平成 25 年度成果報告書

特殊環境用ロボットの標準化、国際連携の推進等に関する調査

平成 26 年 3 月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

（委託先）特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構

目次

まえがき

Ⅰ　研究開発の成果と達成状況
要約（和文）
要約（英文）

＜課題１．我が国の特殊環境用ロボットの戦略的な標準化・安全規格化等の推進（性能指標及び構成モジュールの各種インターフェース等の標準化案の作成）（担当：国際レスキューシステム研究機構）＞

１－１　標準化・安全規格化の戦略的推進のための特殊環境用ロボットの国内外での標準化状況の調査
１－１－１　分野毎の調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１
１－１－２　特殊環境用ロボットの標準化関連施設の調査・・・・・・・・・・・１４

１－２　特殊環境用ロボットの導入普及促進のための標準化・安全規格化戦略の明確化
１－２－１　特殊環境用ロボットとオープンイノベーション・・・・・・・・・１６
１－２－２　特殊環境用ロボットとシステムエンジニアリング（SE)・・・・・２２

１－３　特殊環境用ロボットの開発効率化のための標準化・安全規格化戦略
１－３－１　特殊環境用ロボットの開発事例からみる開発効率化のための戦略・２７
１－３－２　特殊環境用ロボットの開発効率化のための標準化・安全規格化の戦略的推進・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２８

＜課題２．社会実装スキーム（担当：神鋼リサーチ株式会社、特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構）＞

２－１　特殊環境用ロボットに適した社会実装スキームの検討

２－１－１　国内外における特殊環境用ロボットの社会実装の現状（担当：神鋼リサーチ株式会社)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３１
Ａ．特殊環境用ロボットを販売・購入／運営している機関・企業・・・・・・・３２
（１）海外における特殊環境用ロボットを販売・購入・運営している機関・企業等・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４２
（２）国内における特殊環境用ロボットを販売・購入・運営している

機関・企業等・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４５
（３）特殊環境用ロボットの販売・運営の現状と課題・・・・・・・・・・・・４８
（４）参考　DARPA Robotics Challenge・・・・・・・・・・・・・・・・・・４９
Ｂ．特殊環境用ロボットの市場予測／経済効果
（１）特殊慣用ロボットの市場予測の考え方・・・・・・・・・・・・・・・・５１
（２）日本の特殊環境用ロボットの市場予測・・・・・・・・・・・・・・・・５４
（３）米国の特殊環境用ロボットの市場予測・・・・・・・・・・・・・・・・７５
（４）ドイツの特殊環境用ロボットの市場予測・・・・・・・・・・・・・・・８３
（５）中国の特殊環境用ロボットの市場予測・・・・・・・・・・・・・・・・８７
（６）特殊環境用ロボットの市場拡大に伴う経済効果・・・・・・・・・・・・９３
Ｃ．特殊環境用ロボットの開発・産業化事例ならびに政策
（１）特殊環境用ロボットの開発・産業化事例・・・・・・・・・・・・・・・９５
（２）事例における成功・失敗要因と、関連する政策等・・・・・・・・・・１１１

２－１－２　特殊環境用ロボットに適した社会実装スキームの提案（担当：特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構）
Ａ．特殊環境用ロボットによって形成される市場
（１）特殊環境用ロボットのマーケティングにおける特殊性・・・・・・・・１１８
（２）イノベーション市場におけるビジネスモデルのあり方・・・・・・・・１２１
（３）特殊環境用ロボットのビジネスモデルマトリックス・・・・・・・・・１２８
Ｂ．特殊環境用ロボットに適したビジネスモデルの提案
（１）破壊／持続ハイブリッドビジネスモデルの提案・・・・・・・・・・・１２８
（２）ユーザ・イノベーションに基づく特殊環境用ロボットビジネスの提案・１３４
（３）ロボットビジネス雑感・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４９
Ｃ．特殊環境用ロボットのビジネスシミュレーション例
（１）本シミュレーションにおける前提条件・・・・・・・・・・・・・・・１５２
（２）損益計算シミュレーション・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５６

２－２　特殊環境用ロボットの海外展開に関する調査
２－２－１　特殊環境用ロボットを海外へ輸出する際に障害となりうる国内の法令（事実関係）とそれに対する対応策
（１）　外国為替及び外国貿易法（外為法）・・・・・・・・・・・・・・・・１６１
（２）　輸出管理制度改革の必要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１６８

２－２－２　海外の機関が導入する際に障害となりうる海外の法令（事実関係）とそれに対する対応策
（１）　海外の機関が導入する際に障害となりうる海外の法令・・・・・・・・１６９
（２）　統一化の必要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１７３

＜課題３．海外の動向調査及び今後取り組むべき研究開発項目の明確化(担当：特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構)＞

３－１　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１７５

３－２　海外の特殊環境用ロボット技術、市場動向等の調査・・・・・・・・・・・１７５
　３－２－１　　無人飛行ロボットについて・・・・・・・・・・・・・・・・・・１７５
　３－２－２　　水中無人作業機について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８７
　３－２－３　　地上走行ロボット・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１９３
　３－２－４　　欧米の研究プロジェクト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２３２

３－３　今後取り組むべき研究開発項目の明確化・・・・・・・・・・・・・・・・２４２
　３－３－１　　取り組むべき研究開発課題の要点・・・・・・・・・・・・・・・２４２
　３－３－２　　フィールド性能評価試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２５０

評価表１　想定災害とロボットの関連細分（建造物・土木インフラ災害）・・・・・２９１
評価表２　試験項目細分（建造物・土木インフラ災害）・・・・・・・・・・・・・２９２
評価表３　想定災害とロボットの関連細分（水害・土砂崩れ災害）・・・・・・・・２９３
評価表４　試験項目細分（水害・土砂崩れ災害）・・・・・・・・・・・・・・・・２９４
評価表５　想定災害とロボットとの関連細分（テロ・CBRNE 災害）・・・・・・・２９５
評価表６　試験項目細分（テロ・CBRNE 災害）・・・・・・・・・・・・・・・・２９６
評価表７　想定災害とロボットとの関連細分（原子力災害）・・・・・・・・・・・２９７
評価表８　試験項目細分（原子力災害）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２９８
評価表９　想定災害とロボットとの関連細分（プラント災害）・・・・・・・・・・２９９
評価表１０　試験項目細分（プラント災害）・・・・・・・・・・・・・・・・・・３００
評価表１１　想定災害とロボットとの関連細分（水道・下水災害）・・・・・・・・３０１
評価表１２　試験項目細分（水道・下水災害）・・・・・・・・・・・・・・・・・３０２
評価表１３　世界中で活性化している、教育や啓蒙を主目的としない、防災・フィールド
　　関連ロボット競技会・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３０３

Ⅱ　付録
　付録 2-1　Disaster City Expected Participants (2010/2011)
　付録 2-2　課題２　2-1-2　執筆者リスト
　付録 2-3　ビジネスプラン（販売のみ）

まえがき

近年、大規模災害やインフラの老朽化、産業施設等の事故が世界各地で発生しており、災害・事故時だけでなく、平時でも使用でき、迅速な事態収拾を可能とする特殊環境用ロボット（防災・減災、災害対応、インフラメンテナンスロボット等）の配備が急務となっている。

しかし、我が国は『ロボット大国』と言われ、優れた技術がありながら、特殊環境用ロボットは、未だ十分な産業化・市場化に至っていない。特殊環境用ロボットの産業化の促進や産業競争力の強化を図るためには、求められる性能水準、安全性等を、競合する海外製ロボットとも客観的な評価基準のもとで比較可能とした上で、我が国の特殊環境用ロボットの優位性を明らかにし、特殊環境用ロボットの国内外の産業施設、インフラ等への配備の促進に取り組むことが効果的である。

本調査事業では、我が国の特殊環境用ロボットの競争力強化に資することを目的として、次の３点の調査を行った。

１）我が国の特殊環境用ロボットの戦略的な標準化・安全規格化等の推進（性能指標及び構成モジュールの各種インターフェース等の標準化案の作成）

２）社会実装スキーム

３）海外の動向調査及び今後取り組むべき研究開発項目の明確化

この調査によって、海外機関が有する特殊環境用ロボットの情報の明確化、我が国との協力の在り方の検討、標準化すべき性能指標や試験方法、普及が見込める市場の調査と特殊環境用ロボットをつくり育てる社会実装スキーム、高付加価値付与により競争力を強化するために取り組むべき国プロジェクトの具体像等を整理できたと考えている。

今後これらを基にし、重点施策として実施していくことにより、我が国の特殊環境用ロボットの競争力強化が図られ、ロボットの活用が全国及び全世界で進むことによって、災害における安全安心の実現、インフラや産業設備の事故・老朽化対策など、我が国の抱える重要な社会問題だけでなく、世界中における安全安心の問題解決に対して、大きく寄与できることを願っている。

平成２６年３月７日

国際レスキューシステム研究機構

（要約）

本調査では、以下の項目で調査を行った。
１）我が国の特殊環境用ロボットの戦略的な標準化・安全規格化等の推進、２）社会実装スキーム、３）海外の動向調査及び今後取り組むべき研究開発項目の明確化

１）では、特殊環境用ロボットに求められる性能、安全性を運用が想定される関係機関を対象に事実関係を調査し、海外で標準化に取り組んでいる機関や今後の連携が期待できる機関とも十分に協議、連携しながら、当該関係機関がすでに保有する標準等の情報の事実関係の明確化を図った上で、特殊環境用ロボット導入時の客観的選択基準として利用可能な性能指標を、我が国としての産業競争力の強化に資する国際連携のあり方や国際標準化戦略としてまとめた。また、現場の状況に適したシステムを短期間で構築し、最小の訓練時間で現場に投入するために必要となる、構成モジュールの各種インターフェース等について、国内外における既存システムの仕様を調査し、国際連携や標準化のあり方についてまとめた。

２）では、特殊環境用ロボット導入対象の組織や施設が限定されるため必要な生産台数が少ない、導入現場の状況が様々であるため現場に応じたカスタマイズが必要とされる上、災害・事故が発生した場合には速やかに現場の状況に適したシステムを構築・導入できる必要がある、特殊環境用ロボットに使用される技術は日進月歩の途上にあるため継続的にシステムを更新できる仕組みが必要となる、適切な機能向上を行う為には運用側と開発側が密に連携する必要がある、といった条件を伴うことにも留意しつつ、これらの条件の克服や、リスクヘッジなどの観点から特殊環境用ロボットの市場化、産業化に適した事業モデルを調査した。国内外における産業施設、社会インフラのメンテナンス市場、その他の特殊用途に係る市場の定量化と経済的効果、潜在的な市場予測・試算、整備すべき経済社会的制度、省庁や業種間の連携の在り方等も調査した。尚、市場調査に関しては、事実関係としての国内外の市場規模の明確化を、国ごと、用途等ごとに明確化した上で、次に、経済的効果や市場予測・試算等を行った。また、特殊環境用ロボットを海外へ輸出する際に障害となりうる国内の法令とそれに対する対応策、海外の機関が導入する際に障害となりうる海外の法令とそれに対する対応策の調査も行った。

３）では、我が国が海外の軍事技術と比較して劣後する恐れのある無人飛行ロボット、水中無人作業機等について特に注意しながら、海外の特殊環境用ロボットの技術、市場動向等を調査した。以上の調査結果を踏まえて、我が国の特殊環境用ロボットに高付加価値を付与し、海外のロボットとの差異をより一層明確にするために必要な研究開発課題、性能評価を国内で行う上で必要となる運用体制や人材育成を含む評価技術に関する研究開発課題を明らかにし、それらに取り組むための研究開発プロジェクトの企画としてまとめた。それに基づき、協議会形式によるプロジェクト案の具体的な内容と仕様、成果の活用シナリオ等についても調査した。

(ABSTRACT)

This investigation covered: 1) Promotion of safety standards and strategic standardization of SERs in Japan; 2) Implementation strategies within society; 3) Survey of international trends and identification of frontiers for research and development.

1) Related organizations were surveyed on the performance and safety requirements for SERs. Collaborating international standardization organizations were consulted and partnerships with new organizations are expected. Existing standards were clarified and performance metrics, for use as objective selection criteria in introducing SERs, were compiled in terms of international co-operations and standardization strategies to benefit industrial competitiveness. Domestic and international system specifications for the component module interfaces needed to quickly establish appropriate systems that are fieldable with minimal training were researched. International co-operation and standardization options were proposed.

2) Business models to commercialize and industrialize SERs were examined in terms of risk management and these requirements: Robots must be customized for the field; Robot production is insufficient as few organizations use SERs and field circumstances vary; Field-ready systems must be produced and deployed quickly in a disaster or incident; SERs must be updated constantly due to rapid technological progress; Close collaboration between operators and developers is vital for adequate advancement.

This examination covered: Domestic and international industrial facilities; The market for maintenance of social infrastructure; Quantification and economic impact of the market for other special purposes; Potential market forecast and estimation; Implementation of socioeconomic systems; Collaboration between ministries and industries.

The size of domestic and international markets was identified with respect to different countries and purposes. Economic impact and market forecasts were examined. Domestic laws and regulations that can impede exporting SERs and foreign laws and regulations that foreign institutions can encounter in importing robots, and possible solutions, were also investigated.

3) Technology and market trends of foreign SERs was investigated, particularly on unmanned aerial vehicles and autonomous underwater vehicles that might be deficient compared to international military technology. Issues of research and development concerning vital infrastructure for research and performance evaluation, including implementation and human resource development, were identified that provide SERs in Japan with added value compared to foreign competitors. These issues were compiled into a standards research and development project. A meeting was held to examine project details, specifications, accomplishments and applications.

課題１

我が国の特殊環境用ロボットの
戦略的な標準化・安全規格化等の推進

報告

2014年3月

特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構

1－１　標準化・安全規格化の戦略的推進のための特殊環境用ロボットの国内外での標準化状況の調査

１－１－１　分野毎の調査

（１）消防防災分野

①米国 DHS-NIST-ASTM による災害対応ロボットの標準性能試験法

米国では、国土安全保障省（U.S.Department of Homeland Security、DHS）が主導し、国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology、NIST)が中心となり災害対応ロボットの性能を測定する、標準化試験法(Standard Test Method, STM)の開発を進めている。作成された STM は米国材料試験協(American Society for Testing and Materials, ASTM)の Committee E54 on Homeland Security Applications から１２のカテゴリー(以下 NIST/ASTM カテゴリと略記)に分かれて規格として出版されており(以下 NIST/ASTM 規格と略記)、誰でもその情報を入手可能（有償）である。

2013年現在、既に１６規格が発行されている。以下にそのリストを和訳名とともに示す。

カテゴリ名（和訳）
規格番号：英文規格名称（和訳）

1.Terminology（用語）
E2521-07:a Standard Terminology for Urban Search and Rescue Robotic Operations（都市型災害探索救助ロボット運用における標準用語）
E2771-11:Standard Terminology for Homeland Security Applications（国家安全保障への運用のための基本用語）

2.Mobility Terrain Test Methods（モビリティ　地形試験法）
E2826-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Continuous Pitch/Roll Ramps（災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　モビリティ:閉鎖空間におけるピッチ/ロール連続傾斜面）
E2827-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Crossing Pitch/Roll Ramps（災害対応ロボットの性能評価のための標準試験方法　モビリティ:閉鎖空間におけるピッチロール斜面横断）
E2828-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Symmetric Stepfields（災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　モビリティ:閉鎖空間における対称ステップフィールド）
E2829-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot

Capabilities: Mobility: Maneuvering Tasks: Sustained Speed（災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　モビリティ:操作タスク:持続可能な速さ） E2830-11:Standard Test Method for Evaluating the Mobility Capabilities of Emergency Response Robots Using Towing Tasks: Grasped Sleds（災害対応ロボットのモビリティ性能評価のための標準試験法　牽引タスク:掴まれたソリ）

3.Mobility Obstacles Test Methods（モビリティ　障害物試験法）
E2801-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Gaps （災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　モビリティ:閉鎖空間の障害物:ギャップ） E2802-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Hurdles （災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　モビリティ:閉鎖空間におけるハードル） E2803-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Inclined Planes （災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　モビリティ:閉鎖空間における障害物:傾斜面） E2804-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Stairs/Landings （災害対応ロボットの性能評価のための標準試験方法　モビリティ:閉鎖空間における障害物:階段/踊り場）

4.Energy/Power Test Methods（エネルギー／出力試験法）
（該当なし）

5.Radio Communication Test Methods（無線通信試験法）
E2854-12:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Radio Communication: Line-of-Sight Range （災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　無線通信:見通し範囲） E2855-12:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Radio Communication: Non-Line-of-Sight Range （災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　無線通信:非見通し範囲）

6.Manipulation Test Methods （マニピュレーション試験法）
（該当なし）

7.Human-System Interaction Test Methods （ヒューマンシステムインタラクション試験法）
E2853-12 Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Human-System Interaction (HSI): Search Tasks: Random Mazes with Complex Terrain（災害対応ロボットの性能評価のための標準試験法　ヒューマンシステムインタラクション(HSI):ナビゲーションタスク　複雑地形のランダム迷路）

8.Sensor Test Methods　(センサー試験法)
E2566-08 Standard Test Method for Determining Visual Acuity and Field of View of On-Board Video Systems for Teleoperation of Robots for Urban Search and Rescue Applications　(遠隔操作型都市探査救助ロボットに搭載されたビデオシステムの視力と視野角の決定のための標準試験法)

9.Safety and Environment　(安全と環境)
(該当なし)

10.Logistics (物流)
E2592-07 Standard Practice for Evaluating Cache Packaged Weight and Volume of Robots for Urban Search and Rescue　(都市型災害探査救助ロボットの保管用梱包時の重さと体積の評価に関する標準演習)

11.Sumall Unmanned Aerial System (sUAS) Test Methods　(小型無人飛行システム試験法)
(該当なし)

12.Small Unmanned Underwater System (sUUS) Test Methods　(小型無人水中システム試験法)
(該当なし)

ASTM では他の事故・災害対応に関する規格と合わせて以下の CD-ROM の形で安価に上記 STM 規格を提供している。

表題: ASTM Standards for Accident and Disaster Control

価格: $189

媒体：CD-ROM

ISBN: 978-0-8031-8399-5

URL: http://www.astmnewsroom.org/default.aspx?pageid=2971

上記 STM 規格では、実際に試験を行う時に利用するスコアシートのサンプルとその記入例も提供されており、利用者は規格を入手するだけで、すぐに STM に取り組めるように配慮されている。その他にも規格内では、結果のバイアス、不確実性をどのように考慮すべきか等、STM 利用者の便宜を考慮した記述事項が見られる。以下に STM 規格 E2828-11の目次を例として示す。

（タイトル）E2828-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Symmetric Stepfields（災害対応ロボットの性能評価のための標準評価試験　モビリティ:閉鎖空間における対称ステップフィールド）
（目次） 1.適用範囲 2.参考資料 3.用語 4.試験法の要約 5.重要性と用途 6.装置 7.危険源 8.キャリブレーションと標準化 9.手順 10.報告書 11.正確さとバイアス 12.測定の不確実性 13.キーワード

上記 STM 規格は当初、都市探査救助（Urban Search And Rescue, USAR）ロボット用として開発が進められたが、その後、爆発物処理（Explosive Ordinate Disposal, EOD）ロボット用に適用が進められている。また、米国以外でもその導入が検討されている。以下に本調査で明らかになった STM の普及状況を示す。

- The InterAgency Board（米国省庁横断会議　https://iab.gov/）の Standard Equipment List for Equipment Standardization and Interoperability（機器標準化と相互運用性に関する標準機器リスト）のロボットに関する項目(SEL Number: 030E-07-ROBT https://iab.gov/SELDetail.aspx?DocumentId=307)では、STM に関する ASTM 規格を非強制規格として引用している。
- JIEDDO(The Joint Improvised Explosive Device Defeat Organization)(米国即席爆発物処理団体）では STM の導入を進めている(https://www.jieddo.mil/news_story.aspx?ID=1419)。このような STM の利用は米国内の爆発物処理関連団体で広がりを見せている。
- EU の FP7の一環として実施される euRathlon(災害対応ロボット屋外競技会 http://www.eurathlon.eu/)では、STM を利用する予定である。
- 西オーストラリア警察爆発物処理部隊で STM の利用が検討されている。
- ロボットの性能を顧客に説明するツールとして STM を利用するメーカーが現れている。

②「平成 21 年度救助資機材の高度化等検討会報告書～検知型ロボットについて(総務省消防庁)」にみる標準化

総務省消防庁では、地下鉄サリン事件等を受け、検知型ロボットの導入の検討を上記報告書で行っている。ここで言う検知型ロボットとは以下の目的のためのロボットである。

「消防機関が行う救助活動に際し、現場周辺の検索や化学剤等の検知を行い、災害現場の状況を迅速かつ早期に把握するために使用するものである。」（同報告書検知型ロボット仕様書（例）　１．目的より）

この報告書では総務省消防庁消防研究センターが民間企業と共同開発した製品（FRIGO-M　STR）を「比較モデル」として技術詳細の検討を行っている。検討当時の技術を考慮し、この報告書では検知型ロボットの仕様書(例)を提示している。以下にその目次を示す。

（タイトル）検知型ロボット仕様書(例)　（「平成21年度救助資機材の高度化等検討会報告書～検知型ロボットについて(総務省消防庁)」参考資料５より）
（目次） 1 目的 2 購入内容 3 構成 4 本体個別仕様 　(1) 形状・重量 　(2) 性能 　(3) 走行性能 　(4) 検知機能 　(5) 検索機能 5 中継機個別仕様 6 操縦装置 　(1) 基本 　(2) 性能 　(3) 通信性能 7 その他付属品 8 保守体制

この仕様書（例）で例示されている検知型ロボットの仕様の主要なものを、NIST/ASTM カテゴリ毎に以下にまとめる。

NIST/ASTM カテゴリ	仕様書（案）の記述 （仕様書（案）内の項目番号）		関連する NIST/ASTM 規格
	区分	内容	
1.用語			
2.モビリティ地形試験法	形状・重量（4（1））	・ 低所・狭隘箇所走行に配慮した形状 ・ 配線が極力ロボット表面に露出していない ・ 通常の走行、階段昇降時において、床面を傷つけない	
	基本走行（4（3））	・ 通常の走行、階段昇降時において、床面を傷つけない	
	実用速度（4（3））	・ 最高速度4km/h 程度、水平面連続走行速度3km/h 以上 ・ 速度制御(低速・中速・高速)が可能	E2829-11（持続可能な速さ）
3.モビリティ障害物試験法	基本走行（4（3））	・ 転倒防止措置を有する、又は転倒復帰機能を有する ・ 静止状態における左右横転角は、60度以上	
	階段昇降（4（3））	・ 建築基準法施行令に規定される「階段」及び「エスカレーター」の昇降が可能	E2804-11(階段／踊り場)
4.エネルギー／出力試験法	稼働時間（4（3））	・ 通常の使用環境下で連続動作2時間以上	
5.無線通信試験法	中継機個別仕様(5)	・ 中継性能は本体と同程度	
	操縦装置：通信性能(6)	・ 基本操作は無線方式とする。有線方式にも対応可能とする。 ・ 通信距離は見通し距離で100m 以上 ・ 中継機による通信距離の拡大ができる	E2854-12（見通し範囲）
6.マニピュレーション試験法	(該当無し)		
7.ヒューマンシステムイン	起動時間(4(2))	・ 1分程度	

タラクション試験法	操縦装置：性能(6)	・ 専用モニターを有し、操作が容易な配列や構造であること。 ・ 走行モード(低速・中速・高速)の切替え可能	E2853-12（複雑地形のランダム迷路）
	操縦装置：伝送機能(6)	・ ロボットが取得した情報及び本体の状態を鮮明に表示できること。 ・ モニターには各種情報が確実に表示されること。 ・ 伝送機能が十分に動作するよう常時通信スピードを確保するための措置を講じたもの	E2853-12（複雑地形のランダム迷路）
	操縦装置：通信性能(6)	・ 収集した静止画像、検知情報を記録できること	
8.センサー試験法	検知機能（4（4)）	・ 放射線、生物剤、化学剤、燃焼ガスを検知し、事案に応じて専用資機材を本体に搭載できる。 ・ 専用資機材については、消防機関が保有するものを有効に活用できる	
	検索機能：カメラ（4(5)）	・ パンチルト・ズーム機能を有する ・ 原点復帰機能を有する ・ 暗所検索用の照明機能を有する ・ 照明光による画像取得の妨げがない	E2566-08（ビデオシステム視力と視野角）
	検索機能：マイク（4(5)）	・ マイク・スピーカーを有し操縦側と相互交信ができる	
9.安全と環境	形状・重量（4（1)）	・ 防爆性 ・ 静電気対策	
	温度環境(4(2))	・ 連続使用雰囲気温度は、おおむね-10～＋45° C	
	防塵防水性(4（2))	・ IP67	
	耐衝撃性(4(2))	・ 階段から横転転落(高低差1.5m 程度)しても正常に機能	
10.物流	形状・重量（4（1)）	・ 一人で搬送可能な適切な形状と重量(本体は20kg 以下) ・ 構成品はすべてキャリーバッグ等に納まるサイズ	E2592-07(保管用梱包時の重さと体積)

11. 小型無人飛行システム試験法	（該当無し）		
12. 小型無人水中システム試験法	（該当無し）		

（2）プラントメンテナンス分野

①「平成２０年度石油化学コンビナートのメンテナンス作業へのＲＴ適用に関するニーズ調査研究報告書(日本機械工業連合会、日本ロボット工業会)」にみる標準化

１９５５年から１９７３年までの高度成長期時代には、全国で幾多の石油コンビナートが設置され、日本の産業基盤育成や国力増強の基礎となった。その後、四十～五十年が経ち、コンビナートを構成する多くのプラント設備は経年劣化が顕在化してきている。また、近年の少子化や熟練技術者の高齢化・環境資源問題などにより、特にメンテナンス作業を従来どおりに実施することに懸念が生じている。この報告書では、石油化学コンビナートのメンテナンス作業へのロボット技術のニーズ調査を実施している。調査されたニーズを下記に示す。

区分	省力化ニーズ
検査・測定・診断	１．貯槽（含煙突）の板厚計測 ２．貯槽スラッジ測定 ３．マイクロ目視検査ロボット（遠隔） ４．埋設配管の内外面目視検査 ５．海底配管のコーティング目視、減肉検査と補修 ６．断熱機器などの腐食、減肉検査 ７．高所配管フランジ部の気密テスト ８．熱交換器チューブの検査作業 ９．広域設備異常点検、診断 １０．巡回パトロールの高度化 １１．ヘリコプターによる目視検査 １２．有毒ガス検知
作業	１３．窒素雰囲気での固着触媒抜取り作業 １４．バルブ弁座補修 １５．回転機芯だし １６．大型サイズ、フランジ締付けボルト･ナット締緩作業 １７．ハンマー作業 １８．フランジ開放 １９．高圧水洗浄の遠隔化 ２０．熱交換器チューブの高圧水洗浄 ２１．貯槽の内部清掃 ２２．減肉部のオーバレイ溶接 ２３．現場溶接自動化（配管） ２４．高所の肉盛り溶接 ２５．塗装作業 ２６．高所塗装
電気計装	２７．低圧モータの絶縁診断 ２８．計器の校正 ２９．電磁流量計の校正

ボイラ	３０．水管壁の肉厚測定 ３１．水管壁ダスト除去、清掃を遠隔自動施工
全般	３２．高所、狭隘部などの足場組立ロボット ３３．仮設昇降設備 ３４．中重量品（80Kg のイメージ）の取扱
防災	３５．消火作業

また、同報告書では「脱硫装置等における触媒交換作業の自動化」をモデルプロジェクトとして、ロボット化に求められる機能を議論している。このモデルプロジェクトでは詳細なタスクまでは分析していないが、以下をロボットに必要な機能の例としてあげている。

- 防爆構造
- 転倒回避、又は起き上がり
- 触媒破壊を防ぐ柔軟作業機構
- 50cm×80cm 程度の小型化、軽量化
- 遠隔操作
- 当該機器の簡易メンテナンス

これらのニーズ・機能を NIST/ASTM 規格の STM で評価可能か考察すると、以下となる。

- ニーズ・機能でモビリティと遠隔操作に関係する項目（例：機能の「転倒回避、又は起き上がり」）は、現行の STM である程度評価可能と考えられる。
- ニーズ・機能でマニピュレーションが関係する項目は、基礎的な動きは現行／開発中の STM である程度評価可能と考えられるが（例：目視検査に関するカメラアームの動き）、実際のニーズ・機能に対応する評価は、新たな STM の開発が必要であると考えらえる（例：機能の「触媒破壊を防ぐ柔軟作業機構」）。
- ニーズ・機能でセンサが関係する項目は、基礎的な動きは現行／開発中の STM である程度評価可能と考えられるが（例：目視検査に関するカメラの性能）、実際のニーズ・機能に対応する評価は、新たな STM の開発が必要であると考えらえる（例：ニーズの「６．断熱機器などの腐食、減肉検査」）。

（3）道路・生活インフラ分野

道路・生活インフラ分野の例として、ここでは下水管調査を取り上げる。人が入れない狭い口径の下水管の調査は、ロボット等の機器を用いるしかなく、国内でも一定の市場が存在している。下水管の調査ロボットは既に実用化されており、国内でも複数の会社より製品化されている。下の表にその例を示す（表中の値は代表地であり、オプション、設定などで変化する)。

会社名	品名／型番	大きさ（mm)	重さ(kg)
東芝テリー	VCF561XVM-01	LxWxH=635x180x135	約 20
キューアイ	TKC-7800	全長 550	
カンツール	SVR250	LxWxH=488x181x167	25
日本タップ	ロボカムⅡ-6	LxWxH=692x182x134	約 20
石川鉄工所	ハイパーもぐりんこ	LxWxH=450x175x140	8

これらのロボットは、いずれも検査用のカメラとライトを装備し、４～８輪程度の車輪型移動機構を備えた有線操縦ロボットである。有線の長さは、長い物だと１０００ｍになる。ロボットによっては、タイヤなどの部品の交換により、異なる径の下水管に対応できる拡張性を有している。

これらのロボットは、その目的がカメラ画像を主とした下水管調査という同一のものであるため、大きさ、重さと、機構にも大きな差が見られないが、複数社で同じ部品を利用する等の標準化活動は見られない。また制御装置も各社独自のものを利用しており、標準化活動は見られない。

標準化がすすめば、量産化による価格の低下や品質管理の向上といったメリットが期待されるが、標準化活動には一定のコストがかかる。ここでの事例は、複数のロボットメーカーを横断した標準化活動を、メーカーだけで実施することの困難さをしめすと考えられる。

（４）軍事分野

防衛省では９部門４７２の防衛省規格を公表しており、関連ホームページ（http://www.mod.go.jp/trdi/data/nds.html）から閲覧可能である。同ホームページによると「防衛省規格とは、国定規格(日本工業規格)が定められていない場合において、装備品等の標準化のため必要があるときに防衛大臣が制定する技術的な標準をいい、日本工業規格の規定に準じ、装備品等がその目的をはたすために備えなければならない要求事項、試験方法について定めている。」としている。防衛省規格の内訳は下記である。

部門	規格数
電気	58
自動車	31
船舶	128
鉄鋼	17
非鉄金属	10
化学	97
繊維	3
武器	101
一般及び雑	27
合計	472

この防衛省規格において直接特殊環境ロボットに対応する規格はないが、厳しい環境・運用で高い信頼性が要求される装備に関する防衛省規格は、その耐久性に関する試験法（例：「輸送振動試験方法（Y7504)」における輸送時の振動の規格化）や特殊環境の規格化（例：「装軌車の斜面横行性能試験方法（D1023B)」における横行用斜面の角度の規格化）は特殊環境ロボットの標準化でも参考にできると考えられる。

（５）その他

- 特殊環境ロボットの利用分野として警察分野が想定される。警察分野で利用する特殊環境ロボットは、犯罪対応用であり高い秘匿性が求められれるため、公表可能な具体的仕様は入手できなかった。同分野の海外での関連情報は、ロボットのコンテストとして部分的に公開されており、本報告書の以下の節でその情報を示している。

  ３－２　海外の特殊環境用ロボット技術、市場動向等の調査

  ３－２－３　地上走行ロボット

  ３－２－３－３　地上走行ロボットのコンテスト

  （３－２）これまでに開かれたC-ELROBの概要と結果

  ３）C-ELROB 2011

- 特殊環境ロボットのうち無人飛行ロボットと水中無人作業機は、その行う作業を人間が代替することが困難であり、市場性が期待される。本報告書では、その市

場性を個別に検討するのでなく、以下の節で他の特殊環境ロボットと合わせた形で検討している。これらのロボットの個々の市場性と標準化活動は、今後の検討課題と考えられる。

- 分野毎だけでなく、国や地域ごとの特殊環境ロボットの標準化・市場化を検討することも、特殊環境ロボットの開発を戦略的に実施するためには必要である。次章「課題２．社会実装スキーム」では、日本、米国、ドイツ、中国を取り上げその市場性の検討を行う。なお、韓国も重要な市場と考えられ、その検討も今後の課題と考えられる。

１－１－２　特殊環境用ロボットの標準化関連施設の調査

（１）米国ニューイングランドロボット検証実験センター

米国ニューイングランドロボット検証実験センター(NERVE, http://nerve.uml.edu/)では以下のNIST/ASTM規格のSTM施設を有している（一部規格発行前のSTMを含む）。

1. Mobility: Confined Area Terrains: Continuous Ramps
2. Mobility: Confined Area Terrains: Symmetric Stepfields
3. Mobility: Confined Area Terrains: Gravel
4. Mobility: Confined Area Terrains: Indoor Floor Types
5. Mobility: Confined Area Terrains, with or without Payload: Crossing Ramps
6. Mobility: Confined Area Terrains: Sand
7. Mobility: Confined Area Obstacles: Dry/Wet Wood Stair Treads, Dry/Wet Steel Stair Treads
8. Mobility: Confined Area Obstacles, with or without Culvert: Hurdles
9. Mobility: Confined Area Obstacles: Gaps
10. Mobility: Vertical, Horizontal, Diagonal, Circle Following, Station Keeping
11. Mobility: Vertical Insertion & Retrieval Stack with Drops: Ant Farm
12. Manipulation: Mobility with Payload, Target Inspection
13. Manipulation: Dexterous Inspection and Insertion & Retrieval:Cylindrical Apparatuses
14. Manipulation: Payload at Reach/Lifting, Radial Inspection and Insertion & Retrieval, Dexterous Inspection and Insertion & Retrieval: Polar Grid
15. Manipulation: Open Access: Manipulation Open Access
16. Manipulation: Planar Wall Inspection and Insertion & Retrieval: Vertical
17. Human-Robot Interaction: Navigation with Wall Follow, Search
18. Human-Robot Interaction: Pan-Tilt-Zoom Tasks
19. Human-Robot Interaction: Maneuvering Speed: Line Following, with or without Towing: Line Following and Towing
20. Towing Pull Force: Pure Towing
21. Human-Robot Interaction: Underbody Inspection
22. Autonomy: Mapping and Navigation

23. Sensing: Acuity, Resolution, Field of View
24. Energy/Power: Endurance

また、以下の独自の STM 施設も有している。

1. Durability/Mobility: Water Fording: Fording Basin
2. Durability/Mobility: Rain, Wet Inclines: Rain Test Area
3. Manipulation: Door Opening: Doors
4. Mobility: Wet Inclines: Wet Ramp
5. Mobility: Confined Area Terrains: Outdoor Ground Types
6. Durability/Mobility: Water Splashing: Splash Pools
7. Autonomy: Mapping and Navigation: Corridor
8. Rock Climbing Wall

この他にも、複数の STM を組合わせたシナリオベースの Test Method も提供している。

１－２　特殊環境用ロボットの導入普及促進のための標準化・安全規格化戦略の明確化

人間が作業することが困難・不可能な作業を実施する特殊環境ロボットは、従来作業の単純な置き換えだけでなく、ロボットならではの新しい付加価値を社会に提供し、社会を変革する可能性を内在している。ここでは、特殊環境ロボットの研究開発を我が国におけるイノベーションの機会として考え、特殊環境ロボットの研究開発を加速する方法を、イノベーション、特にオープンイノベーションの観点から考察する。また、特殊環境用ロボットをトラブル無く持続的に開発・利用するためにはシステムとしての持続的発展性が重要である。ここでは、システムズエンジニアリングの観点から考察を行う。

１−２−１　特殊環境用ロボットとオープンイノベーション

（１）イノベーションと標準化・安全規格化

イノベーションは、社会が持続的に発展する活力の源とされ、我が国でもその推進が行われている[1]。イノベーションという単語は技術革新と我が国では翻訳される事がおおいが、イノベーションは技術的側面だけでなく、新しいアイデアから社会的意義のある新たな価値を創造し、社会的に大きな変化をもたらす自発的な人・組織・社会の幅広い変革を意味する。イノベーションの提唱者のシュンペーター―は、イノベーションを「創造的破壊」と表現し、次の５つの形を提案している。

Ｉ１．技術イノベーション
Ｉ２．プロセスイノベーション
Ｉ３．新市場
Ｉ４．新素材
Ｉ５．新ビジネスモデル

イノベーションとは、リスクをとって高い目標にチャレンジすることから生まれてくるものであり、リスクを評価しコントロールしながら自立的に持続可能な事業化をはかる担い手が必要である。しかし我が国においては、その技術力と比較して社会的課題の解決力が弱いとされており、テーマ構想力とイノベーションサイクルの推進力を持った「担い手」が必要である。例えば米国では、DARPA や NASA が高い構想力とプロジェクトマネジメント力を持ってイノベーションを推進しているといわれる。これらの団体は、産業界やアカデミアの科学技術力を引き出し、制度改革を促し、先導的な需要(調達)までも創出している。イノベーションによる産業化には、不確実性(リスク)をコントロールする能力が必要である。イノベーションのリスクコントロールでは、次の意味で標準化が大きな役割を果たす

・　標準化は過去の教訓の集大成であり、同じ誤りを繰り返さないためのツールであ

る。

- 標準化活動を通して暗黙知は形式知化されることになり、標準化により属人的知識が持続的に社会で継承される。
- 標準化された性能試験法を用いる事により、技術の可視化が行われることになり、ステークホルダー間での判断の合理性が向上する。

また、他の分野の知見から自明なリスクに対しては、イノベーションが期待される分野に先行して安全規格化を実施する事で、イノベーションのリスクコントロールを社会全体として支援する事が可能となる。このようなイノベーションに対する安全規格化の先行事例は、サービスロボット分野に見る事が出来る(サービスロボットは現在普及していないが、近い将来の産業として期待されている。このためサービスロボットに関する安全規格 ISO 13482が2014年2月に発行されている)。

（2）イノベーションの機会としての特殊環境ロボット開発

経営学の大家のドラッカーはイノベーションの機会として、次の７つをあげている[2]。

０１．予期せぬ成功と失敗を利用する
０２．ギャップを探す
０３．ニーズを見つける
０４．産業構造の変化を知る
０５．人口構造の変化に着目する
０６．認識の変化をとらえる
０７．新しい知識を活用する

特殊環境ロボット開発の潜在的ニーズは我が国において大きく、また関連する基礎的な技術シーズも我が国に蓄積されていると考えられるものの、特殊環境ロボットの研究開発は我が国では活発ではない。このギャップをイノベーションの機会として前向きに捉える事が、今後の特殊環境ロボット開発の加速には必要と考える。

福島原発事故関連で用いられているロボットを例にとると、上記の７つの機会に対応した次のイノベーションの機会の例が見てとれる：

０１．予期せぬ成功と失敗を利用する：我が国のロボットは原発事故初期では利用できなかったが、その後、開発が急速に進められ現場に投入されている。

０２．ギャップを探す:我が国では関連する基礎的な技術シーズが蓄積されていると考えられるが、原発事故現場に利用できる実用的なロボットは事故発生当時には無かった.

０３．ニーズを見つける：原発事故ではロボットでないと対応できないタスクが存在する。

０４．産業構造の変化を知る：原発廃炉が早まる可能性が高まり、廃炉ビジネスや代替エネルギー開発が社会的に重要性を増している。
０５．人口構造の変化に着目する：高齢化により事故対応能力が低下している。
０６．認識の変化をとられる：国民が絶対安全は存在しないと理解し、リスク対応の技術開発に社会的に取り組む事の重要性を認識した。
０７．新しい知識を活用する：原発事故対応技術開発に社会的リソースが投入され、新技術開発が促進されている。

このような災害対応分野での国家的な重要課題には単純な費用対効果に基づく投資判断には壁があり、民間企業のみではチャレンジが不可能なイノベーション領域が存在する。このような領域では、国家的なインセンティブを示した上で、民間の力を含め事業化をはかる必要がある。

（３）特殊環境ロボットとオープンイノベーション

「オープンイノベーション」は、米国カリフォルニア大学バークレー校の Henry W。Chesbrough 氏によって提唱された、イノベーション実現のための新たなコンセプトである[3]。イノベーションは、「技術開発」にとどまらず、開発の過程で創造される知的財産の蓄積・管理や資金調達も含め、マーケットでの販売という「事業化」までの全体に関わるものであることが、前述の I1～I5から理解できる。すなわち、オープンイノベーションとは、技術開発における共同研究やライセンス、販売・マーケティングにおける提携、合併や買収(M&A)も含めて社外の経営資源を社内の経営資源と同様に活用することである。

オープンイノベーションは、グローバル化と多極化の進展に伴い、産業発展のあり方そのものを問い直すパラダイムシフトを起こし、我が国でもその導入が検討されている。経済産業省では、平成21年８月の産構審小委員会で議論されている「イノベーション力を強化する産業技術政策の在り方(中間報告)～出口を見据えた競争と協調～」[1]では、オープンイノベーションに関して次のように述べている：

研究開発の競争モデルが大 きく変化する中で、欧米を中心に必要性が叫ばれているのが「オープン・イノベーション」型の研究開発システムである。次世代新製品・新市場の開拓の主導権を巡って競争と協調を繰り返す研究開発が背景となっていることから、この「オープン・ イノベーション」型の研究開発は従来の企業間の技術提携や産学官連携に多く見られた、従来技術 や非コア技術の外部による補填や研究開発コストの削減のためではなく、将来の新製品・新市場のコアを握るキーテクノロジーの創成を巡る外部との協業である。

したがって、この「オープン・イノベーション」型の研究開発システムとは、実

現すべき新たな 価値観に基づく社会システムのコンセプトを明確に提案することを出発点とした上で、そのコンセプトの実現に向けて、

① 専門化・高度化した要素技術のいかなる組合わせで新たな製品サービスを創出するのか、

② また、その組合わせの中でいかに主導権を握る要素技術を確保するのか、といった厳しい「競争」が行われることとなる。この結果、「競争」を効率よく推進するための

③ 共通基盤技術の確立や標準化、

④ 要素技術の柔軟な組合わせを可能とするためのインターフェース の共通化等の「協調」もこれまで以上に重要となっている。

したがって、現在、世界の最先端の研究開発モデルは、競争モデルの変化に伴い、1つの企業・ 組織内に閉じた研究開発システムから、外部との戦略的な協業を前提とし、多様な要素技術を組合わせの中で、「競争」と「協調」を織り成す重層的なモデルに変化している

オープンイノベーションには、次の三つの類型があると言われる。

1)アウトサイドイン型

供給者、顧客、知識の外部調達などを通じて、企業の自社の知識基盤を拡張していくこと。

2)インサイドアウト型

知的財産の販売、アイデアの外部環境への移転、技術の増殖を通じて、アイデアを市場に投入して利益を獲得すること。

3)連結型

その間のギブ&テイクが成功の鍵となる提携、協力、ジョイントベンチャー等により、補完的パートナーとの間で価値共創を行うこと。(上の二つを結合し、補完的な知識と連携させながら機能させる)

この三つの類型から考えると、特殊環境ロボットの開発でオープンイノベーションの利点は下記と考えられる。

1)アウトサイドイン型

特殊環境ロボットの実用化では複数分野の技術が一定レベルで必要であり、1団体だけの対応では必要な全ての技術開発を実施する事が困難であり、ロボットの実用化が遅くなる。オープンイノベーションにより技術のインテグレーションが早期に実施可能となり、特殊環境ロボットの実用化が加速されると考えられる。

2)インサイドアウト型

特殊環境ロボットに関係する知的財産が販売可能である事が示されれば、特殊環境ロボットの要素技術開発への取り組みが促進される。

3）連結型

福島事故対応ロボット開発等の大規模な国プロの場合、オープンイノベーションでは多くの技術・知材が開発・利用される。この場合、アウトサイドイン型による外部技術導入による開発加速と、インサイドアウト型による国プロ開発技術の他分野への水平展開の加速が期待される。

オープンイノベーションを実施するにあたり、どの技術をどのように使うか、各技術マッピングが重要となる。STM により各技術の特性を見える化する事はこの技術マッピングを精緻化する事に繋がる。すなわち、STM の導入はオープンイノベーションを加速することに繋がると考えられる。また、安全規格を整備しておく事は、他分野の技術を導入した場合の思いもかけない事故を防ぐことにつながり、安全規格化はオープンイノベーションを安心して実施できることに繋がると考えられる。

（4）航空宇宙分野に見るオープンイノベーションの利用事例

我が国の宇宙開発分野で、JAXA を中心としたオープンイノベーションの実践が進んでいる。日本の宇宙開発利用は、研究開発を通じて技術力を高めつつ、国民生活の質の向上、安心安全な社会の実現、地球環境問題への貢献、国際協力の促進など、様々な分野で宇宙開発の成果を最大限に利用・発揮することを目指している。JAXA ではこの目標の実現のため、「JAXA 産業連携センター」を設置し、2つの方針を掲げ取り組んでいる[4]。

1. 日本の宇宙産業の基盤を強化し、国際競争力を高めます

気象観測、通信放送、宇宙探査、国際宇宙ステーションといった日本の宇宙活動はロケットや人工衛星を製造している宇宙機器産業なしには実施出来ません。宇宙活動を支える宇宙機器産業の健全な発展のため、国際競争力を獲得することは大きな目標になっています。

産業連携センターでは、宇宙機器産業との宇宙機器の共同開発や共通の研究開発目標の設定等、国際競争力の向上に資する様々なプログラムの検討・実施を進めています。

2. 宇宙を活用して新しいビジネスチャンスを拡大します

産業連携センターは、宇宙産業以外の産業活動との連携による、民生技術の宇宙転用(spin-in）や宇宙技術の民生転用（spin-off）をすすめ、宇宙の多様な利用方法の開拓を通じて幅広い産業における新しい宇宙ビジネスの創出に取り組んでいます。広く皆様に宇宙ビジネスに取り組んでいただくことを目指し、JAXA オープンラボ公募や成果活用促進制度等の産業連携メニューを準備しています。

これまでにも、衣食住等の分野で成果を上げており、創造性あふれる製品やサービス等の様々なアプリケーションの提供を目指しています。

JAXA オープンラボ制度には、JAXA の課題を解決するアウトサイドイン型オープンイノベーションの「技術提案」と JAXA の技術を外部に展開するインサイドアウト型オープンイノベーションの「ビジネス提案」の2つの提案タイプを設けている。それぞれの実施事例は下記のとおりである

「技術提案型」

- ワイヤレスハーネス技術の宇宙機適用に関する研究開発（株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR)）（平成 25 年度実施中）
- CO２選択透過膜の宇宙における居住空間からの CO２分離・回収への応用（株式会社ルネッサンス・エナジー・リサーチ）（平成 25 年度実施中）
- ナノバブル技術による飲料水保存(真菌に係わる効果）【萌芽研究】（株式会社ナノサイエンス）（平成 24 年度）
- 宇宙用高精度 MEMS ジャイロの開発（住友精密工業株式会社）（平成 24～25 年度実施中）
- 高加熱に耐える３次元炭素繊布耐熱材の開発（北陸ファイバーグラス株式会社）（平成 24～25 年度実施中）

「ビジネス提案」

- 高分解能で耐放射線性のあるレゾルバ／デジタル（ＲＤ）コンバータ（多摩川精機株式会社）（平成 25 年度実施中）
- 需給状況に応じた電力制御システムの事業化【萌芽研究】（株式会社エネゲート）（平成 25 年度実施中）
- 超高精度熱膨張測定の事業化（アルバック理工株式会社）（平成 25 年度実施中）
- 宇宙用冷却下着の民生化に向けた検討及び改良の実施（公益財団法人日本ユニフォームセンター）（平成 24 年度）
- 「水」から考えるエコフレンドリーな洗剤用酵素の開発（東京大学）（平成 24 年度）

JAXA オープンラボ制度を利用する事で、JAXA のブランド力を参加企業は利用する事ができる。このことはブランド力の弱い中小企業にとってビジネス上のメリットがあると考えられる。

１−２−２　特殊環境ロボットとシステムズエンジニアリング（SE）

航空宇宙分野では、限られたサンプルからリスクの高いプロジェクトを持続的に推進しなければいけない。この困難な業務を実施するために、システムズエンジニアリングの考え方が整備されてきた。特殊環境ロボットの開発でも、同様な困難に直面すると考えられる。以下では JAXA のシステムズエンジニアリングの基本的な考え方から、特殊環境ロボットの持続的開発推進に資するシステムズエンジニアリングの考え方をまとめる。

（１）JAXA のシステムズエンジニアリングの基本的な考え方[5]

システムとは、ある目的を達成するために組織化された機能要素の集合であり、組織化により単なる要素和以上の特性を発揮するものと定義される。システムズエンジニアリングは、このようなシステムの目的(ミッション要求)を実現するための工学的方法論(及び、その一連の活動)である。

システム開発においての重要事項は、顧客・ユーザ・ステークホルダの識別が第一であり、次に顧客・ユーザの要求を明確にすることである。このプロセスは超上流工程の一番の肝である、ユーザと顧客は、立場が異なるために一致しない場合が多く、ステークホルダーの中には、利益を得る人と損害を被る人の両方いることに留意すべきである。マイナスのステークホルダーを識別して、その対応方針は兎角無視されがちであるが、必ず考えなくてはならない。そのためのステークホルダーの識別と連関関係を明確に可視化する必要がある。その次に、要求(要件)定義、成果物の作成手順、QCD すなわち品質、コスト、スケジュールのバランスをとることである。

システム開発の過程は幾つかのステップを踏む。第一に、ミッション要求を明確に定義することが必要である。そして、そのミッション要求と制約条件から定められたシステムの機能を段階的に分割し、分割された機能要素間の関係を詳細に検討する。また、分割された要素を統合して適切なシステムを作り上げていくとき、それぞれの設計が要求された機能を満足していることをチェックし、最終的には、システムの中に組み込まれた運用状態の試験で検証することが求められる。この一連の活動を示したのが V カーブである。全体を分割と統合に大別し、V 字型に折り曲げることで、同じ階層におけるアウトプット(成果物)間の検証や上位要求に対する妥当性確認を行うといった関係を表している。

システム開発の中では、システムレベル、サブシステムレベル、コンポーネントレベルで同じようなプロセスが繰り返される。個々の開発プロセスは普遍性があり、個々に分類することがシステムズエンジニアリングの方法論である。この分類により個々の SE プロセスをきちんと意識して実践することが容易になるが、それぞれは独立でない。それらを有機的に結合させること、すなわち、全体を見渡すというシステム思考のもとでプロセスを実践することが重要である。

更に重要なことは、V カーブの全体を常に見通して一貫した開発計画を立てること、そしてそこに内在するリスクを識別し、できる限りの低減策を講じることである。実際のシステム開発においては、定められた制約条件の中で品質・コスト・スケジュール(QCD：Quality、 Cost、 Delivery)をバランスよく満たすことが求められる。開発の初期段階から、V カーブの最終的なアウトプットと全ライフサイクルを見通しつつ、QCD のバランスとマージンを考えることが大切である。

ミッション要求を満たすシステムを実現するためには、技術的な見通しやそれぞれの技術活動を統合的に管理・制御することが不可欠である。このため、体制を含む技術に関するマネジメント計画をあらかじめ立案し、プロジェクトマネジャ、システムズエンジニア、専門技術者などが共通の認識に立って、技術活動を遂行することが重要である。

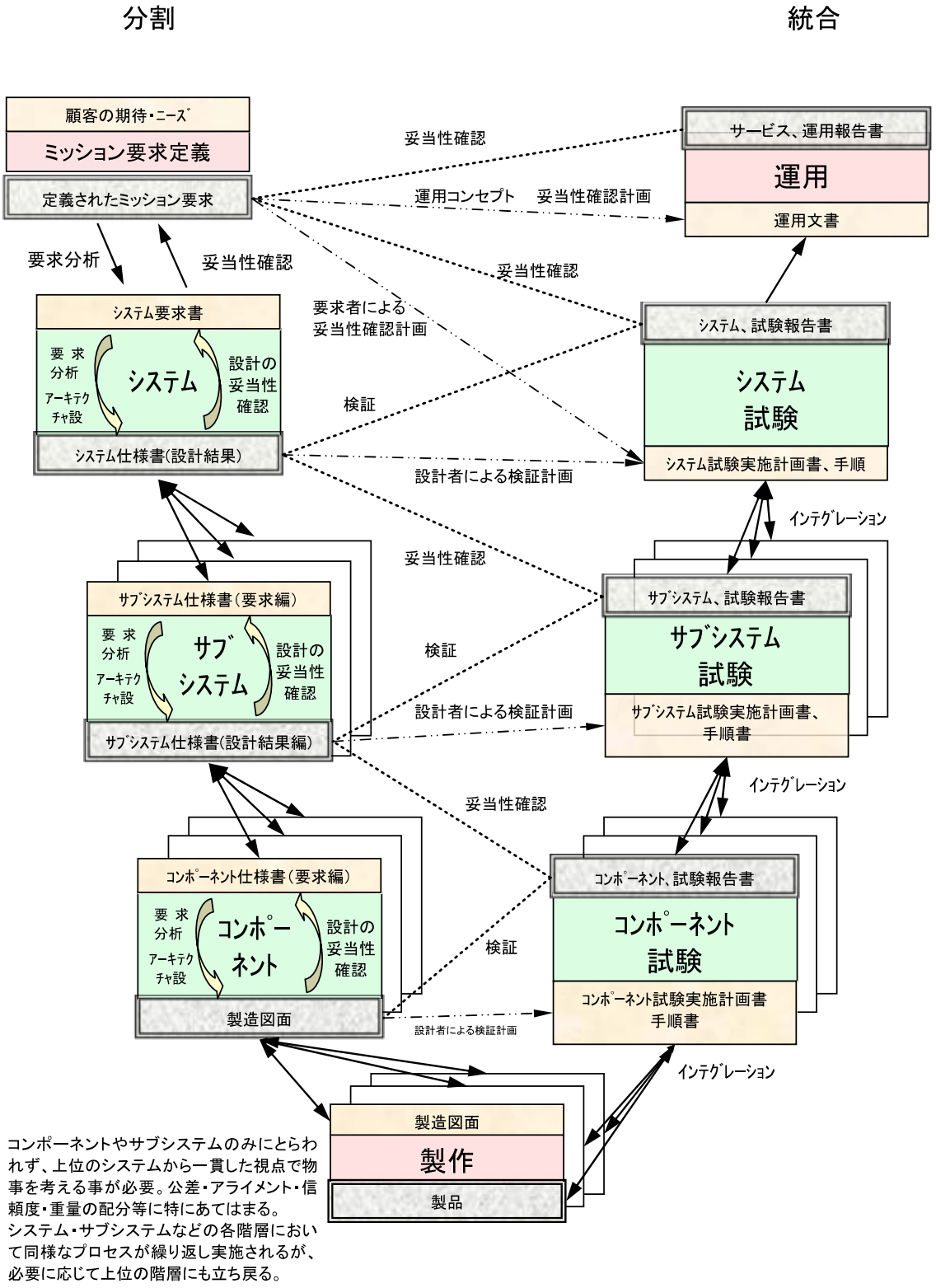


図１－１　システム開発のＶチャート（文献[5]より抜粋）

（２）特殊環境ロボットとシステムズエンジニアリング(SE)

このSEに基づく合理的な思考はDARPA,NASA等の米国の大規模研究機関のプロジェクト推進の基盤になっている。たとえば米国のシステム安全に関する軍事規格 MIL-STD-882E ではSEを下記と定義している。

The overarching process that a program team applies to transition from a stated capability to an operationally effective and suitable system. Systems Engineering involves the application of SE processes across the acquisition life-cycle (adapted to every phase) and is intended to be the integrating mechanism for balanced solutions addressing capability needs, design considerations, and constraints. SE also addresses limitations imposed by technology, budget, and schedule. SE processes are applied early in material solution analysis and continuously throughout the total life-cycle.（プログラムチームが利用する、記述された能力をから運用上効果的で適したシステムを開発する包括的なプロセス。SE は開発ライフサイクル（全てのフェーズに適用）への SE プロセスの適用を含み、必要とする能力、設計で考慮すべき事項と制約条件をバランスさせる解のための統合された機構であることを目的としている。SE はまた技術、予算そしてスケジュールからくる限界を示す。SE は初期の必要とする材料の解析から連続的に全ライフサイクルで利用される）

この定義から SE が、技術開発の全ライフサイクルに現れる多くの要因を合理的に考慮するための重要なツールであることが理解できる。不確実な要因を多く含む特殊環境ロボットの開発促進のためには、SE の効果的な利用が必要と考えられる。特殊環境ロボットの開発で SE を導入することで、具体的には次のメリットが期待できる。

- SEを用いることで特殊環境ロボットの安全性・信頼性を合理的に説明でき、技術性の優位性もわかりやすくアピールできるため、市場での営業力、交渉力の強化につながる。
- SEを導入することで、ロボット開発の初期段階からクライアントとの入念なやりとりが必要になり、双方の議論の場を提供する「コミュニケーションツール」としてSEは機能する。
- SEは経済性と安全性・信頼性の両立にも寄与する。安全対策というものは普通、すればするほど安全性は上がるが経済的な負担も増える。SEを利用することで、設計の早い段階で「どこまでの範囲・条件で安全が求められるのか」が定義されるため、安全のための検討範囲を無駄に広げる必要がなく、設計・製造段階でのコスト増を抑えられる。
- 新幹線、インフラ設備と同様に、災害対応ロボットを含めたシステムとして海外展開する際にも、SEは有効となる。SEにより安全性・信頼性に関与する要

素が明確化されるため、地域ごとのローカライズのために最小限の設計変更で済み、その部分だけの検証・認証をすることで、コスト抑制にもつながる。

- SE の実践においてドキュメント化は重要な要素である。ドキュメント化を通じて、ものづくりへのアプローチや業務プロセスはもちろん、人材育成や組織のあり方も形式知化され、必要に応じた変化が明確になる。すなわち、技術開発の持続的発展に必要な全社的対応と意識改革が SE を通じて実現される。

また、SE における標準化・安全規格化の役割は以下と考えられる：SE の実施では各フェーズでの仕様策定と、その仕様に対する妥当性確認が重要になる。仕様策定と妥当性確認ではある技術にたいする要求事項をどのように表現するかが課題となる。STM を利用する事で、これらの仕様策定と妥当性確認の表現が容易になる。また、同じ STM を各フェーズで使用する事で、各フェーズ間での思い違いといったミスを減らす効果も期待される。よって STM の導入は SE 推進でも有効と考えられる。また、安全規格を整備しておく事は、SE での安全上の制約条件を明確化することであり、SE 推進の効率化に繋がると考えられる。

現在の我が国の科学技術政策立案では、エビデンスベースのアプローチが重要とされている[6]。STM と SE により研究開発の各フェーズでの見える化・文章化を進める事はこのエビデンスベースのアプローチにも役立つと考えられる。

参考文献

[1]経産省 産業構造審議会 産業技術分科会 基本問題小委員会、イノベーション力を強化する産業技術政策の在り方（中間報告）～出口を見据えた競争と協調～、平成21年８月

[2]P.F.ドラッカー(上田敦生訳)、イノベーションと起業家精神、ダイヤモンド社、2007

[3]H.Chesrough(大前恵一郎訳), Open Innovation, 産業能率大学出版、2004

[4]JAXA 産業連携センター　http://aerospacebiz.jaxa.jp/jp/

[5] 宇宙航空研究開発機構チーフエンジニアオフィス, システムズエンジニアリングの基本的な考え方　初版　, JAXA, 2007, https://ssl.tksc.jaxa.jp/isasse01/kanren/BDB/BDB06007BSEkihon.pdf

[6]科学技術振興機構研究開発戦略センター、調査報告書「科学技術・イノベーション政策の科学」－エビデンスベースの科学技術・イノベーション政策を目指して―、２００９

１－３　特殊環境用ロボットの開発効率化のための標準化・安全規格化戦略

１－３－１　特殊環境用ロボットの開発事例からみる開発効率化のための戦略

ここでは Brokk 社の例を通じて、特殊環境用ロボットの開発効率化のための戦略を考察する。Brokk 社は１９７６年にスウェーデンに設立された解体作業機械会社から発展してきた。Brokk 社の作業用ロボット Brokk は有線・無線で遠隔操縦が可能であり、小型高出力、高温・高放射線環境といった厳しい環境で高い信頼性を有するという特徴がある。Brokk のロボットの主な仕様を下記に示す。

		単位	Brokk 50	Brokk 180	Brokk 400
寸法（輸送時）	高さ（最低）	mm	940	1342	1722
	幅	mm	590	800	1500
重量	本体	kg	475	1930	4800
	アタッチメント最大	kg	70	270	600
モーター出力		kw	5.5	18.5	30

我が国でも、その耐放射線能力から福島原発事故対応で Brokk が用いられているが、Brokk の利用分野は原子力分野だけでなく、建設、トンネル、鉱山、鉄鋼、セメントと幅広い分野で利用されている。特に最小型の Brokk 50はその大きさ、重量からビル屋内の階段・エレベータを移動可能であり、ビルの内装の大規模改修（リノベーション）でも利用されている。

Brokk はアタッチメントを容易に交換することで様々な作業を実施する事ができる。Brokk で利用可能なアタッチメントの例を以下に示す。

- ブレーカ
- 横向きデバイス
- コンクリートクラッシャ
- せん断カッタ
- バケット
- クラムシェルバケット
- 多目的グラブ
- ペタルグラブ
- つかみツール
- スキャブラ
- プレーナ
- ドリル装置
- トンネル･鉱山用装置
- ディスクカッタ

Brokk 社は一定の契約下でアタッチメント接続に関する情報をユーザーに開示し、ユーザーが独自にアタッチメントを開発し利用する事を認めている。このことにより、ユーザーと Brokk 社には下記の利点が生じていると考えられる。

- ユーザーは各自のタスクに最も適したアタッチメントを利用する事が可能になり、作業性が向上する。
- 新たなアタッチメントによる新たなロボットの使い方をユーザーが実証してくれることになり、Brokk 社にとってロボットの新たな利用分野の開拓につながる。

このユーザーによるアタッチメント開発は、ユーザー、Brokk 社双方でのオープンイノベーションとみる事ができる。

Brokk のような特殊環境で高い信頼性を有するロボット本体の開発は、多くの現場での知見の蓄積が必要であり、我が国において同様のロボット開発を行うことは中長期的課題と考えられる。一方、アタッチメントの開発はロボット本体の開発より短期間で取り組むことが可能であり、我が国でも短期間で市場性のあるアタッチメント開発は可能と考えられる。STM の利用により新規開発のアタッチメントの有効性を明示的に示せれば、新アタッチメントの市場導入も円滑になると考えられる。現在の、Brokk が実施するような高出力作業の STM は整備されておらず、その整備は今後の課題と考えられる。

１－３－２　特殊環境ロボットの開発効率化のための標準化・安全規格化の戦略的推進

標準化・安全規格化により特殊環境ロボットのオープンイノベーションとシステムズエンジニアリングが推進され、特殊環境ロボットの開発効率化が期待されることは１－２節で述べた。しかし、一般に標準化活動は短期的な利益につながる活動ではないため、メーカー等の個別の団体の自主性に任せていても、すぐには推進されない（例：バックホーンの操作は各メーカーが独自形式でしばらく運用されており、その後 JIS 方式に標準化された）。

特殊環境ロボットの標準化では、各種計測機器等の機械的、電気的インタフェース、ヒューマンインタフェース、操作卓とロボット間の通信インタフェース等が考えられる。本調査の結果、一部の軍用バッテリー等の直接的な利用が可能な標準品を除けば、特殊環境ロボットの具体的な標準化は現時点ではバックデータが少なく困難と考える。標準化のための適切なバックデータを整備するためには、いわゆる標準化の三者構成（メーカー、ユーザー、第三者（標準化の専門家等））での活動推進が重要である。しかし、我が国ではこの三者構成で特殊環境ロボットの研究開発の実施事例は限定的

であるため、取り組みやすい課題を特殊環境ロボットの標準化活動で設定する事が必要である。

取り組みやすい課題を特殊環境ロボットの標準化活動の事例として、ロボット競技会に対する STM の開発が挙げられる。ロボット競技会と STM の連携は、Robocup Rescue と NIST/ASTM 規格の間にみられる。また、DARPA Robotics Challenge も同様な連携が見られる。直接的な製品開発でなく、ロボット競技会を標準化活動の対象とすることで、標準化活動に経験の少ない団体でも、気軽に標準化活動に参加できると考えられる。

標準化・安全規格化の観点から、特殊環境ロボットの開発効率化をオープンイノベーションに基づき推進するために、各ステークホルダーにどのような課題があるか、以下にまとめる。

① ロボットシステムメーカーによるニーズの開示

オープンイノベーションを促進する方策の一つは、システムメーカーが、自らが必要としている技術ニーズを開示する必要がある。今後どのような開発方向を目指しているのか、それに必要な技術は何か、そのうちどれは現在保持しており、どれは保持していないのか、保持していないもののうちどれは現在開発中で、どれは未着手、すなわち外部から調達したいと考えているのか、いつまでに欲しいのか、といったイノベーションの方向性と具体的ニーズを明らかにする。そのためには、企業や大学・研究機関等の協調により、実現場での災害対応ロボットの役割を明確にする必要がある。標準化性能試験法による性能の可視化は、ニーズの可視化により有効と考えられる。

② オープンイノベーションに適した技術ニーズの発掘

イノベーションを触発するような技術ニーズは、簡単なものや小さなものではなく、応えるのに新規の発想や革新的な技術が必要となるようなもので、開発すれば大きなビジネスチャンスが得られるものである必要がある。それはまた、導入する側にも大きな飛躍となりうる。個別の利用者ニーズに細かく応えるための技術開発は、重要なことではあるが、イノベーションを触発するような技術ニーズとはなりにくい。特に特殊環境ロボットにおいては、従来の産業ロボットが利活用されている分野とは異なる分野での利用法を見いだし、新たな市場を開発していくことにおいてオープンイノベーションの推進が必要である。標準化性能試験法による性能の可視化は、ニーズの可視化による有効と考えられる。

③ 技術標準の共同開発による国際競争力強化

我が国の技術を世界標準にしていくことは、我が国の国際競争力を維持していくために極めて有効である。標準化を国際競争力強化の手段として推進するためには、標準

化を図るべき技術領域をきちんと見極める必要がある。競争領域の技術は、ノウハウとして秘匿しておくべきであり、国際競争力強化の手段としての標準化には適さない。国際競争力強化の手段としての標準化領域は、広く世界の企業に利用してもらうことで対価を得ていくビジネスモデルが確立できる領域である。こうした領域の代表例が、環境問題対応や安全性向上のための技術と言える。

④　　国の公的研究資金による共同研究開発プロジェクトの活用

技術ニーズに応えるための技術開発は、各企業が個別に競争しながら行う方法と、複数企業が協調して共同で行う方法がある。災害対応のような公共性の高い技術領域では、公的研究資金によりオープンイノベーションを基本として協同で技術開発を継続推進することが効率的であると考えられる。しかし、日本の企業はクローズドイノベーションの歴史が長いため[5]、オープンイノベーションにおける共同の推進では、プロジェクトマネージャーの積極的な関与が必要と考えられる。

⑤　　ニーズとシーズをつなぐ仲介者の活用

災害対応ロボットのようにステークホルダーが多く存在するシステムは、特にニーズとシーズを結び付ける仲介者の存在が必要である。オープンイノベーションを推進する際には、ベンチャーキャピタルを触媒／仲介者として活かしていくことが有用である。ベンチャーキャピタルは、リスクの高い技術開発を円滑に推進する意味でも有効である。

謝辞：本章をまとめるにあたり、ヒヤリング・調査活動で多くの方々から支援をいただいた。特に次の方々には多くのご支援をいただいた：Brokk 日本支社からは Brokk に関する情報を提供いただいた。Raymond Sheh 氏（カーティン工業大学、オーストラリア）からは警察爆発物処理部隊での STM 利用の取り組みに関する情報提供と STM 策定に関する助言をいただいた。Haldun Komsuoglu 氏（Robolit 社、米国）からは、特殊環境ロボットのビジネでの STM 利用に関して助言をいただいた。Adam Jacoff 氏(NIST,米国)からは STM の活用に関して包括的な助言をいただいた。ここに記して感謝します。

課題２

社会実装スキーム

報告

2014 年 3 月

神鋼リサーチ株式会社

特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構

２－１　特殊環境用ロボットに適した社会実装スキームの検討

本章は、特殊環境用ロボットの市場化、産業化に適した事業モデルを調査すると共に、特殊環境用ロボットの社会実装における特殊性にも留意しつつ、これらの条件の克服やリスクヘッジなどの観点から、国内外における産業施設、社会インフラのメンテナンス市場、その他の特殊用途に係る市場の定量化（市場調査）と経済的効果（採算が合う普及台数の定量的分析など）、潜在的な市場予測・試算、整備すべき経済社会的制度、省庁や業種間の連携の在り方等を調査した結果を提供するものである。
調査は、事実関係としての国内外の市場規模の明確化を、国ごと、用途等ごとにマトリクス的に明確化した上で、経済的効果や市場予測・試算等を行うため、まず市場調査（担当：神鋼リサーチ株式会社）を行った。また、市場調査と同時並行的に専門家による委員会:「殊環境用ロボットのビジネスモデル検討のための作業委員会」、を構成し、特殊環境用ロボットの市場化、産業化に適した事業モデルの調査と検討を、市場調査の中間情報を共有しつつ、総合的に進め、その結果を報告書としてまとめた。

２－１－１　国内外における特殊環境用ロボットの社会実装の現状（担当：神鋼リサーチ株式会社）

災害や事故が発生した際に作業が困難な環境において迅速な事態収拾を可能とする特殊環境用ロボットの配備は急務であるが、利用する機会やユーザが限定的な製品であるが故に事業継続や技術改善に必要な開発投資や体制維持を民間で実施することは困難であり、現状では官需に頼らざるを得ないという課題がある。
そこで､特殊環境用ロボットを市場化･産業化していくことが可能なビジネスモデルの検討や、継続的な事業を日本において展開可能とするための施策・政策の検討を行うことを目的に、国内外における特殊環境ロボット事業の現状把握ならびに将来の市場予測のための基本データを収集した。

なお、本報告書で扱う特殊環境用ロボットとは、次のようなイメージである。

表２－１　本報告書で扱う特殊環境用ロボット

災害分野Ⅰ	災害分野Ⅱ	社会インフラ	プラント分野	農業分野
災害現場探査、被災者発見･救出･搬送、災害復旧作業等	原子力パワープラント（事故防止（検査）、保守等）	橋梁･トンネルの保守･点検等	プラントのメンテナンス等	トラクタ等の大物機械

Ａ．　特殊環境用ロボットを販売・購入／運営している機関・企業

本節では、表２－１の特殊環境用ロボットのすべてを調査するのではなく、その中で、世界中で研究開発が盛んで、ニーズ、配備、販売台数が多いと思われる US&R（Structural Collapse Urban Search and Rescue：都市型捜索救助）ロボットに対象を絞った。

国内外における特殊環境用ロボットの製品／実用化段階のものを検索･抽出した。
国外の対象国は、特殊環境用ロボットの開発･配備が進んでいると思われる国として、まずは、米国、ドイツ、フランス、イギリス、中国を想定した。
ちなみに、NPO 法人ロボティック普及促進センターが開催したロボティック・シンポジウム“発展する無人機の可能性と国際動向”の第 2 部で防衛省が講演した「諸外国の軍事用ロボットの概要」（2013 年 11 月 8 日東京ビッグサイト内会議棟で開催）では、航空無人機システム(UAS)の保有機種数は、米国が 190 機種で大差で１位であり、以下、中国(64 機種)、イスラエル(47 機種)、ドイツ／ロシア(各 46 機種)、パキスタン(42 機種)、イギリス(35 機種)と続いている。[1]

これでは対象国選定の妥当性が薄弱なので、国を限定せず、用途分野を軸にして対象国と組織を抽出するために、別の手段を採用した。

US&R の実証の場として実用化段階の先進的ロボットが参加していると思われる米国 NIST (National Institute for Standards Technology) 主催の救助ロボット性能評価実験実証会（TEEX が運営する米国テキサス州カレッジステーション市の Disaster City® にて開催）への参加企業・組織を調査し、対象組織の抽出を行った。

この救助ロボット性能評価実験実証会は､2005 年から 2011 年まで毎年開催されており、2010 年は、同時に米国 NIST と日本 JST（科学技術振興機構）の共催による日米研究交流ワークショップも開催された。
なお、NIST のサイトから、直近の第 6 回、第 7 回の参加者リスト[2],[3]を入手し、対象組織抽出に用いた。これらを表２－２、３に示す。ちなみに、第 7 回(2011 年 3 月開催)の参加者リストには、会期途中で 3.11 東日本大震災が発生し、日本からの参加者が急遽帰国したため、日本チームの記載がない。また、他の回の参加者リストは削除されているためか、見出せなかった。

この２回分のリストでは、米国、カナダ、ドイツ、及び日本からの参加が認められた。

本報告書では、「実用化段階の特殊環境用ロボット」を対象とするため、この救助ロボット性能評価実験実証会(第 6 回、第 7 回)参加者リストをベースに調査することとした。

表２－２　第６回（2010 年）Disaster City の参加者リスト

１）FEMA　タスクフォース　（９グループ）

CA-TF1, CA-TF6, MA-TF1, MD-TF1, NY-TF1, VA-TF1, VA-TF2, WA-TF1,
PA City of Allentown

２）爆弾分隊（Bomb Squads）　（９グループ）
※EOD: 爆発物処理（Explosive Ordnance Disposal）

EOD – CA Sacramento,　– TX Dallas, – IN Ft. Wayne, – WA Seattle, – MN Minneapolis
EOD – DC Metro Transit Auth., – VA Fairfax Police Dept., – MD Mont. County,
EOD – MI Michigan State Police Bomb Squad

３）ロボット開発者
ａ）GROUND ROBOTS

区分	名称	開発企業・組織　（◆：大学,◇団体）	備考
地上	UMRS 2009	◇国際レスキューシステム研究機構	日本
	Souryu IV　「蒼龍Ⅳ」	◇国際レスキューシステム研究機構	日本
	Kenaf	◇国際レスキューシステム研究機構	日本
	Quince	◇国際レスキューシステム研究機構	日本
	Helios IX	◇国際レスキューシステム研究機構	日本
	KOHGA	◇国際レスキューシステム研究機構	日本
	NuTech-R4	◆長岡技術科学大学	日本
	ActiveScopeCamera 「能動スコープカメラ」	◆東北大学	日本
	Scout	ReconRobotics, Inc.	米国
	Pointman	Applied Research Associates, Inc.	米国
	Dragon Runner SUGV Talon GenIV, Talon GenIV Hazmat, Talon GenIV Shoulder	Qinetiq North America / 旧 Foster-Miller Inc.	米国
	Versatrax	Inuktun Services Ltd.	カナダ
	VGTV-Extreme	Inuktun-USA / （Recce Robotics International Inc.）	米国
	G2Bot, Matilda II, Element	Mesa Robotics, Inc.	米国
	Digital Vanguard ROV	Allen Vanguard Corp.	カナダ

	PackBot 510 EOD, PackBot 510 CAM, SAM, EAP	iRobot Corp.	米国
	TeleMAX	Telerob, GmbH ※2011 年に Cobham plc（UK.）が買収	ドイツ
	Caliber MK3 EOD	ICOR Technology, Inc.	カナダ
	Andros HD-1J, Andros Mini	Northrop Grumman Remotec	米国
	RMP 400-INL	Segway, Inc.	米国
	Centaur	MITRE Corporation	米国

b） AERIALS sUAS VTOL (FAA ARC Group I under 2kg, 30knots, frangible)

空中	AirRobot	AirRobot, GmbH & Co. KG	ドイツ　SME*

*SME: privately financed company

c） AQUATIC

水中	LBV200L2, LBV150SE-5	SeaBotix, Inc.	米国

（出所：　[2]を元に神鋼リサーチが整理）

表２－３　第 7 回（2011 年）Disaster City の参加者リスト

１）FEMA　タスクフォース　（10 グループ）

CA-TF1,　CA-TF2,　CA-TF3,　CA-TF6,　CO-TF1,　FL-TF2,　IN-TF1,　NY-TF1,　VA-TF1,　WA-TF1

２）爆弾分隊（Bomb Squads）　（12 グループ）

※EOD: 爆発物処理（Explosive Ordnance Disposal）

Boca Raton,　FL Police Dept.,　Chico, CA Police Dept.,　Florida State Fire Marshal's Office, Garland,　TX Police Dept.,　Jacksonville,　FL Sheriff's Office,　Michigan State Police Montgomery County,　MD Fire/Explosive Investigations, New Jersey State Police Arson/Bomb Unit, Odessa, TX Police Dept.,　Sacramento, CA Sheriff Office,　Santa Clara, CA Sheriff's Office Seattle, WA Police Arson/Bomb Squad

３）ロボット開発者

ａ）GROUND ROBOTS

地上	Pointman	Applied Research Associates, Inc.	米国
	Packbot 310, 510 FirstLook	iRobot Corp.	米国
	Armadillo	Macro USA Corp.	米国
	MatildaXL, Element ＊	Mesa Robotics, Inc.	米国
	F6A, 5A-1, HD-1	Northrop Grumman Remotec	米国
	Terabot S	Oceaneering Space Systems	米国
	Dragon Runner DR-10, Talon IV	Qinetiq North America	米国
	LT-Flipper	SuperDroid Robots	米国
	TeleMax	Telerob, GmbH ※2011 年に Cobham plc（UK.）が買収	ドイツ
	C-VBIED Tools	Mistral Security, Inc.	米国
	HazProbe	VM Robots LCC Wolstenholme AeroMed, Inc.	米国
	PowerHawk	Power Hawk Technologies, Inc	米国
	Gander	Ideal Supply Inc. ?　（詳細不明）	米国
	LVB Trailer	Leipziger Verkehrsbetriebe　？？（不明）	米国

＊ Robot Competition Variant

b） AERIALS sUAS VTOL (FAA ARC Group I under 2kg, 30knots, frangible)

空中	AirRobot	AirRobot, GmbH & Co. KG	ドイツ　SME*

*SME: a privately financed company

c） AQUATIC

水中	不明 （LBV シリーズ？）	SeaBotix, Inc.	米国
	不明 （Scout シリーズ？）	VideoRay LCC	米国

（出所：　[3]を元に神鋼リサーチが整理）

※（参考）日本から持っていったロボット

区分	名称	開発組織名
地上	BLUE-R2 advance	新潟工科大学
	Nutech-R4	長岡技術科学大学
	Quince TOHOKU	東北大学
	KOHGA3	京都大学
	QUINCE CIT	千葉工業大学
	QUINCE CIT P	千葉工業大学

（出所：　国際レスキューシステム研究機構からの情報）

このほか、ロボット関係の世界的な競技会として RoboCup がある。

RoboCup は、ロボット工学と人工知能の融合、発展のために、自律移動ロボットによるサッカーを題材として、日本の研究者らによって 1993 年に提唱され、1997 年から世界大会として毎年開催されている。現在では、サッカーだけでなく、大規模災害へのロボットの応用としてレスキュー（ロボカップ・レスキュー）や、次世代の技術の担い手を育てるジュニアなどがある。現在のロボカップは、スイスにあるロボカップ国際委員会（The RoboCup Federation）を中心に各国の委員会が運営している。

この中のロボカップ・レスキューは、1995 年の阪神大震災の経験から始まったもので、ロボカップ・サッカーで培われた技術を災害救助に利用しようというプロジェクト。
2001 年の第 5 回世界大会からは、実物大の仮設の災害現場で、レスキューロボットが、災害救助活動のスピードと精度を競い合うレスキュー・ロボットリーグと、都市での災害発生を想定して、サーバ上にて消防、救急など役割の異なるバーチャル・ロボットが協力して災害救助を行うレスキュー・シミュレーションリーグがある。[4]

2013 年の Robocup 2013 Eindhoven （第 17 回世界大会、 オランダ) [5]の参加者を調べたが、ほとんど大学であり、今回の調査対象とはしないこととした。(表２－３参照)

図２－１　ロボカップ・レスキューのロボットイメージ
（出所：　第 16 回世界大会（メキシコ）　公式サイト
http://www.robocup2012.org/comp_RCRescue-robot-General.php ）

表２－４　RoboCup2013 のロボットレスキューリーグ参加チームリスト

Participants Robot Rescue League　（RoboCup2013）

- **RRT-Team FH Wels** , University of Applied Sciences Upper Austria – Campus Wels
  Austria
- **SEU-Jolly** , Southeast University
  China
- **AutonOHM** , Nuremberg Institute of Technology Georg Simon Ohm
  Germany
- **HECTOR DarmSTADT** , Technical University of Darmstadt
  Germany
- **PANDORA** , Aristotle University of Thessaloniki
  Greece
- **FKR2** , Firoozkooh Islamic Azad University
  Iran, Islamic Republic of
- **MRL** , Qazvin Islamic Azad University
  Iran, Islamic Republic of
- **ASEMA MASHIN** , Youth Organization Red Crescent Society and Islamic Azad University of Tehran West Branch
  Iran, Islamic Republic of
- **G-Tan** , Tohoku University
  Japan
- **UP-Robotics** , University Panamericana Campus Bonaterra
  Mexico
- **Socrob-rescue** , ISR/IST, Institute for Systems and Robotics Lisbon
  Portugal
- **BART LAB Rescue** , Mahidol University
  Thailand
- **iRAP_FURIOUS** , King Mongkut’s University of Technology
  Thailand
- **OVEC_SOOMKOR** , Office of the Vocational Education Commission (OVEC)
  Thailand
- **STABILIZE** , Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
  Thailand
- **Warwick Mobile Robotics** , University of Warwick
  United Kingdom
- **RKRS** , Benilde-St. Margaret’s School
  United States
- **RoboEaters** , University of California Irvine
  United States

（出所：　[5]を元に整理）

なお、先の救助ロボット性能評価実験実証会（**Disaster City**）は、2011 年の第 7 回実施の最中に発生した 3.11 東日本大震災による福島第一原発事故を契機として、それまでの DARPA（米国防総省 国防高等研究計画局）グランドチャレンジ（第 3 回からはアーバンチャレンジ）の次のステップとなる、DARPA ロボティクスチャレンジ（DRC）に移行した。[6]

2013 年の 12 月に DRC の Trial が行われ、成績が発表されたので、調査対象として、その参加企業・組織も検討した。

米国では、2004 年から、運転手の乗らない車（Unmanned Vehicle）による長距離無人走行実証大会（DARPA グランドチャレンジ）が行われていた。当初は砂漠を走行していたが、第 2 回で完走車が現れたため、第 3 回からは都市部を走行する DARPA アーバンチャレンジに変わった。それが、2011 年の第 7 回救助ロボット性能評価実験実証会（**Disaster City**）実施の最中に発生した 3.11 東日本大震災による福島第一原発事故を契機として、次のステップとなる、DARPA ロボティクスチャレンジ（DRC）に統合移行したと言える。

（（4）項を参照）

2013 年 12 月の DRC Trial に参加した 17 チームをトラック別に表 2－6 に示す。行の左の丸数字は、DRC Trial の順位を示している。数字の無いものは、9 位以下で 2014 年開催の DRC Final に進めない。

2 年間の開発期間でここまでタスクを達成するとは思われていなかったが、この結果から、CMU、NASA JPL を別格とすれば、日本のシャフト社の 2 足歩行ロボット（電動式）と、公式ロボットとしてトラック B/C チームに提供された Boston Dynamics 社の Atlas Robot（油圧駆動式）の完成度がすばらしいことがわかる。

表２－６　DRC Trial に参加した 17 チーム

トラック種別	チーム名　（○数字は順位）	組織名	国名	得点
トラック A 資金提供を受け ロボットを開発	① SCHAFT	シャフト社	日本	27
	③. Tartan Rescue	Carnegie Mellon 大学	米国	18
	⑤. RoboSimian	NASA　JPL	米国	14
	・Team THOR	Virginia　工科大学	米国	8
	・DRC-Hubo	Drexel　大学	米国	3
	・NASA JSC Team Valkyrie	NASA　JSC	米国	0
トラック B 資金提供を受け ソフトのみ開発 (Atlas Robot を使用)	②. IHMC Robotics	Florida Institute for Human & Machine Cognition	米国	20
	④. MIT	M.I.T.(大学)	米国	16
	⑥. Team TRACLabs	Traclab 社	米国	11
	⑧.Team TROOPER	Lockheed Martin Advanced Technology Laboratories 社	米国	9
トラック C 自費で ソフトのみ開発 (Atlas Robot を使用) (WRECS と HKU は、別のロボットを使用)	⑦. WRECS	Worcester 工科大学	米国	11
	・Team HKU	香港大学(中国)／ Team K(日本)＋ Team Case(Case 大学)	中国→ 日本／ 米国	3
	・Team ViGIR	Virginia-Germany Interdisciplinary Robotics 社	ドイツ	8
トラック D ソフトとロボット を自費開発	・Team KAIST	Rainbow 社	韓国	8
	・CHIRON	Kairos Autonomi 社	米国	0
	・Team MOJAVATON	Colorado MESA 大学？	米国	0
	×Intelligent Pioneer	中国科学院 合肥物质科学研究院 先进制造技术研究所	中国	出場できず

※当初は、トラック A に Raytheon が入っていた。

(出所：DRC 公式ホームページの情報などから神鋼リサーチが作成)

Trial に参加できたチームは、NASA などの国立の機構と有名大学が多く、企業の中でロボットを自社開発していたのは以下の 3 社、上位に残ったのは日本のシャフト社のみであった。

・シャフト社（日本）
東京大学 JSK の OB らが 2011 年 5 月に設立したベンチャー企業。
2013 年 12 月に Google に買収された。

・Rainbow 社（韓国）Team KAIST
韓国先進科学技術研究所（KAIST）のヒューマノイドロボット研究センターに、
2011 年 2 月設立。

プラットフォームとして、Asimo の様な人型ロボット”Hubo 2”、Quick Delivery Robot ”Hubo Q”、Hubo-ARM、Hubo-Hand などを開発・販売。
Hubo 2 は、A*STAR I2R (シンガポール)、Drexel (米国)、電子科技大学（中国)、ソウル国立大学（韓国)、韓国科学技術研究所（韓国)、韓国国立科学博物館（韓国）に販売。
※Drexel 大学は、DRC-Hubo で DRC に参加した。
韓国天文宇宙科学研究所のプロジェクト「電気光学式宇宙監視システム向け望遠鏡とサイトコントローラの開発」及び「電気工学式宇宙監視システム向け望遠鏡マウント」に参加。

・Kairos Autonomi 社（米国）
米国の軍需産業企業の一つ。製品”Pront4”シリーズは既存の車両を無人運転車化する技術とキット。

シャフト社は、DRC Trial への参加を目指して、DARPA から資金提供を受けていた特殊なベンチャー企業であり、他の 2 社も一般的でないため、今回の DRC 参加企業は調査対象に入れないこととした。

（1）　海外における特殊環境用ロボットを販売・購入・運営している機関・企業等

表２－１と表２－２の DisasterCity 参加者リストから、日本からの参加チームと詳細不明の 2 社を除外し、各企業･組織の情報を検索し、付録２－１に整理した。

組織名と国名のみ、表２－５に示す。

表２－５　Disaster City（第 6 回，第 7 回）参加企業・組織

※国名の記載が無いものはアメリカを示す

ReconRobotics, Inc.
Applied Research Associates, Inc.
Qinetiq North America /　旧 Foster-Miller Inc.
Inuktun Services Ltd.　　**※カナダ**
Inuktun-USA /　（Recce Robotics International Inc.）
Mesa Robotics, Inc.
Allen Vanguard Corp.　　**※カナダ**
iRobot Corp.
Telerob, GmbH　　**※ドイツ**　※2011 年に Cobham plc（**UK.**）が買収
ICOR Technology, Inc.　　**※カナダ**
Northrop Grumman Remotec
Segway, Inc.
MITRE Corporation
Macro USA Corp.
Oceaneering Space Systems
SuperDroid Robots
Mistral Security, Inc.
VM Robots LCC
Wolstenholme AeroMed, Inc.
Power Hawk Technologies, Inc
AirRobot, GmbH & Co. KG　**※ドイツ**
SeaBotix, Inc.
VideoRay LCC

この Disaster City には、日本を除くと大学からの参加はなく、企業の実証、宣伝の場となっていることがうかがえる。また、基本的に開発者（メーカー）とシステムインテグレータが参加しており、運用者と言えるのは、別枠で記載されている FEMA Task Force、及び Police、Bomb Squads だけである。（彼らは、NIST から招待されている模様。）

参加しているロボットの形態や機能をみると、移動機構とカメラやセンサを搭載し、非常に小型で丈夫な、放り投げて室内や狭隘空間を偵察する Throw Robot が警察や軍で広く用いられている。

また、クローラ駆動でマニピュレータが搭載されて、車のドアを開けたり、爆発物を取り出したり、車の下部や狭隘部の偵察を行う無人偵察ロボットも種類が多い。
この種のロボットは、米国では、軍関係だけでなく、連邦保安官、国境警備隊、FBI、ICE 及び ATF を含む多くの連邦政府機関、警察等の爆発物処理班、消防/救助部隊などに供給されている。当然、海外の軍隊や、テロ対策部隊等にも供給されていると考えられる。
このタイプは、シャーシ部分がプラットホーム化されており、各種アームやセンサーなどのペイロードを載せられることが多い。

また、Inuktun Services Ltd.(カナダ)の遠隔操作車（ROV）は、「顧客は、オンタリオ·ハイドロ、GE ニュークリア·エナジー、日立ニュークリア、アイダホ国立工学研究所（米国エネルギー省)、パシフィック·ガス&エレクトリック、ERDC、ほか」と記載されている。[7]

Power Hawk Technologies, Inc（USA)は、「火災/救助や緊急サービス、軍隊、法執行機関、EOD、産業、原子力などを含むアプリケーションや市場に、幅広く提供している、」と記載されている。[8]

空中用と水中用は、偵察だけでなく検査・監視などの用途で民生分野での利用が可能である。
AirRobot GmbH & Co. KG（ドイツ）は、ミニおよびマイクロ UAV（無人飛行体）の有名企業であり、ドイツ連邦軍のサプライヤーで、全デバイスは NATO の承認を受けている。また、軍の偵察用だけでなく、警察の事故処理時の文書作成、産業機器・施設の検査など様々な用途に使われている。[9]
さらに、EU のプロジェクトにも参加しており、7. Framework research programme: RHEA （“Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management” 非常に効果的な農林業経営のためのロボット艦隊）プロジェクト、6.Framework research programme: μDrones（未知の地形での無人機の完全自律飛行を達成）プロジェクトなどのほか、Federal Ministry of Education and Research（連邦教育研究省）の資金提供による "RepaKorr"プロジェクト（オフショア風力発電システムの防食コーティングに関する「オンサイト修理·コンセプト」)、NRW 州推進プロジェクト：国際地雷除去、国際森林火災消火にも参加している。[10]

販売数が記載されているロボットとしては、
・iRobot 社（USA）の PackBot … 世界中で 4500 台以上 [11]
・Northrop Grumman Remotec 社(USA)の ANDROS … 全世界で 1000 台以上 [12]
等があった。

(a)PackBot の例

(b)ANDROS の例

図２－２　典型的な無人偵察ロボット（クローラ駆動と車輪駆動）の例

（出所：(a) http://www.irobot.com/us/learn/defense/packbot/Details.aspx ,

(b) http://www.northropgrumman.com/Capabilities/Remotec/Products/Pages/F6B.aspx ）

（２）　国内における特殊環境用ロボットを販売・購入・運営している機関・企業等

DisasterCity に日本から参加しているのは、国際レスキューシステム研究機構（IRS）と大学だけとなっており、Search & Rescue の分野の企業／市場が育っていないことが窺える。

なお、2010 年の DisasterCity 性能評価実験実証会では、日米研究交流ワークショップが開催されており、独立行政法人 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センターの吉村晶子氏(現千葉工大准教授)らが、東北大学大学院情報科学研究科/特定非営利法人 国際レスキューシステム研究機構の田所諭氏に随伴して視察し、その調査結果に基づいて US&R 訓練施設の整備と運用について述べており、施設や訓練の在り方の参考になる。[11]

とはいえ、その種のロボットがまったくないわけではない。
たとえば、土木・建設分野のロボットとして日立建機が東急建設とともに NEDO の「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」（2006～2010 年度）で開発した双腕作業機（商品名：ASTACO）は、2011 年に東京消防庁と川崎市消防局に導入された。[12]

また、「消防研究センターが、テムザック社のレスキューロボット「援竜」を評価。」（2008/12/08）、「テムザックのレスキューロボ、北九州消防局に正式配置、消防ロボの共同研究へ」（2009/07/06）等の記事も見受けられる。
T-53 援竜は 2009 年 7 月に北九州市消防局戸畑消防署に配備されたが、正式導入（購入）には至らず、検証結果を次世代機の開発に役立てることで正式導入を目指し、4 代目「援竜」の開発を進めている、との記事もある。 [15] [16] [17]

一方、東京消防庁は、2009 年 10 月 21～23 日開催の「危機管理産業展 2009」にて 4 月に配備（現場への配備は 6 月から）した遠隔操作タイプの新型レスキューロボット（愛称「ロボキュー」）を公開。危険物の回収から要救助者の救助まで一連の救助作業を披露した、との記事もある。このロボキューは、菊池製作所が製作したもので、従来機を 15 年ぶりに改良し、半分程度に小型化している。[18][19]　　（図２－３　参照）

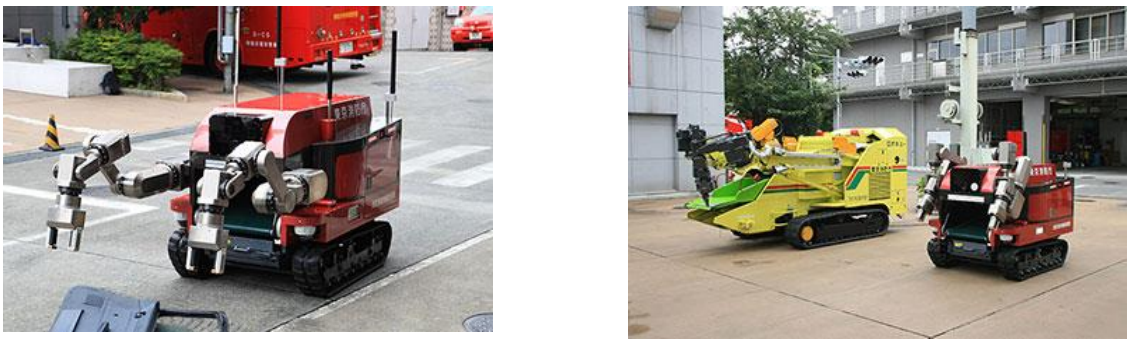


図２－３　救出ロボット「ロボキュー」　（左：新ロボット、右：新旧ロボット比較）
（出所：東京消防庁　http://www.tfd.metro.tokyo.jp/ts/soubi/robo/05.htm）

また、最近では、東日本大震災(2011.3.11)による福島原発事故の後処理のため、NEDOが平成 24 年 1 月から平成 24 年度末まで実施した「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」において、

研究開発項目（1）作業移動機構の開発　（共同提案 4 法人）
　株式会社移動ロボット研究所
　株式会社日立製作所
　株式会社東芝
　三菱重工業株式会社
研究開発項目（2）計測・作業要素技術の開発
（単独提案 1 法人）　学校法人千葉工業大学
（単独提案 1 法人）　株式会社日立製作所
（単独提案 1 法人）　株式会社東芝
研究開発項目（3）災害対策用作業アシストロボットの開発
（単独提案 1 法人）　CYBERDYNE 株式会社
などの項目の開発が行われ、成果を上げた。[20]

図２－４　NEDO の「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」で開発した
９分野のロボット
（出所：NEDO ホームページ　http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100176.html）

なかでも千葉工業大学は、原発施設内での作業を想定した水陸両用の新型ロボットを開発するとともに、三菱重工業と技術協力協定を結び、過酷な環境下で作業するロボットの普及へと新たな一歩を踏み出した。[21]

これらの福島原発事故の後処理として開発されたロボットは、これまでに比べるとユーザの意見を取り入れて急激に改良・新機種開発がなされている。しかしながら、当面は福島原発限定であり、実際に量産され、十分に操作・運用の訓練を行っている状態ではない。とはいえ、ニーズに迫られてある程度役に立つ試作機が出現し、改良のサイクルに入りつつある状況であり、限定的かつ継続的な市場が出現したと言えるかもしれない。

それ以外の探索・災害対応ロボットの開発・普及はあまり進んでいない。

たとえば、消防庁で配備されているロボットの数は少なく、災害時等に、緊急で US&R に使える体制にはなっていないと思われる。

（3）　特殊環境用ロボットの販売・運営の現状と課題

米国でも、軍関係の調達をのぞくと、特殊環境ロボットがそれほど大きい市場を持っているわけではない。ただ、
・事前偵察
・爆発物などの危険物探索･処理
・消防／救助
等の用途で、軍関係や警備隊、連邦政府機関、警察、消防などで幅広く使用されるため、それなりの数量が見込まれることと、軍との契約による資金調達、いくつかの政府系資金のファンドなど、いろいろなアドバンテージがあると言える。

また、エネルギー関係の工場施設などでも、普段のパトロールや監視、災害時の対応など、それなりの需要もあるようである。その場合も、稼働実績があり、価格もこなれているロボットがあることは、購入の障壁を大きく下げるものと思われる。

日本では、これらの市場が育っていないこと、購入予算や基金が少ないこと、実績のあるロボットがほとんど無いこと、普段の維持メンテナンスや運転操作の習熟訓練ができないこと、などさまざまな障壁がある。また、これまでの資金援助も、よく言われていることだが、新規開発にはお金が出るが、それを維持･改良する為の費用が調達できず、開発中止や廃棄されることが多かった。また、実際に活躍する場(災害)があまりなかったために、切実な必要性が見えなかったことも一因と思われる。

この辺りについては、不幸なことではあったが、東日本と福島原発事故が契機となって、本格的な対策が立案・実施される動きが見えつつある。今の(比較的)平和な日本で、この種のロボットの災害時以外の用途を考えると、福島原発対策用のロボットの開発・改良･維持を確実に実施するだけでなく、エネルギー関連施設や化学プラントの防災・メンテナンス、及び、最近問題となっている橋梁、トンネルなどの公共インフラのメンテナンス用に注力する事が考えられる。

B節では、US&R ロボットの平時転用先候補として、さらに特殊環境用ロボットの中で最近ニーズが顕在化して来つつあるメンテナンスロボットやその他の特殊環境用ロボットの市場規模について述べる。

（4） 参考 DARPA Robotics Challenge

以前の DARPA グランドチャレンジは､自律移動型のロボットカーによる競技だったが、DARPA ロボティクスチャレンジ（2012 年 4 月に発表、2013 年 6 月と 2013 年 12 月に競技会(VRC 及び Trial)、2014 年 12 月に決勝大会（Final）を予定）は、主としてヒューマノイド(人型)ロボットによる原発事故等への災害対応能力を実証するものとなった。
※必ずしも人型の必要はないが、1 台で「車を運転する」「凸凹道を歩く」「がれきを取り除く」「ドアを開ける」「はしごを上る」「壁に穴を開ける」「消火ホースをつなぐ」「バルブを締める」の 8 種目の競技の出来をそれぞれ競うため、多くのチームは人型を選んだ。また、ソフトのみを開発するチームに提供(貸与)された Atlas ロボットも人型ロボットである。

※DARPA Grand Challenges：
DARPA による自律移動型ロボットカーによる「ロボットカーレース」。
最初の競技では未舗装路を制限時間内に走破するものだった。2007 年 11 月 3 日に実施された 3 回目の競技では市街地を想定したコースが用意された。
2004 年に米国南西部のモハーヴェ砂漠で開催された最初の競技では、カーネギーメロン大学のレッドチームが 11.78km まで走ったが、どの車両もゴールまで辿り着けなかった。
2005 年の第 2 回競技では、スタンフォード大学、カーネギーメロン大学(2 台)、Gray 研究所、オシュコシュ トラック社（Oshkosh Truck Corporation）の 5 台が完走した。

※DARPA Urban Challenge.
第 3 回の DARPA グランドチャレンジは"アーバン チャレンジ"として知られ、2007 年 11 月 3 日にジョージ空軍基地(現 南カリフォルニア物流空港)で開催された。市街地を想定した総延長 96 km（60-mile）のコースを 6 時間以内に完走することが求められ、6 台が完走した。(カーネギーメロン大学、スタンフォード大学、バージニア工科大学、MIT,ペンシルベニア大学／リーハイ大学、コーネル大学)

※DARPA Robotics Challenge. [22][23]
自然災害と人的災害への対応で人間を支援することのできるロボットを開発するために、ロボットシステムチームとソフトウェアチームが競う競技会である。

この競技会は、2012 年 4 月 1 日に DARPA から概要が発表され、募集が始まった。
競技は、仮想ロボティクスチャレンジ(2013/6)、ロボティクストライアル(2013/12)、ロボティクスファイナル(2013/12)※の 3 段階とし、ソフトとハードの開発能力に対応して、トラック A～D までの 4 トラックを設けた。(※2015 年の中頃までに開催、に変更された)
2013 年 5 月 1 日に、仮想ロボットチャレンジ（Virtual Robotics Challenge）に進むチームを決める、**トラック B** と **C** のチームのための DRC Simulator による予選（26 チームを選出)、6 月 15 日に本戦を開催し、DARPA の資金提供と Atlas ロボット（Boston Dynamics 社製）の使用権利を得る 7 チームを選出した。(JPL が資金と Atlas ロボットの使用権利を辞退したことで、TROOPER、Team K と Case Trials が合流した HKU が追加され)最終的には上位 9 チームを審査通過者として決定した。
一方、**トラック A** チームからは、設計評価の上で、2013 年 6 月 1 日に DARPA の資金提供

を受ける６チームを選定した。

2013 年 7 月 15 日に、Boston Dynamics 社で開発されていた Atlas ロボットが公開され、提供された。

2013 年 12 月 20-21 日に米国フロリダ州にあるホームステッド・マイアミスピードウェイにてロボティクストライアルが開催され、トラック A～C の 13 チームにトラック D の 4 チームを加えた 17 チームで競技し、上位８チームが新たな資金提供を受けつつ 2014 年の決勝戦（ロボティクスファイナル）に駒を進めることになった。（決勝戦には、自費開発のチームが追加されることがある。）

決勝大会は 2014 年末に開催され、ロボットとその操縦者間の劣化した通信の中で、連続した物理的なタスクのコース(サーキット)を試みるロボットが必要になる。優勝チームは 200 万ドル（約 2 億円）の賞金を受け取る。

DARPA ロボティクスチャレンジ（DRC）とは何かという章には、

『世界で最も先進的なロボット工学の研究開発組織の一部を代表する参加チームは、彼らのロボットが災害対応に関連するよう DARPA が選択した一連のチャレンジ作業を完遂する事を可能にするはずのハードウェア、ソフトウェア、センサ、ヒューマン･マシン･コントロール･インタフェースを開発するには極めて短い時間軸上で、共同作業し、革新する。3 つの連続した DRC のイベントは､ハードウェアとソフトウェアに等しい重点を置いている。

（中略）

DRC から生じた技術は、ロボット工学の分野を変換(transform)し、被災地では一般的な危険で劣化した状況下で動作させることができる、タスクレベルの自律性を備えたロボットの開発を一気に推進（catapult forward development）する。』

と書かれている。

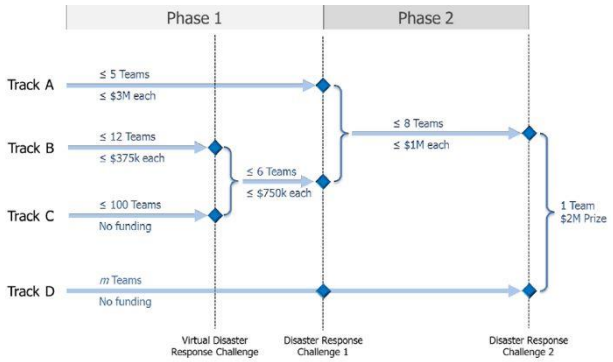


図２－５　DRC の全体の流れ

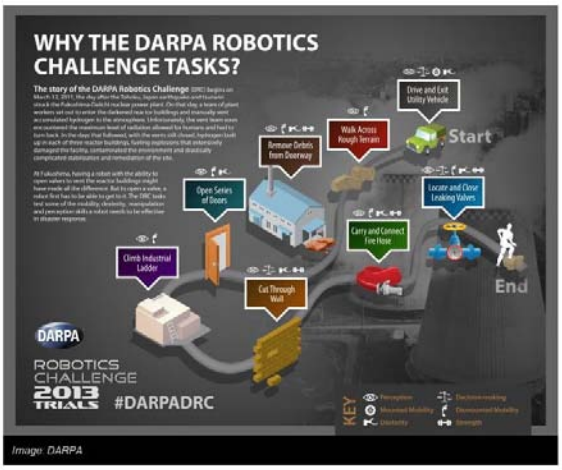


図２－６　DRP Trial の８つのタスクの流れ

（出所：　DRC 公式サイト[23] ）

Ｂ．　特殊環境用ロボットの市場予測／経済効果

（１）　特殊環境用ロボットの市場予測の考え方

（ａ）調査対象国

対象としたのは、日本、米国、ドイツ、中国の４ヶ国である。

日本以外の国として、米国、ドイツ、中国を調査対象としたのは、特殊環境用ロボットの先進国、あるいは今後、マーケットとして有望国と考えられるためである。

米国では、Center for Robot-Assisted Search and Rescue (CRASAR)が研究開発や災害適用の実績を持っており、米国国立標準技術研究所（NIST）では災害対応ロボットの性能を定量的・客観的に評価するための評価手法の開発を進めている。例えば NIST では、開発途中の評価手法による災害対応ロボットの評価・実証実験である「Response Robot Evaluation Exercise」が定期的に開催されている。

ドイツは産業用ロボットでは日本と並んで世界の先進国であるが、一方でフランスなどと同様に原子力災害発生に対応するロボットやその運用組織が整備されている。ドイツの原子力防災組織 KHG は 1977 年から原子力災害対応ロボットの運用を開始しており、古い歴史と実績がある。

また中国については、科学技術部が発表している第 12 次 5 ヶ年国家計画で、ロボット分野に対しての方針を打ち出しており、4 つのサービスロボットプランとして、ヒューマノイドロボット、医療ロボット、モジュラーロボット、公安及び救助ロボットを挙げている。今回の対象分野でいえば、公安及び救助ロボットがそれに該当すると思われるが、そこでは消火、危険物搬送や保安・修繕を行うロボット、あるいは原子力発電プラントの監視・修繕・解体を遠隔で行うロボットの開発などが目標として掲げられている。以上のように、今回対象として挙げた国々は、それぞれ特殊環境用ロボットについて特徴的な取り組みを行っている、あるいは指向している国々であり、これらの市場について調査することは日本にとっても大変参考になるものと考えられる。

なお、今回、日本を除いた上記 3 ヶ国以外を調査対象国として取り上げなかったのは、予備的調査を行った結果、調査時点においては基本的に米国以外には具体的製品に関する情報は乏しく、また市場に関する有益な情報もほとんど得られないと判断したため、冒頭で述べたように、すでに製品が上市されている国や今後大きな市場創出が期待される国に限定して調査を行った。

（ｂ）対象のロボット

本報告書で扱う特殊環境用ロボットとは、次のようなイメージである。

表２－７　本報告書で扱う特殊環境用ロボット

災害分野Ⅰ	災害分野Ⅱ	社会インフラ	プラント分野	農業分野
災害現場探査、被災者発見・救出・搬送、災害復旧作業等	原子力パワープラント（事故防止（検査）、保守等）	橋梁・トンネルの保守・点検等	プラントのメンテナンス等	トラクタ等の大物機械

（ｃ）市場予測の手法

日本における市場予測の手法を米国、ドイツ、中国にも用いた。

日本の市場予測については、公表ベースで入手可能な情報をもとに、現在、各分野にかかっている費用（労務費、人件費等）の試算を行い、それらが 2020 年にそれぞれ、10%、30%、50%ロボットに置き換わった場合、潜在市場としてどの程度の規模になるかを試算した。

したがって、今回の試算値は、需要面からのニーズ等を汲み上げて積算したものではなく、あくまで１つの目安として試算した数値である。

ロボットの置換率を、10%、30%、50%としたのは、2020 年段階で特殊環境用ロボットの導入率がどの程度になるのかの前提条件が明確でないためである。置き換えが比較的高い場合（高位）を 50%と考え、以下中位を 30%、低位を 10%と置いた。

ただし、農業分野については、現在使用されているトラクタが農業用ロボット（無人トラクタ）に置き換わった場合の市場規模を試算した。置換率は他分野と同じ想定である。

また、例えば、原子力メンテナンスやプラントメンテナンスなどでは用途により、実際にロボットが適用される割合に様々な幅があることに留意しておく必要がある。

なお、労務費（人件費）の考え方については、中国の場合、日本との賃金格差を考慮して試算しているが、米国、ドイツについては日本と同等とみなし、賃金格差は考慮していない。

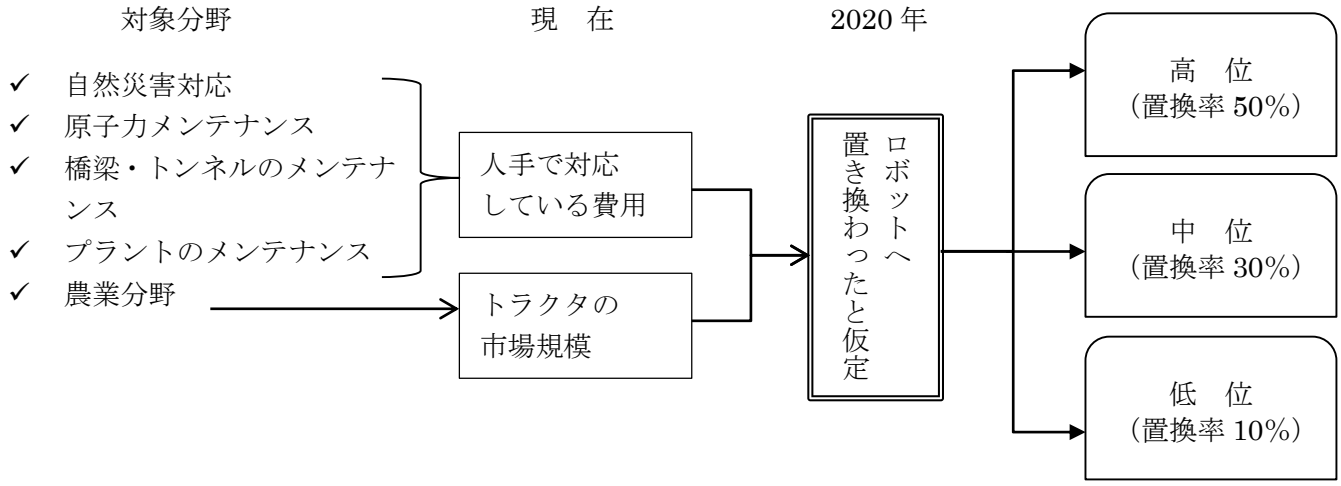


図２－７　本書での日本の市場予測の考え方

なお、試算を行うに当たり、情報等が不足している分野については、できる限り公表されている市場予測、金額等（公的ベース）の収集に努め、当該情報を整理した。

（ｄ）市場予測の試算結果

上記の考え方に基づき、試算を行った結果は次頁に示す通りである。

金額は、現在各分野にかかっている費用（労務費、人件費等）が、2020 年にそれぞれ、10%、30%、50%ロボットに置き換わった場合、潜在市場としてどの程度の規模になるかを試算した数値である。

図２－８　潜在市場予測のまとめ

		日本	米国	ドイツ	中国
特殊環境					
	災害分野Ⅰ（自然災害等）	●2035年：3,200億円（内閣府「科学技術イノベーション総合戦略（2013.6）」 レスキューロボット市場） ＊独自試算については該当情報が不足	・災害分野（2012年→2020年） 10%：40億円　→　同左 30%：120億円　→　同左 50%：200億円　→　同左	＊該当情報なし	＊該当情報なし
	災害分野Ⅱ（原子力PP）	原発（2011年→2020年） 10%：94億円　→　同左 30%：281億円　→　同左 50%：468億円　→　同左 （＊発電炉1/54基当たり：　17億円/年）	・原発（WinterGreen Research,Inc予測） 2012年：5,500万US$（44億円） 2019年：11億US$（1,100億円） ・原発（2013年→2020年）（独自試算） 10%：81億円　→　67億円 30%：243億円　→　200億円 50%：405億円　→　334億円	原発（2013年→2020年） ー2022年末に稼働中の全原子力発電所を閉鎖予定。 ー2013年現在、9基の原子力発電所が稼働中。潜在市場としての可能性は低い。 →日本の数値を使い1基当たり17億円/年として153億円/年（2022年末まで）	原発（2013年→2020年） 10%：4億円　→　9億円 30%：12億円　→　27億円 50%：20億円　→　45億円 ＊発電炉1/54基当たり　17億円/年
メンテナンス					
	橋梁	・橋梁（2011年→2020年） 10%：189億円　→　194億円 30%：566億円　→　582億円 50%：943億円　→　970億円	・橋梁（2011年→2020年） 10%：187億円　→　同左 30%：560億円　→　同左 50%：933億円　→　同左	・橋梁（2011年→2020年） 10%：45億円　→　同左 30%：135億円　→　同左 50%：223億円　→　同左	・橋梁（2013年→2020年） 10%：133億円　→　同左 30%：399億円　→　同左 50%：665億円　→　同左
	トンネル	・トンネル（2010年→2020年） 10%：17.5億円　→　17.9億円 30%：52.5億円　→　54.0億円 50%：87.5億円　→　90.0億円	＊トンネルについて該当情報不明	＊トンネルについて該当情報不明	・トンネル（2013年→2020年） 10%：2.8億円　→　同左 30%：8.4億円　→　同左 50%：14億円　→　同左
	プラント	・製造業のプラント（2011年→2020年） 10%：2,646億円　→　同左 30%：7,938億円　→　同左 50%：13,230億円　→　同左	・製造業のプラント（2011年→2020年） 10%：6,163億円　→　同左 30%：18,488億円　→　同左 50%：30,813億円　→　同左		
			・石化プラント（2011年→2020年） 10%：874億円　→　980億円 30%：2,620億円　→　2,940億円 50%：4,368億円　→　4,900億円	・石化プラント（2011年→2020年） 10%：184億円　→　180億円 30%：552億円　→　540億円 50%：920億円　→　900億円	・石化プラント（2011年→2020年） 10%：400億円　→　501億円 30%：1,200億円　→　1,503億円 50%：2,000億円　→　2,505億円
		●2035：2000億円（内閣府「科学技術イノベーション総合戦略（2013.6）」 点検メンテナンスロボット市場）			
		●2000億円（2035年）（日本再興戦略（2013.6）」） （2013年→2030年） ・50億円→6,000億円			
農業					
	農業分野	・トラクタ（2010年→2020年） 10%：221億円　→　193億円 30%：662億円　→　580億円 50%：1,103億円　→　966億円	・トラクタ（2011年→2020年） 10%：1,584億円　→　1,461億円 30%：4,752億円　→　4,382億円 50%：7,920億円　→　7,304億円	・トラクタ（2009年→2020年） 10%：175億円　→　126億円 30%：525億円　→　378億円 50%：875億円　→　630億円	・トラクタ（2009年→2020年） 10%：29億円　→　44億円 30%：87億円　→　132億円 50%：145億円　→　220億円
その他					
	その他（インフラ全般、ほか）	・社会インフラ全体（2011年→2020年） 10%：159億円　→　170億円 30%：477億円　→　509億円 50%：795億円　→　848億円	・スネークロボ：2012年 3,360万US$（33.6億円）→23億US$（2,300億円）（NEWS） ・水中ロボ：2012～2016年に6.77%で成長（NEWS）		

（注：米国での試算を行った際の使用為替レートは、2010年平均 US$≒¥87.79／2011年平均　US$≒¥79.63／ 2012年平均　US$≒¥80.12／2013年平均予測 US$≒¥97　）□

（２）　日本の特殊環境用ロボットの市場予測

（ａ）災害分野Ⅰ（自然災害等）

①災害対応ロボットの市場規模

市場規模の試算を行うに当たり、情報、データ等がないため、公表されている市場予測等の情報整理を行った。

内閣府が取りまとめて閣議決定された「科学技術イノベーション総合戦略」（2013 年 6 月 7 日）によると、災害対応ロボット関連産業の国内市場規模は 約 3,200 億円の見込み（2035 年時点）になると公表されている。

但し試算方法は公表されておらず不明である。

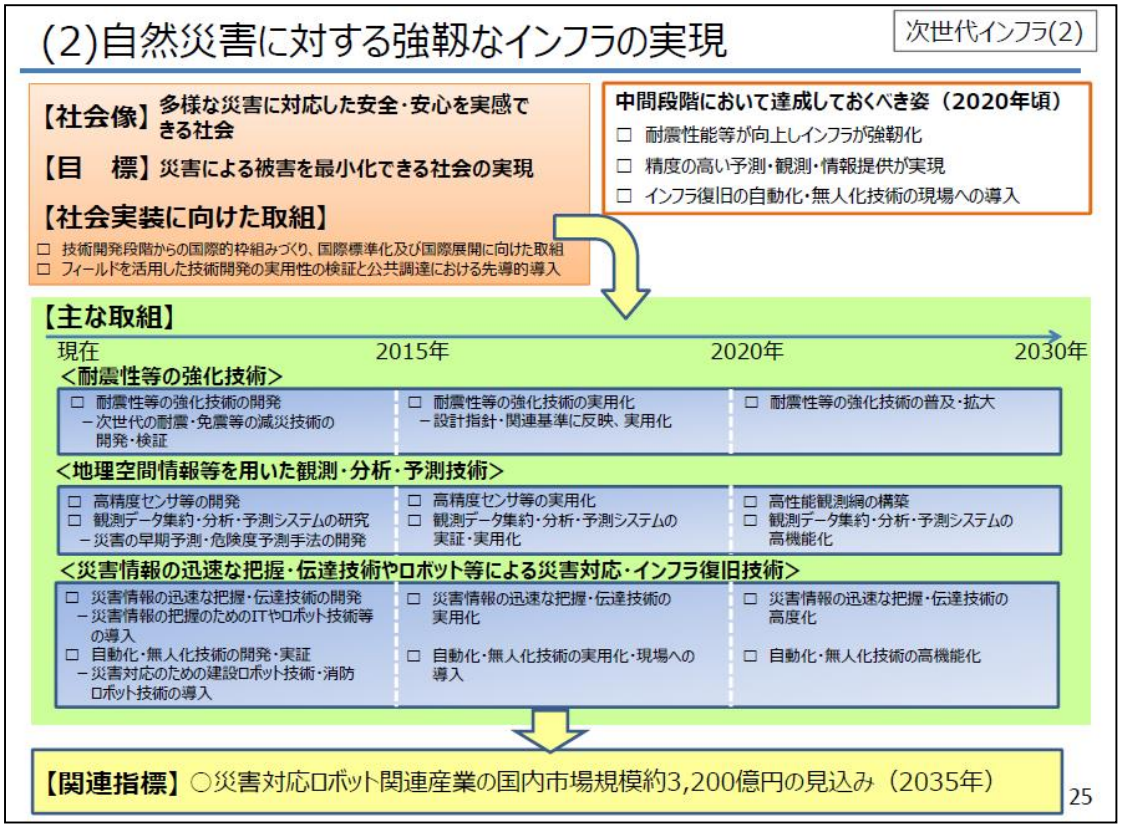


図２－９　日本政府の災害対応ロボットに関する取組方針

（出所：内閣府「科学技術イノベーション総合戦略」（2013 年 6 月 7 日）－別表 科学技術イノベーション総合戦略　第二章　科学技術イノベーションが取り組むべき課題 工程表）

この 2035 年に 3200 億円の市場が形成されるシナリオに従い、2013 年を起点として 2035 年まで定額の伸びをプロットした場合、図に示すとおり、2020 年段階では 1,018 億円、2030 年段階で 2,473 億円となる見込みである。

・2013 年（現在）：　ゼロと仮定

・2020 年（将来）：　1,018 億円

なお、2013 年現在、災害対応ロボットが被災地などで活用されている例が散見されるが、市場規模の把握等は難しいため、現在の市場はゼロとした。

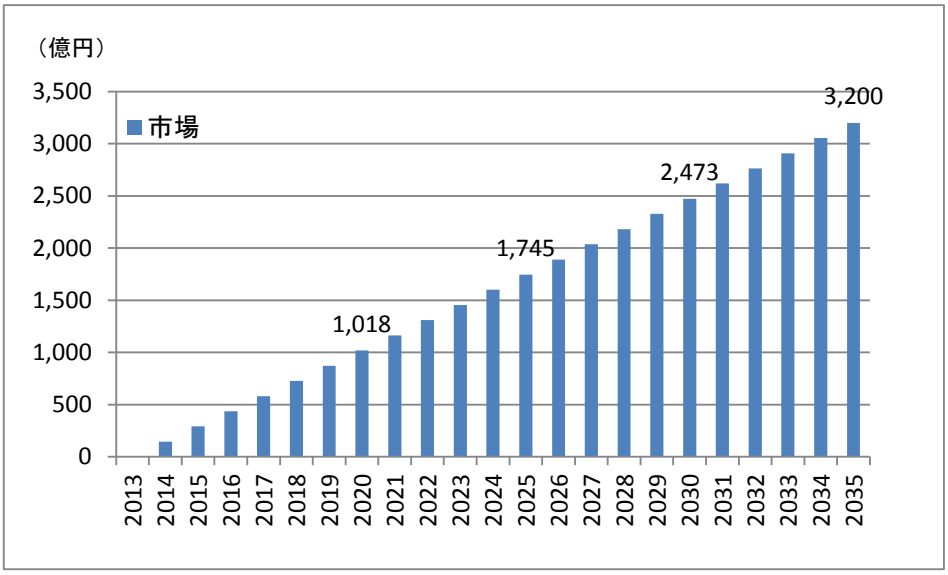


図２－１０　災害対応ロボット関連産業の国内市場規模の試算

（出所：内閣府「科学技術イノベーション総合戦略」（2013 年 6 月 7 日）－別表 科学技術イノベーション総合戦略　第二章　科学技術イノベーションが取り組むべき課題 工程表に基づき作成。2035 年の 3,200 億円は内閣府資料による。
上記グラフは神鋼リサーチ作成。）

②災害対応ロボットの市場規模に関する情報（参考）

総務省（消防庁）では、災害対応ロボットの研究開発について、次年度（2014 年度）に 2.1 億円の予算（案）を計上している（当初要望額は 2 億円）。

・エネルギー・産業基盤災害即応部隊の応急対応に資するリモート操作可能な災害対応ロボット等の G 空間（地理空間）×ICT を活用した高度な車両・資機材等を研究開発

図２－１０　災害対応のための消防ロボット技術の研究開発
（出所：総務省ミッションとアプローチ 2014－重点施策集（2013 年 8 月））

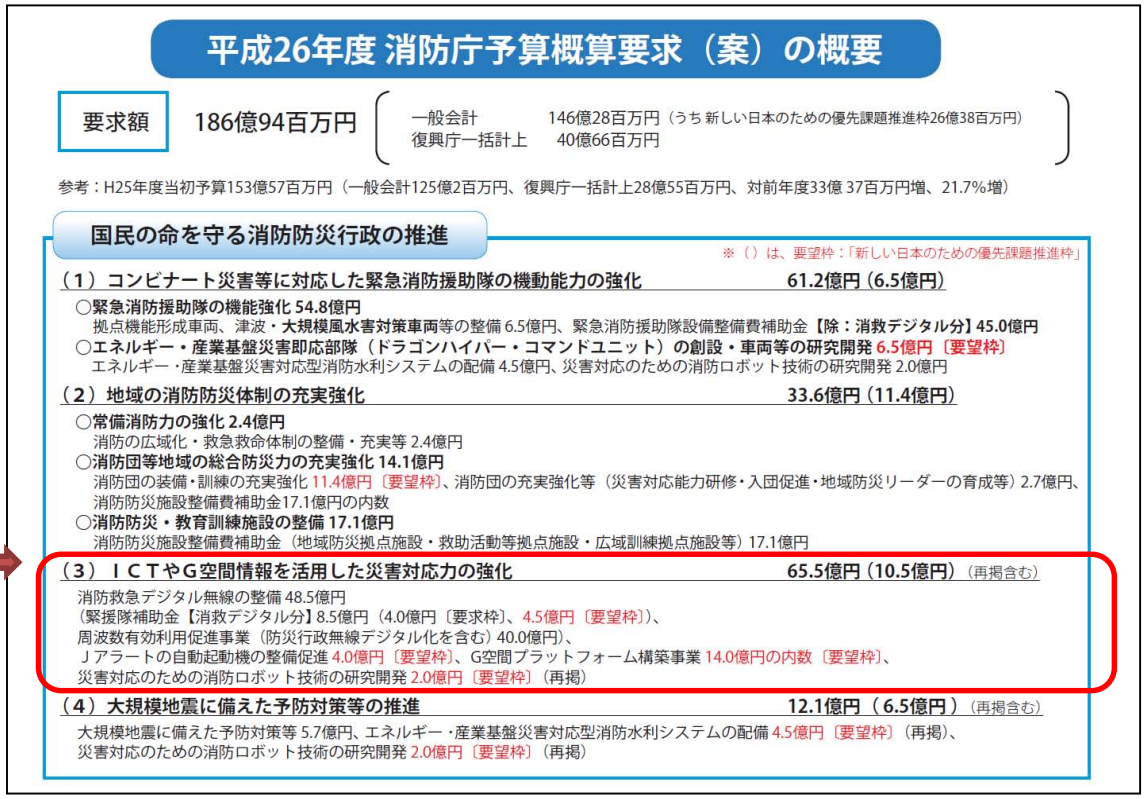


図２－１１　消防庁の災害対応ロボットに関する予算要求案
（出所：総務省ミッションとアプローチ 2014－重点施策集（2013 年 8 月））

（ｂ）災害分野Ⅱ（原子力パワープラント）

①原子力発電所等に使用するロボットの潜在市場規模

我が国の原子力発電所は地震の影響による福島第一発電所の罹災を受けて、2013 年 12 月現在、全て稼働していない。現在、新規性基準の適合性確認に係る申請を行った原子力発電所は 6 箇所、12 基だが稼働の見込みは立っていない。

そのため既存の原子力発電所が稼働し、また東日本大震災前と同じ保全活動が行われていると仮定して市場規模を試算した。

表２－８　日本の原子力発電所数等

□東日本大震災前の原子力発電所数：	17 箇所、原子炉数：54 基
□2013 年 12 月現在の発電所数：	16 箇所、原子炉数：50 基
□建設中の発電所数：	4 箇所
（うち臨界（運転）した炉数：1 基（もんじゅ）、3 基は建設中）	

（出所：一般社団法人 日本原子力産業協会「日本の原子力発電の概要」（2013 年 7 月 16 日）／原産新聞 2013 年 12 月 20 日記事：東京電力福島第一の 5、6 号機（停止中）が来年 1 月末で廃止予定（全基廃止））

また、人件費（保全費）等に関する情報は、日本プラントメンテナンス協会が公表している資料を基にした。

日本プラントメンテナンス協会の設備保全費の算出方法は、次の通りである。

保全費比率＝製品出荷額／保全費

製品出荷額とは日本プラントメンテナンス協会の会員企業の顧客の業種における製品出荷額であり、それを保全費（アンケート調査）で除して業種別の平均値を保全費比率としている。

（主な使用データ等）

＊2012 年度メンテナンス実態調査報告書（公益社団法人 日本プラントメンテナンス協会）のデータをベースに試算。

＊同報告書のアンケートは日本プラントメンテナンス協会会員事業場（製造装置を持つ事業場対象及び保守・エンジニアリング計事業場 863 件に発送。有効回答数：278 件（回収率 32.2%））

＊2011 年ベース

試算経過とその結果を以下に示す。

図２－１２　製造業及び関連業種の保全費

	調査数	製品出荷額（億円）	保全費（億円）	保全費比率（%）
製造業全体	89	111,974	1,633	2.2
窯業・土石	3	97	4	4.3
電力・ガス	*	*	*	*

（出所:日本プラントメンテナンス協会「2012 年度メンテナンス実態調査報告書」(2013.4)）

製造業全体・保全費比率	0.022(2.2%)
窯業・土石　保全費比率	0.043(4.3%)
電力・ガス 保全費比率	秘匿（仮に 4.3%とした）

上記の割合を原子力発電に当てはめて設備保全費を試算した。なお、電力・ガスの保全比率は情報が秘匿されているため、最も保全比率が高かった窯業・土石業界の保全比率 4.3%を仮に用いた。

表２－９　原子力発電所における設備保全費の試算

工業統計-製品出荷額(METI)	出荷額（億円）		(%)		（億円）
製造業全体	2,850,232	×	2.2	＝	62,705
※電力・ガス 保全費比率を使用					
・原子力発電割合（33.8%）#	(51,513)	×	(4.3)	＝	2,215
・(電力売上高　2010 年時点)	(154,695)	×	(4.3)	=	6,652

#注：H22 年度、9 電力会社の発電電力量割合を計算して使用、また電力売上高も 9 電力会社の収入合計値を仮に出荷額とした。表２－１０を参照のこと。

表２－１０　発電電力量に占める原子力発電割合　（100 万 kWh）

	H21（2009）	H22（2010）	直近 2 年（平均）
9 電力会社原子力発電電力量	266,110	271,270	268,690
9 電力会社発電電力量	776,392	815,261	795,827
原子力発電割合(%)#	34.3	33.3	(33.8)

（出所：電気事業連合会「電気事業便覧」を用いて試算）

一方、ロボットの置き換え対象となる労務費について、日本プラントメンテナンス協会の資料を基に試算した。

同協会の資料では、2010 年は 40.7%、2011 年は 43.7%とされている。

表２－１１　保全費に占める労務費

	保全費（億円）		（%）		金額（億円）
保全費に占める労務費	2,215	×	40.7～43.7	＝	902～968 （平均）935 億円

このうち、ロボットに置き換え可能な割合として、10%、30%、50%を試算した。

表２－１２　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2011 年の潜在市場 （平均金額）	90.2～96.8 億円 （93.5 億円）	270.6～290.4 億円 （280.5 億円）	451～484 億円 （467.5 億円）
2020 年の潜在市場	同上	同上	同上

なお、上記の潜在市場規模はあくまでも、保守・点検など原子力パワープラントのメンテナンス業務における潜在市場規模であり、事故・災害対応などの業務は含んでいない。

また、日本プラントメンテナンス協会にヒアリングした結果、今後のプラントメンテナンス費用の増加は考えにくいとの回答から、2020 年の予測値は 2011 年現在と同等とみなした。

ロボットへの置き換えについては、今後、労働力人口の減少等に伴い、これまで人手に頼っていた部分からの置き換えが進んでいくものと考えられる。

加えて、日本プラントメンテナンス協会へのヒアリングでは、プラントの保守・点検などを行う技能者の後継者育成、技能伝承が必ずしもうまく進んでいるとはいえないとのことであった。

したがって、労働力人口の自然減に伴うロボットへの置き換えに加えて、人から人への伝承ではなく、直接人からロボットへの置き換えも十分に考えられる。こうした見方は、原子力プラントだけでなく、一般のプラント分野についても同様である。

図２－１３　原子炉１基あたりの保全費に係る労務費について

日本の原子炉について東日本大震災前の炉数は 54 基であったことから、1 基あたりの保全にかかる労務費は 17 億円となる。

－原子炉「54 基」の保全に係る労務費：　935 億円
・1 基当たり：935 億円÷54 基＝17 億円/基

（注：上記データは米国、ドイツ、中国の試算を行う上で使用）

（ｃ）社会インフラ（橋梁・トンネル）

日本については、国土交通省のデータを基に、①インフラ全体（道路、港湾、空港、公共賃貸住宅、下水道、都市公園、治水、海岸)、②橋梁、③トンネル、について試算を行った。

（主な使用データ等）
＊国土交通省統計データー維持管理費を試算のベースに使用。
＊国土交通省「国土交通白書」
＊国土交通省「国道（国管理）の維持管理等の現状と課題について」
＊国土交通省関連資料ー「積算実績データに基づく建設コストの分析」
＊年数は 2013～2020 年を仮定。

①インフラ全体におけるロボットの潜在市場規模

国土交通省が 2011 年に試算を行った社会インフラ（道路、港湾、空港、公共賃貸住宅、下水道、都市公園、治水、海岸）の維持管理費用は、2013 年で 3.4 兆円、2020 年で 3.5 兆円と試算されている。

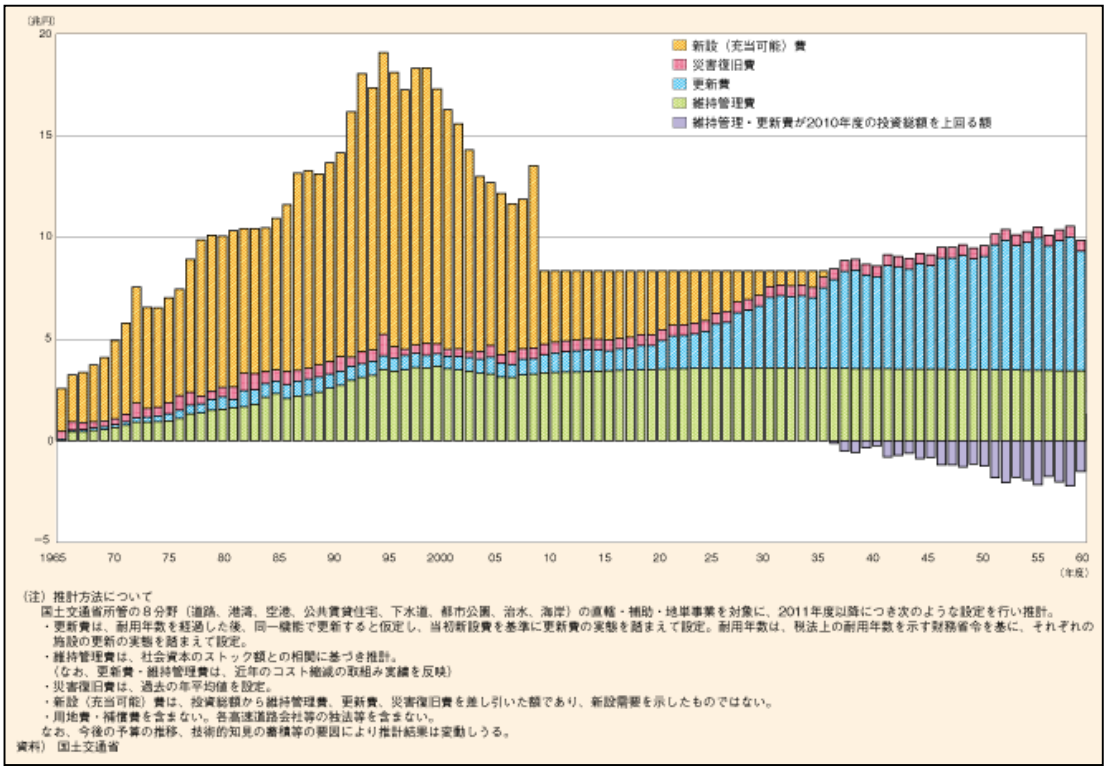
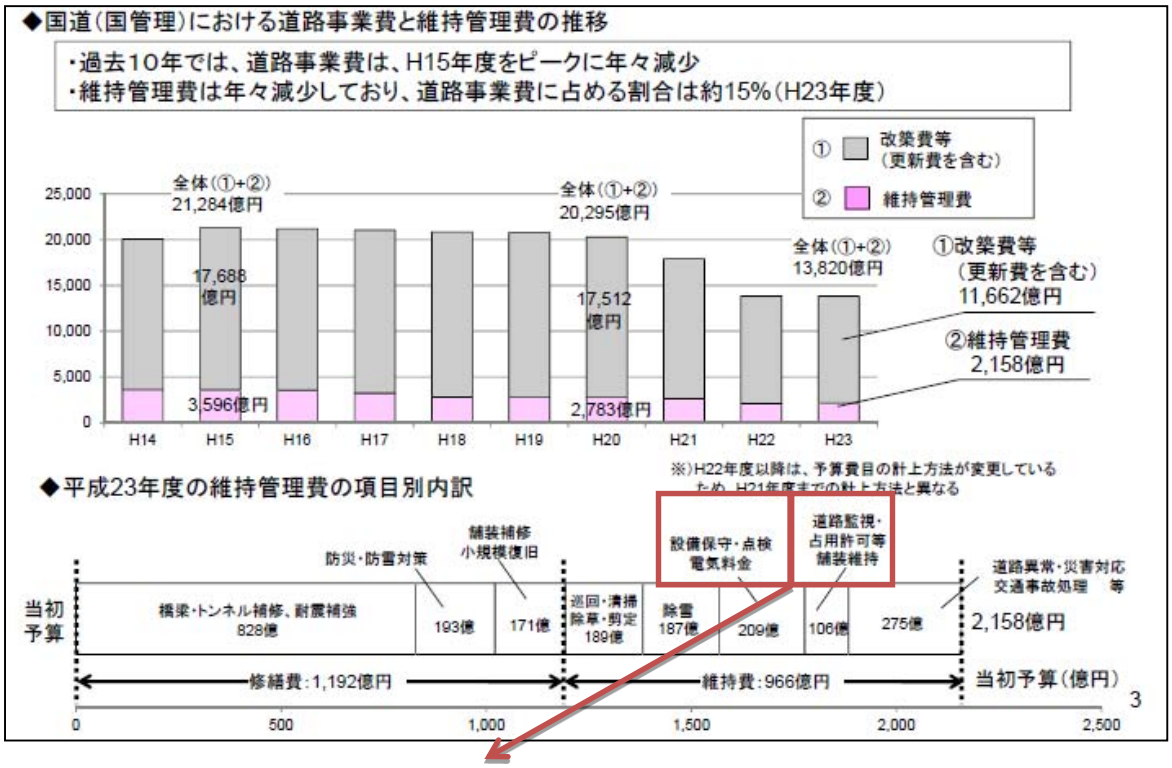


図２－１４　今後の社会インフラの維持管理費用の推移予測
（出所：国土交通省「国土交通白書」情報　（上記の推移グラフは国土交通白書に掲載））

これら維持管理費のうち、労務費の割合を算出する。
算出に当たっては、内訳のデータが把握できる「道路」の数値を用いる。



（（設備保守費）・・・道路監視・占用許可等・舗装維持＋設備保守・点検・電気料金）÷維持管理費＝（106 億円 ＋ 209 億円）÷ 2,158 億円＝　（315÷2,158）＝14.5%

・・・ 全国のインフラの設備保守費の詳細内訳が不明なため道路の設備保守費用割合を使用

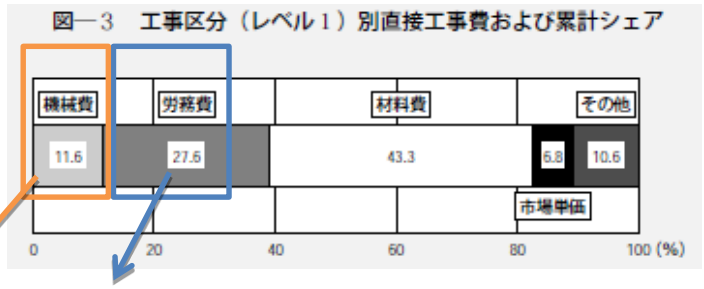
＊全国インフラの維持管理費 X×”道路を事例”とした監視や設備保守費用（14.5%）
＝全国インフラの設備保守費用（X×14.5）

・2013 年：　3.4 兆円×14.5%＝4,760 億円
・2020 年：　3.5 兆円×14.5%＝5,075 億円

図２－１５　道路の維持管理費の項目内訳

（出所：上記図”国道（国管理）における道路事業費と維持管理費の推移”及び”平成 23 年度の維持管理費の項目別内訳”については、「国土交通省資料（国道（国管理））の維持管理等の現状と課題について」より）

また建設工事に係る工事費の内訳を算出する。これは設備保守費の内訳が不明なためである。



（機械費 11.6%）　（労務費 27.6%）

建設工事に係る工事費の内訳は上図のとおりである。このうち労務費が 27.6%、機械費が 11.6%であり、これらがロボットに置き換わる部分と仮定した。

全国インフラの設備保守費用（”道路監視・占用許可等・舗装維持＋設備保守・点検・電気料金”）

14.5%×27.6～39.2%＝全国の設備保守費用の内の労務費等を算定

図２－１６　建設工事費の内訳

（出所：”上記図 工事区分別直接工事費及び累計シェア”については、国土交通省国土技術政策総合研究所 総合技術政策研究センター建設システム課 積算技術係長　杉山 純「積算実績データに基づく建設コストの分析」より）

以上の前提条件に基づき、社会インフラ全体のメンテナンスに係る労務費を算出した。

・2013 年：　4,760×27.6～39.2%＝1,314～1,866 億円
・2020 年：　5,075×27.6～39.2%＝1,400～1,989 億円

これらが、仮にロボットに置き換わると仮定した場合の 2020 年の潜在市場規模は次の通りである。

表２－１３　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場 （平均金額）	140～199 億円 （169.5 億円）	420～597 億円 （508.5 億円）	700～995 億円 （847.5 億円）

②橋梁におけるロボットの潜在市場規模

国土交通省によると日本の全ての橋梁は約 70 万橋（2m 以上）あるとされているが、その内、15m 以上で点検対象となっている道路橋については下表のとおりである。

表２－１４　日本の道路橋の数

	合計
道路橋の数（点検箇所数）	158,897 箇所
延長	9,936,166
現況別－交通不能	4,941
通行制限	5,574
箇所数　安全	148,382

（出所：国交省資料「橋梁現況総括表」／15m 以上の道路橋を対象）

日本の橋梁 1 本当たりの平均保全費用は不明なため、米国の費用に当てはめて試算した。また労務費の比率は 27.6%（国交省資料）とした。

（米国の橋梁 1 本当たりの平均保全費用：430 万円/本）

保全費用 430 万円/橋×158,897 箇所（橋長 15m 以上）=6,832.5 億円

（米国の橋梁 1 本当たりの平均保全費用：430 万円/本）

うち労務費の比率は 27.6%と仮定すると、

6,832.5 億円×27.6%＝1,885.8 億円≒1,886 億円

維持管理費につき、ロボットに置き換え可能な割合を 10、30、50%とした。

国交省の維持管理費につき、2016 年～17 年にかけて 2.9%増加（3.4 兆→3.5 兆円）となると予測されていることから 2020 年は下記のとおり。

表２－１５　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	194 億円	582 億円	970 億円

③トンネルにおけるロボットの潜在市場規模

国土交通省によると日本の全てのトンネルの箇所については下表のとおりである。

表２－１６　日本のトンネルの数

（単位：箇所，m）

道路種別 ＼ 内装区分		素地	吹付け	覆工	ブロック	パネル	タイル	その他	合計
高速自動車国道	箇所数	－	17	313	6	312	145	42	835
	延長	－	7,474	174,464	2,375	367,638	240,035	25,760	817,746
一般国道（指定区間）	箇所数	1	23	1,084	14	168	75	33	1,398
	延長	94	13,892	527,081	3,095	135,153	97,745	17,386	794,446
一般国道（指定区間外）	箇所数	42	166	1,998	23	67	29	53	2,378
	延長	14,241	67,728	840,271	9,899	66,107	32,416	24,225	1,054,887
一般国道	箇所数	43	189	3,082	37	235	104	86	3,776
	延長	14,335	81,620	1,367,352	12,994	201,260	130,161	41,611	1,849,333
主要地方道	箇所数	89	116	1,189	23	52	10	35	1,514
	延長	16,676	38,831	405,672	6,307	29,460	12,409	14,314	523,669
一般都道府県道	箇所数	71	122	708	11	46	23	45	1,026
	延長	6,779	27,066	208,367	2,203	21,863	13,090	21,240	300,608
都道府県道	箇所数	160	238	1,897	34	98	33	80	2,540
	延長	23,455	65,897	614,039	8,510	51,323	25,499	35,554	824,277
国・都道府県道	箇所数	203	427	4,979	71	333	137	166	6,316
	延長	37,790	147,517	1,981,391	21,504	252,583	155,660	77,165	2,673,610
市町村道	箇所数	397	333	1,402	79	114	26	198	2,549
	延長	27,067	39,741	277,532	13,760	40,794	5,781	22,636	427,311
一般道路	箇所数	600	760	6,381	150	447	163	364	8,865
	延長	64,857	187,258	2,258,923	35,264	293,377	161,441	99,801	3,100,921
合計	箇所数	600	777	6,694	156	759	308	406	9,700
	延長	64,857	194,732	2,433,387	37,639	661,015	401,476	125,561	3,918,667

（注）東日本大震災の影響により、市町村道の一部に平成22年4月1日時点のデータを含む。

表２－１７　日本のトンネルの数

（箇所、m）	合計
トンネルの数	9,700 箇所
延長	3,918,667m

（出所：　国交省資料「トンネル現況総括表」）

会計検査院が国土交通大臣に通知した「国が管理する国道のトンネルの維持管理について」の資料によりトンネルの定期点検費用について調査を実施しており、これらの数値（660万円/本）を用いた。

平成 23、24 両年度に、19 国道事務所等が実施した延べ 185 トンネルにおけるトンネル本体工の定期点検費用：12 億 2327 万余円（トンネル本体工の定期点検を含む施設点検業務の契約金額）

12 億 2327 万円÷185 箇所＝661.2 万円

→トンネルのメンテ費用：660 万円/本

9,700 箇所×660 万円/本＝640.2 億円

・640.02 億円×27.3%＝　174.7 億円（労務費：27.3%を使用）

上記の結果を用いて、ロボットに置き換え可能な割合をそれぞれ、10%、30%、50%で試算した。

表２－１８　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	18 億円	54 億円	90 億円

（ｄ）プラント分野

基本的には、前述の（ｂ）災害分野Ⅱ（原子力パワープラント）と同じ考え方で試算を行った。

使用したデータ等は主に、日本プラントメンテナンス協会が公表している資料である。

（主な使用データ）
＊2012 年度メンテナンス実態調査報告書（公益社団法人 日本プラントメンテナンス協会）のデータをベースに試算。
＊同報告書のアンケートは日本プラントメンテナンス協会会員事業場（製造装置を持つ事業場対象及び保守・エンジニアリング計事業場 863 件に発送。有効回答数：278 件（回収率 32.2%））
＊2011 年ベース

①プラントメンテナンスにおけるロボットの潜在市場規模

日本プラントメンテナンス協会が公表している保全費の割合は下表の通りである。

表２－１９　　製造業及び関連業種の保全費

	調査数	製品出荷額（億円）	保全費（億円）	保全費比率（%）
製造業全体	89	111,974	1,633	2.2
化学工業	28	36,323	869	3.1
石油・石炭製品製造業	2	*	*	*

（出所:日本プラントメンテナンス協会「2012 年度メンテナンス実態調査報告書」(2013.4)）

これを我が国の全製造業を対象にした場合、次のような試算になる。

表２－２０　製造業及び主要プラント業界における設備保全費の試算

工業統計-製品出荷額(METI)	出荷額（億円）		%		（億円）
製造業全体	2,850,232	×	2.2	＝	62,705
化学工業	258,916	×	3.1	＝	8,026
石油・石炭製品製造業	165,468	×	(3.1)	＝	5,130

（出所：工業統計（2011）－製品出荷額／日本プラントメンテナンス協会 報告書に掲載されているものを転載。但し、石油・世紀炭製品製造業は回答が秘匿されているため、化学工業の保全費を当てはめた）

上記の結果を用いて、2011 年度の保全費に占める労務費の割合を求める。

43.7%（2011 年）、40.7%（2010 年）

→40.7～43.7%をロボットに置き換え可能な費用＝労務費分の上限と仮定した。

表２－２１　保全費に占める労務費

工業統計-製品出荷額（METI）	（億円）		（%）		労務費（外注費）（億円）
製造業全体	62,705	×	40.7～43.7	＝	25,521～27,402
化学工業	8,026	×	40.7～43.7	＝	3,267～3,507
石油・石炭製品製造業	5,130	×	40.7～43.7	＝	2,088～2,242

表２－２２　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年の潜在市場（平均金額）	2,552～2,740 億円 2,646 億円	7,656～8,220 億円 7,938 億円	12,760～13,701 億円 13,230 億円

なお、日本プラントメンテナンス協会へのヒアリング結果等から、災害分野Ⅱ（原子力パワープラント）と同じく、今後のプラントメンテナンス費用の増加はあまり期待されないことなどから、2020 年の予測値は 2011 年現在と同等とした。

②政府等の公表資料による市場規模

a）内閣府推計

内閣府が取りまとめて閣議決定された「科学技術イノベーション総合戦略」（2013 年 6 月 7 日）によると、点検メンテナンスロボット関連産業の国内市場規模が約 2,000 億円になる見込み（2035 年時点）になると公表されている。

但し試算方法は公表されておらず不明である。

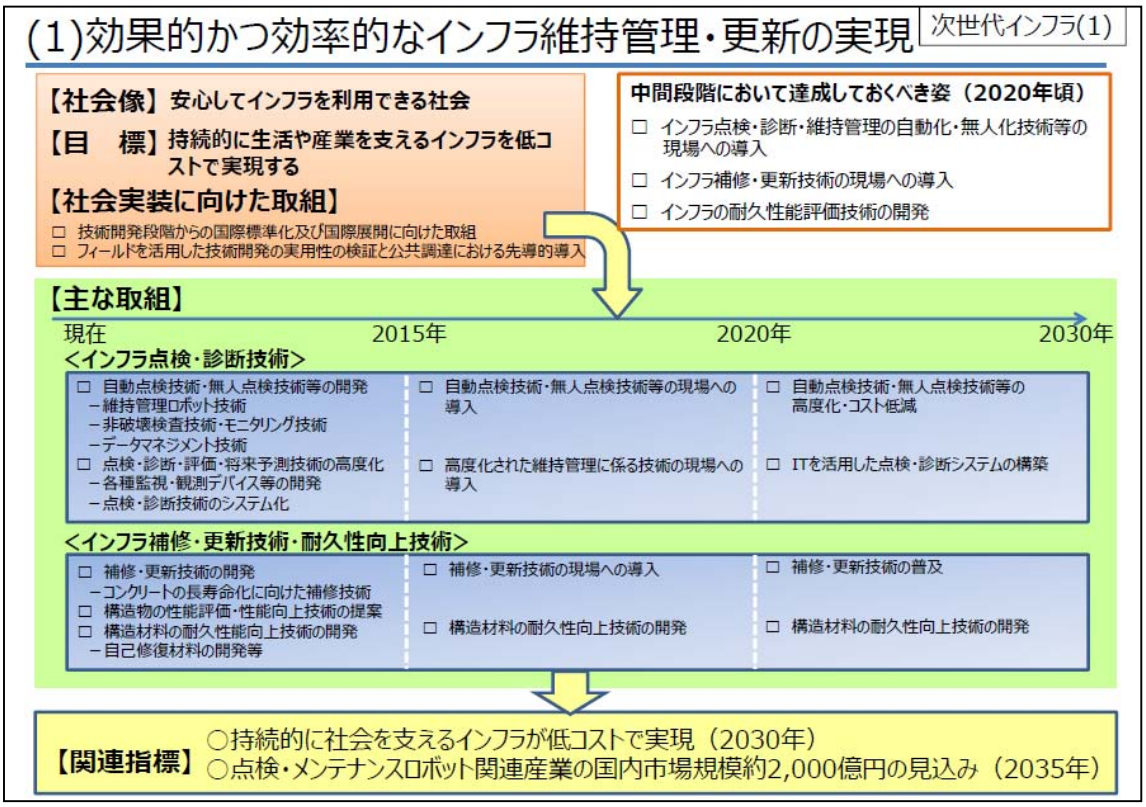


図２－１７　効果的かつ効率的なインフラ維持管理・更新の実現

（出所：内閣府「科学技術イノベーション総合戦略」（2013 年 6 月 7 日）－別表 科学技術イノベーション総合戦略 第二章 科学技術イノベーションが取り組むべき課題 工程表より）

この 2035 年に 2,000 億円の市場が形成されるシナリオに従い、2013 年を起点として 2035 年まで定額の伸びをプロットした場合、図に示すとおり、2020 年段階では 636 億円、2030 年段階で 1,545 億円となる見込みである。

なお、2013 年現在、点検メンテナンスロボットが一部活用されているが、市場形成されているとは言いがたいため、現在の市場はゼロとした。

・2020 年（将来）：　636 億円
・2035 年（将来）：　1,545 億円
（2013 年（現在）：　0 円と仮定）

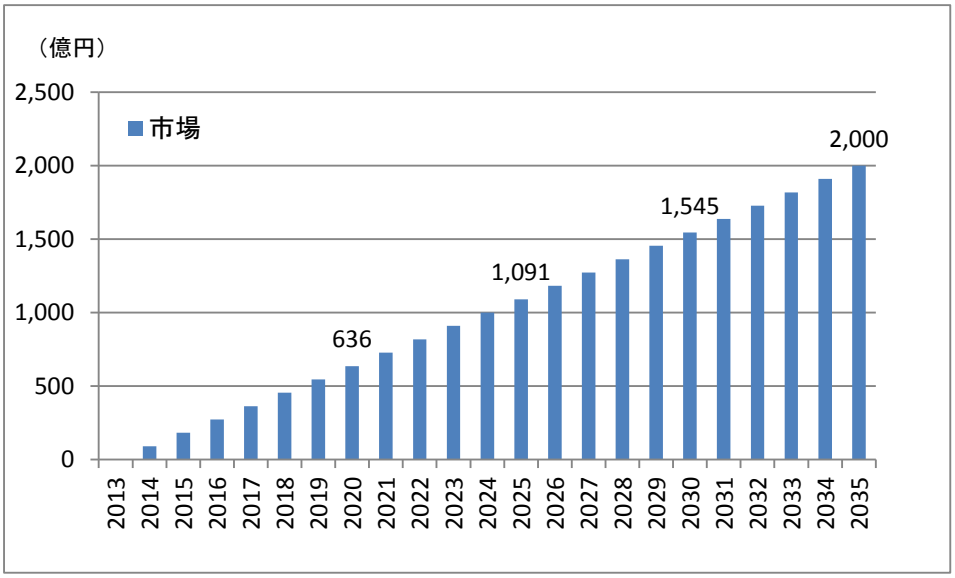


図２－１８　点検メンテナンスロボット関連産業の国内市場規模の推移（予測）
（出所：内閣府「科学技術イノベーション総合戦略」（2013 年 6 月 7 日）－別表 科学技術イノベーション総合戦略　第二章　科学技術イノベーションが取り組むべき課題 工程表に基づき作成。2035 年の 2,000 億円は内閣府資料による。上記グラフは神鋼リサーチ作成。）

b）日本再興戦略/経済産業競争力会議（METI）推計

日本再興戦略によると、インフラ点検・診断システムの世界の市場規模が 2 兆円になる見込み（2030 年時点）になると公表している。

（*「日本再興戦略」（事務局：経産省））

国内の重要インフラ・老朽化インフラの 20%はセンサー、ロボット、非破壊検査技術等の活用により点検・補修が高効率化。

点検・補修用センター・ロボット等の世界市場の 3 割獲得（2020 年）。

インフラ点検・診断システム＜世界の市場規模＞･･･世界 3 割獲得を目標

・センサー：0.5 兆円（現在）→10 兆円（2030 年）　※3 兆円（日本）

・モニタリング：0 円（現在）→20 兆円（2030 年）　※6 兆円（日本）

・ロボット：50 億円（現在）　→ 2 兆円（2030 年）　※6,000 億円（日本）

（単純合計：　32 兆円･･･9.6 兆円分を日本が獲得目指す）

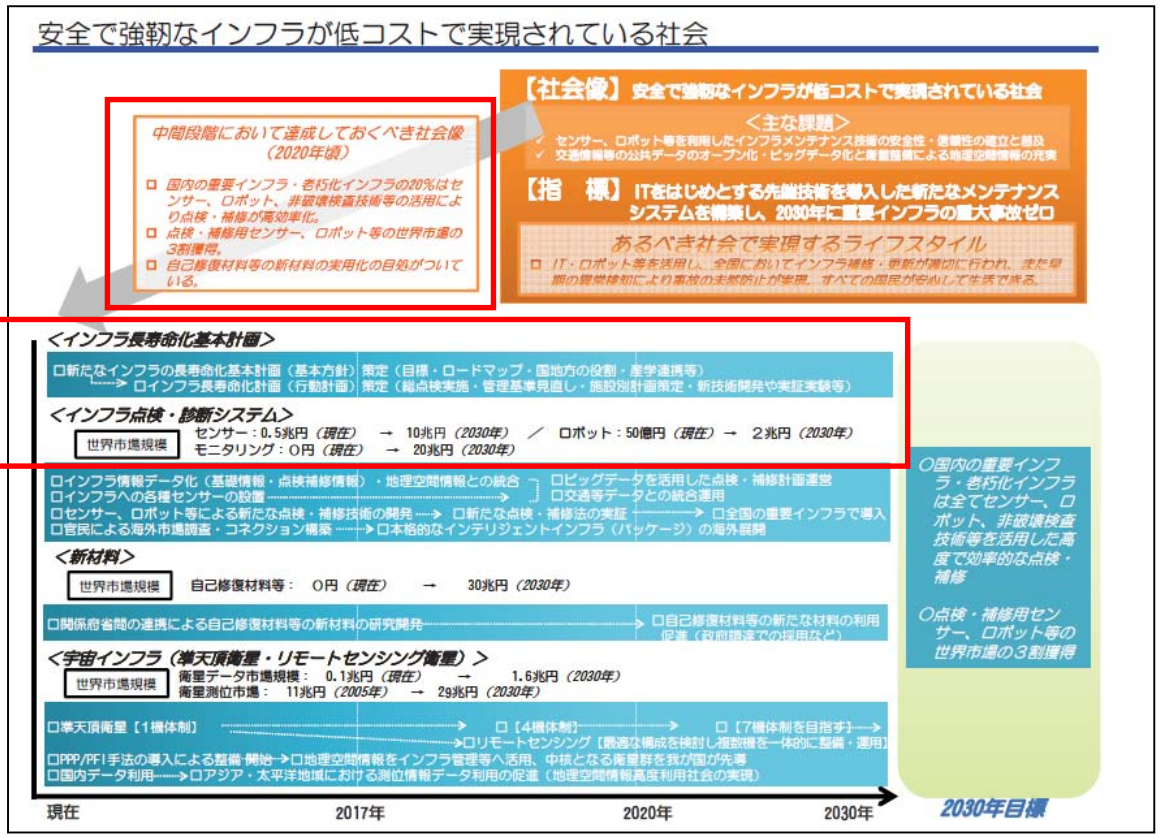


図２－１９　日本再興戦略に掲載されているロボット関連情報

（出所：「日本再興戦略（2013 年 6 月 14 日）－戦略市場創造プラン」資料）

（ｅ）農業分野（トラクタを対象）

①農業分野へのロボット技術の適用

農業分野におけるロボットの適用については、内閣府が取りまとめた「科学技術イノベーション総合戦略（2013 年 6 月 7 日）」では、本文中（P30～31）に下記のような記載があるが、具体的な数値についての情報はない。

（３）ＩＴ・ロボット技術等による農林水産物の生産システムの高度化

[工程表 地域資源（３）]

①取組の内容

この取組では、ＩＴやロボット等の工学技術を、ほ場・作物の管理、収穫、家畜の放牧管理等、様々な作業フェーズに導入し、農作業の省力化・効率化を図るとともに、ユビキタス環境制御システム等を活用して高品質農産物の安定生産、省エネ化等を可能とする。また、アグリインフォマティクス（ＡＩ）を活用し、農林水産業における匠の技やノウハウ（暗黙知）をデータベース化・規格化し、形式知に置換することにより、農林水産業技術の伝承の問題へ対応するとともに、収量予測や経営マネジメント支援へと活かし、高収量・高収益モデルを実現する。そのほか、林業再生として、木材生産のスマート化・認証化等による森林の公益的機能を考慮した生産・流通システムの開発、製材・木質材料製造工程の効率化を図る。また国際的な食料問題に貢献すべく、ウナギ、マグロ等の養殖について、飼育環境制御の高度化等により、天然稚魚に依存しない大規模な完全養殖システムを開発する。これらの取組により、働きやすく持続可能な農林水産業を持つ社会を実現する。

【関係省庁→内閣官房、総務省、外務省、文部科学省、農林水産省、経済産業省】

図２－２０　科学技術イノベーション総合戦略に掲載されているロボット関連情報
（出所：内閣府「科学技術イノベーション総合戦略（2013 年 6 月 7 日)」より）

現在～2015 年	2015～2020 年	2020～2030 年
□自動化技術の高度化（姿勢制御・障害物回避）、システム間のインターフェイス標準化、IT を活用した生産システムの高度化、ユビキタス環境制御システム開発 □低コスト・省力生産システムの大規模実証 □多様な業態にあわせた作業体系の普及	□トレーサビリティシステム・自動化技術の高度化、生産システム・操作インターフェイスの標準化、ユビキタス環境制御システムの開発 □低コスト・省力生産システムの大規模実証 □多様な業態にあわせた作業体系の普及	□低コスト・省力生産システムの大規模実証 □多様な業態にあわせた作業体系の普及 □ユビキタス環境制御システムの普及

図２－２１　科学技術イノベーション総合戦略（別表）に掲載されているロボット情報
（IT、ロボット技術等による生産システムの高度化について（抜粋））
（出所：内閣府「科学技術イノベーション総合戦略」（2013 年 6 月 7 日）－別表 科学技術イノベーション総合戦略 第二章 科学技術イノベーションが取り組むべき課題 工程表より）

なお、参考情報として、農林水産省ではロボットについて次年度（2014 年度）に 11 億円の内数の中で開発するための予算を計上している。

「民間活力を活かした研究の推進」（平成 26 年度 予算～ 11 億円の内数）

表２－２３　農林水産省の民間活力を活かした研究について係る次年度予算

４．農林水産物・食品の高付加価値化等の推進		
薬用作物等地域特産作物産地確立支援事業 （４億円）	薬用作物等の産地形成の促進 【農林水産省】 ・地域ごとの気象条件等に適した品種の選定や栽培マニュアルの作成 ・栽培技術確立のための実証ほ場の設置や農業機械の改良等	【厚生労働省】 ・漢方薬メーカーの需要情報とりまとめ、提供 ・薬用作物の新たな育種、栽培及び生産技術等に関する研究推進
民間活力を活かした研究の推進 （11億円）	医療、ＩＴ、ロボット工学等異分野の革新的な技術を農林水産・食品分野へ活用する研究開発を促進 【農林水産省】 ・異分野の革新的な技術を活用する研究開発を促進	【内閣府ほか】 ・科学技術イノベーション総合戦略に基づき、府省連携の下、医農、理農、農工、薬農などの分野融合研究を支援

（出所：農林水産省 「平成 26 年度 農林水産概算決定の概要」（2013 年 12 月）－他省庁との主な連携事業について）

②トラクタからの置き換えによる潜在市場規模

我が国の 2010 年のトラクタ普及台数は 168 万台であり、2000 年からみて減少傾向が続いている。これは就農者が減少していることもあるが、農地の大規模化に伴うトラクタの大型化（大出力化）も影響していると思われる。

この 2000 年から 2010 年までのトラクタの平均減少率（1.7%/年）を用いて、2020 年のトラクタ普及台数を予測したところ図のとおり 141 万台となった。

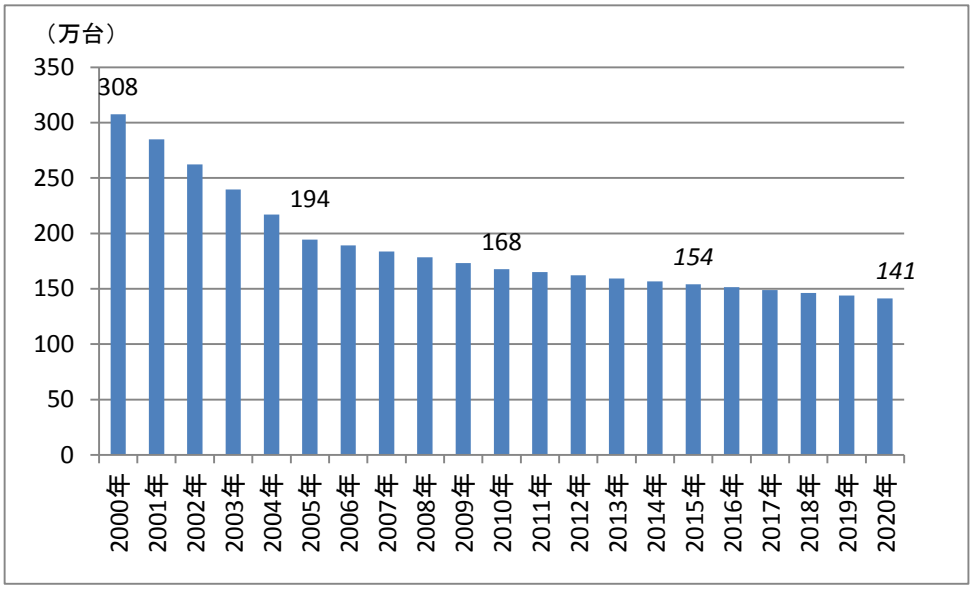


図２－２２　日本国内のトラクタ普及台数と予測

（出所：農業機械統計年鑑 2014（農林水産省統計）、FAO STAT／注：2000～05 年までは歩行用トラクタも含めており、2006 年以降は乗用トラクタ分のみとなっている。）

a) 国内のトラクタ普及台数予測と生産台数

2010 年の国内のトラクタ普及台数は 168 万台であり、図表のとおり 2020 年は 141 万台である。

2010 年の普及台数：　168 万台　（168 万台×180 万円＝3 兆 240 億円）

2020 年の普及台数予測：　141 万台　（141 万台×180 万台＝2 兆 5,380 億円）

また機械統計年報から、現在のトラクタの生産台数（20～30ps のもの）と生産金額を示すと下記のとおりである。また 1 台当たり及び馬力当たりの金額も次に示す

・H22　114,028 百万円÷83,507 台＝172 万円/台　172÷30ps＝5.7 万円/ps

・H24　165,197 百万円÷86,764 台＝190 万円/台　190÷30ps＝6.3 万円/ps

H24、H22 の馬力当たりの金額について上記の平均をとると下記のようになる。

・（5.7 万円＋6.3 万円）÷2＝6 万円/ps

30PS のトラクタで試算＝6 万円×30PS＝180 万円/台

トラクタの耐用年数を 7 年とすると、年間更新（＝生産台数）されるトラクタ数は下記のとおりである。また金額については 30ps のものを使用した。

・168 万台÷7 年＝24 万台/年（2010 年）　24 万台×180 万円＝4,320 億円
・141 万台÷7 年＝20 万台/年（2020 年）　20 万台×180 万円＝3,600 億円

b) 数値の補正について

但し、2010 年の実際にはトラクタの生産台数は、15.6 万台程度である。これは耐用年数 7 年を超えて償却済みのトラクタを使用している農家も多いためと考えられる。

そのため現時点での生産台数から耐用年数を試算してみると、2010 年の普及台数 168 万台÷2010 年の生産台数 16.5 万台＝10.2 年となる。この値を使い再計算した場合、2020 年の年間更新されるトラクタ数（予測）は次のとおりである。また金額も平均 140 万円/台であることからこの数値を使用する。

・168 万台÷10.2＝15.6 万台　2,205 億円（実績）
・141 万台÷10.2＝13.8 万台　13.8 万台×140 万円＝1,932 億円（予測）

上記の数値から 10、30、50%でロボットに置き換え可能と仮定した場合は次のとおりである。

・2020 年：　1,932 億円×10%＝183.4 億円

表２－２４　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	193 億円	580 億円	966 億円

（３）　米国の特殊環境用ロボットの市場予測

（ａ）災害分野Ⅰ（自然災害等）

米国の自然災害関係の予算等については、米国国土安全保障省（U.S. Department of Homeland Security ＝DHS)の一部である米国連邦緊急事態管理庁（Federal Emergency Management Agency＝FEMA）の予算が公表されている。

2011~2013 会計年度の総予算等は次の通りである。

図２－２５　FEMA の予算について

・2011 会計年度: 総予算 104 億 5,000 万ドル(約 8,300 億円*) （内、給与・経費 10 億 6,800 万ドル、約 850 億円、10.2%） （災害救済関係 5,645 人 55.8%、その他 4,465 人 44.2%）
・2012 会計年度: 総予算 139 億 2,300 万ドル（約 1 兆 1,150 億円） (内、給与・経費 10 億 3,100 万ドル、約 826 億円、7.4%) （災害救済関係 4,852 人 48.4%、その他 5,175 人 51.6%） ※2012 年度の主要支出は、災害救済に 70 億 7,600 万ドル（約 5,670 億円、50.9%）、消防支援に 6 億 4,100 万ドル（約 513 億円、4.6%）であった。
・2013 会計年度予想: 総予算 135 億 6.000 万ドル（約 1 兆 3,153 億円） (内、給与・経費 7 億 8,900 万ドル、約 765 億円、5.8%) (災害救済関係 4,852 人 48.4%、その他 5,181 人 51.6%）

*使用為替レート：2010 年平均　US$≒¥87.79
2011 年平均　US$≒¥79.63
2012 年平均　US$≒¥80.12
2013 年平均予測 US$≒¥97

FEMA の 2012 年度の給与・経費の内、災害救済関係の労務費は約 400 億円（約 826 億円×48.4%)。ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、結果は次の通りである。

・10%の場合　400 億円×10%＝ 40 億円
・30%の場合　400 億円×30%＝120 億円
・50%の場合　400 億円×50%＝200 億円

労務費は 2011~2013 年の 3 ヶ年で横ばい～微減の傾向であり、今後、増加される明確な要因も見当たらないため、2012 年の数値を 2020 年の潜在市場規模とした。

表２－２４　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	40 億円	120 億円	200 億円

（ｂ）災害分野Ⅱ（原子力パワープラント）

①関連機関の予測

WinterGreen Research,Inc では、原子力用ロボットについて次のように予測（2013 年 9 月）している。

・2012 年　5,500 万ドル（約 44 億円）

・2019 年　11 億ドル（約 1,100 億円）(US$=¥100)

②当社の試算による潜在市場規模

米国エネルギー省(Department of Energy=DOE)のエネルギー情報管理局(Energy Information Administration=EIA)では、毎年米国の発電に関する情報を公表している。

2013 年 11 月公表の「Electric Power Monthly with Data for September 2013」によれば、

・全米の全発電量（千 MWh)

2010 年 4,125,060　2011 年 4,100,141　2012 年 4,054,485

・全米の原子力発電量（千 MWh）

2010 年 806,968　2011 年 790,204　2012 年 769,331

となっており、全発電量に占める原子力発電量の割合（%）は以下のとおりである。

2010 年　19.56%　2011 年　19.27%　2012 年　18.97%

一方、全米の電力収入（百万ドル）は次のとおりである。

2010 年 368,906　2011 年 371,049　2012 年 363,705

したがって、全発電量に占める原子力発電量の割合から原子力の電力収入（百万ドル）を試算すると、次のようになる。

・2010 年 72,158（6 兆 3,348 億円）

・2011 年 71,501（5 兆 6,936 億円）

・2012 年 68,995（5 兆 5,279 億円）

また、あとの「（ｄ）プラント分野」で述べる世界的化学メーカーである Dow Chemical の 2011 年の保全費用は、売上高の 3.57%であることから、この比率を採用すると、2011 年の原子力発電所の保全費は、約 2,030 億円となる。

日本の労務費割合をこれに当てはめると、米国のロボットに置き換え可能な労務費は、2,030 億円×40%≒810 億円となる。

このうち、ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、以下のように試算される。

10%の場合　810 億円×10%＝ 81 億円

30%の場合　810 億円×30%＝243 億円

50%の場合　810 億円×50%＝405 億円

2020 年を予測すると、原子力発電量は 2010 年、2011 年、2012 年と毎年約 2.0～2.5%減少しており、仮に 2012 年から 2.0%ずつ 9 年間減少を続けた場合、18%減少となり、2020 年の原子力発電量（千 MWh）は、790,204（2011 年）×82%≒647,967 となる。また、原子力の電力収入（百万ドル）も、71,501（2011 年）×82%≒46,687（為替レートを 2011 年平均の$≒¥79.63 と同じとした場合、4 兆 6,687 億円）となる。

この電力収入の 3.57%を保全費、その 40%を労務費とすると、

4 兆 6,687 億円×3.57%×40%≒667 億円

がロボットの置き換え可能な労務費となる。

ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、以下のように試算され、2011 年の試算結果とほとんど変わらない。

・10%の場合　667 億円×10%＝ 67 億円
・30%の場合　667 億円×30%＝200 億円
・50%の場合　667 億円×50%＝334 億円

表２－２５　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	67 億円	200 億円	334 億円

因みに、参考として為替レートを$≒¥100 とした場合は、次のような試算結果になる。

原子力の電力収入（百万ドル）は、71,501（2011 年）×82%≒58,630（$≒¥100 として、5 兆 8,630 億円）となる。

この電力収入の 3.57%を保全費、その 40%を労務費とすると、

5 兆 8,630 億円×3.57%×40%≒837 億円

がロボットの置き換え可能な労務費となる。

ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、以下のように試算され、2011 年の試算結果とほとんど変わらない。

・10%の場合　837 億円×10%＝ 84 億円
・30%の場合　837 億円×30%＝250 億円
・50%の場合　837 億円×50%＝418 億円

表２－２６　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	84 億円	250 億円	418 億円

（ｃ）社会インフラ（橋梁・トンネル）

①橋梁及びトンネルにおけるロボットの潜在市場規模

関連する情報として、米国運輸省（U.S. Department of Transportation ＝DOT)に属する連邦高速道路庁（Federal Highway Administration ＝FHWA)が、各州が全国橋梁点検プログラムに従って実施した点検結果の報告を受け、橋梁台帳（The National Bridge Inventory (NBI)を整理し、全国の高速道路の橋梁&トンネルに関する保全予算の配分を行っている。

「Transportation Asset Management Case Studies」において、Idaho, Michigan and Virginia 3 州の橋梁状況と点検を含む保全予算（連邦予算と州予算）を示している。また、橋梁台帳から Structurally Deficient(構造欠陥橋梁)、Functionally Obsolete (機能陳腐橋梁)の数が把握でき、それらの橋梁が保全対象の橋梁と推測される。

・Idaho 州：保全予算 48 百万ドル（2010 年度）（42 億 1,400 万円）
　　対象橋梁数　826　（単純平均保全予算　510 万円）
・Michigan 州：185 百万$(2011 年度）(147 億 3,150 万円)
　　対象橋梁数　3,153　（単純平均保全予算　467 万円）
・Virginia 州：172 百万$(2011 年度）（136 億 9,630 万円）
　　対象橋梁数　3,602　（単純平均保全予算　380 万円）

これより、１橋梁の保全予算平均は、326 億 4,180 万円／7,581 橋≒430 万円

2011 年の全国の対象橋梁数は 157,303 橋。

従い、@430 万円×157,303 橋≒6,760 億円。

日本の建設工事の労務費割合 27.6%を使用すると、労務費は、

6,760 億円×27.6%≒1,866 億円

このうち、ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、以下のように試算される。

・10%の場合　1,866 億円×10%≒187 億円
・30%の場合　1,866 億円×30%≒560 億円
・50%の場合　1,866 億円×50%≒933 億円

FHWA は、21 世紀 Act 推進に向けた FY2013 & FY 2014 の Highway Program 関連予算を公表しており、そのうち、Surface Transportation Program （Replacement, rehabilitation, resurfacing, restoration, or preservation of, or operational improvements to, bridges not on Federal-aid Highways）に、FY2013 が 100.1 億ドル、FY2014 が 100.9 億ドルを計上している。2013 年度と 2014 年度の伸びはほとんどないため、2020 年も同様と見る。

表２－２７　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	187 億円	560 億円	933 億円

（ｄ）プラント分野

①化学プラント向けメンテナンスロボットの潜在市場規模

世界的化学メーカーである Dow Chemical の 2011 年のアニュアルレポートによれば、総売上高は 599 億 8,500 万ドル（約 4 兆 7,766 億円）、保全（メンテナンス）費用は、製造コストの 4%≒2,140 百万ドル（1,704 億円、売上高比 3.57%）である。

また、2011 年の Dow Chemical の米国内の化学プラントの総生産能力は、11,343 千トンである。従い、生産能力 1 千トン当たりの保全費用は、1,704 億円／11,343 千トン≒1,500 万円／千トンとなる。

一方、2011 年の米国内の全化学メーカーのプラント生産能力は、145,622 千トンである。

ここで、Dow Chemical の保全費用を参考にすると、米国内の全化学メーカーの保全費用は 1,500 万円×145,622 千トン≒2 兆 1,840 億円となる。

保全費に占める人件費の割合は不明のため、日本の割合を適用すると、米国内の全化学メーカーの保全費に占める労務費は、

2 兆 1,840 億円×40%≒8,736 億円となる。

このうち、ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、2011 年の潜在市場規模は次のように試算される。

・10%の場合　8,736 億円×10%≒874 億円
・30%の場合　8,736 億円×30%≒2,620 億円
・50%の場合　8,736 億円×50%≒4,368 億円

2020 年を予測すると、米国内の全化学メーカーの 2016 年末までの新増設計画によるプラント生産能力は、163,384 千トンと予想されており、2011 年時点の Dow Chemical の保全費用を参考にすると、米国内の全化学メーカーの保全費用は 1,500 万円×163,384 千トン≒2 兆 4,500 億円となる。

2011 年と同様の前提で、米国内の全化学メーカーの保全費に占める労務費は、

2 兆 4,500 億円×40%≒9,800 億円となり、ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、2020 年の潜在市場規模は次のように試算される。

・10%の場合　9,800 億円×10%≒980 億円
・30%の場合　9,800 億円×30%≒2,940 億円
・50%の場合　9,800 億円×50%≒4,900 億円

表２－２８　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	980 億円	2,940 億円	4.900 億円

②全製造業向けメンテナンスロボットの潜在市場規模

米国商務省経済分析局(U.S.Bureau of Economic Analysis)の公表データ「GDP-by-industry & Input-Output 2011」によると、2011 年の製造業全体の Output 生産高は、5 兆 4,195 億ドル（431 兆 5,548 億円）である。

このデータを用いて、上記①で行った試算と同様の考え方で試算する。

Dow Chemical の保全費用は売上高の 3.57%であり、仮にこの比率を適用すると、製造業全体の保全費用は、431 兆 5,548 億円×3.57%≒15 兆 4,065 億円となる。

保全費に占める労務費比率 40%をすると、15 兆 4,065 億円×40%≒6 兆 1,626 億円となり、このうち、ロボットに置き換わる割合を 10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、2011 年の潜在市場規模は次のように試算される。

・10%の場合　6 兆 1,626 億円×10%≒6,163 億円
・30%の場合　6 兆 1,626 億円×30%≒1 兆 8,488 億円
・50%の場合　6 兆 1,626 億円×50%≒3 兆 813 億円

2020 年を予測すると、全製造業の中で今後、成長が予測されている分野やその要因等が明確でないため、2011 年の潜在市場規模をそのまま 2020 年の潜在市場規模とした。

表２－２９　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	6,163 億円	1 兆 8,488 億円	3 兆 813 億円

（ｅ）農業分野（トラクタを対象）

米国の農機普及台数は 2002 年に近年のピークである 459 万台以降、2007 年に 439 万台と年々減少傾向になっている。

農地　41,126 万 ha　（2011 年）

耕地　16,016 万 ha　（永年作物地 260、永年採草・放牧地 24,850）

トラクタ普及台数：　4,389,812 台（2007 年　FAO STAT）

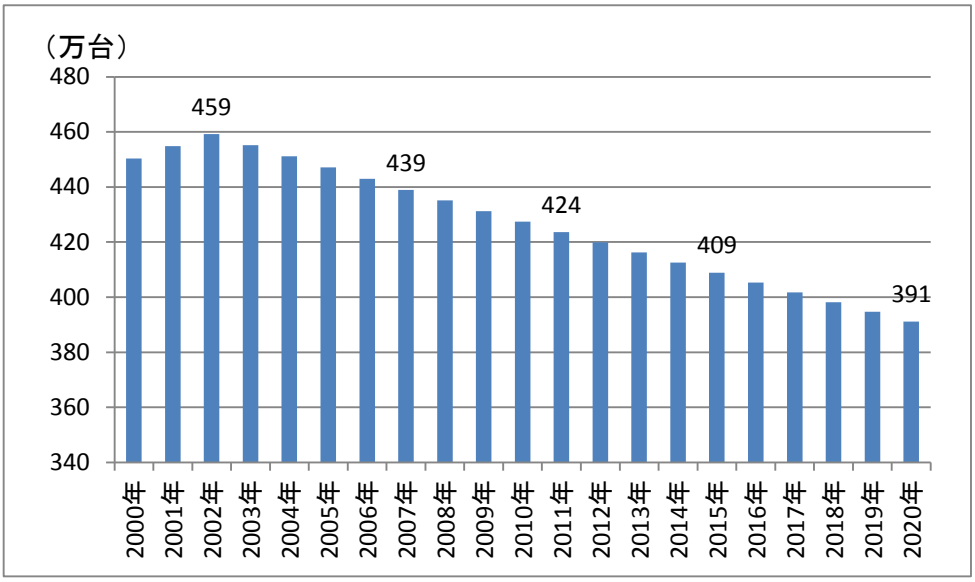


図２－２６　米国国内のトラクタの普及台数と予測

（出所：FAO STAT、農林水産省 HP／（注）2007 年までは実績。それ以降は 2003~2007 年と同じ割合で減少していくと想定。）

トラクタの普及台数を 2002～2007 年と同じ割合と想定すると、2020 年は 391 万台となる。耐用年数は 9 年であるため、年間ベースでは 2007 年は 47.1 万台/年、2020 年は 43.4 万台/年となる。

また、価格は 200ps のもので 1,760 万円の情報がわかっている（次頁参照）。

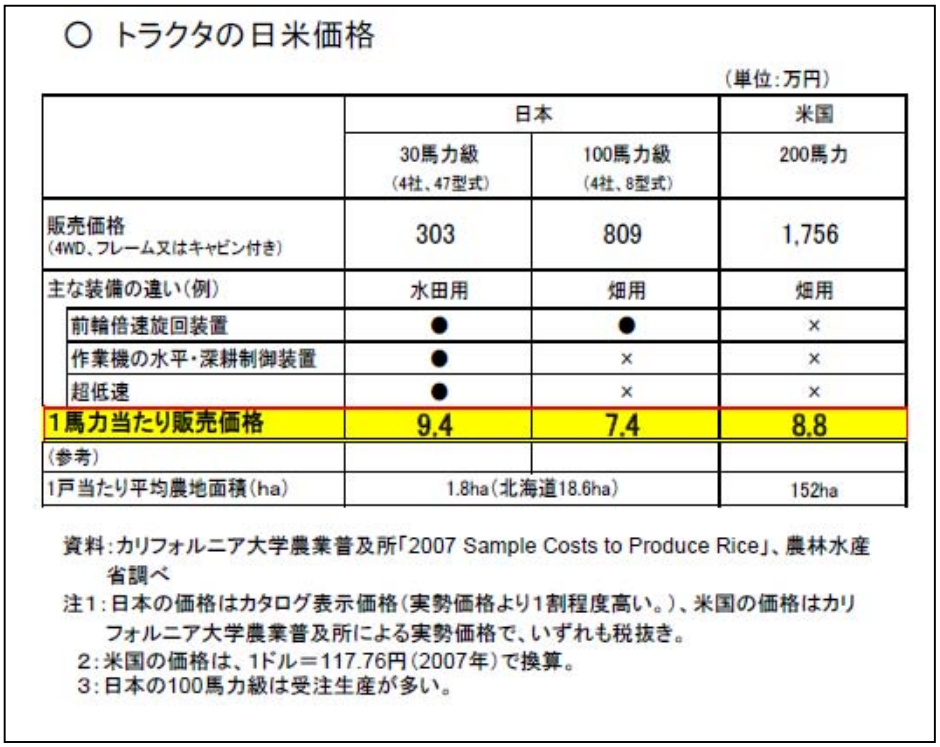
一方、2011 年の大型トラクタ（40ps 以上）の販売台数は 9 万台である（産機工シカゴレポート）。

仮にこの 9 万台の価格を 1,760 万円/台とおいた場合、市場規模は 1 兆 5,840 億円となる。

さらに、2020 年の販売台数を 2011 年と同じ割合と仮定した場合、販売台数は 8.3 万台となる。価格を同じ 1,760 万円/台とおいた場合、2020 年の市場規模は、1 兆 4,608 億円となり、これに置換率（10%,30%,50%）をかけた潜在市場規模は次の通りとなる。

表２－３０　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	1,461 億円	4,382 億円	7,304 億円



○ トラクタの日米価格

（単位：万円）

	日本		米国
	30馬力級（4社、47型式）	100馬力級（4社、8型式）	200馬力
販売価格（4WD、フレーム又はキャビン付き）	303	809	1,756
主な装備の違い（例）	水田用	畑用	畑用
前輪倍速旋回装置	●	●	×
作業機の水平・深耕制御装置	●	×	×
超低速	●	×	×
1馬力当たり販売価格	**9.4**	**7.4**	**8.8**
（参考）			
1戸当たり平均農地面積（ha）	1.8ha（北海道18.6ha）		152ha

資料：カリフォルニア大学農業普及所「2007 Sample Costs to Produce Rice」、農林水産省調べ
注1：日本の価格はカタログ表示価格（実勢価格より1割程度高い。）、米国の価格はカリフォルニア大学農業普及所による実勢価格で、いずれも税抜き。
2：米国の価格は、1ドル＝117.76円（2007年）で換算。
3：日本の100馬力級は受注生産が多い。

図２－２７　日米のトラクタ価格（参考情報）

（出所　農林水産省「農業機械、肥料、農薬に係るコスト低減について（2008 年 4 月）」資料より）

（４）　ドイツの特殊環境用ロボットの市場予測

（ａ）災害分野Ⅰ（自然災害等）

災害分野に関して、直接、該当する情報は見当たらなかった。
関連情報としては、次のようなものがある。

- ドイツでは、自然災害・人的災害時に、民間人保護を所管する連邦の官庁は、連邦内務省及びその下の連邦住民保護・防災支援庁（Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe = BBK）であるが、州当局と補完し合う協力体制がとられている。
  また、非常時又は災害時に出動する人的資源は、市町村の消防団、連邦技術支援隊（Bundesanstalt Technisches Hilfswerk）、ドイツ赤十字社等が担っている。
  2012 年ドイツ連邦政府部門別予算案（支出）では、2011 年の実績見通しと対比した各省の 2012 年予算案が示されているが、内務省連邦住民保護・防災支援庁の実績見通しや予算案の情報はなく、ロボット化推定はできない。

- EU では、自然災害に応答し、かつヨーロッパ内の災害に襲われた地方へヨーロッパの結束を示すために、2002 年に欧州連合団結基金(The European Union Solidarity Fund = EUSF)が設立され、2013 年まで 23 のヨーロッパ諸国の洪水、山火事、地震、嵐及び干ばつ等 56 の災害に 35 億 7,500 万ユーロ以上の支援が実行された。EUSF 資金予算は年間 10 億ユーロ（ユーロ≒¥130 として、1,400 億円）。
  一方、欧州委員会（The European Commission）の人道的援助と市民プロテクション総局 ECHO（The European Commission's Humanitarian aid and Civil Protection Directorate General ）は、EU の境界を超えて DIPECHO (Disaster Preparedness) Programme に従って災害犠牲者に迅速で有効な支援を実施。1998 年から 2011 年まで総額 2 億 5,500 万ユーロ（ユーロ≒¥111 として 283 億円)の災害対策費を支給している。

上記の金額は、いずれも EU としての災害時の支援金であり、災害分野のロボット化を推定するための数値としては使用するのは難しい。また、その他の有用情報は見当たらない。

（ｂ）災害分野Ⅱ（原子力パワープラント）

ドイツは 2013 年現在、9 基の原子力発電所が稼働しているが、2023 年までに稼働中の原子力発電所の全ての閉鎖を予定している。

（一般社団法人 日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発」（2013 年 7 月））

このため、今後、市場として可能性は低いと考えられる。

仮に、日本の数値を用いて 1 基当たり 17 億円/年の保全費用がかかるとした場合、

9 基×17 億円＝153 億円/年の潜在市場規模が考えられるが、2023 年までに全て閉鎖されるため、ロボットに置き換えられる可能性は低いと思われる。

ただし、廃炉・撤去まで時間がかかる場合には、保全用として導入の可能性はゼロではないと思われる。

（ｃ）社会インフラ（橋梁・トンネル）

①橋梁におけるロボットの潜在市場規模

ドイツ連邦道路研究所（BASt）によると、ドイツの橋梁数は下記のとおりである。

橋梁数：　ドイツの道路橋　3.8 万橋　（橋梁の約 7 割が PC 橋）

ドイツの橋梁 1 本当たりの平均保全費用は不明なため、米国の費用を用いた。また労務費の比率は日本の割合（国交省資料）を適用した。

保全費用 430 万円/橋×38,000 箇所＝1,634 億円

（米国の橋梁 1 本当たりの平均保全費用：430 万円/本）

うち労務費の比率を 27.6%（日本国交省）と仮定すると、

1,634 億円×27.6%＝450.9 億円＝451 億円

維持管理費につき、ロボットに置き換え可能な割合を 10、30、50%とした。

表２－３０　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	45.1 億円	135.3 億円	225.5 億円

②トンネルにおけるロボットの潜在市場規模

該当する資料は見当たらない。

（ｄ）プラント分野

ドイツの石油化学プラントについて 2011 年現在、3068 万ｔの生産能力がある。今後 2017 年までにポリ塩化ビニル（PVC）設備が 5.9 万ｔ増強予定だが、その他の設備が停止することから 2011 年比▲74.1 万ｔ減少の 2,993.9 万ｔ（2017 年）になると予測されている。

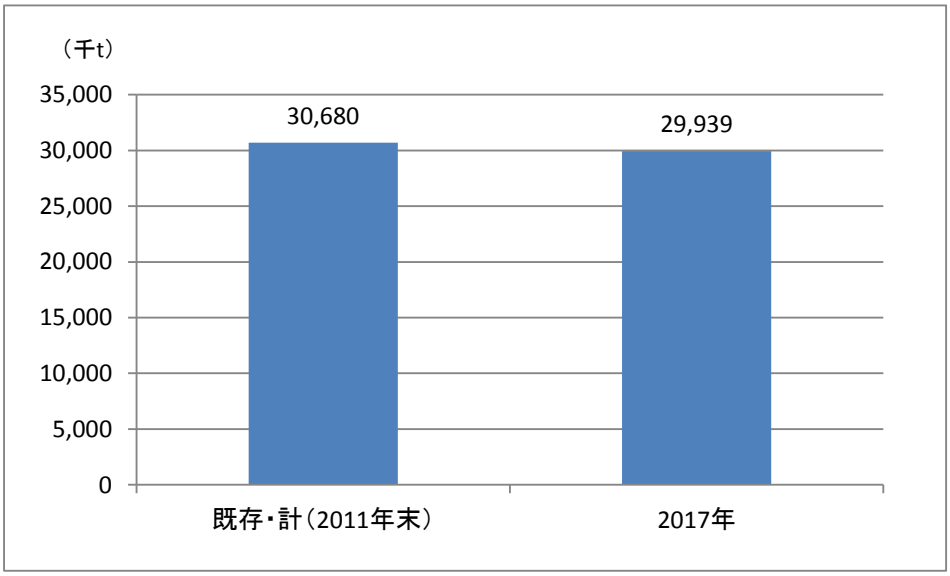


図２－２８　ドイツの石油化学プラント生産能力の推移

（出所：経済産業省　「世界の石油化学製品の需給動向」より」（2013 年 4 月））

ドイツの石化プラントの保全費の試算については次のとおりである。なお、保全費用等が不明なため米国の Dow Chemical の保全費用を用いる。

米国の Dow Chemical の 1 千ｔ当たりの保全費用：1704 億円÷11343 千ｔ＝1500 万円/千ｔ（1t＝1.5 万円）を用いてドイツの石化プラントの保全費を試算すると、次の通りである。

（ドイツの石化プラントの保全費）

・2011 年：　30,680 千ｔ×1500 万円＝4602 億円

・2017 年：　29,939 千ｔ×1500 万円＝4490.9 億円≒4,491 億円

一方、人件費は、日本の割合を適用して試算すると、次のようになる。

（ドイツの石化プラントの人件費）

・2011 年：4,602 億円×40%＝1,840.8 億円＝1,841 億円

・2017 年：4,491 億円×40%＝1,796.4 億円＝1,796 億円

ロボットの置き換えを、10%、30%、50%の 3 ケースで見ると、2020 年の潜在市場規模は次のように試算される。

表２－３１　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	180 億円	540 億円	900 億円

（ｅ）農業分野（トラクタを対象）

近年のピークは、2000 年に 99 万台をつけたあと、減少傾向をたどり 2009 年に 68 万台となっている。過去 9 年間は年平均 3%の割合で減少していることから、同じ割合で 2010 年以降も減少していくものと想定した。

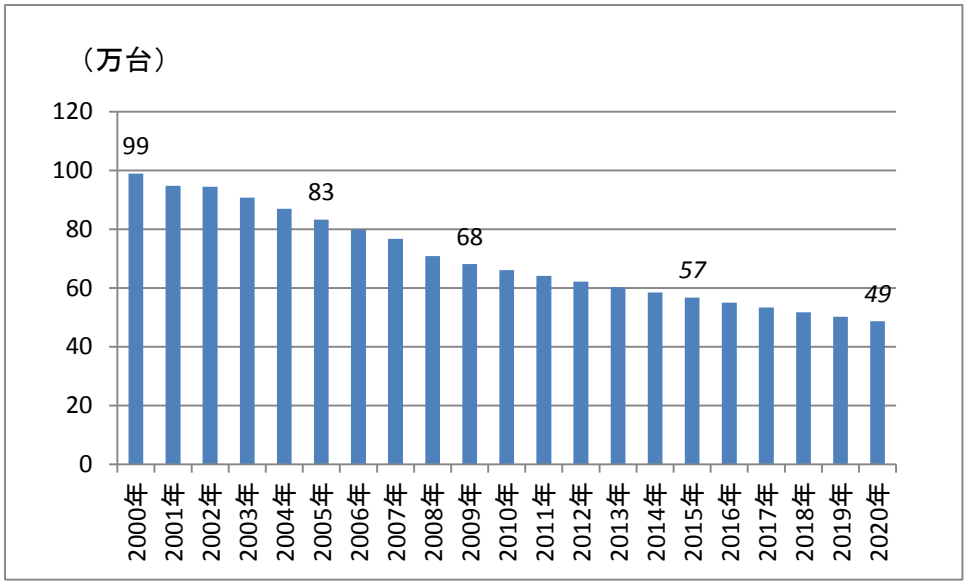


図２－２９　ドイツ国内のトラクタの普及台数と予測

（出所：FAO STAT／（注）2009 年までは実績。それ以降は 2000~2009 年と同じ割合で減少していくと想定。）

2009 年　681,200 台　　2020 年 490,000 台

・日米の農機の価格と同等とする。1 台 180 万円（30PS の場合）。

2009 年：1.23 兆円　　2020 年　8,820 億円

償却年数：7 年（日本の耐用年数を仮に置く）

2007 年　97,314 台/年　　2020 年　70,000 台/年

1,752 億円　　1,260 億円

表２－３２　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	126 億円	378 億円	630 億円

（５）　中国の特殊環境用ロボットの市場予測

（ａ）災害分野Ｉ（自然災害等）

直接、該当する情報は見当たらなかった。

中国のサービスロボットに関する情報としては、第 12 次 5 ヶ年計画の中の科学技術発展計画（「国家“十二五”科学和技术发展规划」2011 年 7 月 4 日）においてハイテク製品製造技術の国際競争力を強化するテーマの中にサービスロボット（服務機器人）が掲載されている。

また、同国の科学技術部が 2012 年 4 月 1 日に通知した「服务机器人科技发展“十二五”专项规划」ではサービスロボットに関する技術開発方針や標準化の推進、今後の取組等について記述されている。同通知では今後の目標として十二五計画期間中に新たに 5～10 種類のサービスロボットを開発すること、100 以上の特許と取得すること、公共安全に関するロボットを 10 都市以上で運用し安全性の実証を行うこと、コア部品の国産化、サービスロボットの研究拠点の設置等が挙げられている。

しかしながら、中国のレスキューロボットなどサービスロボット市場の規模や導入目標に関する点については具体的な数値は掲載されていない。

なお、災害分野の関連情報としては、防災について、中国気象局局長の発表があり、中国の毎年の気象災害は 2,000～3,000 億元（1 元＝16 円の場合、3.2～4.8 兆円）の損害と推定される。

この金額は、中国の GDP の 1～3%を占める。

図２－３０　中国の災害による損害について（中国気象局局長の発表記事）

中国气象局局长郑国光昨日在国务院新闻办公室举行的《气象灾害防御条例》颁布实施新闻发布会上表示，我国是世界上自然灾害最严重的国家之一，在各类自然灾 害中，70%以上是气象灾害。然而，随着全球气候变化，我国气象灾害愈加频发，为人民生命财产安全带来严重威胁。据了解，我国每年由于气象灾害所造成的经 济损失为 2000 亿－3000 亿人民币，占 GDP 的 1%－3%。（2010 年 3 月 30 日　人民網－環境報道記事）

（出所　URL　http://env.people.com.cn/GB/11257573.html　）

（ｂ）災害分野Ⅱ（原子力パワープラント）

2013 年現在、15 基の原子力発電所が稼働しており、建設中が 32 基、計画中が 23 基で今後、合計 70 基を予定している（一般社団法人 日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発」（2013 年 7 月））。

日本の数値を使い 1 基当たり 17 億円/年の保全費用がかかるとした場合、
15 基×17 億円＝255 億円/年。
建設中 32 基は近年稼働する可能性があることから、2020 年の予測については同数値を使用。
（47 基＝15＋32）×17 億円＝544 億円/年市場（2020 年予測）

但し、中国と日本ほか先進国との賃金格差を勘案すると次のとおり。

・日本（千葉）の中堅エンジニアの月額基本給：4,742US$（2013 年 1 月 JETRO 調査）
・中国（上海）の中堅エンジニアの月額基本給： 743US$（2013 年 1 月 JETRO 調査）

図２－３１　日本と中国の賃金格差について
（出所：JETRO「JETRO センター5 月号」（2013 年）「日本国内 6 都市の投資関連コスト（2013 年 1 月）」、「アジア主要都市・地域投資関連コスト比較（2013 年 1 月）」より）

以上から日本との賃金格差は 3,999US$、中国の賃金割合は日本（先進国）の 15.7%とした。
これを中国の人件費を反映した場合、下記のとおりである

・2013 年：　255 億円×15.7%＝40 億円
・2020 年以降：　544 億円×15.7%＝85 億円

表２－３２　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	9 億円	27 億円	45 億円

（ｃ）社会インフラ（橋梁・トンネル）

①橋梁におけるロボットの潜在市場規模

中国交通運輸部『2012 年公路水路交通運輸業界発展統計公報』のデータ等を使用し、日本と同じ考え方で試算を行った。

但し、橋梁を今後どれくらい設置するかは記述がない。

表２－３３　中国の道路橋の数

	数（ヶ所）	延べ長さ（m）
合　計	713,400	36,627,800
うち：		
特大橋梁	2,688	4,688,600
大型橋梁	61,735	15,181,600
前年度より増加数	24,000	3,133,400

（出所：中国交通運輸部：『2012 年公路水路交通運輸業界発展統計公報』
http://www.moc.gov.cn/zizhan/siju/guihuasi/tongjixinxi/niandubaogao/201304/t20130425_1402417.html　）

中国の橋梁１本当たりの平均保全費用は不明なため、米国の費用を用いて試算した。

保全費用 430 万円/橋×713,400 箇所=3 兆 676 億円
（米国の橋梁１本当たりの平均保全費用：430 万円/本）
うち労務費の比率は 27.6%と仮定すると、
27.6×30676 億円＝8466.6＝8,467 億円

日本との賃金格差は 3,999US$、中国の賃金割合は日本（先進国）の 15.7%。
（日中の賃金格差については、前述の図２－３１を参照のこと）

2020 年の予測に当たっては、試算するための該当情報がないので、2011 年の試算結果をそのまま用いた。

表２－３４　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	133 億円	399 億円	665 億円

②トンネルにおけるロボットの潜在市場規模

橋梁と同じデータ（2012 年公路水路交通運輸業界発展統計公報）等を用いて、試算を行った。

但し、中国がトンネルを今後どれくらい設置するについては記述がない。

表２－３５　中国のトンネルの数

	数（ヶ所）	延べ長さ（m）
合　計	10,022	8,052,700
うち：		
特長距離トンネル	441	1,984,800
長距離トンネル	1,944	3,304,400
前年度より増加数	1,500	1,799,300

（出所：中国交通運輸部：『2012 年公路水路交通運輸業界発展統計公報』http://www.moc.gov.cn/zizhan/siju/guihuasi/tongjixinxi/niandubaogao/201304/t20130425_1402417.html　）

中国のトンネル 1 本当たりの平均保全費用は不明なため、日本の費用を用いて試算した。

トンネルのメンテ費用：660 万円/本

10,022 箇所×660 万円/本＝661 億円

661 億円×27.3%＝ 180.5 億円

日本との賃金格差は 3,999US$、中国の賃金割合は日本（先進国）の 15.7%。

（日中の賃金格差については、前述の図２－３１を参照のこと）

中国の人件費を反映した場合、下記のとおりである

180.5×15.7%＝103.6＝ 28 億円

2020 年の予測に当たっては、試算するための該当情報がないので、2011 年の試算結果をそのまま用いた。

表２－３６　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	2.8 億円	8.4 億円	14 億円

（ｄ）プラント分野

中国の石油化学プラントは、2011 年現在、1 億 6,954.5 万ｔの生産能力がある。今後 2017 年までに二塩化エチレン（EDC）以外の全ての設備で増強予定であり、2017 年時点で 4,264.1 万ｔ増加の 2 億 1,218.6 万ｔになると予測されている。

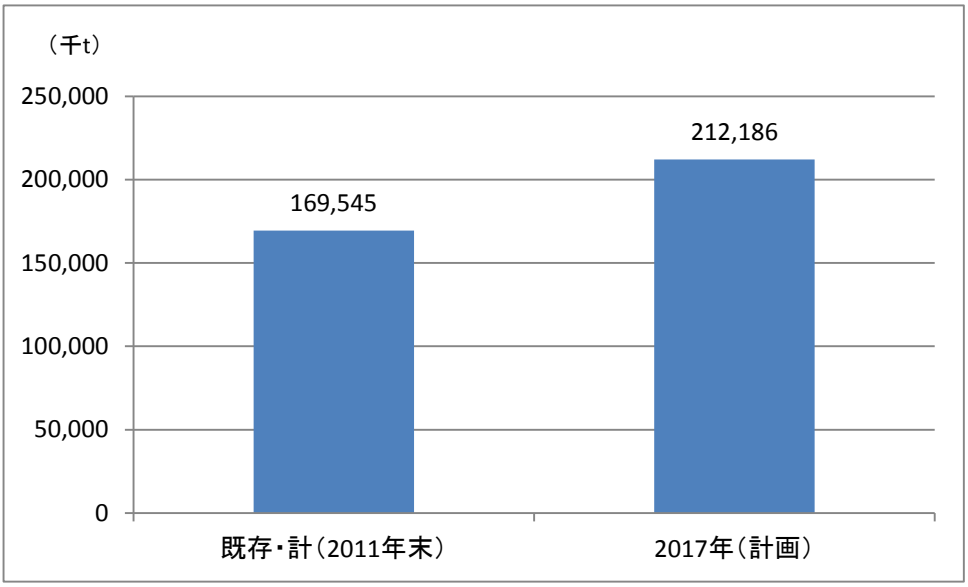


図２－３２　中国の石油化学プラント生産能力の推移

（出所：経済産業省「世界の石油化学製品の需給動向」より」（2013 年 4 月））

中国の石化プラントの保全費の試算については次のとおりである。なお、保全費用等が不明なため米国の Dow Chemical の保全費用を用いる。

米国の Dow Chemical の 1 千ｔ当たりの保全費用：1,704 億円÷11,343 千ｔ＝1,500 万円/千ｔ（1t＝1.5 万円）

（中国の石化プラントの保全費）

・2011 年（2013 年）：　169,545 千ｔ×1,500 万円＝2 兆 5,432 億円

・2017 年（2020 年）：　212,186 千ｔ×1,500 万円＝3 兆 1,828 億円

日本との賃金格差は 3,999US$、中国の賃金割合は日本（先進国）の 15.7%。

（日中の賃金格差については、前述の図２－３１を参照のこと）

以上から日本との賃金格差は 3,999US$、中国の賃金割合は日本（先進国）の 15.7%とした。

これを中国の人件費を反映した場合、下記のとおりである

1,500 万円×15.7%＝235.5 万円＝236 万円

・2011 年：　169,545 千ｔ×236 万円＝4,001.3 億円＝4,001 億円

・2020 年：　212,186 千ｔ×236 万円＝5,007.6 億円=5,008 億円

表２－３７　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	501 億円	1,503 億円	2,505 億円

（ｅ）農業分野（トラクタを対象）

中国農業年鑑（2012 年版）によると、中国のトラクタの生産台数は 283 万台/年（2011 年）、普及台数は 2,256 万台（同）である。普及台数における過去 4 年間の平均成長率は 4.7%であるため、これを 2020 年に適用すると、3,401 万台となる。

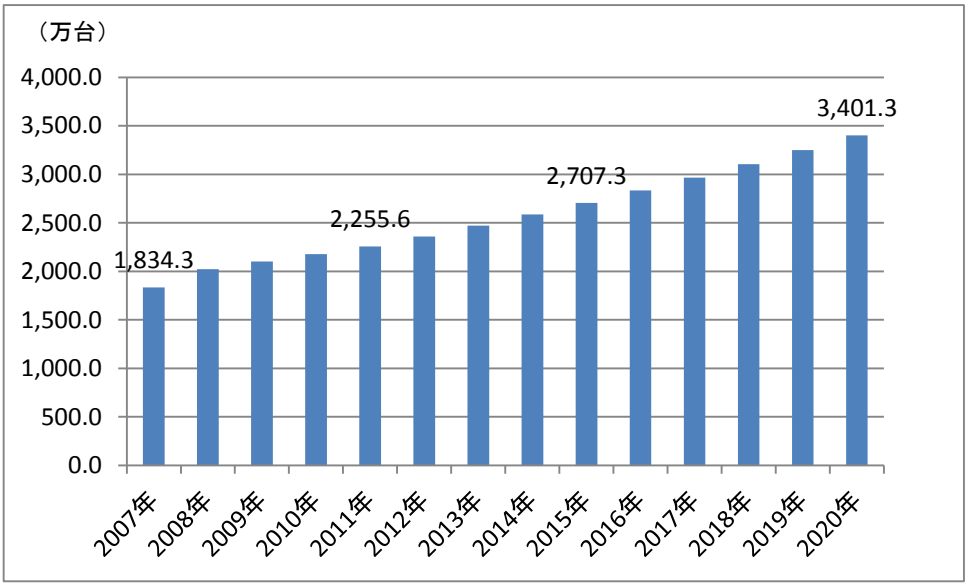


図２－３２　中国国内のトラクタの普及台数と予測

（出所：FAO STAT、農業出版社「中国農業年鑑（2012 年版）」／（注）2011 年までは実績。それ以降は 2007~20011 年と同じ割合で増加していくと想定。）

一方、価格については、110ps のトラクタが約 15,500～20,000US ドル、1ps 当たりでは約 1.4～1.8 万円となる。日本のトラクタが約 6 万円のため、価格はおよそ 1/3～1/4 と考えられる。仮に日本製の 30ps の価格を 180 万円/台とした場合、中国の価格は 45 万円/台（1/4 と想定）となる。

また、中国の農業機械工業年鑑（2012 年版）では、トラクタの 2011 年のサイズ別普及台数が載っており、58.8kW 以上の中大型は 42.31 万台で、全トラクタに占める割合は 1.8%である。仮に 2%とした場合、2020 年における普及台数は 68 万台となる。耐用年数を日本と同様、7 年とした場合、2011 年では 6.4 万台、2020 年では 9.7 万台となる。

以上から、2020 年の潜在市場規模を試算すると、次のようになる。

表２－３８　ロボットに置き換え可能な割合－試算結果

	10%（低位）	30%（中位）	50%（高位）
2020 年潜在市場	44 億円	132 億円	220 億円

（６）　特殊環境用ロボットの市場拡大に伴う経済効果

ロボットは、人間では不可能な災害対応を可能にし、災害のリスクを低下させ、二次被害、三次被害を防止することができる。例えば、原発事故やプラント事故など特殊環境下で人間が近づくことが困難な場面では、人間に代わって災害対応活動を行うロボットがどうしても必要となる。それにより、隊員や作業員の安全を守りながら、救助や被害の沈静化を可能にすることができる。

また、倒壊家屋の狭く入り組んだ瓦礫や、風水害で崩れた土砂内の捜索は、従来の方法では大変困難であり、能動スコープカメラなどの狭いところに潜り込めるロボットが必要である。あるいは、津波被害で家屋に取り残された人の捜索には、上空から建物に近づき、中を捜索できる超小型ロボットヘリや、津波の瓦礫の中に潜り込める水中ロボットが有効である。

先の東日本大震災においては、実際、上記のような実に様々なロボットが使用されている。

一方、災害の予防に関しても、ロボットは効果的である。

例えば、橋やトンネルなどのインフラの老朽化や、プラントなどの産業設備の老朽化が大きな問題となっており、近年では 2012 年に発生した中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落事故が記憶に新しい。こうした老朽化の早期発見・適切な補修の実現に当たり、メンテナンスロボットは、点検の綿密化、あるいはコスト低減などの視点から有効であると期待されている。足場を組んだり、道路を通行止めにしたりすることなく、短時間に点検を行うことができ、また、点検によって無駄な工事を省くことができる。

内閣府の「科学技術イノベーション総合戦略」では、2015、2020、2030 年を目途にした主な取り組み課題が示されている。そこでは、国内における市場規模として、災害対応ロボット関連産業は約 3,200 億円（2035 年）、点検・メンテナンスロボット関連産業は約 2,000 億円（同）が見込まれているなど、今後、自然災害に対する強靭なインフラの実現や効果的かつ効率的なインフラ維持管理・更新の実現に向けて、特殊環境用ロボットに対する期待はますます大きくなるものと思われる。

こうした特殊環境用ロボットの経済効果に関して、東海地域で予想される大地震におけるレスキューロボットの経済効果について考察した結果（2004 年）では、(1)生命保険業界にもたらされる経済効果、(2)死亡者による GDP 損失回避効果、について次のような試算がされている。

まず、(1)では規模の異なる 2 地震の生命保険の支払い総額から東海地域の場合の支払い額を試算し、それに阪神淡路大震災時の関係者からヒアリングで得た救助活動効率化係数をかけて、65～260 億円の経済効果が生命保険業界にもたらされるであろうと試算している。また、(2)では 1 年間の自殺者総数（約 3 万人）が GDP に及ぼす損失（約 1 兆円）を基に東海地域の場合の GDP 損失額を試算し、それに(1)と同様の救助活動効率化係数をかけて、300～1,200 億円の経済効果が GDP 損失回避によりもたらされるとしている。ただし、この試算では負傷者による GDP 損失は考慮していないため、レスキューロボットのもたらす GDP 損失回避効果はこの値以上であると考えられると指摘している。

さらに、最近では、2013 年 3 月に政府中央防災会議が南海トラフ巨大地震が起きた際の経済被害の状況予想を 220 兆円と発表しているが、これは東日本大震災の 10 倍の規模である。ただし、併せて、建物の耐震化等事前の防災・減災（防火を含む）対策を施しておけば、被害額は 31.8 兆円まで減額できると指摘している。こうした対策の実現に当たっては、災害対応ロボットやメンテナンスロボットなどの特殊環境用ロボットの活躍なくしては考えられない。

人的被害を抑え、災害復旧を加速することは、事業停止期間を大幅に短縮し、それまでの顧客を失ったり、事業機会を逸したりするリスクを減らし、経済的損失を最小限に食い止め、産業競争力の維持のために重要である。日本の災害リスクの高さは、我が国への投資判断の上で、大きなマイナス要因となる。こうした課題をロボット技術等によって克服することは、我が国の経済活性化にも大きく寄与する。

ロボット産業は、今後日本の製造業のコアとなる産業として期待されている。それを支えるロボット技術はロボットのみならず、自動車、情報機器等広い範囲の製品に組み込まれ、その機能や性能の向上に活用されており、「ロボット」と呼ばれる限定的機械の範疇に含まれる狭義のロボット産業をはるかに凌ぐ社会経済的波及効果があると考えられる。日本はこれまで産業用ロボットにおいて世界をリードしてきたが、災害対応や原発対応などのロボットに関しては、必ずしも米国や欧州を凌いでいるとはいえない。また、韓国、中国等の追い上げも非常に激しい状況である。

しかし、今回の東日本大震災、福島原発事故を経験し、ロボット技術は、日本ばかりでなく、世界における安心・安全を確保するために不可欠な技術であることを再認識させられた。防災ロボット等は、有事対応という性格からして大きな需要を見込める製品ではないかもしれないが、そこで必要となる技術は最も先端的なロボット技術や ICT 技術であり、その波及効果は非常に大きい。また、メンテナンスロボットを活用し、老朽化対策を推進することは、単にコスト面での経済効果のみならず、災害の予防、社会経済的損失の最小化にも貢献し、産業競争力の維持という経済効果をもたらすものと考える。

C．　特殊環境用ロボットの開発・産業化事例ならびに政策

（1）　特殊環境用ロボットの開発・産業化事例

（a）床下点検ロボットの事例

A. 節で出てきた千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター(fuRo)のサイトによれば、同センターが開発した Iris には、つぎのような記述がある。[24]
『一般企業と共同研究開発した試作ロボット。遠隔操作により一般戸建て家庭の床下を点検するロボットとして実用に向け、安全設計にも考慮。2008 年より実用予定。』
※一般企業とは大和ハウス工業のこと。

◆Ｉｒｉｓ

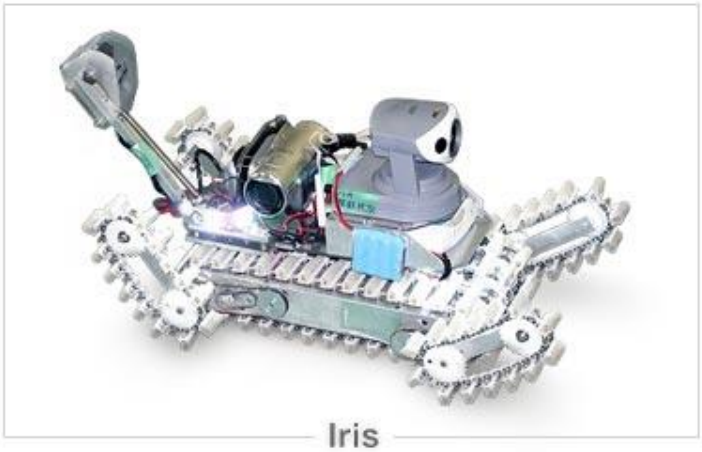


図２－３３　Iris　外観図　(千葉工大　fuRo)
(出所：　fuRo ホームページ　http://www.furo.org/ja/robot/iris/index.html)

この Iris は、『経済産業省の「平成 18 年度サービスロボット市場創出支援事業」の一環として、国立大学法人筑波大学と共同開発したもので、従来行われていた床下の水漏れやシロアリ被害等を確認・補修するための点検では、狭い空間に入って土埃の中で作業するため、点検員の身体・精神的負担は大きく、危険も多くあった。また昨今、悪徳点検商法などの事件により、お客様が直接見ることができない部位について、正しく状況報告することも強く求められている背景を受け、点検ロボットの開発着手に至った。』とある。

そこで、現在の大和ハウス工業社のホームページをみると、この床下点検ロボット（狭小空間点検ロボット）moogle が開発・販売されていること、ほかにもサイバーダイン社のロボットスーツ HAL(福祉用)、産総研が開発したメンタルコミットロボット パロ、エヌウィック社が開発した自動排泄処理ロボット minelet 爽などを販売するとともに、これらのロボットの販売～サービスなどの事業者を募集していることがわかる。[25][26]

●狭小空間点検ロボット moogle （モーグル）　（大和ハウス工業）

図２－３４　大和ハウス工業の狭小空間点検ロボット moogle
(出所：　iREX2013 会場にて撮影)

大和ハウス工業は、『住まいだけでなく暮らしをトータルにサポートする大和ハウス』を標榜して、医療･介護・福祉分野での実績＋ロボット事業に取り組んでいる。

現在は、自立動作のアシストをするロボットや、セラピー効果をもたらすロボットなどが中心だが、今後は、医療・介護、福祉分野のみならず、住まいや暮らしの多様な場面でロボット事業を広く展開していく計画、とのこと。

◆開発・商品化の経緯

この開発・商品化（事業化）の裏には、コーディネータの存在がある。[27]

大和ハウス工業の住宅床下点検ロボットの技術調査から関わり、同社に開発の方向性を示したのが、ロボリューション社の小西康晴社長。

大阪市のロボットラボラトリーによる紹介を通じて、大和ハウスから相談を受けた小西社長は、何軒もの床下に潜って床下点検にかかる作業内容を丹念に調査し、作業条件と要素技術とをマトリックスを使って整理し、かつそれぞれの長所・短所を洗い出し、開発コストとともにシステムとして提案した。また、その作業に適合するシステムとしてレスキューロボットを提示した。その結果として、同社と千葉工大が結びつき、サービスロボット市場創出支援事業への応募に繋がった。

過去のニュースリリース[28]などから、その経緯を追うと、

大和ハウス工業は、経済産業省の公募事業 『平成 18 年度サービスロボット市場創出支援事業』※ に住宅床下点検ロボット開発を目的に応募し、採択。同社と千葉工業大学、筑波大学は、産学連携体制による共同研究開発により、住宅床下点検ロボットの開発に着手した。（2006 年 10 月 26 日）

同社の点検ノウハウと両大学の技術を合わせ、機能、ユーザビリティ、コストバランスを合わせ持つ実用的なロボット開発に着手。また、共同研究先の千葉工業大学校舎内にロボットの機能実験を行うための実験場を新たに建設し、住宅床下環境を再現して、ロボットの駆動性能や画像伝送など、点検に必要な機能を評価できる環境も整えた。

開発スケジュールは、2006 年度に機能評価用ロボット製作、2007 年度に点検現場での試験運用と現場実証・量産化に向けた安全設計を行い、2008 年度以降は床下点検ロボットの実運用を図る計画だった。

※この事業では、実環境下でのロボット導入を図るため、ロボットの安全性を確保する手法の開発とモデルケースの実施を支援した。

実際に、2008 年 4 月からは、実用化に向けた開発を三菱電機特機システム株式会社と共同で行い、ロボットの耐久性や不整地面における走行安定性の向上を図った。また、2009 年 4 月以降は、約 150 件の現場における試験運用を行い、様々な床下でも点検・診断が行えるように度重なる改良を行った。このように、実証実験環境の整備を行っただけでなく、開発者がユーザであることで実現場における試験運用ができ、評価結果のフィードバックを受けての改良開発ができているところが理想的な展開である。

また、ロボットのデザインをロボットクリエーターの高橋智隆氏に依頼し、モグラのような流線型のフォルムに仕上げるなど、商品としての完成度を上げている。

そして、2010 年 10 月には、住宅床下点検ロボット「moogle（モーグル）」が完成し、2011 年 4 月 1 日より関東・中部・近畿地区の現場に配備、運用すると発表。今回開発した moogle による点検・診断作業、及び、住宅リフォーム前の現場調査や簡易耐震調査などでも利用していくと表明。商品化に成功している。

●シロアリ防除ロボット「ミルボⅣ」　　（アサンテ社）

アサンテ社も、同じく経済産業省の公募事業 『平成 18 年度サービスロボット市場創出支援事業』にシロアリ防除ロボットを提案し、採択された。

アサンテは、シロアリ防除などの施工を行う会社であり、したがって、開発すべきロボットの目的も、床下の被害状況の確認・説明だけでなく、薬剤噴霧という施工の機能も必要となる。目的は、お客様の安心と、点検・施工作業の快適化・効率化・コストダウン。

同社は、「床下ロボット」をはじめとした各種作業用ツールと、画像通信・活用ツールを統合したロボットシステムの開発により、調査、施工、アフターサービスの随所にロボット要素技術を組み込んで作業員をサポートする 「シロアリ防除ロボット」の導入によって、お客へより多くの質の高いサービスを提供することを目指した。[29]

◆開発の経緯

もともと、災害救助を行うレスキューロボットを研究している開発者から“床下を潜るノウハウ”についての問い合わせがあり、災害時、ガレキの下に潜り調査を行う作業と、床下を点検するシロアリ防除の作業に共通点があることが分かった。

平成 18 年、19 年の「サービスロボット市場創出支援事業」に応募・採択され、営業、作業効率向上を目指した白アリ駆除作業のロボット化」に着手。開発はアサンテが中心となり、ＮＰＯ法人国際レスキューシステム研究機構と メーカーなど数社で編成されたプロジェクトチームによって行なわれた。また、ＮＰＯ法人安全工学研究所の指導のもと、サービスロボットにおける安全基準に沿った高水準のリスクアセスメントを実施した。
こうした経緯もあり、シロアリ防除で使えるロボットでありながらも、災害時にはレスキューロボットとして活用できるというコンセプトで開発が進められたという。[30]

2007 年 3 月に、最初の試作機である初代「ミルボ（ミルボ I)」が誕生し、同年 10 月には「ミルボ II」が完成。2008 年 2 月には、薬剤の噴射、映像の遠隔地に配信、ロギング、防水・防じん、安全性向上などのあらゆる機能を盛り込んだ「ミルボ III」が完成し、公開実証実験なども行った。[30]

実は、アサンテの取り組みは「サービスロボット市場創出支援事業」を機に 10 年がかりで達成するとして、当初は RT ソリューション社を中心とする開発体制を敷いていたが、RT ソリューション社がロボット関連事業から撤退したため、アサンテにて開発体制の見直しを余儀なくされた。[31]

「ミルボ III では、さまざまな機能を搭載したため、車高が高くなってしまった。その結果、人間が入れる範囲とほとんど変わらない空間でしか作業できなくなってしまった。これでは実用化できないため、機能を『周囲を見る』『薬剤を飛ばす』に特化させ、ミルボ III よりも車高を 5cm 低くしたミルボ IV を開発。2012 年 3 月末に完成させた」という。[30]

2012 年 7 月には「第 3 回 次世代ロボット製造技術展（ROBOTECH)」で新規開発したシロアリ防除ロボット「ミルボⅣ」を公開した。この時点では、営業段階では床下の地図情報がないためにロボットを効率的に運用できないうえ、点検情報をわかりやすく伝えられないことが課題となっていた。ただし、これは、再施工時には影響しない。[32]

2013 年 11 月の iREX2013 でも、このミルボⅣが展示されていた。説明員の話では、床下の観察だけでなく、薬剤噴霧を行わなければならないため、ホース運搬など、そのための課題が大きく、実用化にはまだ課題が残っているとのことだった。

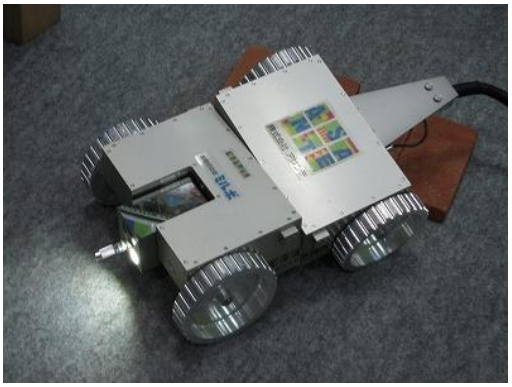


図２－３５　アサンテ社のシロアリ防除ロボット「ミルボⅣ」
（出所：　iREX2013 会場にて撮影）

（ｂ）メンテナンスロボットの事例

◆新日本非破壊検査(株)

新日本非破壊検査(株)は、九州工業大学、早稲田大学大学院、福岡工業技術センター機械電子研究所、(株)九州エレクトロニクスシステム、(株)フジコー、などで実施した、(財)北九州産業技術推進機構の「新産業創出プロジェクト」の成果を元に、管内検査ロボットシステム「エルボーマスター」を開発した。これは、配管内の割れ・腐食・減肉などの配管内面の状態を検査するロボットで、配管の材質や形状によらず配管内を自由に走行することができる。また、カメラの画像で配管内を観察することができる。

また、福岡工業技術センター機械電子研究所と共同で開発した管検査ロボット「マイクロエルボーマスター」は、φ100～200mm の小径管内を検査するロボットで、前後上部に取り付けた車輪によって管内を 360 度回転しながら走行する。発電所や化学プラントなどの腐食やひび割れ検査用として、受託検査サービスの提案を行う。[33][34]

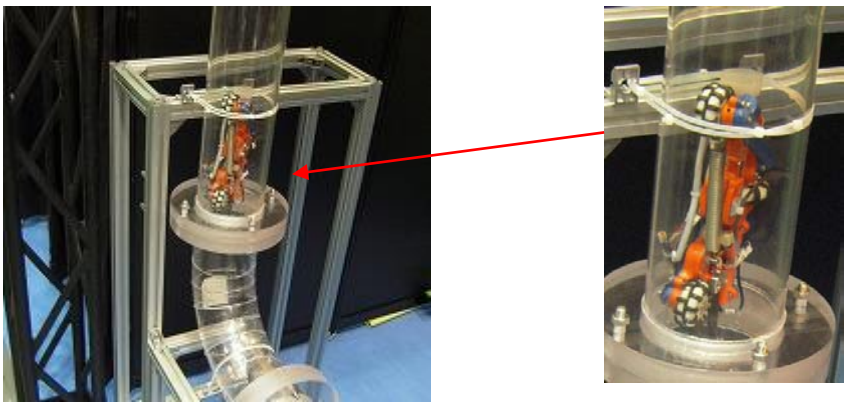


図２－３６　新日本非破壊検査社のマイクロエルボーマスター
（出所：　iREX2013 会場にて撮影）

◆イクシスリサーチ(株)

川崎市にある社員 8 名のベンチャー企業。社長の山崎文敬氏は、大学 3 年の時にロボカップが始まり、小型ロボットリーグに初出場・初優勝を飾った。その後、大学院修士課程 1 年（1998 年）の時に、ロボカップ用ロボットの製作費を稼ぐために会社を設立。

現在では、研究用・ゲーム用ロボット及び電子機器部品の開発・販売、コンピュータソフトウェアの開発・販売、ロボット及びコンピュータソフトウェアの開発研究に関するコンサルティングなどを事業内容としている。[35]

同社の製品には、下記のようなものがある。[36]

・社会インフラ点検ロボット

【ロボット】橋梁鋼床版超音波探傷ロボット SAUT ROBOT

高速道路などの橋梁において、鋼床版と呼ばれる構造物の検査を、足場架設することなしに超音波探傷の検査を実現できるロボット。

(SAUT：Semi Automatic Ultrasonic Testing)

本製品は、イクシスリサーチ、財団法人首都高速道路技術センター、株式会社ホルス、テクニカルリンク株式会社の共同開発品。

【ロボット】超遠隔地監視ロボット ZIGZAG　(ZIGZAGⅡは未掲載)

立ち入ることが困難な場所での画像監視ロボット。

3.5G 携帯電話網(WiMAX、E-mobile 等)を利用し、超遠隔地からロボットの制御及び監視をすることが出来る。ロボットは四輪独立ステアリング機構の iWs12 プラットフォームを利用し、伸縮昇降装置の先端に Pan/Tilt カメラを搭載することで、地上高最大 5m の位置からの監視が可能。

【ロボット】マグネット吸着型点検ロボット MagBug

橋梁やプラントのタンク、配管といったスチール構造物に対して、マグネット吸着し、背面走行、垂直壁面走行することができる全方位移動可能なロボット。

デジタル一眼カメラやネットワークカメラなどを搭載することができる Tilt 機構付き。

【ロボット】ワイヤ吊下げ型目視点検ロボット Rope Stroller

橋梁床版裏面やプラント煙突など、高所で広範囲に目視点検をするロボット。

ワイヤを径間に水平に架設したり、煙突に垂直に架設することで、水平移動、上下移動を可能とする。

【ロボット】フィンガー点検ロボット TANK BASE　(未発売)

・プラント・工場点検　(上記インフラ点検ロボットも該当)

【ロボット】プラント防爆エリア内非磁性体タンク配管点検ロボット SpinBot

石油化学プラントなどのオンサイト(防爆エリア)内のタンクや配管検査用ロボット。

駆動部、センサ搭載部、ベルト緊張部、受動コマ部に分散されたシステムで、センサ搭

載部には、超音波探傷装置や超音波板厚計、ピーニング装置などを搭載可能。

また、受託開発やコンサルティングも行っており、

橋梁検査ロボットA（有線型、車輪型、カメラ、斜角型超音波探傷装置搭載）

橋梁検査ロボットB（有線型、クローラ型、カメラ2台搭載）

住宅向け床下点検ロボット（遠隔操縦型、クローラ型、カメラ、レーザー距離計搭載）

科学館向け巡回ロボット（完全自立型、車輪型）

レスキューロボット（遠隔操縦型、クローラ型）

など、多くの実績事例がある。

同社は、ロボット実証実験実行委員会の公募に応募して、何度か実証実験を行っている。その成果は、神奈川県などが主催するロボット実証実験等成果報告会で公表されている。

この神奈川県のロボット実証実験実行委員会では、公募により、サービスロボットなどの実証実験の機会づくりをサポートしている。

同実行委員会の公式サイトによれば、以下のような支援を行っている。[37]

ロボット実証実験実行委員会　（神奈川県）

神奈川県、川崎市産業振興財団、かわさき・神奈川ロボットビジネス協議会の三者により構成され、ロボットの幅広い用途や使用場所を想定した実証実験の企画を募集し、企画実施者と共に実証実験を運営します。

この実証実験の特徴として、実行委員会から委嘱されたコーディネータが、実施者に代わって、会場や関係機関との折衝、使用申請の手続き、保険など安全対策の手配、メディア各社への連絡など、ロボットの実用化に向けた実験がスムーズに行われるよう必要な調整・サポートを行います。

実際、「平成23年度ロボット実証実験等成果報告会」（2012年3月）では、高所狭隘向け全方位移動検査ロボット「ZigZag」を公開した。高所検査時の足場の設置が不要となり、検査業務の効率化と低コスト化につながる。石油化学プラントや発電所などの高所配管の目視検査に向けを想定している。[38][39]

また、「平成24年度ロボット実証実験等成果報告会」（2013年2月）では、マグネット吸着全方向移動ロボットiCs03をベースに開発した検査ロボットにより、タンク壁面や橋梁、設備配管などの検査実証実験を行った成果を発表している。[40]

近年は、橋梁やトンネル、石油化学プラント向け点検ロボット3機種(ZIGZAGⅡ、Rope Stroller、SpinBot)を開発し、2014年4月にレンタル販売を開始するもよう。レンタル料は1週間で50万円から。開発にあたり、NEDOの「2012年度イノベーション実用化ベンチャー支援事業」の助成金を活用しているとのこと。[41]

●平成 23 年度 ロボット実証実験では、

(1)応募のきっかけ（ねらい）

・弊社は、各所からの要望に応じロボット開発を実施
・近年、工場や社会インフラの検査用ロボットの問合せが増加
・顧客は、検査のロボット化のイメージが正確に掴めていない
・これらの検査は設備稼働中に実施されるもので、容易に実証実験ができない

↓

・事前に、想定される箇所でのロボットの動作イメージ、また、そこから得られるデータを用意し、顧客に提示する必要がある
・顧客も、このような動作イメージ、データから、自身の設備の検査手法を検討できる

↓

本実証実験へ応募し、ロボット検査の可能性の提示、もしくは、取得したデータの解析方法などを確立することを目的とする。

(2)実証実験

・ロボットが投入される現場に近い環境を用意（→川崎マリエン地下）
・天井付近の高所に敷設してあるケーブルラックまたは、ダクト上部、貯水タンク上部をカメラで連続的に撮影する。

(3)今後について

・ロボットを用いた点検検査業務の提案
・画像処理、その他のセンサのデータ処理技術の確立を実施
・現場作業員でも使える技術に落とし込む
・各種ロボットへの埋め込み

図２－３７　実証実験の今後について　（イクシスリサーチ社）
(出所：平成 23 年度 ロボット実証実験成果報告会配布資料)
(http://www.robojikken.com/data/meiji_ixs.pdf)

●平成 24 年度 ロボット実証実験では、

(1)応募のきっかけ（ねらい）

従来より「メンテナンスロボット」の開発運用を行ってきた。

近年、プラントや社会インフラの老朽化が目立ち始め、グローバル診断（一次検査）の必要性が増してきている。

グローバル化によるコストダウン圧力により、十分な予算をかけた検査が困難。

熟練技術者の大量退職や、労働力確保の問題で、検査の質のバラつきが問題。

足場を架設する定期検査では、必要な時に検査が行えず、かつ、コストが高い。

・2011 年の東日本大震災による原子力災害

・2012 年の中央自動車道笹子トンネル天井崩落事故

↓

一気に、社会インフラやプラントの維持管理が注目され始めた

↓

それぞれ固有/公共資産のため、実設備での実証実験が困難

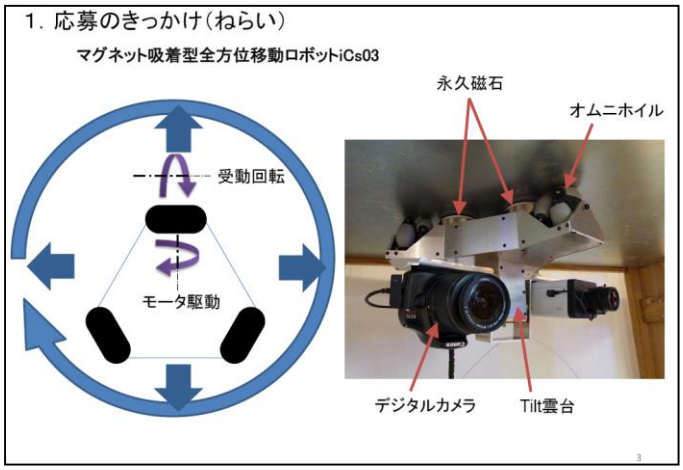


図２－３８　実証実験応募のきっかけ　(マグネット吸着全方向移動ロボット iCs03)

(出所：　平成 24 年度 ロボット実証実験成果報告会配布資料)

(http://www.robojikken.com/data/re_24_ixs.pdf)

(2)実証実験

・石化プラントの原油タンク壁面及び、ウィンドガーター裏面検査の実験

・石化プラントの貯蔵タンク壁面及び、溶接部検査の実験

・石化プラントの貯蔵タンク内壁面検査の実験

・橋梁フェアリング検査及び、橋梁裏面検査の実験

・設備配管検査の実験

(3)今後について

現在、既に高速道路会社、プラントオーナー会社と共同開発案件が複数進行中

どれも、新規事業という位置づけではなく、完成後即実用化のフェーズ

今回の目視検査ロボットも 1 年以内に実用化予定

目視検査だけでなく、超音波探傷、板厚測定、コンクリート構造物への拡張

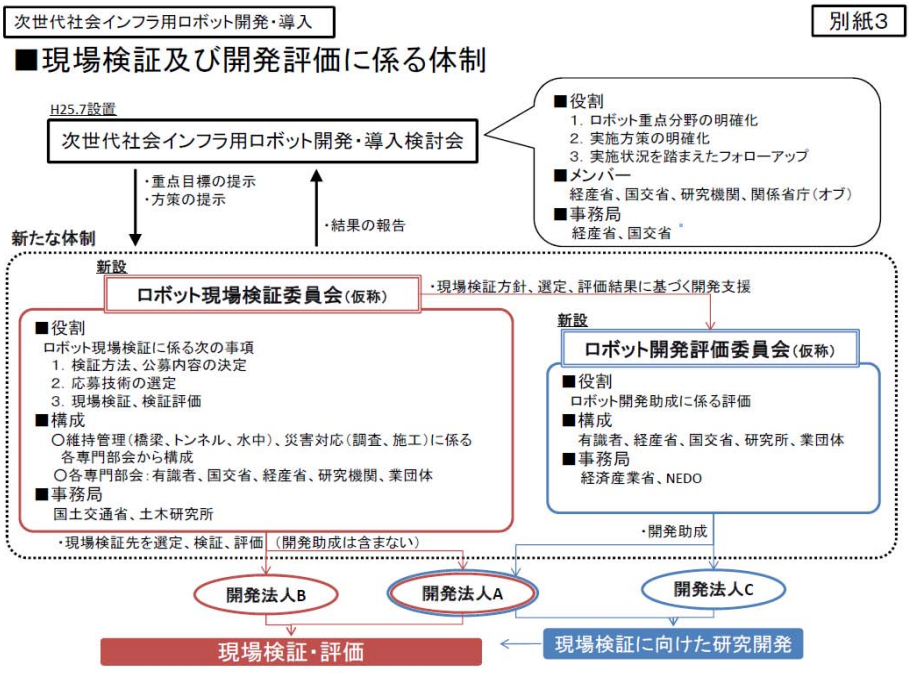
（ｃ）インフラ・メンテナンスロボットの開発方針

ａ）日本の開発方針

日本では、2012 年 12 月に発生した笹子トンネルの天井板崩落事故などを契機として、高度成長期に建設された道路や橋梁などの公共インフラが老朽化してきていることが問題として注目されるようになってきた。それらの維持・管理体制の整備が急務と言われているが、現状では、作業員の目視や打音検査での点検検査が主流である。そこで、足場を作ることなく簡便に検査することができるロボットのニーズが高まってきている。

経済産業省及び国土交通省では、社会インフラの維持管理及び災害対応に関して、その効果・効率の一層の向上のため、それらを支えるロボットの開発・導入を推進すべく、平成２５年７月１６日「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を設置した。そして、インフラ管理者及び災害対応経験者等への現場ニーズ調査や、国内外の異分野を含めた技術シーズ調査を行い、計５回の検討会を経て、平成 25 年 12 月 25 日、社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野を策定し、また、今後の進め方（体制・スケジュール）について明確にした。[42]

(a)別紙１　次世代社会インフラ用ロボット開発・導入促進体制



(b)別紙３　現場検証及び開発評価に係る体制・スケジュールについて

図２－３９　策定された「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」
（出所：　国土交通省報道発表資料）
（https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000104.html）

ｂ）欧州でのプロジェクト事例

2013 年 10 月 1 日に、EU によって「ROBINSPECT」というプロジェクトが開始された。
500 万ユーロ(約 680 万ドル)の予算が付けられている。
本プロジェクトは、第 7 フレームワークプログラムの下で、EC（欧州委員会）によってサポートされている。[43]

この「ROBINSPECT」は、ROBotic System with Intelligent Vision and Control for Tunnel Structural INSPECTion and Evaluation を表す。

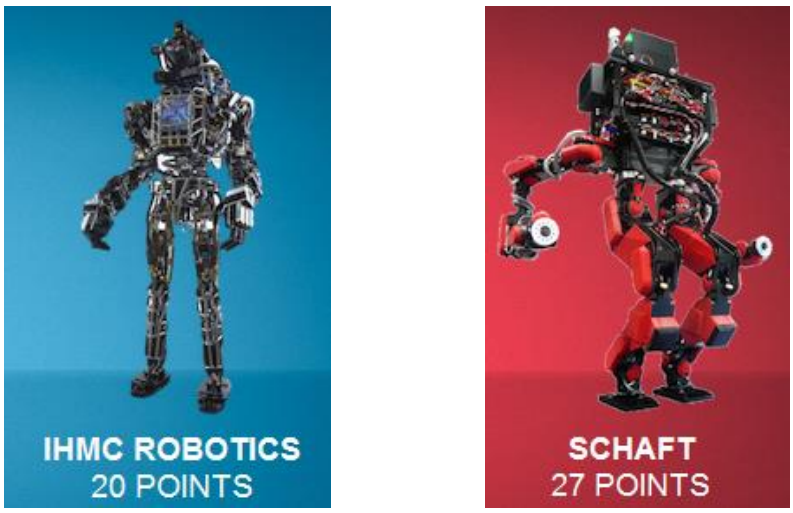
自律的に走行する台車に設置されたクレーンアームのようなものの先端に本ロボットを取り付け、そのロボットアームの先端に設置されたセンサやカメラをトンネルの壁部に沿ってスキャンさせることによって、壁面の亀裂、隙間、ひびなどがないか調べるもの。
トンネル内曲面部に潜在的欠陥がないか、自動的にスキャンし、断面の半径方向の変形や、並列する亀裂間の距離を検出し、トンネルの健全性に影響を与える亀裂や開放接合部をミリメートル精度で測定する。本方式により、トンネルの検査と構造的評価の両方を、1 回のパスで可能にする。
インテリジェント制御やロボットのツールは、人間の操作を最小化するように、自動ロボットアーム操作や自律走行車のナビゲーションを設定することが織り込まれている。この方法では、トンネルの構造条件と安全性が、確実かつ迅速に自動的に評価される。[43]

試作品は、2014 年末に、ロンドン地下鉄内のトンネルや、ギリシャのエグナティア高速道路の地下部分、さらに、スイスで試験運用中のトンネルで運用が開始される予定。最終試験は、スペインの首都マドリッドを走る M30 高速道路のトンネルで行われる計画。[44]

本プロジェクトのコンソーシアムのパートナーメンバーと国名は、
・コミュニケーション・コンピュータシステムズ研究所 (ICC)（ギリシャ）
・CASSIDIAN (CA)（フランス）
・カルロス 3 世大学　マドリッド Dpto.
　システム工学・ロボット工学研究所 (UC3M)（スペイン）
・VSH Hagerbach テスト・ギャラリー(株) (VSH)（スイス）
・Egnatia 高速道路 S.A. (EOAE)（ギリシャ*）
・ﾏｲｸﾛｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ ﾏｲｸﾛｼｽﾃﾑｽﾞ研究所、イタリア国立学術研究会議 (CNR)（イタリア）
・RISA 安全解析 BmbH (RISA)（ドイツ）
・Techniche e Consulenze Nell' Ingegneria Civile S.p.A (TECNIC)（イタリア）
・D. Bairaktaris &アソシエイツ 構造設計事務所(株) (DBA)（ギリシャ）
・パリテク 土木学校 (ENPC)（フランス）
・ROBOTNIK (ROB)（スペイン）

（ｄ）DARPA Robotics Challenge の例

Ａ．節で言及した DARPA ロボティクスチャレンジ Trial 大会において、ソフトウェア中心のチームに貸与されたのが、Boston Dynamics 社の Atlas という油圧駆動式ヒューマノイド型ロボット。一方、1 位になったのは、日本のシャフト社の電動モータ駆動式ヒューマノイド型ロボット S-One である。[45]



(a)Atlas　　(b)S-One

図２－４０　DRC における著名なヒト型ロボット

（出所：　DRC 公式サイト　http://www.theroboticschallenge.org/）

◆ボストン・ダイナミクス（Boston Dynamics）社

同社は、米マサチューセッツ工科大学の元教授であるマーク・レイバート氏が大学発のベンチャー企業として 1992 年に設立し、米軍や DARPA と共同でロボット開発を行っている。DARPA の支援の下で開発した四足歩行ロボット「ビッグドッグ」や、人間のシミュレーションを行う COTS ソフトウェア「DI-Guy」といった製品を開発している。

DARPA の出資の下で開発されたロボットとしては、LS3(軍用 4 脚運搬ロボット)、BigDog（4 脚運搬ロボット）、 Cheetah(4 脚ギャロップ高速走行ロボット)→WildCat、RiSE(壁面登りロボット)、DRC 向けの Atlas（DisasterCity 用標準ヒト型ロボット）DARPA 向けの LittleDog(研究用小型 4 足歩行ロボット)、などがある。また、米陸軍所属の先端装備調達部署 REF の出資の下で開発された SandFlea(ジャンプ可能な偵察用 4 輪ロボット)の他、RHex(荒れ地走行用小型 6 脚ロボット)、Petman(化学防護服テスト用人型ロボット)、などもある。[46]

このように、DARPA や米軍と密接な関係にあった同社が、2013 年 12 月に、突然、アメリカの Google 社に買収されたと報じられた。[47]

第一報を報じた米紙ニューヨークタイムズによれば、Google はボストン・ダイナミクスがすでに結んでいる軍事契約を維持する方針だと語ったとのこと。

これは、逆に言うと、Google は、今後は新たな軍事契約を結ばないかもしれず、軍事開発資金を得なくても自社で十分な開発費を賄える、ということを示唆している。

◆シャフト（SCHAFT）社

東京大学の情報システム工学研究室（JSK）[48]の稲葉雅幸教授、浦田順一氏が慶應義塾大学と産業技術総合研究所の援助を得て開発した HRP3L-JSK（HRP3 の脚部分モデルを JSK で改造したもの）は、液冷高電圧コンデンサーシステムの開発によって高トルク、高速のロボット脚を実現した。その結果、前後左右どんな方向から蹴られても、上手くバランスをとって倒れないように制御できた。歩行速度は時速 5km で、44cm の跳躍が可能だった。[49]

2012 年 4 月に DARPA が DARPA Robotics Challenge の開催を発表した。JSK で助教としてロボットの研究をしていた中西氏と浦田氏は、助教の任期満了が迫っていることや持続的にロボットをつくり続けるための研究資金を得るのが難しいことから、かねてよりロボットを開発するためのベンチャー企業を立ち上げようと考えていた。そんなときに競技会の開催を知り、大会に参加するために（大学では軍事技術を開発できないため）大学をやめて、中西氏が CEO、浦田氏が CTO となって、大会開催発表から 1 ヶ月後の 2012 年 5 月にシャフト社を設立した。[50]

当初は、技術漏出を懸念して DARPA の資金援助を得ないコースを検討していたが、資金調達が思うように進まなかったため、ロボット本体とソフトウェアをともに自分で開発し、かつ DARPA から開発資金を得るコース（Track A）で参加した。無事審査を通って 2012 年 10 月、DARPA から初期の開発費用 180 万ドル（約 1 億 8,000 万円）を得た。また 2013 年 7 月には追加の開発費用 120 万ドル（約 1 億 2,000 万円）を得るための設計の審査があり、それも通過した。並行して、自社での資金集めのため、人型ロボットの要素技術を基にした製品の販売を考え、ホームページ（現在は見られない）にも掲載するなど準備をしていた。その資金調達のためにグーグルベンチャーズに声を掛けたところ、グーグル本体が興味を示したという。[50]
（一説によると、シャフト社側が提示した額があまりに少なくて、グーグルがためらったため、買収決定に 3 ヶ月かかったと言われている。）

そして、Trial 大会(12 月 20～21 日)間近の 12 月 4 日、米紙ニューヨークタイムズに Google による買収が報じられた。[51]
DRC Trial の結果は、シャフト社の S-One が 1 位となり、さらに 100 万ドル（約 1 億円）の資金を得る権利を得た。
SCHAFT ロボット S-One は、前述の HRP3L-JSK の技術や、JSK で開発を続けている日常生活支援ヒューマノイド HRP2-JSK をベースにして開発されたと登録されている。[52]

ちなみに、同社のホームページには、トップページのロゴ等しか見ることができないが、2013 年 12 月 10 日時点では、会社紹介として以下のような記載があった。[53]

会社概要

株式会社 SCHAFT はヒト型ロボットの研究開発・製造・販売を行い、ヒューマノイドと共に歩む未来を創造します。

当社は、２０１２年にロボット研究で３０年以上の歴史を持つ、東京大学情報理工学系研究科・情報システム工学研究室(JSK)からスピンアウトし誕生しました。

当社製の等身大ヒト型ロボットは性能が公開されている既存の同種ロボットの１０倍もの力強さをもち、その力強さを活かし人間が横から蹴っても転ばないほどの安定な二足歩行が可能です。そしてその安定した移動性能の上に、長年のロボットシステム統合経験を生かし多様な動作を実現することができます。

商号　　株式会社 SCHAFT

事業目的

１．人型ロボット及びその要素技術の研究開発・製造・販売事業

２．人型ロボットの開発・運用に関するコンサルティング事業

３．前各号に掲げる事業に付帯または関連する一切の事業

（以上、当社定款より）

資本金　　４４４５万円

役員

代表取締役ＣＥＯ　　中西雄飛

取締役ＣＴＯ　　浦田順一

取締役ＣＯＯ　　鈴木稔人

社外取締役Ｖｉｒｔｕａｌ ＣＦＯ 加藤崇

社外取締役　　鎌田冨久

両社を比べると、日本とアメリカの国情（軍事ロボットの開発の可否、軍事・偵察・爆発物処理等のロボット市場及び利用・運営組織の有無、先進的技術開発に対して戦略的チャレンジ方式による人材発見と支援）などが大きい。

さらに、これまでは、DARPA など軍事利用技術の開発が先進的だったが、今後はグーグル社のような、資金的に余裕があり、10 年先の未来世界の変革を目指して行動する企業が出てきている。軍需産業でない会社は、どのような戦略を取るのだろうか。

（２）　事例における成功･失敗要因と、関連する政策等

（ａ）床下点検ロボットの事例

この事例は、自社での事業展開上のニーズから、ロボットの開発を自社の責任で始めたもの。両社とも、現場のニーズがよくわかる立場にあり、実用機の実証機会には困らないという利点がある。また、ロボット開発の技術力や経験はなく、どこかの機関の指導を受けるか、共同開発をするか、という体制を取ることになる。

このとき、いかに最初の段階で、ロボットのあるべきコンセプトを作り上げられるか、が一つのポイントとなっている。検査・観察であれば、技術的ハードルが比較的低く、重要な課題がある程度見渡せる。しかし、薬液噴霧が必須となると、タンクかホースか、薬液の容量や容器の形状、それらを運搬するのか、親機として配置した上でホースを引っ張るのか、など、狭隘な不整地を移動する以上の課題が出てくる。また、共同開発先の持つ技術力によって、ベースとなる移動機構のレベルが異なっている。ある意味、販売用ではなく自社使用用途なので、量産時のコストはもちろん重要だが絶対的指標ではなく、いかにバランスよく必要な機能が実現できるかがポイントである。

もう一つのポイントは、いかに「開発－実証/検証－改良」のループを速く回せるか、である。そのためには、資金力、担当者（及び上司、組織、トップ）の熱意、明確なニーズ、実証場所ときちんと意見が言えるユーザの確保、が重要と思われる。ロボット開発機関やメーカーにお任せでは、このループはうまく回らない。

（b）メンテナンスロボットの事例

・実証機会の支援

どちらの事例も検査・メンテナンス機械の専門的メーカーであり、また、地元の県の振興策をうまく活用している。それは、資金援助（補助金）であったり、共同開発先の研究機関であったりする。また、神奈川の実証実験支援も、実際に実証する現場を持たない企業にとっては、（規模は違うが、DARPA の DRC と同様）実証機会だけでなく、格好の宣伝の場となる。さらに、その結果をベースに改良を続けていくことが、より実用的なロボットに繋がっていくはずである。

・作業者に対するロボットの関係

もう一つの視点として、ロボットと人との関係がある。

イクシスリサーチ社山崎社長は、「平成 23 年度ロボット実証実験等成果報告会」の際に、過去に取り扱っているロボット製品をそのまま導入したユーザはなく、ニーズへの即応性が要求される、と述べた。また、点検・検査の現場ではロボットによる“省力化”は、業務の縮小につながるとの認識が根強く、「省力化での導入例は 1 つもない」。それを避けるよう「現場作業者にサポートしてもらうことを前提としたシステム構成にしている」と、独特の提案になっていることを明かしている。

また、点検・検査業務の請負企業は、設備設計・開発などを担当したエンジニアリング企業の孫請けである場合が多く、委託した範囲内で業務を遂行すればよいため、新たな技術を導入してコストダウンを図ろうとするマインドが希薄という。そこで、同社では作業者の“身体の拡張”に焦点を当て、かつ現場作業者にサポートしてもらうことを前提としたシステム構成を提案している。身体の拡張とは、たとえば、足場を必要とせずに高所や狭所などの目視検査を可能にすることであり、また、作業者のサポートを前提に開発をすれば、ロボットを簡素かつ低コストにできるうえ、導入に向け現場作業者の理解を得やすくなる。結果的に、提案する点検・検査ロボットは「いわばラジコンカーのように簡素なものとなるが、便利なうえに継続して使ってもらえる」と、開発ノウハウの一端を明かした、とのこと。[54]

介護ロボットでも、作業者（介護士）に取って代わるのではなく、介護士の手足となってサポートするロボットが気に入られていると聞く。このような視点・態度が、「使ってもらえるサービスロボット」の開発には大事なのではないだろうか。

（c）インフラ・メンテナンスロボットの開発

日本でも、公共インフラの問題が喫緊の課題となり、国土交通省と経済産業省がある程度の分担と連携を取りながらの開発を行う方針が出てきた。ここで、時間的に余裕がないからと、どのようなシナリオを想定するか、誰が開発するか、誰が運用するか、などきちんとした検討を最初に十分行わないで開始すると、取り返しの付かない事態になる恐れがある。

もう一つの課題と思われるユーザの確保と継続では、国土交通省の「無人化施工」に対する継続発注の取り組みや、経済産業省／NEDO の福島原発対策への取り組みが良い先例と思われる。

国土交通省では、「点検・メンテナンスロボットは用途が限定されるため、メーカーにとっては開発・製造コストが見合わず、事業として取り組みにくい。この対策として、開発した技術を他の分野で活用し、採算性を高めることも検討するとしている。また、ロボットの操作や保守管理を担う人材の育成も進める。」[55]ということだが、US&R（都市型探索＆救助）ロボットの側も、平常時のニーズがないためにメンテナンスへの転用・流用を図ろうとしており、その辺りの調整／規格化をいかに行うかも、ポイントかもしれない。

欧州のトンネル検査ロボットの事例は、スタートして半年足らずで、まだまだこれからと思われるが、欧州が纏まって取り組むことにより、標準化や市場・ニーズの確保にはアドバンテージがある。日本と欧米の環境・慣習や道路・鉄道などの規格の違いによる障壁があると、グローバル市場への展開の妨げになるのが悩ましいところである。

（ｄ）DARPA Robotics Challenge の例

Ａ．節で述べた偵察ロボットや危険物処理ロボットは、適用が必要なシリアスな状況が結構な頻度で発生し、かつそれに対処するには人命の危険が伴うため、明確なニーズが存在している。（それを解決する技術や方法、ソリューションはいろいろあり得る。）

また、３．１１福島原発事故対応についても、同様に、明確なニーズがある。ただし、原発事故処理に関しては、未経験の分野であり、それを解決するためのソリューションが定まっていないために、これから開発･改良・運用を継続的に行う必要がある。
ということは、「開発－実証／運用－改良開発」をいかに継続させるか、そしてユーザ側も、どうしたら役に立つ使いやすいロボットになるか、真剣に検討・議論する場や仕組みが必要である。

なお、原発事故災害は、自然災害を含む大災害の中でも特に対処が困難で影響も大きい。そのため、軍事的ニーズを基本に無人(自律)運転車の技術開発に取り組んでいたアメリカが、３．１１福島原発事故を契機に、一気にレベルを上げて DARPA Robotics Challenge を開催し、3 年間でかなりの部分まで実用化を図ろうとしている。その開発資金提供額(100 万ドル)と優勝賞金額（200 万ドル）の大きさには驚かされる。常連の軍需企業や国立の研究開発機構ではそうでもないだろうが、大学やベンチャー企業にとっては、資金が得られるだけでなく、うまくいけば世界中に名前が知れ渡ることになり、大きな魅力がある。このような仕掛けで、世の中の先端的技術欲を持つベンチャー企業（や大学）を見いだす機会をもつことは、目的が明確であれば、相当に有効なようである。

また、それにある意味対抗しているとも言える Google 社のロボットベンチャー企業の 8 社買収の動きや、amazon の KIVA システムによる倉庫内自動搬送やドローン（無人航空機、UAV）による空中配送など、IT 企業の動きもダイナミックである。

それぞれ、描いている将来像は異なると思われるが、インターネットによる検索・リコメンドやビッグデータ解析、MAP、自動車間通信や自動運転 、人工知能 AI、単なる省力化や逆転の発想による画期的効率化など、使える技術が数多くあり、それをいかに速く、より差別化できる機能にし、そして業界のスタンダードにしていけるか。
「特殊環境」だけでなく、「われわれの日常生活」に関わる部分での競争も激しくなってきているように思われる。

以上

【参考資料】

[1] 自衛隊と世界の軍用ロボットたち - ロボティクス・シンポジウム(2013)
（http://news.mynavi.jp/articles/2013/12/03/robotics_symposium/）
注：原典は、2011 年 AIAA 発行資料
[2] 第 6 回 Disaster City の参加者リスト（http://www.nist.gov/el/isd/participants.cfm）
[3] 第 7 回 Disaster City の参加者リスト（http://www.nist.gov/el/isd/participants_7.cfm）
注：第 7 回のリストには、日本から参加のロボットの記載無し
[4] ロボカップ日本委員会　（http://www.robocup.or.jp/about.html）
[5] Robocup 2013 Eindhoven
（http://www.robocup2013.org/participants-robot-rescue-league/）
[6] DRC 公式サイト　（http://www.theroboticschallenge.org/about）
[7] Inuktun 社（http://www.inuktun.com/about-us/）
[8] Power Hawk Technologies 社（http://www.powerhawk.com/about.html）
[9] http://www.airrobot.de/index.php/applications.html
[10] http://www.airrobot.de/index.php/projects.html
[11] iRobot 社（http://www.irobot.com/us/Company/About.aspx）
[12] Northrop Grumman Remotec 社
（http://www.northropgrumman.com/Capabilities/Remotec/Products/Pages/default.aspx）
[13]「US&R 訓練施設の整備と運用に関する研究 -テキサス Disaster CityR の調査を通じて-」,吉村晶子ら, 地域安全学会論文集, No.13,2010.11
[14] "日立建機、3 月に双腕作業機を東京消防庁と川崎市消防局に納入",
Robonable 記事 2011.02.23 （http://www.robonable.jp/news/2011/02/23astaco.html）
[15] "【SI2008】消防研、テムザックの援竜を評価。遠隔操縦を評価しつつも双腕に疑問",
Robonable 記事 2008.12.08
（http://robonable.typepad.jp/news/2008/12/20081208-si2008.html）
[16] "テムザックのレスキューロボ、北九州消防局に正式配置、消防ロボの共同研究へ",
Robonable 記事 2009.07.06
（http://www.robonable.jp/news/2009/07/20090706-88a3.html）
[17] "テムザック、20 日にビル解体現場でレスキューロボを実証実験、4 代目の開発につなげる",
Robonable 記事 2010.02.18
（http://www.robonable.jp/news/2011/02/23astaco.html）
[18] "東京消防庁、新型レスキューロボ公開、危険物の処理から要救助者の救助までこなす",
Robonable 記事 2009.10.23
（http://www.robonable.jp/news/2009/10/20091023-d3ab.html）
[19] 東京消防庁（http://www.tfd.metro.tokyo.jp/ts/soubi/robo/05.htm）
[20] NEDO ホームページ　（http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100176.html）
[21] 千葉工大 fuRo ホームページ（http://www.furo.org/ja/robot/sakura2/）
[22] DARPA ホームページ
（http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/DARPA_Robotics_Challenge.aspx）
[23] DRC 公式サイト　（http://www.theroboticschallenge.org/about）
[24] 千葉工大 fuRo ホームページ（http://www.furo.org/ja/robot/iris/index.html）

[25] 大和ハウス工業ホームページ
（http://www.daiwahouse.co.jp/robot/index.html#productsList）
[26] 大和ハウス工業 Moogle サイト
（http://www.daiwahouse.co.jp/robot/moogle/index.html）
[27] 俺の起業｜ロボットベンチャー奮闘記
（http://j-net21.smrj.go.jp/develop/robot/entry/20070814-01.html）
[28] 大和ハウス工業ニュースリリース
（http://www.daiwahouse.co.jp/release/release_170.html）
[29] アサンテ　ホームページ（http://www.asante.co.jp/info/robot01.html）
[30] "コンセプトは「レスキュー」と「シロアリ退治」――実用化目指すシロアリ防除ロボット「ミルボ IV」", MONOist 記事 2013.7.8
（http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1307/08/news080.html）
[31] "アサンテ、新規開発のシロアリ防除ロボ公開、保守点検・再施工から運用へ",
Robonable 記事 2012.07.18（http://www.robonable.jp/news/2012/07/asante-0718.html）
[32] "失敗パターン 2 ターゲットが肉体労働・単純労働に集中（＋フロントステージ支援の重要性)", Robonable 記事 2010.12.10（http://www.robonable.jp/special/2010/12/2.html）
[33] 工業技術センターの研究開発に基づく実用化事例
（http://www.fitc.pref.fukuoka.jp/kenkyu/seika/h25/h25_gaisei-research.pdf）
[34] 福岡県工業技術センター研究成果発表会における成果概要一覧
（http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/82614_16704847_misc.pdf）
[35] 財団法人 川崎市産業振興財団　川崎ネット　元気企業紹介
『ロボット・ルネッサンス』ロボットコンテンツを模索する若きメカ集団
（http://www.kawasaki-net.ne.jp/shisaku/genki/1805.htm）
[36] イクシスリサーチ社（http://www.ixs.co.jp/products/robot/saut-robot-j.html）
[37] ロボット実証実験実行委員会　（http://www.robojikken.com/about）
[38] 「イクシスリサーチ、高所での目視検査に向け全方位移動ロボを公開」
Robonable 記事 2012.3.16（http://www.robonable.jp/news/2012/03/ixs-0316.html）
[39] 「平成 23 年度ロボット実証実験等成果報告会配付資料」
（http://www.robojikken.com/data/meiji_ixs.pdf）
[40] 「平成 24 年度 ロボット実証実験成果報告会配布資料」
（http://www.robojikken.com/data/re_24_ixs.pdf）
[41] 「イクシスリサーチ、橋梁やトンネル・化学プラント向け点検ロボ 3 種開発」
Robonable 記事 2013.10.31
（http://www.robonable.jp/news/2013/10/ixs-1031.html）
[42] 国土交通省報道発表資料
（https://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000104.html）
[43] IROBINSPECT 公式サイト（http://www.robinspect.eu/）
[44] 「欧州で開発された、トンネルの亀裂を検知できるロボット「Robinspect」」
日経 BP 社 ケンプラッツ (2013/11/27)
（http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/article/building/column/20131127/642030/）
[45] DRC 公式サイト（http://www.theroboticschallenge.org/）
[46] Boston Dynamics 社（http://www.bostondynamics.com/index.html）

[47] "Google Adds to Its Menagerie of Robots", New York Times, December 14, 2013.
(http://www.nytimes.com/2013/12/14/technology/google-adds-to-its-menagerie-of-robots.html)
[48] 東京大学 JSK 研究室 （http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research-j.html）
[49] “Japanese Humanoid Robot Can Keep Its Balance After Getting Kicked”,
IEEE SPECTRUM, 8 May 2012
(http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/japanese-high-power-humanoid-robot-hrp3l-jsk)
[50] "DARPA ロボコンで勝利した日本のヴェンチャー企業が、グーグルに買収された理由"
wired 記事 2013.12.23
（http://wired.jp/2013/12/23/schaft-wins-darpa-robotics-challenge/）
[51] "Google Puts Money on Robots, Using the Man Behind Android", New York Times,
December 4, 2013.
（http://www.nytimes.com/2013/12/04/technology/google-puts-money-on-robots-using-the-man-behind-android.html?pagewanted=1&_r=0）
[52] DRC 公式サイト参加チーム紹介（http://www.theroboticschallenge.org/node/58）
[53] シャフト社会社概要（http://schaft-inc.jp/about/） ・・・ 今はアクセスできない
[54] 「点検・検査の現場は省力化に好意的ではない、イクシスリサーチ・山崎氏」
Robonable 記事 2012.4.9
（http://www.robonable.jp/news/2012/04/ixs-0409.html）
[55]「ロボットでインフラ点検 国交省、維持管理効率化へ開発」,日経電子版 2013.5.26
（http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG2601A_W3A520C1CR8000/）

２－１－２　特殊環境用ロボットに適した社会実装スキームの提案（担当：特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構）

本項では、前項２－１－１の調査結果を踏まえた上で、特殊環境用ロボットによって形成されるであろうマーケットとマーケティングの特殊性をロボット技術・ロボットビジネス・経営学分野の先行研究、などの側面から説明する。また、これらの特殊性をヘッジした特殊環境用ロボットに適した幾つかのビジネスモデルを、経営学分野の先行研究及び共通した特殊性をもつ他分野のマーケティング事例等、を応用することによって提案した。

本項で提案されている新しいビジネスモデルは、従って、調査結果の検討のみからでは直接的には造り出し得ない、専門性と経験性が加味された、独創性に溢れた新しいビジネスモデルとなっている。また、このようなビジネスモデルを活用する主体、すなわち“特殊環境用ロボットの社会実装の主体”、となるであろうベンチャー企業のビジネスシミュレーションについても、本ロボットビジネスの特殊性を配慮した上で行ない、その結果について提供している。

本項の報告は、このような新しいビジネスモデルとビジネスシミュレーション結果について、前記した委員会で十分な討論を行ない、修正・改良された内容について纏めたものであり、委員会を構成する委員ならびに関係者（付録２－２参照）によって執筆されたものである。

Ａ．特殊環境用ロボットによって形成される市場

（１）　特殊環境用ロボットのマーケティングにおける特殊性

（ａ）リスク要因について

① 市場における需給ギャップ

特殊環境用ロボットは、災害分野、社会インフラ分野、プラント分野、農業分野、などに今後利用されることが予測される（２－１－１参照）。この内、災害分野については、導入対象の組織や施設（消防、警察など）が限定され、必要な生産台数が少ないため、この分野のマーケティングには、社会的合意形成、社会支援、などが必要で、通常の経済活動とは異なるマーケティングが必要となる。その他の分野についても、産業として１人立ちするまでの間、融資、消費の振興、などの社会的支援により、需給のギャップを埋める方策が必要であろう。

② 納入後の技術的フォローアップとバージョンアップ

導入現場の状況が様々であるために現場に応じたカスタマイズが必要とされる上、災害・事故が発生した場合には速やかに現場の状況に適したシステムを構築、導入できる必要がある。 また、特殊環境用ロボットに使用される技術は日進月歩の途上にあるため継続的にシステムを更新できる仕組みが不可欠となる。

特殊環境ロボットは、適切な機能維持と向上の為、ロボット納入後に数々の技術的フォローアップとバージョンアップを必要とする。このコストはメーカー側または運用側の負担となる。そのための方策として、技術的運用側と開発側が密に連携すると共に、災害分野・社会インフラ分野においては、公的な「技術センターの設置」が必要であろう。

以下、（ｂ）、（ｃ）において、具体的な数値例に基づき説明する。

（ｂ）　非常時利用する製品が平時に利用出来る可能性について

特殊環境ロボットの様な非常時に力を発揮してほしい製品にとっては、平時に如何に有効に設備が活用できるかという問題は、保有するユーザにとって常時必要とせぬ設備を死蔵するか、平時にも活用できるかということで、設備の保有コストの上で重要な意味を持つ。また、メーカーにとっても需要を広げられるかという大きな課題でもある。それによって、商品の用途多様性にもつながり、事業の分野の広がり（需要分野の大きさ）にも大きく影響してくる。

その実際の例を以下に挙げる。

表２－３９　事業分野例とその用途・需要の試算

設備名	概要	非常時用途	平時用途	技術の転用用途	年間需要台数（想定含む）	概略開発費	年間稼働時間	設備単価	年間メンテ費用
移動高圧発電機車の事例	移動式の発電設備 非常時と平時の工事時にも活用可能 	災害時の給電	電気工事時に停電なしで給電し、工事施工可能。		初期配備（数十台/年）済みの現在は年１０～２０台/年程度	数千万円	数百～千時間程度	@数千万円	数十万円～百万円程度
水上飛行艇（救難用）の事例	水上離着水飛行艇（例US-2） 軍事・救難 	災害時、遭難時の救出	そのままでは転用困難。	火災消火用水上艇 技術の転用で民生用へ 	現状、数年に１機	数百億円	数十回出動	@約100億円	数億円?（定期修理含む） 国内＋輸出がターゲット
特殊環境救難用ロボット	災害時の救出用作業ロボット	災害時、事故時の救出・作業遠隔操作	そのままでは転用困難。	アクセス困難部の点検、メンテ作業？	初期配備時に数十台/年弱、配備後は数台～10台?/年程度	数千万円	訓練時、救難時の稼働程度	@１～2千万円	殆んど無し

移動式高圧発電機車の事例では、電力会社や、電気通信企業が保有する設備で、各社数

台から数十台を保有しているが、災害時の電気切断時に非常に有効な設備であるが、平時には無停電電気工事の際に使用され、年間稼働 1,000Hr 弱である。開発費は単価とほぼ同等か少し高い程度で、この程度の年間需要があれば、事業としては何とか商業ベースで成立するレベルである。

次の、水上飛行艇の例では、開発費が非常に高く（製品単価の数倍）て、年間需要も少なく、それを補うメンテ費用も本体の費用に対して、少ない事業で、この状態では、開発費を全面的にユーザ支払いに依存し、製作費も全面的に官需に依存する形でしか事業が成立しない。

それでは、本課題の特殊環境ロボットではどちらかというと、事業環境は飛行艇の例に近く、年間需要を補うメンテ費用も多くは期待出来ないと思われる。また、製品の他分野、他用途への転用は、いかにモジュール設計を行っても、そのままの転用は困難で、技術としての転用はありうるが、そのままの製品の流用は難しいと思われる。

このようなケースでは、やはり事業として成立させるには、開発費もその製作費も官需ユーザに直課し、飛行艇の事例の様に官需に頼る下記の様な形態を取らざるを得ないと思われる。

災害・非常時用レスキューロボット本体の開発・試作　・・・　全面的に国家負担

技術転用の民生用途（プラント点検、接近困難箇所の点検、等々）　・・・　企業ベースで開発・販売

（ｃ）　事業性の一考察

次に、レスキューロボットの配備、整備台数規模とそれから見た事業特性を考慮するにあたって、初期の生産台数、配備完了後の生産台数と事業規模、その特性を検討してみる。

また、最終形態の想定として、民生用と組み合わせた場合の事業規模、その特性を検討する。

レスキューロボットの配備数の想定；

○各災害対応ロボットセンターに数台配備が望ましいとして；

各県に最低１ヶ所は設置がいる。　⇒　総配備数　150～200 台

初期配備・・・主要地域　　まず全国７か所程度　⇒　２５台程度/年

・・・全配備までに　６年強必要　　年産　２５台

・・・更新・新型への更新　６年ごと　⇒　年産　２５台が続く。

	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目	10年目
新規配備	25	25	25	25	24	25				
新型へ更新						25	25	25	25	25
生産数	25	25	25	25	25	50	25	25	25	25

この間は、センターへの支援業務（サービス業務）が多数発生すると想定される

図２－４１　レスキューロボットの配備数と更新数の想定

事業として見ると、この災害対応ロボットセンターへの支援業務（サービス業務）も、有償の業務として国が費用を持つべきであろう。なぜならば、この時期の支援業

務は、サービス部品もあまり出ないため、サービス事業として成り立たず、損益的には旨みのない事業となるからである。

民生用途の需要の追加の想定；
○レスキューロボットに技術的に近い応用用途としての民生用点検・探査ロボット
（事業として、レスキューロボットとどう企業での生産販売が可能と考えられるもの）
需要予測は、調査に委ねるが、せいぜい年産　数十台と想定される。
レスキューロボットの生産が立ち上がった状態（数年後）に、年間　数十台がプラスされる。
その状態では、年間１００台に満たぬ総生産の事業体と想定される。
⇒事業体としては、数十億に満たぬ事業。大手企業の一機種メニューとしては細々しすぎる。
⇒単独にレスキューロボット事業を行うのではなく、既存事業にこれに関連したロボット的事業を保有する企業が、その拡大分野として取り扱うのが一番自然な事業として成立しやすい形態と考える。

上記の想定からでは、利益を生む事業に育てるには、輸出も含めて、上記想定の数倍の需要が欲しいが、直ちに市場が成立しない状況では、類似事業を行っている企業で、その拡大分野として取り扱う形態が事業として成り立ちやすい形態と考える。

（担当：來田浩毅）

（２） イノベーション市場におけるビジネスモデルのあり方

本節では、特殊環境用ロボット分野において、第一に、社会科学分野の先行研究を概観し、どのように、整理出来るか、第二に、今後どのような市場が有望か、第三に、日本が国際的にリードするには、どのような政策が必要か？について明らかにする。

（ａ）先行研究

近年、日本では、レスキューロボットを筆頭に、産業用ロボット以外にも、さまざまな分野において特殊環境用ロボットが導入されている［1］。しかしながら、現在、社会科学分野において、ロボットを対象にした研究は、ほとんどなされていない。その理由として、主に、工場における溶接・塗装用の産業用ロボット以外の特殊環境用ロボットは、未だ、大学における基礎研究段階にあり、事業化に至っていないことが考えられる。

一方、米国の場合、DARPA Robotics Challenge 等の資金援助を受けて、大学における基礎研究段階から、大学発ベンチャーや技術移転の手段を用いて事業化を実現することで、世界一の産業競争力を維持している。米国において DARPA Robotics Challenge 等の巨額の資金投入がロボット分野において実現されているにもかかわらず［2］、日本において、資金投入が実現されていない理由は、その裏付けとなる主たる理論体系が経済学にあるのではなく、社会的・歴史的背景をふまえた経営学・商学分野のイノベーションに関する事例研究の蓄積による知見であるためと考える。

したがって、本節では、特殊環境用ロボット分野の事業化を説明する先行研究の一端を

紹介することで、現実の経営現象を理解するための分析視角を提供することとする。

① 破壊的イノベーション（disruptive innovation）（Christensen, 1997）［3］

2013 年 12 月、Google による MIT 発ベンチャーの Boston Dynamics 社、東京大学発ベンチャーの SCHAFT 社の買収、AMAZON による無人飛行ロボットによる配送サービスの AMAZON Prime Air の発表等、特殊環境用ロボット分野における IT 分野からの参入が相次いだ[1]。また、年明けの 2014 年 1 月になると、Google の提供する Android サービスのコンソーシアムへのホンダの参加表明もあり、ロボット技術のスマートカーへの応用も現実のものになってきた[2]。これらは、異業種・異分野からの特殊環境用ロボット市場への参入であり、既存市場の市場分析では全く説明することが出来ない経営現象である。周知の通り、2000 年初頭まで、携帯電話やカーナビは、日本の大手家電メーカー勢が国際的にも市場シェアを獲得していたが、2010 年頃になると、当初低機能であった Google や Apple 等の米国のベンチャー企業によるスマートフォンに市場シェアを奪われてしまったのである［4］。

この異分野からの新規参入企業やベンチャー企業によって、大手企業が駆逐されてしまう経営現象を最も的確に説明する理論は、ハーバード・ビジネススクールのクリステンセンによる「破壊的イノベーション（disruptive innovation）」である。クリステンセンによれば、破壊的技術とは、「従来の価値基準の下では従来製品よりも性能を低下させるが、新しい異なる価値基準のもとでいくつかの優れた特長を持つ新技術のこと」であり、「破壊的技術がもたらす変化」を、「破壊的イノベーション」と定義している［3］。

クリステンセンは、破壊的イノベーションを理論化するにあたり、真空管に対してのトランジスタ、パワーショベルにおけるケーブル型に対しての油圧型の事例を挙げたが、一方、破壊的イノベーションの対概念として、「持続的イノベーション（sustainable innovation）」を提示した。ここで、持続的技術とは、「主流市場の主要顧客が評価する性能指標（すなわち、従来の価値基準）のもとで性能を向上させる新技術」のことであり、持続的技術がもたらす変化を、「持続的イノベーション」とした［3］。

つまり、日本の大手家電メーカーによる携帯電話やカーナビの事業は、「持続的イノベーション」として説明することが適切であり、Google や Apple 等の異分野から参入したスマートフォンによって駆逐された経営現象は、「破壊的イノベーション」として説明することが適切である。

また、破壊的イノベーションには、「ローエンド型」と「新市場型」と二種類あり、上記、携帯電話・カーナビに対するスマートフォンの事例は、「新市場型破壊的イノベーション（new-market disruptive innovation）」として説明可能である。つまり、新市場型破壊的イノベーションは、「従来の製品・サービスにない性能などを提供することで新たな需要を創り出すイノベーション」として、説明されている［5］。

---

[1] 例えば、IEEE のブログである IEEE Spectrum に 2013 年 12 月 13 日に掲載された Frank Tobe 氏のコラム「Apple, Amazon, and Now Google: An Exciting Time for Robotics」
http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/apple-amazon-and-now-google-an-exciting-time-for-robotics 等を参照のこと。（2014 年 2 月 7 日確認）

[2] Open Automotive Alliance （http://www.openautoalliance.net/ ）を参照のこと。 （2014 年 2 月 7 日確認）

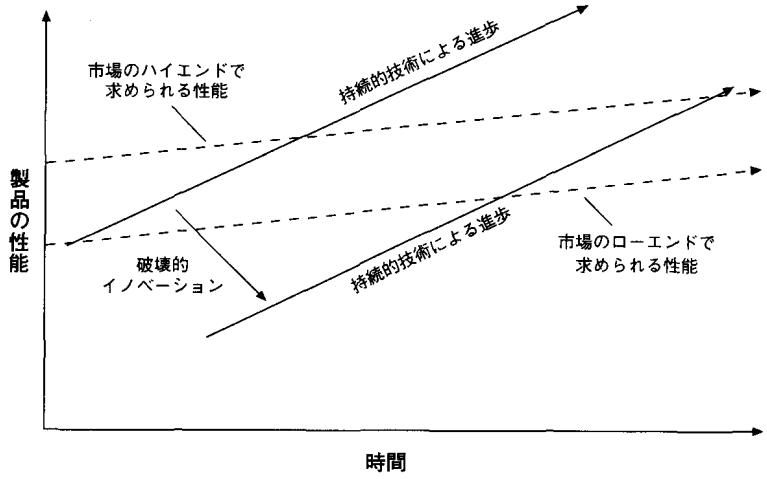


図0.1　持続的イノベーションと破壊的イノベーションの影響

図２－４２　破壊的イノベーションと持続的イノベーションの違い

【出典】（Christensen, 1997 訳, 10 頁）

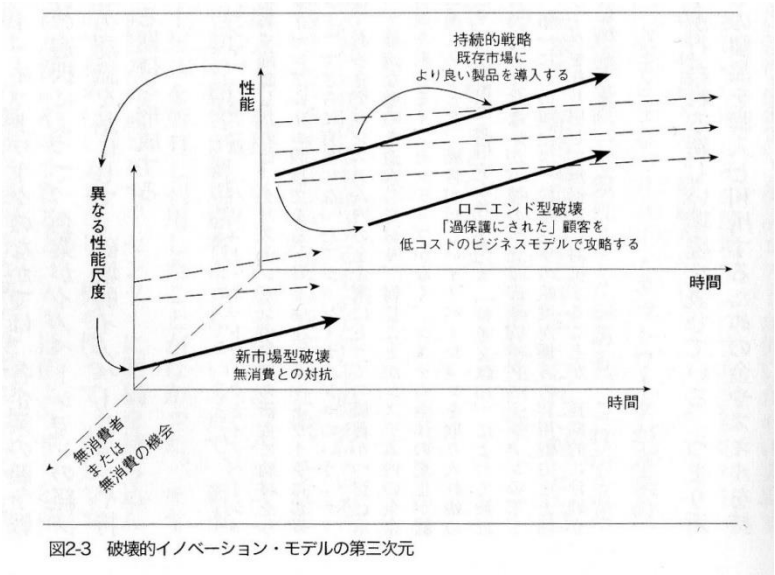


図2-3　破壊的イノベーション・モデルの第三次元

図２－４３　破壊的イノベーションにおける「新市場型」と「ローエンド型」の違い

【出典】（Christensen and Raynor, 2003; 訳書, 55 頁）

例えば、MIT 発ベンチャーの iRobot 社による掃除ロボットのルンバ(Roomba)や福島原発事故に導入されたレスキューロボットの PackBot は、まさしく新市場型破壊的イノベーションの典型的な事例として説明することが可能である[3]。クリステンセンは、「無消費の抵抗（compete against nonconsumption）」と説明したが、破壊的イノベーションの場合、従来の価値基準の下では従来製品よりも性能を低下させるため、ある一定期間、全く売れない時期が続くことが知られている。この現象を、インテル（Intel）の元社長のアンディー・グローブ（Andrew Glove）は「デスバレー（death valley）」と呼んだが［6］（Glove, 1988）、それが故、軍事技術の商用化を巡り、MIT とハーバード大、ならびにボストン財界によってベンチャーキャピタルが想起されたことが知られている［7］［8］。

一方、日本の場合、トヨタ生産方式［9］、京セラのアメーバ経営［10］等、持続的技術を基盤にした持続的イノベーションに長けた大企業が多く、基礎研究からの新市場型破壊的イノベーションは、例えば、トランジスタに対しての真空管、デジタルカメラに対してのフイルムカメラ等の「既存資産とのカニバリゼーション（Cannibalizing Existing Assets）」を起こす懸念から敬遠され、事業化が難しいことが指摘されている［7］［11］［12］

表２－４０　クリステンセンによるイノベーションの種類

持続的イノベーション	破壊的イノベーション	
	ローエンド型	新市場型
		無消費への抵抗

出所：（Christensen and Raynor, 2003）を元に筆者が作成

② 事業システム（Business System）（加護野・井上, 2003）［13］

一方、特殊環境用ロボットに関する経営現象の説明概念として、「新市場型破壊的イノベーション」が適切であったとしても、その事業化を実現するための分析枠組みがなければ、机上の空論となってしまう。その点、ロボット・ビジネスの事業計画策定時に適切な理論体系は、「事業システム論」［13］［14］［15］であると考える。

事業システムとは、 「経営資源を一定の仕組みでシステム化したものであり、①どの活動を自社で担当するか、②社外のさまざまな取引相手との間に、どのような関係を築くか、を選択し、分業の構造、インセンティブのシステム、情報、モノ、カネ、の流れの設計の結果として生み出されるシステム」（47 頁）と定義されている［13］。

[3] クリステンセンら（Christensen and Raynor, 2003）は、破壊的イノベーションの実例として「無人軍用機」を挙げ、以下のように説明している（訳 87 頁）。「当初は隠された対空砲座を探知するための無人標的機として使われていたが、やがて偵察機という上位市場へ移行し、2001 年から 2002 年にかけてのアフガニスタン戦争では、はじめて特殊武器搭載機として使用された。」この点、PackBot はその後の戦争やテロ対策でも使用されていることから、本報告では、新市場型破壊的イノベーションの典型的な事例として、特殊環境用ロボットを検討する。

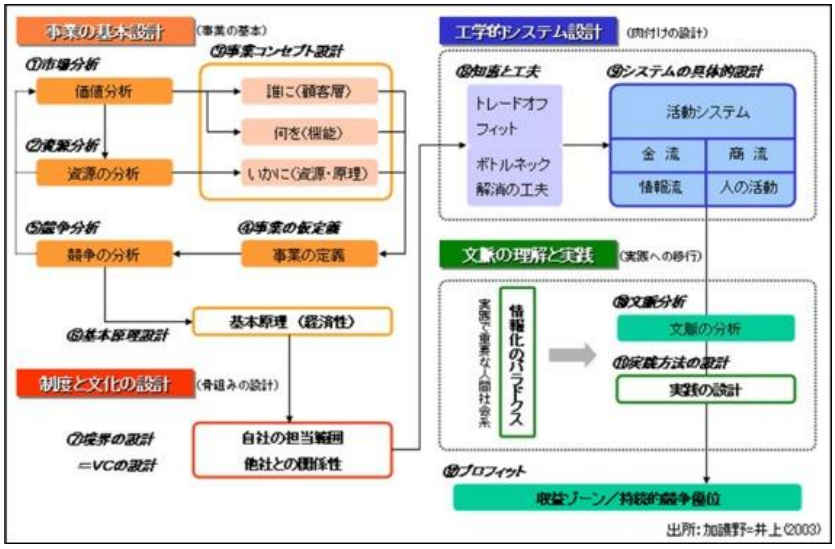


図２－４４　事業システム分析・設計の手順

【出典】加護野・井上（2003, 128-129 頁）を元に、坂田孝明氏による作図[4]

その概要と分析手順は、図２－４４で示した通りであるが、ここで、事業システム論を紹介した意図は、必ずしも技術に優れたロボットが売れる訳ではないことを示唆しているからである。すなわち、ロボットは、エンジニアリング（工学）の対象としてのシステム（人工物）と捉えられるが［16］［17］、その優れたロボットを生み出すビジネスの仕組みも、マネジメント（経営）の対象としてシステム（人工物）として捉えることが、理論的にも実務的にも、重要だからである［18］。なぜなら、トヨタのカンバン方式、京セラのアメーバ経営等、優れた「製品・サービス」を生み出す企業には、必ず、その競争優位を生み出す、優れた「事業システム」が形成されていることが、明らかとなっているからである。

その点、特殊環境用ロボット分野に関しても、米国において勃興しつつある新市場型破壊的イノベーションに対峙するためには、技術のみならず、それを支える経営の視点も統合することが必要であり、製品・サービスにおける技術レベルの差別化のみならず、事業システムにおける差別化を検討する必要があると考える。この点、近年、計測制御分野では、学際的な観点から、システム・インテグレーションの重要性が示唆されているが［19］[5]、経営学・商学においても、経営現象を分析するのみならず、組織を人工物と捉え、設計（デザイン）する立場からの理論構築の必要性が求められているのである［18］。では、特殊環境用ロボット分野において、新市場型破壊的イノベーションを実現するための事業システムを設計（デザイン）するにはどのようにすれば良いのであろうか。

---

[4] 図２－４４は、以下のサイトから引用。http://www.sakata.co.jp/logistics-166/

[5] 例えば、第 14 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 SI2013 の講演会案内は、「システムインテグレーション部門講演会は，高機能化・複雑化するシステムの諸問題を解決し，更に，システムの設計論を開拓・構築するため，人間・社会・人工物が関わる様々な分野における俯瞰的システムインテグレーションをテーマとして，全国の産官学の研究者・技術者が集結して当該分野に関連する講演発表及び討論を行うものです」と記載されている。（http://www.si-sice.org/si2013/ を参照のこと）

③ エコシステム（Eco-system）（Iansiti and Levien, 2004 など）［20］

ここまで、特殊環境用ロボットのビジネスモデルを検討するにあたり、破壊的イノベーション［3］、事象システム論［13］を紹介してきた。これらの理論が説明する経営現象は、企業におけるロボット事業を手掛ける担当者にとっては、身近な対象であり、ある意味、当然の事象として解釈される方も多いと推察される。しかしながら、例えば、溶接や塗装用ロボット等の産業用ロボット以外は、本格的な事業化を迎えておらず、現時点では、主に大学研究室を中心とした萌芽的な基礎研究段階にある。したがって、既存の経営学・商学の事例研究のように、分析対象を企業に限定して、大企業における基礎研究に着目するのみならず、大学における基礎研究にも視野を広げ、分析対象として産官学連携や大学発ベンチャーを包含する理論が必要である。その点、エコシステム（Eco-system）の概念［20］は、例えば、ロボット分野における大型研究開発プロジェクトの是非を検討するのに、きわめて適切な理論であると考える。

イアンシティー（Iansiti）らによれば、エコシステムの定義は、「企業間のネットワーク関係を生物学上のエコシステム（生態系）に例えたものであり、多数の緩やかに結びついた参加者たちが共同の発展と生き残りを目的として、相互依存している状態を表す概念」［20］としている。彼らは、インテルによるマイクロプロセッサやマイクロソフトによるオペレーティングシステムのユーザーを巻き込んだ開発事例を挙げ、参加ユーザーに対して開発環境としてのプラットフォームを提供することによって、競争の次元が、一企業単位ではなく、顧客との協働によるエコシステム単位のユーザーを巻き込んだ競争に進化しつつあることを明らかにした[6]。

また、より現実的に、「新しい価値システムの構想の実現に対して人工物の開発・生産などによって貢献するエージェントの集合体」［21］というエコシステムの定義がなされており、特殊環境用ロボット分野を対象にこの定義を適用すると、新市場型破壊的イノベーション［5］を実現するためには、大学における基礎研究や大学発ベンチャーをエージェントとして視野に入れた産官学連携のエコシステムの構築が不可欠であることが示唆される［22］。その点、1960年代以降、コンピュータ分野において、米国では、軍事研究を積極的に取り込んだ、MIT、スタンフォード、カーネギーメロンの3つの大学によって、軍事技術の商用化を目的としたベンチャーキャピタルと大学発ベンチャーのエコシステムが構築されたが［23］、一方、日本では、当時の通商産業省主導の国家プロジェクトによって、電気試験所と大企業との連携のエコシステムが構築された［7］［24］。つまり、米国と異なり、軍事研究を迂回する形で国家プロジェクトがなされ、通商産業省と大企業との連携によるエコシステムが形成されてきた日本の特殊環境用ロボットの研究開発においては、これまでと同様、軍事研究を迂回しつつ、一方で、社会的合意形成を得ながら、新しい価値システムの構想の実現が不可欠と考える。

[6] リードユーザー・イノベーションについては、マーケティング分野において研究蓄積がなされている。例えば、LEGO マインドストームの事例については、以下のコラムがあるが、http://www.president.co.jp/pre/backnumber/2011/20110404/18440/18450/ (2014 年 2 月 9 日確認)。より包括的な議論については、小川（2013）［25］を参照のこと。

表２－４１　特殊環境用ロボット分野におけるイノベーションの種類と特徴

新市場型破壊的イノベーション	**イノベーションの種類**	持続的イノベーション
米国の大学発ベンチャー	**担い手**	日本の大企業
軍事技術の商業化	**特徴**	米国の既存ビジネスの追随
例 DARPA Grand Challenge	**研究資金源**	通産省・文部省・国土交通省等
軍事ロボットの転用	**位置付け**	防災対応のみ

④ 先行研究のまとめ

以上、先行研究の議論をまとめると、【表２－４０】で示した概念の歴史的背景には、米国の場合、Darpa Robotics Challengeが典型であるが、軍事技術の商業化の観点から、新市場型破壊的イノベーションのエコシステムが大学研究者やベンチャーキャピタルを中心に形成されてきた歴史があり、軍事用途のレスキュー用途への転用が、まさにiRobot社のPackBotであることが理解される。一方、日本の場合、軍事技術であるが故、大学からは敬遠され、米国で生まれた技術、既に米国において萌芽的市場が存在する事業を追随する目的で、持続的イノベーションの文脈において、通産省と大企業が中心となってエコシステムが形成されてきた歴史があり、大学における基礎研究からの新市場型破壊的イノベーションの実現が、社会的に困難であった背景が理解される。

工学と異なり、経営学の場合、方法論として、歴史的事実を基にした事例から帰納的に概念が導かれ、経営現象を説明する理論、構成概念となっていることが多い［26］。したがって、イノベーションの議論についても、コンピュータ分野の研究潮流を含めた歴史をふまえた事例研究が数多く存在する［27］。逆に言えば、経営学の理論は、数学モデルとして議論することは難しいものの、その理論の背景となった事例の歴史を辿ることによって、コンピュータ分野から生まれてきたイノベーションの議論を、ロボット分野に転用することが可能である。

以上をふまえ、本論に戻り、日本の特殊環境用ロボット分野において、新市場型破壊的イノベーションを実現するための事業システムを設計（デザイン）する方策についてまとめておく。まず、第一に、単独の企業単位ではなく、産官学連携のエコシステムの単位で検討する必要がある。そして、第二に、米国における軍事技術の商用化の文脈でなく、日本の社会に受け入れられる可能性が高い文脈において、大企業のカニバリゼーションを迂回する技術経路を設定しなければならない。第三に、その候補は、現時点では、廃炉技術であり、担い手としては、大学発ベンチャーである可能性が高い[7]。以上が、先行研究から導かれる含意である。

しかしながら、想像の範囲を出るものではないが、現時点で、廃炉技術の開発が、研究者によって魅力があり、大学発ベンチャーが魅力的なキャリアパスと成り得るかどうかは、

[7] 日本においては、福井県敦賀市の「原子炉廃止措置研究開発センター」が原子炉の廃炉に関する研究開発拠点である。詳細は、以下の公式サイトを参照のこと。
http://www.jaea.go.jp/04/fugen/index.html （2014 年 2 月 9 日確認）
その他、原子力に関連した独立行政法人・メーカー・電力会社による技術組合として、「国際廃炉研究開発機構」が 2013 年 8 月に発足している。
http://www.irid.or.jp/index.html （2014 年 2 月 9 日確認）

別問題である。これは、金銭的なインセンティブのみならず、社会的なインセンティブを含めて、ロボット研究者の評価システムのデザインが不可欠であると推察される。少なくとも、ここでの研究、事業化の経験が、ロボット研究者として正当なキャリアパスとして認められなければ、魅力的な研究分野として多くの研究者の参入が見込めないと推測される。以上の問題意識をふまえた上で、B(1)以降、具体的な方策を検討する。

（担当：高瀬 進）

（3）特殊環境用ロボットのビジネスモデルマトリックス

特殊環境用ロボットのビジネスに関し、様々の厳しい条件が存在することは、これまでに述べたところであるが、これらをマトリックスとして纏めると、一例として表 2-42 のようになる。

表2－42　特殊環境用ロボットのビジネスモデルマトリックス

	災害分野Ⅰ（地震、水害、火災、海難、遭難・・・）	災害分野Ⅱ（原子力パワープラント）	社会インフラ分野	プラント分野	農業分野
ニーズ	災害現場探査、被災者発見・救出・搬送、災害復旧作業	事故防止（検査）、事故現場（探査）、事故復旧作業、廃炉作業	トンネル、橋梁、ビル等の老朽化・危険状態検査、メンテナンス	化学プラント、鉄鋼プラント等の老朽化・危険状態検査、メンテナンス	作物の作柄検査、農作業（特に畦畔除草など）
技術イノベーションの特徴	破壊的イノベーション技術（自律型⇒新市場型）例：自動運転技術	破壊的イノベーション技術（自律型⇒新市場型）例：自動運転技術	持続的イノベーション技術（支援型⇒旧市場型）例：無人化施工技術	持続的イノベーション技術（支援型⇒旧市場型）	持続的イノベーション技術（支援型⇒旧市場型）
主たる事業主体	（大学発）ベンチャー＜米国が得意な型＞	（大学発）ベンチャー＜米国が得意な型＞	大企業（技術開発・移転）＜日本が得意な型＞	大企業（技術開発・移転）＜日本が得意な型＞	大企業（技術開発・移転）＜日本が得意な型＞
運用体制	今後の課題	今後の課題	半自律型遠隔操作例：コマツのKOMTRAX, AHS等（情報化施工）	半自律型遠隔操作例：コマツのKOMTRAX, AHS等（情報化施工）	半自律型遠隔操作例：コマツのKOMTRAX, AHS等（情報化施工）
社会的合意形成	法律制定の必要性あり	法律制定の必要性あり	現行のままで対応可	現行のままで対応可	現行のままで対応可
予測される市場	官製市場（軍事応用含む）	官製市場（軍事応用含む）	民間市場（交通・介護応用含む）	民間市場（交通・介護応用含む）	民間市場（交通・介護応用含む）
予測される我が国の2020年潜在市場（図2-8参照）	本調査での当該情報の収集できず（参考：2035年に約3,200億円の予測あり）	約281億円	橋梁：約582億円 トンネル：約54億円 その他：約509億円	約7,938億円	約580億円
起業の自立性	×	×	○	○	○
起業の為の社会支援	資金融資、技術支援、需要喚起（制度的支援）	資金融資、技術支援、運用支援	資金融資、技術支援	資金融資、技術支援	資金融資、技術支援
望ましい生産体制	受注生産	受注生産	通常生産	通常生産	通常生産
望ましい販売体制	消防庁、警察等、公的機関などへの特殊販促	原子力発電関連会社などへの特殊販促	通常販促	通常販促	通常販促

以下、このような条件を前提とする、幾つかのビジネスモデルとそのシミュレーション例を示す。

B．特殊環境用ロボットに適したビジネスモデルの提案と事例

（1）破壊／持続ハイブリッドビジネスモデルの提案

（a）特殊環境用ロボットの特徴

既に先行研究に言及したが、ここでの必要な議論は、幅広い分野に対応する一般化された定量的なモデルではない。すなわち、軍事研究を牽引するMIT、スタンフォード、カーネギーメロン大学等、基礎研究の事業化を目的としたプロジェクトを展開する米国とは異なる状況下における日本の場合、歴史的・文化的背景を制約条件として、どのように社会的合意形成を得るか、という点が事業システムを設計する上で、きわめて重要である［13］。この点、日本は地震のみならず、火山大国でもあると言われるが、雲仙普賢岳の噴火以降、

国土交通省の事業として進められてきた「無人化施工」の技術蓄積の事例が参考になる[8]。技術的には、パワーショベル、ブルドーザー等の建設機械の遠隔操作技術であるが、今回の福島原発事故において、有効活用されたことが報告されている［2］。

以上をふまえると、特殊環境用ロボットの理論的背景となるロボット工学は、学問体系としては、機械・制御・電子・情報の複合技術として対応しているが[9]、ビジネスの観点からすれば、産業用ロボットの範疇を超えて、建設機械、スマートカーも、既に、機械・制御・電子・情報の複合技術が対応しており、実質上、ロボット工学の応用分野として考えるのが適切となってきたのである[10]。

（b）持続的イノベーションとしての「無人化施工」

米国においては、軍事目的のロボットが軍事研究を牽引するMIT等において開発され、それらがレスキューロボットに転用されていった経緯については既に述べた通りである[11]。一方、日本においては、地震ならびに、原発事故を想定したレスキューロボットの研究開発プロジェクトは、2006年以降、継続できなかった。当然、技術に対して予算が付かなければ、それを運用する組織や技術者の人材育成についても予算化がされていなかったのである[12]。この事実に対して、レスキューロボット関係者への経営学・商学の立場からの貢献がほとんどなかったことが悔やまれる。そのようなことが遠因となり、日本においては、福島原発向けの初動においてはレスキューロボットを投入することができず、効果的な運用をすることができなかったことが指摘されている［2］。

ところが、雲仙普賢岳の噴火以降、国土交通省の管轄で研究が継続されていた建設機械を用いた「無人化施工」技術は、東日本大震災の復興活動においても十分に活用されており、災害現場への実施力の点において、「レスキューロボット」と「建設機械による無人化施工」は、明暗を分ける形になったのである[13]。

この「無人化施工」の技術を、主に開発したのは建設機械大手のコマツである。「無人化施工」の技術は、遠隔操作の技術であり、ICT技術の応用として位置付けられる。一方、コマツのICT技術を用いたインフラのKOMTRAXは、製品レベルの差別化ではなく、事業システムレベルの差別化［13］を実現している事例として、経営の側面からもグローバルな競争優位を支えるきわめて高い評価を受けているものである[28]。このKOMTRAXは、コマツ製の建設機械を使った銀行ATMの盗難事故が多発したことを受け、GPSを用いた運用管理システムを構築したことがその経緯であるが、既存顧客に対しての価値の提供と

---

[8] 無人化施工についての詳細は、建設無人化施工協会のサイトを参照のこと。
http://www.kenmukyou.gr.jp/ （2014 年 2 月 9 日確認）

[9] 例えば、Wikipedia の英語版では、ロボットの学問体系について、「The design of a given robotic system will often incorporate principles of mechanical engineering, electronic engineering, and computer science (particularly artificial intelligence).」と紹介している。（下線は筆者が追加）
http://en.wikipedia.org/wiki/Robotics （2014 年 2 月 9 日確認）

[10] 例えば、週刊東洋経済 2013 年 11 月 9 日版では「スマートカー 巨大市場」として自動運転の技術に関連してスマートカーの特集が組まれた。

[11] 例えば、iRobot 社の歴史紹介を参照のこと。
http://www.irobot.com/us/Company/About/Our_History.aspx （2014 年 2 月 9 日確認）

[12] 具体的には、1999 年 JCO 事故後に開発された原子力事故対応ロボットが福島原発事故に投入できなかった点についてである。詳細は、［29］を参照のこと。

[13] 例えば、東京電力による「福島第一原子力発電所事故対策におけるロボット（遠隔操作化機器）の活用」2011 年 4 月 28 日 の報告書等がある。以下を参照のこと（2014 年 2 月 9 日確認）。
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1-roadmap/images/11042801a-j.pdf

いう観点から、クリステンセンの「持続的イノベーション」の典型的な事例と考えるのが適切である。しかしながら、GPSを用いた運用管理システムであるKOMTRAXは、現在、与信管理から無人化施工まで応用されており［30］、建設機械の範疇を超えて、レスキューロボットと同様に火山や原発等の立ち入り禁止区域内での作業において有効であることが明らかになったのである。

（ｃ）破壊的技術と持続的技術のハイブリット

先述した通り、日本の場合、軍事技術である懸念から大学を迂回した、通産省と大手企業との国家プロジェクトによる技術移転が、1960年代以降の主たるイノベーションの実現方法であった。それは米国に対して、キャッチアップをする場合には機能したと言えるが、その効果は、クリステンセンの主張するところの「持続的技術」に限定的であったと言える［7］。例えば、写真フイルム事業に対してのデジタルカメラ事業のように、破壊的技術の場合、大手企業の中では、既存事業との共喰い（カニバリゼーション）が起こる可能性が高く、基礎研究からの国家プロジェクトは、既存の大手企業に対しては決して望ましいものではなかった［7］［11］［12］。

軍事技術の商業化の文脈は、日本の大学においては受け入れ難かったこともあり、結果として、2000年頃まで、国立大学教員による大学発ベンチャーは制度化されなかった。そのため、「日本において破壊的技術と破壊的イノベーションの実現を、どのように制度化すべきか」という点は、米国を手本にすることが出来ず、未だ懸案事項のままである。

他方、「持続的技術」の範疇である「無人化施工」の技術は、製品レベルにではなく、事業システムレベルの差別化を実現している「KOMTRAX」に支えられており、建設機械が特殊環境用ロボット分野に応用されつつある。よって、コマツは、KOMTRAXによる事業システムのイノベーションを通じて、結果的に「破壊的イノベーション」を実現していると考える[14]。したがって、特殊環境用ロボット分野の事業化を検討するにあたり、まずは、「無人化施工」を支える「KOMTRAX」の事業システムを、レスキューロボットの研究開発・メンテナンスのスキームに導入すべきである。その結果、レスキューロボットの基礎技術を、例えば、スマートカー等の他分野に応用することが可能になることが期待される。

[14] KOMTRAX について、ICT 化の単なる手段と考えている方が多いが、経営学の視点から見た場合、ICT 化を通じて、「研究開発・生産・販売・サービス」が一体化しており、きわめて模倣の難しい仕組みである。それが故、製品レベルではなく、事業システムレベルの競争優位を生み出していると考える。

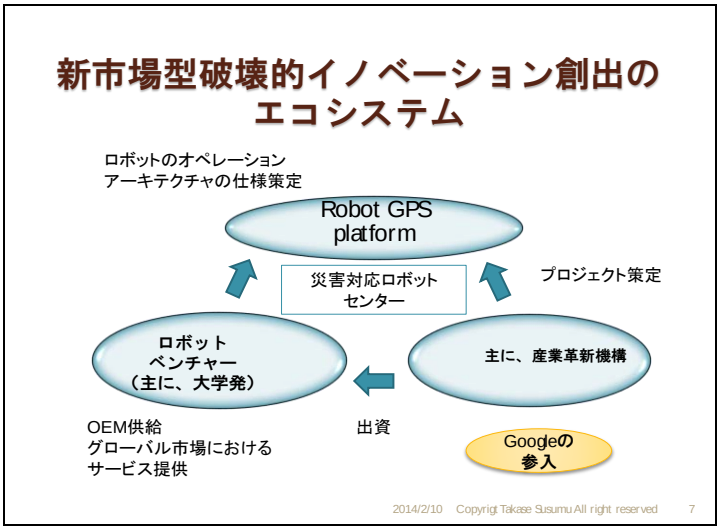


図２－４５　新市場型破壊的イノベーション創出のエコシステム（筆者作成）

【図２－４５】は、新市場型破壊的イノベーションを創出のエコシステムを上記の議論をふまえて概念化したものである。ここで、仮に、ロボットの試作機が出来たとしよう。この図では、産業競争力懇談会（COCN）に提案されている「災害対応ロボットセンター」[15]が設立されたとして、そこに、KOMTRAXに準じた仕組みとして「Robot GPS platform」が導入されていると仮定する。そうすると、今までは、大企業でなければ、その試作機を現場投入することが物理的・予算的に不可能であったものが、大学やベンチャーでも試作機を現場投入することが可能になる。そして、その導入結果を、GPSを通じてデータを取得し、それを一元的に管理し比較検討することで、フィードバックを迅速に研究開発につなげることが可能となる。その研究開発サイクルは、結果として、ロボットのアーキテクチャの仕様策定につながっていくが、ロボットの事業化を支えるエコシステムの中核的存在を担うことになる。

より具体的に言えば、特殊環境用ロボットを、GPSを通じて運用管理するネットワークを提供する事業と、特殊環境用ロボットを開発する事業は、インターネットのプロバイダーと、パーソナル・コンピュータの関係と同様であり、事業化にあたっては水平分業が必要であると考える。このことを言い換えると、特殊環境用ロボットの運用管理するネットワークを構築すれば、水平分業を通じて、大学研究室の試作機を国際市場に投入することが可能となる。

少なくとも、GoogleやAmazonによるロボット事業への参入は、Google Mapを拡張した特殊環境用ロボットの運用管理するネットワークを所与のモノと考えており、破壊型技術の基盤であるプラットフォームと、持続的技術の延長上の、例えば、建設機械や自動車等の既存システムとのハイブリッド、または、新しい組み合わせが、特殊環境用ロボット分野のビジネスモデルを検討する基本要素となると予想される。

2013年12月Googleによるロボットベンチャーの買収が相次いだが、例えば、（株）産業革新機構による官民ファンドからの出資や、Darpa Robotics Challengeのような公開型

[15]産業競争力懇談会（COCN）による「災害対応ロボットセンター設立構想」（2013 年 11 月 1 日）は、以下を参照のこと。http://www.cocn.jp/common/pdf/thema60-S.pdf (2014 年 2 月 9 日確認)

のコンペを実施することで、多様な資金源のアクセスを実現し、その他、自動車や建設機械等の大企業から出資を含めた、多様な産官学連携が期待されると考える。

＜ディスカッション＞

最後に、これまでの議論整理し、今後、どのような市場が有望か、日本が国際的にリードするには、どのような仕掛けが必要か、二点に対して、一旦の見解を述べておこう。

まず、経営学・商学の先行研究を踏まえ、2013 年 12 月の Google や Amazon による参入等の最近のロボット業界の動きを分析するならば、特殊環境用ロボット分野は、新市場型破壊的イノベーションと持続的イノベーションが、同時並行的に勃興している稀な事例と把握するのが適切である。次に、ロボット分野における破壊的技術は、主に、米国の軍用ロボットと大学発ベンチャーがルーツであり、日本の場合は、地震対策かつ、経済産業省主導で、大学における先駆的研究によって実現されてきた。一方、ロボット分野における持続的技術は、日本の場合は、無人化施工がルーツであり、火山対策かつ、国土交通省主導で、大企業への技術移転によって実現されてきたことに言及した。

以上をふまえ、本稿の見解を述べると、まず、第一に、特殊環境用ロボットにおける要素技術が、建設機械や自動車（スマートカー）に応用されることを前提にするならば、20～30 兆円とも言われる巨大な市場が登場したことに着目しなければならない。第二に、物流分野への無人飛行機の導入や原発廃炉向けのレスキューロボットの基礎研究については、萌芽的段階にあるが、技術の裏付けとなる、法律の整備が必要であり、国際標準の取得も視野に入れた活動が不可欠である。第三に、IEEE 等によって標準化プロセスを経て生き残った技術が、事業化される側面もあり、今までのように、既に欧米によって決められた一定のルールに基づいて競争をするのではなく、国際的に通用する競争ルールそのものを日本がイニシアティブをとって提案していく胆力が必要である。

この点、コンピュータや携帯電話と同様、オペレーティングシステム（OS）が、ロボット・ビジネスのヘゲモニーを握ることが想定される。東京大学発ベンチャーの SCAFT やボストン・ダイナミクス社を Google が買収した理由は、無料 OS 戦略を通じて、ロボット・ビジネスのヘゲモニーを奪取しようとしていることは明らかである。既に、2014 年 1 月の段階で、ホンダが、Google が提供するスマートカーの技術開発をおこなうコンソーシアム（Open Automotive Alliance）に加入したことが伝えられているが[16]、今後、スマートカーの OS を巡り、日本の大手自動車メーカーが軸となって、合従連衡が繰り広げられる可能性が高い。したがって、建設機械市場において、世界レベルの競争力を持つコマツの KOMTRAX を巡る動向はきわめて重要と考える。なぜなら、KOMTRAX は、建設機械の事実上の OS 機能を担う仕組みとなっており、また、3000 メートルを超えるチリの鉱山において、既に操業されている無人運転技術が、スマートカーの基盤技術に応用される可能性が高いと想定されるからである[17]。

以上を総合的に判断すると、廃炉や災害対応等の特殊環境用ロボット分野における官製市場の存在は、ロボットの OS 周辺の破壊的技術を促し、その研究成果が、既に 20~30 兆

[16] Open Automotive Alliance の詳細については、以下を参照のこと
http://www.openautoalliance.net/ （2014 年 2 月 9 日確認）

[17] 例えば、コマツによる無人ダンプの市場については、東洋経済オンライン「先行コマツ、強敵も参戦 “沸騰”無人ダンプ市場」（2012 年 8 月 8 日）を参照のこと。
http://toyokeizai.net/articles/-/9721 （2014 年 2 月 9 日確認）

円市場とも言われる建設機械やスマートカーの分野に応用されると推測される。また、2014年は、Google や Amazon が参入しつつあるタイミングであり、国際競争力の観点から、早急に、日本版 DARPA Robotics Challenge や調達制度である SBIR の導入、文理融合型大型プロジェクトや大学発ベンチャーへの資金調達、大企業の買収による出口戦略の拡充、ロボット研究者のキャリアパスの柔軟化等の施策を、可及的速やかに、弾力的に行う必要がある。この施策こそ成長戦略の「第三の矢」に該当するものと、考える。

そして、本調査のように、社会科学と工学の研究者が信頼関係を持ち、ロボット分野における学際研究を積み重ねることによって、この分野のビジネス環境が整備されれば、より一層、この分野に挑戦する研究者や起業家が輩出されるであろう。本稿は、そのような好循環を創出するための一つの試金石にあたると考えている。

（担当：高瀬 進）

（参考資料）

［1］松野文俊（2014）「震災対応　レスキューロボットの活動を振り返ってⅠ」第 32 巻第 1 号, 1 頁

［2］浅間一（2014）「災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システム」第 32 巻第 1 号, 37-41 頁。

［3］Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma: When New Technology Cause Great Firm To Fall.* Harvard Business School Press. (伊豆原弓訳『イノベーションのジレンマ』翔泳社, 2000 年)

［4］藤本雄一郎（2013）『破壊的イノベーション』中央経済社。

［5］Christensen, C. M. & Raynor, M. E.（2003）*The Innovator's Solution: Creating and sustaining successful growth*, Harvard Business School Press.（櫻井祐子訳『イノベーションへの解: 利益ある成長に向けて』翔泳社, 2003 年)

［6］Grove, Andrew S. (1988) *Only the paranoid survive : how to exploit the crisis points that challenge every company and career,* Harper Collins Business.

［7］高瀬進・伊藤智明（2013）「大学発ベンチャーか？技術移転か？　コンピュータ黎明期における新技術の商用化に関する日米比較」、『ベンチャーレビュー』、日本ベンチャー学会、No.22、pp11-26。

［8］西澤昭夫（2012）「NTBFs とベンチャー企業」（西澤昭夫・忽那憲治・樋原伸彦・佐分利応貴・若林直樹・金井一賴『ハイテク産業を創る地域エコシステム』有斐閣, 15-37 頁）。

［9］大野耐一（1978）『トヨタ生産方式』ダイヤモンド社。

［10］三矢裕（2003）『アメーバ経営論 ： ミニ・プロフィットセンターのメカニズムと導入』

［11］Shane, S. A. (2004). *Academic Entrepreneurship: University spinoffs and wealth creation*. Edward Elgar Publishing. （金井一賴・渡辺孝監訳『大学発ベンチャー：新事業創出と発展のプロセス』中央経済社, 2005 年）

［12］Utterback, James M.（1994）*Mastering the Dynamics of Innovation: How companies can seize opportunities in the face of technological change*, Harvard

Business School Press.（大津正和・小川進監訳『イノベーション・ダイナミクス: 事例から学ぶ技術戦略』有斐閣, 1998 年）
［13］加護野忠男・井上達彦（2004）『事業システム戦略：事業の仕組みと競争優位』有斐閣。
［14］加護野忠男・角田隆太郎・山田幸三・上野恭裕・吉村典久（2008）『取引制度から読みとく現代企業』有斐閣。
［15］井上達彦（2012）『模倣の経営学 ： 偉大なる会社はマネから生まれる』日経 BP 社。
［16］吉川弘之（2009）『本格研究』東京大学出版会。
［17］Simon, Herbert A.（1996）*The Science of the Artificial*, 3rd edition, MIT Press.
［18］榊原清則（2010）「「人工物とその価値」の研究」『組織科学』第 44 巻第 1 号, 26-33 頁。
［19］木村英紀（2011）「工学の 2 つのカテゴリー」『日本物理学会誌』第 65 号, 444-445 頁。
［20］Iansiti, Marco and Roy Levien（2004）*The keystone advantage：what the new dynamics of business ecosystems mean for strategy, innovation, and sustainability*, Harvard Business School Press.
［21］椙山泰生・高尾義明（2011）「エコシステムの境界とそのダイナミズム」『組織科学』第 45 巻第 1 号, 4-16 頁。
［22］Etzkowitz, Henry（2008）*The triple helix：university-industry-government innovation in action*, Routledge.
［23］Etzkowitz, Henry（2002）*MIT and the Rise of Entrepreneurial Science*, Routledge.
［24］Kaplan, Eugene J（1972）*Japan, the government-business relationship：a guide for the American businessman*, U.S. Dept. of Commerce, Bureau of International Commerce.
［25］小川進（2013）『ユーザーイノベーション ： 消費者から始まるものづくりの未来』
［26］Yin, Robert K.（2009）*Case study research：design and methods*, 4rd edition, Thousand Oaks, Sage
［27］Ceruzzi, P. E. (2003). *A history of modern computing.* MIT Press.（宇田理・高橋清美訳『モダンコンピューティングの歴史』未来社, 2008 年）
［28］長内厚, 榊原清則編（2013）『アフターマーケット戦略 ： コモディティ化を防ぐコマツのソリューション・ビジネス』白桃書房。
［29］大道武生（2014）「原子力ロボットの記録と教訓」第 32 巻第 1 号, 2-9 頁。
［30］坂根正弘（2011）『ダントツ経営 ： コマツが目指す「日本国籍グローバル企業」』日本経済新聞出版社。

（2）ユーザ・イノベーションに基づく特殊環境用ロボットビジネスの提案

（a）背景

【背景　その１】現在のロボットビジネスにおける感性価値構築の重要性について

現状、様々なサービスロボット開発案件を見てみると、設計前のコンセプト構築がいかに大事かということを、開発が進む中で痛感されている例が多いように感じられる。そこで、サービスロボット開発のファーストステップである「コンセプト構築」について以下

に述べる。

まず、ロボットテクノロジー（以下、RT）を活用することで生まれる価値を、『機能価値』と『感性価値』の２つに分けて考える。（図２－４６参照）「価値」という単語を使う理由は、技術者視点ではなく、顧客視点で物事を捉えるためである。まず機能価値とは、次の５つの項目「機能性、安全性、保全性、耐久性、信頼性」を指す。これら 5 項目に関する技術の蓄積が多い企業こそが、真の技術的な強みを持った RT 関連企業だと言える。BtoB ビジネスにおいて、コンセプト作成段階で重要なことは、ユーザ企業様の機能価値に関する希望を深く聞くことにある。特に重要な要素として、「導入効果プライオリティ」と呼ばれる指標がある。それは、「作業時間の短縮、コスト低減、作業者負担/危険の低減…」といった項目で構成される。そして、それらの項目を基に、ロボット導入後に求める効果について、ユーザ企業が優先順位を付けるのである。この指標が、後々ロボットに仕様変更が生じた際、大きな役割を成す。ロボットの設計/製作段階での仕様変更は、「変更による効果」の面でトレードオフの関係が鮮明になる場合が多く見られる。例えば、「設計変更により、更なる安全性向上（設計変更しなくてもリスクは許容範囲内に低減されている）に繋がるが、コストが増加し、作業者の負担も増える。」といったケースである。こういった場合、指標が無いと議論だけが飛び交い、なかなか結論が出ないことが多い。よって、コンセプト作成時には、「何を大事としてロボット開発に取り組むか。」を明確にしておくこと、そして、機能価値を構成する５項目について各々コンセプトをしっかりと立てておくことが重要である。

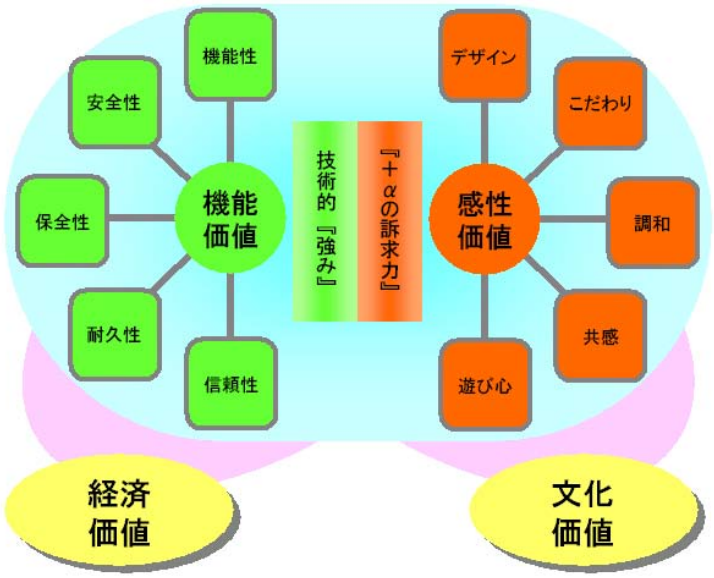


図２－４６　サービスロボットに求められる価値

次に、「感性価値」について説明する。サービスロボットは、この 21 世紀初旬に『豊かさの象徴』となることは間違いない。これは、富裕層のステータスや虚栄心を満たすための贅沢品という意味ではない。ここで述べる豊かさとは、「豊かさ＝選択肢が多いこと」を意味している。つまり、一般消費者の選択肢のひとつにロボットが食い込んでいくという意味である。現代、モノが溢れ、モノに不自由することが無い世の中で、ロボットがユーザの選択肢のひとつに組み込まれるためには、『現状よりも満足させる何か』がロボットに求められている。その答えを見つけることは容易ではない。しかし、その困難に立ち向かうひとつの手段が『感性価値の創造』であると考えられている。つまり、サービスロボッ

トは、モノの豊かさだけではなく、心の豊かさも提供することが重要なのである。よって、感性価値を構成するファクターを５つに分類しコンセプトメイクすることが求められている。「デザイン、こだわり、調和、共感、遊び心」である。これらは、ユーザに対して「＋αの訴求力」を生む。

また、歴史的背景からも、感性価値の創造はロボットのコンセプト構築と相性が良いと考えられる。ロボットの語源は、「小説家カレル・チャペックが創作し、1920 年に発表した戯曲の中で使用したものが広まり、一般的に使用されるようになった。」（＊ウィキペディアフリー百科事典より引用）とされている。つまり、「実体として無い機械に近いもの」に対して、ロボットという名前が先行して生まれたために、現代でも人によってロボットの定義は異なり、かなり曖昧である。その曖昧さに対して、ロボット開発メーカーは、明確な回答を準備しておく必要がある。「どうしてそのロボットが誕生したのか」、「なぜ自社でこのロボットを開発しなければならなかったのか」、「このロボットは未来どういった社会貢献を果たし、経済価値、文化価値を生むのか」、といった質問に対する明快な答えを、社会に伝えていかなければならない。今後、サービスロボットとエンドユーザを繋ぐ「コミュニケーションデザイン」を行う努力も、サービスロボットを開発する企業に求められてくるであろう。

一方、機能価値と感性価値で満ち溢れたサービスロボットにも『競合』が存在することを忘れてはならない。画期的でイノベイティブなサービスロボットでなければ、必ず競合となるロボット以外の道具や人やサービスが存在する。ユーザの論理からすれば、すでにあるモノと価値を相対評価し、総合的にコストパフォーマンスで優ったロボットでなければ購入しない。よって、ロボット開発側の市場創出のスタンスとしては、「今まで無かったサービスロボット市場を構築する。」のではなく、「どの既存カテゴリーにロボットイノベーションを巻き起こし、新たな価値を創造できるか。」を明確にするところからサービスロボットビジネスは芽生えると考えられている。簡潔に言うと「ロボットを使って、どのパイを食いに行くのか。」を明確にすることである。

最後に、以上述べた内容は、あくまでロボットの設計/開発に入る前のコンセプト構築の一部分に過ぎない。機能価値と感性価値の２つが整理されて始めて、ロボットの仕様書となり、抽象的な言葉が具体的な数字へと落とし込まれる。その先に、ようやくプロジェクトチームの組成、ロボットの設計/開発フェーズが待っている。そして、実用化フェーズを経て、その更に先に必ず、サービスロボット分野での『大きな経済価値と文化価値の創出』が待っていると考えられる。

引用文書：ロボット情報サイト『ロボナブル』

Robot コンサル小西の「超・思考法」　第１回：サービスロボット開発におけるコンセプト作成のアプローチ

http://robonable.typepad.jp/column/2008/04/1-fbe0.html

【背景　その２】バリューオリエンテッド型ロボット開発の重要性について

■ロボット開発で重要な３つのデザインの階層

近年、介護福祉分野では、様々なロボット介護機器が開発され、実用化に向けた取組が盛んである。高齢化社会という社会トレンドに対して、ロボットがいかなる価値を創造できるか、その答えが、今求められている。一方で、「世の中に、RT 製品が浸透している成功

例も疎らであり、ロボットだからこそ実現できる新規ビジネスが見えてこない･･･。この現状を、一体どう打破すればよいのだろうか？」とロボット関係者が、ビジネス化の困難さに悩み、次の一歩を踏み出しあぐねていることも事実である。

上記のような現状分析から、「サービスロボットのビジネス化に向けてあるべき開発フロー」、及び、「ロボットビジネスを実現する理想的なコンソーシアムの形成方法（現状、BtoBのビジネスであれば、開発コンソーシアムにユーザを巻き込むことが通例となりつつあるが、その先のビジネス/課金モデル構築への意識がまだまだ低い。)」、「ロボットビジネス活性化のために本当に足りない人材の育成（大学などの理系の学部でロボット工学をいくら勉強しても、ロボットビジネスの画を描くことは困難である。)」などについて、今一度、熟考すべきであろう。

そこで、サービスロボットの実用化に向けて、理想的な開発フローを『３つのデザインの階層』に分けて以下に提言する。

【サービスロボットをビジネス化するための理想的な開発フローとは？】

まず、図２にサービスビジネスにRTイノベーションを巻き起こすために必要な開発フローを『3つのデザインの階層』に分けて整理した。

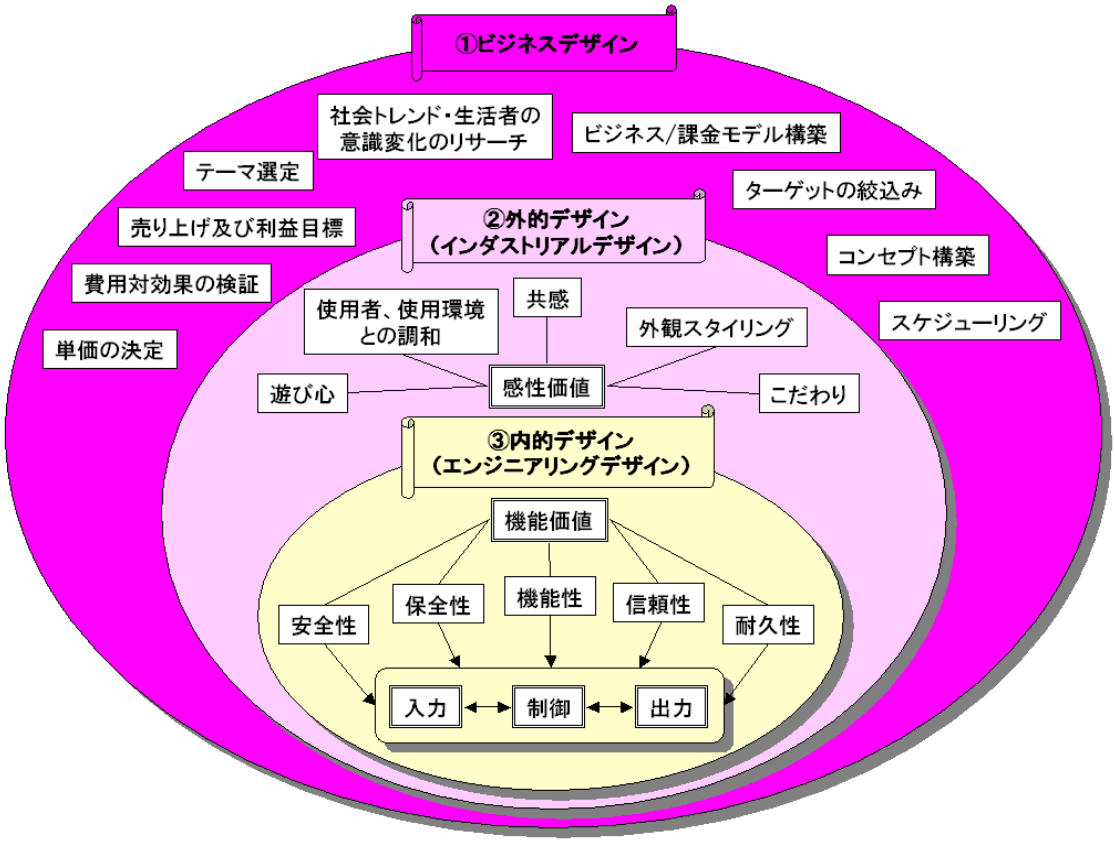


図２－４７　ロボットビジネスの肝となる３つのデザインの階層とその構成要素

①　ビジネスデザイン

RT を活用してサービスビジネスにイノベーションを起こすために、まず実施しなけれ

ばならないデザインは、「ビジネスデザイン」である。その要素は、以下の９つで構成される。社会トレンド・生活者の意識変化のリサーチ、テーマ選定、ターゲットの絞り込み、ビジネス/課金モデル構築、コンセプト構築、費用対効果の検証、単価の決定、目標とする売り上げ及び利益、スケジューリング（タイミングとスピードへの強い意識）である。

② 外的デザイン（インダストリアルデザイン）

使用者や使用環境との調和を強く意識した『感性価値』の高いものづくりを実現するためのプロダクトデザイン。（ロボットの外観デザイン＝スタイリングもその一部）BtoBのビジネスであれば、ロボットのユーザ企業は、使用環境についての情報をどこよりもお持ちなので、この外的デザイン担当の一翼として、コンソーシアムに参画頂くのが望ましい。

③ 内的デザイン（エンジニアリングデザイン）

製品に、十分な『機能価値』を持たせるために、技術者によって行われる３つのロボット構成要素『入力、制御、出力』への具体的な落とし込み。

一般的に、企画から試作開発までの流れは、①⇒②⇒③が理想的であると考えられている。この開発フローは、バリューオリエンテッド型のロボット開発と呼ばれる。（図２－４８、図２－４９参照）現状、技術者を中心としてプロダクトアウトなアプローチで開発されたロボットの多くは、理想とは逆の③⇒②⇒①の順で進められていることがほとんどである。理想とは逆のフローで開発を進めると、『手段』であるはずのロボット（RT）が「目的」に変化する。そうなると、試作したロボットをビジネス化するために活動しようとしても、開発コンソーシアムの中に、サービス業者やサービスプロバイダーが属していないために、ビジネスパートナー探しに四苦八苦することになる。また、ターゲットユーザが絞り込めていない段階で、ロボットを試作してしまうと、実用化への十分なストーリを描くことがとても困難となる。例えば、「人と同サイズのヒューマノイドロボット開発」などは、その最たるものかも知れない。「人を知るための研究」としてヒューマノイドロボットの研究・開発の価値が高いことは、一般にも十分に理解されているが、試作開発したあとで、①ビジネスデザインを試みるのは、非常に難しいように感じられる。

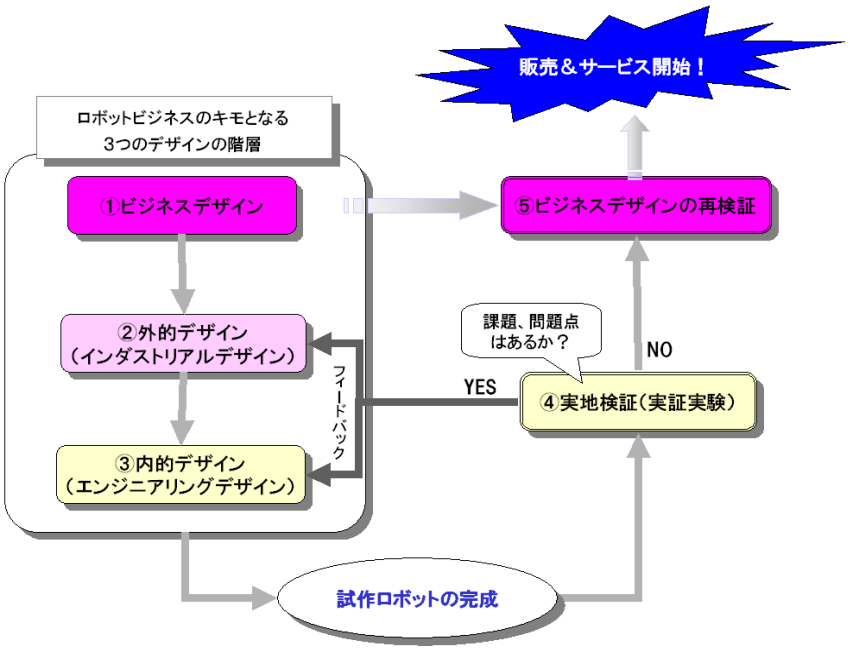


図２－４８　３つのデザイン階層の構築が基盤となるサービスロボットの実用化までの理想的な道筋

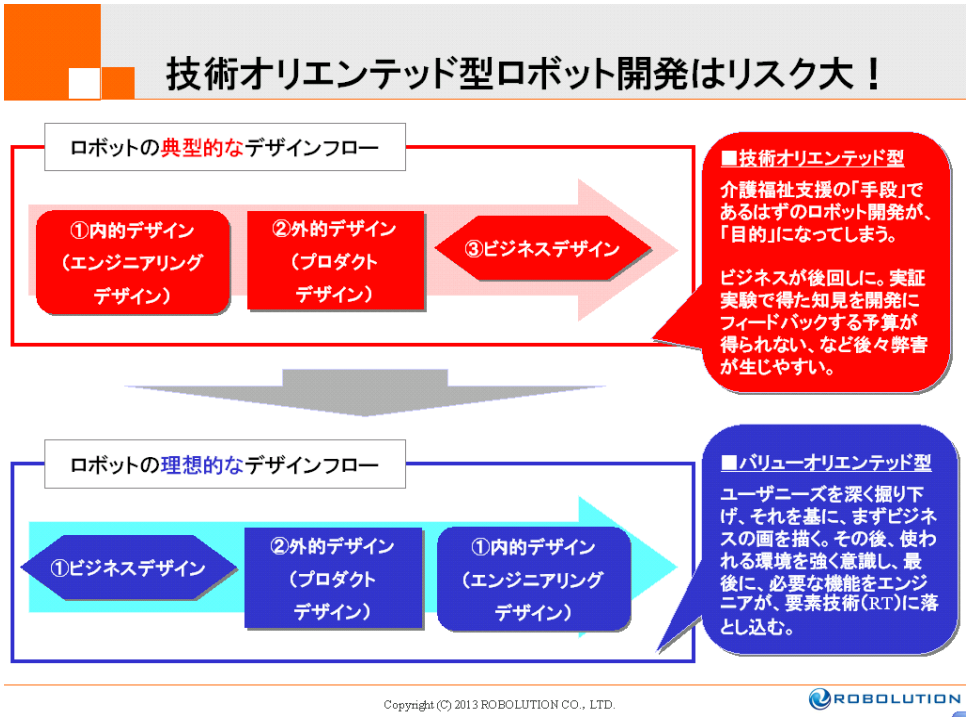


図２－４９　バリューオリエンテッド型ロボット開発の重要性
～　技術オリエンテッド型ロボット開発はリスク大　～

次に、理想的な①⇒②⇒③のフローで完成した試作ロボットは、図２－４８に示すように、「④実地検証」へと移行する。ここからは、②と③に携わるメンバーで、課題を明確に

しながら、お互いへのフィードバックを繰り返すことが重要になる。試作ロボットが完成するまでの②外的デザインは、あくまで「仮説」であるから、試作されたロボットが、本当に、仮説の通りの効果が得られるのか否かを実空間で実証しなければならない。つまり、この『④から②、③へのフィードバック』という一連の流れが、一般的に『実証実験』と呼ばれるステップである。加えて、理想的なフローで開発されていないロボットは、自然と実証実験の質が落ちることが多く見受けられる。なぜなら、ターゲットが曖昧だったりすると、準じて評価の指標もあやふやなものとなり、どこをどのように改善すべきかが、見えにくくなってしまうからである。

続いて、理想的なフローで開発された試作ロボットは、実証実験を繰り返すうちに、①のビジネスデザインがどこまで達成可能かがリアルに見え始める。ここで再度、現実に則した①ビジネスデザインを描き直すのである。それが、図２－４８の「⑤ビジネスデザインの再検証」になる。とは言っても、描きなおすのは、「単価の決定、目標とする売り上げ及び利益、スケジューリング」だけにすべきである。ちなみに、実証実験を繰り返した後で「コンセプト」を再構築する必要があるとなれば、ゼロからやり直しになるので大変である。よって、デザイン階層の第一ステップである①ビジネスデザインの検討を疎かにすると、後に想定外の検討事項が噴出するなど、そのロボット開発プロジェクト自体のリスクが非常に高まってしまうのである。

現状、ロボット開発コンサルティング企業では、実際に様々なロボットビジネス/ロボット開発プロジェクトに関る中で、最善なロボットビジネスプロデュース手法を検討し、まだまだノウハウを蓄積している段階である。よって、図２－４７が全てだとは思っていない。また、RT を活用するサービス業界によって、検討項目の優先順位や手法も異なるのも確かである。しかし、現状、図２－４７の構成要素は、最低限必要な検討項目であることは間違いないと考えられる。

最後に、求められる人材について、以下に述べる。

本章では、ロボットビジネスのキモとなる「３つのデザイン階層の重要性」について述べた。現状、この３つの各デザイン階層において、それぞれプロデューサー、デザイナー、システムインテグレーターの役割を担う方が、日本にはたくさん存在する。現状、サービスロボットをビジネス化する上で、本当に必要な人材は、この 3 つのデザイン階層をバランス良くまとめ上げることができる『トータルプロデューサー』であると多くの人が感じ始めている。さらに、「3 つのデザイン階層をまとめ上げられる『ロボットビジネスプロデューサー』が育たなければ、いつまで経っても、ロボットビジネスは、技術者中心の世界から、一般社会へと羽ばたけないのではないか？」と危惧されている。

引用文書：ロボット情報サイト『ロボナブル』

Robot コンサル小西の「超・思考法」　第 15 回　ロボット開発で重要な 3 つのデザイン階層

http://robonable.typepad.jp/column/2009/09/9-4926.html

（ｂ）感性価値の追究による特殊環境用ロボットのコンテンツビジネスモデル提案
～特殊環境用ロボットを活用した玩具＆アニメビジネスモデルについて～

【点検ロボットの実用化にみるロボットビジネス成功事例】

（ａ）にて、機能価値と感性価値の構築の意義と、バリューオリエンテッド型開発の重要性について述べた。特殊環境用ロボットに関しても、これらの観点を重視し検討すると、機能価値の追究だけでは、ロボットビジネスとして成立させるのは、非常に困難であると考えられる。災害等が起こらないと出動する機会がないので、平時、他の用途で使用することを検討したとしても、特殊環境用ロボットは、名前の通り特殊環境用途であるため、他の用途で使おうとした場合、費用対効果が合わないことが大きな課題と考えられる。開発時に想定していなかったロボットの異環境での活用は、操縦者の教育、本体のメンテナンス、安全性確保（リスクアセスメント）の観点からも、そう容易ではないと感じている。

そこで、特殊環境用ロボットのビジネス化に関しても、機能価値だけでなく、感性価値も追究し、それらを含めたトータルバリューに対価を頂く仕組みを考える必要があると感じられる。

特殊環境用ロボットに近しい形態のロボットで、機能価値と感性価値のバランスが図られている例として、大和ハウス工業㈱にて開発され運用されている『住宅床下点検ロボット 名称：moogle』が挙げられる。

住宅床下点検ロボットは、メインクローラとサブクローラを備えた走破性の高い駆動系を持ち、点検用のカメラを備えた遠隔操縦型ロボットである。床下が土、コンクリートに関らず走行可能で、基礎部のクラックの点検業務などで使用されている。人が行っていた厳しい環境下での点検作業を、ロボットに置き換え成功している良い例と言える。現在、数十台が、日本各地の大和ハウス工業の営業所に配備され、日々の点検業務に従事している。また、2012 年 10 月からは、本点検ロボットを、工務店といった住宅会社やリフォーム会社、不動産会社向けに外販をスタートしている。自社で点検ロボットを開発し、それらを自社サービスで有効に活用しながら、得られた知見を開発にフィードバックし、次のステップとして、外販ビジネスをスタートした数少ない成功例と言える。

加えて、本ロボットにおいて優れているのは、前述した機能価値だけではない。加えて、感性価値も追究されている点は特筆すべきである。大和ハウス工業株式会社には、自社の今後の展望を示す次のステージへのキーワード「アスフカケツノ」という標語がある。（図２－５０参照）「ア：安全・安心」、「ス：スピードストック」など各カタカナを頭文字としてキーワードが設定されている。

この「ス：スピードストック」の項目で、この住宅床下点検ロボットが挙げられている。企業として、新たな社会価値創出へのチャレンジのひとつとして本ロボットを採り上げ、企業価値創出の一役を担っている。ロボットが持つ「未来力」も十分に表現され、企業広報に有効活用されている。

住宅床下点検ロボット「moogle」

図２－５０　大和ハウス工業の今後の展望「アスフカケツノ」

（これからの時代も、様々な問題・課題に対して紳士に向き合い、明日の人・街・暮らしに、不可欠の次世代商品やサービスを開発していきます。大和ハウス工業の次のステージに向けたキーワード「アスフカケツノ」で、新たな価値を社会に届けます。）　引用先：大和ハウス工業 HP

大手企業以外でも、点検用途のロボットを開発し、ロボットの製造・販売だけでなく、さらにビジネス領域を拡げている企業がある。川崎市に本拠地を置く株式会社イクシスリサーチである。主に遠隔操縦型の点検ロボットの研究開発を強みとしている企業である。例えば、マグネット吸着型点検ロボットなどは、橋梁裏面の点検、石油タンク壁面の点検、石化プラントタンク内壁面の点検などで多くの実績を挙げている。彼らは、当初、点検ロボットの研究開発を受託し製品化する、「ロボットの製造⇒販売」という業態をとっていた。しかし、現在では、点検現場へロボットと共に、操縦に慣れた作業者を派遣し、点検サービス事業そのものを請負う業態へと変化してきている。

この変化をもたらした要因としては、ロボットの製造販売事業オンリーの難しさが根底にあると考えられる。ユーザが、点検ロボット購入をためらう理由として、一般的に、以下の２点が挙げられる。

① ロボットの性能に関らず、現場作業者への引継ぎ・教育に多くの時間が必要とされる。現場のメンバーに、RT に関する知識を持った者がおらず、運用が困難と判断される。
② 点検ロボットの使用頻度が高くない場合、購入は費用対効果が合わないというユーザが多い。

これら２点の課題を克服するために、点検サービス事業そのものを請負うという解決策は理想的と言える。

本章で採り上げた 2 社のビジネス事例は、特殊環境用ロボットの社会実装においても、大きなヒントになりえると考えられる。

引用：大和ハウス工業株式会社 HP　今後の展望「アスフカケツノ」
http://www.daiwahouse.co.jp/student/about/asufukaketsuno.html

参照：イクシスリサーチ株式会社 HP
http://www.ixs.co.jp/

[玩具＆アニメを活用した特殊環境用ロボットビジネスモデルの提案]

特殊環境用ロボットに関して見ても、既存のロボットを別分野で活用しようと試みた場合、ビジネス化することの難しさについて前章で述べた。加えて、サービスロボットをビジネスとして成立させるためには、機能価値の追究だけではなく、感性価値を構築することが重要であることも述べた。

よって、特殊環境用ロボットについても、それらの観点を重視し、機能価値と感性価値、これらトータルの価値に対価を頂くビジネスモデルを検討すべきである。そこで、感性価

値を「キャラクターコンテンツを活用した玩具&アニメ」を活用し構築した場合、どのようなビジネスモデルを描くことができるのか、以下に提案する。

【現在の玩具&アニメーションの産業構造とは】

ａ）現在のアニメーション産業構造について

まず、アニメーションの産業構造について説明する。(図２－５１参照) 日本のアニメは、大きく分けて、① 劇場用アニメ、② テレビアニメ、③ ビデオ化・ＣＤ化（①②及びオリジナル制作）の三つに分類できる。アニメ業界の構造を見ると、テレビ局、広告代理店、玩具会社などが『制作委員会』を結成し、キャラクター市場を見据えた共同企画を行う。制作委員会方式をとるのは、テレビアニメ３０分もの１本の制作に約１，２００万円、映画であればさらに高額となる資金の調達とリスクの分散を図るためでもある。実際の制作は、アニメプロダクションが行い、各段階において、元請企業の他に数多くの下請企業が存在するという構造になっている。

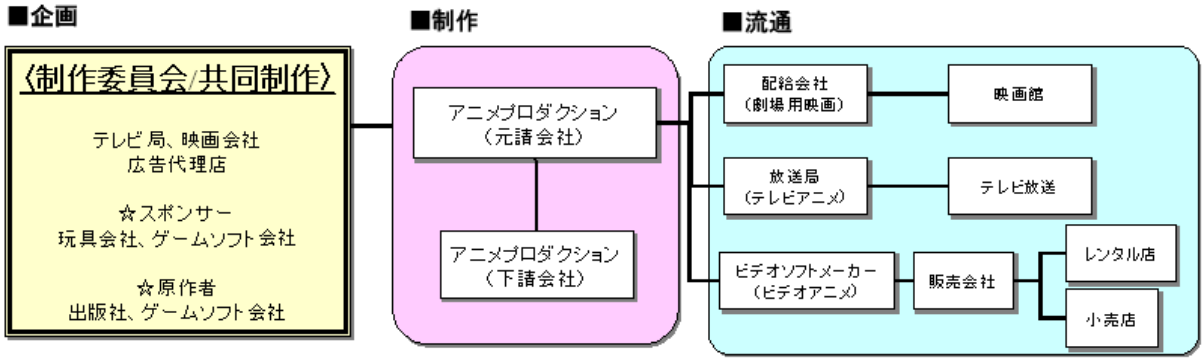


図２－５１　　アニメーション業界の産業構造

引用：日本貿易振興機構（ＪＥＴＲＯ）「日本のアニメーション産業の動向」

ｂ）キャラクターライセンスビジネスについて

次に、キャラクターライセンスビジネスについて説明する。図２－５２に示す通り、ライセンサーである制作会社や出資会社は、ライセンシーがキャラクターを使って商品を作ることによって、キャラクター使用料を得る。この使用料は、おおよそ製品売価の５％程度が相場である。実際、ライセンシーの企業ジャンルは広く、金融、玩具、自動車、航空、食品等の企業が、企業や商品のイメージキャラクターから、アニメキャラクターの人形等のキャラクターそのものを商品化するなど幅広く活用されている。アニメそのものが、商品の宣伝の一部だという捉え方もされるほど、アニメの価値は上がっている。

こうした動きから、アニメ制作の企画段階から広告代理店を通じて、玩具メーカーやゲームメーカー等がスポンサーや共同制作として参画しているケースも多く見られる。

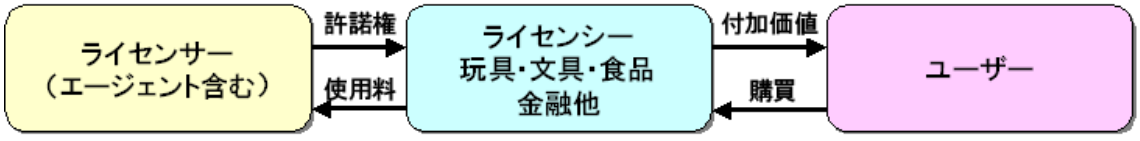


図２－５２　キャラクターライセンスビジネス構造

引用：日本貿易振興機構（ＪＥＴＲＯ）「日本のアニメーション産業の動向」

【玩具&アニメを活用した特殊環境用ロボットビジネスモデル案】

前述した現在のアニメーション産業、及び玩具に代表されるキャラクターライセンスビジネスを、特殊環境用ロボットビジネスに取り込んだ場合、どのようなビジネスモデルが可能になるか、以下に検討を進める。

まず、災害対応を主たる目的とするロボットセンターを設立し、その中で、各企業、大学、研究機関が持つ特殊環境用ロボットを集めチームを構成する。参加するロボットは、無人飛行ロボット、陸上探査・作業用ロボット、水中探査ロボットなどが想定される。災害対応ロボットセンターの役割は、機能評価・認証を行う他、技術情報の集積・管理、緊急時対応の配備などが要求される。

一方、上記の想定は、災害対応ロボットセンターの機能としては申し分ないと言えるが、それら全体の運用を考えた場合、「どこからその運営予算を生み出すのか？」といった問題が生じる。今考えられる答えとしては、国家予算を投入し、技術開発に対する助成金や導入に向けた様々な支援が必要となるであろう。また、今現実として、ロボット開発⇒製造販売をメインとしたロボットビジネスを推し進める企業の多くは、採算が取れず四苦八苦している状況にある。よって、ロボット関連企業が集まり特殊環境用ロボットチームを形成し、今までの既存のビジネスを進めていては、収益性におけるリスクは高まるばかりである。

そこで、収益源を生み出す策として、図２－５３に示すような感性価値に対価を頂く玩具&アニメを活用したビジネスモデルを提案する。

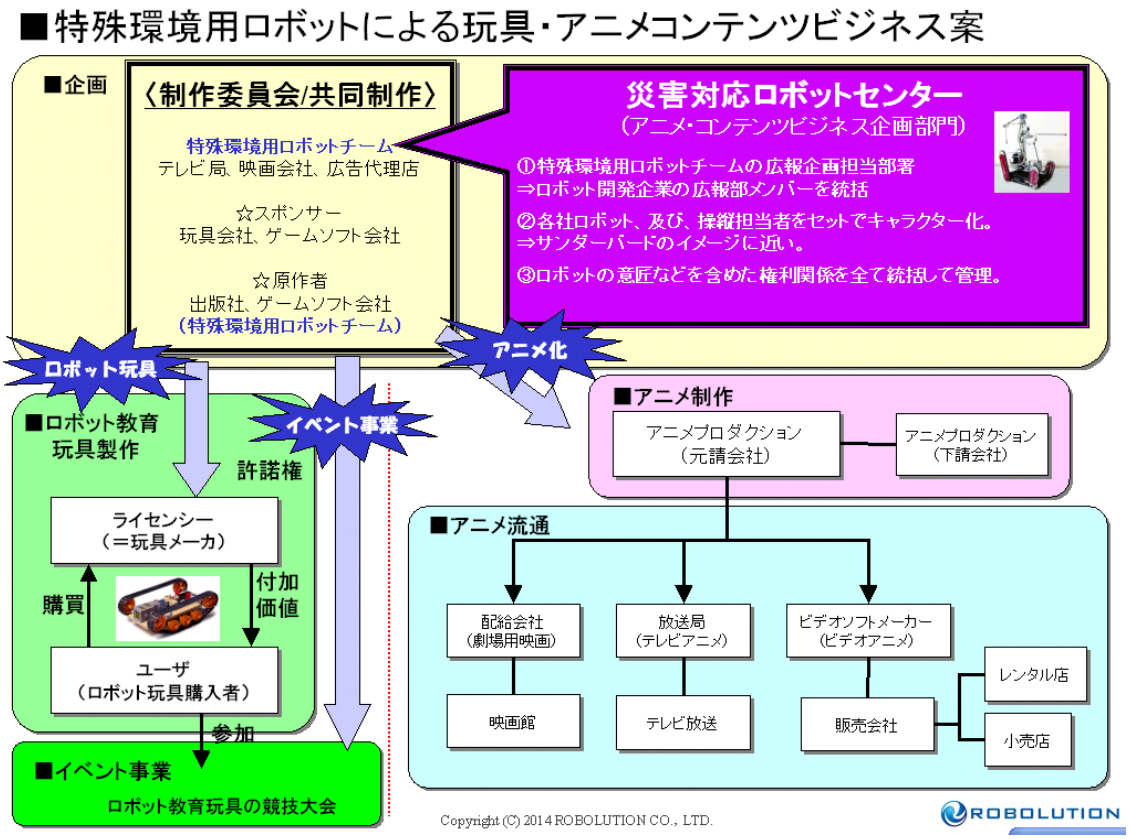


図２－５３　特殊環境用ロボットによる玩具・アニメコンテンツビジネス構成図

まず、災害対応ロボットセンター内に、『コンテンツビジネス企画部門』を立ち上げる。本部門のメンバーは、災害対応ロボットメーカーとして名を連ねている企業の広報担当者を中心に形成するのである。後に本活動を、企業 PR・CSR 活動へと繋げていくためには、各社の広報メンバーの参画は欠かせない。

続いて、次のステップでは、コンテンツビジネス全体を企画する制作委員会を立ち上げる。制作委員会のメンバーは、アニメ制作時と同様に、テレビ局、広告代理店、玩具メーカー、ゲームソフト会社、出版社などで構成する。

制作委員会では、同じ世界観の中で、各企業が、「自社の特殊環境用ロボット」と「ロボット操縦者」をキャラクター化する。これらを活用し、アニメ制作、及び、ロボット玩具の企画を推し進めていくのである。

【アニメ制作について】

アニメ制作に関しては、図２－５１に示した産業構造でビジネスを推し進める。

一方、テレビアニメ単独では赤字になることが多いので、大半のアニメ製作会社はビデオ・ＤＶＤ化や、キャラクター商品販売等のコンテンツの二次利用で収益確保している。また、アニメのスポンサーとして玩具会社が入るのは、テレビアニメの場合、二次利用としてのキャラクタービジネスに大きな収益源があるのが理由である。

一般に、アニメ制作単体で、コンテンツビジネス事業の収益を上げるのは難しいと言われている。しかし、災害対応ロボットセンターの活動を社会へ啓蒙する、そして、収益と

して期待できるロボット玩具販売のためのプロモーションといった観点で見れば、アニメ制作は、初期段階では、コンテンツビジネス部門にとって、とても重要な取組と考える。

【ロボット玩具について】

図２－５３に示すように、制作委員会をライセンサーとして、玩具メーカーにキャラクターライセンスを使用許諾し、ロボット玩具を製造販売するビジネスを考える。具体例としては、各社の特殊環境用ロボットを基にした教育ロボット玩具を企画し販売するのである。教育ロボット玩具の仕様は、各企業のロボット（キャラクター化されたロボットでも可）のデザイン、及び機能を簡素化した教育ロボットに仕上げる。加えて、カスタマイズ性を有するものであれば、なお良いと考える。

さらに制作委員会では、出版社が主たる事業者として、競技イベント事業を展開する。イベントでは、決められたタスクをいかにクリアするか、そのタイムを競うロボットイベントを実施する。参加した子供達は、より深くロボット周辺技術に興味を持ち、理科離れ防止に一役かうと考えられる。

ロボット玩具における収益モデルとしては、図２－５４に示す通り、制作委員会には、玩具会社からキャラクター使用料が入る。一般的に、ロボット玩具の上代の５％程度が制作委員会に支払われる。さらに、災害対応ロボットセンターの社会的意義を啓蒙し、その必要性に共感が得られるよう、ユーザ（ロボット玩具購入者）に対して協力をお願いする。例えば、「購入費の数%が、災害対応ロボットセンターの運営費用に充てられる。（キャラクター使用料とは別)」ことを伝えるのである。つまり、ロボット玩具を購入すれば、その一部が、災害対応ロボットセンターの次世代ロボット開発予算に使われることを周知するのである。

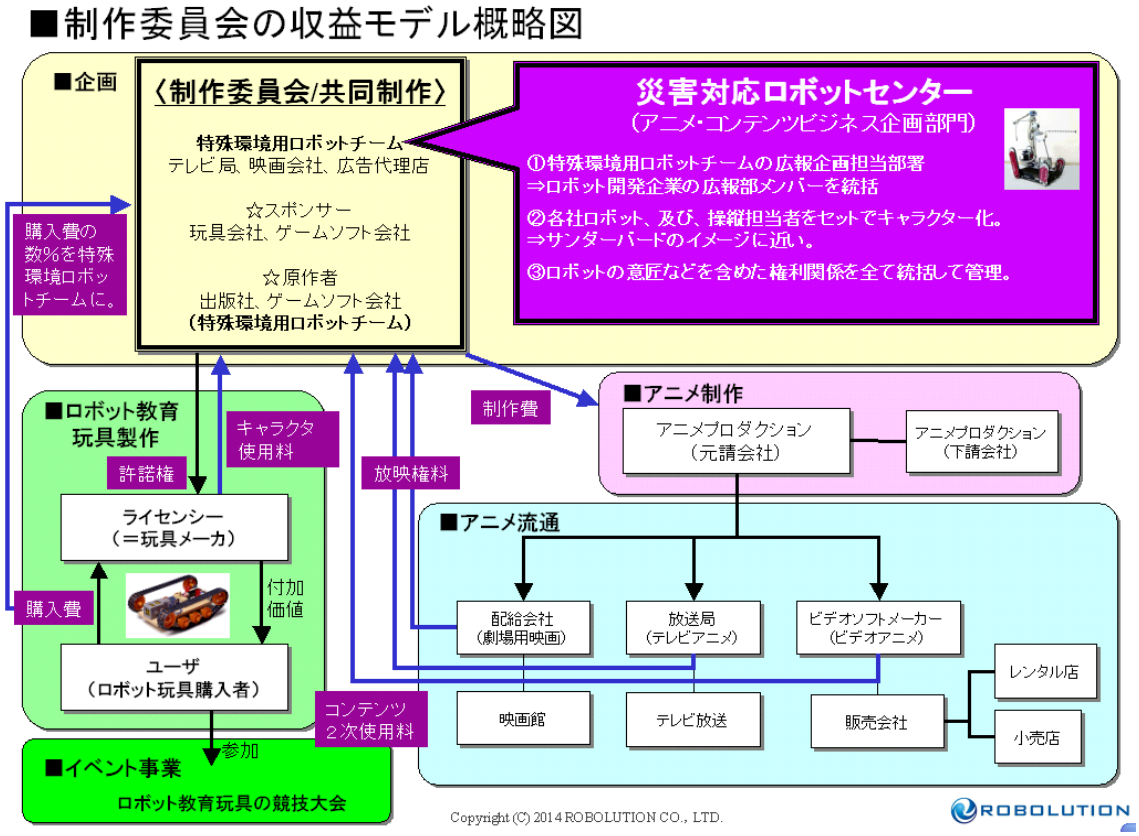


図２－５４　制作委員会の収益モデル概略図

上記した正の循環が起こったならば、新しい特殊環境用ロボットの誕生により、子供達の手に新たなロボット玩具が渡り、さらにテレビアニメとして目に触れることで、ひとつのヒーロー像として社会的意義を啓蒙することができる。また、特に子供達は、もしかの災害時に自分達を助けてくれるロボット、ロボット開発者、ロボット操縦者に対して憧れ・尊敬の念を抱き、ロボット研究者を志す者が増えると考えられる。そうなれば、図２－４６に示したように、実ビジネスとしての経済価値と共に、文化価値も高めることができるはずである。

我が国は、世界から「ロボット大国」と呼ばれながら、実ビジネス化することに非常に苦しんでいる。政府が推し進めているクールジャパン戦略のように、ロボットも、クリエイティブな産業のひとつとして、アニメや玩具といったコンテンツ産業と協働しながら、今後の日本の経済成長を支える戦略分野の一つとして期待されるものにしていくべきである。その可能性の一端を、本提案で示すことができていれば幸いである。

（担当：小西　康晴）

（３）　ロボットビジネス雑感

（ａ）溶接ロボットと溶接棒

ロボット事業に参入する場合、ロボット事業へのアプローチの仕方が多々あると思われる。一例として溶接ロボットを取り上げて、紹介をしておきたい。

溶接作業は、溶接時に発生する有害なヒュームと紫外線が人体に悪影響を及ぼすことから、それぞれの防具を着用して作業を行ってきていた。３K職場の代表とまで言われてきた。そして溶接品質は大変重要で重要部分の溶接は熟練工によりなされていた。

溶接作業が有害な作業で、かつ高度な熟練を要する事で、これをロボットに置き換えようと考えられた。

この場合、溶接ロボット事業に参入する方法に２社の方法があった。

A社は溶接材料のメーカーであり、B社は電機メーカーである。両社とも溶接ロボットのメーカーとして、得意分野を生かしながら成功している。

（A社の場合）

A社の場合は、溶接材料を販売して行く中で溶接の自動化、無人化、省力化が要求され、作業員の３K職場からの解放及び、溶接熟練工の不足、安定した溶接品質の維持と言う必要性から溶接ロボットの開発が成されて行った。

溶接ロボットを開発する上で、最初に対象としたのは、溶接材料の顧客であり、溶接材料を多量に消費する重厚長大産業の溶接構造物であった。すなわち厚鋼板の溶接には多量の溶接材料が消費されていた。

それ故、販売目標は、一般橋梁構造物、造船（船殻の溶接、ダブルハルの溶接)、建設機械などの顧客が中心になり、溶接ロボットの開発が進んだ。

建設機械では同一部品が沢山溶接されるため溶接の自動化が進めやすく、溶接部品の取付け治具と溶接ロボットを組み合わせた溶接システムとして建設機械産業に多大な貢献をしてきた。

同様に造船でのダブルハル（タンカー船殻の二重構造化）では溶接個所が多いため、同時に数台の溶接ロボットを干渉しないようにシステムとして稼働させて溶接時間の短縮、コストダウンをはかっている。また、ロボットでの溶接品質の安定も重要な要素である。

橋梁構造物では、特に公共事業の場合は、製品の安全性、確実性が求められてきた。

溶接熟練工の不足と相まって、溶接ロボットの活躍する所となった。

このようにA社の場合は、ターゲットを重厚長大産業とし、自動化が可能で高度の溶接品質を要する製品、かつ、溶接棒を沢山消費する企業を目標に溶接ロボットの拡販を進めてきた。

（最近では、溶接ロボットでの溶接品質も向上、安定しているため、熟練工が不足している中国でも溶接品質の安定という意味からも販売が伸びている。）

（B社の場合）

B社については、電機メーカーであり、自社で電気式サーボモーターを開発した。

この電気式サーボは高い制御性を持っており、これを十分に発揮できるものとして、複雑で精密な作業を必要とするアーク溶接を選んだわけである。

まず、ターゲットとして薄板の溶接をしている自動車産業の部品の溶接とした。

幸運なことに、丁度その時、自動車工業は車体の軽量化を実現するために薄板構造としアーク溶接により、強度を確保する構造へと変換をしている時であった。

その結果として、自動車が軽量化を進める時代に溶接ロボットが大活躍をすることになったのである。当時は２年間に２０００台を販売する事が出来、大ヒット商品に

なった訳である。
その後の販売では、溶接の専門商社と組んだため種々の部品の溶接が出来る汎用性に富んだ溶接ロボットが出来上がった。当然、生産台数も多く、コストダウンも進み、大量の溶接ロボットを販売する事になった。これをベースとして一般産業用のロボット事業へと発展していったのである。

以上に見るごとく、溶接ロボットだけをとっても様々な目的から生産が始まり、それぞれに成功を収めている。そして何れの会社も事業として成功している。

（b）ロボット単体からシステムへ

自動車の生産ラインで溶接ロボットが実用化されると、引き続いて塗装ロボット、スポット溶接ロボット、シール用ロボットとそれぞれの生産ラインでロボット化が進んでいった。当初は各ロボットメーカーも得意のロボットラインを販売し、自動車会社も技術的に優れたロボットメーカーよりロボットラインを購入していた。そのため、ロボットライン毎にメーカーが異なっていた。しかし、いずれのロボットメーカーも技術的にレベルが同等近くになり、操業に使用されるロボットの台数が増加してくると、次の問題が出てきた。

・メンテナンス・アフターサービスの問題――ロボットが故障すると生産ラインが止まる。最短時間での復旧が必要となった。そのためにはサービス員の常駐が必要となってきた。
・予備品の問題――各種ロボットに対して緊急予備品を準備しておかなければならない。ロボットメーカーが異なると、それぞれのメーカーの予備品を購入しなければならなくなり、予備品費用が増大することになった。
・工場技術者の習熟の問題――工場の技術者もロボットの簡単なメンテナンスは出来なければならない。そのためには、ロボットメーカーが異なると、それだけ習熟に時間を要し、混乱も生じることとなった。
・調達の国際化――世界的に自動車の生産台数が増加してくると、自動車工場を新しく建設する事になる。この場合は世界各国のロボットメーカーの技術評価をすることになるが、これも膨大な作業である。
このためにも各種ロボットを一括して大量購入した方が、価格も安くなるし、手間も省ける。そのためにロボットメーカーもロボットのメニュー揃えが必要になってきた。
そのためにロボットメーカーの間で、連携や統合が進んできた。

これらの理由から、新設の自動車工場の建設時には、ロボットメーカーへの発注がロボット単体からシステム全体への発注へと進むことになった。

自動車工場における各種のロボットと半導体工場における各種のロボットの大量導入が、それぞれのロボットの部品の機能向上、精度向上、部品の小型化、軽量化に繋がり、現在のロボット産業の礎になったと思われる。

（担当：長田國弘）

C．特殊環境用ロボットのビジネスシミュレーション例

（1） 本シミュレーションにおける前提条件

本節の目的は、特殊環境用ロボット市場に中小・ベンチャー企業がどのように参入出来うるかを、一つのモデルケースとして描くことにある。20XY 年に中小企業A社が何らかの自社商品とサービスを市場に提供するものとしているため、以下にいくつかの前提条件を設定している。

その前提条件は、できうる限り公表された資料等に基づいているが、将来の技術開発動向などの不確実性が存在するため、本シミュレーションにも不確実性が存在することをここに明記しておく。

（a）シナリオ概要

20XY 年に中小・ベンチャー企業A社が、橋梁検査モジュールを自社商品として販売、リース及び、保守サービスを市場に提供している。具体的には、製品アーキテクチャのモジュール化が進展していることを前提に、橋梁検査用ロボットのシステム全体を手掛けるのではなく、検査モジュールを開発・生産・販売するものとしている。

橋梁検査をターゲットとした理由は、本ビジネスシミュレーションをより具体的なものとするために、対象となる橋梁数が公表されていること、メンテナンス費用が推計できること、高度経済成長期における集中的な整備等を経て補修や更新を行う必要性が急激に高まっていること、さらに、メンテナンスには人手がかかっているため将来の人口が減少する社会においては機械化が必要視されていることから、実現性が高いと考えられるからである。従来の検査方法と比較したイメージは、表２－４２である。

表２－４２　検査方法のイメージ

項目	従来		特殊環境用ロボット
検査法	人手による目視･打音		センサーによる視認･打音
稼働	8時間／日		8時間／日
現場人員数	複数作業員		オペレーターのみ
足場	必要		不要
検査スピード	小(比較)		大(比較)
検査コスト	大(比較)		小(比較)

（b）時代背景

国土交通省の公表資料によると、「我が国の道路構造物等は、高度経済成長期における集中的な整備等を経て順次ストックとして蓄積され、その機能を発揮してきたところである。今後、これらの補修や更新を行う必要性が急激に高まってくることが見込まれており、国・地方ともに厳しい財政状況にある中、いかに的確に対応するかが重要な課題となっている。」と、課題を示している。さらに、「社会資本整備重点計画では、維持管理・更新は４つの重点目標の一つとして位置づけられており、平成２８ 年までに道路橋、下水道施設及び主要

な河川構造物の長寿命化計画等の策定率を１００％にすることなどの目標が定められている。」と目標も示されている。

地方公共団体が管理する橋梁のうち、橋長１５m以上の橋梁における橋梁長寿命化修繕計画の策定率は、都道府県・政令市で９８％であるのに対し、市区町村で５１％に留まっている。また、策定済みの橋梁長寿命化修繕計画の中で修繕が必要とされた橋梁に対して、修繕実施状況は都道府県・政令市で１７％、市区町村では３％に留まっている（平成２４年４月時点)。

別の観点として、人口統計や推計を行う厚生労働省では、２０２５年問題が議論されてきた。平成２７（２０１５）年には「ベビーブーム世代」が前期高齢者（６５～７４歳）に到達し、その１０年後（平成３７（２０２５）年）には高齢者人口は（約３，５００万人）に達すると推計される。これまでの高齢化の問題は、高齢化の進展の「速さ」の問題であったが、平成２７（２０１５）年以降は、高齢化率の「高さ」（＝高齢者数の多さ）が問題となる。この数値は、高齢者数の割合が人口の３０％にも増加することを意味しており、厚生労働省では医療・介護保険について議論されているわけであるが、ここでは労働人口の減少を示すものとして捉えたい。労働人口は今より２，０００万人も減ることが予想されているのである。

労働人口減少も踏まえて国土交通省は、維持管理・更新の水準を高めるための取組として、非破壊検査技術やICT をベースとしたロボット等による高度な点検・診断技術、モニタリング技術、データベース技術及びコンクリート舗装等耐久性の高い素材の採用など、ICT や材料等に関する分野横断的な技術について、技術開発や現場での試行を積極的に実施するとともに、技術が確立されたものから、それらの積極的な採用・普及を図るという提言を、平成 25 年 12 月の社会資本整備審議会・交通政策審議会より受けている。

（ｃ）橋梁メンテナンス市場規模

将来の市場規模を正確に予測することは困難であるため、本ビジネスプランのシミュレーションでは、保全費用のうち人手による費用割合のうちある割合がロボットで代替できるとして、市場規模を予測することにした。

国土交通省が試算した結果によると、2013 年度の維持管理・更新費は約 3.6 兆円、10 年後は約 4.3～5.1 兆円、20 年後は約 4.6～5.5 兆円程度になるものと推定されている。

国土交通省の公表資料によると、２m以上の橋梁数は約７０万あり、点検対象となっている１５m以上の橋梁数は１５８，８０７ある。国内の保全等の費用は公表されていないため、いくつかの州で費用細目が公表されているアメリカの保全費用を基に推計すると、１橋梁当たりの保全費用は約４３０万円／年である。この数値を援用すれば、年間保全費用は6，８３２億円となる。

保全費用の内訳が不明なため、建設工事に係る工事費の内訳（工事区分のレベル１）を基にして、労務費割合を算出すると２７．６％となった。

労務費のうち、ロボットに置き換え可能な割合を、１０，３０，５０％として試算すると、それぞれ１８８億円（１０％)、５６６億円（３０％)、９４３億円（５０％）が潜在的な市場規模として試算できる。

（ｄ）モジュール化技術動向

20XY 年に中小・ベンチャー企業Ａ社が、橋梁検査モジュールを自社商品として販売、リース及び、保守サービスを市場に提供できるためには、製品アーキテクチャのモジュール化が進展していることを前提としている。そのため、橋梁に対する駆動部は別モジュールとして完成していることを前提としており、例えば、関西大学システム理工学部　機械工学科の高橋智一助教の開発テーマである「自由局面に対応可能な真空吸着式ロボットハンド」のような駆動系モジュールと組み合わせることになる。

（ｅ）中小・ベンチャー企業Ａ社の概要

より現実感を出すために、現有する中小企業をモデルとして、架空のＡ社の保有資産や開発・販売実績を述べる。

・資本金３０百万円、設立１９６０年
・社員４０名（技術３４,営業４,その他２）
・売上高約７億円
・現在の主要事業は、ＦＡ用検査・制御システム開発　各種パソコン・マイコンシステムの試作・開発であり、量産は行っていない。顧客企業の研究開発部門・生産技術部門を中心に検査・制御システムの受託開発業務や、大学の研究支援、試作・実験装置の受託開発業務を行っている。
・技術実績としては、遠隔ロボット制御、工場内設備の遠隔制御の開発及び納入がある。
・自社製品を持ちたいという意向があり、多少のリスクを取り投資する意欲はある。具体的には、工場向け、画像処理検査装置分野への進出においては、技術面では、社内画像処理技術の育成と、外部の機械設計・製作会社との連携も図っている。営業面では、エンドユーザへの直接販売とともに、展示会への出展や、画像処理機器メーカー・商社と連携しての販路の拡大も図り、事業を軌道にのせているなど、新規事業への進出も積極的に行っている。
・自社ビルを持ち、事業が拡大した場合は、（賃貸しているフロアを自社用にして）自社事業用スペースの拡大ができる。また、新たな土地の確保も容易である。（創業者が保有している工場向け土地の活用）

（ｆ）中小・ベンチャー企業Ａ社の技術開発・製品開発

保有資源、特に資金力に制約のあるＡ社が開発に着手し遂行するために、公的資金を活用するというシナリオとした。もちろん、その申請が実際に採択されるか否かは不明であり、採択されるためには応募申請全体の中で一定レベル以上でなければならない。今回は、採択されたことを所与として、ストーリーを描いている。

また、単独での開発は困難であるため、特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構などの専門家との連携・指導の下に開発を進める事ができるという前提である。

さらに、中小企業Ａ社は量産機能を持たないため、量産できるパートナー企業を探索し、量産を依託できるということも前提としている。

これらを踏まえて、３年間の自己資金６，０００万円を拠出し、２／３補助の公的資金に採択されたとして、技術開発・製品開発を進める原資とする。

次に、具体的な開発項目であるが、表２－４３のように NEDO H23 年度「機械システム分野に関する戦略策定調査」報告書を参考にすれば、ライフライン系を実現するための技

術としては、視覚センシング、触覚センシング、壁面移動、空中移動、表面清掃機能があげられている。駆動部とのつなぎ合わせをモジュール化で実現しているとの前提であるため、A社が必要な開発技術は、視覚センシング、触覚センシングに関して、橋梁用に適したモジュールを開発することである。これらの技術開発は、A社の実績と照らし合わせてみると、決して無謀なチャレンジではないものと思われる。

表２－４３　ニーズの類型化

業界	ニーズ	ニーズの類型化				
		高所	狭隘	ﾋﾞｼﾞｮﾝ･ｾﾝｻ	極環境(高温･低温)	移動･作業機構
プラント・エンジニアリング系	・埋設配管の点検。損耗調査 ・高所構造物の点検、残厚計測、軽補修 ・可燃性ガス等環境の点検 ・湾岸岸壁構造物の点検 ・落下物危険エリアの点検保守作業 ・爆発事故の事後迅速処理	・壁面移動 ・空中移動	・小型・痩身構造の設計	・光学・非光学ｾﾝｻ ・落下物回避ｼｽﾃﾑ ・光学ﾌｨﾙﾀﾘﾝｸﾞ技術 ・視覚センサ ・触覚センサ ・嗅覚センサ	・高温鉄鋼材等環境下	・壁面移動 ・空中移動 ・水中移動 ・表面清掃機能 ・多方向対応ﾏﾆｭﾋﾟﾚｰﾀｰ ・防塵・防水マニュピレータ
建設系	・構造物(ビル、橋梁、トンネル等)の老朽化の調査 ・アスベストの検査・除去 ・危険ガスが充満する環境内での作業員救助・現場復旧	・壁面移動 ・空中移動		・視覚センサ ・触覚センサ ・嗅覚センサ ・ガス検知センサ	・ガス環境 ・有害液体環境下 ・アスベスト	・壁面移動 ・空中移動 ・表面清掃機能
ライフライン系	・高圧電線の保守点検及び修復 ・橋梁に係るガス配管の外形検査及び捕集	・高度橋梁 ・配管・壁面移動 ・空中移動		・視覚センサ ・触覚センサ ・嗅覚センサ ・ガス検知センサ ・電力センサ	・高圧電流 ・ガス環境	・壁面移動 ・空中移動 ・表面清掃機能
メーカー系	自動車：安全装置の誤動作(電磁波)等の調査分析 農機具：広大な面積での信頼性の確保 半導体：半導体製造過程で生じる有害物質		・微細製造工程における保守対応超小型設計	・視覚センサ		

共通基盤としてのニーズ(壁面移動、空中移動、各種センサ)

用途特化のニーズ

出所：NEDO　H23 年度「機械システム分野に関する戦略策定調査」報告書

（ｇ）中小・ベンチャー企業Ａ社のビジネスモデル

本来であれば、商品特性、顧客に提供する利便性、適正価格などを、競争優位という観点から他社商品・サービスと比較して述べるべきところであるが、比較対照すら明確ではないため、競合情報などは十分ではない。

伊藤(2010)らによる『１からのサービス経営』の中では、製品のコモディティ化が進展すると価格競争になり収益性に影響を与えることから、モノとサービスによる価値の最大化を目指すべきであることが指摘されている。具体的には、アフターマーケットにも注力することで、顧客との関係性を保ち続けることが重要であると述べている。

アフターマーケットも加味し、開発やサプライチェーンも踏まえたビジネスモデルを図２－５５に示す。（ｆ）中小企業Ａ社の技術開発・製品開発に記載したように、特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構（ＩＲＳ）などの専門家との連携・指導を前提としており、図２－５５ではＩＲＳがその専門家の立場から開発状況や現場での実態も把

握しつつ、Ａ社及び関連プレイヤー間の調整も可能であると考えられる。

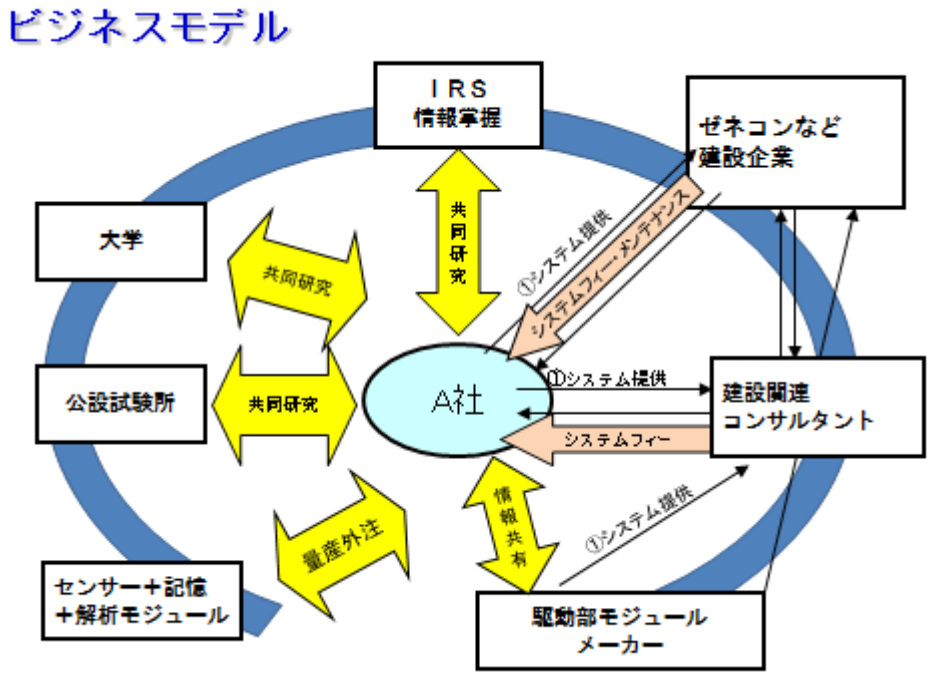


図２－５５　開発・サプライチェーンを踏まえたビジネスモデル

（２）　損益計算シミュレーション

本シミュレーションでは、（１）－（ａ）のシナリオ概要で記載した内容を、橋梁検査用モジュールを販売のみを行う場合と、リースのみを行う場合、さらにそれぞれに対して、楽観的なシナリオと悲観的なシナリオという４つに分類してシミュレーションを行うことにする。

販売のみ、リースのみではなく、現実には顧客との関係性を見ながらビジネスは変容していくものであるが、ここではシミュレーションをシンプルにするため、それぞれ単独事業として考えることにした。まとめると、以下の表のようになる。

表２－４４　シミュレーションにおけるシナリオ

	楽観的	悲観的
販売のみ	a)　シナリオＡ	b)　シナリオＢ
リースのみ	c)　シナリオＣ	d)　シナリオＤ

（ａ）シナリオの解説

【楽観的シナリオ】このシナリオの背景にあるのは、国土交通省の公表資料に「平成２８　年までに道路橋、下水道施設及び主要な河川構造物の長寿命化計画等の策定率を１００％にすることなどの目標」が定められていることである。つまり、点検対象となってい

る橋長１５m以上の橋梁数１５８，８０７をできるだけ早急に検査することが求められているという解釈である。

また、「ＪＲ北海道の改ざんで道警が捜索続行」という 2014 年 2 月 8 日の産経ニュースウェブ版によると、ＪＲ北海道がレールの検査数値を改ざんし特別保安監査を妨害したとして、国土交通省が１０日にも鉄道事業法違反などの疑いで、法人としての同社を北海道警に刑事告発する方針を固めたことが、同省関係者への取材で分かったと報じられている。運輸安全委員会も事故調査を妨げたとして、同委員会設置法違反容疑で告発するとしている。国土交通省は、今まで以上に安全に対する認識が高まり、橋梁の点検を確実に行うこと、データの隠ぺいなどの不正に対しては刑事告発のように強硬な姿勢で臨むことが明らかとなってきている。

全国に散在する橋梁を早急に検査するためには、徐々に販売数量が増加するというより、初期からを販売数量が一気に増える、という想定で描いたものである。その為の予算は、地方公共団体の財政面から、国土交通省が捻出せざるを得ないと考えた。限られた国家予算ではあるが、セーフティを重視する政策といえる。

１５万あまりの橋梁を５年間で点検を終了すると仮定すれば、１年間に３１，６００の点検が必要となる。足場を組む必要がないことから１橋梁あたりの検査期間を２週間と仮定すれば、１つの点検セットで年間２６箇所を点検することができる計算となる。１つの点検セットは４台のモジュールで構成されて両端から検査をするならば、４，８６２台のモジュールが必要となるので、販売開始直後から百台単位での受注を期待する。

【悲観的シナリオ】このシナリオの背景にあるのは、膨大な長期債務残高がある国家財政を勘案して、量産化効果などで価格が安価になってから導入量を増やすというものであり、従来の新製品の市場導入の形である。

（ｂ）シミュレーション方法　計算方法等

中小企業Ａ社が、このビジネスに参入すべきか否かの意思決定をする際の資料として、以下の条件でＮＰＶ（現在正味価値）を計算してシミュレーションを行った。正確には、減価償却費や利息なども考慮して計算するものであるが、ここでは簡便な方法を用いた。

・ＮＰＶ＝ＣＩＦ－ＣＯＦ
・ＣＩＦ（キャッシュ・イン・フロー）は、営業利益を用いた。その値に税控除４０％。
・リース価格は、５年間のキャッシュイン総額を１５０％として、毎年１／５ずつとして試算するため、販売価格の３０％／年と設定する。
・リース方式のリース開始時期は様々である可能性が高いため、平均して、初年度は6か月間として計算する。
・リースの場合のＣＩＦは、営業利益の値に税控除４０％した後、減価償却費を加算。
・ＣＯＦ（キャッシュ・アウト・フロー）は、自社負担の開発費のみとした。
・割引率は、５％とした。
・給与手当に対して、１３％の法定福利費を計上した。
・支払手数料は、仕入原価に対して５％の掛払利息分として計算した。
・発送費は、ＥＣ経由販売個数に 5 千円を乗じた。
・開発期間の３年間は、販売はないものとした。
・リース方式の減価償却費は、定額法で算出する。計算式は、

固定資産の取得価額×０．９×耐用年数に応じた償却率（５年　0.200、３年　0.333）リース方式のリース開始時期は様々である可能性が高いため、平均して、初年度は６か月間として計算する。

（ｃ）シミュレーション結果

シミュレーションにおける年次別販売台数や販売単価や売上原価（仕入価格）の変化は、付録２－３の「売上計画書」「事業計画書」「ＮＰＶ計算書」に詳細を記述しているので、ここでは当該条件下での投資意思決定に関わる数値であるＮＰＶシミュレーション結果について記述する。

a)　シナリオＡ：販売のみの楽観的ケース

５年間のＮＰＶは２１０百万円とプラスの値になるので、「投資すべきである」と判断される。開発投資としての自己資金６０百万円と仕入資金などの手元資金が必要となるが、販売開始初年度から本事業の収支は黒字となる。

ただし、橋梁検査を迅速に実行すべしという世論と必要な予算が潤沢であるという『楽観的』シミュレーションであることには気を付けるべきである。

楽観的シナリオ									
	当該年度末を現在として				ここで発売開始				（単位：千円）
		20XY-3年	20XY-2年	20XY-1年	20XY年	20XY+1年	20XY+2年	20XY+3年	20XY+4年
CIF					10,007	54,788	66,308	96,541	130,460
	営業利益				16,678	91,314	110,514	160,902	217,434
	税控除				6,671	36,526	44,206	64,361	86,974
COF		21,000	21,000	21,000	0	0	0	0	0
	開発投資（自社負担）	20,000	20,000	20,000					
	ECサイト構築	1,000	1,000	1,000					
FCF		-21,000	-21,000	-21,000	10,007	54,788	66,308	96,541	130,460
割引率＝5%と仮定									
	0.05								
DCF		-21,000	-20,000	-19,048	8,644	45,075	51,954	72,041	92,716
		割引率	1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407
NPV	210,382								

b)　シナリオＢ：販売のみの悲観的ケース

５年間のＮＰＶは３百万円とプラスの値になるので、「投資すべきである」と判断される。販売開始初年度と２年度は赤字であるため、開発投資としての自己資金６０百万円と仕入資金以上の手元資金が必要となる点に注意すべきである。

悲観的シナリオ									
	当該年度末を現在として				ここで発売開始				（単位：千円）
		20XY-3年	20XY-2年	20XY-1年	20XY年	20XY+1年	20XY+2年	20XY+3年	20XY+4年
CIF					-9,158	-382	19,606	30,004	42,842
	営業利益				-9,158	-382	32,676	50,006	71,404
	税控除						13,070	20,002	28,562
COF		21,000	21,000	21,000	0	0	0	0	0
	開発投資（自社負担）	20,000	20,000	20,000					
	ECサイト構築	1,000	1,000	1,000					
FCF		-21,000	-21,000	-21,000	-9,158	-382	19,606	30,004	42,842
割引率＝5%と仮定									
	0.05								
DCF		-21,000	-21,000	-21,000	-8,722	-346	16,936	24,684	33,568
		割引率	1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407
NPV	3,120								

c)　シナリオＣ：リースのみの楽観的ケース

５年間のＮＰＶは２２百万円とプラスの値になるので、「投資すべきである」と判断される。リース期間を５年間と設定し、２年目以降に契約した案件の回収期間が、シミュレーション期間の５年間より後に続くため、投資額に対する回収額が少なくなってしまう。また、リース品としての購入資金が、多額に必要となるため販売よりも手元資金が必要となる点に注意すべきである。

楽観的シナリオ									
	当該年度末を現在として				ここで発売開始				（単位：千円）
		20XY-3年	20XY-2年	20XY-1年	20XY年	20XY+1年	20XY+2年	20XY+3年	20XY+4年
CIF					-109,146	-57,810	8,010	106,254	194,756
	営業利益				-118,146	-93,810	-63,990	4,590	129,594
	税控除							-1,836	-51,838
	減価償却費				9,000	36,000	72,000	103,500	117,000
COF		21,000	21,000	21,000	0	0	0	0	0
	開発投資（自社負担）	20,000	20,000	20,000					
	ECサイト構築	1,000	1,000	1,000					
FCF		-21,000	-21,000	-21,000	-109,146	-57,810	8,010	106,254	194,756
割引率＝5%と仮定									
	0.05								
DCF		-21,000	-20,000	-19,048	-94,284	-47,560	6,276	79,288	138,410
		割引率	1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407
NPV	22,082								

d)　シナリオＤ：リースのみの悲観的ケース

５年間のＮＰＶはー７０百万円とマイナスの値になるので、「投資すべきではない」と判断される。

悲観的シナリオ									
	当該年度末を現在として				ここで発売開始				（単位：千円）
		20XY−3年	20XY−2年	20XY−1年	20XY年	20XY+1年	20XY+2年	20XY+3年	20XY+4年
CIF					−23,706	−61,570	−16,650	39,888	67,280
	営業利益				−23,706	−68,770	−39,150	1,980	34,134
	税控除							−792	−13,654
	減価償却費				0	7,200	22,500	38,700	46,800
COF		21,000	21,000	21,000	0	0	0	0	0
	開発投資（自社負担）	20,000	20,000	20,000					
	ECサイト構築	1,000	1,000	1,000					
FCF		−21,000	−21,000	−21,000	−23,706	−61,570	−16,650	39,888	67,280
割引率＝5%と仮定									
	0.05								
DCF		−21,000	−21,000	−21,000	−22,577	−55,846	−14,383	32,816	52,716
		割引率	1	1	1	1	1	1	1
NPV	−70,274								

（ｄ）考察

５年間のＮＰＶを計算することで、開発投資すべきかどうかを判断するシミュレーションを行った。リースのみを事業として行う場合に比べて、販売のみを事業として行う場合の方が、事業としての成立可能性が高くなる結果となった。その理由は、リース期間を５年間と設定する一方、ＣＩＦの期間も５年間で計算しているため、２年目以降に契約した案件はこの５年間で回収が完了しないために、リース売上高が低めになることがあげられる。

その要因を除いたとしても、リース事業として成り立つ売上高を確保するためには、１，０００台規模の資産を保有する必要があることが分かり、管理面の煩雑さや企業規模も考慮すると、適切な事業経営とは言い難いものと考えられる。

【参考資料】

- 資料：「道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて　社会資本整備審議会 道路分科会　道路メンテナンス技術小委員会」平成２５年６月
- 資料：「今後の社会資本の維持管理・更新のあり方について答申　社会資本整備審議会・交通政策審議会」平成２５年１２月
- 資料：「今後の高齢化の進展　～２０２５年の超高齢社会像～第１回介護施設等の在り方 委員会 Ｈ１８．９．２７ 資料４」
- 伊藤宗彦・高室裕史(2010)（編）『1 からのサービス経営』碩学舎
- 北海道警に刑事告発
  http://sankei.jp.msn.com/affairs/news/140208/crm14020810360002-n1.htm

（担当：荒谷典利）

２－２　特殊環境用ロボットの海外展開に関する調査

２－２－１　特殊環境用ロボットを海外へ輸出する際に障害となりうる国内の法令（事実関係）とそれに対する対応策

「我が国（日本）は輸出規制が厳しいので次世代ロボットを輸出できない」という考えが非常に多いが、本質的な問題は、このような先端製品は規制対象として明文化されていないため、輸出できるか否かがわからないことにある。結果、多くの企業等がこうした状況をリスクと捉え、先端技術を駆使した製品開発及び海外展開を躊躇していると想像される。特に、特殊環境用ロボット及び関連要素技術は軍事転用しやすいことから、そうした状況は開発の障壁になっているだろう。このように、我が国は輸出立国でありながら、法体系が輸出の障害になっていることに大きな問題を感じている。この節では、そういった特殊環境用ロボットを海外へ輸出する際に障害となりうる国内の法令（事実関係）とそれに対する対応策について記載する。

（１） 外国為替及び外国貿易法（外為法）

我が国の輸出規制に関する法令として「外国為替及び外国貿易法」（外為法）がよく知られている。【1】外為法では、外国為替、外国貿易その他の対外取引が自由に行われることを基本とし、対外取引に対し必要最小限の管理又は調整を行うことにより、対外取引の正常な発展並びに我が国又は国際社会の平和及び安全の維持を期し、もつて国際収支の均衡及び通貨の安定を図るとともに我が国経済の健全な発展に寄与することを目的としている。【2】外為法の問題点を以下に記載する。

① 禁輸出該当基準が曖昧である

「日本国憲法」では明文化されていないものの輸出の自由が保障されており、外為法でも“原則自由”というスタンスをとっている。そして、具体的な規制対象は「輸出貿易管理令」や「外国為替令」など政省令（政令・省令）に委ねている。

しかし、外為法と政省令との関係性が厄介で、政省令ではすべての工業製品をいったん輸出禁止とし、例外許可条件を定めることで輸出可能としている。つまり、外為法では“原則自由・例外許可”、それを受ける政省令は“原則禁止・例外許可”というスタンスをそれぞれとっており、さらに、例外許可条件を政省令・通達で多重に規定されるという非常にわかりにくい構造になっている。

ロボットは外為法のいくつかの項目で輸出規制されている品目である。その中でも、特殊環境用ロボットの一部は、レスキュー隊員に代わって危険地所を先行探査したり、建物や瓦礫の中から被災者を見つけ出したりするため、技術は偵察ロボットの技術と類似しており、軍事転用にも応用出来る可能性がある。

図２－４５　UMRS2010
（出所　国際レスキューシステム研究機構）

外為法では「貨物の輸出」（48 条）及び「技術の提供（役務）」（25 条）を規制対象としており、規制の種類として「リスト規制」と、「キャッチオール規制」がある。【7】【8】ロボットに関連する規制対象として明文化されているのは、リスト規制の貨物に当たる原子炉関係のロボット〔輸出貿易管理令別表第１の２の（15）、第１の６の（7）〕があるが、規制対象として具体的なロボットは明文化されていない。そこで、他の特殊環境用ロボットの機能に着目して参照すると、階段など自律的に昇降する機能を有するものは、輸出貿易管理令別表第１の１の（7）で規定された「軍用車両」に該当する可能性が否定できない。

ただし、そもそも外為法では「車両」を定義するための規定が存在しない。例えば、道路交通法 2 条では「車両」の定義規約が設けられており、ここでは人が搭乗することを前提としている。しかしながら、人が搭乗しない特殊環境用ロボットは、たとえ移動手段にクローラや車輪を利用していたとしても「車両」に該当しないと解釈される余地がある。

尚、人間が直接装着し現場で主導作業するものについては、「操縦ロボット」扱いとなり規制対象外となる。

また、「シーケンスロボット」も規制対象外となる。

特殊環境用ロボットを「ロボット」と解釈する正当性も問題になる。経済産業省では輸出貿易管理令別表１の２（15）の「ロボット」について、ロボットの定義を次のように規定している。

「マニピュレーション機構であって、CP 制御又は PTP 制御のいずれかによるもののうち（センサーを有するものを含む）、次の全てに該当するものをいう。イ　多機能である。ロ　三次元空間を自由に動くことにより、材料、部品、工具又は特別装置の位置決め又は方位決めが可能である。ハ　閉ループ又は開ループのサーボ装置（ステッピングモーターを組み込んだものを含む）を 3 以上有する。ニ　教示若しくはプレイバック方法により、又はプログラム可能なロジックコントローラとして用いる電子計算機により、メカニカルな介在なしで、利用者によるプログラム書換えを可能とする機能を有する」

この定義によると、「階段などを自律的に昇降できるロボット」は２次元空間を平面的に移動するだけであり、経産省の解釈上では「ロボット」に該当しない可能性がある。

さらに、上述のような法解釈によりロボットを、規制対象となる「軍用車両」に含めることの正当性についても検討しておく。経産省の解釈によれば、軍用車両とは「装輪又は装軌式の軍用ロボットを含む。但し対人地雷除去機を除く」とされている。法文の厳格解釈を要求する罪刑法定主義の立場からすれば、他の条項では法律上「ロボット」を規制対象としていることからすると単に「軍用車両」と規定している以上、そこにロボットを含まないと解釈する方が正当と考える余地がある。先に述べたように、ロボットの定義が曖昧であればこそなおさらである。

このように、特殊環境用ロボットは、軍用車両に該当する可能性は低く、かつ軍用車両に含めないと解釈するのが正当と考えられる。

ただ、特殊環境用ロボットをはじめ次世代ロボットを輸出規制の対象にするのであれば本来、立法的に解決を行うとともに明確な定義規定を設けるのが筋であり法解釈上の技術力が要求される現状は好ましい姿とはいい難い。

② 輸出手続きが煩雑である

特殊環境用ロボットを輸出する際には、外為法に基づく「輸出貿易管理令」で輸出が規制されている場合が多い。規制の種類としては、「リスト規制」と、「キャッチオール規制」がある。

「リスト規制」とは、輸出しようとする貨物が、輸出貿易管理令（輸出令）・別表第 1 の 1～15 項で指定された軍事転用の可能性が特に高い機微な貨物に該当する場合、又は、・提供しようとする技術が、外国為替令（外為令）・別表の 1～15 項に該当する場合には、貨物の輸出先や技術の提供先がいずれの国であっても事前に経済産業大臣の許可を受ける必要があるというものである。

キャッチオール規制とは、「リスト規制」の対象となっている貨物・技術以外でも、ユーザーや用途から大量破壊兵器の開発などに使われるおそれの有無を見定めることを目的に、貨物や技術の輸出及び提供を規制する規定である。貨物については輸出貿易管理令第 4 条 3 項が、技術提供については外国為替令 17 条及び別表の 16 が定めている。経産省の省令（輸出貨物が核兵器等の開発等のために用いられるおそれがある場合を定める省令）で規定されるものが規制対象となり、また、省令に規定がなくても「その貨物が核兵器等の開発等のために用いられるおそれがあるものとして経済産業大臣から許可の申請をすべき旨の通知を受けたとき」（輸出貿易管理令 4 条 3 項ロ）には、輸出に経済産業大臣の許可が求められる。
リスト規制では対象地域の限定がないのに対し、キャッチオール規制では米国や韓国、EU 各国ほか計 26 カ国が対象地域外（ホワイト国）となっている。

規制されている場合には許可申請をしないといけないが、煩雑な手続きのために、逸脱行為が多発し、さらに手続きの煩雑化という悪循環を招いている。

この状態を解決しない限りは、実災害時に、特殊環境用ロボットを迅速に（48 時間以内に）海外投入出来ず、将来、海外展開の障壁となる可能性がある。

ホワイト国	アイルランド、アメリカ合衆国、アルゼンチン、イタリア、英国、オーストラリア、オーストリア、オランダ、カナダ、ギリシャ、スイス、スウェーデン、スペイン、大韓民国、チェコ、デンマーク、ドイツ、ニュージーランド、ノルウェー、ハンガリー、フィンランド、フランス、ベルギー、ポーランド、ポルトガル、ルクセンブルク（全 26 カ国）

表２－４４　ホワイト国一覧

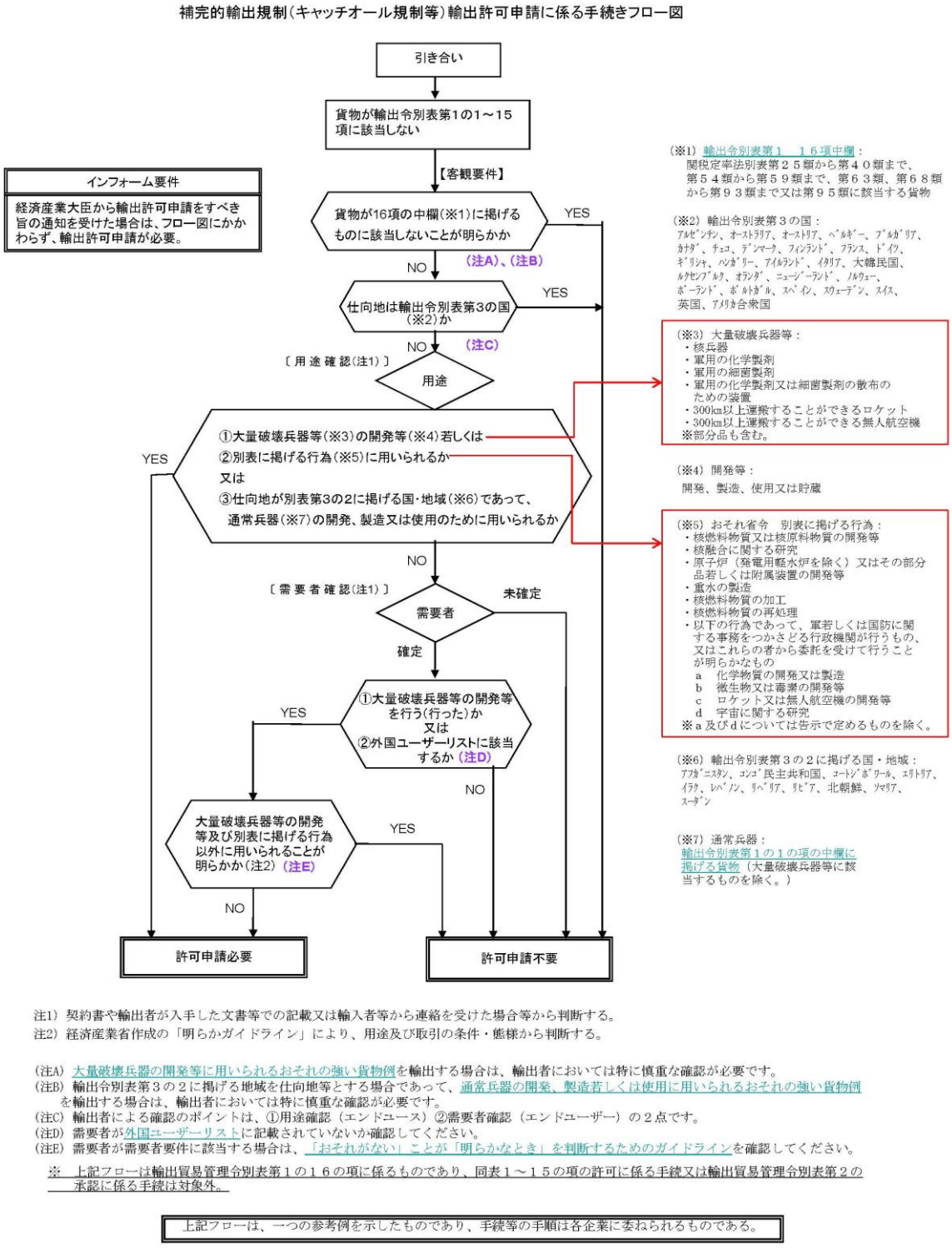


図２－４６　補完的輸出規制（キャッチオール規制等）輸出許可申請に係る手続きフロー図

（出所　経済産業省 HP　http://www.meti.go.jp/policy/anpo/anpo03.html）

リスト規制一覧①

2012.8.1改正

1 武器

項番	輸出許可品目名
(1)	銃砲・銃砲弾等
(2)	爆発物・発射装置等
(3)	火薬類・軍用燃料
(4)	火薬又は爆薬の安定剤
(5)	指向性エネルギー兵器等
(6)	運動エネルギー兵器等
(7)	軍用車両・軍用仮設橋等
(8)	軍用船舶等
(9)	軍用航空機等
(10)	防潜網・魚雷防御網他
(11)	装甲板・軍用ヘルメット・防弾衣等
(12)	軍用探照灯・制御装置
(13)	軍用細菌製剤・化学製剤等
(13の2)	軍用細菌製剤・化学製剤などの浄化用化学物質混合物
(14)	軍用化学製剤用細胞株他
(15)	軍用火薬類の製造・試験装置等
(16)	兵器製造用機械装置等

2 原子力

項番	輸出許可品目名
(1)	核燃料物質・核原料物質
(2)	原子炉・原子炉用発電装置等
(3)	重水素・重水素化合物
(4)	人造黒鉛
(5)	核燃料物質分離再生装置等
(6)	リチウム同位元素分離用装置等
(7)	ウラン・プルトニウム同位元素分離用装置等
(8)	周波数変換器等
(9)	ニッケル粉・ニッケル多孔質金属
(10)	重水素・重水素化合物の製造装置等
(10の2)	ウラン・プルトニウム製造用装置等
(11)	しごきスピニング加工機等
(12)	1 数値制御工作機械 2 測定装置
(13)	誘導炉・アーク炉・溶解炉等
(14)	アイソスタチックプレス等
(15)	ロボット等
(16)	振動試験装置等
(17)	ガス遠心分離機ロータ用構造材料
(18)	ベリリウム
(19)	核兵器起爆用アルファ線源用物質
(20)	ほう素10
(21)	核燃料物質製造用還元剤・酸化剤
(22)	るつぼ
(23)	ハフニウム
(24)	リチウム
(25)	タングステン
(26)	ジルコニウム
(27)	ふっ素製造用電解槽
(28)	ガス遠心分離機ロータ製造装置等
(29)	遠心力式釣合試験機
(30)	フィラメントワインディング装置等
(31)	レーザー発振器
(32)	質量分析計・イオン源
(33)	圧力計・ベローズ弁
(34)	ソレノイドコイル形超電導電磁石
(35)	真空ポンプ
(36)	直流電源装置
(37)	電子加速器・エックス線装置
(38)	衝撃試験機
(39)	ストリークカメラ・フレーミングカメラ等
(40)	干渉計・圧力測定器・圧力変換器
(41)	核兵器起爆(試験)用貨物
(42)	光電子増倍管
(43)	中性子発生装置
(44)	遠隔操作のマニピュレーター
(45)	放射線遮蔽窓・窓枠
(46)	放射線影響防止テレビカメラ・レンズ
(47)	トリチウム
(48)	トリチウム製造・回収・貯蔵装置
(49)	白金触媒
(50)	ヘリウム3

3 化学兵器

項番	輸出許可品目名
(1)	軍用化学製剤の原料、軍用化学製剤と同等の毒性の物質・原料
(2)	化学製剤用製造機械装置等 1.反応器、2.貯蔵容器、3.熱交換器・凝縮器等、4.蒸留塔・吸収塔等、5.充填用機械、6.攪拌機等、7.弁等、8.多重管、9.ポンプ等、10.焼却装置、11.空気中の物質検知装置等

3の2 生物兵器

項番	輸出許可品目名
(1)	軍用細菌製剤の原料
(2)	細菌製剤用製造装置等 1.物理的封じ込め用装置、2.発酵槽、3.遠心分離機、4.クロスフローろ過用装置等、5.凍結乾燥器、6.封じ込め施設用防護装置、7.粒子状物質吸入試験用装置、8.噴霧器・煙霧器等

4 ミサイル

項番	輸出許可品目名
(1)	ロケット・製造装置等
(1の2)	無人航空機(UAV)・【追加】製造装置等
(2)	ロケット誘導装置・試験装置等
(3)	推進装置等
(4)	しごきスピニング加工機等
(5)	サーボ弁・推進薬制御装置用ポンプ・軸受
(6)	推進薬・原料
(7)	推進薬の製造・試験装置等
(8)	粉粒体用混合機等
(9)	ジェットミル・粉末金属製造装置等
(10)	複合材料製造装置等
(11)	ノズル
(12)	ノズル・再突入機先端部製造装置他
(13)	アイソスタチックプレス・制御装置
(14)	複合材用の炉・制御装置
(15)	ロケット・UAV用構造材料
(16)	ロケット・UAV用加速度計・ジャイロスコープ等
(17)	ロケット・UAV用飛行・姿勢制御装置他
(18)	アビオニクス装置等
(18の2)	ロケット・UAV用熱電池
(19)	航空機・船舶用重力計・重力勾配計
(20)	ロケット・UAV発射台・支援装置
(21)	ロケット・UAV用無線遠隔測定装置他
(22)	ロケット搭載用電子計算機
(23)	ロケット・UAV用A/D変換器
(24)	振動試験装置等、風洞・燃焼試験装置他
(24の2)	ロケット設計用電子計算機
(25)	音波・電波・光の減少材料・装置
(26)	ロケット・UAV用IC・探知装置・レードーム

5 先端材料

項番	輸出許可品目名
(1)	ふっ素化合物製品
(2)	ビニリデンフルオリド圧電重合体他
(3)	芳香族ポリイミド製品
(4)	チタン・アルミニウム合金成形工具
(5)	チタン・ニッケルなどの合金・粉、製造装置等
(6)	金属性磁性材料
(7)	ウランチタン合金・タングステン合金
(8)	超電導材料
(9)	作動油
(10)	潤滑剤
(11)	振動防止用液体
(12)	冷媒用液体
(13)	チタンのホウ化物・セラミック半製品他
(14)	セラミック複合材料
(15)	ポリジオルガノシラン・ポリシラザン他
(16)	ビスマレイミド・芳香族ポリアミドイミド他
(17)	ビニリデンフルオリド共重合体他
(18)	プリプレグ・プリフォーム・成型品等
(19)	ほう素・ほう素合金・硝酸グアニジン他

＊赤字の【追加】【変更】等は2012年8月1日改正実施。

表２－４７　リスト規制一覧①

（出所　京都大学　研究　安全保障輸出管理　リスト規制対象貨物一覧表（輸出貿易管理令別表第１概要））

（http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/export/documents/list_restriction120801.pdf）

表２－４８　リスト規制一覧①

（出所　京都大学　研究　安全保障輸出管理　リスト規制対象貨物一覧表（輸出貿易管理令別表第１概要））

（http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/export/documents/list_restriction120801.pdf）

③　外国（人）との共同開発・共同研究の妨げとなる可能性があること

平成 23 年 12 月の東京工業大学でイラン人の入学を拒否する事件があった。東工大が入学を拒否した背景には、文部科学省が国連安保理決議 1737 号を受け、核開発疑惑のある同国研究者及び学生との交流に留意を求めた通達がある。これは外為法の技術情報取引規制に基づいてなされており、同規制では国内「居住者」から「非居住者」への特定技術情報の提供を禁止している（外為法 25 条 1 項）。外国人の場合は、原則的に非居住者となるが、入国後 6 カ月以上が経過すれば居住者となる。

入学拒否をされたイラン人は 2003 年に入国しており、2008 年には難民認定を受け、2010 年に入学申請を行っている。外為法 25 条 1 項の適用には該当せず、イラン国籍を理由に入学拒否をすることは違憲となる。

しかしながら、「居住者」に該当するとしても、イラン人の背後関係は不明であり、提供した技術情報がどのように扱われるかにより、学生を受け入れた研究室（教授）は幇助犯として扱われるリスクがないわけではない。問題が発生して開発助成金を削減されるコストよりも、イラン人に訴訟で負けるコストの方が安いというような考えが外国人との共同研究及び開発に重大な萎縮効果を及ぼすと考えられる。【9】

（2）　輸出管理制度改革の必要性

遠隔操作式の特殊環境用ロボットが輸出規制の対象になる可能性は低いといえるだろうが、このようなシステムの海外展開はリスクを伴う可能性を否定できない。すでに指摘した通り、国内市場で採算が取れる商品開発であれば、輸出できなくてもリスクは少ないが、海外展開しなければ採算が取れない商品の場合、輸出が可能であることや、輸出許可に要する様々なコストが事前に予測できなければ、企業は、その不確実性をリスクと捉え、商品開発を躊躇せざるを得ないからである。

このように、我が国は「輸出立国」でありながら、高い輸出障壁を自らに課して国際競争力を下げている。特殊環境用ロボットもその 1 つで、その輸出にはリスクを伴うため、開発はおろか商品企画の立案すらままならない。冒頭で述べたように、ここに大きな問題を感じている。だからこそ、抜本的な法改革がいま求められているのである。

特殊環境用ロボットの実用化に向けてはグローバリゼーションを前提に検討しなければならず、具体的には、海外マーケットの確保に加え、標準化を可能にする国際的な共同研究・共同開発体制の構築や、国内は 24 時間、アジアでは 48 時間以内に投入できる体制の確立が必須である。ゆえに、上述の外為法の課題を踏まえ、輸出管理制度の改革の方向性は、輸出の自由を原則とした制度設計にあり、禁止範囲の縮小及び明確化、事前規制から事後処罰への変革が求められる。また、そうした改革がなされない限りは、災害対応ロボットの未来は拓かれないと考える。【3】【4】【5】【6】

しかしながら、2014 年 3 月現在、安部政権では、武器輸出三原則の代わりに新原則を策定することが議論されている。特殊環境用ロボットの輸出に関しての障害が減る可能性があ

る。今後の動きに注目したい。

２－２－２　海外の機関が導入する際に障害となりうる海外の法令（事実関係）とそれに対する対応策

電気機器を輸出する際には、輸入国が要求するその国の安全規格への適合に関する認証を取らなければならない場合がある。お金と時間をかけて A 国でやっと認証を取ったと思ったら、今度は別の B 国でまた認証を取らなければならいという、面倒なことがある。特殊環境用ロボットを海外の機関が導入する際にも同様の事態が起こることが予想される。以下に、海外の機関が特殊環境用ロボットを導入する際に障害となりうる主な海外の法令について記載する。

（１） 海外の機関が導入する際に障害となりうる海外の法令

① CE マーキング

CE マーキングは、基本的に欧州連合（EU）地域に販売（上市）される指定の製品に貼付を義務付けられる基準適合マークのことで、「EU（EC）指令」の必須安全要求事項（ESRs：Essential Safety Requirements）に適合したことを示す。「CE」はフランス語の”Conformite Europeenne”（＝英語：European Conformity）の略。該当製品の製造業者（輸入者）または第三者認証機関が所定の適合性評価を行い、製品、包装、添付文書に付与し、CE マークキング表示のある製品は、EU 域内の自由な販売・流通が保証される。

よって、特殊環境用ロボット製造メーカー等は、日本から欧州に輸出する場合には、CE 適合していないと輸出できないため、手続きを行っている。【10】【11】

図２－４７　CE マーク

（出所　PSE ジャパン株式会社 HP　http://www.pse-japan.com/solution/cat04/ceeu.html）

② RoHS （ローズ）指令（Directive on the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical equipment）

欧州では、以前から資源の有効利用や環境保護への取組が進められており、国際的な環境規制に多大な影響を与えている。RoHS 指令は、電気電子機器に関する特定有害物質の使用制限に関する指令である。

2011 年に改正された（通称“RoHS2”指令）。対象製品が拡大し（改正前 RoHS 指令の 8 分類に加え、11 分類の全ての電子電器機器が対象になった）、規制対象物質の追加と見直し検討され、CE マーキングの貼付が義務付けられることとなった。【12】

③ UL 規格

アメリカ国内で使用される電化製品、あるいは電気部品を含んだ製品の安全性を証明する規格。Underwriters Laboratories, Inc.：米国保険業者安全試験所が製品安全を代表に様々なものの安全規格の作成・試験・認証している。

国に製品を輸出する場合、強制規格はもとより、UL 規格のように任意規格にも関わらず一部の州や地方自治体では UL 認定を義務付けるケースもあるので、任意規格についても入念に調査しておく必要がある。

万が一事故が起こった際の訴訟リスクの費用対効果で適合するかどうかは個別に判断している。【13】【14】

Listing認証マーク

Recognition認証マーク

図２－４８　Listing 認証マーク、Recognition 認証マーク
（出所　SMC 国際規格対応品ガイド　https://www.smcworld.com/international/ul01.jsp）

④ KS マーク

KS マークは、韓国工業標準の略称で、韓国の産業標準化法（Industrial Standardization Act）に基づく国家標準規格である。この標準規格は、韓国の鉱工業品や産業活動関連サービスの品質・生産効率・生産技術を向上させて、取引を単純化・公正化して消費者を保護することによって産業競争力を向上させ経済発展に資することを目的としている。新たな KS マークの認証は、韓国工業標準委員会（Korea Industrial Standards Commission）の承認の後、韓国政府知識経済部技術標準院（Ministry of Knowledge Economy, Korean Agency for Technology and Standards）から公示される。韓国の国家機関、地方自治体や公共機関が物品を購入する際やサービスを調達する場合などは、KS 規格を順守することが同法により推奨されている。KS マークは、現在電気製品に貼付が義務付けられている KC マークとの整合化が一部進められている。【15】

図２－４９　KS マーク
（出所　日経 BP 社 HP）

図２－５０　KC マーク
（出所　一般財団法人　電気安全環境研究所）

⑤　S マーク

S マークは、韓国産業安全衛生公団（(KOSHA　：Korean Occupational Safety and Health Agency)が、産業分野で使用される製品の安全性と信頼性ならびに製造業者の品質管理能力に関する総合的審査を通じて、客観的に安全と認められる製品に与える任意認証制度である。

図２－５１　S マーク
（出所　株式会社トーキン EMC エンジニアリング）

⑥　CCC（China Quality Certification Centre：中国強制認証制度）

中国では WTO 加盟に伴い強制製品認証制度を見直し、「中華人民共和国国家品質監督検験検疫総局(AQSIQ)」及び「中国国家認証認定管理委員会(CNCA)」から新認証制度が公告され、2002 年 5 月 1 日より実施されている。また、2003 年 5 月 1 日から新しい認証マーク及び認証書を取得していない製品に対し、出荷、輸入及び販売は禁止されている。CCC では、電気電子製品、電気通信端末設備、自動車関連製品を始め、19 種類 132 品目を対象としている。CCC 認証が無ければ中国への出荷、販売、輸出ができない。AQSIQ(General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of china：国家品質監督検疫総局)及び、SACS(China National Standardization Management Committee：国家標準化管理委員会)を中心に国際標準 GB 規格（中国国家標準：Guojia Biaozhun）の整備が進行している。【16】

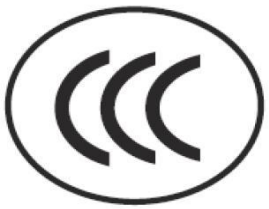


図２－５２　CCC マーク
（出所　インターテックジャパン株式会社）

⑦　CQC（China Quality Certification center：中国品質認証センター）

CQC 制度は、CQC(China Quality Certification center　・中国品質認証センター)による任意認証制度で、対象は電子・電気製品、家庭用機器、材料など多くのカテゴリーに渡り、CCC 制度でカバーされていないものが対象となっている。

CQC 認証を取得した製品・部品は下記の利点がある。

(ア) CCC 認証対象製品の認証を取得される際、部品に関わる試験が免除される。

(イ) CCC 認証対象外製品を中国国内に輸入する際、CQC 認証の書類を添付することで通関をスムーズに通過できる。

(ウ) CCC 認証対象製品の定期工場検査において、要求されている定期的検証試験が免除される。

図２－５３　CQC マーク
（出所　CCC 中国強制性製品認証オンライン HP）

⑧　IMQ マーク

IMQ（イタリア品質表示協会）が、電線、導線、材料、家庭用電気製品等の指定製品を対象に IMQ 認証を実施している。CEI（イタリア電気技術委員会）、AEI（イタリア電気技術電子協会）、ANIE（全国電子電気技術工業会）、ENEL（電力協会）、CNR（国立研究所）等が会員である。

図２－５４　IMQ マーク
（出所　全威験証(RPC Inc.)HP）

⑨　VDE マーク

VDE マークは、VED（VERBAND DEUTSCHER ELECTROTECHNISCHER e.V.：ドイツ電気技術者協会）が策定した規格で、電気・機械構造の問題、耐熱性、有毒性、放射線そして他のあらゆる危険源に対するための安全認証である。【17】

図２－５５　VED マーク
（出所　VED　HP）

⑩　LICIE（LAboratoric Centraldes Industries Electriques）による認証、試験、研修、コンサルティング他の業務

例えば、規格適合分野では、電気安全、EMC、防爆、電子部品試験、環境試験等を行っている。フランス国家規格（NF）を発行する AFNOR（フランス規格協会）の許可を受けて特定分野の NF マーク認証を行っている。キーマーク、ENEC マーク、HAR マーク、CECC マークの認証を行っている。CE マーキングの NB となっている。

図２－５５　ENEC マーク

図２－５６　HAR マーク

（出所　株式会社ケーメックス HP　http://c11j70wd.securesites.net/kikaku/kikaku.cgi）

図２－５７　NF マーク

（出所　Ecosafene Products ServiceCo., Ltd　HP
http://www.ecosafene.com/EN/service/certification.html）

（２）統一化の必要性

上記に記載したように、日本国内、海外、それぞれで規格が異なっており、輸出の際に個別に判断している状況である。海外の機関が特殊環境用ロボット導入するにあたり規格が異なっていると煩雑であり、導入までに時間がかなり取られる。
電気製品のセクターでは、面倒な手続きを簡単にするために国際的に設けられた CB スキームがある。CB スキームは、IECEE（IEC 電気機器安全規格適合性試験制度）に基づき運営されている。まずこの制度への加盟国にある認証機関（NCB：National Certification Body）または CB 試験所（CBTL：CB Testing Laboratory）に製品の試験を依頼し、CB 試験レポートと CB 証明書を発行してもらう。この CB 証明書と CB レポートを他の加盟国の認証機関に提出すれば、認証に必要な試験を大幅に省略ができ、認証取得の期間短縮とコストの削減に大いに役立つ仕組みである。
このように、特殊環境用ロボットの分野でも、国内で独自の規格を作るのではなく、海外にも対応したものをそれぞれ刷り合わせ、統一化していくのが良い。そうすることにより、評価の重複や無駄を避け、国際公益の推進に寄与出来る。各国・各機関の規制当局にとっては製品識別が容易になり、事業者にとっては製品の社会へのアピールや競合他社との差別化が出来、顧客や消費者にとっては第三者証明を取得しているという信頼のもとに明確で安心・安全な購入判断が出来るようになる。

【参考資料】

【1】 外国為替及び外国貿易法（http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S24/S24HO228.html）
【2】 財務省　外為法の目的と変遷
（ http://www.mof.go.jp/international_policy/gaitame_kawase/gaitame/hensen.html）
【3】 （http://www.robonable.jp/trend/2011/07/19kobayashi.html）
【4】 （http://www.robonable.jp/news/2012/01/hanamizuki-0113.html）
【5】 ヒロセ貿易サービス（http://www.hirose-fts.com/）
【6】 廣瀬侑子 「改訂版　外国為替及び外国貿易法ケースブック　-安全保障貿易管理・輸出管理関連の話- [Kindle 版]」
【7】 経済産業省　リスト規制（http://www.meti.go.jp/policy/anpo/anpo02.html）
【8】 経済産業省　キャッチオール規制
（http://www.meti.go.jp/policy/anpo/anpo03.html）
【9】 樋口禎志 、小林正啓、木山智之、平澤威海、佐藤碧、塩田靖浩「御社の安全保障輸出管理は大丈夫ですか[平成 22 年完全施行外為法対応]」
【10】 JETRO　CE マーキングの概要：EU
（http://www.jetro.go.jp/world/europe/eu/qa/01/04S-040011）
【11】 JETRO　自己宣言のための CE マーキング適合対策実務ガイドブック
（https://www.jetro.go.jp/world/europe/eu/reports/05000942）
【12】 JETRO　RoHS 指令（http://www.jetro.go.jp/world/europe/eu/qa/01/04A-081201）
【13】 JETRO　UL 規格
（https://www.jetro.go.jp/world/n_america/us/qa/01/04S-040007）
【14】 オムロン株式会社　主要安全規格の概要
（http://www.fa.omron.co.jp/product/certification/pdf/shuyoukikaku.pdf）
【15】 JETRO　KS マーク（http://www.jetro.go.jp/world/asia/kr/qa/01/04A-010819）
【16】 中国の CCC 認証及び CQC 認証業務（http://www.jet.or.jp/cooperation/ccc_cqc/）
【17】 IDEC 株式会社　規格認証製品一覧表
（http://jp.idec.com/ja/support/Approvals_Standards/）

課題３

海外の動向調査及び今後取り組むべき研究開発項目の明確化

報告

2014年3月

特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構

３－１　はじめに

特殊環境用ロボットが災害の予防・緊急対応・復旧に資することによって我が国の社会や産業を強靱化して産業競争力の喪失を予防し、また、我が国の特殊環境用ロボットがその目的のために明確な優位性を獲得して、国内外の産業施設やインフラ点検のため、および、防災のために配備されることが必要である。ここでは、そのために必要な戦略的スキームについて検討を行い、提言する。

本調査の内容は、防災ロボット等の特殊環境用ロボットについて、国の施策として行うべき方向性を示したものである。COCN（産業競争力懇談会）では本調査事業とは独立に、産業競争力の観点から進めるべき評価・認証についての調査を平成２５年５月から行っていたため、本事業で調査したデータや図を積極的に COCN と共有し、本調査で得られた知見を COCN に提供することによって、本調査事業の終了を待たずして、両者の活動の相乗効果を発揮させつつ、早期に国の施策等に反映される道を探ることとした。本調査の提言や、本報告書に掲載したデータや図は、COCN の調査報告書[1]と共通となっている部分があるが、以上の理由によるものである。

３－２　海外の特殊環境用ロボット技術、市場動向等の調査

３－２－１　無人飛行ロボットについて

３－２－１－１　無人飛行ロボット（UAV; Unmanned Aerial Vehicle）の技術的現状

無人飛行ロボットは地上のように障害物の影響を受けずに様々なサービスやタスクを行うことができるという特徴を有している。そのため、研究開発や軍事用途だけでなく、産業用のプラットフォームとしての活用が拡大しつつあるのが現状である。

無人飛行ロボットは、軍事用の大型無人飛行機（重量 10 t、飛行時間数日間）といったものから、中型・小型の機体、あるいは、ナノサイズ（重量数 g、サイズ数 mm）のものまで存在する。そして、自律的な認知、意志決定、行動を行うための機能を有している。

（１）現状の分析

この研究分野のロボティクスにおける最もメジャーなグループは、IEEE Robotics and Automation Society (RAS) の TC on Aerial Robotics and Unmanned Aerial Vehicle である。このグループは、この現状を下記のように分析し、重要な研究開発テーマの検討を行っている[2]。

近年のナビゲーション用センサ、アクチュエータ、組み込みコントローラ、通信システムなどの開発、それらの小型軽量化が、小型の UAV の能力を飛躍的に向上させた。固定翼機は、エネルギー効率が高い、耐久性が高い、航続距離が長い、という特徴を有している。一方で、回転翼機は、運動性能やホバリング性能が顕著に優れており、ロボットによる作業を考えた場合には適しているケースが多い。そのため、単一ローター、マルチローター（４翼、６翼、８翼など）、同軸２翼などのロボットヘリコプターが、近年特に注目を集め

ている。飛行ロボットの設計には、空気力学、推進、ガイダンス、ナビゲーション、制御、組み込みシステム、通信、自律知能、環境認識、プランニング、それらの総合的なシステムインテグレーションが必要である。

飛行ロボットのナビゲーションとガイダンスはGPSに基づいて行われているが、衛星の遮蔽、マルチパス、無線通信の問題などが安定性を損なうことが問題であり、GPS を代替する機能が求められている。そのため、画像処理やSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) がこの目的でよく使われるようになってきている。

飛行エリアとペイロードの制約はUAVにとって依然として重要な問題であり、実用のための大きな妨げとなっている。研究としては、複数のUAVを使用することによって空間領域のカバーと冗長性による信頼性を改善するアプローチ、同時に多数の場所からの情報を統合して使用し、モデルを作るアプローチが取られている。また、異なる種類のロボットを同時使用することによって、互いの欠点を補うアプローチも見られる。

信頼性と安全性を高めることは、今後１０年間に渡る最も重要な課題である。センシングと回避の技術や新しい方法が必要であり、それによってシステム全体の統合、失敗の検知、リカバリ、緊急行動、着陸などを可能にしなければならない。このためのヒューマンファクターの研究、たとえば、緊急時における人間機械インタフェースなど、も、実際の場面において信頼性と安全性を高めるために重要なポイントである。

飛行ロボットの超小型化は、技術趨勢としてますます進んでいくと考えられ、そのための生物に学ぶ設計、位置決め・ガイダンス・ナビゲーションの問題の解決、多数のロボットの協調行動などは重要な研究テーマである。

UAVが行ってきた方法・技術・応用は、環境に存在する対象物、地上のステーション、他のUAVと、情報を交換することにとどまっていた。ところが、近年になって、物理的なインタラクション（物体搬送や点検など）が研究され、新たな方法論や技術の開発が進みつつある。典型的なものは、複数のロボットで荷物を運んだり、接触しながら遠隔点検を行うような研究開発である。その次のステップは、メンテナンスや工事などを行うための組立やマニピュレーションの機能である。これらのためには、ペイロードの制約が大きな問題である。

UAVをサイバーフィジカルシステムと統合することは重要である。これらのプラットフォームは大きなスケールの実世界の問題の解決に使われていくと考えられる。必要なレベルの高い空間・時間解像度のデータを、複雑なプロセスのシステム全体についてセンシングし、実世界でのリアルタイムフィードバックコントロールをおこなうことが望まれている。このような巨大なサイバーフィジカルシステムにおいては、UAVはネットワークセンサであり、ネットワークアクチュエータとして使用されるものである。

飛行ロボットの持久性を高めることはもう一つの重要なことであり、新しい技術が必要である。単に、エネルギー源やモータなどの問題だけではなく、滑空によるエネルギーハーベストなどもそのテーマの一つである。燃料補給やバッテリー充電も実用のためには重

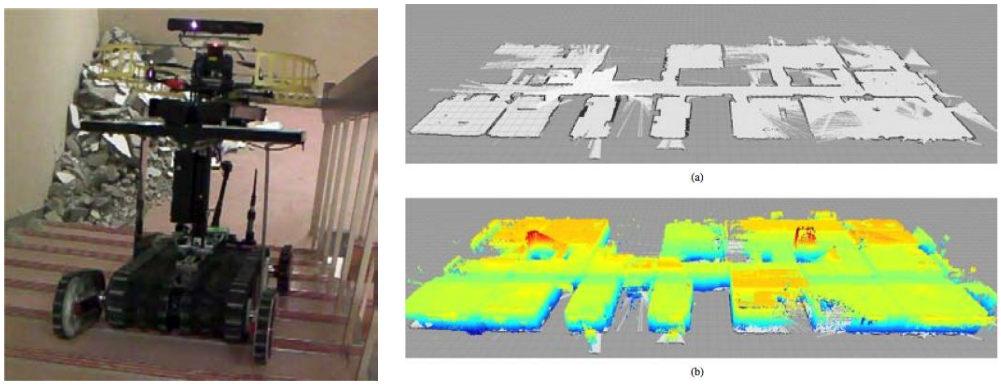
要なトピックであり、飛行しながらの補給も関連するテーマである。止まり木に止まるような方法、また、そこにバッテリー充電機能を持たせる方法など、別の考え方によってミッションの持続時間を増加させるアプローチが必要である。

さらには、人間と非常に近いところ（都市や屋内）で使われる飛行ロボットについては、安全で軽量なプラットフォームの設計が重要である。

（２）国内外での研究事例

この分野は欧米での研究が盛んに行われている。米国では、NASA や米軍関係の研究所の他、Carnegie Mellon University (CMU)、Stanford University、Massachusetts Institute of Technology (MIT)、Georgia Institute of Technology (Georgia Tech)、University of Pennsylvania (UPenn) などの研究がよく知られ、欧州では、DLR（ドイツ）、LAAS（フランス）などの研究所の他、ETH チューリッヒ（スイス）、EPFL（スイス）、セビリア大学（スペイン）などがよく知られ、オーストラリアの CSIRO も有名である。Vijay Kumar（ペンシルバニア大学、米国）のグループは、多数の超小型ヘリコプターによる協調行動の研究を行い、室内の狭い空間を安定して飛行する技術、室内のマッピング、壁への貼り付き、物体の搬送と組立などを実現した。

国内では、野波健三（千葉大学）らのグループ、中西弘明（京都大学・旧井上研）が、ロボットヘリコプターの実利用を念頭に置いた研究開発では以前よりよく知られており、高圧送電線の活線点検、火山噴火の調査などの実績を有している。鈴木真二（東京大学）らは小型固定翼機により新潟中越地震で被災した山古志村のマッピングを行った。その他、制御研究のためのプラットフォームとして、各種ロボット飛行機の制御に関する研究が行われていた。東日本大震災では、田所諭（東北大）らのグループはペンシルバニア大のグループと共同でマルチローターヘリと地上走行ロボットを組み合わせて被災建物内のマッピングを行う実験を行い（図３－１）、野波らのグループは津波被災エリアの上空からの調査を行った。最近では、永谷圭司（東北大）らのグループはマルチローターヘリの火山調査への適用試験を行っており、田所諭（東北大）らのグループは球形マルチローターヘリによる橋梁の検査試験を行い、森川（産総研）らのグループは RMAX を使った消防用無人ヘリの開発を行っている。野波らのグループや田所らのグループは、それぞれ、福島第一原発の建屋内で運搬を行うマルチローターヘリの開発や、CMU との共同で建屋内部を調査するための地上走行ロボットとの協調システムの開発（図３－２）を行っている。



(a) Quince と Pelican による探査　　(b) Quince と Pelican が計測した地図

図３－１　ペンシルバニア大学と東北大学の合同による被災建造物内のマッピング

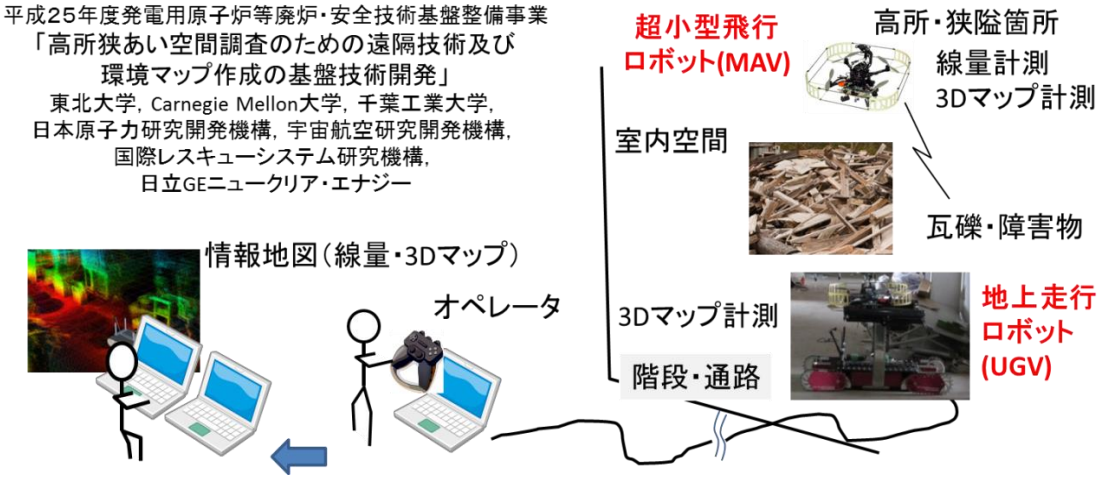


図３－２　福島第一原子力発電所の建屋の内部調査のための飛行ロボットと地上走行ロボットとの協調システム

３－２－１－２　無人飛行ロボットの製品の現状

（１）大型・中型無人航空機

米国を中心として無人航空機プレデター（図３－３）、グローバルホーク、成層圏無人航空機ハレなど、軍事用の無人固定翼機の実用化と軍隊への配備が進んでいる。我が国では、自衛隊によって富士重工業の無人機などの開発がなされたものの、国産で開発された機体は配備には至っていない。

(a) プレデター　　(b) グローバルホーク　　(c) 富士重工製無人機

図３－３　大型・中型無人航空機

(a) 有珠山噴火の調査　　(b) 大大特で開発された操縦 IF

図３－４　ヤマハ無人ヘリコプターRMAX の自律化

ヤマハでは無人ヘリコプターを農薬散布用に開発、1980 年代より販売を行ってきたが、2001 年には京都大学との協力の下その無人化を行い、有珠山の火山観測に適用した。その機体は北海道整備局に配備され、災害対策に活用されている。2002～6 年に行われた文科省大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）では、ヤマハの無人ヘリコプターの高度化を行い、風に対する安定性や、操縦インタフェースなどの研究が行われ、新潟中越地震で被害を受けた山古志村の上空からの調査や、大阪府防災訓練での活用がなされた。RMAX は、米国の大学等での無人ロボットヘリの研究のプラットフォームとして多数使われ、消防と産総研との共同研究開発でも採用されるなど、実績を有している。

（２）超小型無人飛行機

超小型無人飛行機の製品化が進んでいる。災害現場への投入のためには機動性が要求され、超小型無人飛行機はバックパックで隊員が運搬することが可能であり、中型無人飛行機と比べて安全性がはるかに高く、かつ、安価であることから、様々な用途（防災、セキュリティ、軍事、輸送、点検、その他産業応用）への適用が期待されている。その使用法は、大型無人飛行機とは全く異なり、現場至近に自動車や人手で運搬し、短時間でセットアップして、視認可能な距離で遠隔操作するものである。

複数のプロペラを持つ電動型マルチロータヘリコプターの性能がこの５年間で飛躍的に向上し、多数の実用的な無線操縦用の製品が安価に発表され（数十万円～）、遠隔操作によってＴＶ番組などの空撮用に使用されるようになった。表３－１に代表的な製品を示す。マルチロータヘリコプター企業はドイツに特に集中しており、最近では中国でも製品化が盛んである。日本ではエンルートを初めとして数社のベンチャーがあるのみであったが、野波（千葉大）を中心として 54 社を集めてミニサーベイヤーコンソーシアムが結成され、商業利用に向けた研究開発や試験が進められつつある[3]。

表３－１　代表的な市販電動型マルチロータヘリ[4]

モデル名	メーカ	プロペラ	サイズ・重量	ペイロード	国
AR-Drone	Parrot	4	54cm, 380g	0g	仏
Pelican	Ascending Technologies	4	54cm	500g	独
Falcon 8	Ascending Technologies	8	84cm, 1.3kg	500g	独
AirRobot	AirRobot GmbH	4	1.1m, 1kg	200g	独
Draganflyer	Draganflyer Innovations	8	106cm, 1.7kg	800g	加
SD 2.5 Eagle	Service Drone	8	95cm	1.0kg	独
MK-4	MK-Kopter	4	48cm, 640g	0.5kg	独
MK-8	MK-Kopter	8	77cm, 1.3kg	1.5kg	独
MD4- 1000	Microdrones	4	100cm, 2.7kg	800g	独
Phantom 2	DJI	4	60cm, 1kg	1.3kg	中
Zion Pro 800	エンルート	6	120cm, 3.1kg	4kg	日
Zion EX	エンルート	4	110cm, 3.1kg	1.2kg	日
Zion PG	エンルート	4	96cm, 2.5kg	2kg	日

AR-Drone はホビー用であり、飛行時間 12 分、無線 LAN によって iPhone などからコントロールすることができ、オートパイロット、自動離着陸・ホバリングの機能を有している。Pelican は研究用の機体であり、Vijay Kumar (UPenn)のグループによる自律化、SLAM、複数ヘリ協調制御、アクロバット飛行などの研究のプラットフォームとして使われている。Falcon は空撮用の機体であり、0.5kg のペイロードを有している。Draganflyer は 800g のペイロードで、静音（1m の距離で 72dB）に特徴があり、時速 50km、滞空時間 20 分で、機体を折りたたんで運搬することが出来る。SD2.5 Eagle は空撮用であり、高度 350m、距離 500m からの空撮映像を基地局に伝送可能であり、飛行時間は 15 分である。MK-8 は連続飛行時間 10～20 分であり、風速 12m/s に耐え、カメラ搭載時には自動バランスマウント機能が付いている。MD4-1000 はペイロードが 800g であり、最大飛行時間 1 時間、飛行速度 54km/h、風速 6m/s、雨雪下、気温－10～50℃、地上高 4,000m でも飛行可能であり、距離 500m 以内の遠隔操作飛行、高度 1,000m、距離 40km 以内の自律飛行が可能である。

中国製の Phantom 2 はカメラ安定化マウント、飛行時間 25 分、自動帰還着陸機能が付いており、距離 1 km 以内の遠隔操縦が可能である。Zion は空撮用であり、永谷（東北大）らの火山探査ロボットに使用して、浅間山の観測実験を行っている。

これらの多くは、遠隔操作用のラジコンヘリであり、ロボットとして見たときの自律性は限定的である。しかしながら、ロボット化するための飛行プラットフォームとしては高いポテンシャルを有していると考えられる。

図３－５　Zion Pro（エンルート）

図３－６　Phantom 2（DJI）

図３－７　エンルート Zion Pro 800 が UGV を運搬して浅間山を観測（永谷圭司、東北大）

マルチローターヘリの制御用コントローラは、ホビー用として安価に売られており、屋外で GPS が使える環境下ではかなり安定して動作することから、DJI（中国）の NAZA、3D Robotics（米国）の APM など、多数の製品に採用され、自律化のための下位制御部品として研究機関での採用も多い。

ホビイストや大学を中心として、オープンソースで開発が進められているマルチコプターがある。AeroQuad Open Source Project [5] は、プロペラ数３～８の機体を対象としたフライトコントローラボード、加速度計・ジャイロ・地磁気・気圧計・GPS を備えたセンサモジュール、コントロールソフトウェアなどを公開しており、キットとしての販売も行

っている。Next Generation Universal Aerial Video Platform (UAVP-NG) [6] は、空撮用の自律飛行マルチコプターのオープンソースフォーラムであり、CPU・ドライバー・制御ボード、制御ソフトウェア、操縦者インタフェースソフトウェアなどを公開し、販売も行っている。openpilot [7] は、マルチローター、ヘリ、固定翼機の開発フォーラムであり、ウェブページには、研究・空撮・リモートセンシング・点検・レスキューなどのためのプラットフォームを提供している。

図３－８ AeroQuad のクワッドローター

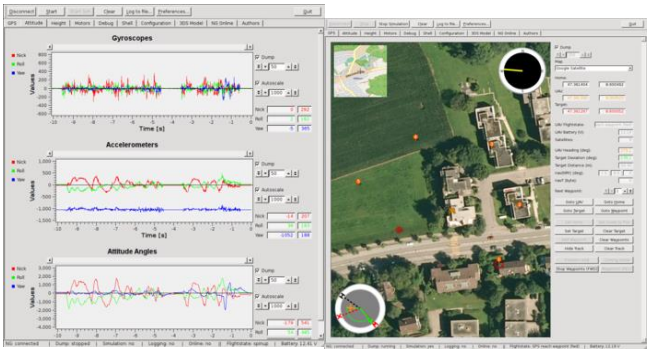


図３－９ UAVP-NG の操縦インタフェース

カメラや赤外線カメラを搭載した自律型超小型固定翼機は陸軍等の偵察用として普及している。数百 g～数 kg と軽量で、安価であり、比較的安全性も高いことから、災害時の情報収集にも使用されている。機体サイズが数十 cm と小型で折りたたみが可能なものもあることから、適用する現地の近傍まで人間がバックパックで運搬し、上空からの映像撮影に使用される。離陸は手投げ、または、カタパルト式であり、着陸は地面に滑走する。表３－２に主な自律型超小型固定翼機の製品例を示す。東大鈴木研は、手投げ式自律固定翼機を使って、新潟中越地震で被害を受けた山古志村のマッピングを行った。

表３－２　製品となっている自律型超小型固定翼機

モデル名	メーカー	サイズ・重量	距離・速度	高度・持続時間
Nighthawk	Applied Research Associates	70x61cm, 750g	10km, 44km/h	150m, 1.5h
TACMAV	Applied Research Associates	53x50cm	80km/h	150m, 50min
Dragon Eye	AeroVironment	90x90cm, 2.7kg	5km, 35km/h	150m, 60min
Cyberbug	CyberDefense Systems	1.1x1.1m, 3.2kg	10km, 40km/h	150m, 45min

Raven	AeroVironment	1.4x0.9m, 1.9kg	10km, 82km/h	150m, 110min
Evolution-XTS	BAI Aerosystems	1.6x1m, 3.7kg	10km, 81km/h	150m, 90min

図３－１０　新潟中越地震で被害を受けた山古志村の調査（鈴木真二，東京大学）

３－２－１－３）無人飛行機の技術以外の課題と展望

（１）技術以外の展望と課題

IEEE Robotics and Automation Society TC on Aerial Robotics and Unmanned Aerial Vehicles は、技術以外の課題と展望として下記を挙げている[2]。

飛行ロボットが市場で使われるためには、信頼性、安全性の向上と、システムのコスト低下が必要である。これは、飛行ロボット自体だけの問題ではなく、無線通信（使用できる周波数を含む）や地上のインフラとの統合システムの問題でもある。

産業応用のためのもう一つの障害として、民間の空間で飛行するための認証の問題、標準的な機体が存在しないこと、部品の標準が存在しないこと、共通の相互運用性の標準が存在しないこと、を挙げることができ、その解決のための運動が進みつつある。

現在の無人飛行ロボットの主たる応用分野は防衛であり、軍事予算による研究投資が多くを占めており、民間の飛行ロボットの市場は小さい。しかしながら、飛行ロボットが多くの民間応用に適用されるのは間近であり、それは大きな社会的インパクトを与えると考えられている。現在それが進みつつある分野は、セキュリティ、災害マネジメント（火災、洪水、台風、地震など)、環境モニタリングなどである。また、商業分野でも、研究が進むに従って、単に空撮を行うだけでなく、点検やメンテナンスを可能にする研究開発が進みつつある。農林業、気象、通信、土木分野でも、リモートセンシング技術を使った応用が進みつつある。

従来の有人飛行機に対する利点は、人間のパイロットが危険な条件での飛行を避けられること、長時間の飛行が必要な環境モニタリングなどを可能にすること、点検やメンテナンスのコストを著しく下げること、にある。

（2）中型無人飛行機

日本産業用無人航空機協会（JUAV）[8] は 2005 年より中型無人ヘリ（100kg 以下）、固定翼無人機、電動小型無人ヘリ（20kg 以下）に関する自主安全基準を策定している[9][10][11]。そこでは、安全に関する設計要求事項、運用する操縦者、整備士、所有者が運用上順守すべき要求事項、反社会的利用を防止するための顧客管理のガイドラインを定めている。中型無人ヘリの運用に当たっては、同協会が認定する遠隔操縦士（無人ヘリについての専門的な知識を有し、無人ヘリを目視により操縦する技能を持った操縦者）を持った者が目視内飛行を、自律航法操縦士（自律航法装置について専門的な知識を有し、自律航法型無人ヘリの操縦を行える操縦者）の資格を持った者が目視外飛行を行える、と定めている。目視内低空飛行（高度 10m 以下）では、下記が定められている。

・無人ヘリから半径 20m 以内に人間が入らないようにすること。
・無人ヘリの進行方向に人間がいないこと。
・原則として速度は 10m/s 以下で、それを超える場合は速度に比例したクリアランスを確保すること。
・機体システムの能力及び飛行制限を超えないこと。

目視内高高度飛行・目視外飛行については、下記が定められている。

・離着陸時は、無人ヘリから 15m 以内に人間が入らないようにすること。
・人間から飛行高度と同等以上の距離を確保して飛行すること。
・高度 150m 未満で飛行すること
・高度 10m 以下では速度 10m/s 以下、高度 10m 以上では速度 30m/s 以下とすること。
・機体システムの能力及び飛行制限を超えないこと。

また、いずれの場合においても、運用に当たって下記に留意することとしている。

・150m 以上の高度、航空路周辺、飛行場周辺での飛行については航空法第 99 条の 2 に従い、関係省庁との調整及びノータム発行等の諸手続きを行うとともに、飛行安全に関する技術的事項を製造者に確認の上運航すること。
・高速道路や鉄道の上空は飛行しないこと。

さらには、反社会的な行為を防止するために、どこの国の誰がどこで何の目的でどのように無人ヘリを使っているかを常時把握できる状態にすることを求めている。

ヤマハの RMAX は中型ヘリコプターの自律無人化のためのプラットフォームとして2000 年代前半には世界中の研究期間や大学で広く使われていたが、2006 年に発生した中国への輸出問題によりそれがストップし、技術開発と実用配備にブレーキがかかることとなった。

2011 年 3 月に発生した福島第一原子力発電所事故に際して、上空からの現場調査へ自律型 RMAX を適用することが検討されたが、実際に使用されることはなかった。関係者によれば、このシステムで使われている無線 LAN が、建屋の陰に入った際に途絶える可能性が高いことが問題となり、実際に適用することはできなかった。また、いくつかの災害での適用が検討されたものの、市街地では安全の確保が難しいこと（自主規制の条件を満たすことができない)、山間部でも無人である保証がないこと、視野外や無線到達範囲外に飛んだ場合にはモニタリングが不可能であること、が理由となって災害への適用は限定的であり、人が入れない火山災害などへの適用が主となっている。誤った使用法による農薬散布時の事故も発生しており、安全性の確保は重要である。

（３）超小型無人電動飛行機

超小型無人電動飛行機（数 kg 以下の模型航空機）は、中型・小型無人飛行機と比べると、安全性ははるかに高い。しかしながら、プロペラが人間に直接衝突する危険性や、搭載物の重量が大きい場合には落下による危険性、バッテリーやモータなどのエネルギー系統に起因する危険性がある。死亡事故も発生しているため、安全対策は重要である。

米国議会のシンクタンクである Congressional Research Service のレポート[12]は、UAV が侵害するプライバシーの危険性について、下記のように述べている。

ホームランドセキュリティや法的執行のための無人飛行機の使用増加に伴い、これらの UAV をどのように取り扱い、他の航空交通と安全に分けることができるかについての議論が高まっている。そのため、Federal Aviation Administration (FAA) は 2015 年までに、どのように UAV と米国の航空管制システムとを統合するかについて、結論を出すことが求められている。

軍事やホビーのみならず、無人飛行機の能力増大に伴って、民間や商用の使用（空撮、科学研究などを含む）への適用が予想されている。現在 FAA はケースバイケースでその許可を与えているが、数の増加によってそのような対応が難しくなっている。これまでは、無人飛行機の製造者に対して飛行許可を与えてきたが、商用ユーザが許可を求めるケースが増えてきたことに伴って、これをどのように扱うかについての検討が必要になった。

飛行ロボットはさまざまなセンサを搭載することが可能であり、特に超小型飛行ロボットは低空（150 m 以下）で居住空間に近づくことが可能であり、プライバシーや人間追跡の危険性を持っている。商用利用が進めば、海水浴場の上空を飛行したり、芸能人のパー

ティーを空撮するようなことも考えられるため、その使用を制限、あるいは、コントロールする必要がある。

また、同機関の別のレポートは政府機関が個人情報を収集することの問題性を指摘し[13][14]、米国会計検査院のレポート[14]はテロリストに UAV が使用されることを避けるための対策が必要である、と述べている。

これらのセキュリティの問題を理由として、米国では FAA が、小型無人飛行機の商業目的での屋外使用を禁止するに至った。2013 年 7 月 18 日には、Raphael Pirker (Team BlackSheep)が 2011 年 10 月に行った超小型無人固定翼機によるバージニア大学のキャンパスの商業用フィルム撮影に対して、FAA が$10,000 の罰金を科し、最初のケースとなった[15][16]。これに対し、2013 年 3 月 6 日に、National Transportation Safety Board (NTSB)が FAA の科料を無効と判断し、法的係争となっている[17]。

しかしながら、無人飛行機を使った様々なサービスが提案されており、将来における大きな可能性を秘めていることから、どのようにして有人飛行機の管制システムの中に組み入れていくかは近々の課題とされており[18]、2015 年までにその結論を出すとされている[18][19]。

その１ステップとして、FAA は Unmanned Aircraft Systems Integration Office を作った。また、無人機研究試験サイトの運用者の募集を行い、2013 年末に全米で 6 つのサイト（University of Alaska、State of Nevada、New York's Griffiss International Airport、North Dakota Department of Commerce、Texas A&M University、Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech)）が選ばれた。それらのサイトでは、数年の間に、安全に UAS を管制システムの中に組み込むのに必要な認証と運用に関する重点研究を行う計画である[20]。

３－２－１－４　無人飛行ロボットのコンテスト

DARPA Grand Challenge、Urban Challenge、Robotics Challenge、RoboCup などに代表されるように、模擬現場を活用したコンテストは技術的な底上げと、現実的な新しいソリューションの導出に大きな役割を果たす。Google Car が米国で一般公道を走ることが出来ているのは DARPA Urban Challenge のおかげであるし、Quince が福島第一原子力発電所内で使える性能を有するに至ったのは RoboCupRescue のおかげである[21]。このような技術革新の方法論は、米国を中心として以前から様々な分野で採用されてきた。無人飛行ロボットの分野もその例に漏れない。

International Aerial Robotics Competition (IARC) は 1991 年に AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) のサポートで、ジョージア工科大学を海上として開始された。最初は自律ロボットが金属のコインを運搬するルール（自律飛行、GPS 使用、物体把持）で始まった競技会であったが、参加ロボットの機能が上がるにつれてより複雑なミッションを行うルールへと次々と変更されている。1996 年からは完全自律ロボ

ットが廃棄物ステーションから廃棄物をサンプリングしてくるミッション（マッピング、ミリサイズの物体認識、物体回収）、1998 年からは上空から被災者や災害の状況（火災や被災建物など）を調査するミッション（被災者の状態識別、飛行障害（火炎、水柱など）の回避、複雑で煙などが充満した環境、災害現場のマッピング）、2001 年からは 3 km 離れたビル内に入って内部を撮影するミッション（長距離飛行、町の発見、ビルの発見、開口部（窓やドア）の発見、子ロボットの投入）、2009 年からはより複雑な内部構造（廊下、小部屋、障害物、行き止まりなど）を GPS 無しで調査するミッション（子ロボットの飛行、ビル内のマッピング、対象物の位置特定、SLAM）、2010 年からはそれに加えて小部屋の中から物体を持ち帰る作業が加えられた（未知ビル内のマッピング、安全基準の順守、壁に書かれた文字の読み取り、小物体の運搬、SLAM）。2014 年からは新しいミッションがスタートし、飛行ロボットと地上走行ロボットの協調、SLAM や GPS を使用しないナビゲーション、複数飛行ロボットの協調をテーマとして、飛行ロボットが走行している地上ロボットに触れながら走行方向を変更してミッションを達成させる羊飼いロボットを開発することをテーマとしている。この競技会への参加者は、米国、中国、ドイツ、英国、スイスなどのチームである[22][23]。

国内では、太田ビジネス創造協議会や鈴木真二（東京大学）を中心として、2006 年より全日本学生室内飛行ロボットコンテストの大会を開催している。2013 年 10 月に羽田空港 T101 格納庫で行われた第 9 回大会では､全国の大学や高専から 62 チームの参加があった。その対象は、飛行機（固定翼機）タイプと、飛行船タイプであり、ヘリコプターは含まれていない。競技ルールは、遠隔操作あるいは自律飛行で 15g のおもりを定められたエリアに運搬することであり、その位置の正確さや機体の性能および操縦性を評価することとなっている。また、追加として、自律飛行の場合には水平旋回や水平８の字飛行を行うこととなっている。

３－２－２　水中無人作業機について

３－２－２－１　水中無人作業機の現状

世界の中で水中無人作業機の研究開発で最もメジャーなグループの一つは、IEEE Robotics and Automation Society TC on Marine Robotics である。2013 年 1 月に作成された Technical Area Overview Report には、その現状を下記のようにまとめている[24]。ただし、下記では水中無人作業機を海洋ロボットと呼んでいる。

この１０年間で、海洋技術とロボティクスの発展は著しく、それが融合した海洋ロボティクスの研究開発が活性化している。近年のセンサ、計算機、通信、情報処理の発展が、海洋ロボティクスにおける高度技術の開発のバックグラウンドを形成し、海底の資源掘削、薬開発のための海洋生物の収集、石油・ガスの掘削など、深海における資源開発のためにロボットは大きな貢献を行っている。そのため、海洋ロボット技術に対する要求はますます増大している。

海洋ロボットは下記のようなカテゴリーに分けられる

・遠隔操作水中無人機（Remotely Operated Vehicle; ROV）

ほとんどの商用の水中無人機は有線で遠隔操作されるものであり、ROV と呼ばれている。現在のほとんどの水中でのロボット作業は ROV で行われている。

・自律水中無人機（Autonomous Underwater Vehilces; AUV）

1980 年代から研究開発がなされ、1990 年代には国際的に多くの開発事例があり、2000 年代になって商用製品の購入が可能になった。

・水上無人機（Unmanned Surface Vehicle; USV）

海上交通路の掃海、ホームランドセキュリティや沿岸警備のための水中捜索の支援が主な用途である。

３－２－２－２　水中無人作業機の製品の現状

有線で遠隔操作して使用される ROV には、民生用の製品が多数ある。表３－３にその例を示す。

表３－３　代表的な ROV

モデル名	メーカー	サイズ、重量	スラスタ	水深、索長
SARbot	Seabotix	55x25x37cm, 17.4kg	4 (2 forward-8.5kgf, vertical-3kgf, lateral-3kgf)	150m, 250m
LBV200-4	Seabotix	53x25x26cm, 11kg	4 (2 forward-7kgf, vertical-3kgf, lateral-3kgf)	200m, 150m
vLBV-10 "SeaLift"	Seabotix	63x64x83cm, 30kg	10 (4 vectored-22kgf, 6 vertical-18kgf, lateral-18kgf)	950m, 1,250m
vLBV950	Seabotix	62x39x39cm, 18.1kg	6 (4 vectored-22.5kgf, 2 vertical-9kgf)	950m, 2,000m
LBC	Seabotix	53x50x40cm, 28kg	4 wheels-8.8kg（車輪駆動） suction device-23kgf)	300m
vLBC	Seabotix	63x39x50cm, 28kg	2 tracked - 12kgf（クローラ駆動）, suction - 28kgf	300m
Seamor 300F	Seamor Marine	36x47x36cm, 23kg	4 (2 forward-11kgf, 2 vertical/lateral-11kgf)	300m, 900m
Seamor Lite	Seamor Marine	25x38x25cm, 14kg	4 (2 forward-10kgf, 2 vertical/lateral-10kgf	300m, 950m
VideoRay	VideoRa	38x29x22cm,	2 (2 forward-10kgf)	300m,

Pro 4	y	6.1kg		300m
RTV N-100EX	三井造船	100x53x52cm, 38kg	6 (3 forward-660W, 2 vertical-200W, lateral-220W)	150m

自律的に水中を航行する AUV は、石油掘削のための海底のマッピング、軍事、科学探査などの用途に使われている。民生用・商用のシステムの数は ROV ほど多くはないが、代表的な例を表３－４に示す。

表３－４　代表的な AUV

モデル名	メーカー	サイズ	重量	水深	航続時間
HUGIN	Kongsberg Maritime	φ0.75x7m	1.9t	4,500m	74h
REMUS 100	Kongsberg Maritime	φ0.19x1.6m	37kg	100m	10h
REMUS 600	Kongsberg Maritime	φ0.67x4m	863kg	6,000m	28h
BLUEFIN -9	Bluefin Robotics	φ0.24x1.75m	60.5kg	200m	12h
BLUEFIN -12D	Bluefin Robotics	φ0.32x4.32m	260kg	1,500m	30h
BLUEFIN -21	Bluefin Robotics	φ0.53x4.93m	750kg	4,500m	25h
Gavia	Teledyne Gavia	φ0.2x2.7m	80kg	1,000m	10h
EXPLORER	International Submarine Engineering	φ0.74x6m	1,850kg	6,000m	85h

イメージングソナーは ROV や AUV には重要なセンサであり、水中無人機の性能を近年飛躍的に向上させた。その代表的なシステムの性能を表３－５に示す。

表３－５　代表的なイメージングソナー

ソナーシステム	周波数 (kHz)	解像度 (cm)	単位時間あたり測定面積(km^2/h)
Synthetic aperture (interferometric)	50-120	2	2.6
Synthetic aperture sonar	50-300	2	1.2

Dynamic focused sonar	850	15	0.5
Interferometric side scan sonar	50-300		
Side scan sonar	50-	20-30	0.25
Multibeam echo sounder	MF		

３－２－２－３　水中無人作業機の技術的課題

IEEE のレポート[24]は下記のように述べている。

海洋ロボットで今後 10 年間で重要となる技術は、一言で言えば自律的な作業である。これを行う AUV は Intervention AUV (iAUV)と呼ばれている。それによって、これまでの ROV やダイバーの限界を打ち破り、母船を含めたオペレーションのコストを下げ、作業員の疲労や安全の問題を軽減する。自律性を高めて人間の介在を最小限にし、知能と意志決定能力を持った自律ロボットがその研究開発の目的である。さまざまなプロジェクトにより、iAUV の開発が行われている（ONR、ハワイ大の SAUVIM プロジェクト（図３－１１）[25]、EU FP7 の TRIDENT プロジェクト[26]、スペインの RAUVI プロジェクト[27]など（図３－１２））。SAUVIM プロジェクトでは、2010 年に、ホノルルのスナグ港で水中ロボットの自律航行とマニピュレーションのデモンストレーションを行った。また、水上ロボット Papa Mau は自律航行での太平洋横断に成功した。

将来は下記のような応用が重要と考えられている。

・科学：海底マッピング、海洋学的現象や地熱現象への迅速な対応、地質学サンプリング
・環境：長期モニタリング（炭化水素流出、放射能漏洩、汚染）、環境改善、海中構造物の点検（パイプライン、ダムなど）
・軍事：浅い水中の爆発物検知と処理、潜水艦の船外センサ
・海洋採鉱・石油産業：海洋資源調査、水中構造物の建設とメンテナンス
・産業：船内点検、タンク内点検、原子力プラント点検、水中通信、電力ケーブルの設置点検、海中ツアー等のエンターテインメント、海洋養殖の管理等

このレポートに書かれているように、iAUV はダイバーや ROV に代わって半自律的に海中作業を行うための自律水中ロボットであり、今後の新しい技術の方向として期待されている。

以前は水中でのメンテナンス等の作業はダイバーが耐圧潜水服を着て行っていたが、気象の影響を受けやすく、安全面でも問題があった。油田が徐々に深海域（＞500 m）に設置されるようになるにつれ、潜水服の重量増や高いリスクによってダイバーによる作業が困難になってきたため、1980 年代以降には、徐々にこれらの作業は ROV を使用するようになってきている。ところが、このような方法で作業を行うためには母船が必要であり、そこからダイバーの潜水を行い、ROV を制御する必要がある。そのため、海中作業のコスト

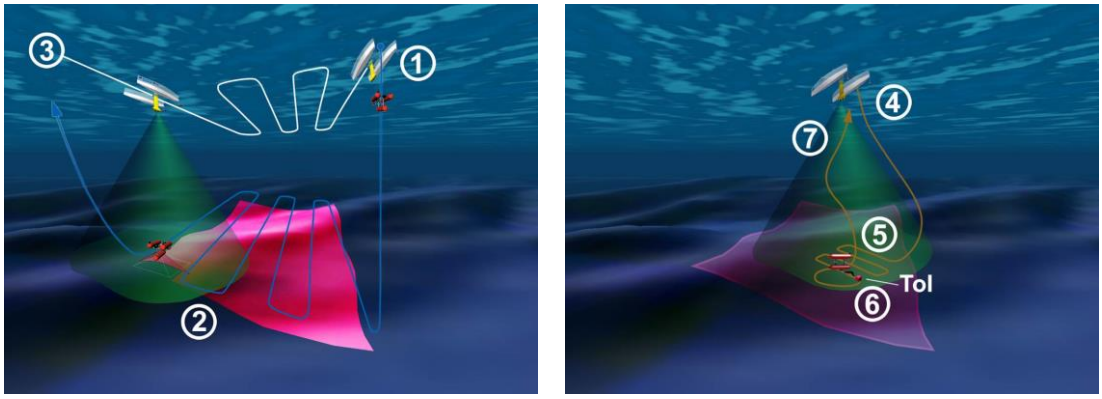
は1日当たり数千万円にも上っていた。

2000 年代に入って AUV の性能が向上し、商用調査に使われるようになってきた。すなわち、自律的に水路調査、海洋資源採取、石油資源探査などのために、海底のマッピングや水柱計測などが行われるようになり、AUV はデータ収集のためのツールとして使われるようになった。

その後、近年になって水中ナビゲーションシステム（USBL; Ultra-Short Baseline やソナー)、音響モデム、カメラなどの技術が向上したため、AUV をより精度良く位置決めし、環境を精度良く認識することが可能になり、作業を行うようなミッションの遂行が可能になってきた。そのため、石油施設のバルブを操作したり、海底から生物をサンプリングしたりすることが可能になると考えられている。このようにして、iAUV の研究開発が活性化するに至った。

USBL は､フェーズアレーの音響発信器や受信機を母船や UAV に搭載することによって、母船からの距離や方向を計測し、UAV の位置を特定するシステムであり、水中作業機にとってキーとなる技術となっている[28]。

図３－１１　SAUVIM プロジェクトで開発された iAUV [25]



(a) Phase 1（調査ミッション）　　(b) Phase 2（インターベンションミッション）

図３－１２　TRIDENT プロジェクトのミッション [26]

３－２－２－４　水中無人機のコンテスト

水中ロボットにおいても、様々なコンテストが行われ、技術の底上げと新しい技術の試行に大きく貢献している。

（１）RoboSub Competition

AUVSI が 1998 年から行っている U. S. Office of Naval Research (ONR) との協力で行っている自律水中ロボット（AUV）のコンテスト。

（２）International RobotBoat Competition

AUVSI が 2008 年から ONR との協力で開催している学生対象の競技会、自律小型ボート(ASV)の競技会。障害物のある沿岸部の航行、運河の通過、自律ドック入れを行う。

（３）National SeaPerch Challenge

AUVSI が 2011 年から行っている遠隔操縦水中ロボット（ROV）のコンテスト。プール内に設けられた障害物を避けながらロボットを操縦するルールで、中高生を対象として開催されている。

（４）UAE Innovation Challenge

2013 年に AUVSI、アラブ首長国連邦の高等工業大学、Northrop Grumman、Abu Dhabi Autonomous Systems Investment (ADASI) の共同で学生対象に行った水中ロボットの競技会。

（５）Maritime RobotX Challenge

AUVSI が 2014 年から ONR との協力で開催する自律ボートの競技会。ONR が標準ボートをチームに対して提供し、チームがその上に自律知能を搭載して競技を行う。そのルールは、決められたスタート地点からゴール地点まで航行するミッション、ランダムに設けられた障害物を避けながらゴールに向かうミッション、水中にある音源を探すミッション、水上の部位のライトのパターンを認識するミッション、ドッキングステーションにドッキ

ングするミッションの５つから成る。

３－２－３　地上走行ロボット

３－２－３－１　地上走行ロボットの現状と製品

世界的に見て地上走行型特殊環境用ロボット（UGV）で最も数量実績があるのは、爆発物処理用（EOD-Explosive Ordnance Disposal、Counter-IED）の遠隔操作ロボットである。その他には、危険環境下での調査・情報収集・偵察用ロボット（災害、汚染、放射線、爆発、疫病等の危険がある閉鎖空間や被災地など)、ロジスティクス・運搬支援用ロボットなどがある。

市場レポート[29]は、米国を中心とする UGV 市場は次のような現状にあると SWOT 分析している。

（Strength；強み）

・リスクの高い作業に対する有効性
・少ない人数で作業能力を維持できる
・都市型紛争、非対称紛争の増加
・米国の教義的統合
・技術的優位性

（Weakness；弱み）

・内乱介入の終了
・調達と研究の予算削減
・UGV のための教義的法典化の欠如
・大企業による市場独占

（Opportunity；機会）

・UGV の役割の増大
・新しいソフトウェアや部品の改良や開発
・有人車両へのロボティクスの活用
・非軍事機関での利用拡大

（Threat；脅威）

・海外事案への介入現象
・研究削減
・自律性に対する文化的な反対
・技術が成熟してから活用されるまでの時間の遅れ

地上走行ロボットの製品の現状については、「２－１－１　国内外における特殊環境用ロボットの社会実装の現状」に詳細に述べてあるので、そちらを参照されたい。

３－２－３－２　地上走行ロボットの技術的課題 [30]

車輪型の UGV は、自動車が走行するような路面を対象として実用化されている。技術的には、遠隔操縦や通信が問題である。クローラ型の UGV は、階段・瓦礫・荒れ地などの走行を目的として実用化され、小型ロボットとしては PackBot など、海外では主として軍事用に実績がある。大型ロボットの代表例は無人化施工建機であり、雲仙普賢岳等での実績がある。

広域の情報収集には速度不足、鳥瞰性能の不足から、飛行ロボットに比べて優位性がない。一方で、作業を行うための移動プラットフォームとしては、実用的に最も優れている。

災害現場では、軍事用に開発された小型ロボットではフィールドでの踏破性能の限界が見られ、さらに高い運動性能（不整地条件のクリア、移動速度の向上）が必要である。そのためには、メカニズムや履帯や車輪などの機械設計とそれらの自律制御の研究開発が必要である。その制約条件として、マニピュレータ、非破壊検査装置、ガスセンサなどの作業を行うための装置を搭載した状態でなければならず、実際に使用される路面条件（不整地、階段、梯子など)、環境条件（水濡れ、油濡れ、など）などが必要であり、それらを満たした上で運動性能を発揮することが求められる。

大型小型を問わず、ロボット周囲の状況を操作者が正しく認知できることが必要である。搭載できる外界センサには、搭載スペース、コスト、信頼性、他の理由によって限界がある。さらには、使用される環境条件（天候、温度、湿度、煙、火炎など）の下でセンシングができなければならず、煙などを通過してその向こう側を見ることも求められる。災害現場で使用できるヒューマンインタフェースには、サイズ、コスト、信頼性他の限界があり、通信のレイテンシーや電送容量の問題などもあり、大きな課題となっている。

人間が入れない閉鎖空間での作業には、安定性の問題が解決できない無線通信を使用することは困難であり、有線通信が必須である。有線の通信ケーブルを制御して運動性能を妨げないようにする方法が必要であるが、世界的に見てほとんど研究開発がなされていない。

災害空間では速度と信頼性が重要であり、高所からの落下でも壊れない頑健性が必要である。災害環境条件に対するロバスト性は重要であり、耐久性、信頼性が必要である。さらには、爆発性雰囲気（燃油漏れ、可燃性ガスなど)、腐食性ガス雰囲気、高温下での使用も想定される。

技術熟成度レベルを表３－６のように定義すると、車輪型やクローラ型の地上走行ロボットは、適用が進んでいる易しい現場においては「９」であるが、困難な状況については未だ「６」に留まっている。

表３－６　技術熟成度レベルの定義

【レベル 1】 科学技術が発見された。

【レベル 2】 技術コンセプトと、その適用法が発明された。

【レベル 3】 機能性能を解析と実験により示した。
【レベル 4】 要素部品を研究室で実証した。
【レベル 5】 要素部品を模擬現場で実証した。
【レベル 6】 試験機を模擬現場でデモンストレーションを成功させた。
【レベル 7】 試験機を災害現場でデモンストレーションを成功させた。
【レベル 8】 実機を災害現場で実証した。
【レベル 9】 実機が配備され、よく使われて実績を上げている。

４脚型のロボットは、傾斜地の作業を行うものや、不整地での運搬用として研究開発されてきたが、特殊建設機械などを除いては実用化・現場配備されたものがない。歩行の安定性の問題などは解決されてきており、BigDog や TAITAN IV など、性能面では実用化が近づいている研究開発ロボットもあり、東芝の４脚ロボットのように、動作が緩慢であるが福島原発の現場で使用されたものもある。

２脚型のロボットは、従来は災害環境を対象とした研究開発は行われなかったが、米国では最近 PETMAN など不整地における運動性能を重視した研究開発が進められ、DARPA Robotics Challenge のようなプロジェクトも行われるようになってきているが、現状ではまだ、他の移動方法と比肩できる性能を災害空間のような場所で実現した研究は知られていない。

脚型ロボットは車輪やクローラによる地上移動ロボットと比べて、速度が不足しており、移動時の安定性を高めるために高度な制御が必要であり、エネルギー効率が悪い、設置面積が狭いなど、広域を移動するには適していない。一方で、脚型でないと移動が困難なケース、たとえば、パイプや障害物をまたぎ越える必要がある場合、階段が急で段の角にクローラなどを引っかける方式では安定した登坂が不可能な場合、梯子など人間の移動のために設けられた環境で動かねばならない場合、などには適している。状況が不明な災害現場に適用するためには、移動のロバスト性を確保するために、車輪型やクローラ型との組み合わせが必要である。

ユーザの観点からは、脚型は車輪やクローラとの比較において優位性が認められる場合にのみ適用が進められることになるため、現在の技術レベルにとどまる限り、適用範囲が限定的であると言わざるを得ない。今後の技術開発によって、適用範囲が拡大されることが期待される。

これら脚型の地上走行ロボットの技術熟成度レベルは、脚型が最も適した現場に対しては「７」程度であるが、車輪やクローラで十分な現場に対しては「４」レベルに留まっていると評価される。

３－２－３－３　地上走行ロボットのコンテスト

地上走行ロボットの先端技術開発において、コンテストが果たした役割は大変大きい。

実用ロボットはユーザからの発注に基づいて企業が開発するのが通常のケースだが、その場合には現場における実用性とチャレンジングな先端的目標とは対極にあり、確実性を求めるために、技術的に見て保守的な求解しか行われにくいという問題点がある。一方で、コンテスト形式の研究開発は、技術的に困難な事がある条件下では不可能ではないことが示される場であり、意欲的な新しい試みがなされるところが異なっている。研究室内の開発では、どうしても不確定要素が少ない特定環境が設定され、それに対するチューニングを施してしまうため、多様な実用現場にあまねく適用できる汎用性や、環境条件へのロバスト性が確保されないケースがある。コンテストのルールはあらかじめ決められることが多く、災害を対象とする多くのコンテストはユーザサイドからの要求をある程度入れた形で企画されることが多いため、実用性を持たせやすい。

さらには、コンテストのルールの下で勝敗が点数の形で決せられるため、参加者間の競争が働き易く、参加団体の名誉をかけて必死になることによって研究開発が加速されやすい。また、それぞれの参加者が独自のアプローチをとることとなるため、さまざまな解をじゅうたん爆撃的に試行し、可能性の有無を広く調べることができる。また、参加者間での情報流通が図られるため、特に基盤共通技術の研究開発が進みやすいという利点がある。

一方で、期限が限られていることから、深く重点を追求することが困難であることが多い。さらには、大学などにおいてはしっかりとした信頼性設計がなされないこともあり、短期間の試行を繰り返すことから、災害空間で必要な耐久性や耐環境性が不足するものも多い。

フィールド地上ロボットのコンテストとしては、下記のようなものを代表的な例として挙げることができる。

（1）Intelligent Ground Vehicle Competition

1993 年より AUVSI により開始された地上走行ロボットコンテストであり、いくつかの競技から成っている。

Auto-Nav Challenge Competition は、完全無人自律自動車の競技会であり、屋外の障害物があるコースを、決められた時間内に、最低時速 1.6 km/h、最高時速 16 km/h を順守しながら、レーンの中を旗や障害物を避けながら走行する。決められたコースを通過する時間でスコアを決める。すべてのセンサや計算機は車両の上に搭載されなければならず、外部からの支援は許されていない。コースのマップを作成することが求められている。コースは 150m×60m の草地のエリアの中に設けられた全長 300m のコースであり、レーン幅は 3～6m である。

Design Competition は、ロボットの設計を競う競技会である。参加チームはレポート、口頭発表、実ロボットの３つの項目で審査員により評価がなされる。レポートの審査項目は、設計プロセスとチーム組織、ドキュメンテーション、設計のイノベーション、マッピング技術、電子設計、ソフトウェア戦略、システムインテグレーション、エネルギーと材

料、安全性・信頼性・耐久性、である。

Interoperability Profiles Challenges は、RSJPO (Robotic Systems Joint Project Office) が定めた IOP (Interoperability Profiles) に従って動作するシステムの開発を競う競技会である。IOP としては、包括 IOP、通信 IOP、搭載機材 IOP、制御 IOP がある。これらのインタフェースに従って開発することが求められる。たとえば、包括 IOP は様々なタイプのモビリティ(テレオペレーションや経由点通過など)についての Mobility 属性を定義し、それらの属性はこれらについてのインタフェースの要求仕様を定めている。これらの IOP は、JAUS Profiling Rules IOP と Custom Services、 Message and Transport という２つの書類に定められており、これらは SAE Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS)を定めたもので、どのように JAUS のサービス、メッセージ、トランスポートが IPO に定められたインタフェースを作るために使われるかを規定している。このように、定めた標準を普及するために競技会メカニズムを活用しているところは興味深い。

（２）RoboCupRescue [31]

（２－１）概要と歴史

ロボカップレスキューは、競技のメカニズムを活用することによって、多くの研究者が自主的に災害救助の問題の求解に参加し、緩やかな競争と協調を通じてレスキューロボットの技術を相互に高め合うことを目的としている。この分野は、日本ではマーケットが小さいため、企業の積極的な技術開発投資が困難であり、経済原理だけでは技術の高度化を図ることが難しいが、この方法論によって研究開発を奨励することが企画された[32][33]。

ロボカップレスキューは 3 つのリーグからなっている。

1) ロボットリーグ

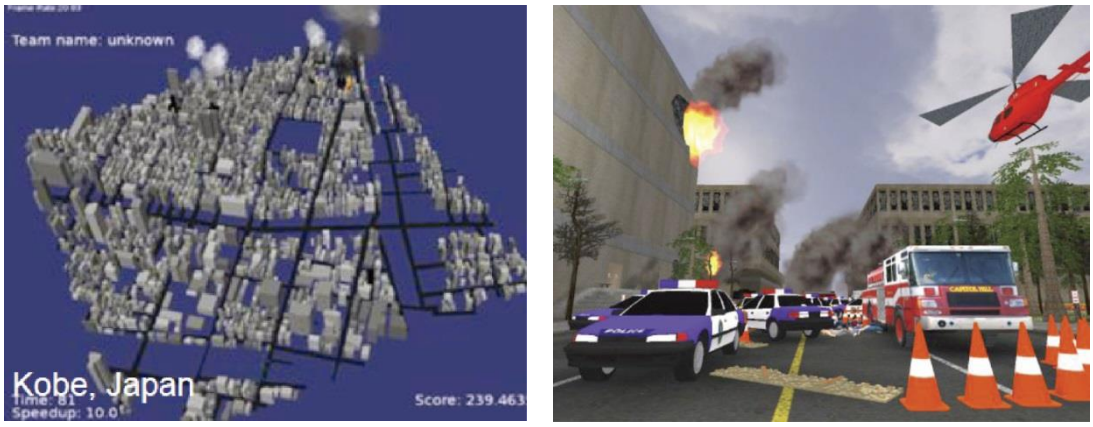
実物大の災害地を模擬した競技フィールドの中で、要救助者の発見、周囲の状況の報告、周辺のマップの作成、危険物体のマニピュレーションなどを競う、遠隔操縦及び自律ロボットによる競技[34]。以下で詳細を説明する。

2) シミュレーションリーグエージェントコンペティション

計算機シミュレータの中に設けられた数 km 四方の都市空間の中で、消火、救助、交通啓開などの災害対応部隊の自律エージェントの活動戦略を競う、シミュレーションによる競技（図３－１３(a)）。

3) シミュレーションリーグロボットコンペティション

USARSim と呼ばれるゲームエンジンを使った計算機シミュレータの中に設けられた数百 m 四方の街区で、自律ロボットが要救助者の発見と状況報告などを競う、シミュレーションによる競技。レスキューロボットリーグと同様のルールで競技を行う（図３－１３(b)）。



(a) Agent Competition　　(b) Robot Competition

図３－１３　ロボカップレスキューシミュレーションリーグ

表３－７　ロボカップレスキューロボットリーグの歴史

Progress of RoboCupRescue Robot League

1998 Start Planning
2000 Demonstration (Melbourne, Australia)
2001 1st Rescue Robot League (Seattle, USA)
2002 2nd RRL (Fukuoka, Japan) 8 Teams
Cameras on radio controlled tank
2003 3rd RRL (Padova, Italy) 12 Teams
Better sensor info., better mobility, more intelligence,
more realistic difficult field
2004 4th RRL (Lisbon, Portugal) 16 Teams (38 entries)
Automatic map generation, navigation intelligence
2005 5th RRL (Osaka, Japan) 25 Teams (51 entries)
3D map generation, autonomous info. gathering at flat place, better
mobility on uneven place, test methods for mobility & autonomy
2006 6th RRL (Bremen, Germany)
Recognition around robots, autonomy at uneven place
2007 7th RRL (Atlanta, USA)
Better mobility on rubble pile
2008 8th RRL (Suzhou, China)
Autonomous info. gathering at uneven place, manipulation
2009 9th RRL (Graz, Austria)
MAV challenge, precise mapping
2010 10th RRL (Singapore)
Robustness on rough terrain
2011 11th RRL (Ankara, Turkey)
2012 12th RRL (Mexico City, Mexico)
2013 13th RRL (Eindhoven, Netherland)
2014 14th RRL (João Pessoa, Brazil)
2015 15th RRL (Thailand)

ICRA1998 での北野（ソニー）、浅田（大阪大）、田所（神戸大）の打合せに端を発し、ロボカップにレスキュー部門を立ち上げるための会合がその年の秋に開かれた。1999 年にシミュレーションリーグの基盤システムの開発をスタート、2000 年のメルボルン大会でのデモンストレーションに始まり、2001 年のシアトル大会からエージェントコンペティションの競技会を開始した。

同時期に Alan Schultz らを中心として AAAI が IJCAI で開催する新しいロボット競技会として、レスキューの問題が取り上げられた。田所らにも競技内容に関する意見聴取が行われ、Adam Jacoff (NIST) らが競技フィールドを設計し、2000 年に AAAI の競技会としてスタートした。2001 年にはロボカップとの合同で競技会が行われ、2002 年の福岡大会か

らはロボカップ単独でレスキューロボットリーグを開催するようになった。レスキューロボットリーグのこれまでの競技会の歴史を表３－７に示す。

2006 年からは Stefano Carpin らを中心としてシミュレーションリーグロボットコンペティションがスタートした。

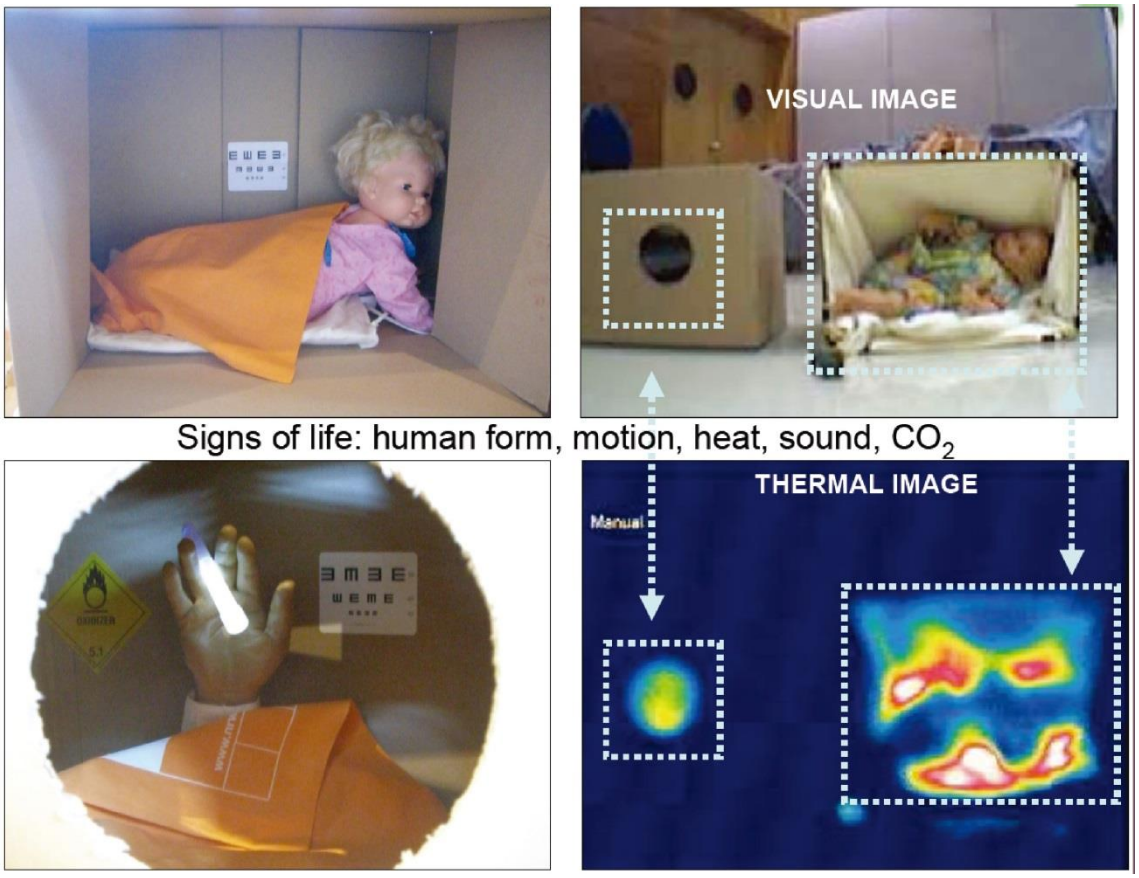


図３－１４　要救助者ダミー

（２－２）レスキューロボットリーグの競技フィールド

レスキューロボットリーグのフィールドとルールは、リーグの Exec および TC 委員会により検討され、決められている。初期の単純なルールから、徐々に困難な問題が導入され、技術発展を促進するよう工夫が加えられてきている。

1）要救助者

この競技会は、図３－１４のようなさまざまな生体信号を発生する模擬要救助者を捜索し、発見することを目的としている。要救助者は段ボール箱の中など、容易に発見できない場所に隠されているものもあり、たとえばアーム先端のカメラを箱の中に入れて捜索するなどが必要である。

生体信号としては、人体の一部の形状、動き、体温、音声、二酸化炭素、などが採用さ

れている。

要救助者を発見した際には、オペレータは審判に対してそれぞれの信号の説明（計測した体温、音声の内容、要救助者に付けられた視力検査表の文字など）を行い、確実に認識できていることを示さねばならない。

2) フィールド

実際の災害現場ではロボットの移動は困難であり、要救助者の発見はさらに困難を極める。競技会としては、要素技術の発展を奨励し、一歩ずつ現実問題に適用可能なレベルに近づけていくことが重要である。そのため、下記のような難易度をレベル分けしたカテゴリを設けている（図３－１５）。

a) Yellow Arena

完全自律ロボットによる要救助者捜索を主たる目的とした競技フィールド。壁で囲まれ、床が 15 度程度の傾斜をもつ迷路の中に、4 体の要救助者が隠されている。要救助者のほとんどはふたの開いたボックスの中などに設置され、発見は容易である。遠隔操縦ロボットにとっては簡単であるため、要救助者を発見しても得点を得ることはできない。

b) Orange Arena

階段昇降などが可能なロボットを対象とした要救助者捜索の競技フィールド。45 度の階段や坂道が設けられた 2 階建てのフィールドであり、段差には回転して滑るパイプが設置されているところもある。床は段差や傾斜のある不整地で構成され、高さ 50～80 cm の穴をくぐる場所もある。4 体の要救助者が、穴の開いた箱の奥など、発見がやや困難な場所に設置されている。

c) Red Arena

運動性能を重視したロボットを対象とした要救助者捜索の競技フィールド。厳しい段差や傾きのある不整地で構成され、4 体の要救助者が、のぞき込むことが容易でないように設置された箱の中に置かれている。

d) Blue Arena

危険物のマニピュレーションを対象とした競技フィールド。段差や傾斜などのある通路で、危険物を模擬した物体（１０ｃｍ角のブロックなど）をつかみ上げ、穴の中に入れたり、指定された場所に置くことが求められる。

e) Yellow-Black Arena (Radio Drop-Out Zone)

無線が届かないフィールド。

f) Black Arena

自動車内に閉じ込められた要救助者を確認する競技フィールド。ドアやハッチバックドア等の開口部へは Red Arena からアクセス。

g) Aerial Vehicle Arena

総重量 2kg 以下の飛行ロボットが空中に設置された要救助者を検索する。風や障害物な

どを避けながら、要求者を発見し、状態を報告する。

h) Japan Arena

日本の建物の状況を反映した独自フィールド。低い天井、木造家屋倒壊をイメージしたもので、ジャパンオープンだけで使用される。

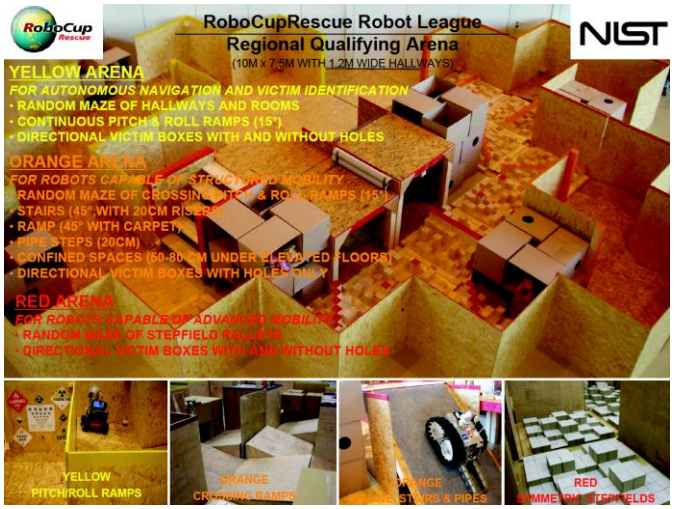


図３－１５　ロボカップレスキューロボットリーグのフィールド

（２－４）レスキューロボットリーグの競技ルール

1) 総合競技

ここで対象としているレスキューロボットの目的は、要救助者を発見し、その状態やマップなどを人間の救助隊に提供し、救助活動を支援することにある。この目的のためには、ロボットには運動能力、センシング機能、自律機能、マニピュレーション機能、ヒューマンインタフェース、通信機能、など、様々な能力が求められ、それらが総合的に発揮される必要がある。

この総合力を試すための競技が設けられており、Mixed Initiative Championship と呼ばれている。この優勝者がロボカップレスキューロボットリーグにおける総合優勝チームである。

1 名の操縦者がロボットやフィールドが見えない場所で遠隔操縦を行い、発見した要救助者、周囲の状況、作成した地図、認識した QR コードなどを審判に報告する。自律ロボットの場合は、スタート後は操縦 PC などに触れることはできない。ただし、要救助者を発見した際に審判がその正否を確認する必要があるため、そのための停止などを行うことは許されている。

総合得点は、発見した要救助者数、状態認識、状況認識、マップ品質、位置精度、周囲への衝突などのペナルティ、などによって計算される

ロボットの遠隔操縦の困難さは、操縦者の状況認識が困難なこと、ロボットに適切な運

動指令を与えられないこと、通信の遅れや中断、ロボットの能力不足、操縦者の能力オーバー、などが原因である。これらの問題を競技得点に反映し、かつ、ロボットの遠隔操縦や自律能力の研究を奨励するために、以上のような競技ルールが採られることとなった。

RoboCup 2009 Graz における競技の様子を図３－１６に示す。

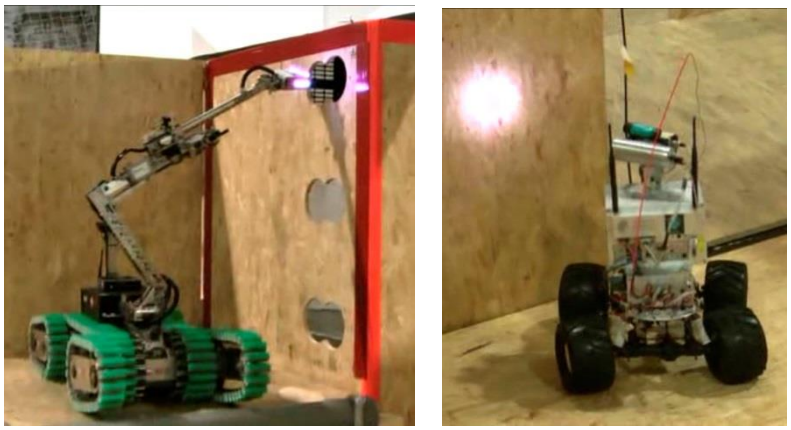


図３－１６　総合競技の様子

2) 個別競技

一方で、研究開発途上において、必要な技術をすべて開発することは容易でない。特に、ある特定の技術分野を研究テーマとする大学の研究者にとって、幅広いテーマの研究開発が必須であるとするならば、参加すること自体が不可能である。そのため、下記のような技術カテゴリ別の競技が設けられ、個別に順位が付けられている。

a) Best-In-Class Mobility

遠隔操縦による運動性能を競う競技。難易度の高い Red Arena において、決められた時間内に多くの加点地点を通過し、得点を競う競技。機械性能だけでなく、ヒューマンインタフェースなどを含め、総合的に優れたシステムでなければ勝てない（図３－１７）。

図３－１７　Best-In-Class Mobility 競技

b) Best-In-Class Autonomy

完全自律制御によるマップ生成を競う競技。Yellow Field において、地図の精度を競う。センシングや SLAM のみならず、不整地のナビゲーションなど、さまざまな技術要素が必要である（図３－１８）。

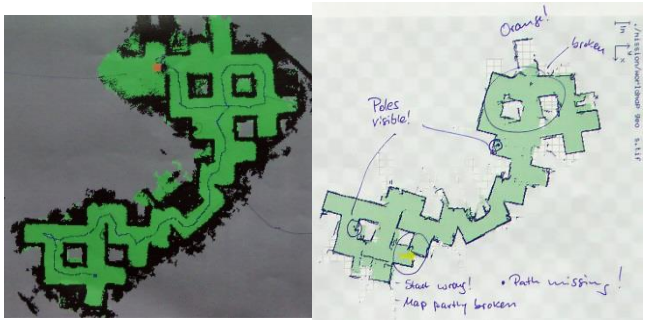


図３－１８　Best-In-Class Autonomy で計測された地図

c) Best-In-Class Manipulation

危険物のマニピュレーションの競技。Blue Field において、運搬した物体の個数と時間を競う。マニピュレータ性能だけでなく、ヒューマンインタフェースや不整地移動能力など、さまざまな技術要素が必要である。

（２－５）NIST/ASTM レスキューロボット評価国際標準化

NIST は米国ホームランドセキュリティ省からレスキューロボットの評価を標準化するプロジェクトを受託しており、ASTM E54.08 Homeland Security Applications, Operational Equipment による国際標準の策定を行っている[35][36][37]。これは将来におけるロボットの調達の基準を策定するものであり、FEMA の全米最大の USAR トレーニング施設である Disaster City などを活用し、多くの FEMA TF の隊員の協力を得て、評価法に関する試験評価を進めてきている。

ロボカップレスキューはそのためのテストベッドとして活用され、これまでにさまざまな評価法のプレテストが行われてきた。そのため、この競技で採用された評価法は現実のレスキューロボットのニーズに即したものとなっている。

（２－６）ロボカップレスキューロボットリーグの貢献

ロボカップレスキューロボットリーグは、特に下記の点において新しい技術的貢献があったと言われている。

・要救助者の発見技術とシステムインテグレーション
・不整地における運動性能
・不整地や２階を含むリアルタイム地図生成

・入り組んだ場所における遠隔操縦
・不整地における自律移動

実物大の模擬災害フィールドを使い、要救助者の発見などの現実的な問題を取り上げたことの意義は大きい。本物の災害現場で研究開発を進めることが、レスキューロボットの発展には望ましいが、予算や場所の面で困難である。解くべき課題の本質を切り取ったベンチマーク問題を適切に設け、それに対する解決を研究することが、ここで採られた方法論である。過去においても、ペグインホール問題など同様のベンチマーク問題が数多く知られている。

また、競技会形式を採用することにより、緩やかな競争原理に加えて、他のロボットが動く様子を見ながら他人のアプローチを学ぶという緩やかな協調が、研究推進に貢献したと考えられる。多くの学生や若手研究者が、競技会にて、説明力や交渉力を鍛え、友人を増やし、国際的に活躍できるための基礎力を身につけたことも、人材育成の面で重要である。

さらには、福島原発で国産ロボットとして初めて原子炉建屋内に投入された Quince は、そのプロトタイプである Kenaf とともに、NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトの一環として、性能実証試験を目的にロボカップレスキューロボットリーグに出場し、2007 年、2009 年に Best-In-Class Mobility で世界優勝している。ロボカップレスキューは、閉鎖空間を探索するという目的に沿った競技ルール設定であり、不整地や急な階段をフィールドとしていたことが功を奏し、Quince が原子炉建屋内で十分な遠隔操縦性能を持つことができたのは、ロボカップレスキューのお陰である[21]。

（3）ELROB

（3－1）概要

ELROB は、実際的なシナリオと路面状況の下で動く無人システムの能力をデモンストレーションし、比較する競技会である。その目的は、問題を解くことができる現在利用可能なテクノロジーを調べることにあり、競技者は目的を果たすためにどのような戦略を使ってもかまわない。ELROB は、現実世界に利用可能なロボット技術の現状を示し、現在人命を救い、短中期的な研究開発の方向性を示すことを目指している。

ELROB は、ロボティクスの高度化によって、現在と未来において社会に対してベネフィットを提供するために、ヨーロッパが再び主役に立てることを目指している。

ELROB の哲学は下記の通りである。

・短期的に実現可能なロボットシステムにフォーカスを置いて実施する。
・眼前にある実社会の問題を解くための、現在のテクノロジーを調べることを目的とし、競技内容を戦略的に計画する。

・ユーザ、研究者、産業界がコミュニティーを形成するための機会を提供する。

ELROB は、軍事的な問題をターゲットとして偶数年に開催される M-ELROB（2006～）と、民生的な問題をターゲットとして奇数年に開催される C-ELROB（2007～）から構成される。2013 年には EURATHLON 2013 が C-ELROB の代わりに FP7 の支援で開催された[38]。

表３－８　C-ELROB 2007 の結果

Combined:	EriCards			Time		Bonus			
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo	
Jacobs University	0	0	100	51:10	51:10	0	0	1	**1.**
University of Oulu	0	0	aborted	1:02	1:02	0	0	0	2.

Non-Urban:	EriCards			Time		Bonus			
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo	
Telerob	4	0	100	39:52	63:39	0	0	4	**1.**
University of Siegen	1	0	75	39:13	39:46	0	0	1	2.
University of Würzburg	1	0	80	40:00	42:05	0	0	0	3.
University of Kaiserslautern	1	0	80	40:00	44:54	0	0	0	3.
PIAP Scout	0	0	75	37:28	38:34	0	0	2	5.
University of Oulu	0	0	aborted	16:58	19:57	0	0	0	6.
Jacobs University			canceled						
Robotics Inventions			canceled						
PIAP Expert			canceled						
PIAP Inspector			canceled						

Urban:	EriCards			Time		Bonus			
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo	
University of Würzburg	6	1	80	39:45	40:42	0	0	7	**1.**
Telerob	6	1	100	38:14	65:14	0	0	7	2.
University of Hannover	5	0	80	39:04	41:27	0	5	5	3.
Jacobs University	3	0	80	39:53	41:19	0	0	5	4.
University of Siegen	2	1	75	38:42	40:18	0	0	2	5.
IdMind – ISR/IST	1	0	80	40:00	41:00	0	0	1	6.
PIAP Expert	0	0	80	40:00	40:00	0	0	8	7.
MacroSwiss	0	0	50	16:37	34:02	0	0	5	8.
PIAP Inspector	0	0	80	40:00	40:12	0	0	4	9.
University of Oulu	0	0	75	39:00	38:30	0	0	0	10.
PIAP Scout	0	0	aborted	17:54	17:54	0	0	0	11.
Robotics Inventions	0	0	aborted	20:00	26:00	0	0	0	11.

Auto Recon:	EriCards			Time		Bonus				
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo		
University of Siegen	2	1	100	85:56	15:54	0	0	1	**1.**	urban & non-urban
University of Hannover	2	0	55	43:26	16:23	0	2	1	2.	urban
BASE 10 (RoboScout)	5	0	140	68:27	72:12	1	5	5	2.	non-urban
University of Kaiserslautern	1	1	75	64:08	15:13	0	1	0	4.	urban
BW University of München	1 (+2)	4 (+3)	55	31:03	28:02	1	1	4 (+5)	3. (1.)	urban (disqualification for non-urban)
University of Oulu	1	4	175	68:52	109:23	0	0	5	5.	urban
Robotics Inventions			canceled							

写真：http://www.flickr.com/photos/europeanrobotics/collections/72157631047094670/

ビデオ：http://www.youtube.com/user/EuropeanRobotics/

（３－２）これまでに開かれた C-ELROB の概要と結果

１）C-ELROB 2007

開催日時：2007 年 8 月 13 日～16 日

参加チーム：１３（スイス１、ドイツ８、ポーランド２、ポルトガル１、フィンランド１）

開催内容：

1) 都市外（non-urban）：NBC 災害、危険物質の捜索（８チーム）

できるだけ自律であらかじめ指定されたエリアを探索し、対象物を発見し、認識し、記録、報告する。できれば、開始地点に戻る。エリアは数百m四方、舗装・非舗装道路、木やオフロードエリア。障害物としては、溝、路肩、防波板、砂地、水たまり、火、岩、石、狭い地下道、建設資材、コンクリート安全レール、鉄塔、ワイヤフェンス、家畜脱出防止溝であり、自動認識することが求められる。

2) 都市（urban）：混雑した商店街での爆発物処理を含む作業、状況認識の向上（１０チーム）

走って探索し、環境情報を収集し、探索するビルを見つけ、ビルの外を調べる。可能ならばビル内に入り、１つの部屋（暗い廃墟）を調べ、結果を報告する。可能なら、元の場所に帰る。障害物は 1)と同じ。

3) 都市と都市外の UGV と UAV の統合作業（combined UGV/UAV）：火災と NBC 災害、疑わしい場所の捜索（２チーム）

できるだけ自律的にあらかじめ与えられたエリアを UAV で探索し、対象物を見つけ、オペレータと UGV に報告する。起きている状況を UGV で正確に把握し、報告する。可能なら元の位置に戻る。エリアは数百m四方、数百m以内の距離にある。障害物等は 1)と同じ。

4) 都市と都市外ルートの自律調査（autonomous reconnaissance）：安全パトロール、偵察を行う（７チーム）

大型車両のためのシナリオ。都市の 3 km のルートと、都市外の 2 km のルート。それは見通しでなく、舗装路と未舗装路、山道、オフロードの砂地エリアを含む。その他環境は 1)と同じ。その場所で指定されたルートに従って、できる限り自律走行を行う。径路はあいまいに GPS の位置（全部で１０点くらい）として指定される、同時に、動きながら色の付いたターゲットを見つけ、位置を特定し、マップ上に記録し、審判に報告し、できれば元の場所に戻る、という偵察タスクを行う。

結果を表３－８に示す

２）C-ELROB 2009

開催日時：2009 年 6 月 8 日～18 日

開催場所：

参加チーム：１０（ドイツ７、フィンランド１、フランス１、ポーランド１）

開催内容：

1) 偵察調査（reconnaissance and surveillance)

都市外、複合した田園地区。ルートを運転し探索を行い、環境情報を収集し、対象物を発見して報告する。境界はあらかじめ与えられ、静的対象物の例もあらかじめ示されている。

2) キャンプセキュリティー（camp security）

都市と都市外。あらかじめ決められたエリアを探索し、動いている対象物を発見、報告、モニタリングする。マップ、境界があらかじめ与えられ、動的対象物の例もあらかじめ与えられる。

3) 自律走行（autonomous navigation）

通路（アスファルト、チップ舗装、コンクリート、砂利、草地、山道）のあらかじめ与えられたルートに従って自律的に走行する。経由点の情報が与えられる。

4) 隊列運搬（transport mule）

都市外の複合田園地区。２つの地点の往復。折り返し地点の場所が与えられる。

結果を表３－９に示す。

表３－９　C-ELROB 2009 の結果

Combined:	EriCards			Time		Bonus			
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo	
Jacobs University	0	0	100	51:10	51:10	0	0	1	**1.**
University of Oulu	0	0	aborted	1:02	1:02	0	0	0	2.

Non-Urban:	EriCards			Time		Bonus			
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo	
Telerob	4	0	100	39:52	63:39	0	0	4	**1.**
University of Siegen	1	0	75	39:13	39:46	0	0	1	2.
University of Würzburg	1	0	80	40:00	42:05	0	0	0	3.
University of Kaiserslautern	1	0	80	40:00	44:54	0	0	0	3.
PIAP Scout	0	0	75	37:28	38:34	0	0	2	5.
University of Oulu	0	0	aborted	16:58	19:57	0	0	0	6.
Jacobs University			canceled						
Robotics Inventions			canceled						
PIAP Expert			canceled						
PIAP Inspector			canceled						

Urban:	EriCards			Time		Bonus			
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo	
University of Würzburg	6	1	80	39:45	40:42	0	0	7	**1.**
Telerob	6	1	100	38:14	65:14	0	0	7	2.
University of Hannover	5	0	80	39:04	41:27	0	5	5	3.
Jacobs University	3	0	80	39:53	41:19	0	0	5	4.
University of Siegen	2	1	75	38:42	40:18	0	0	2	5.
IdMind – ISR/IST	1	0	80	40:00	41:00	0	0	1	6.
PIAP Expert	0	0	80	40:00	40:00	0	0	8	7.
MacroSwiss	0	0	50	16:37	34:02	0	0	5	8.
PIAP Inspector	0	0	80	40:00	40:12	0	0	4	9.
University of Oulu	0	0	75	39:00	38:30	0	0	0	10.
PIAP Scout	0	0	aborted	17:54	17:54	0	0	0	11.
Robotics Inventions	0	0	aborted	20:00	26:00	0	0	0	11.

Auto Recon:	EriCards			Time		Bonus				
	correct position	false position	TTC	Run	Manual	Track	Card	Photo		
University of Siegen	2	1	100	85:56	15:54	0	0	1	**1.**	urban & non-urban
University of Hannover	2	0	55	43:26	16:23	0	2	1	2.	urban
BASE 10 (RoboScout)	5	0	140	68:27	72:12	1	5	5	2.	non-urban
University of Kaiserslautern	1	1	75	64:08	15:13	0	1	0	4.	urban
BW University of München	1 (+2)	4 (+3)	55	31:03	28:02	1	1	4 (+5)	3. (1.)	urban (disqualification for non-urban)
University of Oulu	1	4	175	68:52	109:23	0	0	5	5.	urban
Robotics Inventions			canceled							

写真：http://www.flickr.com/photos/europeanrobotics/collections/72157631094586002/

ビデオ：http://www.youtube.com/user/EuropeanRobotics/

表３－１０　C-ELROB 2011 の結果

Approach

Start Nr	Team	Interaction Time	Runtime (min)	Distance (m)	Map	Log	Photo	
1	University of Hannover	26	60	480	1	1	0	
2	Team Marble	0	0	0	0	0	0	aborted
1	Fraunhofer FKIE	9	37	1000	0	0	0	

Mule

Start Nr	Team	Interaction Time	Runtime (min)	Handovers	detected OPIs	Map	Log	
1	University of Hannover	33	58	3	1	1	1	
2	Team Marble	0	0	0	0	0	0	
3	Fraunhofer FKIE	11	60	3	0	0	0	

Camp Security

Start Nr	Team	Interaction Time	Runtime (min)	Intruders caught	Map	Intruder Photos	Intruder Map	
1	IAIR	26	59	1	0	1	1	
2	FKIE	18	60	3	0	3	0	
3	RMA	20	26	0	0	0	0	aborted

Autonomous Navigation

Start Nr	Team	Interaction Time	Runtime (min)	Distance (m)	Map	Log
1	Team Marble	15	60	1647	0	0
2	University of Hannover	21	60	923	1	1
3	Fraunhofer FKIE	14	60	1964	0	0

写真：http://www.flickr.com/photos/europeanrobotics/collections/72157631160536738/

ビデオ：http://www.youtube.com/user/EuropeanRobotics/

３）C-ELROB 2011

開催日時：2011 年 6 月 20 日～24 日

開催場所：ベルギー、Leuven

参加チーム：６（フランス１、ポーランド２、ドイツ２、ベルギー１）

開催内容

【偵察調査】

セキュリティ、消防、警察、災害対応での基本的な機能。対象エリアへのアプローチと、その調査（キャンプセキュリティー）の２つのタスク。

1）アプローチ（approach）

アプローチは、都市外で植生、草地、砂、水、石、ブッシュ、道路と山道。3 km 先の対象エリアまでのアクセスが必要で、動的・静的な障害物が経路上にはあり、行き止まり・急ターン・閉鎖道路・狭い道路があり、交通があり得る。できるだけ自律的に対象場所までアプローチすること、途上と到着地を調査すること、特定のマーカーを発見すること、見つけたらその映像と位置を報告すること、が求められる。自己位置の特定が必要であり、UTM 座標で与えられた経由地点を通って対象場所にアプローチする必要がある。時間は 60

分。昼間のミッションと夜間のミッションの両方がある。

2) キャンプセキュリティー（camp security）

調査は、アプローチと同様の環境で、動的・静的障害物がある。決められたエリアをモニタリングし、特定のマーカーを持つ侵入者を発見、報告、追跡する。発見したら、映像と位置を報告する。自己位置特定、できる限りの自律性、発見、持続的に侵入者の位置を追跡、位置と映像の報告、地図上へリアルタイムにマッピング、が求められる。ただし、許可された ID を持った人が入ることがある。時間は 60 分。UTM グリッドと座標の地図が与えられ、仮想的な境界線が示される。

【運搬タスク】

運搬タスクは、自律走行タスクと、荷運びタスクの２つからなる。リスクがあって危険な環境での人員・資材・人道支援などの車両での移動は大変危険なミッションである。車両から降ろされた状態で、重量物を人間が運搬すること（荷運び）が必要であるが、これはとても疲れる仕事であり、実際のタスク遂行を困難にしている。荷運び（mule）は特にこのようなタスクを指した言葉である。

3) 自律走行（autonomous navigation）

都市外の森や丘の道路や山道（アスファルト、チップ舗装、コンクリート、ダート）で、7～14 km の運送を行う。動的・静的障害物がルート場にはあり、行き止まり、急ターン、道路閉鎖、狭い道路がある。また、通常の自動車や人などの交通があり得る。50 kg 以上の車両を対象場所まで、できるだけ早く、できるだけ自律的に動かす。人間が搭乗してはいけない。困難度に応じた３つのレベルのルートが設定される。自己位置を特定すること、与えられた経由点（UTM 座標）を経由して目的地まで移動すること、できるだけ自律であること、リアルタイムに位置と映像を送ること、が求められる。時間は 60 分。

4) 荷運びタスク（transport - mule）

都市外の森や丘。距離 2 km の区間の荷運びを行う。動的・静的障害物があり、行き止まり・急ターン・道路閉鎖・狭い道路があり、自動車や人などの通常交通があり得る。２つの地点をできるだけ多くの荷物を搭載して、できるだけ自律的に何度も往復する。人間の搭乗は不可。車両は１台だけ。荷運び（MULE；Multiple Utility for Logistic Equipment）ロボットは開始地点に運ばれ、人間がそこからロボットを折り返し地点まで先導する。その後、ロボットは繰り返し自律的に開始地点と折り返し地点を何度も往復する。ロボットが人間について行くことができない場合には、折り返し地点は座標で与えられる。自己位置を特定すること、人間を折り返し地点まで追跡すること、折り返し地点で人間が指示することによって往復運搬を開始すること、リアルタイムに位置と映像を送ることが求められる。時間は 60 分。制御ステーションは１カ所に設置するかオペレータが運搬する。UTM グリッドのマップが与えられる。

表３－１０に結果を示す。

（３－３）M-ELROB について

M-ELROB はロボットの軍事利用を想定したシナリオによる競技会であり、C-ELROB と隔年で開かれている。

2014 年はワルシャワ（ポーランド）で開催され、下記をテーマとしている。

1) 都市外環境での偵察と調査（昼夜、オフロード）
2) 荷運び（２つのキャンプの間の運搬、都市外）
3) 検索救助（ダミーを発見し、引きずる、屋外）
4) 建物の調査（３つのビルと周囲環境の 2D/3D モデル、やや都市部）
5) 爆弾と爆発デバイスの調査と廃棄（EOR, EOD, IEDD, CIED など、屋内外）

（４）EURATHLON

（４－１）概要

EURATHLON は EU の FP7 がスポンサーとなっている新しいロボット競技会である。EURATHLON のビジョンは、リアルワールドのロボティクスのチャレンジを提示することであり、厳しい疑似災害対応シナリオの中でのアウトドアやオフロードのロボットの知能や自律を試験するものである。福島の原子力発電所事故を教訓として、EURATHLON は、飛行、地上、水中の自律ロボットが協力しながら、災害の調査を行い、環境データを収集し、重大な危険を特定することを目的とした競技会として計画された。

２０１３年は、陸上ベースのロボットにフォーカスを定める。２０１４年は海上／海中ロボットを、２０１５年には陸海空を併せたイベントとする予定である[39]。

（４－２）目的とアプローチ

EURATHLON は困難なシナリオの屋外ロボットのリアルワールドロボティクスチャレンジであり、試験やシナリオは EU の重要研究テーマ「危機において警備と安全を確保する」にしたがって計画されている。この研究は「認知、自津、適応、ロバスト性」を主要なロボティクスの目標としており、自律の飛行・地上・水中ロボットが協力しながら、状況調査、環境データ収集、潜在的な危険の特定を行うことを目指している。

陸海空をつなげてひとつの競技会とするために、EURATHLON はアウトドアロボティクスでよく知られた２つの競技会 ELROB と SAUC-E (Student Autonomous Underwater Challenge - Europe) をパートナーとし、それらを統合することによって企画された。これらのイベントの経験は EURATHLON に受け継がれ、EURATHLON 2013 のキーターゲット（自律ナビゲーションと制御、ロバストなセンシングと行動）となり、大きな共同競技会の基礎となった。

2015 年には、EURATHLON は最終的なグランドチャレンジを迎える。つまり、福島で経験したような災害状況での陸海空の協調を行い、飛行ロボットは介入するエリアをマッ

ピングし、環境データを収集し、水中ロボットは海の化学物質の拡散をセンシングし、地上ロボットは近接してデータを収集し、ビル内に入る。このように、EURATHLON はヨーロッパだけでなく世界をリードするロボティクスのイベントを形成するものであり、科学的な発展をブーストし、公衆にロボティクスを認知させ、知能ロボットの社会的な受容を高めることを目指している[40]。

EURATHLON の競技会の設計は、特定のリアルワールドシナリオと環境における性能の試験法、すなわち、知能・自律性・ロバスト性の評価法を設計する事と等価である。この評価法は、これまでロボティクスのコミュニティーが行なってきたように、公開プロセスで提案、開発されるものである。

システム設計、ハードウェア設計、アルゴリズムなどはチーム自身の所有物であるが、組織委員会は競技会の中で収集できたデータをできるだけ公開するように奨励している。これらのデータセットは、他のチームが比較分析を行い、研究開発を進展させるために有意義である。

競技会と同時に定期的にワークショップを開催する。その目的は、リアルワールドロボティクスのチャレンジにおける共通認識を各研究者の間に作りあげること、地上ロボット・水中ロボット・飛行ロボットの各研究コミュニティーをまたいで、アイデアの融合を図ること、にある。

（４－３）EURATHLON コンソーシアム

下記の団体が EURATHLON コンソーシアムを形成し、FP7 の予算により、競技会を運営している。

- Bristol Robotics Laboratory
  University of the West of England, Bristol (UWE) と University of Bristol (UoB) の共同ラボ
- Fraunhofer FKIE (Information Processing and Ergonomics)
- University of Oulu, Finland, Intelligent Systems Research Group (ISG)
- Heriot-Watt University, Oceans Systems Laboratory
- Oceanic Platform of the Canary islands (PLOCAN)：
  海洋科学技術の振興のために作られたインフラ
- Nato Underwater Research Centre (NURC)
- Center for Advanced Aerospace Technologies (CATEC)
- Fraunhofer FKIE
- European Robotics：
- progenoX GmbH

（４－４）競技内容

EURATHLON 2013 では、下記のような競技を行った。

1) 都市構造物内の調査と監視（都市型救助 USAR; Urban Search and Rescue）

都市型救助は、緊急対応において非常に重要なタスクである。ここでは、関心エリアを探索することと、指定されたターゲットを救出するという 2 つのタスクを掲げている。

○環境条件

主として都市構造物（長さ 50m、幅 25m 程度の廃墟の建物）の中。階段、低照明または無照明、カーテン、閉じられたドア、砂、水、石、瓦礫。地上階と地下階がある。

○状況

関心エリアは出発点から 10m 離れており、建物に到着し、建物内に入って探索と救助のミッションを行う。静的、動的障害物が経路上に存在する。行き止まり、急ターン、道路封鎖、階段、狭い通路があり得る。

○目的

できるだけ高い自律性で関心エリアに近づき、建物に入り、対象物をできるだけ高い自律で探す。対象物としては、図３－１９のような ERI Card Number Plate を使用し、5m の精度で位置を示すとともに、読めるように撮影する。また、建物と環境の地図を作り、対象物がどこにあるかを地図上にレポートする。集めたデータをコントロールステーションに送る。できれば実時間で報告することが望ましい。

○時間

45～60 分。時間が来たらミッション終了。収集データの伝送も含む。

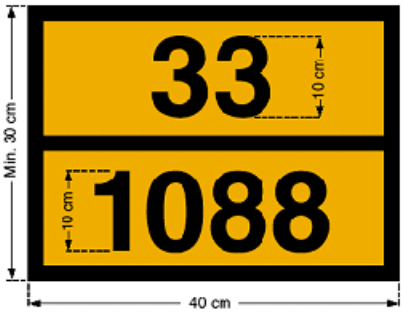


図３－１９　捜索する対象物

2) 危険物質の移動マニピュレーション

CBRNE 災害への対応は近年ますます重要さを増してきているが、ロボットは災害対応隊員のリスクを低下させるために必要である。マニピュレータにより、危険物質をハンドリングするだけでなく、ドアを開け、障害物を排除して車両のモビリティを上げることができる。

○環境条件

準都市環境であり、アスファルトと砂利で囲まれたオープン空間。植物、草、瓦礫が少しあり、障害物が存在する。

○状況

10m 先に危険物質で汚染されたエリアがある。マニピュレータを備えた車両がその場所まで行かねばならない。いくつかの障害物（縁石、轍、レールなど）を越える必要がある。

○目的

できるだけ高い自律性で関心エリアに近づく。最初の対象はタンク車であり、開いているバルブを閉めなければならない。２番目には、漏れている容器をピックアップトラックの積み出し設備から運び出し、ローリーの横の青い樽に入れなければならない。最後に、車両はコントロールステーションに戻らねばならない。できれば、リアルタイムに位置と映像を送る。

○時間

45 分。ミッションを終了してコントロールステーションに戻るか、時間制限に達したら終了。

3) 煙が充満した地下構造物での救助

２つのシナリオがある。１つめは関心エリアの探索であり、２つめは指定されたターゲットの救助である。

○環境

主として都市構造物、ある程度の植物、草、砂、水、石、瓦礫がある。地下構造物は長さ 250m、高さ 5m。構造物内にはひどい煙が充満している。

○状況

関心エリアは 10m まで人間が近づける。ロボットはエリアに移動し、煙が充満した地下構造物の中で捜索と救助のミッションを行う。静的、動的障害物が経路上にある。行き止まり、急旋回、道路封鎖、狭い道があり得る。

○目的

できるだけ高い自律性で関心エリアまで近づくこと。地下構造物に入り、あらかじめ与えられた特徴を持つ対象物を、できるだけ自律的に探索する。構造物と環境のマップを作り、対象物の映像と位置をマップ内に示す。集めたデータをコントロールステーションに報告する。できれば、リアルタイムに位置と映像を送る。

○時間

30～45 分。データ転送時間も含む。

4) GPS, GLONASS, GALILEO を使った自律ナビゲーション

リスクが高く危険な環境下での人員、物資、人道支援の運搬は危険な任務である。自律

ナビゲーション競技の目的は、おおざっぱに決められた都市外のオフロードのアウトドアの径路を自律的に追従し、物資を運搬することである。

○環境条件

都市外であり、木が生え、丘陵地帯で、道や通路がある。小さな道（アスファルト、または、木片が緩く敷き詰められた、コンクリート）から、単純な森の中の未舗装道まで。

○状況

7～10km 以内の地点への物資配送。行き止まり、急旋回、塞がれた道路、狭い道があり得る。動的な対象物や静的な障害物が経路上に存在する。搬送経路上には自動車や人の交通があり得る。

○目的

50kg 以上の車両を目的の場所へできるだけ早く、できるだけ高い自律性で運搬する。チームはデジタルマップと、順番に経由すべき地点の UTM 座標が与えられる。車両は単純に経由地点を直線で走ることはできず、道や径路を認識する必要がある。デジタルマップ上に走行経路をプロットする。

○実施ルール

車両は完全に無人でなければならない。自己位置を認識する必要があり、経由点を与えられた順番に、目的地までの径路を、できるだけ自律的に動く。３つのレベルが設けられている。

L1：ゴール１に行き、始点に戻る（人間の運転で 8 分程度の距離）

L2：ゴール１→ゴール２に行き、そこから始点に戻る（人間の運転で 15 分程度の距離）

L3：ゴール１→２→３に行く（人間の運転で 20 分程度の距離）

○時間

45～60 分。データ転送時間を含む。

5) 爆弾と爆発物の調査と処理（EOR, EOD, IEDD, CIED, etc.）

爆弾や簡易爆発物の調査と処理は近年ますます重要になってきている。この競技は２つのパートから構成され、関心エリアの調査、および、対象物の撤去である。

○環境条件

都市外と都市内の両方を含む。植物、階段、ドア、草、砂、水、石、ブッシュ、道、通路などがある。

○状況

200m の長さの関心エリアを探索する。動的な対象物や静的な障害物が経路上にある。径路には自動車や人の交通がありえる。行き止まり、急展開、道路ブロック、狭い道路がありえる。

○目的

チームは関心エリアの境界を示したグリッドの UTM マップが与えられる。可能な限り高

い自律性で関心エリアに近づき、その中で調査を行う。疑わしいものはすべて探索する必要がある。対象物を発見したら画像と位置をとり、コントロールステーションに報告する。可能であれば、位置と画像をリアルタイムにコントロールステーションに送る。

○実施ルール

第１パート（性能評価試験場の模擬環境にて）

建物に入る（階段）。隠されたパッケージ、スーツケース、箱を発見し、偵察する。

Ｘ線カメラが必要かもしれない。

第２パート（性能評価試験場の模擬環境にて）

埋められた簡易爆発物を発見し、偵察する。掘削が必要かもしれない。

第３パート（実際の鉄道駅にて）

残された荷物ロッカーを開き、偵察する。罠に注意が必要である。

第４パート（レスキュー隊と一緒に行動）

爆発物工場を発見し、偵察する。罠に注意が必要である。

○時間

約１時間。時間内に取得データを報告する必要がある

（４－５）評価法

競技の評価法は、23 ページのルールブックに規定されている。報告するデータの形式は標準化され、Common Shared Data Sets (CSDS) として各シナリオで取られたデータは公開されている。

評価項目は次の通り。

・所要時間
・操縦者が関与した時間
・メンテナンスの時間
・経路上を走行した距離
・通過した E-stop の数
・正しく発見した対象物の数
・間違って発見した対象物の数
・デジタルマップと車両の径路のデータの提出
・車両の径路の GPS ログファイルの提出
・デジタルマップの中に正しくマークされた対象物の提出
・対象物の写真の提出

これらの評価値に基づいて、ベストシナリオパフォーマンス、新しい科学的方法、創造的な方法、チームの努力、のそれぞれの項目に対して賞金が与えられる。その他に、学生

へ最大 350 ユーロのトラベルサポートがあった。

（５）DARPA Robotics Challenge

（５－１）概要

DARPA Robotics Challenge (DRC) は、福島原発災害のような過酷災害をモチーフとして、ロボットのフィールド適用技術向上と、ヒューマノイドのヘビーデューティー屋外作業技術の向上を目的として開催された[41][42]。

DARPA は、このほかにも現在、Legged Squad Support System (LS3)、Maximum Mobility and Manipulation (M3)、Autonomous Robotic Manipulation (ARM) などのプロジェクトを総予算数百億円で遂行しており、フィールドロボットのモビリティとマニピュレーションの能力向上を目指したロボット開発を推進している。

これ以前には、DARPA Grand Challenge、DARPA Urban Challenge によって、DRC と同じ研究マネジメントの方法論によって、屋外を自律的に走行する自動車の先端技術開発を行い、現在の Google Car などの基盤を作った[43][44]。

DARPA は過去においては、Tactical Mobile Robot (TMR) プロジェクトを行い、PackBot などの小型の半自律ロボットを開発している[45]。

競技会へは下記の４つの参加形態が設けられた。

・Track A

DARPA の資金提供の下、実機ロボットの研究開発を行う形態。7 チームに対して 9 ヶ月間で各 1.8 億円の予算が与えられて 2013 年 6 月に開催されるクリティカル・デザイン・レビュー（CDR）に臨む。CDR でチーム数が 6 に絞られ、さらに各 1.2 億円の予算が追加され、2013 年 12 月の DRC Trials に臨む。DRC Trial で Track A, B, C の中から 8 チームに絞られ、各 1 億円の予算が与えられ、2015 年 5 月に開催予定の DRC Final に出場する。日本から、東大発ベンチャー企業である SCHAFT 社が出場した。

・Track B

DARPA の資金提供の下、シミュレータ上でのロボット制御ソフトの研究開発を行う形態。11 チームに対して 9 ヶ月間で各 0.4 億円の予算が与えられて 2013 年 6 月に開催されるクリティカル・デザイン・レビュー（CDR）に臨む。CDR で Track B, C の中から 7 チームの絞られ、各 0.8 億円の予算とヒューマノイドロボット ATLAS が与えられ、2013 年 12 月の DRC Trials に臨む。

・Track C

DARPA からの資金提供は受けず、シミュレータ上でのロボット制御ソフトの研究開発を行う形態。115 チームが出場し、2013 年 6 月に開催されるクリティカル・デザイン・レビュー（CDR）に臨む。

・Track D

DARPA からの資金提供は受けず、実機ロボットの研究開発を行う形態。3 チームが 2013 年 12 月の DRC Trials に臨む。2015 年 5 月に開催予定の DRC Final には追加チームが出場する予定。

（５－２）競技の概要

福島原発をモチーフとした災害対応シナリオに従って、下記の８つのタスクを行う地上走行ロボットを開発する。これらは、さまざまな能力と表３－１１のように対応づけられている。

1. ユーティリティー車両を運転して、現場に到着
2. 不整地を通過する
3. 障害物の瓦礫を取りのける
4. ドアを開けてビルに入る
5. 梯子を登り、キャットウォークを通過する
6. コンクリート板をツールを使って破壊する
7. バルブを発見して閉める
8. 部品を交換する（ホースを接続）

表３－１１　タスクと能力との対応関係

Tasks		Capabilities: Autonomy - Perception	Autonomy – Decision-making	Mounted Mobility	Dismounted Mobility	Dexterity	Strength	Endurance
1. Drive utility vehicle to site		x	x	x		x		
2. Travel dismounted across rubble		x			x			x
3. Remove debris blocking entryway		x			x	x	x	x
4. Open door, enter building		x			x	x		x
5. Climb industrial ladder, traverse industrial walkway		x			x			x
6. Use tool to break through concrete panel		x	x			x	x	x
7. Locate and close valve near leaking pipe		x	x		x	x	x	x
8. Replace component		x	x			x		

そのポイントは、下記にあり、災害空間のようなフィールドで実用になるロボットシステムとコンポーネント技術の研究開発を目指している。

・過酷環境下での災害対処、人道支援対処が出来る柔軟でロバストなシステム開発
・先進的な遠隔自律、モビリティ、マニピュレーション、パワー技術開発
・リアルタイム、ヒューマンインループ型システム

（５－３）シミュレーション競技

１）目的

仮想ロボティクスチャレンジ（VTC; Virtual Robotics Challenge）として、計算期内のシミュレーション環境内での自律行動ソフトウェアの競技会が行われた。この設定は、まず、災害対応ロボットをうまく制御できるためのソフトウェアを試験するための基盤を検証することを目的としている。これは DRC シミュレータの最も重要な役割であり、オープンソースプラットフォームとしてロボット開発を革新するものである。

災害対応ロボットには、探索し、環境とインタラクションし、道具を使用し、バランスを保ち、人間のオペレータと意思疎通するために、多層にわたるソフトウェアが必要である。VRC では、複雑な一連の仕事の遂行を試みる共通ロボット ATLAS に対して、チームが独自に設計したソフトウェアを適用する形態を取った。

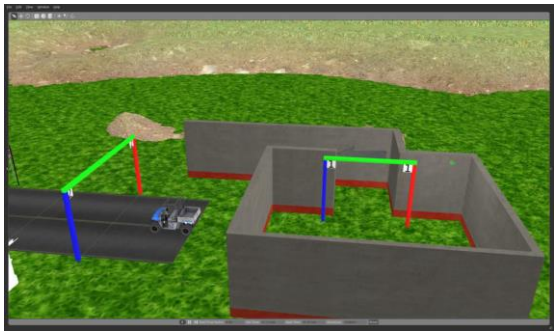
２）VRC のタスク

タスクは下記の３つから成り、それぞれを独立に競技する。

◎Task 1 - Drive Vehicle

図３－２０(a)の左下の囲いの中にあるスタート地点(b)から歩き、バーの手前にある自動車に乗り込む。道路を運転し、同図右上の最終地点(c)に至る。自動車を降り、最終エリアに歩いて行く。フィールドの諸元は、次の通りである。最高速度 16km/h、道路長 1km、道路幅 7.34m、ゲート幅 8m、障害物の樽は高さ 1m 直径 0.5m.

(a) Drive Vehicle のための走行エリアの全体



(b) Drive Vehicle のスタート地点

(c) Drive Vehicle の最終地点

図３－２０　Drive Vehicle のフィールド

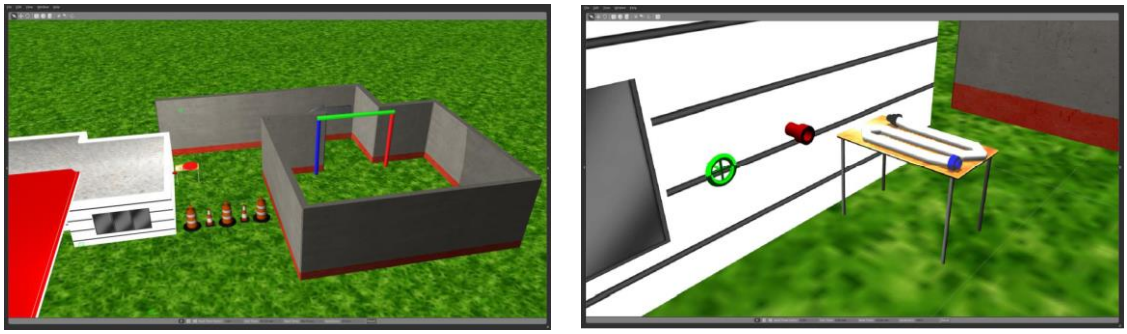
◎Task 2 - Walk

図３－２１に Walk のためのフィールドの全体図を示す。ロボットは左の壁に囲まれた地点からスタートし、沼地、アンジュレーションのある不整地、コンクリートブロックが散乱した場所、を抜けて、右側のゴールまで移動することが求められている。

図３－２１　Walk のフィールド

◎Task 3 - Connect Hose

図３－２２に Connect Hose のフィールドを示す。ここでは、右にある壁に囲まれたスタートエリアから出て、ホースを持ち上げ、ホースをコネクタにあてがい、コネクタを接続する。その後に、バルブを開けることが求められている。コネクタの接続のためには 2.5 回転する必要があり、バルブは 360 度回転させなければならない。コネクタやバルブは地上から 1.2 m の高さにあり、バルブの直径は 30cm、テーブルの高さは 1m である。



(a) Task - Hose のフィールド全体図　　(b) Task - Hose の給水栓とバルブ

図３－２２　Task-Hose のフィールド

３）VRC のシミュレーション環境

VRC の遂行のために、DARPA は予算を出して、Open Source Robotics Foundation にクラウドベースのシミュレータの開発を依頼した。それは、３次元の仮想空間の中で、リアルタイムに、ロボットの物理現象やセンサの挙動を計算して表示するものである。シミュレータは、インターネット経由でチームがシミュレーションされたヒューマノイドロボット ATLAS に対してコマンドを送ったり、ATLAS からデータを受け取ったりすることを

司る。そこで送られる情報は、実ロボットや実世界のオペレータとの間で送られるデータと非常に似通ったものである。

DRC シミュレータは図３－２３に示すような分散計算機環境として、クラウドに用意された。各チームはインターネットを介して VRC シミュレータに接続する。VRC シミュレータが物理現象のシミュレーションを行う。各チームの計算機がロボットの行動をシミュレータに対して動作コマンドの形で与え、また、センサデータなどを受け取ることができる。コマンドやセンサデータの通信帯域は制限され、また、意図的に通信遅延が与えられている。

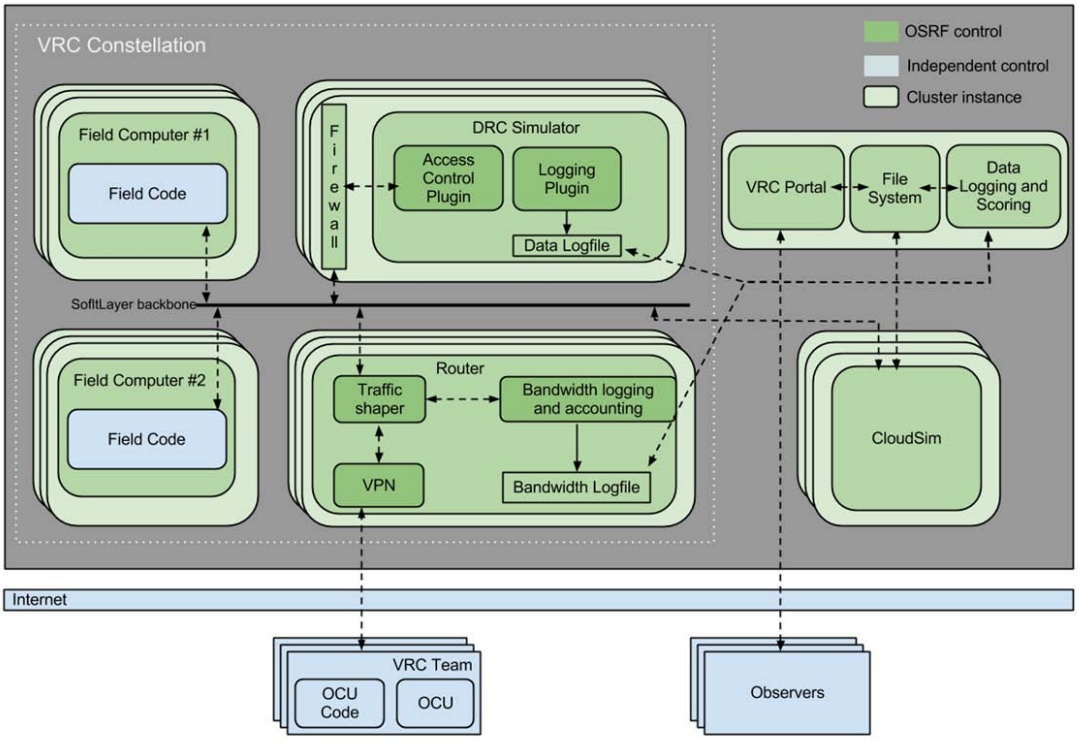


図３－２３　シミュレーションのための計算機環境

４）VRC の対戦内容と結果

１２６チームからエントリーがあったが、最終的には８カ国からの２６のチームが VRC への参加が認められ、2013 年 6 月 17～21 日に競技会が行われた。その結果、トップの 7 つのチームに DARPA から予算と ATLAS ロボットが与えられ（１チームは中国からの寄附）、2013 年 12 月に開かれる DRC Trial で戦うこととなった。

VRC のチームは、ロボットの認知、マニピュレーション、移動に関する 3 つのタスクの 5 回のシミュレーション（合計 15 回）における、タスクの遂行と、オペレータコントロールの有効性によって評価がなされた。タスクは、次のような内容である：実用車への搭乗・運転・降車の作業、泥・非平坦路・瓦礫が散乱した地面を歩行して通過する作業、ホース

のコネクタを蛇口につなぎ、近くにあるバルブを回す作業。災害地での通信の制約を模擬する種に、VRC ではデータ送信のループ遅延時間を 500 ms にし、各志向における通信可能な総ビット数を 900 Mbit から 60 Mbit まで変化させた。

（５－４）実ロボット競技会

１）概要

2013 年 12 月 16 日～21 日に、フロリダの Homestead Miami Speedway に競技会場を設置し、８つのタスクを遂行するためのテストフィールドを用意した。16 チームが、米国、韓国、ドイツ、日本、中国から参加し、競技を行った。

Track A からの出場チームは下記の通りである。

・Tartan Rescue（Carnegie Mellon University）

これまでフィールドロボティクスにおける数々の実績を持っている。DARPA Urban Challenge では１位になった。ヒューマノイドロボットの研究開発は行っていない。

図３－２４　Tartan Rescue のロボット

・DRC-HUBO (Drexel University)

韓国のヒューマノイド Hubo を使ったチームであり、韓国系米国人 Paul Oh を中心とした多数の大学・研究所による共同参加。韓国は Hubo を多数の大学等の研究開発プラットフォームとして売り込んでおり、その研究グループを結集して作ったチーム。

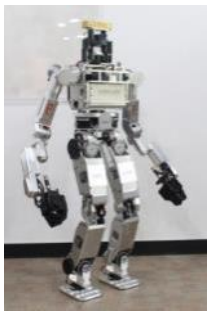


図３－２５　Hubo

・NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory)

これまで火星探査ロボット他の実績がある。Stanford University との共同。Stanford は DARPA Urban Challenge で２位。VRC５位のチームが合流した。

図３－２６　NASA JPL のロボット

・NASA JSC (Johnson Space Center)

Robonaut で上半身ロボットの実績がある。歩行技術は Texas A&M 大を中心とするメンバー。

図３－２７　NASA JSC のロボット

・SCHAFT (SCHAFT)

東大発ベンチャー企業。東大では DARPA からの予算で研究することが認められなかったため、スピンオフ企業を設立した。HRP2 の安定歩行技術をベースとして、高出力モータの開発を行う。

図３－２８　SCHAFT のロボット

・THOR (Virginia Institute of Technology)

韓国系米国人 Dennis Hong を中心とした共同参加。Virginia Tech は DARPA Urban Challenge で３位。

図３－２９　THOR のロボット

Track B からの出場チームは下記の通りである。

・IHMC (Florida Institute for Human and Machine Cognition)

フロリダ州立の研究機関であり、MIT Leg Laboratory 出身の Jerry Pratt が責任者を務め、26 名のメンバーで開発。VRC で１位。

・MIT (Massachusetts Institute of Technology)

MIT Leg Laboratory を中心としたチーム。VRC で３位。DARPA Urban Challenge では４位の成績であった。

・TRAC Labs

VRC で４位。NASA Robonaut の開発で実績がある。

・VIGIR (TORC Robotics)

VRC で６位。Virginia Tech のベンチャー企業で、自律自動車キットなどを販売。Darmstadt 工科大学や Oregon State University などが合流。

・Lockheed Martin

VRC で８位。RPI, U Penn が協力。

図３－３０ Track B のロボット ATLAS

Track C からの出場チームは下記の通り。

・WPI

VRC で２位であり、VRC で 10 位の CMU も合流した。WPI は Drexel チームにも参加。

・HKU (U of Hong Kong)

中国政府の予算で ATLAS を購入し、ロボティクスセンターを設立して参加。VRC７位の Team K（日本)、Case Western Reserve University, University of Edinburgh が協力。

Track D からの出場チームは下記の通り。

・KAIST

韓国チームで、KAIST が開発した Hubo を使って出場。

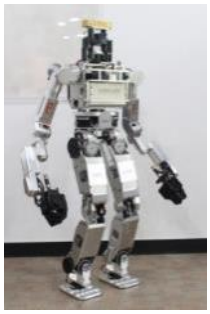


図３－３１　KAIST のロボット

・CHIRON (Parvus 社)

Rugged COTS コンピュータのメーカである Parvus 社からのベンチャー。UGV の自動運転キットを販売。

図３－３２　CHIRON のロボット

・MOJAVATON（Colorado Mesa University)

コロラド州のコンソーシアム。DARPA Grand Challenge, Urban Challenge にも出場。

図３－３３　MOJAVATON のロボット

２）競技ルール

競技ルールはサイトビジットの結果に基づいて徐々に変更がなされた。2013 年 10 月 26 日時点の Release 3 は、もともと計画された内容を最も反映したルールと考えられ、下記に説明するような内容であった。

本番の競技では、この内容では競技不能のチームが多数出ることが予測されたため、ルールが容易になるように種々の変更が加えられた。たとえば、移動する瓦礫は通常の重量の木材ではなくバルサ材となり、バルブは多くのロボットが扱える回転抵抗が極めて低いものが選ばれ、回転しやすい位置に設置された。しかしながら、2015 年 5 月に開催予定の DRC Final では、元の難易度に戻されると予想される。

◎Task 1 - Vehicle

左の START から、右へ移動する。

（１）ロボットが自動車に搭乗した状態で START ゾーンから運転して FINISH に入る。

（２）ロボットが自動車から降りて、End Zone から出る。

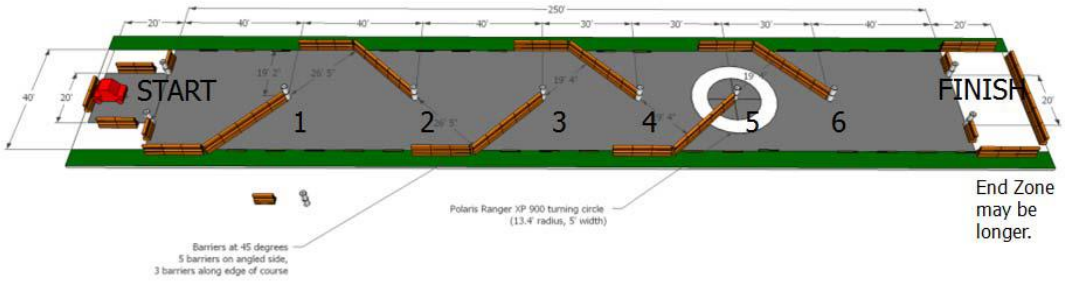


図３－３４　Vehicle Task のコースレイアウト

◎Task 2 - Obstacles

右からコースに入って、左に出る。

（１）Pitch Ramps，Tripping Hazards、直線状の Hurdles を越える。

（２）波状の Hurdles，Footfalls and Holes を越える。

（３）Ascend Flat Top Staps を越える。

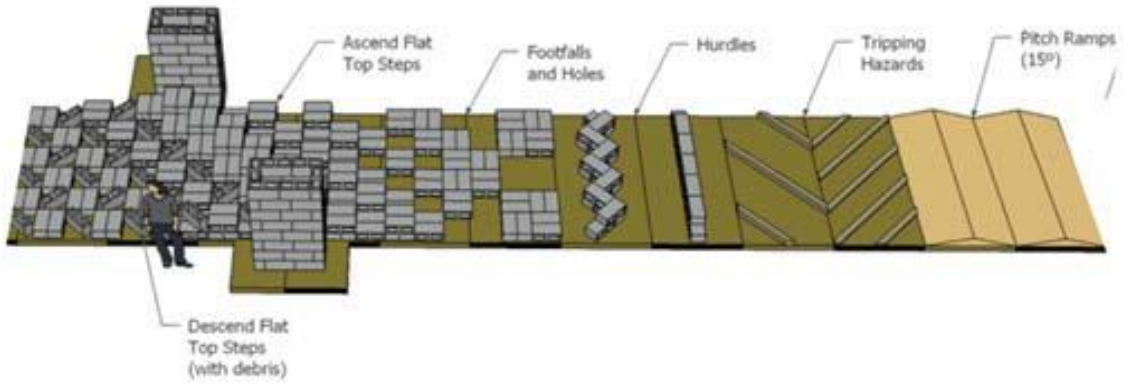


図３－３５　Obstacle Task のコースレイアウト

◎Task 3 - Ladder

（１）最初の１歩から 2 feet 上る

（２）４ステップ目から 2 フィート上る

（３）踊り場から２フィート上る

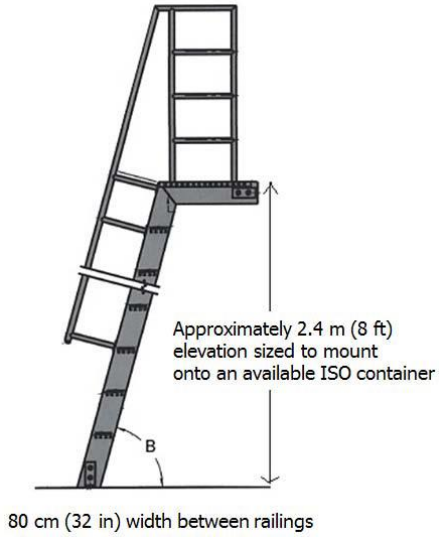


図３－３６　Ladder Task のコース

◎Task - Debris

コースの左、数メートル離れた場所からスタートする

（１）瓦礫を５つ除去する。瓦礫をブロックの反対側へ置く。

（２）もう５つ除去する。瓦礫をブロックの反対側へ置き、出入り口への通路を空ける。

（３）出入り口を抜けて出て行く。

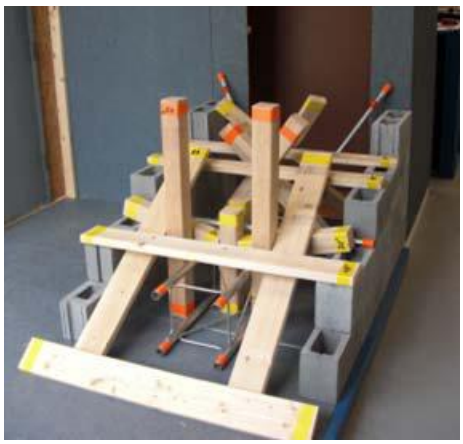


図３－３７　Task - Debris のコース

◎Task -Door

ロボットは右側からスタートし、左側へ抜けていく。扉のサイズは 90 cm 幅で、幅 85 cm の開口部がある。

（１）押し扉を抜ける

（２）引き扉を抜ける

（３）扉が自動的に閉まる装置が付いた引き扉を抜ける

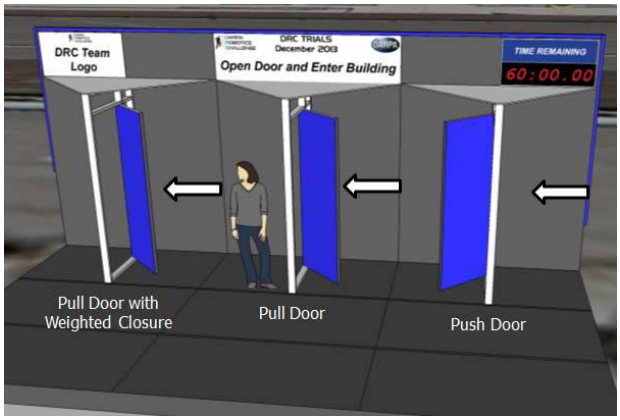
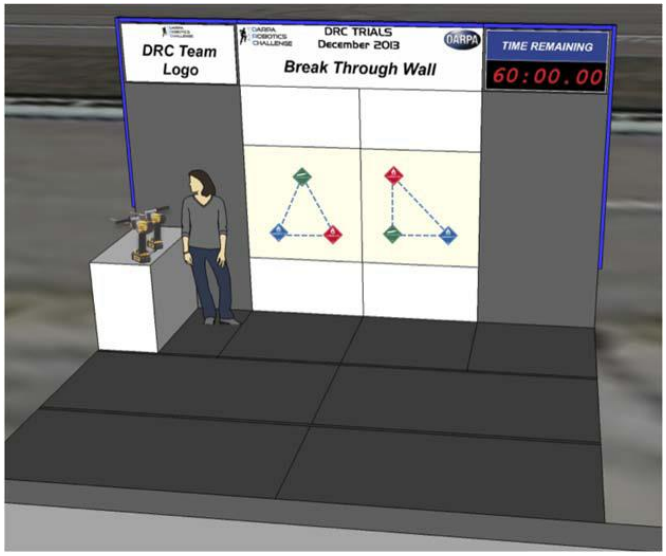


図３－３８　Task - Door のコース

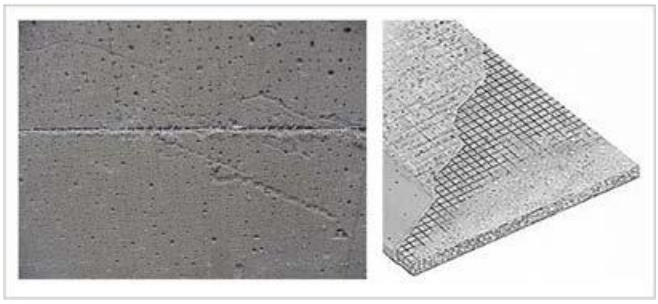
◎Task - Wall

ロボットは壁から少しだけ離れた場所からスタートし、充電式ドリルを使って書かれた絵の形に壁をくりぬく。壁は 1/2 inch 厚の Duroc セメントボード。絵の向こう側には障害物はない。絵は、２つの三角形から成り、外側の三角形は辺の長さが 60cm、内側の三角形は外側の三角形から 7.5cm 内側に描かれている。内側の三角形の内部を完全にくりぬき、外側の三角形の外部はくりぬかない。切断線は直線でなくても良い。

（1）1 辺を切断
（2）2 辺を切断
（3）3 辺を切断して三角形の部材を壁から外す。



(a) Task - Wall のコース



(b) 壁の切断のセメントボード、メッシュ入り

(c) 充電式 2 ハンドドリル

図３－３９　Task Wall のフィールド

◎Task - Valve

バルブから少し離れた位置からスタートし、３つのバルブを閉めていく。閉まったかどうかは、配管の空気の流れで示され、完全に止めなければならない。バルブの回転軸は、地面から 90～150cm の高さに設置。

（1）バルブ 1 を閉める。シャットオフバルブで、90 度回転が必要。
（2）バルブ 2 を閉める。小径の回転バルブで、5 回転が必要。
（3）バルブ 3 を閉める。大径の回転バルブで、5 回転が必要。

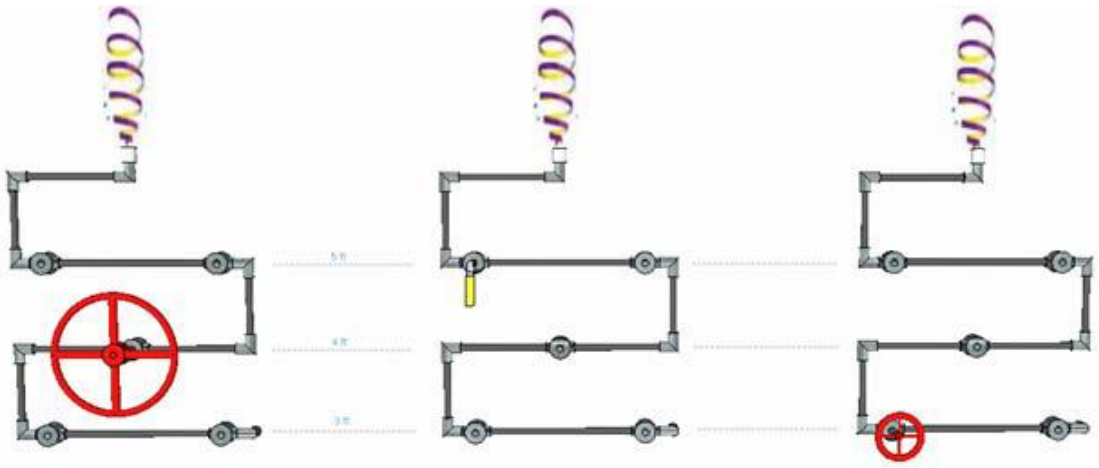


図３－４０　Task - Valve のコース

◎Task - Hose

（１）ホースの端をスタートラインを越えて動かす。ロボットは少し離れた位置からスタートし、ホースに近づき、端をつかみ、ホースをリールから引き出す。

（２）ホースの端を消火栓のエリアまで動かす。ロボットはホースをリールからさらに引き出し、3～6m 離れた消火栓のエリアまでホースの端を持っていく。

（３）ホースの端を消火栓につなぐ。ホースのコネクタを回す必要があり、ホース自身を回しても結合できない。

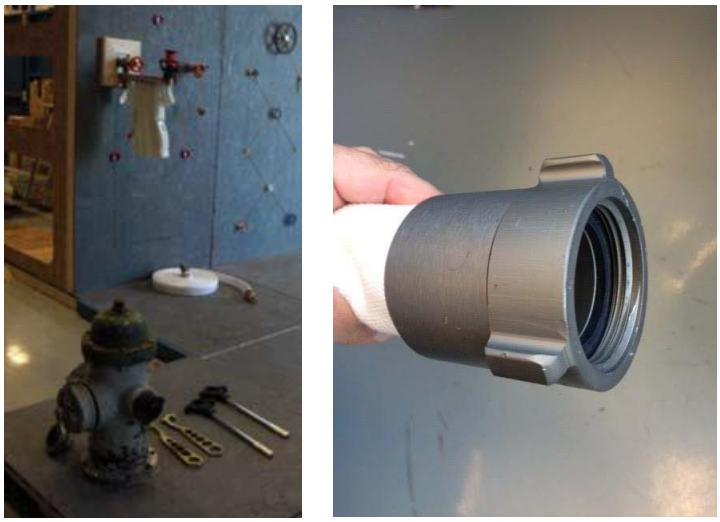


図３－４１　Task - Hose のレイアウトと、消火ホースのコネクタ

３）競技の結果

競技の結果は表３－１２に示すようになった。

表３－１２　DRC Trial の結果

順位	チーム名	得点 (移動, 操作)
1	SCHAFT	27 (9, 18)
2	IHMC	20 (4, 16)
3	TARTAN	18 (2, 16)
4	MIT	16 (4, 12)
5	NASA JPL	14 (2, 12)
6	TRAC Labs	11 (2, 9)
7	WPI	11 (5, 6)
8	Lockheed Martin	9 (3, 6)
9	THOR	8 (2, 6)
9	VIGIR	8 (2, 6)
9	KAIST	8 (2, 6)
12	HKU	3 (1, 2)
12	DRC-HUBO	3 (2, 1)
14	CHIRON	0 (0, 0)
14	NASA-JSC	0 (0, 0)
14	MOJAVATON	0 (0, 0)

Track A チームは、SCHAFT を除いてはハードウェアの完成が DRC Trial 直前となってしまった。そのため、操作に関しては、自律機能などに着手する時間が取れず、ほとんど完全マニュアル操作に終始せざるを得なかった。また、移動については、不整地や梯子など、失敗すると故障につながる移動動作にはトライしなかったため、ほとんどのチームは点数が低い。SCHAFT は HRP-2 の技術を用いてハードウェアの完成が早かったため、プレイバック方式の動作の作り込みとチューニングに十分な時間を費やすことができ、不確定要素がほとんどない DRC Trial のルールでは良い成績を残すことができた。韓国の Hubo は耐環境ロバスト性が低く、直前の路面仕様変更などに対応できないなど、DRC Trial では良い成績を収められなかった。

Track B, C チームは、ATLAS の完成度が高く、シミュレータ上の遠隔操作からの連続性が高かったため、総じて良い成績を収めることが出来ていた。中国チームの ATLAS は出場できなかった。

全体としては、自律動作を組み込む時間が不足しており、通信の帯域制限が比較的広く緩和されていたため、プレイバック方式を除いてはほとんど遠隔操作に終始していた。また、限られた帯域で送られてくる画像を下に遠隔操作するため、動きが極めて緩慢であり、静止時間がほとんどであった。

DRC Final においては、各チームが自律ソフトウェアを本格的に組み込んでくることが予想され、自律性の戦いになると考えられる。さらには、競技フィールドは災害空間をきちんと模擬したものとなり、DRC Trial で導入されたような緩和措置が排除されると考えられ、環境ロバスト性が高く、不確定な状況での確実な動作が求められると考えられる。

Google は、DRC Trial で優秀な成績を収めた会社を、Boston Dynamics や SCHAFT も含めて、８社買収した。DARPA がこの種の競技会を行う目的のひとつは、技術の現状を調査することにあり、未知技術を持たないことによって安全保障を図ることにある。Google が関係会社を買収したことによって、技術の流通がどのように変化するのか、我が国のロボット技術の立ち位置がどうなるか、それに対してどのように戦略的に対応していくか、をよく検討する必要がある。日本ではこのような技術の受け皿がなく、開発した技術がほとんど国外（米国、中国、韓国など）へ流出しているという事実があり、SCHAFT の買収もその一つである。欧米ではロボットが大きなビジネスになる日が近いと言われ、大きな研究開発投資がなされているため、研究者にとってより良い環境が用意されており、我が国の人材は輸出超過の状態にある。国際協調を前提に置きながら、我が国のロボット技術を育て、我が国からビジネスを発信し、国益を確保するための大胆な戦略を計画し、実行することが求められている。

３－２－４　欧米の研究プロジェクト

欧米、韓国、中国などでは、特殊環境ロボットに関する研究開発プロジェクトが多数行われている。下記ではその代表的なものを挙げる。

３－２－４－１　EU プロジェクト

（１）FP7 と Horizon 2020 [46][47][48][49][50][51]

１）FP7 とは

FP7 (Seventh Framework Programme for Research and Technological Development) は、EU が推進しているヨーロッパにおける研究開発ファンドであり、2007～2013 年に、合計 7 兆円の EU 予算で実施されているプログラムである。その目的は、ヨーロッパにおける雇用の創出、競争力の確保、QoL の向上にあり、さまざまな分野の科学技術研究をテーマとしている。FP7 の中で Information and Communication Technologies (ICTs) に関しては合計 1.2 兆円の予算が割り当てられており、ロボットは主として ICTs の枠組みの中で研究が行われている。ICT 以外にも、さまざまな応用分野の中に、ロボット研究が入り込んでいる。

２）FP7 におけるロボット研究

ロボットに関しては 120 のプロジェクトが、650 億円程度の予算により、700 を越える

パートナーによって遂行されており、毎年 90～110 億円の新しいプロジェクトがつくられている。申請数 200 に対して、採択数は 20 件程度である。

内容はロボティクスだけに限定されないものが多く、下記の横軸と縦軸からなるマトリックス状のポートフォリオの上で、重複しないようなテーマの採択がなされている。

（横軸の項目）

- ロボット作業
- ロボット作業支援
- ロジスティクスのためのロボット
- 調査と介入のためのロボット
- 探索と検査のためのロボット
- エンターテインメントロボット

（縦軸の項目）

- 産業
- プロフェッショナルサービス
- 国内サービス
- セキュリティ
- 宇宙

また、技術的には次のような項目分けがなされている。

（感覚）触覚、視覚、聴覚、先端センシング
（理解）認識、解釈、適応、モデリング、認知アーキテクチャ
（行動）マニピュレーション、ナビゲーション、インタラクション、
　　協調、モニタリング
（応用）飛行、水中、産業・生産、プロフェッショナルと国内、医療とリハビリ、
　　モニタリングとサーベイランス

3）FP7 のロボットのプロジェクト

この中で、無人移動体に関するプロジェクトとしては下記の 6 つを挙げることができる。

- ARCUS: Aerial Robotics Cooperative assembly Systems
- EUROPA: European Robotic Pedestrian Assistant
- NiFti: Natural human-robot cooperation in dynamic environments
- TRIDENT: Marine Robots and Dexterous Manipulation for Enabling Autonomous Underwater Multipurpose Intervention Missions

・SHERPA: Smart collaboration between humans and ground-aErial Robots for imProving rescuing activities in Alpine environments
・V-CHARGE: Autonomous Valet Parking and Charging for e-Mobility

また、下記のような研究コミュニティーが作られている。

・EUROP: European Robotics Technology Platform
・EURON: European RObotics research Network（現在は EU 予算でない）
・euRobotics: European Robotics Coordination Action
・EUCogIII: Advancement of Artificial Cognitive Systems, Interaction and Robotics
・EuroSurge: European Robotic Surgery Coordination Action
・ECHORD: European Clearing House for Open Robotics Development
・European Robotics Forum

さらには、下記のようなロボット競技会が作られた。

・euRathlon: Search & Rescue activities
・ROCKiN: Testbeds - Innovation - Links with RoboCup

4）2013 年開始のロボットプロジェクト

2013 年から開始するプロジェクトとしては、ロボティクス、認知システム、スマート空間、ヒューマンマシンインタラクションなどが重要なチャレンジとして取り上げられ、イノベーションと社会活用、社会経済的な観点、国際的な協力が重視された。その結果、6 つのプロジェクトが採択されている。総額は、25 億円である。

・半自律ロボットによる遠隔診断
・無人船舶による藍藻のモニタリングと処理
・ワイン畑の UGV モニタリングによる水と農薬の節減
・自動車組立の移動ロボットマニピュレータ
・オイル・ガス・石油化学産業におけるロボット点検技術
・クラックを見つけるトンネル検査のためのロボット

5）Horizon 2020

FP7 終了後、2014 年からは、FP7, CIP, EIT という 3 つのプロジェクトが統合されて、Horizon 2020 が開始される。そのポイントは、研究とイノベーションをくっつけることであり、研究から商品化に至るまで、さまざまなイノベーションを生み出すことである。そ

のために、次の 3 点に重点を置く。

・最高の科学：ヨーロッパの科学の最高のベースを挙げ、ワールドクラスの研究の着実な流れがヨーロッパの長期的な競争力を裏付けるようにする。
・産業のリーダーシップ：ヨーロッパを研究と産業にとってもっと魅力的な場所にするために、ビジネスがテーマを決めるような活動をプロモートする。
・社会的なチャレンジ：Europe 2020 戦略の政治的な優先事項を反映させ、ヨーロッパ市民に多くの関心を持ってもらう。

この予算は次のように支払われ、研究開発がしやすいようになっている。

・市場に近いもの
　企業等：必要費用の 70%＋間接費（必要費用の 20%）
　非営利団体：必要費用の 100%＋間接費（20%）
・市場に近くないもの：必要費用の 100%＋間接費（20%）
・市場に出る前の調達（Pre-Commercial Procurement）

6）Horizon 2020 のロボット関係予算

ロボット関係予算は直接的にロボットである予算に加え、医療や環境などのロボット活用の予算があり、Horizon 2020 は FP7 と比べて、ロボットをより重点化している。

(1) Robotics and Cognitive System in Excellent Science, Topic 6: Knowing, doing and being

未来のロボット（Cognitive Systems and Robots）のための基礎研究。さまざまな分野の研究が含まれる（knowledge, cognition, embodiment, thinking, development, etc.）。現在の、遅く不十分な状況を、完全に脱却するレベルを目指している。

(2) ICT in Societal Challenges

下記のようなさまざまなテーマが関係する。4500 億円？

・健康、人口動態の変化、福祉　（特にこのテーマがロボティクスと関連が深い）
・安全でクリーンで効率が良いエネルギー
・スマートでグリーンで統合された交通
・食の安全、農業の継続性、海洋研究、バイオ経済学
・環境アクション、資源効率、原材料
・どんな人でも受け入れる、イノベーティブな、思慮深い社会
・安全な社会

(3)　ICT in Industrial Leadership

下記の 6 つのテーマが挙げられ、ロボティクスはその一つになっている。9000 億円。

・要素部品とシステム
・次世代コンピューティング
・未来のインターネット
・コンテンツ技術と情報のマネジメント
・ロボティクス
・キーとなる重要技術：マイクロ・ナノエレクトロニクスと光技術

(4)　Robotics in Industrial Leadership（おそらく、(3)のロボティクスのテーマ）

Challenge 5: Robotics, 5.1 Roadmap-based R&D&I in Robotics として、最初の募集がなされる（公募 2013 年 12 月 11 日、締切 2014 年 4 月 23 日)。その内容は、調査時点では次の通り（変更の可能性あり)。

・産業用ロボットとサービスロボットにおける先端的キー技術への RTD
　市場ドメイン：製造、商業、土木、農業など
　キー技術：特に、認知、把持、マニピュレーション、人間ロボット系、
　　メカトロニクス、ナビゲーション、知覚
・技術移転－ロボティクスの使用事例
・ロボティクスにおける市場に出る前の調達
　公共安全、環境モニタリング
・共有リソースと評価
　ベンチマーク活動によって支援される

Challenge 5: Robotics, 5.2 Roadmap-based R&D&I in Robotics として、2 回目の募集がなされる予定である（公募 2014 年 12 月、締切 2015 年春予定)。その内容は、現状では次の通り。

・産業用ロボットとサービスロボットにおける先端的キー技術への RTD
・技術移転－産学連携への支援
・技術移転－ロボティクスの使用事例
・ロボティクスにおける市場に出る前の調達
・コミュニティーの育成と、ロボット競技会

生産分野における公募がなされる予定である。テーマ名は、ヨーロッパの生産能力の現代化であり、生産 SME における ICT の革新（コード名：I4MS）を目的としている。４つの技術エリアをターゲットとしていて、そのうちの一つが下記である。

○高度にフレキシブルで、ほぼ自律的なロボティクスシステム

応用実験は、バリューチェーンのすべての要素と専門知識を統合する、専門知識は、新しいユーザに新しい製品やサービスを用意し、新しいユーザがそれぞれの環境に対してそれらをカスタマイズして適用するために必要である。

(5)　ICT Horizontal and Cross-Cutting Activities（おそらく、(3)のロボティクスのテーマ）

ICT Horizontal and Cross-Cutting Activities として、CC.1 - Platforms for Connected Smart Objects が研究される。そのポイントは下記である。

・次世代デバイス、ネットワーク、その他の ICT のインテグレーション
・ウェアラブルハードウェアの普及によって充実されたスマート環境と、次世代ロボット（特に消費者と家庭にサービスするロボット）
・家庭、仕事、移動中の市民に対するサービス、および、新しいサービス

７）Horizon 2020 の Public-Private Partnership (PPP)

(1)　Public-Private Partnership (PPP) とは

PPP とは、政府と民間組織がパートナーとなって、政府のサービスや民間のビジネスベンチャーに対して、予算を出して実行する、という考え方のことである。Horizon 2020 では、Public は European Commission であり、Private は企業・大学・研究期間・NGO である。大学は Public でもあり得る。その目的は、特定のビジネス分野においてヨーロッパの競争力あるポジションを強化することにある。そのために、研究戦略と投資活動を協力して展開する。単に研究にとどまらず、規制、政策、通商、非技術障壁などを同時に検討する。

(2)　ロボティクスにおける PPP

その目標は、ロボティクスを通して、すべての人により高い QoL を提供することにある。すなわち、ヨーロッパのロボティクスコミュニティーが、ロボット製品とサービスを創造し、開発し、革新し、製造し、供給していくことによって、ロボティクスにおいて世界をリードする。それによって、多くの EU 国民の社会的なニーズを満たす、ことにある。

その任務は、高いクオリティの仕事と個人生活のためのロボット製品とサービスを創造し、社会に定着させることにある。キーポイントは下記である。

・社会にとってのベネフィット
・工場の内外での良い生活環境
・QoL の直接的間接的な改善
・競争的になる前の研究開発投資行動の戦略的な調整

そのゴールは、下記のように整理される。

・ヨーロッパのロボティクスの戦略的なゴールを作成し、その実施を育成する
・革新的なロボット技術によって、EU の産業競争力を改善する
・ヨーロッパの社会的な課題を解くためのキーエネーブラーとしてロボティクスを位置付ける
・ヨーロッパのロボティクスのコミュニティーにおける活動のネットワークを強化する。
・ヨーロッパのロボティクスを促進する
・新しいユーザとマーケットに送り届ける
・政策作成に貢献し、倫理的・法的・社会的課題に取り組む

PPP の Private 側については、次のようなアクションが行われた。

・2012 年 9 月に非営利法人 euRobotics aisbl をベルギーの法律の下に設立された。
・会長、副会長、理事が就任した。役員には、産業界、学術界からメンバーが出ている。その多くは、IEEE RAS の役員や会員である。
・2012 年 9 月 18 日にブリュッセルにて、EC と euRobotics aisbl との間で MoU が交わされた。

また、下記のような契約上の合意にサインされる予定である。

・パートナーシップの目的
・パートナーの義務
・キーとなる業績指標
・もたらされるアウトプット
・ガバナンスの構造
・合意違反の際の適切なアクション

ロボティクスにおける PPP は下記のような状況にある。

・2013 年 6 月中旬に、民間のステークホルダーが PPP 申請を EC に提出
・外部専門家による申請の審査
・夏休み以降に審査について通知
・euRobotics aisbl のメンバーは、129 名になった（学術 65%、産業 35%）
・21 のタスクフォースが作られ、すべての組織的な事項について取り扱っている（ブランド化、IT 環境など）
・提案募集のためのグループが募集されている
・euRobotics aisbl 事務局はスタッフを募集中
・RockEU Coordination Action について協議中（PPP 遂行を立ち上げ段階で支援する）

現在、EU の戦略研究課題の見直しが行われ、Robotics 2020 Strategic Research Agenda を策定する。その目的は、研究の優先順位、開発すべき技術、含まれるべきセクターを規定することである。2009 年に策定された戦略研究課題は大きく見直される予定であり、2012 年 9 月に策定を開始した。EC はこれを行動プログラムの策定や提案募集に活用する。

2013 年 8 月 28 日時点で上がっている提案募集グループの候補は下記の通りであるが、今後増える予定である。

・健康管理、農業、産業用ロボット、社会用ロボット、環境支援生活、
・飛行ロボット、宇宙応用、水中ロボット、友達ロボット
・認知システムと人工知能、ロボット認知、制御、知覚、安全、自律ナビゲーション、
・人間ロボットインタラクションと協力、ソフトウェア開発手法、システム技術
・小型ロボット、生物に学ぶロボット、遠隔ロボット
・性能評価と競技会、電子教育システム、教育

（２）ARCAS (Aerial Robotics Cooperative Assembly System)

FP7 のプロジェクト例として、ARCAS の内容を説明する [52]。

予算：EU (FP7)
研究代表者：Anibal Ollero（セビリア大学）
予算額：615 万ユーロ（約 8 億円）
期間：2011 年～

その概要は下記の通りである。

複数の飛行ロボットを使った組立や構造物の建設のシステムを研究開発する（図３－４２）。その応用としては、被災者の非難や飛行体の着陸のためのプラットフォームの建設、施設の点検やメンテナンス、立ち入れない場所への構造物の建設、などが挙げられている。

具体的な技術開発内容としては、

1) マニピュレータを持ち、把持物体と接触した状態で、単一あるいは複数の飛行体を制御するための新しい方法

2) 作業シナリオとガイダンスのための、モデリング、同定、認識の新しい方法。たとえば、3D モデル、飛行 3D SLAM、3D トラッキング、協調認識など。

3) 複数の飛行ロボットが協調して組立を行ったり建設を行ったりするための計画の新しい方法

4) 複数飛行ロボットによるマニピュレーションタスクにおいて、オペレータを支援する方法。たとえば、視覚・力フィードバックなど。

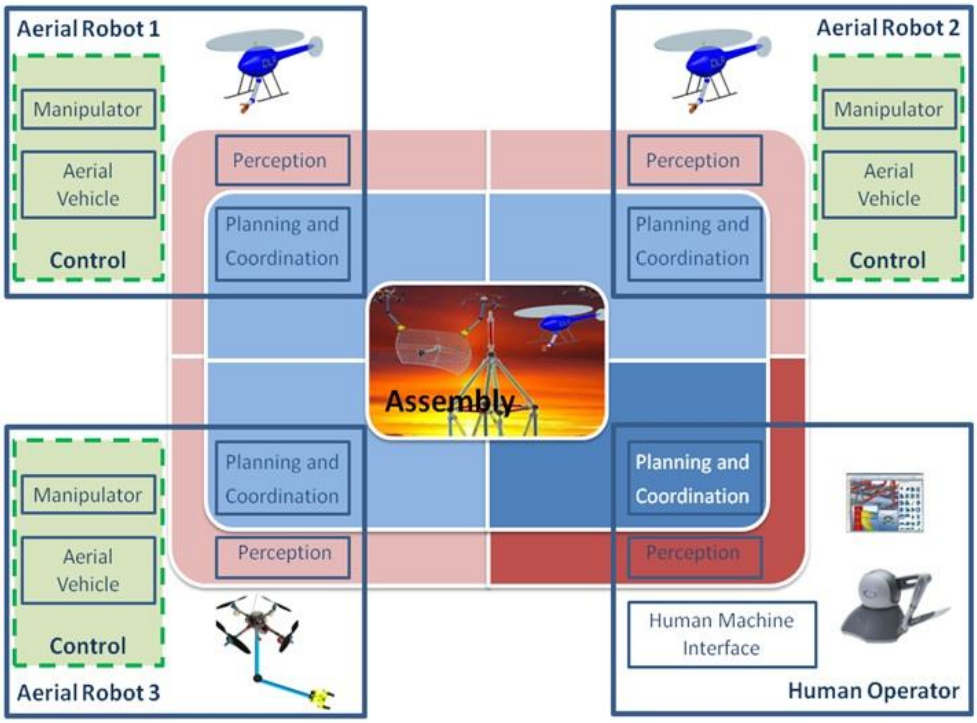


図３－４２　ARCAS プロジェクトの概要

（３）COMETS

ARCAS が始まる前のプロジェクトとして、EU の予算で、COMETS が行われた[53]。概要は下記の通りである。

異種混合の複数の UAV（ヘリコプターと飛行船）を分散協調させて、検知とモニタリングを行う技術の開発を目的としている。特に、新しい制御アーキテクチャ、制御手法、分散センシング手法の統合、リアルタイム画像処理に注力する。実証試験として、森林火災を取り上げてデモンストレーションを行った。

３－２－４－２　米国のプロジェクト

米国では、DARPA、NSF などが中心となって、様々なロボティクスや、サイバーフィジカルシステムの研究開発プロジェクトが行われている。DARPA Robotics Challenge はその一つである。

（１）M3 (Maximum Mobility and Manipulation) [54]

予算：DARPA

プログラムマネジャー：Gill Pratt

概要：

フィールドにおけるモビリティとマニピュレーション能力を飛躍的に高めるための、新しい科学と技術を作ることを目的とする。次の 4 つのトラックを設けて研究開発を行う。

1) 設計ツール

設計されたモビリティやマニピュレーションのパフォーマンスがプロトタイプ機でそのまま実現されるためのツールを開発する。担当：CMU, JPL, UC Santa Cruz, Raytheon, Vecna Technologies。

2) 製造方法

現在の方法よりも実質的に短い時間と低いコストでロボット部品を組み立てるための、３Ｄプリンティング技術とセルフアセンブリ技術を開発する。担当：Cornell, Harvard, Tufts Univ., UC Berkeley。

3) 制御方法

モビリティとマニピュレーションのための中位レベルの制御方式を研究開発する。たとえば、環境に応じて動的に歩容を選択する、動歩行におけるボディ質量の活用、動的安定制御など。担当：CMU, Case Western, Georgia Tech, iRobot, MIT, Tekrona, UC Santa Barbara。

4) 技術デモプロトタイプ機開発

上記のためのプロトタイプロボットとサブシステムの開発。担当：Boston Dynamics, CMU, HRL, iRobot, MIT, Oregon State U, Univ. Florida。

（２）Legged Squad Support System (LS3) [55]

予算：DARPA

プログラムマネジャー：Joseph K. Hitt

概要：

モビリティの高い半自律の脚型ロボットが 200kg の重量の物資を人間について行きながら不整地を運搬し、動物と同じように、ミッションの邪魔にならず、人間を支援できる技術を作ることを目的としている。

2012 年までにアウトドアでの実証試験を行い、丘を上り下りするモビリティや、屋外での認識能力の試験を終えた。実際の運用現場に入れての試験が現在行われており、自律性、人間の至近でついて行く能力、ローカルな障害を修正しながらついて行く能力、障害物回避能力、人間の司令を聴く能力などの改良を進めている。

３－２－４－３　韓国のプロジェクト

韓国でも、フィールドロボットとして、消防ロボットなどの研究開発がなされている。消防ロボットの予算は韓国知識経済省・ロボット部門である。その概要は次の通り。

2011 年より、消火ロボット改良プロジェクト、および、省庁連携での実際の火災現場に対してロボットを出動させるプロジェクトを開始。それまで開発されたロボットは実際の災害に適用されておらず、実現場での試験評価が求められている。様々な災害状況に対して即応でき、高速に不整地を動き、電源の喪失時においても無線通信を確立させることが必要である[56]。

３－３　今後取り組むべき研究開発項目の明確化

３－３－１　取り組むべき研究開発課題の要点

海外に対する優位性をより顕著にするため、また、海外に対する日本の立ち後れを解消するために、戦略的に研究開発課題を設定することは最重要の課題である。

平成 24 年度 NEDO 事業「特殊環境用ロボット等の標準化・安全規格化と競争力の強化等に関する検討」では、我が国が取り組むべき中長期課題に関する調査研究を行い、行うべき研究開発課題の提言を行った[30]。本事業では、その分析を踏まえた上で調査を行った結果、そこで上げられたおのおのの課題に対して、

「模擬特殊環境を活用したフィールド評価に基づいて研究開発を進めること」

が、研究開発の効果を最大限に上げるための方法論として有効であることが明らかになった。

取り組むべき課題は以下のように要約することができる[30] 。

ロボットは、図３－４３の中心に書かれたような機能モジュールの間でデータが受け渡されて、その機能が発現する。ロボットは、移動したり作業したりする機能を持ち、それによって対象物や外界に対して働きかけを行う。対象物の状態の変化は、センシング機能によって計測され、それに基づいて移動や作業が変更されると自律ロボットとなる。セン

シングデータは無線通信・有線通信によって操作者側に送られ、認識機能によってセンサデータへの意味づけがなされて、ヒューマンインタフェース機能を介して操作者に提示される。操作者側のシステムで自律機能やマッピング機能が構成されることもある。操作者からのロボットへの動作指令は、操作者の意図を汲み取った行動計画決定の機能を経て、有線通信・無線通信を介してロボット側に送られ、動作が行われる。ロボットは危険な災害空間の条件下で動くのに対して、操作者は安全な空間で操縦を行う。これらの要素、および、システムインテグレーションを、特殊環境下で十分に能力が発揮できるようにすることを目的とした研究開発が取り組むべき急務の課題である。

特殊環境で作業をするロボットの困難性の多くは、主として災害環境条件にある。すなわち、屋内で稼働するロボットとは異なり、下記の問題のために、図３－４３の右下のように定義された技術熟成度レベルが上がらないことが問題である。

1) 予期しない事象が常に発生する。
2) アクセスが困難（不整地、狭隘地、危険箇所など)。
3) 環境条件が劣悪（照明条件、温度条件、爆発環境、無線環境など)。
4) 人間が入ってメンテナンスできない。
5) 現場運用のために、サイズ・重量、ロジスティクス、自立性、エネルギー、可動時間の制約がある。
6) 実用性のために、信頼性、耐久性、耐環境性が不可欠。

これらの問題を解決するためには、図３－４３に挙げたように、下記が必要である。

1) 各機能コンポーネントの課題をそれぞれ解くこと
   ・各種ロボットの持つ移動・静止性能の課題
   ・操作・司令・教示・認識・判断（人間操作、自律知能）の課題
   ・行動決定の課題
   ・センシング・認識の課題
   ・無線通信・有線通信の課題
   ・作業性能の課題
   ・環境条件の課題
2) システムインテグレーションして機能を果たすようにすること
3) 特殊環境条件下での上記問題を解決すること

そして、これらの問題を解決するための研究開発課題、整備課題として、図３－４４、図３－４５に上げたように、特殊環境条件下における、次のような基盤技術研究、高度実

用化研究、規格・法令整備を行うことが重要である。

1) 遠隔現場へのアクセシビリティの向上
   ・超小型軽量飛行体による状況調査
   ・登壁ロボットによる状況調査と軽作業
   ・狭所探査ロボットによる状況調査
2) 遠隔状況認識・知能化・自動化
3) 無線通信・有線通信
4) 無人化施工
   ・水陸両用運搬車両
   ・緊急対策工事用無人化油圧ショベル
5) 現場悪影響の防止
   ・防爆技術と規格
6) 研究開発拠点、および、防災ロボットセンターの設立
7) 国際標準化、規格化
   ・性能評価法
   ・部品の可換・再利用性
   ・国際安全規格
8) コンテスト形式研究奨励
9) ロボット適用に必要な制度と環境の整備

これらによって、災害等の特殊環境現場すみずみまでロボットが移動することができ、すみずみまで調査し、作業することができ、特殊環境現場で能力を発揮するロボットシステムが実現できる。また、特殊環境ロボットの配備と適用のバリアを低下させ、事業環境と市場の整備を図ることができる。

これらの研究開発課題を実行する際には、特殊環境用であることを踏まえれば、下記の点に特に留意しなければならない。

1) 各要素技術が使用される環境条件、制約条件を、実際に使用される条件と合わせなければならない。
2) 要素技術として性能を発揮できるだけでなく、システム化したときに必要な性能を発揮できなければならない。
3) ロボットやセンサやマニピュレータだけで問題を解決するのではなく、既存機器や人間や組織を含めたシステム全体として問題を解決することが必要である。
4) 運用形態を念頭に置き、必要機能を絞り込む必要がある。
5) 現在ある方法やシステムからの連続性、使用者やシステム全体の教育、導入に至る

までの事業化プロセス、などを念頭に置く必要がある。

これらの問題を総合的に解決するためには、フィールド性能評価試験の活用は、後に述べるようにたいへん有効な手段である。具体的には、下記が必要である。

1) 研究開発を、ユーザとともにフィールド試験を行いながら進めること。
2) フィールド試験によって、実用性や問題点のレベルを定量的に確認すること。
3) その結果をさまざまな人に対してわかりやすく説明できるように論理づけること。
4) フィールド試験を標準化、共通化すること。

さらには、同報告書では、ロボット活用における各種バリアを解消するために、次の方策が必要であると提言している。

1) ユーザ・発注者・予算決定者がロボットの能力を知ること
2) 開発者・販売者・レンタル業者がユーザニーズを知ること
3) ユーザ・発注者・予算決定者にとってロボット使用が経済的に成立すること
4) メーカー・ディストリビュータ・レンタル業者にとってロボット製品がビジネスとして成立すること
5) ロボットが現場で継続的に使用・試験・訓練されること
6) 大学や国研の活用、全国に複数の防災ロボット研究開発拠点の整備と、国際協力
7) テストフィールド・モックアップを設置した防災ロボットセンターの整備
8) ユーザ間の協力
9) わかりやすい研究開発と普及のブースト策、ソリューションコンテストなど
10) 現在あるニーズによってロボットを育てること
11) 法と制度の整備

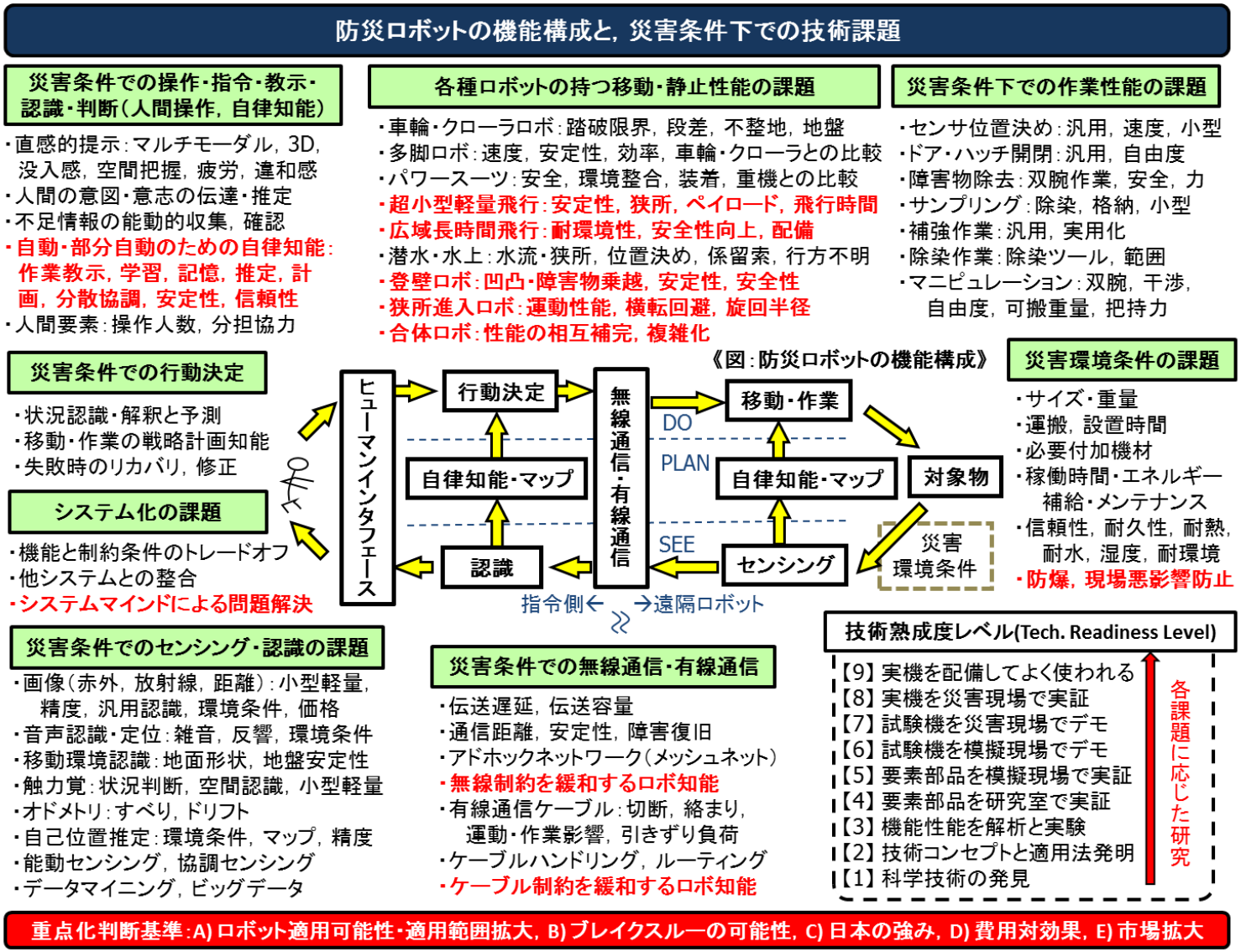

防災ロボットの機能構成と，災害条件下での技術課題
災害条件での操作・指令・教示・認識・判断（人間操作，自律知能）
・直感的提示：マルチモーダル，3D，没入感，空間把握，疲労，違和感
・人間の意図・意志の伝達・推定
・不足情報の能動的収集，確認
・自動・部分自動のための自律知能：作業教示，学習，記憶，推定，計画，分散協調，安定性，信頼性
・人間要素：操作人数，分担協力
各種ロボットの持つ移動・静止性能の課題
・車輪・クローラロボ：踏破限界，段差，不整地，地盤
・多脚ロボ：速度，安定性，効率，車輪・クローラとの比較
・パワースーツ：安全，環境整合，装着，重機との比較
・超小型軽量飛行：安定性，狭所，ペイロード，飛行時間
・広域長時間飛行：耐環境性，安全性向上，配備
・潜水・水上：水流・狭所，位置決め，係留索，行方不明
・登壁ロボ：凹凸・障害物乗越，安定性，安全性
・狭所進入ロボ：運動性能，横転回避，旋回半径
・合体ロボ：性能の相互補完，複雑化
災害条件下での作業性能の課題
・センサ位置決め：汎用，速度，小型
・ドア・ハッチ開閉：汎用，自由度
・障害物除去：双腕作業，安全，力
・サンプリング：除染，格納，小型
・補強作業：汎用，実用化
・除染作業：除染ツール，範囲
・マニピュレーション：双腕，干渉，自由度，可搬重量，把持力
《図：防災ロボットの機能構成》
災害条件での行動決定
・状況認識・解釈と予測
・移動・作業の戦略計画知能
・失敗時のリカバリ，修正
システム化の課題
・機能と制約条件のトレードオフ
・他システムとの整合
・システムマインドによる問題解決
ヒューマンインタフェース
行動決定
自律知能・マップ
認識
無線通信・有線通信
移動・作業
自律知能・マップ
センシング
対象物
災害環境条件
DO
PLAN
SEE
オペ
指令側←　→遠隔ロボット
災害環境条件の課題
・サイズ・重量
・運搬，設置時間
・必要付加機材
・稼働時間・エネルギー補給・メンテナンス
・信頼性，耐久性，耐熱，耐水，湿度，耐環境
・防爆，現場悪影響防止
災害条件でのセンシング・認識の課題
・画像（赤外，放射線，距離）：小型軽量，精度，汎用認識，環境条件，価格
・音声認識・定位：雑音，反響，環境条件
・移動環境認識：地面形状，地盤安定性
・触力覚：状況判断，空間認識，小型軽量
・オドメトリ：すべり，ドリフト
・自己位置推定：環境条件，マップ，精度
・能動センシング，協調センシング
・データマイニング，ビッグデータ
災害条件での無線通信・有線通信
・伝送遅延，伝送容量
・通信距離，安定性，障害復旧
・アドホックネットワーク（メッシュネット）
・無線制約を緩和するロボ知能
・有線通信ケーブル：切断，絡まり，運動・作業影響，引きずり負荷
・ケーブルハンドリング，ルーティング
・ケーブル制約を緩和するロボ知能
技術熟成度レベル(Tech. Readiness Level)
【9】実機を配備してよく使われる
【8】実機を災害現場で実証
【7】試験機を災害現場でデモ
【6】試験機を模擬現場でデモ
【5】要素部品を模擬現場で実証
【4】要素部品を研究室で実証
【3】機能性能を解析と実験
【2】技術コンセプトと適用法発明
【1】科学技術の発見
各課題に応じた研究
重点化判断基準：A) ロボット適用可能性・適用範囲拡大，B) ブレイクスルーの可能性，C) 日本の強み，D) 費用対効果，E) 市場拡大

図３－４４　重点的に進めるべき基盤技術研究、高度実用化研究、規格・法令整備

図３－４５　全国に複数の研究開発拠点、防災ロボットセンター、制度整備

なお、これらと、現在の産業施策との関係は表３－１３に示すようになっている。

表３－１３　各種バリアを解消するための方策と、産業施策との関連

	組織制度	ベンダー育成	市場化促進	人材活用育成	国際協力	規制・法制度	情報流通・国民理解
(1) ユーザ・発注者・予算決定者がロボット能力を知る			◎	○			○
(2) 開発者・販売者・レンタル業者がユーザニーズを知る		○	◎	○			
(3) ユーザ・発注者・予算決定者にとってロボット使用が経済的に成立する			◎		○	○	○
(4) メーカー・ディストリビュータ・レンタル業者にとってロボット製品がビジネスとして成立する		○	◎				
(5) ロボットが現場で継続的に使用・試験・訓練される	○		◎	○			○
(6) 大学や国研の活用，全国に複数の防災ロボット研究開発拠点の整備と，国際的協力	◎	○	○	○	○		○
(7) テストフィールド・モックアップを設置した防災ロボットセンターの整備	◎	○	○	○	○		○
(8) ユーザ間の協力			○	◎			○
(9) わかりやすい研究開発と普及のブースト策，ソリューションコンテストなど		○	○	○	○		◎
(10) 現在あるニーズによってロボットを育てる		◎	○				
(11) 法と制度の整備	○		○		○	◎	

これらの方策のためには、フィールド性能評価は効果的な方法論である。すなわち、フィールド性能評価によって、

1) ロボットの能力を定量的に明らかにし、
2) ユーザニーズはフィールドの設計という形で反映され、
3), 4) ユーザ・メーカーなどの相互理解によってビジネス化が促進され、
5) 模擬現場で試験的に、あるいは、訓練として使用され、
6) 開発拠点にはフィールド性能評価が必須であり、
7) 防災ロボットセンターには性能評価フィールドが設置され、
8) それを通じてユーザ間の協力が進み、
9) 性能評価に基づいた競技会形式のブースト策を活用した研究開発が進み、
10) 現在のニーズの問題を整理した性能評価フィールドを設置し、
11) 理解が進むことによって法と制度の整備が加速される、

ため、研究開発はもとより、様々な産業施策において、フィールド性能評価を活用すべきである。

３－３－２　フィールド性能評価試験

３－３－２－１　現場や模擬現場を使った性能評価試験・認証の必要性

災害の予防、緊急対応、復旧のような特殊環境に対しては、表３－１４に示すようなさまざまなロボットシステムが有効である。これらの特殊環境用ロボットが配備され、効果を上げるためには、ユーザやメーカがその性能をフィールド（現場や模擬現場）で十分に確認できる体制が必要である。

表３－１４　ロボットの種類（機能別）と適用災害

ロボットの種類		形態	適用作業	災害緊急対応・復旧						災害予防
				地震	水害・津波	土砂崩れ	火山	CBRN	原子力	
検査ロボット（視覚，3D形状，ソナー，サーモグラフィー，非破壊検査，化学剤検知，生物剤検知，音，GPS，通信，マッピング）		登壁	高所（橋梁，トンネル，ビル，プラント，崖，他の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 管外壁（パイプライン，煙突，他）の状態・環境検査，サンプリング，作業管理 壁の向こう側の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 高所からの概観情報収集	○	○	○		○	○	○
		管内・瓦礫内走行	管内（パイプライン，上下水道，ガス，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 瓦礫内（倒壊建物，土砂崩れ，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 狭隘部（構造物の隙間，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理	○	○	○		○	○	○
		地上走行	建物内（ビル，地下街，工場，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 屋外（汚染地域，火災，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理	○		○	○	○	○	○
		水上	水上（海，湖，川，氾濫地域，ダム，他）からの状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理	○	○	○		○	○	○
		水中・水陸両用	水中（海，湖，川，氾濫地域，ダム，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 浅水の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理	○	○	○		○	○	○
		固定翼機	上空からの概観情報収集，要救助者検索，セキュリティ，作業管理	○	○	○	○	○	○	
		回転翼機	上空からの概観情報収集，要救助者検索，セキュリティ，作業管理 高所（橋梁，トンネル，ビル，プラント，崖，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 建物内（ビル，地下街，工場，他）の状態・環境検査，サンプリング，人命検索，作業管理 軽量物運搬（火山，危険箇所，他）	○	○	○	○	○	○	○
		気球・凧	上空からの概観情報収集，要救助者検索，セキュリティ，作業管理 通信網確保	○	○	○	○	○	○	○
		パワーアシスト	重量物運搬	○	○	○			○	○
		電線	電線点検	○	○	○			○	○
作業ロボット	土木工事	ロボットバックホウ	火山災害，土砂災害，原子力災害，他での，瓦礫・土砂除去，運搬，法面工事，他の無人化施工	○	○	○	○		○	○
		ロボットブルドーザ		○	○	○	○		○	○
		ロボットダンプカー		○	○	○	○		○	○
		ロボットカメラ車		○	○	○	○		○	○
		ロボット無線通信車		○	○	○	○		○	○
		水中バックホウ		○	○	○				○
		管路工事ロボット		○	○	○		○	○	○
	建築工事	地上走行	危険建築物（ビル，柱・壁，他）の補強工事，廃棄物分別，ハツリ作業（アスベスト，放射性物質，他），清掃（堆積物，他），他	○	○	○	○	○	○	○
		登壁		○	○	○		○	○	○
		パワーアシスト		○	○	○	○		○	○
		廃棄物分別処理		○	○	○			○	○
	プラントエ事	配管工事	バルブ開閉，ドア開け，除染（スラッジ，付着物等），穴開け，散布，塗装，運搬遮蔽材組立，配管切断・組立・保温材剥がし，配線・コネクタ接続，機器・消耗品交換，足場設置・解体	○	○	○	○	○	○	○
		地上走行		○	○	○	○	○	○	○
		登壁		○	○	○		○	○	○
		パワーアシスト		○	○	○	○		○	○

製品のフィールド性能評価・認証は、ユーザやディストリビュータが製品に対する正しい選択や判断を行い、メーカが製品改良やマーケティングのための基礎データとするなど、

市場の健全な発展と産業競争力強化に寄与するところが大きい。そのため、特殊環境用ロボットにおいては、研究開発の推進はもとより、死の谷を越え、ダーウィンの海を渡って、社会に広く活用されるようになるために、ロボットやロボット部品のフィールド性能評価法を確立し、さらには、国際的な協調の下で標準化を進めることが必要である。（註：死の谷：応用研究から製品化までの難関・障壁、ダーウィンの海：製品化から事業化までの難関・障壁）

フィールド性能評価・認証によるメリットを整理すると、次のようになる。

・ユーザにとって
　調達基準の明確化：主観を排し、合理的な調達が可能になる。
　現場での使用判断基準の明確化：適用効果をあらかじめ見積もる。
　訓練基準・目標の明確化：ユーザの操作訓練における熟練度を測る。
・メーカ・ディストリビュータにとって
　開発目標の明確化：性能向上の指針を与える。
　開発効率・投資効率の向上：部品の評価を容易にする。過剰性能を避ける。
　ロボット性能のショーケース：ユーザに対して性能を明確に示すことができる。
　他社製品との差別の明確化：ユーザに対して製品の特徴を明確化できる。

さらにこれを国際的に標準化した場合、市場が国際化されて競争力強化につながる上、ロボットの国際的な互換性が確保されるというメリットも生じる。

性能評価の項目としては、運動、作業、センシング、無線、エネルギー、ヒューマンインタフェース、ロジスティクス、耐環境性能、安全性、などさまざまなものがある。また、次節に述べるように、災害の種類や制約の多様性、時間によって変化する防災ニーズ（災害予防、緊急対応、災害復旧）の変化に応じて、ロボットに必要とされる性能・形態・適用法などは異なる。さらには、表３－６に示したように、技術熟成度（Technology Readiness Level; TRL）には様々なレベルがあり、いずれも研究開発から配備に至る過程で不可欠である。したがって、それぞれに適したフィールド性能評価・認証の方法を検討し、用意することが必要である。すなわち、市場試験や現場適用試験だけでは不十分であり、モックアップ試験やラボ試験など、目的に応じた施設や設備を用意する必要がある。

フィールド性能評価の活用法はさまざまであるが、たとえば、次のようなものがある。

・調達ロボットの性能を模擬現場で評価　→ニーズとのマッチング
・作業者の災害対応・遠隔操作の訓練と評価　→作業者の熟練度・能力の向上
・開発中のロボット性能を定量評価　→開発過程・課題の見える化

フィールド性能評価法の策定には利害関係が絡むことから、メーカやディストリビュータ主導で検討することはできず、政府が先頭に立ち、有識者やユーザやメーカ・ディストリビュータなど、各所の協力を仰ぎながら、産業振興施策の一つとして重点的に進めることが必要である。その推進にあたっては、災害対応ロボットセンターのような組織が支援を行いながら、試験用のフィールドを有し認証機能をもつ機関を育成すること、国際的に標準化活動を推進すること、調達におけるフィールド性能評価の活用を義務づけること、が必要である。

３－３－２－２　特殊環境用の遠隔・自律ロボットと、評価すべき項目

特殊環境用ロボットの性能を評価するためには、想定する使用環境を明らかにし、そこで必要とされる機能・耐久性・耐環境性などを整理し、それに対する評価試験項目を明らかにしなければならない。ここでは、災害の予防、緊急対応、復旧を具体的な特殊環境用ロボットの重要な用途と位置付けた分析を行った。災害の種類としては、建造物・土木インフラ、水害・土砂崩れ、テロ・CBRNE 災害、原子力災害、プラント災害、水道・下水災害を取り上げることとした。

各災害について、想定災害とロボットとの関連細分と、想定される災害対応ロボットの機能等に対する試験項目細分を、具体的に検討した。

想定災害とロボットとの関連細分については、下記を項目とする評価表にまとめた。

- 想定対象・現場
- 想定災害・災害種類
- 被災レベル・被災状況
- 時間軸（平時、発生直後、72 時間以内、復旧）
- 全国的発生頻度・規模
- 遂行作業・対応作業
- 制約条件（環境条件）
- ロボット導入の期待される依存比率
- ロボット導入の価値
- 場所・移動環境（詳細）
- 必要な機能（移動、作業、環境）
- 現状技術でできること（適用可能ロボットまたは技術）
- 技術課題（困難を伴うこと）
- 非技術課題（規制、制約など）
- 将来展望（今後どの程度で実現するか）
- 行うべき試験（性能、耐久性、耐環境性など）
- 評価フィールドへの要求

試験項目細分表では、機能分類として、

・機能（移動能力、検出能力、情報統合能力、作業能力、システム性能、運用、安全機能など）
・耐環境性
・耐久性
・安全性

等をあげ、これらに対する

・試験項目
・評価適応範囲・対象・条件（想定される範囲内で種類や数値、条件等を変えて試験）
・評価内容（計測など）

を整理し、それらの項目が、想定される災害対応ロボットの利用の

・時間軸（発生直後、７２時間以内、復旧、平常時）
・対象となるロボット（クローラ・車輪、脚式、水陸両用型、飛行型、水面浮上型、ヘビ型、配管内、吸着型など）

に対して、該当するかどうかがわかる表を作成した。

３－３－２－３　建造物・土木インフラ災害

整理した表を、評価表１、評価表２に示す。

ここで対象とする建造物（建築物）および土木インフラ（主に社会資本）については、災害発生直後の人命救助（レスキュー）に次ぎ早期の対応を求められる分野である。また想定災害の種類も広く、地震、竜巻、火災（爆発、噴火）、水害（洪水、津波）、突発事故（老朽化に起因する事故、飛行機墜落、電車脱線衝突）など多岐にわたる。

（１）建造物災害対応

建造物の被災対象は、ビル建築物（低層、中高層、超高層／鉄筋コンクリート造、鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造／オフィスビル、集合住宅、学校、その他）、木造住宅、地下街、地下室、建物設備・配管とした。主に建築物およびそれに付属するものを対象とし、被災のレベルは、「倒壊」、「半倒壊・倒壊レベル不明」、「水没」とした。

図３－４６にテストフィールドのイメージを示す。建造物災害対応では災害現場のイメ

ージとして、瓦礫や道路の陥没等の障害物のある環境の中で、半倒壊したビルの内外部の調査・補修をロボットで行う必要がある。外部からは外壁に吸着するロボットや飛行型ロボットで外壁や付属設備の健全度調査、屋内の状況調査、簡易補修等を行う例を示し、内部ではクローラ型ロボットが出入口から進入して階段を昇降して建物の健全度調査や簡易補修を行う例を示している。また、水没した地下街の損壊状況の確認、内部のマップ化等を行う水陸両用型ロボットや水面浮上型ロボットの例が示されている。

災害現場としては様々な状況が想定されるが、図３－４６をベースとして様々なアレンジを加えることにより、実現場に沿った状況を再現可能なテストフィールドを構築する必要がある。フィールドテストの一例として被災した建屋内の健全性調査、補修作業について検討した結果を以下に示す。

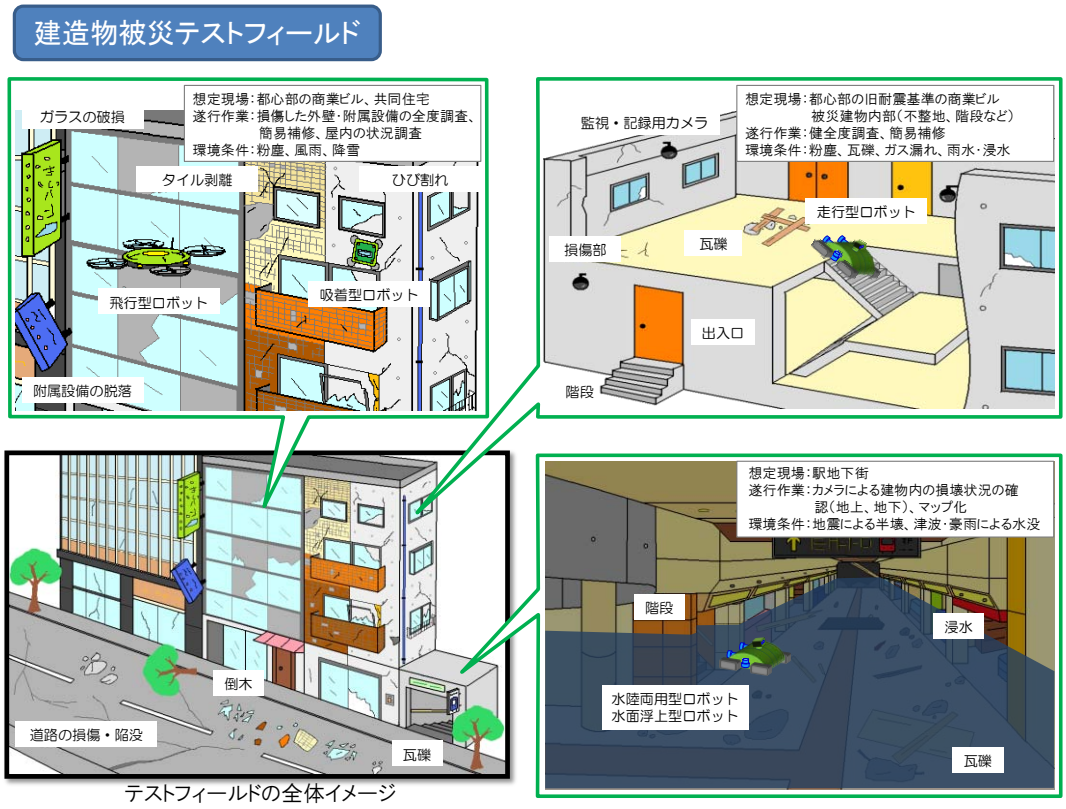


図３－４６　建造物災害テストフィールドのイメージ

１）災害時にロボットが行う想定作業

建造物の被災では建物種類や被災状況が多岐にわたるため、実証実験フィールドの具体化にあたってはロボットへの期待度や可能性を評価して対象作業を絞り込む必要があるが、以下では、その一例として、地震の数日後に、半倒壊した鉄筋コンクリート造建物の健全性の診断および補強等を行うロボットのフィールドテストについて検討する。

建物調査用のロボットは安全な場所から建物に入り、落下した仕上げ材や設備などが散

乱する中を移動しながら柱や壁等の主要な構造材のクラックや変形、強度等をセンシングし、結果を解析して建物の倒壊の可能性や補強の要否を把握する。その結果に基づき必要に応じて補強方法を決定し、補強用ロボットが建物内に入って遠隔操作により補強作業を行う。

２）ロボットシステムに求められる機能

ロボットシステムに必要な機能として、

①移動技術（不整地移動、階段昇降）
②センシング技術（画像、レーザスキャナ、超音波、打音など）
③作業機能（障害物除去、重量物ハンドリング、補修材の充填など）
④複数ロボットや各種センサを容易にシステムに追加でき、得られるセンサデータの蓄積などが可能な IT 基盤とそれを利用した各種データ解析機能
⑤遠隔操作性（通信手段と確保、ヒューマン I/F、遠隔臨場感、遠隔指示機能と自律機能との統合）
⑥安全機能（機器状態把握、周囲状況把握、耐転倒・滑落性能、異常対応、周囲環境への負荷低減）

等があげられる。

３）機能検証設備とロボット評価

これらのロボットのフィールドテスト用に、

①構造体の柱、梁、壁
②部屋と出入口
③廊下
④階段
⑤設備配管

を有する半倒壊した建物の一部の原寸大モックアップを用いて、ロボットの遠隔操作により必要な作業を行い、

①走破性能（不整地対応度、移動速度）
②作業性能（作業速度、精度、測定精度）
③操作性

等についての性能試験と評価を行う。

（２）土木インフラ災害対応

土木インフラの被災対象は、トンネル、橋梁、ダム、上下水道、港湾施設などがあるが、ここでは、土工事（砂防を含む）、上下水道については対象外とした。被災のレベルは、「倒壊」、「一部損傷」、「外観変化なし」とした。

図３－４７にテストフィールドのイメージを示す。土木インフラ災害対応では災害現場のイメージとして、半倒壊したトンネル、橋梁を例とした。トンネルでは、掘削積込み、障害物除去、作業状況を監視、および、被災構造物の健全性評価、被災構造物の補修するロボットが必要となる。一方、橋梁では、一部水中を想定したコンクリート破砕、障害物除去、運搬、状況把握を行うロボットの例として示した。

土木インフラ災害対応のロボットに求められるものとしては、

①インフラの健全度や損傷度、被害状況を正しく着実に把握する技術
②復旧、復興の水準を高めるための技術

が挙げられる。①については対象インフラに対する移動とセンサのアクセス技術、適切なセンサの開発や情報管理、基盤技術、②については、検査から補修・復旧までの一連の作業をロボットで効率よく実現することが要求される。

フィールドテストの一例としてトンネルでの復旧作業について検討した結果を以下に示す。

１）災害時にロボットが行う想定作業

被災直後から数日以内に想定される作業は、被災状況の把握、被災者の探索ならびに障害物の撤去等である。被災状況の把握では、被災した土木インフラや障害物（落下物、瓦礫、視界、有毒ガスを含めた空気環境等）に関する情報収集を、カメラ映像・３Ｄレーザースキャナ・各センサ等により行い、その後の調査・復旧計画の策定に役立てる。被災者の探索では、主に瓦礫等の下敷きになった負傷者あるいは遺体の探索を行う。障害物の撤去では、救出作業等に必要な搬送ルートを確保する。これらの作業は、被災状況に応じてロボットのみ、人や機械、あるいはそれらの併用で実施することになる。

２）ロボットシステムに求められる機能

土木インフラの災害現場で使われるロボットには、主として以下のような機能が要求される。

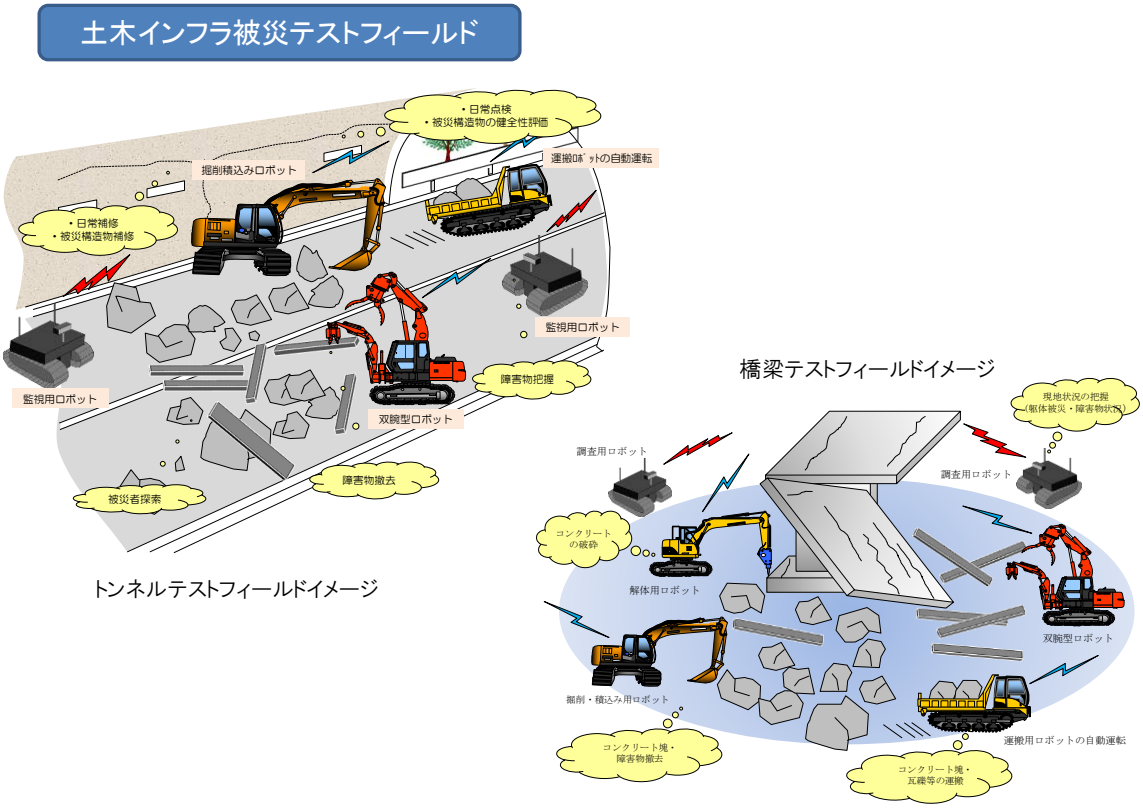


図３－４７　土木インフラ災害テストフィールドのイメージ

①瓦礫などの障害物を踏破あるいは回避できる移動能力
②安全な場所からの遠隔操作／半自律制御
③特定作業（生体認識・瓦礫撤去・破砕・搬送等）
④ＧＰＳ等を活用した自己位置認識(夜間や暗闇等の作業)
⑤災害現場の状況を鮮明に把握できる映像システム
⑥災害現場において早期にシステムを立ち上げ稼働可能
⑦安全機能。

3）機能検証設備とロボット評価

対象とするトンネルは、被災から数日経過した 2 車線・70～80m² 程度の標準的な断面のトンネルとし、

①覆工コンクリートの崩落、
②被災に伴う瓦礫・障害物、
③暗闇～薄明り等の照明、
④漏水・泥水等の環境創出

が必要となる。基本的なパラメータとして、光環境、視界、気流および障害物などへの耐環境試験はフィールドで実施される。一方、空気種類（揮発、低酸素、有毒等)、空気環境（温度、湿度)、降水、冠水、落下、衝撃、振動等に対する耐久性能試験はフィールド以外の設備で検証される。

ロボット評価として、具体的な作業性、操作運用性、メンテナンス性、安全性等がある。

３－３－２－４　水害・土砂崩れ災害

ここでは大雨による河川の氾濫及び土砂崩れといった災害を対象とした。具体的な災害対応場面としては、（１）河川の氾濫により流された人を探索する場面、（２）土砂崩れ等により倒壊した家屋で生存者を探索する場面、（３）土砂崩れにより堆積した土砂・瓦礫等を除去する場面の３つを想定した。これら３つの災害対応場面での制約条件・活動する災害対応ロボットに必要な機能・適用可能なロボットまたは技術・行うべき試験・評価フィールドへの要求等を検討し整理した（評価表３)。さらに「行うべき試験」に関しては、ロボットに要求される機能・性能別に分類して評価内容を検討し、対象となるロボット・時間軸（ロボットが災害対応に投入されるタイミング）を整理した（評価表４)。

以下３つの想定災害場面に分けて、検討結果の概要を説明する。

（１）河川の氾濫により流された人を探索する場面

活動の現場は、河川、港湾、水深の浅い海などの水中及び水面である。作業としては、濁っている水または泥水の中、場合によっては瓦礫等が浮遊する中を移動し、生存者の捜索および救助作業補助が考えられる。

捜索活動には水面移動ロボット・水中探索ロボットを使用することになり、視界の悪い状態で障害物を認識し遠隔操作で除去または回避する機能や、人を検知する機能が必要となる。また、高度な救助活動をするレスキュー隊員の補助装置も必要になり、これらは生存者やレスキュー隊員を傷つけないことが必須である。

評価フィールドとしては河川・港湾等の利用または大型の水槽設備が考えられる。河川・港湾等を利用する場合でも模擬瓦礫の設置や泥水状態の再現が必要であり、専用のエリアを確保する必要がある。また生存者の探索試験のために、バイタルサイン(心拍、体温等)を備えたダミー人形の設備も必要である。

行うべき試験としては、瓦礫等が浮遊する中での移動・ハンドリング試験、流水中での姿勢保持性能試験、操作性評価、バイタルサインの検知能力等がある。

（２）土砂崩れ等により倒壊した家屋で生存者を探索する場面

活動の場所は倒壊家屋で、作業としては土砂や瓦礫が混在する現場の現状調査、生存者の探索および救助作業補助が考えられる。

現場への地上からのアクセスが困難な場合、まず何より現場状況の把握と生存者が存在

する可能性がある位置を早急に特定することが求められる。空中撮影が可能な飛行ロボットを使い、カメラ遠隔操作や、撮影位置把握等の機能が考えられる。生存者探索は、クローラ型のレスキューロボットの使用が考えられ、倒壊した瓦礫上または瓦礫内を安定して前進できる操作性を有し前進を阻む瓦礫等を除去する機能を有する移動手段と、カメラ画像、体温の検知などによる生存者の探索機能が必要である。評価フィールドとしては、泥や沼地状態の軟弱な地面に積まれた倒壊家屋や流木等を想定した模擬瓦礫が必要である。模擬現場については、テキサス Disaster City の訓練施設が参考になる。図３－４８に倒壊家屋現場でロボットを活用することを想定した評価フィールドのイメージを示す。

行うべき試験としては、不安定な足場での姿勢保持性能や操作性、瓦礫のハンドリング性能などである。

また生存者探索については、上記模擬瓦礫に埋まった状態の生存者の探索試験のために、バイタルサイン(心拍、体温等)を備えたダミー人形の設備が必要で、行うべき試験としては、瓦礫内の模擬的なバイタルサインの検知、泥汚れ時センサ能力・リカバリ能力なども評価すべき項目である。

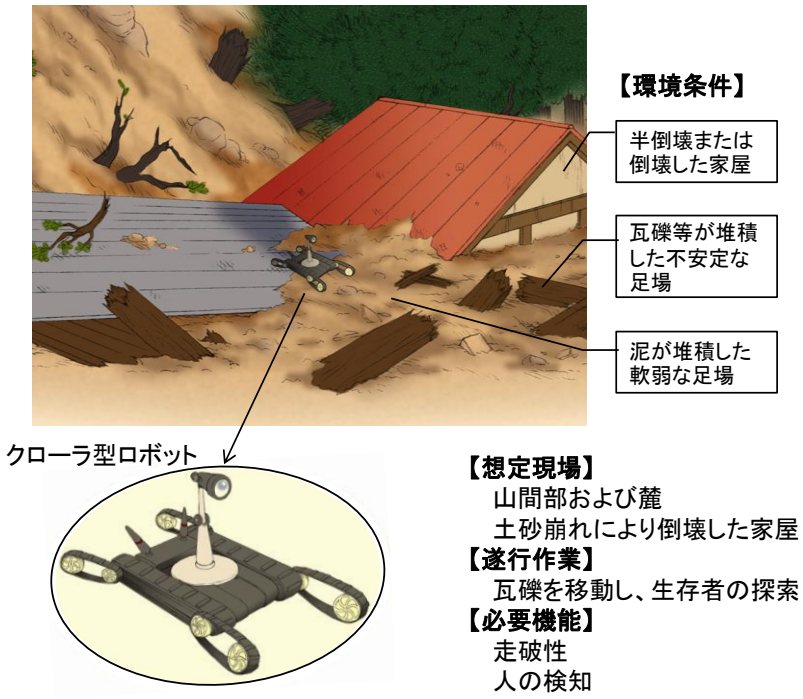


図３－４８ 水害・土砂崩れ災害の倒壊家屋現場でロボットを活用することを想定した評価フィールドのイメージ

（３）土砂崩れにより堆積した土砂・瓦礫等を除去する場面

活動の場面は、油圧ショベル等の重機を用いた、災害直後の緊急性を要する緊急対策工事とその後の復旧工事に分けられる。

緊急対策工事としては、現状調査や走行路の確保、障害物の除去作業等があるが、瓦礫等が散乱した悪路を走行し、危険な現場で作業を行うことが想定されるため、安全な場所から遠隔操作を行う必要がある。遠隔操作では、車体や周囲の状況が把握しにくいことや、無線による信号遅れにより、作業効率が著しく低下するため、車体姿勢の自律安定化や空間認知等の補助的機能が有効である。その他、基地局の立ち上げや周波数帯の確保と整理、現場によっては車体の分解組立が必要である。さらに、広範囲の現場状況を把握する必要がある場合には、UAV（無人飛行体）による空中撮影や地形測量等の事前調査が有効である。

図３－４９　水害・土砂崩れ災害復旧工事現場で無人化施工技術を活用することを想定した評価フィールドのイメージ

復旧工事においても、二次災害の危険性がある現場に対しては遠隔操作が必要とされるが、この場合、周辺住民が速やかに通常生活に戻れるように一層の作業効率の向上が望まれる。緊急対策工事と同様、補助的機能が有効である他、容易に目標地形に仕上げられるマシンコントロール等の無人化施工技術が有効である。飛行ロボット等により災害現場の現況地形を測量し施工図面を作成すれば、その情報をもとにマシンコントロール等の技術を利用した遠隔操作により安全かつ効率的に復旧作業が可能となる。

緊急対策工事の場合、評価フィールドとして例えば土砂崩れ現場を模擬した「瓦礫の散

乱した傾斜地」や「遠隔操作室」といった設備が必要であり、これらの設備を活用することにより各対策工事に対し効率的に再現性のある評価試験が行える。行うべき試験としては、車体安定性や空間認知性能・通信性能・工事立上げ時間等である。また、UAV に関する評価フィールドとしては、ある程度広範囲の飛行エリアが必要であり、試験としては、自然環境下における操縦性や稼働可能範囲の確認、地形計測精度の確認だけでなく、オペレータの十分な訓練を兼ねることも必要である。

復旧工事としては、雲仙普賢岳を試験フィールドとして無人化施工技術が発展してきたが、同様の試験フィールドがあれば、災害現場で作業効率評価・走行性能評価等の実証試験をすることで継続的な新技術の開発が期待できる。また、確実に有事の現場で稼働するためには、災害現場に持ち込む前の先行技術の事前評価は重要であり、復旧工事現場を模擬した評価フィールドも必要である。図３－４９は、復旧工事（土砂崩れにより堆積した土砂・瓦礫等を除去し整地する作業）現場で無人化施工技術を活用することを想定した評価フィールドのイメージ図である。

３－３－２－５　テロ・CBRNE 災害

ここでは、テロ行為等による CBRNE 災害（Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, (Explosive)）を対象とし、事案発生直後の人命救助から復旧までの対処まで、人が近づけず無人機（ロボット）での対応を求められる典型的な分野である。

（１）運用概念

人命救助、被害情報の収集、瓦礫除去等、他との共通項目が多いが、以下のような運用上の特徴が挙げられる。

・特殊な汚染環境下での作業（CBRNE による汚染環境）
・市街地や建屋内での作業
・人が近づけない建屋外からの遠隔操作（中～長距離）
・市街地等、広域のリモートセンシング

また、発生頻度が非常に稀であるため、実際に発生した場合に的確に対処できるための平時の訓練が重要となってくる。図３－５０にロボットの活用イメージを、図３－５１と図３－５２に運用・試験概念図を示す。

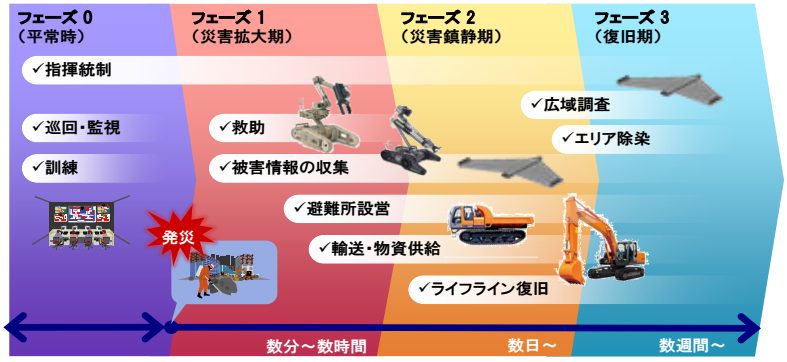


図３－５０　ロボットの活用イメージ

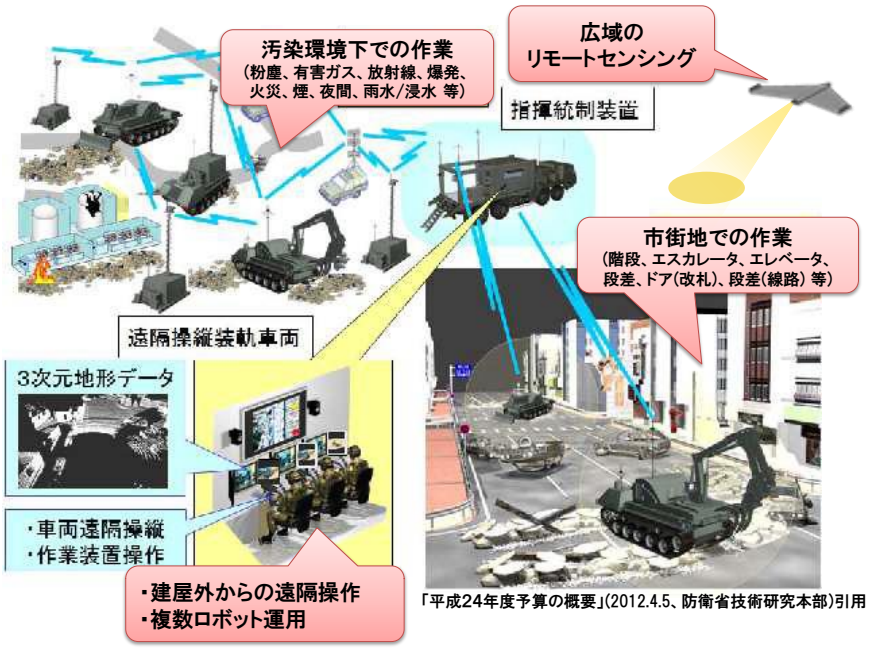


図３－５１　市街地での運用・試験概念図

（１）災害種類

駅やショッピングモール等におけるテロ行為（CBRNE）を対象とし、フィールドとしては、２階建て以上の建屋や地下街を想定する。

・想定現場：公共建屋内部（駅/ショッピングモール等）、公共エリア周辺街路、地下街
・遂行作業：有害物質検知、被害者の位置特定、汚染源の特定、除染、拡散防止
・環境条件：粉塵、有害ガス、放射線、爆発、火災、煙、夜間、雨水/浸水、広域
・評価項目：移動性、耐環境性、操作性（遠隔操作、自律運用）

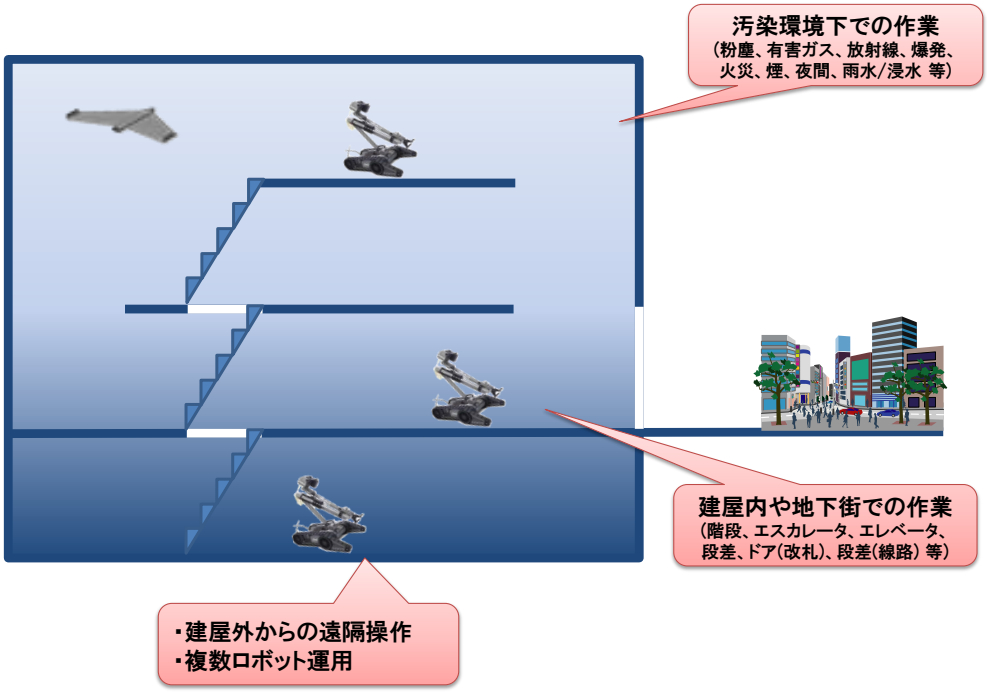


図３－５２　建屋内や地下街での運用・試験概念図

（２）必要機能

必要とされる機能としては、人が立ち入ったり、近寄るには危険と思われる、以下に示すような被災直後から対処までの作業で必要な機能が考えられる。特にCBRNEの特性から、作業の途中や終了時のロボット自身の洗浄による除染や、人が近づけないケースが多いと想定されるため、建屋外からの遠隔操作、複数ロボット運用や自律運用機能が特に必要である。

・現場の状況把握：画像データ取得
・有害物質検知：サンプル物質収集、センサによる検知
・汚染源特定：複数地点でのサンプル物質、センサによる濃度検知
・生存者の位置特定：画像データ取得、センサによる検知
・除染/拡散防止：薬剤散布、汚染源密閉、ロボット自身の除染
・指揮統制：建屋外からの遠隔操作、複数ロボット運用、自律運用機能

また、移動、環境等で以下のような運用上のボトルネックが考えられる。特にCBRNEの特性から、爆発物に関しては、振動による爆発を防ぐため、防振の環境特性が求められる。

・移動：階段、エスカレータ、エレベータ、段差（プラットフォーム）、ドア（改札）、

瓦礫障害物排除 等

・環境：防水、防爆、火災（高温）、放射線、煙幕、夜間(暗闇)、床材質、防振 等

（3）評価フィールドへの要求

上記の項目から評価フィールドとしては、以下の試験が実施できる設備が求められる。詳細は評価表５、評価表６参照。

（機能試験）

・建屋内や地下街での移動が必要なことから、階段/エスカレータ/エレベータ昇降、駅のホームやショッピングモール内の段差、駅の改札や地下街の非常扉等の移動機能の評価
・CBRNE の特性から有害物質検知や試料の収集機能の評価
・状況把握のための映像や 3 次元位置情報のリアルタイムのモニタリング
・汚染源の密閉や起爆装置の破壊
・重量物の運搬
・作業途中や終了時の高圧洗浄等の除染
・爆発物への接近、人への接近、ネットワーク切断時の自律運用等の安全性等、保安基準

（耐環境試験）

・煙、蒸気
・暗闇
・高温/低温
・防水、防爆、耐放射線、
・耐雷、EMC
・通信途絶や狭帯域運用

（耐久性試験）

・連続、繰り返し稼動

３－３－２－６　原子力関連災害

原子力関連災害で活用するロボットは、以下を想定・検討しておくことが必要であり、評価表７、評価表８に整理する。

（1）想定災害

自然災害（地震・津波）、事故（偶発事故や人為ミスを含む）、テロや戦争

→　これらから発生する事象として、爆発・火災・放射能漏れ・施設や機器の破損

（2）活用対象

原子力施設内の主要機器周辺（(例）原子炉容器、熱交換器、主要配管等）と、原子力施設外周辺

（3）原子力関連施設（特に原子力発電所）における特殊性

・放射線環境下の場所がある
・原子炉格納容器のような、外部と完全隔離区域での使用を想定する必要が有る
→小径貫通口（ペネトレーション）が外部とコンタクト。動力・信号線はこれを使用
→エアロックのような２重扉を通過。開閉操作が必要、かつ、狭隘で複雑な形状であることが多い
・施設内部は人が動き回れる程度の大きさで設計されており、大空間は限られた場所のみ

（4）ロボットに求められる性能

前記特殊性に関連した項目を含む、以下性能をロボット設計に反映・検討しておくことは、実運用時に非常に有益である。

・放射線環境下での使用を考慮
・ロボット自身が汚染した場合、除染しやすい構造設計　　（例）丸洗い可能
・ロボット内部が汚染しない構造設計　（例）完全密閉構造、適切なフィルタの使用
・ロボット自身の除染が不十分な場合も想定し、メンテナンスを容易とする設計
（例）車輪やクローラのワンタッチ交換、バッテリのワンタッチ交換
・廃棄する際、小さな部品に簡単に分解可能であること
・部品点数や種類の削減と共通化
・防爆構造
・有線の場合、ロボットと操作系との接続方法（ペネトレーションの利用法を含む)。ケーブル巻き取り機構等の有線処理機構
・無線の場合、中継器の必要性と、必要時の設置方法。無線到達距離・エリアの確認
・狭隘空間での使用を想定した小形軽量設計
・複数台による協力、協調作業（離れた位置からの目視や扉等の保持等）も考慮した設計

（5）災害時にロボットが行う想定作業

災害時には必要な作業を遂行するために対象部位へ移動到達することが極めて重要になり、まずは目的地へ行くという作業が共通で必要である。

福島第一原子力発電所の状況では、ロボットにさせたい作業や要求仕様は、現場作業の

進捗状況に応じて常に変わるため、具体的作業を特定し準備することは困難であった。
将来の災害においても同様の状況になると予想されるため、今回の福島の状況や過去の類似災害から作業を想定する必要があり、例えば以下のようなニーズがあると考える。そのイメージを図３－５３に示す。

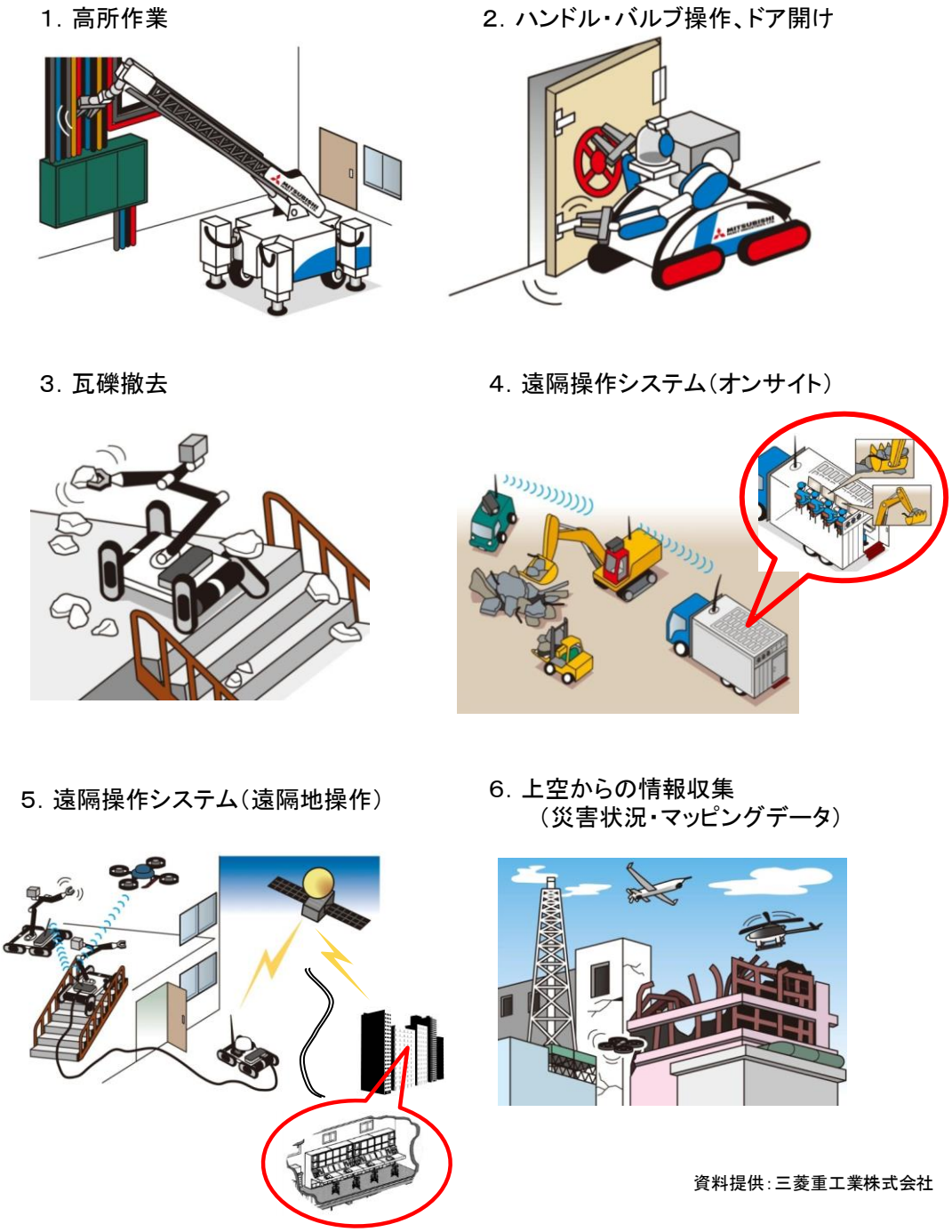


図３－５３　原子力災害現場でのロボット活用イメージ

・目的地への移動
・目視、偵察
・上記達成のためのドア開け通過、別フロアへの移動、瓦礫や異物の撤去
・除染方式決定のためのコンクリートサンプリング（床や壁からドリルを用いて小片を採取）
・除染
・遮へい材の運搬、設置助勢
・バルブ開閉
・配管や手すりの切断・撤去及び、仮配管の接続
・原子力施設周辺の監視及び探索（空中・水中・陸上）

（6）機能検証設備とロボット評価

原子力関連災害用ロボットについて、以下の機能検証案が考えられる。今後は、これら項目の洗い出しを継続することで拡充し、その優先順位や必要性、実現方法をさらに検討し、実現させることが有用である。

・耐環境検証
　＊耐放射線環境（耐放射線）
　＊揮発可燃性ガス環境（防爆）
　＊温度、湿度（耐温度衝撃、耐高湿度）
　＊降雨及び水没（防水）
　＊落下（耐落下）
　＊衝撃（耐衝撃）
・移動性能検証
　＊不整地、段差、階段、梯子、空中（飛行）、水中（遊泳）
　＊曲がり角、狭隘通路、各種扉やドアの通過
　＊通信手段の確保（無線有線）
・メンテナンス検証
　＊消耗品部品交換（要する設備、人員、時間等の評価）
・ロボット操作性検証
　＊オペレーショントレーニング
　＊オペレータの疲労、負荷、ミッション達成に要する時間

（7）オペレータの資格・条件

以下の各項目について必要性を検討し、要すればルールを制定する。
　・免許（受験資格、試験機関、他）

・技能講習（受験資格、講習機関、他）
・特別教育（受験資格、教育機関、他）
・認定講習（受講資格、講習機関、他）

（８）ロボットの性能認証試験

認証試験の必要性を検討し、要すればルールを制定する。

（例）認証試験取得の有無　→　認証無、民間認証、国家認証、国際認証

参考：MIL 規格に準拠した耐久性・防滴性・防塵性

・温度試験・動作温度: -20° C ～ 60° C・非動作時: -30° C ～70° C
・温度衝撃試験・急激な温度変化に耐えることができること
・湿度試験・暖かく高湿度な環境に耐えることができること
・衝撃試験・衝撃に対して耐えることができること
・落下試験・鉄に 1.52m から 26 回落下に耐えることができること
・振動試験・振動に対して耐えることができること

（９）平時（通常時）に原子力発電所でロボットが行う作業

原子力発電所では、安全な運転を継続させるために定期的な保守点検をする事が義務付けられている。保守点検作業は人による作業が多いが、高放射線環境、水中、狭隘等の理由から、人に代わってロボットが用いられる場合も多い。具体的には非破壊検査や切削及び溶接のような補修作業である。

これらロボットは、健全な発電所において特定の目的に使われる専用ロボットであり、災害時に応用可能な機能性能を有していないため、そのまま災害時に適用することは不可能である。

しかし、原子力発電所内での作業ロボットは、放射線環境下、汚染環境下での使用を前提に設計しており、このロボット技術を災害用ロボット設計に反映させることは可能といえる。

また今後は逆に、災害用ロボットを平時に使用するという考え方が重要になると考える。災害対応ロボットをいつでも出動できる状態で維持しておくことは極めて重要である。そのためには、ロボットを定期的に動作させ、故障の有無確認や消耗品の交換を行うと共に、ロボットオペレーションやロボットメンテナンスの技術伝承が必要不可欠である。しかし発生頻度が極めて少ない（または発生しない）災害に対応するロボットを、最良の状態で維持し続けるためには、関係者の努力では継続は困難であり、なんらかの仕組みが必要である。その解決策として、ロボットの平時利用は有効な考え方となる。

しかし、現在の原子力施設は、人が運転管理することを前提に最適化された設計であり、災害用ロボットの運用を想定した設計にはなっていない。従って現在稼働中の原子力施設において、ロボットの平時利用として有効な活用シーンは、簡単には挙げられないが、ま

ずは施設内の目視点検が適当かつ導入のハードルが低いといえる。

以上から、原子力施設の点検業務として、現在の人による点検に加え、ロボットも用いるルールを定めることで、真の意味で災害ロボット配備による「万が一の備え」につながるといえる。この実現には費用負担が生じるが、これを当該事業者のみが負担するのではなく、その施設を使うことで恩恵を被る人すべてが負担（例えば対象施設が原子力発電所であるなら、電気利用代金に上乗せ）すべきと考える。

なお“平時利用”とは、明らかに人が行うほうが合理的な作業であっても、人に代わってロボットにさせることを意味するのでは無く、普段からロボットのオペレーションやメンテナンスを継続・伝承するために必要な営みを意味する。したがって、例えば通常は人が行う施設内の目視点検に加え、週に 1 度はロボットでの点検も合わせて実施するという運用や、人の作業代行にこだわらない“ロボット運用訓練”も平時利用である。

このように、平時には、実施形態を問わず、継続的にロボットが運用される仕組みを必ず付帯することが重要である。

３－３－２－７　プラント災害

（1）プラントとその周辺での災害対応ロボットの役割

プラント及び工場設備において、地震や津波などの自然災害や、倒壊、火災などの産業事故の際、最も懸念されるのは、毒性・引火性のある、ガスや液体の漏えい、飛散、さらにそのリスクの顕在化である火災、爆発などの危険事象である。そこで、ここでは災害時に前記の危険事象が想定される精油、石油化学、化学、製鉄、発電等のプラントを対象として考える。自然災害以外でも、例えば石油コンビナートの特定事業所における火災、爆発、漏洩事故は全国７１５事業所の中で、地震の影響を除いても、年に２０４件発生している[57]。今後さらなる防災努力で、プラントにおける『非自然』災害は低減されるべきだが、老朽化の進む我が国のプラントの実情では避けがたい面もあり、大きな自然災害以外でも災害対応ロボットの利用機会が考えられる。

図３－５４　災害発生時に人に代わって初期対応をするロボット（ヒューマノイド型）

災害対応ロボットには、図３－５４に示すように、倒壊や、毒性ガス、火災への曝露がありえる危険な場所へ、人に代わってアクセスして、漏えいや損害の状況を撮影、報告し、可能であれば被害拡大を防ぐためのバルブ操作等の漏洩の抑制作業の能力が期待される。災害対応ロボットセンターを設立することによって、これらの機能開発の支援と、合わせて平時の保守点検活動への転用など、プラント点検ロボットの開発の推進のためにも、以下に述べる評価機能を作ることが必要である。平時の点検で、プラントの脆弱箇所や不具合の改善は、災害時の被害低減効果も期待されるからである。

（２）前提となる災害とそれに対応するロボットの種類

アクセス困難となっているプラント災害エリアで調査、作業するロボットを以下のように想定する。

・瓦礫等の不整環境を移動するクローラー型、多車輪型ロボット
・梯子昇降による垂直移動や、配管跨ぎ等の不連続面移動が可能な２～多脚式ロボット
・狭隘環境や水中へ進入する車両型、ヘビ型、棒状等のロボットやデバイス
・高所アクセスのための固定翼・回転翼の飛行ロボット、浮力型空中ロボット
・水中移動の浮遊型、スラスト型等ロボット
・壁面、天井裏等の立面へアクセスする吸着ロボット、吊下げロボット

図３－５５、図３－５６にその一例を図示する。

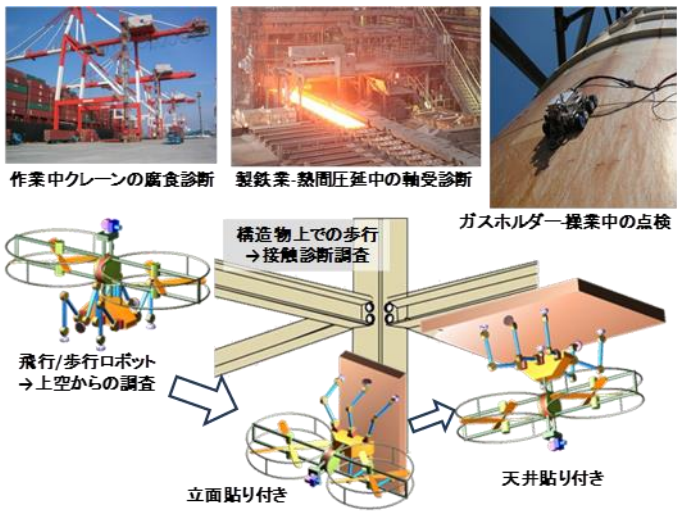


図３－５５　高所、リスクの高いエリアに迅速に進入して点検・補修するロボット（空中/吸着型）

図３－５６　狭隘・複雑環境で点検・補修するロボット（他機能走行型）

（３）プラント向け災害対応ロボットが具備すべき機能と、その検証方法

ロボットによる、プラントの保守と災害時の対応を評価表９に、その要素機能の試験の項目と評価量をロボットの形態毎に整理したものを評価表１０に示す。その概要は下記の通り。

①発災後の時間軸に沿った期待される作業。

・発生直後：状況確認（映像、ガス・液等漏洩物の濃度等）、漏洩箇所の特定、被害拡大を防ぐ機器操作
・復旧作業　：損傷状況の確認、マップ生成
・平常時　：設備の健全度の調査、計測（亀裂、減肉、デブリの堆積等）

②作業遂行に必要な機能（主要な項目）とその試験方法

○アクセス性（現場寄り付き）／移動能力：移動試験、操縦試験（時間、距離、安定性、持続性…）
○検出能力（計測診断）、情報統合能力：倒壊や亀裂など損害を模擬した状況での接近、撮像、探傷、厚み計測、周囲や特定対象からのサンプル採取試験（ロボット化している場合は遠隔作業前提での評価）
+ある程度の広さの試験環境での自己位置推定能力（3D データからの位置・地図推定）や、損傷状況判定能力の試験
○作業能力：作業前段取り（点検センシングの妨げとなる対象物のほこりや油、自身のセンサへの付着物をふき取って計測可能とする能力の試験）、作業の妨げとなる周りの障害物・自身の牽引するケーブル等の除去、処理、さらに弁操作、SW 操作等の防災作業の遂行能力試験
○運用：現場での運用に必要な試験項目（ロジスティクス、充電時間、起動時間、稼働時間、移動範囲、耐久、保守作業時間）

○耐環境性、耐久性（ロボットの自己保全性）：防塵、防水、防爆、耐熱、防爆試験、落下、被雷などの耐久性、繰り返し数での耐久性。（破壊試験と、非破壊試験法の両方を検討すべき）

○安全性：一般的な機械、装置と同様の安全性に加え、通信遮断や暴走などの異常が発生しても、作業者や設備、生産活動に危害、破損、障害をもたらさないことの確認試験

③プラント向けロボット特有の対応課題

保守点検用途での使用では高圧ガス事業法、建築事業法、消防法などによる検出能力の確性、防爆規格などの設計安全性など、法的規制が存在する場合がある。また平常時点検では、対象物の積年の表面付着物、プラント特有の環境側へのセンサ埋め込みなどの環境改変などへの対応能力が求められる。

（4）試験設備とその数量イメージ

上記の試験項目の実行のフィールドとして、災害対応ロボットセンターを設立し、試験設備を設置すべきである。

プラント分野では、対象事業所が国内に 1000 程度あり、各事業所に複数台数配備して数年おきの検査・機能調査を想定すると、年間に数千件、数百種の評価試験が必要となる。温度や環境、ガス含有、高度や風などのプラント近傍を模した、コスト負担の大きい環境条件で、各種の形式のロボットを試験し、公平に比較するには、公共の専用テストベッドを準備して、従量制の費用負担システムとすることが開発促進に必要である。各企業の製造ノウハウに触れずに、試験環境を構築することも重要である。全体では、全国レベルのテーマパークのような多様性と規模が必要であろう。

①標準機によるもの（いわゆる“積み木箱”）：NIST 規定同様。10 種余の陸上移動用コース、数種の水中用サイト、空中用エリアが必要でセンター内 1 式。（国際レスキューシステム研究機構既設利用）

②実際のプラントの一部を移築して使うもの（リアル・モック・アップ）；我が国の産業、インフラ状況を反映させた形状と種類。センター内に数～十数種類。（工場建屋、塔槽類、配管、コンベア…）

③現実のプラントにおける設備の表面性状（濡れ、錆び、ほこり）、粉塵や暗闇など操縦の妨げとなる状況、などの再現性も具備すべきである（試験設備の制御性能）；環境制御チャンバーを数個。

模擬走路装置

模擬倒壊建屋装置

リアルモックアップ（塔槽類）

図３－５７　先行する米の試験設備　（NIST と Disaster City の施設）

（５）補足とさらなる提言

・図３－５７に示すようにロボットの相対的、定量的評価のための“積み木”モックアップと、現実の現場での機能確認のための、リアルな、現実再現的なモックアップの両方が必要である。

・定型的な“積み木モックアップ”は国際レスキューシステム研究機構の施設（神戸）などの既存品を活用すべきである。また試験設備のスペック等を公開し、ロボット開発者が自社で再現し試験すれば開発の効率化に役立つ 。ロボットセンターが販売しても良い。

・現在の防爆規格は構造規格であり、新たな移動ロボットでは、狭隘環境進入などの目的のため、防爆達成との両立は困難な構造規格となっている。構造的な規制とともに、引火性などを性能評価するような試験によって機能的に認定する規格体系が必要で、当面、専門の調査機関等を設ける等にて実証実験し、段階的な規格化を図る工程を検討すべきである。

・防爆機能では、ロボット特有の手法も検討、開発すべきである。例えば、電気的発火エネルギー（静電気等）の蓄積防止機能、接触でも火花を発生させない新材料等。また機能安全的に、特定のエリアでは引火物をセンシングして潜在爆発エリアを見つける・報告する・その際に自らは引火エネルギー以下で行動するモードに変化する、などの“機能的防爆手法”の開発が考えられ、後述の災害対応ロボット技術センターで率先して開発すべきテーマである。

・点検ロボット等の機能向上のみならず、RFID センサを設備に張り付け、ロボットが

近づいて計測を行う手法（遠隔モニタリング）等の環境側の改善による効果を図る実験のため、モックアップ側の改造改修が可能であること。

・ロボットが高所に昇っての試験も想定されるので、試験設備内に落下、逸走の防止機能が必要であり、当然ではあるが試験そのもののリスクの制御が必要である。

３－３－２－８　水道・下水災害

（１）下水管路施設

本分野で想定される災害は地震、液状化現象に起因する機能障害である。下水輸送機能の主たる設備である下水道本管、マンホール、取付け管などの排水施設を検討対象とした。なお処理場関連施設は検討対象より除いている。

１）道路交通障害

道路交通障害は、マンホール浮上、下水本管破損に起因する道路陥没により発生する。マンホール周辺の土砂流ぼう孔への人の落下などの人的被害の最小化や復旧重点箇所の特定のためには、早急かつ正確な状況把握が必要である。図３－５８に示すような UAV（無人航空機）の活用が有効であるが、長距離・長時間飛行、遠隔操作性、ホバリング安定性能、３D マッピングの精度向上、夜間飛行、風雨環境下飛行及び複数人同時制御による操作ネットワーク技術の構築に課題がある。評価フィールドとしては陥没した模擬道路、浮上したマンホール敷設した施設が必要である。

図３－５８　UAV（無人航空機）と航空写真・３D マッピング

２）下水流下障害

下水流下障害は、管路のたるみ、本管、マンホール、取付け管継目損傷部からの土砂流入により発生する。災害による管損傷が激しい場合人手による復旧作業には二次災害発生のリスクがあり図３－５９、図３－６０のようなロボット技術が有効。また中小口径管では人手による復旧作業は不可能である。状況把握のための管路内自走式 TV カメラや画像展開カメラ、残存強度を計測するための衝撃弾性波ロボット、被災箇所特定のための管路内３D 計測ロボット、及び復旧のための土砂洗浄・除去ロボットや管路更生製管機ロボットなどの技術が有効である。これらは一部平時には適用されているが、災害時の劣悪環境下に対応できる機能の付与が必要である。例えば管路内段差の乗り越え、斜面での安定走行、障害物の除去、また高温環境下、高湿度環境下（濃霧）でも正確な作業を可能とする機能

が必要である。評価フィールドとしては、土砂で埋まったマンホール、損傷した管路及びたるみ、蛇行、段差を有する模擬管路施設（流水機能付き）が必要である。

図３－５９　土砂除去ロボット、衝撃弾性波ロボット、管路内３D 計測ロボット

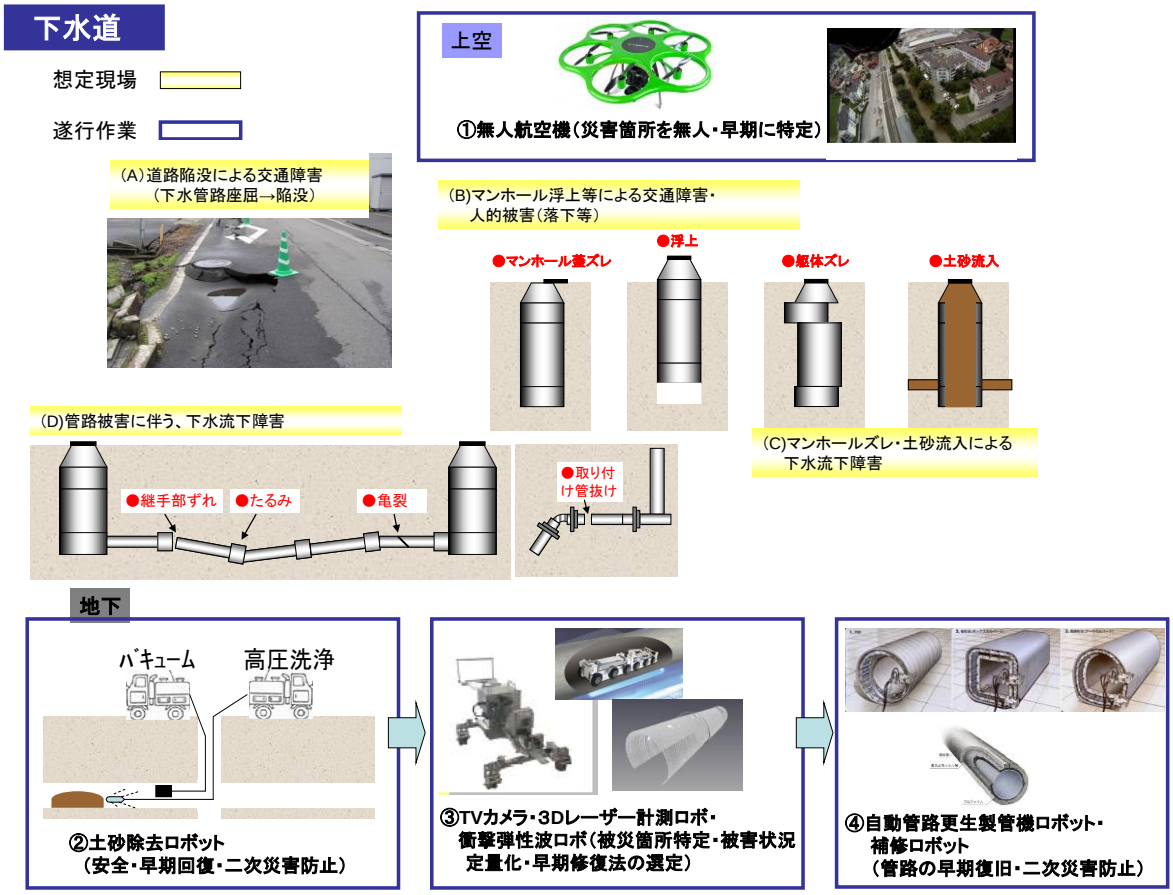


図３－６０　災害現場（下水道）でのロボット活用イメージ（水道・下水災害）

３）平時の維持管理の重要性

下水管路施設は高度成長期から構築されてきたインフラ施設であり、老朽化が進行している。災害時の機能障害を最小化するためには、平時の維持管理も重要で、①埋設位置や埋設管路の仕様に関する情報、②老朽化度と残存寿命に関する情報、③更生・更新の必要時期と仕様などの情報の管理が必要である。平時維持管理においてもロボット技術は有効

で（特に中小口径管路)、管路３D レーザー計測システム、マッピング技術、管内 TV カメラ、衝撃弾性波ロボットなどがある。また老朽化した管路復旧を低コストで実現する管路更生ロボット技術が有効である。これらの精度向上と高速化に向けた検討が重要であり、評価フィールドとしては老朽化した模擬管路が必要である。

（２）水道管路施設

本分野で想定される災害は地震や老朽化破損により発生する圧力水噴出しや、その水噴出により生じる路面二次災、管路破断による給水機能障害などがある。水道輸送機能を担う導水管、送水管、配水管路を検討対象施設とした。なお浄水場などの施設は検討対象外とした。

１）圧力水噴出しによる路面二次災害

圧力管路が破損すれば管路周辺や地表面に圧力水が噴出し、埋設土砂流亡、空洞化による道路陥没や舗装の浮上等による道路交通障害をもたらす。人的被害の最小化、復旧重点箇所の特定のためには、早急かつ正確な状況把握が必要である。UAV（無人航空機）の活用が有効であるが、長距離・長時間飛行、遠隔操作性、ホバリング安定性能、３D マッピングの精度向上、夜間飛行、風雨環境下飛行及び複数人同時制御による操作ネットワーク技術構築に課題がある。また流出した水道水により生じた空洞箇所特定については、地中レーダー計測ロボの活用が考えられる。評価フィールドとしては陥没した道路や、空洞を再現できる埋設管路施設が必要である。

２）漏水・断水被害

管路破断により必要な給水機能（消火用水、飲料水、工業用水など）が失われる。応急的な対応としては、給水車や仮設配管での緊急輸送が挙げられるが、人力による対応が主となる。その後の復旧に向けては、①正確な被災状況把握、②補修、更生のための図３－６１、図３－６２のようなロボット技術が必要で、①については不断水ＴＶカメラ、漏水箇所特定のための音響検知ロボ、管の肉厚や残存強度を推定するための超音波測定ロボットなどが挙げられる。

また②については、自動溶接ロボット（鋼管継ぎ手部)、圧力管路更生ロボットなどが挙げられる。これらのロボットがもたらす効果としては広域・迅速な調査、人命に関わる二次災害発生の防止、非開削による復旧作業などであるが、閉塞箇所の走行性、水圧下走行性能、口径管種対応に課題がある。またこれら被災の程度は施設の老朽劣化により拡大され、平時の維持管理が重要である。

評価フィールドとしては老朽化・破断・漏水を再現した模擬埋設管路（長大管路、管種別口径別、曲管配置)、更生用模擬管路が必要である。行う試験項目としては①については画像分析の解像度評価、肉厚計測（腐食減肉厚）の精度評価、漏水箇所の精度評価など、

②については、補修速度、圧力管ライニング更生速度、口径対応、補修品質評価などが挙げられる。

図３－６１　管路内撮影用 TV カメラ、漏水箇所特定ロボット、圧力管更生ロボット

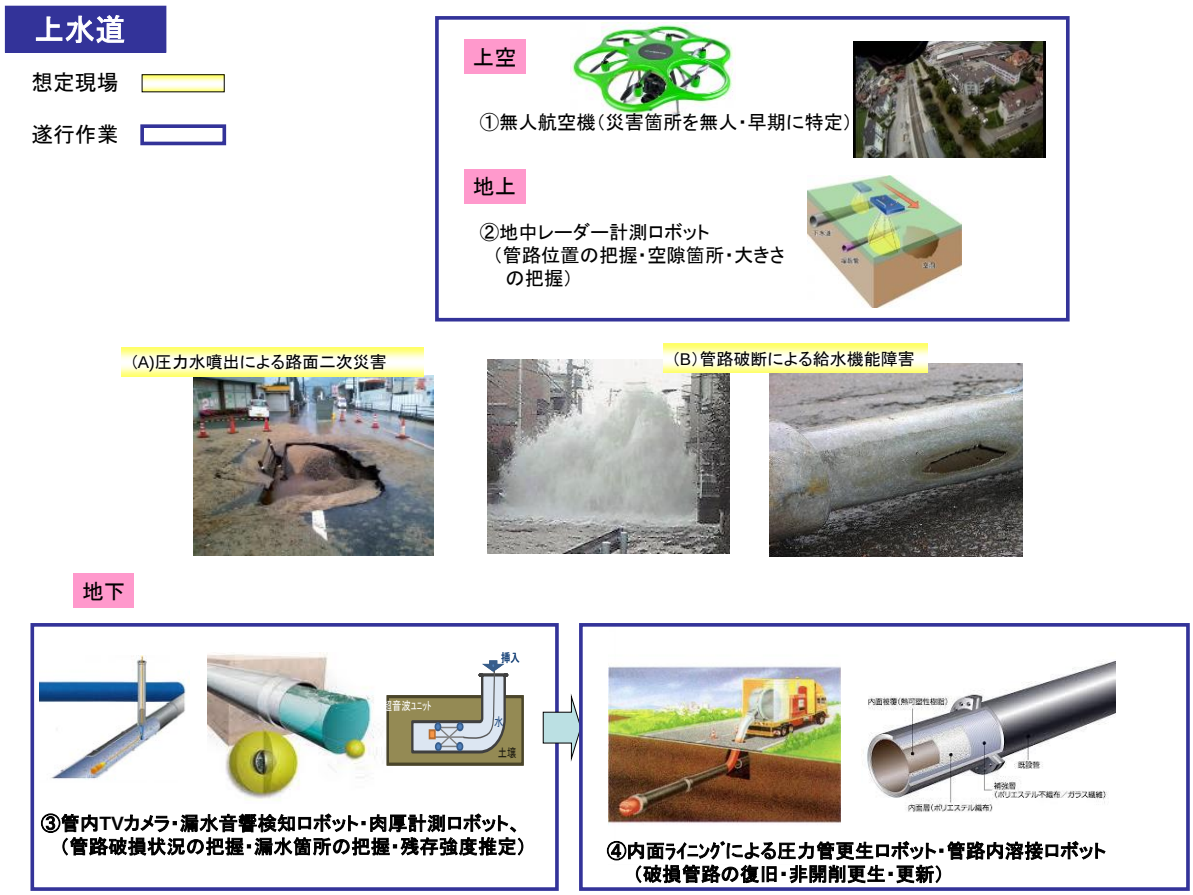


図３－６２　災害現場（上水道）でのロボット活用イメージ（水道・下水災害）

なお、評価表１１に想定災害とロボットとの関連細分表を、評価表１２に試験項目細分表を示した。

３－３－２－９　模擬現場や現場を使った性能評価・認証の事例

（１）NIST による要素性能評価・認証の国際標準化の事例

NIST（米国商務省標準技術研究所）は、2000 年頃から地上走行型災害対応ロボットのフィールド評価基準及び評価法の研究を国内外のユーザやメーカや研究者との連携により進め、ASTM 標準として性能評価法の国際標準を策定してきた。

その目的は、災害対応機関の調達と配備の判断基準を定量化すること、共通の試験評価と目標設定によってロボットの性能向上を図ること、操作者の熟練度を測り熟達者との比較を行うための基準を提供すること、にあり、それによって災害対応ロボットの産業競争力強化を図ることを目的としている。

これまでに全世界 4 カ所（米国：NIST、Southwest Research Institute、ドイツ：Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung、日本：国際レスキューシステム研究機構（神戸市））に試験フィールドが設置されている。米国では、爆発物処理ロボット等の調達や、DARPA Robotics Challenge などのプロジェクトの評価に活用され始めている。

（２）安全性評価・認証の事例

安全性評価・認証の事例として、ここでは生活支援ロボット実用化プロジェクトおよび生活支援ロボット安全検証センターについて紹介する。

生活支援ロボット実用化プロジェクトは、NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が平成２１年度から２５年度の５年間で研究開発を実施しており、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野における社会的課題の解決策の一つとして期待されている生活支援ロボットを対象としている。この生活支援ロボットは、不特定多数の人が関与するような使用環境下で稼働することが求められるが、まだ対人安全技術等が未整備であり、残留リスクへの対処法も確立されていないため、企業独自の取組のみでは、本格的な産業化には限界がある。さらには、安全性評価に関する試験機関・認証機関、安全基準に関する国際標準等を整備することが必要である。そのため、本プロジェクトでは、国際標準化 ISO　TC184SC2 へ提案をしつつ、ロボット企業と一体になりながら、安全技術を実装したロボットの開発とその試験方法などを同時に議論して研究開発を進めている。また、生活支援ロボット安全検証センターは、本プロジェクトの拠点であり、機械・電気・機能安全に関する各種試験等の活動を行う場である。当センターは、①走行試験関連、②対人試験関連、③強度試験関連、④EMC 試験関連の各エリアから構成され、それぞれの安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施している。通常の規格・認証と、生活支援ロボットなどの新しい技術の規格・認証との大きな違いは、新しいロボット（技術）ができる毎に、その安全性をどのように試験・評価し、認証としてユーザとロボット企業の間に安全についての合意を形成するかという点である。

災害対応ロボットにおいては、安全性はさることながら現場に適応できるか否かの性能

評価が重要であり、その性能をどのように試験・評価し、如何に認証としてオペレータとメーカが合意形成できる評価基準を策定できるかが重要であると考える。なお、国際標準化機構（ISO）への提案が採用され、2014 年 2 月 1 日に生活支援ロボットの国際安全規格 ISO 13482 が発行されている。

（3）無人化施工の事例

1991 年 6 月に発生した雲仙普賢岳の大規模火砕流により 43 名の尊い命が奪われた。火砕流や山の崩落といった危険を伴う雲仙普賢岳の災害復旧工事においては、有人作業では工事に限界があるため、安全な場所からカメラ映像を見ながら建設機械を遠隔操作して作業する無人化施工の機運が高まった。

1993 年 7 月国交省(当時は建設省)は、「試験フィールド制度」を適用して民間会社から無人化施工の技術提案を募った。公募のテーマは「土石流発生後に遊砂地等において緊急除石を実施するため、無人化により土砂掘削・搬出を継続的に行う一連の技術」である。フィールド性能評価の要求技術水準を以下に示す。

①直径２～３ｍの岩破砕が可能であること。

②外周条件として一時的には温度が 100℃、湿度が 100%程度でも運転可能なこと

③100m以上の遠隔操作が可能なこと

この公募に対して 34 社 45 件の応募があり、現場への対応が適切であると考えられる 12 社に対して更に施工計画が求められた。最終的には 1993 年 1 月に 6 社が選定され、無人化施工が本格的にスタートした。

この試験フィールド工事の成功を受けて、雲仙普賢岳の災害復旧工事は現在まで継続して実施され、無人化施工の技術開発は飛躍的に進み、徐石工事からコンクリート構造物の築造までが可能となり、適用範囲を拡充させ技術の完成度を高めている。

３－３－３　模擬現場における性能評価試験法の活用

以上述べたように、特殊環境用ロボットの研究開発において、模擬フィールドや実現場を活用した性能評価試験を行いながら進めることは必須であり、それによってはじめて実用化に結びつくことができる。

しかしながら、フィールド性能評価は研究開発そのものはもとより、以下に述べるように、様々な活用が可能である。

３－３－３－１　ロボットユーザの訓練と育成

ロボットが期待される性能を十分に果たすためには、ユーザの使い方が適切でなければならず、めったに起きない災害のような問題においては、ユーザの訓練が重要である。さらには、訓練を通じて新しい使い方をユーザ自らが開発していくことは不可欠である。そ

れは、ロボットの実質的な性能を上げることと等価であり、多様な現場要求への適応を可能にする。さらには、訓練によって、現場で不足する性能等を明らかにし、ロボットやその使用法の研究開発にフィードバックすることも重要である。

ユーザ訓練項目としては下記のようなカテゴリが考えられ、自動車の運転免許制度に代表されるような総合的な制度化が望ましい。

（1）ロボット操作法の訓練

基本操作法（機能、使用場面、状況認識、制約、限界、留意事項など）の習得、典型的な個別場面（平地・階段など）での円滑な操作と判断、典型的な制約条件下（遠隔、暗闇、狭所、汚染場所、爆発性雰囲気など）での円滑な操作と判断、複合場面・条件での操作法、などを習得することが必要である。

１台のロボットを操作することによって、手順が定められた想定ミッションを果たすことが目標となる。これは、自動車運転免許になぞらえれば、仮免許取得までの段階に相当する。

この段階では、個別の模擬評価フィールド（NIST の評価フィールドなど）を使用したり、シミュレータを活用したりしながら訓練を進めることが望ましい。

（2）ロボット使用法の訓練と熟達

この段階では、１台のロボットを操作することによって、手順が不明な想定ミッションを自ら工夫して果たすことが目標であり、応用問題を解くことが１）とは異なる。自動車運転免許では路上教習の段階に相当する。

これによって、ロボットの使用に習熟することが必要であり、現場で予想される様々なシチュエーションに即時に対応し、緊急時や極度のストレス下であっても適切な使用ができるようになることが求められる。ロボットが操作者の体の一部と感じられるまで習熟できることが望ましい。さらには、問題を解くためのよりよい方法論を自ら柔軟に考案し、訓練や現場使用の過程で自ら成長していける素地を作ることが必要である。

この段階では、実現場での操作による訓練が望ましいが、それが困難な問題については、災害空間を模擬したフィールドが必要である。

（3）ロボット運用法の訓練

現場ミッションで求められることはロボットの操作ではなく、チームや組織としての問題解決である。したがって、チームでの操作訓練（複数のロボット・人間の協力、操作者・観測者・指示者・統括者・ロジスティクスなどの役割分担、ロールプレイイングなど）を種々のレベルの想定ミッションによって行い、また、ミッションのよりよい完遂方法を工夫する運用訓練を行うことが必要である。

災害空間模擬フィールドにおける訓練はもとより、実際の災害現場への適用によってス

キルを向上させ、極限環境下でも適切な運用ができるような訓練を行うことが必要である。

（４）ロジスティクス・メンテナンスの訓練

現場への運搬、セットアップ、撤収、補給、検査、メンテナンスは、ロボット運用において重要であり、訓練が必要である。運用のためには、現場の２倍の人数が必要だとの分析もある。

（５）必要な知識の教育

ロボットの点検やメンテナンスはもとより、適切な操作や使用のためには、技術的な知識を持たなければならない。運用は法令や規則に基づいて行われるため、十分な知識を持つことが必要である。たとえば、法的に可能なことや禁止されていること、運用のために必要な手続き（申請、合意形成など）を知ることが重要である。海外での運用のためには、国外法令を知ることも必要である。安全は留意すべき重要事項の一つであり、技術的および法的な知識が必要である。

（６）教育訓練法の習得と開発

災害は多様であり、ユーザによって想定すべき事象や環境が大きく異なっている。そのため、望ましい教育法や訓練フィールドもそれぞれのニーズに応じた工夫が必要である。災害予防や復旧などには多数の運用者が必要であり、それを育てるための教育訓練法を習得することや、新たに開発していくことが求められる。

（７）訓練競技会と資格認定制度

訓練を効果的に進めるためには、目標を明確化し、競争原理を持ち込み、人並み優れた名人を育成することによって、運用者の目的意識を高めていくことが重要である。レベルやカテゴリに応じた資格認定制度を作ることが必要である。

（８）国際協力、災害分野間協力

災害はめったに起きないため、対応能力向上のためには、国内に閉じた運用は望ましくない。海外への人道支援を通じて多種多様な経験を積むことが必要である。また、各災害対応組織がその本来の守備範囲への対応にとどまるのではなく、ジャンルを超えた協力を行うことによって、経験や情報の流通を活性化することが必要である。そのために必要な協定や、資格の標準化を進めることが求められる。

３－３－３－２　安全性・防爆・耐放性・除染性の評価・認証

（１）安全性の評価・認証

３－３－２－９において、安全性評価・認証の事例を述べているが、災害対応ロボット

も同じようにサービスロボットに分類され、対人安全技術等の整備や、残留リスクへの対処法の確立も必要である。特に災害対応ロボットでは、非常時における特殊な環境下における調査や作業などを行うことになるため、その環境と目的に応じたリスクとベネフィットが明らかでないと使用が困難となる。その意味で、災害対応ロボットの安全基準の策定は、開発者側、使用者側にとって非常に重要といえる。災害対応ロボットの安全基準の策定については、[58] に見られるように、早急に取り組むべき課題であり、国際標準化も重要である。対象となる災害の種類や規模、それに対応するロボットは、多種多様になる。そのため、安全基準や安全性の評価は、それぞれに許容されるリスクのもとに、最大限機能を発揮できるようにすることが必要であり、性能や機能の評価と一体化した安全評価が求められると考えられる。また、フィールド性能評価における訓練によって、使用者がロボットのリスクを認識することが可能となり、開発者にとっても、リスクとベネフィットのバランスを考慮し、使用者や周辺に対する安全技術の整備や残留リスクへの対処法の確立も進むと考えられる。さらに今後は、災害対応ロボットに対する安全基準や安全性評価の国際標準化活動を推進していくことが必要である。

今回、安全性評価に関する専門家に、災害対応ロボットに対する安全性の評価認証の必要性などについて、コメントをいただいた。その要点を以下に示す。

- ・欧州においては、橋梁の点検などに使う機械は機械指令の対象
- ・非常時の災害対応ロボットについては、医療機器などと同様、リスクとベネフィットのバランスが重要
- ・平時のインフラ点検ロボットは業務利用のため、労働安全衛生法第 28 条の 2 に基づき、残留リスクと対応方策等を使用者に伝える義務がメーカ等にある
- ・災害対応ロボットや、平時のインフラ点検ロボットは、災害対応ロボットセンターにより事前に安全認証をして残留リスクを明らかにし、広く国民に同意をとることが必要
- ・安全性の評価は合理的予見可能な誤使用・故障も考慮する必要があり、そのためには実環境か実環境の特性を十分に反映した環境で試験する事が必要で、災害対応ロボットセンターで環境設備を持つことは重要

（2）防爆の評価・認証

防災ロボットの現場適用においてしばしば問題となるのが防爆性能である。国内においては労働省告示防爆構造電気機器、および、工場電気設備防爆指針、国際的には IEC60079 などの防爆規格が定められており、本質安全防爆、樹脂充填防爆、耐圧防爆、内圧防爆などの防爆構造がある。これらの規格は主として設置された電気設備を対象として定められており、下記の点で小型ロボットのような移動する機械装置のためには十分とはいえない。

1）機械的発火源等、電気的原因によらない爆発に関する規格化や技術検討が不十分であ

る。そのため、防爆認証が得られても、正確に爆発の可能性を定量的に知ることができない。

2）小型ロボットに有効な内圧防爆や耐圧防爆の詳細にわたる分類や、定量的な規格化が不十分である。そのため、ゾーン０（爆発性雰囲気が通常の状態において、連続して又は長時間にわたって、もしくは頻繁に存在する場所）では、一律に使用することができず、ゾーン１（通常の状態において、爆発性雰囲気をしばしば生成する可能性がある場所）では、一律に使用可能であるなど、ラフな判断しかできない。また、ロボットの重量やサイズを必要以上に大きくする必要が生じ、著しい性能低下をもたらす。ゾーンの定義も曖昧である。

3）国内規格が国際規格と一致していないため、国内検定品が海外で使用できず、国外検定品が国内で使用できないなど、輸出入の障害となっている。また、我が国が防爆規格に関する標準策定に関して、世界で主導的な役割を果たせていない。

4）災害現場では状況が不明であるため、ゾーン０～２のいずれに属するかが判断できないケースが多い。

（3）耐放性・除染性の評価・認証

原子力発電所や使用済み燃料再処理工場などの原子力施設、精錬や石油化学プラント等、放射能環境下における防災ロボットのニーズは高い。

電子部品や材料等の耐放性の評価・認証は、ロボットを耐放射線設計するために必須であり、電子部品や材料等の放射線照射試験結果のデータベース化とガイドライン化は重要である。

放射性物質が付着した防災ロボットの除染は、メンテナンスの際の作業員の被曝を低減し、放射性廃棄物を減少させるために極めて重要である。防災ロボットのどの部分が汚染しやすいか、どのような工夫をしておけば除染しやすいか、それぞれの部位ごとにどのような除染方法が効果的か、に関する定量的な評価が十分になされておらず、そのガイドライン化が望まれる。

また、防災ロボットのメンテナンスその際には、除染作業が防護服を着用しての作業となるため、通常の人間工学とは異なるパラメータ（手の可動範囲、視野角、防護服を傷つけない等）を考慮する必要がある。

３－３－３－３　公開ロボット競技会による技術開発の加速

（1）競技会とグランドチャレンジ型共同研究開発フォーラム

競争原理によって性能や機能を高め、価格を抑制する手法は、競争提案、入札や相見積もり、建築設計コンペなどに代表されるように、我が国でも広く定着している。技術開発を加速するための競争原理の活用も、技術競技会、性能ベンチマーク試験、環境規制など、事例は数多い。

欧米では防災・フィールドロボット関連の競技会が開催され、技術の高度化に重要な役割を果たしてきた。また、新興国のタイやアラブ首長国連邦やイランなどでは、ロボット競技会を将来の産業振興のために重要な起爆剤と位置付け、近年は国を挙げた支援を行っている。

たとえば、AUVSI が 1991 年から行っている International Aerial Robotics Competition は、小型飛行ロボットのフィールド適用の先端技術の高度化を目的としている。最初は自律ロボットが金属のコインを運搬するルール（自律飛行、GPS 使用、物体把持）で始まった競技会であったが、参加ロボットの機能が上がるにつれてより複雑なミッションを行うルールへと次々と変更されている。1996 年からは完全自律ロボットが廃棄物ステーションから廃棄物をサンプリングしてくるミッション（マッピング、ミリサイズの物体認識、物体回収）、1998 年からは上空から被災者や災害の状況（火災や被災建物など）を調査するミッション（被災者の状態識別、飛行障害（火炎、水柱など）の回避、複雑で煙などが充満した環境、災害現場のマッピング）、2001 年からは 3 km 離れたビル内に入って内部を撮影するミッション（長距離飛行、町の発見、ビルの発見、開口部（窓やドア）の発見、子ロボットの投入）、2009 年からはより複雑な内部構造（廊下、小部屋、障害物、行き止まりなど）を GPS 無しで調査するミッション（子ロボットの飛行、ビル内のマッピング、対象物の位置特定、SLAM）、2010 年からはそれに加えて小部屋の中から物体を持ち帰る作業が加えられた（未知ビル内のマッピング、安全基準の順守、壁に書かれた文字の読み取り、小物体の運搬、SLAM）。2014 年からは新しいミッションがスタートし、飛行ロボットと地上走行ロボットの協調、SLAM や GPS を使用しないナビゲーション、複数飛行ロボットの協調をテーマとして、飛行ロボットが走行している地上ロボットに触れながら走行方向を変更してミッションを達成させる羊飼いロボットを開発することをテーマとしている。この競技会への参加者は、米国、中国、ドイツ、英国、スイスなどのチームである。

RoboCupRescue は、2001 年から我が国主導で開始されたレスキューロボットの競技会であり、グランドチャレンジ型の共同研究開発フォーラムの草分けである。地震災害の倒壊家屋や閉鎖空間を対象として、要救助者の発見、状況把握、物体操作などをテーマとしている。競技会開始時にはラジコン戦車にカメラを搭載したような単純なシステムが出場したが、その後、不整地踏破、マッピング、自動要救助者認識、障害物認識、閉鎖空間不整地自律走行、SLAM、バーチャルリアリティ、エコロジックヒューマンインタフェース等の研究のベンチマークと、技術情報の流通手段として活用され、災害対応ロボットの技術を先導する場となった。チェコやタイでは、RoboCupRescue に出場したロボットを元にして消防や防衛等の災害対応ロボットの開発が進められ、調達配備がなされた。福島第一原発で国産ロボットとして初めて原子炉建屋を調査した Quince は、RoboCupRescue での性能ベンチマークを通じて改良され、他のロボットに比べて高い走破性能を実現し、現場で有効なマッピング・遠隔操作技術を確立した。NIST は RoboCupRescue 競技の経験に基づき、災害対応ロボット評価の ASTM 標準を策定し、米国政府の爆発物処理ロボットの調達

等に活用されている。この個別模擬フィールドを用いたベンチマーク手法は DARPA Robotics Challenge にも適用された。RoboCup は世界大会の開催地となった大阪や福岡において、ロボットビジネス等の地域産業振興にも大きく貢献した。

DARPA Grand Challenge、 Urban Challenge は、屋外を無人で走行する自動車技術の高度化を目的として行われ、Google Car のような自律走行車の開発や、関連技術の人材育成に大きな役割を果たした。その流れは、それまで自律走行を完全に否定していた自動車会社が、近い将来に自律走行車の販売を宣言するなど、世界の自動車のあり方を大きく変革することにつながり、グランドチャレンジ型競技会の意義が広く認識されるに至った。

これらの競技会は､我が国で盛んな NHK ロボコンのような教育や啓蒙を目的としたものづくり競技会とは、性格や技術レベルが全く異なっているため、注意が必要である。

我が国ではフィールドロボティクスにおける大学や研究所に対する本格研究投資が欧米に比べてはるかに少なかったため、RoboCupRescue のような我が国が先導して開始した国際競技会であっても、我が国からの参加チームは少数にとどまり、その結果、開催主体が外国に移動してしまっている。また、つくばチャレンジ等においても取り組みが世界展開を前提としてこなかったため、日本独自の発展を遂げることとなった。また、軍事転用を懸念するメディアや大学の意見が、競技会参加とフィールドへのロボット適用研究の大きな障害となってきた。これらは、我が国のロボティクスがフィールド試験からは取り残され、研究室内に閉じた性能評価、研究者の興味に基づく問題設定、他では成功していない方法論の追求、論文成果の重視、といった、フィールドに適用できる実用技術に重きを置く諸外国とは異なり、純粋科学的方向に発展してきた原因の一つであると考えられている。

これまでに開催された主要な競技会を評価表１３に示す。

（２）我が国の産業競争力のために開催すべき競技会

地球温暖化に伴って近年頻発している災害について、被害を最小限に防止する予防措置、拡大を抑えるための緊急対応、いち早く平時に戻るための復旧は、我が国の産業競争力の維持・向上のために、今後ますます重要であり、防災ロボットが果たすべき役割は大きい。前項に述べたように、競技会は防災ロボットの高度化に有効な手段であり、我が国でも重点的に推進すべきである。

その問題設定にあたっては、次の点を考慮しなければならない。

- 国富をもたらすテーマ、国富を失わないためのテーマ、を取り上げるべき。
- 重要な社会的課題、日本にとってメリットがあり、かつ、国際的にも重要なテーマを取り上げるべき。
- 人間ができない事、困難な事、危険な事を取り上げるべき。そうでないとロボット配備・事業は成立しない。
- ユーザ・企業が重要と考え、数年で現実的な成果がある程度得られ、事業になるテ

ーマを取り上げるべき。
・それによって、災害リスクを低下させ、国民の安全安心を担保できるようにすべき。
・技術的優位性を確保し、市場がある産業の育成の核となるテーマを取り上げるべき。
・要素技術だけでなく、フィールド適用の目的を志向したシステムインテグレーションを重視すべき。
・ロボットの形態や要素技術を限定せず、目的を果たすための柔軟なシステム開発を奨励すべき。
・ロボット研究開発とユーザの両面からの人材育成につなげるべき。
・国際協調で進めるべき。
・メディアを活用した大々的なマーケティング手法を採り、開催効果を最大限に高めるべき。
・RoboCup 等、既存の競技会組織を最大限に活用し、企画運営コストと参加障壁を下げるべき。

以上の観点に基づき、我が国の産業競争力強化のために下記のテーマを掲げた競技会を開催すべきである。

１）産業インフラ（プラント等）点検・補修

プラント等の老朽化は我が国において重大な問題の一つである。相次ぐ事故や労働災害に加え、自然災害の危険が高まり、スキルの高い労働者が不足している現在、災害に対する脆弱性の克服と被害拡大の予防による安全化は待ったなしの課題である。いったん事故が起きると工場の閉鎖は必至であり、現在の経済状況では新工場を海外に建設することとなり、産業の空洞化と国内雇用の問題が顕在化する。この問題に対してロボットの新技術開発は、産業インフラを所有する会社が単独で技術開発することは経営合理性の点で問題があり、プラント点検作業は中小企業に依存するところが大きいことから、政府主導による先端技術の開発と人材育成が必要である。さらには、この問題は公共インフラやビルの老朽化対策との共通点が高く、相互の技術や機材の共通化によって、ロボットが経済的に見合うソリューションとなる可能性が高い。また、福島第一原発は化学プラントの一種であり、ここで有効な技術は原発廃炉のための様々な遠隔作業に対しても有効である。

２）社会インフラ（橋梁・トンネル・電気・ガス・上下水道等）点検・補修

橋やトンネルなどの社会インフラの老朽化の問題は１）と同様に重大な問題である。現在の技術では、そのメンテナンスに莫大な自治体や国の予算が必要であり、維持することは不可能であると言われており、ロボットの新技術の高度実用化研究と基盤技術開発が不可欠である。

３）土砂災害の遠隔工事

毎年のように大規模な台風被害による崖崩れや土砂ダムが発生し、火山噴火や大規模な津波被害の危険性が指摘されている。このような土砂災害が起きた際に迅速かつ安全に復旧できるための遠隔技術の高度化は重要である。

これらの具体的な競技の内容については、災害事象とそれに対するロボットソリューション、および、その性能等の評価法に基づき、合理的かつ戦略的に定めることが必要である。また、企業・大学・研究所等が競技会に参加するインセンティブを高める仕組みの設計は、効果を上げるために必須である。

参考文献

[1] 産業競争力懇談会 2013 年プロジェクト最終報告､災害対応ロボットセンター設立構想、COCN, 2014.

[2] Technical Area Overview Report, December 2, 2012, IEEE Robotics and Automation Society TC on Aerial Robotics and Unmanned Aerial Vehicles, 2012.

[3] ミニサーベイヤーコンソーシアム案内、http://mec2.tm.chiba-u.jp/~nonami/consortium/outline.html

[4] 野波健蔵, 産業応用型電動マルチロータヘリコプタミニサーベイヤーの紹介及び飛行デモンストレーション，研究会資料，2011.

[5] http://aeroquad.com

[6] http://ng.uavp.ch

[7] http://www.openpilot.org

[8] http://www.juav.org/index.html

[9] 産業用無人航空機安全基準（回転翼機・無人地帯用)，http://www.juav.org/menu02/anzenkijun_kaitenyoku.pdf

[10] 産業用無人航空機安全基準（固定翼機・無人地帯用)，http://www.juav.org/menu02/anzenkijun_koteiyoku.pdf

[11] 産業用無人航空機安全基準（小型固定翼機・無人地帯用（電動用))，http://www.juav.org/menu02/anzenkijun_kogatakoteiyoku.pdf

[12] Bart Elias, Pilotless drones: background and considerations for congress regarding unmanned aircraft operations in the national airspace system, Congressional Research Service, 2012.

[13] Richard M. Thompson II, Drones in domestic surveillance operations: fourth amendment implications and legislative responses, Congressional Research Service,

2013.
[14] US Government Accountability Office, Agencies could improve information sharing and end-user monitoring on unmanned aerial vehicle exports, 2012.
[15] http://www.wired.com/images_blogs/threatlevel/2014/10/Complaint.pdf
[16] Drone pilot challenges FAA on commercial flying ban, Scientific American, http://www.scientificamerican.com/article/drone-pilot-challenges-faa-commercial-flying-ban/, Nov. 1, 2013.
[17] FAA fine against drone photographer dismissed, NBC News, http://www.nbcnews.com/tech/innovation/faa-fine-against-drone-photographer-dismissed-n46506
[18] US Government Accountability Office, Measuring progress and addressing potential privacy concerns would facilitate integration into the national airspace system, 2012.
[19] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, Integration of civil unmanned aircraft systems (UAS) in the national airspace system (NAS) roadmap, http://www.faa.gov/about/initiatives/uas/media/UAS_Roadmap_2013.pdf, 2013.
[20] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, Press Repease - FAA selects unmanned aircraft systems research and test sites, http://www.faa.gov/news/press_releases/news_story.cfm?newsid=15576, 2013.
[21] 田所、レスキューロボットと福島第一原発事故、日本ロボット学会誌、Vol. 30, No. 10, pp. 1017-1021, 2012.
[22] Official Rules for the International Aerial Robotics Competition Mission 7, Version 9, IARC, October 2013.
[23] http://www.aerialroboticscompetition.org/
[24] Technical Area Overview Report, January 19, 2013, IEEE Robotics and Automation Society TC on Marine Robotics, 2013.
[25] SAUVIM プロジェクト，http://www4.eng.hawaii.edu/~asl/Sauvim/，ハワイ大学（米国）, 2013.
[26] TRIDENT プロジェクト，http://www.irs.uji.es/trident/aboutproject.html，Jaume I 大学（スペイン）
[27] RAUVI プロジェクト，http://www.irs.uji.es/rauvi/news.html，Jaume I 大学（スペイン）, 2013.
[28] RANGER USBL, http://sonardyne.com/products/positioning/usbl-all-systems.html, Donardyne 社カタログ, 2013.
[29] The unmanned ground vehicles (UGV) market 2012-2022, ReportLinker, 2012.

[30] 国際レスキューシステム研究機構，三菱総研，日本ロボット工業会，特殊環境用ロボット等の標準化・安全規格化と競争力の強化等に関する検討報告書，平成 24 年度 NEDO 事業成果報告書, 2013.
[31] 田所論，ロボカップレスキューロボットリーグ，日本ロボット学会誌，Vol. 27, No. 9, 2009.
[32] 田所，北野，ロボカップレスキュー，共立出版，2000.
[33] H. Kitano, S. Tadokoro et al., RoboCup Rescue: searh and rescue in large-scale disasters as a domain for autonomous agents research, Proc. IEEE SMC, pp. 739-743, 1999.
[34] A. Jacoff et al., Test arenas and performance metrics for urban search and rescue robots, Proc. IROS, pp.~3396-3403, 2003.
[35] http://www.nist.gov/el/isd/ks/response_robot_test_methods.cfm
[36] http://www.nist.gov/el/isd/testarenas.cfm
[37] http://www.astm.org/
[38] ELROB ウェブページ、http://www.elrob.org/
[39] EURATHLON 2013 ウェブページ、
http://www.eurathlon2013.eu/eurathlon_2013.html
[40] EURATHLON ウェブページ、http://www.eurathlon.eu
[41] DARPA Robotics Challenge ウェブページ、http://www.theroboticschallenge.org/
[42] DARPA Robotics Challenge プログラム
http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/DARPA_Robotics_Challenge.aspx
[43] The 2005 DARPA Grand Challenge, Springer, 2007.
[44] The DARPA Urban Challenge, Springer, 2010.
[45] Eric Krotkov, John Blitch, The Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) Tactical Mobile Robotics Program, International Journal of Robotics Research, Vol. 18, No. 7, pp. 769-776, 1999.
[46] Anne Bajard <anne.bajart@ec.europa.eu>，euRathlon での講演, 2013.
[47] http://cordis.europa.eu/fp7/ict/robotics/
[48] http://twitter.com/RoboticsEU
[49] http://www.facebook.com/RoboticsEU
[50] euRobotics aisbl website, http://www.eu-robotics.net/
[51] PPP website,
http://www.eurobotics-project.eu/robotics-ppp/about-robotics-ppp.html
[52] ARCAS website, http://www.arcas-project.eu/
[53] COMETS website, http://www.comets-uavs.org/
[54] M3 website, http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Maximum_

Mobility_and_Manipulation_(M3).aspx
[55] L3 website, http://www.darpa.mil/Our_Work/TTO/Programs/Legged_Squad_Support_System_(LS3).aspx
[56] Lee Joong-Yeop, Development of disaster relief robots, Korea IT Times, May 23, 2011.
[57] 平成２４年度消防白書, 2012.
[58] 日本機械工業連合会、日本ロボット工業会、平成 22 年度災害対応ロボットの安全基準策定に関する調査研究報告書, 2011.

評価表１　想定災害とロボットの関連細分（建造物・土木インフラ災害）

想定対象・現場	想定災害・災害種類	被災レベル・被災状況	時間軸（平時，発生直後，72時間以内，復旧）	全国的発生頻度・規模	遂行作業・対応作業	制約条件（環境条件）	ロボット導入の期待される依存比率	ロボット導入の価値	場所・移動環境（詳細）	必要な機能（移動、作業、環境）	現状技術でできること（適用可能ロボットまたは技術）	技術課題（困難を伴うこと）	非技術課題（規制，制約など）	将来展望（今後どの程度で実現するか）	行うべき試験（性能，耐久性，耐環境性など）	評価フィールドへの要求
・建築物 ・木造住宅	地震・竜巻・爆発・突発事故	・倒壊	・平時 ・被災直後 ・被災後数日	頻度：年間数件の発生可能性あり 発生規模：広範囲	・安全通路の確保	・豪雨、暴風などの気象条件（雨量、風速） ・凍結、オーバーヒートなど（気温）	ロボットのみ	人が入りこめない場所や、倒壊危険個所に人の立ち入りさせない	場所：オフィス街、住宅地 移動環境：瓦礫、風雨、倒木		大型重機による瓦礫撤去	・無人化 ・遠隔操縦	遺失物と廃棄物の判別	＜5年＞ 操作感のフィードバックによる微細作業の実現		・テストフィールドと計測室、クレーン設備 ・フィールド内モニタリング機能 ・ロボット、機器等の現地までの搬送 がれきの再現
		・半倒壊 ・倒壊レベル不明（倒壊の危険性）	・被災直後 ・被災後数日		・現地状況把握 ・調査、診断、判定	・明るさ ・粉塵、煙による視界不良 ・凍結、オーバーヒートなど（気温） ・落下物	ロボット＞＞人力	倒壊可能性がある箇所に人を立ち入らせない ・人よりもロボットが小さく，人が立ち入れない狭い隙間からでも搬入して建物内部を確認できる	場所：商業ビル、被災建物内部 移動環境： 粉塵、瓦礫、ガス漏れ、階段 雨水・浸水 搬入経路が狭い（窓，瓦礫隙間）		・外壁点検ロボット ・床下点検ロボット ・カメラ画像による目視点検 ・暗視カメラ、HVカメラ ・3Dスキャナ、LRF等による外観比較 ・環境計測（放射能、ガス）ロボット	・ロボット移動（不整地、壁面、天井面、天井裏） ・ロボット設置作業 ・カメラ画像，センサ情報による遠隔操作 ・半自律動作 ・各種センサを組合わせた半自動検査（カメラ、X線、磁気、打音等） ・倒壊予兆リモート多点モニタリング ・IT利用，そのためのIT基盤技術	個人所有宅への立ち入り（所有者不在時）	＜3年＞ ・がれき上、狭隘部、壁面等の移動が可能で、ケーブルレスで携行性に優れた移動ロボット ＜5年＞ ・自動地図作成と自律移動 ・画像やセンサデータに基づいた建物健全性の自動判断 ＜10年＞ 移動ロボットで外壁や柱の損傷レベルを自動検査（ハンマリング，画像計測等）		・テストフィールドと計測室、クレーン設備 ・フィールド内モニタリング機能 ・ロボット、機器等の現地までの搬送 ・倒壊、半倒壊構造物の再現（柱、壁、天井、出入口、廊下、階段） ・木造住宅の床下 ・補修が必要な設備、配管 ・剥離、クラック、窓枠等の劣化による落下物の危険性 ・多様な災害廃棄物 ・地震等の発生から判定までの一連の作業を再現 ・IT基盤の整備
			・週単位 ・月単位		・安全通路の確保 ・補強、応急補修	・不整地、障害物	ロボット＝人力	迅速に復旧可能			・柱補強ロボット ・最適補修方法検索システム	・半自動ロボット	資材、電力・燃料、作業者の確保	＜5年＞ ・重量物ハンドリング		
		・半倒壊 ・倒壊レベル不明（倒壊の危険性）	・月単位 ・年単位		・解体、撤去 ・廃棄物分別	・長期稼働 ・有害物質	ロボット＝人力	危険作業の回避 労働力不足解消			・解体時の粗選別システム ・重機遠隔操作	・大型重機の自動化	遺失物と廃棄物の判別	＜3年＞ 遠隔操作の建機で，がれきを撤去 ＜5年＞ アタッチメント自動装着など建物解体性を高めた遠隔操作建機で解体撤去 ＜10年＞ ・粉塵、騒音を軽減しながら安全に解体作業を実施		
			・年単位		・復旧~復興	・長期稼働	ロボット＝人力	労働力不足解消			・汚染物除去ロボット ・パワーアシスト	・人とロボットの協調作業	復興計画との協調	＜5年＞ レーザ溶接などを搭載した遠隔建機で，建物柱などを補強 ＜10年＞ ・大量の廃棄物を自動処理可能な処理施設		
・地下街、地下室 ・設備、配管	水害・津波	・倒壊 ・一部水没	・被災直後 ・被災後数日	頻度：年間数件の発生可能性あり 発生規模：限定的	・現地状況把握 ・調査、診断、判定	・明るさ ・混濁による視界不良	ロボット＞＞人力	水没，崩落等で人が立ち入れない箇所	場所： 地下街、地下室 建物周辺の道路 移動環境： 粉塵、瓦礫、階段、水没 水の流れ有り	・防爆性、防水性、防塵性 ・平時から災害発生までを再現 ・フィールドの正確な座標位置 ・階段昇降，凹凸乗り越え，障害物回避	・赤外線、ソナー ・無人ヘリによる空中センシング ・画像解析による判定 ・ファイバカメラ ・超音波カメラ・水中レーザレーダ	・遠隔操作と組み合わせた半自動ヘリ・（水中）移動ロボットによる調査 ・自己位置推定 ・水陸両用遠隔移動ロボット ・IT利用，そのためのIT基盤技術 ・浸水して瓦礫に埋もれた狭隘部の点検	人命救助作業との競合	＜3年＞ 既存の水中ビークルでの水没エリアの状況把握 （出入り口など狭隘部がない箇所に限られる。） ＜5年＞ ・自動ヘリ、（水中）自律移動ロボットによる調査 ・画像、センサデータからの建物内部状態の把握 ・建物内の水没状況，損壊状況のモニタリング，マップ化 ・水陸両用ビークルで，浸水域を含めた瓦礫周辺でも点検 ＜10年＞ 長距離，長時間駆動，潜深度性を高めた汎用型の水陸両用ビークル	・作業速度 ・作業精度 ・測定精度 ・判定精度 ・アクセス性 ・走破性能 ・操作性 ・環境計測 ・耐環境性	・テストフィールドと計測室、クレーン設備 ・フィールド内モニタリング機能 ・ロボット、機器等の現地までの搬送 ・建物が水没した状況 ・地下街が水没した状況 ・IT基盤の整備
			・週単位 ・月単位 ・年単位		・補強、応急補修 ・解体、撤去 ・廃棄物分別		ロボット＝人力				・がれきの撤去、運搬 ・水中バックホウ	・防水性 ・無線操作不能	既存の構造物保護	＜3年＞ 遠隔操作の建機で，がれきを撤去 ＜5年＞ 冠水域移動での転倒防止等で，悪条件下での安全性を高めた遠隔建機 ＜10年＞ ・大量の廃棄物を遠隔で撤去し、自動で選別処理		
・建築物	火災・噴火	・火災 ・大火 ・全焼 ・半焼	・被災直後	頻度：年間数万件件の発生可能性あり 発生規模：限定的	・火元の特定 ・可燃性ガスの除去	・高温による機器損傷 ・粉塵、煙による視界不良	ロボット＞人力	高熱箇所	場所：商業ビル、共同住宅 移動環境：粉塵、煙、ガス漏れ、風雨、降雪 天井からの崩落物あり		・カメラ画像、温度、ガス等のセンシング ・赤外線	・耐火性の高い遠隔操作ロボットおよび周辺機器 ・HV画像，センサなどによる内部状況撮影 ・火花を発生しない道具、機器、ロボット ・ミリ波・遠赤外線レーザレーダによる煙中の可視化 ・火元特定などの火災現場検証の半自動化	個人所有宅への立ち入り（所有者不在時）	＜10年＞ ・火災現場で対応できる検査機器を搭載した半自律移動ロボット（遠隔操作） ・移動ロボットを先導させて建物内をモニタし，消防隊員を誘導 ・建物内部を移動しての消火		・テストフィールドと計測室、クレーン設備 ・フィールド内モニタリング機能 ・ロボット、機器等の現地までの搬送 ・火災後の環境や倒壊建物を想定 ・行方不明者の想定 ・可燃性ガスの存在想定
トンネル	・地震 ・火災 ・爆発 ・天井崩落 ・大規模な車の衝突事故など	・崩落 ・半崩落 ・広範囲な天井落下	被災直後	頻度：年間数件の発生可能性あり 発生規模：限定的	・現地状況の把握（躯体被災状況，障害物状況）	・エンジン(内燃機関)の制約----引火性ガス発生の可能性 ・無線の干渉、無線到達距離の減衰 ・粉塵・煙等による悪視界 ・火災等による高温 ・冬期の厳寒	ロボット＞＞人力	・引火性ガス、有毒ガス発生箇所 ・崩落等の危険箇所	場所：トンネル坑内 移動環境：凹凸大	・状況把握：引火性・有毒ガス検知、現地映像送信、危険箇所モニタリングなど ・崩落、倒壊箇所での移動 ・自己位置認識 ・遠隔操作 ・解体、撤去、積込み、運搬 ・高温、多湿下での稼働	・カメラ映像による状況把握 ・3Dスキャナ、LRF等による外観認識 ・自己位置認識	・迅速なロボットの稼働 ・崩落可能性の判断 ・長距離曲線間での遠隔操作	電波法 VDT作業	＜5年＞ ・遠隔操作によるコンクリートや地山等の診断、点検、補強 ・遠隔操作による解体、撤去 ＜10年＞ ・崩落土砂運搬作業の自動化	・本体の耐環境性(温度、湿度、引火性ガス、有毒ガスなど) ・作業性能（踏破性能，状況認識性能，障害物除去性能，補修性能など） ・運用性（オペレーションの受容性評価など） ・メンテナンス性 ・施工性 ・作業精度	・エリア形状：トンネル型断面×奥行数十m（傾斜） ・光環境：真暗 ～ 薄暗 ・視界：ゼロ ～ クリア ・気流：0m/s ～ 10m/s（奥行方向） ・障害物： ①土砂・舗装・コンクリート系瓦礫 ②クルマ・付帯設備系 ③泥水 ④ガス
			被災から数日		・現地状況の把握 ・障害物（崩落土砂・コンクリート等）の撤去		ロボット＞人力	・引火性ガス、有毒ガス発生箇所 ・更なる崩落等の危険箇所	場所：トンネル坑内 移動環境：凹凸大		・人による目視判断 ・カメラ映像による状況把握 ・3Dスキャナ、LRF等による外観認識 ・自己位置認識	・崩落可能性の判断 ・長距離曲線間での遠隔操作	電波法 VDT作業			
橋梁	・地震 ・地すべり・雪崩・落石 ・飛来物衝突 ・水害 （豪雨，洪水，津波等による冠水）など	・倒壊 ・半倒壊 ・一部水没	被災直後	頻度：年間数件の発生可能性あり 発生規模：限定的	・現地状況の把握（躯体被災状況，障害物状況）	・雨、風、粉塵など ・一部水中 ・冬期の厳寒	ロボット＞＞人力	・倒壊、崩落等の危険箇所	場所：平地部 移動環境：凹凸比較的大、一部浸水	・状況把握：現地映像送信、危険箇所モニタリングなど ・崩落、倒壊、一部水没箇所での移動 ・自己位置認識 ・遠隔操作 ・解体、撤去、積込み、運搬	・人による目視判断 カメラ映像による状況把握 ・3Dスキャナ、LRF等による外観認識 ・自己位置認識	・迅速なロボットの稼働 ・崩落・倒壊可能性の判断 ・一部水没箇所での移動・作業	電波法 VDT作業	＜5年＞ ・遠隔操作によるコンクリートや地山等の診断、点検、補強 ・遠隔操作による解体、撤去 ＜10年＞ ・崩落土砂運搬作業の自動化 ・一部水没下でも稼働できるロボット		・エリア形状：幅10m（両側壁面）×奥行数十m（傾斜） ・光環境：照明 ～ 自然光 ・視界：50% ～ クリア ・気流：0m/s ～ 30m/s（全方向） ・障害物： ①土砂・舗装・コンクリート系瓦礫 ②付帯設備 ③一部水没
			被災から数日		・現地状況の把握 ・障害物（崩落土砂・コンクリート等）の解体、及び撤去		ロボット＞人力	・更なる倒壊、崩落等の危険箇所	場所：平地部 移動環境：凹凸比較的大、一部浸水		・人による目視判断 カメラ映像による状況把握 ・3Dスキャナ、LRF等による外観認識 ・自己位置認識	崩落・倒壊可能性の判断 一部水没箇所での移動・作業	電波法 VDT作業			

評価表２　試験項目細分（建造物・土木インフラ災害）

機能分類 ・機能 ・耐環境性 ・耐久性 ・安全性		試験項目	評価		時間軸					対象となるロボット													分類	
			適応範囲・対象・条件 （想定される範囲内で種類や数値、条件等を変えて試験）	評価内容 （計測など）	発生直後	72時間以内	復旧	平常時		クローラ・車輪	脚式	水陸両用型	飛行型	水面浮上型	ヘビ型	配管内	吸着型	双腕型	リフタ	クレーン	プローブ		建築	土木
機能	移動能力	階段・段差の走行	幅、傾斜、踊り場寸法、材質(コンクリート、鋼製)	速度、精度、冗長性、汎用性、操作性、環境性、限界距離・角度、安定性	○	○	○	○		○	○	○		○	○		○	○	○				○	○
		柱・壁の昇降	柱寸法、表面材質、亀裂の有無	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性、限界距離・角度、安定性	○	○	○	○		○	○	○		○			○	○	○				○	○
		天井の移動	材質、凹凸の有無、障害物の有無	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性、限界距離・角度、安定性	○	○	○	○		○	○	○		○			○	○	○				○	○
		狭所移動	幅、天井高さ、距離、障害物の有無	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性、限界距離・角度、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				○	○
		飛行移動	広さ、高さ、気象	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性、限界高度、安定性	◎	○	○	○					○				○						○	○
		水中移動	深さ、障害物の有無、流速、濁度、水圧	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性、限界深度、安定性	○	○	○	○		○	○	○			○	○	○	○	○				○	○
		登坂能力	角度、床面材質	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、、環境性、操作性、限界距離・角度、安定性	○	○	○	○		○	○	○		○	○	○	○	○	○				○	○
		不整地走破	段差の高さ、路面の固さ、がれきの有無	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性、限界距離・角度、安定性	◎	○	○			○	○	○		○	○	○	○	○	○				○	○
		障害物回避	大きさ、材質、位置	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性安定性	◎	○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				○	○
		各種ドア通過	ドアの種類	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、操作性、安定性	◎	○				○	○	○	○	○	○		○	○	○				○	○
	検出能力	クラック	画像による診断（幅、長さ）	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	◎	○	○	◎		○	○	○	○		○	○	○		○				○	○
		剥離・剥落・爆裂	画像、超音波、電磁波レーダ（大きさ、深さ、鉄筋の有無）	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	◎	○	○	◎		○	○	○	○			○	○		○				○	○
		ジャンカ・空洞	打診、電磁波レーダ（大きさ、位置）	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○			○	○	○	○				○	○
		劣化(中性化や塩害含む)	画像、試薬（大きさ、深さ）	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○			○	○	○	○				○	○
		強度	シュミットハンマー、サンプル採取（圧縮強度、構造）	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○				○	○	○	○				○	○
		錆・腐食	画像、打診（大きさ、程度）	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				○	○
		破損・破断	画像（大きさ、程度）	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、防爆性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	◎	○	○	◎		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				○	○
		ガス漏れ検知	ガスセンサ，レーザガス計測	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、環境性、防爆性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	◎	○	○	◎		○	○	○	○	○	○	○			○				○	○
	情報統合能力	通信品質	屋内外、中継器の有無、障害物	通信距離，通信速度，通信容量，レスポンス	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		画像データ転送	画質、データ点数	送信レート，解像度	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		指向性	無線周波数、アンテナ種類、干渉電波の有無、障害物	電波強度	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		3次元マップ	複数ロボットセンサデータ統合	マップ精度，マップ作成速度，自己位置推定精度	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○						○	○
		情報統合化(IT基盤活用)	複数ロボット対応、情報基盤，各種センサデータ	3Dマップ内センサ位置精度，センサ組込み容易性（組込み開発工数），センサデータ蓄積、システム拡張性，汎用性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		データ活用	各種センサデータ，各種蓄積データ，各種解析ツール	センサデータ解析結果妥当性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
	作業能力	打診	材質（コンクリート、鋼製）、深さ、程度	速度、精度、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	○	◎	○	○		○	○	○		○	○	○	○	○	○				○	○
		注入	対象物（コンクリート、地盤）、注入材、注入量	速度、精度、拡張性、環境性、省力化、操作性、安定性、作業時間		○	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		切断・穴あけ	材質（コンクリート、鋼製）、径、深さ	速度、精度、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	○	◎	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		研磨・研削	材質（コンクリート、鋼製）、研磨量	速度、精度、拡張性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間		○	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		交換	対象物（配管、ボルト、支承など）、位置、気象	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、協調性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間		○	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		塗布	塗料、薬剤、アタッチメント（刷毛、ローラ）	速度、精度、冗長性、汎用性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間		○	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		巻き付け	補強材、種類、材質（コンクリート、鋼製）	速度、精度、冗長性、汎用性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間		○	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		吹付け	塗料、材質（コンクリート、鋼製）、厚さ	速度、精度、冗長性、汎用性、環境性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間		○	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		障害物移動	重量、寸法、移動距離	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、協調性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	◎	◎	◎	○		○	○	○		○	○	○	○	○	○	○			○	○
		運搬	重量、寸法、移動距離	速度、精度、冗長性、汎用性、拡張性、協調性、省力化、操作性、限界距離・角度、安定性、作業時間	○	◎	◎	○		○	○	○		○				○	○	○			○	○
		吸引	塵埃、液体、濃度、比重	速度、、環境性、省力化、操作性、安定性、作業時間	◎	◎	○			○	○	○		○				○	○				○	○
		損傷マップ作成	空間の大きさ，複雑さ	速度、精度、汎用性、拡張性、省力化、操作性、、安定性、作業時間		○	◎			○	○	○	○	○				○	○				○	○
	システム性能	クラック補修効果	散水量（防水性）、耐久性、美観	精度、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、安定性		○	◎	○		○	○	○						○	○				○	○
		巻立て補修効果	強度、耐候性、美観	精度、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、安定性		○	◎	○		○	○	○						○	○				○	○
		貼付け効果	強度、均一性、耐候性	精度、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、安定性		○	◎	○		○	○	○						○	○				○	○
		接着効果	強度、耐候性	精度、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、安定性		○	◎	○		○	○	○						○	○				○	○
		止水効果	水圧、水量	精度、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、安定性		○	◎	○		○	○	○		○				○	○				○	○
		配管補修効果	圧力、流量、耐久性	精度、汎用性、拡張性、環境性、省力化、操作性、安定性		○	◎	○		○	○	○				○		○	○				○	○
	運用	遠隔操作インターフェイス	種類（ジョイスティック，マウス，キーボード，押しボタン，タッチパネル，音声認識）	速度（通信系），精度，操作性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○
		遠隔操作支援情報	環境情報（画像，音，地図），ロボット動作の力覚フィードバック	速度（通信系），精度，操作性，安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	◎					○	○
		遠隔操作支援機能	ティーチングプレイバック，バイラテラル制御 地図上での軌道生成	速度，精度，拡張性，操作性，作業時間	○	○	○	○		○	○	○		○	○		○	◎					○	○
		警報・警告	種類（表示，アラーム，振動，インターロック）	拡張性，安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○
		起動時間	ロボットの組立，設置，起動までの時間	作業時間	◎	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○
		メンテ工数	センサ、工具、消耗品等の更換，充電時間	汎用性，操作性，作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○
		稼動時間	消費電力，バッテリによる駆動時間	作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○
		運搬形態	可搬性，ケーブルレス	操作性，作業時間	◎	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○					○	○
	安全機能	テレメトリ（機器状態把握）	システムレベルおよびコンポーネンツレベル故障診断	速度（通信系），精度，冗長性，操作性，安定性	◎	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		モニタリング（周囲状況把握）	障害物，（落下などの）危険個所認知，人体検知	速度（通信系），冗長性，限界距離・角度，安定性	◎	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		安定性（耐転倒・滑落性能）	静止時，移動時，作業時，電源ダウン時	限界距離・角度，安定性	◎	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		異常対応（緊急停止）	電源ダウン，通信ダウン，過負荷，衝撃・落下，超IP性能環境	速度（制御系），冗長性，制御性	◎	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		周囲環境への負荷	光学障害，通信障害，EMC（誤動作誘発）	速度（通信・制御系），冗長性，制御性	◎	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
	耐環境性	粉塵・煙	濃度、視界	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		蒸気・多湿	温度、湿度	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		高温、低温	温度	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		水中（難視界含む）	防水性、耐水性、水温、濁度	速度、精度、汎用性、操作性、限界距離・角度、安定性	○	○	○	○				○											○	○
		強風	風速、風向	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		落雷	電圧	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		降雨・降雪	降水量、積雪量	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		防水	防水性、耐水性	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		防爆	耐圧構造、内圧構造、安全構造、非点火構造	速度、精度、汎用性、操作性、限界距離・角度、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		暗闇	輝度、照度	速度、精度、汎用性、操作性、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
	耐久性	連続運転	運転時間	速度、冗長性、省力化、操作性、限界距離、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		振動	振幅、衝撃力、加速度	速度、環境性、操作性、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		摩耗・消耗	負荷、運転時間、動作環境	速度、操作性、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		日照	時間	環境性、難燃性、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○		○	○
		錆・腐食	時間	環境性、操作性、安定性、作業時間	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
		落下	高さ	冗長性、操作性、限界距離、安定性	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○

評価表３　想定災害とロボットとの関連細分（水害・土砂崩れ災害）

想定対象・現場	想定災害・災害種類	被災レベル・被災状況	時間軸（平時，発生直後，72時間以内，復旧）	頻度・タイミング	遂行作業・対応作業	制約条件	ロボット導入の期待される依存比率	ロボット導入の価値	場所・移動環境（詳細）	必要な機能（移動、作業、環境）	現状技術でできること（適用可能ロボットまたは技術）	技術課題（困難を伴うこと）	非技術課題（規制，制約など）	社会普及の展望	行うべき試験(性能，耐久性，耐環境性など)	評価フィールドへの要求
河川，港湾，水深の浅い海 （水中または水面）	水害 （大雨による河川の氾濫）	行方不明者の発生 （川の中州に取り残された人，冠水道路で今にも流されそうな人，流されて行方がわからない人） 瓦礫等の流出，堆積	発生直後または72時間以内	年に数件	水面・水中を移動	・水が濁っているor泥水 ・瓦礫等が流れているor浮かんでいる ・流れが速い	ロボット≫人	・視界不良，瓦礫が浮遊する中での生存者探索 ・実証での探索 ・スピーディでより安全に生存者の探索を行うことが可能(救命率の向上)	・河川，港湾，水深の浅い海（水面～水深数十m程度） ・濁っている水or泥水 ・瓦礫が流れているor浮かんでいる	・障害物の除去or回避	〔水面移動ロボット〕 ・ソナーにより水中の状況を高速広範囲に探査。大型ラジコン船で実現可能。 〔水中探索ロボット〕 ・Anchor Diver（東工大など） ・RTV（三井造船） ・seamor-ROV（米Seamor Marine） ・SARobot(米SeaBotix) 〔適用可能技術〕 ・超音波（ソナー），カメラ，サーモグラフィー ・体温感知（サーモカメラ／温感センサ） ・GPS ・モバイル通信による探査結果の司令部への報告 ・救助索を発射する銃（火薬は使い勝手が悪い）	・流れのある中での姿勢制御 ・流水・濁水中における瓦礫除去等のハンドリング ・ケーブルが絡まる ・水中の障害物の認識、効率的な探査経路計画		・複数台のロボットが自律航行（＋協調）して生存者を探索（今後5年）	・移動試験 姿勢保持性能評価 操作性評価 ・瓦礫のﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞ試験 操縦性（（絡まった）ロープ切断、（目印ブイ用の）ロープ取り付け）	・河川，港湾または海 模擬瓦礫 ・大型の水槽 ・小型で安価な流れのある水槽，流れの状況の標準化必要（NIST／ASTMで一部検討中）。
					生存者の探索	・水が濁っているor泥水 ・瓦礫が流れているor積み上がっている ・厳しい時間的制約（生存者救助は数分～20分（子供の場合）以内に救助要）				・人を検知（認識） ・車を検知（認識）（車内に取り残された人想定） ・迅速な準備、現場への接近（車はつかえない事を想定）		・視界が悪い状態でのセンシング ・水中での体温検知 ・音波の場合、周囲環境によってはゴーストが発生し、実状況が上手く把握出来ない。 ・ソナーリーディング自体が難しい技術であり訓練が必要			・水中の模擬的なバイタルサイン（心拍・体温）を備えた人形を検知 ・センサリーディング（探査対象物の標準化）	・河川，港湾または海 ・大型の水槽（車を沈められる大きさ）
					救助補助	・生存者を傷つけない瓦礫等の除去（ダイバーの補助） ・潜水時の共同作業でダイバーを傷つけない ・アプローチでの足場が悪い ・限られたロジスティク能力 ・道路の冠水	ロボット＞人	・救助者の肉体的負荷軽減 ・救助活動の安全性向上		・人を傷つけず浮上させる ・足場の悪い（瓦礫、泥）アプローチでの人・物資の迅速な移動 ・荷物の最小化 ・冠水下の道路の安全な移動（状況把握（マンホール、障害物）、水陸両用移動機構	・エアを送って浮力で撤去または救出 現在使える技術あるか？ ・不整地用パーソナルモビリティ ・既存安全規格 ・パワースーツ	・視界が悪い ・人－ロボ共同作業での潜水作業者へのロボ状況提示（現状人作業時はロボは静止） ・適した安全コンポーネント不足（制御安全、機能安全） ・滑りやすい足場（泥濘地、岩のり付の岩）			・大きさを測る（NIST／ASTM規格に対応規格あり）	・大型水槽 ・模擬施設（滑りやすい足場） ・大きさを測る場所
			復旧時		・川底，海底の現状調査	・水が濁っている	ロボット≫人	・視界不良の中でのソナー等を使った探査 ・潜水士等より効率的な探査が可能	・河川，港湾，水深の浅い海（水深数十m程度） ・水が濁っている	・川底，海底等に沈む瓦礫や障害物の検知 ・位置計測	〔水中探索ロボット〕 上記 水中探索ロボットと同じ	・視界が悪い状態でのセンシング		・自律航行して河底・海底等に沈む瓦礫や障害物の検知（今後3年）	・センシング評価試験（濁り水の標準化）	・河川，港湾または海 （・実際の被災地）
・山間部および麓	土砂崩れ （土砂崩れによる家屋の倒壊）	家屋の半倒壊または倒壊	72時間以内（河川の増水や氾濫が小康状態になった後）	年に数十件	現状調査	・道路の亀裂，地滑りが発生し、被災地に近づけない（地上からのアクセスは困難） ・強風 ・雨、雪	ロボットのみ	・人が入れない場所，有人機飛行禁止エリアの調査 ・シビアリティのより正確な判断が可能	・災害現場上空 ・雨，風	被災状況の把握 ・空中撮影 ・空中カメラ中継 ・撮影位置把握（GPS） ・本部への報告	〔飛行ロボット〕 ・T-Hawk（米ハネウェル） ・各種クワッドローター 〔適用可能技術〕 ・カメラ	・自律安定飛行（特に強風下） ・雨、雪による移動能力低下、センサ能力低下	UAV飛行の航空法上の認証 （東日本大震災や原発事故に際しては、ごく限られた活動しかできなかった）	・自律飛行して被災状況を把握し、情報（映像，被災場所）を本部へ送信 （今後3年）	・飛行試験（迅速性、安定性、再現性（同じ場所に戻れるか）） ・移動中の画像センサ能力（広さ、分解能）	・通常の山間部や都市部 ・模擬環境（雨雪交じりの強風）
					瓦礫を移動	・瓦礫や流木等の山 足場が悪く不安定	ロボットのみ	・人が入り込めない狭隘部の探索 ・足場が悪く人が立ち入れない所の探索 ・スピーディでより安全に生存者の探索を行うことが可能(救命率の向上)	・倒壊家屋現場 ・瓦礫・流木が堆積した不安定な足場 ・泥が堆積した軟弱な足場	・走破性 ・隙間をくぐり抜ける ・瓦礫を除去 ・瓦礫を破壊して内部に侵入	〔瓦礫内の探査ロボット〕 ・IRS蒼竜（東工大） ・MOIRA（阪大） 〔瓦礫上の探査ロボット〕 ・クインス（千葉工大，IRS他） 〔適用可能技術〕 ・カメラ ・体温感知（サーモカメラ／温感センサ） ・匂い？（災害救助犬の能力） ・CO2センサ（狭い閉鎖空間で特に有効） ・電波での探査（シリウス） ・チェーンソー、削岩機、カッター ・マイクロフォンアレイ	・自身の安定度を検知・確保する機能（傾斜・滑り） ・操縦性またはそれを補う自律性 ・泥地移動		・複数台のロボットが自律走行（＋協調）して生存者を探索（今後5年）	・移動試験 姿勢保持性能評価 操作性評価 泥汚れ状況での評価（泥の標準化必要） ・瓦礫のﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞ試験 操縦性	・模擬瓦礫（倒壊家屋，流木，沼地） ・木造倒壊家屋想定フィールドをロボカップ日本大会で運用、NIST/ASTMに提案中
					生存者の探索	・生存者を傷つけない手段 ・泥				・人を検知（認識） ・声の認識		・障害物越しに検知する機能 ・土砂内人体センシング			・瓦礫内の模擬的なバイタルサイン（音声・心拍・体温・呼吸）＋臭いを備えた人形を検知 ・検出範囲（部位、体温、距離）を評価 ・泥汚れ時のセンサ能力・リカバリ能力（泥の標準化必要）	・模擬瓦礫（倒壊家屋，流木，沼地）
					救助補助	・生存者を傷つけない除去（人力に近い） ・レスキュー隊員を傷つけない（2次倒壊、釘、使用工具（チェーンソーのキックバック））	ロボット＞人	・救助者の肉体的負荷の軽減 ・救助活動の安全性向上		・パワーアシスト ・生存者を傷つけずに瓦礫等を除去 ・瓦礫内に侵入した隊員の保護	〔パワードスーツ〕 ・HAL：Hybrid Assistive Limb（ｻｲﾊﾞｰﾀﾞｲﾝ） ・各種ジャッキ ・ケブラー性手袋 ・デュアルソー	・降雨に対する防水性能 ・動作時間（電源）の確保 ・瓦礫より下部に加重をかけずにハンドリング ・狭い場所での作業			・防水確認試験 ・狭い場所での人間工学的試験ー＞狭い場所の定義、破壊する対象の定義必要	・人工降雨室 ・模擬ガレキ
	土砂崩れ （土砂崩れにより、道路等のインフラ崩壊）	土砂や瓦礫の堆積 土砂ダムの生成	緊急対策工事	土砂崩れは年に数十件 土砂ダムは数十年に一件	現状調査	・道路の亀裂，地滑りが発生し、被災地に近づけない（地上からのアクセスは困難） ・強風 ・雨、雪	ロボットのみ	・人が入れない場所，有人機飛行禁止エリアの調査 ・シビアリティのより正確な判断が可能	・災害現場上空 ・雨，風	被災状況の把握 ・空中撮影 ・空中カメラ中継 ・撮影位置把握（GPS） ・本部への報告	〔飛行ロボット〕 上記飛行ロボットと同じ	・自律安定飛行（特に強風下） ・雨、雪による移動能力低下、センサ能力低下	UAV飛行の航空法上の認証	・自律飛行して被災状況を把握し、情報（映像，被災場所）を本部へ送信 （今後3年）	・飛行試験（迅速性、安定性、再現性（同じ場所に戻れるか）） ・移動中の画像センサ能力（広さ、分解能）	・通常の山間部や都市部 ・模擬環境（雨雪交じりの強風）
					走行路の確保，障害物（土砂・瓦礫・雪）の除去	・足場が悪い（瓦礫等） ・危険作業のため、搭乗操作できない ・低温、降雪	ロボット≫人	・二次崩落が懸念される現場での緊急対策工事が可能 ・重機オペレータの安全確保	・土砂崩れ現場 ・瓦礫・流木が堆積した不安定な足場 ・泥が堆積した軟弱な足場	・安全な場所から遠隔操作 ・足場の悪いところ（土砂，流木等）を走行 ・瓦礫，流木等を除去 ・測量 ・トラフィカビリティの測定 ・二次崩落予測のための計器設置 ・軽量化または空輸可能な重量に分解可能なこと	〔無人化施工建機〕 ・油圧ショベル（UAV，UGVで補助カメラ設置） ・GPS付UAV ・加速度センサー	・搭乗操作と比べ、作業効率が大きく低下 ・安定性確保（自律安定化） ・無線周波数帯の用途別割り当て（通信の集中回避） ・通信障害の回避（回り込みの確保） ・空輸能力のUP（分解の必要無ければ組立時間短縮） ・基地局立上げ時間の短縮	・災害用ホワイトスペースの確保 ・特殊運転技能を有するオペレータの継続的雇用	・スタンドアロンでの周辺空間認識機能 （今後5年） ・足場の悪いところでの車体安定化機能 （今後5年） ・特殊運転技能を要しないマンマシンインタフェース （今後5年）	・立上げ時間の測定（基地局設置、重機組立） ・走行時の安定性評価 ・不安定な足場での作業性評価（不安定状況の標準化：斜度、形状、地面剛性、材質）（作業の標準化） ・操作性（作業の標準化必要） ・通信距離と通信障害に対する安定性（森林中での通信）	・模擬瓦礫等の不安定足場（不整地） ・泥地等の軟弱足場 ・見通しがきかない（立木や建屋等通信上の障害物がある）場所 ・長距離通信（過去の崩落規模より決定）
										・安全な場所から遠隔操作 ・足場の悪いところ（土砂，流木等）を走行 ・瓦礫等を運搬	〔無人化施工建機〕 ・クローラーダンプ	・陸上,河川及び水深の浅い海岸での走行（水陸両用運搬車両が必要）			・走行時の安定性評価 ・走行性能評価	・模擬瓦礫等の不安定足場（不整地） ・水深の浅い河川に模擬瓦礫等
		土砂の堆積	復旧工事	土砂崩れは年に数十件 土砂ダムは数十年に一件	地形調査	・二次災害の危険があり、被災現場に人が近づけない ・ご遺体が土砂に混在の可能性あり	ロボット≫人	・人が入れない場所，有人機飛行禁止エリアの調査 ・シビアリティのより正確な判断が可能	・災害現場上空	・地形計測	〔飛行ロボット〕 ・無人ヘリ RMAX（ヤマハ） 〔適用可能技術〕 ・航空レーザー測量	・樹林に覆われた山間地の地形計測（植生の影響）	UAV飛行の航空法上の認証	・自律飛行して被災現場の地形を計測 （今後3年）	・飛行試験（迅速性、安定性、再現性（同じ場所に戻れるか）） ・作業効率評価 ・操作性評価 ・先行技術の事前検証 ・混在ご遺体の確認能力（土砂と混在ご遺体の標準化） ・通信距離と通信障害に対する安定性（森林中での通信）	・通常の山間部や都市部 ・模擬環境（雨雪交じりの強風） ・実際の災害現場を利用（試験フィールド制度等） ・模擬現場と遠隔操縦室 ・見通しがきかない（立木や建屋等通信上の障害物がある）場所 ・長距離通信（過去の崩落規模より決定）
					土砂・雪の除去・整地		ロボット≫人	・二次崩落が懸念される現場での復旧工事が可能 ・重機オペレータの安全確保	・広い範囲で土砂が崩落した斜面 ・広い範囲に土砂が堆積した麓域	・安全な場所から遠隔操作 ・掘削，整地 ・二次崩落の監視 ・掘削土砂内のご遺体の確認 ・空輸可能な重量に分解可能なこと	〔無人化施工建機〕 ・ダンプ ・油圧ショベル ・ブルドーザ 〔適用可能技術〕 ・マシンガイダンス／マシンコントロール ・画像処理	・搭乗操作と比べ、作業効率が低下 ・確認のための作業効率低下 ・無線周波数帯の用途別割り当て（通信の集中回避） ・通信障害の回避（回り込みの確保） ・空輸能力のUP（分解の必要無ければ組立時間短縮）	災害用ホワイトスペースの確保	・搭乗操作並みの作業効率 （今後5年）		
										・安全な場所から遠隔操作 ・土砂の運搬	〔無人化施工建機〕 ・クローラーダンプ	・陸上,河川及び水深の浅い海岸での走行（水陸両用運搬車両が必要）			・走行性能評価（路面形状、路面材質、水深を標準化）	・水深の浅い河川に模擬瓦礫等

評価表４　試験項目細分（水害・土砂崩れ災害）

機能分類 ・機能 ・耐環境性 ・耐久性 ・安全性		試験項目	評価		時間軸				対象となるロボット					
			適応範囲・対象・条件 （想定される範囲内で種類や数値、条件等を変えて試験）	評価内容 （計測など）	発生直後	７２時間以内	復旧	平常時	飛行型	水面浮上型	水中型	ヘビ型	水陸両用型	クローラ・車輪型
機能	移動能力	空中を移動	天候（風速・降雨・降雪・照度） 障害物（立木・架空線・高架橋等構造物）	速度・位置決め・ホバリングの安定性・飛行時間・操縦性 衝突回避・通信距離・防水性	◎	○	○	○	◎					
		水面を移動	流水（流速・濁度・照度） 障害物（流木・車両） 被災者	速度・位置決め・姿勢保持時間・航行時間・操縦性 衝突回避・耐衝撃性能・通信距離・防水性	○	◎	○	○		◎		○	○	
		水中を移動	水深（水圧・照度） 流水（流速・濁度） 障害物（流木・車両）	耐水性 速度・位置決め・停止性・航行時間・操縦性 衝突回避または耐衝撃性能・通信距離・防水性	○	◎	○	○			◎	○	○	
		斜面の移動	勾配・照度 地盤支持力 障害物（立木・倒木・転石・瓦礫・段差）	速度・進入角度・転倒角・滑り量・走行時間・操縦性 衝突回避・乗越え高さ・通信距離・防水性	○	◎	○	○				○	○	◎
		瓦礫上の移動	勾配・高さ・照度 瓦礫種別（コンガラ・木材） 通信障害（瓦礫）	速度・姿勢保持（踏み抜き回避）・走行時間・操縦性 乗越え高さ・通信距離・防水性 瓦礫下部の人に掛かる荷重	○	◎	○					○	○	◎
		泥濘上の移動	勾配 地盤支持力 障害物（立木・倒木・転石・瓦礫・段差）	速度・姿勢保持（接地圧）・走行時間・操縦性 衝突回避・乗越え高さ・通信距離・防水性	○	◎	○					○	○	◎
	検出能力	人の体温	天候（風速または流速・降雨・降雪・気温または水温）	検知時間・検知距離・検知範囲・最小検知レベル	○	◎			○	○	○	○	○	○
		人の呼吸音・声	天候（風速または流速・降雨・降雪） 暗騒音	検知時間・検知距離・検知範囲・最小検知レベル	○	◎						○	○	○
		人の鼓動	天候（風速または流速・降雨・降雪） 暗騒音・暗振動	検知時間・検知距離・検知範囲・最小検知レベル	○	◎			○	○	○	○	○	○
		人の動き	天候（風速・降雨・降雪） 照度・濁度	検知時間・検知距離・検知範囲・最小検知レベル	○	◎			○	○	○	○	○	○
		人の臭い	天候（風速または流速）	検知時間・検知距離・検知範囲・最小検知レベル	○	◎	○			○	○	○	○	○
		位置	天候（降雨・降雪） 上空障害物（立木・瓦礫・高架橋等構造物） 水深・濁度	検知時間・検知距離・検知範囲・精度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		地形測量	天候（降雨・降雪） 水深・濁度	検知時間・停止の必要性・検知距離・検知範囲・精度	◎	○	○	○	◎	○	○	○	○	○
		障害物検知	大きさ	検知時間・検知距離・検知範囲・精度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		画像	天候（降雨・降雪） 水深・濁度・照度	視認距離・視野角・表示性能（分解能・色判別・空間認知） 亀裂の認識・濁りの認識	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		音	暗騒音	検知時間・検知距離・検知範囲・最小検知レベル 落石音の認識	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	◎
		触力覚	天候（降雨・降雪・風速または流速） かたさ	検知時間・検知距離・検知範囲・対象物の判定	○	○	○	○		○	○	○	○	○
		トラフィカビリティ	コーン指数	測定時間・精度	○	○	◎					○	○	◎
	情報統合能力	3Dデータ作成	天候（降雨・降雪・風速または流速）	精度・再現性・データの汎用性	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	◎
	作業能力	被災者救出	地上・瓦礫下・水面（流速）・水中（流速・水深）	救出時間・被災者へのダメージ・操縦性 運搬（牽引）重量	○	◎	○		○	○	○	○	○	○
		障害物ハンドリング	形状・性状・重量・数・障害物の姿勢（瓦礫・土砂・車両） 風速・流速	撤去時間・揚重重量・操縦性	○	◎	○			○	○	○	○	○
		障害物の加工	材質（木材・コンクリート・金属）・形状・硬さ	切断時間・切断可能な厚み	○	◎				○	○	○	○	
		堆積物の除去	瓦礫・土砂	除去能力（ton/h）・操作の容易性		◎	○						○	○
		掘削・地盤成形	土砂・コンクリート・築堤材料	出来高（作業量）・出来形（精度）			◎	○						◎
	運用	輸送形態		輸送手段・分割最大重量	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		起動時間		組立時間・調整時間	○	○			○	○	○	○	○	○
		稼動時間		稼動時間	○	○			○	○	○	○	○	○
		充電時間・燃料供給時間		充電時間・予備バッテリー交換時間・燃料供給時間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		メンテ工数		メンテ時間・消耗品交換頻度・予備品供給能力			○	○	○	○	○	○	○	○
		訓練に必要な時間		訓練に要する時間			○	○	○	○	○	○	○	○
	安全機能	安全装置		過負荷時の停止及び再起動	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		巻き込まれ・挟まれ防止	人との共存作業時	接近警報・接近時の停止・回転部のカバー	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	耐環境性	温度（気温・水温）		作動可能な温度領域	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		湿度		結露の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		防塵		内部への粉じん侵入の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		耐水	降雨量・降雨角度・水深	内部への水分侵入の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		耐雷		規格値	○	○	○		○	○	○	○	○	○
		EMC		規格値	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		通信障害・距離	通信障害（立木・構造物地形・降雨・降雪・霧・漂流物・濁度）・距離	スループット・パケットエラー率 有線はケーブル長・巻取り機能・ひっかかりの解除	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	耐久性	連続運転	規定負荷・規定動作の繰り返し	一定時間での摩耗・劣化・故障	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		振動	運搬時に想定される最大の振動	一定時間での故障・破損	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		衝撃	規定回数、規定高さからの落下	一定回数での故障・破損	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	安全性	通信遮断時の動作		暴走しないこと・再接続時の起動・不時着機能	○	○	○	○	◎	○	○	○	○	○
		絶縁	規定電圧	規定値以上の絶縁抵抗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		非常停止		独立性・優先性・再起動条件	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

評価表５　想定災害とロボットとの関連細分（テロ・ＣＢＲＮＥ災害）

想定対象・現場	想定災害・災害種類	被災レベル・被災状況	時間軸（平時，発生直後，72時間以内，復旧）	頻度・タイミング	遂行作業・対応作業	制約条件	ロボット導入の期待	ロボット導入の価値	場所・移動環境（詳細）	必要な機能（移動、作業、環境）	現状技術でできること（適用可能ロボットまたは技術）	技術課題（困難を伴うこと）	非技術課題（規制，制約など）	将来展望（今後どの程度で実現するか）	行うべき試験(性能，耐久性，耐環境性など)	評価フィールドへの要求
公共建屋内部 (地下街を含む)	化学剤攻撃 (C) 生物剤攻撃 (B)	死者・被害者多数	発生時	非常に稀	被害情報の収集 ・生存者/周囲状況 救助	汚染環境(化学剤/生物剤) 狭隘部通過 煙/暗闇	100%	汚染環境下での運用	建屋内 ・階段/段差 ・斜面 ・エレベーター ・ドア(改札)	【移動】 ・左記移動環境の移動 【作業】 ・動画送信 ・化学剤検知/サンプル収集 ・試薬散布/液拭き取り ・重量物運搬 【環境】 ・防爆/防水/煙/暗闇	クローラロボ	複雑な障害物自律運用 空中ロボ運用	安全規格 無線免許 航空法	人間と同等の移動/作業	移動能力 遠隔操作 耐環境能力	移動能力評価 非見通し区画からの操作 検知/サンプル収集 耐環境能力評価
			数日間		環境情報収集 救助 除染作業		50～80%									
			復旧		環境情報収集 ライフライン復旧		50～80%									
	放射線攻撃 (R) 核攻撃(N)	死者・被害者多数	発生時		被害情報の収集 ・生存者/周囲状況 救助	汚染環境(放射線) 狭隘部通過 煙/暗闇	100%			【移動】 ・左記移動環境の移動 【作業】 ・動画送信 ・放射線検知 ・瓦礫除去 ・重量物運搬 【環境】 ・防爆/防水/煙/暗闇						
			数日間		環境情報収集 救助 除染作業		80%～100%									
			復旧		環境情報収集 除染作業 ライフライン復旧		80%～100%									
	爆発物攻撃 (E)	死者・被害者多数	発生時		被害情報の収集 ・生存者/周囲状況	危険環境(爆発物) 狭隘部通過 煙/暗闇	80%～100%			【移動】 ・左記移動環境の移動 【作業】 ・動画送信 ・瓦礫除去 ・重量物運搬 【環境】 ・防爆/防水/煙/暗闇						
			数日間		環境情報収集 救助		30～50%									
			復旧		環境情報収集 ライフライン復旧		30～50%									
	CBRN(E)攻撃(テロ)を未然に察知・不発	なし	平時・発生時		周囲状況の収集 不審物の識別・処理	危険環境(CBRN（E）) 狭隘部通過 煙/暗闇	80%～100%	危険作業代行		【移動】 ・左記移動環境の移動 【作業】 ・動画送信 ・瓦礫除去 ・サンプル収集 ・重量物運搬 ・破壊処理（起爆装置） ・防爆/防水/煙/暗闇						

評価表６　試験項目細分（テロ・ＣＢＲＮＥ災害）

機能分類 ・機能 ・耐環境性 ・耐久性		試験項目	評価		時間軸			象となるロボ		
			適応範囲・対象・条件 （想定される範囲内で種類や数値、条件等を変えて試験）	評価内容 （計測など）	発生直後	数日間～復旧	平常時	クローラ・車輪	飛行型	水中型
機能	移動能力	階段/エスカレータ昇降	形状（直線、踊り場、らせん、手すり有無、幅、高さ）、踏面材質（コンクリート、縞鋼板、グレーチング、反射率）、悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物）	速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		段差、堰の通過	形状（高さ、奥行、幅、段数）、踏面材質（コンクリート縞鋼板、グレーチング、反射率）、悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物）	荷重の大きさ、速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		斜面通過	形状（斜度、長さ）、踏面材質（コンクリート縞鋼板、グレーチング、反射率）、悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物）、移動向き（真直ぐ、トラバース）	荷重の大きさ、速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		穴ぼこ通過、回避 （ピット等のフタ外れ等）	形状（面積、深さ）、周囲の障害物	発見能力、回避能力、速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		エレベータでの昇降	ボタン押下	速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		穴ぼこ通過、回避 （ピット等のフタ外れ等）	形状（面積、深さ）、周囲の障害物	発見能力、回避能力、速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		水たまり通過、回避	場所（屋内、屋外）、対象（清水、泥水）、水深	発見能力、回避能力、速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		砂利路面移動	砂利密度	速度、操縦の容易性、砂利の掘れ深さ	○	○	○	○		
		グレーチング上移動	ピッチ、剛性違い、欠落部有無（穴ぼこ）	速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		狭隘部通過（正常状態）	隙間の広さ、障害物反射率	速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○
		ドア通過	種類（押し戸、引き戸、スライド、重さ、反力の有無）、ドアノブ回し、開錠	速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		マンホール通過	種類（垂直、水平、扉付）、形状（径、奥行）、取付高さ	速度、操縦の容易性	○	○	○	○		
		ガレキ上移動	ガレキの大きさ、密度、重なり具合、グラつき度	転倒の有無、速度、操縦の容易性	○	○		○		
		ガレキ内隙間通過	隙間の大きさ、形状	速度、操縦の容易性	○	○				
		狭隘部通過（倒壊状態）	隙間の大きさ、形状	速度、操縦の容易性	○	○		○	○	○
		移動障害物除去（押しのけ）	障害物の大きさ、重さ、形状、密度、重なり具合	速度、操縦の容易性	○	○		○		
		転倒	転倒場所（平地、階段）、地面硬さ	転倒で故障しないか、転倒時の飛散状況	○	○	○	○		
		落下	落下高さ、地面硬さ	落下で故障しないか、落下時の飛散状況	○	○	○	○	○	
		広範囲自律移動	建屋内	自己位置推定精度、経路生成能力、マップ生成や教示工数		○	○	○	○	○
		走行台車への乗降	走行台車の傾斜、周囲の障害物	時間	○			○	○	
		走行台車上での安定性	走行台車が斜面や段差を走行	走行振動で落下、転倒しないか	○			○	○	
	検出能力	有害物質検知（C/R/N/(E)）	有害物質種類、悪条件（風）	検知	○	○	○	○	○	
		画像（転送と処理）	種類（腐食や亀裂、変形、液漏れ箇所、気体漏れ箇所等）、利用波長（可視光、可視光外）、悪条件（逆光、暗闇）	表示性能（分解能、ズーミング、色による判別）、異常発見正解率	○	○	○	○	○	○
		温度検出	場所（配管、タンク等）、接触＆非接触（サーモグラフィ）、測定位置	測定精度	○	○	○	○	○	○
		距離測定	種類（障害物、水深、水位）、向き（上下、左右、前後）	測定精度、時間、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○
	情報統合能力	3Dデータ作成	移動を伴うデータ統合、複数ロボットデータ統合	自己位置推定精度	○	○	○	○	○	○
		現場モニタリング	複数ロボット位置、対象物位置	自己位置推定精度	○	○	○	○	○	○
	作業能力	SW操作	種類（プッシュ）、取付位置	時間、操縦の容易性	○	○		○		
		収納扉開閉	ドアノブ種類、取付位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性	○	○		○		
		ピック＆プレイス	目的（ガレキ除去、無線機設置、不特定対象物か）、種類（重さ、大きさ、形状、密度、重なり具合）、対象物の位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性	○	○		○		○
		切断、穴あけ	種類（配線、ワイヤ、鉄筋、木材）、工具使用（電動ドリル、電動のこぎり）、切断場所、周囲の障害物	時間、操縦の容易性	○	○		○		○
		検査物質収集（C/B//(E)）	有害物質種類、悪条件（風）	時間、操縦の容易性	○	○		○	○	○
		検査試薬の塗布、ブロー	種類（粉、液体）、塗布位置、周囲の障害物	その後の検査に十分な能力か、時間、操縦の容易性			○	○		
		液漏れ等の拭き取り	拭き取り対象の位置、周囲の障害物	拭き取り能力（残渣）、時間、操縦の容易性			○	○		
		汚染原・不審物対処	有毒物質の密閉、起爆装置(信管等)の破壊	安全性、操縦の容易性、確実性	○	○	○	○		○
		重量物運搬	種類（重量、サイズ、形状、固形か変形物）	搭載安定性、運搬時の移動制約（速度、空間）			○	○		
	運用	起動に必要な時間	起動時間	時間、必要人数	○			○	○	○
		稼働時間	動作パターンを規定	時間	○	○	○	○	○	○
		充電時間	充電時間	時間	○	○	○	○	○	○
		メンテ工数	センサ、工具、消耗品等の交換	時間、必要人数			○	○	○	○
		除染	高圧洗浄、流水、拭き取り、部品交換等	容易性、時間（被ばく量）、必要人数		○	○	○	○	○
		遠隔操作	建屋内、市街地、複数ロボット指揮統制	同時操作ロボット数、操作容易性	○	○	○	○	○	○
		訓練に必要な時間	操作訓練	時間			○	○	○	○
	安全性	防振	爆発物への接近	振動により爆発しない	○	○	○	○		
		作業安全性	人の接近	人の検知、人の回避	○	○	○	○	○	○
		自律運用	ネットワーク切断	フェールセーフ	○	○	○	○	○	○
	耐環境性	粉塵、煙、蒸気		機能に影響のない濃度	○			○	○	
		暗闇		機能への影響の有無	○	○		○	○	○
		高温、低温	稼働、保管、起動	許容範囲	○	○	○	○	○	○
		防水		規格値	○	○	○	○	○	○
		防爆		規格値	○	○	○	○	○	○
		耐放性	瞬時、累積	許容範囲	○	○	○	○	○	○
		耐放射線	稼働、保管、起動	許容範囲	○	○	○	○	○	○
		耐雷		規格値	○	○	○	○	○	
		EMC		規格値	○	○	○	○	○	○
		通信切れ、通信量制約		機能に影響ない遮断頻度、最低必要通信量、デューティ	○	○	○	○	○	○
		風		機能に影響のない範囲	○	○	○	○	○	
耐久性		連続、繰り返し稼働	動作パターンを規定	一定時間での摩耗、劣化、故障	○	○	○	○	○	○
		運搬	運搬時のGパターンを規定	一定時間での摩耗、劣化、故障	○	○	○	○	○	○

評価表７　想定災害とロボットとの関連細分（原子力災害）

制約条件	ロボット導入の期待	ロボット導入の価値	場所・移動環境（詳細）	必要な機能（移動、作業、環境）	現状技術でできること（適用可能ロボットまたは技術）	技術課題（困難を伴うこと）	非技術課題（規制，制約など）	将来展望（今後どの程度で実現するか）	行うべき試験(性能，耐久性，耐環境性など)	評価フィールドへの要求
作業環境が放射線環境であること	ロボット＞＞人 放射線環境下での作業は完全無人化が理想である	作業者（調査者）の安全確保	被災プラント近傍の上空、陸上、水中	上空への移動	遠隔操作基地～観測地点が遠くない（数百m未満）場合は、無人航空機により基本的にはミッション遂行が可能。	遠隔操作基地～観測地点が離れている（数百m以上）場合、飛行時間、通信による情報伝達量の確保が困難となる。	【無人航空機/飛行ロボットに関して】 運用に関する法律/ルールが未整備である。 【通信に関して】 電波法により帯域や出力が規制されている。（無人化施工機械と同様に、災害対応ロボット専用の無線局免許、無線従事者免許の許可申請が前もって必要である。） 【放射線管理に関して】 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律などにより、作業員の立ち入り可能区域、連続作業可能時間、累積作業時間などが規制されている。また、汚染機器を管理区域外に搬出することもできない。 【原子力施設のデータの取り扱い】 施設内でロボットが移動または作業する場合、施設図面や災害状況が3Dモデル化によりデジタルマッピングされていればロボット操作上極めて重要な情報となる。しかしながらこれらの情報は秘密情報でもあり取り扱いに注意が必要なため、ロボット開発者や利用者に公開されることが難しい。これら原子力施設の図面や各種情報を有効に共有して利用出来る新しいルール作りが必要となる。	【3年以内】 ・原子炉格納容器より外側の各種機器へのアクセスと各種施工の無人化実現 ・数百m未満の距離からの各種遠隔操作 【5年以内】 ・原子炉格納容器内部に対する施工の無人化実現 ・数km未満の距離からの各種遠隔操作 【10年以内】 ・原子炉圧力容器内部に対する施工（開口作成、デブリ取出しなど）の無人化実現 ・数km以上の距離からの各種遠隔操作	移動精度、速度、稼働可能時間、操作性、可搬重量など	1. 下記の各評価が実施できる機能 ・耐環境検証 ＊耐放射線環境（耐放射線） ＊揮発可燃性ガス環境　（防爆） ＊温度、湿度 ＊降雨及び水没（防水） ・移動性能検証 ＊不整地、段差、階段、梯子、空中（飛行）、水中（遊泳） ＊曲がり角、狭隘通路、各種扉やドアの通過 ＊通信手段の確保（無線有線） ・メンテナンス検証 ＊消耗品部品交換（要する設備、人員、時間等の評価） ・ロボット操作性検証 ＊オペレーショントレーニング ＊オペレータの疲労、負荷、ミッション達成に要する時間 ＊ロボットシミュレーター（操作訓練および実施前の事前評価） 2. 軽度な汚染ロボットをメンテナンスできる放射線管理区域(Hot Shop)
									移動精度、速度、稼働可能時間、操作性、可搬重量など	
									対応可能なドアの種類数、開閉抵抗、作業速度、操作性など	
									対応可能な段差高さ、ステップ奥行き、幅、踊り場寸法など	
									対応可能な段ピッチ、背かごの有無など	
									対応可能な瓦礫の高さ、形状など	
									対応可能な瓦礫／異物の形状、サイズ、重量など	
				昇降装置などによる、ロボットや測定機の、高所位置への移送／回収		⇒防水性／防滴性の確保 ・高温環境 ⇒耐熱性の確保			対応可能な高さ、作業スペースなど	
				放射線量測定、核種特定		【放射線環境下の場所がある】 通常の電子機器（センサ）の安定動作が阻害される、また寿命が短くなる。 ⇒耐放射線性の確保			測定・検出精度など	
				放射能汚染物質の漏えい個所の検出		【その他、センサの安定動作を阻害する環境である可能性がある】 ・高湿度環境 ⇒防水性／防滴性／曇り防止機能の確保 ・高温環境 ⇒耐熱性の確保			検出精度など	
				画像撮影					画質など	
				水位計測					計測精度など	
				温度計測					計測精度など	
				湿度計測					計測精度など	
				異常音計測					計測精度など	
				小片の採取					対応可能な材質など	
				瓦礫／異物撤去		「被災状況の把握」の各項で述べた全てが適用される			対応可能な瓦礫／異物の形状、サイズ、重量など	
				配管や手摺の切断・撤去					対応可能な材質、作業時間、操作性など	
				バルブ開閉					対応可能なバルブ形状、サイズ、開閉抵抗など	
				仮配管の接続					対応可能な配管材質、サイズ、形状、施工法など	
				遮蔽材の運搬、設置助勢					対応可能な遮蔽材の重量、サイズなど	
				除染					除染性能、作業時間な	
				被災状況に応じた各種施工		「被災状況の把握」の各項で述べた全てが適用される			施工品質、作業時間、操作性など	

評価表８　試験項目細分（原子力災害）

機能分類 ・機能 ・耐環境性 ・耐久性		試験項目	評価		時間軸				対象となるロボットの移動方式								
			適応範囲・対象・条件 （想定される範囲内で種類や数値、条件等を変えて試験）	評価内容 （計測など） （全試験項目での達成の可否又は、達成率等の確認）	発生直後	72時間以内	復旧	平常時	クローラ・車輪	脚式	ヘビ型	配管内	飛行型	水中型	水陸両用型	吸着型	無移動設置型
機能	移動能力 （ロボット自身が移動して、人、センサ、施工機などを運搬）	階段昇降	場所（屋内、屋外）、 形状（直線、踊り場、らせん、手すり有無、幅・高さ、蹴上板の有無、踊り場形状）、 踏面材質（コンクリート、縞鋼板、グレーチング、その他（大理石、木材））、端部形状（R形状、滑り止め有無）、 悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物（砂状、汚泥状、ガレキ類、その他））	速度、操縦の容易性、安全・安定性、踊り場を通過し上階へ移動できるか、上り下り連続階段を通過できるか、移動可否	○	○	○	○	○	○	○				○		
		段差、堰の通過	場所（屋内、屋外）、 形状（高さ、奥行、幅、段数、傾斜（前後・左右・複合）等）、 踏面材質（コンクリート、縞鋼板、グレーチング、その他（大理石、木材））、端部形状（R形状、滑り止め有無）、 悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物（砂状、汚泥状、ガレキ類、その他））	速度、操縦の容易性、安全・安定性、移動可否	○	○	○	○	○	○	○				○	○	
		斜面通過	場所（屋内、屋外）、 形状（斜度、長さ）、 踏面材質（コンクリート縞鋼板、グレーチング）、 悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物（砂状、汚泥状、ガレキ類、その他））、 移動向き（斜面に並行、斜面に垂直）	速度、操縦の容易性、安全・安定性、移動可否	○	○	○	○	○	○	○	○			○		
		ロボット運搬車両への自走乗り降り	場所（屋内、屋外）、 パワーゲートへの乗り降り、斜面を使用しての荷台への乗り降り	速度、操縦の容易性、安全・安定性、乗り降り可否	○	○	○	○	○	○	○				○		
		穴ぼこ通過、回避 （ピット等のフタ外れ等）	場所（屋内、屋外）、 形状（面積、深さ）、周囲の障害物	穴の発見と回避能力、速度、操縦の容易性、移動可否	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	
		空中移動	風の有無（風速）、離着陸の方法、離着陸に必要なスペース	速度、操縦の容易性、安全・安定性	○	○	○	○					○				
		水中移動	場所（屋内、屋外）、 対象（清水、濁水、泥水、汚泥、汚染水）、 水流の有無	速度、操縦の容易性、安全・安定性	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	
		はしご、段はしご昇降	場所（屋内、屋外）、 材質（鉄、アルミ、その他）、 形状（丸パイプ状、角パイプ状、平板状、その他）、 背カゴ有無、キャットウォーク取付向き（前、横、背面）、 手すり有無	速度、操縦の容易性、安全・安定性、移動可否	○	○	○	○		○	○		○			○	
		平地（不整地）移動・走行	場所（屋内、屋外）、 通路形状（通路幅、コーナ・クランク・交差点形状、段差）、 路面材質（コンクリート、アスファルト、砂利、土、鉄板、縞鋼板、グレーチング、その他（大理石、木材））、 表面材質（鏡面仕上げ、コーティング、カーペット、フロアマット、ブルーシート）	速度、操縦の容易性、砂利の掘れ深さ、移動可否	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	
		配管上・配管内移動	形状（径、エルボ、分岐、フランジ、サポート、径変化）、複数本（平行、交差、段違い、間隔）	速度、操縦の容易性、安全・安定性、移動可否	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	
		ドア通過 （完全隔離区域含む）	場所（屋内、屋外）、 扉※4機構（開き戸(ドア)（片開き・両開き、押し・引き）、引き戸（レール、上吊り）、スライド、グライドスライドドア、折戸、回転扉、引込み扉、エアロック等二重扉）、 材質（コンクリート、鉄）、 厚さ（一般、遮へい扉）、 重量（扉単体重さ、） 反力の有無（自動、半自動、手動、ドアクローザーの有無）、 ドアノブ回し（ドアノブ、レバーハンドル）、 開錠(鍵の種類） 切断撤去、破壊の可否	速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	
		ガレキ上移動	ガレキの大きさ、密度、重なり具合、グラつき度	速度、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○		○		○		
		移動障害物除去（押しのけ）	障害物の大きさ、重さ、形状、密度、重なり具合	速度、操縦の容易性、安定性	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	
		有線ケーブル引き回し	場所（屋内、屋外）、 引きまわし環境（地上、水上、水中）、 引っ掛かり対象物（配管等）、 経路の種類（コーナ、らせん階段等、小径貫通口（ペネトレーション））、 ケーブル水環境特性（中性浮力、沈み勝手、浮き勝手）、 ケーブル材質特性（耐曲率半径、張力）、 送出し・巻き取り機構（有無、送出し可能長さ（内蔵長さ））	張力の運動能力への影響、通信速度減衰率、引っ掛かり外しの容易性	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	
		壁面、天井面移動 オーバハング裏面アプローチ	形状（曲面、凹面、凸面、梁、ボルト、ウィンドウガータ）、壁面材質（鉄、コンクリート）	速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○	○				○		
		遠隔操作性	ロボット単体で操縦できるか（ほかのロボットや固定カメラが自機を映している映像無しで動作できるか） 通路、狭隘部、コーナ・交差点、階段段差等	ロボットを直視できない場所からのロボット操縦可否	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		広範囲自律移動	プラント敷地内（屋外）や屋内	自己位置推定精度、経路生成能力、マップ生成や教示工数			○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	検出能力	放射線強度	放射線種類、核種、強度、線源方向、分布状況（ガンマカメラ）	測定精度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		ガス漏れ検知	ガス種類（可燃性、毒性）、 測定種類（単独、複合）、 サンプリング（可否） 悪条件（風）	検知濃度	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○
		画像（転送と処理）	種類（腐食や亀裂、変形、液漏れ箇所、気体漏れ箇所等）、 利用波長（可視光、可視光外）、 悪条件（逆光、暗闇、高温・低温、多湿度・乾燥、降雨・漏水、霧、水蒸気、放射線強度）、 撮影位置（距離、範囲（水平方向角度、仰角）、ズーム倍率） 画質（カメラ（有効画素数）・、ビデオ（映像ビットレート・フレーム数）	表示性能（分解能、ズーミング、色による判別）	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		温度検出	場所（配管、タンク等）、 接触＆非接触（サーモグラフィ）、 測定位置、 測定温度（低温、高温）	測定精度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		減肉、肉厚測定	保温材の有無、測定位置、周囲の障害物	測定精度、時間、操縦の容易性			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		打音検査	打撃位置、周囲の障害物、検出評価性能	異常発見正解率、時間、操縦の容易性			○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
		距離測定	種類（対象物、水深、水位）、向き（上下、左右、前後）	測定精度、時間、操縦の容易性		○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
	通信能力	通信能力（無線・有線）	狭隘複雑経路、遮蔽空間、障害物、配管、水中	無線通信距離、通信速度、通信容量、中継器の必要性、資格申請要否	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	情報統合能力	3Dデータ作成	移動を伴うデータ統合、複数ロボットデータ統合	自己位置推定精度、統合データの整合度 マップ作成工数		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		損傷マップ作成	移動を伴うデータ統合、複数ロボットデータ統合	自己位置推定精度、統合データの整合度 マップ作成工数		○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	作業能力	バルブ開閉	種類（手動、電動、丸ハンドル（大～小）、コック）、取付位置＆向き、周囲の障害物	時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○				○	○	○
		SW操作	種類（シーソ、ロータリ、プッシュ）、取付位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○				○		○
		収納扉開閉	ドアノブ種類、取付位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○				○		○
		目視・偵察・計測	状況確認のための調査（画像）、計測（水位・温度・放射線・etc.）	視認性、計測作業の容易性	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○
		ピック＆プレイス	把持可能な物の大きさ、質量、形状	時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○
		配線取り回し、引き回し	種類（電源線、通信線）	引っ掛かりへの対応の容易性、時間、操縦の容易性		○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○
		コネクタ挿抜、配管接続	コネクタ種類、配管種類、取付位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性		○	○		○	○	○	○		○	○	○	○
		交換（分解、組立）	交換対象種類、固定方法種類、周囲の障害物	時間、操縦の容易性			○	○	○	○	○	○			○	○	○
		切断、穴あけ、撤去	種類（配管、手すり、配線、ワイヤ、鉄筋、木材）、工具使用（電動ドリル、電動のこぎり）、切断場所、周囲の障害物	時間、操縦の容易性			○		○	○				○	○	○	○
		コンクリートコアサンプリング	除染方式決定のための壁面・床面コンクリートコアサンプリング	時間、操縦の容易性			○		○	○				○	○	○	○
		検査試薬の塗布、プロー	種類（粉、液体）、塗布位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性			○	○	○	○	○		○	○		○	○
		散布・噴霧 （消火剤、中和剤、飛散防止材）	種類（粉、液体）、 散布噴霧位置、 環境（風速、雨、漏水）、 周囲の障害物	時間、操縦の容易性			○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
		除染（液漏れ等の拭き取り・洗浄・はつり除去）	除染対象の位置、周囲の障害物	除染能力（残渣）、時間、操縦の容易性			○	○	○	○	○				○	○	○
		堆積物除去	場所（配管内、タンク内、炉内）、除去対象（スラッジ、触媒）	除去能力（残渣）、時間、操縦の容易性			○	○	○	○	○	○			○	○	○
		重量物運搬	種類（重量、サイズ、形状、固形か変形物、遮蔽材）	搭載安定性、運搬時の移動制約（速度、空間）		○	○	○	○	○	○	○			○	○	○
		物品・機器の移動、案内	搭載しているロボットアームやクレーンで物品や機器（ロボットを含む）を輸送・移動・案内して目的地点へ届ける（大きさ、重さ）	時間、操縦の容易性		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	運用	起動に必要な時間		時間、必要人数	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		稼働時間	動作パターンを規定	時間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		充電時間		時間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		メンテ工数	センサ、工具、消耗品部品交換、分解容易性	時間、必要人数、部品点数や種類		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		除染	高圧洗浄、流水、拭き取り、部品交換等	密閉性、IP試験、容易性、時間（被ばく量）、必要人数		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		操作性	準備～作業完了までの操作	オペレータの疲労、負荷、ミッション達成に要する時間		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		協力・協調作業	複数台による相互支援・連携作業	協調動作・支援の容易性		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		オペレーション	トレーニングに必要な時間 検定試験 オペレーターの資格・条件 ・免許(受験資格、試験機関、・・) ・技能講習(受験資格、講習機関、・・) ・特別教育(受験資格、教育機関、・・) ・認定講習(受講資格、講習機関、・・)	時間、必要な人員、必要な機材				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	安全	一時停止・非常停止・再起動	動作異常時、動作不安定時の停止及び再起動	異常状態の再現と停止性能	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		安全装置作動確認	各種安全装置の作動確認	過負荷等各種安全装置の動作性能	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		故障時対応	遠隔操作時の故障対応（通信切断・動力切断etc.）	複数ロボット支援による協調故障修理	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		暴走対策	制御不能になったロボットの暴走対策	自律停止、状況データの自動送信、予備制御	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
耐環境性		粉塵、煙、蒸気		機能に影響のない濃度	○	○	○		○	○	○	○	○		○	○	○
		暗闇		機能への影響の有無	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○
		高温、低温	稼働、保管、起動	許容範囲（耐温度衝撃）	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		高湿度・低湿度	稼働、保管、起動	許容範囲（耐高湿度）	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		衝撃	稼働、保管、起動	許容範囲（耐衝撃）	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		落下	稼働、保管、起動	許容範囲（耐落下）	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		振動	稼働、保管、起動	許容範囲（耐振動）	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		防水、防塵・耐塵		規格値、IP試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		防爆	揮発可燃性ガス環境	規格値	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		耐放射線	瞬時、累積	許容範囲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		耐雷		規格値	○	○	○	○	○	○	○		○			○	○
		EMC		規格値	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		風		機能に影響のない範囲	○	○	○	○	○	○			○			○	○
		配管、タンク内環境	液体内、粉体内、流水内、圧力下	機能に影響のない範囲		○	○	○			○	○		○	○		○
耐久性		連続、繰り返し稼働	動作パターンを規定	一定時間での摩耗、劣化、故障	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		運搬	運搬時のGパターンを規定	一定時間での摩耗、劣化、故障	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		衝突・落下衝撃対策	ロボット動作時の周囲への衝突・落下時の衝撃対策	不慮の事故に対するロボットのロバスト性能	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

評価表９　想定災害とロボットとの関連細分（プラント災害）

想定対象・現場	想定災害・災害種類/平常時作業	被災レベル・被災状況	時間軸（平時，発生直後，72時間以内，復旧）	頻度・タイミング	遂行作業・対応作業	制約条件（環境条件）	ロボット導入の期待される依存比率	ロボット導入の価値	場所・移動環境（詳細）		必要な機能（移動、作業、環境）		現状技術でできること	技術課題（困難を伴うこと）	非技術課題（規制、制約など）	技術的将来展望（今後どの程度で実現するか）	行うべき試験（性能、耐久性、耐環境性など）	評価フィールドへの要求
									移動環境	作業対象物								
精油、石油化学、化学、製鉄、発電	自然災害（地震、津波、洪水、雷、竜巻、台風、大雪）、または事故	漏えい、火災、爆発、倒壊、水没	発生直後	石油コンビナートにおける火災・爆発・漏洩事故204件@715特定事業所（H23年度：出典H24消防白書）	状況確認（映像、ガス濃度）	倒壊 狭隘 ガス 高温 粉塵・煙 暗闇	ロボット>>人	危険作業代行 計測精度向上 位置情報統合	タンク、塔、配管の上や周辺	配管、フランジ	移動	※移1	クローラロボ：砂利、段差、堰、階段	らせん階段、配管跨ぎ、はしご、ドア通過、ドア鍵開け、こすりながら狭隘部を通過、歩行踏破、ほふく前進	移動ロボットの防爆規格 災害対応ロボット専用周波数	5年以内	アクセス能力 遠隔操縦 移動耐久 起動時間	構造と表面性状を模擬したテスト環境：狭隘な通路、グレーチング、水たまり、水濡れ階段、錆びた床面や手すり、銭面の配管など 落下、転倒試験、加振装置
												※移2	クローラ：ガレキ能動スコープ：ガレキ 飛行：ガレキ飛び越え	ガレキ、倒壊物による狭隘部通過、障害物除去、空中移動、行動可能範囲				
											作業	※作1	クローラロボ：搭載可能 人：運搬可能	搭載できるセンサの開発 必要なセンサの載せ替え			遠隔検出性能（操作者が判断）	周囲環境を制御できるリグ、チャンバー：煙がある中での撮影試験 安全にガス検知性能試験できる
											環境	※環1	人：酸素ボンベ、耐火服	防爆、高温			防爆、防水、温湿度、降雨、風	防爆試験
					漏えい箇所の特定	倒壊 狭隘 高所 ガス 高温 粉塵・煙 暗闇	ロボット>>人	危険作業代行 計測精度向上 位置情報統合	タンク、塔、配管の上や周辺	配管、フランジ	移動	※移1、※移2			移動ロボットの防爆規格 災害対応ロボット専用周波数	5年以内	アクセス能力 動作範囲 安定性	逸走・墜落防止策が取られたテスト環境
												※移3	仮足場設置や吊りによる人作業 飛行、ワイヤー吊り	作業範囲、壁凹凸対応、フランジやサポートの乗り越え、安定性 立面、裏面への安定接近 落下防止策				
											作業	※作1						
											環境	※環1						
					被害拡大を防ぐ機器操作	倒壊 狭隘 ガス 高温 粉塵・煙	ロボット>>人	危険作業代行	タンク、塔、配管の上や周辺	バルブハンドル、SW	移動	※移1、※移2			移動ロボットの防爆規格 災害対応ロボット専用周波数	10年以内		
											作業	バルブ開閉 収納扉開閉、SW操作	人による作業	作業の妨げとなる周りの障害物を避けながら作業 遠隔操作による作業			遠隔作業能力	作業の妨げとなる周りの障害物も含めたバルブハンドルやSWのモック
											環境	※環1						
			数日間		無線機設置	倒壊 ガス 高温 粉塵・煙 暗闇	ロボット>>人	危険作業代行	タンク、塔、配管の周辺	無線機、配線、コネクタ	移動	※移1、※移2			災害対応ロボット専用周波数	10年以内		
											作業	※作2	人による作業	柔軟物のハンドリング、ハーネスの挿抜 遠隔操作による作業			遠隔作業能力	無線機や設置場所のモック
											環境	※環1						
			復旧		損傷状況の確認マップ生成	倒壊 広範囲 自律移動作業	ロボット>>人	危険作業代行 計測精度向上 位置情報統合	タンク、塔、配管の上や周辺	梁、壁、配管	移動	※移1、※移2、※移3			災害対応ロボット専用周波数	5年以内		
											作業	※作1						
												非破壊検査器による計測（接触）	人による作業	搭載できるセンサの開発 遠隔操作によるセンサ位置合わせ			遠隔検出性能（操作者が判断）	地震等による損傷の模擬
												3Dデータ取得、移動による重ね合せ	クローラロボによるマップ生成	高所や狭隘部での3Dデータ取得 複数ロボット間のデータ統合			マップ精度	地震等による損傷の模擬
											環境	※環1						
					ガレキ撤去	倒壊 重量物	ロボット>>人	危険作業代行 重作業	タンク、塔、配管の周辺	ガレキ倒壊物	移動	※移1、※移2			災害対応ロボット専用周波数	10年以内		
											作業	ガレキ撤去、運搬		遠隔操作による作業 重機が入れない狭い空間での力作業			遠隔作業能力	プラントの倒壊ガレキの模擬
											環境	※環1						
					電源等の復活	倒壊	ロボット>>人	危険作業代行	タンク、塔、配管の周辺	配線、配電盤の扉、ブレーカSW	移動	※移1、※移2			災害対応ロボット専用周波数	10年以内		
											作業	※作2						
											環境	※環1						
	見回り監視、点検	平常時		日に2～3回	機器の動作確認	自律移動作業	ロボット=人	省人化 計測精度向上 位置情報統合	タンク、塔、配管の上や周辺	モータ、配管、ポンプ、監視窓、ウェス	移動	※移1			無	10年以内		
												※移4	整えられた環境における自律移動	自己位置認識、経路生成、連続稼働			自律連続稼働	実プラントに近い規模の広さのテストコース（見回り経路、タンク群） 構造体形状の再構築可能なモック
											作業	外観、異音、異臭、液漏れ、異常振動、触診、打音検査、拭き取り、炎の色	人による作業	押し付け、拭き取り等の自律作業、自律異常発見			自律診断能力	実際に稼働しているポンプなど 漏れや汚れの模擬
											環境	※環2	クローラロボの防水 軽量アームの防水	多自由度で力制御等をかけるリンクロボの軽量コンパクトな防水対策			降雨試験	降雨試験装置
					メータ、液量確認、記録	自律移動作業	ロボット=人	省人化 計測精度向上 位置情報統合	タンク、塔、配管の上や周辺	メータ	移動	※移1			無	10年以内		
												※移4						
											作業	カメラによるメータ読み取り	人による作業	自律異常発見			自律診断能力	メータや流量計のモック
											環境	※環2						
					センサ動作確認	自律移動作業	ロボット=人	省人化 計測精度向上 位置情報統合	タンク、塔、配管の上や周辺	液量センサ、ハンドル	移動	※移1			無	10年以内		
											作業	バルブ開閉、指ではじく カメラによる確認	人による作業	ハンドでハンドル回し 液量レベル変化等の認識 自律作業、自律異常発見			自律診断能力	実際に動作しているセンサのモック
											環境	※環2						
					生成物サンプル採取	自律移動作業	ロボット=人	省人化	タンク、塔、配管の上や周辺	収納扉、コック、チューブ、ピン	移動	※移1			無	10年以上		
											作業	収納扉開閉、コック開閉、ピンのフタ開閉、チューブの接続、挿入	人による作業	指先を使った器用作業 自律作業、自律異常発見			自律作業能力	サンプル採取機器のモック
											環境	※環2						
					グリスアップ、フィルター交換	自律移動作業	ロボット=人	省人化	タンク、塔、配管の上や周辺	グリスガン、フィルター、フィルターケース	移動	※移1			無	10年以上		
											作業	グリスガンによる注入、ケースの開閉、部品ハンドリング	人による作業	組立、分解作業、工具使用 自律作業			自律作業能力	グリス注入対象やフィルターのモック
											環境	※環2						
				24時間・365日	目視点検 液漏れ点検 ガス漏れ検知 （巡回点検による劣化の早期発見）	ガス 広範囲 高所 連続作業 自律移動作業	ロボット>>人	危険作業代行 足場架設不要 広範囲、連続作業 計測精度向上 位置情報統合 異常発見精度向上 省人化	タンク、配管、塔、煙突、フレアスタックの上や周辺および空中	タンク、配管、塔、煙突、フレアスタックの外面、先端	移動	※移1			移動ロボットの防爆規格	5年以内		
												※移4						
											作業	カメラによる自律液漏れ検出 ガス検知器での計測 機器の変色、異常加熱、回転機の異常音の発見	人による作業	液漏れの自律異常発見 墜落、制御不能時対策 カメラ、ガス検知器、サーモグラフィ、マイク等の複数センサ搭載 無線：通信や制御など他の電波との干渉			自律診断能力	実際に漏れ状態を模擬できるモック 安全にガス検知性能試験できる
											環境	※環1						
					設備に組込んだRFIDセンサによる計測	広範囲 連続作業 自律移動作業	ロボット>人	広範囲、連続作業	タンク、塔、配管の上や周辺	タンク、配管	移動	※移1			無	5年以内		
												RFIDセンサへプローブを近づける	人による作業	位置合わせ、障害物回避の目標作業			自律作業能力	RFIDセンサを組込んだモック
												※移2						
					圧延工程の搬送ロールの振動計測	高温 可動部付近 連続作業	ロボット>人	危険作業代行 製品精度向上	圧延工程	軸受	移動	※移1			無	5年以内		
											作業	振動センサの押し付け	軸受けに振動センサ設置	遠隔操作によるセンサ位置合わせ			遠隔検出性能（操作者が判断）	実際に回転できるローラのモック
											環境	※環2						
					連続鋳造機、熱間加工機器の点検	高温 可動部付近 狭隘	ロボット>人	危険作業代行 狭隘	連続鋳造機、熱間加工機器内部	ロール、フレーム	移動	狭隘部のほふく前進	人による作業	環境認識、環境へのならい制御	無	10年以内	アクセス能力 遠隔操縦	狭隘部を模擬したモック
											作業	※作1						
											環境	※環2						
	保守点検	平常時		一設備につき数年に一度	配管の点検（外側から）	高所	ロボット>人	危険作業代行 足場架設不要 計測精度向上 位置情報統合	配管上	配管（外側）	移動	※移3			高圧ガス事業法など	5年以内		
											作業	腐食や残厚計測	保温カバーを剥ぎ、検査機器を使った人による点検	フランジ、ラック部での移動 落下防止策 保温カバー越しの測定精度 超音波センサ等を押し付けながら移動させる			遠隔検出性能（操作者が判断）	腐食や減肉を模擬
											環境	※環2						
					配管の点検（内側から）	狭隘 酸欠 液体中 流水中 圧力下 暗闇	ロボット>>人	危険作業代行 狭隘部 計測精度向上 位置情報統合	配管内部	配管（内部）	移動	配管内の移動、分岐点での方向選択	能動スコープのようなプローブ	稼働中の調査 ドレンなどからの挿入（小型化）	高圧ガス事業法など	5年以内	アクセス能力 検出性能 除去性能 遠隔操縦	減肉や堆積物を模擬した配管
											作業	腐食、残厚計測 堆積物の発見、除去						
											環境	狭隘、液体中						
					炉内の点検	高温 粉塵 暗闇	ロボット>人	危険作業代行 計測精度向上 位置情報統合	炉内	炉内面	移動	※移1、※移3			無	10年以内		
											作業	※作3 プロフィル計測機による3次元形状計測、漏れ防止	人による点検	搭載できるセンサの開発 遠隔操作によるセンサ位置合わせ			遠隔検出性能（操作者が判断）	経年変化による損傷の模擬
											環境	※環1						
					蒸留塔の点検	ガス 高所	ロボット>人	危険作業代行 足場架設不要 計測精度向上 位置情報統合	塔槽外面	塔槽外面	移動	※移1、※移3			移動ロボットの防爆規格	5年以内		
											作業	※作3						
											環境	※環1						
					タンク上部の点検	ガス 高所	ロボット>人	危険作業代行 足場架設不要 計測精度向上 位置情報統合	タンク外面	タンク上面	移動	※移1			移動ロボットの防爆規格、消防法、ガス事業法など	5年以内		
											作業	※作3						
											環境	※環1						
					タンク内部の検査	ガス、酸欠、高温、粉塵 高所	ロボット>人	危険作業代行 足場架設不要 計測精度向上 位置情報統合	タンク内	タンク底面	移動	※移1			移動ロボットの防爆規格、消防法、ガス事業法など	5年以内		
											作業	腐食、残厚計測	人による作業	グラインダ作業 試薬による検査			自律作業能力	減肉や腐食を模擬
											環境	※環1						
					壁面の点検	立面 高所	ロボット>人	危険作業代行 足場架設不要 計測精度向上 位置情報統合	建物外壁	建物外壁	移動	※移3			建築基準法	5年以内		
											作業	※作3						
											環境	※環2						
					海底配管の点検・減肉検査	水中 水の濁り 流水 暗闇	ロボット>>人	危険作業代行 計測精度向上、位置情報統合	海底	配管外部	移動	遊泳、海底・配管移動	ダイバーによる点検作業	濁った水中での視野確保 浮遊物への対応	無	5年以内	移動、検査能力	水中での配管環境の模擬
											作業	※作3						
											環境	耐水圧						
	保守修復	平常時		一設備につき数年に一度	触媒交換	ガス、酸欠 高温 暗闇	ロボット>人	危険作業代行	反応炉内	触媒残渣	移動	反応炉底面への昇降 反応炉底面での移動	酸素ボンベを付けた人による作業	残渣触媒上でも安定して移動できる	移動ロボットの防爆規格	5年以内	アクセス能力 遠隔操縦	反応炉内残渣触媒を模擬
											作業	触媒掻き出し		不安定な足場での力作業			遠隔作業能力	
											環境	※環1						
					塔槽（タンク）内の付着物（スラッジ等）の除去	ガス 酸欠 高温 粉塵 暗闇 高所 広範囲	ロボット>>人	危険作業代行 足場架設不要 広範囲 省人化	タンク内	スクレーパ吸引装置	移動	階段昇降 底面への昇降 タンク底面の移動	スクレーパや吸引装置による人作業	壁面昇降 滑りやすい路面での移動 障害物認識、回避	移動ロボットの防爆規格	5年以内	アクセス能力 遠隔操縦	スラッジがこびりついたタンク壁面や底の模擬
											作業	スクレーパや吸引装置のハンドリング		押し付け力制御 障害物へのならい制御			遠隔作業能力	
											環境	※環1						
					ケレン、塗装	高所 粉塵	ロボット>人	危険作業代行 足場架設不要 省人化	配管、タンク	配管、タンク外面	移動	※移3			無	5年以内		
											作業	サンダー、ブラシ、スクレーパ、スプレー、ハケなどのハンドリング	マスクを付けた人による作業	押し付け力制御 あらゆる角度からアプローチ 遠隔作業			遠隔作業能力	配管、タンクなど塗装対象
											環境	防塵						
					足場設置、解体	高所	ロボット>人	危険作業代行 省人化	タンク、塔、配管の周辺	足場パイプ、踏板、ジョイント	移動	※移3			無	10年以上		
											作業	パイプとジョイントの接合 足場をパイプに引っかける 重量物ハンドリング	人による作業	対象物の挿抜 工具を使った組立、分解 遠隔作業			遠隔作業能力	塔、ラック上配管などの足場設置対象
											環境	※環2						
					保温材剥がし	高所 粉塵	ロボット>人	危険作業代行 足場架設不要 省人化	配管周辺	配管、保温材	移動	※移3			無	10年以上		
											作業	スクレーパや工具のハンドリング	マスクを付けた人による作業	押し付け力制御 あらゆる角度からアプローチ 遠隔作業			遠隔作業能力	保温材つきの配管
											環境	※環2						
					機器の交換（運搬、据付）	重量物下（落下物危険） 狭隘	ロボット>人	危険作業代行 重作業 正確性向上 省人化	タンク、塔、配管の周辺	ポンプ、配管等の重量物機器	移動	※移1			無	10年以上		
											作業	重量物持ち上げ、位置決め、運搬	機械を使った人による作業	狭い空間で櫓やクレーンを使わずに重量物を持ち上げる、またはクレーン等を操作する			遠隔作業能力	狭い空間と交換対象を模擬したモック（ポンプ、バルブ、センサ等）
											環境	※環2						

必要な機能の凡例		
	移動	※移1　人と同等のアクセス能力 砂利、段差、堰、配管またぎ&くぐり、階段、斜面、はしご、ドア、キャットウォーク
		※移2　倒壊状況での移動
		※移3　高所、壁面、ラック上配管、オーバーハング裏側
		※移4　自動で移動し続ける
	作業	※作1　カメラ、サーモグラフィ、ガス検知器による計測（非接触）
		※作2　配線の運搬、取り回し、接続
		※作3　カメラや非破壊検査による腐食、亀裂の検査
	環境	※環1　防水、防爆、高温、煙、暗闇
		※環2　防水

評価表１０　試験項目細分（プラント災害）

機能分類 ・機能 ・耐環境性 ・耐久性 ・安全性		試験項目	評価		時間軸				対象となるロボットの移動方式							
			適応範囲・対象・条件 （想定される範囲内で種類や数値、条件等を変えて試験）	評価内容 （計測など）	発生直後	72時間以内	復旧	平常時	クローラ・車輪	脚式	ヘビ型	配管内	飛行型	水中型	水陸両用型	吸着型（壁面、配管外面）
機能	移動能力	階段昇降	場所（屋内、屋外）、形状（直線、踊り場、らせん、手すり有無、幅、高さ）、踏面材質（コンクリート、縞鋼板、グレーチング、反射率）、悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物、ガレキ）	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○					○	
		段差、堰の通過	場所（屋内、屋外）、形状（高さ、奥行、幅、段数）、踏面材質（コンクリート縞鋼板、グレーチング、反射率）、悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物、ガレキ）	安定性、荷重の大きさ、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○					○	
		斜面通過	場所（屋内、屋外）、形状（斜度、長さ、複合）、踏面材質（コンクリート縞鋼板、グレーチング、反射率）、悪条件（錆、水濡れ、油ぬめり、堆積物、ガレキ）、移動向き（真直ぐ、トラバース）	安定性、荷重の大きさ、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○					○	
		穴ぼこ通過、回避 （ピット等のフタ外れ等）	場所（屋内、屋外）、形状（面積、深さ）、周囲の障害物	発見能力、回避能力、安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○					○	
		水たまり通過、回避	場所（屋内、屋外）、対象（清水、泥水）、水深	発見能力、回避能力、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○						
		はしご、段はしご昇降	場所（屋内、屋外）、形状（丸、角、平板）、背カゴ有無、キャットウォーク取付向き（前、横、背面）、手すり有無、材質（鉄、アルミ）	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○		○						
		路面移動	場所（屋内、屋外）、路面材質（コンクリート、アスファルト、砂利、土、鉄板、縞鋼板、グレーチング、カーペット）、覆う物の有無（フロアマット、養生シート）、砂利（砂利種類、砂利密度）、グレーチング（ピッチ、剛性違い、欠落部有無（穴ぼこ））、土（土質）、悪条件（錆、鏡面、水濡れ、油ぬめり、堆積物、ガレキ）	安定性、速度、操縦の容易性、砂利の掘れ深さ	○	○	○	○	○	○					○	
		配管またぎ	場所（屋内、屋外）、形状（エルボ、分岐）、複数本（平行、交差、段違い、間隔）	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○					○	
		配管くぐり	場所（屋内、屋外）、形状（エルボ、分岐）、複数本（平行、交差、段違い、間隔）	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○	○				○	
		キャットウォーク上移動	場所（屋内、屋外）、通路形状（幅、コーナ、分岐、幅変化）、路面材質（グレーチング、縞鋼板、材質変化）、手すり有無	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○					○	
		配管上移動	形状（径、エルボ、分岐、フランジ、サポート、径変化）、複数本（平行、交差、段違い、間隔）	安定性、速度、操縦の容易性				○	平	平					平	平
		狭隘部通過（正常状態）	隙間の広さ、形状、障害物反射率	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	
		ドア通過	種類（押し戸、引き戸、スライド、回転、水密扉、重さ、反力の有無）、材質、ドアノブ回し（丸、レバー）、開錠	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○					○	
		マンホール通過	種類（垂直、水平、扉付）、形状（径、奥行）、取付高さ	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○	○				○	
		ガレキ上移動	場所（屋内、屋外）、ガレキの大きさ、密度、重なり具合、グラつき度	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○				○	
		ガレキ内隙間通過	場所（屋内、屋外）、隙間の大きさ、形状	速度、操縦の容易性	○	○	○				○				○	
		狭隘部通過（倒壊状態）	場所（屋内、屋外）、隙間の大きさ、形状	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○		○	○	○	
		移動障害物除去（押しのけ）	場所（屋内、屋外）、障害物の大きさ、重さ、形状、密度、重なり具合	安定性、速度、操縦の容易性	○	○	○		○	○	○				○	
		有線ケーブル引き回し	経路の種類（コーナ、らせん階段等）、引っ掛かり対象物（配管等）、引き回し環境（地上、水上、水中）	張力の運動能力への影響、通信速度減衰率、引っ掛かり外しの容易性	○	○	○	○	○	○	○	平		○	○	平
		壁面、天井面移動 オーバハング裏面アプローチ	場所（屋内、屋外）、形状（曲面、凹面、凸面、梁、ボルト、ウィンドウガータ）、壁面材質（鉄、コンクリート）	安定性、速度、操縦の容易性				○								平
		広範囲自律移動	プラント敷地内（屋外）や屋内	自己位置推定精度、経路生成能力、マップ生成や教示工数		○	○	○	○	○			○	○	○	
		走行台車への乗降	場所（屋内、屋外）、走行台車の傾斜、周囲の障害物	安定性、時間	○				○	○			○		○	
		走行台車上での安定性	場所（屋内、屋外）、走行台車が斜面や段差を走行	走行振動で落下、転倒しないか	○				○	○			○		○	
		配管内移動	形状（径、エルボ、分岐、径変化）、投入口形状、移動距離、悪条件（水濡れ、油ぬめり、堆積物）	自己位置推定精度、速度、操縦の容易性				○				平				
	検出能力	ガス漏れ検知	場所（屋内、屋外）、ガス種類（単独、複合）、悪条件（風）	検知濃度	○	○	○	○	○	○	○		○			平
		画像（転送と処理）	場所（屋内、屋外）、種類（腐食や亀裂、剥離、変形、液漏れ箇所、気体漏れ箇所等）、利用波長（可視光、可視光外）、悪条件（逆光、煙、霧、蒸気、粉塵、暗闇）	表示性能（分解能、フレームレート、ズーム倍率、色による判別）、撮影可能範囲（距離、向き、視野角）、異常発見正解率	○	○	○	○	○	○	○	平	○	○	○	平
		温度検出	場所（屋内、屋外）、対象（配管、タンク等）、接触＆非接触（サーモグラフィ）、測定位置	測定精度	○	○	○	○	○	○	○	平	○	○	○	平
		異音検出	場所（屋内、屋外）、種類（機械音、吹き出し音）	測定可能距離、範囲、ズーミング可否、雑音除去性能				○	平	平	平		平	平	平	平
		異常振動検出	場所（屋内、屋外）、種類（ポンプ、ローラ等）、測定点の位置、周囲の障害物	測定精度、時間、操縦の容易性				○	平	平						平
		ガタつきなどの触診	場所（屋内、屋外）、振動印加の位置、印加する力と周波数、周囲の障害物	遠隔での判断精度、時間、操縦の容易性				○	平	平						平
		RFIDセンサ読み取り	場所（屋内、屋外）、センサ取付位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性				○	平	平						平
		減肉、肉厚測定	保温材の有無、測定位置、周囲の障害物	測定精度、時間、操縦の容易性				○	平	平		平			平	平
		打音検査	場所（屋内、屋外）、打撃位置、周囲の障害物	異常発見正解率、時間、操縦の容易性				○	平	平						平
		距離測定	場所（屋内、屋外）、測定対象、種類（障害物、水深、水位）、向き（上下、左右、前後）	測定精度、時間、操縦の容易性				○	平	平			平	平	平	平
	情報統合能力	3Dデータ作成	移動を伴うデータ統合、複数ロボットデータ統合	自己位置推定精度、統合データの整合度　マップ作成工数		○	○	○	○	○	○	平	○	○	○	平
		損傷マップ作成	移動を伴うデータ統合、複数ロボットデータ統合	自己位置推定精度、統合データの整合度　マップ作成工数		○	○		○	○	○	平	○	○	○	平
	作業能力	バルブ開閉	種類（手動、電動、丸ハンドル（大～小）、コック）、取付位置＆向き、周囲の障害物	安定性、時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○					○	
		SW操作	種類（シーソ、ロータリ、プッシュ）、取付位置、周囲の障害物	安定性、時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○					○	
		収納扉開閉	ドアノブ種類、取付位置、周囲の障害物	安定性、時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○					○	
		ピック＆プレイス	目的（ガレキ除去、無線機設置、不特定対象物か）、種類（重さ、大きさ、形状、密度、重なり具合）、対象物の位置、周囲の障害物	安定性、時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○			○		○	
		サンプリング	スミヤ、削り取り、空気中の気体、水たまりの液体、ドレンコック（気体、液体）、周囲の障害物	純度、量、時間、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○	○	平	○	○	○	平
		配線取り回し、引き回し	種類（電源線、通信線）	引っ掛かりへの対応の容易性、時間、操縦の容易性		○	○		○	○					○	
		コネクタ挿抜	コネクタ種類、取付位置、周囲の障害物	時間、操縦の容易性		○	○		○	○						
		交換（分解、組立）	交換対象種類、固定方法種類、周囲の障害物	時間、操縦の容易性				○	平	平					平	
		切断、穴あけ	種類（配線、ワイヤ、鉄筋、木材）、工具使用（電動ドリル、電動のこぎり）、切断場所、周囲の障害物	安定性、時間、操縦の容易性	○	○	○		○	○				○	○	平
		検査試薬の塗布、ブロー	種類（粉、液体）、塗布位置、周囲の障害物	その後の検査に十分な能力か、時間、操縦の容易性				○	平	平						平
		液漏れ等の拭き取り	拭き取り対象の位置、周囲の障害物	拭き取り能力（残渣）、時間、操縦の容易性				○	平	平						平
		堆積物除去	場所（配管内、タンク内、炉内）、除去対象（スラッジ、触媒）	除去能力（残渣）、時間、操縦の容易性				○	平	平		平			平	
		散布、噴霧	種類（粉、液体）、噴霧位置、悪条件（風、雨、漏水）	噴霧、散布量、範囲、距離、時間、操縦の容易性	○	○	○	○	○	○			○			平
		ケレン、塗装	対象（壁面、配管）、周囲の障害物	仕上がり品質、時間、作業範囲、操縦の容易性				○	平	平						平
		協力・協調作業	複数台、異種ロボットによる協調	協調動作・支援の容易性		○	○	○	○	○					○	
		重量物運搬	種類（重量、サイズ、形状、固形か変形物）	搭載安定性、運搬時の移動制約（速度、空間）、時間、操縦の容易性				○	平	平			○		平	
	運用	起動に必要な時間		時間、必要人数	○				○	○	○	○	○	○	○	○
		稼働時間	動作パターンを規定	時間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		充電時間		時間	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		ロジスティクス	外部からプラントへの搬入、プラント内での運搬	時間、必要人数、トラックに必要な積載重量と大きさ、リフタやユニックの必要性の有無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		メンテ工数	センサ、工具、消耗品等の交換	時間、必要人数				○	○	○	○	○	○	○	○	○
		除染	高圧洗浄、流水、拭き取り、部品交換等	容易性、時間（被ばく量）、必要人数		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		訓練に必要な時間		時間				○	○	○	○	○	○	○	○	○
	耐環境性	粉塵、煙、霧、蒸気		機能に影響のない濃度	○				○	○	○	○		○	○	○
		暗闇		機能への影響の有無	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○
		高温、低温	稼働、保管、起動	許容範囲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		防水		規格値	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		防爆		規格値	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		耐放性	瞬時、累積	許容範囲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		耐雷		規格値	○	○	○	○	○	○	○		○			○
		EMC		規格値	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		通信（有線、無線）	複雑経路、障害物、遮蔽空間、水中、配管内	距離、範囲、速度、容量、中継器の必要性、遮断デューティ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		風		機能に影響のない範囲	○	○	○	○	○	○			○			○
		配管、タンク内環境	液体内、粉体内、流水内、圧力下	機能に影響のない範囲				○				○		○	○	○
	耐久性	運用	運用時動作パターンを規定し連続動作	一定時間での摩耗、劣化、故障	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		サイクル試験	動作（移動、作業）、温度、電源ON/OFF、充放電	一定時間での摩耗、劣化、故障	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		転倒	転倒場所（平地、階段）、地面硬さ	衝撃G、故障、破損、飛散状況	○	○	○	○	○	○					○	
		落下	落下高さ、地面硬さ	衝撃G、故障、破損、飛散状況	○	○	○	○	○	○	○		○		○	○
		運搬	運搬時のGパターンを規定し連続動作	一定時間での摩耗、劣化、故障	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	安全性	異常発生時	電源ダウン、通信遮断、動作異常＆不安定時、故障	安全側に動作を停止するか 再起動・動作開始時に異常な動作をせず復帰できるか 他のロボットによる支援で復帰や回収できるか	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		絶縁	規定電圧	規定値以上の絶縁抵抗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		安全装置	過負荷時	停止及び再起動ができるか	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		巻き込み、挟まれ	人との共存作業時	接近警報、接近時の停止、可動部のカバー	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		非常停止	独立性、優先順位、再起動が設計通りに動作するか		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		暴走対策	自動停止するか、データの自動送信等で状況を把握できるか		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		遠隔操縦時の人の隔離	遠隔操作時に人が近づかない、または近づいたら検知できる対策や運用がされているか		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		立ち上げ作業、終了作業時	電源ダウン、通信切れ、操作ミス、故障等により暴走、落下、転倒、挟まれが発生し人に危害を加えることがないか		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		運搬作業時	吊上げやリフトアップ作業や手動操作時に落下、転倒、挟まれが発生し人に危害を加えることがないか		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		保守作業時	保守作業者の安全が確保される対策や運用がされているか		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※移動能力、検出能力、情報統合能力、作業能力において平常時に使用されるロボットには「平」と表記

評価表１１　想定災害とロボットとの関連細分（水道・下水災害）

想定対象・現場	想定災害・災害種類	被災レベル・被災状況	時間軸（平時，発生直後，72時間以内，復旧）	頻度・タイミング	遂行作業・対応作業	制約条件	ロボット導入の期待される依存比率	ロボット導入の価値	場所・移動環境（詳細）	必要な機能（移動、作業、環境）	現状技術でできること（適用可能ロボットまたは技術）	技術課題（困難を伴うこと）	非技術課題（規制，制約など）	将来展望（今後どの程度で実現するか）	行うべき試験(性能，耐久性，耐環境性など)	評価フィールドへの要求
下水道管路施設（処理場等の施設は除く）	地震（液状化・地割れ）	ﾏﾝﾎｰﾙ浮上により発生する道路交通障害 ﾏﾝﾎｰﾙ周辺の土砂流ぼう孔への人の落下 下水本管座屈により発生する道路陥没	発生直後	数十年に一度	・危険箇所の特定 ・危険箇所と人との隔離	自動車等路面移動手段による調査が出来ない	ロボット＞＞人	路面障害に影響を及ぼされない調査が可能 ・安全性 ・二次災害防止 ・広域・短時間・詳細把握	鳥瞰的視野がとれる場所	航空機調査 ・広域調査 ・ﾘﾓｰﾄｺﾝﾄﾛｰﾙ ・風雨環境下での走行 ・夜間走行 ・写真、動画撮影 ・3Dﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ	＜無人航空機＞ ○広域調査 △ﾘﾓｰﾄｺﾝﾄﾛｰﾙ ×風雨環境下での走行 ×夜間走行 ○写真、動画撮影 ○3Dﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ	・長距離飛行 ・長時間飛行 ・電波障害等による誤作動 ・ﾎﾊﾞﾘﾝｸﾞ性能 ・夜間・悪天候下飛行＆撮影解像度 ・複数人同時制御による操作ﾈｯﾄﾜｰｸ	専用周波数の準備	3年後実用化	・方向制御 ・滞空時間 ・通信距離 ・画像撮影 ・3Dﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ ・耐風雨性能 ・耐高温・低温 ・耐雷	陥没した道路浮上したﾏﾝﾎｰﾙを設置した模擬施設
	地震（管破損による土砂流入）	流下障害	発生直後	数十年に一度	・管路内土砂除去	管損傷が激しく二次災害の恐れ有り 小中口径管により作業ｽﾍﾟｰｽ狭い	ロボットのみ	管座屈など二次災害から人命を守る 小中口径管で人が入れない場所での作業	損傷の激しい埋設管路内	＜無人土砂排出機＞ ・自動掘削 ・自動高圧洗浄 ・自動排出 ・遠隔操作機能	有人・手動による洗浄・ﾊﾞｷｭｰﾑ	・遠隔操作性 ・精度 ・完全防水	専用周波数の準備	5年後ﾌﾟﾛﾄ機 10年後実用化	・遠隔操作精度（通信距離・作業の正確性） ・土砂排出能力 ・水浸漬下での動作	土砂で埋まったﾏﾝﾎｰﾙ、管路を再現した施設
	地震（管損傷・老朽化）	流下障害	復旧・平時	劣化による調査は常時	・管路破損状況、劣化状況把握	管損傷が激しく二次災害の恐れ有り 小中口径管により作業ｽﾍﾟｰｽ狭い	ロボットのみ	管座屈など二次災害から人命を守る 小中口径管で人が入れない場所での作業	損傷の激しい埋設管路内 管底滞留物有り ﾒﾀﾝ・CO・H2S雰囲気	・段差走行 ・斜面走行 ・管底滞留物上走行 ・簡易滞留物除去 ・防水性能 ・ｸﾗｯｸ撮影 ・残存強度推定 ・管径計測 ・管たわみ計測 ・管路3D地図化	＜TVｶﾒﾗ＞ ＜画像展開ｶﾒﾗ＞ ＜衝撃弾性波ﾛﾎﾞ＞ △段差走行 △斜面走行 ×管底滞留物上走行 ×簡易滞留物除去 △防水性能 △ｸﾗｯｸ撮影 △残存強度推定（一部管種のみ） ○管径計測 △管たわみ計測 ×管路3Dﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ	・段差の乗り越え ・斜面安定走行 ・障害物除去 ・自己位置特定（GPSレス） ＆3D地図化 ・内径・タワミ精度計測 ・残存強度寿命推定（管種問わず） ・高感度撮影 ＆ｸﾗｯｸ画像解析 ・高湿度・濃霧環境・視界不良状況	なし	3年後ﾌﾟﾛﾄ機 5年後実用化	段差走行性能 斜面走行性能 障害物通過 管路3D測量（径・タワミ・変形） 管内撮影・画像よりｸﾗｯｸ検知 衝撃弾性波ﾃﾞｰﾀ収集 耐水性能	被災状況を再現した模擬管路（曲がり・タワミ・破損管路）
	地震（管損傷・老朽化）	流下障害	復旧・平時	劣化による調査は常時	・管路内面補修・更生	下水流下環境 管損傷環境	ロボット>>人	管座屈など二次災害から人命を守る 小中口径管で人が入れない場所での作業	管底汚泥滞留 管形状変形 ﾒﾀﾝ・CO・H2S雰囲気	段差走行 斜面走行 管底滞留物上走行 防水性能 管形状対応 管路更生・部分補修	＜管路更生製管機＞ ＜部分補修工法＞ △段差走行 △斜面走行 ×滞留物除去 ○防水 △管形状対応 △部分補修	段差の乗り越え 斜面での安定走行 簡易障害物の除去 部分補修（湿潤化での）	なし	3年後実用化	段差走行性能 斜面走行性能 障害物通過 耐水性 非開削更生工法の管形状影響 光硬化補修工法	被災状況を再現した模擬管路（曲がり・タワミ・破損管路）
水道管路施設（浄水場等の施設は除く）	地震（管損傷・老朽化）	管路破断による圧力水噴出による路面二次災害	直後	劣化による噴出しは年に数回程度	・水噴出箇所の特定	現場に近づけない	ロボット＞＞人	早期状況確認 二次災害防止	大量の水噴出環境	航空機調査 ・広域調査 ・ﾘﾓｰﾄｺﾝﾄﾛｰﾙ ・風雨環境下での走行 ・夜間走行 ・写真、動画撮影 ・3Dﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ	＜無人航空機＞ ○広域調査 △ﾘﾓｰﾄｺﾝﾄﾛｰﾙ ×風雨環境下での走行 ×夜間走行 ○写真、動画撮影 ○3Dﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ	・長距離飛行 ・長時間飛行 ・電波障害等による誤作動 ・ﾎﾊﾞﾘﾝｸﾞ性能 ・夜間・悪天候での飛行能力 ・夜間・悪天候での撮影解像度 ・複数人同時制御による操作ﾈｯﾄﾜｰｸ	専用周波数の準備	3年後実用化	・移動方向制御 ・滞空時間 ・通信距離制御 ・写真撮影 ・動画撮影 ・3Dﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ ・耐風雨性能 ・耐高温・低温 ・耐雷	水噴出模擬管路 陥没路面
	地震（管損傷・老朽化）	管路破断・圧力水流出による管路外周の地中空洞化	復旧・平時	劣化、漏水による空洞化は常時	・将来路面陥没ﾘｽｸの高い架箇所の特定	・管内から管外面にある埋設土の状況観察 ・道路上から埋設管路周辺の空洞を非開削で検知	小中口径；ﾛﾎﾞｯﾄのみ 大口径：ﾛﾎﾞｯﾄ>>人	人手では箇所特定に長時間を要する 人手では二次災害発生の危険がある	損傷管路内 道路面上	＜管路内からの探知＞ ・自動走行 ・口径対応力 ＜道路からの探知＞ ・ｵﾍﾟﾚｰﾃｨﾝｸﾞによる無人化探知	＜管路内からのﾚｰﾀﾞ探知＞ ×自動走行 △口径対応力 ×無人化 ○ﾚｰﾀﾞｰ探知 ＜道路上からの地中ﾚｰﾀﾞｰ探知＞ ×自動走行 △ﾚｰﾀﾞｰ探知	・錆コブ閉塞箇所の走行性 ・大口径対応 ・長距離走行 ・電波障害等誤作動 ・複数人同時制御	専用周波数の準備	5年後ﾌﾟﾛﾄ 10年度実用化	＜管路内＞ ・管内走行距離 ・口径対応機構 ・無人化調査 ＜道路上＞ ・方向制御 ・通信距離 ・耐風雨性能 ・耐高温・低温	管周囲に空洞を再現した模擬管路
	地震（管損傷・老朽化）	管路破断による漏水・断水	復旧・平時	劣化による漏水箇所は常時	・管路破損状況把握 ・劣化状況把握	水圧環境下	小中口径；ﾛﾎﾞｯﾄのみ 大口径：ﾛﾎﾞｯﾄ>>人	不断水調査 水中調査	水圧環境下 錆発生閉塞管路 損傷管路	・水圧下走行 ・破断位置特定 ・管内面状況把握 ・管減肉量測定 ・可とう管変位量把握	＜不断水TVｶﾒﾗ＞ ＜音響検知ﾛﾎﾞ＞ ＜超音波測定ﾛﾎﾞ＞ △水圧下走行 ×閉塞箇所走行 △水中漏水音検知 ×残存強度推定 ×管内径計測 ×可とう管変位量計測	障害物の除去 ⇒閉塞箇所走行 漏水音長距離検知 非破壊減肉計測	水道法に基づく水質基準	3年後実用化	水中走行 水圧下走行 漏水音響検知 外面腐食減肉計測（超音波） 走行可能距離 水中への成分溶出検査	老朽化・破損を再現した模擬管路（鉄管・樹脂管・口径別）
	地震（管損傷・老朽化）	管路破断による漏水・断水	復旧・平時	劣化による漏水箇所は常時	・補修・更生	・埋設配管内	ﾛﾎﾞｯﾄのみ	非開削での修復	錆発生閉塞管路 損傷管路	・自動溶接 ・管路更生	＜自動溶接ﾛﾎﾞ＞ ×遠隔操作 ×口径問わない ○湿潤状態・水中での溶接 ＜管内面ﾗｲﾆﾝｸﾞ圧力管更生工法＞ ×遠隔操作 △非開削更生工法（一部管種・径のみ） △耐水圧・耐震機能更生管の敷設	＜自動溶接ﾛﾎﾞ＞ 障害物の除去 ⇒閉塞箇所走行 ｸﾗｯｸ精度検知 ⇒自動溶接 ＜管内面ﾗｲﾆﾝｸﾞ更生ﾛﾎﾞ＞ 口径・管種によらない工法の開発 湿潤化でのﾗｲﾆﾝｸﾞ工法（光硬化など） 耐震機能付与	水道法に基づく水質基準	3年後ﾌﾟﾛﾄ 5年後実用化	・管内走行距離 ・閉塞部状況VS走行可否 ・補修箇所特定精度 ・映像解像度 ・溶接性能 ・耐水圧試験 ・耐震試験 ・光硬化条件 ・水中への成分溶出検査	老朽化・破損を再現した模擬管路（鉄管・樹脂管・口径別）

評価表１２　試験項目細分（水道・下水災害）

【下水道】

機能分類 ・機能 ・耐環境性 ・耐久性 ・安全性		試験項目	評価		時間軸				対象となるロボット							
			適応範囲・対象・条件 （想定される範囲内で種類や数値、条件等を変えて試験）	評価内容 （計測など）	発生直後	72時間以内	復旧	平常時	クローラ・車輪	脚式	ヘビ型	配管内	飛行型	水中型	水陸両用型	吸着型
機能	移動能力	無人航空（上空）	滞空時間・航空速度 遠隔操作距離 夜間飛行／風雨下条件飛行／高温・低温下／耐雷 街中（建築障害物有り）／地方（障害物少）／ 電波障害発生地域	速度目標精度／目標地点までの時間／速度／ ﾎﾊﾞﾘﾝｸﾞ安定性 誤作動（電波障害等）発生ﾘｽｸ	○	○		○					○			
		下水管路内移動	段差／斜面角度／たわみ量／曲がり角度／底面滞留物量／ 下水流下条件（量）	移動可能距離／移動速度／防水性能			○	○				○				
	検出能力	路面形状異常検知： 画像撮影（上空）	標準環境下・夜間環境下・風雨環境下	解像度・路面形状異常判別（画像識別）正解率	○	○		○					○			
		下水管路破損・劣化検知： 管路内面画像	濃霧環境・口径別・管種類別	解像度・ｸﾗｯｸ検知正解率			○	○				○				
		下水管路破損・劣化検知： 衝撃弾性波計測	口径別・管種類別	残存強度推定値			○	○				○				
		下水管路破損・・劣化検知： 管路内径／3Dﾚｰｻﾞｰ計測	口径別・管種類別	たわみ・偏平度精度・3D			○	○				○				
		下水管路破損・劣化位置 特定：自己位置特定	段差／斜面角度／たわみ量／曲がり角度／底面滞留物量／下水流下条件（量）	GPSﾚｽでの精度			○	○				○				
	情報統合能力	3Dマッピング（路面）	風雨下条件	自己位置特定精度・危険箇所ﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ精度	○	○		○					○			
		3Dマッピング（埋設管路）		自己位置特定精度・危険箇所ﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ精度			○	○				○				
	作業能力	下水管路内土砂排出	土砂の量／遠隔操作距離	土砂排出能力（速度・量）／操作性（精度）			○					○				
		下水管路更生 （樹脂管ﾗｲﾆﾝｸﾞ）	口径別・管種類別 段差／斜面角度／たわみ量／曲がり角度／底面滞 留物量／下水流下条件（量）／硫化水素環境下	補修速度（日進量）／ﾗｲﾆﾝｸﾞ更生速度（日進量）／品質（口径精度）			○	○				○				
		下水管路補修 （光更化）	管種・口径別 ｸﾗｯｸｻｲｽﾞ（長さ・深さ） 光照射条件（時間・量）	補修速度／ｸﾗｯｸへの浸透度			○	○				○				
	運用	連続稼動 管内への挿入し易さ ﾒﾝﾃ（清掃・修理）		連続稼動時間 挿入に必要な工数・時間 洗浄に必要な工数・時間、補修の頻度	○	○	○	○	○			○	○			
耐環境性		無人航空（上空）：耐風雨・耐雷・ 耐高温低温	風雨強度・電圧負荷・高温環境下・低温環境下	速度目標精度／目標地点までの時間／速度／ ﾎﾊﾞﾘﾝｸﾞ安定性	○	○	○	○	○				○			
		劣化検知＆下水管路更生： 耐水性	水浸漬	劣化度の各種検知精度・連続使用時間	○	○	○	○	○			○				
耐久性		連続繰り返し稼動 振動 衝撃	規定負荷・規定動作の繰り返し 運搬時に想定される最大の振動 規定回数・規定高さからの落下	一定時間での磨耗・劣化・故障 一定時間での故障・破損 一定回数での故障・破損	○	○	○	○	○			○	○			
安全性		無人航空（上空）：電波障害	他電波の影響評価	誤作動発生頻度・ﾘｽｸ	○	○		○					○			

【水道】

機能																
	移動能力	無人航空（上空）	滞空時間・航空速度 遠隔操作距離 夜間飛行／風雨下条件飛行／高温・低温下／耐雷 街中（建築障害物有り）／地方（障害物少）／ 電波障害発生地域	速度目標精度／目標地点までの時間／速度／ ﾎﾊﾞﾘﾝｸﾞ安定性 誤作動（電波障害等）発生ﾘｽｸ	○	○							○			
		水道管路内移動	水圧環境下／内面錆コブ量	移動可能距離／移動速度		○	○	○			○	○		○		
	検出能力	路面形状異常検知： 画像撮影（上空）	標準環境下・夜間環境下・風雨環境下	解像度・路面形状異常判別（画像識別）正解率	○	○							○			
		水道管路劣化検知： 管路内面撮影	水圧環境下 口径別・管種別	解像度			○	○			○	○		○		
		水道管路劣化検知： 漏水箇所特定	水圧環境下 口径別・管種別	漏水音響判別精度 漏水位置精度			○	○			○	○		○		
		水道管路劣化検知： 肉厚計測	水圧環境下 口径別・管種別 超音波条件	外面腐食減肉精度			○	○			○	○		○		
		埋設管周囲空洞	口径別・管種類別 錆コブ量	空洞位置精度 空洞ｻｲｽﾞ検知能力			○	○				○				
	情報統合能力	3Dマッピング（路面）	風雨下条件	自己位置特定精度・危険箇所特定精度	○	○							○			
		3Dマッピング（埋設管路）		自己位置精度・危険箇所特定精度	○	○	○	○				○		○		
	作業能力	水道管路更生 （圧力管内面ﾗｲﾆﾝｸﾞ）	口径別・管種類別 錆コブ量	補修速度（日進量）／ﾗｲﾆﾝｸﾞ更生速度（日進量）／ 品質（口径精度・耐圧力・耐震）			○					○				
		水道管路補修 （自動溶接）	漏水状態	補修速度／品質（耐圧力）／ 溶接肉厚測定（超音波探傷）			○		○	○		○				
	運用	連続稼動 管内への挿入し易さ ﾒﾝﾃ（清掃・修理）		連続稼動時間 挿入に必要な工数・時間 洗浄に必要な工数・時間、補修の頻度	○	○	○	○	○			○	○	○		
耐環境性		無人航空（上空）：耐風雨・耐雷・ 耐高温・低温	風雨強度・電圧負荷・高温環境下・低温環境下	速度目標精度／目標地点までの時間／速度／ ﾎﾊﾞﾘﾝｸﾞ安定性	○	○	○	○	○				○			
		劣化検知＆下水管路更生： 耐水性	水圧下	劣化度の各種検知精度・連続使用時間	○	○	○	○	○			○		○		
耐久性		連続繰り返し稼動 振動 衝撃	規定負荷・規定動作の繰り返し 運搬時に想定される最大の振動 規定回数・規定高さからの落下	一定時間での磨耗・劣化・故障 一定時間での故障・破損 一定回数での故障・破損	○	○	○	○	○			○	○	○		
安全性		水道管路内：水質安全性		水中への溶出物・量の計測	○	○	○	○				○		○		

評価表１３　世界中で活性化している，教育や啓蒙を主目的としない，防災・フィールド関連ロボット競技会

名称	開催地	開始年	目的	開催組織
屋外フィールド競技会				
International Aerial Robotics Competition	米国	1991	飛行ロボットによる災害等への対応技術の向上．上空からの災害現場のマッピング，ビル内撮影，小物体のハンドリング，複数ロボット協調などをミッションとする．	AUVSI
Intelligent Ground Vehicle Competition	米国	1993	無人自律自動車によるコース走破，ロボット設計，標準に従ったシステム開発，をテーマとした競技会で，地上走行自律車両の技術向上を目的とする	AUVSI
RoboSub Competition	米国	1998	自律水中ロボット（AUV）の技術向上．	AUVSI, ONR
ELROB	ヨーロッパ	2007	実際的なシナリオと路面状況の下で動く無人地上システムについて，現在利用可能な技術を調査する事を目的とする．民生用との C-ELROB と軍事用途の M-ELROB がある．	EURON
DARPA Grand Challenge	米国		砂漠の屋外道路を長距離に渡って無人走行し，目的地に到達する．DARPA Urban Challenge 開催に発展．	DARPA
DARPA Urban Challenge	米国		市内道路を法規に従って無人走行する．駐車，交通信号，一時停止，追い越し，など．Google Car の実現に貢献	DARPA
つくばチャレンジ	日本		人通りの多い公園内の道路数 km を無人走行する．	つくばチャレンジ実行委員会
euRathlon	EU	2013	2013 年：地上走行ロボットによる，プラント災害（バルブ開閉，物体操作），建物内捜索（廃墟内），爆発物処理，屋外自律走行（山中）．	EU FP7
Maritime RobotX Challenge	米国	2014	自律ボートの技術向上	AUVSI, ONR
European Robotics Challenge	EU	2014	プラント点検とサービスを目的とする競技会	EU HORIZON 2020
ARGOS	ヨーロッパ	2014	ガス・石油に関する自律ロボットの競技会	石油関連会社，フランス政府
屋内模擬災害空間競技会				
RoboCupRescue Robot League	世界	2001	実物大の模擬フィールド（不整地，迷路，隠された要救助者・操作物）での要救助者の発見，マップ作成，遠隔操作＋自律移動，マニピュレーション．日本発．Quince 開発などに貢献．	RoboCup Federation
DARPA Robotics Challenge	米国	2012	福島原発モチーフ（車両，不整地，猿梯子，瓦礫排除，ドア開け，壁穴開け，バルブ回し，ホース接続），ヒューマノイド研究を奨励することに特化．	DARPA
シミュレーション競技会				
RoboCupRescue Simulation League	世界	2001	大規模地震災害（建物倒壊，火災延焼，道路閉塞）の数 km 四方の都市，防災シミュレータ，部隊を模擬したエージェントシミュレーションで，火災消火，道路啓開，被災者救出の資源配分・ロジ戦略を競技．日本発．世界に先駆けて行われた防災ロボット研究のシミュレーションの世界競技会．	RoboCup Federation
RoboCupRescue Virtual Robot League	世界	2007	都市災害の建物内，物理シミュレータ（ゲームエンジン），個別ロボットシミュレーションで，要救助者の発見，マップ作成，遠隔操作＋自律移動を課題とする．	RoboCup Federation
DARPA Virtual Robotics Challenge	米国	2012	福島原発モチーフ（車両，不整地，猿梯子，瓦礫排除，ドア開け，壁穴開け，バルブ回し，ホース接続），ヒューマノイド研究を奨励することに特化．	DARPA

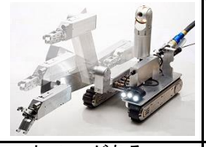
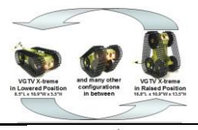
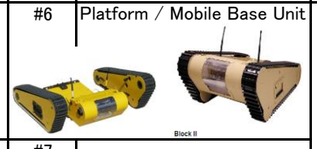
付録2-1

Disaster City Expected Participants (2010/2011)

ロボット開発者

（企業：★、組織：○、大学等：△）

注）現時点で各社ホームページを調査したため、当時の機種が見当たらない場合は、同一シリーズの掲載されていたロボットについて記載している。

用途	開発組織・企業	産/学	ロボットの名称	開催回	ロボット形状等	仕様等	備考	組織のホームページ URL	参照先
地上（日本）	国際レスキューシステム研究機構（日本）	○	UMRS 2009	#6				http://www.rescuesystem.org/IRSweb/home.html	
			Souryu IV （蒼龍）	#6					
			Kenaf	#6					
			Quince	#6					
			Helios IX	#6					
			KOHGA	#6					
	東北大学（日本）	△	ActiveScopeCamera（能動スコープカメラ）	#6				http://www.u-tokyo.ac.jp/index_j.html	
	長岡技術科学大学（日本）	△	NuTech-R4	#6				http://www.nagaokaut.ac.jp/j/index.html	
			Nutech-R4	(#7)					
	新潟工科大学（日本）	△	BLUE-R2 advance	(#7)				http://www.niit.ac.jp/	
	東北大学（日本）	△	Quince TOHOKU	(#7)				http://www.tohoku.ac.jp/japanese/	
	京都大学	△	KOHGA3	(#7)				http://www.kyoto-u.ac.jp/ja	
	千葉工業大学	△	QUINCE CIT	(#7)				http://www.it-chiba.ac.jp/	
			QUINCE CIT P	(#7)				(fuRo) http://www.furo.org/	
（海外）	ReconRobotics, Inc. (USA)	★	Scout	#6	投げ込み型小型偵察ロボット(各種)	500g程度	DARPAと、とりわけ、米国国立科学財団からの資金提供の下で、ミネソタ大学の分散ロボット工学研究室で開発されたロボット技術を商業化するために,2006年に設立された。 偵察Scoutロボットのユーザは、米国空軍、陸軍、海軍と海兵隊だけでなく、米国の連邦保安官、国境警備隊、FBI、ICE及びATFを含む多くの連邦政府機関。 政府の首都ワシントン会議（MWCOG）が13台のReconScout®マイクロロボットキットを購入し、引き渡しを受けた。それらは、ワシントンDCエリア全体予め指定されたタイプ1の戦術チームに配布されたことを発表した。 MWCOGは、2011年にMWCOGに授与された都市部安全保障構想（the Urban Areas Security Initiative）からの補助金を使用して、戦術偵察ロボットを購入した。	http://www.reconrobotics.com/	http://www.reconrobotics.com/company_profile.cfm
	Applied Research Associates, Inc. (USA)	★	Pointman	#6	戦術的ロボット	19" W, 13" L, 6.75" H 18lbs (8.16kg) speed: 5 ft/s Climbing: 2 s/step	1979年にニューメキシコ州アルバカーキに設立された従業員所有企業。	http://www.ara.com/	http://www.ara.com/Newsroom_Whatsnew/press_releases/pointman.html http://www.araforcepro.com/products/pointman/
			Pointman	#7					
	Inuktun Services Ltd. (Canada)	★	Versatrax	#6		Diameter min 15in（381mm） Tether Cable 500ft （160m） Multi conductor, abrasion resistant rilsan Speed Up to 30ft （9m）/m Payload 200lb （92kg）	限られた空間と危険な環境で使用するために、遠隔操作車（ROV）とモジュラーロボットシステムを設計し、製造するために1989年に設立された。 顧客は、オンタリオ･ハイドロ、GEニュークリア･エナジー、日立ニュークリア、アイダホ国立工学研究所（米国エネルギー省）、パシフィック･ガス＆エレクトリック、ERDC、ほか。	http://www.inuktun.com/index.php	http://www.inuktun.com/crawler-vehicles/versatrax-450.html
	Inuktun-USA (USA)		VGTV-Xtreme	#6	XtremeとMicroがある 	Speed: up to 90' （27m）/m Tether Cable 30m（～90m） Weight 14lbs / 6.2kg (WxLxH) Lowered: 11" x 17" x 6" (27.9 x 43.1 x 15.2cm) Raised: 11" x 11" x 13.5" (27.9 x 27.9 x 34.3cm)	**Recce Robotics International Inc. (R2i2)** 社は Inuktun Service社によって設計された（VGTV）可変ジオメトリクローラ車両を販売する世界的な独占的ライセンスを持っており、設計、製作、販売を行う。		http://www.recce-robotics.com/
	Mesa Robotics, Inc. (USA)	★	G2Bot	#6		•36 in²Payload Area •20 lb. Capacity･ •Weight: 25 lb.	アラバマ州マディソンにある、女性が個人所有する小企業。 最初はMesa Associates, Inc.のシステム開発部門として、2004年からは個人所有の小企業であるMesa Robotics, Inc.となった。	http://www.mesa-robotics.com/	http://www.mesa-robotics.com/files/Robotic%20Products.pdf http://www.mesa-robotics.com/files/Affordability%20Commentary.pdf http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=885560
			Matilda II	#6	Platform / Mobile Base Unit 				
			MatildaXL	#7					
			Element	#6		•216 in² Payload Area •125 lb. Capacity •Chassis Weight: 40 lb.	用途 ・研究・実験用 ・ロボット自動車の競技		
		★	Element （Robot Competition Variant）	#7					

Allen Vanguard Corp. (Canada)	★	Digital Vanguard ROV	#6	左：MK2		デジタルヴァンガードは、DVとも呼ばれ、爆弾処理ロボットとして、補助ポートおよび（破砕器、カメラ、ECM、X線装置やCBRNセンサを含む）爆発物処理設備の配列を展開する伸縮アームを持っている。	http://www.allenvanguard.com/	http://www.azorobotics.com/equipment-details.aspx?EquipID=276 http://www.rf-video.com/pdf/robot1.pdf
iRobot Corp. (USA)	★	PackBot 510 EOD	#6	・EOD manipulator arm ・Enhanced Awareness Payload (EAP) ・Small Arm Manipulator (SAM)	510 ・階段を容易に登る ・時速 5.8 miles(9.3km) ・60度までの坂を登坂 ・3 ft(91cm)の水中を走行 ・全天候対応 ・24 lbs (10.89 kg) 電池除く ・27″Lx16″Wx7″H	世界中で4,500台以上の PackBot robotが提供されている。 世界で最も成功した歴戦のロボットの一つである iRobot 510 PackBot は、戦闘員と第1対応者のために、爆弾廃棄や他の危険な任務を実行する。	http://www.irobot.com/us/ http://www.irobot.com/us/learn/defense.aspx	http://www.irobot.com/us/learn/defense/packbot.aspx http://www.irobot.com/en/us/learn/defense/sugv/Configurations/310_sugv.aspx
		PackBot 510 CAM, SAM, EAP	#6					
	★	Packbot 310, 510	#7		310 ・27.9″Lx13.7″Wx9″H ・29lbs(1.3kg)	310 SUGVロボットは、ラップトップコントローラ、基本的なウェアラブルコントローラと高度なウェアラブルコントローラを含むオペレータ制御ユニット（OCUs）など、様々な特徴を持つ。		
		FirstLook	#7		・10″Lx9″Wx4″H ・5.4lbs(2.45kg) ・3.4mph(5.47km/h) ・3ft落下可能	iRobot 110 FirstLook は、迅速な状況認識を提供する、小型軽量、スロー可能なロボットで、永続的な観測を実施し、密閉された空間を調査する。		http://www.irobot.com/us/learn/defense/firstlook.aspx
Qinetiq North America / Foster-Miller Inc. (USA) QinetiQ North America (USA)	★	Dragon Runner SUGV	#6	Small Unmanned Ground Vehicle (SUGV)	・Weight: 11 lbs (5 kg) ・Size: 15.5″L x 13.8″W x 6″H ・Throwable and Invertible ・Accepts Payloads: Sensors, Manipulator Arms, Cameras, etc.	親会社と協力して、4000以上の特許化されたソリューションと5300人を超える高いスキルと経験を持ったスタッフ、最大規模の防衛研究所システムにて開発された数々の最先端の技術で武装しているので、我々は、問題を解決するビジネスを行うことができる。 QinetiQ's Technology Solutions Group Foster-Miller Inc. (Waltham, MA) は2009年にQinetiQ North America (McLean, VA).と名前を変えた。	https://www.qinetiq-na.com/	https://www.qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/dragon-runner/ https://www.qinetiq-na.com/press-release/qinetiq-north-america's-dragon-runner-10™-selected-by-u-s-marines/ http://www.prweb.com/releases/2013/9/prweb11165688.htm
		Dragon Runner DR-10,	#7					
		Talon GenIV	#6		115 lbs to 156 lbs （52 kg to 71kg）	TALON GEN IV Heavy Lift 安全な距離から、地雷、不発弾、危険なIEDを検出/除去するように設計 ・65ポンドを持ち上げる ・標準TALONロボットよりも強く、リーチが長い		https://www.qinetiq-na.com/products/unmanned-systems/talon/ https://www.qinetiq-na.com/products/pscs/c-talon/ https://www.qinetiq-na.com/support/unmanned-systems-support/
		Talon GenIV Hazmat	#6					
		Talon GenIV Shoulder	#6					
		Talon IV	#7					
Telerob, GmbH (Germany)	★	TeleMAX	#6		・4track running gear	Cobhamは、2011年1月Telerobを買収し、現在ではミッション機器SBU、無人システムの製品範囲の一部となった。 Cobham plc　（ Dorset, UK.）	http://www.cobham.com/	http://www.cobham.com/about-cobham/mission-systems/about-us/mission-equipment/unmanned-systems/products-and-services/remote-controlled-robotic-solutions/telemax-explosive-ordnance-(eod)-robot.aspx http://www.xtek.net/eod-iedd/eod-robotics/telerob-telemax/#.UniJleXwpAs http://www.xtek.net/assets/DOL/PDF/Telemax-Extra.pdf
		TeleMax	#7					
ICOR Technology, Inc. (Canada)	★	Caliber MK3 EOD	#6		6×6 All wheel chain drive（2段変速） Tires size: 10.0"/25.0 cm) Low Gear: 0-3.2 km/h High Gear: 0-8 km/h	爆弾の技術者·研究者の国際交流協会（IABTI)の栄えあるメンバー ICBTI: International Association of Bomb Technicians & Investigators	http://icortechnology.com/	http://icortechnology.com/mk3-caliber/
Northrop Grumman Remotec (USA	★	Andros HD-1J	#6	mini-ANDROS Ⅱ	F6B ・Height: 56.5″ ・Width: 29″ or 17.5″ without wheels ・Length: 52″ ・Ground clearance: 3.5″ ・Weight　485 lb	1,000 台以上のANDROS robotsが全世界で配備されている。	http://www.northropgrumman.com/ http://www.northropgrumman.com/Capabilities/Remotec/Pages/default.aspx	http://www.army-technology.com/contractors/mines/northrop-remotec/ http://www.militaryfactory.com/armor/detail.asp?armor_id=616 http://www.youtube.com/watch?v=FtuvS3lUWGc&list=PLyjDJRDdYHb8wjSk8_WIrszwLRpi6Rdah&index=1 http://www.powerhawk.com/download_brouchers/Power-Hawk-NERAT.pdf
		Andros Mini	#6	F6A				
		F6A, 5A-1, HD-1	#7					

Segway, Inc. (USA)	★	Robotic Mobility Platform RMP 400-INL	#6	RMP440SE	・L:110.5 cm, W:84.2 cm, H: LE:53.3cm, SE:60.7 cm ・Weight: LE:120.2 kg, SE: 106.6 kg	セグウェイのRMP440は、頑丈、全地形対応、4輪駆動のモビリティプラットフォームです。そのデザインは、特定のニーズを満たすためにカスタマイズされたアプリケーションを構築するために自分の装備を簡単にプラットフォームの上に統合できるよう、今日のモバイルロボット開発者を支援します。	http://rmp.segway.com/	http://rmp.segway.com/tag/segway-inc/ http://knightscope.com/
The MITRE Corporation (USA)	★	Centaur	#6			MITRE社は、複数の連邦政府資金を運用する研究開発センター（FFRDCs）であり、個人所有の非営利会社。	http://www.mitre.org/	http://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/09_3569.pdf
Macro USA Corp. (USA)	★	Armadillo	#7		投げ出し型偵察ロボット		http://www.macrousa.com/	http://www.bizjournals.com/sacramento/stories/2010/05/17/story8.html?page=all http://www.youtube.com/watch?v=2cdY8GWM9xU http://www.youtube.com/watch?v=1kwNVpszNME
Oceaneering Space Systems (USA)	★	Terabot S	#7		Absolute joint encoding, clutch independent weight:42lbs(19kg)	Oceaneering社は、深海のアプリケーションを中心に、主にオフショア石油･ガス産業への技術サービスや製品の世界的な油田プロバイダ。Terabot-Sは、プラットフォームに依存しないので、実質的に任意の無人地上車両(UGV)に装着することができる。マスターアームで操縦する。	http://www.oceaneering.com/	http://www.oceaneering.com/advanced-technologies/space-systems/robotics-and-automation/terabot/ http://www.youtube.com/watch?v=IHS58MptIFQ http://en.wikipedia.org/wiki/Terabot-S
SuperDroid Robots (USA)	★	LT-Flipper	#7		TotalWeight: ~40lbs (18kg) Speed:0-5ft/s(1.5m/s)	ロボット及びロボットキットを販売	http://www.superdroidrobots.com/	http://www.superdroidrobots.com/shop/custom.aspx/lt-support-page/48/ http://www.superdroidrobots.com/product_info/sdr_lt-f.pdf http://www.youtube.com/watch?v=_dCvjX1oqM0
Mistral Security, Inc.	★	C-VBIED Tools	#7			Mistral Group	http://www.mistralsecurityinc.com/	http://www.mistralsecurityinc.com/Our-Products/Robotic-Toolkits-VBIED http://www.dtic.mil/ndia/2011grcce/Heaven.pdf http://www.nist.gov/el/isd/disaster_city_7.cfm
VM Robots LLC(USA): Wolstenholme aeromed, Inc. Wolstenholme machine, Inc.,	★	HazProbe	#7			Wolstenholme AeroMed社は、HazProbeという爆弾分隊やSWATで使用されるロボットのツールを促進し、販売する。	http://www.wmrobots.com/wmgrouphome.html	http://www.wmrobots.com/images/Knight_Specifications.pdf http://www.youtube.com/watch?v=C3BzvaNX-1A
Power Hawk Technologies, Inc (USA)	★	PowerHawk	#7			パワーホークは簡単にすべての種類や救助活動を行うために、非油圧救助ツール、便利で効果的かつ便利なセットを提供します。我々はまた、秒単位で車両を安定させるための車両安定化のためのツールを提供しています。 私たちは、火災/救助や緊急サービス、軍隊、法執行機関、EOD、産業、原子力などを含むアプリケーションや市場に、幅広く提供しています。 PowerHawk N.E.R.A.T.は、Northrop Grumman社に供給。	http://www.powerhawk.com/	http://www.powerhawk.com/products_p-16-rescue-system_unmanned-operations.html
Gander	★	Gander	#7	mini Gander	$6,165	Ideal Supply Inc. ?	http://www.idealblasting.com/minigander.aspx	
LVB Trailer	★	LVB Trailer	#7	?		Leipziger Verkehrsbetriebe ?		

区分	AERIALS sUAS VTOL (FAA ARC Group I under 2kg, 30knots, frangible)			開催回	ロボット形状等	仕様等	備考	組織のホームページ URL	参照先
空中	AirRobot® GmbH & Co. KG (Germany)	★		#6	AR200 	payloads up to 1.5 kg – big reach and long flying time	AirRobot GmbH & Co. KGは、AirRobot MAS（マイクロ空中システム）を開発した私的融資会社（中小企業）です。 最も多様な分野のアプリケーションに向けたミニおよびマイクロUAVのグローバルに活躍する、本社をArnsbergにおくメーカです。 AirRobotの特徴は、ユーザーフレンドリー 、自律的、信頼できる、迅速に使用することができる。 民間および軍事分野で使われている。私たちは、ドイツ連邦軍のサプライヤーです	http://www.airrobot.de/	http://www.airrobot.de/index.php/legal-details.html http://www.youtube.com/watch?v=usjifWtvSLg http://www.youtube.com/watch?v=rpW9potu0Ng
			AirRobot	#7					

区分	AQUATIC			開催回	ロボット形状等	仕様等	備考	組織のホームページ URL	参照先
水中	SeaBotix, Inc. (USA)	★	LBV200L2	#6				http://www.seabotix.com/	http://www.youtube.com/watch?v=iCs1r2TmRz4 http://www.youtube.com/watch?v=YXAwCN0b2tg
			LBV150SE-5	#6					
			不明	#7					
	VideoRay LLC (USA)	○	不明	#7	Scout X3 	Depth Rating:76 m (250 ft) ROV Dimensions: 30.5 x 22.5 x 21 cm Total System Weight:34 kg – includes TDS	VideoRay は、世界で最も大量の水中ROV（遠隔操作ビークル）を製造しているメーカです。 1999年に設立され、幅広いミッションのために、幅広い組織に2500台以上供給しています。	http://www.videoray.com/	http://www.youtube.com/user/Vrayluzzi12

付録 2-2

課題 2　2-1-2 執筆者リスト

長田　國弘（神戸商工会議所　コーディネータ）
來田　浩毅（神戸商工会議所　コーディネータ）
小西　康晴（㈱ロボリューション　代表取締役）
高瀬　進　（神戸大学　経営学研究科　研究員）
荒谷　典利　（荒谷マネジメントサービス　代表）

オプティミスティック・シナリオ

（単位：千円）

	当該年度末を現在として 20XY-3年	20XY-2年	20XY-1年	ここで発売開始 20XY年	20XY+1年	20XY+2年	20XY+3年	20XY+4年
CIF				10,007	54,788	66,308	96,541	130,460
営業利益				16,678	91,314	110,514	160,902	217,434
税控除				6,671	36,526	44,206	64,361	86,974
COF	21,000	21,000	21,000	0	0	0	0	0
開発投資（自社負担）	20,000	20,000	20,000					
ECサイト構築	1,000	1,000	1,000					
FCF	-21,000	-21,000	-21,000	10,007	54,788	66,308	96,541	130,460
割引率＝5%と仮定								
0.05								
DCF	-21,000	-20,000	-19,048	8,644	45,075	51,954	72,041	92,716
割引率		1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407

NPV　210,382

前提：

開発費：国プロ2/3補助事業　3年間10，000千円＋人件費等10,000千円
3年間継続して改良

ペシミスティック・シナリオ

	当該年度末を現在として			ここで発売開始				（単位：千円）
	20XY−3年	20XY−2年	20XY−1年	20XY年	20XY+1年	20XY+2年	20XY+3年	20XY+4年
CIF				−9,158	−382	19,606	30,004	42,842
営業利益				−9,158	−382	32,676	50,006	71,404
						13,070	20,002	28,562
COF	21,000	21,000	21,000	0	0	0	0	0
開発投資（自社負担）	20,000	20,000	20,000					
ECサイト構築	1,000	1,000	1,000					
FCF	−21,000	−21,000	−21,000	−9,158	−382	19,606	30,004	42,842

割引率＝5%と仮定

0.05

DCF	−21,000	−21,000	−21,000	−8,722	−346	16,936	24,684	33,568
割引率		1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407

NPV　3,120

前提：

開発費：国プロ2/3補助事業　3年間10，000千円＋人件費等10,000千円
3年間継続して改良

契約管理番号	１３４０１４９５－０