

平成 24 年度成果報告書

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

平成 25 年 3 月

(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

(再委託先) 株式会社三菱総合研究所

(再委託先) 一般社団法人日本ロボット工業会

# 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. 我が国における特殊環境用ロボット等の政策的位置付け等（担当：株式会社三菱総合研究所）>

### 1-1. 特殊環境用ロボットの開発・活用動向と課題

- 1-1-1 特殊環境用ロボットの利用環境・利用目的の全体像・・・・・・・・・・ 1
- 1-1-2 特殊環境用ロボットに関する我が国の取り組み・・・・・・・・・・ 2
- 1-1-3 災害対応における特殊環境用ロボットの活用の現状と課題・・・・ 10
- 1-1-4 平常時におけるメンテナンス等のための特殊環境用ロボットの  
活用ニーズ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
- 1-1-5 我が国の政策における特殊環境用ロボットの位置付けと課題・・・・ 35
- 1-1-6 特殊環境用ロボットの開発体制・運用体制の整備の必要性・・・・ 47

### 1-2. 特殊環境用ロボットの運用体制構築のあり方

- 1-2-1 運用体制に求められる要件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 49
- 1-2-2 災害発生地域・種類および対応主体・方法等に関する想定・・・・ 50
- 1-2-3 運用体制構築の方向性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61
- 1-2-4 （参考）災害時の技術支援に係る既存の取り組み  
（国土交通省 TEC-FORCE）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 62

<課題2. 我が国が取り組むべき中長期的課題の明確化（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）>

### 2-1 調査の目的と概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65

### 2-2 災害・事故・インフラ・メンテナンス等の適用におけるユーザニーズ

- 2-2-1 災害・事故におけるユーザニーズ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
- 2-2-2 インフラ・メンテナンス等におけるユーザニーズ・・・・・・・・・・ 81

### 2-3 災害・事故・インフラ・メンテナンス等に適用が期待される特殊環境用

- ロボット・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 86

2-4	特殊環境ロボットの技術の現状と課題	
2-4-1	特殊環境用ロボットの構成	93
2-4-2	特殊環境用ロボットの能力の評価	94
2-4-3	特殊環境用ロボットの能力の現状とその課題、および、現在の 研究開発動向を踏まえた中長期的課題解決法	100
2-5	ロボットの研究開発から配備・運用に至るまでの、技術以外の 中長期的課題	109
2-6	取り組むべき内容、課題解決に必要な研究開発プロジェクト	
2-6-1	遠隔現場へのアクセシビリティの向上	117
2-6-2	ロボットによる現場の悪影響の防止	120
2-6-3	無線通信、有線通信の問題点の解決	121
2-6-4	遠隔状況認識、知能化、自動化	122
2-6-5	無人化施工の高度実用化研究開発推進	123
2-6-6	コンテスト形式によるロボットの基盤技術研究の奨励	123
2-6-7	国際標準化、規格等の整備	124
2-6-8	全国に複数の研究開発拠点の整備、および、防災ロボット センターの開設	125
2-6-9	ロボット適用に必要な制度と環境の整備	126
2-7	ロードマップ	129
2-8	予算	130
2-9	参考：Quinceの研究開発に関する事実関係について	130
2-10	まとめ	132

<課題3. 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と競争力の強化に関する調査（Test Field & Test Method 等の将来像）（担当：一般社団法人日本ロボット工業会）>

3-1	特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の現状と課題	135
3-1-1	分野毎の調査	135
3-1-2	技術毎の調査	141
3-2	特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の戦略的推進と競争力の 強化への提言	147
3-2-1	特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の戦略的 推進への提言	147

3-2-2	特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化を用いた国際産業 競争力強化への提言・・・・・・・・・・・・・・・・・・	157
3-2-3	特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化を用いた国際産業 競争力強化へのアクションプラン・・・・・・・・・・	159

## II 付録 活動記録

## まえがき

東日本大震災や福島第一原子力発電所事故では、多数のロボットが災害対応に使用され、2011年は防災ロボット活用元年と言われている。この実績を踏まえて、今後の大規模災害では、世界中で防災ロボットの活用が加速されると予想されている。

一方で、我が国はロボット大国と言われながら、防災ロボットの配備が進んでおらず、その適用がスムーズになされないという問題点も明らかになった。今後、大規模災害やインフラや産業設備の老朽化などの我が国が抱える社会問題への対策として、特殊環境用ロボットの技術や運用体制を強化することが求められている。

本事業では、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) 我が国における特殊環境用ロボット等の政策的位置付け等（担当：三菱総合研究所）
- 2) 我が国が取り組むべき中長期的課題の明確化（担当：国際レスキューシステム研究機構）
- 3) 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と競争力の強化に関する調査（担当：ロボット工業会）

この調査によって、多様な観点から、特殊環境用ロボットの必要性、運用体制のあり方、技術的問題点、技術以外の問題点、それらを解決するための方策、進めるべきプロジェクト、標準化と安全規格化、競争力強化のために重要なポイント、などが明確化されたと考えている。

今後これらをさらに具体化し、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老朽化対策など、我が国の抱える重要な社会問題、また、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25年3月8日

国際レスキューシステム研究機構  
ロボット工業会  
三菱総合研究所

## (要約)

本事業では、我が国の特殊環境用ロボットの競争力の強化に資することを目的として、1) 我が国における特殊環境用ロボット等の政策的位置付け等の明確化、2) 我が国が取り組むべき中長期課題の明確化、3) 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と競争力の強化に関する調査を行った。

1) では、特殊環境用ロボットの開発・活用動向と課題として、特殊環境用ロボットの利用環境と利用目的、我が国のこれまでの取り組み、災害対応における特殊環境用ロボットの活用の現状と課題、開発体制・運用体制の整備の必要性に関する分析を行った。また、ロボットの運用体制構築のあり方として、運用体制に求められる要件と運用体制構築の方向性を明らかにし、災害発生地域・種類及び対応主体・方法等に関する想定に基づいて、我が国の有事における今後の運用体制のあり方について提言を行った。

2) では、災害・事故・インフラ・メンテナンスにおける特殊環境用ロボットのユーザーズの調査を行い、ロボットに求められる役割が2つのケースに、ロボットが求められる状況は3つのケースに類型化できることを明らかにするとともに、特殊環境用ロボットに対する潜在ニーズを高さを明確化した。この目的のために適用が期待される特殊環境用ロボットを10種類に分類し、ロボットの機能として8つの評価項目、性能として5つの評価項目、運用として5つの評価項目を明らかにした。それに基づき、各種ロボットに対して分析を行い、それぞれの災害条件下での問題点や技術達成度レベルを明らかにした。同時に、ロボットの研究開発から配備・運用に至るまでの技術以外の中長期課題の分析を行い、それを11個の項目として整理し、それぞれについて解決すべき点を明らかにした。以上の分析をもとにして、重点的に取り組むべき内容を、遠隔現場へのアクセシビリティの向上、ロボットによる現場の悪影響の防止、無線通信・有線通信の問題点の解決、遠隔状況認識・知能化・自動化、無人化施工の高度実用化研究開発推進、コンテスト形式によるロボットの基盤技術研究の奨励、国際標準化・規格等の整備、全国に複数の研究開発拠点の整備、及び、防災ロボットセンターの開設、ロボット適用に必要な制度と環境の整備、という9点の提言としてまとめ、そのロードマップと必要な予算を明らかにした。また、今後のプロジェクト立案等の参考として、Quinceの開発に至った必要条件を明らかにした。

3) では、特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の現状と課題として、分野別に、消防防災分野における米国の性能評価基準、我が国の安全規格化と性能要件定義、農業分野における安全規格の調査を行った。また、技術別に、標準試験法や安全規格、通信プロトコル規格、ロボットOS、ロボットシミュレーション技術の規格の現状に関する調査を行った。それに基づき、特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の戦略的推進の強化への提言として、標準性能試験法を利用した実用化推進、リスクベーストップマネジメントによる安全規格化の推進、人材育成と社会啓発に関する提言を行い、戦略的推進のロードマップを示した。また、国際産業競争力強化のために、標準性能試験法、安全規格化、市場化コストへの対応策、の3点の提言を行った。そして、アクションプランとして、コスト・ベネフィット分析、標準性能試験法開発による実用化加速、安全規格化による安心化、総合評価入札制度の導入による国内普及、パッケージ型海外展開による国際展開を提案した。

## (ABSTRACT)

This project analyzed the following three items for consolidation of competitiveness of special environment robots (SERs) in Japan: 1) clarification of political positioning of SERs, 2) clarification of mid-long term issues that Japan should pursue, and 3) strategic planning of standardization, safety standards and the competitiveness.

As for 1), trend of development and utilization of SERs was analyzed particularly on their environmental conditions, purposes, Japan's efforts, state of art and problems, necessity of frameworks for development and utilization. On this basis, it proposed the necessary points and directions of utilization frameworks, and the future emergency frameworks with supposing areas and types of disasters, response organization and methods.

As for 2), user needs of SERs were categorized into 2 roles and three conditions, and clarified the potential needs of SER is high. Effective SERs are classified into 10 types, and evaluation metrics of 8 functional items, 5 performance items and 5 utility items were proposed. Issues under disaster conditions and technology readiness level of each robot were evaluated. Mid-long term issues out of technology for R&D and deployment were analyzed for 11 issues. On the basis of these data, the following prioritized items were proposed: improvement of remote accessibility, prevention of damage by robots, solution of wireless and wired communications, remote situation awareness with intelligence and autonomy, unmanned construction systems, promotion of basic research by contests, international standardization, multiple R&D sites all over the nations, disaster robot center, and establishment of frameworks and environments for utilization. The roadmap and necessary budget was also explained. In addition, the necessary conditions by which Quince was developed were explained.

As for 3), the state of art and problems of standardization and safety standards of SERs was analyzed for firefighting area and agriculture area, and the state of art of standard test methods, safety standards, communication protocol standards, robot operating systems, and robot simulation technologies were investigated. For strategic consolidation of standardization, promotion of utilization by the standard test methods, safety standards by risk-based top management, and human resource development and social promotion were proposed with roadmap. For strategic consolidation of international competitiveness, standard test methods, safety standard and marketing costs were discussed. Finally, the following action plans were proposed: cost-benefit analysis, acceleration of practical realization by developing standard performance test methods, safety standards for security, nation-wide propagation by introducing bidding systems with synthetic evaluation, and package-type international development.

我が国における特殊環境用ロボット等の政策的位置付け等

報告

2013年3月

株式会社三菱総合研究所

1-1 特殊環境用ロボットの開発・活用動向と課題

1-1-1 特殊環境用ロボットの利用環境・利用目的の全体像

特殊環境ロボットの行う活動は、利用環境（想定される災害と空間的区分）と、利用目的（機能）から、以下のようにマトリクスで整理される。現状で想定されている特殊環境ロボットの活動例を図表中に示した。

図表 1-1 特殊環境ロボットの利用環境・利用目的の整理（例）

利用環境		利用目的(機能)								
災害	空間等	(要救助者の)探索・状態検査	(危険物質・環境等の)情報収	災害の概観情報の収集	緊急治療の補助	被害の定量的調査	災害復旧工事	避難所支援	安全性検査	セキュリティ機能
構造物倒壊	建物の全・半壊	取り残された人の救助・探索		現場調査			復旧作業			
	トンネル・鉱山の崩落・爆発現場	取り残された人の救助・探索	内部調査				復旧作業			
土砂崩れ・地滑り・雪崩・火砕流・噴火	道路・橋梁・崖等の崩落現場	取り残された人の救助・探索		現場調査			復旧作業			
	中州等の孤立した地域	取り残された人の救助・探索		天然ダム等の現場			復旧作業			
	土砂や雪の中	埋もれた人の救助・探索		現場調査			復旧作業			
	埋もれた構造物内	埋もれた人の救助・探索		現場調査			復旧作業			
	噴火・火砕流の危険性の高い場所			現場調査			復旧作業			
水害	浸水・流された建物(中、上)	取り残された人の救助・探索		現場調査			復旧作業			
	地下街・下水(洪水・津波)	流された人の救助・探索		内部調査			復旧作業			
	倒壊建物の瓦礫中(洪水・津波)	埋もれた人の救助・探索		現場調査			復旧作業			
テロ・CBRN	入れない閉鎖空間(爆発の危険、CBRN物質汚染)	救助・探索	現場調査				復旧作業(汚染源除去・除染)			
	近づけない場所(爆発の危険、CBRN物質汚染)	救助・探索	現場調査				復旧作業(汚染源除去・除染)			
	疫病流行地域	救助・探索	状況調査		治療		復旧作業			
事故	列車・船・飛行機等の内部	取り残された人の救助・探索		内部調査						
	海・川(水難)	流された人の救助・探索								
災害地支援	災害地(犯罪防止)									犯罪防止・警備
	ライフライン寸断(電気、水道、ガス、通信)、ロジスティクス寸断(道路、鉄道、航空、海運、サプライチェーン)						復旧作業			

出所：東北大学/国際レスキューシステム開発機構・田所諭教授資料より MRI 作成

## 1-1-2 特殊環境用ロボットに関する我が国の取り組み

### ① 極限環境ロボット

昭和58年より平成2年までの8年間（精算事業のため平成3年までの1年間延長）、総額約148億円の大型プロジェクトとして、我が国の国民生活の安定と経済発展を図るため、産業の長期的成長基盤と創造的自主技術の開発が極めて重要で、そのため、労働災害の回避、社会施設の安全強化を図るため「極限作業ロボット」がスタートした。

その目標は、

- i. 原子力・海洋・災害等の分野において、放射線・高水圧・高温等により立入が困難な状況での点検・保全・救援活動等極めて多様かつ複雑な現場作業をあらかじめ与えられた指示或いは遠隔からの指示により、迅速かつ確実にを行う機動性及び汎用性を有したロボットについて、その実用化に必要な技術を確立することを目標とする。
- ii. この目標達成のため、原子力・海洋・災害の3分野において、それぞれの分野固有のニーズを踏まえ、専用の機能を有するロボットを開発するとともに、各分野に共通する技術については基盤技術として研究開発を実施するものとする。
- iii. 以上の研究開発に当たっては、多岐に亘る技術開発課題及び将来の需要分野に対応するため、また、国際協力プロジェクトへの貢献を図るため、国内外の関連研究機関との交流を積極的に推進することとしている。

図表 1-2 極限作業ロボットの開発目標

項目		目標
原子力関連作業ロボット		原子力発電所等の原子力関連施設において、遠隔のオペレータの指示に従い、機器設備の保守、点検、修理等の高度な作業を行うロボットを開発する。
海洋石油開発支援ロボット		海洋石油開発関連施設において、遠隔のオペレータの指示に従い、機器設備の保守、点検、修理等の高度な作業を行うロボットを開発する。
災害対応ロボット		産業施設、社会施設等において災害が生じた際に、遠隔のオペレータの指示に従い、災害の拡大防止、救援等の高度な作業を行うロボットを開発する。
基 盤 技 術	機 構 技 術	脚、車輪等により階段、斜面等の不整地を効率的に移動する機構を開発する。 多関節・多指のマニピレータにより柔軟かつ器用に作業する機構を開発する。 センサからの情報によりの確に環境を認識する機構を開発する。
	制 御 技 術	ロボットの自律機能を開発するとともに、オペレータによる制御技術として、高度な実時間臨場感のもとに大局的な指示により正確かつ迅速に制御する方式を開発する。
	支 援 技 術	ロボットを効率よく利用するための技術として、複数台ロボットからなるシステム構成手法、ロボット言語及び総合的評価手法を開発する。

【その後】

開発された原子力メンテナンスロボット（ケンタロウス型）や力フィードバック可能な制御装置、双腕マニピレータ、光空間伝送システム、壁面ロボット、水中探索ロボット等様々なロボットの開発を行ったが、いずれにせよ研究機、実験機で実用化に至るまで到達はしていない。ただ、これら開発で培った技術は、この後日本のロボット技術の基礎技術や実用応用に利用されており、有用な利活用が図られた部分も多数あることが確認できている。

② 原子力防災支援システムの開発（JCO事故後のロボット開発）

平成11年（1999年）9月、茨城県の東海村ウラン加工施設で発生した臨界事故は、

高放射線から人を防護できる装備がなったため、現場施設への接近が阻まれ災害状況の把握と災害処理等の作業の遅れ及び実際に臨界停止に当たり作業員が相当の被ばくを受けた。

このため、通商産業省工業技術院（現：経済産業省）は、防災関係者がサイト内の防災活動を的確、かつ安全に行うことができるよう、放射線防御等に必要な整備等を備えるための技術開発を行うこととした。

予算措置としては、平成11年度第二次補正予算（電源特別会計）の原子力防災支援システム開発費補助30億円充てることとし、補助金は、（財）製造科学技術センターに交付され、同センターが実施主体となって開発を進めることになった。開発期間は、平成12年1月～平成13年3月31日まで。

a) 開発の進め方

（財）製造科学技術センターに本プロジェクトの円滑な推進と重要事項（開発要求機能・目標設定、開発託先選定、開発成果の評価等）の審議を行う原子力防災支援システム開発推進委員会を設置。委員は、ロボット及び原子力に知見を有する学識者等で構成。

b) 開発の前提条件

原子力発電所等で、炉心に重大な損傷（多数の燃料破損又は炉心の溶融など）が生じ、多量の放射性物質が原子力発電所外に放出する可能性のある事故で、発生の可能性が工学的には考えられないほど極めて低い事であるシビアアクシデント（過酷事故）が起こったことを前提とし、原子力防災従事者が原子力施設において作業可能な遠隔操縦ロボット等の技術開発を行う。

c) 開発ロボットの機能等

- ・ 事故発生時に防災従事者が実施困難な作業に対応できる機能を有すること
- ・ 対象作業場所までの往復時間を含めて約2時間程度活動可能とする
- ・ 原子炉建屋内（原則として原子炉格納容器外）とする。ただし、格納容器内での活用の可能性についても考慮する
- ・ 屋外は、想定対象外とする
- ・ JCO事故での対応作業も対象とする
- ・ 事故発生時には、外部電源、非常用電源は使用できないことも想定する
- ・ 事故発生時の負傷者救出、人命救助（負傷者に対する応急手当、運搬等）は、施設に対する防災策と異なる特別な対応が想定されるため、想定対象外とする

d) 開発目標および実施者・開発内容等

具体的な開発目標を以下図表に示した。

図表 1 - 3 開発目標

要求項目	開発目標仕様	
1. 作業環境	①耐放射線性	・人間が立ち入り困難な放射線レベルに耐えるものとする。(放射線レベル最大10Sv/h (γ線) を目安とする。短時間の中性子線下作業も考慮する) ただし、マニピュレータ先端部については極度の放射線を浴びる可能性があり、本体の電子回路についてはシステム上及び運用上で考慮することを要する。また、CCDカメラ、センサ部については相当量の放射線を浴びる可能性があることを考慮する。)
	②温度	・蒸気の漏洩に対処出来ることとする。 火災発生についても考慮する。
	③相対湿度	・最大100%RH
	④圧力	・大気圧とほぼ同等とする。
	⑤視界性	・水蒸気漏洩時、発煙時にも作業可能とする。
	⑥照明	・所内電源喪失による消灯時の作業を可能とする。
	⑦防爆性	・必要な環境下では適切な防爆性を有する。
	⑧防水性	・必要な環境下では適切な防水性を有する。
2. 移動機能	①通過寸法	・幅 : 0.8m (曲がり通路幅1m) を通過可能とする。 ・高さ：一般扉の高さ2mを通過可能とする。
	②堰、段差	・高さ0.2m以下の段差、堰の乗り越え可能とする。 ・最大勾配1/5のスロープを通過可能とする。
	③階段	・幅0.8m以上、傾斜40°以下、段差0.2mを昇降可能とする。 ・奥行き1mの踊り場での旋回(90°及び180°)が可能とする。
3. 電源	・作業者が建屋内の電気ベネトレーションを利用し電源を確保することを前提とする。 ・作業目的に応じてバッテリーを搭載する。	
4. 通信	・作業者が建屋内の電気ベネトレーションを利用し、通信ケーブル及び中継器を設置し建屋 外からの通信を確保することを前提とする。 ・通信方式は有線又は無線とする。	
5. 信頼性	・ロボットの異常発生時のフェールセーフを有する。	
6. 作業	①作業現場の状況把握	・作業現場の状況確認(異常状況、機器配置、位置関係等) ・作業現場の環境情報収集(放射線、温度、湿度等)
	②ドア開閉操作	・作業上、アクセスが必要な扉の通過機能を有する。
	③弁開閉操作	・小口径配管弁の操作を可能とする。
	④機器、配管等の切断、開孔	・作業上、必要な専用工具の取り扱いを可能とする。
	⑤ホース類取扱	・給水、排水及び消火用ホースの取り扱いを可能とする。
	⑥放射線遮へい体の取り扱い	・遮へい体の運搬及び設置を可能とする。
	⑦その他(例)	下記の作業例についての対応も検討する。 ・事故時の炉水、冷却材及び格納容器内ガスの試料採取作業 ・現場盤、電源盤操作 ・人が行う作業の前に、必要となる除染作業 ・作業上、必要となる開錠作業
7. その他	①上記項目を考慮したロボットシステムが複数のロボットより構成される場合は、下記の項目について可能な限り統一を図る。 ・操作、制御のマンマシンインターフェース ・外部入力電源仕様 ②運転員による操作が容易に出来ることとする。 ③ロボットは2時間程度活動出来ることとする。	

また、実施者(委託先)およびそれぞれのロボットシステム、構成、開発内容等を以下図表に示した。

図表 1-4 実施者および開発内容等

委託先・サブシステム等	構成	作業内容等
㈱東芝 作業監視観測用 ロボットシステム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クローラ駆動式走行台車 1台</li> <li>・監視観測ユニットI型 1台 車輪走行式で、TVカメラ、センサ類を装備。</li> <li>・監視観測ユニットII型 1台 監視観測ユニットI型の装備に加えて、赤外線カメラ、マイクロフォン及び中性子線センサを装備。</li> <li>・実証試験用設備（4社共用）</li> <li>・制御装置用コンテナ（4社共用）</li> <li>・ロボット運搬用コンテナ（4社共用）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業現場の状況把握を急ぐ場合、作業現場が狭隘な場合などは、監視観測ユニットI型を単独又は走行台車に搭載して現場近傍まで運搬し監視観測。</li> <li>・作業現場の状況を詳細に把握する場合、他のロボットの作業状況を俯瞰して監視観測する場合などは、監視観測ユニットII型を走行台車に搭載して運搬し監視観測。</li> </ul>
㈱日立製作所 作業用ロボットシステムA	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業用ロボット 1台 形状可変型クローラ式移動機構マニピュレータ（6自由度）、</li> <li>・電源装置（4社共用）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一般ドア開閉、小口径弁の開閉、スミヤ採取、ガス及び炉水試料採取等の作業。</li> </ul>
三菱重工業㈱ 作業用ロボットシステムB	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業用ロボット 1台 クローラ式移動機構マニピュレータ（7自由度）、</li> <li>・重量物運搬用ロボット 1台 クローラ式移動機構</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業用ロボットは、負圧ドア開閉、弁の開閉、機器配管等の切断・開孔、簡易除洗等の作業。</li> <li>・重量物運搬用ロボットは、ホース、遮蔽体等の運搬。</li> </ul>
サイバネティクス社 （日商岩井㈱と共同） 作業用ロボットシステムC	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業用ロボット 1台 主キャタピラー+2対の可動キャタピラーの移動機構マニピュレータ2本（可搬重量25kgとグリッパ+可搬重量80kg）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主に高放射線下における各種作業</li> </ul>

d) 実証試験

プロジェクト終了後の平成13年3月22日、23日には、財団法人機械振興協会・技術研究所の一部を借り、想定事故事象対応モックアップ（原子力建屋内、階段、ドア、配管等）を利用した実証試験を行った（映像データ有り）。

d) その後

平成12年度末、それまでは、原子力防災センター（オフサイトセンター）の何れかに同システムを移管。システムとして完成させるため、電源や移動用のコンテナ、指揮車等の一体（システム）化を行い、ロボット等マニュアル等も整備を行ったが、当時のオフサ

イトセンター構想がしばみ、維持メンテナンス費用がかかる同システムの受入が実現できなかった。

#### ④戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト

NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト「被災建造物内移動 RT システム」(2005～2011年に実施)では、被災建物内での危険物質漏洩を想定した災害情報収集ロボットの研究が行われ、Quince 他のロボットが開発された。

災害対応ロボット Quince は、NEDO による上記プロジェクトにおける「被災建物内移動 RT システム(特殊環境用ロボット分野)閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」において、実用化に向けたプラットフォームとして開発された。プロジェクトでは、一般市民に甚大な被害を与える可能性がある大規模地下街でのテロ発生を想定し、解決すべき問題と研究課題を明確化した。

#### ⑤「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」におけるレスキューロボット開発

「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」では、大震災における緊急災害対応(人命救助など)のための人体検索・情報収集・配信等を支援することを目的とした、ロボット・インテリジェントセンサ・携帯端末・ヒューマンインタフェース等の研究開発を行った。これらにより、能動的・インテリジェントに情報を収集し、ネットワークで情報の伝達・集約・要約等を行い、人間の緊急災害対応活動(人命救助など)や意思決定を支援することに役立つシステム及び要素技術を研究開発した。

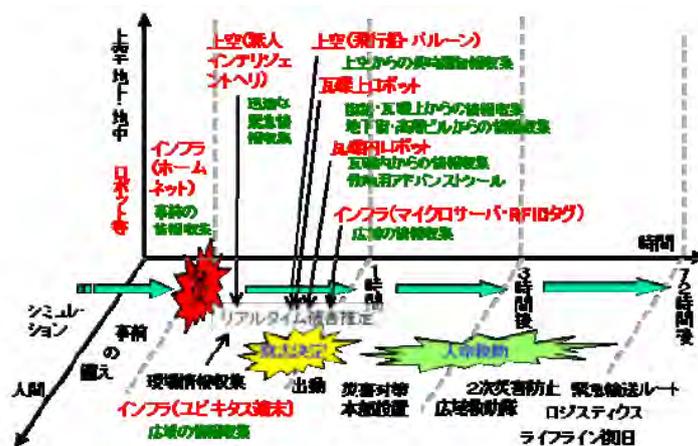
この1つのテーマとして、レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発が行われた。そこでは、阪神淡路大震災直後の救助と適用可能技術、消防等のニーズ調査に基づき、ロボット技術を活用した要救助者情報の収集に重点を定め、研究開発が進められた。

プロジェクトの実施期間は平成14年8月1日～平成19年3月31日。

##### a) プロジェクト成果の概要

図表のような活用シナリオを想定し、ミッションユニット(MU)という4つのグループを中心に研究が行われた。

図表 1-5 研究成果の活用シナリオ



出所：レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 成果報告資料

プロジェクトではさまざまな研究開発が行われたが、その成果を大まかに分類すると次のようになる。

図表 1-6 プロジェクト成果の概要

① 救助活動機器・システム	ファーストレスポnderが使う高度救助資機材。ヘビ型ロボット（瓦礫内ロボット）、クローラ型ロボット、ジャンプロボット（瓦礫上ロボット）、レスキューツール、能動スコープカメラ、瓦礫内レーダー、RFID タグによる無線トリアージタグ、など
② 救助活動機器のための要素技術	高度救助資機材を実現し、性能を高めるための基盤技術。 センサ情報処理、画像処理、半自律機能、ヒューマンインタフェース、など
③ 防災対応機関のための機器	広域災害において上空から概観情報を迅速に収集するための防災機器。無人インテリジェントヘリ、飛行船、バルーン、データベース、など
④ 一般建物設置機器	一般家屋に設置して安全安心を高めるための防災機器。 レスキューコミュニケーター（ユビキタス端末、マイクロサーバ、ホームネット）など

#### b) 実証試験・訓練

研究成果の実用化のためには、実証試験と改良を繰り返すこと、ユーザからのフィードバックを得ることが必要である。そのために、実証試験フィールドとして国際レスキューシステム研究機構神戸ラボラトリーに倒壊家屋実験施設を建設し、現役消防隊員によるボランティア部隊 IRS-U を結成しての訓練・評価・意見聴取を行った。また、ハイパーレス

キューや国際緊急援助隊に対するデモ、米国国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology, 以下 NIST）、米国材料試験協会（American Society for Testing and Materials, 以下 ASTM）によるレスキューロボット評価標準化に協力し、米国連邦緊急事態管理庁（Federal Emergency Management Agency of the United States、以下 FEMA）隊員によるロボットデモ体験・試験を行った。また、展示会やマスメディア等を通じ、成果を広く知ってもらうことができた。

c) その後

プロジェクト開発成果の応用例として、瓦礫内情報収集ロボットである能動スコープカメラは、工業用ビデオスコープのケーブル表皮全体に繊毛振動駆動の原理によるアクチュエータ機能を実現したものであり、ごく狭い瓦礫の空隙内（開口径 3 cm 程度）の奥深くの検査を行うことができる。

これは一つの例であるが、レスキューロボットおよびその技術は、建設施工に対して有効なものが多いと見られ、研究成果の相互の波及が期待される。

また、福島第一原発の原子炉建屋に最初に入った国産ロボット **Quince** は、NEDO プロジェクトによる研究開発に加えて、本プロジェクト（大大特）を通じてシステム改良・試験・実証・デモを行ったことにより実現した成果である。これらプロジェクトがなければ **Quince** は存在せず、冷温停止状態の実現はかなり遅れ、作業員の総被曝量ははるかに増大したと考えられる。

⑥神戸市における災害対応ロボットの配備等

神戸市は 2010 年度末に、国際レスキューシステム研究機構（IRS）が開発した災害対応ロボット「**UMR2010**」を購入した。阪神淡路大震災のような直下型地震の発生時に、ビルや地下街など閉鎖空間における先行探査や要救助者の探索などを目的に開発されており、神戸市の事情に合致する。長田区に設置した「神戸ロボット工房」での展示を通じた啓蒙や、神戸市消防局での運用訓練に役立てることが計画されている。

2010 年 4 月に、総務省により救助隊の編成、装備および配置の基準を定める省令改正がなされ、特別高度救助隊および高度救助隊による「検知型遠隔探査装置」の配備が推奨された。つまり、遠隔操作式の災害対応ロボットの配備である。あくまで地域の実用に応じて導入するものであり、義務づけているものではないが、すでに配備していた東京消防庁を除き、現在のところ神戸市以外の自治体で配備に向けた動きは見られない。

なおその後、東日本大震災への対応等の影響により、訓練での利用は延期されたままとなっている。

### 1-1-3 災害対応における特殊環境用ロボットの活用の現状と課題

#### (1) ロボット投入概況

東日本大震災と福島第一原発事故ではさまざまなロボットが活用され、一定の成果を上げた。主要なものを上げると以下の通りである。

- ・ NEDO 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト「被災建造物内移動 RT システム」で開発されたレスキューロボット **Quince** は、国際レスキューシステム研究機構・千葉工業大学・東北大学から東京電力に対して無償貸与され、2011年6月から原子炉建屋上階の線量計測や状況撮影に活用された。
- ・ 無人化施工の建機は4月から屋外の瓦礫処理に活用され、多いときには15台以上が稼働している。
- ・ 南三陸町・陸前高田市では、米国テキサス A&M 大学・国際レスキューシステム研究機構・京都大学・長岡技術科学大学のチームが高解像度ソナーを備えた水中ロボット (ROV) を使って遺体捜索及び港湾被害調査を行い、漁業復興に大きく貢献した。
- ・ 産総研・大和ハウスはセラピーロボット **PARO** を避難所等に無償貸与し、被災者のメンタルケアに貢献した。東北大学・京都大学・米国ペンシルバニア大学は被災建物内で地上ロボット **Quince**・飛行ロボット **Pelican** を使った被害調査を行った。
- ・ 東京電力は **Packbot** などさまざまな欧米のロボットを事故対応に活用した。放射能汚染のため、福島第一原発の冷温停止状態の実現は、ロボットや遠隔装置無しでは困難であった。

このような多数のロボットが災害対応のための活用されたのは歴史上初であり、2011年はレスキューロボット活用元年とすることができよう。これを契機として、今後の巨大災害への対応ではロボットがフル活用されるようになると期待される。

ちなみに、ロボットに対する出動要請と実際の出動状況は以下図表の通りである。

図表 1-7 ロボットに対する出動要請と実際の出動状況

年月日	東日本大震災における IRS の主要な活動	適用対象	主担当
2011/3/11	米国:CRASAR に対する出動要請(正式 Invitation Letter 3/17)	倒壊家屋	田所
2011/3/13	仙台:仙台市消防局に対する能動スコープカメラ適用の申し出 仙台:能動スコープカメラスタンバイ	倒壊家屋 倒壊家屋	田所 田所
2011/3/14	仙台:東北経産局, 宮城県, 仙台市を通じた適用可能ロボットリスト配布 仙台:Quince スタンバイ	被災工場 被災工場	田所 小柳
2011/3/15	仙台:空港ニーズ調査	津波災害	田所
2011/3/17	千葉:鹿島コンビナートのための Quince 適用検討 福島:原発対応のための Quince 改造開始	被災工場 福島原発	小柳 小柳
2011/3/19	八戸:KOHGA による体育館被災調査, 港湾関係のニーズ調査	被災建物	松野
2011/3/28	仙台:Quince による全壊建物調査	被災建物	田所
2011/3/31	岩手:港湾調査へのロボット適用呼びかけ	港湾調査	松野
2011/4/2	宮城県南三陸町:町長よりロボット適用依頼	港湾調査	木村
2011/4/7	宮城:港湾調査へのロボット適用呼びかけ	港湾調査	村田
2011/4/11	宮城・岩手:被災状況のデジタルアーカイブ呼びかけ	被害状況	村田
2011/4/12	仙台:チームニッポン車両への 3 次元・熱画像カメラ搭載開発開始(JAEA 協力)	福島原発	田所
2011/4/18 -4/19	宮城県亘理町:Anchor Diver III による港湾調査	港湾調査	広瀬
2011/4/18 -4/19	宮城県南三陸町:Seamore, SARbot 港湾調査(CRASAR 協力)	港湾調査	木村, Murphy
2011/4/20 -4/22	岩手県陸前高田市:Seamore, SARbot 港湾調査(CRASAR 協力)	港湾調査	松野, Murphy
2011/6/24 -10/20	福島:Quince による原子炉建屋内情報収集, 軽作業(全 6 回)	福島原発	小柳
2011/7/28 -8/1	仙台:Quince と Pelican による全壊建物調査(ペンシルバニア大協力)	被災建物	田所, Kumar
2011/10/23 -10/25	南三陸町:Seamore, SARBOT 港湾調査(CRASAR 協力)	港湾調査	松野, Murphy

※赤字:実災害適用、緑字:対応準備開発

出所: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) 田所教授資料

## (2) ロボット投入事例

### ①福島原発への Quince 投入

福島第一原子力発電所は、東日本大震災における大津波により、未経験の原子力災害を引き起こした。Quince（開発経緯は前述）は6月に国産ロボットの1号機として現場に投入されたが、原子力災害用に開発されたものではない。但し瓦礫で埋め尽くされた被災地を走行できるのは他にないと判断され、原子力災害対応版 Quince の開発が開始された。

Quince は、高濃度の放射能の人が入れない環境下でのモニタリングロボットとして期待された。一方、原子炉建屋内の遠隔操作について以下の課題があった。

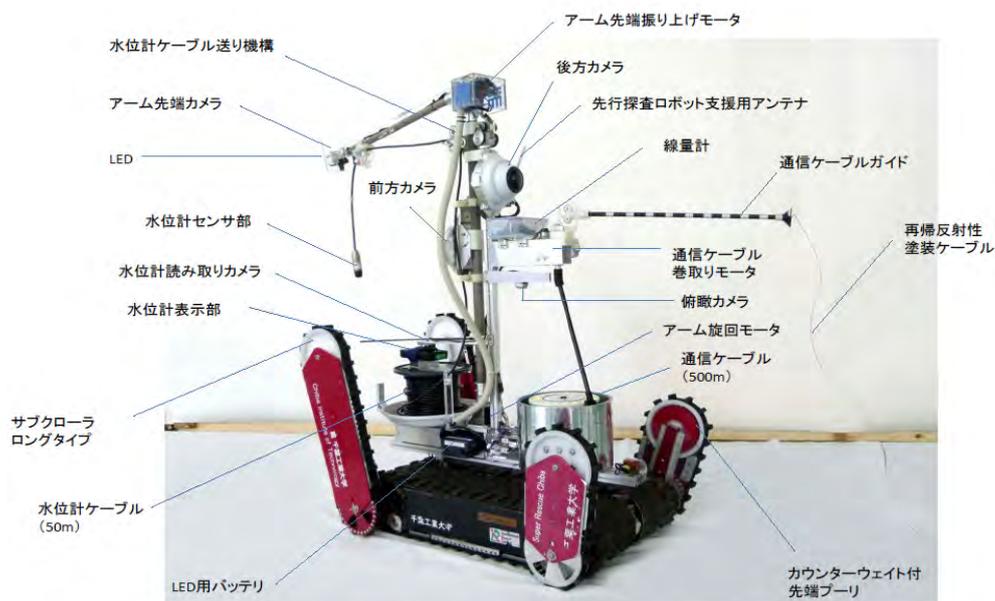
- ・ 電子部品の耐放射線特性
- ・ 遠隔通信

#### a) 福島原発対応版 Quince の開発

ロボットが活動する高線量下において、一般に遮蔽以外に被曝量を低減が難しい。小型ロボットへの遮蔽能力を取り付けは重量の増加と運動性能悪化を招き、一方で、原子炉を遮蔽する分厚いコンクリート構造は無線通信の障害となる。

これらをふまえ実施された電子デバイスの耐放射性線特性に関する実験の結果、Quince のデバイスは 200[Sv]まで耐えることが確認され、「ロボットへの遮蔽」が不要であるとされた。

写真 1-1 原発対応版 Quince



出所：千葉工業大学、東北大学、国際レスキューシステム研究機構 プロジェクトチーム「Quince による福島原発対応」（2011.6）

b) 原子炉建屋内の遠隔通信

廃炉準備中の浜岡原子力発電所 1 号原子炉建屋内での無線通信実験の結果、原子炉建屋内でのロボットの無線での遠隔操縦は不可能と判断された。このため、互いのアンテナ同士が見通せる（目視できる）範囲内での通信ができ、ロボットを目的とする場所に移動できるように、原子炉建屋内に 100～250 本のアンテナが設置された。

c) Quince 活動の主な記録

Quince の主な活動を以下に示す。

ロボット	年月日 建屋	活動
【Quince1 号機】	2011/6/24 2 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下汚染水水位センサ投入</li> <li>階段踊り場の幅が図面より狭く、通行不能により未遂</li> </ul>
【Quince1 号機】	2011/7/8 2 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>線量計測とともに 2、3 階のダストサンプリング</li> </ul>
【Quince1 号機】	2011/7/26 3 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 階でスプレー冷却系の保全状態調査</li> <li>3 階に向けて走行を試みるが、瓦礫に阻まれ走行断念</li> </ul>
【Quince1 号機】	2011/9/23 2 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 階詳細線量計測と写真撮影</li> </ul>
【Quince1 号機】	2011/9/24 3 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 階詳細線量計測と写真撮影</li> </ul>
【Quince1 号機】	2011/10/20 2 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>1～5 階の線量測定、5 階燃料プール付近の撮影</li> <li>3 階で通信ケーブル切断により帰還不能</li> </ul>
【Quince2,3 号機】	2012/2/27 2 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>1～5 階の線量測定、5 階燃料プール付近の撮影</li> </ul>
【Quince2,3 号機】	2012/3/21 2 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 号機原子炉建屋 1 階の TIP 室調査</li> </ul>
【Quince2,3 号機】	2012/5/23 3 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 号機原子炉建屋 1 階の TIP 室内環境調査</li> </ul>
【Quince2,3 号機】	2012/6/13 2 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 号機原子炉建屋 3 階～5 階の線量測定</li> </ul>
【Quince2,3 号機】	2012/7/4 1 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 号機原子炉建屋 1 階の線量測定や TIP 室内の調査</li> </ul>
【Quince2,3 号機】	2012/11/27 3 号建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 号機原子炉建屋内の PCV ガス管理システムダクトの状況確認</li> </ul>

d) まとめと課題

Quince は原子力災害対応ロボットとして開発されたものではなかったが、今回の原発事故という緊急事態への対応のため、短期間に原子力災害対応用への開発が進められた。但し以下のような課題が残されていると指摘される。

- ・ メンテナンス
- ・ 運用組織
- ・ 今後廃炉に向け 40 年以上という年月への対応
- ・ 開発資金

さらに、災害対応ロボットにおいては、想定した事態への準備とともに、想定外への対応も必要である。これに関して、法令で定めるものは全て想定内であり、必ずしも非常時に役立たないという点への対応も課題となると考えられる。

## ②水中ロボでの水中捜索

京都大学大学院工学研究科松野文俊教授（国際レスキューシステム研究機構副会長）は国際レスキューシステム研究機構とテキサス A&M 大学の CRASAR との日米合同チームを結成し、3 台の水中ロボットを運用しての調査活動が可能となった。これによる活動は以下の通り。

- ・ 2011 年 4 月 19、20 日に宮城県南三陸町佐藤仁町長の要請により、志津川漁港の復旧復興にむけた海底の瓦礫調査を実施。海水の透明度は 30－50cm と非常に悪く、ソナーセンサを使って 20cm 程度の距離にある障害物を検出し、その障害物に水中ロボット接近させカメラ映像で詳細を確認する作業を行った。調査の結果、港内には海面より目視で確認できる瓦礫以外は船の航行に障害となる瓦礫は存在せず、復旧復興に向けての情報を提供することができた。
- ・ 2011 年 4 月 21、22 日には岩手県災害対策本部からの要請で、陸前高田市で活動を行った。陸前高田市は 2011 年 4 月 20 日現在 830 名が行方不明の状態で、遺体の探索の依頼を受けた。海上保安庁と合同で遺体の探索を実施し、探索の結果遺体の発見には至らなかったが、海中の様子が明らかになった。浅瀬でも瓦礫がある海中は鋭利な突起物などがあり、さらに視界も悪いためダイバーにとって危険であり、人間にとってのリスク軽減化のために水中ロボットの活用が有効であった。また、水中ロボットの操作卓には GPS が搭載されており、水中ロボットに搭載されている高精度のソナーセンサを併用すれば、瓦礫などの位置を計測・記録でき、収集されたデータは、位置と時間をキーとした情報として地理情報システム（GIS）を用いて管理され、今後の復旧復興のために利活用される。

その後、日本科学技術振興機構（JST）の J-Rapid：震災関連研究を対象とした国際緊急共同研究・調査支援プログラム「津波被害地域での復旧復興に関するロボット技術研究と調査活動」が採択され、2011 年 10 月 23－26 日に南三陸町歌津漁協と志津川漁協の依頼を

受け、港や沖合いの海底調査を日米合同チームで行った。その活動結果は以下の通り。

- ・ 瓦礫の中でも、特にガソリンや燃料が残っている可能性がある船や車は要注意で、発見されれば GIS 上に記録するとともに、マーカーブイを取り付け、その所在を目視できるようにした。4 日間で 100 個以上の瓦礫を発見することができ、復旧復興のための情報を町と各漁協に提供した。
- ・ 2012 年 3 月 8-10 日には、フォローアップとして南三陸町を訪れており、町や歌津・志津川両漁協からはロボットによる水産資源の活用や魚場の GIS による管理などの業務で継続的な支援を依頼されている。

### ③市街地での検索（久慈市）

2011 年 3 月 11 日においては、京都大学大学院工学研究科松野文俊教授（国際レスキューシステム研究機構副会長）は米国の Disaster City において、様々な災害を模擬したフィールドに開発したロボット KOHGA3 を持ち込んでロボットの性能評価を実施し、現場のレスキュー隊員と実運用について議論していた。その実証実験も終了し、帰国の日の明け方前に日本での地震発生を知った。その後、同ロボットを用いて以下の活動を実施した。

- ・ 被災地での活動体制が整った 2011 年 3 月 18 日には八戸に入り、同日、KOHGA3 を用いて、八戸市内の天井が一部崩落した体育館での二次崩落の危険性調査と体育館内の小部屋の屋根の被害調査を実施し、危険度はそれほど高くないことを確認した。
- ・ 2011 年 3 月 19 日には久慈市に入ったが、海岸沿いにある久慈国家石油備蓄基地は壊滅状態であった。基地の隣の造船所は津波で建物の壁が破壊されており、レスキュー隊員は外から建物の内部を覗き込むように検索をしていた。ロボットによる検索活動を申し出たが、発災後 1 週間は経過し津波で全てがさらわれてしまった状況では、建物内部に生存者がいる確率はゼロに等しく、そのような場合にはレスキュー隊員でも所有者の許可無く建物の中に入ることはできないとのことであった。
- ・ その後、生存者の発見の可能性がある野田村に消防の先導で入ることができ、被災現場を一望できる現地対策本部の屋上に上がり、現地指揮隊長と相談し、ロボットを投入する建物を 2、3 選定した。但し、村側は建物の所有者の所在も分からない状況につき直ちに許可はできないとのことで、最終的にロボットの投入には至らず。

写真 1 - 2 KOHGA3



出所：京都大学 HP

#### ④海外製ロボットの福島での活動

今回の震災に伴う福島原発事故への対応においては、海外のロボットの活躍も見られた。主要なものを以下に示す。

- ・ 2011年4月10日に米国ハネウェル社の無人ヘリコプターT-HAWKが原発建屋を撮影（福島第一原子力発電所への最初の投入となった）
- ・ 2011年3月の地震直後に iRobot 社（掃除ロボット Roomba を発売している）が Packbot および Warrior の各 2 台を日本に無償で送付され、以下の活動を行ったとされる。（Packbot は 2001 年 9 月 11 日のワールドトレードセンターでの救出作業に使用され、以降、米軍がアフガニスタンやイラク、米国内の警察で使用され、25 カ国以上に輸出されている。）
  - 2011年4月1日に福島第一原子力発電所3号機建屋脇の撮影に Packbot 投入。
  - 2011年4月17日11時半から14時まで、Packbot2台（放射線対策未実施）が無線操作で、同3号機建屋にて線量等の測定ならびに撮影、1号機建屋でも16時から17時半まで同様の作業を実施。
  - 2011年4月18日13時42分から14時33分まで2号機建屋にて作業実施。

写真1-3 iRobot社サイトによる Packbot (上) と Warrior (下) の外観イメージ



出所：iRobot HP

### (3) 現状と課題のまとめ

これまで見てきた通り、東日本大震災および福島第一原子力発電所事故に関しては、災害対応ロボットの活用が複数見られ、一定の成果を上げている。NEDO によるプロジェクトで開発された **Quince** が、その高い性能を活かして福島第一原子力発電所建屋内の調査に貢献できたように、我が国としての技術開発の取り組みは、一定の成果を上げたと言える。

しかしながら、日本製のロボットの投入が遅れたこと、過去に開発され本来活用可能であったはずのロボットが活用できなかったことなど、運用体制面の未整備が課題となった。

また、原子炉建屋内を遠隔操作する際、遠隔通信やロボットに搭載されている電子部品の耐放射線特性などが課題となるなど、実運用に際しては様々な技術課題が発生した。これらに対して開発者の協力により迅速な改良の取り組みが行われたが、こうした改良も含む運用を担える組織があれば、より効率的な改良・投入が可能であったと見られる。

そもそも、実運用を考えた場合にはロボットの能力がユーザの求めるレベルに対して決定的に不足しているとの指摘もある。たとえば、最も成熟した特殊環境用ロボットシステムの1つである無人陸上車両 (UGV、Unmanned Ground Vehicle) であっても、状況認知の不足から人間がその場に行くよりも遥かに限定的な機能しか担えない。また、ハードウェアとしては比較的完成された部類に入る壁登りロボットも、平面の部分しか登れないため、調査が必要なエリアすべてを調べることはできない。

こうした技術課題は、実運用あるいはそれに近い環境での実証があつてこそ明確化される。技術開発だけでなく評価・実証フィールドの整備や運用体制の構築を進めることの重要性が改めて指摘できる。

#### 1-1-4 平常時におけるメンテナンス等のための特殊環境用ロボットの活用ニーズ

##### (1) 平常時における災害対応ロボット活用の考え方

有事を想定した、災害対応ロボットの開発と運用システムの充実が望まれる。

しかし、いつ起こるかわからない有事のためだけに研究開発するには費用対効果の面で進展しにくい。特に、財政が非常に厳しい昨今の状況の中で、有事のためだけに研究開発や実用化・整備を推進することは難しいと考えられる。

一方、平時においても事故は存在し、この対策のためのロボットへのニーズはある。更に、製油プラントや建設設備、ライフライン等のインフラの老朽化が進んでおり、メンテナンスロボットへのニーズもある。

これらを踏まえて、平時ではメンテナンスロボット、有事では災害対応ロボットとして活用可能なロボットの研究開発を目指すことで、費用対効果を高めることが可能となり、国等の公的資金によるだけでなく民間資金も活用した開発の促進が期待される。

##### (2) メンテナンス等のためのロボット活用ニーズ

日本国内における産業の根幹を支える素材産業やエネルギー産業など、基盤的な産業分野における技術・マーケットの成熟化が進行しており、国内において、設備のスクラップ&ビルドを期待することは難しいと見られる。このような状況では、我が国の高度な操業技術とメンテナンス技術で既存設備の劣化を防止し、かつ効率的で長期に稼働させることが重要な課題となると考えられる。

これに関する代表的な産業施設である石油精製・石油コンビナートについてみると、その設備能力と稼働の実態は以下の図表に示す通りである。

図表 1-8 原油処理能力と稼働率の推移



出所：石油連盟 HP

我が国では、震災の影響等で、電力供給源を原子力より火力に切り替えており、石油等に依存する割合が9割以上と極めて高い。石油・科学コンビナートは、設備更新ができない中で稼働率が80%程度に高まっており、早急に適切な計画のもと、設備の維持・メンテナンスを行わなければならない状況となっている。

このような日本のものづくりの基盤的な産業が何らかの不具合等で停止してしまうと、他産業への影響力は計り知れないと危惧される。また、石油・科学コンビナートは全国的に展開されているため、局所的な対応をするのではなく日本全国レベルでの対応が求められる。

また、平時の危険物を扱う事業者は常に事故と背中合わせで、その影響は作業員だけでなく周辺住民まで及ぶことが想定される。そのため石油プラントなど、「予防対策として未然に事故を防ぐ」という考え方が重要である。但し、用地の制約から新設工場を建てるのが難しく、また、メンテナンスのために生産を止めることによる非効率も望ましくない。これに対して、既存の設備を運転しつつ最大限利用しつつ余寿命を延ばすための対策（メンテナンス）を行うことが望まれる。

そのための具体的な対策としては、以下のような手順・手段が考えられる。

- |                                    |
|------------------------------------|
| a. プラントの稼働状況確認（ロボットモニタリングやセンシングより） |
| ↓                                  |
| b. モニタリング等のデータ分析より余寿命予測            |
| ↓                                  |
| c. 危険部位の明確化                        |
| ↓                                  |
| d. 効率的なメンテナンス（機能延長対策や交換）           |

ここで上げられるロボットキーテクノロジーとしては、①移動機能、②モニタリング、センシング機能、③補修や部品交換等作業がある。

特に、設計上耐久年数を超えた設備等については、経済性を考慮し、生産設備の総入れ替え等急激な対策ではなく、現存する生産設備の寿命を延ばしつつ、適切な設備のメンテナンスを行いつつ、同時に新たな設備への移行を図っていくことが必要となる。このための予防保全技術を、日本のものづくりを支える基盤的な技術として確立していくことが望まれる。

コンビナートにおけるメンテナンスでは、以下図表のような省力化ニーズが見られる。このアンケートは、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」における調査専門委員会の委員が所属する団体（財団法人エンジニアリング振興協会（現：一般財団法人エンジニアリング協会）、石油化学工業協会、日本メンテナンス工業会、）の関連企業を対象としたものである。また、必要度は、同委員会の委員をはじめとする専門家の主観評価に基づくものである。

図表1-9 コンビナートメンテナンス作業の省力化ニーズアンケート結果集約表

区分	No.	項目	補足	作業区分		防爆	貢献				必要度	
				作業中	休止中		品質	効率	安全	省力		
検査 測定 診断	1	貯槽(含煙突)の板厚計測	スティフナやガーダ回避。落下防止		○	○	○	○	○	○	○	
	2	貯槽スラッジ測定	油中、防爆。自律遠隔	○	○	○	○	○	○	○	◎	
	3	マイクロ目視検査ロボット(遠隔)	遠隔内部検査。位置検出機能。防塵・防水			○	○	○			◎	
	4	埋設配管の内外面目視検査	掘削せずに検査できる技術	○		○	○				◎	
	5	海底配管のコーティング目視、減肉検査と補修	ガスフリー状態で遠隔操作		○	○	○		○		◎	
	6	断熱機器などの腐食、減肉検査	断熱材を取り除かないで高精度検査		○	○	○				◎	
	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	機械化による作業時間短縮		○		○				○	
	広域	9	広域設備異常点検、診断	広域自動点検(画像処理)	○		○	○				◎
		10	巡回パトロールの高度化	広範囲監視エリア。エキスパート認識、判断機能	○		○	○				○
		11	ヘリコプターによる目視検査	操縦安定性・接触回避・故障時着陸など			○	○				◎
	安全	12	有毒ガス検知	フィルター代えるだけで有毒ガス検知	○	○	○			○		○
13		窒素雰囲気での固着触媒抜き取り作業	セラミックボールと触媒の分離などの作業有り		○	○		○	○	○	◎	
作業	バルブ	14	バルブ弁座補修	オーバーホール時の弁座自動補修		○	○	○	○		○	
	回転機	15	回転機芯だし	修正値の自動割り出し、記録、保管機能。簡易に		○	○	○			○	
	ボルトナット 締め・緩め	16	大型サイズ、フランジ締め付けボルト・ナット締緩作業	軸力検出、小型軽量、電動式、高温対応	○	○	○	○	○		○	◎
		17	ハンマー作業	安価、簡易、可搬、安全打撃機能	○	○	○		○		○	○
	フランジ	18	フランジ開放	コンパクト・ハンディタイプ、流化水素噴出可能性場所		○	○		○		○	
	洗浄・清掃	19	高圧水洗浄の遠隔化	自動運転、監視		○		○	○	○	○	◎
		20	熱交換器チューブの高圧水洗浄	機械化による作業時間短縮		○		○	○	○	○	◎
		21	貯槽の内部清掃	油分処理。保護具なしで入槽できる		○	○	○	○	○	○	◎
	溶接	22	減肉部のオーバーレイ溶接	連続溶接と内面形状へのポジショニング(公開否)		○		○				○
		23	現場溶接自動化(配管)	高精度、高品質自動溶接		○		○				○
24		高所の肉盛り溶接	下地処理、溶接、仕上げ作業。高信頼性		○		○		○		○	
塗装	25	塗装作業	ケレン、塗装の自動施工	○	○			○	○	○	○	
	26	高所塗装	下地処理、塗装作業	○		○	○	○	○	○	◎	
電気 計装	27	低圧モータの絶縁診断	活線下で単線毎に連続絶縁測定、傾向管理、メンテ予測	○			○	○			◎	
	28	計器の校正	試験器に自動データ収集し、出力する		○			○			○	
	29	電磁流量計の校正	簡易型(現場式)で自動計測		○			○			○	
ボイラ	検査	30	水管壁の肉厚測定	ダスト除去後自動肉厚計測。自動位置設定。粉塵環境		○		○	○	○	○	
	清掃	31	水管壁ダスト除去、清掃を遠隔自動施工	強固な付着ダスト除去。自動位置設定。粉塵環境		○		○	○	○	○	
全般	作業足場	32	高所、狭隘部などの足場組立ロボット	自動足場組立	○	○			○	○	◎	
		33	仮設昇降設備	簡易、簡単に設置	○	○			○		○	
	中重量品取扱	34	中重量品(80kgのイメージ)の取扱	簡易、可搬	○	○			○	○	○	
防災	火災対応	35	消火作業	耐熱性能あり、自走して映像、放水機能など	※火災時						◎	
操業	ハンドリング	1	ペレット、フィルムの取扱自動化	からくり的発想で作業負担を軽減	○	○	○	○	○			
		2	フレコンバック充填作業の自動化	ホッパーよりフレコンバック	○		○	○	○		○	
		3	ホッパーへの樹脂投入自動化	25KG程度の紙袋より	○		○	○	○		○	

出所：日本ロボット工業会 H20 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

表による調査結果を見ると、技術的にもかなり広い範囲で作業の自動化やロボットが期待されていることがわかる。(おそらく、実際には多くの目的で、自動化、遠隔制御化等による省力化が検討され、一部は実施されていると考えられる。)

なお、この表に掲げられた作業の種類は多岐にわたっており、これに対応するロボット技術は、各々、個別の作業目的や環境条件に適して働くことが求められる。これに対して、汎用のロボットの機器による対応も考えられるが、むしろ、個別の作業を完遂するロボット、あるいは自動化機器を丁寧に作ることの必要性が明らかとなっている。

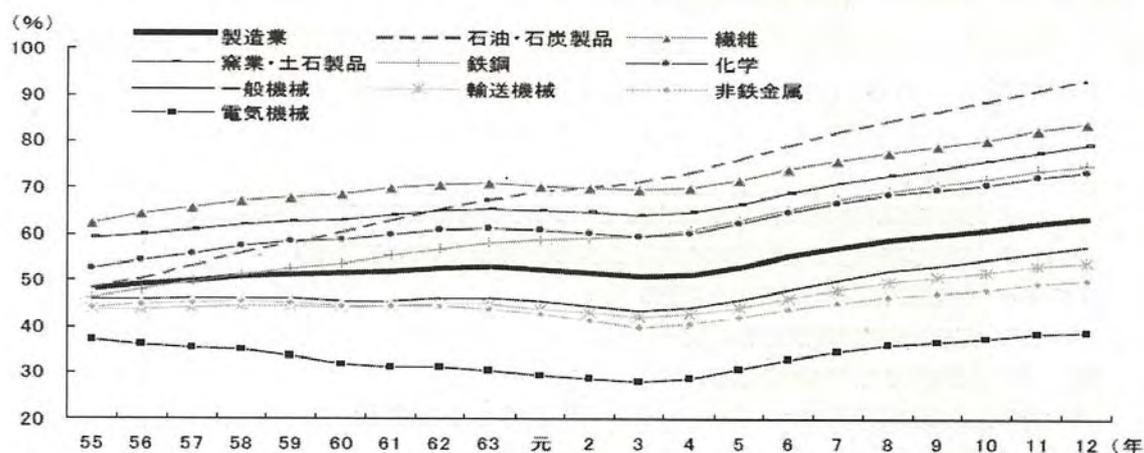
またこれらの作業を実現する上で必要に応じて開発されるであろう要素技術についても、かなりの共通性が見受けられるが、実際に働かせて見なければ解らないことも多く、汎用化の視点より、むしろ個々の作業をしっかりと達成することを重視する視点が不可欠であると考えられる。

### (3) プラント・設備のビンテージをふまえたニーズの優先度

ここでメンテナンスロボット活用の優先度を検討してみる。

各業種のプラント・設備の老朽化を示す指標である「ビンテージ」(設備の平均年齢：ここの指標は産業・設備毎に平均値で除した比による。)の動向について見た。

図表 1-10 業種別ビンテージ



資料:「国富調査」(経済企画庁)、「民間企業資本ストック統計」(内閣府)

出所:日機連、ロボット工業会「平成 20 年度石油化学コンビナートメンテナンス作業への RT 適用に関するニーズ調査報告書」

これを見ると、ビンテージの高い業種として、石油・石炭製品、繊維、窯業・土石製品、鉄鋼・化学分野となっており、主に石油化学系であり、逆に低い業種は、電気機械、非鉄金属、輸送機械、一般機械で主に加工組立産業系である。

従って、メンテナンスに対するロボット活用の優先度は、プラント・エンジニアリング

系の業種で高いと考えることができる。

(4) 平時のメンテナンスに関わる主要業種の RT ニーズの整理

特殊環境用ロボットは、平時（事前）の対策としてのメンテナンス等と有事（事後）の対策としての事故後の即時状況把握、対策分析、マッピング、復旧作業等の2つの視点で考えるべきである。

NEDO「機械システム分野に関する戦略策定調査」（H23 年度）では、建設、鉄鋼、石油化学等の分野の有識者からなる委員会を開催し、各産業分野でロボット技術の有効活用視点で検討した。

各産業におけるニーズを分類した結果を以下図表に示した。全ての産業において必要とされる「共通基盤としてのニーズ」と業界毎に必要な「用途特化のニーズ」の2つに区分することができる。これに対する技術開発等の方向性としては、我が国の産業全体に寄与する「共通基盤としてのニーズ」に関して国が支援し、「用途特化のニーズ」に関しては各々の産業に任せることが望ましいと考えられる。

図表 1-1-1 RTニーズ作業分類

業界	ニーズ	ニーズの類型化				
		高所	狭隘	ビジョン・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	<ul style="list-style-type: none"> <li>埋設配管の点検・損耗調査</li> <li>高所構造物の点検・残厚計測・軽補修</li> <li>可燃性ガス等環境の点検</li> <li>湾岸岸壁構造物の点検</li> <li>落下物危険エリアの点検保守作業</li> <li>爆発事故の事後迅速処理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁面移動</li> <li>空中移動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型・瘦身構造の設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>光学・非光学センサ</li> <li>落下物回避システム</li> <li>光学フィルタリク技術</li> <li>視覚センサ</li> <li>触覚センサ</li> <li>嗅覚センサ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高温鉄鋼材等環境下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁面移動</li> <li>空中移動</li> <li>水中移動</li> <li>表面清掃機能</li> <li>多方向対応マニピュレータ</li> <li>防塵・防水マニピュレータ</li> </ul>
建設系	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物(ビル、橋梁、トンネル等)の老朽化の調査</li> <li>アスベストの検査・除去</li> <li>危険ガスが充滿する環境内での作業員救助・現場復旧</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁面移動</li> <li>空中移動</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>視覚センサ</li> <li>触覚センサ</li> <li>嗅覚センサ</li> <li>ガス検知センサ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガス環境</li> <li>有害液体環境下</li> <li>アスベスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁面移動</li> <li>空中移動</li> <li>表面清掃機能</li> </ul>
ライフライン系	<ul style="list-style-type: none"> <li>高圧電線の保守点検及び修復</li> <li>橋梁に係るガス配管の外形検査及び捕集</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高度橋梁</li> <li>配管・壁面移動</li> <li>空中移動</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>視覚センサ</li> <li>触覚センサ</li> <li>嗅覚センサ</li> <li>ガス検知センサ</li> <li>電力センサ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高圧電流</li> <li>ガス環境</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁面移動</li> <li>空中移動</li> <li>表面清掃機能</li> </ul>
メーカー系	<ul style="list-style-type: none"> <li>自動車:安全装置の誤動作(電磁波)等の調査分析</li> <li>農機具:広大な面積での信頼性の確保</li> <li>半導体:半導体製造過程で生じる有害物質</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>微細製造工程における保守対応超小型設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>視覚センサ</li> </ul>		

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

## (5) メンテナンスへのロボット活用事例

### ①管内走行ロボット

現在、大がかりなものでは国をまたがる石油や天然ガスのパイプライン、発電所や化学プラントなどでの配管設備、身近なところでは上下水道や都市ガスなどの生活の様々な場所に配管が使用されている。

その検査は、安全性を確保するために非常に重要である。しかし、現在のところ、ほとんどの場合、人間が配管外部より目視や打診検査などで行っており、長距離にわたって設置されている配管をくまなく検査することは大変な作業である。また、ガス管などの配管は、複雑に入り組んでいたり、地中に埋設されていたりしている場合が多く、その長さは膨大である。

一般に配管の外側にはバルブ、T字形配管接合部、フランジなどの障害物が存在し、これらの障害物を回避しながら、何らかの軌道（レールやガイド）の設置なくして無軌道で配管外部から検査を行う自律移動型配管検査ロボットは既に20年以上前から開発されている。

ガス管などの地中埋設管は配管外部からの検査のために、配管を掘り起こす必要がある。そのため、配管を内部から検査することができる、管内走行ロボットの開発が行われてきた。

管内走行ロボットの移動方式には、以下のように分類される。（なお、管内という移動環境は、JISによれば、管路方向の線的拘束に分類されるが、ロボットと管径との相対的な大きさにより、管路方向に直角な、円周方向移動も発生することもある。）

管内走行ロボットの移動方式

非自走式移動	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 流体圧走式</li><li>・ 牽引式</li><li>・ 押し込み式</li></ul>
自走式移動	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 専用レール走行式</li><li>・ 車輪式</li><li>・ クローラ式</li><li>・ 尺取り虫式</li><li>・ 蠕動式</li></ul>

以下では自走式移動型のロボットに着目し、主な事例を示した。

#### 【自走式移動ロボット】

##### a) 微粉炭管の内面検査ロボット

中部電力(株)の電力技術研究所エネルギーG 機械チームが開発した微粉炭管の検査ロ

ボットは、火力発電所の微粉炭輸送管を検査対象とする管内走行ロボットである。微粉炭輸送管の内面は微粉炭によって磨耗する。このロボットは、摩擦による減肉を調べるための肉厚測定機構を備えている。

走行はマグネット車輪吸着自走式で、配管径 450～700φの磁性材配管中を直線部・曲がり部・水平部・傾斜部を走行できる。

写真 1-4 微粉炭等輸送配管内面検査システム  
(中部電力(株)、(株)日東工業との共同開発品)



出所：新日本非破壊検査 HP

#### b) 自走式配管検査カメラロボット

高菱エンジニアリング(株)が開発した自走式配管検査カメラロボットは、管径 200～600mm のガス管などでの鋼管溶接を検査対象とする自走式配管検査カメラロボットである。管壁への付勢により姿勢を維持し、3 輪独立駆動により垂直管、エルボ管の走行が可能である。搭載する検査カメラで、配管奥部の溶接部の点検や異物、損傷、脱落等の不具合の目視検査を行う。

#### c) 自走式配管内面溶接部検査ロボット

(株)CXR が大阪ガス(株)と共同で開発した自走式配管内面溶接部検査ロボットは、管径 150mm～200mm と 300mm～400mm 用の検査ロボットで、管径方向に 3 方向に突っ張る 3 軸の駆動車輪を有する走行部とその前方に設置した検査部から成り、最大 100m の長さの管を検査できる。このロボットは、新設配管の溶接部のくぼみや、とけ込み不足などを配管内面の減肉部の深さと大きさをレーザ光と TV カメラにより検査する。

#### d) 配管内検査ロボット

新日本非破壊検査(株)が(財)北九州産業技術推進機構の「新産業創出プロジェクト」の一環として開発したエルボマスターは、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、カメラの画像で配管内を観察することができる。くの字形の突っ張り機構を採用し

たゴム製車輪で、鋼管だけでなくステンレス鋼管、樹脂管にも対応できる。また、管径は 350mm～600mm の連続的変化に対応でき、エルボ部における走行および回転も可能である。90° 可動のステアリング機構による、その場回転、らせん走行で障害物を回避しながらの走行が可能である。2009 国際ロボット展でデモを行っていた。

写真 1-5 新日本非破壊検査(株)「エルボマスター」



出所：新日本非破壊検査 HP

## ②管路点検用水中ロボット

「管路点検用水中ロボット」は、管路の内部を点検する水中ロボットである。

使用例としては、三井造船(株)のものでは、火力発電所の冷却海水用収・放水路および揚水発電所の水圧管路での運用が見られる。

日本国内の管路や水路としては水道管、下水道管、農業用水路、それに工業用水路等があり、水道管は 60 万 km、農業用水路は 40 万 km ともいわれ、一般国道の総延長距離(2.2 万 km)よりも長いとされ、管路点検用水中ロボットの活用範囲は大きいと見られる。

管路点検用水中ロボットは、大きく以下のように分類できる。

### a) 勾配を利用した管路で使用する水中ロボット

勾配を利用した管路は、一般的に管路の出入り口が大気に開放されており、小型水中ロボットが使用できる。但し、以下の制約条件がある。

- ・ 投入口の寸法：φ 60cm 以上
- ・ 流速：0.2m/s 以下
- ・ 管路の断面形状 φ 80cm 以上

この制約条件を満たせば、1200m の水中ケーブルを水中ロボットに装着して、管路内を点検できる(ただし、管路が曲がっている場合や上流にさかのぼる場合は、点検距離は 800m 以下になることもある)。

管路は左右の曲がりのほかに、上下の曲がりのあるサイホン管といわれるものがある。サイホン管の断面形状が大きい(数 m 以上)場合、ヘリコプターのように管内を上下左右に動きまわるタイプ的水中ロボットも使用できるが、管路の断面形状が小さい場合は、

管軸に並行して直線的に高速移動するタイプの中水ロボットが使用される。

写真 1 - 6 三井造船株式会社「RTV-100MK II」



出所：三井造船 HP

b) 水道管等の圧力水管で使用する水中ロボット

水道管などの圧力水管は、水圧のため、管路の途中に小さな空気弁、消火弁程度しか設置されていない。また、水道管などは一般的には水が常に流れている。従って水中ロボットを圧力水管に投入するためには、水中ロボットは超小型とし、かつ空気弁を開けても水が噴き出ない装置が必要となってくる。

三井造船株式会社により、水道管などの圧力水管に投入できる管路点検ロボットと、水が噴き出ない装置（不断水挿入装置）が開発されている。この管路点検ロボットの概要を以下に示す。

- $\phi 500\text{mm}$  以上の管で有効内径が  $75\text{mm}$  以上の空気弁があれば圧力水管に挿入可能
- 流速  $2.0\text{m/s}$  以下、圧力  $1\text{MPa}$  の圧力水管内を点検できる。
- 不断水状態（水が流れている状態）で  $300\text{m}$ 、断水状態でも  $50\text{m}$  以上の管路点検ができる。
- 管の断面寸法は水道水であれば  $1\text{m}$  離れていても壁面調査が可能（水の濁度による）。

写真 1 - 7 三井造船㈱「Pipescope-500」



出所：三井造船 HP

三井造船による、水中ロボットでの水中心検実績を下図表に示す。

図表 1 - 1 2 点検調査の実績

(1985年から2009年3月末まで)

番号	主な点検調査対象	調査件数
1	電力会社ほかダム関連（取水路、放水路、スクリーン、提体、湖底など）	200
2	発電所ほか設備、構造物（管路点検）	280
3	発電所ほか管路点検以外の設備、構造物（タンク、水圧鉄管、護岸など）	90
4	各種海洋関連の点検調査（海洋構造物、生物、海底ケーブルほか）	128

出所：野口正男「管路点検用水中ロボット」（ロボット No.193）

### ③鋼板厚さ測定ロボット

火力発電所や原子力発電所の各種の鋼板製設備の健全性確認のため、定期的な鋼板の厚さ測定（非破壊検査手法の1つである超音波厚さ測定法による）が行われている。この際、測定効率向上と安全性確保を目的としたロボットの活用事例が見られる。

#### a) 煙突点検ロボット

発電所の鋼板製煙突（高さ 180m 程度）筒身の鋼板厚さ測定は、これまで、検査員がゴンドラに搭乗して実施されてきたが、測定範囲が限られるという問題があった。これに対して、より多くの測定データ採取のため、東電工業㈱は以下のロボット開発

を進めて来た。

- 初代煙突点検ロボット「えんとつ君」：「永久磁石車輪 8 輪で筒身に吸着し、走行しながら鋼板厚さを行うロボット。
- 2 代目のロボット「のりこえ君」：初代機が座屈防止用の補強リブ及び建設時に利用したジャッキアップリングが取り付けられている煙突筒身では測定ができなかったことに対応する開発。(下写真)
- 3 代目のロボット「多目的鋼板厚さ測定ロボット」：初代、2 代目煙突点検ロボットは線状に厚さ測定を行うものであったのに対し、同ロボットでは 100mm 幅の面状測定を可能とした。さらに、煙突点検以外の鋼製設備（構造物）に対する測定も考慮し、旋回性能等を向上。

写真 1 - 8 東電工業 段差乗り越え機能付き煙突点検ロボット

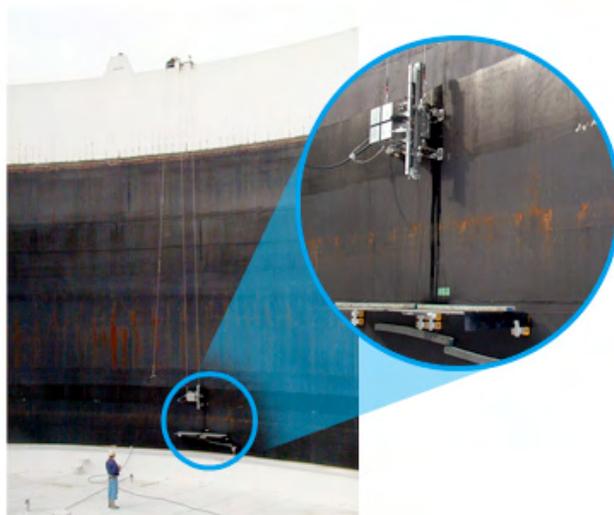


出所：東電工業 HP

#### b) 鋼板厚さ測定ロボットシステム

発電所の燃料タンクは、貯蔵燃料油の粘性調整のため常時加温されており、このために側板全面に保温材が取付けられている。側板の健全性を調査するために、これまでは定期点検時に、タンク全周に足場を設置し、保温材を取外しての外面からの目視検査が行われてきた。これに対し、東電工業(株)による、燃料タンク内面からの鋼板の厚さ測定を行う鋼板厚さ測定ロボット（システム）の開発例が見られる。(下写真)

写真1-9 東電工業 多目的鋼板厚さ測定ロボット



出所：東電工業 HP

鋼板厚さ測定ロボットシステムは以下の概要は以下の通り。

- ・ タンク浮き屋根上に制御器、測定器類を設置
- ・ 鋼板厚さ測定ロボットがマグネット車輪で側板に吸着し、自走して測定箇所へ移動
- ・ 測定はタンク水平に移動しながら行う
- ・ 垂直方向への移動も可能

このようなロボット類の開発・活用により、一部の火力および原子力発電所において、鋼板設備の測定の効率で安全性が向上したと見られる。

#### ④タイル診断ロボット

タイル診断ロボットは、タイル劣化状況が無足場で観察・収集するために開発した外壁タイル診断支援ロボットである。

現在のタイル診断ロボットは、過去の教訓を活かし使用者の立場から徹底的に要求仕様をそぎ落として開発された。特に、診断作業をロボットと遠隔操作の複合システムと捉え、最適な自動化と高い実用性を第一の目標としている。

用途については、部分診断用の検査ツールとして、主に比較的簡易な検査を対象としている（従来は、主に在来工法が困難な特殊物件への対応に特化していた）。

外観および諸元を以下写真、図表にそれぞれ示した。

写真 1-10 東急建設(株) タイル診断ロボット



出所：東急建設 HP

図表 1-12 タイル診断ロボットの諸元

重量	21kg (本体のみ)
寸法	W980mm×H1050mm×D650mm
診断幅	横 700mm×縦 450mm
診断速度	35~40 m <sup>2</sup> /h (標準)
適用高さ	42m (実績値)

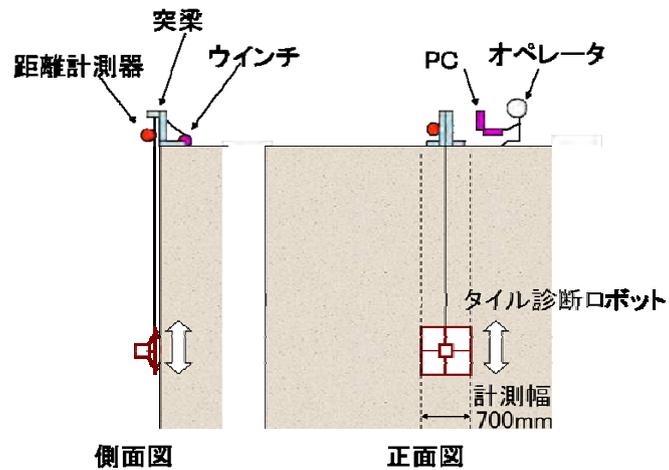
出所：遠藤健「タイル診断ロボットの開発と適用事例」(ロボット No.193)

全体が遮光用カバーで覆われ、以下のものを配置・装備している。

- ・ 遠隔操作式の一眼レフカメラ (本体中央)
- ・ 撮影用の照明 (カメラ周囲)
- ・ 浮き診断用の打撃装置 (カメラの前下方)
- ・ 壁面との離隔を保ち、窓などの障害物を乗り越える櫓 (本体両脇)
- ・ 状況確認と記録用のビデオカメラやマイクロフォンなどの映像・音声収録機器
- ・ 電源、制御回路等

また、図表にロボットシステムの機器配置図を示した。

図表 1 - 1 3 タイル診断ロボットの機器配置図



出所：東急建設 HP

#### ⑤道路・橋梁等の保全作業ロボット

現在、我が国の橋梁ストックの累計は 15 万橋（橋長 15m 以上）に達し、そのうち高度成長期（1955～73 年）に建設されたものは全体の 34% を占めるとされる。橋梁寿命は通常 100 年と言われ、これらの建設後 40～50 年を経過した橋梁の本格的なケアが必要な時期に達していると考えられる。これに対して、財政的制約が厳しい中、これらの高齢化橋梁のケアをロボットを活用することにより効率的に行い、LLC（ライフサイクルコスト）の抑制していくことが求められる。

これに関して、以下の事例が見られる。

##### a) 主塔点検修理用ロボット

吊橋の主塔は防錆のために塗装が施されているが、塗膜が劣化するため定期的な点検やタッチアップ塗装が必要になる。これを行うため、従来は、接近手段としてゴンドラや吊り足場が利用されるが、風などにより墜落の危険性と、下方に大掛かりな防護設備を要することが問題となる。

本四架橋ではこれに対応するものとして、高所主塔壁面の任意位置に移動して点検とタッチアップ塗装を行う点検補修ロボットが開発された。同ロボットは、以下で構成される。

- ・ 磁石車輪による吸着移動装置
- ・ TV カメラ
- ・ ケレンユニット

- ・ 塗装装置を装備したマニピュレータ

これまで、高所壁面移動ロボットは吸盤式などの数タイプが開発されてきたが、何れも平滑面を対象とし、主塔の添接ボルトなどの段差を乗り越えることが難しかった。これに対し、磁石車輪が試行錯誤を重ねて開発された。同ロボットの磁石車輪は 3 輪合計で吸着力が 7.5KN あり、150kg の機体を平面に吸着保持し、ステアリング機能により自在に移動可能であり、また段差 40mm までの添接部の乗り越えも可能である。

ここで開発された磁石車輪は b) で後述する磁石車輪ゴンドラに取り代わられた。しかし壁面保持・吸着移動の技術は、その後、c) で後述する本四架橋での海中橋脚ケレン作業ロボットや、本四架橋以外では、球形タンクや急傾斜管路などにおける機体の重要な移動保持技術に応用されている。

#### b) 塗装ロボット

本四架橋では箱桁用と主塔用の塗装ロボットが開発されている。

従来の架橋塗装で用いられる人手による刷毛塗り工法は機械化が難しく、新たにロール塗装（塗料供給と塗装を行う 2 本のローラで構成された塗装方式）の技術が先行して開発された。

塗装装置全体としては一種のマニピュレータであり、これを箱桁の場合は既設の常設式移動足場に、また主塔では仮設式の磁石車輪ゴンドラに搭載したのもで、以下の機能を持つ。

- ・ 移動式プラットフォームの移動機能と塗装装置自体の動作及びマニピュレータ機能の複合により、自動塗装を実現
- ・ 塗装の前工程である素地調整は塗装ユニットと取付互換性を備えたロールブラシによる 4 種ケレンが可能
- ・ 研掃粉塵は集塵機で捕捉して飛散防止

同ロボットの導入によりケレン・塗装共、施工能力は人力の 10 倍、500 m<sup>2</sup>/日以上が確保され、経済性・安全性の向上と省力化が実現している。

写真 1-1-1 (株)技術開発研究所 壁面塗装ロボット



出所：技術開発研究所 HP

c) 海中橋脚ケレン作業ロボット

本四架橋の海中橋脚の防食に用いられる電着工法は、前処理として壁面に付着した海生生物や黒錆の除去が必要であり、この作業をロボット化するための水中ケレンロボットが開発された。同ロボットは以下の機能を有する。

- ・ 壁面に吸着保持して移動する技術は前記 a)の主塔点検補修ロボットの磁石吸着車輪を応用
- ・ 永久磁石と駆動モータを内蔵する磁石車輪が4輪合計18kNの力で凹凸障害物の点在する壁面に吸着、壁面を自在に移動
- ・ 機体前方のアブレイシブジェットにより素地調整を行う

従来のダイバー作業は大水深、大潮流等による危険性が問題であった。本ロボットの導入により、施工能率はダイバー工法の10倍以上になり、経済性、施工品質と共に海中作業の安全性が飛躍的に向上したとされる。

1-1-5 我が国の政策における特殊環境用ロボットの位置付けと課題

(1) 防災政策における位置付け

① 中央防災会議における我が国の防災政策に関する議論<sup>1</sup>

我が国は地震や火山活動が多く災害が発生しやすい国土であり、様々な災害を経験しながら、防災の法制度と体制を整備してきた。我が国における防災対策は、国レベルから自治体レベルまで、以下のような体制で取り組まれている。内閣府の中央防災会議は、防災基本計画の作成や、防災に関する重要事項の審議等を行う会議であり、我が国の防災政策の全体方針が検討される場である。自治体は、中央防災会議の方針に則って、地域の防災を担っている。

なお、防災に係る機器やシステムは、基本的には地域の防災を担う自治体によって導入・配備されるものであるが、「全国瞬時警報システム (J-ALERT)」が総務省消防庁主導で導入されたように、我が国全体として整備が必要な機器やシステムについては、中央防災会議がとりまとめた方向性に従って所管省庁が政策を推進することで、予算措置とともに整備が進められてきた。

図表 1-1-4 我が国の防災政策の検討体制



出所：「わが国の災害対策」（内閣府）

<sup>1</sup> 「わが国の災害対策」（内閣府） <http://www.bousai.go.jp/panf/saigaipanf.pdf>

平成 23 年 10 月 11 日に、中央防災会議の専門調査会として防災対策推進検討会議が設置された。東日本大震災における政府の対応を検証し、同大震災の教訓の総括を行うとともに、首都直下地震や東海・東南海・南海地震（いわゆる「三連動地震」）等の大規模災害や頻発する豪雨災害に備え、防災対策の充実・強化を図るための調査審議を行うものであり、その結果として平成 24 年 7 月 31 日に最終報告（防災対策推進検討会議最終報告～ゆるぎない日本の再構築を目指して～）を取りまとめている<sup>2</sup>。

同報告は今後の我が国の防災に係る方針を示したものであり、基本姿勢として以下が提示されている。

【災害対策に取り組む基本姿勢 ～災害に強くしなやかな社会の構築のために～】

1. 災害から国民を守り、国を守ることは政治の究極の責任である
2. 「国難」ともいふべき大規模災害を意識する
3. 「防災の主流化」を通じ、可能な限りの備えを怠らない
4. 災害発生時、官民が連携し資源の大量・集中投入を行う
5. 被災を地域社会再構築への希望に変えていく
6. 防災こそ我が国再生のフロンティアである
7. 「防災先進国日本」を世界に発信する

「防災の主流化」は、『国難に立ち向かうためにはあらゆる行政分野について「防災」の観点から総点検を行い、必要な資源を割り当てる』などのことであり、平時から防災を念頭に置いたインフラ・システム・体制を構築していくことが求められている。災害対応ロボットの議論においても、平時からの運用、それによる平時・有事の連続性が議論のポイントの1つとなっており、同様の方向性と言える。

また、「防災こそ我が国再生のフロンティアである」は、我が国の経済低迷や閉塞感の高まりの中で東日本大震災が起きたことを背景に、危機を乗り越え、我が国の再生へとつなげる姿勢が示されている。『防災の裾野は広い』ことが指摘されており、『新たな技術革新で生まれた最先端の技術や装置も、防災の分野で試され、活用される』ことが指摘されている。例として、スーパーコンピュータ「京」を用いた地震・津波の予測精度の高度化や人工衛星等宇宙への挑戦、ICT を活用した被災者の生活再建支援が挙げられているが、ロボット技術についても同様の視点に位置付けられるものと言える。

さらに、「防災先進国日本」として、『教訓、技術・ノウハウ、体制・制度、草の根からの取組姿勢など』を世界に向けて展開していくことの重要性が示されている。ロボット技術に蓄積を有する我が国として、技術を活用する体制・制度とともに海外に展開していくことの重要性が窺える。

<sup>2</sup> 「防災対策推進検討会議について」（内閣府）  
<http://www.bousai.go.jp/chubou/suishinkaigi/index.html>

また、同報告では、今後重点的に取り組むべき事項として以下が挙げられている。

【今後重点的に取り組むべき事項 ～防災政策の基本原則を踏まえて～】

- ・ 災害から生命を守り、被災者の暮らしを支え・再生する取組
  - ▶ 災害から生命を守るための初動対応
  - ▶ 被災者の避難生活や生活再建に対するきめ細かな支援
  - ▶ ライフライン等の被害からの早期回復
- ・ 災害発生時対応に向けた備えの強化
  - ▶ 災害即応体制の充実・強化
  - ▶ 自然災害による国家的な「緊急事態」への対応のあり方
- ・ 災害を予防するための多面的な取組
  - ▶ 防災の基本理念の明確化と多様な主体の協働
  - ▶ 災害文化の継承・発展
  - ▶ 災害に強い国土・地域・まちの構築
  - ▶ 最新の科学的知見を反映した防災対策
- ・ 迅速かつ円滑な復興への取組
- ・ 国の総力を挙げた取組体制の確立

救命・救助活動においては、災害発生から 72 時間が極めて重要な時間帯であり、人命救助のオペレーションのさらなる強化が望まれる。大きな課題の 1 つとして「情報の収集・伝達」が指摘されており、行政の情報収集だけでは限界があるためソーシャルメディアやカーナビゲーション情報など民間の情報を活用すること、地理空間情報を活用することで状況認識の統一や意思決定を早めることなどが挙げられている。

陸・海・空のロボット技術は、自ら移動しながら情報を収集できる新たな手段として活用のポテンシャルがある。危険地域の状況確認のため人に先んじて投入することで二次災害の軽減にも繋がり、さらにセンサ情報の活用により地理空間情報とも連携しやすいものである。東日本大震災においても、国際レスキューシステム研究機構とテキサス A&M 大学の CRASAR との日米合同チームにより、岩手県陸前高田市や宮城県南三陸町における水中ロボットによる探索活動が行われた際、ロボットが収集した情報は GIS により管理され、活用された。

また、「災害発生時対応に向けた備えの強化」については、国、地方公共団体、民間企業、NGO、NPO、社団、財団、ボランティアなど災害対応を行う各主体間の相互の協力体制の整備や、民間事業者の能力・施設・ノウハウ・エネルギーの活用といった様々な主体の連携の必要性が提示されるとともに、各府省庁にまたがる課題について迅速な意思決定を行うための国の体制整備の必要性が指摘されている。

ロボットについても、東日本大震災における教訓を踏まえ、運用主体の確立が課題として指摘されているが、国、地方公共団体、民間企業といった様々な主体のどこに運用機能を位置づけるべきか、こうした体制見直しの動きに歩調を合わせて議論を進めることが有効と考えられる。

## ② 消防庁における防災に関する取り組みの方向性

前述の通り、地域における防災は各自治体によって取り組まれているが、その体制や装備について、国レベルで対応すべき指針は総務省消防庁が整備している。大規模災害に関連した取り組みとしては、阪神・淡路大震災を契機とした、広域連携の仕組みとしての「緊急消防援助隊の設置」や、新潟県中越地震での東京消防庁の消防救助機動部隊（ハイパーレスキュー）の活動実績などを背景とする「高度救助隊および特別高度救助隊の設置」、また、救助の高度化に関する各種の検討会における先端技術活用の検討が挙げられる。

高度救助隊および特別高度救助隊は、2005年4月4日に「救助隊の編成、装備及び配置の基準を定める省令」が一部改正される形で創設されたものであり、東京都及び政令指定都市に特別高度救助隊を、中核市等に高度救助隊を整備することが定められている。

特別高度救助隊は、人員と装備に関する以下の定めがある。

- ・ 人命の救助に関する専門的かつ高度な教育を受けた隊員5人以上で編成すること
- ・ 指定された救助器具を備えていること
- ・ それら救助器具を積載することができる救助工作車1台及び特殊災害対応自動車1台を備えていること
- ・ 地域の実情に応じてウォーターカーター及び大型ブロアーを備えていること

高度救助隊および特別高度救助隊が備えるべき救助器具として、通常の救助隊が備えるべき救助器具に加えて、以下が指定されている。このうちの「検知型遠隔探査装置」は災害対応ロボットを含むものであり、2010年4月の改正により追加された項目である。義務化されたものではなく、地域の実情に応じて備えるものとされているため、現在の枠組みにおいては、災害対応ロボットの活用が有効と判断した自治体において、高度救助隊あるいは特別高度救助隊の装備として導入されることとなる。

当該枠組みの中でも、実績を示すことにより個別の自治体へのロボット導入を進めることが可能であり、まずは特別高度救助隊から導入を進めることが考えられるが、個別の取り組みに留まる。一方で今後、省令の改正により義務化されることとなれば、高度救助隊あるいは特別高度救助隊の標準装備として、全国的な導入が進むこととなる。

図表 1-15 高度救助隊・特別高度救助隊の専用装備器具

分類	品名
高度救助用器具	画像探索機
	地中音響探知機
	熱画像直視装置
	夜間用暗視装置
	地震警報器
	電磁波探査装置※
	二酸化炭素探査装置※
	水中探査装置※
検知型遠隔探査装置※※	
一 ※印のものは、高度救助隊については、地域の実情に応じて備えるものとする。 二 ※※印のものは、地域の実情に応じて備えるものとする。 三 表中の救助器具については、はん用器具によることができ、また、同種の機能を有する器具により代替することができるものとする。	

出所：救助隊の編成、装備及び配置の基準を定める省令

また、総務省消防庁では、各種の検討会によって救助技術の高度化を進めている。前述の「検知型遠隔探査装置」の省令への追加も、「平成 21 年度 救助資機材の高度化等検討会」などの検討の結果、実施されたものである<sup>3</sup>。

都市型救助技術（US&R）についても、平成 22、23 年度に「救助技術の高度化等検討会」の中で検討された。東海地震、東南海・南海地震及び首都直下地震を始めとした大規模地震において、座屈した耐火建物や倒壊した木造家屋等における救助活動が想定される中、我が国における都市型救助技術の導入のあり方が検討されたものである。すでに米国においては、座屈した耐火建物等から要救助者を救出・救助する活動として、都市型救助技術（生存者に対する位置特定、救出・救助、初期容態安定化処置を柱とする一連の救助技術等）が導入されており、それらの救助技術が災害現場において実際に活用されており、同検討でも先行事例として提示されている<sup>4</sup>。また、検討会の成果として、平成 23 年度の報告書には「救助活動要領」が掲載され、各地域の消防本部における大規模地震による倒壊/座屈建物の救助活動マニュアル作成時に参考となるよう、とりまとめられた。

各地域の消防本部、消防署等における資機材の配備は、こうした総務省消防庁における

<sup>3</sup>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～（平成 21 年 9 月、総務省消防庁国民保護・防災部参事官付）

<sup>4</sup>平成 22 年度 救助技術の高度化等検討会報告書 座屈耐火建物等における救助活動について（技術）（平成 23 年 3 月、消防庁国民保護・防災部参事官付）

技術検討および運用検討のもとで進められており、ロボット技術についても継続的に検討を呼びかけていくことが重要と考えられる。

### ③ 日本再生戦略における特殊環境用ロボットの位置付け

日本再生戦略（2012年7月31日閣議決定）は、新成長戦略（2010年6月18日閣議決定）を発展させた経済成長戦略として、とりまとめられたものである。この中には、11の成長戦略と38の重点施策が記載されており、「国土・地域活力戦略」の1つとして、「大都市等の再生と災害に強い国土・地域の構築（防災・減災対策）」が掲げられている<sup>5</sup>。

戦略実行のための取り組みの方向性は「日本再生に向けた改革工程表」としてまとめられているが、この中では上記の防災・減災対策について、「4. 国全体の防災性向上」として、「大規模災害に対する防災・減災対策、危機管理体制の強化」が位置付けられている。

具体的には、前述の防災対策推進検討会議の最終報告を受けて、「災害関連法制の改正、南海トラフの巨大地震・首都直下地震等に備えた被害想定を作成・対応策の実施」を進めることが明記されている。この対応策の1つとして、前述してきたような災害対応ロボットの導入検討が位置付けられるものと考えられる。

### ④ 防災政策における特殊環境用ロボットの位置付け

これまでの議論をまとめると、防災政策における特殊環境用ロボットの位置付けとして、以下が挙げられる。

- ・ 東日本大震災を受けて、中央防災会議が今後の我が国の防災のあり方に関する基本方針をとりまとめており、今後は当該方針に基づいて具体的な施策が形作られると見られる。ロボットについても、初動対応における情報の収集・伝達の高度化などの文脈で、当該方針に基づく検討の重要性が指摘できる。
- ・ 同会議における基本方針として、「防災の主流化」が挙げられている。平時から防災を念頭に置いたインフラ・システム・体制を構築していくことが求められており、災害時に加え平時のインフラ検査・メンテナンスにも対応できる特殊環境用ロボットは、本方針に合致するものである。
- ・ また、「防災こそ我が国再生のフロンティア」「防災先進国日本の世界発信」も掲げられている。我が国が誇るロボット技術を、我が国の高度な防災インフラの1つとして位置付け、海外に展開していくことが有効である。
- ・ 一方、総務省消防庁は、地域の消防本部や消防署の体制や装備について順次高度化を図っており、先端機器による救助高度化も検討している。ロボットについても既に高度救助隊・特別高度救助隊の装備の1つとして例示されており、有用性のさらなる検証や技術改良、運用整備により、導入拡大や義務化を進展させることが望まれる。

<sup>5</sup>日本再生戦略～フロンティアを拓き、「共創の国」へ～（平成24年7月13日閣議決定）

なお、我が国の防災機能は、大規模災害の発生の際に、それらを教訓として経験的に強化・改善されてきた。前述したのものも含め、以下などの技術配備や体制構築があった。

図表 1 - 1 6 過去の災害とそれを受けた技術配備・体制構築

災害発生	それを受けた技術配備や体制構築
大阪千日デパート火災（1972年） 太陽デパート火災（1973年）	はしご車の高度化
江東区高層マンション火災（1989年） 阪神・淡路大震災（1995年）	消防ヘリ、防災ヘリの整備進展
阪神・淡路大震災（1995年）	緊急消防援助隊の設置
新潟県中越地震（2004年）	高度救助隊および特別高度救助隊の設置 中山間地域の情報収集・救助のための航空力強化 J-ALERTの開発・整備
東日本大震災（2011年） 笹子トンネル崩落（2012年）	防災対策推進検討会議を中心とする我が国全体としての防災強化の取り組み (災害対応ロボットの運用検討含む)

災害対応ロボットがはじめて本格的に導入され、その過程において導入に当たった運用主体や指揮系統などの未整備の問題や、ロボット自身の技術改良の必要性が明らかとなった東日本大震災の教訓を活かし、災害対応ロボットの本格配備に向けた検討を進めるべきタイミングと言える。

検討の進め方としては、以下の2つのアプローチがあると考えられ、それぞれを進める中で我が国全体としての取り組みとなると考えられる。

- ・ 中央防災会議のとりまとめた我が国の防災政策の基本方針に則り、ロボット技術にこれまで取り組んできた経済産業省およびNEDOが主体となって、中央防災会議および関連省庁と連携しながらロボット技術の有効性を提言、技術開発および運用のあり方検討の双方を進めた上で、国主導で全国に配備すること  
(先行事例：総務省による全国瞬時警報システム（J-ALERT）の開発・配備）
- ・ 総務省消防庁および地域の消防本部、消防署等との連携により、高度救助隊・特別高度救助隊が備えるべき救助器具としてのロボットのあり方を現場目線で技術面、運用面から検討し、先進地域から順次配備・運用を進め、実績を順次増やすこと  
(先行事例：現在配備が義務づけられている各種の資機材)

## (2) 産業政策における位置付け

### ① 国内産業インフラのリスク耐性強化に関する方向性

経済産業省による平成 25 年度の経済産業政策<sup>6</sup>の重点の 1 つとして、「原子力事故・震災からの再生、産業活動・産業基盤のリスク耐性の強化」が挙げられている。このうちの産業活動・産業基盤のリスク耐性の強化は、さらに以下の 3 つの方向性とされている。

- ・ 災害に強いインフラの構築（製油所や備蓄基地等の災害対応能力強化、コジェネ、天然ガスパイプライン、生活必需品に係る情報共有システム等）
- ・ 各種基準の見直し等を通じた産業保安の強化
- ・ サイバー攻撃等への対応力を強化する枠組の実現（官民連携による情報共有の推進、総務省と連携した分析機能の強化）

災害に強いインフラの構築については、石油製品備蓄の増強や、災害時の石油・LP ガスのバックアップ供給能力向上といった運用強化策の他、「石油・LP ガスの精製・備蓄・流通機能の災害対応能力の強化」が掲げられている。

また、産業保安の強化については、『東日本大震災をきっかけとして、自然災害に対するライフライン等の脆弱性が明らかになるとともに、大企業でも重大事故や悪質な法令違反が相次ぎ発生・発覚するなど事業者の現場での保安力の低下が疑われる事態も生じつつある』との問題意識を明らかにしている。東日本大震災、南海トラフ、首都直下地震等に対応したライフライン等の基準策定や安全技術の開発に取り組む意向である。

この背景の 1 つには、自然災害以外でも、昨今、化学プラントにおける大規模な事故が続いている。2011 年 11 月には、東ソーの南陽事業所（山口県周南市）において塩化ビニルモノマーの製造設備の爆発火災事故が起き、従業員 1 名が死亡した<sup>7</sup>。また、2012 年 4 月には三井化学の岩国大竹工場（山口県和木町）で爆発・火災事故が発生、死者 1 名、負傷者 12 名の被害となった<sup>8</sup>。さらに 2012 年 9 月には、日本触媒の姫路製造所（兵庫県姫路市）の爆発・火災事故が発生、死者 1 名、負傷者 36 名の被害となった。

こうした産業インフラのリスク耐性強化として、平時の保全強化、有事の災害対応強化の双方が挙げられる。中央防災会議による首都直下地震の被害想定においても、被害総額 112 兆円のうち、生産額の低下等による間接被害が 39 兆円を占めており、直接被害 66.6 兆円よりは小さいものの、甚大な経済損失が発生する<sup>9</sup>。産業政策の観点からも、産業インフラの災害対応能力強化は大きな課題と言える。現在のところ、実現手段としてロボット

<sup>6</sup> 平成 25 年度 経済産業政策の重点（平成 24 年 9 月 経済産業省）

<sup>7</sup> 東ソー株式会社 南陽事業所 第二塩ビモノマー製造設備の爆発火災事故について  
(<http://www.tosoh.co.jp/newsn/index.html>)

<sup>8</sup> 三井化学株式会社 岩国大竹工場における爆発・火災事故について  
([http://jp.mitsuichem.com/release/2012/2012\\_0422.htm](http://jp.mitsuichem.com/release/2012/2012_0422.htm))

<sup>9</sup> 首都直下地震対策について 首都直下地震対策について（中央防災会議）

への言及はないものの、ロボットの導入による予防保全や災害時対応の高度化が実現できれば、経済効果は大きいと推察され、今後、導入に向けた検討が進むことが望まれる。

## ② 海外展開のための国際標準化・認証に関する方向性

近年、グローバル市場への展開にあたっての国際標準化および認証の重要性への認識が高まっている。経済産業省においても、基準認証政策として位置付けられ、継続的に取り組みが強化されている。

前述の経済産業省による平成 25 年度の経済産業政策においても、重点の 1 つとして「価値創造」を通じた「稼ぐ」モデルへの転換が挙げられており、その手段の 1 つとして「戦略的な国際標準化の推進」が掲げられている。推進にあたっては、他省庁とも連携しつつ、実証事業や国際標準の獲得支援、導入支援等を戦略的に組み合わせて実施する意向である。

ロボット分野についても、パーソナルケアロボット（生活支援ロボット）について日本主導での国際標準化が進められ、2011 年 9 月には国際規格原案として ISO/DIS 13482:2011 が発行されている。

また、特殊環境用ロボットについても、米国国立標準技術研究所（NIST）が、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と標準化を進めている。評価手法の開発・標準化は、テキサス州カレッジステーションに位置する世界最大の都市型災害対応訓練施設「Disaster City」においてロボットの評価・実証実験を通じて行われている。米国に限らず国外からもロボット開発者が参加し、また、ユーザ側からはレスキュー隊員や爆弾処理班が参加している。施設は実際の災害現場を模したものとなっており、実環境での評価・実証実験が可能である。

我が国としても、東日本大震災等の経験を活かし、米国との連携を深めながら、日本独自の取り組みにより米国の取り組みを補完・発展させていく視点での標準化を進め、日本の特殊環境用ロボットの海外展開に向けた仕組みを作ることが重要と考えられる。

## ③ 産業政策における特殊環境用ロボットの位置付け

これまでの議論をまとめると、産業政策における特殊環境用ロボットの位置付けとして、以下が挙げられる。

- ・ 国内産業インフラのリスク耐性強化が重点政策の 1 つとして掲げられており、平時の保全強化、有事の災害対応強化の双方が重要と見られる。平時・有事ともに活用可能な特殊環境用ロボット技術は、課題解決のための重要な手段となり得る。
- ・ 我が国の技術・製品・システムをグローバル展開するための国際標準化・認証の推進も、重点政策の 1 つとして掲げられている。米国が先行する特殊環境用ロボットの標準化の取り組みに我が国も連携することで、我が国が強みを有するロボット技術の海外展開に繋げることができる。

### (3) 科学技術政策・ロボット政策における位置付け

#### ①科学技術政策における位置付け

我が国の科学技術政策の大方針を定める「第4期科学技術基本計画」(平成23年8月19日閣議決定)は、平成23年度から27年度までの5年間を対象とした基本計画であるが、その中では東日本大震災からの復興、再生、災害対応の強化等に係る観点に記載されている。「Ⅲ. 我が国が直面する重要課題への対応」の中では、「2. 重要課題達成のための施策の推進」の1つとして「安全かつ豊かで質の高い国民生活の実現」が掲げられており、『国や地方公共団体における防災マップの作成等を通じた防災体制の強化、災害発生の際の迅速な被害状況の把握及び情報伝達、リスク管理も含めた災害対応能力の強化に向けた研究開発等の取組を促進する』こと、『火災や重大事故、犯罪への対策に関する研究開発を推進し、国や自治体等における対策等の取組を促進する』ことが明記されている。

前述のとおり、災害対応ロボットは自律移動可能な情報収集手段としての性格を有することから、初動対応における被害状況の把握・情報伝達の有効手段の1つと考えられ、また、火災や重大事故、犯罪への対応にも広く使えるものであり、災害対応能力の強化に資する研究開発対象と考えられる。

#### ②経済産業省のロボット政策における位置付け

我が国の特殊環境用ロボットに関する取り組みは、米国のスリーマイル島原発事故などを背景に開始された旧通産省の「極限作業ロボットプロジェクト」(1983年～1990年)まで遡るが、現在につながる活動が本格化したのは、2000年代に入ってからである。

2000年度に実施された「21世紀におけるロボット社会創造のための技術戦略調査」では、災害対応ロボットについて米欧に比べて日本の国際競争力が低いことが指摘され、また、2025年にかけてのロボット将来市場の予測として、全体で8兆円の市場創出を予測し、その後のロボット関連施策の推進剤となった。

その後、NEDOによる「次世代ロボット実用化プロジェクト」(2004年～2005年)が実施され、愛知万博における次世代ロボットの実証実験およびプロトタイプロボット展の開催につながった。災害対応ロボットもテーマの1つとなり、NBCテロ対応探査ロボットや瓦礫内探査ロボットが開発された。さらにその後、21世紀ロボットチャレンジプログラムの一環として、NEDOによる「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」(2006年度～2010年度)が実施され、東日本大震災でも活用された **Quince** などが開発された。

#### ③他省庁のロボット政策における位置付け

特殊環境用ロボットに関連する他省庁の政策として、阪神・淡路大震災などを背景に開始された、文部科学省による「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」(2002年8月～2007年3月)がある。当該プロジェクトでは、災害対応ロボットの開発に多数の研究者が従事し、研究開発の裾野が広がった。また、実証試験フィールドとして国際レスキューシステ

ム研究機構神戸ラボラトリーに倒壊家屋実験施設を建設し、現役消防隊員によるボランティア部隊 IRS-U を結成しての訓練・評価・意見聴取を行ったほか、ハイパーレスキューや国際緊急援助隊に対するデモ、米国国立標準技術研究所(NIST)、米国材料試験協会(ASTM)によるレスキューロボット評価標準化に協力し、米国連邦緊急事態管理庁(FEMA)隊員によるロボットデモ体験・試験を行った。

また、大都市大震災軽減化特別プロジェクトおよび前述の戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトと並行して、ロボカップレスキューが2001年より開催され、性能評価のフィールドとして研究開発に活用された。

#### ④ロボット政策における特殊環境用ロボットの位置付け

これまでの議論をまとめると、ロボット政策における特殊環境用ロボットの位置付けとして、以下が挙げられる。

- ・ 経済産業省およびNEDOによる次世代ロボットの研究開発・実用化に向けた取り組みの中で、特殊環境用ロボットについても継続的に研究開発が行われてきた。これにより、東日本大震災においても実際に活用できるロボットが実現している。ただし、プロジェクト終了後に、試験運用・実運用を進めながら改良開発を進めるまでの取り組みには、これまでは至らなかった。東日本大震災における福島第一原発事故へのQuince投入のための改良開発が、初めての取り組みと言える。
- ・ 文部科学省による大都市大震災軽減化特別プロジェクトやロボカップレスキューなどを通じ、ユーザサイドとの対話や実環境あるいはそれに近い環境での性能評価などが行われてきた。ただし、ユーザが実際の運用に至るまでの取り組みはこれまでなく、そのための体制や運用の検討は、十分ではなかった側面がある。

#### (4) 特殊環境用ロボットに係る政策課題

これまで、特殊環境用ロボットの位置付けを、防災政策、産業政策、ロボット政策の3つの観点から整理した。これらを総括し、特殊環境用ロボットに係る政策課題をまとめる。

防災政策の観点からは、以下の観点から、特殊環境用ロボットの開発・実用化や海外展開は我が国の防災政策の方向性に合致するものであり、我が国全体としてのロボット活用のあり方を議論する土壌があることが窺える。

- ・ 東日本大震災を受け、中央防災会議は今後の我が国の防災のあり方に関する基本方針をとりまとめており、当該方針に則った我が国の防災高度化が進められること
- ・ 「防災の主流化」の方針に、災害時に加え平時のインフラ検査・メンテナンスにも対応できる特殊環境用ロボットは合致していること
- ・ 「防災こそ我が国再生のフロンティア」「防災先進国日本の世界発信」の方針に、我が国が誇るロボット技術を、我が国の高度な防災インフラの1つとして位置付け、海外に展開していくことが合致していること

- ・ 既に、総務省消防庁が定める高度救助隊・特別高度救助隊の装備の1つとしてロボットが例示されており、有用性のさらなる検証や技術改良、運用整備により、導入拡大の土壌があること

また、産業政策の観点からも特殊環境用ロボットの開発・実用化や海外展開は、我が国の産業競争力強化の方向性に合致するものであることが窺える。

- ・ 国内産業インフラのリスク耐性強化のための、平時の保全強化、有事の災害対応強化が求められており、ロボットは課題解決のための重要な手段となり得ること
- ・ 我が国の技術・製品・システムをグローバル展開するための国際標準化・認証の推進が掲げられており、我が国が強みを有するロボットの海外展開も望まれること

このように防災政策、産業政策の双方においてロボットが位置付けられる一方、ロボット政策の観点からは、これまでの政策により研究開発が進められ、Quinceのような実環境で効果を挙げられる優れたロボット技術が開発されたことが成果である一方、実運用のための改良開発の取り組みや、運用体制のあり方の検討は限定的であったと考えられる。

東日本大震災を教訓に、我が国の防災のあり方が見直されるとともに、東日本大震災からの再生を我が国の産業競争力強化にもつなげる動きがある中、我が国を揚げた取り組みを、関連省庁の連携のもと、また、米国など海外との連携のもとで、進めていくことが政策的な課題と考えられる。具体的には、以下の2つの取り組みが、課題と考えられる。

- ・ 我が国の災害対応力強化のための、特殊環境用ロボット導入に向けた取り組み
  - 中央防災会議の基本方針に則った、我が国全体としての運用体制検討
  - 総務省消防庁および地域の消防本部、消防署と連携した、現場運用手法の検討
  - 実ニーズに即した研究開発・実証・改良開発の取り組み
- ・ 我が国の産業競争力強化のための、特殊環境用ロボット海外展開に向けた取り組み
  - 海外展開にあたっての市場性検討および市場創出策の検討
  - 海外展開を見据えた国際標準化および認証の整備に向けた取り組み

前者については、ロボットの研究開発の取り組みを継続的に実施してきた経済産業省・NEDOが中心となって、中央防災会議に提案していくといった我が国全体としての動きと、ロボット研究開発者と消防本部・消防署との連携による現場としての動きの双方を組み合わせ進めていくことが有効と考えられる。

また、後者については、特殊環境用ロボットの評価手法の標準化で先行する米国との連携体制の中で、我が国特有の技術や使用環境を踏まえた仕組みづくりを行なっていくことが重要と考えられる。

## 1-1-6 特殊環境用ロボットの開発体制・運用体制の整備の必要性

### ① 想定外への対応が課題

災害対応について、今回の東日本大震災と福島第一原発事故に関して得られた教訓として、想定外への対応が課題であるということがある。ロボットもその例外ではない。

日本でのレスキューロボットの開発は、1995年の阪神淡路大震災に端を発して活発になった。そこでロボットに求められる仕様はこれまでの震災の経験を基に行われることが多かった。倒壊建造物からの救助が最も重要と考えられ、それに資するロボット技術の研究開発が盛んに行われてきた。しかし、東日本大震災はこれまでの震災とは全く異なる様相を見せ、津波被害や原発事故への対応が大きな課題となった。ちなみに、巨大災害では二度と同じことは起きず、毎回新しい被害が発生するという認識は防災研究者にあったが、今回もその例に漏れない。今回の東日本大震災と福島第一原発事故への対応として、ロボットは一定の成果を上げたが、今後、さらに本格的な活用が期待される。

### ② ロボット開発体制整備の必要性

特殊環境ロボットの開発・運用については、想定外を想定して備えることが重要と考えられる。ちなみに、レスキューロボットにはマーケットが存在せず、企業の参入は困難である。従って主に大学や研究機関での開発に留まっており、実用化フェーズには至っていないのが現状である。津波被害や原発事故に見るように、少しのリスクでも存在する場合は災害発生を想定して、何らかの措置を講ずる必要があり、人が近づくのに危険な現場での作業にはロボット技術の活用が必須である。従って、レスキューロボット等の特殊環境ロボットの開発と、そのための体制整備が必要であると考えられる。

なお、今回の新たに浮き彫りになった震災と原発事故の教訓も含め、特殊環境ロボットの技術的な課題は以下の通りに上げられる。

- ・ ハイテク機器の脆弱性
- ・ システムの機動性の欠如（可搬性、電源の確保）
- ・ ロジスティクスの脆弱性
- ・ 情報の齟齬、信憑性が不明
- ・ 時空間情報の柔軟な管理の不備
- ・ 情報伝達手段の脆弱性
- ・ 予知、減災、復旧、復興、平常時の全てのフェーズを考慮したシステムの一貫性の欠如

### ③ ロボット運用体制整備の必要性

今回の震災への対応において、レスキューロボットシステムの運用面での課題として、以下が指摘される。

- ・ 関連機関や自治外との連携

- ・ 電波法などの法制度の整備
- ・ 国際協力
- ・ 標準化

特に、川妻紳二「福島第一原子力発電所事故におけるロボットによる緊急対応の概要と教訓」(ロボット No.206)によれば、震災に関して生じた一連の原発事故への緊急対応における重要な教訓として、「ロボットシステムを運用する組織(枠組)を予め用意しておくべきであった」と指摘される。また、ロボットの運用組織が存在していれば、ロボットのみならずロボットを有効に活用するための周辺設備を含むロボットシステムが維持されていたばかりか、ロボットのシステム化、現場状況に合せた最適化、機動性などの課題についても、モックアップ試験や防災訓練の段階で問題の指摘・改善等がなされていた可能性が指摘される。

従って、開発された特殊環境ロボットを有効に災害対応に活用するための運用体制の整備が必要であると考えられる。

## 1-2 特殊環境用ロボットの運用体制構築のあり方

### 1-2-1 運用体制に求められる要件

有事を想定し、災害対応ロボット・運用システムを充実させることは急務と考えられる。しかし、国家財政が非常に厳しい昨今の状況の中では、いつ起こるかわからない、況や起こらないかもしれない有事のためだけに研究開発や実用化・整備を推進することは難しいと考えられる。一方、平時においても事故は存在し、この対策のためのロボットへのニーズはある。更に、製油プラントや建設設備、ライフライン等のインフラの老朽化が進んでおり、メンテナンスロボットへのニーズもある。

以上をふまえ、平時ではメンテナンスロボット、有事では災害対応ロボットとして活用可能なロボットの研究開発を目指すことで、費用対効果を高めることが可能となると期待される。

有事対応および平時におけるメンテナンス対応のそれぞれにおけるロボット運用体制へのニーズとしては以下が上げられる。

#### ① 一般の災害対応ケース

以下のようなニーズが上げられる。

- ・ 迅速な状況確認
- ・ 早急な状況分析
- ・ 可及的速やかな人命探索・救助

#### ② 特に、原子力発電事故のケース

以下のようなニーズが上げられる。

- ・ 高放射線による現状の復帰・復旧
- ・ 周辺地域の放射性物質の除去
- ・ 適正な廃炉処理
- ・ 原子力燃料の適正な破棄や保管

#### ③ 平時におけるメンテナンスのケース

関連業種ごとに、以下のようなニーズが上げられる。

業種	ニーズ
プラント・エンジンリング系	・ 高所構造物の点検・経年劣化評価・軽補修 ・ 埋設等配管の点検、損耗調査 ・ 非特定環境状態の測定（ガスや危険気体、液体等）、補修
建設系	・ 構造物（ビル、橋梁、トンネル等）の経年劣化調査 ・ 有害物質（アスベスト、ガス等）環境の測定と対策
ライフライン系	・ 構造物（建屋、配管、保管、電線等）経年劣化等の調査・測定・

	対策・補修
メーカー系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自動車：事故防御の安全対策（有害電磁波等）</li> <li>・半導体：製造過程での薬剤等有害物質</li> </ul>

### 1-2-2 災害発生地域・種類および対応主体・方法等に関する想定

#### (1) 災害発生地域・種類に関する想定

我が国の防災政策の方向性として、東日本大震災を受けた中央防災会議による基本方針にもある通り、大規模災害への対応強化が挙げられる。典型的な大規模災害として、プラント・工場災害と都市・交通インフラ災害を取り上げ、それぞれの概要と地域の例、関連する近年の災害例をまとめると以下の通りである。

図表 1-17 災害発生地域・種類の想定（プラント・工場災害）

種類	プラント・工場災害
概要	発電所や化学プラント、大規模工場における爆発・火災等の災害
地域の例	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子力発電所や火力発電所立地地域</li> <li>・ 化学プラント・大規模工場立地地域</li> </ul>
近年の災害例	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 福島第一原子力発電所事故（福島県双葉郡、2011年3月）</li> <li>・ 東ソー南陽事業所（山口県周南市、2011年11月）</li> <li>・ 三井化学岩国大竹工場（山口県和木町、2012年4月）</li> <li>・ 日本触媒姫路製造所（兵庫県姫路市、2012年9月）</li> </ul>
ロボットの利用 イメージ例	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 危険性が不明な建屋内部の情報収集</li> <li>・ 人が到達できない高所や狭隘部の情報収集</li> </ul>

図表 1-18 災害発生地域・種類の想定（都市・交通インフラ災害）

種類	都市・交通インフラ災害
概要	都市や交通インフラにおける、構造物の倒壊・瓦解や崩落を伴う災害
地域の例	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 首都圏や政令指定都市をはじめとする市街地、地下街</li> <li>・ 長大トンネル</li> </ul>
近年の災害例	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 阪神・淡路大震災（兵庫県および周辺地域、1995年1月）</li> <li>・ 地下鉄南北線工事現場火災（東京都港区、1997年3月）</li> <li>・ JR 福知山線脱線事故（兵庫県尼崎市、2005年4月）</li> <li>・ 八箇峠トンネル爆発事故（新潟県南魚沼市、2012年5月）</li> <li>・ 笹子トンネル崩落事故（山梨県大月市、2012年12月）</li> </ul>
ロボットの利用 イメージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 倒壊した建物内や瓦解した地下街、崩落したトンネル内など、狭隘環境、危険環境における情報収集</li> </ul>

以降では、プラント・工場災害および都市・交通インフラ災害それぞれについて、具体的な災害の事例や想定を交えながら、災害対応におけるロボット運用のあり方をまとめる。

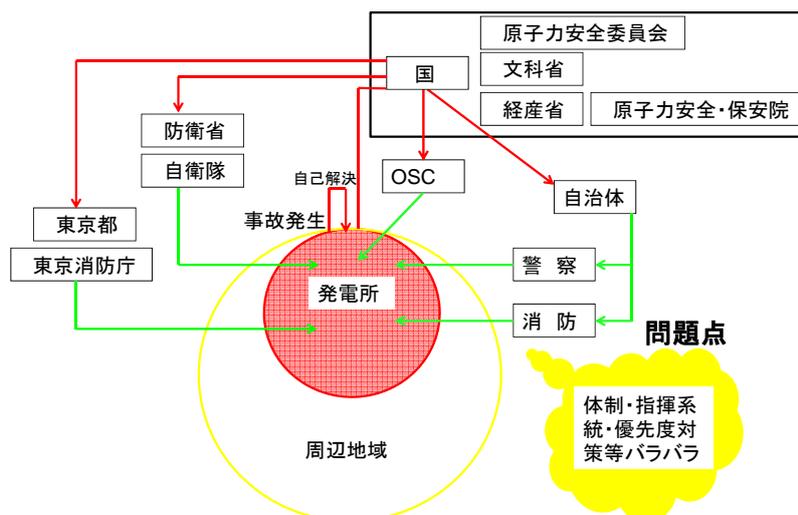
### (2) プラント・工場災害における対応主体・方法等に関する想定

地域としては、東日本大震災による被災を受けた福島第一原子力発電所や、再稼働された福井県大飯原子力発電所などの国内各地の原子力発電所をはじめ、火力発電所、化学プラント、大規模工場が想定される。

今回の震災に伴う原発事故に関しては、日本では未曾有の対応のため各所で混乱が見られ、本来早い段階での対応ができていなかった。国、関連省庁、自衛隊、自治体、警察、消防等の関連機関の関係が複雑で、運用体制、指揮系統、優先度が不明確であり、対策がばらばらになったとの問題が指摘される。(図表参照)

図表 1 - 1 9 3.11 原発事故対応の運用例

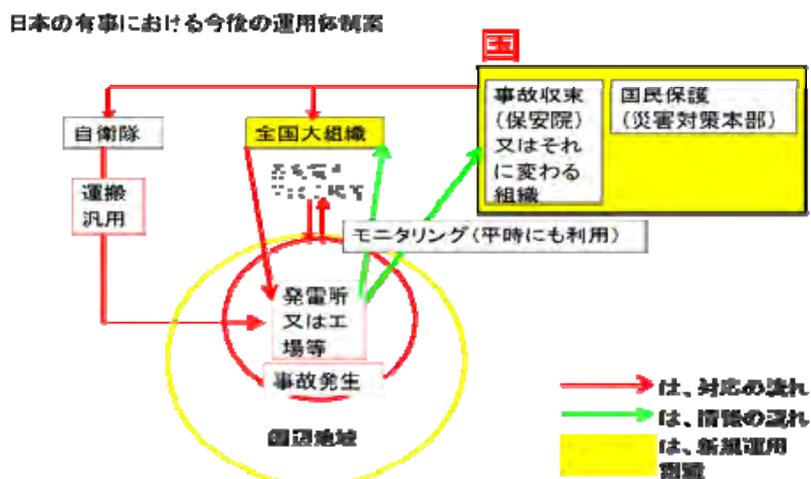
### 3.11 事故対応の日本の運用例



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

これに対して、東日本大震災と原発事故を経験により、全国レベルでの有事・災害時如何にマニュアル化された対象法があったとしても、想定外の事象が起きたときの対策、対応を検討してこなかった反省点を活かしていくことが課題である。如何に素早く、連携をして有事にあたるため、各種災害においてもRTを活用した運用体制で臨むことが必要と考えられる。以下に、今回の福島第一原子力発電所の反省点を踏まえ、かつ原子力災害以外でも活用出来る運用体制を、有識者等と検討を行い、その素案として作成されたものを示す。

図表 1 - 2 0 今後の運用体制案（一般災害の例）



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

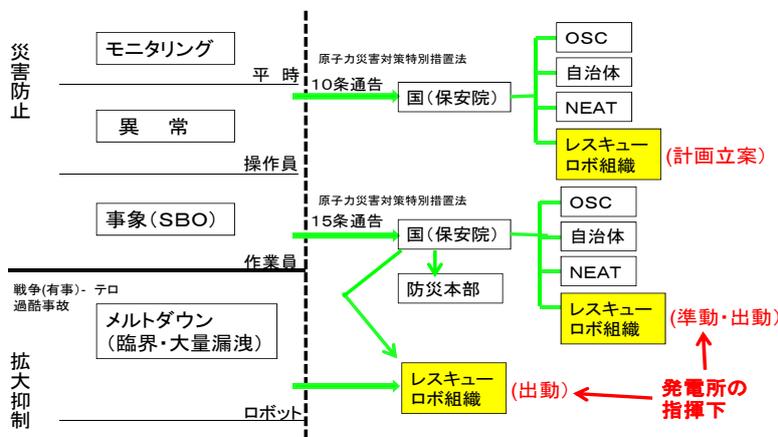
この体制案においては、災害対応のためロボットを運用する全国大の組織を新規に整備し、国、自衛隊、事故現場に対して統一的に対応するとともに、事故現場からの情報を国とともにモニタリングする。このような体制をとることで意思決定や対応を迅速化・統合が可能になるものと期待できる。

なお、モニタリングは平時においても実施し、異常等がある場合は随時、必要に応じてロボットも含めた対応を検討・実施するものとする。原子力災害を例とした、日本の今後の運用体制のあり方を以下図表に示す。

図表 1 - 2 1 今後の運用体制案（原子力）

日本の今後の運用体制（原子力例）

注：産業災害の場合は事象やそれぞれの安全法規や組織と連動



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

例えば、レスキューロボットの運用組織を国として設置し、平時はモニタリングを実施し、有事の対策や計画を常日頃から検討しつつ、異常を検知した際には災害防止活動にロボットを活用し、メルトダウン等の有事においては防災本部と連携し、発電所の指揮下で事故の拡大抑制に向けたロボットの運用を実施すること等が考えられる。

具体的なロボットの配備のあり方は今後の検討課題であるが、現在、電気事業連合会が福井県などで整備を進めている「原子力緊急事態支援組織」においては、既にロボットの配備検討が進められている<sup>10</sup>。ただし、多くの原子力プラントが県内に立地し、全国の原子力発電所のほぼ中間地点に位置する福井県を筆頭に、全国で1～2ヵ所程度を予定しているものである。

配備されるロボットの想定は、2012年度中に3台（iRobot社のPackbotを2台、Warriorを1台）とされているが、2015年度までの拡充も検討されている。この中では資機材として、偵察用ロボット、放射線測定用ロボット（地上、空中）、除染用ロボット、遠隔操作重機（がれき撤去等）、現地指揮車両、資機材輸送車両等が挙げられており、10台を超える規模になることも想定される。

図表1-22 原子力緊急事態支援組織の概要

**福島第一原子力発電所事故を踏まえ、高放射線量下など多様かつ高度な災害にも対応可能な世界最高水準の災害対応組織を現在検討している**

**●役割**

①緊急時に迅速に展開し、多様かつ高度な災害対応を実施することにより、事故発生事業者を支援

②ロボット等資機材について、維持管理と関係機関と連携した継続的改善・充実化を実施。また、計画的に要員を育成

**●組織**（海外の先行事例を参考）

**拠点** 全国で1～2ヵ所程度（福井県ほか）

**要員数** 20名程度

**施設** 事務所兼研修棟、資機材庫、改良・実証施設、訓練フィールド

**資機材** 偵察用ロボット、放射線測定用ロボット（地上、空中）、除染用ロボット、遠隔操作重機（がれき撤去等）、現地指揮車両、資機材輸送車両 等

**●設置時期** 電力業界全体で支援組織のあるべき姿（組織形態、要員数、整備すべき資機材など）を具体化し、2015年度中に設置

出所：「原子力緊急事態支援組織」の設置について（2012年7月20日、電気事業連合会、日本原子力発電(株)）

<sup>10</sup>「原子力緊急事態支援組織」の設置について（2012年7月20日、電気事業連合会、日本原子力発電(株)）[http://www.fepec.or.jp/about\\_us/pr/pdf/20120720\\_s1r.pdf](http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/pdf/20120720_s1r.pdf)

なお、電気事業連合会による「原子力緊急事態支援組織」をはじめとする災害対応ロボットの配備検討の背景として、以下の2つが挙げられる。

- ・ 原子力災害対策特別措置法第十一条第2項における、原子力事業者への「原子力防災資機材」の備え付け・保守点検の定め
- ・ 2011年6月に開催された国際原子力機関（IAEA）「原子力安全に関する閣僚会議」における日本政府からの報告<sup>11</sup>

前者について、原子力災害対策特別措置法は、1999年の東海村におけるJCO臨界事故を受けて制定されたものであり、原子力災害の予防に関する原子力事業者の義務等や、緊急事態における対応等について定められている。このうち、第十一条第2項として『原子力事業者は、その原子力防災組織に、当該原子力防災組織がその業務を行うために必要な放射線障害防護用器具、非常用通信機器その他の資材又は機材であって内閣府令・原子力規制委員会規則で定めるもの（以下「原子力防災資機材」という。）を備え付け、随時、これを保守点検しなければならない。』ことが定められている。

このような定めはあったものの、後者のIAEAにおける我が国としての報告にあるように、福島第一原子力発電所の事故から得られた教訓の1つとして「(15)緊急対応資機材の集中管理とレスキュー部隊の整備」が挙げられている。

この中では、『今回の事故では、Jヴィレッジを中心として、事故や被災対応の関係者、資機材を結集し懸命な後方支援を行っているが、事故当初は、周辺においても地震・津波の被害が発生していたため、緊急対応資機材や事故管理活動を支援するレスキュー部隊の動員を迅速かつ十分に行うことができず、現場での事故対応が十分に機能しなかった。このため、過酷な環境下でも緊急時対応の支援が円滑に行えるよう、緊急対応資機材の集中管理やこれを運用するレスキュー部隊の整備を進める。』と記載されており、集中管理され運用体制を整えるべき緊急対応資機材の1つとして、災害対応ロボットも位置付けられるものである。

原子力災害対策特別措置法施行令では、第9条として、『内閣総理大臣、原子力規制委員会、国土交通大臣、所在都道府県知事、所在市町村長又は関係周辺都道府県知事が原子力事業者に対し報告させることができる事項』が定められており、この中に『原子力防災組織、原子力防災要員、原子力防災管理者若しくは副原子力防災管理者、放射線測定設備又は原子力防災資機材の状況』がある。災害対応ロボットを含む資機材の適性配備を進めることが、原子力事業者の今後の活動の前提となると考えられる。

---

<sup>11</sup>原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－（平成23年6月、原子力災害対策本部）

さらに防災機能を高める観点では、原子力発電所のオフサイトセンターにロボットを配備することも考えられる。オフサイトセンターは、原子力災害対策特別措置法の第12条（緊急事態応急対策拠点施設の指定等）に基づいて整備されるものであり、立地・機能要件として以下が挙げられている。

第4号に「放射線測定設備、気象及び原子力事業所内の状況に関する情報を収集する設備を備えていること」が掲げられており、緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（SPEEDI）や緊急時対策支援システム（ERSS）等が想定されているが、災害対応ロボットについても配備の有効性が考えられる。

<立地・機能要件（第16条）>

- （第1号）原子力事業所との距離が20km未満であること
- （第2号）参集するために必要な道路、ヘリポート等が確保できること
- （第3号）TV会議システム、電話、FAX等を備えていること
- （第4号）放射線測定設備、気象及び原子力事業所内の状況に関する情報を収集する設備を備えていること
- （第5号）床面積の合計が800m<sup>2</sup>以上であること
- （第6号）原子力防災専門官の事務室を備えていること
- （第7号）被ばく放射線量低減措置（コンクリート壁、換気設備等）が講じられていること
- （第8号）表面汚染除去に必要な設備を備えていること
- （第9号）敷地内又はその近傍に報道用のスペースを有していること
- （第10号）オフサイトセンター及び設備の維持管理に関する責任範囲が適正・明確であること
- （第11号）オフサイトセンターにおける緊急事態応急対策を実施する際に必要となる資料を保管する設備を有していること
- （第12号）代替オフサイトセンターがオフサイトセンターからの移動が可能な場所に存在すること

原子力安全・保安院管轄のオフサイトセンター及び代替オフサイトセンターは、現在 20 箇所存在し、その配置は以下の通りとなっている<sup>12</sup>。仮に、これらに前述の原子力緊急事態支援組織と同等程度のロボットが配備された場合、我が国として全国 200 台規模のロボット配備となると想定される。

図表 1-23 オフサイトセンターの配置



出所：オフサイトセンターの在り方に関する基本的な考え方について取りまとめ（平成 24 年 8 月、原子力安全・保安院）

<sup>12</sup>オフサイトセンターの在り方に関する基本的な考え方について取りまとめ（平成 24 年 8 月、原子力安全・保安院）

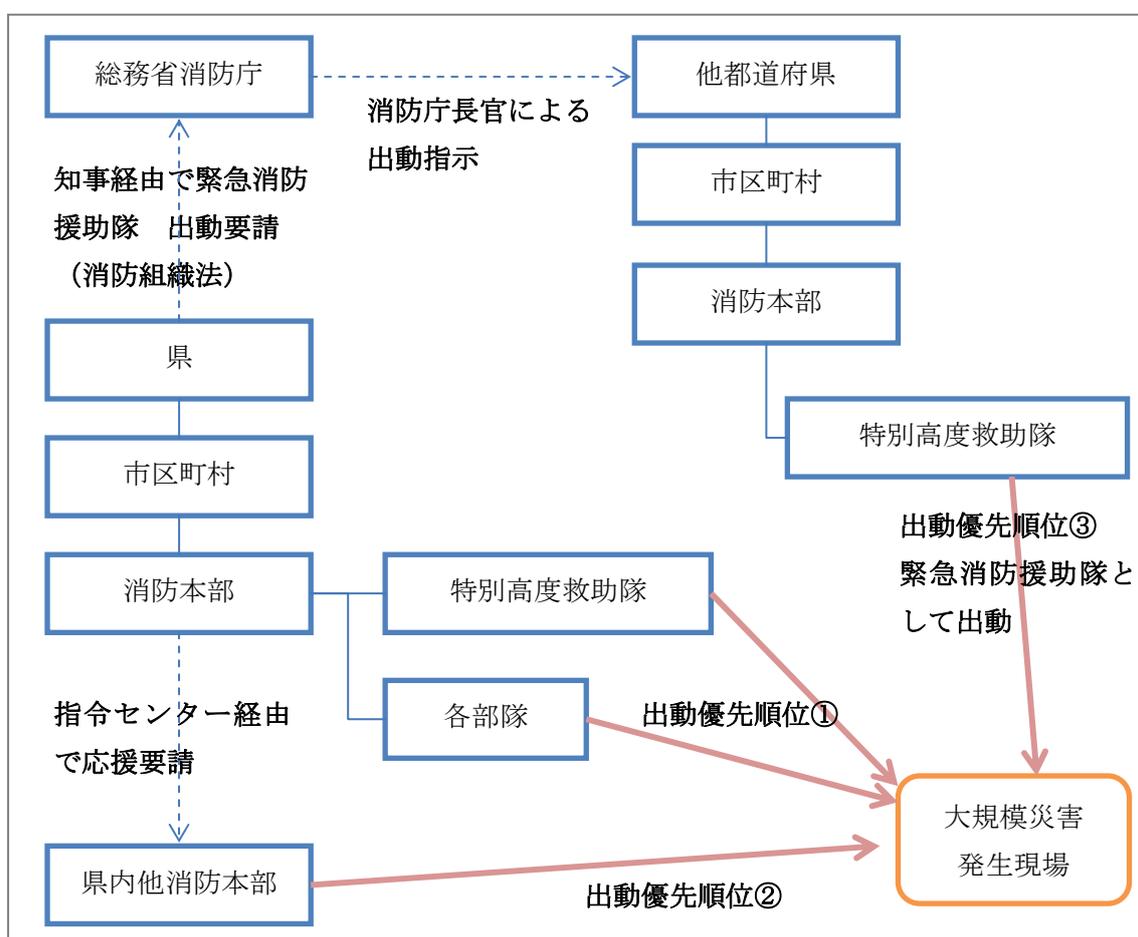
<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/36/torimatome/torimatome.pdf>

(3) 都市・交通インフラ災害における対応主体・方法等に関する想定

大規模災害が発生した場合、消防では以下の様な出動体制を取ることとなっている。

- ・ 大都市（中核市、政令指定都市）では、特別な技術と能力、資機材を持った特別高度救助隊が出動し対応に当たる。
- ・ 地方（中核市より規模が小さい）では、当該消防本部の消防力を超える場合には、同一県内の消防本部へ応援を要請、共同で出動し対応に当たる。
- ・ 大規模災害が発生した県内の消防力では対応が困難な場合には、消防組織法にもとづき県外の消防本部の特別高度救助隊や他の部隊が、緊急消防援助隊として災害現場に派遣される。

図表 1-24 大規模災害時における消防出動体制



出所：総務省消防庁 WEB ページ「緊急消防援助隊の出動スキーム」  
[http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/kinkyu/kinshoutai\\_gaiyou.pdf](http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/kinkyu/kinshoutai_gaiyou.pdf)

このうち、ロボット活用の可能性が高いのは、特別高度救助隊と考えられる。既に、特別高度救助隊の装備の1つとして、ロボットを含む「検知型遠隔探査装置」が挙げられており、地域の実情に応じて備えるものとされている。実際、東京消防庁では「検知探査型災害対策用ロボット」が配備されている。なお、特別高度救助隊の装備は「救助隊の編成、装備及び配置の基準を定める省令」において定められており、「検知型遠隔探査装置」は2010年4月の改正により追加された項目である。

特別高度救助隊は現在、以下の21箇所の消防本部に設置されている。仮に、これらに前述の原子力緊急事態支援組織と同等程度の10台程度のロボットが配備された場合、我が国として全国200台規模のロボット配備となると想定される。

図表1-25 特別高度救助隊の一覧

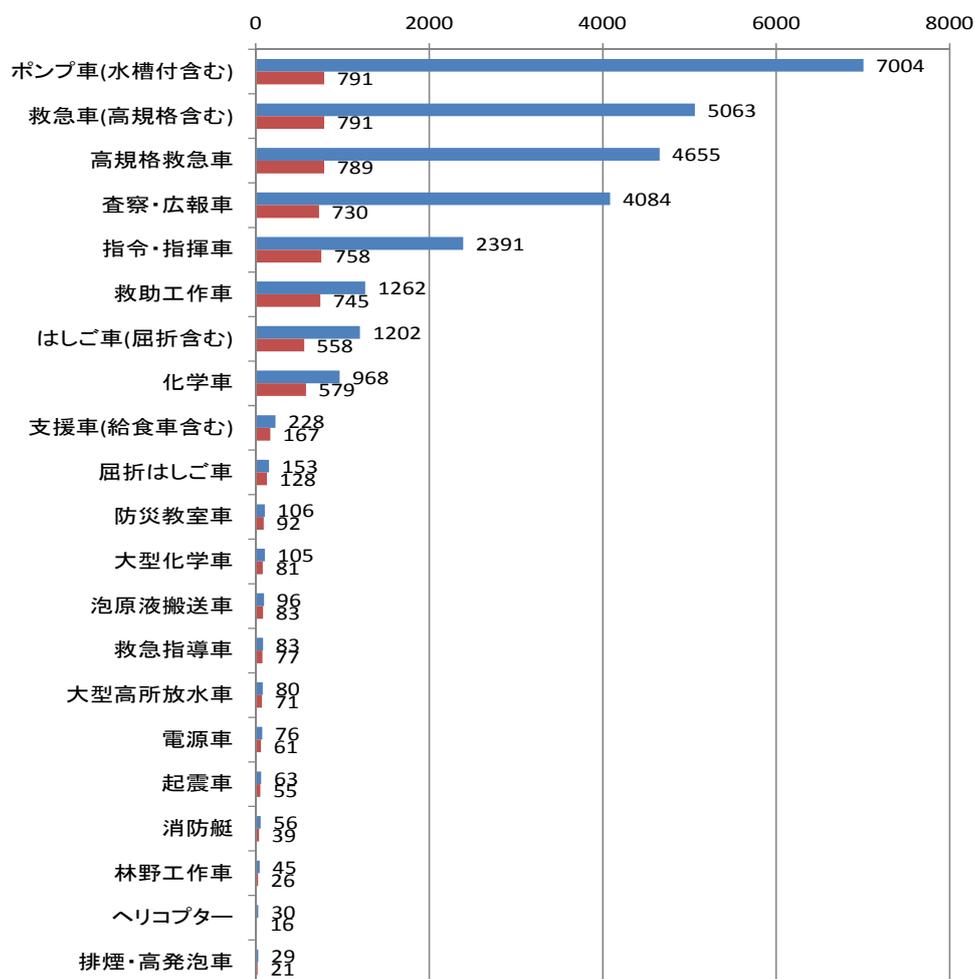
都道府県	消防本部
北海道	札幌市消防局
宮城県	仙台市消防局
千葉県	千葉市消防局
埼玉県	さいたま市消防局
東京都	東京消防庁
神奈川県	川崎市消防局
神奈川県	横浜市消防局
神奈川県	相模原市消防局
新潟県	新潟市消防局
静岡県	静岡市消防局
静岡県	浜松市消防局
愛知県	名古屋市消防局
京都府	京都市消防局
大阪府	大阪市消防局
大阪府	堺市消防局
兵庫県	神戸市消防局
岡山県	岡山市消防局
広島県	広島市消防局
福岡県	北九州市消防局
福岡県	福岡市消防局
熊本県	熊本市消防局

なお、全国 791 箇所の消防本部における資機材の配備状況は、以下の通りとなっている。資機材ごとに、上段に配備数、下段に配備拠点数を示したものである。ポンプ車、救急車、高規格救急車、査察・広報車、指令・指揮車、救助工作車のようにほぼすべての拠点に配備されているものから、石油コンビナートなどの特別防災地域において配備される大型化学車、泡原液搬送車、大型高所放水車のように、限られた拠点にのみ配備されているものまで様々である。大型化学車の価格は 6,500 万円などであり、高額な資機材であっても必要性が認められた拠点に配備される。また、こうした資機材の配備には、法令により自治体に対する国の補助金があり、基準額の 2 分の 1 などと設定されており、地域の防災力強化を国として進める枠組みがある。

ロボットについても、たとえば一定規模以上の都市部や、一定規模以上の地下街や地下鉄を有する地域、一定規模以上のトンネルを有する地域などに、国として予算を付けながら配備を進めることができる枠組みがあると考えられる。

特定の特別高度救助隊との連携により個別の実績を積み上げる一方で、経済産業省や NEDO による中央防災会議への働きかけなどにより、ロボットの全国的な配備へとつなげることができると考えられる。

図表 1 - 2 6 我が国における消防資機材の配備状況



出所：平成 24 年版消防装備情報（車両情報）（全国消防長会）

### 1-2-3 運用体制構築の方向性

全国どこで生じるかが不明な災害・事故等に対して、迅速な対応が実施できる全国大の特殊環境ロボット運用組織を国レベルで整備し、原子力発電所のオフサイトセンターや、東京都および政令指定都市に配置された特別高度救助隊などの地域の防災拠点と連携していくことが考えられる。このような組織は、以下のような能力を備えることが求められる。

- ・ 技術力：特殊環境ロボットの理解や評価等に必要な技術的ポテンシャル
- ・ 実践力：訓練等、ロボットを使って見ることにより、試行錯誤しつつ開発を支援する能力
- ・ 運用力：メンテナンスや操作教育等、組織・運用面での能力
- ・ 決断力：異常時に出段等の決断の権限が明確にされ、また混乱が生じないようにマニュアル化されていること。

また、あわせて、以下のような運用手法づくりが必要である。

- ・ 運用イメージ、運用ルール
- ・ ロボット評価手法の確立、実証フィールドの整備
- ・ ロボットを有効活用するための関連システムの整備
- ・ 維持・メンテナンスや操作のスキル、人員教育

これらは一朝一夕には進まないため、まずは将来的に運用を担い、そのための各種整備を行うことをミッションとする専門組織を設けた後に、国によるプロジェクトなどを加速要因とし、ユーザ、ディベロッパー双方参加による評価・実証を進める中で、段階的に整備していく必要があると考えられる。

また、災害対応に関して国内の叡智を結集するに留まらず、広く海外と連携して開発・実証・運用を進めていくことが重要である。特に、**Disaster City** 等の実証フィールドの整備や、米国国立標準技術研究所（NIST）主導で進められているような評価基準の標準化において先行する米国との連携関係について、現在の個人・機関レベルのものから国レベルの連携に強化していくことが、我が国ひいては世界全体の特殊環境用ロボット開発・実用化の進展に繋がると期待される。

1-2-4 (参考) 災害時の技術支援に係る既存の取り組み (国土交通省 TEC-FORCE)

大規模な自然災害発生時に、被災地を技術的に支援する専門家を派遣する仕組みとして、国土交通省が平成 20 年度に創設した「緊急災害対策派遣隊 (TEC-FORCE)」がある。

全国の地方整備局と事務所を中心とする国土交通省各組織の職員、合計 3,546 名 (平成 24 年 4 月 1 日現在) が任命されている。災害対策用機材 (ヘリコプター、排水ポンプ車、照明車、衛星通信車、応急組立橋等) を全国に配備しており、迅速な被害状況調査や現地での応急対応が可能となっている。また、TEC-FORCE に任命された職員は、平時から研修や訓練を行うこととしている。

災害発生時には、大臣 (災害対策本部長) 指揮命令のもと、全国の各地方整備局等が以下の活動を実施する。

- 被災状況の調査
- 災害緊急対応
  - ・緊急輸送路の確保
  - ・緊急湛水排除
- 被災地方自治体の支援
  - ・リエゾンの派遣
  - ・衛星通信車等の派遣による通信網確保
  - ・災害復旧に関する技術指導や助言
- 二次災害の防止
  - ・応急対策の立案・実施
  - ・被災箇所の危険度予測

隊員は河川、砂防、道路、港湾、建築、電気、機械、下水道等の専門技術者等で構成され、あらかじめ任務別に班編成を行うことにより、速やかで的確な対応を可能にしている。

図表 1-27 TEC-FORCE 各班の活動内容

各班(任務)	活動内容
先遣班	被災直後から先行的に派遣し、被災状況や必要応援規模を把握するとともに、派遣元への情報連絡により支援体制の強化を図る
被災自治体支援班(リエゾン)	被災直後から先行的に派遣し、被災状況や被災自治体の支援ニーズを把握し、被災地方整備局等の災害対策本部に伝達するほか、自治体業務の支援を実施
現地活動調整班	現地のTEC-FORCE各班と災害対策本部との連絡調整、技術支援に係る派遣元の地方支部局等との連絡調整、災害情報、応急対策活動等との情報収集
情報通信班	国が保有する衛星通信車、Ku-SAT(小型画像伝送装置)等の機材を活用し、被災地の映像情報配信や災害対策に係る被災地の通信回線を確保
高度技術指導班	特異な被災事象等に対する被災状況調査、高度な技術指導、被災施設等の応急措置及び復旧方針樹立の指導を実施
被災状況調査班(ヘリ調査)	災害対策用ヘリコプターにより、広域にわたる被災状況調査を実施
被災状況調査班(現地調査)	踏査等により、公共土木施設等の被害状況を調査し、被災箇所の早期把握を実施
応急対策班	国が保有する照明車、排水ポンプ車、応急組立橋梁等の資機材を活用し、被災地の応急対策を支援する

出所：緊急災害対策派遣隊（TEC-FORCE）について（国土交通省）

東日本大震災においては、全国から TEC-FORCE が総動員され、最大で 1 日 500 名を超える隊員が、必要な資機材とともに被災地に派遣され、応急対策や被害拡大防止等の活動を実施した。

図表 1 - 2 8 東日本大震災への TEC-FORCE の派遣



出所：緊急災害対策派遣隊（TEC-FORCE）について（国土交通省）

一方、TEC-FORCE のさらなる迅速な活動に向けた課題も明らかになった。これを受けて国土交通省は、TEC-FORCE のさらなる体制強化を打ち出している。

具体的には、今後発生が想定される首都直下地震や東海・東南海・南海地震等の大規模災害時において、全国からの TEC-FORCE の迅速な派遣や、それぞれの派遣隊の組織を超えた被災地での統合的な運用などが可能となるよう、「緊急災害対策派遣隊の設置に関する訓令」を定め、大臣の指揮監督のもと、被災地での指揮監督権を現地の地方整備局長等に集約するなど TEC-FORCE の指揮命令系統の明確化を図るとともに、TEC-FORCE を専門的に担当する事務局を設置して具体的な活動計画の策定や隊の管理・運営を行うこととした。

TEC-FORCE の取り組みは、災害対応ロボットの運用においても参考になるものであ

る。専門性を有する人材を予め組織化し、平時から研修や訓練を実施、また、指揮命令系統の明確化を図ることで、実効性が高まると考えられる。

#### 【参考】

- ・ 田所諭「大都市大震災軽減化特別プロジェクトで開発されたロボット技術」(*建設の施工企画* '08.9)
- ・ 田所諭「東日本大震災の教訓」(*ロボット No.206*)
- ・ 田所諭「管内走行ロボット」(*ロボット No.193*)
- ・ 松野文俊「東日本大震災でのロボットを用いた支援活動と今後の課題」(*ロボット No.206*)
- ・ 今堀崇弘「市民の理解と選択が災害対応ロボットを強くする」(*季刊 中国総研 2011 Vol.15-3 No.56*)
- ・ 小柳栄次「災害対応ロボット Quince の実用化と課題」(*ロボット No.206*)
- ・ 野口正男「管路点検用水中ロボット」(*ロボット No.193*)
- ・ 建部昌幸「鋼板厚さ測定ロボットによる厚さ(板厚)測定事例紹介」(*ロボット No.193*)
- ・ 遠藤健「タイル診断ロボットの開発と適用事例」(*ロボット No.193*)
- ・ 秋山和夫「道路・橋梁等の保全作業ロボット—適用事例」(*ロボット No.193*)
- ・ 資料：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
- ・ 日本ロボット工業会 H20 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
- ・ 緊急災害対策派遣隊 (TEC-FORCE) について (国土交通省)
- ・ 【報道発表】国土交通省緊急災害対策派遣隊 (TEC-FORCE (テックフォース)) の更なる体制強化を図ります (国土交通省)

# 我が国が取り組むべき中長期的課題の明確化

## 報告

2013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

## 2-1 調査の目的と概要

これまでに発生した災害・事故、および、それを防止するための平常時におけるインフラ・メンテナンス等の利用ニーズ等について、現状の特殊環境ロボットや無人化施工技術等の研究開発のレベルや制度、国等における研究開発の動向、特殊環境ロボットの市場、研究開発・ビジネス等の人材の状況、国民全体の問題の理解、費用対効果、制度や組織の現状、等をふまえたうえで、「今何ができて、何ができないか」についての分析・整理を行う。それを踏まえて、特殊環境用ロボットの実用化と活用・配備においての中長期的課題や研究開発プロジェクトの骨太な内容や具体像、すなわち、「我が国が、これから、何をしたいかねばならないか」について具体的に整理・検討する。

その結果について時間軸と優先順位の検討を行い、中長期的視点から「いつ、何に取り組み、どのようにして実用化から配備へのステップを踏んでいくか」を検討する。そこに際しては、研究開発の具体的・定量的な内容はもとより、組織制度、ベンダー育成、市場化促進、人材の活用と育成、国際協力、規制と法制度、情報流通と国民の理解増進、などを考慮する。

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防災ロボットの施策についての調査を平成24年7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。

## 2-2 災害・事故・インフラ・メンテナンス等の適用におけるユーザニーズ

### 2-2-1 災害・事故におけるユーザニーズ

#### (1) 防災ロボット活用元年としての東日本大震災

災害状況に対応する特殊環境用ロボットの技術は近年研究開発が活性化した新しい分野である。それ以前には、日本では、水中捜索ロボットの配備が行われ、消火ロボットや要救助者運搬ロボット、爆発物処理ロボットの試作配備が行われてきた。1991年に発生した雲仙普賢岳噴火では、火砕流の危険がある現場の工事のために遠隔操縦の無人建機が開発され、無人化施工が行われるようになった。1995年に発生した阪神淡路大震災以降には、災害対応のためのロボット技術の高度化に関する必要性が叫ばれた。遠隔操縦および自律飛行の小型ヘリコプターが開発され、有人ヘリでは危険性が高い火山噴火の調査が行われた。2002年からは文科省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」（略称：大大特プロジェクト）（図2-1）[2]が開発され、大学等においても研究開発が活性化することとなった。

# 大大特 レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発

平成14～18年度 国際レスキューシステム研究機構 田所諭(東北大)

### 概観情報の収集

#### 上空からの情報収集



- ・インテリジェントヘリ (緊急情報収集エアロロボ)
- ・情報収集気球(定点観測用)

#### 情報収集インフラ機器



- ・レスキューコミュニケーションタ (家屋内分散要救助者センシング)

### 高度救助資機材

#### 瓦礫内での情報収集



- ・統合ヘビ型ロボット
- ・ヘビ型移動体機構(IRS蒼竜他)
- ・能動スコープカメラ
- ・レスキューツール(ジャッキ, 手動探査機, 3D棒カメラなど)
- ・無線トリアージタグ, 救出済タグ (救助ロジスティクス管理)

#### 地下街・瓦礫上からの情報収集



- ・統合地下街探査ロボット
- ・連結クローラ移動体機構
- ・投擲型システム(瓦礫高速踏破)
- ・操縦ヒューマンインタフェース (過去画像鳥瞰システム, 3次元地図生成, 標準化など)
- ・UWB電磁波人体探査センサ
- ・アドホックネットワーク

### 情報統合

#### 共通プロトコル・データベース

- ・情報伝送形式の標準化(MISP)
- ・収集情報データベースDaRuMa
- ・遠隔地より情報加工・情報統合・判断

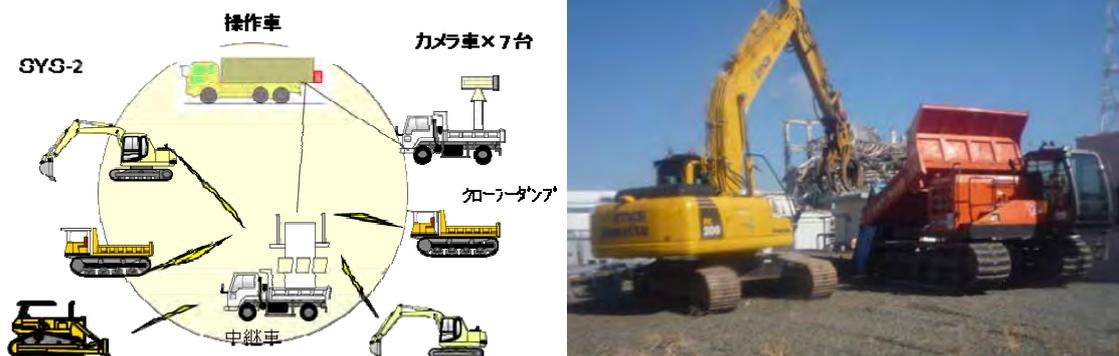
### 実証試験・訓練・デモ



- ・東京消防庁立川訓練所
- ・山古志村
- ・JICA国際緊急援助隊訓練
- ・FEMA訓練所
- ・新潟中越地震
- ・倒壊家屋実験施設
- ・ボランティア消防部隊IRS-U

図2-1 文科省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」(2002～2006年度)の成果の概要[2] (国際レスキューシステム研究機構提供)

東日本大震災では、さまざまな用途にロボットが使用された。福島第一原発の緊急対応・冷温停止・廃炉に向けた準備では多数のロボットが使用された(図2-2)。また、地震動や津波による構造被害調査(図2-3)、津波被害を受けた港湾調査や遺体捜索(図2-4)、放射線量計測などでも多数のロボットが使用された[3][4]。これは、人類の歴史上初の出来事であった。NPO法人国際レスキューシステム研究機構においても、図2-5に示すような活動を行った。今後、世界中の大規模災害においては、安全あるいは迅速に被害の終息を図るために、ロボットのような遠隔化技術・自動化技術を活用することが当たり前になると予想されている。



(a) 福島第一原発における、無人化施工システムの構成と、工事の様子(無人化施工協会提供)



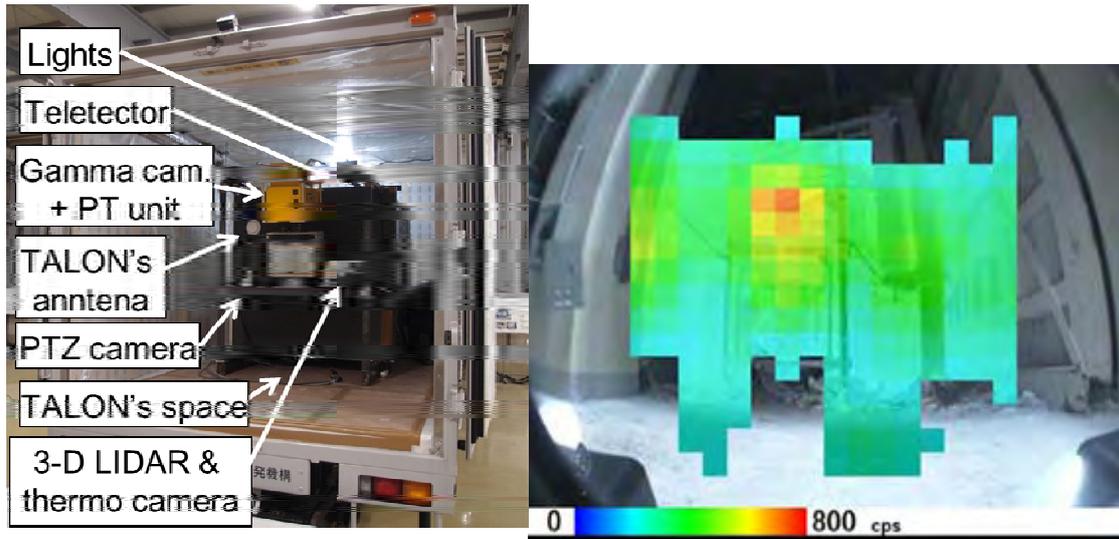
(b) 上空からの事故調査を行った飛行ロボット T-Hawk と、3号機の様子(Honeywell, 東京電力提供)



(c) 原子炉建屋内に初めて入り、内部(1階)を調査した PackBot と、建屋内の様子(iRobot, 東京電力提供)

図2-2 福島第一原発で使用されたロボット(その1)



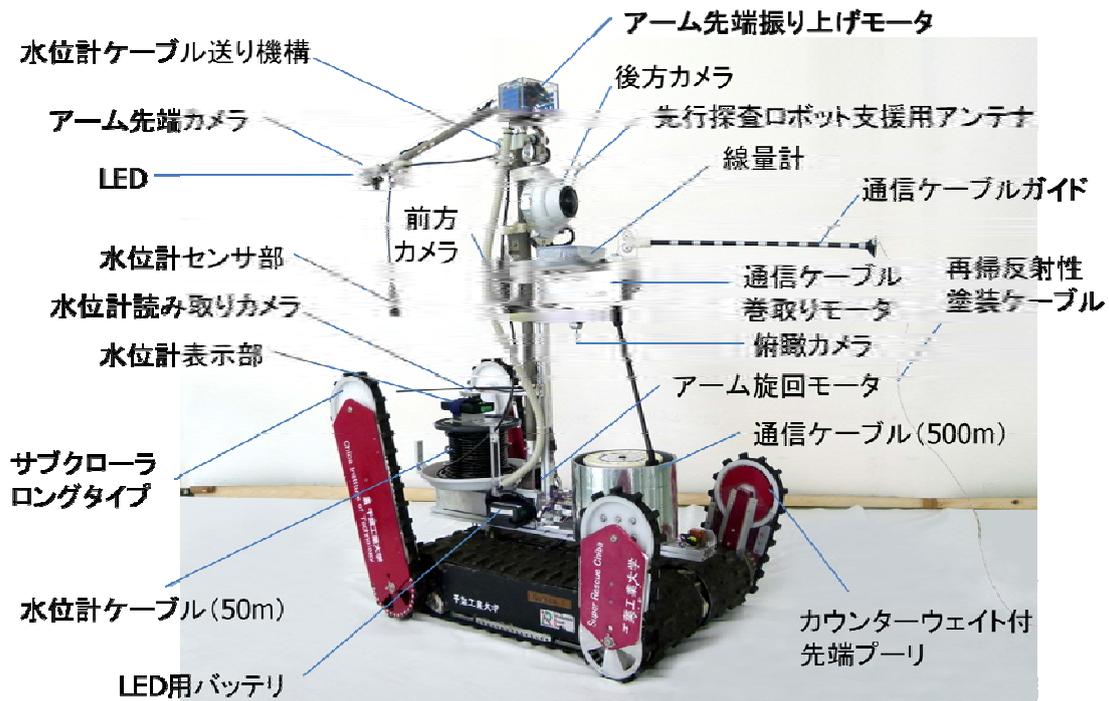


(g) 放射線源を調べるガンマカメラを搭載した TEAM NIPPON 車両と計測結果 (JAEA 提供)



(h) 建屋床面のダスト清掃を行った Warrior (東京電力提供)

図 2-2 福島第一原発で使用されたロボット (その3)



(i) 原子炉建屋の2階～5階に初めて入り、内部を調査した Quince とその操縦画面（国際レスキューシステム研究機構、東京電力提供）

図 2-2 福島第一原発で使用されたロボット（その4）



図 2-3 地震動によって被災した全壊建物内を調査する Quince（国際レスキューシステム研究機構提供）



図 2-4 港湾での遺体捜索と被害調査に使用された水中ロボット（国際レスキューシステム研究機構提供）

## （2）災害の様相の変化と、ロボットに対するニーズ

災害は時間によってその様相を刻一刻と変化させる。一般的には、その変化を図 2-5 のような 4 つのフェーズに分類することが多い。これら 4 つのフェーズのそれぞれにおいて、求められる防災の内容は異なっている。

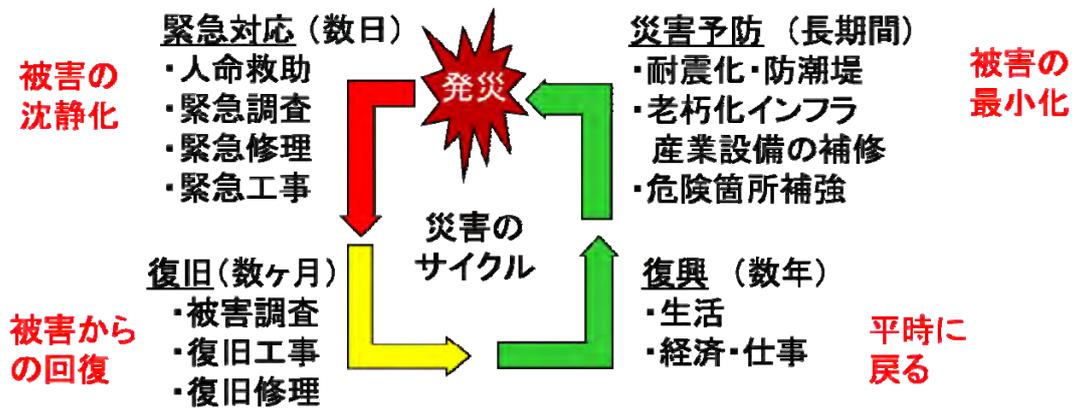


図 2-5 災害の様相の時間変化と、様相によって変化する防災ニーズ

### 1) 災害予防フェーズ

災害が発生する前の期間である。この時期においては、地震・津波・台風・豪雨が起きても、被害に発展することを未然に防ぐ、あるいは被害が一定規模で収まるようにすることが必要である。そのためには、耐震化、老朽化インフラの補修、危険箇所の補強、発災直後の緊急対応を適切に行えるための備え、などが重要であり、その如何によって発災後の被害の程度が大きく異なる。

1974年に発生した宮城沖地震を教訓として、1978年に建築基準法が改正された。その結果、阪神淡路大震災の建物倒壊被害を見ると、それ以前に建てられた建物と以後に建てられた建物では、倒壊率が大きく異なる結果となっている。東日本大震災では、東北大学青葉山キャンパス（宮城県仙台市）においては、改正前の建物で耐震補強を行っていなかった建物では大きな構造被害が見られて建て替えが必要となったのに対し、同時期の類似構造の建物でも耐震補強を行っていた建物には大きな被害は発生しなかった。トヨタ東日本の岩手工場（岩手県金ヶ崎市）では、2009年の岩手宮城内陸地震の経験を基に徹底した地震対策を行っていた結果、その2年後の東日本大震災では、数日後には生産が可能な状態に復旧できるほど被害が少なかった。ソニー仙台テクノロジーセンター（宮城県多賀城市）では、震度6にも耐えられるように工場敷地内配管設備の耐震化を進めていた結果、津波被害を受けながらも配管系の被害は限定的であり、3ヶ月後には一部生産を再開することができた。ラピスセミコンダクター（宮城県黒川郡大衡村）では、早期地震警戒システムを導入し、地震動に先だってガス供給や機器稼働を停止させる対策を行っていた結果、新潟中越地震での三洋電機のように工場内が汚染されて危険な状態に至るようなことがなく、水の供給が復旧した地震の数週間後には生産を再開することができた。これらの事例を、表2-1にまとめて示す。

これらの事例から明らかなように、事前対策を十分に行っておけば、地震などの自然災害が起きた場合でも大きな被害に至ることなく、早期に通常状態に戻すことができる可能性が高くなる。このように、災害に対するレジリエンスを向上させることは、根本的な防災対策であり、極めて重要である。

現在、インフラや産業設備の老朽化を調査するためには、多くの場合は足場を組んだ工事を行う必要があり、必要かどうかわからない段階では調査を行うことが難しく、工事が明らかに必要となるまで放置されているケースが多い。簡便で安価に使用できるロボット

が普及すれば、最初の調査を手軽にコストをかけずに行うことが可能になるため、老朽化対策や補修や耐震化を進めやすくなると期待される。

表 2-1 東日本大震災においてインフラや産業設備の耐震化が効果を奏した事例

事例	効果
東北大学青葉山キャンパス (宮城県仙台市)	電子情報システム・応物系 1 号館は昭和 30 年代に建設され、6 階までが耐震補強されていた。東日本大震災によって、補強されていなかった 7 階以上が全壊となり、エレベータが落下し、倒壊の危険のため取り壊されることとなった。一方で、同時期に建設された機械知能系 1 号館、2 号館は上階まで耐震補強されていたため、構造被害はなかった。
トヨタ東日本岩手工場 (岩手県金ヶ崎市)	2009 年の岩手宮城内陸地震で長期にわたって生産が停止した経験をもとに、生産設備に対して徹底的な地震対策を行っていた。東日本大震災では生産中の車両の脱落などがみられたものの、生産設備の被害は小さく、数日後には、部品や電気などの供給さえ整っていれば生産を再開できるレベルにまで復旧することができた。
ソニー仙台テクノロジーセンター (宮城県多賀城市)	化学プロセスの配管などを震度 6 にも耐えられるように補修と耐震化を進めていた。そのため、津波によって工場は大きな被害を受けたが、配管系の被害はそれほど大きくならなかった。もしも配管の補修と耐震化を行っていなければ、回復不能で全滅していたと考えられ、ソニーは工場を撤退していただろうと考えられている。
ラピスセミコンダクター (宮城県黒川郡大衡村)	かねてより、早期地震警戒システムを導入した緊急停止や、地震動によって生産設備が動くことを防止する対策を行うなど、万全の地震対策を行っていた。そのため、東日本大震災による被害は軽微であり、水などの供給の問題や従業員の安否の問題を除いては、すぐにでも生産を再開できるところまで復旧することができた。

いつ起きるかわからない災害に備えるために大きな投資を行うことは一般的には困難である。発生確率が低い場合、投資合理性を定量的に説明することが難しく、その必要性が理解されないことが多い。

このような解析に使われる手段として、確率的安全性評価 (PSA) がよく知られ、原発の安全性評価などでよく使われている (図 2-6)。この手法は、理論的に考え得るすべての事故シーケンスを対象とし、異常・故障等の起因事象の発生頻度、発生した事象の拡大を防止し影響を緩和する安全機能の喪失確率、および、事象の進展・影響を、定量的に分析・評価することにより、その発生確率、影響の大きさ、および、両者の積 (リスク) を基にして、総合的な安全性を評価するものである [5]。この方法は、決定論的安全評価と比べると、合理的な評価を定量的に与えることができるため、頻度の高い故障や、比較的単純なシステムの場合には、明らかに有効性が高いと考えられる。

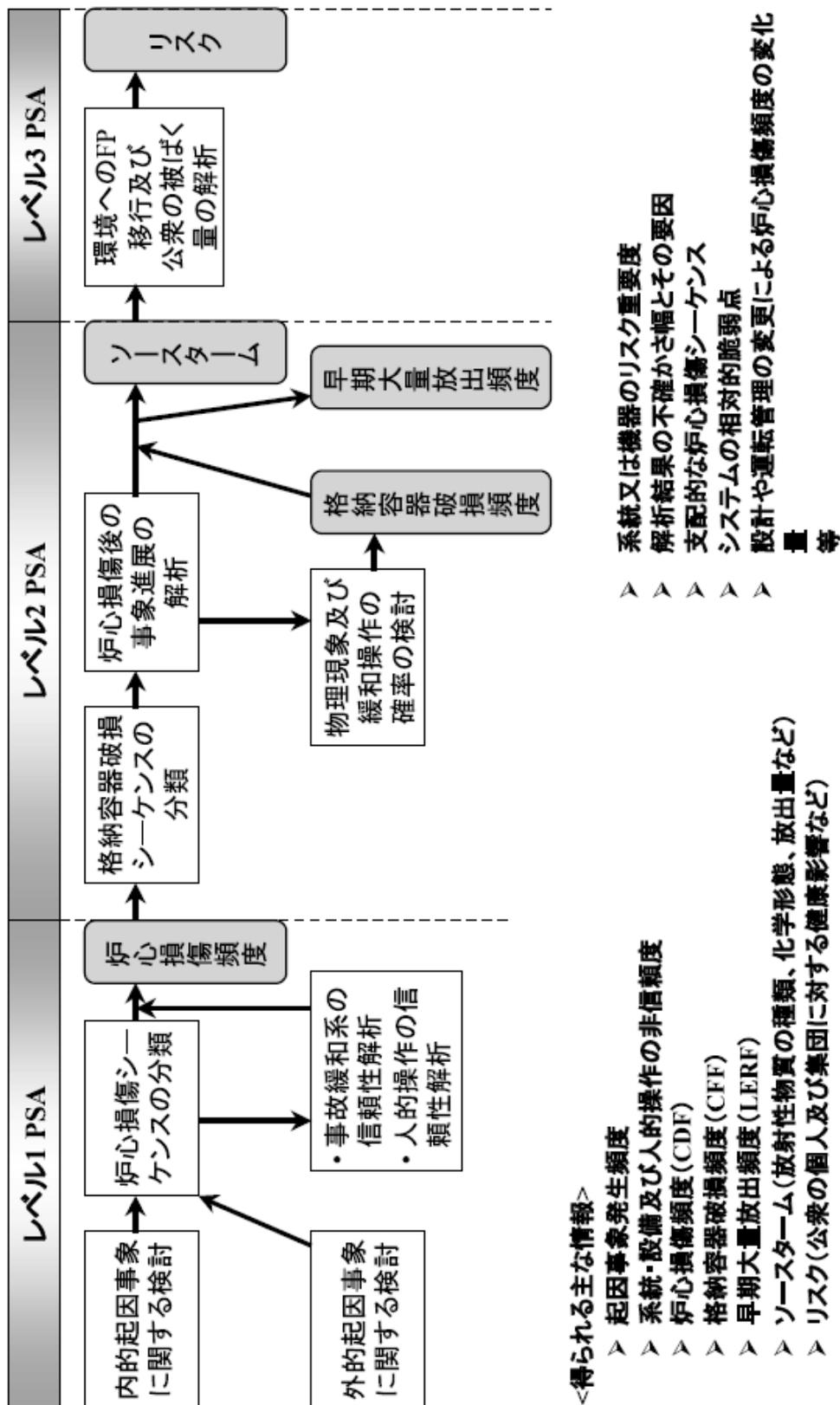


図2-6 確率的な安全評価 [5]

しかしながら、そのもととなる事象の発生確率が極めて低い場合には、その発生頻度や機能喪失確率の推定確度も極めて低い。システムが複雑な場合には、事象間の連関や事故シーケンスをすべて尽くして考慮することが困難であり、特に発生確率の低い基本事象を見落としてしまう可能性がある。さらには、長期使用や事故などによってどのように劣化が進んでいるかは、容易に予測することができず、いまだ未知の科学的現象が存在する可能性すら否めない。このようなケースでは、PSAによって得られた安全性の評価値の精度は低くならざるを得ない。したがって、評価値をそのまま鵜呑みにして使用できるまでの解析結果が得られるわけではない。つまり、もしもその目的で評価を行ったのであれば、PSAは有効な手法とはいえない。このような問題をどのように取り扱うべきかについては、今後の学術的な研究により、根本的に解明されていかねばならない。

さらには、PSAを行うことは非常に大きなコストが必要となるため、原子力プラントのような安全性が極めて重要な施設を除いては、徹底的な解析を行うことが困難な場合が多い。これを簡便化し、かつ、その効果を高めるような研究開発が望まれる。

システムの現在の状態は、設置されたセンサによってごく一部を直接計測できるだけであり、それ以外の部分は間接的に推定できるだけである。長期使用や事故などによる劣化がある場合には、推定のためのモデルが設計時と異なる可能性があり、推定値の信頼性は限定的である。確度を上げるためには、できるだけ多数のセンサデータを収集するとともに、劣化に対する徹底した調査・点検を行い、不明点を無くしておくことが必要である。ところが、プラントや建築物等をくまなく調査・点検することは、コストの面からも技術の面からも、不可能である。

この問題に対しては、将来、ロボットが技術的なブレイクスルーをもたらす可能性があり、また、ロボットを使用することによってコストを低減できる可能性が高く、その場合には、根本的な解決を生み出すことができると考えられる。それは、経済的な効果は極めて大きい。ロボットの経済的な価値を考える際には、ロボットの販売が生み出す利益だけを考えるのではなく、ロボットでなければできないサービスが社会システムにもたらす価値を総合的に解析することが重要である。

## 2) 発災・緊急対応 (Response) フェーズ

災害が発生した直後からの数日間がこの期間にあたる。この時期においては、人命救助や、被害拡大を防止する措置（消火など）が重要である。

この期間は急性期であり、災害被害が急激に拡大、あるいは、状況が突然変化するようなことが多い。たとえば、建物の倒壊が発生し、津波が発生し、それが火災の発生・延焼につながる、というようなケースである。

以下に、人命救助の典型的な手順を示す。

### 1) 災害発生の覚知

災害被害が発生したことに気づくプロセス。たとえば、倒壊家屋からの人命救助の場合、要救助者が発する声が聞こえる場合や、あるいは、家族や隣人からの聞き取り情報によって、要救助者の存在が覚知される。その他、臭気、音、色の変化、濡れ、足場不安定、などのさまざまな兆候によって、被害発生が覚知される。

### 2) 災害の状況把握

災害対応においてまず行わなければならないのは、現場や周囲の状況把握である。たとえば、倒壊家屋からの人命救助の場合、家屋の構造の状況（安定性、内部の危険性など）、内部への進入や運搬の経路の調査、周囲の状況（火災など）の調査、外部からの声かけや救助犬による要救助者のおよその位置の推定、等、さまざまな仕事を挙げることができる。

### 3) 救助活動の計画手配

収集した情報に基づいて、救助活動の手順や使用する資機材などを計画する。たとえば、倒壊家屋からの人命救助の場合、家屋の倒壊を防止して安全を確保するための補強、瓦礫の撤去手順、要救助者の確保や搬出の手順などである。

### 4) 要救助者探索・情報収集

要救助者の探索を行うとともに、さらに詳しい現場状況の情報を収集する。たとえば、倒壊家屋からの人命救助の場合、瓦礫の崩壊を防止する措置を行いながら内部に進入し、声かけを行いながら要救助者を発見するとともに、内部の状況を詳細に調べ、救出するために必要な情報を収集する。

### 5) 要救助者応急確保作業

要救助者を災害現場で確保する。たとえば、倒壊家屋からの人命救助の場合、要救助者の位置や容態などを調べ、指揮者に対して報告を行い、要救助者を拘束している障害物を取りのけ、瓦礫内から搬出する。

### 6) 緊急医療・応急処置

要救助者に対して応急処置を行う。倒壊家屋からの人命救助の場合、気道確保などを行う。また、要救助者に覆い被さっている柱などを撤去するとクラッシュシンドロームを発生させる可能性があるため、瓦礫内からの搬出前に点滴を行ってそれを防止する必要がある。

### 7) 医療機関への搬送・治療

要救助者を医療機関へ搬送する。大規模災害の場合、交通網が寸断されていて運搬に困難を極めるほか、医療機関や医療従事者の被災や、治療を要する患者が集中することによって、平常時のような機能を発揮できない場合も多い。

このような現場でロボットが必要とされる機能は、緊急対応のための補助手段としての機能である。すなわち、上記の作業を遂行するために、人間や従来型の資機材の能力を超える場合、危険性が高く遠隔での作業が必要な場合、ロボットの導入によって迅速化や効率化が図られる場合、等において、ロボットを使用することによって、従来の方法論よりも効果的な救助を行うことができると考えられる。

その他、避難、水・食料調達、排泄処理、帰宅、家屋の応急処置、などの問題があり、それに対してもロボットが適用できる可能性がある。

緊急対応のフェーズは数日間で終了し、その短期間に集中して一時的に大規模な資機材の需要が発生する。資機材によっては、緊急対応のためだけにしか役立たない物も存在するが、調達者の論理として、投資合理性の説明が困難な場合がある。ロボットは高価であるため、特にその傾向があると考えられる。そのため、緊急対応以外のフェーズ（復旧や平時）に使用されていることが望ましい。一方で、ロボットでなければできない作業に関しては、その必要性が理解されやすいと考えられる。

緊急対応ロボットに限らず、緊急時の機材が有効に機能するためには、平時から使われていること、使用訓練などが十分になされていること、使用できる操縦者のチームが多数揃っていること、十分に大量に配備されていること、その機能が十分に認知されていること、実運用されていることが必要である。我が国では、機能を発揮できるシステムはあっても、それが事前に運用されていないという問題点があった。

このフェーズにおけるロボットの経済的な価値を考える場合、ロボットの販売額の見積もりを行うことには意味がない。すなわち、ロボットによって、人命の喪失が防止され、家族や社会が維持されることを、価値として評価しなければならない。あるいは、災害が起きても大きな被害に拡大しない安心感を、価値と考えなければならない。

経済活動はすべて人間によってなされるものである。企業の技術やノウハウの多くは暗黙知として従業員の頭脳の中に存在し、企業経営は誰がやっても同じ経理事務によって行われるのではなくて優れた経営者の恣意的な決断によってなされるものである。従業員が元気に働けるために家族が果たす役割は大きく、家族の安否が不明の状況では仕事が手に着かない。このような企業活動の基盤をあたりまえのこととして顧みるとき、従業員やその家族の人命を重視する姿勢は、企業経営として当然のことである。

第2代住友総理事であった伊庭貞剛は日本におけるCSRの草分けとして知られている。「君子財を愛す、これを取るに道有り」という彼の言葉は、新居浜惣開精錬所の亜硫酸ガス煙害と甚大な健康被害に際して「別子全山を旧（もと）のあをあをとした姿にして、之を大自然にかへさねばならない」として、別子鉱山の2年分の純利益をかけて精錬所を沖合の四阪島へ移転させ、年間100万本の植樹を続けた。伊庭貞剛に代表されるような総合的な物の見方は、現在は、我が国の大企業の経営における基本方針として、ある程度定着しているのではないかと考えられる。

ロボットの効果を狭い範囲のそろばん勘定によって評価するのではなく、社会全体の価値の観点から深く議論する必要がある。

### 3) 復旧 (Recovery) フェーズ

緊急対応時を脱して、災害によって生じた被害を回復し、平常状態に戻るフェーズである。復旧対象としては、上下水・電気・ガス・通信などのライフライン、道路・橋梁・トンネル・電車・港湾などのロジスティクス、家屋・ビルなどの建造物、工場・プラント・商店・オフィスなどの産業施設、堤防などの砂防施設、土砂崩れ・土砂ダム・火砕流・土石流・水害などの自然現象、等を挙げることができる。数日間で元の状態に戻るものもあれば、大規模災害の場合には数年間を要するものもある。

復旧作業の典型的な手順は下記のようなものである。

#### 1) 被害発生の覚知

被害発生を知るプロセス。緊急通報、警戒巡回、定点カメラなどによって覚知される。

#### 2) 被害の状況把握

復旧作業を行うために、現地の状況を調査する。

#### 3) 復旧作業の計画手配

復旧計画を立て、必要な資機材の手配を行う。

#### 4) 被害調査・情報収集

復旧作業を進めるために、現地の詳細な被害状況を調査する。

5) 被害箇所応急修繕作業

被害箇所を応急修繕する。

6) 被害構造物撤去

被害を受けた構造物を撤去し、新しい構造物の設置等を可能にする。

7) 修繕・新構造物搬入設置

被害箇所を修繕する、あるいは、新しい構造物を搬入、設置する。

以上の手順は2) で述べた緊急対応と酷似している。すなわち、このプロセスは

1) 情報収集と計画

2) 復旧作業

の2つからなっていることがわかる。

以上をまとめると表2-2のようになる。

表2-2 災害における緊急対応・災害復旧の手順

	救助の場合	復旧作業の場合	キーワード	種別
1	災害発生の覚知	被害発生の覚知	覚知	情報 収集
2	災害の状況把握	被害の状況把握	状況把握	
3	救助活動の計画手配	復旧作業の計画手配	計画手配	
4	要救助者探索・情報収集	被害調査・情報収集	情報収集	
5	要救助者応急確保作業	被害箇所応急修繕作業	応急作業	復 旧 作 業
6	緊急医療・応急処置			
7	医療機関への搬送	被害構造物撤去	撤去搬送	
8	治療	修繕・新構造物搬入設置	治療修繕	

■ **情報収集**: 状況が不明. 被曝・有毒ガスの危険性. 高所・狭所など.  
→ 人間による調査の代替と精度向上. 適切な計画の立案

■ **復旧作業**: 作業の危険性. 被曝の可能性. 高所・狭所など.  
→ 人間による作業の代替. 総被曝量の低減

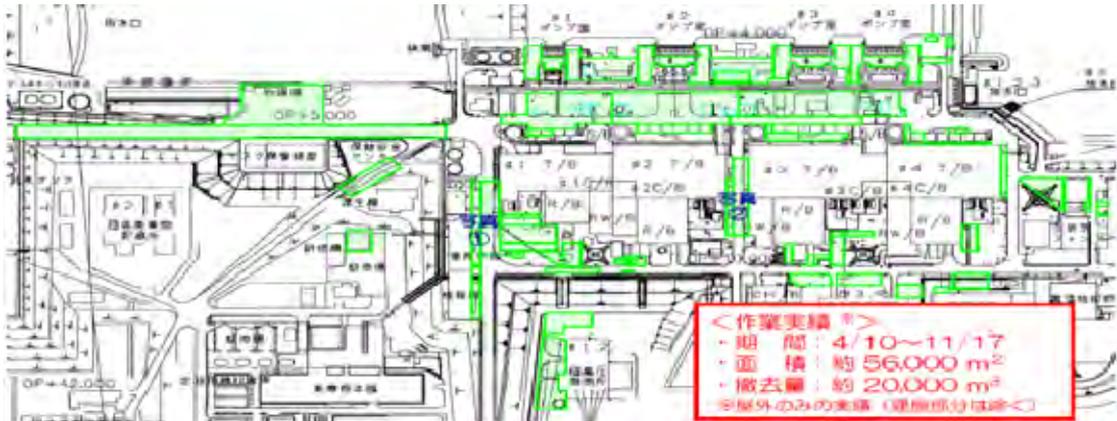


図 2-7 無人化施工による福島第一原発の屋外瓦礫の撤去範囲（無人化施工協会提供）

災害復旧作業は人海戦術によって行われてきた。ロボットはこのプロセスの中に、機材の一種として導入され、使用されることになる。

無人化施工は1990年から1995年にかけて噴火を繰り返した雲仙普賢岳の復旧工事を行うために開発された遠隔操作ロボット建設機械システムであり、1994年から現在に至るまで数々の災害現場で使用されている。福島第一原発で屋外に大量に散らばった汚染瓦礫の撤去には、無人化施工建機が多数使用され、作業員の被曝低減に大きく貢献した（図2-2(a)）。最も多いときで同時に16台のバックホー、クローラダンプ、カメラ車、操作車などが投入され、図2-7に示すように、瓦礫撤去を行った総面積は56,000 m<sup>2</sup>、撤去した瓦礫の量は20,000 m<sup>3</sup>にのぼった。これは、無人化施工が雲仙普賢岳などさまざまな現場で継続的に使用されており、操縦者、運用ノウハウなどが蓄積されていたからである。

産業施設に関しては、被害が長期化すると産業競争力が失われてしまうことが多い。すなわち、活動の休止によって顧客を他社に奪われてしまい、その後活動が再開できた段階でも顧客を取り戻すことが困難なためである。阪神淡路大震災では、神戸港が地震によって破壊された結果、貨物取り扱いの多くが国内や近隣諸国の港に移動せざるをえなくなった。ところが、港湾設備が完全に復旧した後でも、貨物取扱いは長期にわたって回復せず、神戸の港湾産業は壊滅的な打撃を受けることになった。

#### 4) 復興フェーズ

経済や被災者の心の復興には長い年月が必要である。1995年に発生した阪神淡路大震災でも、2013年の現在、未だに復興を遂げたとはいえない部分が残されている。

この目的のためのロボットは、平時に使われるサービスロボットや産業用ロボットと同じであるため、本報告書では説明しない。

#### (3) 災害においてロボットに期待される機能

災害においてロボットやロボット技術に期待される機能は、大別すると、「情報収集：災害現場の情報収集」と、「作業：被害軽減・復旧活動」の2つである。「計画」に関しては、ITによる意志決定支援を別とすれば、ロボットが直接貢献できる部分は少ないと考えられる。

### 1) 災害現場の情報収集

「災害現場の情報収集」としては、たとえば、被害発生の覚知から始まり、要救助者の発見、被害の状況把握、被害調査・情報収集、復旧作業の計画手配、事前の老朽化調査、などを挙げることができる。これらにおいてロボット技術が必要な理由は、たとえば、次のような項目を挙げることができる。

#### 1) 狭所、高所、水中等で人間が入れない場所の状況を、遠隔的に調べること

倒壊家屋の瓦礫の中や、足場を組まないと上がれない被災した橋や鉄塔や大規模設備、津波で水没した家屋や船の中など、人間が入るのは困難な場所において、救助を求めている人を発見し、そこにおける被害状況を把握し、救助や復旧の計画を立てることは重要である。ロボットを使うことによって、迅速に情報収集を行うことができ、救助における生存確率を飛躍的に向上させ、復旧を大幅に早めることができる。災害予防のために、老朽化した家屋や設備等を点検することは重要であるが、ロボットによって点検できる範囲が著しく拡大する。

#### 2) 汚染、火災爆発の危険、安全が確認できない場所の状況を遠隔的に調べること

放射能や化学物質による汚染の可能性のある設備内、事故で火災や爆発の危険がある場所、テロや有事などで予期しない事態発生の可能性がある場合など、人間が入って状況を確認したり救助に向かうには危険性が高く、二次災害が予想されるような場合には、勇敢な決死隊を結成するのではなく、ロボットに人間の代理として情報収集させることが必要である。

#### 3) 長期や広域のモニタリングを自動化してコストを下げること、位置情報と収集情報との統合精度を上げること

災害時における海中の広範囲の搜索、噴火が予測される火山の形状変化のモニタリング、放射線源分布のマッピングなどのケースでは、ロボットが情報収集を行うことによって精度向上やコスト低減を図ることができる。また、老朽化点検においても、足場を組む必要がなくなるなど、迅速化とコスト低減に寄与するため、これまで困難だった施設も点検が可能になり、災害時のリスクを下げるができる。

### 2) 被害軽減・復旧活動

「被害軽減・復旧活動」としては、たとえば、緊急医療、患者搬送、治療、応急修繕作業、被害構造物撤去、運搬、修繕作業、新構造物搬入設置、などを挙げることができる。ロボット技術の必要理由は、たとえば、

#### 1) 狭所、高所、水中等の人間が入れない場所で作業を遠隔的に行うこと

#### 2) 汚染、火災爆発の可能性のある場所などでの作業を遠隔化して、安全性を向上すること

#### 3) 長期にわたる定型的な作業を自動化してコストを下げ、品質を上げること

などを挙げることができ、情報収集と共通である。

### 3) ロボットが必要とされる理由の整理

これらから、ロボットが必要とされる理由を整理すると、図2-8に示すような3点に集約される。

被災地全体として、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可能性を減らし、経済的損失を最小限に食い止め、産業競争力の維持を図ることができる。日本の都市部の災害リス

クの高さは、我が国への投資を判断する上での大きなマイナス要因である。ロボット技術の適用によって投資リスクを下げることは経済活性化に寄与する。

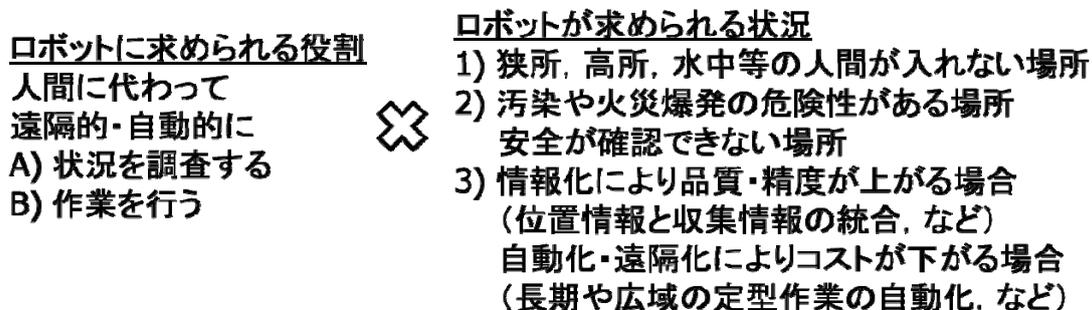


図 2-8 ロボットが求められる役割と、ロボットが求められる状況

## 2-2-2 インフラ・メンテナンス等におけるユーザニーズ

### (1) インフラの老朽化問題

戦後より高度成長時代に建設された建物やインフラが、40～50年を経て老朽化が進んできている。高度成長期からバブル期に建設された大規模プラントについても、その後の経済低迷期に設備更新が進んでおらず、プラントとしては老朽化が著しい。

老朽化した建物、特に、1981年建築基準法改正前に建設された建物では、災害被害が発生する可能性が高い。阪神淡路大震災では建築基準法以前に建てられた建物に被害が集中した。東日本大震災では、耐震補強を行っていなかった昭和30年代に建てられた東北大学の建物ではエレベータが落下して全壊となり、建築後70年以上を経た東京の九段会館ではホール天井が落ちて死亡事故が発生し、橋齢43年で耐用年数に達した茨城県北浦の鹿行大橋の中央部は崩落し、福島県庁や水戸市役所は使用不能となった。[6]

建設後50年以上経過したインフラの割合を表2-3に示す[6]。このデータは、今後急速に社会資本の老朽化が進み、倒壊や落橋等の事故が発生する可能性が高まることを示している。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は、開通から35年を経過して老朽化が進んだことが原因であり、老朽化が定期点検によって発見されず、修繕がなされなかったため事故に至ったものである。

表 2-3 建設後 50 年以上経過したインフラの割合

	2010 年度	2030 年度	2040 年度
道路橋 (155,000 橋)	8%	26%	53%
排水機場、水門等 (10,000 施設)	23%	37%	60%
下水道管渠 (430,000km)	2%	7%	19%
湾岸岸壁 (5,000 施設)	5%	25%	53%

従来通りにインフラの維持管理を行った場合に要する費用の変化を図2-9に示す[7]。内閣府 PFI 推進委員会の試算によれば、公共施設とインフラ（道路、橋梁、上下水道）に必要な更新投資の増加額は今後50年間にわたって年間6兆円とされている。

このような施設に対して、老朽化の早期発見・補修によって長期的視点からの予防保全を行い、インフラ自体の長寿命化を図ることは、事故を防止することはもとより、トータルコストを縮減するためにもたいへん有効である。そのためには点検・監視のための技術開発が重要である。たとえば、構造物の目視検査、超音波非破壊検査、打音検査、排水機等の機械設備の潤滑油分析による劣化診断、赤外線による漏水箇所同定など。

点検と早期・適切な補修の実現という課題に対して、インフラ点検・メンテナンスロボットは、点検の綿密化、あるいは、コスト低減のために有効であるケースがある。特に、高所の点検、狭く入り組んだ場所や地下埋設管の点検については、壁登りロボットや狭所点検ロボットを使用することによって、点検に要する時間の短縮、足場の設置やユニック車が不要、道路使用許可や誘導員配置が不要、などの著しいメリットがある。

たとえば、2008年の建築基準法の改正に伴い、竣工・外壁回収から10年を経た建物の外装タイルの劣化・損傷を、全面打診検査等により調査する事が義務づけられ、それから3年を経た2011年までに調査義務を負っている建物が数多く存在する。壁登りロボットによって調査が可能になれば、その実施のために必要な足場が不要となり、調査時間とコストを大幅に短縮することができる。

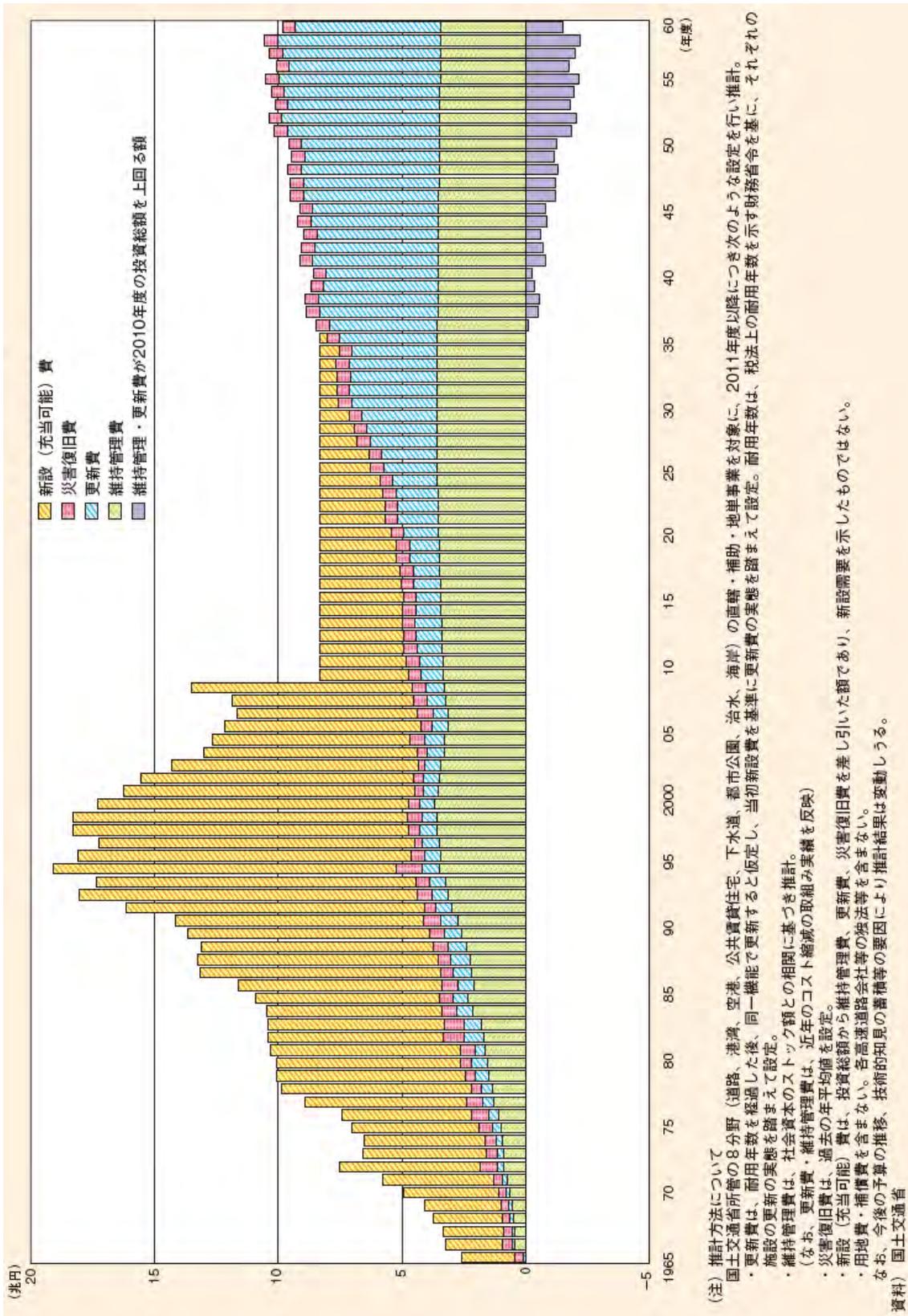


図2-9 従来通りの維持管理・更新をした場合に要する費用 [7]

## (2) 産業設備の老朽化問題

老朽化が進んでいるのは、インフラだけではない。長引く不況のため企業設備への投資が抑えられて来た結果、国内製造業の設備年齢（ビンテージ）は近年著しく上昇してきている。内閣府の資料[8]によれば、図2-10に示すように、バブル崩壊後の1992年より急上昇を続けてきた設備年齢は、2005年より低下傾向に転じていたものの、2008年のリーマンショック以降上昇に転じ、老朽化がさらに進んできている。鉄鋼プラントや石油化学プラントは、高度成長期に稼働を始めた設備も多く、内需の伸びが期待できないためスクラップ&ビルドによる大型投資が進まず、高経年化が著しい。

老朽化したプラント設備では、事故や不具合による運転停止などの頻度が高くなっており、火災やガス漏洩による死亡事故も毎年のように発生している。それに加えて、老朽化したプラント設備では、地震などの災害に対する頑健性が大きな問題になっている。東日本大震災では津波や地震動による設備の故障が多数発生し、燃料の積み出しができないなどの問題が発生して社会問題となった。一方で、震度6以上に耐えられるように耐震化工事を行っていたソニーテクノロジーセンター仙台のパイプラインは津波を受けたにもかかわらずその部分には被害が生じず、迅速な生産の回復に大きく寄与した。

老朽化した設備には特にプラントメンテナンスが重要であるが、団塊の世代の退職に伴って高い技術やノウハウを持つ設備維持技術者の不足が問題となっている[9]。人材不足によって事故が起きた際に適切な対応を取ることができず、大きな被害につながった事例もある[10]。

プラントの点検は、視認検査、打音検査、超音波やX線による非破壊検査などの方法により、人手で行われている。その際、下記のような悪環境では、点検が困難であり、コストとリスクが問題となっている。

- ・高所：危険性が高く、足場建設によるコストが高く、点検に時間を要する。
- ・狭所：パイプラインや橋脚の背面などの人のアクセスが困難な場所。
- ・悪性ガス：ガスタンクやパイプラインでは、毒性ガス・引火性ガス漏洩の可能性がある。
- ・高温：炉などの高温環境。
- ・高電圧：高電圧設備、上空架線など。
- ・放射能汚染：福島第一原子力発電所など。

これら悪環境においては、人間に代わって遠隔操作ロボットの活用が望まれる。現在、配管内点検ロボット、橋梁点検カメラシステム、鋼構造物点検ロボット、床下点検ロボットなどが販売され、使用されている。しかしながら、現状で点検できる範囲とセンサは限定されており、価格が高いなどの問題がある。今後、積極的にロボットの活用を進め、それによってロボットの実用化を促進し、我が国の産業設備老朽化の問題を効率的に解決できるようにしなければならない。

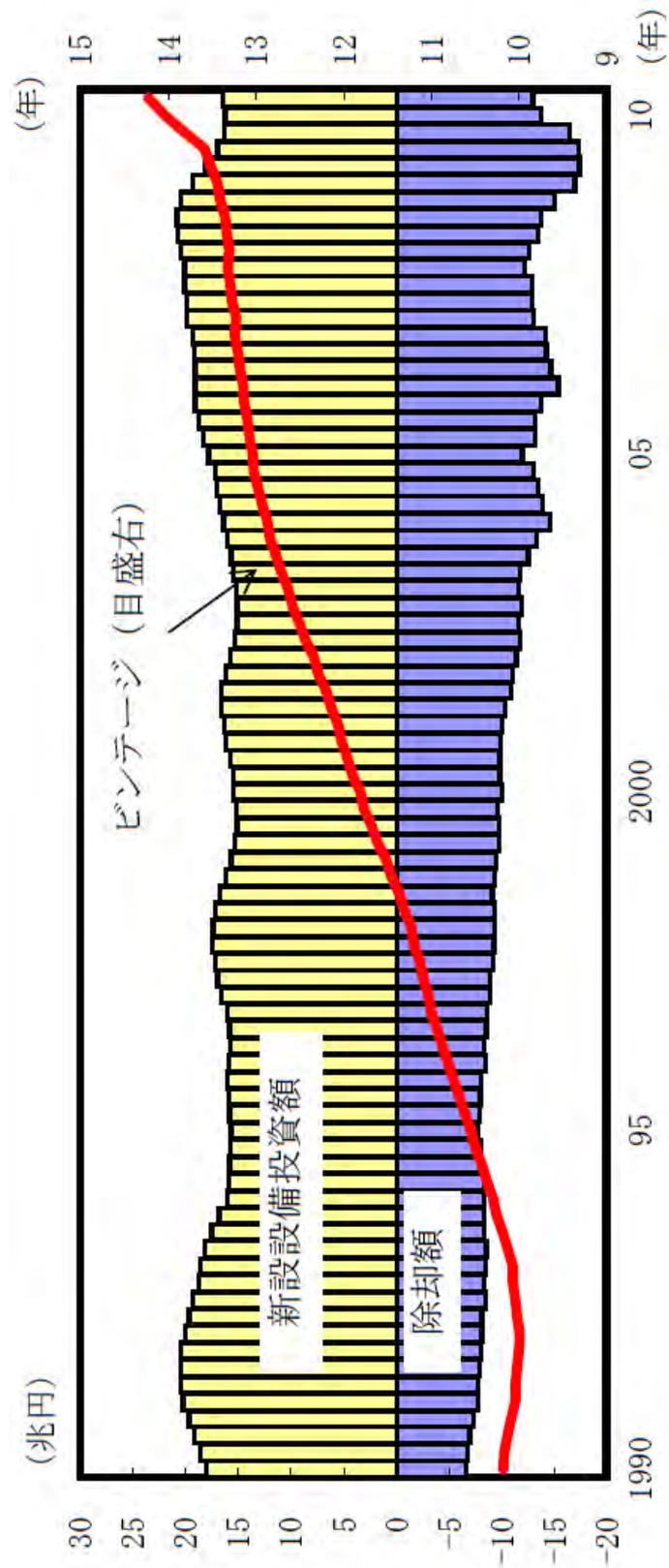


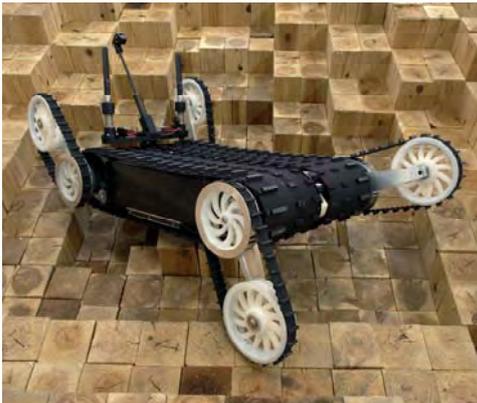
図2-10 全産業の設備年齢 (binテージ) [8]

2-3 災害・事故・インフラ・メンテナンス等に適用が期待される特殊環境用ロボット  
 さまざまな種類のニーズに対して、適用可能と考えられる特殊環境用ロボットの形態は多様である。しかしながら、災害現場での使用を想定した場合、下記のような形態のロボットが有効であると考えられる。

(1) 地上移動ロボット (Unmanned Ground Vehicle; UGV)

移動方式として、車輪、クローラを用いる移動ロボットであり、危険性が高く災害現場に入れない場所で、現場の状況を調べ、作業を行う。

たとえば、化学プラント・原子力プラント・石油関連施設・電力プラントなどの危険物質や高いエネルギーが集積している場所、地下街・高層ビル・下水内・工場建屋内・タンク内・床下などの閉鎖空間、崖崩れ・土石流・火砕流などのリスクが高い場所、テロや犯罪や有事で危険性が高いケース、など、人間が行うと二次災害の危険性がある現場で使用される。このような現場の状況を調べるための情報収集機能、災害被害軽減活動を行うための作業機能を持つ。現在実用化されている無人化施工の遠隔操縦建設機械、床下点検ロボットなどは、このカテゴリに属する。(図2-11)



(a) CBRNE 災害対応ロボット Quince



(b) 床下・設備点検走行ロボットエニーII S-90



(c) 双腕作業機アスタコ



(d) 小型探査作業ロボット MATILDA

図2-11 地上移動ロボット

(国際レスキューシステム研究機構、トピー工業、日立建機提供)

## (2) 脚型ロボット

2脚、4脚、6脚などの足による移動方式であり、車輪やクローラでは走破が困難な状況で、現場の状況を調べ、作業を行う。

たとえば、プラントで梯子の昇降が必要なケース、地面に走っているパイプラインや障害物をまたぎながら移動する必要があるケース、ロボットのボディ長の1/2以上の長さのギャップがあるケース、瓦礫や被災建物等で数十 cm 以上の高さの段差に登ったり降りたりする必要がある場合、などが相当する。(図2-12)



(a) 福島原発に投入された4足ロボット（東芝）

(b) ビッグドッグ

図2-12 脚型ロボット（東京電力，Boston Dynamics 提供）

## (3) パワースーツ型ロボット（Exoskeleton）

作業員が装着し、作業力を拡大するためのパワースーツであり、重量物の運搬や重量物の組み付けなどの工事作業を行う人間の作業を支援する。海外ではエクソスケレトンと呼ばれ、1950年代から多くの研究開発がなされている。特に、軍事用途で重量物を兵士が運搬する負荷を軽減するために開発され、DARPA Exoskeleton プロジェクトなどによって実用化されている。日本ではサイバーダインの研究開発が最も知られ、歩行障害者の支援を目的とした商品化がなされている。

災害等の特殊環境への適用を考えた場合、車両や運搬機材を入れることができる広い場所ではその必要性は小さいが、建物内やプラントの中の狭い場所、瓦礫などの不整地での作業、荷物の積み降ろしなどでは、有効性が高いと考えられる。(図2-13)



(a) HAL

(b) UC Berkeley Robotics and Human Engineering Lab

図 2-13 パワースーツ型ロボット (サイバーダイン, UC Berkeley 提供)

#### (4) 飛行ロボット (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)

小型のヘリコプターや固定翼機であり、昼夜を問わず低空飛行することが可能であり、大型ヘリでは収集が困難な広域の災害状況を迅速に調査する。あるいは、大型構造物の高い場所や、洪水や崖崩れ等によって道路でのアクセスが困難な場所、被災した建物の中などに飛行し、詳細な被害状況を視覚的に調査する。

多ロータ超小型無人ヘリや超小型固定翼機は、この5年間で飛躍的に性能の向上が見られ、GPS等のセンサの小型化も進んできたため、防災への活用が高く期待されている。(図 2-14)



(a) クワッドロータ型超小型無人ヘリ Pelican

(b) ヤマハ RMAX

図 2-14 飛行ロボット (Ascending Technology, ヤマハ発動機提供)

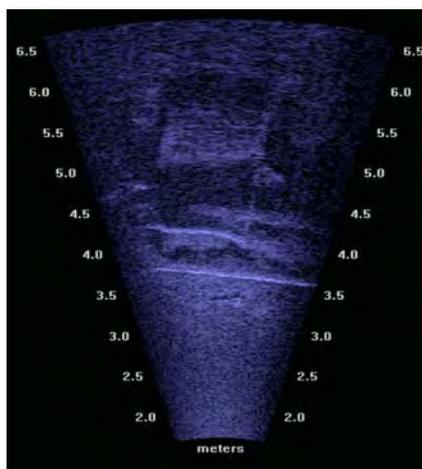
(5) 小型潜水艇 (Remotely Operated Vehicle; ROV)、自律潜水艇 (Autonomous Underwater Vehicle; AUV)、または、Unmanned Underwater Vehicle; UUV)、無人水

### 上艇 (Unmanned Surface Vehicle; USV)、水陸両用車

海中に流された人や瓦礫、海の汚染状況などを広域捜索する。自動化を図ることによって、効率よく捜索等を行うことができる。

水害によって、孤立した構造物や、水中に沈んだ危険な構造物内を有人船やダイバーに代わって調査する。土砂崩れによる自然ダム の状況を調査する。これらの現場は大変危険であり、遠隔化することによって二次被害を防止することができる。(図2-15)

水深が浅いためサルベージ船が使用できない水中で復旧工事を行う水陸両用車がある。船も陸上建機も使えないため、他の手段では工事が不可能である。



(a) SeaBotix ROV

(b) 海底のソナー映像

図2-15 小型潜水艇 (国際レスキューシステム研究機構提供)

### (6) 壁登りロボット

大型構造物 (ビル、産業設備など) の高い場所を、視覚や非破壊検査装置によって調査する。足場を組む方法と比べると、短時間に低コストで点検が可能であり、鋼構造配管の検査ロボットなどが実用化、販売され、使用されている。しかしながら、一般のコンクリート壁や、複雑な形状の鋼壁での移動能力は限定的であり、全ての場所を検査するには性能が不十分であることが多い。(図2-16)



(a) Inuktun Nanomag

(b) Clarifying Technologies Climber III

図2-16 壁登りロボット (国際レスキューシステム研究機構提供)

### (7) 狭所進入ロボット

倒壊した構造物や構造物の入り組んだ場所について、視覚やセンサによる調査を行う。直径500mm以下の配管については有人検査は不可能であるため、ファイバースコープや配管検査ロボットが実用化され、販売・使用されている。しかしながら、細径管や屈曲部においてはロボットの移動そのものが困難であり、被災した配管のように著しく変形、あるいは、傾いた管路の検査は大変困難なのが現状である。倒壊した構造物の瓦礫に関しては、能動スコープカメラが開発されているが、運動能力が現状ではまだ不足しており、引き抜きが困難であること、瓦礫内での進入位置を特定することが困難であること、などの問題点を有している。(図2-17)



(a) 能動スコープカメラ



(b) IRS 蒼竜



(c) 能動スコープカメラの災害適用

図2-17 狭所進入ロボット (国際レスキューシステム研究機構提供)

### (8) 地中掘削ロボット

土砂崩れ、雪崩、地震による倒壊などで埋もれた要救助者を、地面を掘削することによって捜索する。掘削のためのボーリングマシンは実用化されているが、災害対応を目的としてはいない。掘削により地中の空隙に達するまでは、カメラ映像等でのセンシングが不可能である。(図2-18)

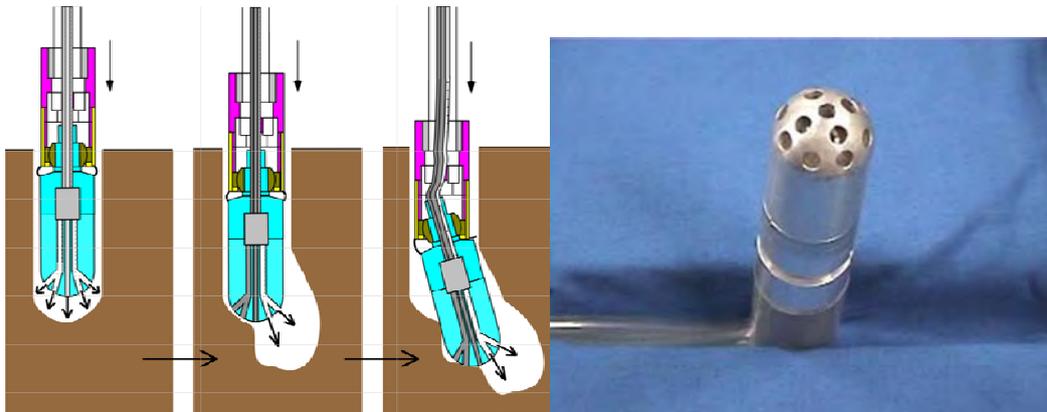


図 2-18 地中掘削ロボット（東工大塚越提供）

### （9）無人化施工

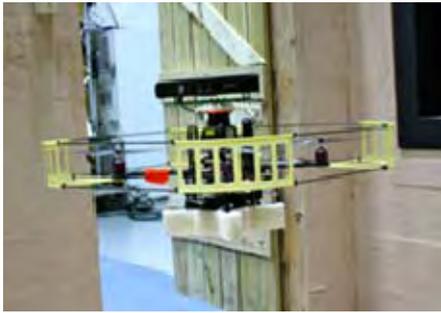
遠隔操作される建設機械であり、土石流などの危険性が高い工事現場において、有人建設機械に代わって作業を行う。雲仙普賢岳の復旧工事を契機として開発され、数々の災害に適用された実績を持っている。雲仙普賢岳の工事が長期にわたり、実システムとその技術が継続的に改良されてきたことが、その実績の源泉である。（図 2-19）



図 2-19 無人化施工（雲仙普賢岳）（国際レスキューシステム研究機構提供）

### （10）合体ロボット、システム化

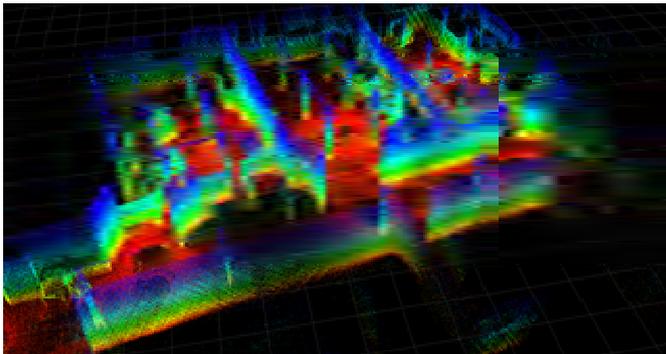
ロボットを他のロボットやシステムと組み合わせることによって、実用性能を確保する必要がある場合も多い。合体したシステムの例としては、車両に地上移動ロボットを搭載して運搬を容易にする、飛行ロボットを地上走行ロボットに搭載して飛行時間の制約を緩和する、狭所進入ロボットや壁登りロボットをクレーンなどを使って適用箇所まで運ぶ、などが挙げられる。システム化の例としては、作業ロボットと監視ロボットや通信ロボットとの組み合わせ、有人作業機と無人ロボットとの組み合わせなどが挙げられる。（図 2-20）



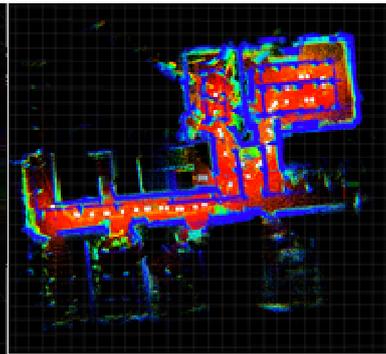
(a) クワッドロータ型超小型無人ヘリ Pelican



(b) 瓦礫走行ロボット Quince



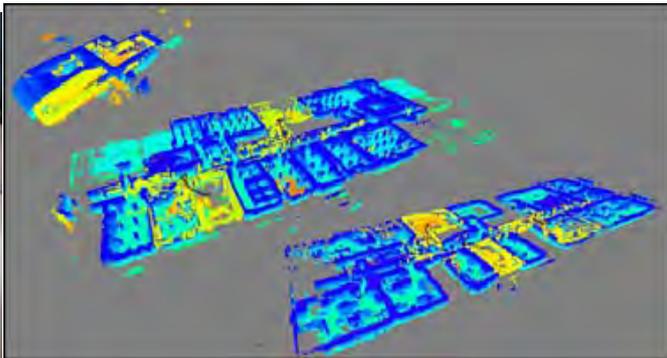
(c) Quince がリアルタイムに構築した 3 次元地図



(d) Quince による鳥瞰 3 次元地図



(e) Quince と Pelican の合体



(f) 2 台のデータ統合による建物内地図

図 2-20 Quince と Pelican の合体による被災建物調査  
(東北大学、U Penn、国際レスキューシステム研究機構提供)

## 2-4 特殊環境ロボットの技術の現状と課題

### 2-4-1 特殊環境用ロボットの構成

#### (1) ハードウェアの構成

特殊環境用ロボットは、人間に代わって遠隔操作あるいは自律制御で作業を行うロボットであり、次のようなハードウェア構成要素からなっている。

- 1) 移動機構：車輪、脚等。
- 2) 作業機構：アーム（マニピュレータ）、ショベル等。
- 3) センサ：カメラ、ロボット位置計測センサ、アーム回転角センサ等。
- 4) 制御装置：位置決め、自律知能等。
- 5) 通信装置：無線、有線。
- 6) 操作盤：ジョイスティック、ビデオスクリーン等。

前節3におけるロボットの分類は、上記の1) 移動機構による分類である。

#### (2) 機能の構成

特殊環境用ロボットは、次のような機能からなっている。

- 1) 移動機能
- 2) 作業機能
- 3) センシング・認識機能
- 4) 自律機能、半自律機能
- 5) 通信機能
- 6) ヒューマンインタフェース機能

これらの機能モジュール間では、図2-21のようにデータが受け渡されて、ロボットの機能が発現する。ロボットは、1) 移動したり、2) 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、3) 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5) 無線通信・有線通信によって操作者側に送られ、3) 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、6) 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。

この情報の流れは、PLAN-DO-SEEのフローであると考えられ、人間は仕事全体のデータフローの中ではPLANの機能に加えて、計算機では困難な認識や行動決定の役割も担っている。災害空間は多くの場合不定環境であるため、状況を自動的に認識したり、定型作業として行動を計画したりすることが困難なケースがある。そのような場合には、ロボットを完全に自律的に動作させることは無理であり、半自律機能によって人間が行う操作を支援する形態(Shared Autonomy)や、人間が自律機能を調節する(Adjusted Autonomy)が実用的なロボット知能として一般に採用されている。一方で、災害空間であっても空中

飛行するケースのように予期しない外乱が少ないケースでは、自律的な動作が容易であり、無人自律 UAV のような調査のための飛行体が実用化されている。

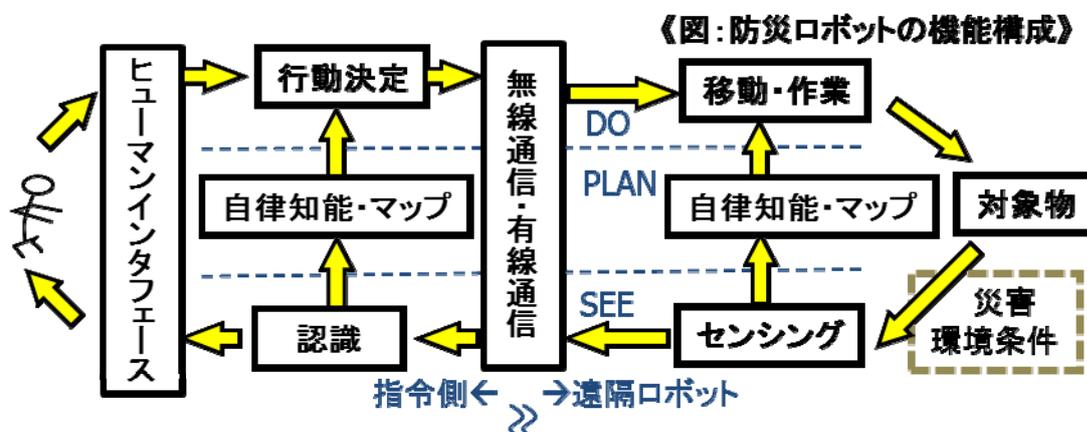


図 2-2-1 遠隔操作・自律制御ロボットの機能モジュールと、それらの間の情報の流れ

#### 2-4-2 特殊環境用ロボットの能力の評価

ロボットの能力や適用可能性を見積もるためには、まず、技術熟成度レベル (Technology Readiness Level; TRL) を念頭に置いて評価を行わなければならない。研究開発レベルと実用レベルでは、同じロボットや同じ機能であっても大きな隔たりがあり、「機能が発揮されることがある」研究ロボットと、「365日失敗することなく機能を発揮できる」実用ロボットを同列に論じることはできないからである。

NASA では、表 2-4 のように技術熟成度レベルを定義し、技術開発の指針を定めるために活用している[11]。同様に、欧米のさまざまな機関では、その内容に応じた技術熟成度レベルを独自に定義し、技術マネジメントに活用している。本調査では、この NASA による定義を防災ロボットにそのまま置き換え、表 2-5 のように技術達成度レベルを定義して用いることとする。

表 2-4 NASA の技術熟成度レベル (Technology Readiness Level; TRL) 定義[11]

TRL 1	Basic principles observed and reported
TRL 2	Technology concept and/or application formulated
TRL 3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept
TRL 4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment
TRL 5	Component and/or breadboard validation in relevant environment
TRL 6	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)
TRL 7	System prototype demonstration in a space environment
TRL 8	Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or space)
TRL 9	Actual system “flight proven” through successful mission operations

表 2-5 本調査のために、防災ロボットに翻訳した技術達成度レベル

- 【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。

東日本大震災では多数のロボットが使用されたが、それらの中にはさまざまなレベルがある。すなわち、非常に有用であって頻繁に継続して使用されているもの、特殊な作業の際だけに使用されたもの、故障が頻発して継続して使えなかったもの、1、2回使われてその後使われていないもの、デモや実験を行っただけで実際には使われていないもの、使うための準備を行って使われていないもの、などに分けられる。すなわち、何が本当に有効であったか、その問題点は何であったか、について実態を調査しなければ、誤った判断を導き出すことにもなりかねないため、注意が必要である。

特殊環境用ロボットにおいて評価すべき項目は、下記のように整理することができる。

#### (1) ロボットの機能にかかる事項

##### 1) 移動・静止能力

現場で想定される条件（地形、環境、気象など）で、作業を行うために十分な移動能力と静止能力を持つこと。移動ロボット技術や制御技術が関連。

ロボットが使用される理由は、従来法ではアクセスが困難であることにあるため、移動・静止能力はロボットにとって最も重要な機能である。移動するための機構や制御の問題だけでなく、センシング、通信、遠隔操作、自律機能などによる、総合システムとしての解決が不可欠である。

特に、災害現場では、瓦礫などの障害物や、アクセス路などの制約を受けにくいことが重要であり、最近急速に性能が上がってきた超小型飛行体を、概観情報収集や視認調査のために災害現場で活用できるようにすることが重要である。また、さらに詳細な情報を得るためには、至近距離から視認や打診を行うこと、障害物をとりのけてその向こうを視認すること、瓦礫や構造物の狭い場所の視認調査や点検、などが必要であり、登壁ロボットや狭所探査ロボットのブレイクスルーと実用化が必要である。

##### 2) センシング・認識能力

現場条件で十分な、目的の情報に関するセンシング能力を持つこと。また、操作者が作業を行う上で十分な現場状況の把握を可能にし、あるいは、自律的な作業を可能にするため、センサ情報を取得・解釈できること。センサ技術、計測技術、診断技術が関連。

移動や作業のためには、遠隔操作や自律機能が不可欠であり、そのためにはセンシング・認識能力が必要である。災害においては、現場の状況が未知であり、移動や作業のための環境を事前に整備することはできないことから、産業用ロボットなどと比べてはるかにセ

ンシング・認識能力の重要性が高い。移動のためには、ロボット周囲の状況を知ることが必要である。ロボットが動いている場所の情報、たとえば、段差・ギャップ・経路・不整地などの形状情報、路面の柔らかさ・崩れやすさ・滑りやすさ・地盤の安定性などの力覚情報などが必要である。それに加えて、ロボットの移動戦略のための情報、たとえば、障害物がある不整地の経路計画を行うための作業戦略に関する情報、滑ったり崩れたりした場合に何が起きるかを予測したり、復帰が可能かどうかの判断や復帰のためのリカバリ戦略に関する情報なども必要である。作業のためにも、移動と全く同様にロボット周囲の状況を知ることが必要である。すなわち、作業対象の形状や力覚情報に加えて、作業戦略やリカバリ戦略のための情報が必要である。そのためには、単にセンサ信号を取得するだけでなく、その解釈を行うことや、多種多数のセンサ信号から総合的に推定するデータマイニングや、戦略的にセンサを動かして必要なデータを取得してくる能動センシングや、人間と計算機とロボットが互いの能力を補完し合う協調センシングや、ネットワーク経由のビッグデータ活用などが求められる。

### 3) 作業能力

現場条件で十分な、目的とする作業能力を持つこと。また、センシングや異常状態回避に必要な作業能力を持つこと。さまざまなロボット作業技術、マニピュレーション技術などが関連。

作業を行えるためには、移動・静止能力の問題と全く同様で、作業機構や制御の問題だけでなく、センシング、通信、遠隔操作、自律機能などによる、総合システムとしての解決が不可欠である。

### 4) 無線通信と有線通信の能力

情報収集、作業遂行、遠隔操作等に十分な通信帯域、短い通信時間遅れ、移動や作業時の安定性、障害に対する復旧能力、通信距離を確保することが必要である。

無線の場合、多数のロボットからの多数の映像情報などを取得するために、チャンネル数の不足が大きな問題である。災害ロボットや災害対応システムのための専用周波数割り当てが強く要望される。非常時に使用できるためには、訓練時や開発時にもその周波数が使えなければならない。また、災害現場において緊急エリア計画に基づくアンテナ設置や帯域管理を柔軟かつ容易に行えるシステム整備が必要である。

通信距離は重要であり、日本の規格に則った無線 LAN 装置では 50 m 程度しか飛ばないため、建物内外を問わず、ロボットの実用化の妨げとなっている。災害ロボットのための電波出力の緩和が強く要望される。

遠隔操作においては、情報圧縮伸張・通信プロトコル・中継・ルーティング等に起因する通信時間遅れ（レイテンシー）が大きな問題である。時間遅れがあると迅速な移動や作業が不可能になり効率が著しく落ちる上、失敗時のリカバリが困難になり、操作者のストレスと疲労が大きいという問題がある。

入り組んだ建物内や瓦礫内などの閉鎖空間や水中では、電波の遮断やマルチパスなどによって無線が届きにくい場所が多く、通信不能のためにロボットの回収すらできなくなることがある。そして、それが事前に予測できないことが大きな問題である。一般的にはアドホック無線（メッシュネットワーク）はその解決策の一つだが、レイテンシーの問題のため、遠隔操作ロボットに対しては有効でない。

新しい無線システムの研究開発には巨費が必要であり、ロボット用無線のような特殊用途向けの研究開発が進まないという問題点もある。つまり、無線技術単独での解決は限界に近づいており、むしろ、無線の状態を制約条件として入れてロボットの行動計画を行うような、ロボット知能技術による解決策の方が有望であると考えられる。

災害対応ロボットでは、ロボットが失われることを防止し、無線通信が途絶することを防ぐために、どうしても有線通信が求められることが多い。特に入り組んだ建物内や瓦礫内の無線通信の問題は、事前にインフラを設置できない災害現場では、原理的に解決が不可能と思われるケースもあり、ケーブルを使った有線通信が必須である。たとえば、福島第一原発事故に対応するロボットのようなケースでは、内部に無線機の設置ができず、無線通信は電波出力や周波数を変更しても大きな改善が見込めないため、見通し範囲以外は有線通信を使用するほかない。このような場合に、無理に無線通信を持ち込むことには意味が無く、有線通信の問題点を積極的に解決していくことが必要である。

ケーブルリールを搭載できる比較的大型のロボットの場合には、ケーブルの切断やキンクなどによる通信不良、障害物へのケーブルの引っかかりや絡まり、ケーブルによる運動や作業への支障、それらを避けるためのケーブルのマニピュレーション法、ケーブルリールの重量やサイズ、搭載できるケーブル長と通信規格などが問題である。

ケーブルを引きずる小型ロボットの場合には、それらに加えて、ケーブルを引っ張るための負荷の軽減、ケーブルのルーティングの問題、などの問題もある。

これらの有線通信ケーブルの課題は世界的に見て研究があまりなされておらず、今後の解決が必要である。これらの問題は、産業用ロボットなどでの重要課題である柔軟対象物や長尺対象物のマニピュレーションの問題と共通性が高く、ロボット知能技術による解決が望まれる。

#### 5) 情報収集・整理・提示能力

センサ情報を解釈・整理し、記録し、利用者が活用しやすいように直感的に提示する能力を有すること。情報が不足する場合には、戦略的に追加情報を収集できること。違和感が少ないこと。GIS (Geographical Information System : GIS)、3D、マルチモーダル、没入感、距離・位置関係把握など、さまざまな情報処理やバーチャルリアリティ技術やビッグデータ技術が関連する。

#### 6) 遠隔操作、ヒューマンファクタ、必要な操作者数

長時間でも疲れずに遠隔操作し、高い作業効率と低い失敗確率で作業を遂行することができること。人間の意図や意志を不足無く伝達し、その意味を正しく推定し、それに応じた適切な行動決定がなされること。必要な操作者の人数が少ないこと。さまざまなヒューマンインタフェース技術が関連する。

#### 7) 自律機能、自動作業、部分作業の計画

部分的に自律機能によって作業を自動化することができること。また、それを合理的に計画できること。作業教示、学習、記憶、推定、計画、分散協調、などさまざまな知能ロボット技術が関連する。

## 8) システム化

これらの機能が有機的に組み合わせられ、必要な機能が実現し、制約条件が満たされ、ユーザにとって便利な道具にならないといけない。さらには、ロボットを使った仕事が全体としてきちんと目的を果たせるように、システムインテグレーションされることが必要である。

### (2) ロボットの性能にかかる事項

#### 1) サイズ、重量

現場で作業を行うに適したサイズと重量であること。救助隊員や作業員が現場に運搬し、容易に運用でき、大きすぎて取り回しが困難などの問題がないこと。

#### 2) 運搬、設置時間、必要付加機材

集積地から現場に運搬し、設置するまでの容易性。セットアップに必要な時間が十分に短いこと。また、運搬車両やクレーンなどの補助機材を併用して作業を行う際の容易性などが重要である。

#### 3) 稼働時間、エネルギー補給、メンテナンス

作業に十分な連続稼働時間、容易なエネルギー補給手段を有し、短時間で再稼働可能なこと。メンテナンスが容易であり、部品供給や即応体制が整っていて、停止せざるをえない期間がミニマムで済むことが重要である。

#### 4) 信頼性、耐久性、耐環境性、耐熱、耐水

高い信頼性を持ち、作業に十分な耐久性や耐環境性能などの基本性能を有することが不可欠である。

#### 5) 現場への悪影響の防止、防爆

ロボットの導入によって現場作業全体の遂行や、現場の環境条件などに悪影響を与えないこと。現場作業員からの不満が出ないこと。

特に、災害対応ロボットにとって防爆は大きな課題である。可燃物・爆発性物質が関係する災害は数多く、爆発の危険性によってロボットの適用が阻まれた事例が多い。多くの災害において小型軽量ロボットが求められているが、そのような機械に適した防爆の技術は実用的にみて不十分であり、安全基準や事故に対する免責制度の整備が遅れている。今後の災害対応ロボットの活用のためには、この問題のブレイクスルーを図ることが必要である。

### (3) ロボットの運用にかかる事項

#### 1) 規格化、性能評価法、標準化

技術規格や性能規格が定められ、標準化が進まなければならない。特に、性能評価の標準化、防爆の安全規格、センサ等の部品間のインタフェースの標準化、情報収集のプロトコル・データ形式・データベースの標準化が必要である。

性能評価基準をユーザニーズに則した形で適切に設定し、それに基づいて調達がなされることは、災害対応ロボットが産業として成立するために不可欠の条件である。何が問題

解決に有効であるかが明らかにならないと研究開発の方針を定めることができない。求められる仕様がわからないと、研究開発しても調達されない可能性が高いため、進まなくなる。基準が明確であることによって、ユーザ側からの問題点や改良案の指摘を受けやすく、新しい使い方の工夫も進みやすい。

防災ロボット専用の無線通信周波数および出力の割り当てが必要である。緊急時のみならず、平時における訓練や、研究開発において、同じ周波数が使える必要がある。そのためには、エリアを限定して専用周波数帯の平時使用を常時許可する、などの方策が必要である。

## 2) コスト

国の果たすべき役割や企業の経営の観点から見て、投資コストが合理的に説明でき、導入・維持・運用ができること。

災害対応ロボットは、災害の発生頻度が低いことから、対費用効果の点で配備の合理性を説明することが困難であるという問題がある。一方で、大規模災害は発生すると被害が甚大であり、前に述べたような理由により、ロボットの必要性は高い。また、地球環境変動に伴って災害が起きる頻度とその規模が近年著しく変化してきており、今後我が国では大規模な地震の発生が予測され、大規模な風水害被害も毎年のように起きていることから、積極的にリスクを抑えないと国や企業等の維持すら困難になる可能性が高まっている。以上から、現存するあるいは予測されるリスクの定量評価、それに基づくロボットによるリスク低下の効果（死亡・行方不明の防止効果、国民の安心感への効果、経済的損失の防止効果、産業競争力維持の効果、国力維持の効果、国際安全保障に関する効果、他）、技術発展により将来に見込まれるリスク低下の予測、国や企業にとって受容できるリスクのレベル、防災ロボットが生み出す技術的や産業他への波及効果、を総合的に明らかにする必要はある。

## 3) 人間や他の機器との役割分担、全体業務計画

人間や他の機器との役割分担を明確化し、全体の業務計画を容易に行えること。現場での、指揮所や操縦卓の配置など。

防災の主体は人間や組織であって、ロボットはそのための資機材の一つに過ぎない。すなわち、一連の防災活動の流れの中で、どの場面でどのようにロボットが使用されるべきかの判断ができ、使用において必要なロジスティクス・人間の動き・組織の動きなどが最適に設計・計画され、指揮命令系統が明確化されていることが必要である。

## 4) 緊急改造による現場ニーズ対応

現場で必要とされる機能に応じて、柔軟に改造を行い、緊急ニーズに応えられることが必要である。災害は起きる度毎に様相が変わると言われており、現場に応じて防災ロボットの機能を柔軟に変更し、実情に合うように再構成することが求められる。たとえば、測定すべき化学物質や放射線のためのセンサ、求められる作業のためのマニピュレータやエンドエフェクタ、状況に合わせた通信機器・バッテリーなどの搭載、各種認知・操作支援機能の搭載、環境条件への適合（温度、湿度、放射線、水、塩分、路面状況、風、可燃性雰囲気、など）。

## 5) 配備運用体制

配備運用体制が整備されていることが必要である。全国で防災ロボットを使える人員と組織を整備するとともに、大規模災害時に全国の配備拠点から資機材と人員を集結させることができる体制が必要である。そのためには、平時から資機材が運用されていることが必要である。そのためには、訓練使用はもちろんのこと、民生用業務に同じロボットが使用されることによって十分な数量を確保するとともに、平時からの整備がなされ、操作者の確保が容易であることが重要である。

### 2-4-3 特殊環境用ロボットの能力の現状とその課題、および、現在の研究開発動向を踏まえた中長期的課題解決法

以上の整理に基づき、特殊環境用ロボット能力の現状と課題、それを解決するための中長期的課題解決法について考察する。

#### (1) 移動・静止能力

移動・静止能力の観点から、前項で述べた各種形態のロボットを評価してみると、下記のようになる。

##### 1) 地上移動ロボット (Unmanned Ground Vehicle; UGV)

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用に実績がある。大型ロボットの代表例は無人数化施工建機であり、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。

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が、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り、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。

以上から、技術熟成度レベルは、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」に留まっていると結論付けられる。

## 2) 脚型ロボット

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福島原発の現場に試験投入されたものもある。

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ない。

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、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。もちろん、今後の技術開発によって、適用範囲が拡大される余地はある。

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) パワースーツ型ロボット (Exoskeleton)

災害対応としては重量物運搬の力支援を目的としてXOS ExoskeletonやHALなどが研究開発され、技術的には実用に近づきつつある。

人間が装着する、あるいは、搭乗することが前提であるため、他のロボットのような遠隔機器あるいは自動機器ではなく、人間の能力拡大機器である。人間が行動計画や環境認識を行うため、従来の作業現場の延長線上で導入を進めやすいと考えられる。災害現場では、有人の車両や建設機械と同様の条件での使用が見込まれ、それらとの性能や機能の比較が必要である。また、過去には死亡事故も起きているため、大出力のためには事故防止対策と安全規格化が必要である。

技術熟成度レベルは、災害現場の重量物搬送のための高出力パワーアシストに関しては、最も実用的なロボットで「6」程度であり、「4」レベルにとどまっているものが多いと考えられる。ただし、米国等の軍用技術についてはその内容やレベルが明らかでないため、この評価には含まれていない。

## 4) 飛行ロボット (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)

全長数mの小型ヘリは実用化され、ヤマハRMAXなど火山災害などへの適用事例も多数ある。ペイロードは大きく、資機材の運搬も可能である。通信・安全自主規制・事故時の影響などの課題があり、有効性は明らかでありながら、災害に適用できなかった事例も

ある。特に、都市部や重要施設の上空では墜落事故の際に予想される危険性が指摘され、地上に人がいる場合には飛行できる範囲が限定され、目視不能な遠距離での使用は限定される。災害適用のためには、事故時の免責などの安全規格化が必要である。

滑走路が必要な重量数十～数百 kg の小型固定翼機が実用化されており、主として、空撮用や軍事用に使用されている。

これらのシステムの技術熟成度レベルは「8」～「9」であるが、災害状況の全体把握やモニタリングのために実用配備する観点から評価すると、耐環境性向上、安全性・信頼性向上の課題が残されている。

模型ヘリに分類される全長数十 cm、重量数 kg の超小型多ロータ型ヘリは最近になって実用性が高まり、GPS による屋外飛行のみならず、屋内飛行の研究も行われるようになってきている。現在、強風・突風時の安定性、狭い構造をぬった飛行、ペイロード不足、飛行持続時間などの課題がある。前記小型ヘリとは違って墜落時の安全性は高く、安価な製品も多数出てきているため、災害への適用のバリアは低いと考えられる。ペイロードが小さいため、搭載できるセンサが限定される。短時間しか飛べないため、広域の情報収集には適しておらず、数百m四方以内のエリアの概観情報収集や、高所をゆっくりと移動・静止しながらの目視点検などに有効である。

模型飛行機に分類される全長数十 cm のカタパルト式の超小型固定翼機が上空からの災害情報収集のために実用化されつつある。強風時の挙動や、飛行持続時間などの課題がある。超小型多ロータ型ヘリと同様に、墜落時の安全性は高く、安価な製品も多数出てきているため、災害への適用のバリアは低いと考えられる。ペイロードが小さいため、搭載できるセンサが限定される。移動速度が速く、静止できないため、数 km 四方以内のエリアの概観情報収集に適している。

これらの技術熟成度レベルは、オープンスペースなどの容易な環境においては「8」に達していると評価されるが、困難な環境や高精度の飛行に関しては「4」に留まっていると考えられる。

5) 小型潜水艇 (Remotely Operated Vehicle; ROV)、自律潜水艇 (Autonomous Underwater Vehicle; AUV、または、Unmanned Underwater Vehicle; UUV)、無人水上艇 (Unmanned Surface Vehicle; USV)、水陸両用車

ROV は従来より国内でも配備が進んでおり、防災用として全国の消防や海上保安庁にも配備されている。近年になってソナーの性能向上により従来適用が困難だった視界が数十 cm 以下の現場でも実用性が高まっている。水流の影響、ケーブルのハンドリング、位置決め、水中の複雑な障害物をぬった遊泳などの課題がある。小型船や岸壁から遠隔操作され、数百m以内の範囲の情報収集やマニピュレータ作業を行う。

AUV (または UUV) は、広域を自律潜水航行し、海底探査などに実用化されている。防災用途では、水底に近づいて遊泳することが困難、自機の位置を測定することが困難、などの課題がある。

USV の防災への適用としては、米国のハリケーンカトリーナの被害調査などに使用された実績がある。

水陸両用車は、水深が浅いために船も地上建機も適用できない津波被災地に代表される場所で、工事を行うことができる。緩い地盤での移動、土砂が舞っている水中での物体認

識、遠隔化などの課題がある。

技術熟成度レベルは、容易な現場に対しては「9」にあるが、上記のような困難な現場では「6」程度である。

#### 6) 壁登りロボット

平面の鋼構造に対しては技術的実用化段階にあるが、複雑な凹凸や障害物などの踏破能力は未だ不足している。コンクリート構造物等の磁力吸着が不可能なケースに対しては、平面以外では吸着力の安定した発生が困難である。そのため、情報収集が必要な箇所全てにアクセスすることができず、災害現場への適用を考えた場合には、ユーザにとって性能が十分でない。また、落下や滑落のおそれがある場合には、大きな問題である。

技術熟成度レベルは、実用化されている点検現場に近い環境では「8」と考えられるが、困難な環境では「5」程度である。

#### 7) 狭所進入ロボット

ヘビ型ロボットは、蒼竜などが開発されたが、瓦礫などへの潜り込みが可能であるが、横転しやすく、狭所での旋回性能、瓦礫内での位置推定に課題がある。

ビデオスコープ型ロボットとしては、能動スコープカメラが開発され、瓦礫内で重力方向への探査が可能であるが、運動能力の不足、瓦礫内での位置推定などの課題がある。

技術達成度レベルは、容易な現場においては「8」レベルの実績もあるが、困難な環境では「5」程度である。

#### 8) 地中掘削ロボット

ボーリングマシンのようにマシンや立坑を反力として3次元方向に削孔する技術は実用化されているが、地盤を反力として掘削しながら地中を進むロボットは開発が進んでいない。地中での位置推定に課題がある。

技術達成度レベルは、「4」程度でしかない。

#### 9) 無人化施工

雲仙普賢岳のような現場での実用化は進んでいるが、土砂ダムでの工事や浅い水の現場での工事など、問題点も多い。

技術熟成度レベルは、実用化が進んだ工事では「9」であるが、問題の多い現場では「6」にとどまると考えられる。

#### 10) 合体ロボット

分離合体方式、システム化は防災ロボットにおいても Marsupial robot などの概念があり、運搬機と作業機の組み合わせ、などの事例は多数あり、JCO ロボットや大大特の瓦礫内ロボットでもシステム化が試行された。しかしながら、作業機能や性能を積極的に向上させるための最適なシステムについて深く検討がなされてきているわけではなく、今後の研究によって上記1)～9)のロボットの問題点を解決できる可能性は高い。また、ロボット同士の組み合わせだけでなく、さまざまなシステムとの組み合わせが考えられる。さらには、機能モジュールを付加する（飛行ロボットに車輪を付けるとか）ことも、有効である可能性が高い。

技術達成度レベルは、「4」～「6」程度であると考えられ、今後の技術開発が待たれる。

以上の分析結果を簡潔にまとめてみると、表2-6のように整理することができる。

表2-6 ロボットの適用場面と特徴、災害適用上の問題、および、  
技術熟成度レベル (Technology Readiness Level; TRL)

形態	ロボットの適用場面と特徴	災害適用上の問題点	TRL
車輪・クローラ	屋内外の地上調査・地上作業、普及型	運動性能の限界	6～9
多脚型	車輪やクローラでは走破が困難な場所	安定性、信頼性、効率の限界	4～7
パワースーツ	重機が入れない場所で代替	人間が搭乗する必要	4～6
超小型軽量飛行	屋内外の調査点検、急速に実用化進む	狭所、ペイロード、飛行時間	4～8
広域長時間飛行	災害状況の全体把握、モニタリング	耐環境性・安全性向上	8～9
潜水・水上	海中の調査点検	狭所、静止、行方不明になる	6～9
壁登り	インフラや産業設備の高所の調査点検	単純壁以外での困難性	5～8
狭所進入	瓦礫や産業設備の狭い場所の調査点検	運動性能、旋回性能	5～8
地中掘削	土砂崩れ現場の調査	地盤反力掘削、自己位置推定	4
無人化施工	人が入れない場所で工事	自動化、水中作業	6～9
合体型	性能を相互補完	複雑化	4～6

## (2) センシング・認識・ヒューマンインタフェース機能

センシング・認識・ヒューマンインタフェース機能の観点から、代表的な機能について評価を行ってみると、下記のようなになる。

### 1) 画像

可視カメラ、近赤外カメラ、遠赤外カメラ（サーモグラフィ）（図2-22）、放射線カメラなどがあるが、後者に関しては、小型化、解像度向上、低価格化が課題である。画像認識は特定対象については実用レベルにあるが、任意対象・環境では困難である。被害の認識手法として、構造物の形状変化や人間の認識など研究開発されているものもある。



図2-22 FLIR社製小型遠赤外線カメラ Tau 640 (サイズ: 45 x 45 x 30 mm、解像度: 640 x 512、温度測定範囲: -40℃～+160℃) (FLIR社提供)

## 2) 距離、3次元

一般的に、小型軽量化、精度向上が必要である。LIDAR（レーザレンジファインダ、測位器センサ）は小型化が進んできている。距離画像カメラや Kinect のような投写型のカメラは、太陽光下でリアルタイム計測が可能なものもあり、実用性が高まっているが、計測精度や解像度が問題である。超音波ソナーは計測精度が高まり、水中での実用性が高い。ミリ波レーダは自動車の衝突防止用途で実用化が進み、人を識別できるものも開発されている。マイクロ波で瓦礫に埋もれた人を検知する人体探索レーダが開発されているが、検知範囲の拡大、ノイズの除去が課題。3D認識は、対象が定形物体の場合には実用的だが、不定形の対象については研究開発段階である。（図2-23）

ヘッドマウントディスプレイや3次元ディスプレイによる3次元の提示は実用化され、疲労感の改善も見られるが、ロボットの移動や作業に使うには奥行き方向の提示精度や分解能に課題がある。

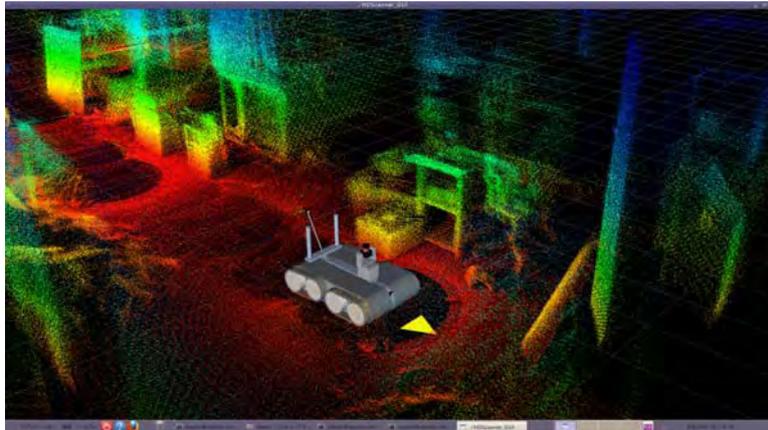


(a) 北陽電機 スキャナ式レンジセンサ UTM-30LX      (b) マイクロソフト Kinect



(c) 距離画像例（日本信号製エコスキャン）

図2-23 距離、3次元センサ（その1）（北陽電機、マイクロソフト、日本信号提供）



(d) 3次元マッピング例（東北大学大野）

図2-23 距離、3次元センサ（その2）（国際レスキューシステム研究機構提供）

### 3) 音声

災害現場では周囲の雑音や反響音の影響があるため、音声認識の精度向上が必要である。音源定位の精度は環境次第である。

### 4) 触覚・力覚

力・接触・近接センサは実用レベルであるが、テクスチャーや柔軟性などのセンシングや認識は計測対象や環境によっては研究開発段階である。人間に触覚や力覚を提示するヒューマンインタフェースの研究が行われているが、災害で使えるように装置をコンパクト化することが課題である。

### 5) 環境

ガス、放射線、塵埃、薬品などの小型センサが市販されている。

### 6) 非破壊検査

センサ自体には問題ないが、検査対象にセンサプローブ密着させて操作する案内機構に課題があり、適用箇所が限られる。

### 7) ロボットの位置推定

GPSやマーカ（磁気、反射板など）が使用できる環境では問題ない。GPSは樹木や建物に囲まれた場所では精度が落ち、屋内外を行き来する場合や瓦礫の中では実用レベルにない。場所を限定しない場合、カメラやレーザを使った三角測量による地形マッチングやSLAMによる位置推定は研究開発段階である。車輪回転数、加速度センサ、ジャイロなどによるオドメトリは、すべりやセンサのドリフトの影響があり、誤差の蓄積が課題である。

### 8) センサネットワーク

多数のセンサの計測データの高速通信が課題である。

### (3) 作業機能

作業機能の観点から代表的な物を評価する。

#### 1) センサを対象物に当てる

大口径の鋼配管の減肉検査など特定用途では実用化されているものもあるが、汎用的な作業を実用的な速度で行うことは困難である。

#### 2) ドア・窓・ハッチを開ける

形状・構造により開放方式、必要な力、自由度が異なるため、専用のエンドエフェクタやアタッチメントが適用可能なものについては実用化されているが、汎用性に課題がある。

#### 3) 障害物の除去

障害物によって、重量、切断力、把持力、吸引など、方式や必要なアーム・ハンドが異なる。双腕アームの有効性が高い。人命救助の場合には、要救助者の安全確保が課題である。

#### 4) サンプリング

対象によって方法、工具、器具などが異なる。格納容器、サンプリングした物質の取り出し方、除染などが課題である。

#### 5) 補強作業

被災建造物の一時補強が必要であるが、ロボット作業は実用化されていない。

#### 6) 除染作業

対象によって、除染ツールが課題である。

#### 7) マニピュレーション

臨場感ある遠隔操作、双腕複合動作、自由度、可搬力、把持力、ハンドリング範囲、閉鎖空間での周囲との干渉、などが課題である。

以上をまとめたものを図2-24に示す。



## 2-5 ロボットの研究開発から配備・運用に至るまでの、技術以外の中長期的課題

災害対応ロボット技術は、研究が本格的に開始されて10年になるが、その期間に飛躍的に技術が向上した。東日本大震災では、さまざまなロボットが活用あるいは試験され、一定の成果を挙げた。今後もさらなる能力の向上が期待されており、現在実用レベルにないが、数年後には実用性能に達すると考えられ、有用な機材となる可能性が高いものも多数存在する。そのため、今から10年の間に世界中で、ロボットは防災のために欠かせない機材となっていくと考えられる。

このように、これまでの災害対応の方法論の大前提は変わってきている。したがって、ロボットの使用について根本的に検討しなおし、災害対応のシナリオを見直すべきであり、それを継続して進めていくべき時期に来ている。

現在はまだロボット活用のために各種のバリアが存在すると考えられ、そのバリアを解消することが必要である。そのためには、次のような方策が必要である。

### (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

国内外の製品はもとより、要素技術や、実用化に近い研究開発などについて、ユーザ・発注者・予算決定者が容易に情報を収集できるようにすることが必要である。ロボットの性能向上は日進月歩であるため、継続的にウォッチすることが必要である。10年前に試験したロボットのイメージで、使えないものと思い込んでいる現場担当者も多い。

現場での実用性能を正しく把握するためには、災害空間の制約・環境条件が整わない展示会では不足である。本来は仮配備して使用訓練や現場使用を行うことが必要であるが、コストと時間がかかる問題がある。そのため、常設のモックアップフィールドにロボットをプールし、現場に近い条件下で試験を行えることが必要である。それによって、ユーザはもとより、技術や現場に関する知識がない者であっても、その有効性（あるいは、役立たないこと）が容易に理解できるようにしなければならない。

性能評価試験を標準化すること、それに基づいて性能認証することは、ロボットの能力を短時間に知ることが可能にするため重要である。それによって、調達意志決定が加速され、導入配備が進むと考えられる。また、ユーザ間でロボットの能力に関する情報や使用ノウハウを流通・共有させることは重要であり、そのための組織が必要である。

ロボットはマンガやアニメに登場するため、一般人が持つイメージが実態と異なっているケースがある。情報、機械、電気、ヒューマンインタフェース、防災科学を融合させることによってソリューションをもたらす防災ロボット本来のあり方を第一に考え、ユーザに対して防災ニーズからの発想を促すことが重要である。

### (2) 開発者・販売者・レンタル業者がユーザニーズを知る

開発者・販売者・レンタル業者がユーザや発注者が求めているものを知る、認識のギャップを埋めることが重要である。すなわち、ロボットの用途や使用方法、災害現場で使用するために必要な制約条件、必要な機能と性能、不要な機能と性能、ユーザがかけられる導入コスト・メンテナンスコスト・価格帯、可能なメンテナンスサイクル、使用に当たってのロジスティクス、などを正しく把握することが必要である。それによってはじめて、ユーザニーズ（性能および制約条件）の多くを満たすために必要な技術課題を明確化することができる。

そのためには、ユーザとのコミュニケーションを密に行うとともに、現場で使用する経験を持つことが必須である。ユーザ以外が災害現場へ入ることは一般的には困難であるため、災害環境を模擬した場所で、想定シナリオに基づいた試験を行うことが必要である。そのためには、常設のモックアップフィールドが必要である。

### (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

そのためには、ロボットの価格が下がることが根本的に重要である。そのためには、容易にシステムインテグレーションができるためのバリアの低下が必要である。開発側としては、ロボット部品（ハードウェア・ソフトウェア）やロボットプラットフォーム（移動台車、マニピュレータ等）の標準化・共通化、汎用品の使用、民生用途との共用化などが必要である。ユーザ側では、長期的な配備計画の策定と実施、需要変動の抑制、ロボット使用のためのシステム整備などが必要である。

防災ロボットは災害リスクを低下させることが目的であるため、リスクを定量化して、ロボット導入の効果を明確にすることが必要である。許容できるリスク限度を越えないことは社会的に必須であるため、経済的な評価だけでは片手落ちである。それを基にして、社会制度として、許容リスク限度を法制化すること、保険料率や税制等にも反映させていくこと、が必要である。

ロボットは導入初期には経済的に成立しにくいと考えられるが、政策的にインセンティブを与えることが必要である。その理由は、地球温暖化に伴って災害の頻度と規模が拡大していること、今後の技術的発展による性能向上と価格低下が期待できること、我が国は科学技術による防災をリードすることが国際的に求められていること、技術開発が他分野に波及して新しい産業につながっていくと期待されること、である。特定の業務だけを見た場合には経済的に成立しない場合でも、国全体を長期的視点から見た場合には、最終的に費用対効果が合理的に説明できると考えられる。

### (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

緊急災害対応に関しては、国民が国や自治体に附託しており、防災ロボットの多くは国民の税金によって配備されるべきものであるため、その市場は官需に大きく依存する。大規模石油化学プラント等では消防車などの配備が義務づけられているが、ロボットの有効性が高い場合には（CBRNE 災害など）、ロボットの配備の義務づけを検討することが必要である。このような市場を安定化するためには、政府が配備調達計画を策定し、着実かつ計画的に配備を進めていくことが必要である。

防災ロボットの民生用途を開発すること、あるいは民生機器と併用してデュアルユースを徹底させることも重要である。それによって、ロボットの需要を増やして価格を下げることはもとより、緊急時の資材調達、操作員の数の確保、改良サイクルの短縮、が期待できる。

国内製品のみならず、外国製品との組み合わせによるシステム化も重要である。市場は国内のみに求めることは現実的でなく、海外への輸出を前提とすることが必要である。

プラットフォーム（移動台車、マニピュレータなど）の開発と、ソリューションビジネスとは大きく性質が異なっているため、同じ企業がすべてをまかなう必要はない。

レンタル業が成立するためには、ある程度の使用頻度が見込める必要がある。そのため

には、民生用途との共用化が必要であり、民生品（建設機械など）に防災用アタッチメントを組み合わせることによってシステム化するなどの戦略が必要である。

(5) ロボットが現場で継続的に使用・試験・訓練される

これによってはじめて、ロボットを現場に合うように改良したり、問題点を改善することが可能になる。ユーザにとっても、現場での使い方を工夫改善することが可能になるとともに、どのような場合に使えてどのような場合には使えないか、性能の限界と制約条件が明らかになる。また、ユーザの使用訓練法の開発は重要であり、免許・資格制度を設けることが必要である。

(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、国際的協力高度実用化研究、および、基盤技術研究の両方を国が支援し、全国に「複数」の研究開発拠点を整備し、外国とも協力しながら研究開発を進めることが必要である。

防災ロボットはシステムであり、関係する技術の範囲が広いことから、単一の研究開発拠点では幅広い領域をカバーすることは不可能である。さらには、防災ロボット研究だけが他から孤立した状態では、「防災ロボット村」ができあがり、先端技術から取り残される結果となる可能性が高い。それを防止するため、複数の拠点を設けてそれぞれが独自の優れた技術を磨き、互いに競争原理によって切磋琢磨する環境を整えることが必要である。

優れた人材を集め、流動させるためには、大学・国研・独法を積極的に活用することが望ましく、それらの中に拠点を整備するべきである。それによって他分野からの先端技術の導入とともに、防災ロボット研究で創られた技術を他分野へスピニングアウトさせ、新たな産業を創生することにつながるため、防災のみならず産業政策の観点からも望ましい効果を得る。大学・国研・独法内には、高度実用化研究を行う内部の企業組織（大学発ベンチャー企業、一般企業との共同開発組合など）が必要である。拠点の構成員は研究者・技術者からユーザ、ディストリビュータまでがローテーションすることが望ましい。いずれにしても、研究開発拠点は、一流の人材が継続的に確保しやすい条件を備えていなければならない。

新たに独立した研究開発組織を作った場合には、下記のようなデメリットとメリットがあると考えられ、既存の大学・国研・独法の活用が望ましい。

(メリット)

- ・目的に則した名前を付けることができる。

(デメリット)

- ・組織にブランド力がないため、若い一流の研究開発人材を集めることが困難である。一流でないといいロボットはできない。
- ・人材を育てる仕組みがない、キャリアパスが描けないので、この組織に骨を埋める覚悟ができず、アルバイト的な雇用形態になり、人が定着しない。
- ・自分が犠牲になってやろうとする人を見つけられない、兼任者や老人ではできない。
- ・継続性がない、予算を流し込むことを生業とする省庁がないと、途絶えてしまう。
- ・天下り組織となると、国民の反発が予想される。
- ・研究者・技術者・戦略企画・広報・経理・総務など20名以上の専任職員が必要であり、非効率である。
- ・さまざまな技術分野との密な交流を図ることが、大学・国研・独法などと比べて困

難であり、広い技術情報の流通の観点で、劣る。

拠点の場所としては、東京地区の大学、東北大学、京都大学、産総研などが望ましい。東京地区の大学は、成果が国やメディアから見えやすく、省庁とのコミュニケーションが円滑であるため、ヘッドクォーターとしての役割に適している。東北大学は、被災地であるため防災ニーズを捕らえやすく、防災科学国際研究所や極限ロボティクス国際研究センター等の協力が得られ、東日本大震災や福島第一原発への対応などの実績があるため、成果が期待できる。京都大学は防災研究所を持ち、防災ニーズを捕らえやすく、人と防災未来センターや国連機関との協力が得られ、東日本大震災への対応などの実績があるため、成果が期待できる。産総研は生活支援ロボット安全検証センターなどをもち、研究開発の実績があるため、成果が期待できる。

国際的協力としては、国内外の防災関係機関、大学や研究所、国内外の学会・標準化機関、国内外のプロジェクト、国内外の競技会と協力を進めていくことが求められる。それによって、広い叡智を結集する事が可能になり、高い成果が見込まれる。防災ロボットでは、国際レスキューシステム研究機構（神戸）、Center for Robot-Assisted Search and Rescue (CRASAR)（米国）が研究開発や災害適用の実績を持っており、それらの活用が望まれる。

実用的なソリューションをコンスタントに出すために、発足時に向こう5年間の研究開発成果のロードマップを策定すべきである。各研究開発テーマについては、ユーザと協力して研究開発目標を設定、ユーザが毎年、成果を評価することが必要である。

防災ロボットは多省庁に関係することから、拠点の予算は内閣府が所管して、他省庁との協力の下に推進していくべきである。

#### （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

研究開発拠点とは独立に、高度実用化研究のための現場フィールド（災害現場、工事現場、実プラントなど）、基盤技術研究のための模擬フィールド（模擬災害現場、模擬工事現場、廃棄プラントなど）、性能評価のための評価フィールド（NIST/ASTM 評価フィールドなど）を設置し、さまざまなロボットを常設維持し、いつでも試験が可能な、大規模な防災ロボットセンターを、独立させて整備すべきである。

防災ロボット研究開発拠点・大学・国研・独法・企業・ディストリビュータが共同利用して研究開発を進め、ロボットを現場環境で試験し、実用化を加速させる、各機関が現場環境での問題意識を共有できるため、性能や制約条件に関する理解が進みやすい。

消防、警察、自衛隊、海上保安庁、電気事業連合会の緊急災害対応組織が共同利用し、ロボットの試験や教育訓練を行う。それぞれの機関はゆくゆくは独自に試験フィールドを設置すると考えられるが、ユーザ間の情報流通や交流が促進できること、さまざまなロボットのショーケースとしての役割を果たして初期導入を促進しやすくすること、ユーザ間の共通化によって相互協力が容易になること、各機関の用途に則した独自の試験評価をノウハウで支援できること、ロボットをプールして常に使えるように準備しておくことによって、大規模災害時に防災ロボットセンターの機材を投入できること、が利点である。

大規模なセンターを全国に1カ所開設し、小規模なものは全国の複数の研究開発拠点に設置することが望ましい。

防災ロボットセンターを設置する場所は、有明・立川や南相馬、兵庫・宮城などの基幹的広域防災拠点、福井、神戸などが考えられる。有明・立川防災拠点は、首都圏の防災拠

点であり、国やメディアから見え、首都圏で大規模災害が起きた際に対応できるという利点がある。南相馬は、放射能汚染が深刻であり、自治体の強力な支援が得られ、被災地の広大な場所を使用できる。兵庫は、消防訓練のための瓦礫フィールドが設置されており、多数の災害対応訓練の実績があり、消防との連携がしやすいという利点がある。宮城は、被災地の広大な場所が使用できると考えられるが、未だ計画中のため利点・欠点は不明である。福井は、電気事業連合会の強力な支援が得られ、稼働中の原発への対応が利点である。神戸は、防災ロボットの実績とともに、自治体の強力な支援が得られ、すでにNIST/ASTM 性能評価フィールドが設置されているという利点があるが、大規模なセンターの設置は困難である。

いずれにしても、箱物を作ることに意義があるわけではなく、この目的のために本当に機能できるセンターを作らなければ、設立したことがマイナスとなる。

この種の組織における大きな課題は、人材の確保と、それぞれのモチベーションの維持である。人材としては、マネジメント人材、ユーザ側人材、ロボット試験のための技術人材、補助者人材、が必要である。ユーザ人材としては、ユーザ間の情報流通や交流を重要なミッションとし、調達につなげていくことが重要であることから、消防、警察、自衛隊、海上保安庁、電事連、国交省等の人材が入れ替わりで就任することが必要である。また、地方出先機関となるのではなく、将来トップとなる人材のローテーションに組み込まれることが重要である。ロボット試験のための技術人材としては、ロボットの性能評価試験を行うのみならず、試験方法の開発や国際的標準化を進めていくことが求められるため、性能評価試験や規格化に対して、深い理解と情熱を持った人材が必要である。博士号は不要であるが、高い専門性をもった専門職でなければならない。モチベーションを維持するためには、適切なキャリアパスを計画する必要がある。

施設が頻繁に利用され、設置の効果が上がるように、利用頻度を高めるための工夫が必要である。そのためには、下記のような方策が考えられる。

- ・フィールドを活用したロボット試験会の開催。
- ・防災ロボット競技会の開催
- ・ユーザの招待により展示会機能を兼ねる
- ・ロボット認証の実施
- ・ユーザ組織、各担当省庁との一体運営

上記のようにした場合の、予想されるメリットとデメリットは下記の通りである。

(メリット)

- ・まとまった場所の確保が可能である
- ・フィールドをきちんとメンテする体制をとることができる
- ・事業として展開していくことができる
- ・すべてのユーザから中立な立場で、協力体制を作ることができる
- ・導入検討に要するコストを下げるができる

(デメリット)

- ・研究・技術者としては一流人材が集まらない  
→フィールド試験、評価、標準化なら博士号は不要なので、いい人が集められる
- ・少数のスタッフが拠点に関することを何でもやらないといけない  
→フィールド試験にあたっては、サポート部隊を外注（IRS、イベント会社など）  
拠点のメンテにあたっては、外注する（建設会社など）

フィールド試験の内容は、プロパーの職員が技術的にもしっかりと計画する

#### (8) ユーザ間の協力

ロボットはユーザにとって非常に新しい技術であり、特殊機材であることを十分に踏まえ、ユーザ間の協力体制を強化することが必要である。すなわち、それによって使用ノウハウを共有することができ、災害時に有効な活用を図ることができるようになる。研究開発側では現場ニーズを徹に入り細に入り把握することは困難であり、ユーザ側でのノウハウの蓄積は重要である。また、それによって、災害発生時に相互協力が進むと考えられる。

ユーザとしては、緊急対応としては、消防（含、消防団）、警察、自衛隊、海上保安庁、電事連原発事故緊急対応組織、国交省の緊急対応組織、DMAT、レスキュー犬の団体、などがある。それに加えて、プラントメンテナンス業、建設業、ライフラインメンテナンス業（電気、ガス、水道、鉄道など）などの工事業者は、平時における潜在ユーザであると考えられ、これらとの資機材の共通化は、価格を下げること、大規模災害時に投入可能な資機材の台数と操作できる人の人数を増やすこと、メンテナンスなどを容易にすること、市場拡大によって技術や性能の向上が見込めること、などの観点から、効果的である。

#### (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

研究開発とロボットの普及を進めるため、わかりやすいブースト策を取ることが必要である。

その一つの方法論として、ソリューションコンテストがある。建築分野では昔からデザインコンペやコンテストが行われ、美しい建築物の設計に有効な方法論として定着してきた。ロボット分野においては、宇宙ロボット競技会などが技術開発を目的として行われてきている。防災ロボット分野の技術開発としては、ロボカップレスキュー国際競技会が2001年から開催されてきており、ロボットの運動性能向上、自律知能高度化、ヒューマンインタフェース高度化、センシング技術向上、SLAMなどのマッピング、マニピュレーション技術向上などの成果を挙げてきた。福島第一原子力発電所で活用されているQuinceはロボカップレスキュー競技会で性能の向上が図られ、瓦礫環境での高い運動性能はロボカップレスキューがなければ実現しなかった。2012年にはDARPA Robotics Challengeが原発災害をモチーフとして開催されている。この方法論は、競争原理によって研究開発を加速すること、公開競技会によって研究グループ相互の情報流通や人材交流が図られやすいこと、が効果を上げる理由であると考えられる。

防災ロボットの技術を向上させるためには、災害現場に則した適切な目標（グランドチャレンジ）や評価基準の設定、ステップバイステップの短期目標や評価基準の見直しとレベルアップが必要である。

それに加えて、研究としての技術レベル評価だけでなく、実用面から見た技術レベル評価が重要である。すなわち、先端研究としての評価と、実用面からの評価の、両面が必要である。それによって、実用化の壁を破るための研究開発支援が可能になると考えられる。すなわち、大学・独法・国研などの研究期間にとっては、耐久性、信頼性、評価試験などの実用面を制約条件として研究を進めるマインドが醸成され、企業にとっては、先端技術の導入に対する障壁が下がって他のロボット等に対する差別化を図りやすくなり、ユーザ機関にとっては、実用面からの性能が明らかになるとともに性能向上が期待できる。

これらは国際的な協力の枠組みの中で進めることが必要である。それによって、国内企

業が開発したロボットが世界市場で使用されることとなり、導入コストを下げることもつながる。

#### (10) 現在あるニーズによってロボットを育てる

現在、ロボットが有効であると考えられる災害は、下記のようにさまざまなものがあり、これらの切実なニーズによってロボットを育てていくことが重要である。

- ・頻発する風水害
- ・予測されている大規模地震・津波災害
- ・老朽化インフラ・産業設備の点検・修繕・事故対策
- ・福島第一原発廃炉中長期措置
- ・被災地復興（津波被害、放射能汚染）

これらのうちのいくつかについては、すでに重点的な予算措置がなされているものもあるが、それらについてロボットを積極的に使用することとし、ロボット技術の実用化を図ることによって、防災の効果と、費用対効果の向上を図っていくことが重要である。

#### (11) 法と制度の整備

災害対策基本法の枠組みの中で、ロボットが使われるための制度を整備することが必要である。各ユーザ機関の緊急対応や訓練などの中に、ロボットが使用されるための枠組みを整備すべきである。また、有事にロボットが使用できるように、有事法制としての電波行政、安全規格などの整備が必要である。また、有事を想定した条件での研究開発を進められるような制度整備が必要である。

以上の中長期的課題を、産業施策の種別との関連として整理すると、表2-7のようになる。

表 2-7 技術以外の中長期的課題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ーニーズを知る		○	◎	○			
(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ー・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	○		○		○	◎	

## 2-6 取り組むべき内容、課題解決に必要な研究開発プロジェクト

上に述べた数多くの中長期的な課題の中から、重点的に研究開発を進めるべき技術を定めるためには、下記の判断基準が重要である。

### A) 適用可能性・適用範囲の拡大

その技術によって防災ロボットの適用可能性・適用範囲を飛躍的に拡大できるか。

### B) ブレイクスルー

最近開発された、あるいは、最近の技術革新が著しい技術や方法論であって、ブレイクスルーに結びつく可能性が高いか。

### C) 日本の強み

日本が強い分野であって、課題解決に世界的レベルで大きく貢献できるか。

### D) 費用対効果

限られた予算で、高い効果を上げられるか。

### E) 市場の拡大

ロボット使用の市場を大幅に拡大できるか。

以上の考察に基づき、重点的に研究開発や調達を進めるべき技術を下記のように整理する。

## 2-6-1 遠隔現場へのアクセシビリティの向上

ロボットはセンサや作業ツールを安全に遠隔現場まで移動させ、調査や作業を行うことが、そもそもの目的である。現在のロボットは、必要な場所全てにアクセスすることが不可能であり、それが実戦配備の妨げとなっているケースも多い。アクセシビリティの向上はこのように最も基本的な要件であるため、中長期的観点から重点的に研究開発を進めるべきである。

特殊環境用ロボットの現状を上記のA)～E)の観点から整理したとき、アクセシビリティの観点からは、下記のロボットやシステムの研究開発が急がれる。

### (A) 超小型飛行体によるモニタリングシステム

#### (1) 必要性

重量数 kg の超小型 UAV (マルチロータヘリコプター、超小型固定翼模型飛行機) の性能がここ数年で飛躍的に向上してきた。カメラなどのセンサを搭載でき、GPS により経路に沿った飛行を行うことができ、屋内や複雑な障害物を避けることも可能になりつつあり、風に対する安定性も向上してきた。短時間に視野を拡大でき、足場を組むなどのプロセスを省略できるため、手軽な災害状況調査や点検のための手段としての有用性が高まってきた。小型軽量のため、墜落しても事故になる可能性が非常に低く、適用できる範囲は広い。

日本では、小型ヘリについては、ヤマハ RMAX など、世界的にも非常に優れた民生用の機体が広く販売されている。ヤマハと京都大学の協力によりその自律化が進められ、文科省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの支援により、制御の高度化、ロボスタ化が行われた。一方、欧米では、超小型飛行体の研究がここ数年で非常に活性化し、超小型クワッドロータ型やヘキサロータ型のヘリコプターや、超小型固定翼機が実用化された。これらは従来は模型ヘリや模型飛行機として分類されていたが、短時間のローカルな屋外の情報収集や上空からの撮影などのためには、実用上十分な性能を持つに至り、商品化もなさ

れている。しかしながら、超小型ヘリの場合、強風時や建物の近くや複雑な配管などがある場所を安定して飛行することは、未だ困難である。一方、屋内については、クワッドロータ型のヘリでマップ作成を行う研究がなされ、デモを行っている研究室も米国等でごく少数存在するが、制約も大きく、まだ先端的研究の段階である。

その主たる原因は、周囲環境をオンボードセンサで正確に計測することが困難であるため、そのような S/N 比 (Signal to Noise ratio) の悪いデータから、ロボットの位置の推定、障害物の位置の推定やマッピング、障害物回避の制御や計画を行うことができないこと、機体を静止させることが困難であることにあると考えられる。これらについてブレイクスルーが必要である。さらには、前に述べたように、飛行時間やペイロードの問題などの解決が望まれる。

以上のことから、A) 適用可能性拡大、B) ブレイクスルー、の観点で優れており、本テーマを重点化すべきである。

## (2) 問題点とそのブレイクスルーのための研究開発

超小型飛行体の実用化のためには、前に述べた技術的な問題点の解決、および、その利用技術の開発が必要であり、以下の研究開発が望まれる。

### 1) 地上走行ロボットや車両との組み合わせによるシステム化 (高度実用化研究)

飛行時間が短い問題、搭載できるペイロードの限定、搭載できるセンサの制約、作業を行うことは困難である事、などの問題点を、超小型飛行体単体で解決することは、技術的に大変困難であり、バッテリーやモータの性能向上、すなわち、そのための材料の改良などが進む必要があり、時間を要する。現場での実用的な運用を可能にするという観点からは、具体的な作業を想定したシステム化により、問題を解決することが近道である。

そのため、地上走行ロボットや車両と組み合わせることによって、システム化を行うことが望まれる。すなわち、車両等からの充電、車両からの飛行体の位置モニタリングとそれによる飛行体の制御へのフィードバック、車両等に搭載した 3 次元形状計測センサ等と飛行体の形状センサ等とのデータ統合による相補的なマッピング、などが必要である。さらには、技術熟成度レベルを高めるために、想定される現場への適用が必要であり、試行を繰り返すことによってさまざまな問題点を洗い出して、現場性能の改良をすすめることが必要である。

### 2) 壁面吸着・壁面走行・係留など静止手段との組み合わせ (基盤技術研究)

風の強い屋外、電線や配管など障害物が入り組んだ場所、狭い屋内などで、周囲と接触せずに飛行することは大変困難である。また、飛行しながらの位置決め精度は低く、静止することは困難であるため、センシングの精度を上げることが難しい。バッテリー持続時間の問題もある。これらを解決するために、壁面に吸着して静止する、壁面に沿って走行する、ケーブルなどで係留する、など、ハエやクモのように、障害物を活用して静止することによって、位置決めや制御安定性の問題を解決する方法が有効であると考えられる。

## (B) 壁登りロボットによるモニタリングシステム

### (1) 必要性

壁登りロボットの近年の発展は著しい。登壁ロボットは、短時間に広範囲を調べられるため、手軽な災害状況調査や点検のための手段となる可能性がある。磁性材料の性能向上により、鋼構造物については、平面壁のみならず、オーバーハングなどを登ることも可能

になってきた。また、吸引、吸着、粘着その他の手段によって、コンクリート構造物についても、平面壁は問題なく登ることができるようになってきた。そのため、現在の管検査ロボットや壁検査ロボットの現状から、適用範囲は今後さらに広がっていくと予想されている。

以上のことから、A) 適用可能性拡大、の理由によって、重点的に進めるべきであると結論づけられる。

## (2) 問題点とブレイクスルーのための研究開発

壁登りロボットの実用化のためには、前に述べた技術的な問題点の解決、および、その利用技術の開発が必要であり、以下の研究開発が望まれる。

### 1) 運動性能の向上（基盤技術研究）

現状の登壁ロボットは平面上では十分な運動性能を持っているが、オーバーハング、フランチ、ボルト、すきまのある壁、窓などとの段差、等々の状況によっては、動くことが難しい場合がある。運動性能を高度化し、動ける範囲を拡大することは、実用性確保のために最も重要である。複雑な構造物を登るためには、登るルート、手がかりの使い方の計画やシミュレーションを行う必要がある。また、失敗の可能性の推定と見積もり、失敗確率を減らすための計画、失敗した際のリカバリの計画、なども必要である。従来はこれらをロボット単体で行おうとしてきたが、限界があるため、システム化や他の方法論との併用（クレーン・地上ロボット・飛行ロボットなどの活用、ガイド敷設や命綱によるぶら下がりなど）によって、システム全体としてこの問題を解決する必要がある。

### 2) 壁登りロボットによる非破壊検査（高度実用化研究）

壁登りロボットに搭載できるようにセンサを軽量化し、複雑な形状や入り組んだ対象物に対して、センサプローブの位置決め・スキャンニングを行うことができるようなシステムの研究開発が必要である。それによって、従来の大口径鋼管などを対象とした壁登りロボットを超えた性能を実現する必要がある。

## (C) 狭所探査ロボットによるモニタリング

### (1) 必要性

災害対応・復旧においては、倒壊構造物からの搜索と救助、災害被害の詳細調査（構造被害、汚染状況、腐食調査他）など狭所探査ロボットに対するニーズは大きい。災害予防のためには、インフラ配管設備・橋梁などの狭い場所の点検、危険箇所内部調査によって、修繕すべき箇所を特定することが必要であり、狭所探査ロボットはそのための重要なツールである。調査ができれば修繕法を最適化することが可能であるため、コスト低減にも有効であると考えられる。内視鏡など、日本が先端を走っている分野の一つであるが、能動スコープカメラ、ヘビ型ロボットなど、狭所にもぐり込むための技術が我が国主導で近年発展してきており、実用化を図ることが必要である。

以上のことから、A) 適用可能性拡大、B) ブレイクスルー、C) 日本の強み、の3つの点から、重点的に進めるべきである。

## (2) 問題点とブレイクスルーのための研究開発

### 1) 狭く複雑な場所での安定した進入・退避（基盤技術研究）

現状の狭所探査ロボットは、25mm以下の幅の管路や狭い場所の通過、回転半径 50mm

以下の場所での旋回、瓦礫等の不整地での走破、進行方向・横方向に傾いた面での走破、柔軟面・絨毯面・滑りやすい面などでの走破、段差垂直方向・段差斜め方向の走破、ギャップのまたぎ超え走破、進行方向・後退方向への運動、周囲物体への引っかかり回避、などの点で能力が不足しており、障害物が多数ある災害空間への進入・退避性能が十分でない。これらの問題は、走行のためのアクチュエーションの原理・運動の方式・機構・制御による改善に加えて、ロボット位置の推定、走行経路の推定、周囲状況の認識、走破の戦略、失敗時のリカバリなどを考慮に入れた問題の解決が必要であり、基盤技術研究が必要である。

## 2) クレーンなどとの組み合わせによるシステム化（高度実用化研究）

これまでの狭所探査ロボットは狭所入口に操作員が位置して内部への進入・退避を行うことが想定されていた。ところが、入口へのアクセスが困難であるため適用できない災害事例が多数あった（倒壊事故、福島原発、プラント検査など）。以上から、ユニック車・クレーン・はしご車・建設重機・マニピュレータなどと組み合わせてシステム化を行い、システム全体の協調制御の問題を解くことによって、探査すべき狭所入口までのアクセスを確保することが必要であり、高度実用化研究が必要である。

## 2-6-2 ロボットによる現場の悪影響の防止

ロボットが現場に悪影響を与えないこと、特に安全性は必須の要件である。これについては、下記の取り組みが望まれる。

### (A) 防爆技術と規格

#### (1) 必要性

我が国で毎年十数件発生している CBRNE 災害の多くには可燃物・爆発性物質が関係しており、その危険性によって災害対応・復旧が阻まれる事例もある。新潟県のトンネル内爆発事故ではロボットの適用が検討されたが、防爆性能の不足により断念された。福知山線脱線事故の救助現場には自動車から漏れ出たガソリンが充満しており、狭所探査ロボットがあっても適用は困難だったと考えられる。

ロボットのような動く軽量機械のための防爆構造に関する技術開発と基準の整備が遅れている。耐圧防爆・油入防爆のためには重量が重くなって運動性能が犠牲になり、本質安全防爆・樹脂充填防爆はモータのために不可能であるため、内圧防爆が必要であり、火花が飛ばないために災害空間におけるアース、材料や表面加工などの技術が必要である。さらには、規格・法律・保険制度を整備し、爆発時の免責を担保する必要がある。

以上のことから、A) 適用可能性拡大、C) 日本の強み、の2つの理由によって、重点的に進めるべきであると考えられる。

#### (2) 問題解決のために必要な事項

##### 1) 小型軽量ロボットに有効な防爆技術の確立と基準の明確化（高度実用化研究）

小型軽量ロボットに実用的に使えるような防爆技術を確立し、現場状況に応じて安全性のレベルを定量的に見積もることができる基準を明確化する必要がある。

##### 2) ロボットが使えるように法令を整備（制度）

安全基準を明確化し、危険性に応じた詳細な基準を法令あるいは省令として制定することが必要である。ロボットが広く使われるためには、基準が国際的に標準化されているこ

とが必要である。

## (B) 防災ロボットの現場適用のための国際安全規格の策定

### (1) 必要性

防災ロボットは従来の災害対応資機材とは大きく異なる性質を持ち、日常生活用ロボットとも異なる性質を持っている。そのため、現場適用を進めるためには、独自の安全規格が必要である。

これは、防爆の問題と同様に、A) 適用可能性拡大、C) 日本の強み、の2つの理由により、重点的に進めるべきであると考えられる。

### (2) その方法論

防災ロボットセンターを中心にして、生活支援ロボット安全検証センター、日本消防検定協会等の専門機関が協力し、国内外の有識者やその他関連機関の協力を得ながら、標準化や規格化を進めるべきである。

## 2-6-3 無線通信、有線通信の問題点の解決

ロボットを遠隔操作したり、ロボットが収集した情報を伝送するためには、通信手段が重要である。特殊環境では人間がアプローチすることが阻まれるため、信頼性の高い十分な能力を持った通信手段が不可欠である。従来から無線通信と有線通信が現場に応じて使い分けられてきているが、その両方について、高度化が必要である。

### (A) ロボット用無線通信の高度化

#### (1) 必要性

無線通信による遠隔操作のためには、無線通信のチャンネル数、通信時間遅れ、安定性、通信距離などが重要であり、収集した情報を伝送するためには伝送容量も重要である。使用電力の問題もある。通信ができなくなると、ロボットを回収できなくなったり、誤動作を引き起こす原因となり得るため、極めて重要である。災害現場では無線通信インフラを短時間に整備することができないため、これらが問題となるケースが多く、制度の整備と技術開発が必要である。

以上のことから、A) 適用可能性拡大、の観点から、この問題の解決を重点的に図っていく必要がある。

#### (2) ブレイクスルーのために必要な事項

##### 1) 防災ロボット用専用無線周波数割り当て、電波出力制限緩和（制度）

災害現場でのロボット運用、ロボット使用訓練、ロボット開発試験のために使用可能な防災ロボット用の専用無線周波数を割り当てる必要がある。さらには、電波出力の制限を緩和し、必要なエリアでの通信ができるようにする必要がある。

##### 2) ロボット用メッシュネットワークの実用化（高度実用化研究）

必要なエリアをカバーするためのメッシュネットワークにおいて、限定された使用電力とロボットに搭載するための小型軽量、移動、複数ノード、リアルタイム要求というさまざまな制約条件下において、レイテンシーの改善、伝送容量の優先割当、ルーティング変更の高速化、ハンドオーバーの短時間化を行う必要がある。さらには、アンテナ、

リピータ、漏洩同軸アンテナ、伝送ケーブルの設置を迅速に最適化できる必要がある。

### 3) 無線通信の問題を解決するためのロボットの自律知能（基盤技術研究）

通信遅延・伝送容量・伝送距離・安定性等の問題を、無線技術だけでなく、ロボットの自律知能を使うことにより解決する必要がある。

#### (B) ロボット用有線通信の高度化

##### (1) 必要性

無線通信の条件整備が困難な現場では、有線通信を使う必要がある。さらには、災害現場でロボットが失われないためには、係留索が必須であるケースも多い。このような場合には、通信ケーブルのマニピュレーションが大変困難な課題である。すなわち、ロボットの運動を妨げないこと、ケーブルの切断・絡まり・引っかかりを避ける手法、ケーブルリールの小型軽量化、ケーブル引っ張り負荷の軽減、ケーブルのルーティングなどの問題を解決しなければならない。これら有線通信の問題については研究開発が遅れており、重点的な取り組みが望まれる。

以上のことから、A) 適用可能性拡大、の観点でこのテーマを重点的に進めていかなければならないと判断する。

##### (2) ブレイクスルーのために必要な事項

###### 1) ケーブルマニピュレーションの研究（基盤技術研究）

ケーブルの制御、ケーブルを這わせたり移動させる戦略計画問題、ケーブルが引っかった際の外し方、ケーブルの状態推定、などの問題をロボット知能の基盤技術研究として解決する必要がある。

###### 2) ロボット用専用ケーブルの開発（高度実用化研究）

運動を阻害しないケーブル、引っかかりにくいケーブル、自走式ケーブル、ケーブルハンドリング機構、ケーブル材料・構造、ケーブルリール・敷設ガイドの機構・制御などの高度実用化開発が必要である。

#### 2-6-4 遠隔状況認識、知能化、自動化

##### (1) 必要性

遠隔操作の困難性の多くは、周囲の状況やロボットの状態を操作者が直感的に認識できないことに起因している。この問題は、従来から多数の研究がなされてきたが、依然として困難な共通課題である。大型のシステムは災害現場への導入に困難があるため、簡便で効果的な技術が望まれている。

この問題は明らかに、A) 適用可能性拡大、の点で非常に重要であり、重点的に研究開発が進められなければならない。

##### (2) 問題点とブレイクスルーのための研究開発

###### 1) 災害環境下でのセンサおよびセンサ情報処理の高度化（高度実用化研究）

災害環境下で使えるロボット搭載センサの小型軽量化、視野拡大、精度向上等は、根本的な課題である。また、センサ情報処理、認識なども同様に重要である。最新の手法の適用試験と評価が重要である。

###### 2) 広域長時間飛行による災害状況の自動把握の高度実用化（高度実用化研究）

災害の初期情報収集の信頼性と安全性を高め、実戦配備を図ることが重要である。目視外の遠距離での使用を想定し、燃料切れ、データリンクの途絶、突風等の不測事態等への対応能力を高める必要がある。

### 3) ヒューマンインタフェース・情報提示の課題解決（基盤技術研究）

現場状況を操作者が認知イメージとして正確に持つことができることが重要である。認知速度の向上、違和感や疲労の低減、勘違いする確率の減少、習熟速度の向上などが必要である。ヒューマンインタフェースの設計問題だけでなく、情報増強や自律機能支援による方法が考えられる。大型システムは災害現場に持ち込むことは困難なので、小型簡便で効果的な技術が望まれている。

### 4) 状況認知知能の高度化（基盤技術研究）

センサ情報処理として、多種センサ情報から状況推定を行うマルチモーダルセンシング、マルチモーダルヒューマンインタフェースが重要である。

### 5) アクティブセンシング、複数ロボット協調センシング、ネットワークセンシングの課題解決（基盤技術研究）

不足情報を能動的に取得するアクティブセンシング、複数台のロボットが協調したセンシング、多数のセンサをばらまくことによるネットワークセンシング、ビッグデータからの状況推定、などが課題である。

### 6) 収集した情報の統合と解釈（基盤技術研究）

収集した情報は GIS（Geographical Information System : GIS）に統合され、3D マッピングがなされなければならない。それらのデータは、画像認識やデータマイニングやビッグデータ解析によって統合的に解釈され、情報の持つ防災における意味を十分に引き出し、活用できるようにする必要がある。

## 2-6-5 無人化施工の高度実用化研究開発推進

無人化施工はこれまで数多くの災害で実績を上げ、福島第一原子力発電所事故対応にも大きく貢献した。この研究開発を継続的に推進していくことは、強く求められる。

COCON では、この問題の重要性をとりあげ、無人化施工協会、大手建設会社、建設機械メーカーを中心として議論を行い、下記のテーマが重要であるという結論を導いた[1]。

この問題は明らかに、A) 適用可能性、C) 日本の強み、の観点から非常に重要な課題であり、重点的に進めるべきである。

### 1) 緊急対策工事用無人化油圧ショベル

ヒューマンインタフェースの高度化による空間認識力向上、車体の自律安定化制御が重要である。

### 2) 水陸両用運搬車両

水中走行クローラの信頼性、安全性が基本性能として重要である。また、水中地形計測、地盤認識、海底地質調査、安定性評価、転倒防止などの機能開発が求められる。

## 2-6-6 コンテスト形式によるロボットの基盤技術研究の奨励

現場模擬環境で災害対応ミッションを完遂させることをテーマとしたロボットコンテストの奨励を図るべきである。Quince はロボカップへの参加によって実用化が加速され、米国では DARPA Robotics Challenge が開始された。フィールドでのきちんとした性能評価基準に基づいたロボットコンテストを開催することによって、大学・独法・国研等のロ

ボットを実用に近づけ、我が国の研究レベルの全体的なレベルアップを図ることが必要である。また、関係省庁・ユーザ・国民一般に対して、研究成果と課題を理解しやすい形で見せることが重要である。

この問題は、A) 適用可能性、B) ブレイクスルー、D) 費用対効果の観点から、重点的に進めるべき課題である。

1) ロボカップレスキューなど、防災研究を目的としたコンテストの運営および参加への、国を挙げた支援

防災研究を目的とした国際コンテストの運営、国際コンテストへの参加に対して、国を挙げた支援を行い、防災ロボット研究の奨励を図るべきである。

2) 東日本大震災等の災害を踏まえた、新たなコンテスト、あるいは、コンテストのカテゴリの創設

東日本大震災等の災害に関する知見を基に、ロボット技術が防災に役立つための新たなコンテスト、あるいは、既存コンテストの中での新たなカテゴリを、災害環境の解析とロボットの性能評価基準をふまえ、国際的な協力により、創設すべきである。

## 2-6-7 国際標準化、規格等の整備

下記のような標準化、規格化が必要である。

(A) ロボット・ロボット部品・各種モジュールの性能評価法の確立と、性能評価法の国際標準化

### (1) 必要性

ロボットや部品等を開発・改良する上において、信頼性を含め、性能評価法を確立し、標準化することは重要である。性能評価によって、現場での実用性能を仮想環境で見積もることが可能になり、実用の観点から研究開発すべきポイントが明確になるため、研究開発の効率が上がり、コスト低下が期待される。評価基準がユーザニーズを適切に反映できれば、必要な仕様などを詳細にわたって正確に定めることが可能となり、研究開発側とユーザ側との間にある死の谷を埋めることができる。

これは明らかに、E) 市場拡大、の観点から非常に重要な施策であり、しっかりと進めていくことが必要である。

### (2) その方法論

テストフィールド・モックアップ試験、現場適用試験を通じて、ロボットに対する各種性能のニーズを明らかにし、国内外の機関（産総研、消防検定協会、米国 NIST など）との協力のもと、国際標準機関（ASTM、ISO、IEEE など）を活用しながら、標準化を進めていくことが不可欠である。また、その標準に対して認証を出していくことなども必要である。

(B) 特殊環境用ロボット部品・モジュールの可換性・再利用性を高めるための、国際標準化と規格化

### (1) 必要性

特殊環境用ロボットの市場は大きくないので、標準化によって部品や各種モジュール（ハードウェア、ソフトウェア）の可換性や再利用性を向上させることが必要である。

これは、D) 費用対効果、E) 市場拡大、の観点から重点的に進めることが望まれる課

題である。

## (2) その方法論

防災ロボットセンターが中心となって、国内外の有識者や関連機関の協力を得ながら、標準化や規格化を進めるべきである。

## (C) 防災ロボットの国際安全規格の整備

防災ロボットの国際安全規格について、防爆などをはじめとして、整備を進めるべきである。

これは防爆と同様に、A) 適用可能性の観点から進めていかねばならない課題であり、危険性の高い現場へのロボットの導入を推進するために必要である。

## 2-6-8 全国に複数の研究開発拠点の整備、および、防災ロボットセンターの開設

### (A) 全国に複数の研究開発拠点の整備

特殊環境用ロボットの研究開発を推進するため、全国に複数の研究開発拠点を設置することが必要である。複数の拠点を設けることによって、競争原理が働き、優れた成果と研究開発の加速が期待できる。拠点運営の効率化のため、大学・独法・国研を積極的に活用し、既存組織の中に拠点を設けることが得策である。また、国際的な協力を進め、海外との技術交流、情報や人材の相互流通を行う必要がある。

設置場所としては、関連する省庁とのコミュニケーションが容易な東京地区の大学、防災科学国際研究所を持つ東北大学、防災研究所を持つ京都大学、生活支援ロボット安全検証センターをもつ産総研などが適している。いずれにしても、一流の人材が継続的に確保しやすい条件を備えていなければならない。

この問題は、B) ブレイクスルー、(C) 日本の強み、の観点から重要であり、最先端技術を開発し維持するための生命線である。この問題は企業が営利目的で継続して研究開発していくことはできないため、政府が税金を投入し、国民に対する責任として進めなければならない。

### (B) 防災ロボットセンターの開設

種々の災害模擬現場を設置した防災ロボットセンターが必要である。実用的な特殊環境用ロボットを開発するには、災害模擬現場で繰り返し試験を行い、改良を進めることが必須であるが、日本にはそのようなセンターがロボットに最適な形で存在していなかった。フィールド試験にもとづく性能評価、公開試験会の開催などが望まれる。そこには、種々のロボットを配備し、いつでも使用できるように整備し、試験訓練を行い、防災ロボットのショーケースとして機能させることが望ましい。大規模災害が起きたときには、災害対応組織に対してロボットを貸し出し、協力しながら災害対応活動を進めるべきである。

開設場所としては、ロボットの成果が見えやすく災害時出動が容易な立川や有明の広域防災拠点、東日本大震災で被災して放射能の影響が深刻な南相馬市、などが考えられる。大規模なものを全国に一カ所開設し、小規模なものは全国の複数の研究開発拠点に設置することが望ましい。

## 2-6-9 ロボット適用に必要な制度と環境の整備

ロボット適用に必要な制度と環境の整備は重要である。特に下記の3点を重点的に進める必要がある。

### (A) 災害対策基本法に基づく制度整備

災害対策基本法に基づいたロボット使用のガイドラインの整備を行い、国交省・防衛省・消防庁・警察庁・海上保安庁、自治体等が積極的にロボット配備を進められるようにする必要がある。

### (B) 老朽化インフラ・産業設備維持における積極的活用

老朽化インフラ・産業設備の補修やメンテナンスにおいて、ロボットが積極的に活用されるためのインセンティブ制度を整備し、平時よりロボットが活用されるようにし、災害発生時に必要なロボットの台数と操作員の人数を確保する必要がある。

### (C) 調達障壁の低下

調達を進めやすくするため、最新技術情報、現場環境での実用性能評価情報を定期的に収集し、カタログ化しておくことが必要である。また、海外への技術・製品情報の流通、海外製品の情報の流通を促進すべきであり、国産品を積極的に海外に売り込むべきである。

以上をまとめたものを、図2-25、および、図2-26に示す。



図2-25 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 2-26 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

2-7 ロードマップ

以上の提言に関するロードマップを図2-27に示す。計画的にプロジェクト等を推進していくことが望まれる。

ロードマップ		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021-
基盤技術研究	遠隔現場アクセシビリティ向上	プロジェクト検討	手法開発	手法改良	プロトタイプ開発	模擬現場試験改良	模擬現場実証	現場実証試験配備	製品検討・開発	製品配備
	無線通信・有線通信		プロトタイプ開発	模擬現場試験改良	製品検討	製品開発	製品配備			
	遠隔状況認識・知能化・自動化									
高度実用化研究	遠隔現場アクセシビリティ向上	規格検討	プロトタイプ開発	手法改良	現場実証試験配備	製品検討	製品開発	製品開発	製品開発	製品開発
	無線通信・有線通信									
	遠隔状況認識・知能化・自動化									
防爆技術										
規格・法令整備				標準化運動		規格策定				標準規格化

図2-27 推進のためのロードマップ

## 2-8 予算

この推進のためには、表2-8に示すような予算措置が必要である。

表2-8 防災ロボットに必要な予算（単位：百万円）

	高度実用化研究（経産省等）		基盤技術研究（文科省等）	
	内訳	金額	内訳	金額
遠隔現場アクセシビリティ向上	100×6件×3年	1,800	50×9件×5年	2,250
無線通信・有線通信	100×4件×3年	1,200	50×6件×5年	1,500
遠隔状況認識・知能化・自動化	100×5件×3年	1,500	50×8件×5年	2,000
コンテスト形式研究奨励			30×8件×5年	1,200
国際標準規格化	20×4件×6年	480		
研究開発拠点整備			(800+100×10年)×5件	9,000
防災ロボットセンター開設	8,000+300×10年	11,000		
合計		15,980		15,950

積算の考え方：

遠隔現場アクセシビリティ向上、無線通信・有線通信、遠隔状況認識・知能化・自動化に関しては、高度実用化研究のためには企業を想定して1種類が毎年100百万円程度は必要であり、基盤技術研究は大学や独法を想定して1種類が毎年50百万円程度は必要である。コンテストに関しては、ロボカップレスキューなどの事例によれば、研究開発費と交通費等で1チームあたり毎年30百万円程度必要であり、8チーム程度は支援される必要がある。国際標準化には人件費と交通費等で毎年20百万円程度が必要である。研究開発拠点に関しては、規模にもよるが最初に整備する際に設備等のために800百万円程度が必要であり、人件費や研究開発費として毎年100百万円程度が必要である。防災ロボットセンターに関しては、規模にもよるが最初に開設する際の用地や建物として8,000百万円程度必要であり、人件費やロボット整備費として毎年300百万円が必要である。

## 2-9 参考：Quinceの研究開発に関する事実関係について

福島第一原子力発電所原子炉建屋の2～5階を探索したQuinceの成り立ちについて、下記の事実関係が意外に知られていないように見受けられるので、本報告書に参考データとしてまとめて記述することとする。これらの事実関係も参考にしながら、将来のプロジェクト等を立案していくことが望まれる。

### (1) Quinceがなければ、冷温停止状態の実現は遅れた、または、困難だった

NEDO戦略先端ロボット要素技術開発プロジェクトで開発されたQuinceは、福島第一原発の事故対応に使用され、原子炉建屋の2階～5階を調査する事ができた。このような危険な災害現場には作業員が入ることが極めて困難であり、Quinceがなければ冷温停止状態の実現はかなり遅れ、場合によっては危険な状況にも至っていた可能性があると考えられる。特に、7月26日に3号機原子炉建屋内で行ったスプレー冷却系の調査は極めて重要であり、バルブや配管系を調査する事によって初めて冷却系の2重化の工事に着手することができた。2重化前までは90℃以上あった炉内温度は、それ以降急激に低下して、30℃程度に下げることができた。

(2) NEDO 戦略先端ロボット要素技術開発がなければ、Quince は存在しなかった

Quince は同プロジェクトで開発され、その後の改造によって福島第一原発に投入されたものであり、NEDO プロジェクトがなければ世の中に存在していなかった。

(3) 文科省大大特プロジェクトがなければ、Quince は存在しなかった

Quince は NEDO プロジェクトだけによってできたものではなく、それまでのレスキューロボットの研究開発の積み重ねによってはじめて開発が可能になったものである。科学的な研究開発の項目はそれまでの研究開発の延長線上にあり、それを基盤として NEDO プロジェクトで改良が行われた。さらには、それ以前に、技術的な問題点の整理、ロボットの適用場面や条件の整理、消防等との協力、国際的な協力、Disaster City などのフィールド試験、災害現場への適用、などは、研究開発ができるための必要条件であり、それらが文科省大大特プロジェクトによって開始され、培われてきたため研究開発が初めて可能になったものである。これらがなければ Quince は存在していない。

(4) ロボカップレスキューがなければ、Disaster City などでの評価試験はなかった

ロボカップレスキューは米国 NIST との協力によって続けてきた災害対応ロボットのコンテストであり、その中で不整地走破、災害現場情報収集、自律化、マニピュレーションなどの技術的な試験をベースとした、国際共同研究協力が醸成されてきた。NIST はロボカップレスキューの経験に基づいて、ホームランドセキュリティ省からの受託で災害対応ロボットの評価標準化のプロジェクトを立ち上げており、ロボカップレスキューがなければ評価標準化はなく、Disaster City でのフィールド試験も、FEMA 等のファーストレスポンスとの協力もなかった。

(5) ロボカップレスキューがなければ、Quince は存在しなかった

Quince の前身である Kenaf はロボカップレスキューに何度も出場し、そのルールの中で良い性能を実現することを中間目標として研究開発が促進された。また、他の出場者からのさまざまな情報提供やコメント、他のロボットとの比較は非常に有益であり、問題に対する解を与える上で大きな参考になった。ロボカップレスキューの問題設定がなければ、Quince は存在していなかった。

(6) Disaster City のようなフィールド試験がなければ、Quince は存在しなかった

Disaster City、東京消防庁立川訓練所、兵庫県消防学校などでのフィールド試験は、Quince の不足する性能を明らかにし、それを充足するための研究開発を進め、問題点が解決できたかどうかを確認するために、非常に重要であった。また、Packbot 等との性能比較も、フィールド試験によって初めて可能になり、Quince でなければ原子炉建屋内の上階に登ることが困難であるという事実も明らかにならなかった。以上のように、フィールド試験がなければ、Quince の適用はあり得なかった。

(7) 多くの協力者の政治的な支援無しには、Quince の活用はなかった

Quince の性能が認知され、東京電力が Quince 投入の決断を行うまでに、さまざまな政治的な意味での支援があった。それがなければ、Quince は認知されず、活用されることはなかった。

(8) 多くの協力者の技術的な支援無しには、Quince の改造は不可能だった

放射線の影響に関する JAXA や JAEA など専門家からの情報、無線通信に関する専門家からの情報、高湿度対策に関する情報、各種部品に関する情報など、さまざまな情報が3月から4月初めにかけて協力者から得られたことによってはじめて Quince を原子炉建屋内に投入できる状態に仕上げることができた。

(9) NEDO、国際レスキューシステム研究機構、千葉工業大学の3者の費用負担が無ければ、Quince の改造はできなかった

3者は多額の負担を行い、それによってはじめて東京電力に Quince を無償貸与することが可能になった。

ただし、NEDO は、人間が立ち入り困難な実災害現場において、災害現場の状況等を情報収集できる遠隔操作型災害対策用ロボットの開発に必要な仕様やデータ、またロボットの操作や保守管理等の運用面について必要となる知見について情報収集することを目的とし、ロボットの改造等を伴う調査事業を行い、この目的に対して費用を負担した。

(10) 東京電力の技術者や作業員によるダメ出しがなければ、Quince は投入できなかった

2ヶ月間にわたって、信頼性などの問題点の改善、作業員にミスを起こさせないための工夫やチューニング、作業員がミスしてもミッション遂行を妨げないようにするための工夫など、現場投入を前提としたブラッシュアップが行われた。これがなければ、Quince は原子炉建屋内で使用できるレベルには至らなかった。

(11) 千葉工業大学小柳教授を初めとするメンバーの夜を徹した努力無しには、Quince は投入できなかった

メンバーの多大な尽力により、Quince の投入が可能になった。

## 2-10 まとめ

以上を要約すると、重点的に研究開発を進めるべき技術として、下記が重要である。

- ・遠隔現場へのアクセシビリティ向上（特に、超小型軽量飛行体、登壁ロボット、狭所探査ロボット）
- ・ロボットによる現場悪影響の防止（特に、防爆技術・規格）
- ・無線通信・有線通信の問題点解決
- ・遠隔状況認識・知能化・自動化
- ・コンテスト形式による基盤技術研究の奨励

さらには、重点的に進めるべき規格標準化や、重点的に整備すべき組織・制度として、下記が重要である。

- ・ロボットの性能評価法の国際標準化
- ・部品の可換性のための国際標準化
- ・国際安全規格の整備

- ・全国に複数の研究開発拠点の整備
- ・防災ロボットセンターの開設

また、下記のような技術以外の中長期課題を指摘した。

- ・ユーザ・発注者・予算決定者がロボット能力を知る
- ・開発者・販売者・レンタル業者がユーザニーズを知る
- ・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
- ・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
- ・ロボットが現場で継続的に使用・試験・訓練される
- ・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
- ・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
- ・ユーザ間の協力
- ・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
- ・現在あるニーズによってロボットを育てる
- ・法と制度の整備

今後、特殊環境へのロボットの活用が進み、防災や安全安心などの問題解決にロボットが寄与することを願っている。

- [1] 災害対応ロボットと運用システムのあり方最終報告、産業競争力懇談会 COCN、2013
- [2] 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」研究成果報告書、文部科学省、防災科学技術研究所、国際レスキューシステム研究機構、2007
- [3] 日本機械学会東日本大震災調査・提言分科会報告書、第5章、被災地で活動できるロボット課題の整理、2013
- [4] 日本ロボット学会東日本大震災関連委員会原子力記録作成分科会報告書、2013
- [5] 平野光将、軽水炉の確率論的安全評価(PSA)入門、第1回 PSA 技術活用の経緯と基本的考え方、日本原子力学会誌、Vol. 48, No. 3, pp. 38-44, 2006
- [6] 根本祐二、朽ちるインフラ、日本経済新聞出版社、2011
- [7] 国土交通白書 2012
- [8] 日本経済 2010-2011 内閣府政策統括官室、2010
- [9] 2011 年度メンテナンス実態調査報告書概要、日本プラントメンテナンス協会、2012
- [10] NHK クローズアップ現代、コンビナート・クライシス、2012
- [11] J. C. Mankins, Technology Readiness Levels: A White Paper, NASA, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office, 1995.  
(<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>)
- [12] 田所諭、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
- [13] 田所諭、災害対応のためのロボティクスー想定外の想定は日本再起のきっかけ、経済

Trend、8月号、pp. 24-25, 2011

[14] 田所諭、防災ロボット活用元年、情報処理、Vol. 54, No. 1, 巻頭言、2013

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  
推進と競争力の強化に関する調査  
(Test Field & Test Method 等の将来像)

報告

2013年3月

一般社団法人日本ロボット工業会

### 3-1 特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の現状と課題

#### 3-1-1 分野毎の調査

##### (1) 消防防災分野

###### ①NIST/ASTMによるレスキューロボットの性能試験評価

インターネット、GPS(Global Positioning System)という世界規模のイノベーションを達成したアメリカの技術開発政策には見習うべき点が多い。以下では、アメリカにおける Urban Search And Rescue Robot (USAR ロボットとも以下では表記) 開発に見る技術標準化の動きを紹介する。

##### a) 技術標準化の現状

アメリカにおける USAR ロボット開発では、アメリカ国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology、NIST)が中心となりレスキューロボットの技術標準化を進めている。NIST はアメリカ合衆国商務省(United States Department of Commerce)の配下の研究所であり、USAR ロボット技術標準化の活動はアメリカ国土安全保障省 (U.S. Department of Homeland Security、DHS) の推進する一連の対テロ・自然災害対策技術開発の一環として2005年から5年計画で実施された。開発された技術標準は ASTM (米国材料試験協会: American Society for Testing and Materials)の Committee E54 on Homeland Security Applications で12のカテゴリーで規格化が進められており、2013年現在、既に17規格が発行されている。以下にその詳細を示す。

カテゴリ名
規格番号：規格名称

1. Terminology
E2521-07:a Standard Terminology for Urban Search and Rescue Robotic Operations

2. Mobility Terrain Test Methods
E2826-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Continuous Pitch/Roll Ramps
E2827-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Crossing Pitch/Roll Ramps
E2828-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Terrains: Symmetric Stepfields
E2829-11:Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Maneuvering Tasks: Sustained Speed
E2830-11:Standard Test Method for Evaluating the Mobility Capabilities of Emergency Response Robots Using Towing Tasks: Grasped Sleds

3. Mobility Obstacles Test Methods
E2801-11: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Gaps
E2802-11: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Hurdles
E2803-11: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Inclined Planes
E2804-11: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Stairs/Landings

4. Energy/Power Test Methods
(該当なし)

5. Radio Communication Test Methods
E2854-12: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Radio Communication: Line-of-Sight Range
E2855-12: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Radio Communication: Non-Line-of-Sight Range

6. Manipulation Test Methods
(該当なし)

7. Human-System Interaction Test Methods
E2829-11 Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Maneuvering Tasks: Sustained Speed
E2830-11 Standard Test Method for Evaluating the Mobility Capabilities of Emergency Response Robots Using Towing Tasks: Grasped Sleds
E2853-12 Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Human-System Interaction (HSI): Search Tasks: Random Mazes with Complex Terrain

8. Sensor Test Methods
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

9. Safety and Environment
(該当なし)

10. Logistics
E2592-07 Standard Practice for Evaluating Cache Packaged Weight and Volume of Robots for Urban Search and Rescue

11. Small Unmanned Aerial System (sUAS) Test Methods
--

(該当なし)
--------

12. Small Unmanned Underwater System (sUUS) Test Methods
--

(該当なし)
--------

b) 技術標準の策定手順

技術標準の策定は次の3ステップを繰り返す事で進められている。

Step-1. レスキュー隊員等ユーザが求める要求仕様を調査

Step-2. 要求仕様を技術標準に変換

Step-3 技術標準の妥当性の検証

この3ステップの実行にあたっては、最新の情報が開発者、ユーザ、技術標準作成者間で適切に共有されるよう、ワークショップや技術標準評価訓練を実施している。

また、技術標準に基づく評価を適切に実施するために、評価試験手段と評価試験施設も併せて開発している。

c) 小結

多様な災害現場で用いられる USAR ロボットの技術標準の決定では、ガレキの形状など定量化するのが難しい因子が多数含まれており、工学的アプローチだけで技術標準を策定するのは困難である。NIST ではこの困難な技術標準化を、標準を作る組織と手順を State of the Art と考えられるレベル（芸術とも言える現状で最高のレベル）で実施することで、社会的に説得力のある形で実施している。特殊環境ロボットの標準化策定では、NIST の USAR ロボット技術標準策定方策には参考にするべき点が多いと考えられる。

また、NIST/ASTM での USAR ロボット技術標準化活動に関して、NIST 関係者へのヒヤリングを実施し次の意見を得ている：

- ・ 上記 17 規格以外にも複数の規格発行を NIST/ASTM では準備している。
- ・ USAR ロボットの関連技術と要求事項は多様性から、NIST 単独では USAR ロボットに必要とされる技術標準化をすべて実施するのは困難である。高い技術力と災害に対する多くの貴重な経験を持つ日本の協力を強く期待している。
- ・ 日本の産業用ロボットマニピュレータ技術は国際的に高い評価を得ており、USAR ロボット技術標準化活動のマニピュレーション分野でも日本の協力を期待している。
- ・ 現在の NIST/ASTM の USAR ロボット技術標準化活動は直接的な性能に関する部分が多く、製品ライフタイムに関する分野（例：耐久性）や、耐環境性に関する分野（例：防爆）での標準化の取り組みが遅れている。これらはロボットの信頼性に関わる分野であり、製品の高い信頼性が国際的に評価されている日本には、同分野での標準化活動にその知見を生かしてほしい。
- ・ 今後の USAR ロボットの国際的普及を考えると、アジアに多くある木造家屋の倒壊現場を意識した Test Method の開発が必要である。木造家屋の知見が豊富にある日本の

協力を期待している。

以上のことから、特殊環境ロボットの技術標準化は米国で先行して取り組まれているものの、我が国の災害ロボット技術と被災経験に基づく実運用実績等を活用した貢献は、今後大いに期待できると考えられる。

参考文献：Elena Messina、Adam Jacoff、et.al、“STATEMENT OF REQUIREMENTS FOR URBAN SEARCH AND RESCUE ROBOT PERFORMANCE STANDARDS (Preliminary Version)”

DHS and NIST Report、2005.

([http://isd.mel.nist.gov/US&R\\_Robot\\_Standards/Requirements\\_Report\\_\(prelim\).pdf](http://isd.mel.nist.gov/US&R_Robot_Standards/Requirements_Report_(prelim).pdf))

## ②日本の消防用ロボットの性能標準化・安全規格化

日本機械工業連合会と日本ロボット工業会により「平成22年度災害対応ロボットの安全基準調査研究専門委員会報告書」（日機連22先端-3、平成23年3月）がとりまとめられている。同報告書では、災害対応ロボットの安全基準の明確化に関する検討が次の3つの項目に分け議論されている。

- ・国際規格から見る災害対応ロボットにおける安全と責任のあり方
- ・災害対応ロボットの安全性評価
- ・災害対応ロボットの可用性評価

各項目での主要な内容は以下のとおりである

### a) 国際規格から見る災害対応ロボットにおける安全と責任のあり方

消防隊員へのヒヤリング等を通じて、災害対応ロボットの安全と責任のあり方では、安全性だけでなく可用性とのバランスを考慮することが重要であることを示した。

### b) 災害対応ロボットの安全性評価

消防では、機器の最高の性能を発揮するために、隊員が厳しい訓練により製品残留リスクを適切に制御している。ここでは、訓練により低減する事の困難な次の4分野の安全技術・規格を調査し、まとめている。

#### ア) 防爆性

IEC60079シリーズが主要な防爆安全関連規格である。防爆技術の中でも内圧防爆構造は、防水・防塵性も同時に高めるため、小型災害対応ロボットに適していると考えられる。内圧防爆では、その内圧監視も考慮する必要があり、サービスロボット向け小型安全信号処理技術の応用が期待される。また、屋外や通気性の良い被災環境では、防爆性の必要性が高くない場合もある、防爆性をロボットに付加する事は、その移動能力等を低下させる事にも繋がるため、災害対応ロボットの利用目的に応じて、適切な防爆性を考えるべきである。

#### イ) 電磁ノイズ (EMS/EMI)

関連規格として CISPR11 (医療機器等)、CISPR14 (電動工具)、CISPR22 (IT 機器)、IEC61000-6 (EMC 全般) がある。EMS に関して、災害環境でどのような電磁ノイズが生じ

ているか、これまでのところ定量的知見はない。よって、現状では既存の上記規格等を参考に対策を進めて行くのが現実的と考えられる。EMI に関しては、病院等の電磁ノイズに敏感な機器があると考えられる場合には、災害対応ロボットでも十分な考慮が必要であり、残留リスクとして現場で配慮してもらう必要が有る。

#### ウ) ユーザインタフェース(UI : User Interface)における人間工学的配慮

現状の災害対応ロボットは、遠隔操縦型が主流であり UI は重要である。関連する規格として、例えば次のものがある。

- ISO 13407 (人間中心設計)
- ISO 9241 (ユーザビリティ)
- IEC 60447 (ユーザインタフェース)

現状では災害対応ロボットに対して様々な UI が混在する形になっており、災害対応ロボットごとに一からその操作法を学ばなければならない。できるだけ早期に、可能な範囲で UI の標準化を図って行く必要がある。標準化では上記関連規格も合わせて考慮が必要である。

#### エ) 除染

除染に関しては、食品機械における衛生安全に対する取り組みが参考になると考えられる。食品機械安全は対応する ISO の TC が組織化されておらず、国際的には欧州の European Hygienic Engineering & Design Group (EHEDG, <http://www.ehedg.org/>) が主導して国際安全規格に類似する階層的な食品機械安全規格を構築している。

日本では JIS として、以下の食品機械の衛生安全に関する規格が整備されている。JIS B 9650-2 食料品加工機械の安全及び衛生に関する設計基準通則—第2部：衛生設計基準、JIS B 9651 製パン機械の安全及び衛生に関する設計基準等。これらの規格では、清掃のし易さ等の衛生安全設計の手法が述べられており、除染のし易いロボットの設計に有用な情報があると期待される。現状の食品機械の洗浄性の判定は、人手で洗って判定する場合が多く、より客観的な判定基準の整備が求められる。また、除染作業では作業者は防護服を着用としての作業となるため、通常の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）を考慮すべきである。

#### オ) 保守・点検

災害対応ロボットの使用状況に適した保守・点検の基準と手順の構築が必要である。点検の間隔の目安となる、標準的な使用状況の設定が必要と考えられる。

上記のア)～オ)の項目を含め、設計者と使用者によるできる限りの安全対策を実施しても、災害対応ロボットのすべての残留リスクはゼロにはできない。すなわち、すべての災害対応ロボットで偶発的な事故の発生の可能性はゼロにできず、この事故で生じた損害に対しては保険での賠償対応を考える必要がある。災害対応ロボットが用いられる可能性の高い消防業務においては、「消防業務賠償責任保険」といわれ

る消防業務時に発生した賠償責任に対応する保険がある。この保険は次の特徴をもっている。

- ・ 保険加入者は消防本部
- ・ 消防法に定める消防本部が実施する全ての業務（消火活動等）で生じる損害賠償請求に対応。対応する事故事例は以下の通り
  - 消火や救助活動中に、隊員が向きを変えた際、住民にぶつかりケガをさせた。
  - 消火活動が不十分であったため、再燃火災が発生し、被害が拡大した

災害対応ロボットの消防分野での普及のためには、上記の消防業務賠償責任保険への対応を考慮する必要がある。

#### c) 災害対応ロボットの可用性評価

多様な環境で使用される災害対応ロボットの可用性を判断するためには、その性能を測定する適切な標準的手法の開発が必要である。さらに、技術標準を設定する事で、技術開発や使用時の不要な努力を低減できると考えられる。災害対応ロボットの可用性評価の課題を検討する上で有用と考えられる技術標準化に関する取組例として、

1) NIST/ASTM の災害対応ロボット技術標準の日本での展開について

2) 消防庁における検知型ロボットの性能調査について

3) サービスロボットの性能標準化への取り組み調査結果（ISO の SC2WG8で議論中）、を紹介している。

また、「総務省消防庁国民保護・防災部参事官付、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～、平成21年9月」では、消防庁による検知型ロボットの性能についての調査結果が報告されている。調査は以下の項目に関して行われた。

1. 形状・重量
2. 性能
3. 走行性能
4. 操縦装置
5. 探査・検知機能
6. 維持管理
7. 「検知型ロボット」の実戦配備に際しての課題
8. その他必要と考えられる検討事項等

この調査では、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検知型ロボットを「比較モデル」として用い、具体的調査が円滑に行われるよう配慮している。調査の結果、比較モデルの基本性能は改良の要望が一部で有るものの、概ね消防での実戦配備で必要とする性能が有るとされている。また、次の要求事項を検知型ロボットの具体的な仕様の例として示している

- ・ 本体重量：20kg 以下

- 防爆性がある事
- 連続使用可能温度：－10～45度
- 防塵防水性：IP67

ここでは、比較モデルを用いる事でロボットの性能を具体的な数値により議論しており（例：重量18キロ、移動速度5km/h 等）、このような具体的データが消防側から提供される事は、災害対応ロボットの開発の加速に大いに役立つと考えられる。

## （2）農業分野

我が国の農業分野では、安全規格を制定するだけでなく、規格に基づく安全鑑定により安全な農業機械を明確にし、安全鑑定済機械の導入に対する補助事業を併用することで、安全な機械の普及に取り組んでいる。以下にその概要を説明する。

安全鑑定は、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター（以下生研センターと略記）にて実施されている。この鑑定は、生研センターで制定している「安全装備の確認項目と安全鑑定基準及び解説」に基づき農業機械をチェックをし、基準に適合する一定水準以上の安全性を有するかどうか判定するものである。平成 24 年度現在で、トラクターや田植え機など 117 機種 of 安全鑑定が行われている。安全鑑定を受けた機種は、カタログに安全鑑定済の表示がされるほか、生研センターのホームページでメーカー名、型式と共に公表されており、安全鑑定対応の農業機械が購入者・使用者に容易にわかるようになっている。

生産設備の国際安全規格・認証の観点から考えると、「安全装備の確認項目と安全鑑定基準及び解説」が安全規格に、安全鑑定が安全認証に対応していると考えられる。

我が国の農作業死亡事故件数は毎年 400 件前後と一定であり、農業就業人口に対する死亡事故件数の割合は増加傾向にある。今後は、農業就業人口のさらなる減少が見込まれる中で、農作業死亡事故数を減少させることが緊急の課題となっている。

一方、安全鑑定を受けた農業機械の利用に法的な強制はないため、農林水産省では安全鑑定を受けた農業機械の購入に補助を行うことで、安全な農業機械のより一層の普及を促進している。例えば平成 24 年には、「安全フレーム装着トラクター普及促進事業」を実施している。この事業は、安全キャブ・フレーム未装着のトラクターから、転落又は転倒事故において救命効果の高い安全フレームを装着し安全鑑定を受けたトラクターへの更新を促進する事業である。1 台の買い替えに対して 5～15 万円の補助金を交付している。補助金の申請は、農機具販売店を通して行うことが可能であり、補助金申請者の手続き負担軽減も考慮されている。

### 3-1-2 技術毎の調査

特殊環境用ロボットの標準化については、積極的、かつ、十分な支援が行われてきたとは言いがたい。特に、特殊環境で多様な特殊用途で使われる災害対応ロボットは標準化を検

討することが難しい面もあるが、ロボットの開発や運用などを標準化、規格化することは、その機能、性能を評価する面で重要であり、かつ効率的な開発を行うためには必須の要素であると考ええる。

ロボット開発を考えた場合、基礎研究段階で原理の最適化を行い、製品化（形態最適化）される。ここで重要なのは基礎段階での「要求仕様の明確化」である。この要求仕様に基づき製品化（概念設計～詳細設計）を進めるが、その結果出来上がった試作機が与えられた要求仕様とどの程度合致するか判定する「仕様適合性評価」も重要となる。

開発されたロボットの「仕様適合性評価」を公平、かつ効率的に行うためには、統一された標準化試験法を開発することは必須となる。

例えば米国の NIST (National Institute Standards and Technology、アメリカ国立標準技術研究所) や ASTM (American Society for Testing and Materials、米国材料試験協会) では日本に先行して標準化試験法の開発が進められており災害対応ロボットなどに役立っている。これらの取り組みに対して、日本が優位にある技術については積極的に働きかけを行い、協調、共同して災害対応ロボットの標準化試験法の整備、拡充を行うことが重要であると考ええる。

標準化試験法が整備されることのメリットについて考察する。まず考えられるのは、基礎研究或いは開発した各ロボットの機能レベルが想定された現場でどの程度であるかを評価できる点である。これによってユーザは各ロボットの能力を公平に判断でき、多種多様な災害現場に最適なロボットを選ぶことが可能となるとともに適合性に向上にも役立つ。

また、各ロボットの機能、能力が見える化されるので性能を競い合うことができ、災害対応ロボットの開発に取り組むベンチャー企業の育成とともに既得権益の打破にも繋がると考える。

以下その他の重要技術分野の標準化、規格化の調査結果を述べる。

#### (1) ロボット安全技術全般

まず、安全技術については、平成21年～22年度に日本機械工業連合会の「災害対応ロボットの安全基準策定に関する調査研究」\*<sup>1</sup>にて調査を行っている。

(\* 1 : 日機連22先端-3 「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」参照)

これによると安全性だけでなく可用性（使いたいときに使う）とのバランスを考慮することが、ロボットの安全と責任の取り方で重要であることが示されている。

残留リスクについてはレスキュー隊員の十分な訓練によって低減することは期待できるが、困難なリスクについては設計時優先して考慮すべきである、としている。なお、主要な残留リスクとしては、防爆性、電磁ノイズ、ユーザインタフェース (UI) による人間工学的配慮、除染、保守・点検などについて考察が行われている。

また、多様な環境で使用される災害対応ロボットの可用性を判断するためには、その性

能を測定する標準的手法を開発することが重要であると指摘している。更に、技術標準を設定することも仕様検討や開発時の不要な努力を低減する上で重要としている。

## (2) 通信技術分野

### ①ORiN (Open Robot Interface for the Network)

ORiN は工場生産設備を対象に開発された通信方式であり、欧州を中心に産業分野で導入実績がある。生産設備にはロボットを含め多くのデバイスやアプリケーションを使うが、それぞれの通信仕様などインタフェースが異なるため、統合システム化するには多くの手間がかかり、長期間、かつ膨大なコストが必要であった。

これを解消するのが ORiN である。ORiN を導入することによって多くのデバイスやアプリケーションが容易に接続できるようになり、コストをかけずにシステム化できるようになる。

特殊環境ロボットについても多様な環境に対応し、多様な作業を行う必要がある。従って「一品物」ではなく、多種のデバイス・アプリケーションを多様に組合せてモジュール化し、それらを適時組合せ、システム化して対応することは重要かつ必須の要件となる。その意味で ORiN 導入を検討する意味は大きいと考える。

更にビジネスの観点から世界市場を見た場合、ORiN を使うことにより特殊環境ロボット活躍のフィールドが大きく広がることとなり、世界を相手に「防災ビジネス」として成立させる可能性も期待できる。

(ORiN については、HP (<http://www.oring.jp/>)を参照のこと)

### ②RSNP (Robot Service Network Protocol)

民間団体である RSi ではインターネットを利用したロボットサービスビジネスを展開するための通信プロトコルを策定している。このプロトコルは RSNP (Robot Service Network Protocol) 仕様書として公開されている。(RSNP 仕様書は、RSi の HP からアクセスし所定の手続きをすれば入手可能である)

このプロトコルを利用して特殊環境ロボットの操作インタフェース統一などを図ることも考えられる。但し、リアルタイム性などについては詳細検討する必要あり特殊環境ロボットへの適用性の評価が必要である。

(RSi については、HP (<http://robotservices.org/>) を参照のこと)

### ③MISP (Mitigation Information Sharing Protocol : 減災情報共有プロトコル)

各省庁や自治体、自衛隊などが保有しているデータを活用する視点から相互運用を可能とする簡便なシステムの構築を実現するシステムである。

これは、文部科学省科学技術振興調整費・重点解決型研究プロジェクト「危機管理対応情報共有技術による減災対策」の研究項目「減災情報共有プラットフォームの開発」における研究成果であるが、災害対策の場において情報共有を図るための共通プロトコルである。

例えば、政府、県、自治体、災害対策本部、消防、警察などの関係機関がインターネットを介して共有情報の通信を行うために、以下のことが必要である。

- ・多様性（種々のシステムと接続する）＝仕様を公開
- ・可用性（インターネットで広く使っているプロトコルで構成）＝XML、GML、WFS、SOAP を使用
- ・柔軟性（データフォーマットに依存しない）＝XMLScheme 等

これら災害対応ロボットシステムの情報共有は不可欠な機能と考えられるため MISP による通信機能は必須であると考えられる。

### （3）ロボット用OS分野

#### ①RT ミドルウェア

ロボットのコンポーネント（＝部品）を汎用的に使うことが可能である RT ミドルウェア技術については、NEDO が平成14年から開発を開始し、平成19年度～23年度に実施した「次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト」を経て実用化レベルに達した。

その成果は現在、(独)産業技術総合研究所(AIST)のROBOSSA (Robot Software Suite, AIST) としてオープンソースで開発された知能ソフトウェアモジュール (RTコンポーネント) を「作業知能」「移動知能」「コミュニケーション知能」ごとに知能ソフトウェアモジュール群「OpenRTC-aist」として、オープンソースライセンスのもとで公開されており、特殊環境ロボット開発への適用は十分可能であり効果が期待される。

公開されている主な知能モジュールを以下に示す。

- ・作業知能モジュール：対象物認識、作業計画、ロボット操作、等
- ・移動知能モジュール：センシング、自己位置同定、経路計画・追従、走行系、等
- ・コミュニケーション知能モジュール：音響入出力・処理、音声認識・合成、等

また併行して、標準化活動として OMG (Object Management Group) において、RT コンポーネントモデルおよびロボット用位置情報標準 RLS (Robotic Localization Service) の2つは公開されており、ロボットと人間との間のインタラクションを統一して扱うための枠組みとして人との相互作用標準 RoIS (Robotic Interaction Service Framework) とソフトウェアモジュールの構成や配置を動的に変更するための動的システム構成標準 DDC4RTC (Dynamic Deployment and Configuration for Robotic Technology Component) の2つの標準化提案については現在審議が進められている。

例えば、福島原発事故への災害ロボット適用を考えた場合、レーザセンサやビジョンセンサがRTM化してあれば無人で遠隔の環境調査を行う際に、RTM対応ロボットであれば簡単に搭載可能となり種々のロボットの適用性を大幅に拡大することができる。

その他以下のメリットが考えられる。

- ・ロボットの開発期間短縮が可能である。
- ・コスト削減が可能である。

一方、デメリットとしては、

- ・リアルタイム性が乏しい。
- ・信頼性が未検証である。
- ・モジュール事例が少ない。

など製品としてロボットに搭載するには越えなければならないハードルがあることも事実である。特に防災ロボットのように高い信頼性が求められる機器への適用についてはこれをクリアする事が肝要であり特殊環境ロボットへの適用性の評価が必要である。

(RT ミドルウェア技術については、HP (<http://www.openrtm.org/>)を参照のこと)

## ②ROS (Robot Operating System)

ROS は民間企業 (米国ウィローガレッジ社がスポンサー) が開発主体であり、オープンライセンスを基本として開発効率を重視しやすいうようにライブラリ化を設計方針としているソフトウェアである。

また、前述の NEDO 知能化プロジェクトで RT ミドルウェアとの相互流用 (連携) が図れるようになったことから発展が期待されている。ROS の特徴としては、開発ツール、デバイスドライバ、通信ライブラリといった分野を得意領域として開発を進めている。一方 NEDO 知能化プロジェクトでは多くの企業が参画したことから、アプリケーション、RT コンポーネント、ライブラリ、シミュレータといった領域が充実しており、ROS との連携を強化することによって十分な成果が得られる事が期待できる。

特殊環境ロボットについても、ROS の活用は十分メリットがあると考えられ、RT ミドルウェア共々開発動向を注目すべきと考えられる。

(ROS については、HP (<http://www.ros.org/wiki/>)を参照のこと)

## (4) ロボットシミュレーション技術分野

### ①OpenHRP

OpenHRP3 (Open-architecture Human-centered Robotics Platform version 3) は独立行政法人産業技術総合研究所 (産総研) が開発したロボットのソフトウェア開発・シミュレーションのための統合ソフトウェアプラットフォームである。OpenHRP3は、ユーザは独自のロボットモデルと制御プログラムを動力学シミュレーションで検証することが可能である。また、OpenHRP3はロボットのソフトウェア開発に活用可能な各種のソフトウェアコンポーネントと計算ライブラリも提供している。

OpenHRP3は分散オブジェクトシステムとして設計されており、各種機能を提供するサーバプログラム群と、サーバの管理を行うクライアントプログラムから構成される。

NEDO 事業では、産総研が有する OpenHRP の技術を活用して、災害対応ロボット (クローラータイプ) のシミュレーションの開発を行った。

シミュレータの用途としては、

- a) 災害対応ロボットのデザイン評価

- b) 災害対応ロボットの操縦訓練
- c) 人と協調した災害復旧作業の事前検討

等を想定しており、開発完了したら特殊環境ロボットへ適用すべき技術であると考え。  
(OpenHRP については、産総研の HP (<http://www.openrtp.jp/openhrp3/jp/about.html>) を参照のこと)

## ② USAR-Sim (Unified System for Automation and Robot Simulation)

アメリカ国立標準技術研究所NISTが公開している災害対応ロボットの評価を行うためのシミュレータパッケージである。クローラ型、車輪型、飛行型などの各種レスキューロボット、ロボット搭載用ロボットアームやセンサ類、災害現場3Dマップ、要救助者、障害物・壁等のオブジェクトを含む。これらは、USAR-SimのコアであるUDK(EpicGame社)に追加する形で実装・使用する。UDKは、衝突判定や力学演算、リアリスティック3D表示、ロボット・要救助者・動くオブジェクト等の制御プログラムの実行を司る。UDK付属のエディタでは、ロボットや障害物等オブジェクト形状・表面テクスチャおよび衝突判定領域の新規追加・修正、災害現場3Dマップの新規作成・修正等が可能である。

USAR-SimはRoboCup Simulation Virtual Robot League 等で使用され、レスキューロボット、ロボット搭載用デバイス類、災害現場3Dマップが更新され続けている。また、レスキューロボット研究でも使用されており、災害現場で起こりうる2次災害(動的な環境変化)を実現する追加モジュールやレスキューロボットオペレータ訓練用シミュレータ等が開発されている。例えば次の論文では、USAR-Simを用いたレスキューロボットオペレータ訓練環境の開発が報告されている: 清水、高橋, ” ロボットオペレータチーム訓練環境の一提案,” 人工知能学会研究会資料 SIG-Challenge-B201-12(5/4), 63/68, 2012。また、ROS (Robot Operating System)との接続も行われ、ロボットの行動計画やマップ作成等高次機能を開発するための仮想空間プラットフォームとしての利用も始まっている。

USAR-Simの用途としては、

- ・レスキューロボットの性能評価(移動能力評価、マップ作成性能評価)
- ・自律および半自律ロボット行動計画アルゴリズムの評価(安全性評価・性能評価)
- ・ユーザインタフェース評価(ユーザビリティ評価・拡張性評価)
- ・災害現場3Dマップ自体の評価(妥当性評価・忠実性評価)
- ・ロボットオペレータ訓練(単独操作能力向上、能力評価、協調作業訓練・評価)

等があげられる。

これらを通して、次項目も期待されている。

- ・レスキューロボット性能評価基準の標準化(評価用3Dマップの標準化)
- ・レスキューロボットユーザインタフェースの標準化
- ・レスキューロボットオペレータ操作能力評価(方法と基準)の標準化

USAR-Simは、標準化作業自体にも貢献する。

以下の点で、実在するロボットや評価環境に対して有利である。

- ・複製、配布
- ・過去の評価環境の復元・修正・再配布
- ・過去のロボットの復元・修正・再配布、過去のロボットの再評価
- ・新評価対象ロボットと過去の比較基準ロボットや評価環境との比較

なお、産総研で開発中の OpenHRP は物理量も厳密に定義しているのに対して、USAR-Sim はゲームエンジンをベースとしているので、高精度なシミュレーションには適さない。

### ③Gazebo

Gazebo は屋外環境でのロボット物理シミュレータとして、2002年から南カリフォルニア大学で開発が開始され、無償で提供されている。2009年から ROS と Gazebo が統合され、ROS 上での重要な物理シミュレータとして Gazebo が用いられるようになった。2011年から ROS の開発母体である Willow Garage 社が Gazebo を経済的に支援するようになり、安定性や使い勝手といった実用性の向上が期待されている。2012年には DARPA Robotics Challenge のロボットシミュレータとして Gazebo が採用されており、Gazebo のシミュレーション精度がロボット開発で有用であることが推定されることから、その動向には注意を払う必要がある。なお、DARPA Robotics Challenge での Gazebo と DARPA の契約では、DARPA は Open Source Robotics Foundation(OSRF)と契約をしている。OSRF は2012年4月に ROS に関する活動を拡大する形で設立された非営利団体であり、活動実績の少ない OSRF と DARPA が契約を結び Gazebo の利用を促進していることは、Gazebo のロボットシミュレータ分野で重要性を示唆するものである。

(Gazebo については、同プロジェクトの HP (<http://gazebo.org/>) を参照のこと。

OSRF については、同団体の HP (<http://www.osrfoundation.org/>を参照のこと))

この Gazebo の開発過程を見直すと、1) 大学で開発開始 (2002年南カリフォルニア大学)、2) 民間企業支援による開発拡大 (2009年 ROS との統合、2011年 Willow Garage 社出資)、3) 非営利団体化によるオープン化推進 (2012年 OSRF への移行)、4) 国家プロジェクト採用による開発拡大 (2012年 DARPA Robotics Challenge への採用) という、大学発の技術シーズを産官が連携し、持続的に発展させる戦略がとられている。我が国でも Gazebo に類するロボットシミュレータとして OpenHRP (本節①参照) が開発されており、その持続的発展のためには産官学が戦略的に連携する必要があると考えられる。

## 3-2 特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の戦略的推進と競争力の強化への提言

### 3-2-1 特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の戦略的推進への提言

標準化は国際産業競争力の重要な要素であるが、我が国はその技術力と比較して標準化への取り組みは遅れており、世界市場で「技術で勝って、ビジネスで負ける」ことの遠因にもなっている。このため我が国では、「国際標準化戦略目標」(経済産業省2006年)

を設定し、2015年までに欧米諸国に比肩しうよう国際標準化を戦略的に推進する活動を開始し、国際標準化アクションプラン(日本工業標準調査会標準部会2007年設定、2011年改定)も制定されている。

本節では、このような我が国の現状を踏まえ、標準化活動の観点から特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化を戦略的に推進するための提言を行う。

\*ここでの戦略的推進とは、論理的考察の基、社会的に異なる分野が時間軸を考慮して効果的に連携して推進することを意味する。

#### ①標準性能試験法(Standard Performance Test Method)を利用した実用化推進

通常の製品開発における標準化活動は、次の仕様標準と性能標準に大別される：

- 仕様標準：製品の具体的な仕様を指定する（例：ベットの転落防止の柵の柱の間隔は20cm以下とする。）
- 性能標準：製品に求められる性能を指定する（例：ベットの転落防止の柵は、寝ている人を落下させてはいけない。）

仕様標準を満たしているかどうかの判断は技術的に容易であるが（上記の例だと、柱の間隔を測定して20cm以下かどうかで判断できる）、利用できる技術に制限があり新規技術開発を阻害する恐れがある。一方、性能標準を満たしているかどうかの判断は仕様標準より困難となるが（上記の例だと、製品開発者はなぜその構造だと寝ている人が落下しないか説明しなければならない）、利用できる技術への制限は少なく、新規技術開発への阻害は少ない。近年は、多くの標準化で性能標準の導入が進められ、技術革新を支援している。

特殊環境用ロボットは他の製品より利用環境・使用法が多様であり、仕様標準、性能標準を単純に推進することは困難である。本稿3-1-1(1)①で説明したNISTの災害対応ロボット標準化活動では、以下の標準性能試験法(Standard Performance Test Method)の開発を通じて、災害対応ロボットの標準化と実用化を推進している：

- 標準性能試験法(Standard Performance Test Method)：具体的な性能（移動能力、環境認識力等）を測定する標準化された試験方法。

標準性能試験法を通じた標準化活動では、標準性能試験法で得られた値は標準化活動としては判断はせず（性能標準では一定の性能を要求する）、測定された値は製品の使用者が主体的に判断することになる。

多様なパラメータを有する特殊環境ロボットは、関係者がロボットの幅広い性能の優劣を判断することは容易ではなく、標準性能試験法を通じて特殊環境ロボットの様々な性能を「見える化」することができれば、その研究開発と実用化が推進されると考えられる。標準性能試験法の利用の利点を表3-1と図3-1にまとめる。NIST関係者へのヒヤリングを通じて、NISTの災害対応ロボット標準性能試験法の利用例として、以下があるこ

とが本調査より分かった。

- 米国の爆発物処理を任務とする団体 National Capital Bomb Squads はロボットの調達に NIST の標準性能試験法を利用した（2010年に8台、2011年に6台を調達）
- JIEDDO(The Joint Improvised Explosive Device Defeat Organization)は520台(予算\$32M=29億円)の小型群ロボットを調達するにあたり、NIST の標準性能試験法を利用した(2012年)。
- DARPA Robotics Challenge for Disaster Response(virtual and physical) では、2013年に実施を予定している予選と評価で NIST の標準性能試験法を利用する予定である。
- ニューヨークの消防署では、NIST の標準性能試験法を併用して利用する災害対応ロボットの選定を進めている。
- NIST の標準性能試験に参加することでメーカーが開発時に想定していなかったが、実際の運用時には想定されるロボットの技術的課題が明らかになり、その後の改良が速やかに行われた UGV メーカーが複数ある。

以上のことから、標準性能試験法の利用は特殊環境ロボットの研究開発と実用化の推進に有効であると考えられる。

特殊環境ロボットの研究開発と実用化の推進にはまた、多様な関係者の協力が必須である。行政主導で特殊環境ロボットの研究開発と実用化の推進を考えた場合、我が国では省庁間の垣根を越えての連携が課題となる。米国の行政主導の災害対応ロボットの研究開発と実用化の推進では、省庁横断型組織で DHS が主導し、各省庁の協力を得ている。我が国でもこのようなトップダウン方式での省庁連携が考えられる。

一般に我が国の省庁連携では、「縦割り」といわれる省庁間の「垣根」が課題とされている。この課題にとりくむための一助として次に示すよう、各省庁間での標準性能試験法の共有による、緩やかな省庁連携も考えられる：これまでの我が国では、監督官庁に対応する利用分野ごとに、独立して特殊環境ロボットの研究開発が推進されてきた事が多い（例：農業用ロボット、原発事故対応ロボット、交通インフラ保守点検ロボット）。このような分野ごとの独自開発は、

- 各分野の特殊性を考慮し易い

という利点がある一方、以下の欠点が考えられる。

- 類似技術の重複開発による予算利用の非効率化
- 開発技術の水平展開遅延による国際産業競争力の潜在的低下

省庁間において標準性能試験法を共有することで、各分野で独自に開発すべき技術と、共通開発すべき技術が明確になり、上記の欠点が克服されることが考えられる。また、省庁間での標準性能試験法の共有では、現行の開発・利用体制は維持されるため直接的な利害関係を生じないため、その導入でも摩擦は大きくないと考えられる。

以上のことから、我が国でも標準性能試験法の導入を積極的に進めるべきと考えられる。

表3-1 特殊環境ロボット各関係者への標準性能試験法利用の利用

関係者	現状の課題	標準性能試験法利用の利点	図3-1内 番号
研究者	多くの研究者は特殊環境ロボットの使用現場行く事が困難なため、研究者の設定した研究課題と実問題との適合性が不明な場合がある。	標準性能試験法開発に特殊環境ロボット利用者が関与することで、標準性能試験法に実問題を適切に反映させることが可能である。研究者はこの標準性能試験法を研究課題とするで、実問題との適合性を考慮する手間が減る。	①
	研究者が行った研究結果の評価と、実際の現場での評価の相関が不明確であり、研究結果の実用性評価に手間がかかる。	標準性能試験法を用いて結果を評価することで、実際の現場での性能が推定でき、実用性の判断が容易になる。	②
開発企業	特殊環境ロボットは技術課題が多様・不明確であり、どの技術課題に開発リソースを振り向けるべきか判断が分かれ、技術開発が非効率となる恐れがある。	標準性能試験法を用いることで技術課題が明確になるため、技術開発が効率化される。	①
	他分野・他国の特殊環境ロボット市場の要求性能が不明である。	標準性能試験法を共通利用することにより、他分野・他国の特殊環境ロボット市場の要求性能の理解が容易になる。	①
	販売実績の少ないベンチャー企業のロボットは、確実な動作が求められる特殊環境ロボットでは実績不足で不安に思われ、販売面で不利である。	標準性能試験法を用いることで性能の見える化が促進され、ベンチャー企業のロボットでも実績不足を補い安心して導入してもらえる。	②
利用者	単純なカタログデータだけでは実際の現場で有効に利用できるか、ロボットの性能を適切に把握することが困難である。どのロボットが自分の現場に適しているのか、調達基準が不明確である。	標準性能試験法を用いることで、実際の現場に即したロボットの性能把握が効率的に行える。標準性能試験法を用いることで、調達基準が明確化されるほか、標準性能試験法の結果に基づき現場での運用効率の試算も可能となる。	③
	ロボットを操作する要員の教育で、どこまで教育すればよいのか具体的な目標が不明確である。	実際のロボットの標準性能試験は開発メーカーの十分訓練された要員が実施するため、標準性能試験の結果はそのロボットの最高の性能と考えられる。よって標準性能試験の結果を目標として利用者は要員教育を実施すればよい。	④
	実際の現場での利用にロボットが適合しているか根拠が不明確であり、不安に感じる事が考えられる。	標準性能試験法の開発にロボットの使用者も参加することで、作られた標準性能試験法に利用者の現場感覚も十分反映させることが可能である。よって標準性能試験法で評価されたロボットは利用者の安心感を向上させる。	⑤
	技術に詳しくない利用者は、ロボットの性能改善のための開発者との技術的コミュニケーションが困難である。	技術に詳しくない利用者でも、標準性能試験法の結果を利用して自分の意見を開発者に説明することができ、ロボットの利用者と開発者の技術的コミュニケーションが効率化される。	⑥
認証機関	ロボットの各種認証を行う場合、その基準や手順が不明である。	標準性能試験法が確立されていれば、ロボットの各種認証を行う場合、標準性能試験法をその基準や手順として利用できる。	⑦
保険機関	ロボットが関係する保険業務を実施する場合、ロボットの現場での具体的性能把握が困難であり、保険業務遂行に手間がかかる。	ロボットが関係する保険業務を実施する場合、標準性能試験法を用いればロボットの現場での具体的性能把握が容易になり、保険業務遂行の手間が減る。	⑦
PJ 評価者	特殊環境ロボット開発プロジェクトを実施したとき、どこまで成果が得られたのか、特に複数プロジェクトが関係する場合に統一的な評価が行いにくい場合がある。	標準性能試験法を用いることで、複数のプロジェクトでも統一的に評価が行える。	⑧

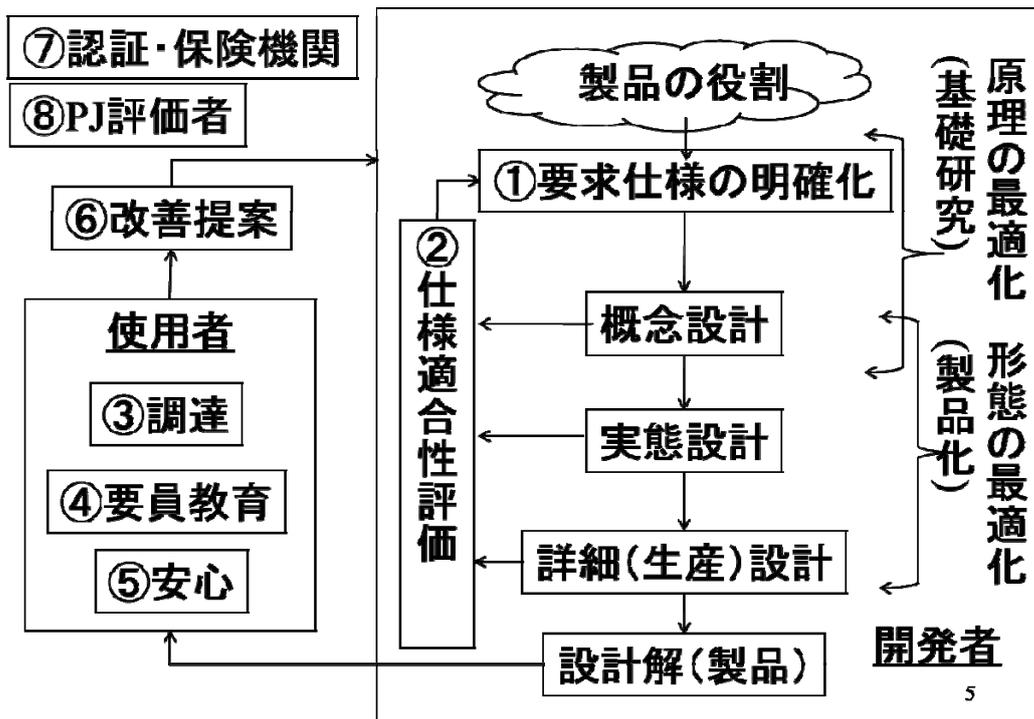


図3-1. 研究開発ライフサイクルと標準性能試験法の利点 (図中①～⑧)

またこの標準性能試験法を利用した特殊環境ロボットの標準化推進では、次に説明する標準化に対するメーカー、ユーザー、標準専門家等第三者からなるいわゆる「三者構成」の公平性を十分に考慮する必要がある。標準化の基本的ガイドである ISO/IEC Guide 2 (JIS-Z-8002) 「標準化及び関連活動—一般的な用語」では、標準化活動を「規格を作成し、発行し、実施する過程からなる。」とし、同ガイドでは規格を以下のように定義している

- 規格 (standard) : 与えられた状況において最適な秩序を得ることを目的に、共通的に繰り返して使用するために、活動又はその結果に関する規則、指針又は特性を規定する文章であって、合意によって成立し、一般に認められている団体によって承認されているもの。注記1 : 規格は、科学、技術及び経験を集約した結果に基づき、社会の最適の利益を目指すことが望ましい。

また、この文章中で用いられている「合意」を同ガイドでは以下のように定義している

- 合意 (consensus) : 本質的な問題について、重要な利害関係者の中に妥協できない反対意見がなく、かつ、すべての関係者の見解を考慮することに努める過程及び対立した議論を調和させることに努める過程を経たうえで全体的な一致。注記 : 合意は、必ずしも全員の一致を必要としない。

これまでの我が国の標準化は技術分野に限定されることが多く (例 : コネクタ形状の標準化)、この場合ユーザーへの技術的影響は自明なため、メーカー主導の一者構成で標準

化が推進されても不都合は生じてこなかった。一方、不確実性・多様性を必然的に内包する特殊環境ロボットの標準化では、上記「標準化」「規格」「合意」の定義より、代表的関係者としてメーカー、ユーザー、標準専門家等第三者の関与が不確実性・多様性の適切な考慮のため必須となる（特殊環境ロボットの現場の多様性を、メーカーのみで十分考慮することが困難であり、標準専門家等第三者の支援による議論の調和活動が求められるため）。

このような三者構成は、規格・認証・保険に基づくリスクマネジメント社会の基本でもあり（図3-2にその構造を示す）、特殊環境ロボットの安全規格化を進めるうえでも重要である。

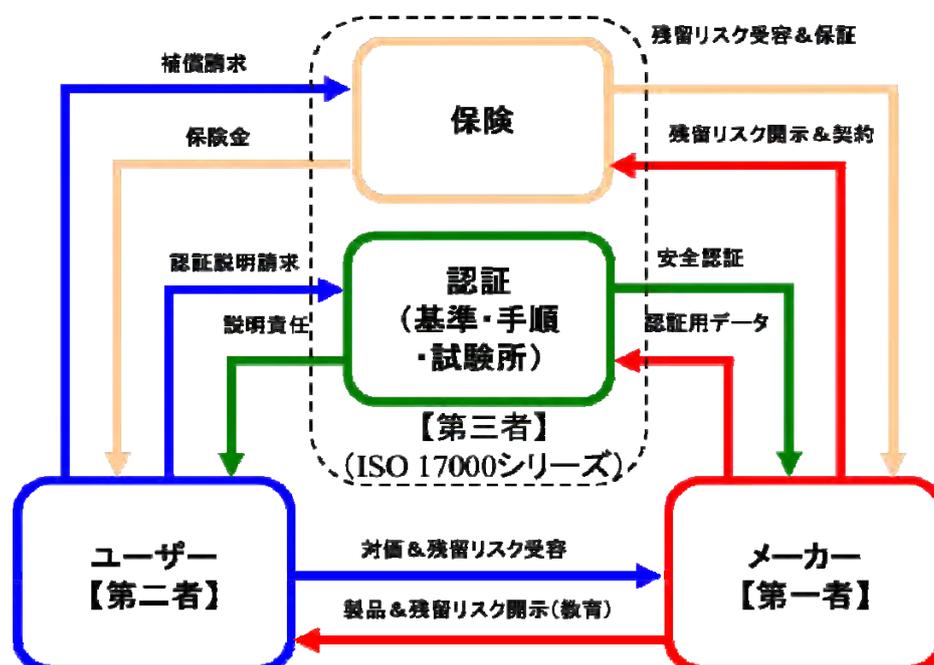


図3-2. リスクマネジメント社会の三者構成

## ②リスクベースとトップマネジメントによる安全規格化の推進

安全規格化の過度な推進は、不必要な製品価格の上昇や使い勝手の低下を招くため、安全規格化はリスクベースで合理的に推進する必要がある。特殊環境用ロボットのリスクは、これまで各分野で経験的に考慮されることが主であり、今後はその定量的把握が重要となる。しかし、実環境における特殊環境用ロボットのリスクの定量的把握は一般には困難であり（特殊環境で多くのリスクデータを入手する事は難しい）、適切なテストフィールドを設置することで、特殊環境用ロボットのリスクの定量的把握を推進することが考えられる。

また、特殊環境用ロボットの残留リスクが適切であるかどうかの判断には、特殊環境用ロボットが社会に提供するベネフィットとの比較が重要である。標準性能試験法の利用により特殊環境用ロボットのベネフィットを定量的に把握することで、合理的な特殊環境用

ロボットの安全規格化が推進されると考えられる。

また安全規格化の推進では、トップマネジメントの視点も重要である。一般にリスクマネジメントでは、トップマネジメントの関与が重要とされる。「JIS Q 31000 : 2010 (ISO 31000 : 2009) リスクマネジメント-原則及び指針」では、「リスクマネジメントを導入し、常にその有効性を確実にするためには、組織の経営者の強力かつ持続的なコミットメントとともに、そのコミットメントをすべての階層で達成するための、戦略的かつ綿密な計画策定が要求される」とし、リスクマネジメントでの組織経営者の役割の重要性を説明している。

特殊環境ロボットの利用の想定される消防等は、現場作業での「頑張り」が尊ばれ、安全に関して不満不安があっても、頑張ることでそれを解消しようとする風土が存在する。このような場合、安全規格に対する現場からの適切なフィードバックが得られず、過度な頑張りによる「決死隊」的活動を現場に強いる事が懸念される。同様な頑張る風土を有する介護分野では、過度な頑張りによる腰痛が介護者の問題になっている。オーストラリアでは被介護者を人力で持ち上げない「ノーリフトポリシー」を同国看護同盟がトップダウン的に導入し、介護者の過度な頑張りによる腰痛防止と介護作業の質の向上に繋げている(参考1)。

また米国では、「The first responders of America, all across America, must have the resources necessary to respond to emergencies and save lives(米国の災害対応要員は全米を通して非常事態対応と救命のための全ての必要な設備を有しなければならない).” President George W. Bush, March 27, 2002」として大統領が災害対応要員への十分な支援を表明し、CRASAR の設置など災害対応ロボット開発支援が強化された(参考2)。この流れを受け、米国下院では「The conferees support House language regarding search and rescue robotics certification and expect the Department to develop standards and criteria for search and robotics certification (米国下院議員は探査救助ロボットの認証に関するホワイトハウス声明を支持し、探査救助ロボットの標準と評価基準を開発することを期待する).」として関連事業に 39 百万ドル (=35 億円) の支出を 2003 年に認めている(参考3)。

特殊環境ロボットの安全規格化の推進、特殊環境ロボットの国家としての研究開発・実用化の推進は、レイヤーは異なるが共にリスクマネジメント活動と考えられる。ISO 31000 や米国の例にみるように、リスクマネジメント活動を適切に実施するにはトップの明確な意思表示が必要と考えられる。我が国の特殊環境ロボットの安全規格化の推進、その研究開発・実用化の推進を効果的に実施するためには、関連諸団体のトップ及び、我が国としての明確な意思表示が必要である。

参考1 : オーストラリア看護師同盟(AUF), AUF policy no lifting, 2008

参考2 : "Science and Technology: A Foundation for Homeland Security," Executive

Office of the President Office of Science and Technology Policy, (2005))

参考3：“MAKING APPROPRIATIONS FOR THE DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY FOR THE FISCAL YEAR ENDING SEPTEMBER 30, 2004, AND FOR OTHER PURPOSES,” 108TH CONGRESS REPORT, 1st Session, HOUSE OF REPRESENTATIVES, Report 108-280, 2003

### ③ 人材育成と社会啓発

標準化・安全規格化を推進するためには、標準化の社会的役割と関連規格の理解が必要である。例えば次の規格の理解は必須と考えられる。

- ISO/IEC Guide 2 標準化及び関連活動—一般的な用語
- ISO/IEC Guide 51 安全側面—規格への導入指針
- ISO/IEC 17000 適合性評価 用語及び一般原則
- ISO 31000 リスクマネジメント—原則とガイドライン
- ISO 12100:2012 機械類の安全—一般設計原則—リスクアセスメントとリスク低減

このような規格を含む技術経営的素養を有する人材は、特殊環境ロボット分野ではきわめて限られている。我が国で特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化を推進するにあたり、関連人材の育成は急務と考えられる。標準化・安全規格化に関する人材育成は、他分野でも課題であり、特殊環境ロボットに近い分野では、例えば以下の標準・安全規格に関する要員認証制度が我が国で実施されている。

- 機械安全分野：セーフティアセッサ制度（日本電気制御機器工業会、日本認証）
- システム安全分野：システム安全エンジニア制度（長岡技術科学大学）
- サービスロボット分野：サービスロボット安全技術者制度（NPO 国際レスキューシステム研究機構、NPO 安全工学研究所）

このほか、標準化・リスクマネジメント等を実学的視点から教授する技術経営系専門職大学院が2003年から我が国でも設置が開始され、同分野の人材育成に努めている。特殊環境ロボット分野でも、これら既存の人材育成制度と協力して、効率的に標準化・安全規格化を推進する人材育成を進めるべきである。

教育・人材育成の社会的効果は10年単位で考えるべきである。また、標準化・安全規格化を通じた特殊環境ロボットの実用化推進は、研究開発から実用への製品ライフサイクルの効率化から得られるものであり、直接特殊環境ロボットを開発することと比較し、短期的な成果は得られにくい。言わば、標準化・安全規格化による実用化推進は東洋医学的体質改善（製品ライフサイクルの効率化）によるものであり、西洋医学的な直接製品開発による成果とは異なる長期的な時間軸で評価すべきものである。このような長期的活動を可能とするためには、社会に継続的に情報を発信し、得られた評価を標準化・安全規格化活動にフィードバックする仕組みが必要である。このような社会啓発活動の例として、DARPA Challenge や RoboCupRescue 等のソリューションコンペティションや、NIST の Response Robot Evaluation Exercise (NIST/ASTM 標準性能試験法の妥当性検証会)が

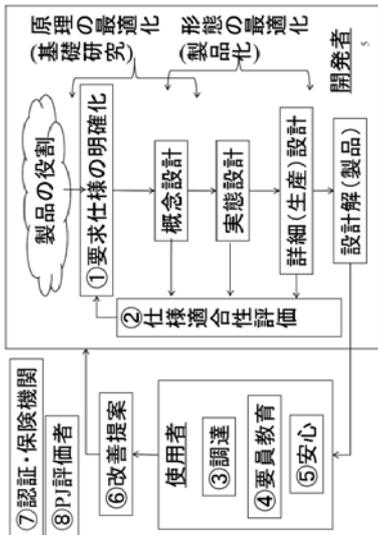
ある。我が国でも、同様な活動を通じて特殊環境ロボットの標準化・安全規格化の社会啓発を推進すべきである。

#### ④標準化・安全規格化の戦略的推進のロードマップ

上記本節の議論および、特に「「2-5」ロボットの研究開発から配備・運用に至るまでの、技術以外の中長期的課題」「「2-7」ロードマップ」を踏まえ、標準化・安全規格化の戦略的推進のロードマップを図3-3に示す。

# 特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化の戦略的推進

## 標準性能試験法を利用した実用化推進



## 製品ライフサイクルの「体質改善」型実用化加速

## 安全規格化の推進

- ・リスクベースアプローチによる必要かつ十分な安全規格化
- ・トップマネジメントによる効果的推進

## 人材育成と社会啓発

- ・関連分野との連携による標準化・安全規格化人材の効率的育成
- ・コンテスト等を通じた社会啓発

## 国民支持を得た継続的活動

関係者	現状の問題	標準性能試験法利用の利点	図*内番号
研究者	研究課題の実現課題適合性不明	標準性能試験法開発時に実問題適合性考慮	①
開発企業	結果の適用性評価困難 技術課題が多様・不明確であり開発非効率	結果評価容易 技術課題明確化により開発効率化	②
利用者	他分野・他国の市場要求不明 業績少ないベンチャー企業は販売面で不利	標準性能試験法の共通利用により他分野・他国理解容易 性能の見える化で実績不足を補う	③
	性能把握困難・調達基準不明確	性能把握の効率化⇒調達基準の明確化・運用効率向上	④
	要員教育の目標不明確化	要員教育の目標明確化(開発メーカーによる標準性能試験時の血が最高値と推定される)	⑤
	現場適合性への不安	標準性能試験法に使用者参加で安心向上	⑥
	開発者との技術的コミュニケーション	開発者との技術的コミュニケーションの効率化	⑦
	認証基準・手順不明	認証基準・手順明確	⑧
	保護機関 性能把握困難	性能把握容易	
	PJ評価者 PJ実施時の評価困難	PJ実施時の評価容易	

ロードマップ		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021-
基礎技術研究	プロジェクト検討	手法開発	手法改良	PT開発	模擬現場試験改良	模擬現場試験改良	現場実証・試験配備	製品検査	製品検査	製品配備
本格実用化研究	プロトタイプ開発	模擬現場試験改良	現場実証・試験配備	製品検査	製品検査	製品検査	製品検査	製品検査	製品検査	製品検査
規格整備	規格検討	標準化運動	規格策定	規格策定	規格策定	規格策定	規格策定	規格策定	規格策定	規格策定
標準性能試験	プロジェクト検討	試験法試案	試験法試案	評価	試験法原案	試験法原案	評価	標準性能試験法提案・規格化	標準性能試験法提案・規格化	標準性能試験法提案・規格化
安全規格化	プロジェクト検討	規格試案	規格試案	評価	規格原案	規格原案	評価	安全規格提案・規格化	安全規格提案・規格化	安全規格提案・規格化
人材育成	カリキュラム開発・試行	改良	改良	本活動	本活動	本活動	本活動	本活動	本活動	本活動
社会啓発	カリキュラム開発・試行	改良	改良	本活動	本活動	本活動	本活動	本活動	本活動	本活動

図3-3. 特殊環境ロボットの標準化・安全規格化の戦略的推進ロードマップ

### 3-2-2 特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化を用いた国際産業競争力強化への提言

我が国の産業用ロボットの技術力は依然として世界のトップクラスであり、特殊環境用ロボットでも技術的ポテンシャルは高いと考えられる。この高い技術力に対する期待は国際的にも高く、本調査の一環として行われた海外でのヒヤリング調査でも、度々その期待の声が聞かれた。例えば次の事例がある：2013年1月に米国で開催された NIST/ASTM の災害対応ロボットの標準化会議で、日本の災害対応ロボットの研究開発と本 NEDO プロジェクトの紹介を本調査委員（田所、木村）により行った。この発表を通じて、特殊災害ロボットの標準化分野で日米共同を提案したところ、会場からは賛同の声があがった。この発表は、ASTM のインターネット会議システムにより ASTM 会員の聴講希望者に配信されたほか、ASTM Homeland Security Applications の責任者も聴講しており、本プロジェクトに対する ASTM/NIST の強い期待を感じた。

本章では、この日本の高い技術力をいかにして特殊環境用ロボットの国際産業競争力に発展させていくか、標準化・安全規格化を利用した強化策の提言を行う。

#### ① 標準性能試験法を用いた国際産業競争力強化

我が国に標準性能試験法を導入した場合、特殊環境用ロボットの国際産業競争力の強化方策として以下が考えられる。

- 特殊環境用ロボットを導入済の国に対し（現状では主に米国）、標準性能試験法を共有していれば、対象国に導入実績がなくとも、同じ試験法を用いることで技術的利点が説明しやすくなり、対象国参入の負担が低減される。
- 特殊環境用ロボットを必要とする外国に対し（例えば南アフリカでは地下鉱山の落盤調査ロボットを研究開発している）、標準性能試験法を共有できれば、対象国で必要とされる特殊環境用ロボットの技術的課題が明確になり、海外対応ロボットの開発戦略立案の負担が低減される。
- 特殊環境用ロボットへの要求事項は国により異なる（例えば米国ではビル倒壊現場が主たる想定で日本の木造家屋等は未想定）。我が国で、独自の標準性能試験法を開発・導入することができれば、社会制度設計・人材育成等も含む関連ノウハウと合わせて、特殊環境用ロボットをパッケージ型で海外に展開が可能となる。パッケージ型海外展開はアジアにおけるインフラ分野で既に我が国で取り組みが始まっており、単純な技術輸出より国際競争力が高いとされている。

#### ② 安全規格化を用いた国際産業競争力強化

我が国で安全規格化を推進した場合、特殊環境用ロボットの国際産業競争力の強化方策として以下が考えられる。

- 安全規格化を共有している外国に対し、対象国に導入実績がなくとも、同じ安全規格を用いることで技術的利点が説明しやすくなり、対象国参入の負担が低減される。安全設計において安全－性能－コストをバランスよく設計するには高い技術力が必

要であり、産業ロボット分野では日本は高い安全設計のバランス能力を有している（例えば近年、天井からつりさげ可能な軽量防爆塗装ロボットが日本で開発されている）。特殊環境用ロボットの安全規格化を推進することで、国際的産業競争において日本の設計能力の優位性が明確になると考えられる。

### ③ 市場化コストへの対応策

我が国に標準性能試験法・安全規格化を導入した場合、特殊環境用ロボットの市場化コストを吸収する方策として以下が考えられる。

- 民主導型（特殊環境用ロボットと民間保険の組み合わせ）：たとえば大規模プラントの保守メンテナンス・事故対応を考えた場合、特殊環境ロボット利用することで、効率化・高品質化・2次災害防止が計られ事故の発生確率が低減されると考えられる。この場合、該当プラント事故に対する保険掛金の低減が期待され、ロボット導入コストを保険掛金低減分で賄うことができると考えられる。特殊環境ロボット利用による効率化・高品質化・2次災害防止を定量的に見積もるために、標準性能試験法が利用できる。
- 国主導型（特殊環境用ロボット導入のインセンティブを法制度等により付与する）として次の2つが考えられる。
  - 建築分野では総合評価入札制度（コスト以外に指定技術（低振動低騒音等）を有する機械の利用に技術点を付与し、コストと技術点で入札結果を評価する制度）が導入され、新規技術の建築現場への導入を推進している。特殊環境ロボットを利用できる公共事業の入札でこの総合評価入札制度を導入し、特殊環境ロボット利用による利点に技術点を付与し、特殊環境ロボット導入のコストを補てんすることが考えられる。特殊環境ロボット利用の利用を明確にするために、標準性能試験法が利用できる。
  - 農業分野では、農業機械化促進法関連事業で安全検定を受けた農業機械の導入を補助金等の形で支援している。この支援により安全な農業機械が利用され、事故が減ることが期待されている。事故の減少は農作業従事者の減少にもつながり、農業機械の安全化は農業の持続的発展にも効果が期待されている（詳細1-1（2）参照）。特殊環境ロボット導入でも社会的に見て利点が高いと考えられる分野では、補助金により市場化コストを吸収することが考えられる。どの特殊環境ロボットの導入が社会的に見て利点が高いかを判断するために、標準性能試験法が利用できる。
- 海外主導型（海外で特殊環境ロボットを市場化し、市場化コストを吸収する）：状況によっては、海外での特殊環境ロボット市場化が我が国より先行することが考えられる。この場合、標準性能試験法を対象国と共有できれば、海外向け特殊環境ロボットの開発を日本国内で効率的に行える。また、海外展開後のロボット

を日本に導入する場合、標準性能試験法を利用することで海外仕様と日本仕様の差が明確になり、海外で市場化されたロボットの日本への導入が円滑に進むと考えられる。

### 3-2-3 特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化を用いた国際産業競争力強化へのアクションプラン

老朽インフラの調査保守は、老朽インフラの増加のほか、高齢化による熟練作業不足、若者の3K職場離れにより、我が国の重要な課題となっている。本節では、老朽インフラの調査保守への特殊環境用ロボットの導入を例にとり、特殊環境用ロボットの標準化・安全規格化を用いた国際産業競争力強化へのアクションプランを示す。またここでは、ステイクホルダーとして、下記を想定する。

- 第一者（ロボット開発者）：ロボットメーカー、ロボット研究者。
- 第二者（ロボット使用者）：調査保守会社、現場作業員（ロボット化後の作業員含）。
- 第三者：標準・規格開発者、テストフィールド運営者（試験実施者含）、社会コスト試算者（研究者等）、行政、保険会社、マスコミ、国民

#### 【取組方針1】コスト・ベネフィット分析

- (1) 潜在的ニーズの把握：ロボット化が適していると考えられる作業をヒヤリング等により把握し、ロボット化の適用対象を絞り込む。

主関連者：ロボットメーカー、研究者、調査保守会社、現場作業員。

- (2) 現行のコストの明確化：老朽インフラの現行の調査保守コストを、事故起きた場合のリスクも合わせて社会的総合的に見積もる。

主関連者：調査保守会社、社会コスト試算者。

- (3) ロボット化のコスト・ベネフィットの明確化：ロボット化の導入費用だけでなく、ロボット自体の開発・保守費用、要員教育費用等ライフタイムコストを算出する。また、ロボット化による効率化・高品質化によるベネフィットを、本格実用化研究のための現場フィールドを用いて定量的に把握する。

主関連者：ロボットメーカー、ロボット研究者、調査保守会社、現場作業員、テストフィールド運営者、社会コスト試算者。

- (4) 総合的コスト・ベネフィット分析：以上の結果を合理的に判断し、ロボット化が社会コスト低減につながる分野を明確化し、ロボット化を効果的に推進する。

主関連者：ロボットメーカー、ロボット研究者、調査保守会社、現場作業員、社会コスト試算者。

#### 【取組方針2】標準性能試験法開発による実用化加速

- (1) 第一次技術マップ作成：現行の標準性能試験法を用いて既存技術応用可能な分野

と新規技術開発が必要な分野を区分し、実用化までの第一次技術マップを作成する。現行の標準性能試験法で適用可能と考えられるものに次の物がある：Mobility Terrains, Mobility Obstacles, Energy/Power, Radio Communication, Manipulation, HRI, Sensor, Safety and Environment, Logistics。

主関連者：ロボットメーカー、ロボット研究者、標準・規格開発者

(2) 標準性能試験法開発の第二次技術マップ作成：既存の標準性能試験法で対応できない技術に対し、新たに標準性能試験法を開発する。新たな標準性能試験法を用いて精度の高い第二次技術マップを作成し、テストフィールドを用いて開発中の性能評価の精度を高め、技術開発を加速する。開発すべき新たな標準性能試験法として、例えば次が考えられる。

- ・ ロボットのハンゴ上での移動、狭部での作業員によるロボットの持ち運びなど、作業現場へのアプローチに関する性能試験法。
- ・ ロボットアームの打撃部の精密な位置決めなど、打音検査に関する性能試験法。
- ・ 3次元計測に関する性能試験法。
- ・ 排気ガスなど耐環境性に関する性能試験法。

主関連者：ロボットメーカー、ロボット研究者、調査保守会社、現場作業員、標準・規格開発者、テストフィールド運営者。

### 【取組方針3】安全規格化による安心化

テストフィールドを用いて必要十分な安全規格を開発し、ロボット化作業の安心を確保する。開発すべき新たな安全規格として、例えば次が考えられる。

- ・ ロボットが高所で作業する場合の転落防止安全規格
- ・ ロボットが人の近くで自律作業する場合の対人安全規格
- ・ ロボットを遠隔操作する場合の通信安全性規格
- ・ 違法車両無線を前提にした EMC 規格
- ・ 排気ガスによる腐食作用を前提としたロボットの保守点検に関する安全規格

主関連者：ロボットメーカー、ロボット研究者、調査保守会社、現場作業員、標準・規格開発者、テストフィールド運営者。

### 【取組方針4】総合評価入札制度の導入による国内普及

(1) 国発注の老朽インフラの調査保守事業において総合評価入札制度を用いて、調査保守ロボットの国内普及を図る。ロボット化作業の社会コストの合理性を、テストフィールドでのデモを用いてマスコミを通して国民に発信する。

主関連者：ロボットメーカー、調査保守会社、テストフィールド運営者、行政、マスコミ、国民。

【取組方針5】パッケージ型海外展開による国際展開

- (1) 海外での標準性能試験法導入・開発の支援：海外展開が期待される国に対し、その国に適した老朽インフラの調査保守用標準性能試験法導入・開発の支援を行う。対象国は、標準性能試験法とテストフィールドを導入することで導入技術の妥当性の検証が容易になり、費用対効果を高めることができる。

主関連者：標準・規格開発者、テストフィールド運営者、行政

- (2) ロボット導入：既に導入してある標準性能試験法に基づき、相手国に最も適したロボットを販売、開発する。場合によっては、我が国の業者が実作業としても請け負う。どのようなロボット導入形式が適切かは、標準性能試験法の結果により客観性が高い形で評価する。

主関連者：ロボットメーカー、調査保守会社。

- (3) 標準性能試験法の見直し支援：標準性能試験法は技術発展に伴い適時見直しが必要なため、我が国は対象国に継続的に技術支援を行う。海外展開においては、お互いの信頼関係が重要であり、このような継続的支援により、信頼関係の維持・向上が図られると考えられる。

主関連者：標準・規格開発者、テストフィールド運営者、行政

## 付録

### 打ち合わせ、委員会、安全規格化 WG の活動記録

平成 24 年 8 月 7 日 (火)	第 1 回ミーティング (キックオフミーティング)
平成 24 年 8 月 28 日 (火)	第 2 回ミーティング
平成 24 年 9 月 26 日 (水)	第 3 回ミーティング
平成 24 年 10 月 16 日 (火)	第 1 回特殊環境用ロボット標準化・安全規格化 WG
平成 24 年 10 月 22 日 (月)	第 1 回委員会
平成 24 年 11 月 16 日 (金)	第 4 回ミーティング
平成 24 年 12 月 4 日 (火)	第 2 回特殊環境用ロボット標準化・安全規格化 WG
平成 24 年 12 月 11 日 (火)	第 2 回委員会
平成 24 年 12 月 21 日 (金)	第 3 回特殊環境用ロボット標準化・安全規格化 WG
平成 24 年 12 月 27 日 (木)	第 4 回特殊環境用ロボット標準化・安全規格化 WG
平成 25 年 1 月 10 日 (木)	第 5 回ミーティング
平成 25 年 1 月 23 日 (水)	第 5 回特殊環境用ロボット標準化・安全規格化 WG
平成 25 年 2 月 26 日 (火)	第 6 回ミーティング
平成 25 年 3 月 3 日 (日)	第 6 回特殊環境用ロボット標準化・安全規格化 WG

契約管理番号	12101262-0
--------	------------