

3.4.3 レスキューのためのがれきの工学研究

大阪大学 小野里雅彦

(1)目的

1995年1月17日未明に発生した阪神・淡路大震災では倒壊した家屋の下敷きとなり、その探索、救出が間に合わずに多くの方が命をおとした。こうしたことを教訓に、より多くの命を救うために、瓦礫内の救命ロボット機器の開発が検討され、各所で研究開発が進められている[1]。しかしながら、救命ロボット機器の活躍する主要な場である、倒壊した家屋（以下これを"がれき"と記す）については、ほとんど解析されておらず、知見が蓄積・共有されていないのが現状である。そのため、実際に救命ロボット機器を開発するに際しても、設計の要求項目を明示することができない、あるいは、開発された機器の有する性能の評価を、一般性をもって行うことができないという問題に直面する。

こうした救命機器の開発における作業環境の知見が不足しているという現状の問題点に関して、本研究では救命活動の場としてのがれきに対する関心を喚起し、がれきに関する知見を学術的な観点から集積することを目的とした「がれき工学」の提案とそれに向けた要素技術の研究開発を行う。

(2)年次実施計画

本研究は平成14年度からの5カ年での実施を予定している。各年度における研究実施計画の概要は以下の通りである。

【平成14年度：研究開発1年目】

I-1) がれき工学の枠組み提示とがれき形成過程に基づくがれきモデルの構築

まずがれき工学の枠組みを明確にし、それを提示する。また中で中核となるがれき形成過程に関して、地震動による木造家屋の破壊プロセスをシミュレーションで行い、がれきのデジタルモデルを構築する。

I-2) がれき特徴量に対する検討

がれきを認識し分類する際に用いられる特徴量に対する検討を行い、特徴量の明確な定義を与えるとともに、がれきのデジタルモデル上での特徴量の計算手法を提示する。

I-3) がれきモデルのためのプラットフォームの設計・製作

原寸大の材料をもちいたがれきモデルを構築する際の、土台となるプラットフォームの設計と製作を行う。

【平成15年度：研究開発2年目】

II-1) 標準がれき(ver.1)の策定、提示と改訂

前年度のがれきに関する考察結果に基づいて、レスキュー機器開発の指針となる、標準がれきの第1版を提示する。この第1版の内容に対して、広く意見を募り、その意見に従い改訂を実施する。なお、標準がれきは、VRMLなどの標準的なフォーマットに従った3次元モデルデータとして一般に提示される。

II-2) がれきモデル用プラットフォーム用の計測と情報提示システムの開発

前年度に製作したのがれきモデルのためのプラットフォームに対して、がれきの計測とモデル化、またそれに基づいた各種の情報提示を行う装置の製作、設置を行う。これはがれきの組み替えとがれきの全方向からの観察・計測を実現するものである。

【平成16年度：研究開発3年目】

III-1) 実がれきの迅速な計測と分析手法の研究開発

倒壊した木造家屋の画像情報より、がれきの3次元モデルを構築する手法を開発する。さらに倒壊前の家屋のデータを用いて、倒壊後のがれきの内部構造（居住空間の変形、圧縮など）の推定技術を開発する。

III-2) 3次元がれきモデルの力学的安定性の評価手法の開発

3次元デジタルモデルとして構築されたがれきの、力学的な安定性に関する概念を規定し、評価する手法の開発を行う。これは、がれきを除去しながら救出活動を行う計画立案に不可欠な要素である。

【平成17年度：研究開発4年目】

IV-1) 標準がれき(ver.2)の策定、提示

標準がれきに関する改訂版を作成し、公開を行う。これは多くのレスキュー機器の開発を行う研究開発者に対して、レスキュー作業の作業環境の典型を示し、相互に比較・検討を促すことを目的にしている。また、前年度の力学安定性の評価を取り込んだバーチャル・がれきシステムとしての提示も行う。

IV-2) フィールドでのレスキュー活動に対する支援システムの検討

家屋の倒壊した現場において、がれきを認識、計測、分析し、適切な行動計画立案を行う支援をするシステムの開発を行う。これにより、救助現場においてがれきに関する蓄積された知見を利用することが可能となる。

【平成18年度：研究開発5年目最終年度】

V-1) 海外の家屋の倒壊がれきに対する検討

前年までの木造家屋を中心とした検討内容を、より世界的に通用するものとするために、多様な住宅に対して、本研究で考えられた手法の適用性の評価を行う。特に、中近東などのレンガ作りの住宅のがれきに対して検討を行う。

V-2) 研究開発の総括

これまで行ってきた研究開発の成果を総合して、「がれき工学」に関する情報公開をWebや本の出版などを通じて行い、総括を行うとともに、さらなる展開に向けた研究課題を検討し提示する。

(3)平成14年度の目的

平成14年度における業務目的の概要は、以下に述べる3つの項目にまとめることができる。

- (a) 【がれき工学】がれきを工学的な観点から研究を行う際の、研究領域のマップとなる枠組みを作成し、そこでの主要な研究テーマを提示する。また、その研究枠組みに則った具体的な研究として、がれきの形成過程論を中心に研究開発を行う。
- (b) 【がれき特徴量】がれきに関する知見を整理し、利用する上で重要となるがれきの分類を行うための基礎となる特徴量に関して考察を行い、特徴量の定義と導出方法に関して提示する。
- (c) 【がれきプラットフォーム】がれきに対して適用するロボットや各種の機器をテストするためのがれきのフィールドを設置するがれきプラットフォームの設計を行い、神戸ラボラトリに構築を行う。

(4)平成 14 年度の成果要約

平成 14 年度においては、がれき工学の提案、がれき形成過程のモデル化とシミュレーション手法の確立、がれきの分類のためのがれき特徴量の分析と提案、そしてがれきフィールドの基盤となるがれきプラットフォームの構築を目的として研究を実施した。それぞれにおいて、資料の調査、関係者との意見交換、コンピュータ上でのシミュレーションなどを行い、それぞれ、5 つの主要分野からなるがれき工学の枠組みの提示、拡張個別要素法に基づくがれき形成過程のシミュレーション手法の開発、3 タイプに大別されるがれき特徴量の体系の提示、ならびに神戸ラボラトリにおけるがれき可変式のがれきプラットフォームの構築という成果を研究初年度において得ることができた。

(5) 平成 14 年度の実施方法

上記の 3 つの各項目に関して、その実施方法を簡単に述べる。

(a) 【がれき工学】

がれき工学に関する研究実施方法は、がれき工学の枠組み設定と、がれき形成過程のシミュレーションのそれぞれに関して以下のように実施した。

1) がれき工学の枠組みの設定

本研究項目は基本的には文献等の調査と、関係者との議論によって遂行する。具体的には、

- 過去の大震災等の被害状況のデータ収集
- 倒壊家屋に関する研究の現状調査
- がれきからの救命活動の現状と問題点
- がれきなどを対象とした救助機器の開発動向

などを実施した。特に、1995 年に発生した阪神・淡路大震災に関する各種の情報を中心として分析を行い、がれき工学に求められる要件と、がれきの発生から救助活動にいたる段階的プロセスに合致した枠組みの考案を行った。

2) がれき形成過程

がれき形成過程の研究は主に既存の研究の調査とデータ収集、ならびにコンピュータ上でのシミュレーションにより実施した。具体的には、がれきの主な発生源となる旧式の木造家屋の構造と倒壊メカニズムについて調査、分析を行い、木造家屋の倒壊プロセスをコンピュータ上でシミュレーションするためのモデル化とシミュレーション・プロ

グラムの開発を行った。倒壊過程の計算に関しては、大域的な構造部材の運動を扱う部分と、継ぎ手などの局所部分の破壊を扱う部分の2つに分離し、それらが連動して家屋の破壊と倒壊のプロセスをシミュレーションする手法を新たに開発した。

(b) 【がれき特徴量】

がれきの特徴量の研究に関しては、以下のようなアプローチを採用している。

- 1) 単純化されたがれき要素の集合としてがれきに対して、定量的に評価可能な特徴量を想定する。
- 2) コンピュータシミュレーションにより構成されたがれきに対して特徴量の計算を行い、特徴量が意図するがれきのクラス分けを実現しているかどうかを検証する。
- 3) 検証されたがれきの特徴量に関して、実際の複雑ながれきに適用するための評価手法の開発を行う。

今年度の研究においては、上記の a) および b) を中心に研究を実施した。

(c) 【がれきプラットフォーム】

がれきプラットフォームの設計・構築に関しては、設置する神戸ラボラトリの責任者の田所諭氏(神戸大学工学部助教授、国際レスキューシステム研究機構 会長)との協議、神戸ラボラトリにおいてロボットのフィールドテストを実施する予定の研究者からの要請収集、ならびに共同開発を行う企業側との技術的検討により実施した。

屋内に設置すること、多様な研究者の要求に対して応えることのできる柔軟性を有すること、安全にテストが実施できること、など多くの制約と要求事項に対して、まずは基本となるシステムを構築した。

(6)平成 14 年度の成果

平成 14 年度の研究成果の詳細について、研究実施項目ごとに以下に説明する。

(a) 【がれき工学】

1)がれきの工学研究のフレームワーク

本研究で提案するがれき工学を、がれきが形成され、そこでの救助活動が展開される時間的系列の観点から、Fig. 1 に示す 5 つの研究領域を考えている[2]。

)倒壊対象論

倒壊する対象(被倒壊物)についての性質を扱う。すなわち、がれきとなる前の建造物の諸性質等を取り扱う。このカテゴリに属する主要な内容としては、以下のものがある。

)建築物構成分析

建築物が、いかなる素材がどういった量、分布で構成されているかに関するもの。地域の風土や生活習慣などに大きく依存する。国内では木造建築の建物が多いが、台風に合わせて屋根土をのせて瓦を葺く地方や、積雪に合わせて傾斜のついたトタン屋

根で軽量化する地方がある，という具合に地域差がある．海外では，熱帯や亜熱帯などの気温，湿度の高い地域の開放的な家屋と，高緯度の寒冷地の断熱に配慮した家屋，乾燥地域の日干し煉瓦を積み上げた家屋など大きく異なっており，「おなじ」が「れき」と称しても違ったものになってくる．

建物の構成を考える上において，家具等の生活に用いている物品も含めて考えることが必要である．こうしたものは，建築物倒壊時においては，建物の構造材と一緒に「れき」を形成する．タンスやテーブル，椅子などの家具，冷蔵庫やテレビなどの大型家電製品，ふとんや毛布などの寝具，といった生活用品の材質，数，重量，場所などの情報を調査することが，建築物構成を考える上で必要である．

)建築物強度分析

建築物がどのような構造的な強度を有しているかを分析するもの．これは，従来より建築構造学などの領域で多く研究されている．特に耐震設計の分野では，柱，梁，壁などからなる構造物の強度を有限要素法など，各種の解析手法を駆使して詳しく分析がなされている．しかしながら，木造建築物における柱や梁の継ぎ手のようなものは，形状の複雑性，木質材の物性の不均質性，非線形性などのため，いかなる条件のときに接合部が破断するか，といったことを正確に予測することは難しい．

)生活空間分析

生活空間分析とは，建築物内において居住あるいは勤務する人間が，どの部屋でどのような活動を行っているか，ということ进行调查・分析するものである．建築物が住居であれば，深夜には多くの人々が寝室で就寝しているであろうし，朝はダイニングで食事をとっていることが多いであろう．こうした一日の時間帯による行動領域の違いは，捜索において重要な手がかりとなる．また，夏と冬での屋内の環境の違いなども考慮の対象となる．これらの情報は災害発生時に要救助者が「れき」の中のどこにあり，その周辺はどのような状況になっているか，ということ推測する手がかりを与える．

)「れき」形成過程論

地震等の外力により建築物が倒壊するプロセスを研究の対象とするものであり，建築物と「れき」とを結びつけるものである．この領域で主要な内容としては，倒壊作用調査，倒壊過程解析，人体損傷評価の3つが挙げられる．

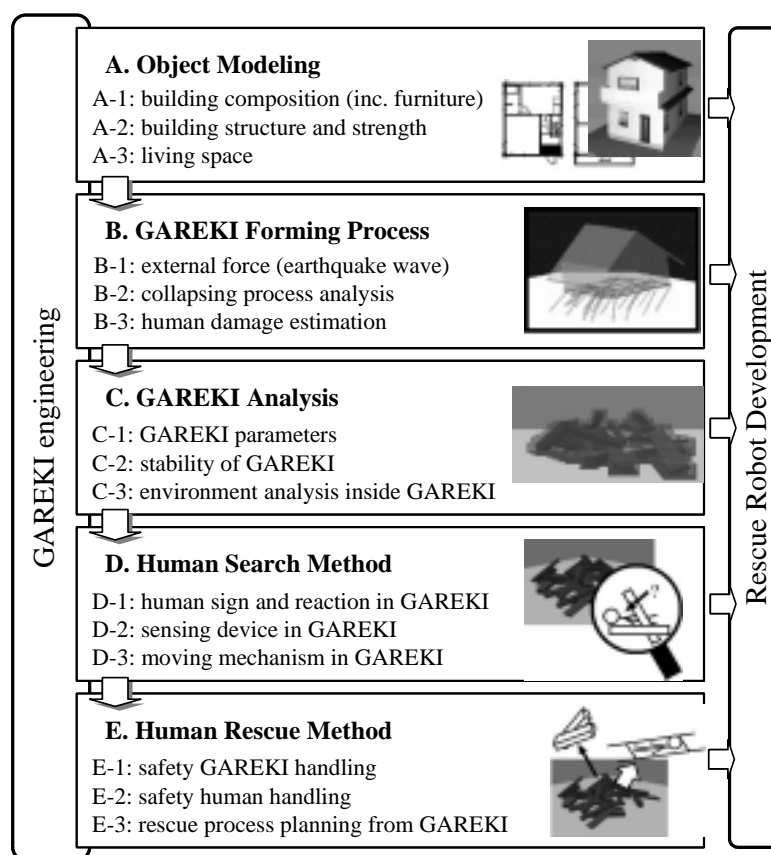


図1 がれき工学のフレームワーク

)倒壊作用調査

建造物に作用する外力に対する調査を行うもの。地震においては家屋の土台に作用する地震動の波形などのデータ収集・解析が主となる。これらのデータに関しては、すでに気象、建設、電力、鉄道など様々な分野で収集されている。また台風や洪水、土砂くずれなど地震以外の家屋倒壊においては、それに応じた作用(外力)の調査・検討が必要となる。

)倒壊過程解析

上記の倒壊作用が加わったときに、建造物がどのように倒壊するか、を解析するもの。これまでも建築の分野を中心に建造物の耐震性評価などで家屋の倒壊が研究されてきた。しかしながら、その関心の中心は建造物のどの箇所が、どのように破壊するか、という破壊開始前後の挙動であり、がれきへと倒壊していく過程および倒壊した後の状態に関してはあまり関心をはらわれてこなかった。これは、建築設計においては想定される外力に対して倒壊しないようにすることが重要であり、どのように倒壊するか、ということを経済的に取り扱う必要性がなかったことによる。がれきからの救助を考える上では、がれきがどのように積み重なって形成されるのかを解析することは重要となる。

)人体損傷評価

上記の家屋の倒壊過程において，家屋の内部，あるいは周囲にいる人間にどのような損傷を与えるのかを評価するもの．地震動による身体の受動的な運動，住居内の家具・家電等との衝突，圧迫，倒壊する家屋の構造材との衝突，圧迫などが対象となる．基本的な技術としては，自動車における乗員の衝突解析の手法が有効であろう．

)がれき形態論

建物が倒壊し，準静的な安定状態にあるがれきの諸特性を論じるものであり，がれき特徴パラメータ抽出，がれき安定性解析，がれき内環境分析などがこのカテゴリに含まれる．

)がれき特徴パラメータ抽出

がれきの有する各種の性質を代表することのできる特徴パラメータを設定するもの．一般にがれきは不定形で無秩序な対象であるが，救命機器の開発や救助計画の立案においては，作業現場としてがれきを特徴付けて分類することが重要となる．がれきの複雑性を考えると，単一のパラメータにより代表させることは難しく，複数のパラメータの組によるクラス分けが必要となる．

)がれき安定性解析

準静的な状態にあるがれきに対して，外力等が作用したときにどのようにがれきの各部材が運動するか（がれきがくずれるか）を解析するもの．余震が生じたときの家屋倒壊進行や，救助活動に伴うがれき部材の切断，除去などに伴う，がれきの崩壊などを予測する技術を確立することが重要となる．

)がれき内環境分析

がれきの中に埋もれている要救助者や，がれき内に入って行く救助者，さらにはがれき内で活動を行う救命機器等にとって，がれき内がどういった環境（状態）であるのかを分析する．たとえば，照度，温度，音の伝播，二酸化炭素濃度など．がれき内での探索用センサ開発などにおいて重要な情報となる．

)がれき内要救助者探索論

がれき内に埋もれている被災者を探索する手法を研究するものである．英語の”search and rescue”の search に該当する．

)がれき内の人間の徴候と反応の分析

がれきの中から生存者（あるいは遺体）を探し出す上で有効な，人間の徴候や反応を分析し，がれき内でそれらがどのように伝達（拡散，吸収）されるかを調べる．たとえば，呼気による二酸化炭素濃度の勾配，心臓の拍動や横隔膜の上下動に伴う電磁場の乱れ，体表面からの赤外線放射，声の伝播，などは分析の候補となる．

)がれき内センシング機器の開発

上記で述べた人間の徴候や反応を検出したり，後述の移動機構に必要な環境情報を取得するためのセンサや信号処理機器の開発を行う．がれき内での救助活動に用いられるということで，センシング機器には，特に信頼性，頑強性，小型・軽量，などの性質を有することが求められる．

)がれき内移動機構の開発

要救助者の探索や救出のためにがれきの内部（あるいは表面）を移動する機構を開発するもの．がれきは従来の移動機構が対象としてきた単なる悪路や不整地と違い，3次元的に障害物となるものが存在すると同時に，障害物が次の移動の足場になるなど，非常に環境が複雑で多様である．こうしたがれきの中を確実性を持って移動できる機構としては，現在，ヘビ型ロボットに代表される多体節型の機構がある．

)がれき救出過程論

がれきに埋もれている人を発見した後，その人をどのようにして安全に救出できるか，という救命活動の最終段階の内容を扱う．”search and rescue”の後半，rescue に相当する．

)がれきの安全なハンドリング方法の確立

がれきの中の人および救助活動を行っている人の双方にとって安全ながれきの取り扱い - 特に除去 - の方法を検討する．がれきの除去に際しては，がれきを切断したりすることが行われるが，不用意な切断はがれきの崩落を招く危険がある．また，がれきのつり上げなどにおいても力学的な安定を崩す危険があり，最新の注意が必要となる．そうした救出活動を安全に行う際の指針を確立する．

)要救助者の安全な搬出

がれきに埋もれた要救助者を救い出すためには，上記のがれきの除去に加えて，安全かつ要救助者に苦痛や不安を与えない取り扱いが求められる．特に，足場の悪い，狭い作業環境で重量のある人間をソフトにハンドリングするための機器の開発は重要であり，また，がれきから周囲の安全な場所へと移送する手法も課題として存在している．

)がれきからの救出過程立案

現場で実際に救出活動を行う上では，がれきの中から要救助者を救出するために必要な機材や所要時間などを見積もり，具体的な救出手順を立案するための手法が求められる．特に，不確実な情報に基づいた計画となるため，作業の進行に応じた計画の見直し等が重要となる．

以上，がれき工学のフレームワークと主要な研究開発課題を列挙してきた．本研究においては以上のすべての項目を行うのではなく，がれき形成過程論とがれき形態論を中

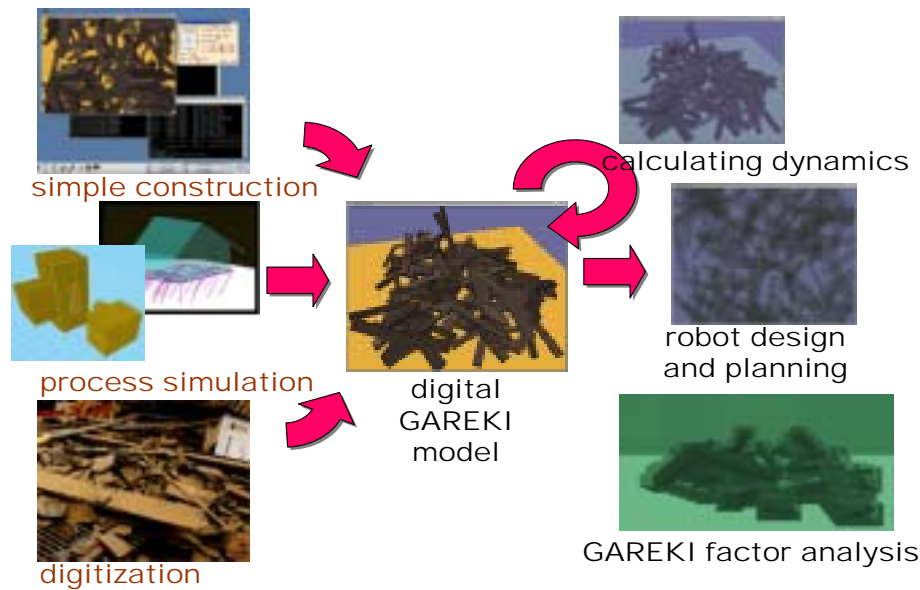


図2 がれきのモデル化とシミュレーション

心に、モデリングとシミュレーション技術の確立を目指している[3]。(図2参照)

最終的に効果的のがれきから人命を救出するためには、上記の各領域の研究開発成果が有機的に結合することが必要となる。また、がれき工学の研究遂行に際しては、さまざまな専門を有する人の横断的な協力が不可欠と考える。たとえば、ロボット工学、計測工学、機械工学、オペレーションズ・リサーチ(OR)、構造力学、建築学、材料力学、人間工学、生理学、心理学、医学、地震学などの領域は関わりを有している。また、当然のことながら、研究者のみならず、消防や警察、自治体、建設業、防災機器メーカー、医療関係者などとの連携も実践に移す上で重要なことである。

2)がれき形成過程

木造家屋の倒壊は、主に壁、柱などの構造部材やその接合部の破壊(ひびわれ、脱落、剥離など)が要因となる。構造部材の破壊に伴って家屋の抵抗力が低下し、家屋の構造を保てなくなると構造が崩れていき、がれき化する。本研究では木造家屋の倒壊プロセスを解析するために、図3のように部材スケールの破壊解析と家屋スケールの倒壊解析の2種を連携させる[5]。

部材スケールでの破壊プロセス

部材スケールでは、壁、柱、接合部など構造部材自体の破壊プロセスを解析する。境界条件/寸法/物性値、地震応答などから解析モデルの初期状態などのパラメータを決定し、破壊を含めた構造部材の動的な挙動を計算する。部材スケールの解析結果(内部亀裂、破断など)は、家屋スケールにおいて接合部の脱落や部材の剥離などとして適用される。

家屋スケールの倒壊解析

家屋スケールでは、構造部材の結合の変化とそれともなう運動により倒壊からが

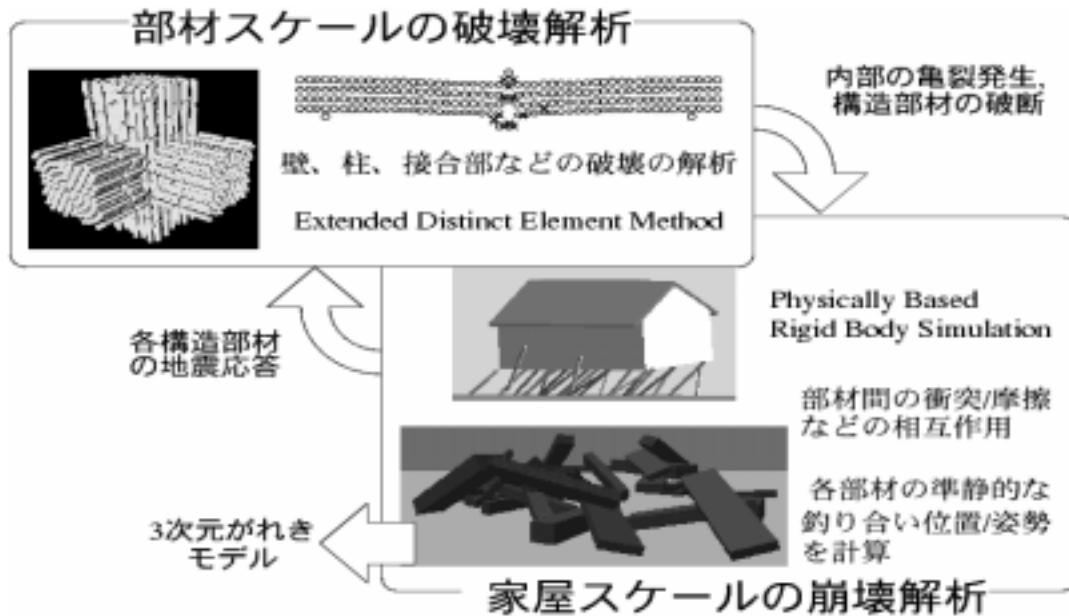


図3 2つのスケールを連携したがれき形成過程シミュレーション

れき化までのプロセスを解析する。部材スケールの解析結果から脱落/破壊する部材を特定し、部材の衝突や摩擦などの運動を計算し、準静的な釣り合い位置・姿勢を求める。得られた構造部材の集合は3次元がれきモデルとして、がれき形態の解析やがれき内作業の検討などにいられる。

部材スケールの解析では、接合部、壁、柱など構造部材自身の破壊を解析する。木造家屋の場合は構造部材に、多く木材が使われる。木材は繊維方向の引張に強くせん断に弱いという異方性を持つため、木材の破壊は繊維方向に割れる場合が多い。また木材は生物材料であるので物性値のばらつきが大きく、引張・圧縮・曲げによる破壊強度にかなりの個体差がある。

このような木材の破壊を解析するために、本研究では、拡張個別要素法(Extended Distinct Element Method: EDEM)[6]を用いる。EDEMは、連続体も解析できるように拡張した個別要素法である。個別要素法は、砂利のような個々が独立した小要素の挙動を解析するために開発されたメッシュレス解析法である。EDEMではさらに引張荷重に抵抗する間隙ばねを導入する。間隙ばねの消失により連続体の破壊挙動も解析できる。EDEMは不連続体の解析法がベースなので、大変形をともなう破壊解析に向いている。

EDEMのモデルは小要素、要素ばねおよび間隙ばねで構成される。小要素は任意の形状でよいが衝突判定の高速化のため主に円形や球形が使われる。要素ばねは、小要素間が接触または干渉しており、両者が接近する場合にのみ作用する。間隙ばねは、要素間にあらかじめ接続された一対の弾性ばねとダッシュポットである。間隙ばねは要素を結ぶ方向(法線方向)と法線方向に垂直な方向(せん断方向)にそれぞれ破壊条件を設定する。法線方向は引張ひずみによって、せん断方向はせん断力によって間隙ばねの破壊基準が

定められる。

木材の異方性と不均一性を表現するために、本モデルでは、間隙ばねの弾性ばね定数と間隙ばねの破壊基準にばらつきを持たせる。これにより木材の破壊断面に見られる激しい凹凸形状を表現させる。現在のところ、上記の EDEM に基づく構造部材の接合部破壊のシミュレーションを実施しており、木材の持つ性質を反映した各種のパラメータの設定を行っている。

(b)【がれき特徴量】

1)がれき特徴量の検討

「がれき」とひとことで言っても、その様子は様々である。組成、構造、規模、生活様式、風土、文化などにより、倒壊家屋で形成されるがれきの性質は異なってくる。そうすると、がれきを活動の場とする機器の開発に際しては、どういった性質をもったがれきを対象とするのか、ということを確認にする必要があり、がれきの性質を表すための特徴パラメータを定める必要がある。

本研究においては、がれきの特徴パラメータとして3つのタイプを考え、それらの代表的な量を提案している。

)タイプ-I: がれきの大きさや数などがれきの規模(サイズ)を表す特徴パラメータ。たとえば、がれきを包絡する柱状体の集合の体積総和や、それを床に投影した面積の総和など。

)タイプ-II: がれきの全体での代表する性質を表す特徴パラメータ。各種の比や最大値、平均値などが該当する。たとえば、がれきに存在する最大の要素重量やがれきの空間占有率など。

)タイプ-III: がれきの中の、ある特定の点、パス、領域などにおける局所的な性質を表す特徴パラメータ。たとえば、がれき内のある点から別の点へと移動することが可能な最大の球径など。

上記の3つのタイプに対する代表的な特徴パラメータを表1に示す。

2)がれきの特徴パラメータ分析のためのがれき形成ソフトウェア GAREKI

上で述べたがれきの特徴パラメータとがれきの形態との関連性などを調べるために、単純ながれき構成要素からなるがれきを構成するソフトウェア GAREKI を作成した[4]。その特徴は以下の通りである。

)直方体のがれき要素

GAREKI で扱うがれき要素は、縦、横、長さの3つの寸法パラメータで与えられる直方体形状の剛体要素に限定される。その他の多面体や曲面を含むものは扱わない。また、柔軟物のように変形するものも考慮していない。柱や梁、壁板、家具類など家屋の中にあるものの多くが直方体形状を有していることから、ここでの形状の制限は近似を行う上で大きな障害にはならないと考えている。

)逐次的な要素の積み上げ

がれきはがれき要素をひとつずつ上から順に落下させて積み上げていく形で形成する。落下したがれきはすでに積まれたがれき要素または床（地面）と接触し、力学的に安定な位置・姿勢で静止する。このとき、すでに積まれたがれき要素が運動することはないものとする。安定姿勢の評価には摩擦を考慮しないフォームクロージャ(form closer)を用いており、最低3点からの反力により重力と釣り合っている。

)乱数による寸法ならびに初期位置・姿勢の決定

がれき要素の形状や大きさに分布を持たせ、空間的に配置を行うために、立体形

表1 がれき特徴量のタイプと典型的特徴量

CATEGORY	FACTOR		EXPLANATION
Factors TYPE-I GAREKI scale	number of GAREKI elements (over U)	N[U]	N[U] tells us how many elements consist of GAREKI. Exclude small fragments under the volume of U.
	ground projection area (by L-square grids)	S[L]	S[L] shows the ground area on which GAREKI exits. LxL square grids are introduced for blank-filling.
	covering volume (by L-square grids)	V[L]	V[L] shows the volume of GAREKI. Pillars with LxL square base are introduced for internal space filling.
	GAREKI height	HG	Maximum height of GAREKI from the ground
	GAREKI weight	WG	The total weight of GAREKI
	GAREKI element volume	VG	The sum of the volumes of GAREKI elements. VG doesn't include the internal vacancy of GAREKI.
Factors TYPE-II GAREKI global characters	GAREKI stuff ratio	rg	rg shows how tightly GAREKI is stuffed. $rg = VG / V[L]$
	GAREKI space ratio	rs	$rs = 1 - rg = (V[L] - VG) / V[L]$
	element mean weight	wg	$wg = WG / N[U]$
	element mean volume	vg	$vg = VG / N[U]$
	element maximum weight	wmax	$wmax = \max \{w1, w2, \dots, wN\}$
	element maximum volume	vmax	$vmax = \max \{v1, v2, \dots, vN\}$
	building collapsing ratio	BCR	The ratio of the original volume of the building V_{org} and covering volume $V[L]$. $BSR = V[L] / V_{org}$
	living space reduction ratio	LSRR	The ratio of the original living space in the building V_{liv} and space volume in GAREKI $LSCR = (V[L] - VG) / V_{liv}$
Factors TYPE-III GAREKI local characters	maximum space ball radius at point p	$R_{max}(p)$	The maximum radius of the virtual ball expanding with its center at the point p.
	maximum space ball radius at point p region	$\underline{R}_{max}(p)$	The maximum radius of the virtual ball expanding with its initial center at the point p.
	maximum tube radius along path P	$\underline{R}_{max}(P)$	The maximum radius of the virtual tube expanding with its initial center axis on the path P.

状を表す3つの寸法値と、落下させる際の初期位置(x, y平面内での2つの座標値)ならびに初期姿勢(3つの角度)の合計8つのパラメータを一樣乱数を用いて変動させ与えている。一樣乱数とパラメータとの間の対応付ける関数を変化させることで、位置や姿勢、寸法の変動範囲に制限を与えたり、分布に偏りを与えたりすることができる。

)3次元モデルとグラフィックス

形成されたがれきは、各要素あたり寸法(3パラメータ)と位置(3パラメータ)・姿勢(3パラメータ)の合計9パラメータの集まりで記述される。また、各要素は3次元ソリッドモデルとしてコンピュータ内に表現がされており、各種の幾何学的量の計算や干渉計算が可能であるとともに、OpenGLなどを用いたシェーディングされたコンピュータグラフィックスを容易に生成することができる。また、VRML2.0などのファイル形式を介在させることで、他のアプリケーションでもモデルを共有可能である。

GAREKIを用いて形成されたがれきの例と、それに対して計算を行ったがれきの特徴パラメータの例を図4に示す。

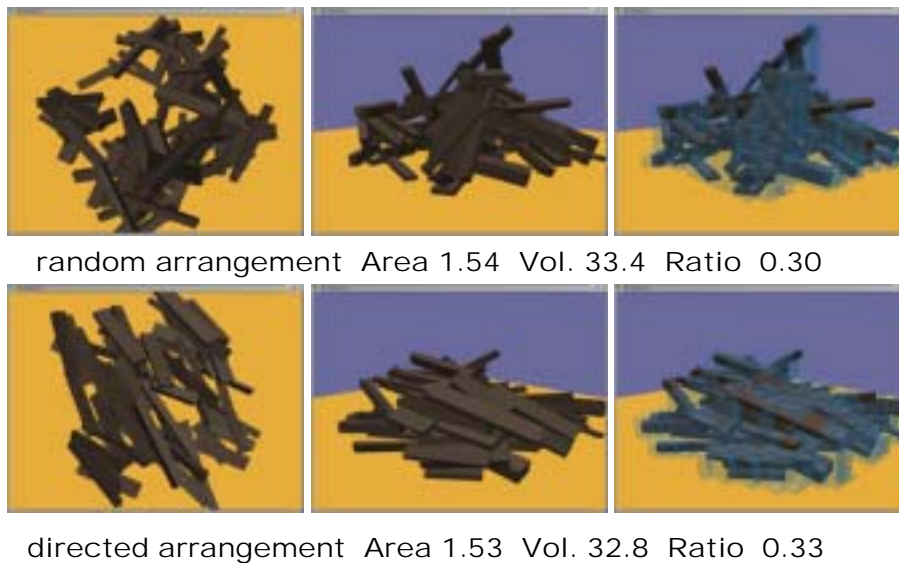


図4 がれき形成ソフトウェア GAREKI によるがれき特徴パラメータの例

(c)【がれきプラットフォーム】

1)がれきプラットフォームの要求仕様

レスキューロボットの開発を目的としたがれきのフィールドとしては、米国 NIST の Intelligent Systems Division が構築した"Reference Test Arenas for Autonomous Mobile Robots"が有名である[7]。これは屋内型のフィールドであり、

種の搭載センサや能力を分離してテストできること
テストの前およびテスト中に構成を変えることができること
繰り返しテストのシナリオを実行できること
移動可能であること

という指針で設計され、難易度や構成の違うイエロー、オレンジ、レッドの3つのフィールドから構成されている。

神戸ラボでのがれきフィールドにおいても NIST の設計指針を参考にしながら以下の5つの内容を実現することを目指している。

リアリティ：現実のがれきの持つ諸性質を（部分的にでも）有していること。

多様性：現実のがれきの持つ組成や構造などの多様性を実現すること。

可変性： がれきの組成や構造を目的に応じて変えることができること。

可観測性： がれき構造やがれき内で活動するレスキューロボットの行動を観測できること。

再現性： 構築されたあるがれきと同じ組成や構造のがれきを再現できること。

これらのすべてを高いレベルで実現することは困難ではあるが、こうした要件を踏まえて IRS 神戸ラボでのがれきフィールドの設計を行った。

2)がれきフィールドの基本設計と構築

レスキューロボットの開発を目的としたがれきの IRS 神戸ラボでのがれきフィールドの検討を行い、図5に示すようプラットフォーム（がれきを設置するベース）を設計した。プラットフォームは大きく3つのエリアとそれにアクセスするためのオーバーブリッジから構成される。

エリア A：がれきの底面ならびに内部を観察するとともに、等身大ダミーを昇降型テーブルリフトに乗せてがれきの内部に設置できるエリア。幅と奥行きが 1m、高さ 0.8m のユニットの集合で構成し、適宜追加したり積み上げたりできる。天板は透過型とし、ポリカーボネート板と FRP グレーチングを併用する。

エリア B：重量のあるがれき（たとえばコンクリート）等を使用するエリア。1.0m 四方の産業用パレットを使用し、防振ゴム上に配置することでエリアを構成する。

エリア C：高低差のある移動経路を模擬するエリア。昇降型テーブルリフトの上に透過型の天板を取り付けたものを3台並べる。外部からの操作でテーブルの高さは変えることができる。

オーバーブリッジ：エリア A～C に対して上方からアクセスするための橋。同時に2名が乗ることができる。

がれきフィールドにはがれきを観測する映像系も常設設備として設置する。がれきにおけるレスキュー機器の動作を上面ならびに下面からの映像でとらえ、それを DVD+HDD レコーダで記録する。

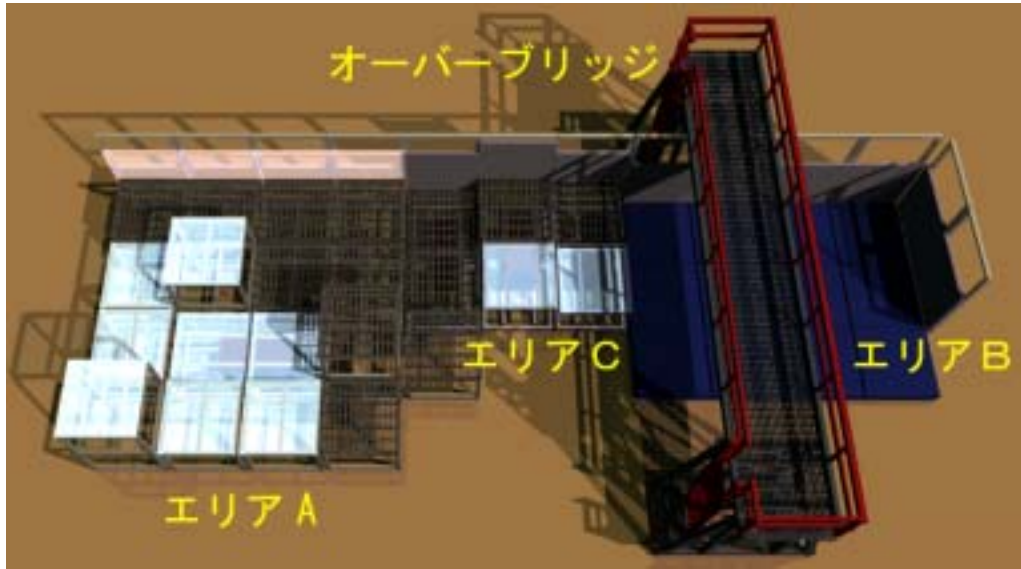


図5 神戸ラボ がれきフィールド・プラットフォームの構成図（CG）



図6 建設中のがれきフィールド・プラットフォーム（平成15年3月）

平成15年3月末現在で、(株)ジーベック、(株)イマオコーポレーション、日本FRP(株)などの技術協力を受けて、構築・設置を完了している。機器の調整や運用方法の取り決めを行い、平成15年度のはじめから本格的にレスキューシステム機器開発研究に供される予定である。図6に3月はじめ時点でのがれきフィールド・プラットフォームの建設の様子を示す。

以上、IRS 神戸ラボでのがれきフィールド構築の状況について説明してきた。ここで述べたがれきフィールドが多くの研究者に利用され、レスキューシステム開発の促進に役立つことを期待している。

また、本がれきフィールドは賃貸オフィスの室内に構築するという制約から、現実のがれきと比較したときに、スケール等に限界があることも確かである。IRS 神戸ラボでは神戸キメックセンタービル近くの空き地に、実際の倒壊木造家屋に相当するフルスケールのがれきを設置する計画もあり、現在、その技術ならびに予算の両面から検討を行っている。

(7) 平成14年度の結論

以下に平成14年度の研究の結論を研究項目ごとに列挙する。

(a) 【がれき工学】

1) 今年度目標の達成状況

がれき工学の枠組みとして、家屋倒壊によるがれきの形成前から人命救助にいたるプロセスを5つに分割し、それぞれに対する主要な研究項目を提示した。これにより、がれきを工学的に研究する上での内容が明確となり、さらに相互の関係性が明確となった。また、具体的な研究項目として取り組んでいるがれき形成過程論のシミュレーションに関しては、手法は概ね完成したが、計算量の爆発を押させて実用的な時間で結果を出すための手法の改良が未完成である。

2) 今後の課題

がれき工学をより広く研究者や関係者に認知してもらい、研究開発活動に参加してもらうことが必要となる。そのため、がれき工学に関する広い領域での広報活動が必要であるとともに、研究成果の具体的な提示が不可欠である。そのためにも、がれき形成のシミュレータの開発と公開が今後の課題としてあげられる。

(b) 【がれき特徴量】

1) 今年度目標の達成状況

がれきの特徴量の研究に関しては、特徴量のタイプ分けと典型的な特徴量を提示したことで、年度としての計画は達成されたと考えられる。また、特徴量を検証するためのシミュレータである GAREKI を構築したことで、単純化されたがれきの山の外観と特徴量との間の関連について、直感的に見て取ることができた。

2) 今後の課題

今後の課題として重要なことは、いかにして実がれきから特徴量を算出するか、という点にある。3次元モデルの世界においては容易に算出できても、実際のがれきの山に対して、いかにしてすばやく、かつ正確な特徴量を算出できるか、という課題に対して、計測技術を中心に研究開発を行う必要がある。

(c) 【がれきプラットフォーム】

1) 今年度目標の達成状況

年度当初においては、平成14年度はがれきプラットフォームの設計と基本試作の段階を予定していたが、特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構の神戸ラボラトリ内における研究施設整備の計画と連動することにより、年度内に大き

く進展し、プラットフォームを細部をのぞき、構築することができた。

2) 今後の課題

がれきプラットフォーム上に構築するがれきに対して、その正確な形状、位置、姿勢を計測し、実がれきと同等のデジタルがれきを構築することが、テストする機器の分析・評価の上で不可欠となる。

(8) 平成14年度の成果発表等

本研究に関して、平成14年度に行われた研究成果発表は以下の通りである。

- 1) Onosato, M. and Watasue, T.: Two attempts at linking robots with disaster information: InfoBalloon and gareki engineering, *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 6, pp. 545-548, 2002.
- 2) Onosato M. and Watasue, T.: Analysis of GAREKI Factors of Collapsed Wooden Buildings for Rescue, *Proc. SICE Annual Conference 2002 in Osaka*, pp. 1099-1101, 2002.
- 3) 綿末, 小野里, 木造家屋の倒壊プロセスシミュレーションによる3次元がれきモデルの構築, (社)計測自動制御学会 SI2002 講演論文集(I), pp. 269-270, 2002.
- 4) 小野里, 救命活動の場としてがれきの分析と空中からの災害情報収集システムの構築, 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 公開シンポジウム論文集, pp.69-74, 2003.
- 5) 小野里, IRS 神戸拠点がれきフィールドの構築に関して, 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 公開シンポジウム論文集, pp.173-174, 2003.

(9) 平成15年度計画案

平成15年度においては、平成14年度で得られた研究成果に基づき、以下に挙げる4つの研究項目を中心に実施する。

(a) がれきの特徴分析:

がれきの特徴を表す量に関する検討を、がれきのランダム形成シミュレータGAREKIを用いて構成したがれきモデルを用いて行う。特に、がれき内部におけるがれき部材の充填密度とがれき粒度に注目し、がれき内の移動ロボット開発の設計指標に用いることのできる特徴量の抽出を行う。

(b) がれきのデジタルモデル構築:

現在、構築中の木造家屋の全体構造・局所構造の多重構造モデルでの家屋倒壊シミュレーションを進展させ、倒壊に伴う生活空間の変形・圧縮の様子を導出し、3次元のデジタルがれきモデルとして提示する。提示に際しては、裸眼立体視を用いたがれき立体提示装置を製造して用いる。

(c) がれきのテストフィールド構築:

神戸拠点において平成14年度に構築したがれきフィールドのプラットフォームの上に、がれき要素を配置し、がれきフィールドを形成する。また、がれきフィールドの各部材の形状・寸法・位置・姿勢を計測し、コンピュータ内にシミュレーションやプランニング用

のデジタルがれきモデルを構築する技術を開発する．データ入力にはCCDカメラを使用する．

(d)実がれきの計測と分析：

倒壊した家屋の画像（複数）から，倒壊家屋のがれきの3次元モデルの構築を行い，倒壊前の住宅の情報ならびに倒壊シミュレーションのデータベース情報より，がれき内部の様子を推定する手法の開発を行う．データ処理に購入予定のパーソナルコンピュータを使用する．

以上の研究項目を実施しながら，その研究成果を随時，レスキューロボット等の機器の研究開発に携わっている研究者に公開し，連携をしながら研究を遂行していくことを予定している．

(10) 参考文献

- [1] 高森他：レスキューロボット機器研究会報告書，(社)日本機械学，2001.
- [2] Onosato, M. and Watasue, T.: Two attempts at linking robots with disaster information: InfoBalloon and gareki engineering, *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 6, pp. 545-548, 2002.
- [3] 小野里：倒壊家屋の瓦礫を対象としたモデリングとシミュレーション - レスキュー工学からの研究フレームワーク - ，日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 771-772，1999.
- [4] Onosato M. and Watasue, T.: Analysis of GAREKI Factors of Collapsed Wooden Buildings for Rescue, *Proc. SICE Annual Conference 2002 in Osaka*, pp. 1099-1101, 2002.
- [5] 綿末他：地震による家屋の瓦礫形態の分類とその形成過程の解析に関する研究，(社)計測自動制御学会 SI2000 講演論文集，pp. 203-204，2000．
- [6] 伯野：破壊のシミュレーション，(株)森北出版，pp.1-55，1997．
- [7] <http://www.isd.mel.nist.gov/projects/USAR/>