Ⅲ.1 震災総合シミュレーションシステムの開発

研究代表者　後藤 洋三（防災科学技術研究所）

1. 研究の目的

阪神・淡路大震災の現場からは「事前に被害状況が想定できていたら・・・・」、「もっと早くに被害を把握できていたら・・・・」という声が聞かれました。効果的な防災と減災を実現するためには災害対応の前線に立つ自治体を、最新の知見と経験を実装した情報技術で支援する必要があります。震災総合シミュレーションシステムはそのような目的で研究され、開発されました。

どんなに良いシステムを作っても使われなければ意味がありません。個々の自治体が大震災に遭遇することは希なことです。そのため、開発の目標を以下のように設定しました。

①安価で堅牢、自治体の日常業務と連携できること。
②平常時の災害対策業務にも活用できること。
③被害を詳細かつ具体的に推定できること。特に、構造物被害を個別に推定できること。
④実被害情報を効率的に取り込み統合する機能を持つこと。
⑤実時間より十分に早く災害の進行と対応行動をシミュレーションし複数の対応策を比較し選択できること。

2. 主要な成果

(1) 震災総合シミュレーションシステムの枠組み

開発の目標を実現するシステムの基本となる枠組みを以下のように整理しました。

①震災総合シミュレーションシステムは複数の自治体が共同運用する高度な機能を持った防災情報センターシステムと、各自治体に置かれ平常時の業務から災害・復旧時の業務にわたって使われる自治体情報システムで構成する。
②それぞれのシステムは、平常時、地震発生直後、復旧時の3つのフェーズで活用できる機能を備える。
③防災情報センターシステムは、さまざまなソフトウエア（アプリケーション）をパーツとして組み合わせ、目的とする機能を効率的に構成、実現できるものとする。
④自治体情報システムはリスク対応型地域管理情報システムの理念に基づいて構成し、平常時業務と災害時業務を連続して扱えるシステムとする。
⑤自治体情報システムは、自律分散で使用出来るように設計して自治体の各職員が日常使うノート型パソコンに搭載し、庁舎が被災して使えない場合でもそのノート型パソコンを持ち出せば、最低限の災害対応業務が実施できるようにする。

(2) 被害推定サブシステム

一般的に必要となる基本的な被害推定機能と先進的な技術を適用した詳細な被害推定機能を開発しました。

1) 被害推定法には、緊急地震速報や震度の第一報を受けて瞬時に1kmメッシュで被害推定する簡易法、50mメッシュの詳細な地震動分布推定に基づき 5 分程度で被害推定する詳細法、観測された地震波データの周期特性を使い 30 分程度で構造物被害を個別に推定する方法、の3方法を用意しました。

2) 50m メッシュの地震動分布推定では、地震観測点の情報から表層地盤のデータベースを使って地盤の非線形増幅特性を考慮した補間を行います。

3) 液状化も 50m メッシュの地盤データベースを使って短時間に推定できるシステムを用意しました。

4) 避難計画の立案などには、建物の戸別被害推定が必要です。そのため、建物の高さと構造材料、地震動の大きさと周期特性から建物の応答振幅を個別に求め、100 万都市でも 30 分で全戸の被害を推定できるシステムを開発しました。

5) 100 万都市の道路網を対象に、上述の建物倒壊による道路閉塞を 30 分以内に推定するシステムを開発しました。

6) 有風下の延焼、飛び火、火災旋風、そして消火活動の影響を考慮しながらリアルタイムに火災延焼を予測出来るシミュレータを開発しました。

7) 化学プラントが被災した際の気体拡散や火災延焼と消火の効果を時系列に予測できるシミュレータを開発しました。

(3) 実被害情報収集サブシステム

発災後 30 分を目途に、調査できる範囲は限られても確実に被害状況をモニターできるシステムを開発しました。

1) 自治体職員が操作できることを前提に、ヘリウムガスで膨らませるバルーンに静止画カメラと動画カメラを搭載する装置と、クレーン車のブームの先端に高感度暗視カメラと投光器を搭載する全天候型の移動高所観測車を開発しました。

また、自治体の庁舎の屋上などの高所に望遠レンズ付きのデジタルカメラを取り付け、地震発生前後の写真を比較することにより周辺半径 1km の被災箇所を 30 分で検出、結果を GIS の市街地図にプロットするシステムを開発しました。

2) 自治体が日常業務で撮影している航空写真画像と発災後に撮影する画像を比較して変化域を抽出するシステムを開発しました。また、ギガ単位のサイズになるデジタル航空写真画像をパソコンでも効率的に収録し扱える技術を開発しました。

(4) 災害対応支援サブシステム

災害発生後の自治体の対応を支援するシステムです。

1) 震度情報などに基づく被害推定結果と時々刻々入手され

る実被害情報を統合処理することによって被害推定結果を修正し、緊急対応の要否を判定するシステムを開発しました。
2) 備蓄救援物資の配分と、一部道路が閉塞した状況で物資配送を最適化するシステムを開発しました。
3) 新潟県中越地震で被災した自治体の支援を通して、時空間 GIS を活用した自治体の災害対応業務の効率化を実践的に研究しました。

(5) マルチエージェントシミュレーション技術による震災総合シミュレーション

時々刻々と変化する災害に対し防災要員や市民が取る行動とその結果を実時間より十分に早くシミュレーションすることが出来れば、対応案をいくつか比較し、より効果的な行動を選択することが出来ます。そのため、多数の人間(エージェント)の対応行動をシミュレーションする技術を開発しました。
1) 地物の変化を計算するサブシミュレータと人間の行動を模擬するエージェントシミュレータを統合し、10,000個を超えるエージェントの動きを効率よくシミュレーションするアーキテクチャ(計算の仕組み)を開発しました。
2) 大震災を想定した広い地域のシミュレーションを目標として、地理分散を基本とした分散シミュレーションアーキテクチャを開発し、3km×4kmの密集市街地モデルで10,000個を超えるエージェントが活動する様子を22台のパソコンを用いて実時間の1/10以内で計算できることを実証しました。
3) エージェントの行動規範を記述するプログラム言語と、シミュレーションの結果を利用者に分かり易く表示するビューワの開発をおこない、自治体防災機関の協力を得てリスクコミュニケーションに適用し実用性を検証しました。
4) マルチエージェントシミュレーションを津波から避難する問題、自動車と歩行者が混在して市街地から避難する問題に適用し手法の標準化を進めました。奥尻島の津波避難の実例に適用し、シミュレーションの精度を検証しました。

(6) シミュレーション技術の事前対策への適用

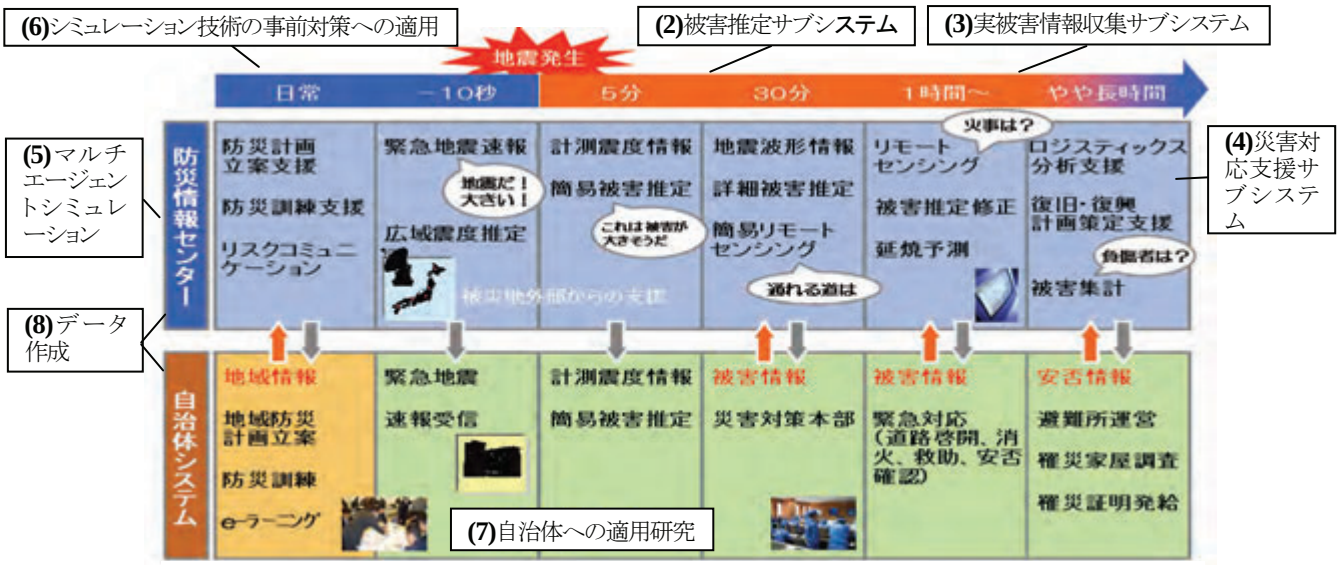
震災総合シミュレーションシステムの事前対策への適用をパイロット的に実施しました。
1) 南関東で活断層を抱える50万都市を選定し、直下地震による震度、液状化、家屋被害などを50mメッシュで推定したハザードマップを作成、同市の地域防災計画の被害想定やハザードマップのホームページ公開に役立てました。
2) 100万都市を対象に50mメッシュの震度予測機能を活用し、住民が自宅(木造戸建て)に作用する震度を予測して耐震安全性と補強方法を診断できるWebシステムを構築しました。

(7) 自治体への適用研究

1) リスク対応型地域管理情報システム(RARMIS)の概念である平常時と災害時の連続性、公開形式のデータベースの必要性、自治体が導入・運用しやすい経済性を実証するため、三重県下の自治体にRARMIS概念に基づく自治体システムを適用する研究を行っています。
2) 秋田県下の自治体と協働して全庁統合型時空間 GIS の導入を行い、準備・計画段階から導入・運用に至るプロセスの在り方と留意点を実践研究しています。

(8) 自治体適用におけるデータ作成

1) 震災総合シミュレーションを活用するために必要なデータを整備する手法と事例をまとめました。
2) 谷埋め盛土等の人工改変地盤の検出方法をまとめました。盛土地盤は地震に対して一般に脆弱ですが、人工的に平坦化された宅地では、どこが盛土か判別が困難です。そのため、新旧地形図の比較から谷埋め盛土や貼り付け盛土を検出する手法を開発し、100万都市や50万都市に適用して実用性を検証しました。宅地造成等規制法がH18年に改定になった現在、各自治体で危険な盛土のハザードマップ作りが進められていますが、この技術の活用が期待されます。



平常時、地震発生直後、復旧時の 3 つのフェーズで活用される震災総合シミュレーションシステム

1. 震災総合シミュレーションシステムの枠組み

震災総合シミュレーションシステムは地震災害の軽減を目的とした総合的な防災情報システムです。図1に示すように、専門機関が運営し平常時から緊急対応時、災害復旧時に至る災害対応業務を支援する防災情報センターシステムと、自治体に置かれ日常業務から災害時の緊急対応、災害復旧、復興に至るまでの業務を一貫して支援する自治体情報システムで構成されます。防災情報センターシステムは大規模な自治体の災害対応専門部局や小規模な自治体が共同利用する防災専門機関に置かれるシステムです。

1.1 平常時・発生時・復旧時の3つの時間帯における役割と機能

震災総合シミュレーションシステムを構成する2つのシステムの3つの時間帯における役割と機能を図2にまとめました。

(1) 自治体情報システム

自治体の日常業務とシームレスに連携し自治体職員が自ら操作することを想定した情報システムです。

・平常時には、日常業務を通じて地域の情報を蓄積・管理、災害時にはこれらの情報を有効利用します。
・発災時には、自治体の迅速な災害対応を支援するため、地震計の情報などを使って被害状況を推定し、その後は緊急対応に必要な情報を収集、共有します。
・復旧時には、効率的・効果的な復旧・復興を支援するため、刻々と変化する被災の影響、二次災害の危険性、救援活動や市民への生活支援情報、復旧工事状況等を一元的に蓄積・管理します。

(2) 防災情報センターシステム

大規模な自治体では災害対応の専門部局に置かれ、小規模な自治体では共同利用される専門機関に置かれて災害対応業務を支援する情報システムです。

・平常時には、詳細な被害予測によるハザードマップの作成、被害シナリオの作成、シミュレーションによる消防活動や緊急物資輸送などの防災計画の精査、様々な状況を設定した防災訓練シナリオの作成、住民とのリスクコミュニケーションや合意形成のための情報提供などにより自治体が日常に行う防災活動を支援します。
・発生時には、高度な技術を駆使した被害推定結果のほか、各地で収集された被害情報、航空写真や衛星画像の解析から得られた被害情報などを提供し、自治体の災害対応を支援します。また、自治体システムが収集する人的被害情報、火災発生情報あるいは避難情報などを集約して防災関係機関に提供し、被害波及軽減のための広域的な減災活動を情報面から支援しますます。
・復旧時には、生活支援活動、復旧支援活動のための広域的なロジスティックス策定や効率的な復旧・復興戦略策定のための情報提供とシミュレーションによる予測を活用した意志決定支援を行います。

1.2 平常時からの活用

震災総合シミュレーションシステムは発災時に高度な情報を提供する機能を備えています。しかし、個々の自治体にとって、大地震に直撃されその情報が必要となる機会は希なことです。したがって、震災総合シミュレーションシステムが平常時の防災活動、減災の準備活動に活用される枠組みが重要であり、平常時に活用されていてこそ災害時にも活用されると言えます。ここでは、最近の防災行政施策に対応した活用例を示します。

(1) 耐震改修促進計画や地震防災マップ作り

建物の地震対策を推進するため、「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が改正され（改正耐震改修促進法）、2006年1月に施行されました。各都道府県及び市町村は、2006年度中に耐震改修促進計画を策定することとされています。

この計画では、国がこれまで調査し発表してきた地震動予測地図などを参照しながら、全ての市町村が平成20年度までに地震による揺れ易さを示した地図（地震防災マップ）を作成・公表することとされています。この地震による揺れ易さについては、個々の建築物の所在地の揺れ易さが認識可能となる程に詳細なものとすることが求められています。さらに、揺れ易さだけでなく、地域の状況に応じて、地盤の液状化や崩壊の危険性、市街地の火災の危険性、避難の困難さ等に関する地震防災マップの作成にも取り組むことが重要とされています。

後述する、**6.1**の「50万人都市のハザードマップ作成」、**6.2**の「住宅耐震診断システムへの適用」では、震災総合シミュレーションシステムをこのような防災マップ作りに適用した具体例を紹介しています。

(2)造成宅地の変動予測調査

大規模に谷を埋めた造成宅地で起こりやすい地すべり等の被害を防ぐため、「宅地造成等規制法の一部を改正する法律」が、2006年10月に施行されました。都道府県知事等が崩落等の危険のある既存の造成宅地を「造成宅地防災区域」として指定し、宅地所有者に対して必要な勧告および命令を行うことができるようにしたものです。

そのために、まず造成宅地の変動予測調査（一次スクリーニング）を行うこととされており、震災総合シミュレーションシステムのデータ整備技術として開発した人工改変地盤の抽出技術（8.2参照）はまさにそれに応えるものです。

震災総合シミュレーションシステムのテストフィールドとして共同研究を実施した川崎市と横須賀市では、作成した人工改変地盤データがこの法律に基づく造成宅地の変動予測調査に活用されています。

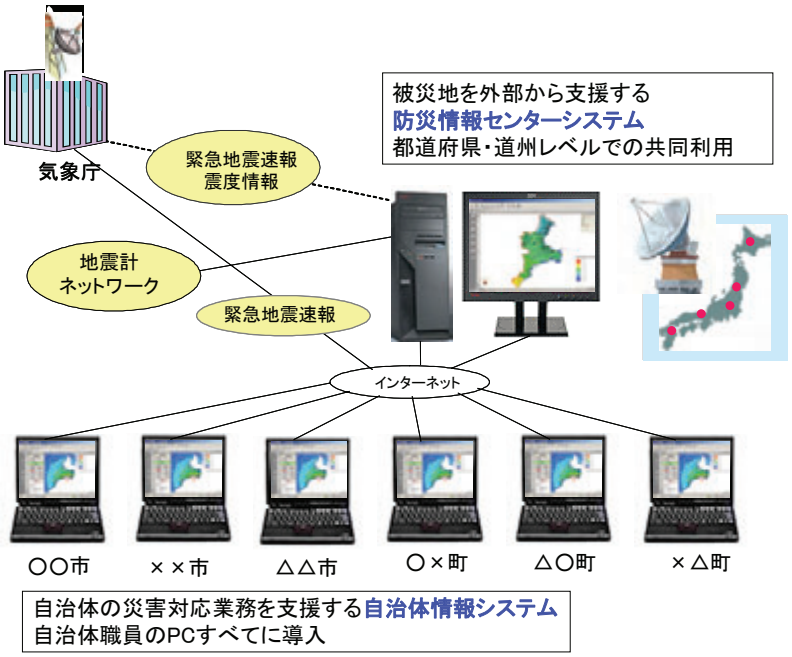


図 **1**　震災総合シミュレーションシステム運用の枠組み

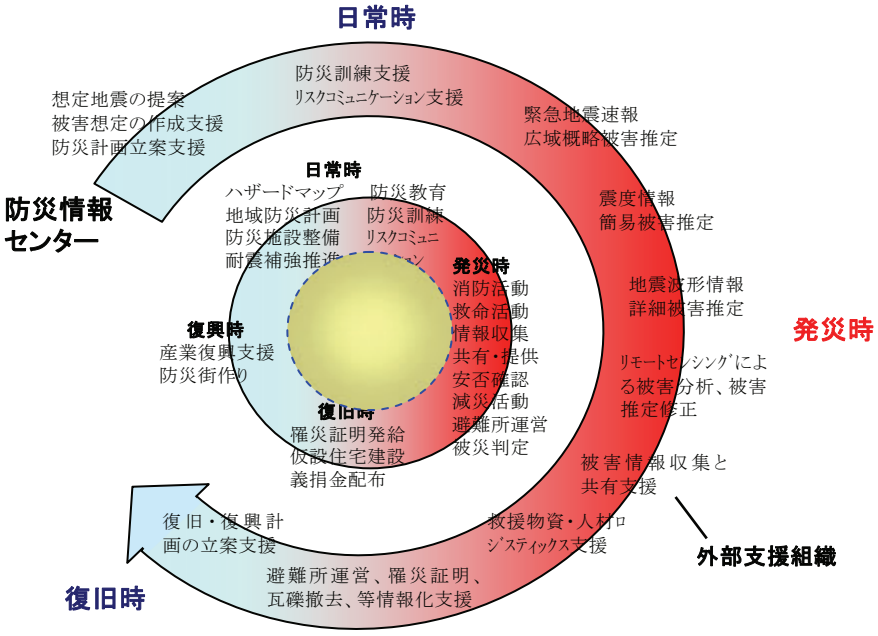


図 **2**　防災情報センターと自治体の防災業務の連携

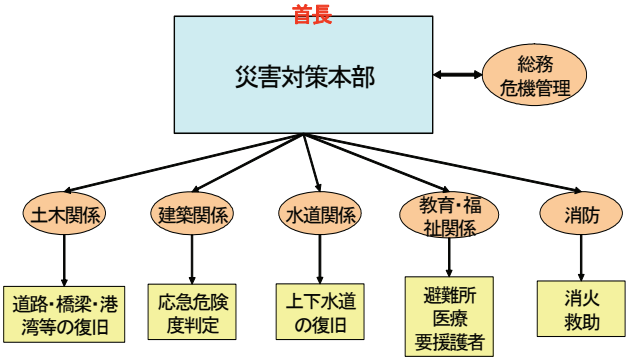


図 **3**　災害時における自治体内の業務分担

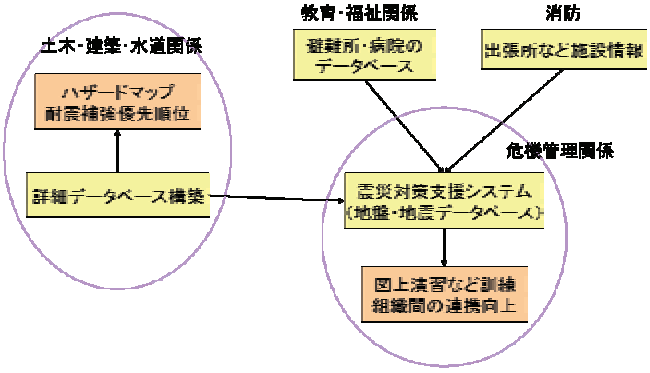


図 **4**　平常時における自治体の防災への取り組み

1.3 防災情報センターシステム

震災総合シミュレーションシステムが高度な機能を提供するためには、防災情報センターシステムが状況に応じて様々な災害をシミュレーションし、様々な被害を推定する機能を持つようにすることが必要です。また異なる作りや異なる機能のサブプログラムが混在しても、それらが共通のデータベースとGIS上で連携しなければなりません。

(1) 防災情報センターシステムの構成

図**1**は防災情報センターシステムです。被害推定サブシステムと被害情報収集サブシステムで構成されます。

1) 被害推定サブシステム

・災害分析・推定シミュレータ群

同じ現象をシミュレーションするにも、目的や使用可能な入力データに応じて異なるアプリケーションを使用する柔軟な対応が求められます。例えば、平常時における防災訓練シナリオや防災意識啓発のための資料作成には、想定地震に対する詳細被害推定や、消防活動・緊急物資輸送などの対応行動シミュレーションを行う必要があります。一方、地震発生後の緊急対応支援のためには、震源やマグニチュード程度の速報に基づく広域で大まかな即時被害推定、その後に各地の震度情報が得られたときの詳細被害推定を行い、さらに出火情報が得られた場合には火災延焼シミュレーションを行います。

このような用途の違いに応じてその都度システムを作り直すのではなく、個別にパーツとして開発されているアプリケーションを用途に応じて統合する方が効率的です。そのため図**2**に示す構成を基本としました。メインシステムは制御サブシステムを有し、これがシミュレータの実行順などを管理します。そのための定義ファイルもテキスト形式なので、容易にシミュレータの変更・追加できます。

入出力ファイルはCSV（Comma Separated Values）形式のテキストファイルとし、各アプリケーションの連携を容易にしました。また、全体的な精度と所要時間を考慮して各シミュレータの性能を調整しています。

・災害予測・対応シミュレータ群

シミュレータ間の相互作用を考慮しながら時間ステップ毎に計算を進める特徴があります。図**1**に示すように消防隊員や救助隊員をエージェントモデル（行動目標、周辺覚知能力、行動能力などがプログラム化されたエージェントが地図内を自律行動するモデル）で記述します。これと時間ステップ毎に計算される火災延焼や交通流のシミュレーションを組み合わせ、消防力の配置、住民の初期消火と避難、道路啓開手順など、様々な選択肢を比較検討します。ここに統括カーネル（制御システム）がS-API（シミュレータ用インターフェース）を使って各シミュレータ間のデータと計算結果の受け渡しを行い、メインシステムがこの統括カーネルを起動し、制御します。

2) 被害情報収集サブシステム

防災情報センターシステムの特徴の一つは実被害情報収集サブシステム（図**3**）を組み込んでいることです。その代表的な機能は以下の通りです。

・航空写真、衛星写真、バルーンや高所設置カメラなどの画像情報を地図と重ね合わせてビューアに表示
・被害地点を抽出し地図に落としてビューアに表示
・被災現場からの被害速報を地図に貼り付け
・実被害情報でシミュレーションによる被害予測を修正

ここに、バルーンや高所設置カメラなどの開発については**3.1**と**3.2**、発災前後の画像比較から変化域を抽出しシステムに登録する機能等については**3.3**、実被害情報による被害予測結果の修正及びそれに伴う緊急対応支援の必要性を評価する機能については**4.1**で述べます。

(2) アプリケーションの実行管理

防災情報センターシステムの主画面を図**4**に示します。通常は即時被害推定サブシステムの画面が表示されており、緊急地震速報などで気象庁等から発表される震源情報を受信すると数秒で震度分布や建物・人的被害の概略分布を1kmメッシュで推定し表示します。平常時の訓練などでの利用では、模擬地震の条件設定を行い、シミュレータ群を起動します。

画面の下部はアプリケーションの実行管理を行う制御サブシステムの表示です。起動順序は定義ファイルで記述出来ます。起動順序を表す接続条件、実行プログラムファイルのパス、出力結果ファイルのパスおよび制御サブシステム画面での表示位置をツールを使ってテキストで記述します。各アプリケーションはバッチファイルから呼び出され、戻り値に応じて正常終了もしくは異常終了を表すステータスファイルが作成されます。制御サブシステムはステータスファイルを監視し、画面表示します（図**4**）。

入力条件や出力結果によってアプリケーションの連携先を自動的に判断させることも可能です。現状では震源情報と観測震度情報といった入力データの相違により、異なるアプリケーション群を自動的に実行出来るようになっています。さらに、手動操作によるアプリケーションの個別起動および強制終了機能も実装しています。この機能により、実情報を入力してシミュレーションをやり直したりタンク火災シミュレータを起動したりすることが出来ます。

(3) データの規格化

データ形式として図**5**に例を示すCSV形式を採用しました。データの並び順を変更するマッピングに対応するため、各データ項目に名称を付し、データ参照出来るようにしました。データ形式変換にも対応するため、文字コードのほか座標系、測地系、タイムゾーンといったメタデータを先頭行に記述しています。他システムとのデータ交換には上述のCSV形式のデータをXML形式に変換することにより対応します。また、データ項目の意味を共通化して管理するため、各項目の内容を記述するファイルを別途用意し、そこでテキストファイルの形式も定めています。

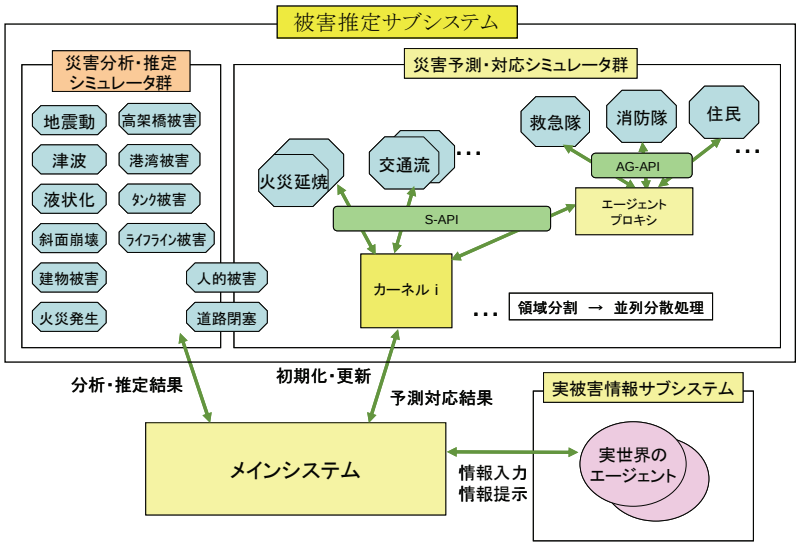


図**1**　防災情報センターシステムの構成

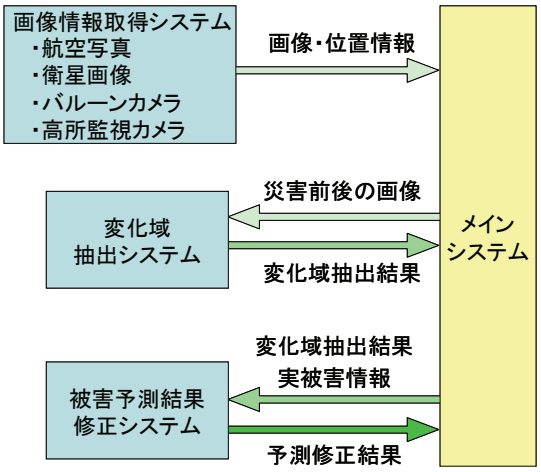


図**3**　被害情報収集サブシステムとメインシステムの関係

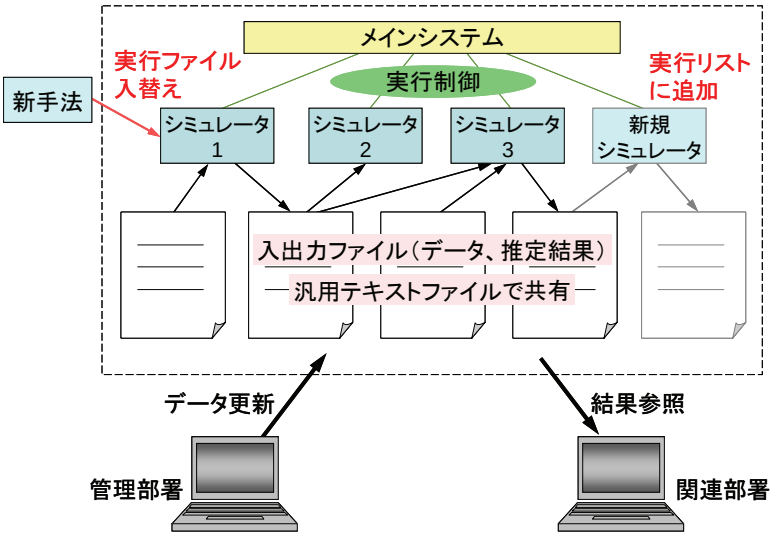


図**2**　システムにおける各シミュレータやデータの更新や構成を容易にする仕組み

図**4**　防災情報センターシステムの画面表示

```
%TypeName=EqGroundMotion,GeometryType=Point,GeodeticDatum=TokyoDatum,CoordinateSystem=XY09,TimeZone=+09:00,Encoding=Shift_JIS,Version=1.3
#points,pointsStartTime,pointsEndTime,startTime,endTime,meshCode,pga,pgv,ij,si
-51525:-12475,0000-00-00T00:00:00,0000-00-00T00:00:00,2006-05-26T10:03:40,2006-05-26T10:03:40,1153441,715.3,105.1,6.4,125.3
-51575:-12475,0000-00-00T00:00:00,0000-00-00T00:00:00,2006-05-26T10:03:40,2006-05-26T10:03:40,1152441,667.9,109.9,6.3,131.5
```

1行目：ヘッダ行　　データの型名および形状種別，使用する座標系，測地系，タイムゾーンおよび文字コードを定義

2行目：データ項目行　データの項目名を記述

3行目以降：データ行　数値データまたは文字列データを記述

図 **5**　データの規格化

2. 被害推定サブシステム

被害推定サブシステムは**1.3**で述べた多様な災害分析・推定シミュレータ群と災害予測・対応シミュレータ群ならびにその制御システムの総称です。目的に応じて「簡易推定」と「詳細推定」の2通りの流れを開発しました。簡易推定は発災後数分程度で入手される震度情報を基に5分以内に被害推定を行うことを意図しています。詳細推定は発災後30分程度を目途に地震波データを分析した結果や火災の発生情報などを使って多様で精度と分解能が高い被害推定を行います。ここでは最初に簡易推定の流れを説明し、簡易推定に用いられる主要なシミュレータの機能を解説します。次に、詳細推定の流れを説明します。詳細推定で使われるシミュレータの内、建物戸別被害推定については**2.5**、道路閉塞については**2.6**、火災被害の詳細な延焼モデルについては**2.7**、プラント火災については**2.8**で述べます。

2.1 簡易推定の流れ

簡易推定における各シミュレータの連携関係を図**1**に示します。簡易判定では精度よりも速度を優先しており、既存の手法も含む複数の手法を採用、状況に応じて選択できるようになっています。なお、簡易推定と詳細推定の両方で使われるシミュレータの内、地震動推定については**2.3**、液状化とライフライン被害については**2.4**で述べます。近年、調査の必要性が指摘されている谷埋め盛土等の人工改変地盤の検出については**8.2**で述べます。

(1) 建物被害

最大速度または計測震度と建物の被害率の関係を過去のデータの回帰分析から求めた曲線が一般に使われており、ここでは、a)内閣府首都直下地震対策検討専門調査会(2005)、b)山口・山崎(2000)、c)村尾・山崎(2002)の3モデルを選択可能なシミュレータを作成しました。入力項目は、木造・非木造の構造種別、建築年代別の棟数データです。テストフィールドとした川崎市版では、地震動を50mメッシュで推定していることから同じメッシュで被害棟数を計算し、それを町丁目単位や区単位の集計結果へと加工しています。

(2) 一般橋梁

久保・片山(1978)による、1923年関東地震、1948年福井地震、1964年新潟地震における30橋の橋梁損傷程度および影響因子の数量化I類による分析結果から、落橋の可能性を推定するシミュレータを作成しました。入力項目は、構造、支承、橋脚高さ、地盤条件などの構造データと、震度、液状化の有無の外的要因データです。判定は、落橋可能性大、落橋可能性有り、落橋可能性無し、の3段階としました。

(3) 高架橋

1995年兵庫県南部地震の際の阪神高速道路公団（当時）の被害データを用いて、橋梁の諸元、地盤条件および震度と損傷ランクを関係づけるニューラルネットワークを構築し、橋脚の損傷ランクを推定するシミュレータを作成しました。

ここでは逆誤差伝搬法に基づく5層（入力層＋中間層3＋出力層）のニューラルネットワークを用いました。入力層は19、中間層はそれぞれ50、出力層は5ニューロンから構成されるとし、学習率は0.001、学習回数は28,000回としました。学習する際には、震度が小さい場合の被害推定も可能とするため、元の橋脚被害調査結果による585件のデータに加え、それらの橋脚の「震度4のとき無被害」というデータも併せて計1170件のデータを使用しました。出力層には兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会(1995)で定められた橋脚の被害ランク、すなわち被災度で、As(落橋)、A(大被害)、B(中被害)、C(小被害)、D(被害無し)の5段階が出力されます。

地形分類は建設省国土地理院(1995)の1:10,000地震防災土地条件図の地形分類を再分類したものを使用しました。ここで「川沿い等地形」には内水面、天井川沿いの微高地、浅い谷、自然堤防、砂堆・砂州、後背湿地、旧池沼が含まれています。また、震度分布は山口・山崎(1999)による兵庫県南部地震の建物被害率から推定された分布を使用しました。

(4) 火災延焼の簡易推定

ここでは、パソコン1台で町丁目レベルの簡易推定を行う方法として、「東消式97」に基づくシミュレータを開発しました。基本的には、町丁目ごとの建物全壊率・建物棟数、震度および気象条件から、町丁目内の出火点数、延焼出火点数、延焼棟数を算定するものです。

- 出火点数：中央防災会議(2005)の方法を用い、建物全壊率および町丁目内の建物棟数に基づき以下の式で算出します。
  冬18時：出火点数＝0.0069×(全壊率)$^{0.73}$×(建物棟数)
  夏　昼：出火点数＝0.0046×(全壊率)$^{0.73}$×(建物棟数)
- 初期消火率：中央防災会議(2005) の方法を用います。
- 延焼出火点数：次式（中央防災会議:2005）で算出します。
  延焼出火点数＝(1－初期消火率)×(出火点数)
- 消防力の配置と焼失棟数の算出：消防力（消防車等）は消防施設（消防署等）に駐在しているものとし、焼失棟数の算出には中央防災会議(2001) の方法を用います。消防力の1次運用のみを対象とし、転戦は考えません。

(5) 人的被害

対象項目は、死者数、負傷者数、避難者数、としています。

・死者数:内閣府首都直下地震対策検討専門会(2005)、及び内閣府地震被害想定支援マニュアル(2001) の方法を選択可能としています。いずれも、係数は、兵庫県南部地震における被害データの回帰分析により定められたものですが、前者の式の方が小さい評価となります。このシミュレータでは、建物倒壊と火災による死者のみを対象としました。

・負傷者数:死者数と同様の方法です。

・避難者数:死者数と同様の方法ですが、本来は時間的変化も考慮すべきです。すなわち、地震発生当初は情報収集や食料・水を求め、自宅が無事である人も避難します。少し落ち着くと、自宅が無事である人は戻り始め、この時の避難者数の減少割合はライフラインの復旧状況と大きく関係します。自宅が全壊した人は、水道・ガスが復旧した後も避難生活を続けるので、最終的な避難者数は建物被害推定によって推定できます。しかし、その前の段階の避難者数は、ライフラインの復旧状況等と関係するため予測が難しく、今後、よりきめの細かい避難者対策を検討していくためにはライフラインの復旧を考慮した避難者数推定モデルが必要と考えられます。

2.2 詳細推定の流れ

詳細推定の流れを図**2**に示します。発災後30分程度で地震波データを入手して周期特性(スペクトル情報)を分析すると、その地震波に対する建物毎の揺れ易さを判定することにより、建物の被害を戸別に推定できるようになります。

火災発生などの情報が入ってくると延焼シミュレーションを実施して被害の進行を具体的に予測します。さらに実被害情報が入ってくると**3.**で述べる被害推定結果を実被害情報で修正していくプロセスに入っていきます。

そして、これらの情報を総合的に受けて**5.**のエージェントシミュレーションによる災害対応のシミュレーションが実施されていくことになります。

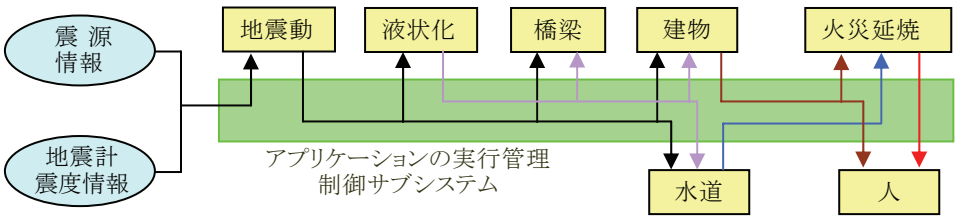


図**1** 簡易推定の流れ

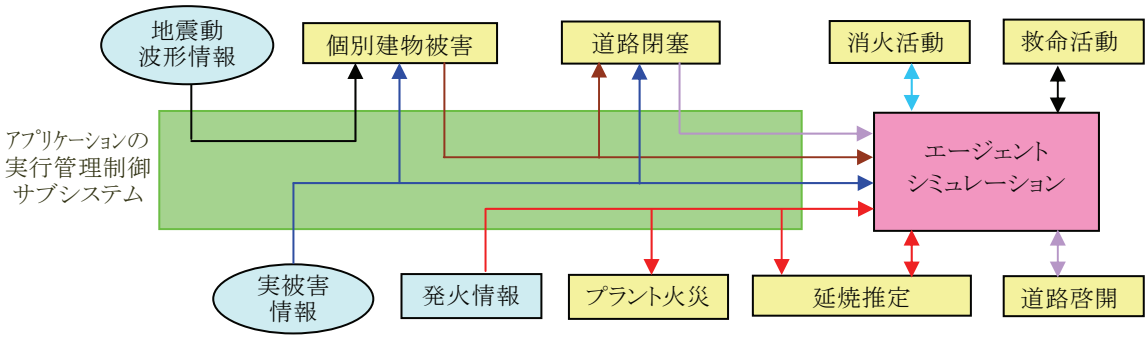


図**2** 詳細推定の流れ

2.3 地震動推定シミュレータ

地震被害推定に最もよく使われるのは震度です。我が国では全国の自治体に最低一カ所、合計で約3,800箇所に配置されている震度計の情報が地震発生後数分で気象庁から配信される仕組みになっています。この震度情報をそのまま使って被害推定するシステムも有りますが、地震の揺れは地盤条件によって大きく異なるため、全国で3,800箇所有っても十分ではありません。一カ所の震度計の表示値をその町村全域の震度推定に当てはめると大きな誤差を招く恐れがあります。

また、震度が構造物の被害を推定する最適な指標か、という問題があります。振動速度やSI値を指標値に使う施設も有りますし、長周期成分の影響を強調した長周期震度の方が木造家屋の被害とよく対応するという研究例もあります。さらに、地震計で観測された波形から得られる応答スペクトルを使って、構造物の応答周期を考慮した精度の高い推定を行う方法も考えられます。ただし、地震計からのデータ通信の問題（確実性・コスト・所要時間）や被害推定を行う構造物の情報が十分に集められるかという問題があり、地震動の推定精度だけを高めればよい、という訳ではありません。

震災総合シミュレーションでは2.1で述べたように、簡易推定と詳細推定のシミュレータが用意されています。地震動推定サブシステムはそれぞれが使われるタイミングと要求される精度に対応するように開発されています。

(1) 地震動の空間補間と50mピッチ地盤データベース

地震動特性（地表の振幅、周期、継続時間など）は、一般に震源特性、伝播経路特性、基盤と表層地盤の増幅特性により決まります（図**1**）。図中の地震計1と2の間の地震動を推定する場合、二つの地震計が数kmの間隔であれば、震源特性、伝播経路特性、深層地盤構造に大きな違いは有りません。地震動の差異は主として表層の地盤条件の違いにより生じます。この差異を考慮するため、図**2**に示すように地盤増幅の影響を考慮して地表の観測値を基盤に引き戻し、基盤上で補間を行うことにしました。

補間方法は様々ありますが、ここでは①距離による重み付けを行う方法（IDW法）と②距離減衰式をトレンド成分（平均値）とするSimple Kriging法を用意し、状況に応じて選択されるようにしました。

また、このような補間のためには、それぞれの地点における地盤条件が必要になります。そのため、テストフィールドとした川崎市と横須賀市については8.1で述べる50mピッチの表層地盤データベースを構築しました。

(2) 加速度、震度、SI値の増幅度評価モデル

基盤の地震動に対して表層の地震動は増幅されて大きくなります。その増幅度の評価方法は次の3つに大別されます。

①大地震の観測値に基づく方法
②中小地震の観測記録を用いる方法
③地震応答解析に基づく方法

①の大地震については基盤と地表で同時に観測された事例がまだ少なく汎用性に欠けます。②は観測事例が多く類似地盤の実測増幅度も利用できますが、大地震時に地盤が非線形化して増幅度が低下する影響が含まれません。③によれば弱震から強震までの評価を行うことができますが、地盤の材料特性の設定によって結果が敏感に変る場合があるため、詳細な地盤調査が必要となります。

そこで、②と③を組合せ、次式で示す関数形で増幅度をモデル化しました。基盤地震動がX_1よりも小さい弱震時では増幅度を一定とし、②の中小地震の回帰分析から得られた増幅度を用います。これにより、深層地盤の影響も考慮されます。極めて強い揺れが作用すると、地盤はそのせん断強度以上の力を上層に伝えることができないので、地震動の主要成分の最大加速度や計測震度は上限値を有します（図**3**）。この上限値は、表層地盤の最も弱い層の強度と厚さ等で決まるので、表層地盤のみの解析によって決定可能です。

$$X_S = \alpha \cdot X_b \qquad (X_b \le X_1) \qquad [1]$$

$$X_S = X_L - \beta \cdot (X_b - X_2)^2 \qquad (X_1 < X_b < X_2) \qquad [2]$$

$$X_2 = \frac{2}{\alpha} X_L - X_1$$

$$\beta = \frac{X_L - \alpha \cdot X_1}{(X_2 - X_1)^2}$$

$$X_S = X_L \qquad (X_b \ge X_2) \qquad [3]$$

αは弱震時の増幅度であり、X_bは入力地震動、 X_1、X_2は変曲点です。変曲点の間は2次式で結んでいます。X_Lは地表面地震動の上限値です。これまでの観測事例や地震応答解析結果の分析・検証により、α、X_1、X_Lを表層地盤の平均S波速度の関数として与えるモデルとしました。

(3) 応答スペクトルの増幅度評価モデル

2.2で述べた詳細推定では地震動のスペクトル情報を使うため、応答スペクトルの増幅度モデルが必要になります。以下の3種類の方法を利用可能としました。

①古本・杉戸らの方法
②石井らの方法
③改正建築基準法

①は、地盤パラメータS_n値の関数とするもので、簡易な方法ですが、単一の地盤パラメータで非線形化の影響も含めたスペクトルを推定するのは精度的に限界があります。②③は地盤の応答を考慮したモデルを用いる方法です。なお、このサブシステムでは、石井らの方法、改正建築基準法による方法とも、補間に不可欠な地表から工学的基盤へのスペクトル引き戻し解析を行っています。

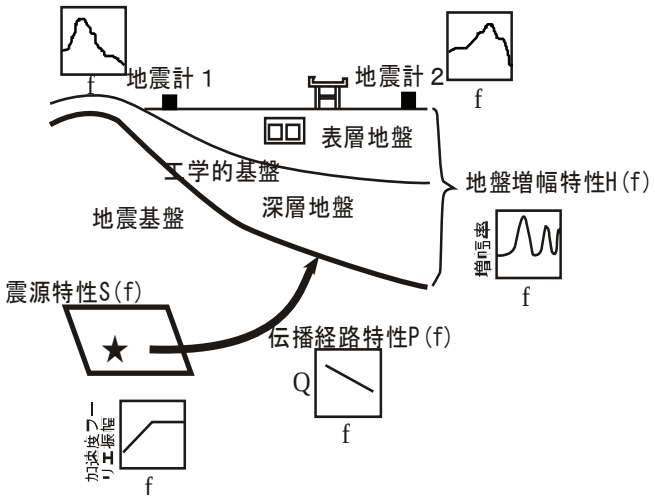


図**1**　地震動の伝播

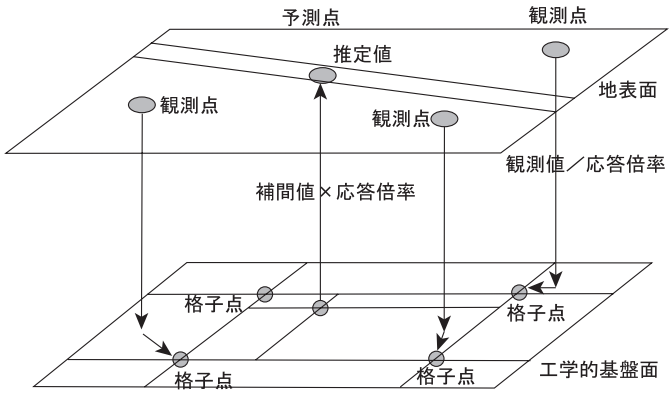


図**2**　地盤増幅を考慮した補間

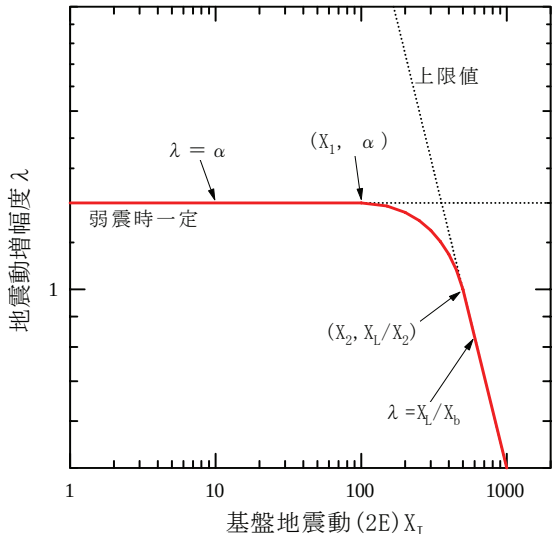


図 **3**　最大加速度増幅度モデル

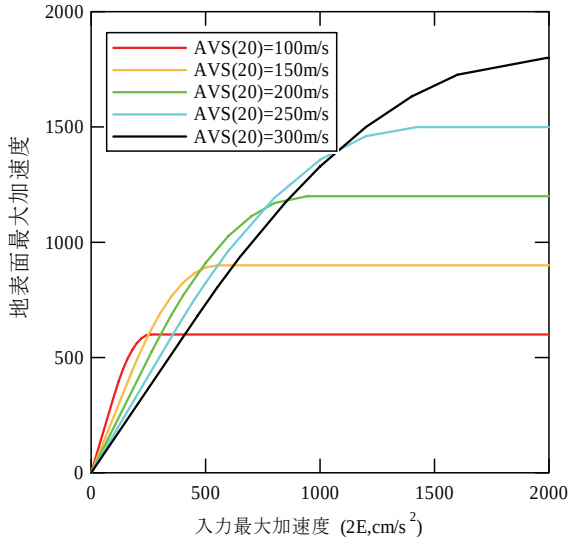


図 **4**　最大加速度に関する地盤の増幅関係

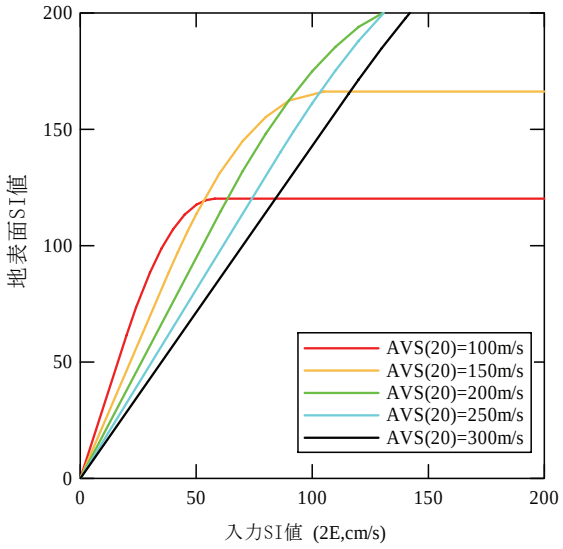


図 5　SI 値に関する地盤の増幅関係

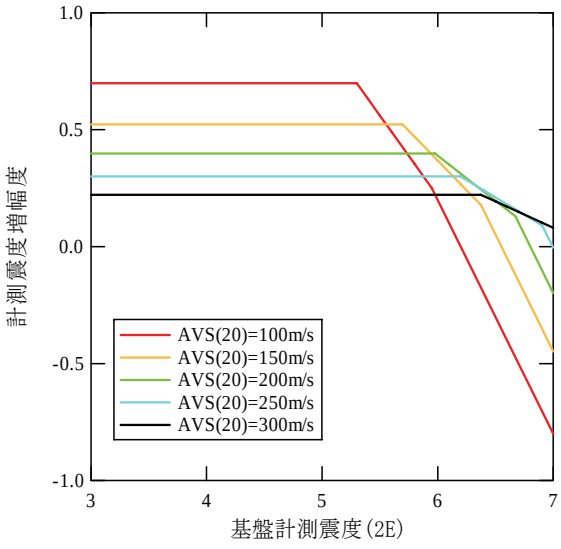


図 6　計測震度に関する地盤の増幅関係

2.4 液状化シミュレータ

液状化の危険性を推定する方法としては、液状化危険度指標P_L値（各土層の液状化強度を深さ方向に重みをつけて足し合わせた値、5以上だと液状化の可能性あり、15以上だとその危険性が高い）[1]を用いることが多いですが、P_L値の計算には、地盤の深さ方向の情報（土質、細粒分含有率、N値等）が必要であり、ボーリングデータ等が用いられます。現在、テストフィールドとした川崎市では約8,000本のボーリングによる地盤情報を収集整備しており、これらの地点でP_L値の計算が可能です。しかし、この計算には比較的時間がかかります。そのため、予め代表的なタイプの地震動について強度を段階的に変えてP_L値を計算したテーブルを作っておき、地震発生時に地震動に適合するP_L値をテーブルから検索し補間して求める方法をとりました。

(1) 事前P_L値テーブルの作成

震災総合シミュレーションシステムでは、地震発生後数分で地震動分布が推定されますが、この即時推定地震動分布を使ってP_L値の分布も即時推定することが望まれます。これに応えるためには、各50mメッシュ毎にP_L値を地震動強さの関数として事前にテーブル化しておくのが実用的です。そこで、以下の手順で地震動強さ毎のP_L値の事前整備を行いました。

①各地表面で地震動の強さが同じ値になるように調整しながら各ボーリング地点に地震動を与えP_L値を計算します。
②補間により、50mメッシュでP_L値分布を作成します。
③地表面地震動を徐々に増加させ、①～②を繰り返します。
④50mメッシュ毎に地震動強さ毎のP_L値をテーブルファイルとして整備します。

図**1**に地表面地震動を一律とした場合のP_L値分布を示します。ボーリング地点毎に求めたP_L値を50mメッシュに補間した結果です。左側がType I地震動（海洋型）を想定した場合、右側がType II地震動（内陸型）を想定した場合の結果です。図**2**は、各50mメッシュについて、地震動強さを横軸、P_L値を縦軸としてプロットした例です。これをテーブルファイルとした例を図**3**に示します。

(2) 即時P_L値推定シミュレータ

(1)の事前P_L値テーブルを用いて、地震動分布推定後、即座にP_L値分布を計算するシミュレータを作成しました。計算例として、図**4**の地震動分布を与えた時のP_L値分布を図**5**に、計算結果の一部を図**6**に示します。図**6**では、地震動強さとして、地表面加速度（Gal）を用いた場合と、SI値（Kine）を用いた場合の計算を行っています（SI値用の事前P_L値テーブルも作成している）。また、Type I地震動（海洋型）を想定した場合と、Type II地震動（内陸型）を想定した場合の各々について推定しています。実際には、震源の位置やマグニチュードの情報や地震動の周波数特性から、Type IかType IIか見極める必要があります。図**5**はType I地震動と見なした場合の結果です。

参考文献

1)岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田 進: 地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎, Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980

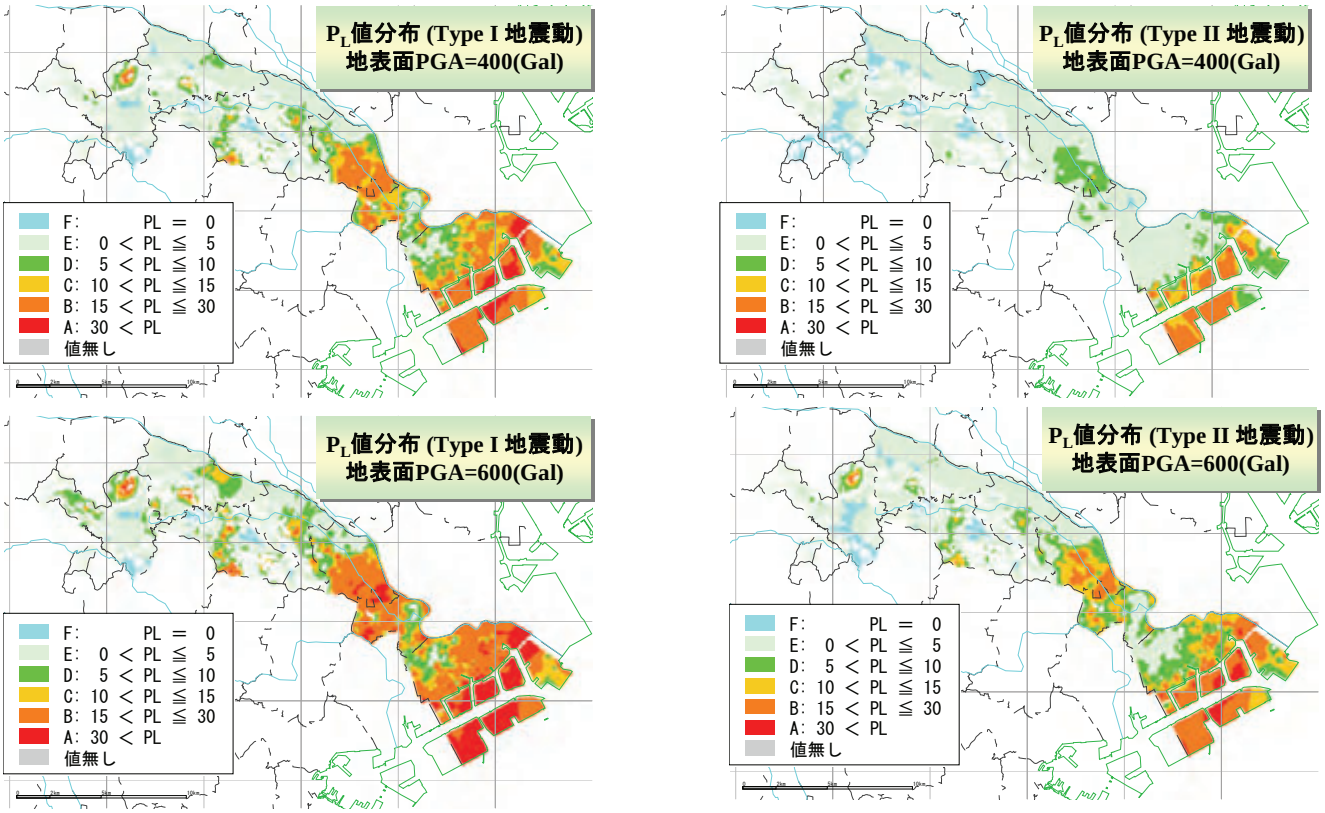


図 1 地表面地震動を一律とした場合の P_L 値分布 （図中の PGA は最大地盤加速度）

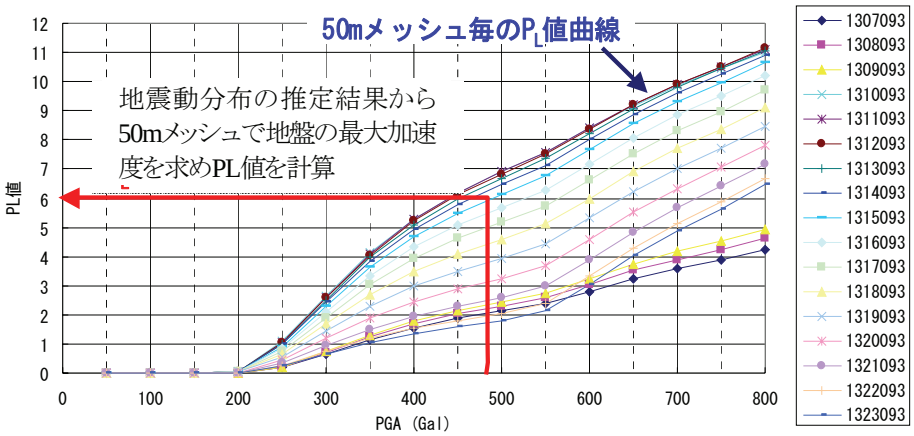


図2　50m メッシュ毎の地震動強さ増加に伴う P_L 値増加の例(Type I 地震動)

Microsoft Excel - pl_pre50m.csv

2	A #points	F meshCode	G t1-0.05	H t1-0.10	I t1-0.15	J t1-0.20	K t1-0.25	L t1-0.30	M t1-0.35	N t1-0.40	O t1-0.45	P t1-0.50	Q t1-0.55	R t1-0.60	S t1-0.65	T t1-0.70	U t1-0.75	V t1-0.80	W t2-0.05	X t2-0.10
1528	-43675:-32275	1310045	0	0	0	0	0.012	0.411	1.398	2.33	3.424	4.388	5.181	5.851	6.568	7.435	8.195	8.864	0	0
1529	-43625:-32275	1311045	0	0	0	0	0.011	0.381	1.358	2.292	3.41	4.4	5.214	5.901	6.643	7.547	8.338	9.035	0	0
1530	-43575:-32275	1312045	0	0	0	0	0.01	0.354	1.33	2.278	3.428	4.449	5.288	5.986	6.742	7.661	8.451	9.148	0	0
1531	-43525:-32275	1313045	0	0	0	0	0.009	0.328	1.287	2.202	3.321	4.319	5.141	5.823	6.573	7.498	8.293	8.995	0	0
1532	-43475:-32275	1314045	0	0	0	0	0.009	0.306	1.249	2.156	3.28	4.285	5.111	5.798	6.556	7.495	8.302	9.016	0	0
1533	-43425:-32275	1315045	0	0	0	0	0.008	0.289	1.217	2.116	3.239	4.245	5.072	5.76	6.521	7.467	8.28	8.999	0	0
1534	-43375:-32275	1316045	0	0	0	0	0.008	0.277	1.19	2.08	3.196	4.198	5.021	5.705	6.464	7.408	8.22	8.938	0	0
1535	-43325:-32275	1317045	0	0	0	0	0.008	0.269	1.168	2.046	3.15	4.14	4.955	5.631	6.382	7.317	8.121	8.832	0	0
1536	-43275:-32275	1318045	0	0	0	0	0.007	0.265	1.149	2.013	3.098	4.071	4.871	5.536	6.274	7.192	7.981	8.68	0	0

pl_pre50m

図3　地震動毎の事前 P_L 値整備データ(テーブルファイル)

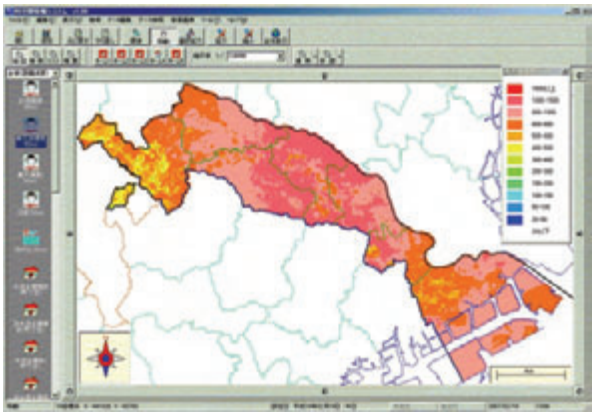


図4　計算例として与えた地震動分布(地表面最大加速度分布

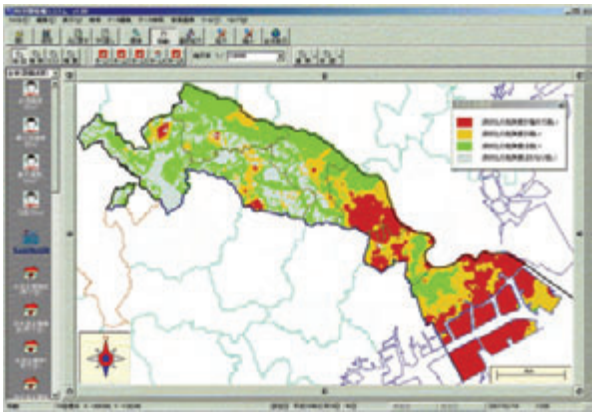


図5　即時 P_L 値分布推定結果の分布表示例(Type I 地震動の例)

Microsoft Excel - pl50m.csv

2	A #points	F pga	G si	H ij	I t1pga	J t2pga	K t1si	L t2si	M t1ij	N t2ij	O
1528	-43675:-32275	585.68	62.608	5.572	5.819	1.308	5.667	1.056	2.377	0.023	
1529	-43625:-32275	615.72	65.869	5.605	6.321	1.561	6.299	1.466	2.678	0.04	
1530	-43575:-32275	636.55	68.329	5.623	6.735	1.729	7.267	1.831	2.96	0.055	
1531	-43525:-32275	598.75	63.993	5.588	5.988	1.211	6.445	1.323	2.627	0.034	
1532	-43475:-32275	598.65	63.983	5.588	5.963	1.145	6.427	1.341	2.629	0.036	
1533	-43425:-32275	613.64	65.633	5.606	6.158	1.268	6.714	1.563	2.758	0.048	
1534	-43375:-32275	596.05	63.704	5.585	5.83	1.028	6.328	1.359	2.612	0.04	
1535	-43325:-32275	583.27	62.363	5.572	5.566	0.884	6.043	1.226	2.507	0.033	
1536	-43275:-32275	572.91	61.306	5.562	5.331	0.811	5.799	1.126	2.417	0.027	

pl50m

図6　P_L 値推定結果データの例(テーブルファイル)

2.5 建物個別被害シミュレータ

これまでの地震災害推定システムは小学校の校区程度の地域内で被害を受ける建物の割合を示すものがほとんどで、個々の建物の被害を推定するものはありません。しかし、街の防災化計画の立案や身近なリスクに基づいた住民の啓発には個々の街区、個々の建物の被害推定があると効果的です。また、発災直後の被災家屋の推定や家屋倒壊による道路閉塞の推定と避難経路の設定には、建物の被害を個別に推定できることが必要です。

そのため、耐震設計に用いられる限界耐力法をベースにした建物個別被害シミュレータを開発し、詳細推定法としてシステムに導入しました。この手法は、入力地震動として応答スペクトルを用いているので、地震動および建物の周期特性を考慮できる特徴があります。必要なデータは、自治体が用意できる建物の階数（高さ）、構造材料（木造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造）、築年に限りました。

(1) 限界耐力法

図**1**、**2**に示すように横軸に地震動から求められる変位応答スペクトルS_d、縦軸に加速度応答スペクトルS_aをとり、複数の減衰定数に対する応答スペクトルを計算してS_a-S_d曲線を図化しておきます。ωを角振動数とすると$S_a=\omega^2\times S_d$ であるので、原点を通る直線の傾きがω^2となります。建物を1つの質点でモデル化すると質点の質量に加速度S_aをかけた値が地震応答によって建物に作用する力を表します。S_dはその力が作用している時の変位応答ですから、S_a-S_d図は建物の構造特性から決まる荷重-変形関係図と同等で、正規化すれば重ね書きができます。荷重-変形関係曲線は建物の構造モデルに水平荷重かけて変形を計算することにより求められます。交番荷重をかければ履歴曲線の面積から等価の減衰定数が求められます。

実際に応答を求める際は、減衰定数の値がS_dによって変わりますので、S_dを仮定して減衰定数を求め、その減衰定数に対応するS_a-S_d曲線と荷重-変形関係曲線との交点を求めます。その交点のS_dが仮定したS_dに収束すれば答えが求められたことになります。

(2) 建物の被害判定

応答変位が求まると最大層間変形角を計算し、その大きさで建物の被害判定を行います。計算された最大層間変形角を、木造建物およびRC造建物については高井・岡田の分類（1999）、鉄骨造建物については桑村らの分類（2001）を用いてランク付けし、そのランク（DG値）に応じて各建物の被害判定を行うことにしました。（図**3**）。

(3) モデルの構築

建物の降伏ベースシア係数Cy（建物最下層の降伏強度を建物の重量で割ったもの）と被害（DG値）に対応する限界層間変形角を定める必要があります。厳密には、設計図等から評価される量ですが、そのような情報をすべての建物についても得ることは不可能です。ここでは、構造材料、築年、階数のみをパラメータとし、1995年兵庫県南部地震における建物被害と整合するようにモデルを定めました。

非木造（RC造、鉄骨造）建物のC_y

H_f：階数の関数として、次式で与える。

1981年以前：$c_y = 1.848 / H_f^{0.7718}$　　[1]

1982年以降：$c_y = 2.789 / H_f^{0.836}$　　[2]

表**1**　木造建物のC_y

1950年以前	0.1
1951～1970年	0.3
1971～1981年	0.4
1982年以降	0.6

表**2**　RC造建物の層間変形角とDG値の関係

	1971 年 以前	1972 ～ 1981 年	1982 年 以降
DG1	1/130	1/130	1/120
DG2	1/100	1/100	1/90
DG3	1/70	1/65	1/65
DG4	1/40	1/35	1/30
DG5	1/30	1/30	1/20

表**3**　鉄骨造建物の層間変形角とDG値の関係

	1981年以前	1982年以降
DG2	1/150	1/150
DG3	1/100	1/100
DG4	1/50	1/40
DG5	1/40	1/30

表**4**　木造建物の層間変形角とDG値の関係

	1950 年 以前	1951～ 1970年	1971～ 1981年	1982 年 以降
DG1	1/120	1/120	1/120	1/120
DG2	1/90	1/90	1/90	1/80
DG3	1/50	1/45	1/45	1/30
DG4	1/40	1/30	1/30	1/15
DG5	1/10	1/10	1/10	1/10

(4) バラツキの考慮

当然ながら、同年に建てられた木造住宅であっても壁の配置等が異なれば建物強度は異なります。したがって、降伏ベースシア係数Cyの評価においては、バラツキが対数正規分布に従うものとして、降伏ベースシア係数の中央値と対数標準偏差を定めることにしました。対数標準偏差のデフォルト値は0.4としました。

実際に個別建物について評価する際には、中央値と

対数標準偏差から乱数により各建物のCyを生成します。道路閉塞シミュレーションとセットでモンテカルロ・シミュレーションを行い道路閉塞確率を評価することができます。

一方、建物の危険度評価だけを目的とするのであれば、モンテカルロ・シミュレーションを行わずとも、ある地震動条件下での全壊確率があればよいことになります。ある地震動に対する個別建物の最大層間変形角が R になるときに建物被害が発生する確率 $P(R)$ は、標準正規分布の累積確率 $\Phi(R)$ を用いて、対数正規分布で表せると仮定しました. 標準偏差ですが、まず木造建物の場合、同じ構造（建築条件）でも一棟一棟のばらつきが比較的生じやすいと考えられるので、0.4としました。RC造建物と鉄骨造建物の場合は0.8としました。

(5) 検証

兵庫県南部地震における西宮市と神戸市の被害データ、ならびに新潟県中越地震の一部の被害と比較・検証しました。新潟県中越地震でも大きな地震動が観測されましたが、被害は兵庫県南部地震に比べ小さい傾向にあります。本手法で評価すると、短周期成分が卓越するK-NET十日町の記録ではほとんど被害がでません。一方、JMA小千谷の記録では周囲の民家の被害が少なかったにもかかわらず兵庫県南部地震の震度Ⅶ地域と同程度の被害となり、過大評価となりました。中越地方は雪国であることから、西宮市・神戸市に比べ建物の強度が高いものと考えられます。

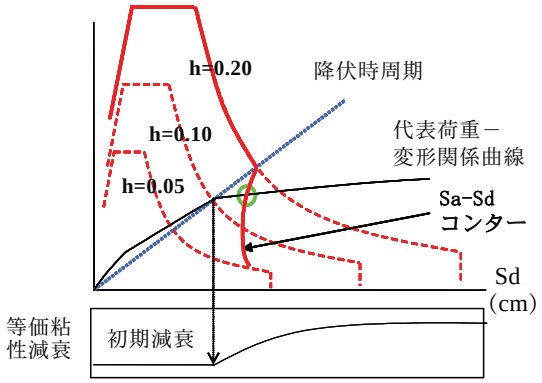


図 **1**　Sa-Sd コンターと応答変位点

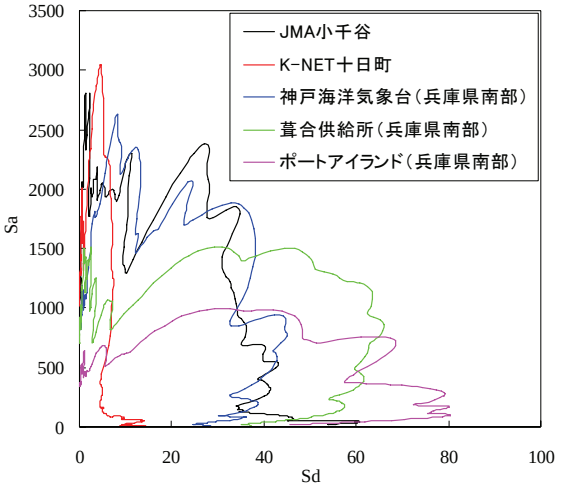


図 **2**　入力地震動の Sa-Sd コンターの比較

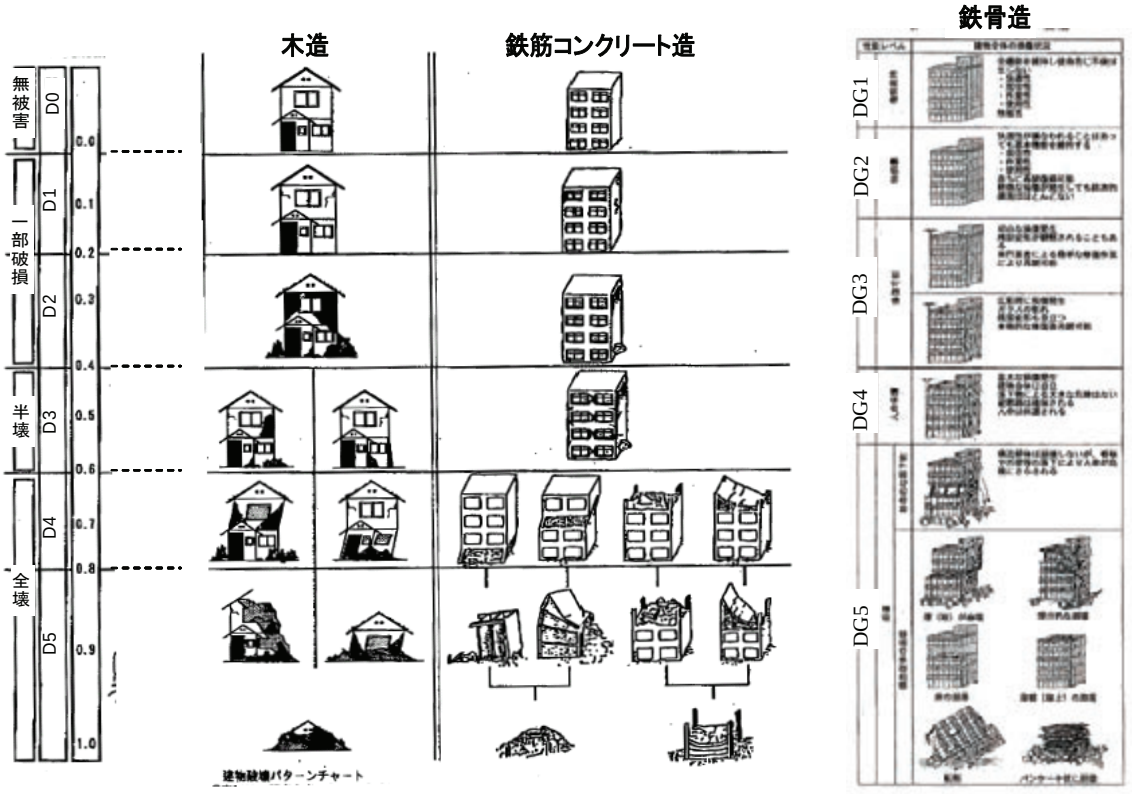


図 **3**　建物構造別の破壊パターンと被害判定

2.6 道路閉塞シミュレータ

震災時に発生する道路閉塞は救急救命や消火活動に影響する重要課題です。この研究開発は建物倒壊による道路閉塞を市街地の詳細なデータを基にシミュレーションしようとするものです。このシミュレーションにより，街のどの箇所で道路閉塞が起こりやすいかを知って事前に対策を講じることや，発災直後の緊急対応戦略の意志決定，より安全な避難ルートの選択などが可能となります。

この研究では，既往技術に沿って個々の建物被害の状況から道路閉塞を予測するアプローチを踏襲しましたが，瓦礫流出モデルや閉塞判定モデルを新たに開発し、震災総合シミュレーションシステムにプラグインしました。

(1) 大地震時の瓦礫流出状況のデータベース化と分析

瓦礫流出モデルの開発には、過去の大震災の記録から建物1棟ごとの倒壊状況と瓦礫流出状況を分析しておく必要が有りますが、瓦礫の流出状況を詳細に調査したデータは有りませんでした。そのため、兵庫県南部地震の時の神戸市灘区および東灘区（約63km^2）の瓦礫流出データを作成しました。作業の内容は以下の通りです。

・民間航空測量会社が発災直後に撮影した空中写真を基に，平面地図と同等になるように正射投影したデジタルオルソフォト（無限遠からみたと同等の写真）を作成
・目視判読で瓦礫流出範囲を特定しGIS上に図化(図**1**)
・日本建築学会・日本都市計画学会と旧建設省建築研究所による建物被災データと瓦礫流出図形の関連づけ

瓦礫面積と建物面積の関係を図**2**に示します。きれいな正比例の関係にあることが分かります。

(2) シミュレーションに必要な要素技術の開発

1)瓦礫流出モデル　市川等による既往研究を参考に、建物の周囲に瓦礫幅相当のバッファーを生成することで瓦礫流出範囲としました。ただしバッファーを用いるということは、建物の周囲に均等に瓦礫が発生することを仮定したことになります。実際の瓦礫流出状況のデータでは、建物の周囲に均等に瓦礫が発生していることは希であるため、影響を過大評価することになります。このため、瓦礫流出データを参考に、瓦礫流出方向を加味したモデルの開発も併せて行いました。すなわち、建物瓦礫方向の最大距離ベクトルを建物各辺の放線方向に投影してバッファー幅とし、投影値がマイナスなどになる場合はあらかじめ設定した最小バッファー幅を取るようにしました。

2)道路閉塞判定手法　瓦礫流出モデルによって生成された瓦礫流出範囲が道路の通行にどの程度の支障を及ぼすか判定が必要です。特に防災対策上は道路が塞がった場所と程度を道路1本ごとに求めることが必要です。

この研究では，道路ポリゴン（ポリゴンとは一筆書きの図形のこと）から瓦礫流出によって覆われた部分を削除した図形（以下，これを非閉塞道路ポリゴンと呼ぶ）に着目して次の2つの手法を開発しました。

・詳細道路閉塞判定手法

非閉塞道路ポリゴン上で通行可能幅を求め、通行必要幅との比較により通行可能／不可能を判定します。計算量が道路データの総延長と道路直行方向に通行可能幅を計算するラインの細分間隔によって決まるため，時間がかかります。

・簡易道路閉塞判定手法（図**3**）

震災総合シミュレーションシステムでは，100万都市を対象に発災後30分以内に閉塞状況を推定することを目標としたため、計算時間の短縮が優先されます。そのため，市川らによる研究を参考に，道路ポリゴンに対する非閉塞道路ポリゴンの個数によって閉塞状況を判定する手法を採用しました。すなわち、一続きの道路ポリゴンが2個以上の非閉塞道路ポリゴンに分かれていれば閉塞と判定する方法です。この方法では道路データの数（リンク数とノード数の合計）で計算時間が決まるため，短時間でリンク単位の閉塞／非閉塞判定が可能になります。

(3) 道路閉塞シミュレーションシステムの構築

この研究で開発した閉塞判定手法は，市街地の詳細な図形データを使って幾何演算する箇所が多数あります。そのため、開発の初期段階では幾何演算の基本的なライブラリが備わっている市販GISを使った開発を行いましたが、震災総合シミュレーションシステムと連携させる段階では幾何演算ライブラリを独自に準備し、市販GISエンジンに依存しないシステムとしました。これによりシステムの汎用性が増すと共に幾何演算部分の高速化が実現しました。また、システムが発災後の情報空白期においても活用されるようにするためには短時間でシミュレーションを終える必要があるため、震災総合シミュレーションシステムには，流出方向を考慮しない瓦礫流出モデルと簡易道路閉塞判定手法をプラグインしました。

入力データは建物個別の倒壊状況、建物用途、地上階数、道路ネットワークデータ、並びに道路ポリゴンです。道路ポリゴンは、都市計画GISや国土地理院数値地図2500の街区データなどから抽出出来ますが、これを道路部分と交差点部分に分割する前処理が必要です。

(4) 計算例

開発したシステムにより，テストフィールドとした川崎市街地データ（3km×4km）について計算した例を図**4**に示します。CPU：Xeon 2.8GHz Dual、メモリー2Mの計算機で、道路リンクごとの閉塞の状況を76秒で計算しています。

(5) まとめ

開発したシミュレータの入力データはいずれも自治体などで用いられているGISデータから作成できます。今後は防災に強いまちづくりを支援する事前予測業務への適用や、震災時の復旧復興の迅速化を図るための瓦礫撤去作業支援システムへの組み込みなどが考えられます。

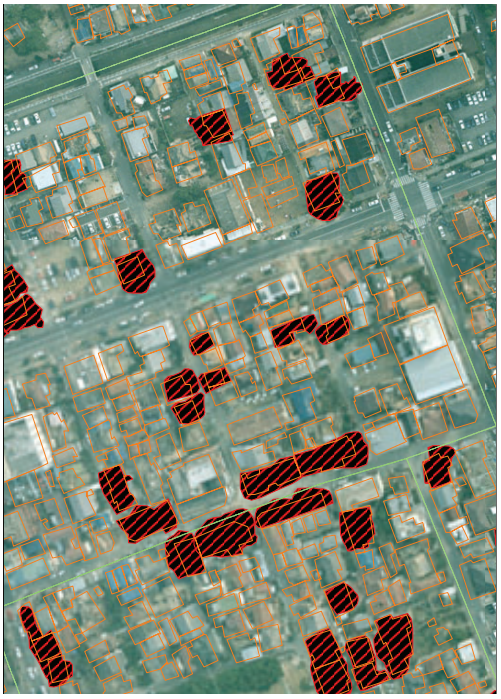


図**1**　瓦礫判読結果（赤線部分）

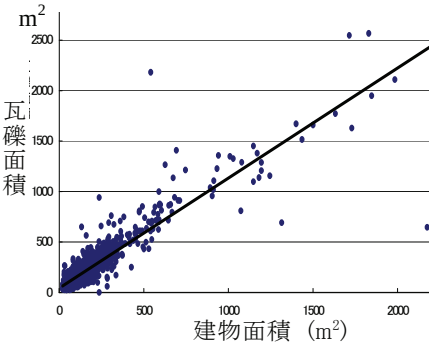


図 **2**　瓦礫面積と建物面積の関係

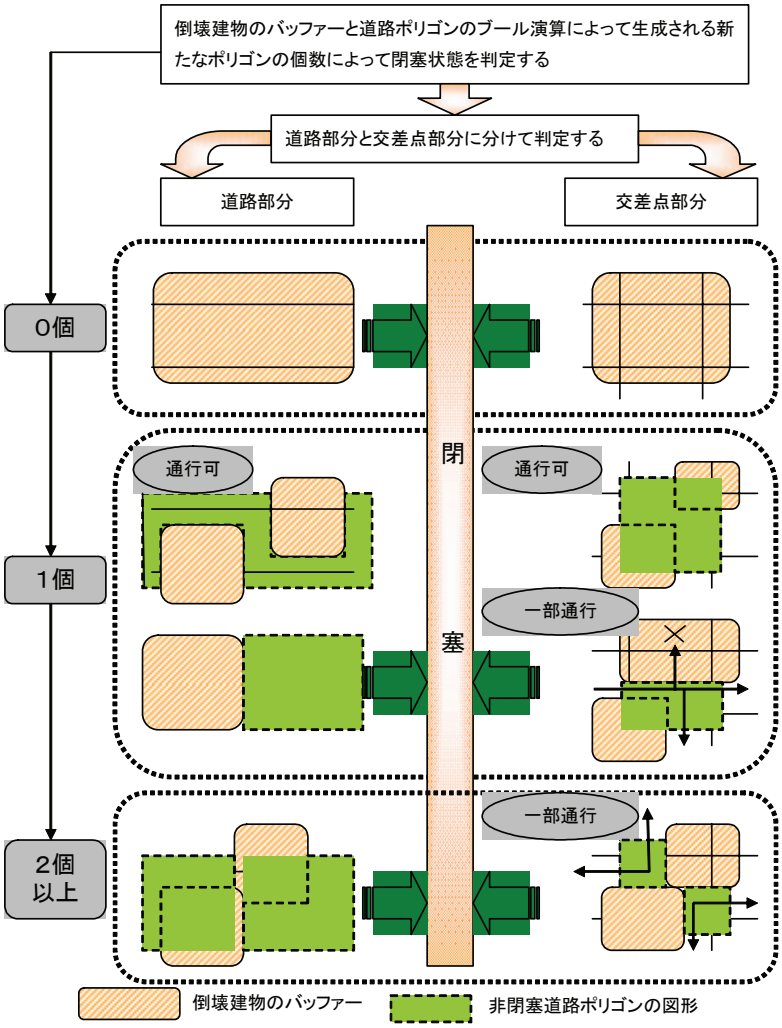


図**3**　簡易道路閉塞判定手法

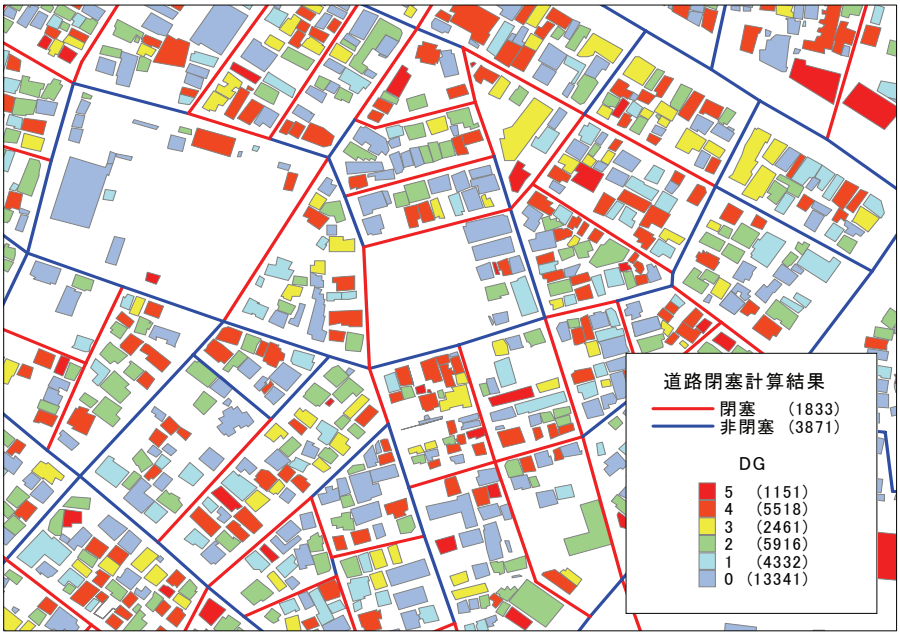


図 **4**　結果表示例（対象地域の一部を拡大）

2.7 火災延焼シミュレータ

大都市に数多く存在する木造密集市街地では、大地震直後に同時多発火災が発生し、消防力が対応できなくなる恐れがあります。この研究では、市街地火災の延焼について、火災風洞実験と数値解析を繰り返し実施し、火災旋風の発生条件や火の粉による飛び火現象の解明に努めました。そして市街地火災の延焼モデルを構築し、震災総合シミュレーションシステムに組み込みました。この延焼モデルは、火災に対する放水の影響を考慮できるので消防隊や住民による消火活動の効果を評価することができます。一方、物理現象に基づくモデルを使いながら計算は簡素化を図り、被害推定サブシステムの中の種々の災害予測・対応シミュレータと時系列に連携しながらリアルタイムに火災延焼を予測出来るようにしました。

(1) 有風下火炎モデル

延焼シミュレーションには有風下の火炎モデルが必要です。建築研究所の火災風洞を用いて有風下の火災実験を実施しました。写真**1**、**2**がその代表例で、実験結果を整理したものが図**1**です。防火木造建築で屋根が抜け落ち、開口噴出火炎と屋根噴出火炎が合わさった状態を示しています。炎は風速の増加とともに風下に傾斜していきますが、その長さは風速にかかわらずほぼ同じです。火災が盛期になっても天井が抜け落ちない開口噴出火炎のみの場合も同じ傾向でした。無風時の開口噴出火炎の長さについては実験結果から定式化し、屋根燃え抜け後や裸木造の火災の火炎長さについては既往の式から定式化しました。そして風による火炎の傾斜を実験結果から定式化し、モデルに組み込みました。

(2) 火の粉による飛び火

火の粉の跳躍延焼、いわゆる飛び火については、実験的検討（写真**3**）と数値解析的検討（図**2**）を基に解析モデルの構築を行いましたが、計算時間がかかるため、リアルタイム予測には適用できません。そのため、火の粉による飛び火を、風下側の延焼速度が速くなるモデルで表現することにしました。すなわち、

- 火炎の風下の受熱量を風上にくらべ増加させることにより着火までの時間を短縮、火災の伝播を早める。
- 対象とする風下の着火判定点は風下に向かう火炎軸の±15度以内とする。±15度の飛散角度は過去の実例・実験・シミュレーション等から得られた知見である。
- 受熱の割増し量は火炎からの距離もパラメータとする。

(3) 火災旋風の発生条件

火災旋風は炎の竜巻であり、火の粉と強風をもたらしながら一瞬にして周辺を火の海にします。関東大震災では旧陸軍被服廠跡空地でも発生し、避難していた4万人の大半が犠牲になりました。これ以外にも東京と横浜で大小130個の発生が記録されており、火源と風の条件が揃えば容易に発生すると考えられます。しかし、これまでの火災旋風の研究はその発生条件や発生プロセスの解明に至っていません。この研究では、旧陸軍被服廠跡空地の幾何学的状況を概略再現した模型実験で（写真**4**、**5**）、火災旋風が発生することを確認しました。一方、火災旋風の発生を差分方程式でシミュレーションすると、非常に大きな計算負荷が発生し、リアルタイムシミュレーションは不可能です。そこで、「火災旋風が発生し得る条件」を下記のように設定し、その条件を満たした場合に警報を出す機能を延焼シミュレータに組み込みました。

- 風速3～5m/s
- 全ての地域を監視することは計算負荷上好ましくないため、火災旋風が発生すると特に甚大な被害が生じる広域避難場所を対象とする。
- 火災旋風につながる火災の広がりを監視する範囲を広域避難場所の風上側で避難場所と同面積の範囲とする。
- そして、火災中の建物がその範囲内の80％を超えた場合に火災旋風発生の可能性ありとする（図**3**）。

(4) 火災に対する放水の影響

震災総合シミュレーションシステムは、消火活動をエージェントシミュレーションによって表現出来ます。消火活動の効果を評価するためには、火災に対する放水の影響のモデル化が必要です。この研究では、火災統計より得られる焼失面積と消火に要した放水量の関係を整理して次のようにモデル化しました。すなわち、

焼失床面積(㎡)×【係数】＜放水量(㎥)

この方法によれば、火災の初期でまだ焼失床面積が小さい時には盛期火災になった時に比べて少ない放水量で消火できることを表現でき、初期消火の効果を評価できます。焼失面積はそれまでに焼失した可燃物重量と残っている可燃物重量の割合から求めるようにしました。

(5) 震災総合シミュレーションシステムへの組み込み

延焼シミュレーションモデルはまず起動時に被害推定サブシステムから建物群の幾何学的情報と可燃物重量を取得します。時系列のシミュレーションが始まると、風向・風速、出火状況、放水量を取得し、放水の影響を取り入れた延焼計算を行って、個々の建物の火災の進行状況を被害推定サブシステムに返します。同時に、火災の進行状況をモニターし、消火より避難を優先すべき警報および広域避難所に対する火災旋風発生の危険性の警報を必要に応じて出力します。

(6) まとめ

被害推定サブシステム上で時系列の動作を確認し、リアルタイムシミュレーションが可能な速度のレベルであることを確認しました。火の粉による飛び火のモデル化など、高速化のため簡易化されている部分の精緻化は今後の課題です。

写真**1**　無風時火炎

写真**2**　有風時火炎

写真**3**　火の粉飛散の実験の様子

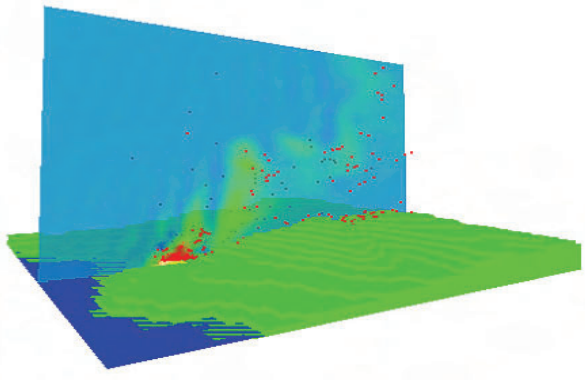


図**2**　火の粉飛散の数値予測

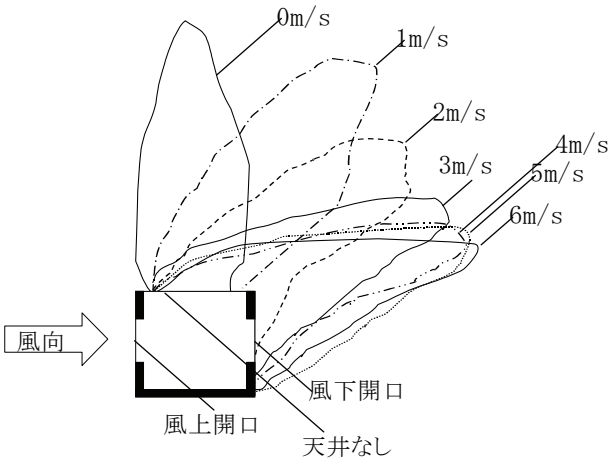


図**1**　風速と火炎の傾き

写真**4**　火炎が小渦に誘引される様子

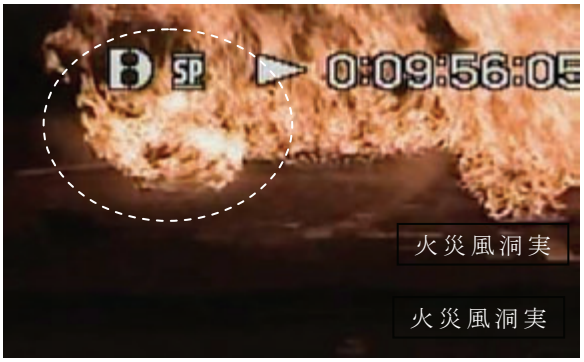


写真**5**　火災旋風の生成

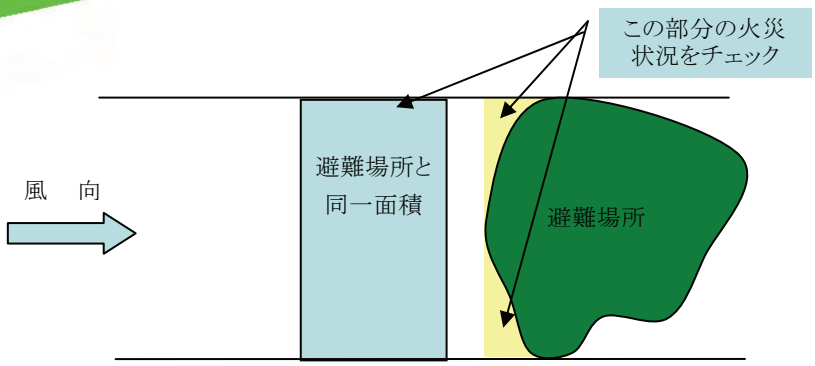


図**3**　火災旋風の発生の可能性チェック

2.8 拡散・火災・爆発を考慮した化学プラント災害シミュレータ

爆発引火の危険性の高い大型タンクが密集している化学プラントでは、地震発生時にプラント自体が被災するだけでなく、周辺に2次災害を及ぼす危険性が高くなります。それゆえ、周辺地域に影響を及ぼす気体拡散や火災延焼の規模と持続時間をパソコン上でシミュレーションするシステムを開発しました。このシステムには時刻歴で風向・風速変動の影響を取り入れリアルタイムにシミュレーションする機能も開発し、震災総合シミュレーションシステムに結合しました。

タンク火災の延焼や消火の効果、気象条件の変化等を時刻歴で、かつGISと連動させて総括的に扱ったプラント災害シミュレーションは他に存在しません。このシステムは日常から化学プラントの安全性向上を支援し、災害時には安全かつ効率的な避難誘導を支援する有力なツールとなります。

(1) 本研究開発の特徴

1)災害が発生した際の危険範囲を体系的に解析

プラント災害を図**1**のようにタンク内容物が液体か気体かにより4つ(流出・拡散、爆発、プール火災(液面火災)、ファイヤーボール(タンク内容物の漏洩により生じた可燃性蒸気雲の爆発的着火))に分類しています。プラント災害で重要なのは①有毒性物質や火災・爆発の主原因となるタンク内容物の流出・拡散による拡散濃度の評価と、②着火した際に生じる火災、爆発によるふく射熱や爆風圧の評価です。化学プラントを対象にしてこのような評価を行う場合、我が国では通常、高圧ガス保安協会のコンビナート保安・防災指針(KHK E 007- 1974)が用いられており、本研究でもその手法に準拠しました。ただし、この手法で不足する点については独自のモデルや定量式を開発して組み入れています。

2) 災害の連鎖による危険性(ドミノ効果)を評価

図**2**に示すように、タンク火災が周囲のタンクに及ぼす熱力学的影響の評価手法を構築しました。具体的には、火災からのふく射熱を基に、隣接タンク群の内部温度ならびに圧力上昇を計算します。圧力上昇によるタンク破壊、または温度上昇による内部発火などの二次延焼を時刻歴で判定し、タンク延焼の連鎖(ドミノ効果)を推定します。

また、タンク内容物の流出・蒸発・拡散災害に関して、本研究では流出モードを図**3**に示す3つに分類し、流出・蒸発・拡散の各現象を連続した事象として扱える気体拡散シミュレータを開発しています。すなわち、微小漏洩と大破流出の中間を多頻度・多影響の小破流出と定義し、フラッシュ蒸発(減圧し暖かいものに接触することにより瞬間的に発生する蒸発)による気化と、防液堤内での入熱による蒸発との併発を定量的に解析する手法を展開しました。

3) 消火による減災効果の評価

プラント内のタンクにはスプリンクラーの設置による安全策が施されています。そこで、火災周囲のタンクにスプリンクラーを作動させた場合の水の気化熱がタンク表面の温度上昇を抑制する効果と、スプリンクラーの水噴霧カーテンによるふく射熱の低減効果を取り入れました。さらに、スプリンクラーのみならず、消防車の放水による効果も評価可能としました。

また、プラント内に供給される消火水量は有限であるため、延焼してしまうまでの時間を最大限延長し得る冷却水量の配分を計算するアルゴリズムを開発し、付加しました。

4) ふく射熱遮断領域の評価

実在のプラントでは、他のタンクや施設に遮られふく射熱を受けない領域が存在します。そこで、図**5**のように火災を円筒形でモデル化し、ふく射熱を離散的な放射光子の集合体とみなして、受熱面に到達する光子の総量をモンテカルロ法で評価し、受熱量を計算出来るようにしました。

5) 風向・風速変動下での評価

火災からのふく射熱や流出気体の拡散濃度の評価を従来の高圧ガス保安協会の方法は一定の風向・風速下で行っています。これを風向・風速の変動の影響をリアルタイムに取り入れて評価できるようにするため、タンク火災に関しては風速・風向に応じて変動する火炎円筒傾斜モデルを適用して隣接タンクの温度上昇や人体危険熱範囲の拡大を評価するようにしました。また、気体拡散に関しては、気体発生源が見かけ上、風向・風速に従って移動するアルゴリズムを用い、風向・風速変動下での気体拡散域の時刻歴評価を可能としました。

6) 震災総合シミュレーションシステムのGISとの連動

GISから評価対象となる領域のデータを取り込み、結果をGISに返し、熱影響範囲や危険濃度範囲等を表示します。シミュレーションで用いるデータファイルは全てCSV形式です。タンク内容物の物性値等は外部データファイルを参照し、利用者側が用意するデータは、対象とするプラントのデータ(タンク位置や形状、内容物種類など)など最小限に留めました。

(2) シミュレータの適用例

1) タンク火災・延焼・消火シミュレーション

図**5**中に示す円筒型原油タンクから初期火災が発生した場合を想定し、風向・風速の変動を考慮した解析を実施しました。火災発生後120分の隣接タンクの被災状況を色に分けて表示しています。タンクを中心に描かれた円は人体に及ぼす熱危険範囲です。同じく、図**5**には隣接タンクにスプリンクラー冷却を行った際のシミュレーションを示しています。120分後にタンク火災は一次災害のみに抑制されていることが判ります。

2) タンク内容物の気体拡散シミュレーション

図**5**中に示すLPGタンクよりプロピレンが漏洩し、フラッシュ蒸発による気化と、防液堤内での入熱による蒸発が併発する状況(小破流出)を想定し解析しました。風向・風速は時刻歴に変動するものとしました。図中に流出後 7分の拡散状況を示します。200ppm以上となる拡散範囲をGIS上に表示したもので、西方向へ拡散した気体は、その後の風向・風速変化により西方向の塊を維持しながら西北西へ遷移しています。

3) 本シミュレーションの検証

本研究において開発したシミュレーションと、市販ソルバーの結果を比較し、良好な一致を確認しました。さらに、米国のプラントを対象に例解析も実施し、簡易にプラント災害による影響範囲を推定可能であることを実証しました。

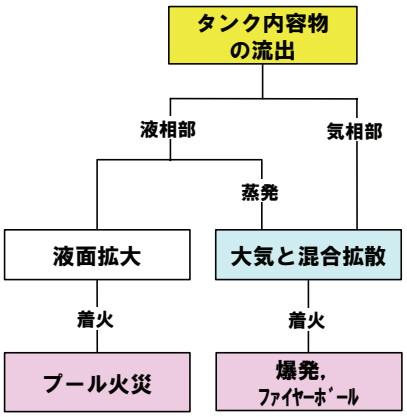


図 1　プラント災害の分類

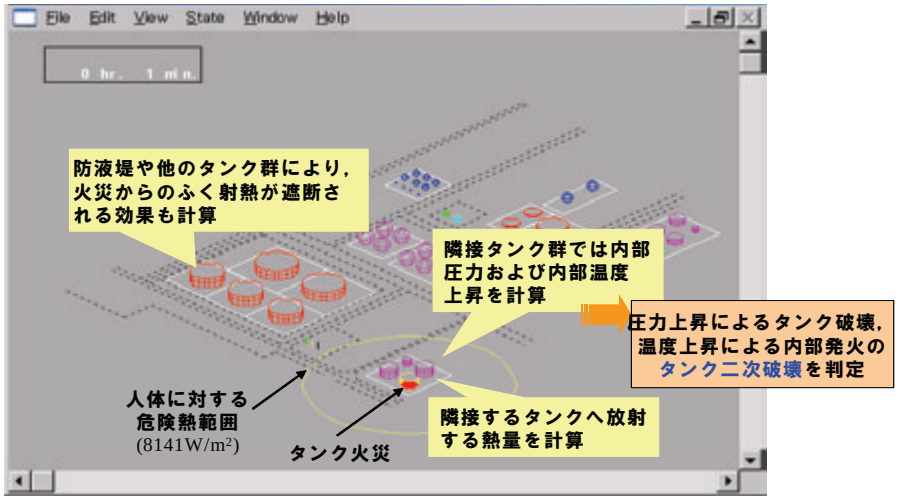


図 2　タンク火災・延焼の評価

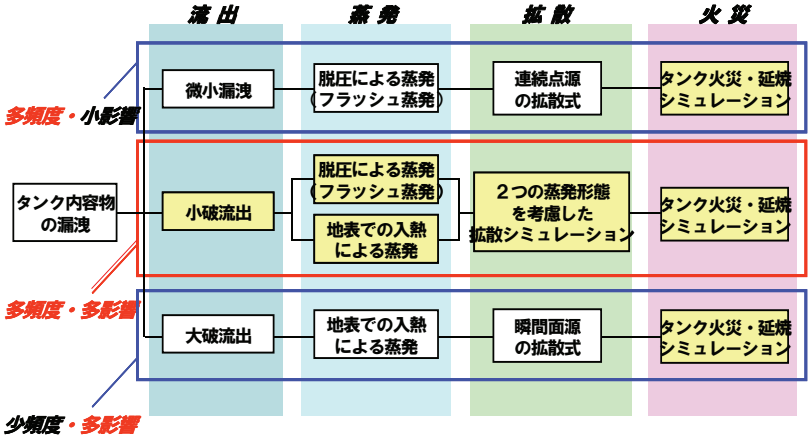


図 3　流失・蒸発・拡散の連成を考慮した災害分類

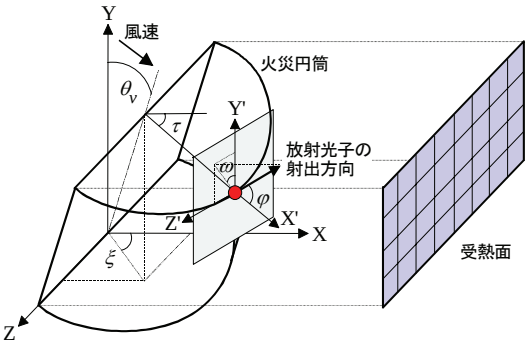


図 4 火炎円筒・放射光子によるふく射受熱評価

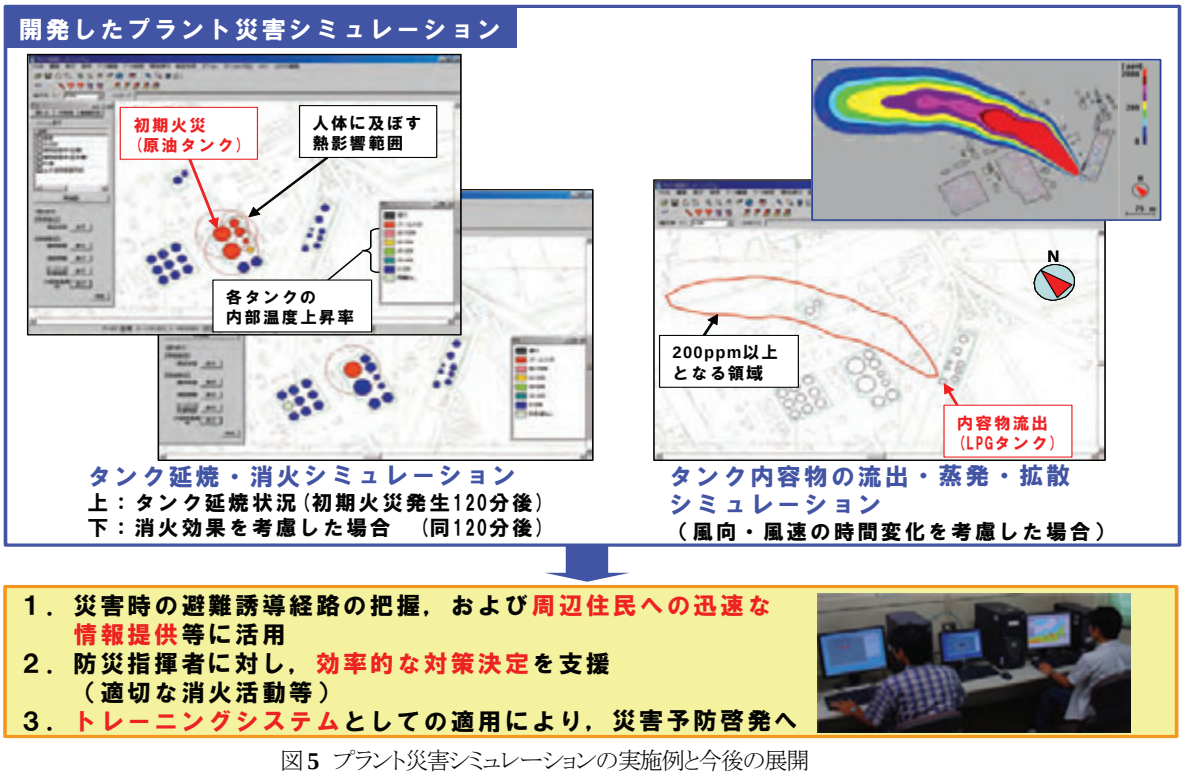


図 5　プラント災害シミュレーションの実施例と今後の展開

3. 実被害情報収集サブシステム

災害発生直後は現場からの被害情報の収集が困難なため初動期には災害推定サブシステムを活用した災害対応が進められます。しかし、実際の被害情報が入手されるようになり、情報が錯綜する中で救助、消火、道路啓開などの災害対応行動を効率的に実施するためには、実被害情報収集サブシステムが必要になります。この実被害情報収集サブシステムの研究開発については、災害現場の特殊性を考慮したモニタリング技術の開発と、収集された画像情報を災害対応に活かす画像処理技術の開発を主としました。高度なセンシング技術や通信技術の研究開発は、その分野を専門領域とする研究者やメーカの研究開発に期待しています。また、収集された情報を共有し減災に活用する技術の開発は科学技術振興調整費「危機管理対応情報共有技術による減災対策」を平行して実施し、連携を図りました。

3.1 簡便な空撮モニタリングシステムの開発

広域な空撮画像は被害分布を一気に把握するのに非常に有効ですが、現状では航空・衛星画像の詳細データが手元に届くまでに地震発生後数時間から数日を要します。情報の遅延は災害発生直後の救助活動の障害となることから、本業務では、発災後短時間で自治体職員が自らの手で空撮画像を取得できる観測系の開発を行いました。具体的には、バルーン観測系と、全天候型高所移動観測系を構築しました。

(1) バルーン観測系の構築

自治体対策本部近傍や防災拠点近傍の被害状況を発災後30分程度で把握する目的で、①高度を容易に確保可能、②小型軽量、③小電力、④低コスト、⑤安全かつ特別な操作技術不要、という条件をみたすバルーン観測システムを開発しました。本システムの全体概要図を図**1**に示します。バルーン系と計測系で構成され、バルーン系は、バルーン（ポリエチレンラミネート製、容量1,470ℓ、自重522gf、浮力1,592gf）を2台の電動リール（空巻速度140m/min、最大巻上力47.8kgf、バッテリー使用）でコントロールすることで高度調整を行います。バルーンの容量1,470ℓは、観測系の携帯性を考慮して小型ヘリウムガスボンベの容量（1,500ℓ）を超過しないように設計した結果です。また、作成したバルーンは、風の影響を軽減することを目的に、風を受けると浮力が得られるようバルーンの上面円弧曲率が下面円弧曲率より大きくなるように設計しています。制御系を搭載したカートの総重量は小型ヘリウムガスボンベを含み31.1kgfです。

本システムは、災害時に使われる物ですから、電源は太陽電池パネルによっています。計測系には、動画通信ユニット（68万画素 1/3”CCD、重量246gf、1.2GHzマイクロ波通信）および静止画撮影ユニット（310万画素 1/3.2”CCD、232gf、27MHz帯通信、サーボにより搭載カメラのシャッターボタンを操作）を搭載可能です。動画受信によりリアルタイムでの情報入手ができますし、デジタルカメラで高画素数の画像を取得することもできるので、より精度の高い変化域の抽出などが可能となります。撮影画像例を衛星写真と比較して図**2**に示します。

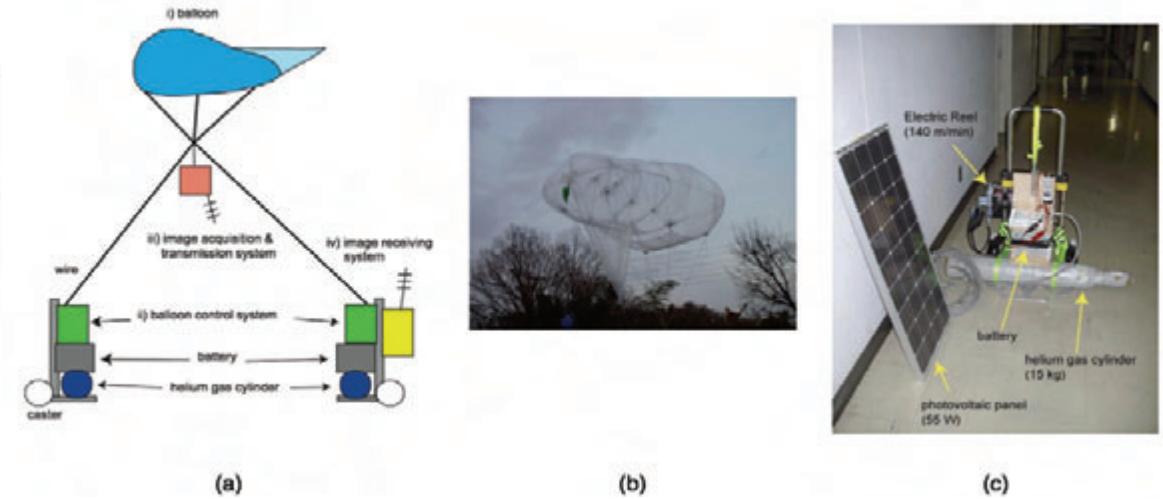
(2) 全天候型高所移動観測系の構築

発災1時間後程度を目途に特定被災地域へ出動し高所観測画像を取得することを目的として、①多種センサの搭載（バルーン系では重量制限有り）、②夜間対応（日没後の捜索活動を想定）、③全天候対応（バルーン系では悪天候時撮影不可能）、④精度（GPS情報等、自治体GISへの接続を想定）、という条件をみたすクレーン搭載観測系を開発しました。システムの全体概要図を図**3**に示します。

本システムには、3種類の防水仕様光学センサ（ハイパーラインセンサ、HD（ハイビジョン）ビデオカメラ、夜間撮影用高感度カメラ）が搭載可能となっており、クレーン車両のクレーン先端部に光学センサ、ラインスキャンを行うためのセンサ回転台、夜間照明用ハロゲンランプ（100W×6個、図**4**）を搭載します。また、クレーントラックにはGPSおよびクレーン長・仰角・旋回角センサを搭載し、撮影動画像と撮影条件（GPS位置情報、撮影方角情報）をトラック内のパソコンに記録します。光度は距離の自乗に反比例することから推定される照明の到達距離と搭載する高感度カメラの最小照度から測定可能距離が推定できます。最小照度0.7Luxの夜間暗視カメラHG-88sを使う場合、約1,000mまで撮影可能であることが予想され、夜間撮影系として十分実用に耐えられます。

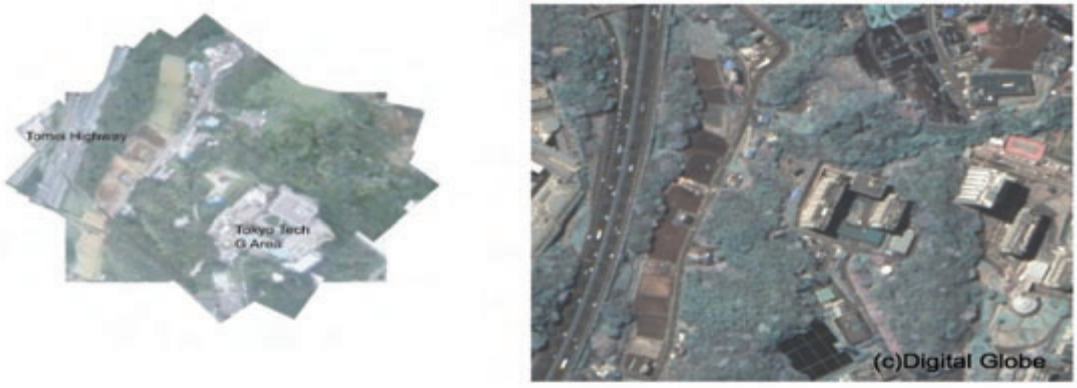
(3) 小電力画像伝送系の実現

本観測技術の目的である災害発生直後の被害状況の初動把握を実現するためには、被災現場において収集されたデータをリアルタイムに基地局へ伝送する技術が不可欠です。特に、災害時にはインターネット、携帯電話などのインフラが機能しないことを想定する必要がありますから、独自通信の手だてが必要となります。本業務では、SS (スペクトラム拡散方式)画像無線伝送システムによる小電力画像伝送系をクレーン画像取得系へ組み込みました。受信基地より890mの距離に設置された画像送信側クレーンにて撮影された動画の受信に成功しています。



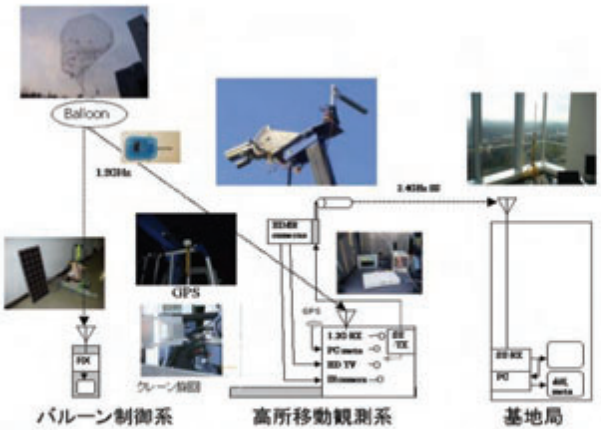
(a)　(b)　(c)

図 **1**　バルーン観測系、(a)全体概要図、　(b)バルーン、　(c)バルーン制御系



(a)　(b)

図 **2**　バルーン観測系より取得された空撮画像(a)と衛星写真(b)の比較



(a)

(b)

図 **3**　クレーン搭載観測系、(a)全体概要図、　(b)クレーン系全体画像

図 **4**　夜間照明系

3.2 高所カメラによる被害早期検出システム

自治体の庁舎は周辺の建物より高層であることが多く、その屋上に監視カメラを置けばある程度の範囲の被害状況の画像が取得できます。実際、多くの自治体で庁舎の屋上などの高所に望遠レンズ付きのテレビカメラを設置し災害や火災発生時のモニタリングに活用しています。このテレビシステムは火災などの被害状況をリアルタイムに目視できる点で優れていますが、大きな地震災害が発生した時に、広がりのある街並みの中から、分散した被災箇所を漏れなく抽出するような機能は有しません。また、被災箇所が発見されても、その場所が平面地図上に表示されないと具体的な災害対応の実施には結びつきません。

そこで、近年急速に解像度が増してきた市販のデジカメを使い、望遠レンズと首振り機能を取り付けて庁舎の屋上に設置しておき、周辺の写真を撮って分析し被害箇所を早期に抽出するシステムの開発を行いました。

(1) 開発する機能

以下のように設定しました。

・20F程度の建物屋上に設置し半径1kmをモニター
・大きな建物の陰に隠れて見通せない家屋があるのはやむを得ない。
・地震発生後30分でほぼ360度の被害をモニター
・抽出された被害箇所を自動的に2次元のGIS地図上にプロット。さらに人間の目によるチェックと被災状況判定を経て震災総合シミュレーションシステムに登録
・制作費は制御・モニター用のパソコンとソフトウエアを含めて100万円以下を目標

(2) ハード系の検討

カメラから半径1kmの円周上で10cmの分解能を実現するためには、円周長を約6kmとすれば、約6万ピクセルを要します。1フレーム水平方向に2,000ピクセルで撮影可能なカメラを用いると30フレームで1周分となります。すなわち、地震発生後30分間で変化域の検出を終えるためには1フレームについて撮影開始から分析終了までを1分以内とする必要があります。

また、装置は高層建物の屋上に設置されるので、厳しい風雨に曝される他、大地震時には重力の数倍の加速度に耐える必要があります。また、避雷針の近くに設置されることになるので、落雷（誘導雷）対策も必要です。

写真**1**が試作したシステムです。カメラの回転台の下に制御と通信のためのパソコンと電源部を収納しています。

(3) 制御のフロー

初期設定とモニタリングは以下の様になります。

①市街地のGISデータ（建物の平面形状と階数（建物高さを求める））、地盤の標高データの読み込み
②カメラパラメータ（XY座標値、高度、回転台回転軸の傾き、視野角、仰角）の読み込み
③平面形状と階数から作成される建物3Dモデルの街並みをカメラの位置から眺めたパノラマ画像の作成
④初期設定用写真の撮影、建物3Dモデルパノラマ画像との位置あわせ（撮影方位、仰角等のマッチング）
⑤写真と整合するように建物3Dモデルを修正、写真上の建物画像とGIS平面地図上の建物ポリゴン（ポリゴン：一筆書きの図形）との関連づけ（ひも付け）

以上で初期設定を終了、モニタリング状態に入ります。

⑥日常のモニタリングモードでは一定時間間隔で必要範囲を常に撮影、地震が発生すると直ちに撮影を開始し、直前の写真あるいは気象条件や日射条件が出来るだけ合った直近の写真と比較し差分を抽出
⑦抽出された被災箇所の画像を担当者が目視判読、プルダウンメニューに用意された被災項目を選択、⑤のひも付けを使ってGIS平面地図上に表示

(4) 研究開発課題

主要な開発課題は以下の3項目です。

1) 建物3Dモデルパノラマ図と写真の位置合わせ

カメラの回転台をデジタル制御することによりパノラマ図と写真の方位は大凡合致しますが、ひも付けや差分抽出のためには高精度の位置合わせが必要です。そのため、パノラマ図、写真ともエッジ検出を行い、或る程度の長さを持つ縦線のみを抽出して方位をパラメータとした相関解析を行い相関値最大となる方位を決定しました。これで大きな建物の側面輪郭が合うように方位を合わせたことになります。さらに、手動で仰角や傾斜角の微調整を行い、一致度を高めます。

2) GIS平面地図上の建物ポリゴンと写真上の建物画像の位置の自動ひも付け

1)の位置合わせが正確に行われていれば建物3Dモデルの精度が鍵となります。ここでは建物の高さを入手しやすい階数から設定しましたが、中高層の建物については手動による修正が必要でした。しかし、2階建て程度の建物ではその誤差は小さいと考えられます。

そこで、高さ80mの庁舎の屋上にカメラを設置して撮影したテストデータを使い、特に低層の小さな建物に注目してひも付けの検証を行いました。最初に1フレームの撮影範囲約12度内に写る建物について、手動により可能な限りのひも付けを行いました（図**1**）。その結果、低層建物約290棟の97％をひも付けすることができました（ただし、この作業には約10時間を要しています）。これを正解と見なし、カメラパラメータの調整のみで写真とパノラマ図の一致度を測った結果が表**1**です。画像のピクセル単位で見ると約半分が当該の建物3Dモデル図の中に重なっています。したがって、戸建て住宅1、2軒分のズレがあることを許容すれば、見通せるほぼ総ての住宅のひも付けが自動的に可能となる見通しを得ました。

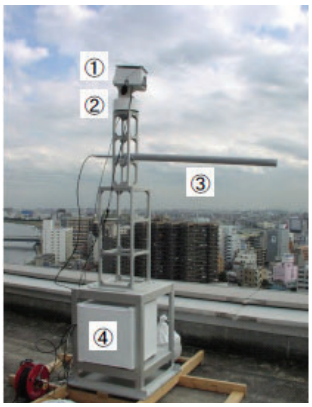
3)差分抽出による被害箇所の検出精度について

アルゴリズムとしては、エッジ強度・クラスタリングによる

方法など複数の方法を試しましたが、比較する2枚の写真で日照条件に大きな変化がない場合には、青成分について差分を抽出し閾値で2値化する比較的単純な方法で良好な結果が得られました。

検証のため屋上のフェンスに人為的にブルーシートを貼って変化を作り出し、その前後で写真撮影した結果を図**2**に示します。ブルーシート部分は問題なく抽出され、2次元平面地図に反映されています。また、道路部分の車や人の動きも差分として抽出されていますが、建物以外の領域はでひも付けされていないため、2次元平面地図に反映されることはありません。

今後、実用化に向けて、どの程度の日照条件の違いまで対処出来るか、実地試験を行って見極め、差分抽出方法を改良していく必要があります。



①デジタルカメラ
②雲台
③無線LANアンテナ
④カメラ制御装置

写真**1**　高所監視カメラ装置プロトタイプ

緑:視野角外、又は大きな建物に隠れて見えない、**青＋赤**:手動ひも付け可、**青**:自動ひも付け可、**赤**:自動ひも付け不可

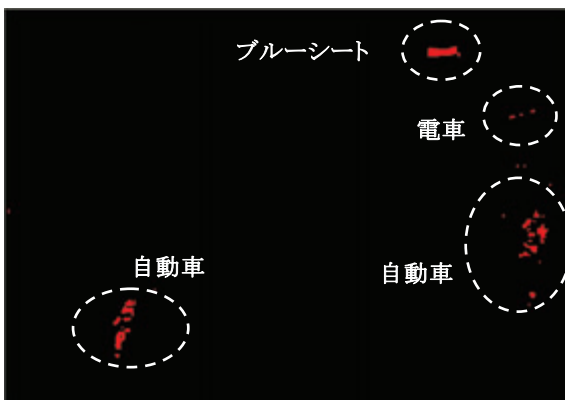
図 **1**　ひも付けの達成状況

表**1**　撮影方向のパノラマ画像の対象建物別による一致率

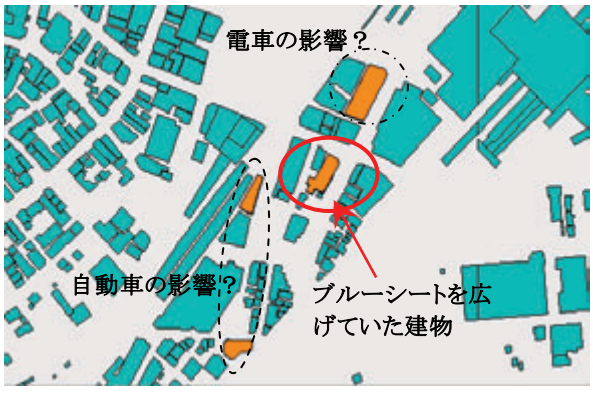
対象建物	ピクセル単位	一致戸数
低層住宅のみ	52.37%	229 / 289

比較画像

差分抽出対象画像



差分結果(差分結果のみ)



GIS に反映させた差分結果

図 **2**　差分抽出実験結果

3.3 空撮画像からの被災域抽出システム

ヘリコプター、航空機あるいは人工衛星から撮影した被災地の写真から被災箇所を抽出するシステムの開発を行いました。被災後の写真のみを使う方法と被災前後の写真を使って比較する方法がありますが、ここでは、より精度高く抽出できる可能性がある後者の開発を行いました。この方法をシステムとして確立するためには、撮影系の技術、大容量画像データと属性情報をカメラから解析用パソコンへ転送し収納、管理する技術、被災前後の画像を比較し被災箇所を抽出してGISに登録する技術、それぞれの開発が必要です。このうち撮影系については高機能高精度のデジタル航空カメラや直接定位システム（GPSと慣性測定装置から構成された航空写真の撮影位置と姿勢の計測システム）が導入されるようになり、ハードウェアによる画像の前処理が可能になりました。

(1) 大容量画像データの転送、収納、管理技術の開発

撮影系により取得した大容量の画像データ（ビデオ動画を含む）や建物変化域の抽出結果を時空間GISで管理して自治体や防災情報センターが情報共有する技術として次のサブシステムを開発しました（図**1**参照）。

1) 大容量画像管理

詳細なデジタル航空写真画像はギガ単位の大きさになります。パソコンで稼働する時空間GISでこのような画像を高速に処理するために画像の階層構造化とサブ領域分割を開発しました。これによりパソコンでも2GBまでの画像の高速アクセスが可能となり、さらに各サブ領域を非可逆圧縮することにより、データ量を1/10以下にして格納できるようにしました。

2) 災害情報取得・管理

時々刻々変化するデータを時空間GISに格納します。

3) 変化抽出結果の画像処理と面空間の形成機能

最初に建物変化を抽出する被災前後の画像を設定し、変化抽出アプリケーションへ引き渡し、抽出処理後、結果をシステムに取り込む画像処理機能を開発しました。2値化した変化抽出画像のノイズ除去にはモフォロジ処理（画像の膨張・収縮）を適用、得られた変化域をベクトル化し、一筆書きの面空間（ポリゴン）としてGISに認識させるようにしました。

(2) 建物変化域抽出技術の開発

1) 2次元照合と3次元照合

地震災害発生前後の画像データから建物変化域を抽出する方法として、立体視が可能なステレオ航空写真を用いる3次元照合と、オルソ画像（無限遠方から見た平面画像）を用いる2次元照合があります。大都市では高層建物が多く斜視による部分遮蔽の影響が大きくなるので3次元照合により建物の屋根高さを検出しその変化を抽出する方法が有利と考えられます。表**1**は2次元、3次元の建物変化域の抽出性能を写真の縮尺や撮影方法を含めて比較した結果です。3次元照合では高さ方向の読み取り精度が2m以下となる1/8,000より大縮尺の写真を使えば抽出精度が高くなります。しかし、自治体が保有している写真画像はオルソ画像であることが多く、被災前のステレオ画像の入手は困難です。一方、オルソ画像を使った2次元照合でも同じ撮影系の画像を使えば良い結果が得られることが分かりました。

2) 2次元照合による変化域抽出の高精度化・高速化

i)非線形写像法

非災前の画像を一定の大きさの小領域に等分割し、被災後の画像を探索して小領域が重なる部分における画素間の平均二乗誤差を最小化する平行移動量を求めます。この過程が移動ベクトルの探索です。探索後に移動ベクトルの修正（協調）を行います。修正は対象となる移動ベクトルとその近傍にある（協調範囲に含まれる）ベクトルのメディアン協調（平滑化）によります。探索・協調の操作を収束するまで繰り返し、最終的に求められた移動ベクトル群が画像間の対応付けとなります（図**2**参照）。

ii) 大歪み画像への対応技術の開発

災害前後で撮影条件が大きく異なる大歪み画像の処理を想定し、次の3方法を開発しました。

①多段的探索： まず、探索範囲が広く、探索間隔が大きい大域探索を行い、移動ベクトルのおおまかな検討をつけます。その後、探索・協調の繰り返し過程で、比較的探索範囲が狭く、探索間隔が小さい探索を行います。

②選択的協調： 探索・協調の収束性を高めるため、全移動ベクトルにメディアン協調を施すのでなく、必要性が高い移動ベクトルのみに協調を施します。

③歪みによる小領域変形を考慮した誤差計算： 被災後の画像上における小領域の回転や領域形状の変形などを取得し、非災前の画像の小領域をその形状に変換した上で、二乗誤差を計算します。

iii)複雑度指標・植生指標・影抽出による抽出精度向上

撮影条件の変化に依存しない特徴量として①ラプラシアンフィルタに基づく複雑度指標、②山間部における土砂災害等を想定した植生指標NDVIの利用、③ニューラルネットワークによる影領域抽出および影の影響の低減化を試行し、抽出精度の向上を確認しました。

iv)変化画像の統合による抽出精度の向上

非災前の画像を小領域に分割するときの1辺の大きさは、変化域抽出精度に大きな影響を与えるパラメータの1つです。多くの場合、画像中にさまざまな大きさの変化域が混在します。これらをより正確に検出するために、1辺の大きさをさまざまに変えて求めた複数の変化域抽出結果を統合することで、精度を向上する方法を開発しました。

v) 本方式の適用例

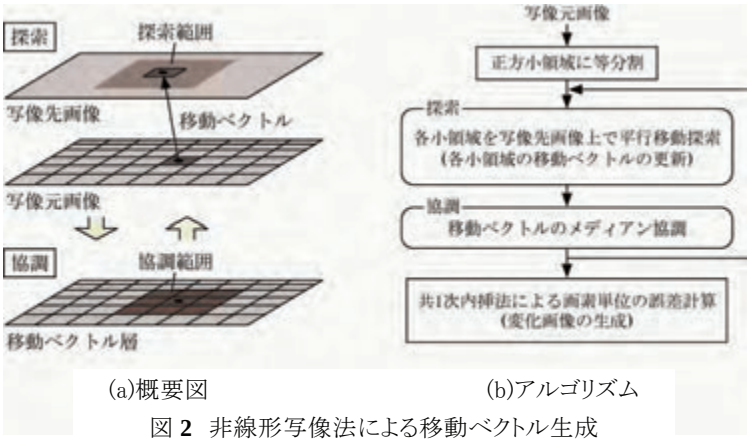
新潟県中越地震で発生した土砂災害の抽出結果を図**3**に示します。本処理結果は、異なるセンサによる画像間（QuickBird（災害前）とIKONOS（災害後））に基づくものです。NDVIによる抽出精度向上が確認されました。

図**1**　自治体 GIS への接続インターフェース

表 **1**　建物変化域の抽出結果

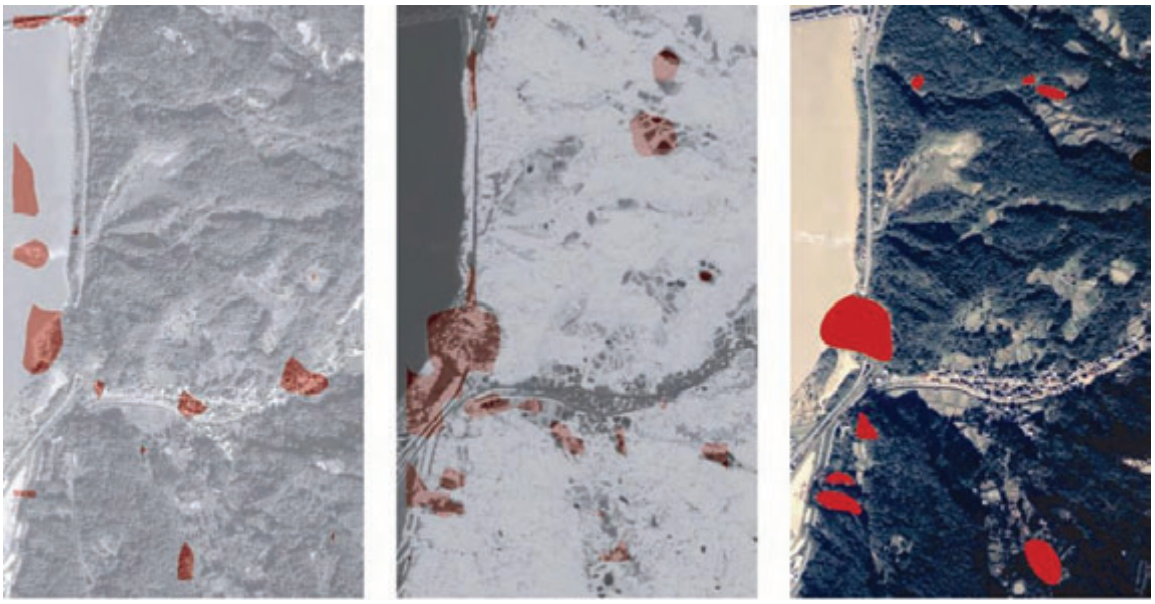
No.	変化抽出法	変化前画像	変化後画像	抽出の結果
1	2次元照合	川崎市オルソフォト 50cm／画素 1997.6.1 1/30000	航空写真 2003.8.12 1/20000	○ 検出率79% 誤り率30%
2			QuickBird衛星画像 2003.12.31	△ 検出率53% 誤り率30%
3		QuickBird衛星画像 2003.9.30	イラン・バム地震 QuickBird衛星画像 2004.1.3	○ 検出率90% 誤り率20%
4	3次元照合	ステレオ航空写真 1997.6.1 1/30000	ステレオ航空写真 2003.8.12 1/20000	× 検出率40% 誤り率30%
5		ステレオ航空写真 1998.12.13 1/8000	ステレオ航空写真 2003.2.28 1/4000	◎ 検出率79% 誤り率 5%

＊航空写真のスキャニング解像度は20μm



(a)概要図　　(b)アルゴリズム

図 **2**　非線形写像法による移動ベクトル生成



(a)輝度値に基づく変化域抽出結果　(b)NDVI に基づく変化域抽出結果　　(c)人による判読結果

図 **3**　新潟県中越地震土砂災害抽出結果

4. 災害対応支援サブシステム

震災総合シミュレーションシステムに不可欠な機能として、**2.**被害推定サブシステムと、**3.**実被害情報収集サブシステムの結果を統合してより精度の高い被害情報を提供すると共に、緊急対応の要否の判断を具体的に支援する災害対応支援サブシステムを開発しました。

また、災害対応ロジスティックスを支援するシステムのプロトタイプ、ならびに被災後の自治体の業務を支援するシステムを開発してサブシステムに加えると共に支援実践を通した検証を行いました。

4.1 被害推定情報と実被害情報の統合処理

地震動情報に基づく早期被害推定結果と、リモートセンシング情報、ならびに時々刻々入手される実被害情報（図**1**）を統合処理することによって、迅速かつ正確な被害把握を可能とし、地震後の緊急対応を実際に支援できるサブシステムの開発を行いました。この目的を達成するため、ベイズ確率の方法（事前確率（被害推定）と事後確率（部分的実被害情報）を関係づけるベイズの定理を用いて、新しい証拠に照らして命題の尤もらしさを改訂していく方法）を基本とする逐次処理アルゴリズムを構築しました。

(1) 統合処理と緊急対応要否判定の枠組み

図**2**は統合処理による被害推定の逐次更新と、これに基づく意思決定過程の枠組みを示したものです。ここでは、シミュレーションによる初期推定結果をベイズ確率の方法における事前情報として扱います。時々刻々と入手される実被害情報を用いて事前情報を更新し、被害の全体像を予測分布の形で逐次先行予測するとともに、逐次確率比検定を適用して緊急対応の要否を判定します。

(2) プロトタイプを用いた検証

震災総合シミュレーションシステムのプロトタイプに災害対応支援サブシステムとして「被害情報の統合処理モジュール」および「緊急対応の意思決定支援モジュール」をプラグインしました。そして、テストフィールドとした川崎市をモデルに直下地震を想定して、震度分布推定～初期被害推定～実被害情報の統合～意思決定支援の一連の流れをシミュレーションし、機能を検証しました。

1) 推定震度分布と初期被害推定

直下地震を想定して50mメッシュ単位で推定した詳細な震度分布をもとに初期被害推定を行いました。サブシステムでは被害推定のばらつきを考慮するため、推定結果を確率分布で表します。本研究では、実データ解析に基づいて、ベイズ統計学の「仮設的事前標本」を規定して被害関数の不確定性を付与しました。全壊建物棟数の推定値の平均値を町丁目単位でGIS表示した結果を図**3**に示します。表**1**は全壊建物棟数の初期被害推定結果（町丁目単位）を区単位および市全域で集計した結果を平均値と標準偏差で示したものです。

2) 実被害情報との統合処理による被害推定の逐次更新

被害調査が全体の10%まで進捗し、実被害情報の入手によって逐次判明してくる被害程度が初期被害推定とほぼ同程度で推移するケースを想定して実被害情報を作成し、その情報を初期被害推定情報と統合処理して被害推定を更新した結果を表**2**に示します。このケースでは、実被害が初期被害推定に近いため、平均値は表**1**とほぼ同様の結果となっていますが、調査の進捗により推定幅（標準偏差値）は狭まっている事が示されています。

図**4**は、情報入手の各段階（初期推定・10％・20％・30％被害情報入手時）における全壊建物棟数の平均値±標準偏差値の変化を示したものです。モデル都市全域の集計結果についてのみ示しています。図**4**には、実被害が初期被害推定より30%少なかった場合と多かった場合を示していますが、10％調査進捗段階で初期推定結果より±約20%にまで修正されています。

3) 推定被害率に基づく意思決定支援

地震後の初動段階においては、限りある対策資源を有効に配分することが重要であり、被災地内における緊急対応の優先順位付けを行う必要があります。本サブシステムには、建物全壊率の推定結果に基づいてその意思決定を支援する機能を備えました。

地震直後（初期被害推定の段階）における緊急対応の意思決定結果を図**5**に示します。緊急対応を優先する必要性の高い地域は「赤」、緊急対応を優先する必要性の低い地域は「青」、緊急対応の決定を保留する場合は「黄」の色分けで表示しました。この段階では、市北部が「緊急対応を優先しない」と判断され、その他は「決定保留」となっています。

図**6**は、被害調査が10％進捗した段階における緊急対応の意思決定の更新結果です。図**5**において「決定保留」の判断となっていた市中南部の多数の町丁目において「緊急対応を優先」の判断に転じています。これは、実被害情報との統合処理によって被害推定の確からしさが向上したためです。被害調査が30％進捗した段階ではさらに「決定保留」の町丁目が減少し、その多くは「緊急対応を優先」に転じています（紙面の都合で割愛）。

これらの結果は実被害が初期予想とほぼ同じだった場合の結果ですが、初期被害推定と実被害との乖離が±30%あった場合でも、被害調査が偏りなく適切に実施されていれば、10％程度の調査でも十分な精度向上が可能である事を確認しました。

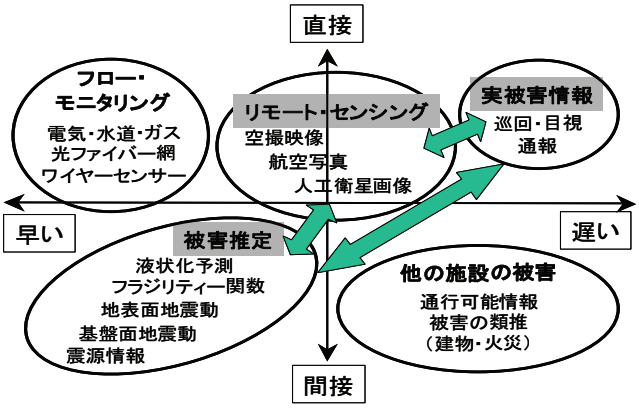


図 **1**　地震被害の早期把握のための情報源

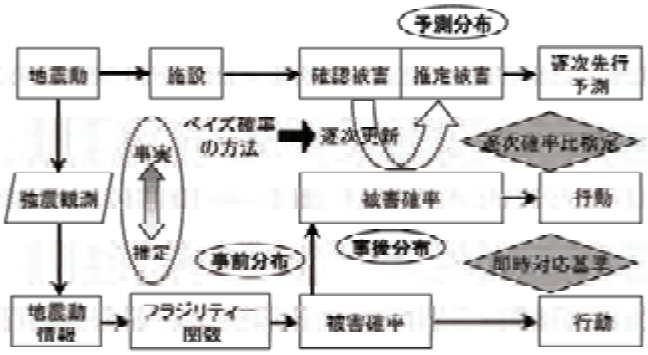


図 **2**　被害推定情報と実被害情報の統合処理の枠組み

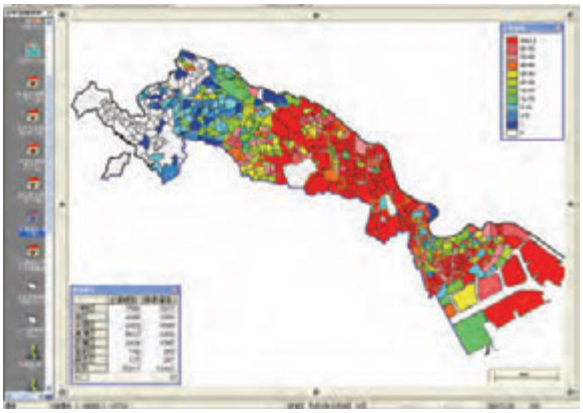


図 **3**　全壊建物棟数の初期推定値（平均値）
模擬データを使用

表 **1**　建物被害の初期推定値（平均値と標準偏差）

建物被害

	全壊棟数	標準偏差）
川崎区	7596	3307
幸区	4889	1956
中原区	8423	3008
高津区	5612	2439
多摩区	2929	1565
宮前区	743	880
麻生区	125	267
合計	30317	13422

模擬データを使用

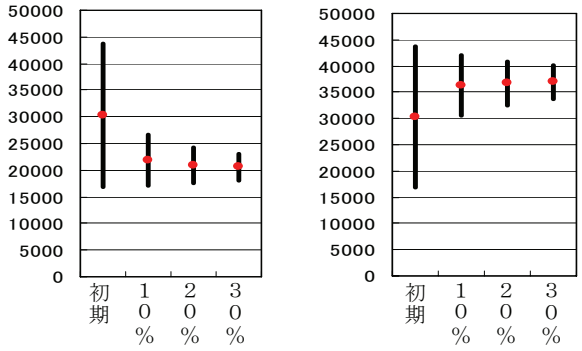
表 **2**　更新された建物被害推定値

建物被害（実情報考慮）

	全壊棟数	標準偏差）
川崎区	7296	1523
幸区	4633	752
中原区	8201	1150
高津区	5458	855
多摩区	2832	688
宮前区	744	359
麻生区	112	90
合計	29276	5417

模擬データを使用

（調査進捗
10%：実被害
の平均値が
ほぼ初期推
定通り）



実被害が 30%少ない場合　　実被害が 30%多い場合

図 **4**　被害調査進捗の各段階における推定全壊建物棟数
の平均値±標準偏差値（全市域の合計値）

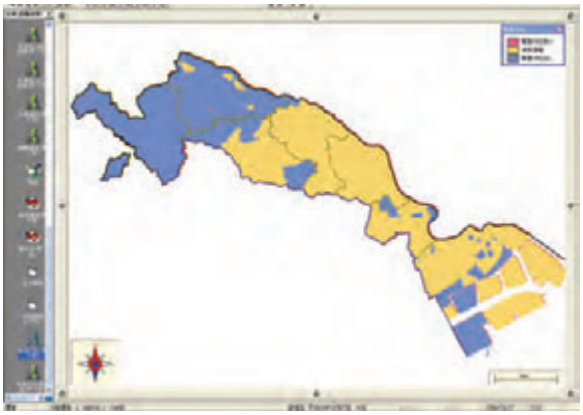


図 **5**　建物被害の初期被害推定に基づく緊急対応
意思決定結果　　模擬データを使用

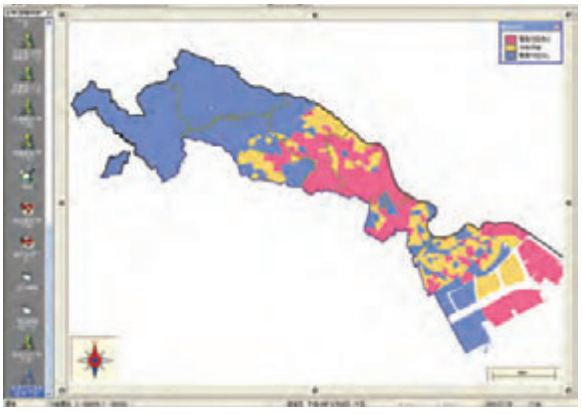


図 **6**　調査査進捗 10%：決定保留が緊急対応優先
に変更されている　　模擬データを使用

4.2 災害対応ロジスティックスシステム

災害対応のためのロジスティックス支援機能として、物資輸送基地における支援物資量と、配送先となる避難所等で必要とされる物資量がわかっているとき、各配送先への物資配分量を算出する機能を構築しました。さらに、建物損壊、斜面崩壊等の原因により一部道路が閉塞した状況の下で、支援物資の輸送時間を最短に近づける配送計画最適化機能を構築しました。

(1) 物資配分量の算出機能

物資輸送拠点で入手可能な支援物資量と、避難所等の配送先での必要物資量のデータが与えられたとき、各配送先に対し、輸送拠点にある配分可能な物資の分配を行う機能を構築しました（図**1**）。ただし、輸送拠点は1箇所のみ考慮可能です。

離散量で表される物資（ペットボトルなどのように個数で数えられるもの）と、連続量で表される物資（飲料水などのように自由に分割可能なもの）の配分量を算出します。離散量で表される物資はサン・ラグ法（各配送先に必要量を1,3,5・・・で割った商の表を作り、商の大きい順に総量に達するまで配分していく方法）により、連続量で表される物資は必要量の比例配分により配分しました。

ここでは50万都市を例として、図**2**に示すような19箇所の避難所に対して、1箇所の物資輸送基地から支援物資（缶詰、毛布、飲料水）を配送する問題を考えました。この市内では、丘陵や山地を切り開いて宅地等が造成されており、多数の急傾斜地が存在します。したがって、大地震の際には急傾斜地崩壊により道路網が寸断されると想定して、緊急支援物資の供給や、救助や消火といった緊急対応の方策を検討することが重要です。

物資輸送基地には缶詰6,000個、毛布3,000枚、飲料水4tが用意されており、輸送基地から避難所までの道路は図**2**のように所々閉塞しているものとします。

このときの物資配分結果を表**1**に示します。輸送基地の物資量より必要量の多い缶詰と飲料水は、それぞれサン・ラグ法および比例配分により配分された結果です。毛布は十分な量があるため、各避難所の必要量がそのまま配分量となっています。道路閉塞により到達不可能な避難所（図**2**の白抜き番号の避難所）には物資が配分されていません。

(2) 物資配送計画の最適化機能

道路閉塞のある道路ネットワーク上で、利用可能な車両を用いて物資輸送拠点から避難所等へ支援物資を配送する時の、最短配送時間を目的とした配送計画の最適化を行う機能を構築しました（図**3**）。ここで配送時間は、全物資の配送を完了し、最後の車両が輸送拠点に戻るまでの時間を指しています。

計算条件は以下の通りとしました。

- 車両は複数運行が可能とする。車両の1運行は、輸送拠点を出発して輸送拠点に帰るまでをさす。
- 一度に配送できないときは、物資を分割して配送する。
- 積載制約は重量のみとし、体積は考慮しない。
- 移動手段は車両のみとし、船や鉄道は考慮しない。
- 車両はいつでも利用可能とする。道路ネットワークは時間経過により利用可否が変化しないものとする。
- 車両の平均移動速度および道路リンクの移動速度係数は、時間経過により変化しないものとする。

目的関数として単純に最大配送時間を最小にしようとすると、図**4**(a)のように遠い避難所を経由するルートが作成されてしまう可能性があります。逆に全配送時間を最小にしようとすると、図**4**(b)のように車両間の配送時間のばらつきが大きくなる可能性があります。ばらつきを小さくするには分散を小さくすればよいので、各車両の配送時間の2乗和を最小にする方法が考えられます。しかし、図**4**(c)のような解を得るには、単純な2乗和ではなく、配送時間Tから基準値T_{base} を引いた値の2乗和S

$$S=\Sigma(T-T_{base})^2 \qquad [1]$$

が最小になるようにする必要があります。一般に配送計画問題は最適解を求めることが非常に難しいNP困難な問題であるため、挿入法で厳密な最適解が得られる保証はありませんが、式[1] の値の最小化を図ることにより、図**4**(c)のような解が得られる可能性が出てきます。ここでは、基準値T_{base} を現在の解における各車両のうちの最小の配送時間としました。

配送計画の作成には挿入法（B.コルテ、J.フィーゲン、2005）を用いました。精度を上げるために、挿入法をランダムに繰返す多スタート法（以下、多スタートグリーディー法と記す）を採用しました。挿入場所を決定するための尺度は以下のとおりとしました。

第1優先順位：分割をしないで輸送できること
第2優先順位：$S=\Sigma(T-T_{base})^2$ が小さいこ
第3優先順位：一度の輸送量が多いこと
第4優先順位：輸送車両の空き積載量が多いこと

以上のような方法を用いて、図**2**と同じ配送問題に対する配送計画の算出を行いました。配送には2台の3t車を用いることとし、缶詰および毛布の単位あたり重量はそれぞれ0.2kgf、1kgfとしました。また、物資の積み下ろし時間は物資の重量に比例するものとし、比例係数を0.001（hour/kgf）としました。

多スタートグリーディー法の反復回数が1,000回のときの各車両の配送経路を図**5**に示します。反復回数による最大配送時間および計算時間の変化（表**2**）より、反復計算による解の改善が確認できます。

以上のような物資配分量の算出機能および物資配送計画の最適化機能を用いて、地震発生時には、実際の道路閉塞状況を反映した道路ネットワークを用いて配送計画を立案することが可能です。

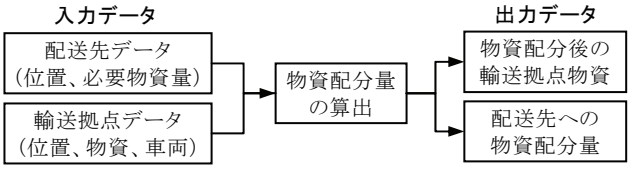


図 **1**　物資配分量の算出機能の概要

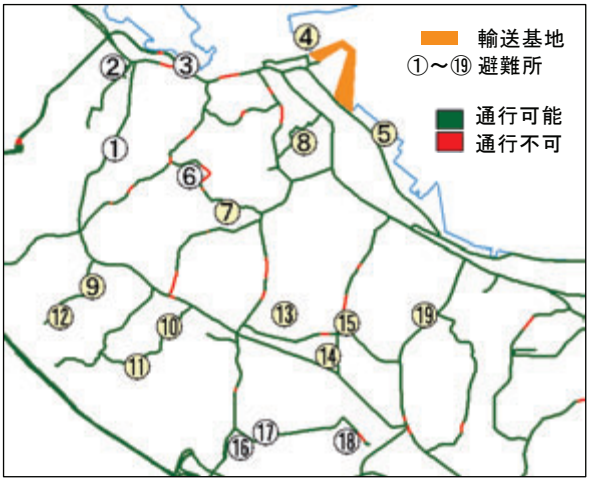


図 **2**　物資配送問題

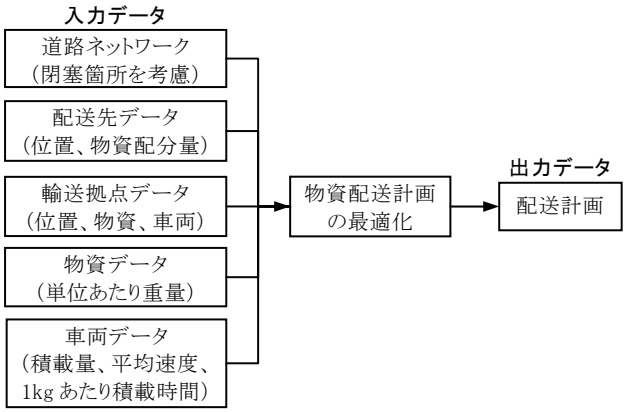


図 **3**　配送計画最適化機能の概要

表 **1**　物資配分量の算出例

避難所	物資配分量			避難所	物資配分量		
	缶詰（個）	毛布（枚）	飲料水（L）		缶詰（個）	毛布（枚）	飲料水（L）
①	0	0	0	⑪	434	100	280
②	0	0	0	⑫	145	40	110
③	0	0	0	⑬	361	80	230
④	723	180	510	⑭	506	120	340
⑤	651	150	420	⑮	217	50	140
⑥	0	0	0	⑯	0	0	0
⑦	723	170	480	⑰	0	0	0
⑧	867	200	560	⑱	0	0	0
⑨	578	140	390	⑲	506	120	340
⑩	289	70	200	-	-	-	-

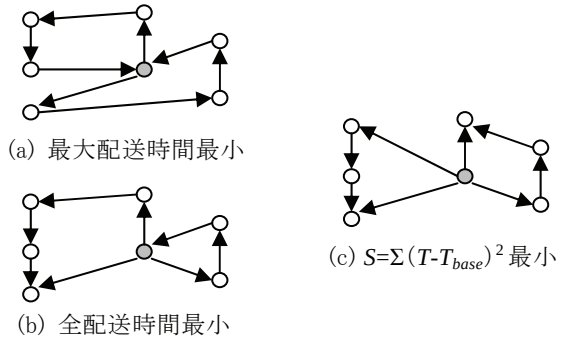


図 **4**　目的関数による解の相違の例

(a)　3t トラック（No.1）の経路

(b)　3t トラック（No.2）の経路

図 **5**　配送経路の算出結果

表 **2**　多スタートグリーディー法の反復回数による最大配送時間の変化

反復回数	最大配送時間(hour)
1	4.142
100	3.850
500	3.825
1000	3.824

4.3 自治体災害対応業務への適用

地理情報システム学会の呼びかけで新潟中越地震被災自治体を支援するボランティア活動が行われ、その支援活動への参加を通して自治体システムについての研究開発成果を適用し実効性を検証しました。川口町役場、十日町市役所、旧山古志村役場を中心に、魚沼市役所についても支援活動を行っています。共通システムを活用し、それぞれの自治体の要求に臨機応変に対応した支援を試みました。研究上は3つの自治体の特徴を、被害の規模と切迫性が高い川口町役場、処理対象データの規模が大きい十日町市役所、復興に難点の多い旧山古志村役場、と位置付けました。特に、現況の把握、罹災証明書の管理、倒壊家屋解体撤去業務、農地管理、固定資産管理、水道の復旧などの業務への適用に関する情報処理に付いて適用研究を行いました。

(1) 川口町

積雪前に被災状況を把握する要望があり、町内全戸の住宅・付帯建物全ての画像を時空間GIS上の当該位置に登録する作業を行いました。川口町の世帯数は約1,500世帯で、撮影枚数は、約5,000枚です。作業日数は6日で、のべ作業者数は31人・日でした。GPS付きカメラの写真の取り込み機能を開発した結果、作業時間がほぼ同規模の支援例と比べて1/10程度に短縮されました。この作業はGIS学会と共同して行い同学会のボランティア学生が作業を行いました。

平行して、地元業者からデータ提供の協力を受け、都市計画図、住宅地図、地籍図を利用したベースマップの作成を行いました。そして、住所と氏名で管理されていた被災家屋データを地図に登録し、ベースマップに建物画像を登録した時空間データベースを構築しました。さらに、住所・氏名等での検索機能と画像の表示機能（サムネイル表示等）を追加し、川口町に提供しました。

当初、提供した時空間GISは、復旧業務において参照のみの機能が活用されていました。その後、撤去家屋の補助金申請に係わる面積確定作業の支援のため、固定資産台帳データと撤去申請帳票の登録を行いました。

撤去家屋の面積確定には、台帳に記されている住居建物、付帯建物（作業場、蔵、車庫等）の位置を特定する必要があります。申請書で記されていた氏名、住所、地番、家屋番号から台帳データ上の対象物を抽出する作業は手間暇がかかります。しかし、位置座標と時間で管理する時空間GISによる管理を行うことではるかに効率良く業務が遂行できます。

当然ながら、当該自治体は、自治体が管理する情報が時空間データベース化されていないため、時空間GISへの登録（時空間データベース化）が求められます。そこで、表計算ソフトで台帳データの突き合せを行い、住居建物、付帯建物の当該位置に台帳データを登録しました。従来の台帳検索では、1軒の建物の面積確定を行うために、台帳の全てを検索し、当該建物の面積を合算していました。旧地番（丑、虎等の地番）や台帳登録者の世代と現住者の世代の相違等で、作業に多くの時間と労力を要します。この突き合せ作業と時空間GISへの登録作業を防災科研及びGIS学会のボランティア学生が行うことで、自治体の職員は検索と確認のみで面積確定を行うことができ、大幅な作業時間の短縮が実現できました。

(2) 十日町市

2次調査結果（調査票、罹災証明書、家屋台帳、写真、アンケート結果等）を時空間GISに登録し、税務課の復旧業務に供するシステムを構築しました（図**1**, 図**2**）。十日町市の規模（面積、人口、役所の人員等）は川口町の10倍程度あります。登録する2次調査結果の図書類も膨大でした。それゆえ、自治体職員が復旧業務に際し、資料を検索するだけでも多大な労力が払われていました。十日町市に関しては、全ての建物の家屋番号を時空間GISに登録する作業を進めています。

(3) 魚沼市、山古志村への展開

川口町、十日町市での活動を聞いた近隣自治体から支援要請があり、魚沼市、山古志村への展開を進めています。活動が広がり、地元の専門家（GIS関連業者や建築士等）による自治体支援体制も構築しつつあります。

罹災証明発行や撤去申請受付等の窓口業務において、住民に時空間GIS上で指さし確認を行ってもらうことで建物の特定が可能となります。さらに、避難所等で避難者がどこから（自宅等）避難してきたかという情報を地図上で指さし確認することで、安否確認と被災情報の収集が同時に実現します。これらの内容を自治体職員に説明すると、「なぜもっと早く来てくれなかったのか」という声が多く聞かれました。

(4) まとめ

自治体職員が求める情報処理を考えた場合、開発してきた自治体システムが要求を包含する機能を有しており、防災実務に資する確証は得られました。しかし、どんなに優れたシステムを開発しても、現場で使われなければ意味がありません。

平成15年度及び平成16年度に実施した被災地支援では、被災後の自治体でベースマップの作成、情報の登録を行いました。現在、システムの適用を進めている三重県では、モデル自治体に時空間GISが設置され、平常業務からシームレスに緊急業務が行える自治体時空間情報システムの研究・開発が進められています。将来、三重県を襲う地震を含む自然災害で実際に使われ有効に機能するシステムと情報処理の枠組みづくりが責務です。

情報処理技術による減災の実現という面では、自治体の情報処理が効率化されることにより、復旧が早められ、被災者を苦痛からより早く開放でき、経済損失も低減でき

ます。

地域防災計画や国の指針には、主に被害調査方法や判定基準が記述されています。しかし、自治体の災害対応の現場での支援活動を通じ、自治体業務に最適な情報処理を遂行することで減災を実現する手法を体系化する指針が求められている、と感じています。

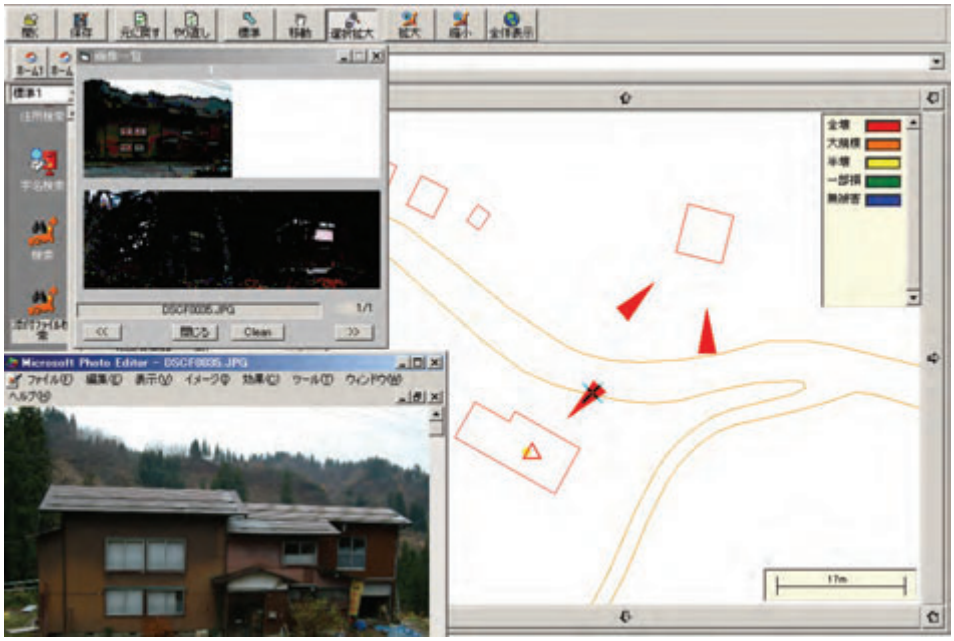


図 **1**　建物写真、被災情報、帳票類を登録した時空間 GIS の表示例

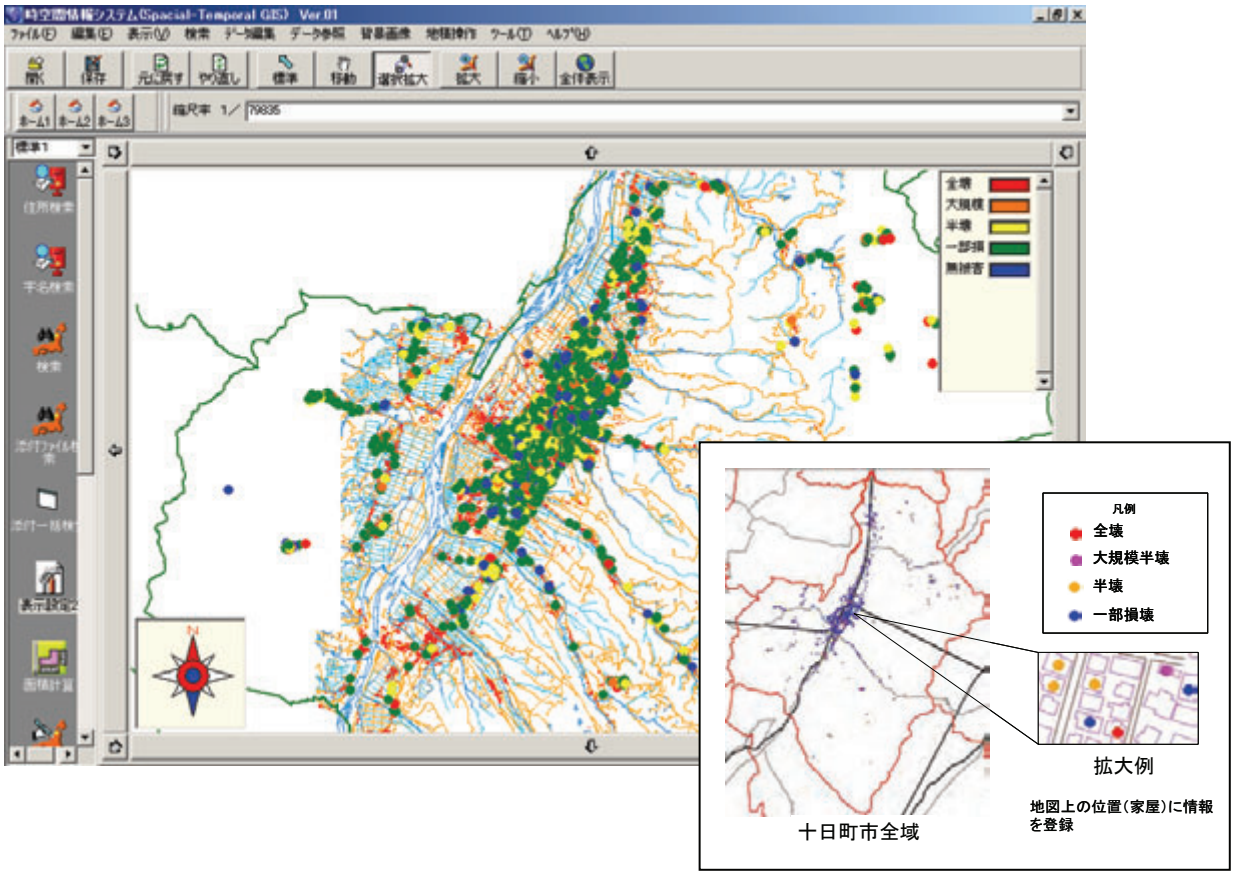


図 **2**　十日町市の家屋被害表示例

5. マルチエージェントシミュレーション技術による震災総合シミュレーション

震災総合シミュレーションは、時々刻々変化する自然現象と、広範囲に広がっていく被災事象を高精度で予測するだけではなく、それに立ち向かう行政機関とその構成員、あるいは市民の災害対応行動を最適化する示唆を与え得るものでなければなりません。本章では、震災総合シミュレーションシステムを構成する被害推定サブシステムのうち、人間（エージェント）の災害対応行動シミュレーションを行う「災害予測・対応シミュレータ群」について説明します。ここに、エージェントとは行動目的と周辺知覚能力と行動能力をプログラムされて地図上を自律行動する人間のモデルです。

5.1 大規模分散シミュレーションアーキテクチャ

(1) シミュレーション統合

災害予測・対応シミュレータ群は、地震被害、火災延焼、市民行動、交通流、消防救急、など多数の要素シミュレータの総合体です。これらの要素シミュレータは日々技術発展するものであり、新しいシミュレータが随時加わり、あるいは古いものと置き換えられる必要があります。このため、新規・既存を問わず、多数の要素シミュレータ(以降、サブシミュレータ) を接続・統合して、一貫した一つのシステムにまとめあげる「シミュレーション統合」が必要です。火災延焼という物理現象と人による消火活動のように、複数のサブシミュレータを時間の進行に従って矛盾なく相互作用させる必要があります。また、個別の人間の行動をシミュレーションするために、人工知能技術を援用することも必要です。

アーキテクチャの詳細を図**1**に示します。災害予測・対応シミュレータ群は、さらに現象のサブシミュレータと、エージェントに大別されます。左半分に多数並んでいるのは現象のサブシミュレータです。これらの現象サブシミュレータは、シミュレーションの時間進行とサブシミュレータの間の相互作用を統括するカーネルと、サブシミュレータ Application Software Interface (以降、S-API) という共通インタフェース仕様を通して情報のやり取りをします。S-APIに従って新しいサブシミュレータを書けば、このシミュレータ群にプラグイン (新しいコンポーネントソフトウェアを追加すること) することができます。

シミュレーション世界の状態は、属性と呼ぶ変数を持ったオブジェクトの集合としてモデル化されます。オブジェクトは建物や道路といった地物やエージェントであり、属性は、建物の位置、建物がどの程度燃えているのか、道路がどのように接続しているか、エージェントがどこにいてどのような行動をとろうとしているか、といったものです。これらの情報を共有時空間データ（SSTD）と呼びます。SSTDはカーネルによって管理され、サブシミュレータが、S-APIを通じてSSTDを読み書きすることでシミュレーションが進行します。サブシミュレータはSSTDを介して他のサブシミュレータのシミュレーション結果を知ることができ、それによって相互作用がシミュレートされます。すべてのサブシミュレータが同じ時刻のシミュレーションを行うように、カーネルは、時刻tの属性値を入力にとるサブシミュレータがあるとき、時刻tの出力を行う他のサブシミュレータを先に実行させ、それらが出力を行うまで時刻tの入力を行うサブシミュレータを休止させます。

人間の行動をシミュレーションするエージェントも、現象サブシミュレータと同様、他のサブシミュレータと相互作用する一種のサブシミュレータですが、10,000個を超えるエージェントを一般のサブシミュレータと同じ枠組で実装すると、計算に非常に時間がかかってしまいます。そのため、エージェントプロキシ (Agent Proxy、以下APXと書く) という仕組みを用い、本来独立並列に動作する多数のエージェントを逐次化して効率的に扱います。APXにエージェントを連携させるAPIを、エージェントAPI (以降、AG-API) と呼びます。

エージェントの種類は、現在、消防隊、救急隊、救助隊、これら3つの本部という (職業的) 災害対応要員、および一般被災市民などです。災害対応要員は自治体の実際に即したように配置します。市民エージェントは、北海道大学チームが調査して得た市民の行動様式（5.3参照）を織り込んでいます。エージェントの種類は、サブシミュレータと同様に自由に増やすことができます。

エージェントは周囲の状況と自分の状態を認知・判断し、自らの意志で行動します。APXはこの認知・判断・行動のサイクルを各エージェントに実行させます。APXに上がってくる各エージェントの行動とは、行動そのものではなく、行動の意志となります。実際、エージェントが速く移動しようと思っても、交通流シミュレータが渋滞を検知すれば、その意志は完全には充足されませんし、消防隊が放水したいと思っても、そこで水利が尽きれば水は出ません。

(2) 分散シミュレーション

大震災を対象にすると、広い領域をシミュレートできる必要があります。本シミュレーションシステムでは、必要な台数のパソコン(以下PC)をLANで接続したPCクラスタを用いて、広範囲を短い時間でシミュレーションします。

災害予測・対応シミュレータ群の計算を進める場合は、地理分散を基本とした分散シミュレーションを行います（図**2**）。シミュレーションの対象空間 (宇宙と呼びます) をPCの台数分に分割（図**2**では16分割）し、それぞれを異

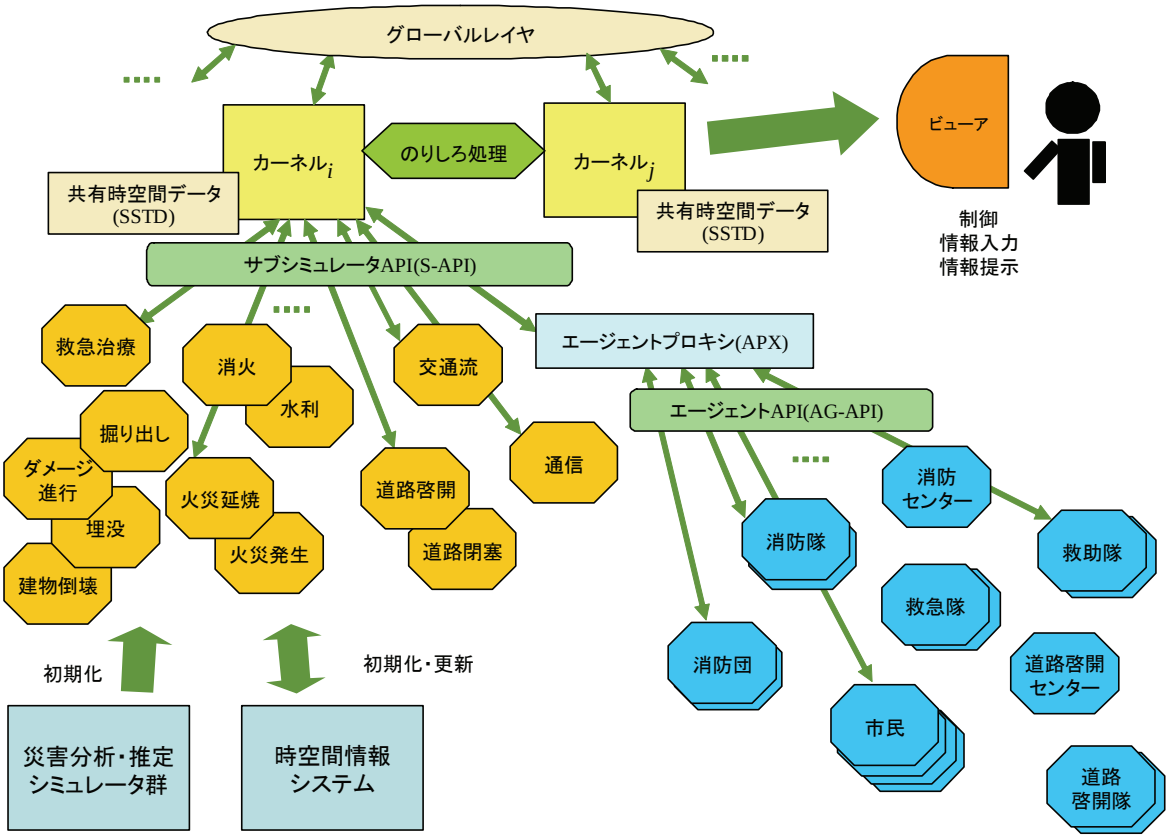


図 **1**　人間（エージェント）の災害対応行動のシミュレーションを行う災害予測・対応シミュレータ群

なるPC(パソコン)に割り当てます。割り当てられた空間を、そのPCの領地と呼びます。各PCは領地にあるオブジェクトの状態をシミュレートし、それらの総体によって宇宙全体をシミュレートします。

たとえば、火災延焼シミュレーションでは、各PCで、時刻t = 1、2、3、…に対して、領地にある家屋のt+1における火災状態を、tにおけるその家屋の周囲のオブジェクト（家屋や消火活動を行うエージェント）から計算します。このとき、各PCにおけるシミュレーションの入力は、割り当てられた範囲および境界線から一定距離にある範囲（のりしろ）に限定できます。これにより、PC間通信は主として境界線付近の情報のやりとり（のりしろ交換）だけですみ、通信量を抑えることで効率的なシミュレーションを行うことが出来ます。

ただし、電話などの長距離通信によってエージェントの行動が影響を受ける場合、エージェントの状態は周囲のオブジェクトの状態からだけでは計算できません。長距離通信を導入するために、宇宙に実空間の座標に依存しないオブジェクトの空間を加え、これをグローバルレイヤと呼びます。通信メッセージがグローバルレイヤから観測可能な特別のりしろにあるオブジェクトと設定すれば、通信などによる遠隔相互作用が、拡張されたのりしろ交換によって扱えます。このような統一的方式を打ち立てておくことで、シミュレーションシステムは今後アドホックな継ぎ足しをせずに拡張することができます。

このような分散シミュレーションを用いることで、3km×4kmの市街地を対象としたシミュレーションにおいて、単独のPCを用いた場合、実現象で1時間のシミュレーションに1時間以上の計算時間がかかっていたものが、22台のPCを用いることで、6分以内の計算時間でシミュレートできるようになりました。

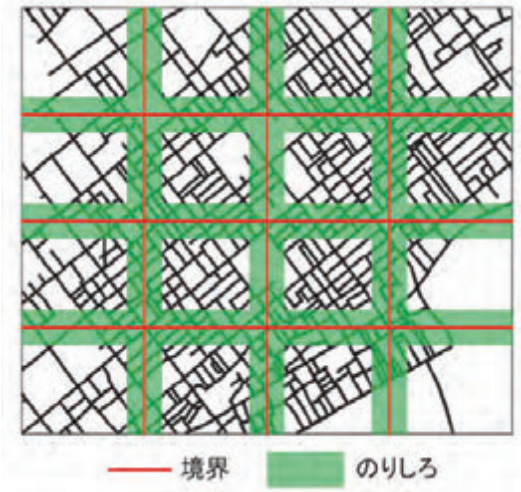


図**2**　領域分割とのりしろ

5.2 エージェントモデル記述ライブラリーとリスクコミュニケーションツール

震災総合シミュレーションは、災害の物理的側面にとどまらず、災害対応行動や市民の挙動とその影響を考慮するマルチエージェントシミュレーションを災害推定サブシステムの災害予測・対応シミュレータ群に取り入れています。本節では、エージェントシミュレーションをサブシステムに統合するために開発を行ったエージェント(**5.1**参照)行動記述システムと、エージェントシミュレーションの結果を利用者に適切に表示するためのビューワの開発、応用について説明します。

(1) エージェントモデル記述ライブラリー

大規模なシミュレーションでは非常に多数のエージェントの行動を適切な精度をもって再現できる必要があります。このため、計算量に考慮しつつ個別の目的をもったエージェントの行動をプログラムし実行する軽量なシステムが必要となります。さらに、多様な自律主体として扱うため柔軟な行動記述が可能で、容易に変更、テストができる必要があります。これらを実現するために、被災時の人間の様々な行動を、例えば「避難する」とか「救助活動を手伝う」などの複数の目的に応じた判断結果と考え、周囲の状況に応じた行動判断の規則を目的別に記述する枠組みを考案しました。

「シナリオ」の構成要素となる部分状況(Part Of SITuation, Posit)に基づいてルールを記述し、このルールを処理する並列シナリオ実行システム(Parallel Scenario Processing System, PSPS)を開発しました。詳細につきましては、大大特成果報告書(1)をご覧ください。

次に示すのは、避難所に移動する際のルールの記述例です。

```
(defrule GotoRefuge
   :condition
    (?know (and
       (world    :time *simulation_cycle)
       (refuge  :id  *ref  :dist  *dist  :cond  (<  *dist
1000))
       (self        :position   *self   :cond   (/=   *ref
*selfid))))
   :activation (/ 100 *simulation_cycle)
   :action        (!move :id *ref))
```

ここでは、「現在位置から1km以内の避難場所を知っていたとして、自分がまだその場所に居ないのであれば、逃げ込む」ということを表しています。 PSPSは、本研究で開発したシステムの前身であるRoboCup Rescueシミュレータに実装され、災害救助シミュレーションの実験において標準市民エージェントとして採用されています。

(2) 市民エージェント

災害予測・対応シミュレータ群に組み込むエージェントプログラムは、APX(Agent Proxy)を介してサブシミュレータのひとつとしてカーネルに接続されます。APXとエージェントプログラムとのやりとりは、AG-API(Agent Application Program Interface)として規定されています。このAG-APIには、簡素な機能しか用意されていませんので、これを補うためのエージェントフレームワークが用意されています。エージェント開発者は、このフレームワークを用いることによって、エージェントとシミュレータの通信、同期といった低レベルな問題から開放されます。また、エージェントの行動をモジュールとして記述できるようになっているため、プログラム構造が簡素化され、再利用性を高めることも可能になり、開発、修正、改良などが容易になるように設計されています。

このフレームワークを用いて、市民エージェントプログラムの雛形として、次に述べる**5.3**の研究で類型化された人の避難行動パターンをもとにして、社会学の知見を取り入れたプログラムを作成しました。図**1**に示す領域で1万エージェントが動くシミュレーションの速度のパフォーマンス測定を行った結果、実時間の10倍ほどの速度で実行できることが確認できました。

(3) さまざまな避難行動シミュレーション実験

マルチエージェントシミュレーションを利用して、さまざまな状況や行動パターンの設定についてシミュレーションを行い、結果を検討、分析することが可能です。ここでは、類型化された人の避難行動パターンの割合を個別に変化させた場合の避難効率に表れる変化についてシミュレーションにより実験した結果を示します。

市民エージェントの数を1,000体とし、3時間経過した後の避難効率を集計して図**2**に示します。グラフの横軸は、各タイプの割合を示し、横軸の値が1の点が全タイプの割合が等しい位置になります。グラフの縦軸は、3時間後に避難完了した人数になります。この実験では、3番目の市民の割合が増えると急激に避難効率が低下するという結果が出ています。3番目の行動タイプは、避難所の知識を持たないにも関わらず、家族を引率して行動するリーダタイプです。

(4) 情報提示技術とリスクコミュニケーション

マルチエージェントシミュレーションの結果を利用者に適切に提示し、対話的にシミュレーションを実施することがシステムを応用するにあたって必要です。そこでいくつかの利用場面を想定し、災害情報の最適な提示技術、ならびに人間との対話技術に関する検討と開発を行ってきました。ここでは、そのうちのリスクコミュニケーションへの応用について説明します。

科学技術を含めてあらゆる事象には利便性と危険性が含まれています。したがって、その災害や科学技術による危険性から市民を守るため、情報の所有者である行政や企業は事象の持つ利便性と危険性を市民に伝えて、

ともに対応について考える必要があります。このようにリスクはリスクとして公正に伝えて、関係者が認識を共有することがリスクコミュニケーションです。マルチエージェントシミュレーションをこのリスクコミュニケーションに利用することを想定して、プロトタイプシステム、情報提示ソフトウェア(図**3**)を構築しました。この情報提示ソフトウェアは、大規模なシミュレーションデータを通常のパソコン上で多様な情報提示形態で表示できるように工夫がされています。

また、実際にリスクコミュニケーションの場を設けてアンケートを実施しました。実施概要を以下に示します。最初のリスクコミュニケーションの試みであったため、一般市民ではなく、消防団員を対象として実験を行いました。

名称:都市近郊の村の消防団班長研修会
日時:平成 17 年 12 月 5 日(日)
14:15－15:45
場所:岩手県盛岡市近郊

リスクコミュニケーションでは、震災時の火災について、住民による初期消火が行われた場合と行われなかった場合について、村の一部の地区のデータを用いてシミュレーションをした結果を見てもらいました。そして、リスクコミュニケーションの効果検証のために、実施直後に参加者全員を対象にアンケートを行いました。

説明がわかりやすかったか、相互救助の大切さがわかったか、といった設問に対して、8割以上の肯定的な解答が得られました(図**4**)。また、シミュレーション結果を定量的に示すことへの効果を測定するための質問と、視覚的効果の有効性を測定するための質問に関しても、8割以上が有効であると答えています(図**5**)。

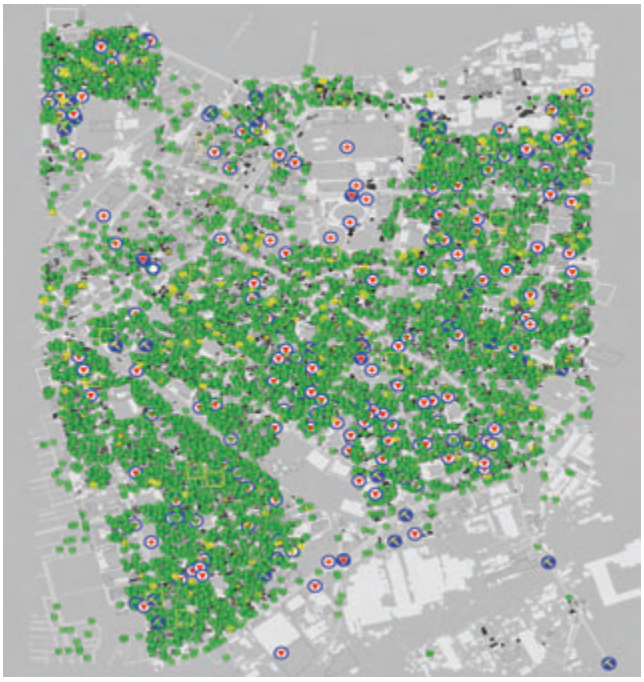


図**1** モデル市街地の地図(3kmx4km)上での市民エージェント10,000体による避難シミュレーション

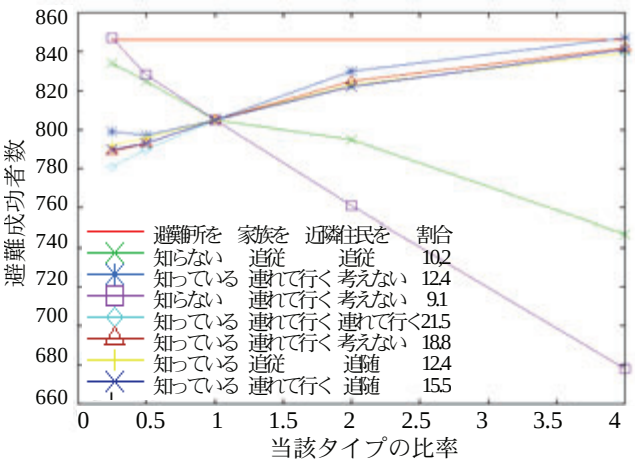


図**2** 各行動タイプの割合の変化と避難効率への影響

図**3** 情報提示ソフトウェア

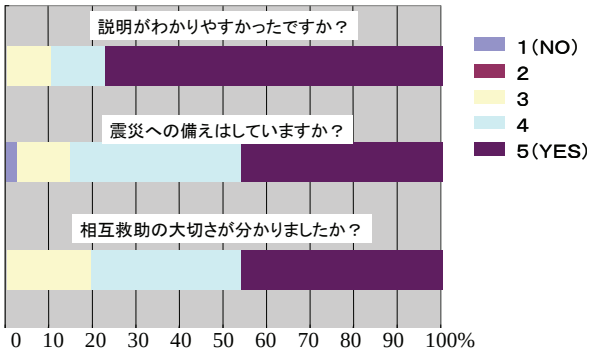


図**4** リスクコミュニケーション後のアンケート結果(1)

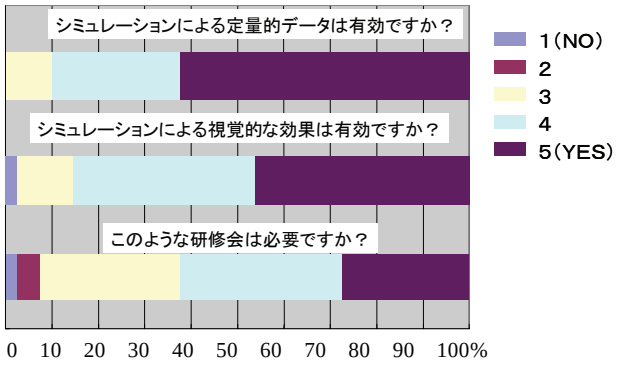


図**5** リスクコミュニケーション後のアンケート結果(2)

5.3 マルチエージェントシミュレーションの適用

本課題では、震災時の避難行動をマルチエージェントシミュレーションで追跡することで、震災時の避難の問題点、対策効果などを指摘できるシステムの構築を目的としました。マルチエージェントシミュレーションを構築するツールとしは市販のMAS（Multi Agent Simulator）【http://mas.kke.co.jp/】を利用しました。ビジュアルベーシック（VB）に準拠した言語をベースにしているので、容易に条件設定などのプログラム開発が行えます。ここでは、津波からの避難シミュレーションと震災時における自動車避難行動のシミュレーションについて述べます。

(1) 津波からの避難シミュレーション

1) モデルの構築

広い範囲を効率よくシミュレートできるノード・リンクシステムでモデル化しました。人エージェントのルールはより標高の高いノードを目指すという単純なルールとし、移動速度は個人の年齢・性別により異なる分布性状を用意し乱数で個人別に与えました。道路を移動する際の速度は道路の勾配、幅員、混雑度により変化させています。避難開始までの時間も分布形で与え乱数により個人別に与えました。

2) 奥尻島青苗地区への適用と検証

1993年北海道南西沖地震の際の最大の被災地となった奥尻島青苗地区を選び、津波からの住民避難シミュレーションを行いました。図**1**にシミュレーション画面を示します。ノード（交差点）とそれを結ぶリンク(道路）上をエージェント(人)が移動し灰色部分の高台に避難します。人エージェントの初期位置は簡略化のため個別の住居ではなく最寄のノードに置きました。避難開始時刻の分布については1993年北海道南西沖地震の際の避難に関する実態調査資料を基に設定しました。図**1**の画面では、赤点が避難行動を開始していない人、青点が移動中の人、緑点が避難を完了した人を表しています。右上の図は地震発生から5分後の状況です。左端の青苗5区では1982年日本海中部地震の体験もあり全員が避難を開始しています。しかし、図中に楕円で示したように青点の移動中の人が多数いて、地震後約5分で津波が襲来していますからこれらの人は助かりません。図**2**は実態調査結果と比較したものです。左図の要避難時間はほぼ再現できています。右図は各区での津波到達時間から死亡・行方不明率を比較したもので、よい一致を示しています。

3) 低平地での建物避難

一般に海岸平野に位置する都市では背後に高台がない場合が多く、堅牢な建物への避難が考えられます。避難ビルへの避難を考えたモデルに拡張し、釧路市をモデルにシミュレーションを行いました。対象とした釧路市中心部は釧路駅南側に広がる低平地で、青苗の場合のような高台避難が行えません。川の南側（橋南地区）の背後には高台がありますが川を横切っての避難は津波からの避難の大原則に反します。釧路市では学校などの公共施設のほか、民間の高層ホテルと協定を結び津波発生時の緊急一時避難所としています。

ケーススタデイとして、①津波避難施設がなく内陸への避難を行った場合、②現在指定されている学校、協定ホテルを利用した場合、③さらに利用できる避難施設を追加した場合、の3ケースについてシミュレーションを行いました。図**3**にケース①、③の場合のシミュレーション画面を示します。ケース①（左図）では避難経路が鉄道線路越えの2ヶ所しかないため避難に多くの時間を要しています。ケース③は利用できる施設を最大限使った場合で避難が早くなっている様子が伺えます。

以上の適用例ではシステム構築の段階で出来るかぎり単純なエージェントルールを採用し、多数のエージェント（約5,000名）の行動を追跡できるようにしました。観光客など外来者の考慮、避難のための標識など避難誘導の効果の評価も容易に導入できます。個別の都市の実情に合わせ活用していくことが可能です。

(2) 自動車による避難行動のシミュレーション

1) モデルの構築

震災により道路閉塞が発生した状況下での自動車による避難行動のモデル化では、渋滞に巻き込まれた際に、渋滞の車列に入ってからどの程度の時間でUターン、もしくは別の経路を選択するか、の設定が重要です。そこで、アンケートによる意識調査を行い、運転者の年齢と渋滞回避開始時間によって自動車エージェント属性を類型化し、モデルに導入しました。走行速度については車間距離が短くなると速度を落とし、前方車を追い抜く事はないとしました。また交差点ではFirst-in First-outを原則とし、直進・右左折の3通りの選択確率は初期値により与え、その初期確率と1Step毎に発生する乱数によりエージェントは進行方向を決めこととしました。

2) シミュレーションによりモデルの検証

図**4**に示す簡単なモデルで道路途絶の有無の影響をシミュレーションで比較しました。本モデルにおいて自動車は信号機(ノードに設定)等の情報を得ながら常に行動を変えていきます。図**5**は道路途絶がある場合とない場合の年齢別平均速度を示しています。どの年代においても途絶のない場合の方が平均速度が高くなっています。

また、図**6**は歩行者・自動車が交錯する場合をシミュレーションしたモデルの一例です。歩行者が交差点内にいる場合は自動車が止まるルールを適用しています。歩行者と自動車がシミュレーション領域から出た段階で避難を完了した事になりますが、途絶区間と交差点部における歩行者と自動車の交錯による相乗的な影響から、混雑状況がますます悪化する結果がシミュレーションで再現できました。

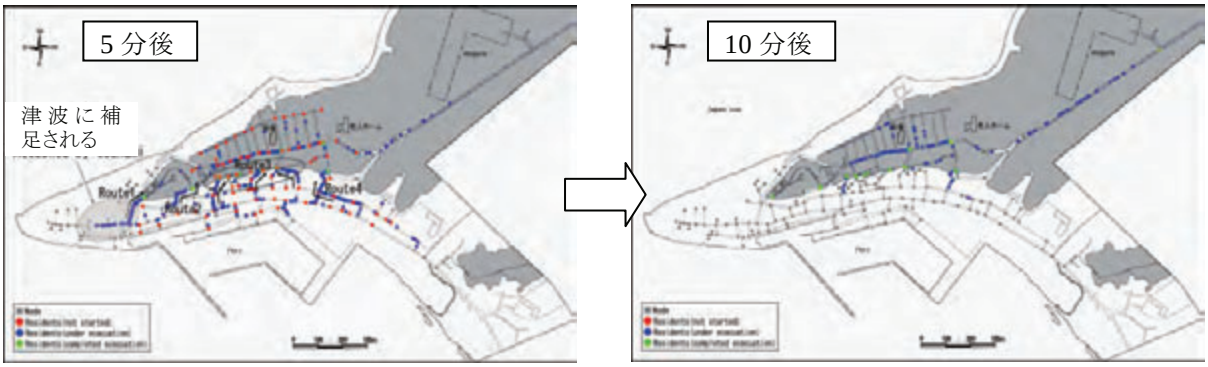


図 **1** 1993 年北海道南西沖地震を再現したシミュレーションの実行画面

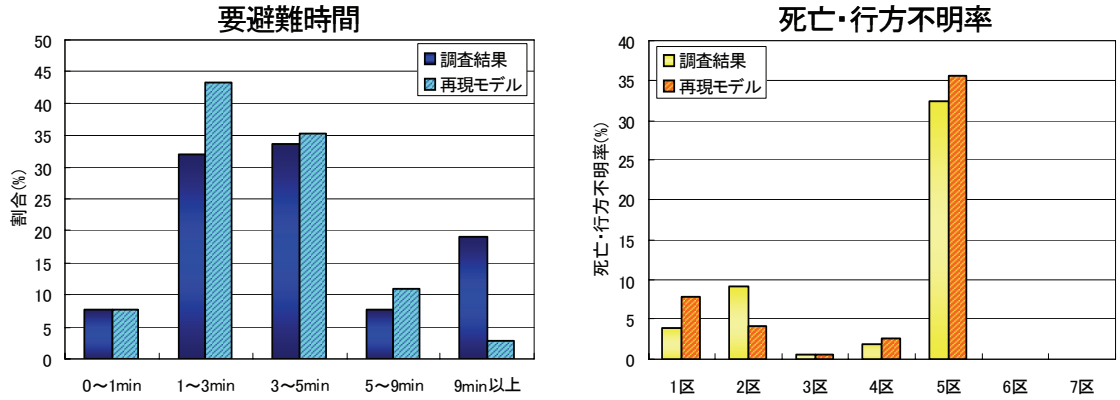
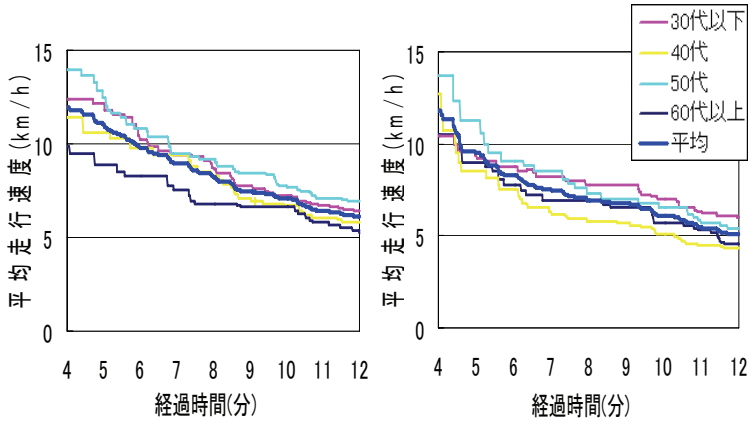


図 **2** 1993 年地震の際の避難行動アンケート調査結果との比較

図 **3** 釧路市中心部のシミュレーション画面 15 分後
（左ケース①、右ケース③）

図 **4** シミュレーション画面



平均走行速度(途絶なし)　　平均走行速度(途絶あり)

図 **5** 類型別に見た途絶の有無による平均走行速度

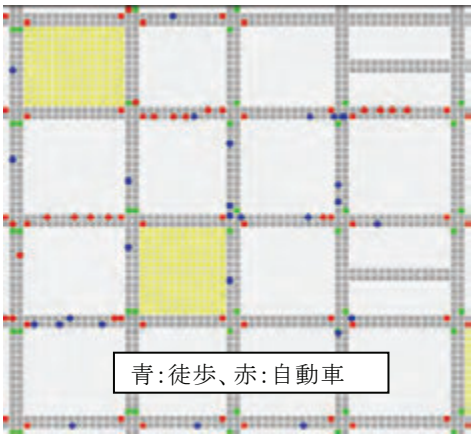


図 **6** 歩行者と自動車が混在するシミュレーション

6. シミュレーション技術の事前対策への適用

6.1 南関東50万都市への適用

震災総合シミュレーションシステムの成果適用の試験フィールドとして南関東の人口50万人クラスの自治体の意向調査を行い、川崎ラボラトリーは平成16年6月に横須賀市と共同研究協定書を取り交わしました。協定書には3ケ年の目標として以下が掲げられています。

1) 平成16年度:資料収集と詳細震度マップの作成
2) 平成17年度:詳細震度マップに基づく被害想定マップ作成と地域防災計画への反映
3) 平成18年度:システムのオンライン化実験と持続的に使用可能なシステムの検討

業務は、上記に沿って実施されました。まず、震災総合シミュレーションシステムを適用するためのデータ整備を行い、次に被害推定サブシステムの機能を活用して、横須賀市で被害が予想される3地震に対する震度マップを作成、最後に、震度マップと整備したデータに基づき、各種の地震ハザードマップを作成しました。

上記の成果は、平成16～17年度横須賀市消防局が改訂を行った地震災害対策計画編において、地域防災計画の前提となる被害想定として採用されました。また、震度マップは、平成19年2月27日より横須賀市ホームページ「よこすかわが街ガイド」で広く公開されています。

横須賀市を対象として構築した震災総合シミュレーションシステムは、平成18年12月12日より平成19年1月31日までの1ヶ月半余りの間、横須賀市市民安全課などでの試用に供しました。

(1) データの整備

震度マップ作成するために、50mメッシュ地震応答解析用地盤データベースを構築しました。そのために、横須賀市から提供を受けた約4,000地点のボーリング資料のデジタル化を行いました。一方、航空写真判読・旧版地形図などに基づき、50mメッシュ約4万個で構成される詳細地形・地盤分類図を作成し、ボーリングデータがないメッシュを補間するためのデータとしました。

被害推定に必要な各種データの提供を横須賀市より受け、震災総合シミュレーションシステムで実行可能な形式のデータの構築を行いました。横須賀市は10の行政地区に分けられており、各種データを、50mメッシュ→町丁目単位→行政地区単位という集計を行えるようにデータを整備しました。

(2) 地震動分布の評価

想定地震としては、平成3～5年度に横須賀市が行った被害想定などを参考にして、①三浦半島断層群地震、②関東地震、③東海地震としました。 **(1)**で述べた地盤モデルを用いて一次元等価線形解析を行い、50mメッシュでの地震動分布推定を行いました。推定した地震動指標は、最大加速度、最大速度、計測震度、SI値、加速度応答スペクトル(減衰5%)であり、後述の被害推定にはそれぞれ最も適した指標を使っています。図**1**に、想定地震に対する震度分布を示します。横須賀市では3つの地震の中で、三浦半島断層群地震による震度が最も大きく、ついで関東地震、東海地震の順であり、東海地震では一部の埋立地などを除いて震度5弱以下にとどまり、横須賀市への影響は比較的小さいことがわかりました。

(3) 想定地震の地震動分布に基づく被害想定

(2)で述べた地震動分布を用いて、以下の項目について被害推定を行いました。推定手法については、「2. 被害推定サブシステム」で詳しく述べています。

① 液状化危険度
② 建物被害
③ 火災延焼被害
④ 人的被害(死者数、負傷者数、避難者数)
⑤ 上水道被害
⑥ 急傾斜地崩壊危険度
⑦ 急傾斜地崩壊による道路閉塞。

図**2**に、三浦半島断層群地震で想定される①～⑥の被害分布を示します。

(4) 震災総合シミュレーションシステム試用版構築と評価

横須賀市を対象として構築した震災総合シミュレーションシステムの試用版をインストールしたパソコンを平成18年12月12日より平成19年度1月31日までの間、横須賀市市民安全課に設置し、市民安全課のみならず防災関連部署でシステムの試用に供しました。このシステムには、①地震動(50mメッシュ)、②液状化推定(50mメッシュ)、③人的被害(町丁目)、④建物被害(町丁目)、⑤火災被害(町丁目)、⑥斜面崩壊による道路閉塞の推定機能、を実装しています。

システムを試用した市役所職員からは以下のような感想が寄せられた。

・膨大な情報が入力されているようで、それに基づく非常に精密な被害予想には驚かされた。レベル的には非常に高いシステムである。
・ 災害が起きた時、このシステムに実際の被害状況を入力できる機能があれば活用範囲が広がる。
(実被害収集サブシステムと災害対応支援巣不システムは試用に供しなかった。)
・災害時は情報の取捨が大きなウエイトを占めるが、シミュレーションの被害予測に基づいて災害対応をするこ

とは難しく、確実な情報に頼ることになる。このシステムは計画作成を行う段階までの活用と考えた方がいい。

・一つの自治体だけで活用するのは勿体ない。広域のエリアで使用すべきである。実際に災害が起きたときには、自分のところは目の前の対応で精一杯である。しかし、少し離れた位置にいれば「被災地はどんな被害状況か？を把握するために、冷静な立場でシミュレーションができ、応援の体制を整えるのにも参考になる。

・自治体の日常業務では実務的でない。

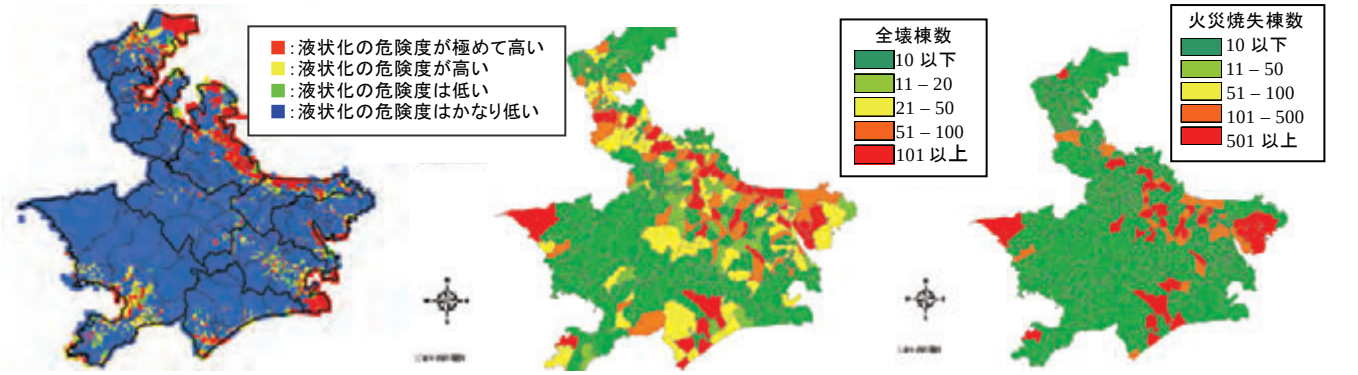
・アフターメンテナンス体制がないと使用するのは不安。

(5) まとめ

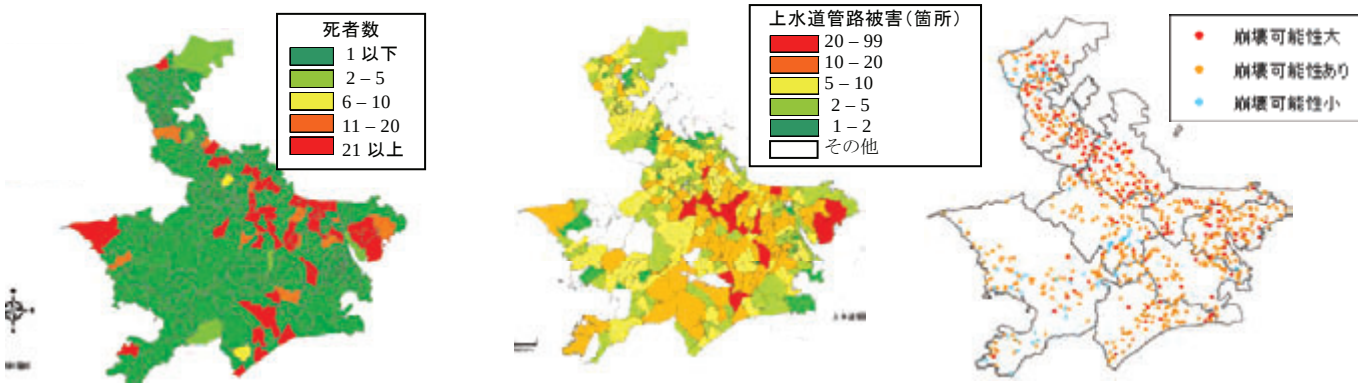
横須賀市システムは、災害直後に推定被害情報を提供することにより自治体防災担当者の判断を支援すると共に、平常時には、任意の地震を想定して簡便に被害の大きさや分布を見積もることができ事前対策強化に利活用できます。システムの試用期間中、幸い横須賀市被害を生ずるような地震は発生せず、災害対応支援への検証はできませんでしたが、事前対策への適用として、被害想定結果の地域防災計画への反映、震度マップの市民への公表などを通じて地域防災力向上に資することができました。

(a) 三浦半島断層群地震　(b) 関東地震　(c) 東海地震

図**1**　想定地震による震度分布



(a) 液状化　(b) 木造建物全壊棟数　(c) 焼失棟数（冬18時）



(d) 死者数の分布（冬18時）　(e) 上水道被害　(f) 急傾斜地崩壊

図**2**　三浦半島断層群地震による各種被害想定結果

6.2 住宅耐震診断スシステムへの適用

震災総合シミュレーションシステムで開発した50mメッシュでの震度予測機能を活用して、住民が居住する木造戸建住宅の住所と基本的な構造データを自ら入力することで危険性を知ることができ、さらに耐震補強の簡単な方針を示すシステムを構築しました。このシステムをインターネットでアクセスできるようにし、多くの住民が手軽に自宅を耐震診断できる仕組みを提案しました。

(1) 背景とシステムの概要

地震災害を軽減するためには個々の建物の耐震性を高めることが最も基本的かつ根本的な対策です。現在、多くの自治体で住宅の耐震診断を無料で実施できるようにしたり、補強工事に補助金を出したりする支援策が取られていますが、耐震性に欠ける古い住宅の補強さえなかなか進まないのが現実です。これには、古い住宅に住む人は経済的にも心情的にも行動を起こし辛い高齢者が多いという事情もあります。しかし、地震の時の自宅の危険性と補強方法・費用を客観的な根拠に基づいて簡便かつ具体的に示すことができれば、住民が行動を起こす動機付けとなり、また、悪徳業者に対する不安の除去にも役立つと思われます。

そこで、インターネットによってWebページにアクセスすることにより、住民が自宅の危険性や補強方法について情報を得ることができる住宅耐震診断システムを開発しました。すなわち、①住民が自宅の基本的な構造を入力することによってその住宅（木造）の構造的な耐震性を診断し、次に、②震災総合シミュレーションシステムの被害推定サブシステムの成果の一部である詳細な震度予測機能を活用して、住民が住所と想定する地震（デフォルトは直下地震）を入力することによって自宅の敷地の揺れと、それを受けた場合の住宅の予想被害と住人のけがの程度を評価し、さらに、③復旧に要する時間と費用を概算し、最後に、④耐震性の診断結果から弱点となっている構造部分の一般的な耐震補強方法を提示します。

木造住宅の耐震診断法は平成16年7月から診断基準が改正されています。簡易診断法は簡便ですが診断結果の精度は高いといえないのに対し、一般診断法は診断精度が高いといえますが、診断項目の多くは専門家の知識を要する内容となっており、住民が気軽に利用するには難しいものです。これまで、インターネットによる耐震診断システムはいくつか存在しましたが、いずれも簡易診断です。そこで、精度としては一般診断法のレベルを持たせつつ、診断項目の選択肢をある程度集約し内容を図解することによって、一般住民でも容易に操作できて診断結果が自動計算されるシステムを構築しました。

(2) システムの構成

図**1**に本システムの構成を示します。①耐震性の診断を（財）日本建築防災協会発行の「木造住宅の耐震診断と補強方法」（平成16年）の一般診断法に基づいて必要耐力Qrと保有する耐力Pdを求め、両者の大小関係から大地震による倒壊の可能性の大きさを判定します。建物の構造データは、システムの利用者が選択式の設問に答える形で直接入力します。一通り入力が完了すると、耐震性の評点と一般的な倒壊可能性が算出されます。

②その評点に従って損傷度を算出するための損傷度関数を決定します。損傷度関数とは、木造建物の耐震診断評点（旧精密診断）をパラメータにして地震動強さ（最大速度）と損傷度との関係を関数として表したグラフのことです。ここでは、岡田らの提案する損傷度関数(2004)と田端・大橋の論文による新・旧耐震診断の評点の換算式(2006)に基づいて、新評点から旧評点へ換算された値に基づいて損傷度関数を決定しています。次に、被害推定サブシステムで計算された50mメッシュ単位の想定地震動の最大速度を損傷度関数に代入して損傷度を算出し、さらに損傷度に該当する被害ランクを求めます。人的被害に関しては、宮野らの論文(2001)に基づいて、建物のダメージインデックス（DI）と人的被害の関係を使っています。

③に関しては、国内に十分な分析データが蓄積されていないことから、米国のATC-13の評価結果を利用しています。ここで、岡田らが提案するダメージインデックス（DI）とATC-13の損失率との関係を定義する必要があります。DIが0.6以上（全壊）ならば復旧困難であると判断されますので、損失率=100％とし、DIが0.4（一部損壊の上限）ならば損失率は20％とみなして関係付けました。

④補強対策の選択では、耐震診断で評価の低い構造部分を選び出し、それを改善項目として示します。

代表的な4画面を図**2**に示します。本システムの特長は、50mメッシュ単位で地盤の揺れ易さを評価して想定した地震動を使い、精度の高い一般診断法によって被害ランクを評価している点、復旧に関する目安や補強のポイントを示している点、等です。一方、地盤のデーターベースや町丁目データを使うため、現状ではテストフィールドとしてそれらのデータを用意した川崎市に限られます。

(3) システムを利用した方の意見

本システムを川崎ラボラトリー関係者で川崎市内の居住者とNPO東京命のポータルサイトの有志に試験使用してもらいました。その結果、約5名から以下の意見が寄せられました。

①細かい住所で自宅が特定されるので、現実感がある。
②屋根や壁などのパラメータ入力を補助するイラストが丁寧に入っているので入力しやすい。
③リスクが具体的に示され、補強方法についてもガイドが示されるのは大変良い。
④どのような基準や根拠に基づいて判定されているか、説明するページが有るべきである。
⑤実際に耐震補強が必要な家に住んでいる人は高齢者

が多く、その多くはこのようなシステムを使えないと思われる。そこで、市の職員やボランティアのほか、学校の課外活動の一環として学生にサポートしてもらう取り組みが出来るとよい。

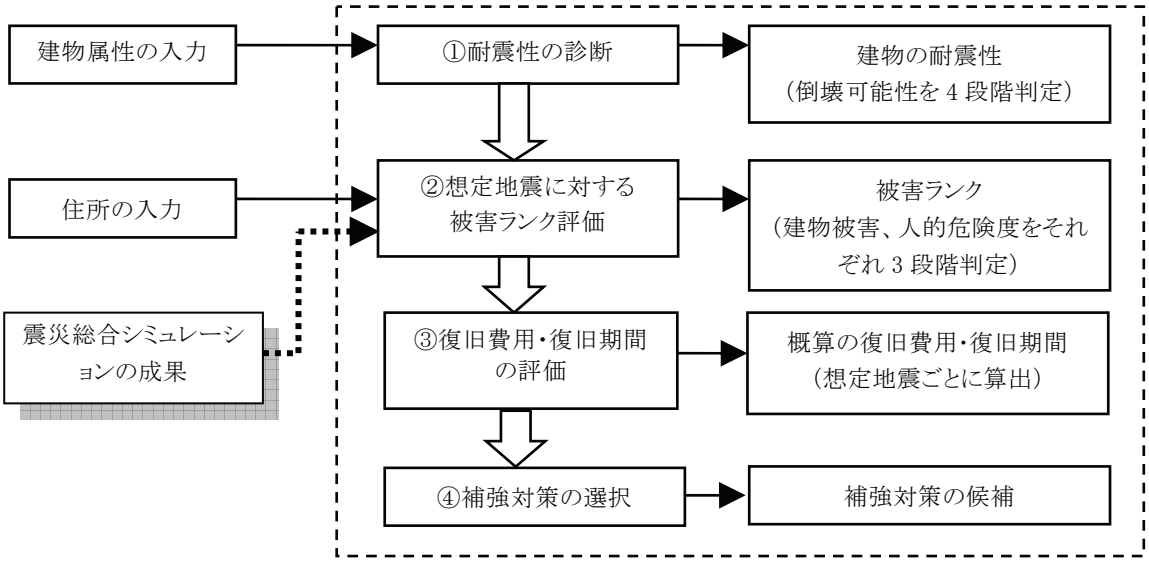


図 **1**　木造建物の総合的地震リスク診断システムの構成

(a)住所入力

(b)屋根の種類選択

(c)耐震診断結果の表示

(d)補強対策の提示

図 **2**　建物耐震診断の画面例

7. 自治体への適用研究

震災総合シミュレーションシステムを構成する二つのシステムの内の自治体情報システムは、亀田らが提唱した平常時と災害時をシームレスな地域管理業務としてとらえるリスク対応型地域管理情報システム（RARMIS）の概念に基づいて構築しています。この自治体情報システムを専門的な機能とスタッフで支援し、必要な場合はバックアップの機能も果たすのが防災情報センターシステムです。

7.1 日常業務と連係するシステムのための基盤技術

(1) RARMIS概念と自治体情報システム

平常業務と連続した自治体情報システムの一般的な設計方針を以下の様に整理しました。

① このシステムを自治体が住民記録、固定資産管理などの日常業務にも使用する。これにより、運用・保守のコスト低減を図り、部局間の共用をはかって情報システム構築の投資を抑制する。そのため、部局間における汎用・共通の機能を分析・抽出し提供する。

② データベースとして時空間型を用い、平常時に更新維持された地域管理のデータと時々刻々変化する災害時のデータとを時間的に区分しながら重畳し、必要に応じて表示して自治体の意志決定を支援する。

③ 自治体職員が操作できる使い勝手を提供する。

④ 被害の及ばない遠隔地にバックアップセンターを設定し、自治体データをバックアップする。

⑤ 地域外の防災情報センターから詳細被害推定や広域モニタリングなどの支援を受ける機能を用意する。

⑥ 自律分散的な自治体データの保全により、発災直後における自治体情報システムの再稼働を支援する。

(2) 自律分散とデータのバックアップセンター

多くの自治体情報システムがサーバー中心のシステム形態を取っていますが、被災自治体では情報システムもハード的なダメージを受けてしまいます。集中的なデータ管理によっていると、LANやサーバーが破損しただけで貴重なデータが使用出来なくなります。そのため、自治体情報システムでは、時空間標準データ構造を用いた自律分散によるデータ保全の機能を提供することとしました(図**1**)。これにより、平常時は各部局がその業務に必要なデータだけを管理し当該部局の長が認めたデータだけを他の部局に公開することができますので、データの管理が自治体の業務特性に合致するものとなります。また、被災時には、生き残った僅かなパソコンから自治体のデータを復元することもできます。

加えて、大震災等により全てのコンピュータシステムが壊滅した場合を想定して、平常時からバックアップをとることとしました。バックアップセンターは、同時に壊滅しないよう十分遠い場所に置きます。自治体の情報システムが壊滅した場合、バックアップセンターは、被災自治体を情報面から支援する防災情報センターのような特定の相手に対してだけ読み出しを許可します。

(3) 三重県地震防災システムへの適用研究

RARMISの概念である平常時と災害時の連続性、公開形式のデータベースの合理性、自治体が導入・運用しやすい経済性が次代の防災情報システムの要件として三重県に評価されました。そこで、防災科学技術研究所は三重県庁、三重大学との共同研究に参加し、RARMIS概念に基づくシステムの適用研究を行っています。

まず、県防災と三重県県下パイロット自治体（鳥羽市他）に緊急地震速報利用システムを導入しました。続いて、三重県の県防災を「防災情報センター」に位置付けて、自治体情報システムと連動する防災情報センターの基盤システムを構築しました。ここでは、緊急地震速報の利用だけでなく、県の地震計ネットの利用、自治体で収集する被災データの情報共有を含めています。

この基盤システムは**4**つのサブシステムからなります。すなわち、①震源情報や地震波形データ等の地震情報を収集する機能と自治体からの実被害情報等を収集する機能と自治体や災害対応機関に被害情報を伝達する機能を持つ情報伝達サブシステム、②シミュレータ群のタスク管理と防災情報センターの全体制御を行う制御サブシステム、③被害推定シミュレーションを行う被害推定サブシステム、④被害推定結果や実被害情報を集計し上位機関のフォーマットに準拠したデータを作成する被害集計サブシステムです。

図**2**に示すように、震災時において県災害対策本部では市町村を含む各種機関との情報連携が求められます。開発システムは、既存の通信環境と地方公共団体広域ネットワーク（LG1）を活かした効果的な情報連携を目指しました。また、既存システムとの連携を目指しています。

防災情報センターシステムには、防災科学技術研究所が整備した全国統合時空間データベースとGOM (三重GISオリジナルマップ)データから作成した公開型データ構造の基盤データベースを整備しました。地震被害推定システムはこの基盤データベースと既存の震度情報ネットワークシステムから得られる県内の震度データを利用します。

さらに、自治体での日常業務とシームレスな災害対応を実現する枠組みとして、防災情報センターと自治体情報システムの連携を構築しました。自治体情報システムには、災害対策本部、避難所、被災現場の各モードを今後随時構築する予定です。例えば、災害対策本部モードでは、防災情報センターから得られる地震動推定結果と自治体が保有する個別家屋

データから建物一棟毎の被害推定を行います。また、時々刻々変化する被害情報を時空間データとして管理し、個別値・集計値を防災情報センターシステムに送ることで県と自治体の双方向情報伝達と情報共有を実現します。

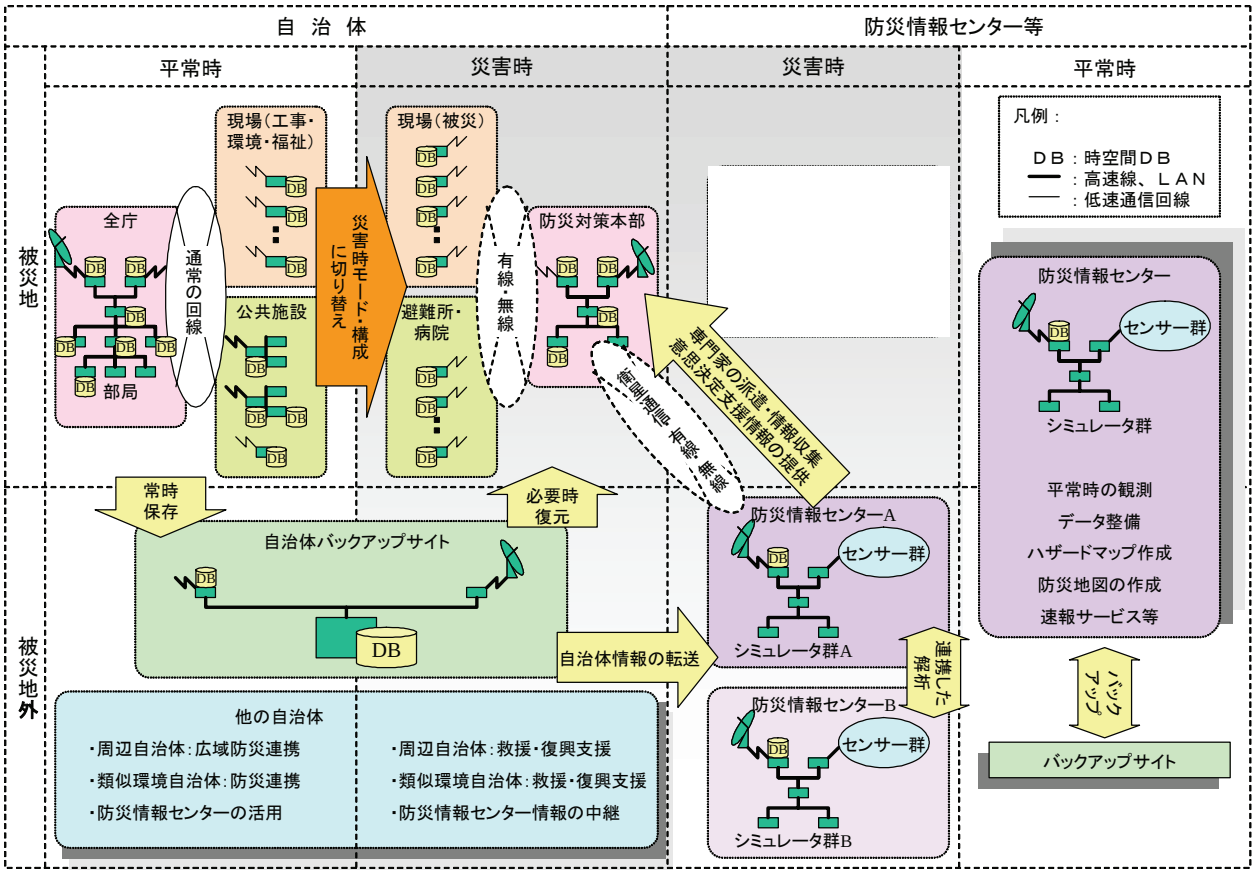


図 **1**　平常業務と連動した自治体情報システムと防災情報センターの位置付け

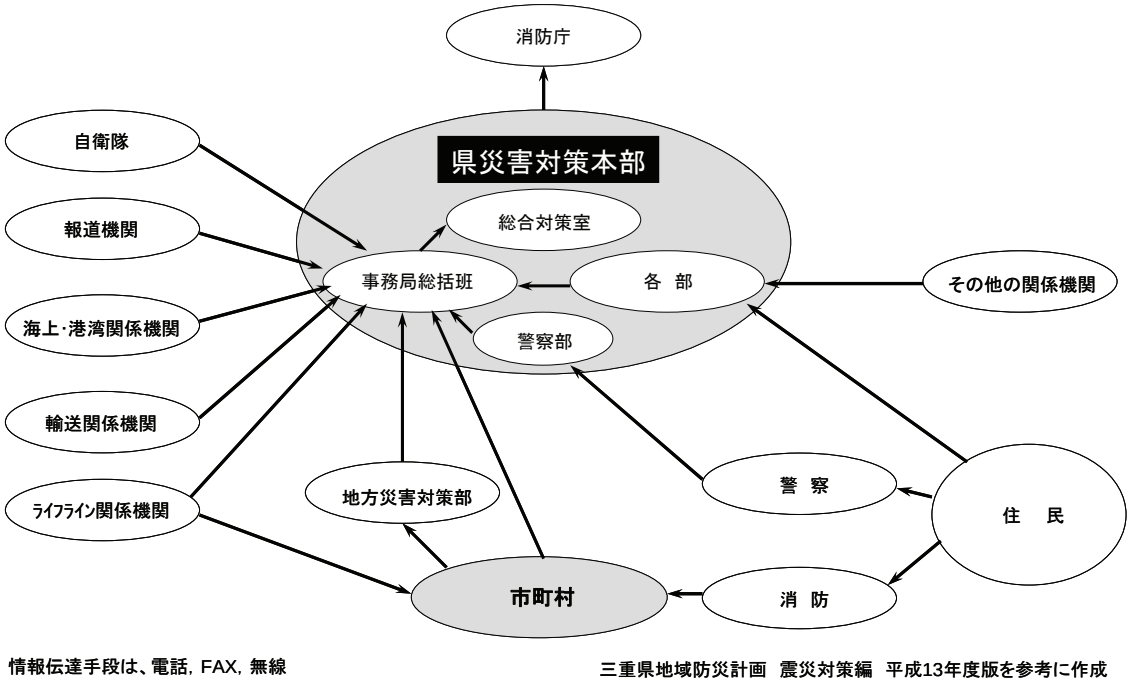


図 **2**　震災時の情報連携

7.2 リスク対応型地域管理情報システムの実践

本研究では、自治体情報システムとしての全庁統合型時空間GISを対象に、準備・計画段階から導入・運用に至るプロセスの在り方と留意点を、自治体での実践を通して明らかにします。平常時の地域管理業務を通じ、災害時に必要な地域情報が準備される仕組みも重視しました。

(1) 準備

1)マインドセット

全庁統合型時空間GISを導入することは、行政業務全般における費用対効果と住民サービスの向上を同時に解決する手段として位置づけるべきです。導入にあたっては、以下の心構え（マインドセット）が必要です。

① 紙媒体処理にある利点は全て満たし、欠点は克服
② 自治体側が主体性を持った導入と運用
③ データの維持更新と蓄積を継続、次世代に引継ぎ

2)基礎調査

導入計画立案に先立ち、庁内の全業務に対しアンケートを行いました。その結果を基に、時空間GISを利用した際の効果（省力化やサービス向上等）を、業務毎のヒアリング調査により評価しました。

次に、全庁統合型時空間GISの構築と運用の体制を検討するため、自治体職員との共同作業のもと各部署のニーズとシーズを精査しました。その結果に基づき、データの維持更新体制の原則を次のように定めました。

①各対象物において、最新情報の必要性と必要精度を答えてもらう。
②原則として最新で且つ高精度な情報を必要とする部署を更新担当とする。
③情報源提供担当部署を選び、更新担当部署にデータを渡すルールを設ける。

3)プロジェクトチーム

由利本荘市（旧本荘市）では、常に企画調整課（平成14年～16年は総合政策課）が先頭に立って推進してきました。これまでの5年間に、職員の異動によって全てが振り出しに戻った事は有りません。RARMIS理念に共感し、その具現化が地域社会に恩恵をもたらすとの理解のもとで上司と部下が一体となって推進してきたからです。

(2) 計画

1) 共用時空間データ

全庁統合型時空間GISのデータを単年度で整備すると財政的な負担が大きくなります。そこで、複数年度で段階を踏んで整備するのが現実的です。一方、需要の大きいデータから漸次整備し、データを初年度から活用できるようにすべきです（図 **1**）。由利本荘市の場合，平常時よりも災害時の視点から，次の 3 段階に分けて，整備するデータの優先順位を選定しました。

①「人口密度の最も高い所」「発災後数日間のいわゆる混乱期に利用する情報」
②「人口密度の比較的低い所」「発災後数週間のいわゆる初動期に利用する情報」
③「人口密度の低い所」「その他」

2) 共通アプリケーション

RARMIS理念の一つである自律分散型システムを実現するには、共通アプリケーションが全職員のパソコンにインストールされる必要があります。ここに、共通アプリケーションとは全ての部署で必要なものか、一部の部署のみであるがその部署の総ての職員が必要なものです。本研究では、パイロット版アプリケーションを作成し、自治体職員に使用してもらい、改良意見を収集しました。

3) ユーザビリティ検討会

パイロット版の試用だけでは実務利用の使い勝手を完全に評価する事が難しいため、ユーザビリティ検討会を設け「消防水利の管理」「道路占用物の管理」他6業務と「災害時の情報処理」のペーパプロトタイプを作成し、実務担当者も交えて検討と改良を加えました**(**写真**1)**。

(3) 導入

委託業者選定はプロポーザル入札で行われ、業者の選定はRARMIS理念の実現性、設計協議とサポート能力を重視しておこなわれました。

(4) 運用

1) 平常時

平常時の運用では時空間データの維持更新が課題です。**(1)**の**2)**の方針に基づきますが**(**図**2)**、維持更新の体制は、運用しながら再調整されていくことになります。

2) 災害時

自治体職員との議論の結果、災害時に最も問題になる事として、組織間の迅速な情報連携が上げられました。災害時は、平常時と異なり、職員はパソコンを操作している時間が取れなくなります。そこで、中央のシステムによる末端からのデータの取得を、平常時は末端からのPUSH（送信）を基本とするのに対し、災害時は中央からのPOP（取りに行く）を基本とすることにしました**(**図**3)**。

(5) 配信

WebGISは、多くの自治体が導入していますが、市民の生活に浸透していない場合が少なくありません。由利本荘市では安易な一般市民向けWebGISの導入は避け、将来的な展開の可能性は残しつつも、現時点では印刷物を配る方法に留めています。一方で、時空間GISのWeb配信を試作しており、Webブラウザ上で、特別なプラグインソフトを必要とすることなく、時空間情報の閲覧を行えます。技術的には入力操作も可能です。

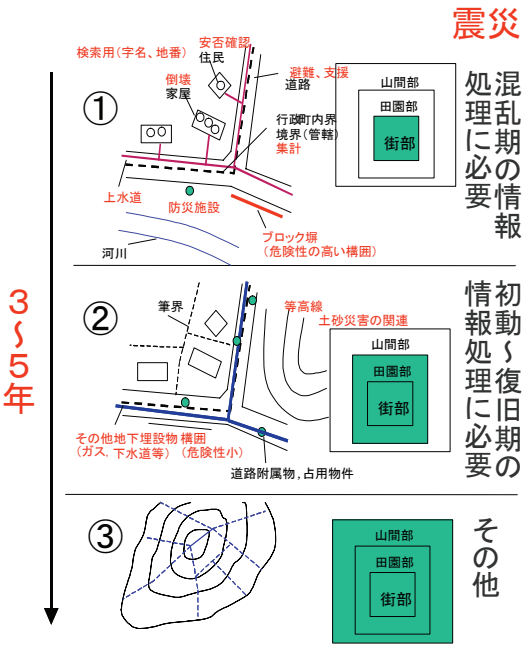


図 **1** 時空間共用データ段階的構築の考え方の例

写真 **1** ペーパープロトタイプの例

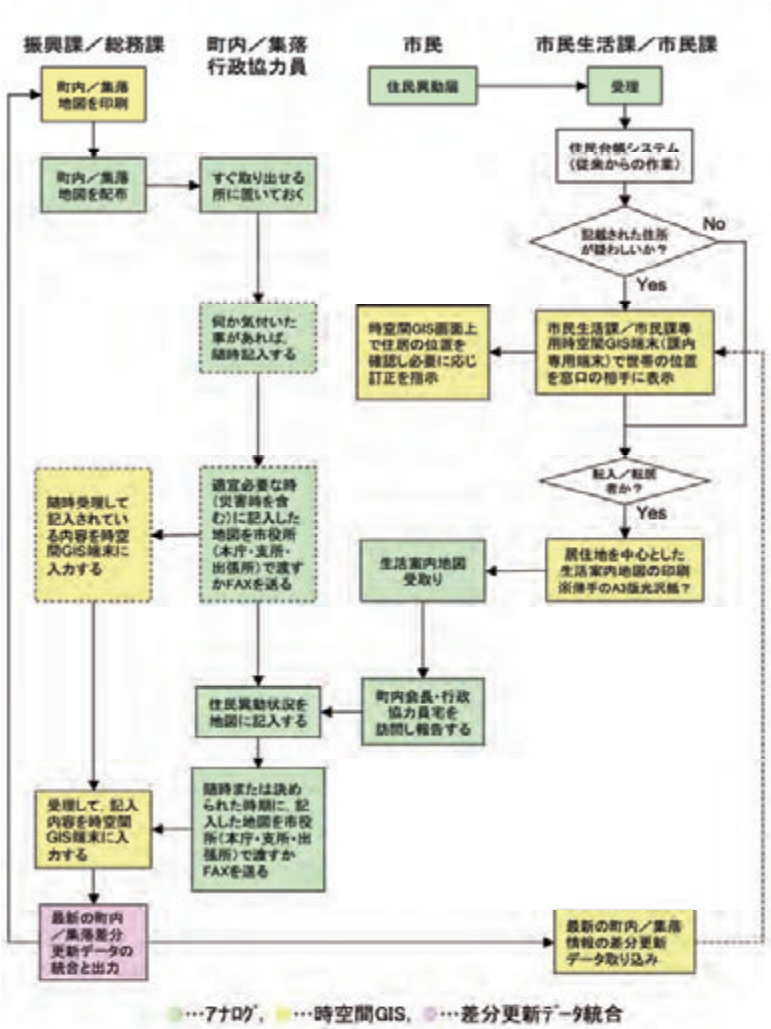


図 **2** 住民データ維持更新体制の案

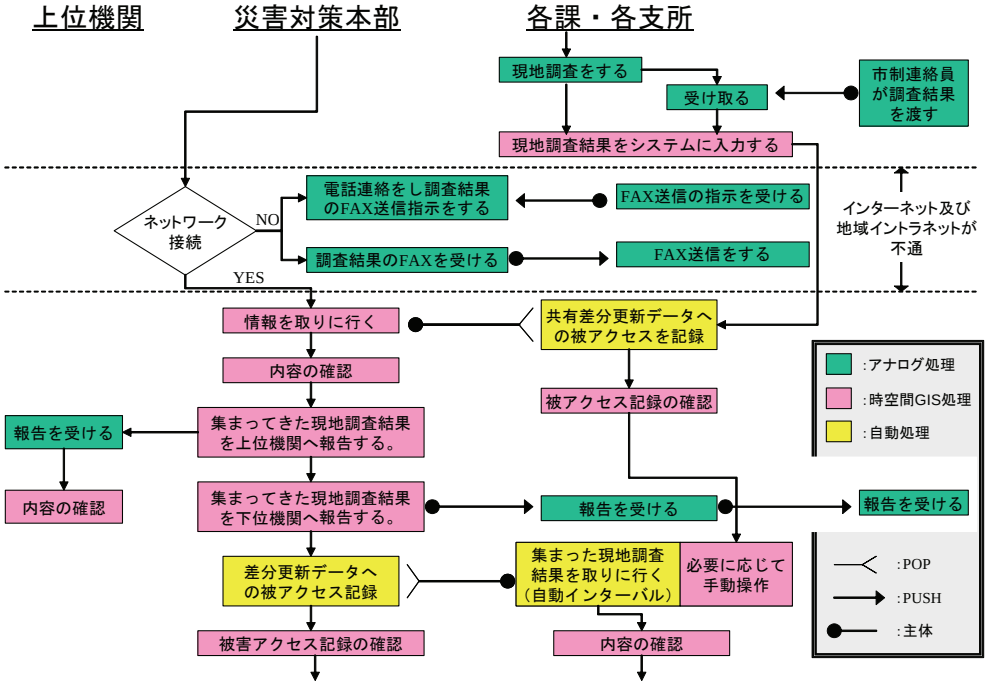


図 **3** 災害時における時空間 GIS を用いた庁内情報連係体制の案

8. 自治体適用におけるデータ作成

これまでに示したシミュレーションを活用するためには、データを整備することが必要になります。**1.**で述べたように、土木・建築・水道、教育・福祉、消防など、様々な部署で管理しているデータを、危機管理を行う部署が統合することで震災総合シミュレーションシステムのためのデータベースが構築されることになります。したがって、システムを構築する際には、各部署がどのようなデータをどのような形式で管理しているかを調査し、シミュレーションに使うデータと関連づけることが必要になります。本章では、そのようなデータ整備の参考事例を紹介します。特に**8.2**では、最近重要視されてきた谷埋め盛土等の人工改変地の分布のデータベースを構築する技術を紹介します。

8.1 シミュレーション用データ作成方法

海岸線や河川、行政界、道路、建物などの様々な基本地図データが必要になります。大都市ではGISのデータとしてこれらのデータが整備されていますので、震災総合シミュレーションシステムのための一からの整備は一般に不要になります。ただし、大地震発生時には周辺自治体の情報も必要となります。そのため周辺自治体について、少なくとも簡単な地図データを用意しておくことが必要になります。簡単な地図データとしては、市販のデータも各種ありますし、公的な機関が刊行し一般に入手可能なデータとして、国土地理院が数値地図データ1/2500および1/25000のデータを全国を対象に整備しています。市販のデータにはデータ構造が異なるものもあり、都道府県または自治体の行政界ごとにファイル化されていて各境界の整合を取る必要があるものもあります。

縮尺が異なるものを、高精度側の境界データを基にして整合を取り、全国を網羅してシームレスに統合した時空間データベースの例を図**1**に示します。

データの管理方法や体制は自治体により様々ですが、住民、建物、土木施設など自治体で管理する内容は全国共通です。ここでは本プロジェクトのテストフィールドとして協力協定を結んでデータ整備を行った川崎市の例を紹介します。表**1**は整備した主なデータ項目です。

(1) 地盤データ

川崎市より約8,000本のボーリング資料を借用し、デジタル化を行いました。この作業は1人でおよそ1日30点程度をデジタル化できる効率となります。

① ボーリング地点の地盤パラメータのデジタル化

② ①の値を50mメッシュ中央位置に補間

の手順で一辺50mのメッシュ単位に地盤パラメータを評価しました。約8,000点のボーリングデータから，6万点弱の50mメッシュ地点の値を，次式の距離の重みによる補間で算出しています[1)]。

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i}{r_i^2}\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{r_i^2}\right) \qquad [1]$$

n=5個としています。ただし、5km以上離れているデータは外していますが、最低2個は使います。対象メッシュ地点に近いボーリングデータから順に選びますが，地形分類から平地部と丘陵部に分け，この分類が異なるデータは用いないこととしました。

作成した地盤パラメータは、基盤深度（N値50の層）、卓越周期（1/4波長則）、深度20mまでの平均S波速度(Vs20)、深度30mまでの平均S波速度(Vs30)、S_n値(地盤の軟らかさを示す指標値)、地形分類、の6種類です。ボーリング地点についてVs20を評価し、式［1］により50mメッシュでの値を評価した例を図**2**に示します。

表**1**　シミュレーションに用いる主なデータ

推定項目	元となる資料	データの内容
地震動、液状化	ボーリングデータ	土質、N値、等
斜面危険度	土砂災害防止法による急傾斜地危険指定箇所	斜面高さ、勾配、等
建物被害	都市計画基礎調査データ、家屋課税データ	構造種別、階数、用途種別、建築年、面積等
人的被害	人口データ	住民基本台帳登載人口(町丁目別人口データ)
道路閉塞	緊急輸送指定路及び市販データ等	道路ネットワークデータ
橋梁	道路台帳、道路橋調書	構造、橋脚高さ、径間数、等
上水道被害	管網データ	管種管径別延長データ
火災延焼被害	消防年報等	消防署・消防団の位置および所有車両，防火水槽の設置数

(2) 建物データ

川崎市のデータ作成においては、川崎市まちづくり局で作成された「都市計画基礎調査データベース(H12)」を利用しており、個別建物の構造種別、階数、用途のデータを取り出しました。

建物被害推定において築年情報が重要ですが、これは課税台帳に登録されている情報です。しかし、研究目的では個人の資産に関わる情報の提供は受けられなかったため、川崎市が整備していた過去の市街地図を現在から遡っていき、初めてその建物が出現した年を築年とみなしてデータ作成を行いました。全域(約30万棟)実施するのに12／人月を要しました。

(3) 人口データ

川崎市は、南東部(臨海部)の重工業地域と、北西部(内陸部・丘陵部)の住宅地域という性格の異なる地域の結合により都市が形成されています。住宅地域では夜間人口が多くて昼間人口は少なく、逆に，商工業地域では、夜間人口は少なくて昼間人口が多いということになります。当然、地震が発生する時間帯により、人の被害は大きく異なります。したがって、時間帯別の人口データが必要になります。

夜間人口については、どの自治体でも整理されています。昼間人口については難しい場合がありますが、幸い川崎市では、平成12年度の国勢調査結果と、平成12年学校基本調査、平成13年事業所・企業統計調査の集計結果を基に推計したデータがありましたのでこれを利用しました。この場合も、従業・通学のための定常的な人口に限られており、買物客などの非定常的な移動については考慮されていません。

参考文献

1)石田栄介、磯山龍二、山崎文雄、清水善久、中山渉:防災GISを用いた地盤増幅度の面的整備と地震動面的分布推定に関する検討、第26回地震工学研究発表会講演論文集、2001年、pp.421-424

図**1**　シームレス結合により作成した全国データ(国土地理院:1/25000、1/2500データ、(財)統計情報研究センター)と自治体詳細データ(研究対象地域のみ)の統合結果

(a)ボーリング地点における評価　　(b)50mメッシュ分布

図**2**　深さ20mまでの平均S波速度データ算出例

8.2 谷埋め盛土等の人工改変地盤の検出方法

大地震が発生する度に斜面崩壊や盛土崩壊、谷埋め盛土の移動、擁壁や護岸の崩壊、液状化などの地盤被害が発生します。特に我が国の大都市近郊では、昭和30年代後半から大規模な宅地造成が行われ谷埋め盛土や切り盛り造成地が広がっています。これら人工的に形成された地盤は一般に地震に対して脆弱で、特に盛土は揺れやすく、液状化したり滑落したり移動したりする危険性が有りますし、周辺の地山との境目で埋設ライフラインが集中的に被害を受けることも有ります。

震災総合シミュレーションシステムは、平常時から人工改変地を特定して対策を促し、地震発生時には被害を速やかに推定して緊急対応を支援する機能を持つ必要があります。しかし、人工改変された地盤が一旦平坦化されて宅地などに利用されると、その判別が困難になります。そのため、そのような人工改変地盤を検出する手法を開発し、テストフィールドとした川崎市北西部や横須賀市の実例に基づいて精度を検証しました。

(1) 谷埋め盛土検出法とその精度

新旧の地形図を比較して、現在と人工改変前の標高データに差が有れば人工的に改変されたことになります(図**1**)。このように原理は簡単ですが、改変前の旧標高データを精度良く得ることは容易でなく、精度と結果の解釈には充分注意を払う必要があります。

最初に、対象地域の旧版地形図や人工改変前の航空写真を収集します。また、人工改変エリアを最新地形図において予察し、自然地形部分を対象から外すことも効率化のために必要です。

旧地形図や航空写真からデジタル標高データを取得する場合は、複数の資料を精度順に統合する必要があります。そして、取得したデータの精度を精査・検証し、盛土・切土と判定する基準を決定しておく必要があります。

利用可能なデータと精度の関係の目安を表**1**に示します。ここに現在の標高は、2m間隔の等高線等で0.7mの精度で取得できるとしています。等高線の標準的な高さ間隔は縮尺に応じて、1/2,500で2m、1/5,000で5m、1/10,000以下で10mと想定しています。1/10,000縮尺でも1/2,500から配布用に作成された場合などは2m間隔で等高線が記されることもありますし、1/2,500地図でも実際には表**1**のレベルBの精度しか得られない場合もあります。最初に平地で標高に変化がないと思われる地点で (例えば古い街道)、チェックしておくことが肝要です。

(2) 標高データ資料の収集と予察

人工改変前の必要な精度の地形図が得られない場合には、経済的では有りませんが、米軍の航空写真を用いて三次元測定を実施する方法があります。米軍が昭和20年代に、日本全国を縮尺1/4万で、さらに重要地域や国道沿いを縮尺1/2万～1/5千で精力的に航空写真撮影を実施していて入手可能です。ただし、撮影時間や季節により標高測定に不適な場合もあります。また、米軍の撮影時点において既に人工改変が進んでいる場合もあります。そのような場合には、精度は落ちますがより古い地形資料を用います。例えば、旧版1/20,000正式図は、三角点等の基準点設置後に整備された最初の全国版地形図で、「正式図」と呼ばれ明治20年代～40年代にかけて整備されています。正式図よりさらに古い1/20,000迅速図は基準点設置以前の地形図で精度的には疑問視されていますが、海岸線の改変などの情報を得ることが出来ます。

実際に自治体でハザードマップを全域で作成しようとすれば、上述の様々な資料を混在させて利用せざるを得ない場合が多く、各資料の精度と適用年代と適用領域を整理しておく必要があります。作業で使用する資料と旧地形データを取得する区分の整理例を図**2**に示します。

(3) 人工改変地盤ハザードマップの作成例

図**3**に横須賀市全域の分布図を示します。この全域図では、盛土・切土の領域のみを示していますが、別途2mピッチの標高コンターを示した「人工改変区域図」(1/10,000)が作成されています。その際、横須賀市で取得できた標高データの精度から、-3m～+3mゾーンを改変の少ないエリアとし、-3m以下を切土エリア、+3m以上を盛土エリアとしています。

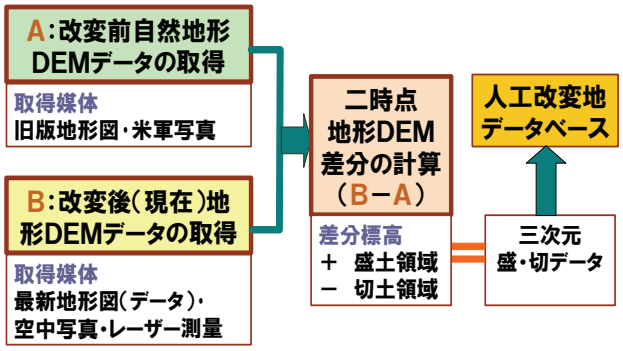


図1　改変前後の標高データ(DEM)を用いた検出法

表1利用可能なデータと精度の目安

精度レベル	DEM精度値	改変の少ない区域の設定	旧地形データ取得の主な標準的取得媒体
A	1m以下	+1m～-1m	1/2,500・1/3,000級地形図 1/10,000級航空写真
B	1m～2m	+2m～-2m	1/3,000・1/5,000級地形図 米軍写真1/10,000級
C	2m～3m	+3m～-3m	米軍写真1/40,000級 1/10,000地形図
D	4m以上	+4m～-4m以上	1/20,000地形図(迅速図・正式図)、地理院1/2.5万

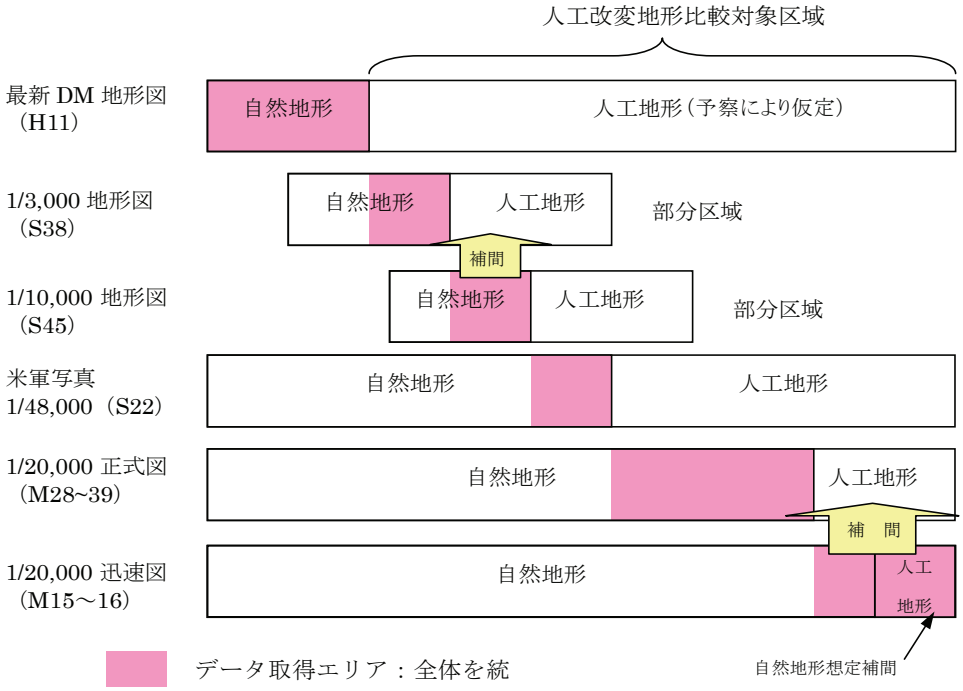


図 **2**　作業で使用する資料と旧地形データを取得する区分

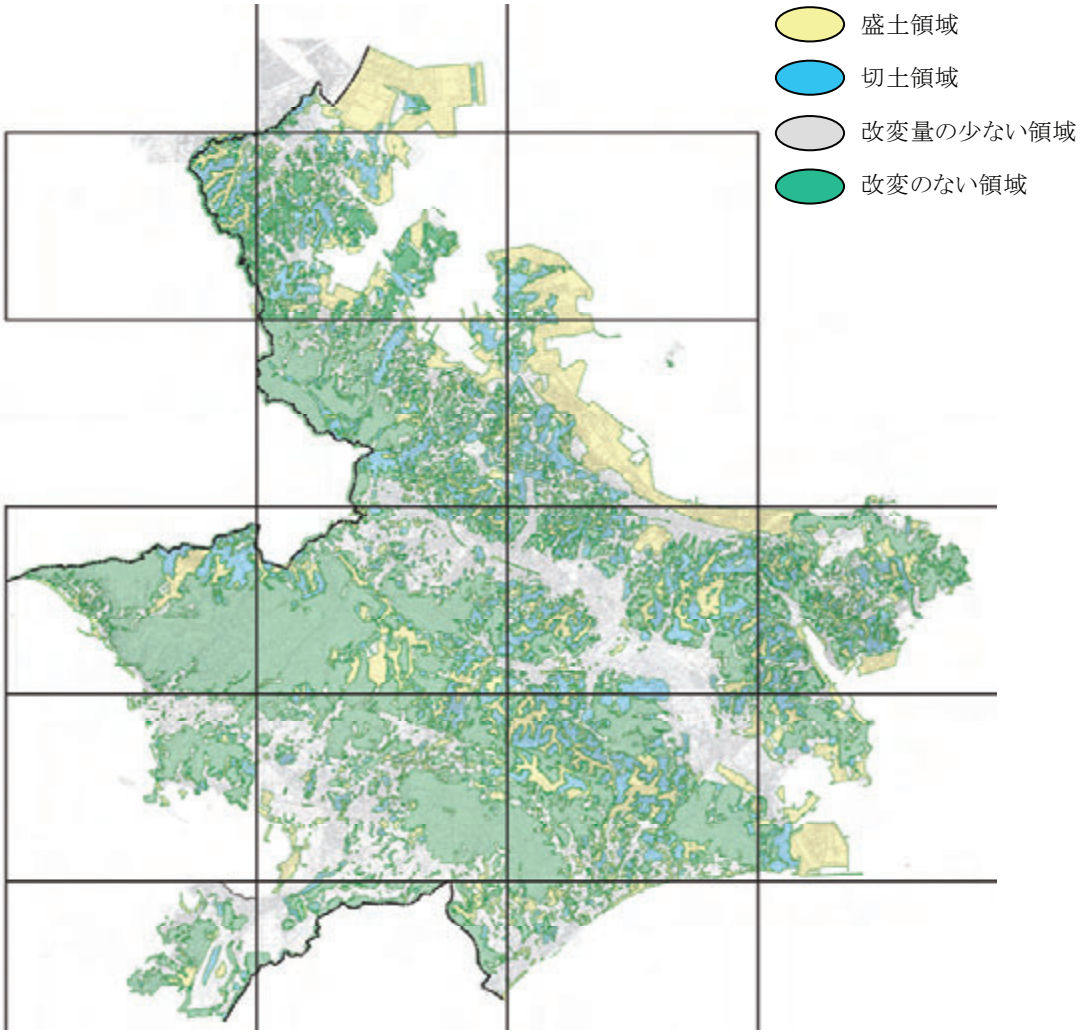


図 **3**　横須賀市全域の人工改変地盤ハザードマップ

研究実施体制

研究代表者
後藤 洋三（防災科学技術研究所）

1. 震災総合シミュレーションシステムの枠組み
若松 加寿江（防災科学技術研究所）
末冨 岩雄　（防災科学技術研究所）
長谷川 浩一（防災科学技術研究所）
小玉 乃理子（防災科学技術研究所）
佐々木 直史（防災科学技術研究所）
角本 繁　　（防災科学技術研究所）
山田 博幸　（防災科学技術研究所）
古戸 孝　　（防災科学技術研究所）

2. 被害推定サブシステム
若松 加寿江（防災科学技術研究所）
末冨 岩雄　（防災科学技術研究所）
長谷川 浩一（防災科学技術研究所）
小玉 乃理子（防災科学技術研究所）
佐々木 直史（防災科学技術研究所）
磯山 龍二　（日本技術開発）
石田 栄介　（日本技術開発）
塚本 博之　（日本技術開発）
寺木 彰浩　（建築研究所）
阪田 知彦　（建築研究所）
林 吉彦　　（建築研究所）
岩見 達也　（国土技術政策総合研究所）
大宮 喜文　（東京理科大学）
平澤 一浩　（CAE ソリューションズ）
座古 勝　　（大阪大学）
倉敷 哲生　（大阪大学）
文田 成俊　（大阪大学）

3. 実被害情報収集サブシステム
小杉 幸夫　（東京工業大学）
角本 繁　　（東京工業大学）
小俣 透　　（東京工業大学）
角田 貢　　（東京工業大学）
伊東 利哉　（東京工業大学）
宇都有昭　（東京工業大学）
土居原 健　（アジア航測）
内田 修　　（アジア航測）
坂元 光輝　（アジア航測）
織田 和夫　（アジア航測）
長谷川 浩一（防災科学技術研究所）

4. 災害対応支援サブシステム
能島 暢呂　（岐阜大学）
杉戸 真太　（岐阜大学）
古本 吉倫　（岐阜大学）
松岡 昌志　（防災科学技術研究所）
小玉 乃理子（防災科学技術研究所）
角本 繁　　（防災科学技術研究所）
山田 博幸　（防災科学技術研究所）
古戸 孝　　（防災科学技術研究所）

5. マルチエージェントシミュレーション技術による震災総合シミュレーション
竹内 郁雄　（防災科学技術研究所）
下羅 弘樹　（防災科学技術研究所）
森下 卓哉　（防災科学技術研究所）
小藤 哲彦　（防災科学技術研究所）
伊藤 暢浩　（愛知工業大学）
高橋 友一　（名城大学）
野田 五十樹（産業技術総合研究所）
秋山 英久　（産業技術総合研究所）
和泉 潔　　（産業技術総合研究所）
桑田 喜隆　（NTT データ）
鏡味 洋史　（北海道大学）
加賀屋 誠一（北海道大学）
萩原 亨　　（北海道大学）
高井 伸雄　（北海道大学）
内田 賢悦　（北海道大学）

6. シミュレーション技術の事前対策への適用
若松 加寿江（防災科学技術研究所）
末冨 岩雄　（防災科学技術研究所）
小玉 乃理子（防災科学技術研究所）
佐々木 直史（防災科学技術研）
長谷川 浩一（防災科学技術研究所）

7. 自治体への適用研究
角本 繁　　（防災科学技術研究所）
山田 博幸　（防災科学技術研究所）
古戸 孝　　（防災科学技術研究所）
小川 淳二　（秋田県立大学）
浅野 耕一　（秋田県立大学）
北野 寛二　（秋田県立大学）
三浦 守　　（本荘由利産学共同研究センター）
渡部 聖一　（由利本荘市企画調整部）
大庭 司　　（由利本荘市企画調整部）
佐々木 幸治（由利本荘市企画調整部）

8. 自治体適用におけるデータ作成
若松 加寿江（防災科学技術研究所）
末冨 岩雄　（防災科学技術研究所）
小玉 乃理子（防災科学技術研究所）
角本 繁　　（防災科学技術研究所）
山田 博幸　（防災科学技術研究所）
古戸 孝　　（防災科学技術研究所）
磯山 龍二　（日本技術開発）
石田 栄介　（日本技術開発）
塚本 博之　（日本技術開発）