

意志決定支援のための 統合的被災シミュレータの開発 —RoboCup-Rescueプロジェクト（第14報）—

高橋宏直¹, 松野文俊², 畑山満則³, 松井武史⁴, 兼田敏之⁵, 田所諭⁶, 高橋友一⁷, 竹内郁雄⁸, 北野宏明⁹

¹ 正会員 工修 運輸省 港湾技術研究所 計画設計基準部 システム研究室長

² 工博 東京工業大学 大学院総合理工学研究科助教授

³ 工博 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 日本学術振興会特別研究員

⁴ 正会員 応用技術株式会社 解析事業部 環境解析1部

⁵ 工博 名古屋工業大学 工学部 システムマネジメント工学科助教授

⁶ 工博 神戸大学 工学部 情報知能工学科 助教授

⁷ 工博 中部大学 経営情報学部 経営情報学科 教授

⁸ 工博 電気通信大学 電気通信学部 情報工学科教授

⁹ 工博 The RoboCup Federation / Sony CSL

地震発生直後に得られる震度情報,あるいは数値解析による想定震度情報等に基づき被災状況を予測するシミュレータの開発は,各領域において非常に進展している.しかしながら,リアルタイム地震防災のみならず,都市空間の被害予測において真に必要なのは,各現象を時・空間的に重ね合わせると共に,それらの相互作用を踏まえた動的な変化予測が可能なシミュレータの開発である.

本研究では,今後のリアルタイム地震防災をはじめとする様々な防災対策において重要な意志決定支援に資する統合的被災シミュレータの概念及びその具体化が推進されているRoboCup-Rescueプロジェクトでの開発状況について報告する.

Key Words : *RoboCup, RoboCup-Rescue, Hyogoken-Nanbu earth quake, disaster simulator by distributed computation, total disaster simulator, kernel, GIS, TRANSIMS*

1. はじめに

1923年の関東大震災以降,昭和時代までに人口100万人を越える過密都市を直撃し,1000人以上の死者を出した地震は発生していなかった.その間,特に昭和の時代には都市への人口集積が進み,生活様式も大きく変化した.一方で,関東大震災以降,1964年の新潟地震,1978年の宮城県沖地震等の被害を踏まえ,建築基準法,コンクリート標準示方書を始めとする様々な示方書が改訂され,構造物の耐震性は順次向上して来ている.このようにハードの面での対応が進展してきたのに対し,ソフト面での対応は

相対的に随分遅れていた.このことが顕著になったのが1995年1月17日の阪神淡路大震災であったといえる.もちろんハード面での不備も多かったものの,ソフト面での対応がより進んでおれば,6500名をも越える尊い人命が奪われることはなかったと考えられる.

この遅れていたソフト面での対応の一つとして,本研究では,被災シミュレータが個別には高精度に開発されているものの,これらを時・空間的に統合するシミュレータの開発がなされていないとの認識のもとに,新たな概念による統合的被災シミュレータの開発を行った.なお,本論文においては,その概念及び具体化を推進しているRoboCup-Rescueプロジェクト

での開発状況について報告する。

2. 統合的被災シミュレータの概念

(1) 現状の被災シミュレータの現状

地震に特化した被災に関するシミュレータは、多種多様な分野で研究が進められ、既に多くの成果が挙げられている。なお、本論文では、多様な分野を対象として、単なる予測式からコンピュータによる膨大な処理を行うシミュレーションシステムまでを幅広く含む被災に関する予測システム全てを被災シミュレータとして定義する。このように、被災シミュレータをとらえると、例えば分野的には次のように整理される。

- ・地震発生機構に関するシミュレータ
- ・地盤変動に関するシミュレータ
- ・構造物挙動・被災に関するシミュレータ
- ・ライフライン被災に関するシミュレータ
- ・火災延焼・被災に関するシミュレータ
- ・社会活動影響に関するシミュレータ
- ・避難行動に関するシミュレータ
- ・経済活動影響に関するシミュレータ

しかしながら、こうしたシミュレータの開発は、各領域の個別分野においてより専門的に研究が進められているのが一般的である。もちろん、幾つかのシミュレータにおいては複数の分野に関連しているものの、全ての災害を取り込むことを目的とした統合的な被災シミュレータの構築を目指している事例は殆ど見られない。

実際の発災直後を想定してみても次のように各現象は非常に強い関連性を有している。先ず、家屋が倒壊し、このことが街路閉塞や火災発生の大きな要因となる。この街路閉塞は、避難のための交通流を大きく支配するのはもちろんであり、さらに消火活動のための消防車の行動をも大きく支配する。

したがって、被災シミュレータに関しては、個別には高精度のシミュレータが開発されてはいるものの、発災後の実際現象を想定し、これら統合的に処理する被災シミュレータの開発が行われていないのが現状といえる。

(2) 統合的被災シミュレータの必要性

災害発生後からの状況変化は図-1のように整理される。この中で、統合的被災シミュレータが、先ず必要とされるのが発生直後から数日までの混乱期である。リアルタイム地震防災の当面の課題である発生直後に観測データによる被害状況の即時的な把

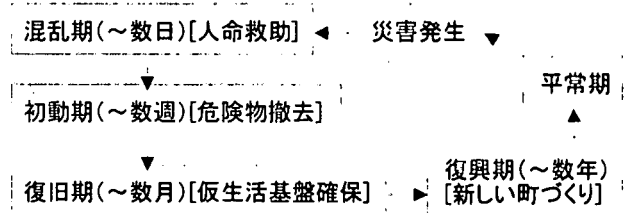


図-1 災害発生時における情報処理の変遷

握には、各分野を統合し、かつそれらの時・空間的な相互影響を予測することが必要である。現状では、個別の状況をもとに、災害対策本部等において経験的にその後の被災状況をイメージしていると想定される。例えば、国道* *号線が不通であるという予測もしくは情報により、(きっと直ぐに〇〇方面への大渋滞が発生する)ということを経験から判断していると考えられる。このように、種々の現象の相互影響の把握は非常に重要であり、この観点から第1の必要性が整理される。

次に、災害対策の観点から、効果的な対応方策を即時に選択することが求められる。発災直後であればあるほど救助等のための方策は限定される。例えば、多くの火災が発生している状況の中で、限られた消防車を最大効果が期待できるように配備するためには、さまざまな状況予測を踏まえて行うことが必要となる。先程の例の続きとしては、国道* *号線の不通により予想される渋滞を避けて、〇〇方面の火災現場に最短時間で到着するためのルート選定が考えられる。先の適切な被災状況予測を踏まえた上での最適な対応方策の選択は非常に重要であり、この観点から第2の必要性が整理される。

一方、地震発生以前の状態ででの対応が挙げられる。地震発生予測と同様に、地震発生後の被災状況の想定は非常に重要であるにもかかわらず、地震発生予想ほど被災状況想定に関して十分な手法が開発されているとはいえない。様々な地震発生の状況に対応した、多様な都市環境、時間帯での被災状況の想定に、この統合的被災シミュレータは非常に有効な手段となる。多くの局面での被災状況を想定し、その防災対応をシミュレーションすることでその都市の地震に対する弱点が明らかになる。したがって、発災以前の詳細な防災対応の観点から第3の必要性が整理される。

ここで整理した発災の事前・事後における3つの必要性から、統合的災害シミュレータの開発は早急に実施されるべき課題であり、これは様々な局面での意志決定支援に大変効果的な手段になるといえる。

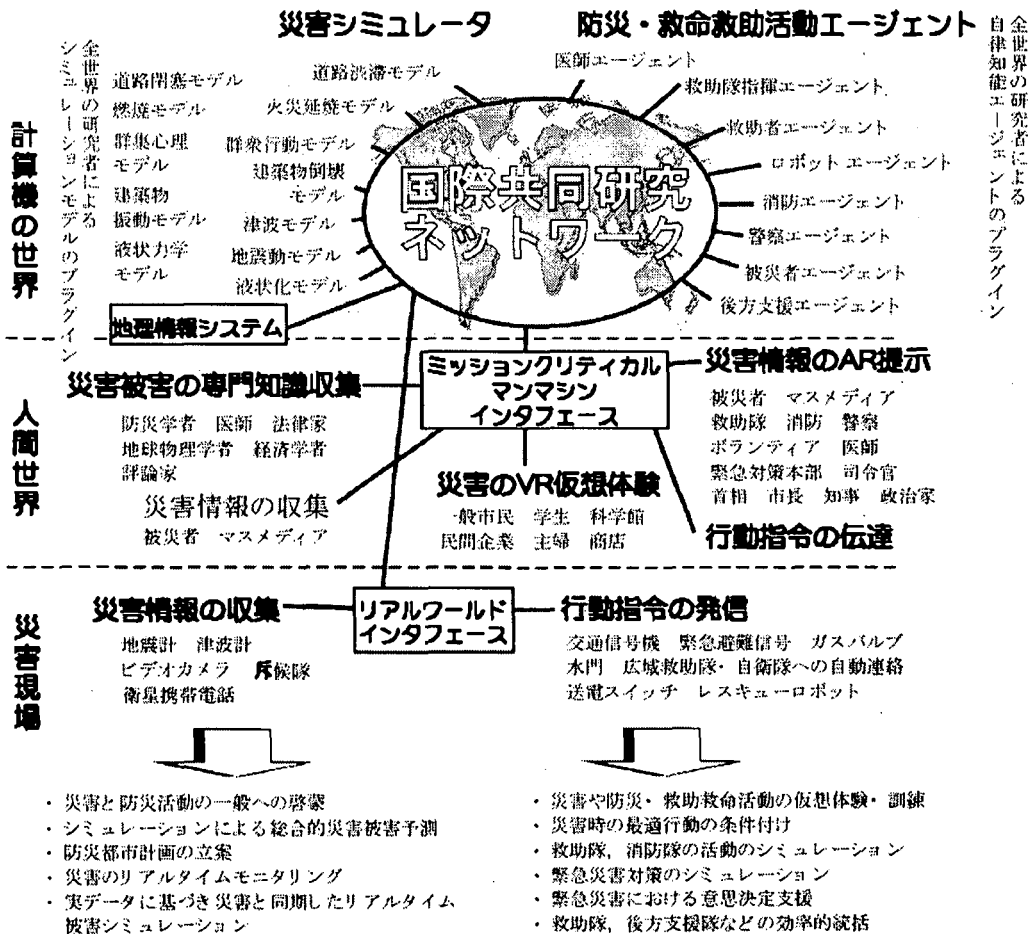


図-2 シミュレーションプロジェクト

3. RoboCup-Rescueプロジェクト

(1) RoboCup-Rescueと何か

統合的被災シミュレータの開発は、既に、多様な機関の参加による RoboCup-Rescue^{1)~6)} の場において推進されている。この RoboCup-Rescue の概要を以下に示す。

RoboCup-Rescue は、大災害における救命救助問題という普遍的かつ重要な社会問題に対して、情報科学、人工知能、ロボット工学等の最先端技術を活用しようとするものである。RoboCup 自体は「2050年に完全自律型のヒューマノイドロボットがワールドカップのチャンピオンに勝利を収める」というグランドチャレンジのもとに、現在、35カ国、3000名の研究者が参加して推進されている。ここでは、サッカーという分かり易いテーマの設定により研究資源の集中を行うものの、その過程において産み出される技術を世界的に重要な社会問題や次世代の産業基盤に役立てることが目的となっている。この社会問題の一つとしての災害救助問題に特化したのが RoboCup-Rescue である。

現在、RoboCup-Rescue では、次の4プロジェクトが進められている。

- ①シミュレーションプロジェクト
- ②ロボティクス&インフラストラクチャプロジェクト
- ③インテグレーションプロジェクト
- ④オペレーションプロジェクト

(2) RoboCup-Rescueにおけるシミュレーションプロジェクト

4プロジェクトの中で、シミュレーションプロジェクトは、包括的災害救助シミュレータの中で緊急対応活動を行うエージェントの知能行動と意志決定問題を研究するプロジェクトで、他に先駆けて議論が進められている。現在では、国内においては、神戸大、中部大、電通大、東京大、東工大、名工大、国際情報科学芸術アカデミー、港湾技研、消防研、電総研、NTTデータ、応用技術、ソニーCSL、三菱総研など、国外においては米国のCMU、USC及びドイツのDFKI、GMDなどの研究者が参加して共同作業を行っている。このシミュレーションプロジェクトの全体は図-2に示すが、個別には次の4部門から構成されて

いる。

- ①分散計算機上に構築される包括的災害救助分散シミュレータ
- ②防災・救命救助活動を行うソフトウェアの自律的エージェント
- ③ロボットや計測・制御システムとの通信を行うリアルワールドインターフェース
- ④人間への情報提示、人間からの情報獲得を行うマンマシンインターフェース

この第1部門の包括的災害救助分散シミュレータの主要素の一つが、統合的災害シミュレータである。

(3) 包括的災害救助分散シミュレータの構成

現在、2000年6月を目標にシミュレーションプロジェクトのプロトタイプ(神戸市長田区の1.5km×1.5kmを対象)の公開を予定している。そのシステム構成を図-3に示す。このプロトタイプでは分散シミュレーション方式が採用されている。分散シミュレーションは、これまで主に軍事関係での研究開発が実施されてきている。これは、既存のシミュレータや人間のオペレータを、ソフトウェアの改編を最小限に抑えて統合することが要求されるためと想定される。分散シミュレーションを実現する方式としては、以下のような方式がある。

①シミュレーション対象の分割方式

- ・空間分割方式：シミュレーション対象を空間的に分割し、各シミュレータは担当部分をシミュレーションする。
- ・能動エージェント分割方式：能動的に行動する単位エージェント、あるいはシミュレーション機能単位ごとにシミュレータを割り当てシミュレーションする。

②データの共有方式

- ・集中管理方式：ネットワーク上にある1つのサーバーがデータを管理し、各シミュレータはこのサーバ上のデータを参照、更新する。
- ・分散処理方式：各シミュレータがデータを管理し、自分の担当するデータを更新すると共に、必要なデータは別のシミュレータとネットワークを介して取り寄せる。

プロトタイプにおいては、サーバカーネルを中心にデータを管理する「集中管理方式」、シミュレーション単位は災害事象やエージェントごとに分割する「能動エージェント分割方式」を採用している。

(4) シミュレータ間の情報通信

分散シミュレーションではシミュレータ間の情報通信、特に、要素間の通信プロトコルが重要となる。

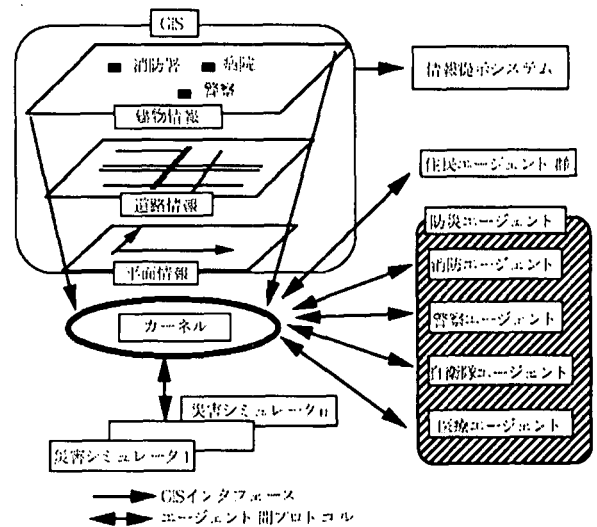


図-3 プロトタイプのシステム構成

以下に、情報の流れを整理する。

①開始時

カーネルはGISから地理情報データを受け取り、災害シミュレータ及びエージェントに初期データを提供する。

②各構成要素における情報処理

- カーネル：各構成要素からのプロトコルに応じ、対応する構成要素に情報を提供する。シミュレータに時間ステップごとの空間情報を提供する。
- 各災害シミュレータ：カーネルのシミュレーションステップ開始時を初期状態とし、さらに細かいシミュレーションステップで終了時までシミュレーションを実施し、カーネルを介して結果を時・空間情報としてGISへ提供する。
- エージェント：カーネルを介して外部情報を入力し、状況を判断し次に行動を決定する。
- GIS：シミュレータのシミュレーション結果やエージェントの時空間行動データを管理する。情報提示システムに表示用のデータを供給する。

4. RoboCup-Rescueにおける統合的被災シミュレータ

(1) 統合的被災シミュレータの概念

プロトタイプにおける包括的災害救助分散シミュレータの主要素の一つが、統合的被災シミュレータである。この統合的災害シミュレータは、カーネル、GIS、災害シミュレータ群の3要素から構成される。エージェント群と一体となり包括的災害救助分

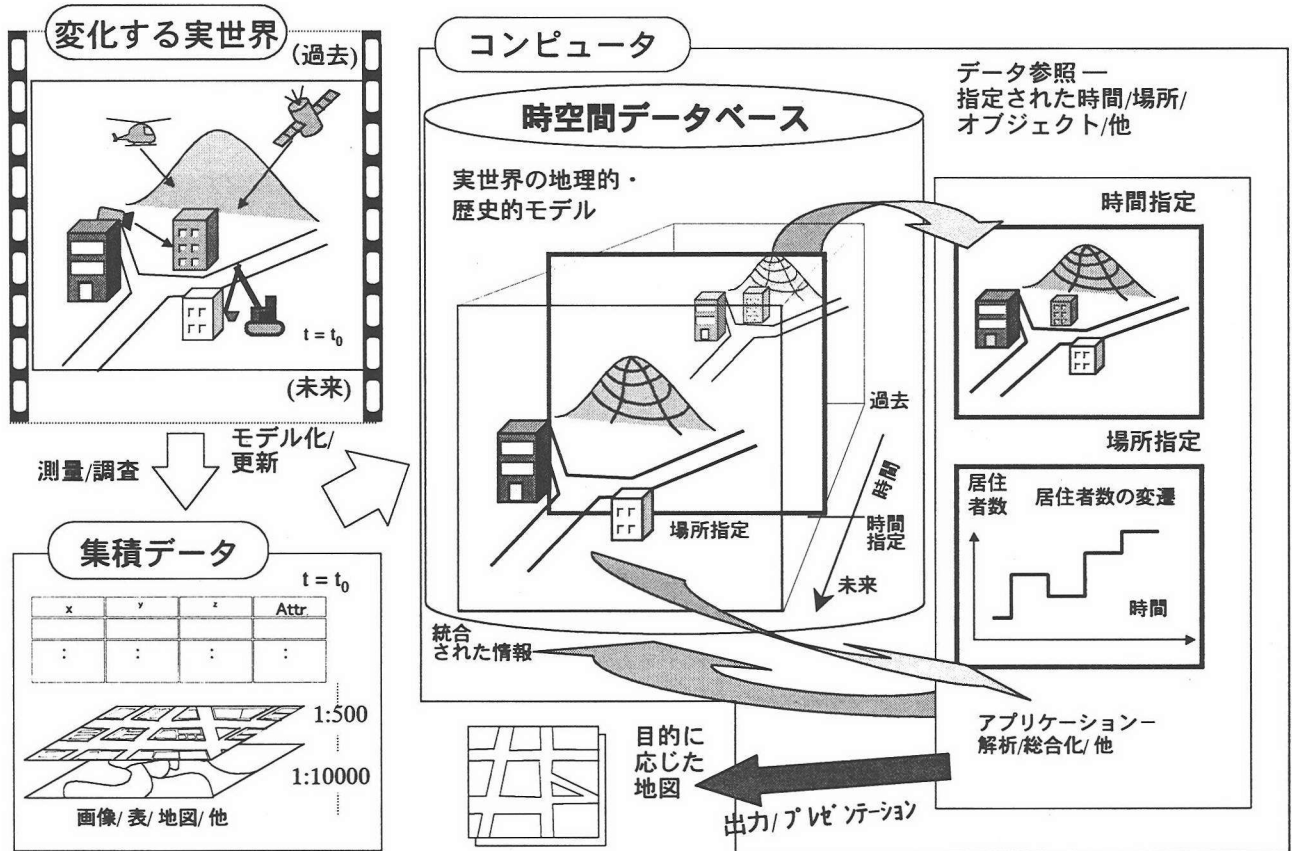


図-4 4次元地理情報システム概念

散シミュレータとして機能することはもちろん、エージェント群を切り離した統合的被災シミュレータ単独として、2章で示した必要性に早急に対応するシステムの構築も可能である。

特に、現状では、エージェント群と比較して、災害シミュレータ群の方が研究レベルが高いと想定されるため、統合的被災シミュレータ単独としての先行的な稼働への期待も高い。

さらに、分散シミュレーション方式を前提としているため、各災害シミュレータ群はプラグイン方式となっている。このことは、有効な統合的被災シミュレータとなり得るための次の要件を有していることを示している。

- ①最適な構成：地域特性に応じた災害シミュレータのみをプラグインすることで、その地域に最適なシステムをオーダーメイドで構築することが可能となる。
- ②最新の精度：ある現象に対して既にプラグインされているシミュレータより、より精度の高いシミュレータが開発された場合には、これを差し替えることが可能となる。

以下に、統合的災害シミュレータの3要素であるカーネル、GIS、災害シミュレータ群のプロトタイプでの概要を示す。

(2) カーネル

プラグインされるシミュレータは、カーネルとは独立にいくらかでも詳細な時・空間を対象とすることが可能である。しかしながら、統合的災害シミュレータとしてはもちろん、最終的な包括的災害救助分散シミュレータでの時・空間での詳細度は、このカーネルと先のプロトコルにより決定される。カーネル自体も研究の進展によって詳細化が高まるはずであるが、カーネルの変更はシステム全体そのものを変化させることになる。この詳細度が替わる度に、作り直しに近い大変更が生じるという問題は、これまで多くのソフトウェアで経験されてきた。

したがって、本プロジェクトでは、詳細化のレベルに応じて「発展する機構」を備えたシステムを目指して開発が進められている。

(3) GIS

統合的被災シミュレータにおけるGISでは、

- ①空間情報と時間情報の統合
 - ②自律分散協調性
- を実現させることが重要となる。

まず、GISの空間情報のデータ構造に関しては、一般的に次の2種類に分類される。

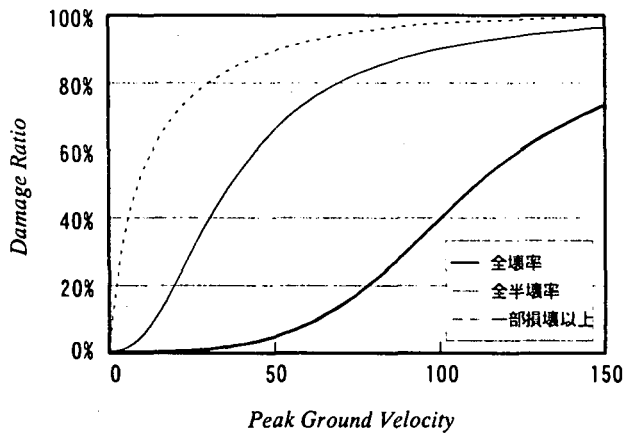


図-5 木造建物の被害関数(最大速度)

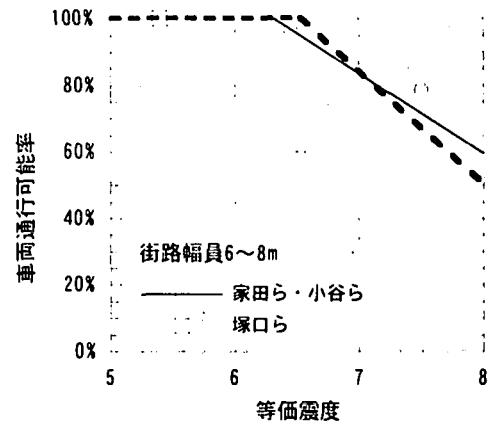


図-6 発生モデルと実測値(幅員6~8m)

- ・トポロジー構造明示型データ構造：オブジェクト間の接続関係を空間データベースに直接記述するデータ構造(現在の殆どのGISがこれに属する)
- ・トポロジー構造算出型データ構造：算出可能なデータ構造を空間データベースには記述しないデータ構造

次に、同じくGISの時間情報管理に関しては、次の2種類に分類される。

- ・Snapshot View型：ある時点の空間データベースを、1枚のスナップショットに見立て、この情報の時間要素を用いて管理することにより、過去の空間情報を参照できるようにする構造(現在の殆どのGISがこれに属する)
- ・Space-Time Approach型：地図を構成するオブジェクトごとに時間情報を記述し、指定された時間の空間情報を管理する構造

すなわち、GISの時・空間処理の手法に関しては、それぞれ2タイプずつの合計4タイプの組み合わせが設定される。この4タイプに関して、被災状態において非常に重要となる検索問題、データ更新性、データ統合等演算処理能力及び記憶領域に関して、標準的な問題を与えることで比較検証を実施した。その結果、既存のGISでは、殆ど全く見られない、トポロジー構造算出型データ構造+Space-Time Approach型が、統合的被災シミュレータのGISタイプとして最も優れていることが明らかになった。

さらに、自律分散協調型システムでは、GISが端末ごとに存在する。各端末で、ローカルなデータ更新を実施した場合、これらの点状ローカルな更新データを統合しグローバルな更新データを構築する必要がある。この統合の際に、通信する情報量を出るだけ少なくするためには、変化した情報のみを差分データとして管理しておき、これを統合する方法が最適である。特に、この差分記述ファイル

方式は、トポロジーの記述の有無に支配されないという優位な点をも有する。しかしながら、この手法は通常では用いられていない。

すなわち、既存のGISソフトでの対応は困難、もしくは不可能であるとの認識から、プロトタイプにおいては新たに時空間情報処理システムDiMSIS

(Disaster Management Spatial Information System)の開発を畑山、松野らが行った。このDiMSISでは、統合的被災シミュレータやRoboCup-Rescueプロジェクトの要素として機能することはもちろん、今後の災害直後に単独で実用可能なりスク対応型地域空間情報処理システム(RAMSIS Risk-Adaptive Regional Management Spatial Information System)としての概念の構築も目指している。この概念による4次元地理情報システムのイメージを図-4に示す。

(4) 災害シミュレータ群

プロトタイプでは、現在、次の4種類の災害シミュレータがプラグインされている。すなわち、2章で整理した事項のうち「構造物」、「火災延焼」、「社会活動」に関するシミュレータの代表的なものを第1段階として開発した。技術的には、断層モデルを想定した地盤加速度等の「地盤変動」の対応も可能であったが、プロトタイプでは阪神・淡路大震災を対象とするため、シミュレータによるデータではなく、実際の震度、加速度等の観測データにより対応をしている。

a) 家屋倒壊シミュレータ

家屋倒壊シミュレータは、山崎、山口、杉浦らの研究成果^{8)~10)}による、地震動強さに対する構造形式や建築年代等の建物特性に応じた被害推定式に基づき構築した。この成果の一部は、例えば図-5に示すように、木造建築物における全壊、全半壊、一部損壊以上としての倒壊レベル区分での被害関数として示されている。具体的には、先ず、対象となる長田区の地域に対して、観測データに基づく地表面加速度を一定間隔

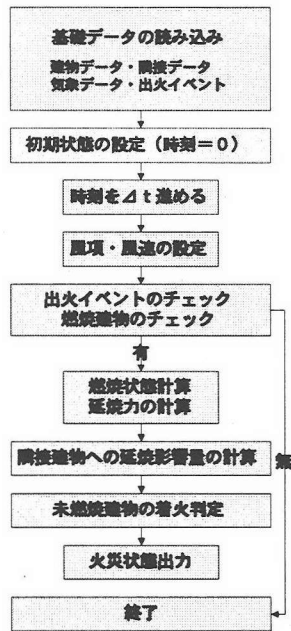


図-7 火災シミュレーションの流れ

での分布状況を設定する。その同一の加速度領域ごとに同種の構造形式の家屋をGISにより抽出し、これらを被害関数で与えられる倒壊レベル割合により割り振りを行う。この作業を、被害関数が設定されている建築物の種類ごとに実施する。これにより、1家屋単位ごとに、倒壊レベルを数値（例えば、全壊では100、全半壊では50、一部損壊では25、被災なしでは0）として与えることが可能になる。

b) 街路閉塞シミュレータ

街路閉塞シミュレータは、赤倉、高橋らの研究成果¹¹⁾による、地震動強さに対する街路幅員ごとの車輛通行可能率に基づき構築した。図-6にその1例を示す当初の成果では、車輛通行可能率のみ示されているので、これをもとに街路閉塞幅の定量化を実施した。具体的には、車輛通行可能幅を3mと仮定し、最初の成果で得られる通行可能率は、この3m幅以上を確保できる累積確率とし、正規分布仮定の下に逆解析を実施した。これにより、実際の現象とは車輛の通行可能性のみでの検証でしかないものの、地震動強さに対する街路閉塞幅を定量的に与えることが可能となっている。また、先に数量化した家屋倒壊情報と整合させることで、相関性の高い家屋倒壊と街路閉塞の両現象間に不整合が生じないように試みている。

c) 火災延焼シミュレータ

火災延焼シミュレータは、神戸市消防局、矢野、松井、高井らの研究成果¹²⁾による、地震による大規模火災延焼モデルに基づき構築した。図-7にその

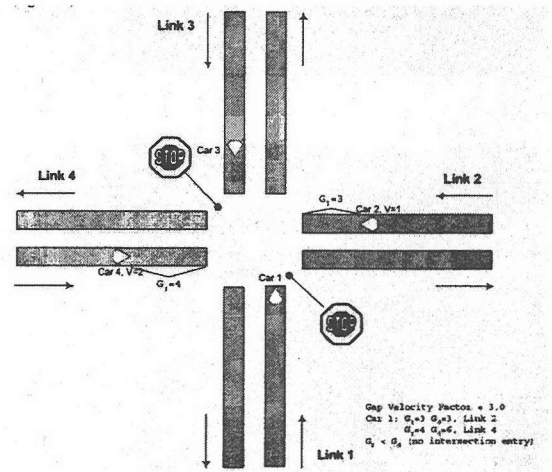


Figure 21: Intersection entry interfering lane gap.

図-8 TRANSIMSのイメージ

フローを示すこのモデルでは、個々の地域の詳細な建物状況・特性や建物の倒壊等による影響が容易に反映されるように、建物1棟ごとに延焼を拡大させることになっている。また、このモデルでは、火災の延焼過程を、建物の燃焼過程、隣接建物等との関係で定まる伝搬過程、未燃焼物に対する着火過程の3区分から構築されている。燃焼過程では、建物の燃焼状態を、火災高さ、建物規模、消防力で定義される延焼力の観点からモデル化した。伝搬過程では、二つの建物の隣接状態、建物高さ、風向、風速の関数で定義される伝搬係数からモデル化した。着火過程では、その建物の累積延焼影響量、単位時間延焼影響量、単位時間最大延焼影響量等を変数とした着火判定によりモデル化した。

d) 交通流シミュレータ

交通流シミュレータでは、図-8に1例を示すTRANSIMS¹³⁾を踏まえた兼田らの研究成果により、道路の幅員、車線数、歩道幅、交差点での信号、左折ショートカット、右折ポケットなどを考慮した1秒ごとのマイクロシミュレーションモデルを構築した。特に、緊急車輛の追い抜き、街路閉塞の影響、歩行者の車道への溢れ出しの影響を統一して処理するため、「一車線あたりの有効幅」で走行速度を算出することを可能とするモデル化を進めている。なお、この有効幅算定と、街路閉塞シミュレータでの値との整合を進めている。また、計算量制約下におけるモデル化の原則として

- ・ 車輛の急減速を認めるという無事故仮定、

- ・信号機故障による交差点内渋滞を擬似的に交差点外で発生させるという空間貸借,
 - ・運転の短期予測概念を省略し事後に影響を与えることにする時間貸借
- を認めるという条件緩和の設定を試みている。

5. おわりに

この統合的被災シミュレータを一つの核とする RoboCup-Rescue シミュレーションプロジェクトは、現在、以下のスケジュールにより数十名の研究者による作業が進められている。

2000.6: シミュレーションプロトタイプ of 公開及び国際ネットワークの組織化

2001.7: 限定された災害・エージェントによるシミュレータの構築と第1回研究評価会議の開催

2005.4: 本格的なシミュレータの構築

特に、統合的被災シミュレータに関しては、本稿中でも示したように、プロトタイプで設定している災害シミュレータ以外の様々なシミュレータのプラグインはもちろん、既にプラグインされている事項のシミュレータの取り替えが可能となっている。このような追加、差し替えにより、RoboCup-Rescue シミュレーションプロジェクトの一要素としてはもちろん単独システムとしてもさらに優れた統合的被災シミュレータが構築されることが期待される。

なお、RoboCup-Rescue に関しては、ロボカップレスキュー日本委員会編集による「緊急大規模災害救助への挑戦」¹⁾、また RoboCup ウェブページ <http://www.robocup.org/> を参照されたい。

謝辞: 本論文の作成に関しましては、ロボカップレスキュー技術委員会の多くの方々のご支援を頂きました。ここに全て方のお名前を記述できませんが、技術委員会の皆様及び関係者の方々に対してまして、ここに記して謝意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 田所, 北野 (監修), RoboCup-Rescue 技術委員会・The RoboCup Federation, ロボカップ日本委員会 (編): ロボカップレスキュー...緊急大規模災害救助への挑戦..., 共立出版 (2000, 近刊)
- 2) Kitano, H. and Tadokoro, S. et al.: RoboCup-Rescue: Search and Rescue in Large-Scale Disasters as a Domain for Autonomous Agents Research, Proc. IEEE Intl. Conf. on system, Man, and Cybernetics (1999).
- 3) Tadokoro, S. and Kitano, H. et al.: The RoboCup-Rescue Project: A Multi-Agent Approach to the Disaster Mitigation Problem, Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (2000).
- 4) 北野, 田所, 高橋, 松野, 大須賀: RoboCup-Rescue 技術委員会, RoboCup-Rescue, bit, Vol. 32, No. 2-4 (2000).
- 5) RoboCup-Rescue オーガナイズドセッション, 情報処理学会第60回全国大会 (2000).
- 6) 田所論, 北野宏明, 高橋友一, 松野文俊, 竹内郁雄, RoboCup-Rescue 技術委員会: RoboCup-Rescue-情報科学の緊急災害対応問題への挑戦-, 情報処理 (2000, 4月)
- 7) 畑山満則, 松野文俊, 角本繁, 亀田弘行: 時空間情報処理システム DiMSIS の開発, GIS-理論と応用 (1999, 9月)
- 8) 杉浦正美, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の宝塚市域被害データに基づく建物被害推定式, 第10回日本地震工学シンポジウム (1998)
- 9) 山口直也, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の建物被害による地震動分布の推定, 第10回日本地震工学シンポジウム (1998)
- 10) 山口直也, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集 No. 612
- 11) 赤倉康寛, 高橋宏直, 中本隆: 大規模地震による街路閉塞予測シミュレーションの構築, 土木学会論文集 No. 632
- 12) 神戸市消防局 (編): 阪神・淡路大震災における火災状況 (神戸市域), 神戸市防災安全公社/東京法令出版.
- 13) Barrett, C.: TRANEIMS-Version TRANSIMS-LANL-1.0, LA-UR-99-1658 (1999)