

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：12601  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2008 ～ 2012  
 課題番号：20246075  
 研究課題名（和文） 都市の統合自然災害シミュレーションシステムの開発

研究課題名（英文） Development of integrated natural disaster simulation of Urban area

研究代表者  
 堀 宗朗（HORI MUNEO）  
 東京大学・地震研究所・教授  
 研究者番号：00219205

## 研究成果の概要（和文）：

想定された災害シナリオに応じて、都市に生じる災害・被害という物理過程と、被害対応という非物理過程を数値計算によって予測するシステムである、統合自然災害シミュレーションシステムを開発した。対象とする自然災害は、地震・津波、風水害等である。災害を高い空間分解能で計算し、災害を入力とする都市内全構造物の応答・損傷といった被害を計算する。この物理過程の計算には、地理情報システム(GIS)を使って構築される都市の解析モデルを作成する。都市の被害対応として、群集避難や被災構造物の復旧過程といった非物理過程も計算する。物理過程・非物理過程の全計算結果は可視化される。

## 研究成果の概要（英文）：

Developed is a system for integrated natural disaster simulation of an urban area, in which physical processes of natural hazard and disaster and non-physical processes of actions taken against the disasters are computed. The target natural disasters are earthquake, tsunami and flooding. Hazards are computed in high spatial resolution, and results are used as input to compute disasters, which are the sum of structure-wise damage and failure. Urban area models, which are generated by using Geographical Information System, are used. Non-physical processes such as mass evacuation and structure damage recovery are computed. All the results of the integrated natural disaster simulation are visualized.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2010年度	4,440,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	4,440,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	5,550,000	1,650,000	7,150,000
総計	23,330,000	6,960,000	30,160,000

## 研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：地震防災，自然災害防災，数値計算，エージェント，可視化

## 1. 研究開始当初の背景

長周期地震動を引き起こす海溝型巨大地震、局所的な都市水害の発生等、自然災害が都市

を襲う可能性は高く、防災・減災の第一歩である被害予測は依然として最重要課題である。過去の被災データに基づいて被害を予測

する手法は確立しているが、精度や分解能に限界がある。実際、製造・物流業の自然災害に対する事業継続計画の立案には、より高度な予測が必要である。また、高齢化・バリアフリー化を考慮すると、発災後の群集避難といった災害対応の予測も高度化が必要である。

高度化の具体像は、想定された災害シナリオに応じて都市被害と災害対応を詳細に予測する「次世代ハザードマップ」である。このハザードマップ作成のためには、災害・被害という物理過程のシミュレーションと災害対応という非物理過程のシミュレーションを齟齬なく組み合わせるといふ、統合的なシミュレーションが必要である。

## 2. 研究の目的

統合自然災害シミュレーションのプロトタイプとして、統合地震シミュレーションが開発されている。これは、地理情報システム（GIS）を使って都市の地盤構造や構造物群の解析モデルを作り、強震動分布、構造物応答、群集避難行動を計算し、その結果を三次元的に可視化するものである。経験式や統計解析ではなく、高度な数値解析手法を使って応答を計算するため、空間分解能や信頼度は高い。可視化によって、地震災害に関する共通認識を社会全体での容易に作ることができる。

自然災害全般のシミュレーションができるよう、この統合地震シミュレーションを拡張することが本研究の目標である。特定のGISに特定の解析手法を組み込んだ地震・水害・火山噴火の被害予測システムは各種開発されている。しかし、GISと解析手法の更新に伴うシステム更新は手間がかかり、陳腐化しやすい。この点を解決するため、統合地震シミュレーションでは、「個々のGISや解析手法をシステムの独立な要素として扱い、その力データや計算結果のみを処理する」という統合技術を開発してきた。この統合技術を発展・洗練させることが本研究の技術的課題である。

## 3. 研究の方法

統合自然災害シミュレーションシステムの技術的開発項目は、統合技術の基幹となるCMD (Common Modeling Data) の構築である。ついで、CMDを使って、自然災害と各種構造物の数値解析を統合した物理過程シミュレーションと、災害対応を模擬するエージェントを使った、非物理過程シミュレーションを開発する。後述するように、CMDの構築では、基本となるスーパークラスの考案・設計・コード化と、派生するCMDのサブクラスのコード化を行う。システムのユーザは住民・行政官・企業を想定しており、それぞれ、災害認

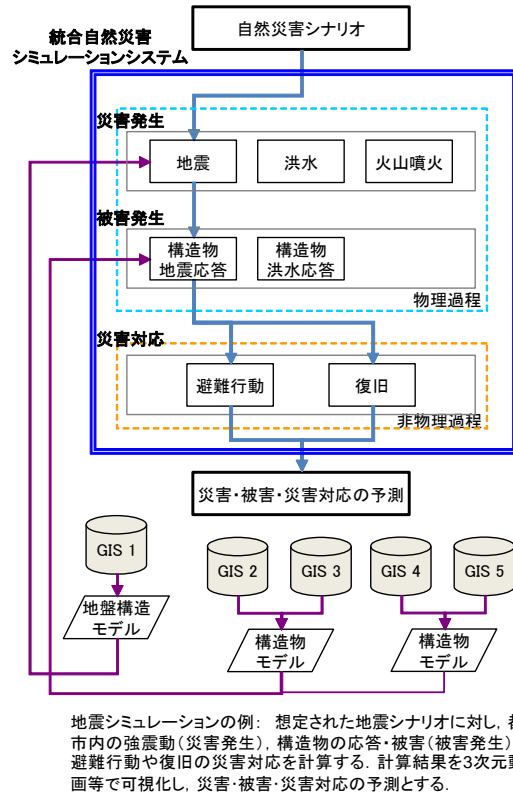


図1 統合自然災害シミュレーションの概要

識・防災・減災計画立案・事業継続計画立案が主要な利用目的である。使いやすいシステムとなるよう適宜改良を行う。研究内容を図1に整理する。

主要な研究メンバーは東大地震研の研究代表者と分担者の2名である。実際の作業はシステムの設計とコード化であり、密な意思疎通が必須であるため2名に絞っている。年次計画(案)を右図に示す。統合技術の基幹であるCMDの構築は、物理過程・非物理課程のシミュレーションと連動させる必要があるため、全研究期間で実行する。東京23区を対象としたシステムの試験的運用を平成23年度より開始することを予定している。

研究の第一期は、CMDの構築として、プログラム構造の考案と設計を行う。統合自然災害シミュレーションシステムで利用するGISは複数であり、構造物の位置・幾何形状、構造形式や築年等の構造物の属性、地盤・地層構造等のデータを持ち、さまざまな形式で記述されている。一方、物理課程シミュレーションで用いられる災害・被害発生の数値解析手法は、各々固有の形式で記述された解析モデルが必要である。可視化手法も複数あり固有の形式の入力データが必要である。各種のGIS、数値解析手法、可視化手法を汎用的に利用するために、GISのデータや数値解析手法の計算結果を変換して作られるCMDの性能が統合の鍵を握ることになる。具体的なCMD

は、地盤構造や越流路となる都市空間 CMD と各種構造物の構造物用 CMD に大別できる。データとメンバ関数からなるプログラムの構造を図 2 に示す。

実際のプログラミングには C++ を使う。オブジェクト指向プログラミング言語の中で、大規模並列計算が実行できる言語であることが C++ の選択の理由である。オブジェクトの継承の他、C++ の標準テンプレートライブラリを使って、できるだけ平易でわかり易いコード化を行う。CMD のスーパークラスの構造の構想と設計は研究代表者が行う。CMD のスーパークラスは統合技術の中核となるため、さまざまな GIS に蓄積されたデータの特徴、数値解析手法と解析モデルの特徴を理解が必要であり、また、可視化手法に馴染みがあることが望ましい。CMD のスーパークラスを特殊化したサブクラスのコード化は、研究分担者の研究室に属する大学院生が担当する。スーパークラスのコードとプログラム文書があるため、サブクラスのコード化は大学院生レベルのプログラミング技術で十分可能であると判断している。

研究の第二期は、CMD を使いながら物理過程・非物理過程シミュレーションを開発する。統合自然災害シミュレーションシステムの試験的運用を開始する。物理過程シミュレーションの開発では、非線形有限要素法等の高度な解析手法も統合しなければならない。非物理過程シミュレーションでは、開発済みの

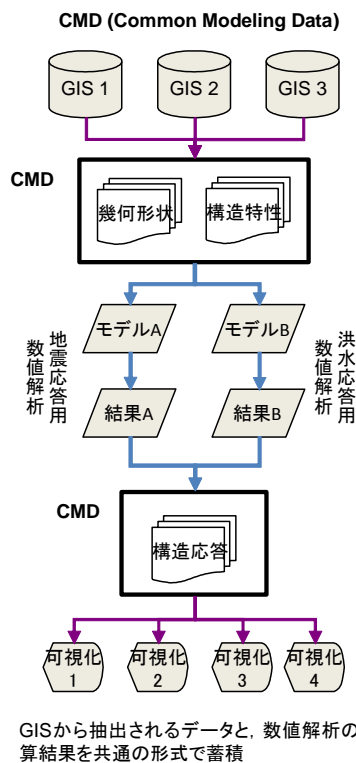


図 2 CMD を使った都市モデル構築の概要

群衆避難の数値解析手法をシステム組み込み、新たに復旧過程の数値解析手法を開発する。

研究の第三期は、国内都市を対象に、高精度 GIS と地盤構造や標高の GIS を使って、統合自然災害シミュレーションシステムを試験運用する。具体的には東京 23 区と少数の政令指定都市である。

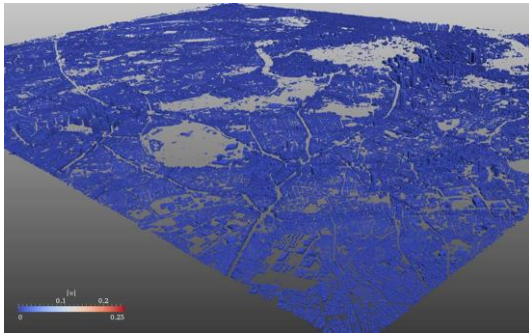
#### 4. 研究成果

統合自然災害シミュレーションシステムとは、災害シナリオに応じて、都市に生じる災害・被害と被害対応を数値計算によって予測するシステムである。地理情報システム (GIS) を使って都市や構造物の解析モデルを作成し、災害・構造物応答、被害対応を計算し可視化する。

研究の第一期では、各種都市モデルを自動構築するための基盤となる、共通モデリングデータ (CMD) を用いた統合技術を開発することを目的としていた。各種 GIS のデータを CMD に変換することで、柔軟に都市モデルを構築することが可能となるため、GIS のデータを CMD に変換することはシステム開発に本質的に重要である。多様なフォーマットの GIS のデータを CMD に変換する、堅牢性の高いコードを開発した。基となったコードを大幅に改良し、CMD に関わるオブジェクトの独立性と適用性を高めた、透明性の高いコードを作成した。この結果、さまざまな都市のさまざまな GIS に対し、物理過程のシミュレーションと、非物理過程のシミュレーションを実行する都市モデルが自動構築できるようになった。CMD のコードの開発とは別に、マルチエージェントを使った自然災害からの復旧過程のシミュレーションの開発に成功した。

ついで統合自然災害シミュレーションの根幹となる、災害・被害過程の物理シミュレーションと、被害対応のマルチエージェントシミュレーションに対し、数値計算の大規模化・高速化を行った。これは並列計算を利用するもので、シミュレーションの数値解析手法のコードに、MPI と OpenMP を用いたハイブリッドの並列化を施した。スケイラビリティを確保しつつ、問題と計算環境の規模に応じた計算性能となるようコード化には工夫を凝らした。この結果、物理過程のシミュレーションと非物理過程のシミュレーションの両方の数値解析手法ともに、一応の計算性能を確保することに成功した。特に、入力/アウトプットの方法を抜本的に代えたことの効果は大きかった。この点は、物理過程のシミュレーションの数値解析手法では見逃されがちであり、他のシミュレーションの並列化された数値解析手法に転用されることが期待できる。

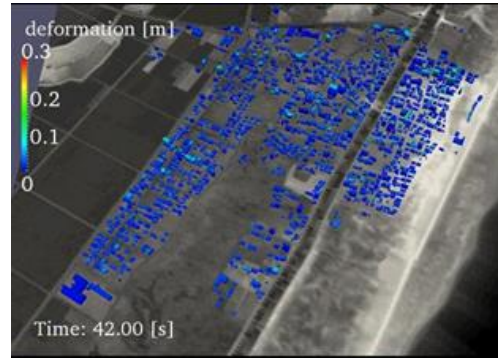
研究の第二期では、東京 23 区を対象とする



GISから自動構築された東京23区都市モデル

図3 東京 23 区の統合自然災害シミュレーションのプロトタイプ(地震災害用)

統合自然災害シミュレーションのプロトタイプに、大規模化・高速化を施した数値解析手法を実装した(図3参照)。地震災害に限定したケースであるが、ハイブリッドの並列化を実装することによって、シミュレーションの大規模化と高速化を実証した。2011年東日本大震災を受け、津波を自然災害シナリオの一つとするため津波シミュレーションを組み込み、さらに津波からの避難に対応する避難シミュレーションの高度化を行った。津波シミュレーションでは、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) を用いたコード開発とその並列化、SPH 用の都市モデルの開発を行った。これは新規なモデルであり、地盤・構造物を固定した粒子の集合、海水を移動可能な粒子の集合とするものである。構造物を地震動で揺らす地震応答シミュレーションと連成させた。地震動による損傷を受けた構造物に対して、SPH の都市モデルでは、損傷に応じてその形状が変わるようにした。この結果、地震動と津波の複合災害に対し、より現実的なシミュレーションが可能となった(図4参照)。避難シミュレーションでは、津波避難開始まで最長 30 分かかる場合があることを考慮し、エージェントのデータに待機時間を付加した。さらに、新たにオフィシャルエージェントを導入した。これは、待機時間中のため避難を開始していないエージェントに対し、避難の開始を促す機能を持つ(図5参照)。オフィシャルエージェントを 0.5%導入するだけで、待機時間の長さによる避難の遅れを短縮できる可能性があるという結果を得ている。エージェントシミュレーションの並列化にも成功し、避難方向の探索のアルゴリズムを工夫することで、25 コアの PC クラスタにおいて、スーパーリニアの並列化効率を得ている。研究の第三期は、東京 23 区と仙台市を対象に、統合自然災害シミュレーションの数値計算を実行し、計算可能性等を検証することである。これに合わせて、数値計算の大規模



GISから自動構築された仙台市太平洋沿岸地区の都市モデル(非線形地震応答解析用)

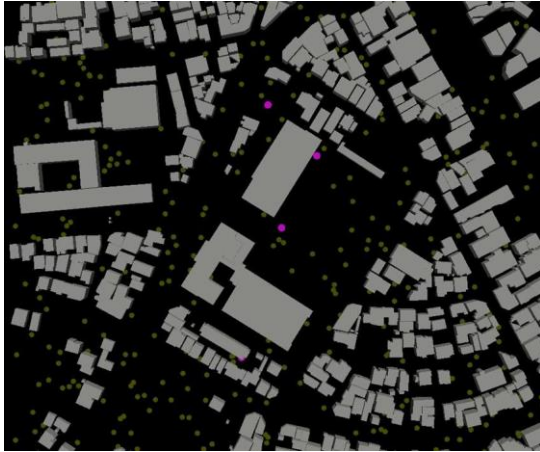


GISから自動構築された仙台市太平洋沿岸地区の都市モデル(SPH法による津波解析用)

図4 仙台市の統合自然災害シミュレーションのプロトタイプ(地震・津波災害用)

化・高速化を継続し、実装された各種数値解析手法の並列化を進め、並列化によって向上された基本的な計算性能を検証し、定量的な指標を使って大規模化・高速化を進めた。なお、開発する並列計算コードの陳腐化を避けることは重要である。持続的な更新が可能となる都市モデルの開発を対象とする本研究では、システム設置用 PC クラスタを使い、ハードウェアの更新を続け、その性能を発揮できるコードの改良も行った。高精度 GIS と地盤構造や標高の GIS を使って、統合自然災害シミュレーションシステムを試験運用の検討を行った。観測された地震等のデータを使った自然災害のシナリオを想定し、一連のシミュレーションを行い、システムの実行可能性を検証した。住民の災害認識、行政官の防災・減災計画立案、企業の事業継続計画立案、という三つの利用方法に関して、システムの機能・性能、ユーザインターフェイス等の改良点を見出した。

## 5. 主な発表論文等



GISから自動構築された避難経路モデルを使うマルチエージェントシミュレーション  
 黄色: 避難を開始していないエージェント  
 桃色: 避難を開始していないエージェントに避難を勧告するエージェント

図5 高度化された群衆避難のマルチエージェントシミュレーション)

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件) 主要論文のみ列挙

1. Pher Errol Quinay, T. Ichimura, M. Hori, Waveform Inversion for Modeling Three-Dimensional Crust Structure with Topographic Effects, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102, 1018-1029, 2012.
2. T. Ichimura, M. Hori, P. E. Quinay, M. L. L. Wijerathne, T. Suzuki and S. Noguchi, Comprehensive numerical analysis of fault-structure systems - Computation of the large-scale seismic structural response to a given earthquake scenario -, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41, 795-811, 2012.
3. Pher Errol Quinay, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, M. L. L. Wijerathne and A. Nishida, Seismic Structural Response Analysis Considering Fault-Structure System - Application to Nuclear Power Plant Structures -, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2, 516-523, 2012.
4. H. Chen, M. L. L. Wijerathne, M. Hori and T. Ichimura, Stability of Dynamic Growth of two Anti-Symmetric Cracks using PDS-FEM, *土木学会論文集 A2*, 68, 10-17, 2012.
5. Wijerathne, M., Hori, M., Kabeyazawa, T., and Ichimura, T., Strengthening of Parallel Computation Performance of Integrated Earthquake Simulation, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2012.
6. T. Ichimura, M. Hori and M. L. L. Wijerathne, Linear Finite Elements with Orthogonal Discontinuous Basis Functions for Explicit Earthquake Ground Motion Modeling, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 86, 286-300, 2011.
7. M. Hori, G. Sobhaninejad, T. Ichimura and M. Lalith, Enhancement of Integrated Earthquake Simulation with High-performance Computing, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 5, 271-282, 2011.
8. M. Hori and T. Ichimura, M. L. L. Wijerathne, On some recent achievements of earthquake simulation, *Proceedings of the International Conference on Computational Science*, 2344-2353, 2011.
9. T. Ichimura and D. Fukuda, A Fast Algorithm for Computing Least-Squares Cross-Validations for Nonparametric Conditional Kernel Density Functions, *Computational Statistics & Data Analysis*, 54, 3404-3410, 2010.
10. Gholamreza Sobhaninejad, Muneo Hori, Tsuyoshi Ichimura and Lalith Maddegadara, Real-Time Hazard Map an Application of Enhanced Integrated Earthquake Simulation (IES) with High Performance Computing Technique, *Journal of Applied Mechanics, JSCE*, 13, 691-698, 2010.

[学会発表] (計 84 件) 2012 年主要英語発表のみ列挙

1. Mitsumasa Osada, Hiroshi Dobashi, Kenji, Namikawa, Sho Nonaka, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Takemine Yamada, Naoto Ohbo, Yoshihiro Terashima, Naoyuki Kojima, Takashi Obara, Three-dimensional seismic response analysis of underground ramp tunnel structure based on multi-step analysis with massive numerical computation, *World Tunnel Congress 2012 (WTC 2012)*, Bangkok, Thailand, 18th to 23rd May, 2012.
2. Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, M. L. L. WIJERATHNE, Seizo TANAKA, STUDY ON INTEGRATING DISASTER SIMULATIONS IN URBAN AREAS USING A COMMON CITY MODEL AND APPLICATION TO INTEGRATED EARTHQUAKE-TSUNAMI SIMULATION IN URBAN AREAS, *The 8th International Symposium on Social Management Systems SSMS2012*, Kaohsiung, Taiwan 2nd-4th May, 2012.
3. S. Tanaka, M. Hori, T. Ichimura, M. L. L. Wijerathne, T. Miyamura and Li Chen, Large-scale simulation of the failure of

- concrete structure due to surge front tsunami impacts, The 10th World Congress of Computational Mechanics, Brazil, 8-13 July, 2012.
4. Ryoichiro AGATA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, A method to generate a large-scale multilayered 3DFEM model with hybrid multiresolution mesh and its application to Japan, The 10th World Congress of Computational Mechanics, Brazil, 8-13 July, 2012.
  5. Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, M. L. L. WIJERATHNE, Seizo TANAKA, Integrating seismic response analysis and high resolution tsunami simulation by data conversion for solving a system of earthquake and tsunami disaster in urban areas, The 10th World Congress of Computational Mechanics, Brazil, 8-13 July, 2012.
  6. Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Muneo HORI, M. L. L. WIJERATHNE, Seizo TANAKA, High resolution tsunami simulation in urban areas using detailed city model and three dimensional fluid analysis methods, 15th WCEE World Conference on Earthquake Engineering, Portugal, 24-28 September, 2012.
  7. P. E. Quinay, T. Ichimura, M. Hori, A. Nishida, S. Yoshimura, An Integrated Geologic- and Engineering-Length Scale Forward Modeling for Response Estimation of Nuclear Power Plant due to the Rupture of a Nearby Fault, 15th WCEE World Conference on Earthquake Engineering, Portugal, 24-28 September, 2012.
  8. Fangtao Sun, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Tsuyoshi Ichimura, M. L. L. Wijerathne, Large-scale 3D Nonlinear FEM Analysis Using Reformulated Concrete Constitutive Relations in Application to a Tunnel Junction, 15th WCEE World Conference on Earthquake Engineering, Portugal, 24-28 September, 2012.
  9. R. Agata, T. Ichimura, T. Hori, K. Hirahara, M. Hori, Crustal Deformation Analysis Using a 3D FE High-fidelity Model with Fast Computation Method and Its Application to Inversion Analysis of Fault Slip in the 2011 Tohoku Earthquake, AGU fall meeting, San Francisco, 3-7 December, 2012.

[図書] (計 3 件)

1. M. Hori, Introduction to computational earthquake engineering, 2<sup>nd</sup> edition, Imperial College Press, 2011.
2. 堀宗朗・市村強, 土木・環境系の学生の

ための物理数学, コロナ社, 2011.

3. 佐竹健治・堀宗朗 (編), 東日本大震災の科学, 東大出版会, 2012.

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/LsETD/>

6. 研究組織
  - (1) 研究代表者  
堀宗朗 (HORI MUNE0)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号 : 00219205
  - (2) 研究分担者  
小國健二 (OGUNI KENJI)  
慶応大学・理工学部・准教授  
研究者番号 : 20323652  
市村強 (ICHIMURA TSUYOSHI)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号 : 20333833
  - (3) 連携研究者  
無し