

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360183

研究課題名(和文)バーチャルリアリティ技術に基づく体験型自然災害予測シミュレータの構築

研究課題名(英文)Development of an experience based natural disaster simulator based on virtual reality technology

研究代表者

榎山 和男(Kashiyama, Kazuo)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：10194721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、住民の防災意識向上の促進を目的として、人的被害の大きい地震災害と水害(特に津波)に焦点を絞り、(1)実際の都市・地域環境を忠実に再現したモデルを構築し、(2)自然災害の発生過程を物理モデルに基づくシミュレーション手法を構築した上で、(3)その結果をバーチャルリアリティ(VR)技術に基づく高品質なCG映像をVR空間に投影し、災害を疑似体験することが可能な体験型自然災害シミュレータの構築を行った。

研究成果の概要(英文)：An experience based natural disaster simulator based on physical simulation has been developed in order to improve the awareness of disaster risk management. An accurate digital modeling system for urban area has been developed by using GIS/CAD data for the pre-process. The numerical simulation methods based on parallel computation have been developed for the computation of natural disaster. A high quality visualization system based on the virtual reality technology has been developed for the post-process.

研究分野：計算力学

キーワード：バーチャルリアリティ 自然災害 津波 地震

1. 研究開始当初の背景

(1) 東日本大震災をはじめとして国内外において自然災害が頻発する中、自治体を始めとして各地で防災計画が策定され、また、こうした動きに合わせるように、緊急時の避難や情報伝達についての研究開発が進められていた。

(2) しかし、このような防災対策の推進にもかかわらず、一般住民の防災に対する意識はそれ程向上しているとは言えなかった。その大きな原因の一つとして、これらの対策では、主に災害時の緊急対応を対象としているため、災害予測も迅速に結果が算定される簡易手法(シナリオ型あるいは統計的モデル)が採用されている点が挙げられる。すなわち、簡易手法から導かれる結果は、災害についての大略的性質を表しているが、自然現象の発生から災害に進展していく過程を陽に提示することが困難なため一般住民が災害現象をイメージできない、という理由が挙げられる。

(3) 以上の背景を踏まえ、本研究では、災害予測を正確に行うために、従来のシナリオ型あるいは統計的モデルに基づく災害予測ではなく、物理モデルに基づく災害予測を行い、誰もが自然災害を具体的に理解できるように、計算結果をVR技術に基づく立体視映像により表示する体験型自然災害予測シミュレータを開発することを目指した。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、住民の防災意識向上の促進を目的として、人的被害の大きい地震災害と水害(特に津波)に焦点を絞り、実際の都市・地域環境を忠実に再現したデジタル都市・地域の作成モデルの構築を行う。

(2) 自然災害を高精度に予測するために、物理モデルに基づくシミュレーション手法を構築し、その手法を用いて自然災害の発生過程を再現する。

(3) 計算結果をバーチャルリアリティ(VR)技術に基づく高品質なCG映像をVR空間に投影し、災害を疑似体験できる体験型自然災害シミュレータの構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 前処理手法として、GIS/CADデータを用いたバーチャルデジタル都市・地域の作成(形状モデリングとメッシュ生成)手法の構築を行う。ここでは、有限要素法を用いることを前提とした非構造格子モデルおよび粒子法を用いることを前提とした粒子モデルの構築を行う。

(2) 物理シミュレーションのソルバーとして、流体シミュレーション手法の高度化と並列化、および固体シミュレーション手法の高度化と並列化を行う。流体および固体のシミュレーション手法としては、有限要素法および粒子法を採用し、並列化手法としてはMPIを用いる。また、それらの手法の統合した連

成解析システムの構築を行う。なお、連成手法としては、弱練成手法を採用する。

(3) 後処理手法として、バーチャルリアリティ(VR)技術を用いた高品質な可視化手法の構築、およびそのシミュレータの適用と評価・改良、を行う。

4. 研究成果

(1) GIS/CADによるバーチャルデジタル都市・地域の作成(形状モデリングとメッシュ生成)手法の構築を行った。CADシステムを用いて形状モデリングを行い、有限要素法を用いることを前提とした非構造格子モデルおよび粒子法を用いることを前提とした粒子モデルの構築を行った。また、高品質な非構造格子モデルを作成するために、バーチャル技術を用いた非構造格子のメッシュ修正システムの構築を行った(雑誌論文)。この手法の構築により、バーチャルリアリティ空間において、ユーザがメッシュを適切に修正可能となった。

(2) 広域の津波シミュレーション手法として、2次元 Boussinesq 方程式を用いた手法の構築を行った。手法としては、CIVA-安定化有限要素法をもとに構築を行った(雑誌論文)。検証例題において、計算結果は従来の安定化有限要素法による結果に比べて、理論解と良い一致を示した。また、東日本大震災の津波シミュレーションにおいて、女川を計算対象として浸水域の計算を行ったところ、図-1に示すように計算結果は実測結果と良い一致を示した。

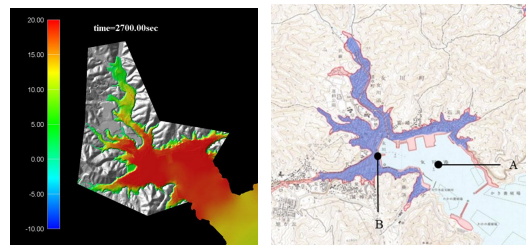


図-1 浸水域の比較(左:計算、右:実測)

(3) 3次元流体シミュレーション手法として、Navier-Stokes方程式を基礎方程式としてVOF法に基づく安定化有限要素(雑誌論文)および安定化ISPH粒子法(雑誌論文)に基づく手法を構築した。そして、いくつかの既往の実験事例を用いて流体力の評価について検討を行い、3次元の計算結果は2次元の計算結果に比べて、実験値と良い一致を示すことを確認した。

(4) 津波シミュレーションを効率よくかつ高精度に実施するためには、沖合から海岸構造物付近までの広領域に対しては2次元モデル(浅水長波方程式または Boussinesq 方程式)に基づく手法を、海岸構造物から陸上遡上部に対しては、3次元モデル(Navier-Stokes方程式)に基づく手法を用いる連成解析が必要不可欠となる(図-2 参

照)

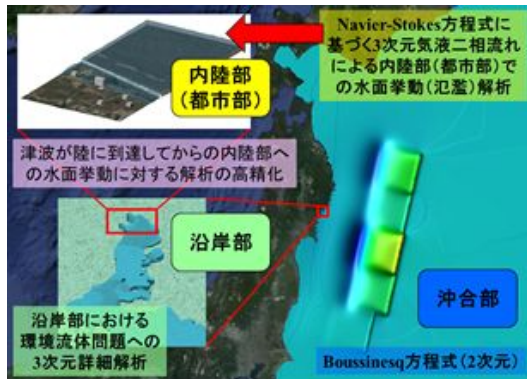


図-2 連成解析の概要

そこで、本研究では、安定化有限要素法に基づく結合解析手法の構築を行った(雑誌論文)。図-3は、2次元モデルと3次元モデルの連成解析の結果の一例である。連成解析については、実際の地形および構造物を再現したモデルを用いての妥当性の確認が今後の課題である。

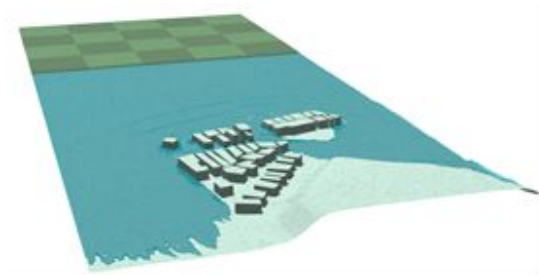


図-3 連成解析の結果の一例

(5) 固体シミュレーション手法として、粒子法(安定化 ISPH 法)に基づく手法(雑誌論文、)を構築した。また、粒子法に基づく流体-構造連成解析手法の構築を行った。

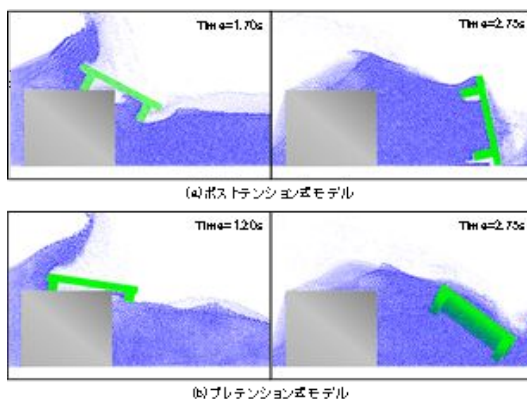


図-4 各モデルの流出挙動の比較

図-4に東日本大震災において被災した事例に適用した結果を示す。図中、上部構造は緑、橋脚は灰、水は青で色付けしている。図よりプレテンション式上部構造モデルと比

べポストテンション式上部構造モデルはより回転を伴う流出挙動が確認された。これは、ポストテンション式上部構造は地覆張り出し長が大きく、津波衝突時に鉛直方向に受ける流体力が大きくなること、また桁高の高さにより橋脚と床版の接触が遅れることにより、より回転するようなモーメントが作用するためと考えられる。ポストテンション式上部構造を模した橋梁モデルがより回転するといった現象は、歌津大橋の実際の被害報告と類似したものとなった。ただし、まだ支承部のモデル化が不十分なことに加えて、流入条件が実際のものとはことなるため、妥当性の確認が今後の課題である。

(6) 津波等による流体力に構造物の安全性を検討するためには、破壊力学に基づく流体-固体連成解析が重要となる。

そこで、本研究では3次元有限要素法に基づく微細ひび割れの形成と接触を考慮した準脆性材料の圧縮破壊シミュレーション手法の構築を行った(査読論文)。実験結果との検証例題において、手法の妥当性の確認を行った。今後は、破壊現象を考慮した流体-構造連成解析手法の構築を行う予定である。

(7) 大規模かつ複雑な計算結果を数値計算が専門でない一般住民に対して分かり易く可視化表示するためには、効率的な可視化技術と効果的な可視化手法の融合が必要不可欠である。

本研究では、計算結果の可視化に際して、建物および地形形状に適合した非構造格子を作成し、それに計算結果を写像した上で、テキストチャマッピング手法によって、航空写真画像や津波浸水画像を貼り合わせ、CG効果を付加することでフォトリアリスティックな津波浸水画像を作成する手法を構築した(査読論文)。図-5に、東日本大震災による津波の可視化映像を示す。構築した本可視化ツールは、地域住民の津波からの避難教育などに有用なツールと成り得るといえる。



図-5 可視化例

(8) 計算結果をVR空間に立体映像として可視化表示するに際して、より臨場感を向上させるためには、物理現象から生じる音を実装することが重要となることが判明した。

そこで本研究では、可視化技術(査読論文

と可聴化技術を用いて、津波現象をバーチャルリアリティ空間内で再現し、立体視に基づく可視化映像とともに津波の襲来音を実装した疑似体験システムの構築を試みた(査読論文)。その結果、検証例題において、立体音響場が正しく再現できていることが確認された。また、立体視に加えて立体音響場を実装したことにより実装前と比べ臨場感の高いVR空間の提供が可能となった(図-6 参照)。音源位置の設定、音源データの取得についての検討が今後の課題である。



図-6 VR空間にて疑似体験している様子

5. 主な発表論文等

(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 19 件)

高橋佑典・桜庭雅明・榎山和男、津波シミュレーションのための CIVA-安定化有限要素法、土木学会論文集 A2(応用力学)、査読有、Vol.70(No.2)、pp. 1_349-1_356、2015

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/70/2/70_1_349/_pdf

高瀬慎介・加藤準治・森口周二・寺田賢二郎・京谷孝史・野島和也・桜庭雅明・榎山和男、安定化有限要素法を用いた 2D-3D ハイブリッド手法による津波解析、土木学会論文集 A2(応用力学)、査読有、Vol.70(No.2)、pp. 1_307-1_315、2015

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/70/2/70_1_307/_pdf

浅井光輝・合田哲朗・小國健二・磯部大吾郎・榎山和男・一色正晴、安定化 ISPH 法を用いた津波避難ビルに作用する流体力評価、土木学会論文集 A2(応用力学)、査読有、Vol.70(No.2)、pp. 1_649-1_658、2015

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/70/2/70_1_649/_pdf

岩塚雄大・古牧大樹・西畑剛・川辺起史・榎山和男、地域防災教育のための 3 次元津波浸水解析とその可視化に関する研究、土木学会論文集 F3(土木情報学)、査読有、Vol.70、pp. 1_152-1_159、2015

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejcei/70/2/70_1_152/_pdf

川辺起史・榎山和男・宮地英生・岩塚雄大・古牧大樹・西畑剛、可聴化技術を用

いた津波疑似体験システムの構築、土木学会論文集 F3(土木情報学)、査読有、Vol.70(No.2)、pp. 1_235-1_242、2015
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejcei/70/2/70_1_235/_pdf

Abdelraheem M. Aly, Mitsuteru Asai, Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics Simulations of Fluid-Structure Interaction on Free Surface Flows、International Journal of Fluid Mechanics Research、査読有、Vol.41、pp.471-484、2015

Abdelraheem M. Aly, Mitsuteru Asai, Modelling of non-Darcy Flows through porous media using an extended Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics、Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamental、査読有、Vol.67、pp. 255-279、2015

Takahiro Kawaguchi and Kenji Oguni, Automatic Conversion of Visually Consistent Digital Maps to Conforming Geometry for Computational Fluid Dynamics、Journal of Computing in Civil Engineering、査読有、Vol.29、04015003-1-11、2015

DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.000473

神野真弥・車谷麻緒・寺田賢二郎・京谷孝史・榎山和男、微細ひび割れの形成と接触を考慮した準脆性材料の圧縮破壊シミュレーション、日本計算工学会論文集、査読有、p.20140006、2014

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsces/2014/0/2014_20140006/_pdf

榎山和男、防災・減災分野における計算機シミュレーション、学術の動向、査読なし、Vol.19(No.10)、pp.21-25、2014

田邊将一・浅井光輝・中尾尚史・伊津野和行、3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証、構造工学論文集、査読有、Vol.60A、pp293-302、2014

https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/60A/0/60A_293/_pdf

A. Kageyama, N. Ohno, S. Kawahara, K.Kashiyama and H. Ohtani, Immersive VR visualization by VFIVE, Part 2: Applications、International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing、査読有、Vol.4(Suppl. 1)、p.1340004、2013

I.Nakamura, M.Saeki, K.Oguni, B. Buttara zzi, M.Basili and S.Glaser, Energy-Saving Wireless Sensor Node for Relative Positioning of Densely Deployed GPS Network、Journal of Infrastructure Systems、査読有、p4014003、2013

DOI:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.00001

N. Murata and K.Oguni, Behavior of magnetic particles under fluctuating fields considering hysteresis characteristics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, Vol.335, pp. 36-45, 2013

DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.01.029

A. M. Aly, M. Asai, Y. Sonoda, Modelling of surface tension force for free surface flows in ISPH method, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 査読有, Vol.23, pp. 479-498, 2013

10.1108/09615531311301263

高田知学・榎山和男・林田憲治・陰山聡・大野暢亮、バーチャルリアリティ技術を用いた有限要素メッシュの対話的修正システムの構築, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.68, pp. 1_217-1_218, 2012

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/68/2/68_1_217/_pdf

山崎輔・榎山和男・陰山聡・大野暢亮、バーチャルリアリティ技術を用いた非構造格子に基づく流れの対話的可視化システムの構築, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.68, pp. 1_261-1_268, 2012

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/68/2/68_1_261/_pdf

近藤真徳・小國健二、線形弾性体の動的破壊進展の数値解析手法の提案, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.68, pp. 51-66, 2012

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/68/1/68_51/_pdf

浅井光輝・上坂隆志・園田佳巨・西本安志・西野好生、都市型水害対策用ゴム製止水構造の非線形有限要素解析とその検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.68, pp. 1_353-1_360, 2012

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/68/2/68_1_353/_pdf

[学会発表](計 18 件)

榎山和男、防災シミュレーションにおけるバーチャルリアリティ技術を用いた可視化、応用力学委員会 中部地区フォーラム「地震・津波災害へ備えるために ~ 応用力学からのアプローチ, 解析現状と精度」, 2014 年 10 月 2 日、名城大学サテライト (愛知県名古屋市)

松本純一・榎山和男、有限要素法を用いた 2D 浅水流れと 3D 気液二相流れにおける結合法の検討, 第 19 回計算工学講演会, 2014 年 6 月 11 日~2014 年 6 月 13 日、広島国際会議場 (広島県広島市)

S.Takase, J.Kato, S.Moriguchi, K.Terada, T.Kyoya, M.Kurumatani, M.Asai, K.Kashi

yama, M.Sakuraba and K.Nojima, 2D-3D Hybrid method for tsunami simulation based on stabilized finite element method, COMPSAFE2014(Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems), 2014 年 4 月 13 日~2014 年 4 月 16 日, Sendai(Japan)

D.Furumaki, Y.Iwatsuka, T.Nishihata, T.Kawabe, K.Kashiyama, 3D Numerical analysis on tsunami inundation and visualization of evacuator's view, COMPSAFE2014(Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems), 2014 年 4 月 13 日~2014 年 4 月 16 日, Sendai(Japan)

S.Tanabe, M.Asai, K.Terada, K.Kashiyama, S.Moriguchi and M.Kurumatani, Numerical evaluation of impact tsunami force acted on bridge girders by using a particle method, COMPSAFE2014(Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems), 2014 年 4 月 13 日~2014 年 4 月 16 日, Sendai(Japan)

K.Kashiyama, Modeling and Simulation for Safety and Environmental Problems Using Virtual Reality Technique, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013 年 12 月 11 日~2013 年 12 月 14 日, Singapore

T.Fumuro, S.Tanaka and K.Kashiyama, Large-Scale Tsunami Simulation Based on Three-Dimensional Parallel SUPG-VOF Method, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013 年 12 月 11 日~2013 年 12 月 14 日, Singapore

Y.Takahashi, K.Kashiyama and M.Sakuraba, CIVA-Stabilized Finite Element Method for Tsunami Simulations, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013 年 12 月 11 日~2013 年 12 月 14 日, Singapore

S.Tanaka, K.Kashiyama, and A.Kageyama, Mesh Modification System for Three Dimensional Unstructured Mesh Using VR Technology, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013 年 12 月 11 日~2013 年 12 月 14 日, Singapore

T.Kawabe, K.Kashiyama, H.Okawa and H.Miyachi, Development of Simulation System for Tsunami Evacuation Using Virtual Reality Technology, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics, 2013 年 12 月 11 日~2013 年 12 月 14 日, Singapore

K.Oguni, Analysis of dynamic propagation of cracks based on particle discretization Scheme Finite Element Method, Society of Engineering

Science 50th Annual Technical Meeting、
2013年7月28日～2013年7月31日、
Providence(USA)

S.Hirobe and K.Oguni、 Numerical
Simulation of Diffusion Induced Crack
Formation in Solids、 International
Conference on Coupled Problems in
Science and Engineering、 2013年6月
17日～2013年6月19日、 Ibiza(Spain)
K. Kashiwama、 Finite element methods
based on CIVA/SUPG for tsunami waves、
17th International Conference on Finite
Elements in Flow Problems (FEF 2013)、
2013年2月27日、 San Diego(USA)

浅井光輝・一色正晴、粒子法による3次
元津波シミュレーションの可視化とその
応用、第18回ビジュアライゼーションカン
ファレンス(可視化情報学会)、2012年
12月3日、タイム24ビル(東京都江東
区)

H. Sumitomo, K. Oguni、 O(n) algorithm
for identification of domain isolation
by fracture surfaces、 6th European
Congress on Computational Methods in
Applied Sciences and Engineering
(ECCOMAS 2012)、 2012年09月13日、
Vienna(Austria)

M. Kondo and K. Oguni、 Analysis of
dynamic propagation of brittle failure
by PDS-FEM with energy balance
consideration、 6th European Congress
on Computational Methods in Applied
Sciences and Engineering (ECCOMAS
2012)、 2012年09月13日、
Vienna(Austria)

M. ASAI、 K. Fujimoto, T. Mikami, H.
Tatesawa、 High performance
incompressible SPH method and its
application to Tsunami disaster
simulation、 10th World Congress on
Computational Mechanics、 2012年7月
11日、 San Paulo (Brazil)

K. Kashiwama、 Modeling and simulation
of Tsunami waves -challenge to
disaster prevention-、 10th World
Congress on Computational Mechanics、
2012年7月10日、 San Paulo(Brazil)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/keisai
n/kenkyuunaiyou.html](http://www.civil.chuo-u.ac.jp/lab/keisai/n/kenkyuunaiyou.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎山 和男 (KASHIYAMA, Kazuo)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：10194721

(2) 研究分担者

小國 健二(OGUNI, Kenji)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：20323652

浅井 光輝(ASAI, Mitsuteru)
九州大学・工学(系)研究科(研究院)・
准教授
研究者番号：90411230