

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K01334

研究課題名(和文) 水害防護対策工の信頼性向上のための大規模水害シミュレータの開発

研究課題名(英文) The developing of a simulator for flood disaster to estimate the damage of structure

研究代表者

田中 聖三 (Tanaka, Seizo)

広島工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10439557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：水害の被害評価を行うことのできる水害シミュレータの開発を目的とした研究を行った。洪水や津波などの自由表面流れ解析手法としては、界面捕捉法に基づく方法を採用し、大変形・移動する構造物を考慮するための移動境界手法として、メッシュ再構築手法に基づく界面追跡法を開発する予定であった。しかしながら、界面捕捉法に基づく自由表面流れ解析手法において、局所的な質量保存がされていない問題が発生していることが判明した。質量保存の問題は、水害の氾濫域の評価精度を大きく低下させる可能性があるため、移流方程式の解法にDiscontinuous Galerkin (DG) 法に基づく方法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水害の被害評価において、氾濫域の予測精度は結果に対し大きな影響を及ぼす。また領域内の水の質量保存が満たされない場合、氾濫域の予測精度は大きく低下することとなる。質量保存を満たすために補正をかける方法も提案されているが、それらは領域全体での質量保存を満たす方法であり、分離や合体を繰り返す氾濫解析では局所的な質量保存が満たされる保証は無い。本研究の成果として開発されたDiscontinuous Galerkin法に基づく方法では、この局所的な質量保存を満たす方法であり、氾濫域の予測精度の向上に大きく寄与する方法である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the simulator for flood disaster to estimate the damage of structure. The interface capturing method for the free surface flow analysis technique based on stabilized finite element method had a local problem on mass conservation of water. This problem was serious to estimate the flooding area. To overcome this problem, we have developed the advection equation solver based on discontinuous Galerkin method.

研究分野：自然災害科学・防災学

キーワード：水害シミュレータ 界面捕捉法 Discontinuous Galerkin法 質量保存

1. 研究開始当初の背景

2011年に発生した東日本大震災では津波による未曾有の被害が引き起こされ、多くの構造物が津波により破壊された。また、2015年9月の関東・東北豪雨では洪水氾濫、浸水が発生し、家屋の流出・倒壊などの甚大な被害が引き起こされた。さらに2016年には多くの台風が来襲し、日本の至る場所で水害が引き起こされた。特に洪水や高潮被害は、気象変動によりその発生リスクが上昇しており、その被害も想定以上のものとなる可能性がある。これらの災害による被害を減らすためには強固な防護対策工（堤防や防波堤）が必要となるが、この防護対策工に想定以上の外力が作用した場合の安全性を確保するためには、終局状態の挙動を把握することが必要である。さらに外力を与える津波や洪水などによる流体と力を受けて変形・移動する構造物の相互連成を考慮する必要もある。そこでこれらの評価が可能な数値シミュレーション手法の開発を行った。

2. 研究の目的

今後、発生リスクの高まる洪水や高潮、そして発生頻度は低いものの甚大な被害を引き起こす津波といった水害による被害予測および、対策工の安全性、機能性を評価することが可能な大規模水害シミュレータの構築を目的として、対策工の転倒、大移動、破壊などの終局状態における挙動を把握することが可能な有限要素法に基づく流体-構造連成解析手法を開発し、その現象の定量的な評価を行うことが可能なシステムの開発を行う。

3. 研究の方法

上記の大規模水害シミュレータの開発に向け、以下の3点について取り組みを行った。

(1) 自由表面流れ解析手法の解析精度、安定性の向上

研究代表者がこれまでに開発してきている有限要素法に基づく津波伝播シミュレータを基に、解析精度、安定性の向上を行う。本課題において、自由表面流れ解析は浸水域の評価であり、構造物に作用する流体力の評価となる。特に領域内の水の質量の保存性は浸水域の評価精度に大きく影響するため、保存性について確認していく必要がある。自由表面流れ解析手法としては、界面捕捉法に基づく方法を用いる。界面捕捉法での解析精度、安定性は非圧縮性粘性流体解析手法だけでなく、界面関数の支配方程式の解法の影響も受けるため、検討を行う必要がある。非圧縮性粘性流体解析手法としては、地形や建物などの複雑な表現が可能である有限要素法に基づく方法を開発する。最終的には構造物との連成解析を行うため、その連成をシームレスに行うことができるシステムを念頭に置いた開発を行う。

(2) 終局状態の挙動を表現可能な構造解析手法と流体の連成手法の検討

水害を引き起こす流体力が作用する構造物、特に防護対策工の安全性を検討するために、大変形、破壊を伴う終局状態を表現することが可能な方法を検討し、自由表面流れ解析手法との連成方法について検討を行う。本課題では、はり要素を用いて構造物の大変形、大移動現象を解析することができる ASI-Gauss 法の導入を行う。開発された手法は流体力を外力として構造解析を行い、手法の妥当性を検証する。

(3) メッシュ再構築手法を用いた構造物の大移動を考慮した流体-構造連成手法の開発

本課題では終局状態の構造物の挙動を把握するために、破壊し、その破片が流出するような、構造物が大移動する問題を取り扱う。その構造物の表現には有限要素メッシュの境界として直接的に表現する方法が幾何形状を正確に表現し、流体力を高精度に外力として算定することができる。しかし有限要素メッシュの境界で移動する構造物を表現する場合には、メッシュのゆがみが大きくなってしまい、最終的には解析が破綻してしまう。そのため構造物の移動にあわせて解析メッシュを随時再構築する手法が必要となる。本課題ではバックグラウンドメッシュを用いた3次元メッシュ再構築手法の開発を目標とする。ただし、開発に先立って、構造物境界を関数で間接的に表現する流体-構造連成解析手法の構築を行い、システムの設計方針を得ることとする。

4. 研究成果

研究方法で説明した3つの内容について研究を行う計画であったが、界面捕捉法における解析領域内の流体質量の局所的な保存性について問題が発覚し、その解決のために研究期間の多くを費やすこととなった。そのため、バックグラウンドメッシュに基づくメッシュ再構築手法の開発が滞ったため、流体-構造連成解析手法は、構造物を関数で間接的に表現する方法での検討を行った。この遅れのため、実地形での検証や大規模問題に対する高速化などを行うことはできなかった。それ以外の本課題で得られた成果の概要を以下に説明する。

(1) 自由表面流れ解析手法の精度, 安定性の向上

研究代表者はこれまでに, 安定化有限要素法を用いた界面捕捉法に基づく自由表面流れ解析手法の開発を行ってきた. この手法は解析を進める上で, 界面関数の分布が不明瞭となる問題があり, これに対して, 質量保存を考慮した界面鋭敏化手法を導入していた. この質量保存は解析領域全体で質量保存を満たす方法であり, 水路や水槽内の流れでは大きな問題とはなっていないが, 局所的な質量保存を満たしていないため, 流体領域が分離したり合体する問題においては, 解析結果に信頼性が無いことが研究を進めるうちに発覚した. 具体的には, 浸水域を評価する上で, ある地域にあった水が, 別の地域に移動する現象が起っていた. これは全体的な質量保存は満たしているため, これまで問題が明確化されていなかった. この局所的な質量保存性を満足するために, 界面関数の基礎方程式である移流方程式の解法を discontinuous Galerkin 法に変更し, 検証を行った.

開発した DG 法の有効性を検証するために, 二つの水槽内のダムブレイク問題 (物理的に分かれている 2 つの領域を取り扱う問題) を取り上げ, 従来の安定化有限要素法 (CG 法) との比較を行った.

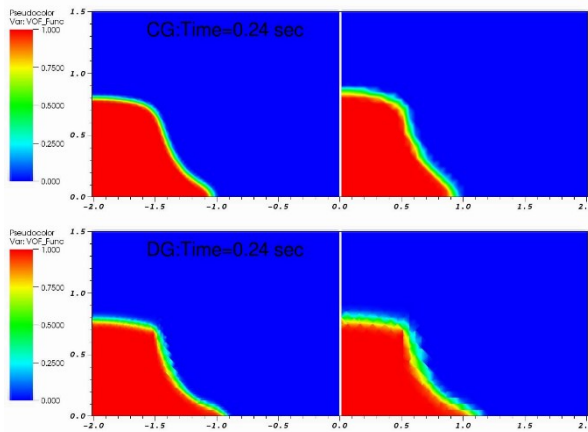


図1 二つの水槽内のダムブレイク問題
(界面関数の分布, 上: CG 法, 下: DG)

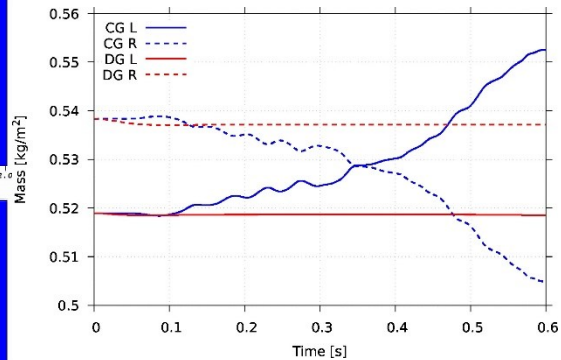


図2 各領域の質量の時刻歴

解析結果として図1にCG法とDG法による界面関数の分布と, 図2に各領域の質量の時刻歴を示す. 界面関数の分布はCG法, DG法とも同等の結果が得られている. しかし, CG法による各領域の時刻歴では, 解析領域全体 (2つの水槽内の合計) では質量は保存されているが, 各水槽での質量は満たされておらず, 各水槽間で質量の輸送が行われており, 不自然な結果となっている. 一方で, DG法による結果は各領域で質量は変化せず初期質量を保っていることが分かる. このことから, 本課題ではDG法に基づく解析手法の開発を行うこととした. 解析精度, 計算効率向上のための適合メッシュ法や, 安定性向上のために基礎方程式を Phase-Field 法に変更するなどの開発を行い, 手法を3次元へ拡張し, 同様に局所的な質量保存の問題が起っていないことを確認した.

(2) 終局状態の挙動を表現可能な構造解析手法と流体の連成手法の検討

終局的な構造物の挙動を解析することを目的とし, ASI-Gauss 法を拡張し, 流体力を外力として入力可能な解析システムを開発した. 検証問題として津波避難ビルに作用する流体力の評価を取り上げる.

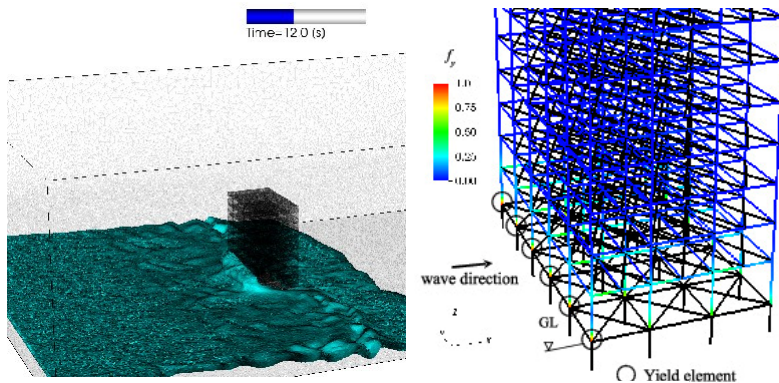


図3 津波避難ビルの流体力評価解析
(左: 津波水面形状, 構造解析結果)

流体力を外力として入力可能な解析システムを開発した. 検証問題として津波避難ビルに作用する流体力の評価を取り上げる. 解析結果として図3に津波水面形状と流体解析による流体力を荷重条件とした ASI-Gauss 法による構造解析結果を示す. 本解析では流体から構造への一方向連成であるが, はり要素モデルである ASI-Gauss 法とのカップリングに成功していることが分かる.

(3) メッシュ再構築手法を用いた構造物の大移動を考慮した流体-構造連成手法の開発

構造物の大変形、大移動を考慮するためのメッシュ再構築手法は、当初の計画で予測されていなかった(1)での局所的な質量保存問題に対応するための研究期間が必要となり、開発が滞ってしまった。そこで、構造物の境界を間接的に表現する方法を導入し、剛体と流体の連成問題解析を行った。解析例は水槽内の円柱自由落下問題を取り上げた。図4の左に円柱中心の軌跡の実験値と解析値の比較を行っている。実験値とは若干異なる結果となっているが、図4右に示される各時刻における渦度のように、流体と構造の連成現象を解析することができていることがわかる。今後、剛体からASI-Gauss法への拡張を計画している。

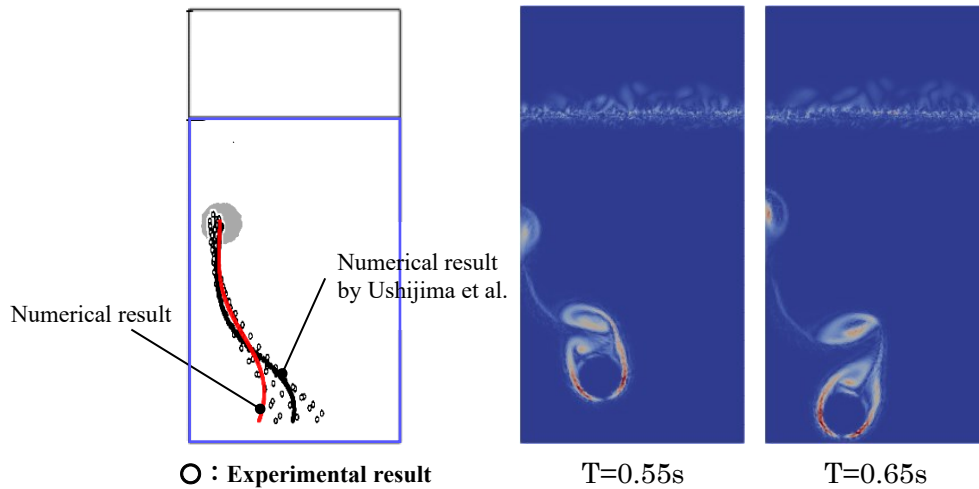


図4 水槽内円柱自由落下問題

(左：円柱中心の軌跡，右：紙面垂直方向軸周り渦度)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 田中 聖三, 高瀬 慎介	4. 巻 73
2. 論文標題 界面捕捉法に基づく自由表面流れ解析手法のためのDiscontinuous Galerkin法の検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_273 - I_281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.73.I_273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福島 寛二, 田中 聖三, 磯部 大吾郎	4. 巻 2018
2. 論文標題 界面捕捉法による自由表面流れ-構造連成解析手法の基礎的検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2018.20182004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 田中 聖三, 磯部 大吾郎	4. 巻 2018
2. 論文標題 津波避難ビルの損傷評価のための有限要素解析手法の構築	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2018.20182008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 藤田将司, 佐藤信光, 田中聖三, 京藤敏達
2. 発表標題 地震による重力式ダムクレストゲートの振動及び動水圧の発生要因の分析
3. 学会等名 第39解地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田将司, 佐藤信光, 佐野貴之, 田中聖三
2. 発表標題 実測地震記録および解析による重力式ダムクレストゲート部動水圧の発生要因分析
3. 学会等名 第74回土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南手陽太郎, 田中聖三
2. 発表標題 Adaptive Discontinuous Galerkin法のための高解像度化方法の検討
3. 学会等名 第74回土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中聖三, 高瀬慎介
2. 発表標題 界面捕捉法におけるDiscontinuous Galerkin法の有効性の検討
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seizo Tanaka
2. 発表標題 Wave propagation analysis based on interface capturing approach with DG method
3. 学会等名 the 7th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsuke Takase, K. Hashimoto, R. Ogasawara, K. Kaneko, S. Tanaka, K. Nojima and M. Sakuraba
2. 発表標題 Fluid-rigid body interaction analysis based on Finite Cover Method
3. 学会等名 the 7th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsuke Takase, R. Ogasawara, K. Kaneko, S. Tanaka, K. Nojima and M. Sakuraba
2. 発表標題 FSI analysis considering Tsunami debris impact loading based on Finite Cover Method
3. 学会等名 the 20th International Conference on Fluid Flow Problems (FEF-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seizo Tanaka
2. 発表標題 Development of a DG method for tsunami analysis based on interface capturing method
3. 学会等名 the 20th International Conference on Fluid Flow Problems (FEF-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中聖三
2. 発表標題 界面捕捉法に基づく自由表面流れ解析のためのAdaptive Discontinuous Galerkin法
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seizo Tanaka
2. 発表標題 Discontinuous Galerkin method for advection equation of interface capturing method
3. 学会等名 13th World Computational Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高瀬慎介
2. 発表標題 瓦礫の衝突を考慮した津波荷重に関する基礎的研究
3. 学会等名 第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinsuke Takase
2. 発表標題 Tsunami debris simulation considering impact loading based on Finite Cover Method
3. 学会等名 13th World Computational Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中聖三
2. 発表標題 界面捕捉法による津波伝播解析の移流方程式のためのDG法の検討
3. 学会等名 日本計算工学会計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中聖三
2. 発表標題 界面捕捉法に基づく自由表面流れ解析手法のためのDiscontinuous Galerkin法の検討
3. 学会等名 土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seizo Tanaka
2. 発表標題 Discontinuous Galerkin approach for free surface flow analysis based on interface capturing method
3. 学会等名 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seizo Tanaka
2. 発表標題 Development of tsunami wave propagation analysis method for damage estimation of structure
3. 学会等名 19th International Conference of Finite Elements in Flow Problems (FEF2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yotaro Minamite, Seizo Tanaka, Daigoro Isobe
2. 発表標題 A study of local mass conservation in 3D flood simulator
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	高瀬 慎介 (Takase Shinsuke) (00748808)	八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授 (31103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------