

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19815

研究課題名（和文）高レイノルズ数流れと複雑構造の大規模連成解析のためのオイラー型解法の開発

研究課題名（英文）Development of Eulerian scheme for large-scale interaction simulation of high Reynolds number flows and complex structures

研究代表者

西口 浩司（Nishiguchi, Koji）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10784423

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：オイラー型解法は、構造の大変形解析や大規模並列計算に適している。ただし、ヤング率の高い構造解析では従来のオイラー型解法では数値安定性に課題があった。原因は、速度勾配の不連続による数値不安定、固体応力波のクーラン条件による時間増分制約の2つが挙げられる。そこで本研究では、Reference map法により前者を解消し、半陰解法により後者を緩和した手法を提案する。界面の速度勾配が不連続であるベンチマーク問題において、実行時間の観点で陽解法と比較して提案手法が優位であり、従来の速度勾配法においても弾性率の高い領域において実行時間の観点で優位であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究成果は、乱流と伴う気流と構造物の相互作用シミュレーションや、金属材料など弾性率が高い構造物の超並列シミュレーションを実現する要素技術となるものである。これにより、社会基盤構造物などの安全性評価において、より正確かつ効率的な解析が可能となり、安全性の向上に寄与することが期待される。さらに、この方法論は、氾濫解析など自然災害時の構造物の挙動予測にも応用でき、災害リスクの低減にも貢献する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Eulerian methods are well-suited for the analysis of large deformations in structures and for large-scale parallel computations. However, in the analysis of structures with high Young's modulus, conventional Eulerian methods have faced challenges with numerical stability. The causes can be attributed to two main factors: numerical instability due to discontinuities in velocity gradients, and time increment constraints imposed by the Courant condition for solid stress waves. Therefore, this study proposes a method that resolves the former issue through the Reference map technique and mitigates the latter using a semi-implicit scheme. In benchmark problems where the interface velocity gradient is discontinuous, it was found that the proposed method is superior in terms of execution time when compared to explicit methods, and also shows an advantage in execution time in regions with high elasticity rates when compared to traditional velocity gradient methods.

研究分野：計算力学

キーワード：オイラー型解法 構造流体連成問題 界面不連続性

1. 研究開始当初の背景

固体と流体を同時に計算する連成問題に対するアプローチの1つとして、Zhaoら(2008)の提案した、固体をラグランジュメッシュで計算し、流体を空間固定したオイラーメッシュで計算する手法がある。しかし、この手法においてはラグランジュメッシュの生成に多大な時間がかかる場合がある上、固体が大変形を生じる場合はメッシュの再生成を行う必要がある。

これらの問題を回避するための手法として、Sugiyamaら(2011)は有限差分法を用いた完全オイラー型固体-流体連成解法を提案している。一方で固体界面をVolume-Of-Fluid(VOF)法により捕捉しており、移流計算を必要とすることから、固体界面および固体内部変数の数値不安定が課題であった。

そこで、Nishiguchiら(2018)は固体領域を表現するためのマーカー粒子を新たに導入し、固体体積率や固体に関する物理量をマーカー粒子の情報を利用して計算するオイラー型固体-流体連成解法を提案している。これにより、オイラー型固体-流体連成解法において固体界面及び固体内部変数の数値不安定を回避できるようになり、解析精度が向上された。

また、西口ら(2017, 2019)は階層型直交メッシュ法的一种であるビルディング・キューブ法(Nakahashiら, 2003)を用いた完全オイラー型流体-構造強連成解法を提案している。ビルディング・キューブ法に基づくオイラー型解法は、数十万コアレベルの超並列計算環境において高い並列化効率を得やすく、かつ幾何学的に複雑な構造物の解析メッシュを自動かつ高速に生成できる利点を有する。また、嶋田ら(2022)はこれをマーカー粒子によるオイラー型固体-流体連成解析に適用した手法を提案し、固体界面の形状精度が向上した。

ここで、実問題の大規模解析を想定した際に、固体と流体の速度差が大きい問題例として高層ビルと周辺風の連成現象などが挙げられるが、固体として鋼など弾性率の高い物質が利用されていることから、弾性率の増加に伴う時間増分制約を緩和することは工学的に重要である。

しかし、弾性率の高い固体と流体を解析するにあたっては、2つの問題が生じる:(1)固体と流体の界面における、速度勾配の不連続による数値不安定、(2)固体応力波の伝搬速度のクーラン条件による時間増分制約

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究ではReference map法を利用した陰的オイラー型固体-流体連成解法を提案し、複数のベンチマーク問題においてその計算精度、計算時間、計算安定性を検証する。また、複数の弾性率において同様の比較を行うことで、弾性率を上昇させた際の数値安定性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では連続体力学の理論を利用し、固体と流体が同時に存在する場の解析を行う。なお、オイラー型解法を用いる際は、一つの計算セルに複数の物質が存在しうる。そこで本研究では、岡澤ら(2010)や西口ら(2015, 2019)により提案された、非圧縮性の仮定の下で固体と流体の基礎方程式(連続の式、運動方程式)を体積平均化した方程式を用いる。本研究では、固体の構成方程式として粘性応力を付加した非圧縮性 neo-Hooke 体、流体の構成方程式として非圧縮性 Newton 流体の構成方程式を仮定する。

以上の基礎方程式に対して、オイラー型セル中心有限体積法で空間離散化を施す。オイラー型解法では、空間固定されたオイラーメッシュ上において支配方程式や空間微分量について解き、固体領域(固体物質点)を表すマーカー粒子において固体の持つ物理量(固体構成方程式など)を計算する。マーカー粒子には固体の初期位置ベクトルであるReference mapを保持させる。

提案手法の優位性を検証するため、固体-流体連成解析における2種のベンチマーク問題を用いる。1つめは、流体中に初期速度場を配置し、振動させる問題である。流体の流れに伴った固体変形、エネルギー時刻歴をZhaoら(2008)の参照解と比較し、総エネルギーの保存誤差の空間収束性を検証する。その後、提案手法と既往手法のエネルギー時刻歴、実行時

間を比較し、提案手法の妥当性と有効性を示す。2つめは、壁面上部に初期速度場を配置し、流体中の流れに伴う固体の移動と変形の挙動を評価する問題である。流体の流れに伴った固体変形を Zhao ら (2008) の参照解と比較評価し、その後提案手法と既往手法において実行時間、応力評価を比較し、提案手法の妥当性と有効性を示す。

4. 研究成果

本研究では、Reference map 法を用いた陰的オイラー型固体-流体連成解法を提案し、超弾性体の振動問題、キャビティ流れ問題を用いてその妥当性と有効性を検証した。本研究の結論を以下に示す。

- 固体-流体界面の速度勾配が連続的な問題である、超弾性体の振動問題において、提案手法により、クーラン数の高い条件下での数値解の振動、発散が抑制された。
- 固体-流体界面の速度勾配が連続的な問題である、超弾性体の振動問題において、実行時間の観点では、陽解法が優位であるものの、数値解精度の観点では提案手法が優位である。ただし総エネルギー保存率についてはメッシュ解像度 128×128 において陽解法の Reference map 法と比較して減少する傾向がある。
- Reference map 法を用いる条件下では、実行時間の観点では陽解法が少し優位であるものの、数値解の精度を考慮すると弾性率の高い領域 ($G=20, 30$) では提案手法が優位である。
- 速度勾配法と比較する条件下では、速度勾配法が優位である。
- 固体-流体界面の速度勾配が不連続な問題である、キャビティ流れ問題において、Reference map 法を用いる条件下では、実行時間の観点で提案手法が優位である。
- 固体-流体界面の速度勾配が不連続な問題である、キャビティ流れ問題において、速度勾配法と比較する条件下では、弾性率の高い領域 ($G=30$) において実行時間の観点で提案手法が優位である。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Shimada Tokimasa, Nishiguchi Koji, Bale Rahul, Okazawa Shigenobu, Tsubokura Makoto	4. 巻 123
2. 論文標題 Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid-structure interaction problems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 1294 ~ 1328
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nme.6896	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 嶋田 宗将、西口 浩司、Peco Christian、岡澤 重信、坪倉 誠	4. 巻 2022
2. 論文標題 Reference map 法を用いたマーカー粒子によるオイラー型流体-構造連成解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20220002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11421/jsces.2022.20220002	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 -

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 7件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 T. Shimada, K. Nishiguchi, C. Peco, S. Okazawa, M. Tsubokura
2. 発表標題 Unified Eulerian formulation for large-scale combined fluid-solid behavior in biomaterials
3. 学会等名 Meshfree and Novel Finite Element Methods with Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nishiguchi, S. Takeuchi, R. Katsumata, T. Shimada, H. Hoshiba, J. Kato
2. 発表標題 Eulerian finite volume formulation for the interaction of visco-hyperelastic structure and airflow
3. 学会等名 Meshfree and Novel Finite Element Methods with Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内 秀輔, 西口 浩司, 嶋田 宗将, 勝又 稜平, 干場 大也, 加藤 準治
2. 発表標題 Building-cube法に基づくオイラー型構造-流体統一解法による粘性-超弾性解析
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Takeuchi, K. Nishiguchi, T. Shimada, R. Katsumata, H. Hoshiba, J. Kato
2. 発表標題 Coupled simulation of fluid and visco-hyperelastic solid with Eulerian unified formulatio
3. 学会等名 41st JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shimada, K. Nishiguchi, R. Bale, S. Okazawa, M. Tsubokura
2. 発表標題 A novel method to impose velocity boundary conditions for Eulerian fluid-structure interaction scheme using Lagrangian marker particles
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Sugiyama, T. Shimada, K. Nishiguchi, M. Tsubokura, S. Okazawa
2. 発表標題 Eulerian elastoplastic analysis using Lagrangian particles for resin material
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西口 浩司, 竹内 秀輔, 嶋田 宗将, 勝又 稜平, 干場 大也, 加藤 準治
2. 発表標題 オイラー型有限体積法による流体と粘性-超弾性体の連成解析
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内 秀輔, 西口 浩司, 嶋田 宗将, 勝又 稜平, 干場 大也, 加藤 準治
2. 発表標題 マーカー粒子を用いたオイラー型構造-流体統一解法による粘性-超弾性解析
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西口 浩司, 竹内 秀輔, 嶋田 宗将, 勝又 稜平, 干場 大也, 加藤 準治
2. 発表標題 Building-cube法に基づく有限体積法による粘性-超弾性解析
3. 学会等名 第25回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西口浩司
2. 発表標題 オイラー型固体解析の基礎とその産業応用
3. 学会等名 第41期非線形CAE勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西口浩司
2. 発表標題 粘弾性/弾塑性解析の基礎と超並列計算への応用
3. 学会等名 第40期非線形CAE勉強会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西口浩司, 岡澤重信
2. 発表標題 オイラー型構造解析と自動車CAE への展開
3. 学会等名 第2 回「富岳」高性能シミュレーション技術交流会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西口浩司
2. 発表標題 超並列計算に適したオイラー型構造-流体統一解法とその産業応用
3. 学会等名 超並列計算に適したオイラー型構造-流体統一解法とその産業応用（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西口浩司
2. 発表標題 超並列計算に適したオイラー型構造-流体統一解法とその産業応用
3. 学会等名 自動車技術会 構造強度部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西口浩司
2. 発表標題 スーパーコンピュータ「富岳」に適したオイラー型構造-流体統一シミュレーション
3. 学会等名 建設技術のデジタル革新に関する研究会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西口浩司
2. 発表標題 スーパーコンピュータ「富岳」に適したオイラー型構造-流体統一解法
3. 学会等名 日本建築学会 連続体力学の連成問題小委員会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryohei Katsumata, Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Hoshiba Hiroya, Junji Kato
2. 発表標題 Eulerian coupling simulation method for dynamics of air and shock-absorbing structure
3. 学会等名 International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Hiroya Hoshiba, Junji Kato
2. 発表標題 Semi-implicit Eulerian formulation using marker particles with a reference map for fluid-structure interaction problems
3. 学会等名 16th U.S. National Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西口浩司, 嶋田宗将, 岡澤重信, 坪倉誠
2. 発表標題 リファレンス・マップ法を用いた陰的オイラー型構造-流体連成解析
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝又稜平, 西口浩司, 干場大也, 加藤準治, 平山洋介
2. 発表標題 階層型直交メッシュを用いたオイラー型構造 - 流体統一解法による骨折予防床の大変形解析
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西口浩司, 勝又稜平, 嶋田宗将, 干場大也, 加藤準治, 平山洋介
2. 発表標題 オイラー型有限体積法による骨折予防床の構造-流体連成解析
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Masafumi Otaka, Christian Peco, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Voxel-Based Fluid-Structure Interaction Method for Nonlinear Biomaterials Involving Large Deformation
3. 学会等名 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Otaka, Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Makoto Tsubokura, Hirofumi Sugiyama, Shigenobu Okazawa
2. 発表標題 Large Deformation Solid Dynamics Using Marker Particles Based on Eulerian Formulation
3. 学会等名 Proceedings of 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) ECCOMAS Congress 2020
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Masafumi Otaka, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Eulerian finite volume formulation using hierarchical Cartesian mesh for multi-material vehicle structures
3. 学会等名 Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Full Eulerian formulation using Lagrangian marker particles for fluid-structure interaction problem
3. 学会等名 Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masafumi Otaka, Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Makoto Tsubokura, Hirofumi Sugiyama, Shigenobu Okazawa
2. 発表標題 Large deformation solid dynamics using Marker particles based on Eulerian formulation
3. 学会等名 Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020)
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------