

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15218

研究課題名（和文）粒子法を用いた流体-氷-船舶の連成解析手法の開発

研究課題名（英文）Development of a fluid-ice-ship interaction solver using moving particle semi-implicit method

研究代表者

飯田 隆人 (Iida, Takahito)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50837573

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）：本研究では流体-氷-船舶の連成問題を精度よく計算するための粒子法に基づく数値計算手法を開発した。初めに粒子法により流体、剛体および弾性体の連成問題を解くプログラムを作成し、船体近傍に存在する浮氷により船体のスラミング荷重が増加することを明らかにした。またその結果から粒子法の流体計算において数値計算条件（粒子径や時間刻み幅）に対する収束性が乏しいことを見出した。この問題が圧力ポアソン方程式のソース項に起因することを突き止め、時間収束性を改善した新たなソース項「RF-SDS」を提案した。その結果、上記問題を含む様々な問題にて数値計算条件のチューニングをせずに高精度に数値計算ができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで用いられてこなかった北極海航路の今後の展望を鑑みて、従来とは異なる氷と波が存在する海域において船体がどのような危険に遭遇するかを数値計算によって明らかにすることを目的としている。本研究によって、氷がない海域に比べ、氷がある海域では船体に働く荷重が増加しうることを明らかにした。これは今後北極海に適した商船を開発するうえで重要な知見である。また、上記の目標のために粒子法に基づく計算手法の高精度化も行った。これは氷海工学のみならず、様々な流体領域において精度よく、かつロバストに数値計算するために用いることができる。

研究成果の概要（英文）：A numerical method based on the moving particle semi-implicit method (MPS) was developed to accurately calculate fluid-ice-ships interaction problems. First, a program code was developed to solve the fluid, rigid-body, and elastic-body interaction problems, and it was found that the slamming load of a ship hull increases due to ice floe in the vicinity of the hull. From this result, it was also found that the convergence of the MPS to the numerical conditions (particle size and time step size) is poor. It was determined that this problem was caused by the source term in the pressure Poisson equation and proposed a new source term "RF-SDS" with improved time convergence. As a result, numerical calculations for various problems, including the above problem, can be performed with high accuracy without tuning the numerical calculation conditions.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：粒子法 氷海工学 船舶海洋工学 CFD Marginal ice zone

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化の影響により北極海の海氷は減少傾向にある。この環境変化は必ずしも悪いことばかりではなく、これまでは困難であった北極海航路の開拓や氷海域での油田開発などが実現可能となってきた。例えば日本 - オランダ間で北極海航路を利用した場合、スエズ運河経由時に比べ距離は 40% 程度短縮でき、輸送日数の効率化や燃料消費、二酸化炭素排出量の大幅な削減が期待できる。またマンデブ海峡やマラッカ海峡等のテロや海賊被害のリスクがあるチョークポイントを回避できるため、輸送ルートの多様化、堅硬化の一端を担うと考えられる。2018 年 3 月には商船三井が世界で初めて砕氷 LNG 船を用いた定期的な輸送サービスを開始し、また 8 月にはマースク・ライン社が砕氷船の随行なしでのコンテナ船の運航を試験的に実施するなど、今まさに世界的に注目を集めている分野である。

一方で、船舶にとって氷海は依然として厳しい環境であり、運航する船舶の安全性を確保、保証することは最重要な課題である。氷海工学の研究は古くから行われてきたが、地球温暖化の影響を受け、氷海の様相が変化しつつあることをこれからの研究では念頭に置かねばならない。これまで船舶は海一面が氷板に覆われている中を運航することが多かった。このとき、海が無制限の氷板に覆われていると仮定し、氷板を弾性板と見立てた境界条件として扱うことが多かった。しかし近年は海に小規模の氷が浮かんでいる海域が多くなってきた。このとき、例えば船体近くに浮かぶ氷の影響で船体が流体から受ける力が大きくなることや、流氷が構造物に衝突することがあることが報告されているが、まだ流体に浮かぶ氷が船舶に及ぼす影響は十分に解明されていない。流体と氷、そして船舶との相互干渉によって、今後はこれまで予期していなかった現象、事故が起こる可能性があるため、氷海域を運航する船舶に働く力を正確に推定する手法を新たに開発し、起こり得る危険を予測することが求められる。

2. 研究の目的

本研究では流体 - 氷 - 船舶の連成解析手法を開発し、船舶に働く力を正確に推定することで今後起こりうる事故を未然に防ぐことを目的とする。特に本研究ではその解析手法として粒子法を用いる。粒子法はメッシュフリー法のひとつであり、物質を有限個の粒子によって表現する手法である。この手法では物体の大変形や分裂を比較的容易に描写できるため、例えば水面から水が飛び散る現象や氷が船体により破壊され船体の下に潜り込む現象、また氷荷重による船体の弾性応答や塑性変形など、本研究の対象となる事象の解析に適している。また流体、氷、船舶をすべて粒子として記述するため、流体 - 構造連成問題を解く上で一貫性のある手法を開発可能である。本研究では粒子法の中でも船舶流体分野で取り扱う非圧縮性流体に適し、かつ構造体の応力も比較的精度よく解析できる Moving Particle Semi-implicit (MPS)法を用いる。

3. 研究の方法

本研究ではまず初めに、流体および剛体、弾性体の連成問題を解析するためのプログラムの作成を行う。開発した流体解析プログラムの検証として、過去に行われたダム崩壊やスロッシングの模型実験との比較を行う。構造解析プログラムに対しては、片持ち弾性梁の振動問題や円孔を有する弾性板の引張り試験の理論解との比較を行う。さらに流体 - 構造連成解析プログラムの検証のために、静水への弾性板の落下に関する模型試験との比較を行う。その後、氷の破壊を解析プログラムに組み込む。以上により開発した解析プログラムを流体 - 氷 - 船舶連成問題に適用する。具体的には船体スラミングによる船体に働く荷重が、船体の近傍や下に浮氷が存在することでどのように変わるかを分析する。

4. 研究成果

まず初めに、流体および剛体、弾性体の一貫した解析プログラムを作成し、さらに氷の破壊などの非線形現象も再現可能とした。このプログラムを用いて船体スラミングの解析を行い、船体近傍に存在する浮氷により船体のスラミング荷重が増加することを明らかにした。一方で、このスラミング荷重が数値計算条件(粒子径や時間刻み幅)の値によって変化してしまうことが明らかになった。特に時間刻み幅を小さくしていったときに結果が収束せず、むしろ発散してしまう問題に直面した。これは当初予期していなかったことであったが、数値計算条件を変化させた複数の分析を行った結果、特にスラミング問題においては、スラミング速度、入射角という問題特有のパラメータに加え、粒子径と時間刻み幅を用いて表現した「MPS-slamming 条件」が等しければ相似流となることを発見した。本成果は査読付国際論文誌 Iida and Yokoyama (JMSA, 2022) にて発表した。またさらなる調査の結果、この相似流の原因が圧力を求める際の圧力ポアソン方程式のソース項が数値的離散化をしていることに起因することを突き止めた。そこで、このソース項に対して数値的離散化ではなく解析的な二階微分を行うこと(second-order differential source term: SDS)、および粒子径と時間刻み幅の比をクーラン条件で置き換えること(resolution-free representation: RF)によって新たなソース項 RF-SDS を導出した。この新たなソース項 RF-SDS を用いることで、従来のように数値計算条件をチューニングパラメータと

して結果をチューニングすることなく、数値計算条件に対して収束性のある結果を得られるようになった。この手法をスラミングやダム崩壊、スロッシングなどといった自由表面流体工学の典型的な様々な問題に適用した結果、一貫して精度よくかつ収束性を保持した解析結果を得ることができた。本成果は査読付国際論文誌 *Iida and Yokoyama (APOR, 2022)* にて発表した。上記のように、直面した問題は当初予期していないものであったが、開発した RF-SDS は当初の対象であった氷海工学のみならず、流体力学の数値計算を用いるすべての分野において用いることができる汎用的な手法であり、数値流体力学分野において重要な知見となると考えられる。

また本研究では当初数値計算による氷海工学へのアプローチを考えていたが、氷海の問題は関係するパラメータが多く、また粒子法は時間スケールが大きい問題に適用しづらいことから、数値計算だけでは限界があると考え、波と氷の連成問題の解析問題にも取り組んだ。初めに、氷板のような弾性板の物性が一様でない場合の氷 浮体の連成解析を行い、特に均質化法を用いた近似解と厳密解が良く一致することを示した。本成果は査読付国際論文誌 *Iida and Umazume (APOR, 2020)* にて発表した。その後、ノルウェーのオスロ大学数学科の Atle Jensen 教授と共同研究として、小さな浮氷が無数に浮いている marginal ice zone における波の散乱の解析解の研究に取り組んだ。上記の均質化法を応用することで、marginal ice zone と等価な均質化自由表面を導出することができ、それにより浮氷による波の散乱に基づく減衰係数の解析解を導出することができた。さらに大阪大学保有の二次元水槽にて模擬氷を用いた模型実験を行い、実験と解析解が良く一致することを示した。本成果は現在国際論文誌にて査読中である。この成果は地球規模の環境シミュレーション(例えば全球波浪推算や地球温暖化予測など)にも影響の与える氷海の特性を明らかにするものであり、氷海工学のみならず、環境科学にとっても重要なものである。

今後は開発した粒子法をさらに高精度化しつつ、様々な氷海工学の問題に応用していく予定である。また粒子法での計算が得意とするのはスラミングのような時間スケールとしてはごくわずか(～数秒)の現象であり、波動のようなより時間スケールの大きい問題は得意ではない。そのような問題に対しては波動の解析的なアプローチを採用し、さらなる分析を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Iida Takahito, Yokoyama Yudai	4. 巻 124
2. 論文標題 Convergence-improved source term of pressure Poisson equation for moving particle semi-implicit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Ocean Research	6. 最初と最後の頁 103189 ~ 103189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apor.2022.103189	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 Iida Takahito, Yokoyama Yudai	4. 巻 124
2. 論文標題 Convergence-improved source term of pressure Poisson equation for moving particle semi-implicit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Ocean Research	6. 最初と最後の頁 103189 ~ 103189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apor.2022.103189	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 Iida Takahito, Minoura Munehiko	4. 巻 249
2. 論文標題 Analytical solution of impulse response function of finite-depth water waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 110862 ~ 110862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2022.110862	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 Iida Takahito, Yokoyama Yudai	4. 巻 20
2. 論文標題 Investigation of Numerical Conditions of Moving Particle Semi-implicit for Two-Dimensional Wedge Slamming	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Application	6. 最初と最後の頁 585 ~ 594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11804-021-00234-x	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 Iida Takahito, Umazume Keisuke	4. 巻 97
2. 論文標題 Wave response of segmented floating plate and validation of its homogenized solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Ocean Research	6. 最初と最後の頁 102083 ~ 102083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apor.2020.102083	査読の有無 無
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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yudai Yokoyama, Takahito Iida
2. 発表標題 Simulations of Wedge Slamming in Vicinity of Floating Ice Using Particle-based Solver
3. 学会等名 The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯田隆人、横山雄大、西谷瞭
2. 発表標題 二次元楔型浮体のスラミング問題における MPS法の数値計算条件の考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和3年春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山雄大, 飯田隆人
2. 発表標題 MPS法における自由表面の取り扱いに関する考察
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会令和3年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山 雄大, 飯田 隆人
2. 発表標題 粒子法を用いた氷海中でのスラミング現象に関する研究
3. 学会等名 第28回海洋工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yudai Yokoyama, Takahito Iida
2. 発表標題 Particle-based Simulations of Wedge Slamming in Vicinity of Floating Ice
3. 学会等名 Annual Academic Exchange Seminar between OU & SJTU -2020 Academic Exchange Workshop on NAOE Recent Research- (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yudai Yokoyama, Takahito Iida
2. 発表標題 Verification of Enhanced MPS solver in Wedge Slamming for Development of Fluid-Ice-Ship Interaction Problem
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Novel Computational and Experimental Methods for Complicated Fluid Structure Interactions (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahito Iida, Takefumi Higaki
2. 発表標題 MPS for Free Surface Flow with Elastic and Destructible Structures
3. 学会等名 The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu (国際学会)
4. 発表年 2019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			
ノルウェー	オスロ大学			