

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04576

研究課題名（和文）船体に加わるスラミングによる衝撃荷重の粒子法による数値シミュレーション手法の開発

研究課題名（英文）Numerical simulation of slamming impact load acting on a ship by a particle method

研究代表者

柴田 和也（Shibata, Kazuya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：30462873

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、研究代表者らが開発した可変解像度の粒子法の1つである双方向の重合粒子を用いて粒子数を効率的に削減し船舶に加わる波浪荷重を短い計算時間で予測可能な数値解析手法を開発した。具体的には、可変解像度の粒子法である双方向の重合粒子と楕円体粒子を用いて船舶に加わる波浪荷重を短い計算時間で予測可能な数値解析手法を開発した。本研究では低解像度領域、中解像度領域、高解像度領域の三段階に分けた。三段階で空間解像度を変化することができ、従来の単解像度や二段階での解像度変化と比べてより柔軟な解像度の設定が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、スラミング現象によって船体に加わる衝撃荷重を、汎用的に高速かつ高精度に計算するシミュレーション手法を開発した。手法として、流体の非線形現象を汎用的に解析することを得意とする粒子法を用いた。学術的独自性として、計算時間の短縮手法の導入が上げられる。研究代表者が開発した可変解像度の手法をスラミング計算に適用することで計算時間の短縮を行った。この成果は、従来の手法では解析が困難であった複雑な船首形状の影響の解析を可能にしたものであり、船舶の安全性の向上に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：We developed a numerical analysis method that can predict the wave pressure acting on a ship in a short computation time. The method is based on the overlapping particle technique for the multi-resolution simulation of particle methods and ellipsoidal particles. The spatial resolution can be changed in three levels in the simulation domain. The spatial resolutions of this simulation can be set more flexibly than conventional single- and two-level spatial resolutions.

研究分野：数値流体力学

キーワード：粒子法 数値流体力学 水波 波浪 船舶海洋工学 スラミング 波力

1. 研究開始当初の背景

スラミングによる衝撃荷重の計算は、これまでのワグナー理論による方法が広く用いられてきた。この方法はポテンシャル理論を基にしているため計算時間が短いという長所がある。一方、数学的に解くために様々な近似の条件を導入しており、複雑な船首形状の影響を詳細に考慮することが難しい場合がある。

一方、数値流体力学によるスラミングのシミュレーション手法は、汎用性の高いという長所がある。ただし、長時間の計算時間が必要という学術的問題点がある。そのため、これまで数値流体力学によるスラミングの研究の多くは計算時間を短縮するために2次元計算や低解像度の3次元計算で行われており、3次元的な挙動を示すスラミング現象を詳細に表すことができていない。数値流体力学による3次元の詳細な流体シミュレーションを実用的に行うための計算時間を短縮する新たな手法が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、波浪時のスラミングによる船体に加わる波浪衝撃荷重を汎用的に高速かつ高精度に予測する手法の開発である。

3. 研究の方法

波浪時のスラミング現象を高精度に計算するためには、まず大波高の波浪場を高精度に求める必要がある。これら計算には、研究代表者らが開発した粒子法の数値水槽モデルを用いた。3次元の船体全体の計算を行うには計算時間が膨大になる問題があり、計算時間の高速化が不可欠である。本研究課題では、この計算時間の問題を解決するために、研究代表者らがこれまでに開発した粒子法の計算時間を短縮することができる楕円粒子モデルと重合粒子モデルを適用した。これらの手法は、空間解像度を任意に変えられるようにすることで不要な粒子を削減し計算時間を短縮するとともに、船体近傍に高解像度の粒子を配置することで高精度な計算を可能にするものである。具体的には、楕円粒子モデルは、横長あるいは縦長の粒子を用いることで、粒子数を削減する。重合粒子モデルは、計算領域を高解像度領域と低解像度領域に分け、低解像度領域で大きな粒子を用いることで粒子数を削減し、計算の高速化を可能にする技術である。各領域内では均一の大きさの粒子を用いることで安定した計算が可能という特徴がある。

4. 研究成果

(1) 計算条件

計算に用いたパラメータを表1と表2に示す。初期速度として流体粒子にストークス波の2次の近似解を与えた。低解像度領域の外部境界にはストークス波の2次の近似解の速度分布および圧力分布を与えた。圧力の測定位置を図1と表3に示す。この図では船首部分の剛体粒子のみを描画し、計測位置を黒色で表示している。船首FPの位置を原点とし、x軸は船体の進行方向、y軸は鉛直上方向、z軸は船体幅方向にとった。

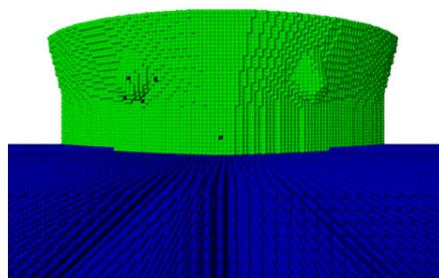
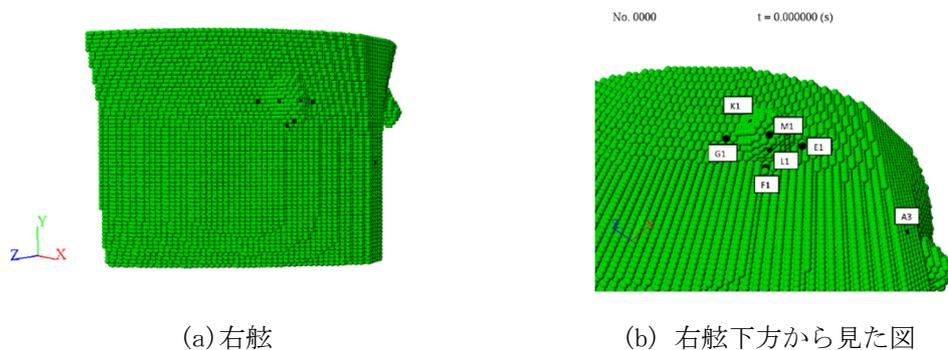
本研究では、流体粒子に船速と等しい相対速度を与え、船体は固定した。波長船長比が小さいため船体動揺はしないと仮定した。計算結果の比較検証に用いた実験値は、日本造船技術センターによって海上技術安全研究所の中水槽において全長6.351mの模型船を用いた波浪中曳航試験で船体表面添付型FBG圧力センサーにより計測された値である。粒子法で求めた圧力波形には数値的な振動が含まれるため、5Hzより高い周波数成分を除去した圧力波形を実験値と比較した。

表1 Common parameters

船種	Crude Oil Tanker
重み関数影響半径 r_e	$2.0l_0$
粒子の質量密度 (kg/m^3)	1000.0
圧縮性 (Pa^{-1})	0.45×10^{-9}
動粘性係数 ν (m^2/s)	1.0×10^{-6}
重力加速度 (m/s^2)	9.81
クーラン数上限値 C_{max}	0.2

表 2 Independent parameters

	低解像度領域	中解像度領域	高解像度領域
初期粒子間距離 l_0 (m)	0.035	0.025	0.0075
アスペクト比 $s_x:s_y:s_z$	1:1:4	1:1:3	1:1:1



(a) 正面図

図 1 圧力の測定位置

表 3 圧力の測定位置の座標

No.	Name	x (m)	y (m)
0	A3	-0.0075	-0.0075
1	E1	-0.0675	0.1125
2	F1	-0.1050	0.0675
3	G1	-0.1350	0.1125
4	H1	-0.0600	0.1125
5	K1	-0.0900	0.1125
6	L1	-0.0825	0.0750
7	M1	-0.0675	0.0750

(2) 計算結果

シミュレーションで求めた流体挙動の可視化結果を図 2 に示す。ボルスターが入射波により没水する様子が分かる。圧力の計測点の内、A3, E1, L1, M1 での圧力波形の時間変化の数値解析結果と実験値を図 3 に示す。シミュレーションで求めた圧力波形は実験値に近く、精度良く計算できていることがわかる。ただし測定位置 L1 では波形の違いがみられた。この原因は実験値では負圧が生じるのに対してシミュレーションでは負圧を考慮していないことが原因だと考えら

れる。模型スケールで10秒（出会い波周期の約8.4倍）の現象の計算に要した計算時間は約513時間であった。用いた計算機は、Intel Core i5-4440、3.1GHzのCPU、メモリ32GBのパーソナルコンピュータ1台であり、4コアを用いた並列計算でシミュレーションを実施した。

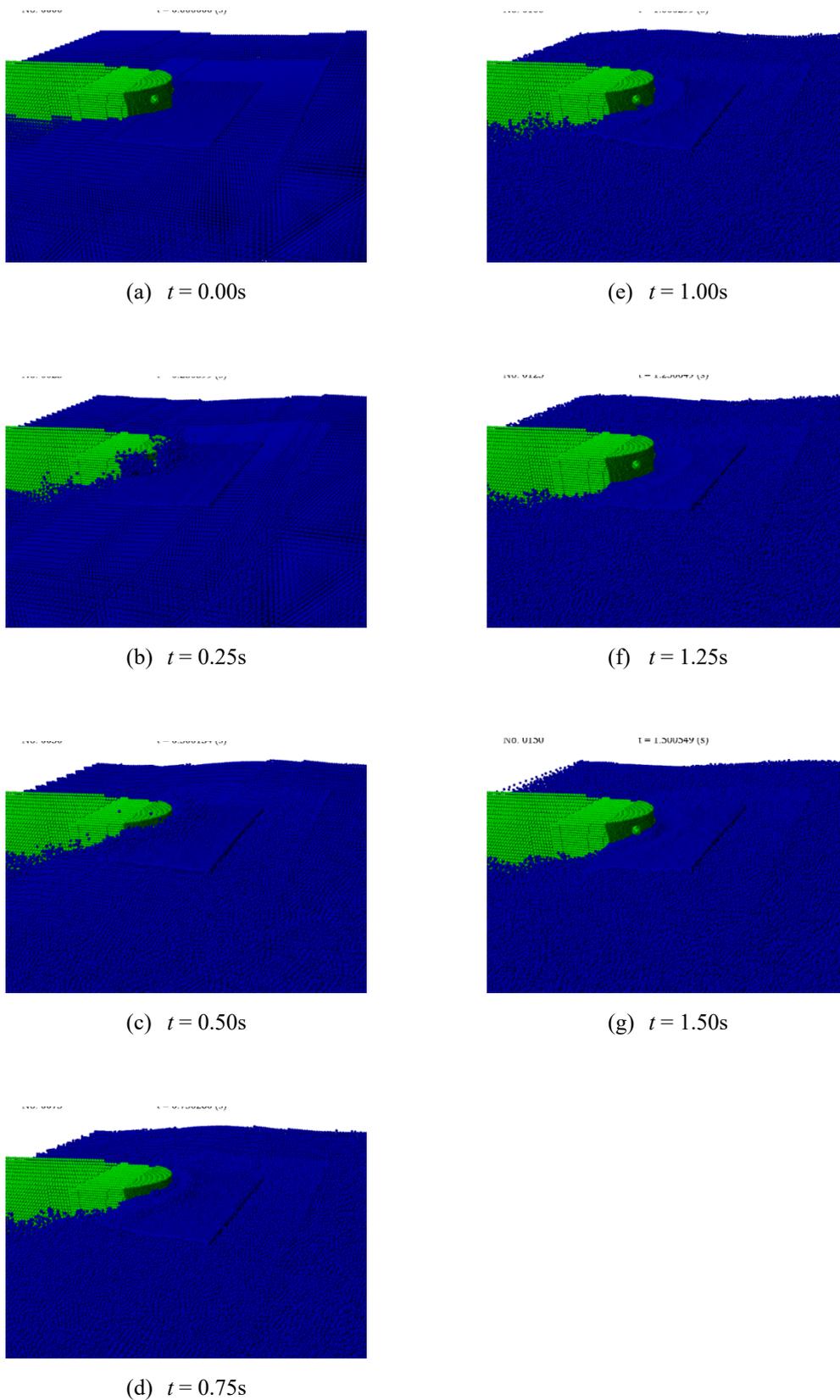
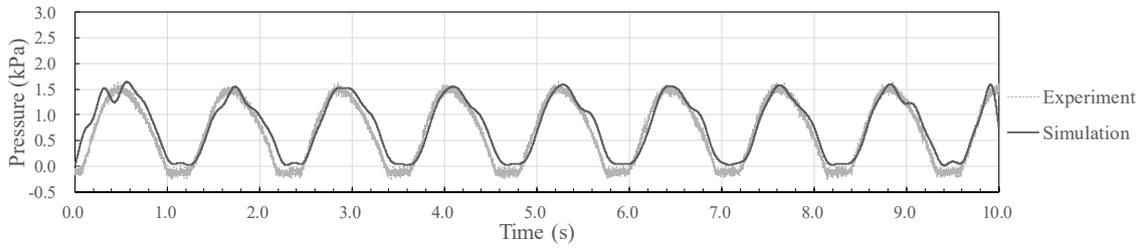
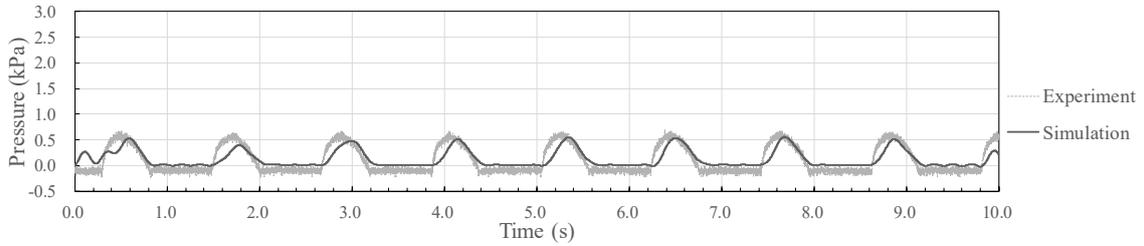


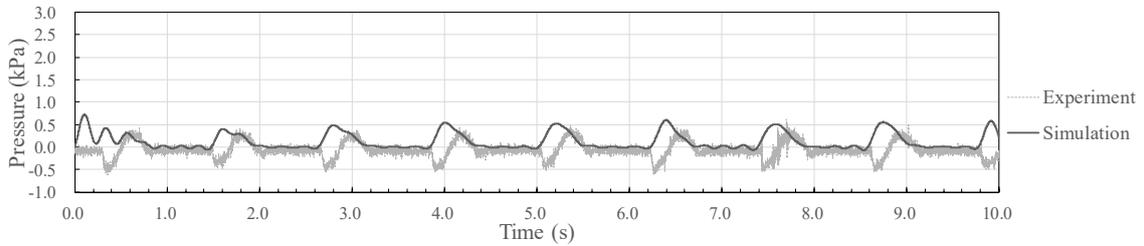
図2 流体挙動 ($t=0.00\sim 0.75s$)



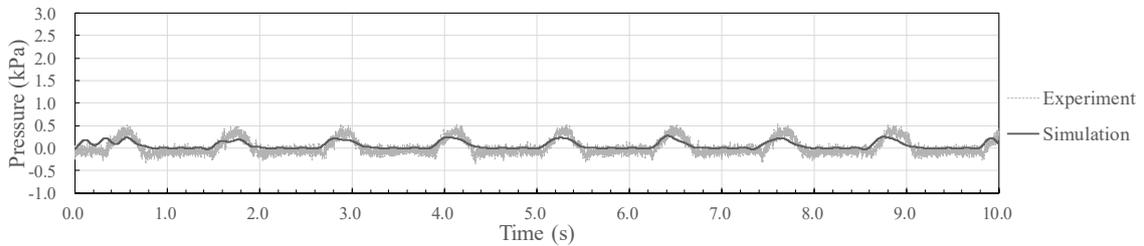
(a) A3



(b) E1



(c) L1



(d) M1

図3 圧力の時間履歴

可変解像度の粒子法である双方向の重合粒子を用いて船舶に加わる波浪荷重を短い計算時間で予測可能な数値解析手法を開発した。三段階で空間解像度を変化することができ、従来の二段階での変化と比べてより柔軟な解像度の設定が可能となった。また、並列化ライブラリ OpenMP を用いて計算プログラムの並列化を行った。

開発した手法を用いて短波長の規則波の波浪条件において、船首部に加わる波浪荷重を数値解析した。結果、数値計算で求めた船首部に加わる波浪による圧力は実験値に近いことが分かった。今回の場合、可変解像度手法を適用しない場合に比べて総粒子数を約 99%削減することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Takuya Matsunaga, Axel Sodersten, Kazuya Shibata, Seiichi Koshizuka	4. 巻 358
2. 論文標題 Improved treatment of wall boundary conditions for a particle method with consistent spatial discretization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 112624
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cma.2019.112624	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 松永 拓也, 柴田 和也, 越塚 誠一	4. 巻 2019
2. 論文標題 LSMPS法における壁境界条件の改良	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20190012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11421/jsces.2019.20190012	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 松永 拓也, 柴田 和也, 越塚 誠一	4. 巻 84
2. 論文標題 MPS法における境界積分を用いたポリゴン壁境界表現	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p. 18-00197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.18-00197	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 Daisuke Yamada, Toshiki Imatani, Kazuya Shibata, Kazuaki Maniwa, Shingo Obara and Hideyo Negishi	4. 巻 9
2. 論文標題 Application of improved multiresolution technique for the MPS method to fluid lubrication	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 421-441
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40571-021-00420-2	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 Yoshiki Mizuno, Kazuya Shibata and Seiichi Koshizuka	4. 巻 9
2. 論文標題 Statistical analysis of three-dimensional run-up heights using Gaussian process emulator of particle method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 525-535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40571-021-00426-w	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 柴田和也、前田智紀、馬場禎男、金井健
2. 発表標題 三段階の双方向重合粒子による可変解像度粒子法 を用いた船舶に加わる波浪荷重の数値解析
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 Kazuya Shibata, Daisuke Yamada, Takuya Matsunaga, Issei Masaie
2. 発表標題 Fluid simulation by a multi-resolution particle method and its applications
3. 学会等名 EUROGEN 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 大輔、松永 拓也、越塚 誠一、柴田 和也、間庭 和聡、根岸 秀世
2. 発表標題 可変解像度手法を用いたMPS法による流体潤滑解析
3. 学会等名 トライボロジー会議2019 春 東京
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 大輔, 松永拓也, 越塚誠一, 柴田和也, 間庭 和聡, 根岸秀世
2. 発表標題 重合粒子を用いたMPS 法によるボールオンディスク流体潤滑解析
3. 学会等名 第32 回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Matsunaga, Kazuya Shibata, Seiichi Koshizuka
2. 発表標題 Boundary Integral Based Method for Treatment of Solid Wall in a Particle Method
3. 学会等名 WCCM2018(The 13th World Congress in Computational Mechanics) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Shibata, Seiichi Koshizuka, Takuya Matsunaga, Daisuke Yamada and Issei Masaie
2. 発表標題 Multi-resolution simulation by the Overlapping Particle Technique and the Ellipsoidal Particle Model for Particle Methods
3. 学会等名 WCCM2018(The 13th World Congress in Computational Mechanics) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Yamada, Seiichi Koshizuka, Kazuya Shibata
2. 発表標題 Verification of Tsunami Simulation by Using Elliptical Particles of the MPS Method
3. 学会等名 The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 大輔、二宮 哲郎、柴田 和也、小原 新吾、根岸 秀世
2. 発表標題 粒子法を用いたソフトEHL 現象への数値解析手法の開発
3. 学会等名 トライボロジー会議2021秋松江
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiki Imatani, Kazuya Shibata, Harufumi Sekine, Daisuke Yamada, Kenya Takahashi, Hiroshi Sanuki and Takeshi Nishihata
2. 発表標題 Tsunami Simulation by a 2D and 3D Coupled Multi-Resolution Particle Method
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sotaro Oda, Tomonori Maeda, Daisuke Yamada, Kazuya Shibata, Sadao Baba and Takeshi Kanai
2. 発表標題 Numerical Analysis of Wave Pressure Acting on a Ship by a Multi-Resolution Particle Method
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Yamada, Tetsuro Ninomiya, Kyuya Matsumoto, Kazuya Shibata, Hideyo Negishi and Shingo Obara
2. 発表標題 Soft Elasto-Hydrodynamic Lubrication Simulation by a Multi-Resolution Particle Method
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------