

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02824

研究課題名(和文) 粒子法の計算精度の向上に関する研究

研究課題名(英文) Improvement of Accuracy in Particle Method

研究代表者

越塚 誠一 (Koshizuka, Seiichi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：80186668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者がこれまで独自に開発し研究を進めてきた粒子法であるMPS(Moving Particle Semi-implicit)法に関して、本研究では基礎的かつ発展的な研究を行った。具体的には、(1) 空間離散化の高精度化、(2) 壁境界条件の高精度化と高速化、(3) 定常問題の高精度化、(4) 表面張力モデルの高精度化、に対して研究を進め、多くの成果を得ることができた。従来よりも飛躍的に高精度かつ高速な粒子法シミュレーションが実施できるようになった。さらに、研究成果はジャーナル論文等で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子法は流体を粒子の集まりとしてシミュレーションを行う方法であり、従来の方法とは異なり空間を格子で覆う必要がない。そのため、自由表面や界面の複雑な運動を扱うことが容易である。粒子法の研究では日本が世界的に先導しており、日本発の商用プログラムが普及しつつある。

粒子法に限らず様々なシミュレーション手法は、高度な製品開発を効率的かつ迅速に行うためには必要不可欠な技術となっている。その中で粒子法は有力な手法の1つに成長しつつあり、自動車、機械、材料、食品、化粧品など、様々な分野で活用されている。本研究の成果により可能となった高精度の粒子法シミュレーションは、産業への波及効果が極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted basic and advanced research on the MPS (Moving Particle Semi-implicit) method, which is a particle method that the principal investigator has originally invented and developed. Specifically, (1) high accuracy of spatial discretization, (2) high accuracy and speed-up of wall boundary conditions, (3) high accuracy for steady problems, and (4) high accuracy of surface tension model were studied and many results were obtained. It has become possible to perform particle method simulations more accurate and faster drastically than before. Furthermore, the research results were published in journal papers.

研究分野：計算力学

キーワード：計算力学 粒子法 流体力学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は連続体力学解析のための新しい粒子法として MPS(Moving Particle Semi-implicit)法を独自に開発した[1]。MPS法では支配方程式中の微分演算子に粒子間相互作用モデルを代入することで、メッシュを用いることなく連続体の支配方程式を離散化する。粒子法には他に Lucy(1977) および Gingold-Monaghan(1977) が提案した SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法がある。粒子法はメッシュを用いずに連続体の支配方程式を離散化するため、流体力学において自由表面の大変形を伴うシミュレーションが容易である。

MPS法とSPH法では空間離散化の原理が異なる。MPS法は基本的に差分法および有限体積法の拡張であり、粒子の持つ変数の差分に対して重み平均を取る。一方、SPH法では粒子の持つ変数にカーネル関数(MPS法の重み関数に相当)を掛けて重ね合わせることで空間分布を表す。そのため、空間微分の離散化の定式化にはカーネル関数の微分が現れる。

MPS法の離散化手法、非圧縮流れのための半陰的アルゴリズム、自由表面境界条件、壁境界条件といった基本的な計算技術は最初の文献[1]に示されている。その後、表面張力モデル、相変化モデル、温度場の計算手法、構造解析手法、剛体解析手法、流体-構造(剛体)連成解析手法などが研究されてきた。こうした基礎的な計算手法の開発に基づいて3次元シミュレーションソフトウェアが開発され、知的財産権が取得された。さらにベンチャー会社を設立し、商用コードが開発された。既に日本国内では多くの企業が商用コードを利用しており、海外にも広がりつつある。このようにMPS法は基礎的研究が大学においてなされ、その成果が新しい産業にまで発展している。しかしながら、MPS法をさらに広く用いられるようにするためには計算手法に関する基礎的な研究課題があり、本研究ではその解決に取り組む。

### 2. 研究の目的

研究代表者らがこれまで独自に開発し、研究を進めてきた粒子法である MPS(Moving Particle Semi-implicit)法は、自由表面の大変形を伴う流れのシミュレーションが容易である。既に商用プログラムが開発され、産業への応用も進んでいる。本研究ではMPS法の基礎的かつ発展的な研究を行う。具体的には、(1)空間離散化の高精度化、(2)壁境界条件の高精度化と高速化、(3)定常問題の高精度化、について研究する。

本研究成果は、MPS法の計算精度および計算効率を飛躍的に高めることができると考えられ、MPS法の産業応用にも大きく貢献できる。

### 3. 研究の方法

研究体制は、研究代表者および2名の研究分担者が協力して行い、これに博士研究員および博士課程および修士課程学生が加わる。研究には既存および新規に購入する計算機を用いる。基礎的な研究課題であるので、大規模計算の必要はないと予想している。当初の研究計画は、「(1)空間離散化の高精度化」は最小二乗法を用いた高次精度MPS法空間離散化スキームを典型的な流体力学の問題に適用を試みる。「(2)壁境界条件の計算手法の高精度化と高速化」では壁重み関数の高精度化と Position-based Dynamics の導入を試みる。「(3)定常問題の高精度化」では ALE 法で新たに必要となる対流項の計算に高次精度スキームを適用し、典型的な定常問題に適用を試みる。

さらに、途中で表面張力モデルに関する研究課題を追加し、これを「(4)表面張力モデルの高精度化」として研究を進めた。

### 4. 研究成果

#### (1) 空間離散化の高精度化

これまでLSMPS(Least Squares MPS)法により最小二乗法を用いて任意精度の離散化が行えるようになった。本年度は、これを空間2階微分の離散化に具体的に適用して誤差を評価し、用いた精度が得られていることを確認した。図1に結果を示す。最初に提案されたSPH法やMPS法では、空間解像度を細かくしても誤差が収束しないのに対して、LSMPSでは収束し、 $p=2$ では2次、 $p=4$ では4次で収束していることが分かる。また、空間1階微分に対しては、Corrective Matrixを掛けることで、粒子配置が乱れた場合でも容易に1次精度を維持した計算ができることがわかり、気液二相流への適用など多くの場合でその有用性が示された。

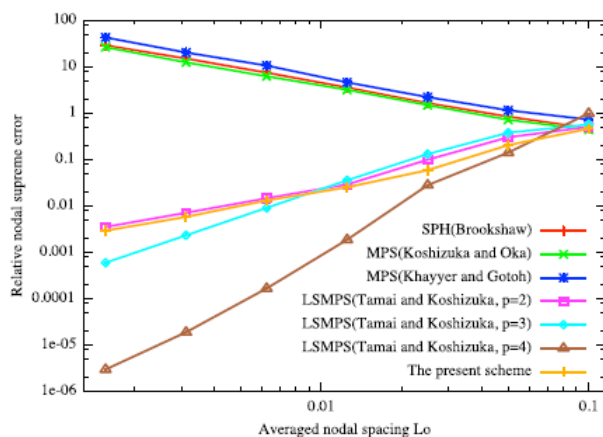


図1 ラプラシアン離散化誤差の空間解像度に対する収束

## (2) 壁境界条件の計算手法の高精度化と高速化

壁境界を壁粒子ではなくポリゴンを用いることで複雑な3次元形状を高速に解くことができる。ポリゴンを用いる場合には壁重み関数による壁境界条件の定式化が必要であるが、壁の外側の影響を体積積分で表し、これを境界の面積分に変換する定式化を新たに考案した(図2)。本手法を攪拌槽内の流れに適用し、従来よりも高精度であることを

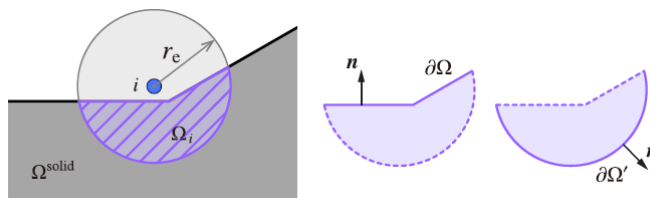


図2 ポリゴン壁境界条件における壁領域の体積積分と面積分

示した。本手法を用いて、角、隅、曲面を含むような複雑形状に対する流体シミュレーションが安定かつ高精度に計算できることを示した。本手法を攪拌槽の解析に適用し、従来と境界条件を用いた場合と同様の結果が得られることを示した。

さらに、壁をポリゴン(面)として扱うことにより、流体の壁面上での広がりが精度良く計算できることを示した。これは、津波などにより建屋内の浸水をシミュレーションする上で重要な知見である。さらに、浮遊物を伴う浸水のシミュレーションを行った(図3)。

東日本大震災で発生した津波においては、自動車やがれき等が浮遊物として運ばれ、建築物の破損に大きく影響した。浮遊物の挙動は初期配置などの入力パラメータによって大きく変わるため、統計的な扱いが必要であると考え、ベイズ統計により入力パラメータの影響を効率的にシミュレーションする方法を研究した。事前に実施したシミュレーション結果を用いてエミュレータを作成し、エミュレータにより瞬時に計算結果が推定できるような方法を研究した。

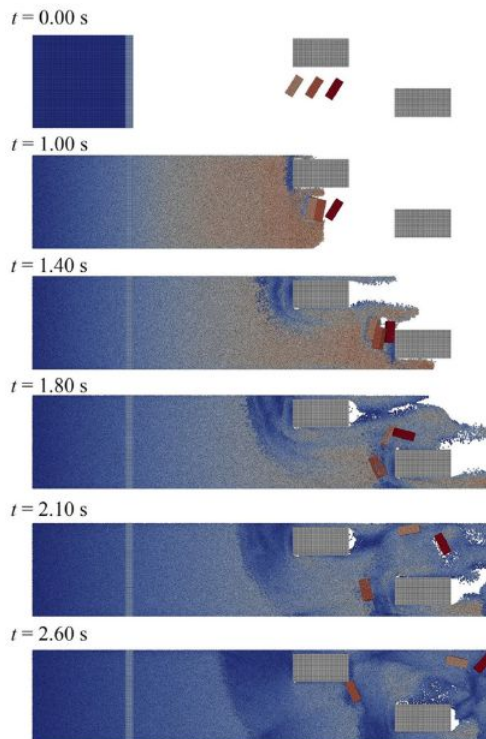


図3 浮遊物を伴う浸水のシミュレーション

## (3) 定常問題の高精度化

定常問題では粒子を空間に固定するオイラー記述の方法により効率的な計算が可能であるが、格子を用いることなく対流項を計算する必要がある。そこで、対流項の計算にLSMPS法を適用し、近傍粒子には風上側の半分だけを用いる方法を考案した。キャビティ内流れに本手法を適用したところ、従来の差分法であるGhia et al.の解に匹敵する計算精度が得られた(図4)。これまで粒子法では定常問題の解析が計算時間および計算精度において従来の差分法などと比較して劣るとされていたが、本研究によりこれが克服された。

## (4) 表面張力モデルの高精度化

表面形状を局所的に高次関数で近似することにより、曲率を安定かつ高精度に計算する方法を開発した。本手法を用いて球形液滴のラプラス圧が精度良く計算できることを示した。さらに、球形から微小変形させた液滴を初期条件として液滴の振動の計算を行ったところ、振動周期は解析解と良く一致した。ただし、粘性がゼロの場合でも振動の減衰が生じるという問題が残った。

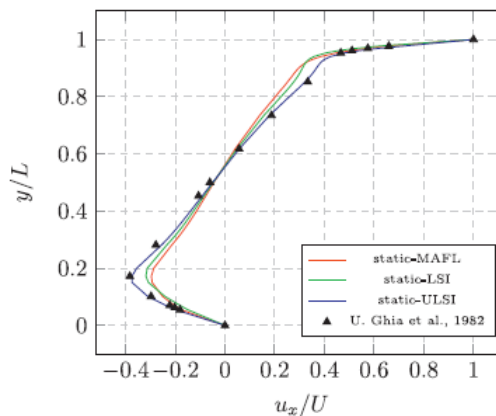


図4 正方キャビティ内流れにおける中央断面のx方向速度分布: static-ULSIが本提案手法

## <引用文献>

- [1] S. Koshizuka and Y. Oka, "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid," Nucl. Sci. Eng. **123**, 421-434 (1996)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Z. Wang, F. Hu, G. Duan, K. Shibata and S. Koshizuka	4. 巻 341
2. 論文標題 Numerical Modeling of Floating Bodies Transport for Flooding Analysis in Nuclear Reactor Building	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 390-405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2018.11.031	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 T. Zhang, S. Koshizuka, P. Xuan, J. Li and C. Gong	4. 巻 178
2. 論文標題 Enhancement of Stabilization of MPS to Arbitrary Geometries with a Generic Wall Boundary Condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 88-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2018.09.008	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 該当する
1. 著者名 G. Duan, A. Yamajia and S. Koshizuka	4. 巻 343
2. 論文標題 A Novel Multiphase MPS Algorithm for Modeling Crust Formation by Highly Viscous Fluid for Simulating Corium Spreading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 218-231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nucengdes.2019.01.005	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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 G. Duan, A. Yamaji, S. Koshizuka and B. Chen	4. 巻 190
2. 論文標題 The Truncation and Stabilization Error in Multiphase Moving Particle Semi-implicit Method Based on Corrective Matrix: Which Is Dominant?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 254-273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2019.06.023	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 該当する

1. 著者名 T. Matsunaga and S. Koshizuka	4. 巻 191
2. 論文標題 Bucket-based multigrid preconditioner for solving pressure Poisson equation using a particle method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2019.104242	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 Z. Wang, K. Shibata and S. Koshizuka	4. 巻 55
2. 論文標題 Verification and Validation of Explicit Moving Particle Simulation Method for Application to Internal Flooding Analysis in Nuclear Reactor Building	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Nucl. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 461-477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2017.1412364	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 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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 G. Duan, A. Yamaji, S. Koshizuka and B. Chen	4. 巻 115
2. 論文標題 An Accurate and Stable Multiphase Moving Particle Semi-implicit Method based on a Corrective Matrix for All Particle Interaction Models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Int. J. Numer. Methods Eng.	6. 最初と最後の頁 1287-1314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nme.5844	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 該当する

1. 著者名 T. Tamai, K. Murotani and S. Koshizuka	4. 巻 142
2. 論文標題 On the Consistency and Convergence of Particle-based Meshfree Discretization Schemes for the Laplace Operator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 79-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2016.02.012	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 F. Hu, T. Matsunaga, T. Tamai and S. Koshizuka	4. 巻 145
2. 論文標題 An ALE Particle Method Using Upwind Interpolation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 21-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2016.12.011	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 G. Duan, B. Chen, S. Koshizuka and H. Xian	4. 巻 318
2. 論文標題 Stable Multiphase Moving Particle Semi-Implicit Method for Incompressible Interfacial Flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.	6. 最初と最後の頁 636-666
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cma.2017.01.002	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 Y. Tao, K. Shibata and S. Koshizuka	4. 巻 -
2. 論文標題 A Bingham Snow Model for Train Safety Built Using the Moving Particle Semi-implicit Method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Transactions of JSCEs, Paper No.20170010	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2017.20170010	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13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 F. Hu and S. Koshizuka
2. 発表標題 Consistent Inlet and Outlet Conditions for ALE Particle Method
3. 学会等名 Proc. 8th Int. Conf. Computational Methods (ICCM2017), Guilin, July 25-29, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Z. Wang, K. Shibata and S. Koshizuka
2. 発表標題 Explicit Moving Particle Simulation Method for Internal Flooding in Nuclear Reactor Building
3. 学会等名 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-17), Xi'an, September 3-8, 2017, 20379 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Koshizuka
2. 発表標題 Large-scale Numerical Simulation of Flooding in Nuclear Power Station Using Particle Method
3. 学会等名 2nd Sino-German Symposium on Fundamentals of Advanced Nuclear Safety Technology (SG-FANS), Karlsruhe, September 12-15, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Koshizuka
2 . 発表標題 Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Free Surfaces: Fundamental Modeling and Industrial Application
3 . 学会等名 5th Int. Conf. on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications (Particles 2017), Hannover, September 26-28, 2017 (招待講演)(国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Tamai and S. Koshizuka
2 . 発表標題 A Posteriori Error Estimation Technique for Particle Methods Using Meshfree Compact Schemes
3 . 学会等名 5th Int. Conf. on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications (Particles 2017), Hannover, September 26-28, 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 F. Hu, T. Tamai and S. Koshizuka
2 . 発表標題 Simulation of Laminar Flows over a Backward-facing Step Using an ALE Particle Method
3 . 学会等名 5th Int. Conf. on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications (Particles 2017), Hannover, September 26-28, 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 N. Benkemoun, S. Koshizuka and K. Shibata
2 . 発表標題 Verification of the Moving Particle Semi-implicit Method for Multi-physics Simulation in Thermoplastic Injection Process
3 . 学会等名 5th Int. Conf. on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications (Particles 2017), Hannover, September 26-28, 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年



1. 発表者名 G. Duan, S. Koshizuka, A. Yamaji and B. Chen
2. 発表標題 An Accurate and Stable Multiphase MPS Method with Corrective Matrix
3. 学会等名 5th Int. Conf. on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications (Particles 2017), Hannover, September 26-28, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Koshizuka, Y. Nannichi, Z. Wang, K. Murotani, K. Shibata, E. Nagai, T. Fujisawa and A. Anju
2. 発表標題 Three-dimensional Flooding Analysis in a Building by Tsunami Run-up Using Explicit MPS Method
3. 学会等名 2nd Int. Conf. Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE 2017), Chengdu, October 15-18, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Z. Wang, K. Shibata and S. Koshizuka
2. 発表標題 Modelling Floating Body for Flooding in Nuclear Reactor Building Using a Particle Method
3. 学会等名 10th XJTU-UT-SJTU Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology, Xi'an, Nov. 22-24, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 玉井佑, 越塚誠一
2. 発表標題 メッシュフリーコンパクトスキームを用いた事後誤差推定法の基礎研究
3. 学会等名 第2回計算工学講演会論文集, さいたま, May 31-June 2, 2017, A-08-4
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松永拓也, 柴田和也, 越塚誠一
2. 発表標題 MPS法での壁境界表現における境界積分を用いた計算アプローチ
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会 (CMD2017), 東大阪, September 16-18, 2017, 139
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 玉井佑, 越塚誠一
2. 発表標題 メッシュフリーコンパクトスキームを用いた事後誤差推定法に基づくアダプティブアルゴリズムの基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会 (CMD2017), 東大阪, September 16-18, 2017, 287
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 S. Koshizuka, K. Shibata, M. Kondo and T. Matsunaga	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Academic Press	5. 総ページ数 293
3. 書名 Moving Particle Semi-implicit Method	

〔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	柴田 和也  (Shibata Kazuya)  (30462873)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授   (12601)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	松永 拓也  (Matsunaga Takuya)  (40782941)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任助教    (12601)	