

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17660

研究課題名(和文) 溶融凝固を伴う複雑自由表面流れ解析手法の構築

研究課題名(英文) Development of a numerical method for complex free surface flow with melting and solidification

研究代表者

近藤 雅裕 (Kondo, Masahiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・主任研究員

研究者番号：10589295

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)：原子力発電所の過酷事故における溶融挙動解析の高度化に向けて、複雑な幾何形状および自由表面を伴う流れを得意とする数値計算手法の1つである粒子法の基盤技術を整備し、溶融凝固解析へと発展させた。具体的に、粒子法の離散的な計算において、角運動量保存則や熱力学第二法則など基本的な物理法則を満たす計算手法を開発し、基礎的な検証を行ない、さらに、高粘度流体、非ニュートン流体(ビンガム流体)、溶融凝固を伴う流れ、表面張力を伴う流れの解析へと展開し、開発した手法の有用性および発展性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した角運動量保存則や熱力学第二法則などの基本的な物理法則を満たす非圧縮計算を効率的に行う粒子法は、世界的にも先端的方法であり、国際論文誌に掲載された。熱力学第二法則を満たすことは、力学的エネルギーの増大を伴う粒子の飛散を防ぎ、安定な計算結果を得るうえで重要である。また、角運動量保存則を満たす高粘度流体の計算手法は、半固体や固液共存状態の計算へと発展する技術であり、原子力発電所の過酷事故における溶融凝固を伴う流れのみならず、食品、樹脂成型、金属加工、土木、防災など様々な産業分野における固体と液体の中間に位置するような流動現象の計算に貢献するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the analysis of melting behavior in severe accidents at nuclear power plants, we have developed a basic technology for the particle method, which is one of the numerical calculation methods that is suitable for analysing flows with complicated geometry and free surfaces. The method has been extended to for the calculation of the flows with melting and solidification. Specifically, we have developed and verified a calculation method that satisfies basic physical laws such as the law of conservation of angular momentum and the second law of thermodynamics also in the discrete calculation. Furthermore, the usefulness and developability of the developed method were demonstrated by expanding it to analysis of non-Newtonian fluid (Bingham fluid), flow with melting and solidification, and flow with surface tension.

研究分野：数値流体力学

キーワード：粒子法 高粘度流体 溶融凝固 非ニュートン流体 表面張力 自由表面流れ 非圧縮性流体 物理的健全性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

●原子力発電所の安全性向上と福島廃炉のために炉心溶融挙動の解明が求められていた東日本大震災に起因して、福島第一原子力発電所の1～3号機が炉心溶融（メルトダウン）し、炉心溶融物がどのように格納容器底部に落下したを予測することで、原子力発電所の安全性向上、および、福島第一原子力発電所における燃料デブリ取り出しなどの廃炉作業に寄与することが求められていた。炉心溶融など複雑構造物の溶融凝固挙動を直接的に計算するためには、自由表面流れを扱うことを得意とする粒子法が有利と考えられた。

●支配方程式を離散化した後の粒子系で物理的な基本則が厳密には満たされていなかった一方、粒子法は複雑な構造物中の自由表面流れを扱うことについての優位性があるが、ナビエ・ストークス方程式などの支配方程式を離散化したあとの粒子系において、角運動量保存則や熱力学第二法則などの基本的な物理法則を満たすことを効率的に保証するものはほとんどなかった。溶融凝固などのエネルギーバランスを考える現象を扱ううえで、熱力学的法則を満足することはすることは重要であり、また、溶融した酸化物の流れなどの高粘度自由表面流れの回転挙動を適切にとらえるためには、角運動量保存則を満足することが重要であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、炉心溶融物の崩落挙動を解析する上で基盤となる溶融と凝固を伴う複雑自由表面流れ解析手法を構築する。具体的には、粒子法で安定に計算を行う上で重要となる熱力学第二法則を満たす粒子法を開発し、静水圧計算など非圧縮自由表面流れに関する基礎的な検証を行う。また、高粘度流体の回転を伴う挙動を適切にとらえられるようにするため、角運動量保存則を満足しつつ高粘性流体を数値的に安定に計算可能な手法を開発する。さらに、表面張力モデル、固液相変化モデル、非ニュートン流体モデルと組み合わせることで、原子力発電所の過酷事故解析のような固体と液体が混在する複雑体系の計算に向けた計算手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 物理的健全性をもつ非圧縮性粒子法の開発と検証

ナビエ・ストークス方程式を離散化した後の粒子の運動方程式が、散逸項を含む場合のラグランジュ力学に従うように定式化を行うことで計算手法の開発を行う。また、開発した手法を用いて、静水圧計算、液滴伸長計算、ダム崩壊計算などを通じて、自由表面非圧縮流れに関する基礎的な検証を行う。

#### (2) 角運動量を保存する粘性の計算手法の開発

ナビエ・ストークス方程式の粘性項に関する離散式について、角運動量保存則を満たすように定式化を行うことで、計算手法を開発する。高粘度流体が回転を伴う挙動を示す体系を用いて、これまでの角運動量を保存しない手法と開発した角運動量を保存する手法を用いて計算結果を比較し、角運動量を保存することの重要性を示す。

#### (3) 表面張力の計算モデルの開発および検証

物理的健全性を維持しつつ表面張力計算を行うため、流体表面で大きくなるポテンシャルを定式化し、ラグランジュ力学に従ってポテンシャルを空間微分することで得られるポテンシャル力を粒子法の粒子に与えることで表面張力モデルを開発する。また、開発した表面張力モデルに関して、ラプラス圧計算などの基礎的な検証を行う。

#### (4) 溶融凝固を伴う流動の解析モデルの開発

本研究で開発する高粘度流体の計算手法が、幅広い粘性範囲を統一的に扱えることを活かし、固相を粘性が非常に大きな流体とみなして固液を統一的に計算する。溶融凝固に関しては、粘性係数をエンタルピーあるいは温度の関数として与え、固液共存状態を計算する。また、ビンガム流体などの非ニュートン流体に関しては、粘性係数をせん断速度の関数で与えて計算を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 物理的健全性をもつ非圧縮性粒子法の開発と検証 [1]

解析力学的な枠組みに従うように非圧縮性粒子法の離散式を定式化し、基本的な検証を行った。図1は静水圧計算を大なった場合の圧力分布である。非圧縮条件をみたしつつ安定に静水圧が計算されていることが確認できる。また、図2は、図1の静水圧計算の容器中央の圧力履歴を、従来の粒子法であるSPH法[2]およびMPS法[3]と比較したものである。これまでの粒子法と比較して、圧縮や数値振動に伴う圧力変化は抑制され、安定な解が得られていることが確認できる。一方、図3は、自由表面の変形に関する検証として液滴伸長問題を計算した結果である。また、図4は、液滴の長半径および短半径の理論解と比較したものである。理論解とよく一致していることが確認できる。

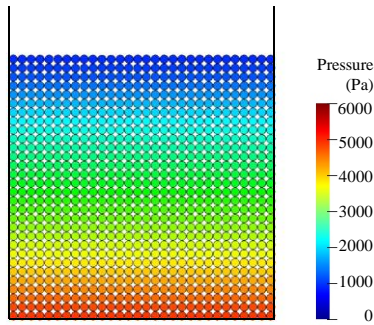


図1 静水圧計算における圧力分布

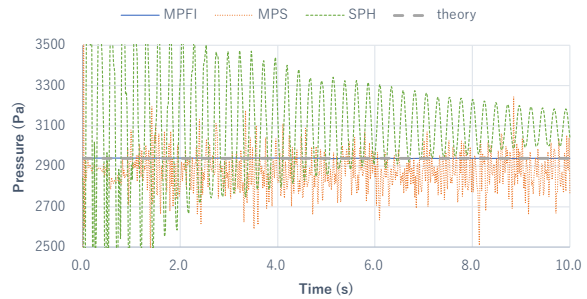


図2 圧力履歴に関する従来法 (SPH, MPS 法) との比較

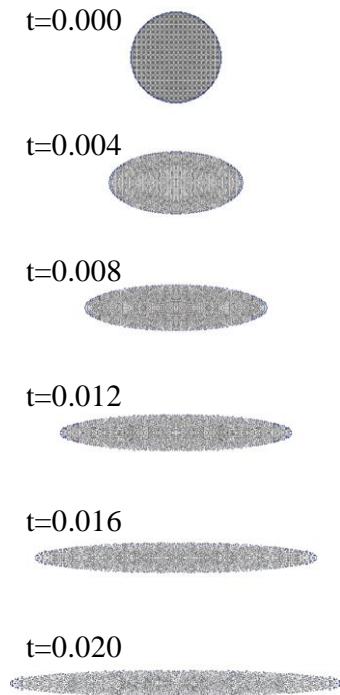


図3 液滴伸長問題の計算

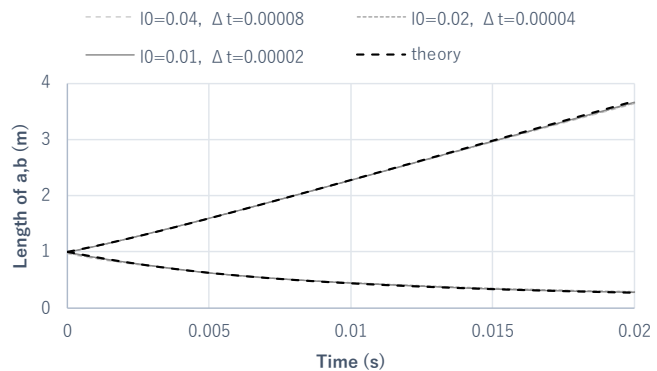


図4 液滴伸長問題における長半径および短半径の履歴

(2) 角運動量を保存する粘性の計算手法の開発 [4]

従来の粒子法の多くでは、粘性項を離散化する際に相対速度を直接的に用いたラプラスアンモデルを適用していた [3] が、この方法では相対速度に反する力が回転運動を止めるトルクとなり、回転を適切に計算することができない。本研究では、従来のラプラスアンモデルに含まれていた相対速度から回転成分を除く定式化を行い、角運動量を保存した。図5は、高粘度物体が落下して障害物にオフセット衝突する計算において、本研究で開発した角運動量を保存するラプラスアンモデルを用いた場合と、従来型のラプラスアンモデルを用いた場合を比較したものである。従来型のラプラスアンモデルを用いると不自然に回転が止まってしまうのに対して、本研究で開発したラプラスアンモデルを用いると高粘度物体が回転する様子が確認できる。

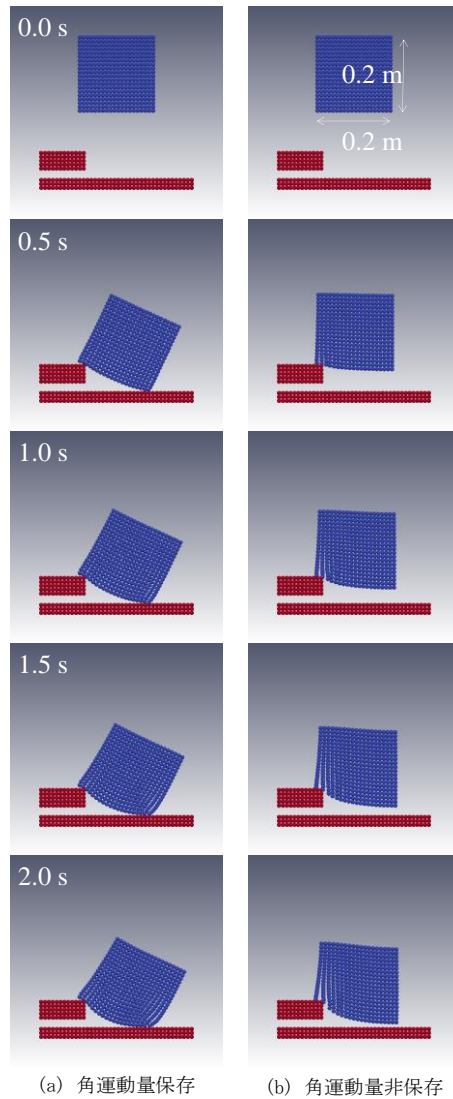


図5 高粘度物体のオフセット衝突（従来型ラプラスモデルとの比較）

### (3) 表面張力の計算モデルの開発および検証[5]

これまで粒子法に適用されてきた表面張力モデルには、主として表面の法線と曲率から粒子に力を与える CSF モデル[6]と、粒子間に引力を生じるポテンシャルを与える方法[7]があったが、前者は法線曲率の計算が煩雑となり解析力学的な枠組みにあてはまらず、後者は液滴内部にも力が働くため液滴挙動が不自然になる場合があるという課題があった。本研究では、液滴の表面のみ大きくなるポテンシャルを定式化し、ポテンシャルに基づく力を粒子に与えることで表面張力計算を行った。図6は、液滴計算におけるポテンシャルの分布であり、表面のみで大きなポテンシャルエネルギーが現れていることが確認できる。また、図7は、液滴の大きさを変えてラプラス圧を計算した結果である。理論通りに液滴表面の曲率と内圧の比例関係が確認でき、本研究で提案した表面張力モデルが、表面張力の基本的な性質を満たしているといえる。

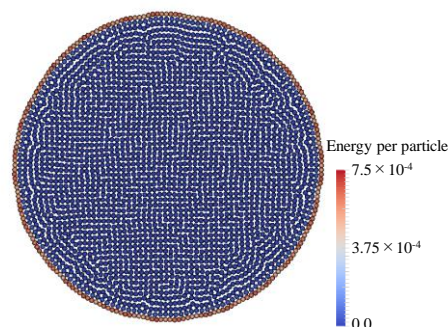


図6 液滴計算におけるポテンシャルエネルギーの分布

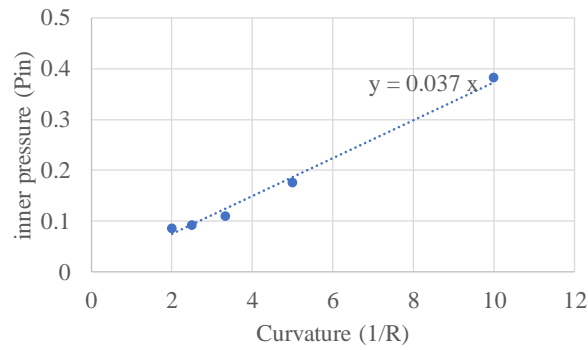


図7 液滴表面曲率と内圧（ラプラス圧）の比例関係の確認

#### (4) 溶融凝固を伴う流動の解析モデルの開発[8]

固相を粘性が非常に大きな流体とみなし、粘性係数をエンタルピーの関数として与え、固液相変化を計算した。図8は、内部の固体に壁面からの熱が伝わり溶融する様子を計算した際の粘性変化を示したものである。本研究で開発した計算手法が  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^8$  (Pa) と幅広い粘性範囲を同時に扱うことができ、粘性変化により溶融を表現できることが確認できる。

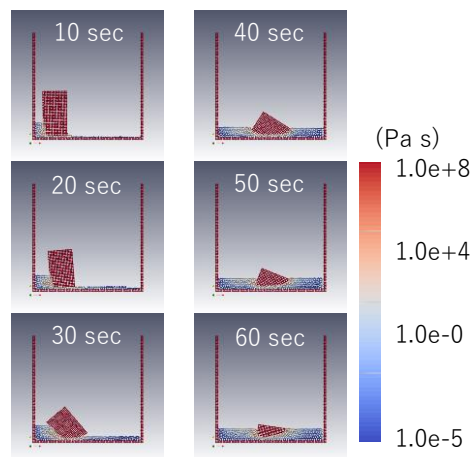


図8 粘性変化を利用した溶融計算

#### 参考文献

- [1] Masahiro Kondo, Computational Particle Mechanics 263 (2020)
- [2] J.J. Monaghan (1994), Journal of Computational Physics 110:399-406
- [3] S. Koshizuka and Y. Oka (1996), Nuclear Science and Engineering, 123:421-434
- [4] 近藤雅裕, 第22回計算工学講演会, 埼玉, 2017年5月
- [5] Masahiro Kondo, Particles2017, 461-470, Hannover, Sep. 26-28
- [6] Joseph P. Morris, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 33, 333-353 (2000).
- [7] Alexandre Tartakovsky and Paul Meakin, PHYSICAL REVIEW E 72, 026301 (2005)
- [8] Masahiro Kondo, Shota Ueda, Koji Okamoto, Proceedings of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE25), July 2-6, 2017, Shanghai, China.



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masahiro Kondo	4. 巻 263
2. 論文標題 A physically consistent particle method for incompressible fluid flow calculation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Particle Mechanics	6. 最初と最後の頁 TBD
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40571-020-00313-w	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11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 近藤雅裕
2. 発表標題 MPFI法を用いたビンガム流体シミュレーション
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 Masahiro Kondo
2. 発表標題 A new incompressible particle method constructed with conservative and dissipative forces
3. 学会等名 Particles 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Kondo
2. 発表標題 Bingham Fluid Simulation using Moving Particle Full-Implicit (MPFI) method
3. 学会等名 12 th XJTU-UT-SJTU Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Kondo
2. 発表標題 High-viscos flow calculation using Moving Particle Full-Implicit method
3. 学会等名 APCOM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ueda, M. Kondo and K. Okamoto
2. 発表標題 Numerical analysis of the eutectic melting and relocation of the B4C control rod materials by the MPFI-MPS method
3. 学会等名 Particles 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤雅裕
2. 発表標題 液滴表面のみに働くポテンシャル力を用いた 粒子法表面張力モデル
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 近藤雅裕
2. 発表標題 Gas-liquid Two-phase flow Calculation using Moving Particle Full-Implicit method
3. 学会等名 WCCM 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤雅裕
2. 発表標題 Surface tension calculation in a continuum particle method using many body potential
3. 学会等名 CSW 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤雅裕
2. 発表標題 高粘度流体解析のための角運動量を保存する粒子法の開発
3. 学会等名 第22回計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Kondo, Shota Ueda, Koji Okamoto
2. 発表標題 Melting Simulation using a Particle Method with Angular Momentum Conservation
3. 学会等名 International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-25) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro Kondo
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF SURFACE TENSION MODEL WITH MANY-BODY POTENTIAL FORCE
3. 学会等名 Particles 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----