

令和 4 年 5 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20283

研究課題名（和文）移動サーフェスマッシュを用いた高精度粒子法の開発

研究課題名（英文）Development of moving surface mesh-incorporated particle method

研究代表者

松永 拓也（Matsunaga, Takuya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：40782941

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）：表面張力を主体とする流れの高精度解析の実現を目指して、移動サーフェスマッシュを用いる新しい粒子法を開発した。主な研究成果は以下の通りである。（1）新しい時間進行法を開発し、非圧縮性流れの基礎的な解析精度を向上した。（2）移動サーフェスマッシュを用いて界面形状を陽的に追跡することで、表面張力の計算精度を大きく向上した。（3）軸対称座標系を用いることで、軸対称三次元流れの計算効率を向上した。（4）移動サーフェスマッシュの分裂アルゴリズムを開発し、トポロジー変化を計算可能とした。（5）実問題例として蛇口からの液垂れ問題や連続式インクジェット流れを解析し、開発手法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気液界面を伴う流れは自然や産業など極めて多くの体系に現れる。特に液滴、液柱、液膜などの小スケール現象ではしばしば表面張力が支配的となる。本研究は表面張力およびそれに伴う界面挙動をより正確に数値予測する新しい計算技術の作成を試みる研究であり、従来手法では実現できなかった流体现象の解析が実現可能となる。従って、粒子法による流体解析技術を抜本的に強化する基礎研究であると同時に、開発手法の工学応用においては極めて広範な産業分野への波及効果が期待される。

研究成果の概要（英文）：Aiming at accurately simulating fluid flows with surface tension forces, a novel particle method incorporating a moving surface mesh has been developed. The main results of this research are as follows. (1) The fundamental computational accuracy is improved by using a new time-marching scheme together with a consistent meshfree discretization scheme. (2) The moving surface mesh is incorporated to explicitly calculate deformations of the free-surface boundary, which particularly improves the accuracy of surface tension calculation. (3) By using axisymmetric coordinates, the computational efficiency is effectively enhanced. (4) In order to simulate breakup of a liquid domain, the topological change is treated using a surface mesh splitting technique. (5) As examples of practical applications, the dripping faucet and continuous inkjet problems are simulated, and the validity of the developed particle method is validated.

研究分野：数値流体力学

キーワード：粒子法 数値流体力学 表面張力 自由表面 気液界面 液滴 インクジェット

1. 研究開始当初の背景

物体駆動の流れや混相流、自由表面流れなどの移動境界問題に適した数値流体解析手法として「粒子法」が注目されている。粒子法は計算格子を使用しないため、自由境界の大変形やトポロジー変化を伴う複雑な流れを容易に解析できる。これまでに国内外で多くの研究が行われており、産業への応用も進んでいる。その一方で計算精度に関する重大な未解決課題がある。

粒子法では計算点(粒子)がラグランジュ的に移動するため界面を正確に追跡できると言われている。しかし粒子が実際に追跡しているのは流体内部の代表点であり、界面は点群の間に曖昧に存在するものでしかない。更に粒子法では流れに伴って粒子分布にばらつきが発生するため、界面形状に数値的な凹凸が現れる。この凹凸によって表面張力の計算精度が著しく低下する。こうした要因によって、従来の粒子法では表面張力を主体とする流れを正確に予測することができない。

2. 研究の目的

従来の粒子法において表面張力の計算精度が低下する主な原因は、界面形状を精度良く追跡できないことであった。そこで本研究では、界面形状を陽的に追跡する「移動サーフェスマッシュ」を用いた計算アルゴリズムを新たに開発して、界面変形ならびに表面張力をより正確に計算できる粒子法を作成し、表面張力を主体とする気液界面流れの高精度解析の実現に取り組む。

本研究で開発する手法は、粒子法における表面張力の計算精度を抜本的に改善する。これは単に従来の解析精度を数量的に向上するような付加的改良ではなく、これまで実現できなかった流体现象の解析を実現可能にする野心的な研究である。この点で、粒子法による数値流体解析技術を底上げる基礎的かつ発展的な研究である。気液界面を伴う流れは至るところに現れるため、極めて広範な産業分野への波及効果が期待される。

3. 研究の方法

移動サーフェスマッシュとは、図1に示すような気液界面に配置する表面メッシュである。流体の流れに従ってメッシュ節点を移流させることで、界面変形をラグランジュ的に追跡する。この原理に基づき、移動サーフェスマッシュを用いた高精度粒子法を作成する。

移動サーフェスマッシュによって閉じられた領域を液相、それより外側の領域を気相とする。当初の研究計画では、液体と気体の流れを連成させる気液混相流解析を想定していたが、気体の運動を無視した自由表面流れの方針を変更した。自由表面流れの解析では気相側に粒子を配置する必要がないため、計算効率に大きな利点がある。

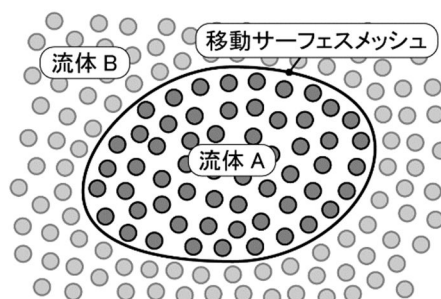


図1 移動サーフェスマッシュ

4. 研究成果

(1) 非圧縮性流れ計算の高精度化

一般的な粒子法と同様に非圧縮性流れを仮定する。ただし従来の粒子法は解析精度が低い問題があった。そこで空間離散化には Taylor 展開と最小二乗法に基づく LSMPS (least squares moving particle semi-implicit) スキームを採用した。更に、新しい時間進行法を開発して、時間進行に伴う計算誤差を削減した。これらの修正により、時間1次精度、空間2次ないし4次

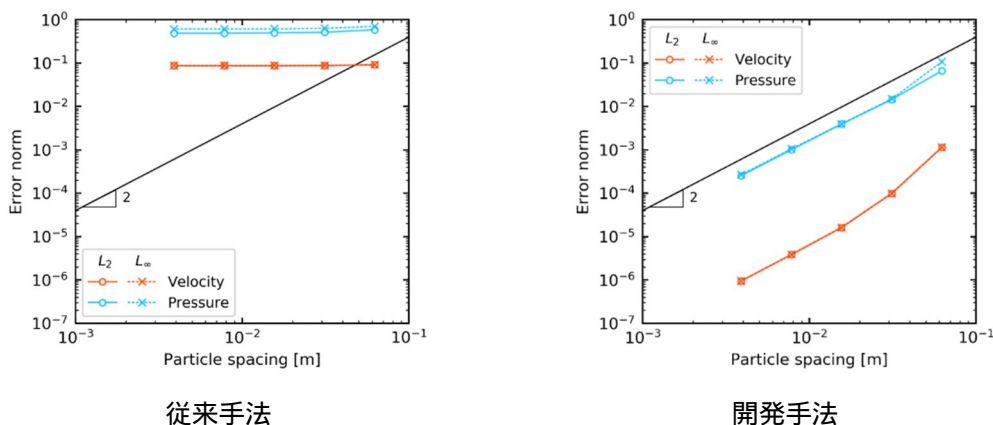


図2 Taylor-Green問題における速度と圧力の誤差ノルムの収束性

精度の解析が可能となった。

図2に2次のLSMPSスキームを用いてTaylor-Green渦を解析したときの誤差ノルムの空間収束性の検証結果を従来手法と比較して示す。従来手法では空間解像度を変えても誤差ノルムが収束しないのに対し、開発手法では誤差ノルムが粒子間隔の2乗に比例して減少している。これは従来手法が0次精度であるのに対し、開発手法は2次精度に向上したことを表す。

(2) 表面張力と自由表面の境界条件

表面張力は法線ベクトルと曲率の計算精度が重要となる。Front-tracking法で用いられるスキームを採用して、各メッシュ節点上の法線ベクトルと曲率をメッシュ形状から直接算出する。メッシュ節点は速度・圧力に関する独立な自由度を有するため、自由表面上の応力の釣り合いを境界条件として拘束できる。これにより、格子法でしばしば問題となるparasitic currentと呼ばれる数値誤差が根本的に発生しない。更に、境界条件を拘束条件として空間離散化スキームに組み込む手法を開発した。

図3は妥当性検証の1つとして実施した単一液滴振動の計算結果である。液滴振動周期ならびに定常状態の内部圧力値について理論解との一致が確認され、表面張力と境界条件の計算方法の妥当性が示された。

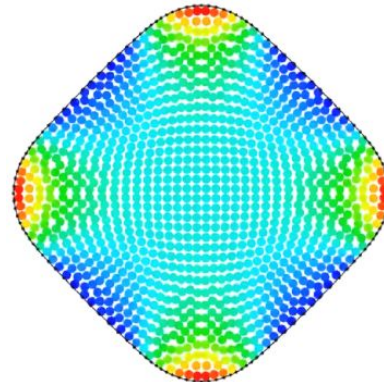


図3 表面張力によって駆動される液滴振動の計算結果（色は圧力を表す）

(3) 軸対称座標系への拡張

支配方程式を軸対称座標系で記述することで、軸対称三次元流れを効率良く扱えるよう計算手法を拡張した。軸対称解析では、断面内の速度分布が二次元の連続の式を満たさないため、粒子をラグランジュ的に移流させると粒子分布の粗密が時間とともに増大する。特に界面が大きく変形する問題では粒子分布が著しく偏り、数値不安定化を引き起こす。そこで粒子の移動速度を仮想的に二次元圧縮性流れとして解くALE (arbitrary Lagrangian Eulerian) 型の計算方法を考案した。これにより軸対称解析における数値安定性が飛躍的に向上した。基礎検証として、円管ポアズイユ流れ、軸対称パッチテスト、球形液滴振動を計算し、理論解との比較によって妥当性を示した。

(4) 液滴分裂によるトポロジー変化

液滴生成等の現象を計算するためには、液体領域の分裂を考慮する必要がある。このようなトポロジー変化を取り扱うため、移動サーフェスマッシュのメッシュ分裂アルゴリズムを開発した。本来、流体領域の分裂は気液境界の交差によって起こるものである。しかし、サーフェスマッシュ間の間隙が極めて小さくなると、数値不安定化により計算が破綻する問題がある。そこでメッシュ間の距離に基づく分裂判定を導入することで、移動サーフェスマッシュの分裂を安定に計算できるようにした。

図4はcapillary instabilityによって起こる無限長円柱の液滴分裂の計算結果である。初期状態から分裂までにかかる時間や生成液滴サイズの理論解との比較により妥当性を検証した。

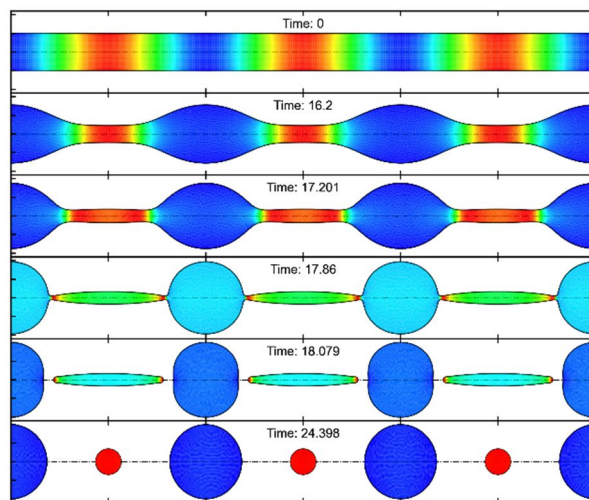


図4 無限長円柱の液滴分裂の計算結果（色は圧力を表す）

(5) 実問題解析

表面張力を主体とする気液界面流れの実問題例として、蛇口からの液垂れ問題や連続式インクジェット流れの解析を実施した。蛇口からの液垂れ問題では、円筒ノズルから一定流量で流入する液体について、表面張力と重力によって生じるdrippingと呼ばれる液滴生成現象を解析した。移動サーフェスマッシュを用いることで空間解像度の依存性が比較的小さく、加えて軸対称座標系を用いることで計算効率が極めて高いことがわかった。具体的には、一般のデスクトップPCを用いて数十分という短い計算実行時間で妥当な数値解が得られた。文献の実験結果を参照値として、液滴破断時の気液界面形状や破断長さを比較したところ、複数の実験条件に対して良好な一致が確認された。このことから本開発手法の高い有用性が示された。

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 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Matsunaga Takuya, Koshizuka Seiichi, Hosaka Tomoyuki, Ishii Eiji	4. 巻 409
2. 論文標題 Moving surface mesh-incorporated particle method for numerical simulation of a liquid droplet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109349 ~ 109349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.109349	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 Matsunaga Takuya, Yuhashi Nobuhiro, Shibata Kazuya, Koshizuka Seiichi	4. 巻 121
2. 論文標題 A wall boundary treatment using analytical volume integrations in a particle method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 4101 ~ 4133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nme.6429	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、越塚 誠一	4. 巻 87
2. 論文標題 粒子法における時間進行法の改良	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 20-00437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00437	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 Takuya Matsunaga, Axel Soedersten, 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 Matsunaga Takuya, Koshizuka Seiichi	4. 巻 389
2. 論文標題 Stabilized LSMPs method for complex free-surface flow simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 114416 ~ 114416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cma.2021.114416	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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 T. Matsunaga, S. Koshizuka, T. Hosaka, E. Ishii
2. 発表標題 A novel particle-based simulation algorithm for axisymmetric liquid jet breakup using moving surface mesh
3. 学会等名 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuya Matsunaga, Seiichi Koshizuka, Tomoyuki Hosaka, Eiji Ishii
2. 発表標題 Simulation of surface tension flows using a particle method with moving surface mesh
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松永 拓也, 越塚 誠一
2. 発表標題 LSMPs法の数値安定化と複雑な自由表面流れへの適用
3. 学会等名 日本機械学会 第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学 越塚・柴田研究室ホームページ
<http://mps.q.t.u-tokyo.ac.jp/lab/>

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