

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03174

研究課題名(和文) 整合性を有する離散化に基づく潤滑解法の粒子混相流への展開

研究課題名(英文) Lubrication analysis based on consistent direct discretisation and its application to particle-dispersed multiphase flows

研究代表者

竹内 伸太郎 (Takeuchi, Shintaro)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50372628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,200,000円

研究成果の概要(和文)：粒子を分散的に含む流れの中で発生する輸送現象の解析を目指し、粒子間の狭い領域(狭隘流路)で発生する潤滑流れを数値的に解く手法(潤滑解法)を提案した。その際、粒子・流体界面をシャープに解像するには整合性のとれた直接離散化という差分法概念が本質であることを示し、狭隘流路の流れ解析における有効性を示した。

さらに、透過性を有する膜を表面にもつような粒子群(例：生体細胞)を想定し、提案した数値解法を膜透過流れの問題へ発展させた。非圧縮流体の速度場と圧力場の連成に由来する圧力ポアソン方程式において、界面表裏における圧力の不連続性を考慮したユニークな形式を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、多数の粒子を含む流れでは粒子間の狭隘流路における流れを解く際は、解像度の低下が問題であった。提案した手法により狭隘流路の流れを正確に解くために必要な条件が明らかになり、それを数値解析コードに実装するユニークな方法を示した。また、狭隘流路において、壁面圧力から壁垂直方向の圧力分布を構成する数値モデルを提案した。これは従来の潤滑流れ解法の解像度を補う手法と位置付けられる。

さらに、提案した数値解法を膜透過流れの解法へ発展させる過程をとおして、より一般に膜表裏における物理量の不連続性を考慮する方法が明らかになりつつあり、将来的に流れ中の輸送現象の理解に貢献する方法論への展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：Aiming at the analysis of transport phenomena occurring in a multiphase flow of dispersed particles, a numerical method is proposed for the lubrication flow occurring in the narrow regions between particles. It was shown that the concept of "consistent direct discretisation" in the finite-difference method is essential for velocity-pressure coupling and capturing a particle-fluid interface, and its effectiveness for the flow analysis in a narrow passage was demonstrated.

The method was extended to permeate flows through membrane, which aims a number of particles covered with a permeable membrane (e.g. biological cells). The uniqueness of the method is imposing the pressure discontinuities at the front and rear sides of the interface to the pressure Poisson equation for coupling the velocity and pressure fields of an incompressible fluid. The proposed method was also proved to be effective for analysing the permeate flow driven by the lubrication-induced pressure.

研究分野：数値流体力学

キーワード：潤滑 粒子を含む流れ 離散化

1. 研究開始当初の背景

相対運動する物体間もしくは界面間の狭い領域(狭隘領域)に発生する流れは、機械要素の潤滑の問題に関連して古くから注目されてきた。狭隘領域において大きな圧力が発生するというのが潤滑流れの特徴であるが、それは摩擦低減の目的だけにとどまらず、近年では潤滑の効果が表れやすい例として、流体中に高数密度で分散的に存在する物体(たとえば雨滴や生体細胞、微生物)が相対的に運動する粒子流れが注目を集めている。そのような問題では粒子間・界面間の隙間形状は複雑になり、流れを数値的あるいは実験的に解析しようとする、流路が狭隘であるために空間解像度がしばしば不足し、潤滑に由来する圧力の上昇を正確に捉えることが難しくなる。自然界や生体内および工学的応用においては、界面間における流れがさらに熱や物質の輸送現象を誘起するという現象がしばしばみられ、工業プロセスや防災、医療に関連して重要な課題である。そこで本課題では狭隘領域が至る所に発生する粒子流れまでをターゲットにして、流れを正確に予測する研究に着手した。

2. 研究の目的

この課題では、粒子間・物体間の狭隘領域を多数含む流れ場を数値的に解く方法について研究を進めた。その際に基礎に置いたのは、(1) 物体近傍の最近接格子点まで運動量保存を解く「直接離散化」、(2) 非圧縮速度場と圧力場の離散的な意味での「整合性」を満たすことの二点である。双方を満たす離散化(以後「整合性のとれた直接離散化」と称する)を、任意形状の物体まわりの流れに適用可能な形式にすることを目的とした。さらにその発展として、可変形物体および表面が透過性をもつ物体を含む流れ場を扱う手法への展開を目指した。

しかし、整合性のとれた直接離散化に従って任意形状(非球形/非円形)の狭隘流路における流れを正確に解くには、究極的には格子解像度を局所的に向上させた数値解析になり、計算負荷は極めて高くなる。したがってこの課題では、狭隘流路を含む流れの数値解法に内在する問題を、本質的な観点から解決することを同時に目指し、過度な数値的負担を低減する手法についても研究を進めることを第二の目的とした。具体的には、潤滑が卓越する場において数理モデルによって構成した流れ場を数値的に周囲流れへ「埋め込む」手法に関する基礎的な検討である。

3. 研究の方法

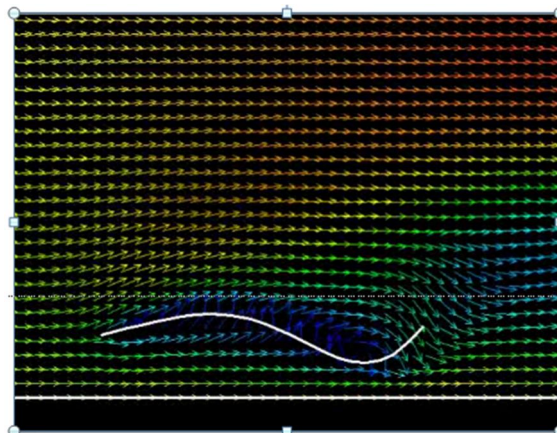
報告者はかつて粒子周囲の流れに関する数値解析を行った際、高い解像度の数値計算を実施しても満足いく解の収束を得られず、非圧縮速度場と圧力場の離散化における不整合がその主な要因の一つであることを明らかにした。したがって本課題では、狭隘領域が至る所に発生する粒子流れの問題にこそ整合性のとれた直接離散化を採り入れるべきと考えた。そこで、報告者は支配方程式の離散式において離散格子点と界面の距離を適切に反映した境界埋め込み法を提案した。この手法のユニークな点は、整合性のとれた直接離散化になっているだけでなく、境界の移動に伴う差分テンソルの切替え時にも離散化の性質が保たれるようにしたことである。さらに本課題では、潤滑が支配的な狭隘流路においても、この方針が有効であることを示した。

しかし、その数値計算手法は高い解像度で計算が実施されることを前提としており、特に高数密度の粒子流れに適用する場合は粒子間の狭隘領域を基準にして解像度を設定することから、必要な格子数は幾何級数的に増え計算負荷を増大させることになる。そこで、数値計算の負荷を減らす手法を目指して、潤滑流れの新たな数理モデルを検討した。具体的には、古典的な潤滑方程式(Reynolds潤滑方程式)の導出において無視される高次の項を考慮に入れ、適当な仮定の下で微分方程式を解くことにより、狭隘路における壁面上の圧力分布(低次情報)から壁垂直方向の圧力分布(高次情報)を再構成する数理モデルを提案し、その解を数値的に周囲流れへ埋め込む方法について基礎的な検討を行った。なお、周囲流れの数値解法には上述の新規開発手法を用いた。

研究の手順としては、基礎的な検証問題を通じて数値解法の有効性を確認した後に、固体物体の間の狭隘路における潤滑流れの解を数値的に周囲流れへ埋め込む試みを行った。以下では研究成果の一例として、可変形物体と壁面との間の潤滑流れの数値解析結果、および粒子と固体壁の間に発生する潤滑流れの数理モデルについて報告する。また、提案した数値解法の応用例として、透過性をもつ膜を通じた物質輸送の問題へ発展させた研究例についても簡単に紹介する。

4. 研究成果

整合性のとれた直接離散化のアイデアを狭隘路に沿う領域へ拡張した数値解析の一例を右図に示す。この例では、下壁面(図下部の白い直線)から少しだけ離れた点に一端を固定されて流れの中に置かれたフィラメント(図中の白い曲線)が流体力を受けて運動する。下壁面は図の左から右方向に一定速度で動いており、初期にフィラメントは下壁と平行に速度0で設置される。図中の矢印は速度ベクトルである。フィラメントと壁面との間の潤滑が支配的な条件ではフィラメントが微小擾乱を受けても静止状態を保ち運動することはないが、壁からの距離を離すと図のようにフィラメントは準定常的な運動を示すようになる。この運動の遷移が起こる条件について線形安定解析をおこなったところ、フィラメントの密度と曲げ剛性および壁からの距離で決まる安定条件が得られ、レイノルズ数が小さい範囲では数値解析結果と一致する傾向を確認した。



提案した数値解法を、界面表裏における物理量の不連続を含む離散形式に変更することで、膜透過流れの問題にも適用できることを示した。一例として、円管内に張られた膜を透過する流量から膜の透過係数を求める公式(文献)に対して、上述の数値解法を用いて公式の検証と適用範囲の検討を行った。

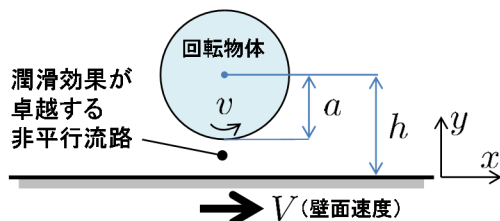
続いて、狭隘路における流れの圧力分布を再現する数理モデルを提案した。そのモデルで求まる壁垂直方向の圧力分布は、壁速度と Reynolds 潤滑方程式から得られる圧力勾配によって駆動される速度分布(Couette-Poiseuille 速度分布)の流路接線方向変化率に比例する、という形式で書かれ、物理的にも自然な解釈であるといえる。これによって得られる解を、移動平板と円柱の間の流れを例にとって下図に示す。図 a の問題設定に対して、図 b, c, d では複数の手法で得られる圧力分布を比較している。Reynolds 潤滑方程式を解いて求まる解(図 b)では狭隘路の長手(x)方向の圧力に関する情報しか得られず、厳密解(図 d)と分布が大きく異なるが、本研究のモデルで求めた圧力分布(図 c)では狭隘路の壁垂直方向分布の特徴を再現している。さらに、三次元空間で互いに接近する粒子の間の領域で発生する圧力が同モデルによって正確に求まったことから、多数の粒子を含む系において潤滑を考慮した粒子流れ解析に適用する見通しを得ることができた。

<引用文献>

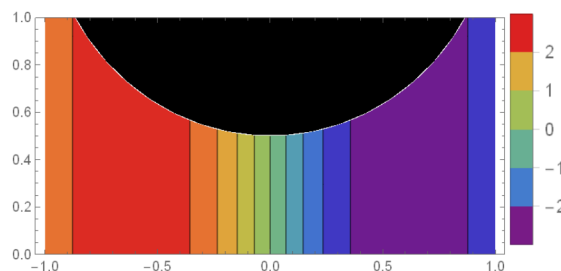
S. Takeuchi, A. Tazaki, S. Miyauchi and T. Kajishima, “A relation between membrane permeability and flow rate at low Reynolds number in circular pipe”, *Journal of Membrane Science* Vol. 582, pp. 91-102 (2019)

DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.018>,

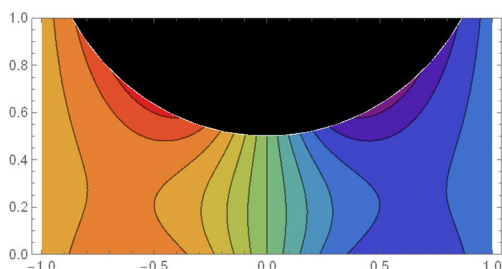
研究機関アーカイブ: <http://hdl.handle.net/11094/79018>



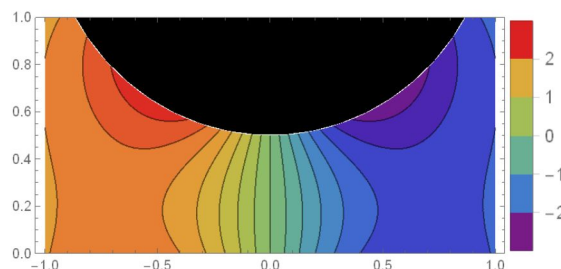
(a) Reynolds潤滑が適用困難な問題設定



(b) Reynolds潤滑理論による圧力分布



(c) 提案数理モデルによる圧力分布



(d) 厳密解

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tazaki Asahi, Takeuchi Shintaro, Miyauchi Suguru, Zhang Lucy T., Onishi Ryo, Kajishima Takeo	4. 巻 36
2. 論文標題 Fluid Permeation Through A Membrane With Infinitesimal Permeability Under Reynolds Lubrication	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 637 ~ 648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jmech.2020.38	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 該当する
1. 著者名 Takeuchi Shintaro, Gu Jingchen	4. 巻 4
2. 論文標題 Extended Reynolds lubrication model for incompressible Newtonian fluid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 114101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.114101	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 Takeuchi Shintaro, Miyamori Yuri, Gu Jingchen, Kajishima Takeo	4. 巻 4
2. 論文標題 Flow reversals in particle-dispersed natural convection in a two-dimensional enclosed square domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 84304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.084304	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 Takeuchi Shintaro, Tazaki Asahi, Miyauchi Suguru, Kajishima Takeo	4. 巻 582
2. 論文標題 A relation between membrane permeability and flow rate at low Reynolds number in circular pipe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 91 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2019.03.018	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 Fukada Toshiaki, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 113
2. 論文標題 Estimation of fluid forces on a spherical particle for two-way coupling simulation based on the volume averaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 165 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.01.009	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 Okabayashi Kie, Hirai Kenshi, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 8
2. 論文標題 Direct numerical simulation of turbulent flow above zigzag riblets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 105227 ~ 105227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5049714	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 Takeuchi Shintaro, Fukuoka Hiroki, Gu Jingchen, Kajishima Takeo	4. 巻 371
2. 論文標題 Interaction problem between fluid and membrane by a consistent direct discretisation approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2018.05.033	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 Gu Jingchen, Takeuchi Shintaro, Fukada Toshiaki, Kajishima Takeo	4. 巻 130
2. 論文標題 Vortical flow patterns by the cooperative effect of convective and conductive heat transfers in particle-dispersed natural convection	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 946 ~ 959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.138	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 Miyauchi Suguru, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 345
2. 論文標題 A numerical method for interaction problems between fluid and membranes with arbitrary permeability for fluid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 33 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2017.05.006	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 Gu Jingchen, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 120
2. 論文標題 Influence of Rayleigh number and solid volume fraction in particle-dispersed natural convection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 250 ~ 258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.020	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 Gu Jingchen, Sakaue Motoki, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 329
2. 論文標題 An immersed lubrication model for the fluid flow in a narrow gap region	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 445 ~ 454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2018.01.040	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 Fukada Toshiaki, Fornari Walter, Brandt Luca, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 in press
2. 論文標題 A numerical approach for particle-vortex interactions based on volume-averaged equations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.02.019	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 花輪理徳、竹内伸太郎、梶島岳夫	4. 巻 36-2
2. 論文標題 剪断流中のキャノピー層境界における運動量輸送の解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 75~78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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11件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Shintaro Takeuchi, Jingchen Gu, Amaury Barral, Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 A non-Reynolds lubrication model and application to droplet levitation
3. 学会等名 アメリカ物理学会 流体力学部門 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima
2. 発表標題 A new immersed stress method based on volume average
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Takeuchi, Jingchen Gu, Takeo Kajishima
2. 発表標題 Cell structures in natural convection containing neutrally-buoyant conductive particles
3. 学会等名 10th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeo Kajishima and Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Immersed Boundary Methods for Particle-Laden Flows and Fluid-Structure Interactions with Heat and Mass Transfer
3. 学会等名 ACHEMA2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shintaro Takeuchi, Jingchen Gu and Takeo Kajishima
2. 発表標題 Vortical structures in natural convection of particle-dispersed two-phase flow
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Mechanics (ICM 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima
2. 発表標題 Effect of flow disturbance around a particle for fluid force estimation in two-way coupling simulation
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics,
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jingchen Gu, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima
2. 発表標題 Coupled Effects of Convection and Conduction on Heat Transfer in Solid-Liquid Two-Phase Media Densely Laden with Finite-Sized Particles
3. 学会等名 16th International Heat Transfer Conference (IHTC16) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Effect of temperature gradient within the solid particles on the heat transfer in dense particle-dispersed flows
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Numerical Methods in Multiphase Flows (ICNMMF-III) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Mechanisms of oscillation and reversal in particle-dispersed Rayleigh-Benard cells of laminar regime
3. 学会等名 The US-Japan Workshop on Bridging Fluid Mechanics and Data Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jingchen Gu, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima
2. 発表標題 Effect of conductive and convective heat fluxes in dense solid-dispersed two-phase flows
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Numerical Methods in Multiphase Flows (ICNMMF-III) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内伸太郎
2. 発表標題 粒子分散混相流における熱対流の安定性について
3. 学会等名 第2回海洋地球科学計算ワークショップ：混相流シミュレーション (招待講演)
4. 発表年 2018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
連携研究者	梶島 岳夫 (Kajishima Takeo) (30185772)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	

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1件

国際研究集会	開催年
第2回海洋地球科学計算ワークショップ：混相流シミュレーション	2018年～2018年

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			
英国	University College London			
スウェーデン	スウェーデン王立工科大学			