

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760128

研究課題名（和文）

固体粒子を高濃度に含む流れの高精度数値計算

研究課題名（英文）

Direct numerical simulation of flows including dense solid particles

研究代表者

辻 拓也（TSUJI TAKUYA）

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90379123

研究成果の概要（和文）：固体粒子を高濃度に含む流れの振る舞いは大変複雑であり、直接数値計算による現象の理解促進が望まれている。体積力型埋め込み境界法は、その簡便さと計算コストの低さから大変魅力的であるが、数値計算法として本質的な問題があることがわかった。本研究では、問題の原因を明らかにし、これを修正する手法の検討を行った。加えて、種々の流れ場の直接数値計算を行い、その振る舞いについて詳細に調べた。

研究成果の概要（英文）：Flows including dense solid particles show complex behavior and deep understanding of flow physics by direct numerical simulations is highly required. Body-force-type immersed boundary method is attractive from its simplicity and low computational cost while it has intrinsic problems as a numerical method. In the present study, we specified the source of problems and an alternative method was proposed. In addition, direct numerical simulations of flows including dense particles were performed to investigate its behavior in detail.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：固気・固液混相流，直接数値計算，粒子-流体相互作用，埋め込み境界法

## 1. 研究開始当初の背景

固体粒子を高濃度に含む流れは、工業装置内や自然界において広く見られる。流動層などの工業装置の設計の最適化には、容器内部での流動を詳細に把握する必要があるが、この種の流れは粒子-流体，粒子-粒子・壁面間の複雑な相互作用を伴い、その振る舞いは大変複雑である。さらに、高濃度に固体粒子が

存在することにより、実験的に内部流動の詳細を計測することは依然困難である。

この様な状況のもと、近年一切の平均化モデルを用いない直接数値計算法による現象の理解促進が、強く望まれるようになってきている。固体粒子を含む流れの直接計算を行うには、固体-流体間の界面を含む移動境界問題を高精度に、かつ簡便に取り扱うことができる数

値解法が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、当初スペクトル法をベースとし、これに埋め込み境界 (IB) 法を組み合わせることにより高濃度固気・固液二相流の高精度な直接計算を可能とする手法を新規に開発することを主な目的としていたが、検討を進める上で、固体粒子-流体間のカップリングに用いる予定であった体積力型埋め込み境界法 (Kajishima et al., *JSME Int. B*, Vol.44, pp.526-535, 2001) に数値計算手法として大きな問題があることが判明したので、体積力型 IB 法の問題点とその原因の探求と、これに対する改良手法の検討を主な研究目的とした。また、直接数値計算法を用いて、複数の異なる流れ場の計算を行い、高濃度固気・固液二相流の微視的な流れの振る舞いの詳細な検討を行った。

## 3. 研究成果

本研究において得られた成果は多岐に渡るため、ここでは代表的なもののみ箇条書きにて示す。

(1) 体積力型 IB 法の問題点の把握: IB 法は、移動境界問題を対象として開発された数値計算法であり、そのコンセプト自体の導入は決して新しくないが、近年の並列計算機の普及に伴い、その存在が再度注目されている。IB 法では、固体粒子内部も含んだ計算領域全体で計算格子を配し、固体内部に含まれる計算セルにおいて、流体の運動量保存式である Navier-Stokes 式に、固体内部セルの速度が本来の固体の速度になるように選択的に強制力を加えることにより、固体-流体系の統一的な取り扱いを可能とするものである。IB 法自体は様々なバリエーションがあるが、その中でも体積力型 IB 法は、固体の存在を各計算セルにおける固体体積率のみで表現することから、固体界面上において界面追跡のためのラグランジュ点を配置する必要が無いなど、大変シンプルで、また計算処理も速い為、これまで多くの問題に適用されてきた。しかし、本研究の検討を通して、この体積力型 IB 法には数値計算手法として、本質的な問題があることを確認した。具体的には、以下の問題点が考えられる。

- ① 離散レベルにおける連続の式の不満足: これは、Uhlmann (*J. Comp. Phys.*, Vol.209, pp.448-476, 2005) によっても指摘されているが、体積力型 IB 法は、離散レベルにおいて連続の式を満たさない。本研究においても、これを確認し、その原因を明らかにした。
- ② 計算結果の時間刻み幅依存性: 体積力型 IB 法では、各計算セルにおいて、粒子速度および流体速度を固体体積率に応じて重み付けしたカップリング速度になるように強制

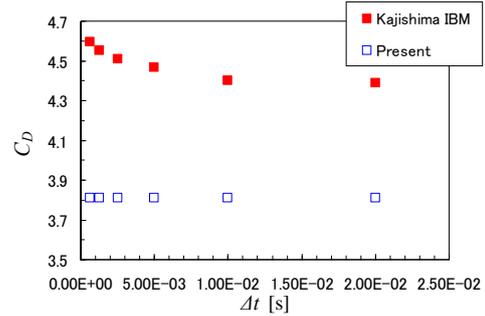
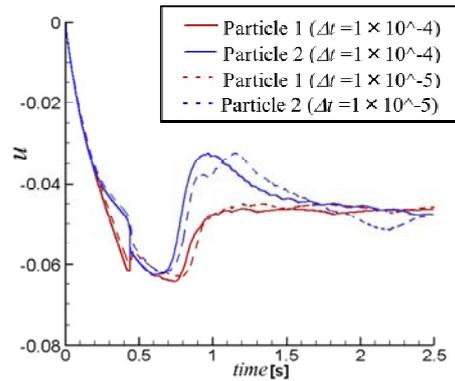
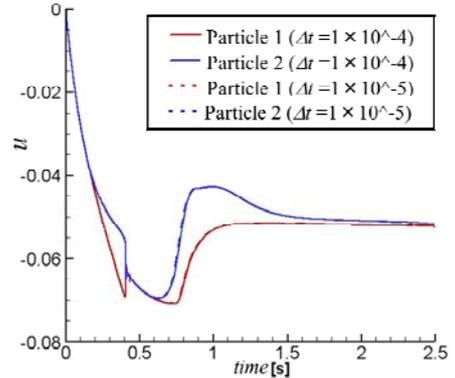


図 1 流体抵抗力の時間刻み依存性



(a) 体積力型 IB 法



(b) 修正体積力型 IB 法

図 2 DKT イベント時の二粒子の鉛

が行われるが、従来の体積力型 IB 法のアルゴリズムでは、実際には粒子速度と前の時間ステップにおいて求めたカップリング速度を、一度流体として解いた速度が固体体積率で重み付けされており、これが主な原因となって計算結果の時間刻み幅への依存性があることを明らかにした。これは、クーラン数を 1 近傍にできる場合には大きな問題とはならないが、本研究で対象としているように粒子濃度が高く粒子間の接触が頻繁に起こる場合や、二相間の熱物質輸送を扱う場合など、流れの時間スケールと比べて遥かに小さい

時間スケールを持つ現象を同時に扱おうとすると、この問題が顕在化する。また、同様の理由から、支配方程式自体はガリレオ不変性を満たすが、計算結果は現象を取り扱う座標系によって結果が異なる可能性があることも確認された。

(2) 修正体積力型埋め込み境界法の提案と検証: 先に示した体積力型 IB 法の問題点のうち、特に計算結果の時間刻み幅依存性に関して、これを修正する手法を新規に提案した。定常一様流中に固定された球に働く流体抵抗力の時間刻み幅への依存性の結果を、図 1 に示す。この時  $Re = 10$  である。従来の体積力型 IB 法では、時間刻み幅を小さくしていくと流体抵抗力が上昇していくが、修正法では時間刻み幅依存性がほとんどないことがわかる。前後に近接配置した二粒子を静止流体中において重力沈降させると、接近 (drafting), 接触 (kissing), 離脱 (tumbling) の特徴的な連続した過程 (DKT イベント) を示すことが知られている。図 2 は、この DKT イベントを計算した際の二粒子それぞれの鉛直方向の速度成分を示している。これについても、従来の体積力型 IB 法では、時間刻み幅を変更すると結果が変わっているが、修正手法ではほとんど変化しないことがわかり、その有効性が確認できた。

(3) 高濃度固体粒子を含む流れ場に固体壁面が与える影響の微視的計算: 高濃度に固体粒子を含む流れ場では、固体壁面の存在が流れ場に対して大きく影響を与えると考えられるが、特に粒子レベルの微視的なスケールにおいて、実際どのような影響があるのかは、ほとんど知られていなかった。また、実際のものづくりにおける設計検討では、平均方程式に基づくメソスコピックモデルにより現象の把握を行うことが多いが、例えば固体・流体両相の壁面上における適切な境界条件の設定など、微視的なスケールでの物理と大きく関係すると考えられるが、十分に理解されていないため実際に計算をするにあたり大きな問題となっていた。本研究では、壁面近傍の流れ場の微視的な数値計算を行うことにより、壁面が、粒子・流体両者に与える影響について詳細に調査を行った。

① シフト鏡像境界条件の提案: 平均方程式に基づかない直接計算では、その計算コストの高さが大きな問題となる。壁面近傍の流れ場のみに着目し検討を行う場合においても、計算コストの低減が重要な課題となる。壁面近傍を対象とした流体計算では、遠方境界条件や、鏡像境界条件を用いて、計算領域を極力小さく設定することにより、計算負荷の軽減を図ることが多い。本研究で対象としている流れ場では、固体粒子が高濃度に存在し、近接した粒子間で接触・衝突が頻繁に起こるため、特に鏡像境界条件を用いた場合、境界界

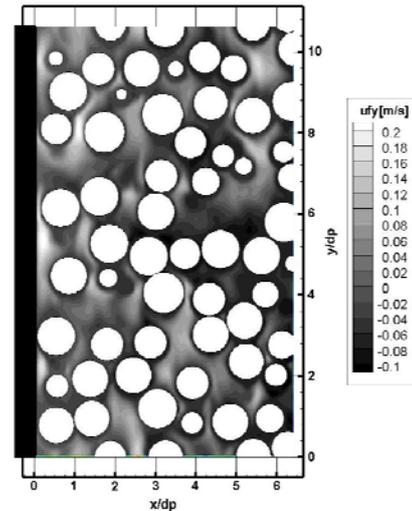


図 3 壁面近傍での流体速度分布

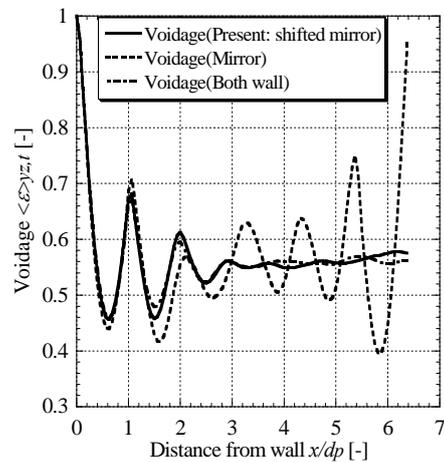


図 4 平均空隙率分布

面を通して粒子の実像-虚像間での接触が発生し、これが境界面付近での非物理的な大きな空隙となっていた。本研究では、この問題を克服することを目的として、新たに“移動鏡像境界条件”と名付けた境界条件を提案した。この方法では、鏡像を境界面と平行に移動させることにより、粒子の実像-虚像間の接触問題を回避できる。図 3 はこの境界条件を用いて、固体壁面近傍での粒子群の沈降運動を計算した例である。 $x = 6.25 d_p$ においてこの境界条件を用いており、粒子群はこの界面を通過することが可能である。図 4 は、平均の空隙率分布を示しており、比較のため従来の鏡像境界条件を用いた結果と、計算領域サイズを二倍にした上で両側に固体壁を設定した結果を併せて示している。先に述べた通り、従来の鏡像境界では、 $x = 6.25 d_p$ の境界界面近傍において、大きな空隙率分布となっていることがわかるが、これに対して移動鏡像境界条件を用いると概ね両側固体壁

とした結果と一致していることが確認でき、提案した境界条件の有効性が確認できる。

②流れ場の微視的検討: 固体壁面が存在することにより、近接する固体粒子群の配列に影響を与え、壁面近傍の空隙率分布が振動的な分布となり、壁面から離れるに従って、順次バルクの空隙率に漸近するようすがわかった。また、流体速度についても、これに対応するように振動的な分布になることがわかった。これらの知見は、現象の理解促進に貢献するばかりか、平均方程式を用いたモデル計算の評価、およびモデル改良に利用可能であり大変重要である。

(4) 噴流層の微視的計算: 準 2 次元の噴流層を対象として直接数値計算を行った。結果の一例を図 5 に示す。(a)は層中央、(b)は前面壁近傍における粒子群の構造と気流の速度ベクトルである。気流を層下部中央において強制流入させている。このような微視的計算においても、気泡流動化している様子が観察される。層中央では、気流は流入位置直上を大きく広がらずに吹き抜けていることがわかる。これに対して、前面壁近傍では、壁面の存在により粒子構造が制限され相対的に空隙率が高くなるため、粒子間隙の微視的なスケールにおいて、気流が微細な流れ構造を作り層全体に広がっている様子がわかる。つまり層内での流れは、極めて 3 次元性の高いものとなっていることがわかる。今後は、この種の微視的な計算で得た詳細なデータをメゾスケールモデルの改良に活用する予定である。

#### 4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

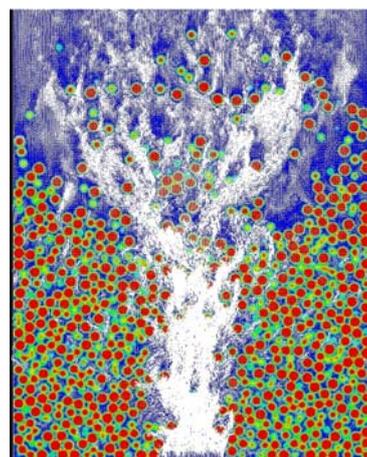
① Takuya Tsuji, Eiji Narita & Toshitsugu Tanaka, Effect of a wall on flow with dense particles, *Advanced Powder Technology*, Vol. 24, (2013), 565-574

② 藤原忍, 辻拓也, 田中敏嗣, 高濃度粒子が存在する流れ場に壁面が与える影響について (粒子が移動を伴う場合), *混相流*, 26 巻, (2013), 489-497

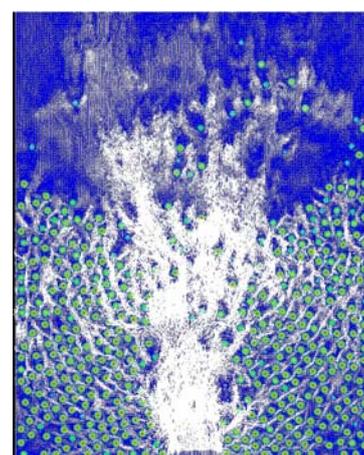
③ 辻拓也, 成田栄二, 田中敏嗣, 高濃度粒子を含む流れに壁面が与える影響について, *粉体工学会誌* 48 巻, (2011), 847-858

[学会発表] (計 7 件)

① Shinobu Fujihara, Takuya Tsuji & Toshitsugu Tanaka, Effect of wall on the flow with dense solid particles, 8th International Conference on Multiphase Flow, 2013. 5. 26, Jeju, Korea



(a) 層中央



(b) 前面壁近傍

図 5 噴流層における粒子と気流速度ベクトル

② Zaidi Ali Abbas, Takuya Tsuji & Toshitsugu Tanaka, Dynamic behavior of sedimenting particles at moderate Reynolds number, 8th International Conference on Multiphase Flow, 2013. 5. 26, Jeju, Korea

③ Zaidi Ali Abbas, Hiroataka Yada, Takuya Tsuji & Toshitsugu Tanaka, Microscopic DEM-CFD coupling simulation of spouted bed, 5th Asian Particle Technology Symposium, 2012. 7. 2, Singapore

④ Takuya Tsuji, Tomoya Wakamatsu & Toshitsugu Tanaka, Modifications for body-force type immersed boundary method, Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012. 3. 18, Seoul, Korea

⑤ Tomoya Wakamatsu, Takuya Tsuji & Toshitsugu Tanaka, Development of modified body-force type immersed

boundary method, 64th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, the American Physics Society, 2011.11.20, Baltimore, USA

⑥ Tomoya Wakamatsu, Hirotaka Yada, Takuya Tsuji & Toshitsugu Tanaka, Direct numerical simulation of flow including dense solid particles having microscopic arrangements, 63th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, the American Physics Society, 2010.11.21, Long Beach, USA

⑦ Takuya Tsuji, Hirotaka Yada, Kaoru Yoshikawa & Toshitsugu Tanaka, Comparison between DNS and DEM-CFD coupling mesoscopic simulation for 2-D spouted fluidized bed, 7th International Conference on Multiphase Flow, 2010.5.30, Tampa, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻 拓也 (TSUJI TAKUYA)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90379123