

## 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5月1日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560190

研究課題名（和文）熱輸送を伴う固体・流体二相乱流のDNSと確率的数値モデル構築

研究課題名（英文）DNS and Stochastic Modeling of Solid-Fluid Two Phase Flow and Heat Transfer

研究代表者

松原 幸治（MATSUBARA KOJI）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20283004

研究成果の概要（和文）：本研究では、固体・流体二相乱流の直接シミュレーション（DNS）を実施し、分散性二相乱流とその熱輸送の確率モデルに繋がる知見を収集した。DNSの数値解析手法として、固体と流体の体積平均速度を変数としたスペクトル法を開発した。また二相流・熱輸送の確率モデルとして、ランダムウォークによる拡散の模擬および二体衝突による混合の模擬をベースとした手法を考案した。

研究成果の概要（英文）： This study performed the direct numerical simulations of solid-fluid two phase flow, and developed the stochastic model of the dispersed turbulence and the related heat transfer. The direct numerical simulation was made by the Fourier spectral method to the volume-weighted solid and fluid mean velocity. The two-phase heat transfer modeling was developed based on the random walk model to the diffusion and the two-body collision model to the mixing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱輸送、乱流、二相流、DNS、確率的数値モデル

### 1. 研究開始当初の背景

固体粒子のガス化や燃焼の過程において、流れは固体粒子が分散した乱流状態となり、その流動と伝熱の予測が機器の設計において重要である。最近は、農業残渣や廃棄物系バイオマス等を積極的に活用する技術動向が有るが、関連する装置の設計において複雑な分散乱流の予測が不可欠である。

研究代表者は、これまで、壁乱流や噴流の直接シミュレーション（DNS）に実績があ

り、スペクトル法による一様乱流のDNSも行ってきた。これらの実績を踏まえて、複雑な分散性乱流の高精度DNSを実施し、その乱流伝熱モデルの構築に繋がる方法論を確立することを着想した。

### 2. 研究の目的

本研究では、次の三つを目的として掲げる。  
(1) 固体球を分散した直接シミュレーション（DNS）コードを開発する。格子や計算体

積による依存性を検証し、その信頼性を確認する。

(2) 固体球が分散した減衰二次元噴流のDNSを実施し、固体粒子が乱流現象に及ぼす影響を検討する。

(3) 分散性乱流および熱伝達の確率的数値モデルによる取り扱い方について検討する。

### 3. 研究の方法

流体解析の基礎方程式として、粒子速度  $u_p$  と流体速度  $u_f$  の体積平均速度

$$\mathbf{u} = \alpha \mathbf{u}_p + (1 - \alpha) \mathbf{u}_f \quad (1)$$

を変数としたナビエーストークス式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla \frac{p}{\rho_f} + \nu_f \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_p \quad (3)$$

を用いる。ただし、 $\alpha$ は粒子の体積分率、 $p$ は圧力、 $\rho_f$ は流体密度、 $\nu_f$ は流体動粘度、 $\mathbf{f}_p$ は粒子から流体に働く力である。粒子の基礎方程式として、次の二つの式を用いる。

$$\frac{\partial (m_p \mathbf{v}_p)}{\partial t} = \int_{V_p} \mathbf{f}_p dV + \mathbf{g}_p \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\mathbf{I}_p \cdot \boldsymbol{\omega}_p)}{\partial t} = \int_{V_p} \mathbf{r} \times \mathbf{f}_p dV + \mathbf{h}_p \quad (5)$$

$m_p$ は粒子質量、 $\mathbf{g}_p$ は重力加速度、 $\boldsymbol{\omega}_p$ は角速度である。ここで $\mathbf{f}_p$ は、梶島の研究を参考にして次式から計算した。

$$\mathbf{f}_p = \frac{\alpha (\mathbf{u}_p - \hat{\mathbf{u}}_f)}{\Delta t} \quad (6)$$

流れ場として、周期境界条件による立方体計算領域内部で減衰する二次元噴流を想定する。流体解析の手法としてフーリエスペクトル法を採用する。計算アルゴリズムとしてフラクショナルステップを用いて、粘性項に克蘭クニコルソン法を、非線形項にアダムスバッシュフオース法を用いる。

図1は計算領域を示す。計算領域は一辺  $2\pi$  の立方体である。計算格子数は主に  $144^3$  としたが、比較のため一部  $192^3$  とした。レイノルズ数を1500に設定した。噴流の初期速度分布は、噴流と周囲流の間の境界層を考慮し、その部分を3次元関数で近似した。乱流を発達させるためのかく乱として、境界層厚さを非一様に変化させた。異なる格子数の計算から計算格子の依存性が小さいことを確認した。

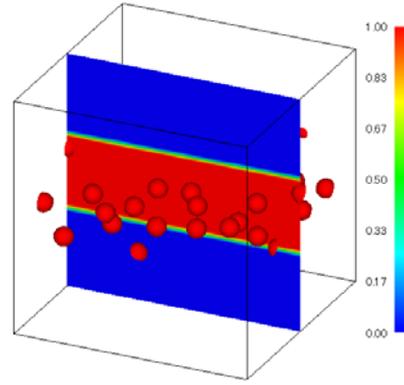


図1 計算領域

### 4. 研究成果

研究成果は次の通りである。

(1) 分散性噴流の解析を行う前に、一様減衰乱流のDNSを行った。この時、初期値として、予め定められた三次元スペクトルに従い、なおかつ、連続の式を満たす乱流場を生成する補助プログラムを開発して、初期値の生成に用いた。図2は、格子数を  $96^3$  に設定して行った一様減衰乱流のDNSの結果であり、既存の飯田らの結果と比較している。同図に見るように、本計算結果は飯田らの結果と良く一致しており、計算コードの妥当性が示された。

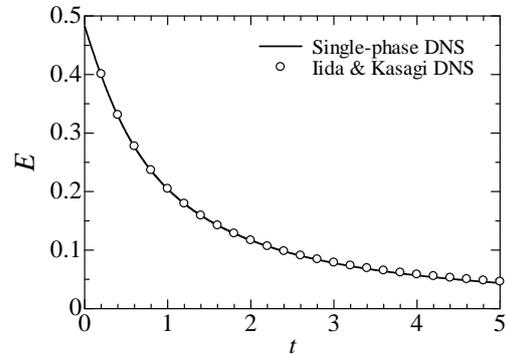


図2 一様減衰乱流の計算結果

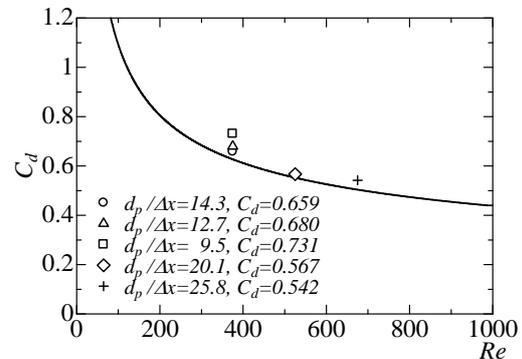


図3 球の効力係数の計算結果

(2) 分散性噴流の解析の準備として、様々な格子解像度において、球の後流の解析を行った。図3では、効力係数をレイノルズ数に対してプロットした。図中の実線は、既存の実験式である。同図に見るように、球内部に10点以上の格子数を入れた計算では、効力係数が既存の実験によく一致しており、信頼性の高い計算が可能であった。このため、以降の噴流の解析でも、同様の格子解像度の解析を行った。

(3) DNS による平均速度分布について次の知見が得られた。図4は、平均速度分布の時間変化を表わしており、様々な密度比の場合について比較している。同図に示すように、平均速度分布は時間の経過とともに平坦化するが、固体球を分散させることによって、より急速に変化する。

(4) DNS による乱流エネルギーは次の通りであった。図5は、乱流エネルギー分布の時間変化を示す。乱流エネルギーは、境界層での組織的渦の発達によって、二つの大きな隆起を示している。固体球を噴流に加えると、噴流中心部では乱れが小さくなるが、噴流の外側で乱れが増大する傾向が観察された。このことから、球による平均速度の平坦化は、乱れの促進によって乱流拡散が大きくなったことに基づくと考えられた。

(5) DNS による粒子軌跡に関する知見は次の通りであった。密度比（固体球密度／流体密度）を10にした場合の粒子の軌跡を図6に示した。同図のように、固体粒子は噴流内部で過疎になり、噴流外周部への輸送が活発であることが観察された。噴流中の渦の可視化によると、渦中の低圧領域によって固体球が中心部から外周部に拡散する傾向が観察できた。このことは、先に見た乱流拡散の増大と整合しており、初期状態において乱れは球を外部に押し出す効果をなし、その慣性によって、ある時間の間、噴流内部の球の存在率が低下する可能性が示唆された。

(6) 二相流熱伝達の確率的数理モデルに関して次のような検討を行った。仮想的な流体粒子のランダムウォークによって拡散を、二体衝突によって混合を模擬する乱流伝熱解析法を構築し、二相流の場合の修正方法について検討し、この検討においてDNSの結果が役立つことを示した。特に、急拡大流路内の反応性混相乱流の場合について、この確率的数値解析手法を適用し、同様の実験結果との比較から、モデル係数を調整することによって妥当な温度予測が可能であることを示した。

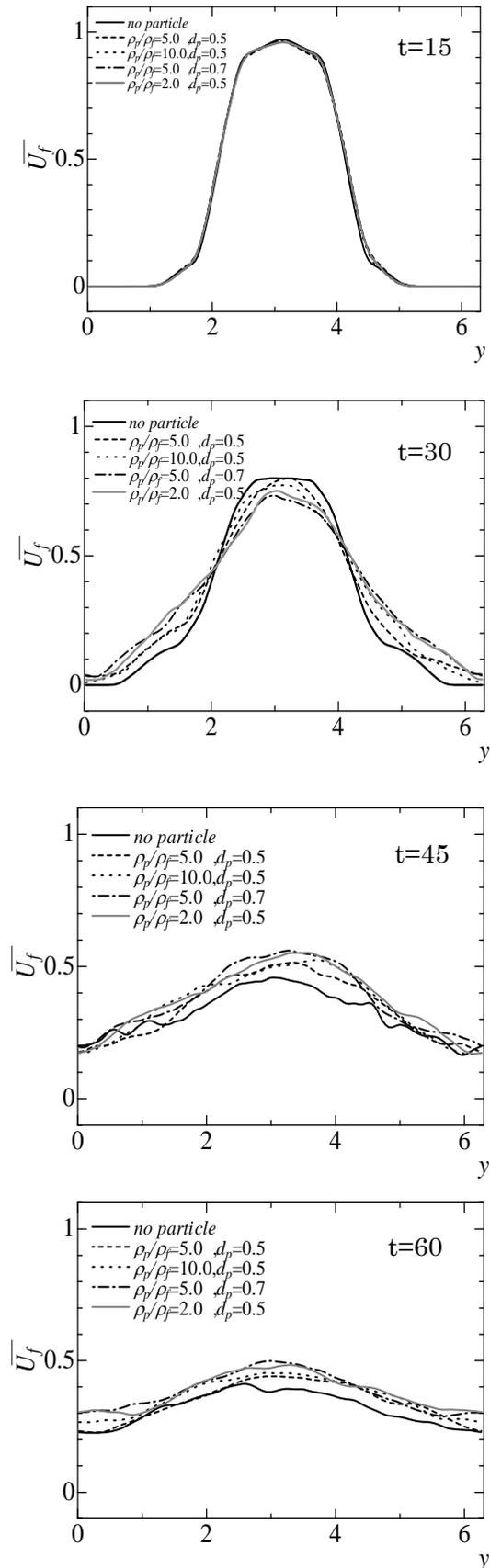


図4 平均速度分布の時間変化

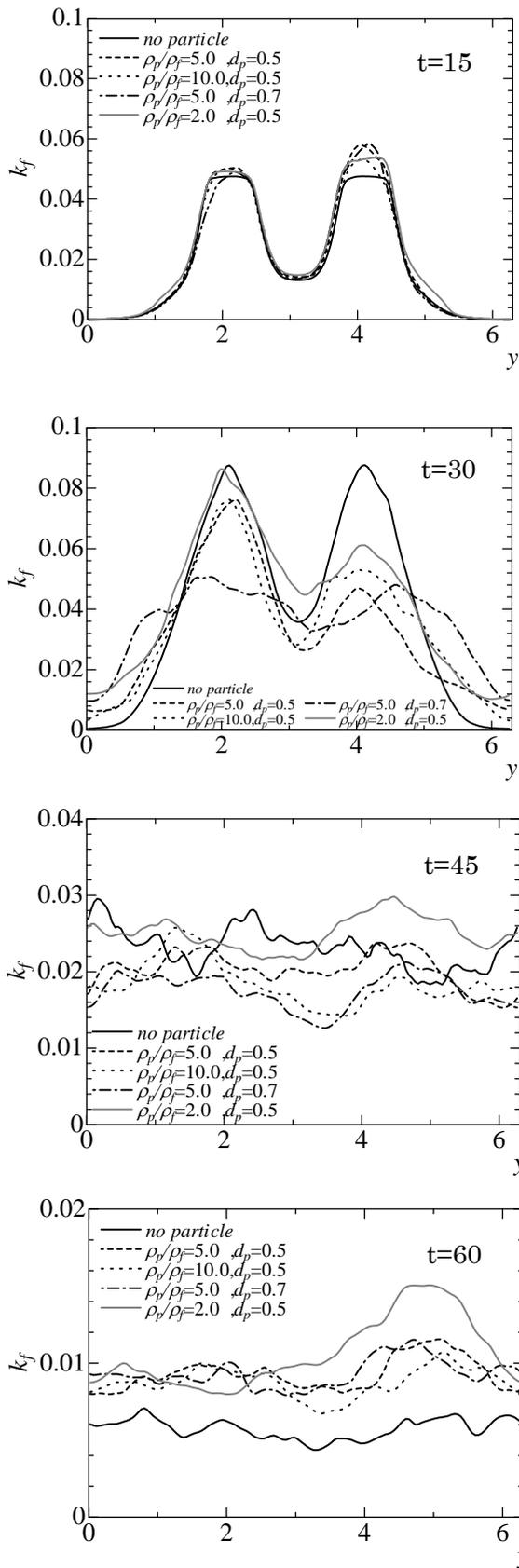


図5 乱流エネルギー分布の時間変化

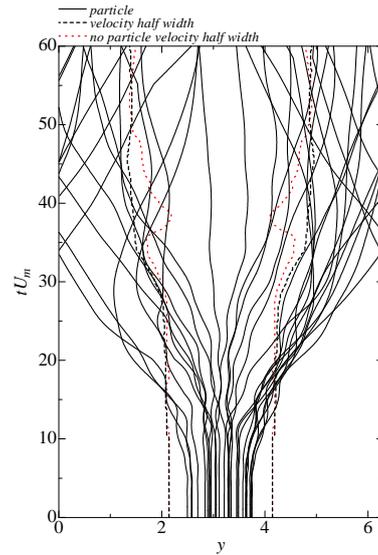


図6 粒子軌跡 (密度比10の場合)

(7) 以上を総括すると、本研究では、固体・流体二相乱流 DNS のための数値解析手法を構築し、固体球による乱れの促進と球の排除効果等の現象を見出し、さらに、二相乱流伝熱の確率的数値解析手法を開発できた。

### 5. 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 Koji Matsubara, Atsushi Sakurai, Takahiro Miura, and Takuya Kawabata, “Spanwise Heat Transport in Turbulent Channel Flow With Prandtl Numbers Ranging From 0.025 to 5.0”, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol.134, pp.0417011-0417018, (2012-04)

DOI: 10.1115/1.4005077

② Koji Matsubara, Takahiro Miura, Atsushi Sakurai, Kenya Yamazaki, and Makoto Takeda,

“Heat Transfer Characteristics and Reynolds Stress Budget of Spatially Advancing Turbulent Flow in Curved Channel”, Numerical Heat Transfer Part A, Vol.60, pp.234-253, (2011-04)

DOI: 10.1080/10407782.2011.588562

③ Koji Matsubara, Akihiko Matsui, Takahiro Miura, Atsushi Sakurai, Hitoshi Suto, and Koji Kawai,

“A Spatially Advancing Turbulent Flow and Heat Transfer in a Curved Channel”, Heat Transfer-Asian Research, Vol. 39, No.

1, pp. 14-26, (2010-01)

〔学会発表〕(計3件)

①信田啓介、大石友也、松原幸治、櫻井篤、竹田真、三浦貴広、曲がりチャンネル内乱流熱伝達におけるレイノルズ数の影響、第49回日本伝熱シンポジウム、2012年5月30日、富山

②太田智、松原幸治、櫻井篤、固体・流体二相噴流の研究、日本機械学会第49期講演会、野々市

③松原幸治、太田智、櫻井篤、球状固体粒子を含む一様乱流の直接シミュレーション、第47回日本伝熱シンポジウム、2010年5月28日、札幌

〔その他〕

ホームページ等

<http://mu-koba.eng.niigata-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松原 幸治 (MATSUBARA KOJI)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20283004

### (2) 研究分担者

鳴海 敬倫 (NARUMI TAKATSUNE)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20143753

(2010年度)