

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420097

研究課題名(和文) 壁乱流内粒子分散機構の解明と予測の高度化

研究課題名(英文) Analysis of particle dispersion in wall turbulence and its prediction with a high level of knowledge

研究代表者

三戸 陽一 (MITO, Yoichi)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20422032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：物質輸送プラントや相変化を伴う熱交換器等において生じる流体乱流内に粒子/液滴/気泡が分散した流れ形態における物質輸送や流体相と分散相間の干渉のメカニズムについて高精度数値シミュレーションを用いて検討を加えた。本研究は、流体を用いた物質輸送や粒子/液滴/気泡の添加による物質輸送の効率化に貢献する。

本研究課題において、添加される粒子の慣性の減少による流体駆動性能の向上と抵抗の減少、粒子の慣性の増加による流体乱流の減衰と摩擦抵抗の減少、すなわち、流体乱流内における粒子分散の分子拡散に対する類似性が示された。

研究成果の概要(英文)：The mechanisms of mass transfer and interaction between the fluid phase and the disperse phase in turbulent fluid flow where particles, droplets or bubbles are dispersed, as are seen in pipelines and heat exchangers that are accompanied by phase changes, were examined using numerical simulation with a high degree of accuracy. The outcome contributes to the development of an efficient mass transport system and of a new method with the addition of particles, droplets or bubbles, that is used in a transport system.

Fluid flow is driven efficiently, that is, drag is decreased, by decreasing particle inertia. Fluid turbulence is damped, where frictional drag is decreased, by increasing particle inertia. Similarity between dispersion of particles and molecular diffusivity in fluid turbulence is observed.

研究分野：工学

キーワード：乱流 混相流 分散流 粒子 液滴 マイクロバブル 乱流制御 直接数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

資源の開発・輸送、工業プラントにおける分離・反応・加工プロセス、原子力発電所において用いられる相変化を伴う熱交換器、航空機・自動車・船舶のボディー・エンジンの設計、大気・海洋・生体内における物質輸送の予測とそれらの制御機器の開発において、流体流れ内、特に、固体壁や二相界面上に形成される壁乱流内に分散した粒子・液滴・気泡、すなわち、分散相の輸送のメカニズムに対する理解と、これら分散相の輸送の計算を高精度で行えるモデルの構築が求められている。また、分散相によって流体乱流に生じる変化のメカニズムに対する理解、特に、分散相(添加剤)を用いた流体乱流制御手法に対する指針が求められている。

本研究課題は、平成 22~24 年度に同研究代表者によって行われた基盤研究(C)(一般)『二相分散流システムにおける物質輸送機構のモデル化(課題番号: 22560154)』に引き続き行われる。前課題において、本研究課題において用いる数値計算用プログラムの作成、課題に含まれる問題点の抽出、本研究課題のための一部参照データの構築を行った⁽¹⁾。

2. 研究の目的

本研究は、次の3つのテーマによって構成される。

(1) 平行平板間流路(チャンネル)内に形成される流体乱流中における固体粒子・液滴の分散メカニズムの解明とモデル化。本テーマでは、粒子慣性、重力、流体乱流構造、分子拡散、粒子・壁面間干渉、粒子間干渉が粒子分散に及ぼす影響、分散粒子の体積割合と濃度分布が流体乱流・流れの抵抗に及ぼす影響に対して検討を加える。粒子・液滴・ポリマー・界面活性剤等の添加による流体乱流の制御方法に対しても検討を加える。

(2) チャンネル内液体乱流中におけるマイクロバブルの分散のメカニズムと分散したマイクロバブルによる液体乱流抵抗の低減メカニズムの解明。本テーマでは、船舶や液体の輸送における抵抗低減手法としてのマイクロバブルの有用性・適用方法に対して検討を加える。

(3) 波面上流体乱流内におけるスカラー輸送のメカニズムの解明。スカラーには、温度、分子濃度を仮定する。波面、粗さ、流れの剥離が、流体乱流構造、熱・物質の輸送に及ぼす影響に対して検討を加える。

本研究課題においては、テーマ(1)のデータベースの補完と粒子間干渉の影響に対する検討の追加、各効果のモデル化について検討する。テーマ(2)においては、フルード数、体積割合をパラメータとして直接数値シミュレーションを実施し、データベースを構築、

マイクロバブル分散のメカニズムおよび流体乱流に対する重力と体積割合の影響に対して検討を行う。また、(1-2)において、分散相が流体乱流の大規模運動⁽²⁾と抵抗に及ぼす影響、添加剤を用いた壁乱流の制御手法に対して検討を加える。テーマ(3)においては、Hudson et al.⁽³⁾の実験において用いられた条件を用いて直接数値シミュレーションを実施し、粗さ(波面)による運動量・熱・濃度輸送の変化、平板チャンネル流と当該場の間のスケールリング⁽⁴⁾に対して検討を加える。(1-3)のテーマは、高精度数値シミュレーションを用いて行われる。全てのテーマにおいて、三次元可視化を用いて、流体乱流諸構造と分散相間の物理、具体的制御の効果に対して検討を加える。

3. 研究の方法

本研究課題の初年度の初期において、テーマ(1-2)の拡大の重要性が予想される結果を得たため、テーマ(3)の開始を1年遅らせて、下記のようにテーマ(1-2)の検討内容の拡大を図った。2年次において、拡大されたテーマ(1-2)の重要性とその遂行が急務であることが明らかとなったため、本研究課題期間におけるテーマ(3)の実施を中止とした。また、テーマ(1)における粒子間干渉の影響に対する検討についても中止とした。以下、テーマ(1-2)の方法について記す。

(1) 粒子分散流の研究(テーマ1)においては、鉛直に設置された平行平板間流路内を下降する発達気体乱流中に微小粒子が領域内均一に添加された非静止流れモデルを用いて、気体乱流に対する分散粒子による広範囲のフィードバックの影響、特に、粒子慣性・フルード数の影響について検討を加える⁽⁵⁾。気体乱流の計算には直接数値シミュレーション、粒子が気体乱流に及ぼす影響の計算にはポイントフォース法を用いる。粒子間干渉の影響は無視する。すなわち、流体乱流、慣性、重力によって変化する粒子の運動を表すポイントフォース列が流体乱流に及ぼす影響に対して検討を加える。

気体流れは圧力勾配一定で駆動される。粒子添加前の気体乱流は完全発達状態、このときの摩擦速度 v_0^* と流路半幅 H によって定義される摩擦レイノルズ数は 150 である。粒子添加時における気体バルク速度と流路半幅 H によって定義されるバルクレイノルズ数は 2260 である。粒子には、無次元直径 $d_p^+ = 0.95, 1.3, 1.9$ の球を仮定する。粒子と気体の密度比は $\rho_p / \rho_f = 1000$ である。このときの無次元ストークス時間定数は $\tau_p^+ = d_p^{+2}(\rho_p / \rho_f) / 18 = 50, 100, 200$ である。ここで、上付きの+は摩擦速度 v_0^* と気体の動粘性係数による無次元化を表す。フルード数には $Fr = v_0^{*2} / 2gH = 0.05, 0.25, 0.5, \infty$ を仮定する。このとき、無次元重力加速度は $g^+ = 6.7 \times 10^{-2}, 1.3 \times 10^{-2}, 6.7 \times 10^{-3}, 0$ である。無次元終端速度は、 $Fr = \infty$ に

において $V_T^+ = 0$, $Fr = 0.5$ において, $\tau_p^+ = 50$ の場合 $V_T^+ = 0.3$, $\tau_p^+ = 100$ の場合 $V_T^+ = 0.6$, $\tau_p^+ = 200$ の場合 $V_T^+ = 1.1$, $Fr = 0.25$ において, $\tau_p^+ = 50$ の場合 $V_T^+ = 0.6$, $\tau_p^+ = 100$ の場合 $V_T^+ = 1.1$, $\tau_p^+ = 200$ の場合 $V_T^+ = 2.0$, $Fr = 0.05$ において, $\tau_p^+ = 50$ の場合 $V_T^+ = 2.6$, $\tau_p^+ = 100$ の場合 $V_T^+ = 4.4$, $\tau_p^+ = 200$ の場合 $V_T^+ = 7.1$ である. 添加粒子の体積割合には, $\alpha = 1 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3}, 2 \times 10^{-3}$ と, フィードバックの影響を考慮しない場合 (1-way coupling) を考慮する. 粒子・壁面間衝突には完全弾性を仮定する. 粒子の軌道の計算には, 流体抵抗と重力を考慮する. 粒子の初期速度には, 中心位置における気体の瞬時速度を与える.

(2) マイクロバブル分散流の研究 (テーマ 2) においては, 無限大の平板間鉛直チャネル内を上昇する発達液体乱流中に微小気泡を領域内一様に添加した場合に生じる非静止流れモデル⁽⁶⁾を用いて, 微小慣性分散相の壁乱流に及ぼす影響並びに二相乱流に対する分散相サイズ (気泡径) の影響に対して検討を加える. 流体相の計算手法およびレイノルズ数はテーマ (1) と同じである. 気泡は直径 $d_b^+ = 1.3, 1.9, 2.7$ の球形, 気体と液体の密度比は $\rho_b / \rho_f = 1 \times 10^{-3}$ とする. このとき, 気泡の無次元有効時間定数は $\tau_b^+ = d_b^{+2}(\rho_b / \rho_f + 1/2) / 18 = 0.05, 0.1, 0.2$ である. フルード数には $Fr = 2.5 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, \infty$ を仮定する. このとき, 無次元重力加速度は $g^+ = 13.3, 6.7, 0$, 無次元終端速度は, $Fr = \infty$ において $V_T^+ = 0$, $Fr = 5 \times 10^{-4}$ において, $d_b^+ = 1.3$ のとき $V_T^+ = 0.6$, $d_b^+ = 1.9$ のとき $V_T^+ = 1.1$, $d_b^+ = 2.7$ のとき $V_T^+ = 1.8$, $Fr = 2.5 \times 10^{-4}$ において, $d_b^+ = 1.3$ のとき $V_T^+ = 1.1$, $d_b^+ = 1.9$ のとき $V_T^+ = 2.0$, $d_b^+ = 2.7$ のとき $V_T^+ = 3.2$ である. 体積割合には, $\alpha = 1 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3}, 2 \times 10^{-3}$ と, フィードバックの影響を考慮しない場合 (1-way coupling) を考慮する. 気泡の軌道の計算には, 流体抵抗, 付加質量力, リフト, 重力, 浮力を考慮, Basset 履歴力, 周囲流体の圧力勾配の影響は無視する.

4. 研究成果

(1) 固気粒子分散流の研究 (テーマ 1) に関して, Fig. 1 に添加粒子の体積割合 $\alpha = 1 \times 10^{-3}$ におけるバルク気体速度 U_{1B}^+ の時間 (t^+) 変化を示す. 粒子慣性 (τ_p^+) の減少に伴う流れの加速の増加が示される. Fig. 2 に同条件における流れ方向フィードバック力の流路内平均の時間変化を示す. 粒子慣性の減少に伴うフィードバック力 (= 流体駆動力) の増加が示される. Fig. 3 にフルード数 $Fr = 0.25$, 時間 $t^+ = 1250$ における壁垂直方向粒子速度の rms 値の分布を示す. 体積割合の増加, 粒子慣性の増加に伴う粒子乱流の減少が示される. 体積割合の変化に伴う粒子乱流の変化は, Fig. 4 に示される流体乱流の変化による. Fig. 4 において, 体積割合の増加, 粒子慣性の増加に伴う気体乱流の減少が示される. 慣性の

増加によるフィードバック力の分散の増加により, 流体乱流における分子拡散増加と類似のメカニズムが生じていることが考えられる.

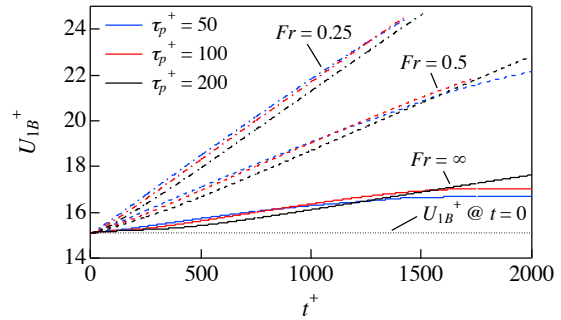


Fig. 1 Fluid bulk velocity, varying with time, at $\alpha = 1 \times 10^{-3}$

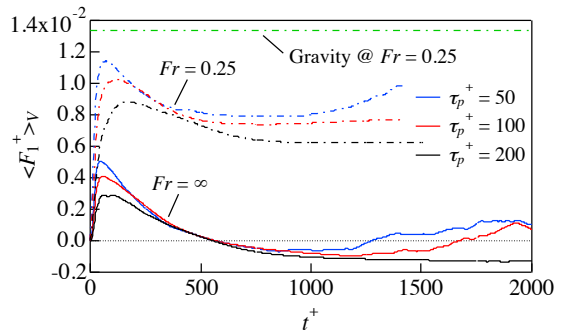


Fig. 2 Streamwise feedback force, varying with time, at $\alpha = 1 \times 10^{-3}$

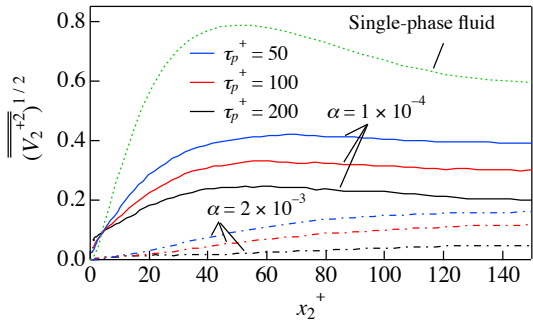


Fig. 3 Root-mean-square values of wall-normal particle velocities at $t^+ = 1250$ for $Fr = 0.25$

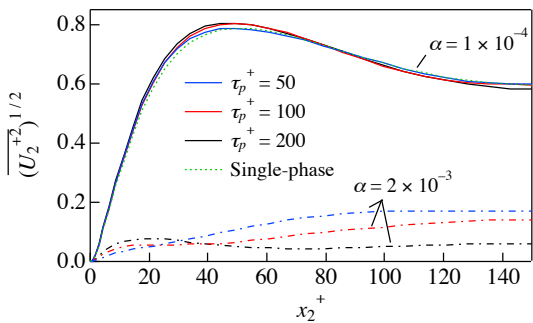


Fig. 4 Root-mean-square values of wall-normal fluid velocities at $t^+ = 1250$ for $Fr = 0.25$

(2) マイクロバブル分散流の研究 (テーマ 2) に関して, $Fr = 5 \times 10^{-4}$ における流れ方向液体バルク速度の時間変化を Fig. 5 に示す. 全領域内の液体相の運動量バランス⁽⁷⁾より, 気泡に掛けられる重力・浮力に起因する力は一定のため, 液体流量の変化は Fig. 6 に示される壁面摩擦の変化を反映する. 気泡の添加の影響は, フィードバック効果 (体積力) の増加による流量の増加, および, 小慣性による壁垂直方向リフトの卓越化による気泡の壁面上集積傾向に伴う摩擦レイノルズ数の増加として現れる. Fig. 7 に示すように, 気泡の慣性が十分に小さいため, 粒子を添加した場合に見られる流体乱流の減衰は見られない.

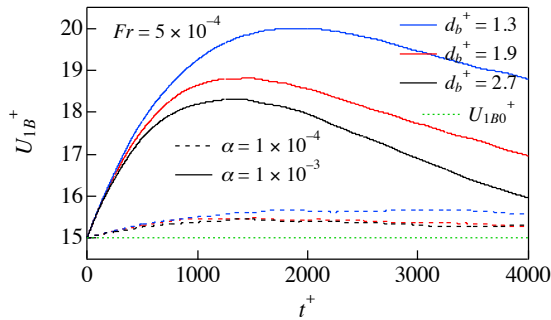


Fig. 5 Liquid bulk velocity at $Fr = 5 \times 10^{-4}$

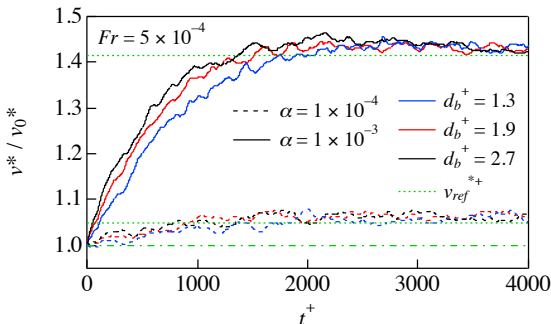


Fig. 6 Frictional velocity at $Fr = 5 \times 10^{-4}$

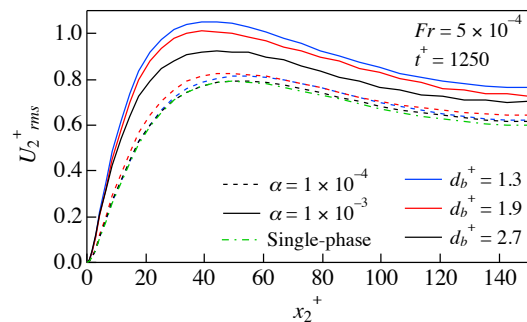


Fig. 7 Root-mean-square values of wall-normal liquid velocities

(3) 上記の粒子分散流およびマイクロバブル分散流における分散相によって流体相に掛けられる重力/浮力の大きさを統一することにより, Figs. 8-9 に示されるように, 添加物の慣性の増加に伴う粒子/気泡の分散の

増加とこれに伴う流体乱流の減衰, 添加物の慣性の減少に伴う添加物によって付加される体積力による流体駆動性能の向上が示された⁽⁸⁾.

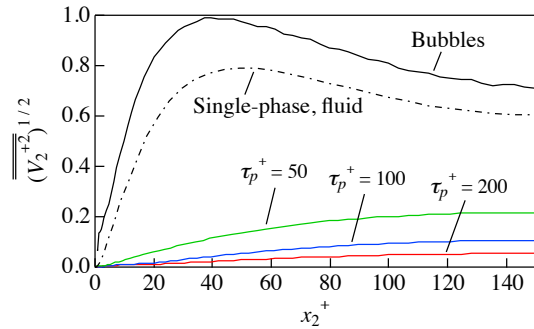


Fig. 8 Root-mean-square values of wall-normal particle/bubble velocities at $t^+ = 1250$ for $\alpha = 1 \times 10^{-3}$

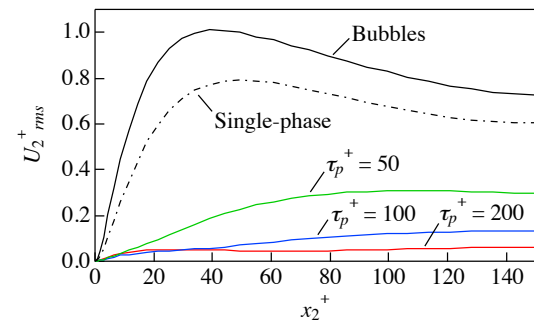


Fig. 9 Root-mean-square values of wall-normal fluid velocities at $t^+ = 1250$ for $\alpha = 1 \times 10^{-3}$

<引用文献>

- ① Mito Y., 2012. Effect of particle-wall interaction in disperse flows. J. Chemical Engineering of Japan, 45, 793-799.
- ② Mito, Y., 2013. Influence of inter-phase forces in turbulent gas-particle channel flow. Proc. 9th World Congress of Chemical Engineering, Aug. 18-23, Seoul, Korea.
- ③ Hudson, J.D., Dykhno, L., Hanratty, T.J., 1996. Turbulence production in flow over a wavy wall. Exp. Fluids, 20, 257-265.
- ④ Nakagawa, S., Na, Y., Hanratty, T.J., 2003. Influence of a wavy boundary on turbulence. I. Highly rough surface. Exp. Fluids 35, 422-436.
- ⑤ 三戸, 2015. 粒子添加による垂直チャンネル内乱流の加速. 日本流体力学会年会, Sep. 26-28, 目黒.
- ⑥ 三戸・池田, 2014. マイクロバブル様添加による上昇チャンネル乱流非定常挙動の変化. 化学工学会第79年会, Mar. 18-20, 岐阜.
- ⑦ 三戸・池田, 2014. 上昇チャンネル乱流におけるマイクロバブル添加の影響. 混相流シンポジウム, Jul. 28-30, 札幌.
- ⑧ Mito, Y., 2015. Similarity between particles and bubbles as micro-additives in turbulent channel flow. The 68th Annual Meeting of the

American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, Nov. 22–24, Boston, USA.

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)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Mito, Y. Effect of particle inertia on fluid turbulence in gas-solid disperse flow. The 69th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2016年11月20日～2016年11月22日, Portland (USA)
- ② Mito, Y. Feedback effect in gas-solid disperse flow through a vertical channel. The 9th International Conference on Multiphase Flow, 2016年5月22日～2016年5月27日, Firenze (Italy)
- ③ Mito, Y. Similarity between particles and bubbles as micro-additives in turbulent channel flow. The 68th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2015年11月22日～2015年11月24日, Boston (USA)
- ④ Mito, Y. Damping of turbulence in downward channel flow by the addition of particles. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, 2015年7月26日～2015年7月31日, Seoul (Korea)
- ⑤ Mito, Y., IKEDA, S. The momentum balance in upward turbulent channel flow laden with microbubbles. The 67th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2014年11月23日～2014年11月25日, San Francisco (USA)

[その他]

ホームページ等

<http://hanadasearch.office.kitami-it.ac.jp/searchja/show/id/1177>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三戸 陽一 (MITO, Yoichi)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20422032