

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24年 6月 18日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360077

研究課題名（和文） 複素粘度解析によるマイクロバブル流体の不可説明要因の一掃

研究課題名（英文） Sweeping the unexplained factors in microbubble fluids
by complex viscosity analysis

研究代表者

村井 祐一（MURAI YUICHI）

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号： 80273001

研究成果の概要（和文）：

マイクロバブル混合液体の層流域から乱流域までのレオロジー特性を実験的に研究したものである。層流域では、非定常なせん断応力場において気泡形状と応力の関係に非平衡性が表れる場合、平衡を仮定した実効粘度よりも10倍以上大きな運動量伝達特性をもつことがわかった。遷移域では周波数の変調による乱流への初期遷移が抑制されることがわかった。また乱流域では乱流渦干渉による乱流エネルギー低下、気泡クラスタリングによる新しい境界層構造の出現や伝熱促進が観測された。

研究成果の概要（英文）：

Rheological characteristics of microbubble mixture are investigated experimentally from laminar to turbulent states to obtain following findings: Non-equilibrium deformation of bubbles in oscillatory shear provides effective viscosity higher than 10 times as that of equilibrium deformation. In transition mode to turbulence, flow modulation is suppressed with microbubble, proving the fundamental function of transition delay. Reduction in turbulent intensity, promotion of heat transfer, and emergence of new type boundary layer structure with clustering of bubbles are also found in turbulent states.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

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： 気泡力学, 混相流, 気液二相流, マイクロバブル, 画像処理, レオロジー

1. 研究開始当初の背景

マイクロバブル流体の研究史は機械・エネルギー分野と化学・バイオ分野に大別される。本課題は前者を扱う。その背景は1970年代

の潜水艦に対する流体摩擦低減効果の発表に端を発する。マイクロバブルが乱流構造を変化させ、その効果が従来理論で説明できないほど大きいという結果である。80年代以降、

米国・欧州で確認実験が実施され、85年には米国で最大 80%の抵抗低減を実現するデータが示された。我が国では 95 年頃から船舶応用を想定した研究が立ち上げられ、以降、日米欧の間で抵抗低減の実用化を狙った種々の基礎実験が遂行された。その間、ドイツやオランダの研究者が DNS でレイノルズ応力低下の理由を突き止めた。本研究組織でも気泡運動論から抵抗低減シナリオに新解釈を与えた。しかし順当な展開の裏に重大な不可説明要因が残された。未公表のままとなっている研究現場の実験結果に、解釈困難な現象のリストが作成された。これらは現時点では混相流特有のバラツキの問題だとして放置されている。マイクロバブル研究の過熱度が峠を越えたという印象が広まりつつある現状こそ危惧すべきステージにある。本研究は科学的説明責任のもと、各々の国際的トップ水準の実験技術で、山積した問題を解き明かす。

2. 研究の目的

本課題でいう「マイクロバブル流体」とは、数百 μm 以下の直径の微小気泡が無数に分散する液体である。ただし現象論上では実次元での定義に固執すべき根拠はなく、要するに着目する空間スケールに対してサイズが相対的に微小と言えるサイズの気泡群を含む流体である。過去 10 年間に発見され、未解決となっている重大な疑問のリストは以下である。これらを本課題の研究期間内で解きほぐす。

- ① 過渡的せん断下で粘度が Einstein-Stokes 理論から外れて著しく増加する理由
- ② ボイド率による密度逆転層を成すときの逆カスケードのトリガーが不明
- ③ マイクロバブル流体専用のポンプが存在しない
- ④ マイクロバブルの界面物性と界面動力学によるチクソトロピ的応力挙動が不明
- ⑤ マイクロバブル流体の断熱的平均物性による対流発現の臨界レイリー数が不明
- ⑥ 高レイノルズ数境界層でマイクロバブルが底層に進入せず隔離ピークをもつ理由が不明
- ⑦ マイクロバブル流体に対する撥水性/親水性表面処理のマクロ的境界条件が不明
- ⑧ 高ボイド率マイクロバブル流体の液膜立体ネットワーク構造によるレオロジー物性が不明

本課題ではマイクロバブルの衝撃圧発光現象、界面活性剤影響、ナノバブル化などの化学系の話は対象としない。

3. 研究の方法

最も努力する点はマイクロバブル流体を”

知る”ための計測技術開発である。計測技術は光計測と超音波計測に二分される。光計測は村井、石川、北川が担当する。超音波計測は武田、村井、田坂が開発する。さらにこれらと並列に理論解析を進める。また混合体の乱流遷移については英国ウォーリック大学流体力学センターとの連携を、粘弾性レオロジーについてはスイス連邦工科大学と連携をはかり、成果獲得の保障を図る。

4. 研究成果

以下に、研究年度別に得られた成果を示す。なお、研究目的欄に記載した①から⑧までの未解決問題への対応についても明記する。

(1) 2009 年度 ～ 問題設定の確認

村井（代表者）は、①に対して、落球レオメトリによるデータから気泡流の複素粘度をモデリングした。これはキャピラリー数とその時間変化率をパラメータとするモデルであり、実験と同じスピン流れと管内振動流での周波数応答をシミュレートする数値解析法を開発し、周波数選択現象の部分的な再現に成功した。

武田は、①と⑧に対し、超音波ドップラー流速計 (UVP) をレオメータとして利用する新しい原理を設計・製作し、スピン流れに対してその性能試験を行った。この結果、粘弾性流体の非線形せん断領域を含めてシングルランの試験で 4 つのレオロジー物性を同時計測することに成功した。

田坂は、①と⑥に対応し、テイラーキュート流れ場に電気分解発生したマイクロバブルを注入し、流れの時空間構造を UVP 計測した。これにより僅かな体積率でも波動テイラー渦の周方向波動速度が大幅に低下すること、ならびに変調波動モードが消失し、初期乱流遷移を抑制する効果を確認した。

北川は、⑤～⑦に対応し、水の電気分解により発生したマイクロバブルを鉛直加熱平板に沿う自然対流場に注入し、画像処理による気泡径計測と熱電対による多点同時温度計測を行った。その結果、マイクロバブルの注入により、熱伝達率および熱伝達ゲインが大幅に増加することを明らかにした。

石川は、②と③に対して、気泡を含む上昇噴流を対象とした粒子画像流速測定法 (PIV) の利用により、気泡周囲の液相流速分布を計測した。その得られた時系列の変動速度を用いて、固有直交分解法 (POD) により、時間的・空間的な流動構造に分解し、周波数およびモードを選択することで、大規模な渦構造を確認した。

以上の結果、マイクロバブル混合液体のせん断場における特徴的な性質が実在することが確認され、本課題の次の焦点の設定に向けた準備ができた。

(2)2010年度 ～ 比定常性と再現性

村井(代表者)は、①の解明のため、周期的せん断応力場でキャピラリ数が1を跨ぐ振動応力を与えたときの運動量拡散係数から実効粘度を計測し、従来の平衡変形理論および実験に比べてボイド率に対する粘度変動感度が10倍以上であることを明らかにした。またマイクロバブルを含む液体を低レイノルズ数向けのギアポンプに適用した結果、遷移域付近における乱流強度の低下が確認され、流体機械内におけるマイクロバブル複素粘度の機能的応用例を初めて提示することができた。

田坂は、②と⑥の解明のため、回転二重円筒内の波動テイラー渦領域におけるマイクロバブルの時空間的な数密度の疎密波の形成とそれに伴う変調波動テイラー渦への遷移の抑制を明らかにした。また②と⑤に対して、疑似二次元水槽内でのマイクロバブルプルームの成長過程の可視化計測を行い、マイクロバブル対流がもつ自己組織化機能の実験的確認に成功した。

北川は、⑤～⑦に対して、水の電気分解により発生したマイクロバブルを鉛直加熱平板に沿う自然対流場に注入し、熱電対を用いた多点同時温度計測と画像処理を用いた気泡径および気泡層厚さ計測を行った。その結果、気泡注入時の熱伝達率の増減と気泡層厚さの変動との関連性を示した。

石川は、②、③、⑧に関係し、気泡を含む上昇噴流において、粒子画像流速測定法(PIV)を用いて、気泡周囲の液相流速分布を計測した。その周囲流体の時系列の流速分布を固有直交分解(POD)法により、モードごとの時間的・空間的な流動構造に分解し、大小の渦を含む流動構造の時空間特性を調査した。

以上の結果、マイクロバブルが混入した液体の渦運動への影響、組成対流の構造、ならびに熱対流とそれらの複合的なメカニズムが究明された。

(3)2011年度 ～ 流体力学的普遍性の抽出

村井(代表者)と田坂は、①～④に対応し、マイクロバブル混合流体のせん断応答について、層流域のレオロジー問題から乱流域の非定常応答特性まで幅広く実験的研究を行った。特に気泡変形の周囲応力場に対する非平衡変形特性がもたらす周波数応答特性すなわち複素粘度特性について調べた。計測対象は、円筒内の非定常スピン流、振動平板によるレーリー流れ、水平乱流チャンネル流、二重円筒間クエット流、および円柱カルマン渦列流、ギアポンプ内部流である。これら一連の条件で共通して得られた知見は、液体中にマイクロバブルを混入すると、乱流カスケ

ードの初期段階の変調モード成長を抑制する効果があることである。つまり、流線上のラグランジュ観測系でせん断歪みに非定常性をもつとき、マイクロバブルがその成長を妨げる。また、マイクロバブルの局所的濃度集積は負の拡散係数をもつ分散性二相流の特徴をつくりだし、プルームの自己組織化を伴う逆カスケード成長などが観測された。

北川は、⑤～⑦に対応し、マイクロバブルインジェクションによる鉛直加熱平板上の自然対流熱伝達の促進メカニズムを解明することを目的とし、熱電対を用いた温度計測と、画像処理による気泡径・気泡速度・気泡層厚さ計測を行った。その結果、気泡注入時の熱伝達率が、気泡径および気泡流量に強く依存し、また、その変化が、高速度で上昇する気泡群による強制対流効果と気泡層厚さの変動に伴う混合効果に密接に関係することを明らかにした。

石川は、②と⑥について、気泡を含む上昇噴流の流動様式の分類を示すとともに、あるボイド率条件において、粒子画像流速測定法(PIV)を用いて、気泡周囲の液相流速分布の同時計測した。さらにその応用として、気泡を含む上昇噴流の周囲流体の時系列の流速分布を固有直交分解(POD)法により、モードごとの時間的・空間的な流動構造に分解し、大小の渦を含む流動構造の空間特性および時間的特徴を調査した。

以上を要するに、マイクロバブル流体が共通して含む普遍的な流体力学的特性が明らかとなり、それを工学における機能として今後活用する、もしくは既に活用されているシステムの内部メカニズムを明快にすることができた。

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13件)

- (1) 熊谷一郎, 大藪剛志, 榎田崇文, 村井祐一, 田坂裕司, 高橋義明, 船舶のCO₂排出削減へ向けた翼型気泡発生装置の最適化, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 78, 2012, pp.500-503
- (2) I. Kumagai, Y. Murai, Y. Tasaka, N. Nakamura, Bubble generation by a cylinder moving beneath a free surface, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, 6, 2012, pp. 2152-2159
- (3) 宮城島圭人, 渡村友昭, 田坂裕司, 熊谷一郎, 村井祐一, マイクロバブルプルーム群の浮上成長に関する定量的可視化実験, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 77, 2012, pp.88-97

- (4) 石川正明, 気泡噴流の可視化画像計測と POD によるその後処理, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 78, 2012, pp.263-275
- (5) A. Kitagawa, H. Endo, Y. Hagiwara, Effects of sub-millimeter-bubble injection on transition to turbulence in natural convection boundary layer along a vertical plate in water, Experiments in Fluids, 査読有, 51, 2011, pp.701-710
- (6) S.Fujimoto, Y.Murai, Y.Tasaka, Y.Takeda, Visualization of transient interfacial waves induced by spin-up of two immiscible fluid layers, Journal of Visualization, 査読有, 10, 2010, pp.1-8
- (7) A. Kitagawa, K. Kimura, Y. Hagiwara, Experimental investigation of water laminar mixed-convection flow with sub-millimeter bubbles in a vertical channel, Experiments in Fluids, 査読有, 48, 2010, pp.509-519
- (8) Y.Murai, Y.Tasaka, Y.Nambu, Y.Takeda, S.R.Gonzalez, Ultrasonic detection of moving interfaces in gas-liquid two-phase flow, Flow Measurement and Instrumentation, 査読有, 21, 2010, pp. 356-366
- (9) 渡村友昭, 田坂裕司, 村井祐一, 武田 靖, マイクロバブルによるテイラー・クエット流れの遷移抑制, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 76, 2010, pp. 2160-2167
- (10) A. Kitagawa, K. Kitada, Y. Hagiwara, Experimental study on turbulent natural convection heat transfer in water with sub millimeter bubble injection, Experiments in Fluids, 査読有, 49, 2010, pp.613-622
- (11) Y.Murai, S.Ohta, A.Shigetomi, Y.Tasaka, Y.Takeda, Development of ultrasonic void fraction profiler, Measurement Science and Technology, 査読有, 20, 2009, pp.1-13
- (12) 北川石英, 北田賢司, 萩原良道, 微細気泡を含む乱流自然対流の流動および熱伝達特性, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 75, 2009, pp. 1830-1837
- (13) A. Kitagawa, K. Uchida, Y. Hagiwara, Effects of bubble size on heat transfer enhancement by sub-millimeter bubbles for laminar natural convection along a vertical plate, International Journal of Heat and Fluid Flow, 査読有, 30, 2009, pp. 778-788
- [学会発表] (計 41 件)
- (1) T.Watamura, Y.Tasaka, and Y.Murai, Microbubble streams in Taylor vortices and suppression of the wave modulation, 17th Int. Couette-Taylor Workshop, 2011.7.25, リーズ大学, リーズ, 英国
- (2) Y.Toghe, Y.Tasaka, I.Kumagai, Y.Murai, Shallow DOF-imaging of turbulent boundary layer accompanied with bubble cluster, 7th Int. Symp. Measurement Tech. For Multiphase Flow, 2011.9.12, 天津大学, 天津, 中国
- (3) 村井祐一, マイクロバブルが乱流渦の成長を選択的に鎮圧する現象について, 日本混相流学会年会講演会 2011, 2011.8.3, 京都工芸繊維大学, 京都
- (4) A. Kitagawa, H. Endo, Y. Hagiwara, Experimental investigation of turbulence transition of natural convection boundary layer along a vertical plate in water with sub-millimeter-bubble injection, Proc. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 2011.7.25, 浜松アクロシティコンgresセンター, 浜松
- (5) 上地飛夢, 石川正明, マイクロバブルを含む円筒容器内回転流れの可視化, 日本機械学会九州支部第 65 期総会講演会, 2012.3.16, 佐賀大学, 佐賀
- (6) Y.Murai, Y.Tasaka, K.Sakurai, K.Oyama, and Y.Takeda, Ultrasound Doppler rheometry from spin response of viscoelastic and bubbly Liquids, 7th Int Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 2010.4.6, スウェーデン SIK 研究所, スウェーデン
- (7) Y. Tasaka, T. Watamura, Y. Murai, Mutual interaction between microbubbles and wavy vortices in Taylor-Couette system - Part I: findings from UVP, 8th Japan-UK Seminar on Multiphase Flow 2010.9.13, ホテルノルド小樽, 小樽市
- (8) 村井祐一, 桜井康介, 田坂裕司, 武田 靖, 大石義彦, マイクロバブル分散流体の複素粘度とそれによる乱流渦変調効果について, 第 38 回可視化情報シンポジウム, 2010.7.22, 工学院大学, 東京
- (9) 山本和明, 北川石英, 萩原良道, マイクロバブル注入による自然対流場の伝熱促進, 熱工学コンファレンス, 2010年10月31日, 長岡技術科学大学・長岡市
- (10) 石川正明, 伊良部邦夫, 照屋功, 新田宗宏, POD による気泡噴流の動解析, 混相流学会年会講演会 2010 (浜松) 講演論文集, 2010年7月19日 静岡大学, 浜松
- (11) Y. Murai, M. Suzuki, K. H. Lau, and Y. Takeda, Alternation of Multi-dimensional Flow Fields by Mixing of Microbubbles Proc. 5th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, 2009年9月10日 スポレットホテル, スポレット, イタリア
- (12) Y. Murai, N Furuya, Y.Tasaka, Y.Takeda, Spinning Rheometry for Visco-Elastic Liquid by Means of UVP, Proc. Int. Symp. Food Rheology and Structure- Zurich, 2009年6月10日, スイス

- 連邦工科大学, チューリッヒ, スイス
- (13) A.Tasaka, Y.Murai, T.Watamura, Y.Takeda, Taylor-Couette flow with microbubbles, Abstract of 16th International Workshop on Taylor-Couette Flow(ICTW16), 2009年9月17日, プリンストン大学, プリンストン, アメリカ合衆国
- (14) H.J.Park, Y.Tasaka, Y.Murai, Y.Takeda, Drag reduction by active control of bubble injection, Proc. 8th International Symposium on Marine Engineering, 2009年10月5日, BEXCOホール, プサン, 韓国
- (15) Y. Tasaka, T. Watamura, Y. Murai, Y. Takeda, Effects of microbubbles on Taylor-Couette flow, Bulletin of 62th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, 2009年11月22日, APS学会, ミネアポリス, アメリカ合衆国
- (16) 北川石英, 萩原良道, 微細気泡を含む自然対流場の乱流構造, 第37回可視化情報シンポジウム講演論文集 2009年7月20日 工学院大学, 東京
- (17) 石川正明, 伊良部邦夫, 照屋功, 新田宗宏, 気泡を含む噴流のPOD解析, 混相流学会年会講演会 2009 (熊本) 講演論文集, 2009年8月3日, 熊本大学, 熊本

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

村井 祐一 (MURAI YUICHI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：80273001

(2)研究分担者

田坂 裕司 (TASAKA YUJI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：00419946

北川 石英 (KITAGAWA ATSUHIDE)
京都工芸繊維大学・
工芸科学研究科・准教授
研究者番号：80379065

石川 正明 (ISHIKAWA MASAOKI)
琉球大学・工学部・助教
研究者番号：00398306

(3)連携研究者

武田 靖 (TAKEDA YASUSHI)
東京工業大学・原子炉研究所・特任教授