

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24246033

研究課題名(和文)乱流摩擦抵抗低減のための二相流のスマート制御

研究課題名(英文)Smart control of gas-liquid two-phase turbulent boundary layer

研究代表者

村井 祐一 (Murai, Yuichi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：80273001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：2011年の大震災以来、エネルギーの効率的な生産と効果的な利用が、持続可能な社会を目指す上で早急に実現すべき人類の課題として最重要視されてきた。このうち海運分野で重責を担う革新的省エネ技術が、二相流を利用した乱流摩擦抵抗低減技術である。船舶の10%の抵抗低減が世界全体で2GW(年間CO2換算で2100カト)の省エネを実現する。本課題では、高レイノルズ数環境にある二相流力学的な「摂理」(多次元性、マルチスケール性、ならびに著しい非定常性・不規則性)を真正面から扱い、5%以下の僅かなポイド率で30%以上の正味抵抗低減率を「常に」得るような二相乱流のスマート制御を達成した。

研究成果の概要(英文)：After great disaster of east Japan 2011, our human kind is tasked to realize high energy safety and production in improved efficiency upon needs of sustainable society. Marine technology is one of such concerns, to which we develop turbulent frictional drag reduction method feasible to marine vessels. In this project, we have established three kinds of new techniques that convert unstable bubbly two-phase flow to controlled state to save energy consumption of large ships through multiple laboratory scaled fundamental experiments to find out hidden science in bubbly turbulent boundary layer at high Reynolds numbers. We have eventually succeeded in 15% energy saving for four kinds of marine vessels demonstrated by sea-trial as well.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 抵抗低減 船舶 混相流 気泡 乱流 境界層 翼

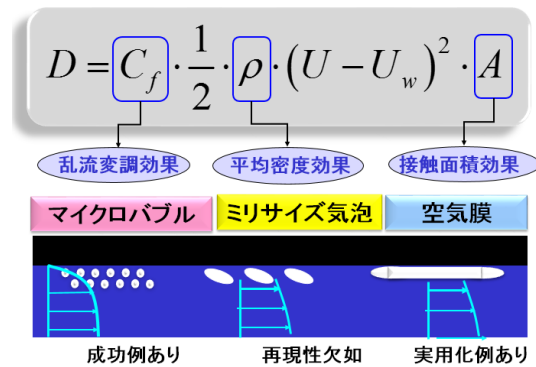
1. 研究開始当初の背景

2011年の大震災以来、エネルギーの効率的な生産と効果的な利用が、持続可能な社会を目指す上で早急に実現すべき人類の課題として最重要視されてきた。このうち海運分野で重責を担う革新的省エネ技術が、二相流を利用した乱流摩擦抵抗低減技術である。船舶の10%の抵抗低減が世界全体で2GW(年間CO₂換算で2100万ト)の省エネを実現する。80年代は欧州で最初の解析が発表された。しかし実験結果を包括的に説明できず、逆に流体力学的な難度の高さが証明された。90年代は分散性二相流としての乱流応力緩和機構について数多く発表された。高精細な数値解析技術も台頭し、日・米では二相乱流研究それ自体に種々のホットトピックを派生させた。一方で、解析可能な最高レイノルズ数が船舶条件に遙か遠く届かない。2000年代に入ると日・欧で高解像度のPIVが現象の実験現場に導入された。その結果、高レイノルズ数条件での乱流せん断応力の低下の原因が従来に比べ格段に明確となった。例えば、乱流縦渦まわりの気泡速度ベクトル場の発散(欧州)や、気泡変形能によるレイノルズ応力生成イベントの緩和(日本)などである。しかしこれらの流体力学的機構は、残念ながら、気泡発生点から下流の短い距離でしか維持されなかった。2005年頃を境に、気泡による抵抗低減は概ね、暗礁に乗り上げたと解釈する研究者が増えた。世界の開発史は、学問的知識だけを遺産として残し、使えない技術とレッテルを貼られる危機を迎えている。形勢の逆転は船舶専門家の苦闘を理解した、二相流の専門家に委ねられた。

2. 研究の目的

本課題では、高レイノルズ数環境にある二相流力学的な「摂理」(多次元性、マルチスケール性、ならびに著しい非正常性・不

規則性)を真正面から扱う。摂理を不可制御な対象に放置せず、いわばその粗悪な性質を工学技術に逆変換する。これにより、5%以下の僅かなボイド率で30%以上の正味抵抗低減率を「常に」得るような二相乱流のスマート制御を達成する。



3. 研究の方法

前述の目的を研究期間内に実現するために、現状で最高効果を持つと期待される次の3つの制御スキームの開発を行う。

	再現性確保	持続性伸延	気泡動力節減	
RBI 間欠的気泡発生	◎ 過渡応答利用	○ 過渡応答持続	○ 気泡流量半減	北川 朴
CVA 乱流粘度応適化	○ 最適気泡径	◎ 境界層集積		田坂 石川
WBI 翼型気泡発生法			◎ 負圧利用発生	熊谷 大石
	相乗効果あり	相乗効果あり	重合せ効果あり	

3×3の二次元的なアプローチで抵抗低減性能を改善
(撥水性塗料効果はRBI、マイクロバブル発生技術はWBIに入れている)

[CVA] 微小気泡の複素粘度の利用

振動せん断応力場(1~100Hz帯)では水・空気系でも微小気泡群に粘弾性挙動が発現する。当グループでは2009年に超音波ドップラーレオメトリを開発し、それを応用した結果、ボイド率が1%でも、変形固有振動数の近傍では実効粘性が30%も増加した。Einstein(1904)のサスペンション理論から完全に逸脱したこの値は、世紀を超えて発見された気泡の新レオロジー物性となった。本課題ではこのレオメトリに三次元界面計測技術を複合して、振動キャピラリ

数(Ca)を関数とする複素粘度データベースを作る．これにより境界層内の高周波変動する乱流渦と、その渦核に集積する微小気泡群の相互作用の秩序を究明する．複素粘度は高レイノルズ数乱流ほど顕在化するため、船舶条件での抵抗低減の主要シナリオになりうる．実際に、高速の乱流バーストだけを選択的に鎮圧する作用があることが最新の実験で確かめられた．この複素粘度の広範な実験的立証は、流体物理に基盤をおくゆえに、船舶の抵抗低減技術を一新する影響力がある．

[WBI] 圧縮工程のない翼型気泡発生法

喫水 3 ~ 10m の深さに空気を圧送して、船全体を覆うほどの大量の気泡を連続発生させる動力は莫大である．過去の実船実験の抵抗低減率はこの必要動力を計算に入れることで、半減ないしは負に落ち込んだ．我々は 2008 年 水中翼の負圧形成原理を活用することで圧縮機なしの気泡発生に成功した．さらに大型実船実験でプロアなしの大気圧誘導で正味抵抗低減率 14% を達成した．水流が形成する翼周りの圧力場に二相流の流動様式をロックインさせるという知的制御である．この発明は動く系では気泡発生動力をいかようにも最小化できることを周囲に教示した．本課題ではこれを展開させ、高速での砕波作用との流体力学的カップリング、デルタ型の三次元翼による縦渦気泡誘導、渦発信配列素子とケルビン-ヘルムホルツ不安定の相乗作用、さらに、翼負圧効果の増幅を実現するダリウス型気泡発生翼へと進める．実用性は海上実験で調査する．なお、水中翼による船体の圧力抵抗増大は、全体の抵抗低減に比べてその 2% 程度でしかなく、大型船舶であるほどこの比率は縮小して有利である．

[RBI] 反復的気泡注入による持続性確保

今日まで抵抗低減の因果関係の整理方法

が全て誤りであった．気泡の注入を反復的にすることにより、抵抗低減に再現性が初めて生まれたためである．気泡による抵抗低減は、平均ボイド率の関数ではなく、ボイド率の時間変動によって作り出されていた．通常、ボイドには主流方向に脈動が自然成長するが、それが抵抗低減を作り出す正体であった．実際に過去の実験で「不都合」に見える脈動を阻止した装置からは、抵抗低減効果が消失していた．本課題では、この発見をもとに、抵抗低減メカニズムの遷移線図を再構築する．この作業こそが、抵抗低減の再現性と下流持続性を保障する設計を生み出す．

4. 研究成果

3 つの開発研究項目のそれぞれについて以下の成果が得られた．

[CVA] 高周波数せん断応力場における微小気泡の複素粘度の利用については、平行平板型と円筒型の振動クエット二相流検定装置を製作した．これに対して UVP を利用することで運動量伝達速度、すなわち実効粘度が計測され、気泡がキャピラリー数で 1 を越えて急変形する場合に、大きな粘度増加が計測された．また連携大学としてスイス連邦工科大学で気泡乱流レオロジーの測定装置の共同開発のための設計を行った．2 年目の研究では、乱流渦が気泡群を局所的に高い数密度でその中心に捕獲し、その結果、周囲の 100 倍の粘度を呈することで、渦バーストに至る前に渦消散するというシナリオが確認できるようになった．これは微小気泡による乱流の沈静化や再層流化の基本原則を説明するものとなった．3 年目には超音波と界面レオメータによる究明が完了した．この結果、気泡が振動降伏する高速変形場では粘度の増減幅が平衡変形時の 10 倍以上となること、局所的に高濃度の気泡群が形成されたときは粘度が水の

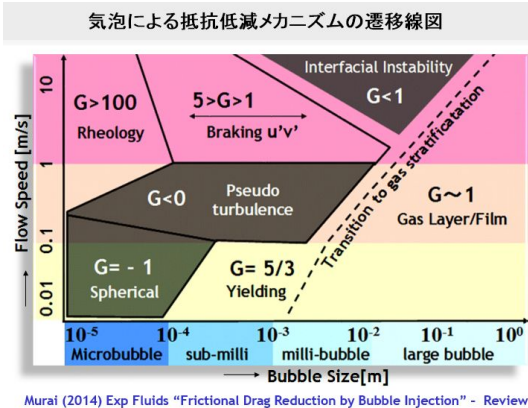
100～3000 倍になることが確実となり、それぞれ英文誌に掲載された。4 年目には超音波ドップラー流速分布測定法による気泡群や粘弾性流体・非ニュートン流体の汎用計測法が確立され英文誌に掲載された。5 年目は連携先である海外の研究所の協力を受け、次のように多数の成果が得られた。ポイド率 25%以上の高濃度微細気泡群では実効粘度が水の 500 倍に達すること、超音波ドップラー法による非定常せん断応答試験による新しいレオメトリが開発されたこと、縦渦を伴う壁面せん断流では微小気泡が低速ストリークと渦内の 2 カ所に集中し前者が抵抗低減に貢献すること、壁面に撥水性・親水性の装飾を付すことで微小気泡の壁面集中度が変化すること、ならびに、層流と乱流の間遷移域では微小気泡の注入が乱流パフを発生させやすくなること、などである。このほか計測機材の開発では、レーザードップラー流速計(LDV)の高時間分解能化による気泡流の粘性底層計測、カラー立体証明による微細気泡の 3 次元分布計測技術を発表した。

[WBI] 圧縮工程なしで船底に大量の気泡を発生する翼技術の開発については、自作曳航水槽により 2 種類の NACA 翼による水面変化、気泡発生性能の試験を行った。また、負圧原理による同様な低負荷気泡発生技術として回転翼の性能も一連のパラメータ研究を終えた。さらに水面データと CFD を結合するハイブリッド解析を実施し、翼の揚力、抗力などの特性を明らかにした。2 年目には、負圧作用のみならず縦渦による気泡群の深い位置までの誘導作用を組み合わせることが可能となった。3 年目には、過去 2 年間の成果が英文誌に掲載され、さらなる新しい翼型の設計により従来性能を超えることも確認された。4 年目には分担者の熊谷が中心となって発表した英文誌が、同誌で最も閲覧回数の多い年間

ランキングで 3 位となり、世界中に影響を与えた。この発展版として特殊翼の設計に入っており、従来よりもさらに気泡発生性能を向上させることが可能となった。5 年目には水中翼の最大負圧点で気泡を翼の内部から発生する設計を行った。この結果、従来水中翼方式に比べて、気泡発生流量が多くなること、気泡の微細化が促されること、ならびに下流の境界層の内側に進入しやすいことが発見された。この成果は混相流国際会議(イタリア)で発表された。

[RBI] 反復的気泡注入による再現性保証と下流持続性の拡大については、気泡群の波状移流の自然形成を実験的に調査し、短波長の反復気泡移流との関連性を調べた。またマイクロバブルの間欠的発生実験を行い、気泡クラウドの横波移流特性を可視化した。2 年目には、ポイド率を移流・拡散・分散の 3 項による微分方程式でモデル化し、とくに分散項に由来する孤立波が、長距離の下流における波動性を確保することが提唱された。また、気泡群の孤立波がチャンネル内でもたらず乱流渦変調について 2 色可視化法により定量可視化した。3 年目には 100m 曳航水槽試験を実施し、ポイド波の自然成長と人工制御の調和条件が明らかとなった。このスキームの流体力学的機構については 2 つの英文誌に掲載された。さらに、マイクロバブル領域の抵抗低減については、自然脈動形成や大域的渦の変調作用があることが確認され、これも英文誌に掲載された。ほかには壁面のコーティングによる気泡挙動の違いや、壁面を沿う大気泡の近傍に現れる乱流境界層の内層変調について詳細なデータベースが構築され、英文誌とて発表・公開された。4 年目には代表者の村井と研究協力者のパク博士が担当し、ポイド波による抵抗低減促進の正味作用と乱流境界層の内層二相流構造の計測が実現した。その成果は 2 つの英文誌に掲載された。さ

らにマイクロバブル領域の抵抗低減については分担者の田坂, 石川が担当し, 物理メカニズムの研究が進展した. このほか, 壁面の濡れ性制御による乱流中の気泡挙動の違いを分担者の北川が, 新しい気泡流用のせん断応力計の開発を分担者の大石が進めた. 5 年目には船底において下流側で自然発達するポイド波について実験的調査を行い, その結果, バルク平均流速の 1/2 程度の波動速度をもつこと, ポイド波の卓越周波数が船速に比例して増加すること, ならびに平均摩擦抵抗と境界層内平均ポイド率の間には相互可逆的な波動方程式を共有することが, 明らかとなった. この成果も英文誌に掲載された.



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 28 件)

1. 円柱後流渦による液体自由界面の振動と間欠的気泡注入, 熊谷一郎, 大藪剛志, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流, Vol. 25, No. 5, pp.399-405 (2012)
2. 鉛直加熱平板自然対流熱伝達に対するマイクロバブル注入の影響, 北川石英, 山本和明, 村井祐一, 日本機械学会論文集 B 編, 78-793, pp. 1539-1549 (2012)
3. Development of ultrasonic visualizer for capturing characteristics of viscoelastic fluids, T.Shiratori, Y.Tasaka, Y.Murai, Y.Takeda, Journal of Visualization, Vol. 16, pp. 275-286 (2013)
4. Intensified and attenuated waves in a microbubble Taylor-Couette flow, T.Watamura, Y.Tasaka, Y.Murai, Physics of Fluids, Vol. 25, 054107 (2013)
5. LCD-projector based 3D color PTV, T.Watamura, Y.Tasaka, Y.Murai, Experimental Thermal and

- Fluid Science, Vol. 47, 2013, pp. 68-80 (2013)
6. Natural convection heat transfer from a vertical plate in water with microbubble injection, A.Kitagawa, Y.Murai, Chemical Engineering Science, Vol. 99, pp. 215-224 (2013)
7. Off-axis PTV for 3-D visualization of rotating columnar flows Y.Murai, J.H.Vlaskamp, Y.Nambu, T.Yoshimoto, P.Denissenko, and P.J. Thomas, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 51, pp. 342-353 (2013)
8. Quantitative visualization of microbubble streams in Taylor vortices T.Watamura, Y.Tasaka, Y.Murai, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Volume 61, The 61st Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics, 2012, pp.123-131(2013)
9. Visualization of counter-current convection induced by microbubbles and small particles, A.Kitagawa, T. Mimura, M. Ishikawa, Y.Murai, Journal of Visualization, Vol. 16, pp. 313-321 (2013)
10. 過渡的気泡変形を伴う分散気泡流れの実効粘度変化, 桜井康介, 田坂裕司, 村井祐一, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 79, No. 797, pp. 1-11(2013)
11. Experiments on bubble generation by a hydrofoil moving beneath the water surface for reducing ship drag, I.Kumagai, Y.Murai, Y.Takahashi, H.Sakamaki, T.Tsukahara, T.Ozaki, Y.Tasaka, Y.Oishi, AIP Conference Proceedings, Vol. 1592, No. 177, pp. 322-328 (2014)
12. Frictional drag reduction by bubble injection [Review] Y.Murai, Experiments in Fluids, Vol. 55, 1773 (p28) (2014)
13. Horizontal turbulent channel flow interacted by a single large bubble, Y.Oishi, Y.Murai, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 55, pp. 128-139 (2014)
14. Pulsatory rise of microbubble swarm along a vertical wall, A.Kitagawa, Y.Murai, Chemical Engineering Science, Vol. 116, pp.694-703 (2014)
15. Vortical structures swept by a bubble swarm in turbulent boundary layers, H.J. Park, Y.Tasaka, Y.Oishi, Y.Murai, Chemical Engineering Science, Vol. 116, pp.486-496 (2014)
16. 微小気泡による大型船舶の抵抗低減 [Review], 村井祐一, 日本エネルギー学会誌, Vol. 93, pp. 1038-1043 (2014)
17. マイクロバブルを用いた流動制御と船舶抵抗低減に向けたいくつかの試み, 田坂裕司, 渡村友昭, パクヒュンジン, 村井祐一, 大石義彦, 化学工学会誌, Vol.78, No.9, pp.593-596(2014)
18. A new power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil for reducing ship drag: theory, experiments, and applications to ships I.Kumagai, Y.Takahashi, Y.Murai, Ocean Engineering, Vol. 95, pp. 183-195 (2015)
19. Drag reduction promoted by repetitive bubble injection in turbulent channel flows, H.J.Park,

- Y.Tasaka, Y.Oishi, Y.Murai, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 75, pp. 12-25 (2015)
20. Effective viscosity measurement of bubble/particle mixture at high volume fraction by interfacial rheometry, Y.Murai, T.Shiratori, I.Kumagai, P.A. Ruehs, P.Fischer, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 41, pp. 121-128 (2015)
 21. Estimating the effective viscosity of bubble suspensions in oscillatory shear flows by means of ultrasonic spinning rheometry, Y.Tasaka, T.Kimura, Y.Murai, Experiments in Fluids, Vol. 56: 1867(p13) (2015)
 22. Rapid rheological characterization of a viscoelastic fluid based on spatiotemporal flow velocimetry, T.Shiratori, Y.Tasaka, Y.Murai, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 71, pp. 1-13 (2016)
 23. Ultrasonic pulse echography for bubbles traveling in the proximity of a wall, H.J. Park, Y.Tasaka, Y.Murai, Measurement Science and Technology, Vol. 26: 125301 (14pp) (2015)
 24. Ultrasonic velocity profiling rheometry based on a widened circular Couette flow, T.Shiratori, Y.Tasaka, Y.Oishi, Y.Murai, Measurement Science and Technology, Vol. 26: 085302 (2015)
 25. Effect of wall surface wettability on collective behavior of hydrogen microbubbles rising along a wall, A.Kitagawa, Y.Murai, P.Denissenko, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 80, pp. 126-138 (2017)
 26. Quantitative visualization of swirl and cloud bubbles in Couette-Taylor flow, B. van Ruymbeke, Y.Murai, Y.Tasaka, Y.Oishi, C.Gabillet, C.Colin, N.Latrache, Journal of Visualization, DOI: 10.1007/s12650-016-0391-5 (2016)
 27. Void waves propagating in the bubbly two-phase turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship during drag reduction, H.J.Park, Y.Oishi, Y.Tasaka, Y.Murai, Experiments in Fluids, Vol. 57, No. 178 (18p) (2016)
 28. 管内流れの局所乱流塊形成におけるマイクロバブルの影響, 中村幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一, 混相流, Vol. 31, No.1, pp.20-28 (2017)

〔学会発表〕(計 113 件)
紙面制約のため省略

〔図書〕(計 4 件)

1. T.Karayianiss, Y.Murai, Proceedings of 9th UK-Japan Seminar on Multiphase Flow, Brunel University and Hokkaido University, CDROM of SMPF13 (2013)
2. 村井祐一, 微細気泡の最新技術(第4章1節: マイクロバブル懸濁液の粘性流体力学的特性) NTS 出版, pp. 81-92 (2014)
3. 村井祐一, 混相流研究の進展, 混相流学会誌 混相流, Vol.28, No.5, pp.531-590 (2015)
4. 村井祐一, ほか 52 名, マイクロバブル(ファ

インバブル)のメカニズム・特性制御と実際応用のポイント, 情報機構出版, 469p, 分担執筆: pp.163-173396-401(2015)

〔産業財産権〕

取得状況(計 2 件)

名称: 回転翼式気泡発生装置
発明者: 村井祐一, 熊谷一郎, 田坂裕司
権利者: 北海道大学, 明星大学
種類: 特許
番号: 5501028
取得年月日: 2014.3.3
国内外の別: 国内

名称: 高効率船体摩擦抵抗低減システム
発明者: 田坂裕司, 村井祐一, 武田 靖
権利者: 北海道大学, 明星大学
種類: 特許
番号: 5532220
取得年月日: 2013.4.4
国内外の別: 国内

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

熊谷一郎 (KUMAGAI, Ichiro)
明星大学・理工学部・教授
研究者番号: 50697680

北川石英 (KITAGAWA, Atsuhide)
京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授
研究者番号: 80379065

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

大石義彦 (OISHI, Yoshihiko)
室蘭工業大学・工学研究科・助教
研究者番号: 90617078