平成29年度防衛装備庁 安全保障技術研究推進制度

成果報告書

マイクロバブルの乱流境界層中への混入による摩擦抵抗の低減

平成30年 5月

国立大学法人 北海道大学

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究 推進制度による委託業務として、国立大学法 人 北海道大学 が実施した平成29年度安全保障 技術研究推進制度「マイクロバブルの乱流境界層中への 混入による摩擦抵抗の低減」の成果を取りまとめた ものです。

1. 委託業務の目的

1.0 委託業務の目的

船舶表面に気泡を一定流量以上、混入させると、摩擦抵抗が大幅に減少する。このことが文献で初 めて登場したのは、1973年の米国の学術誌であった。今日までの43年間、オランダ、米国、日本、 韓国、台湾、イギリス、フランス、カナダなど、世界中の研究機関で再現実験あるいはさらなる性能 向上を目指した実験や理論解析が実施されている。本課題では、この性能をさらに飛躍させる新技術 として、マイクロバブルによる乱流境界層の制御のメカニズムを解明することを目的とする。この課 題からの知見は、世界の温室効果ガスの海運分野における削減を後押しする。

この課題は、以下の5項目の科学的究明要素とそこからの知見の設計への利用から構成される。そ れぞれの目標は以下のように定義する。

なお、以下で用いられる境界層という用語は、壁面近傍領域に形成される摩擦の原因となる流動が 存在する層を指す総称である。境界層は、対象とする物理量によって複数の呼称に分かれ、液相の速 度が壁面に影響を受ける領域を速度境界層、マイクロバブルの濃度が一定以上保持されている領域を マイクロバブル濃度境界層と言う。またこれらが乱流状態となる場合は、乱流速度境界層および乱流 マイクロバブル濃度境界層と呼ぶ。さらにこれら2つをまとめて単に乱流境界層と呼ぶ。本課題で は、すべて乱流境界層を対象とする。とくに、乱流条件における乱流速度境界層と乱流マイクロバブ ル濃度境界層の相対関係および相互依存性を調査の対象とする。

(1)移動体曲面作用への対応

船体表面形状が曲面から構成されることを考慮し、曲率をもつ壁面における境界層内のマイクロバブルの滞留作用を明らかにする。船舶と同じ条件となる境界層レイノルズ数 Re で整理する。ここで境界層レイノルズ数 Re は、摩擦速度 U_τ と、液体の動粘度 ν、および速度境界層厚さδにより Re=U_τδ/νで定義される、この境界層レイノルズ数について、0<Re<10³の実験範囲を調査対象とし、乱流マイクロバブル濃度境界層厚さを、画像計測から明らかにする。この現象については流線曲率による表面負圧の形成で、曲率が強い場合にはマイクロバブルが乱流速度境界層δの内側に集積すると予想している。この効果を円柱・楕円体・翼形・船形で立証する。実験は小型曳航水槽設備を利用する。得られたマイクロバブル濃度分布から、曲面における境界層の下流付着作用と剥離限界を特定する。さらにこの結果から、任意形状物体における抵抗低減効果を予測可能にする、マイクロバブルの空間発展の数理予測モデル式を構築する。これにより摩擦抵抗低減を促進するような3次元形状の最適化の指針を得る。

(2) 微小気泡クーロン力の活用

乱流境界層内のマイクロバブルが負電荷を帯びることによる乱流渦の制御性を明らかにするため に、マイクロバブル群の三次元計測を実施し、理論解析と融合することで帯電に伴うクーロン力の分 布を割り出す。このクーロン力の測定により、マイクロバブルどうしの合体抑止臨界、ならびに再層 流化作用に関する定量的なデータを取得する。さらにこれらの現象が、摩擦抵抗低減の何割を占める かを明らかにする。この手段として、実験には小型回流水槽を利用し、カラーグラデーション PTV 法 を開発する。数値解析では実験データを入力とするクーロン力のシミュレーションソフトウエアを開 発・完成させる。クーロン力の寄与分が明らかにされた後は、クーロン力が抵抗低減機能として顕在 化するような、境界層の条件(流速、曲率、下流持続性)を明らかにする。

(3) 局所レオロジー効果の活用

非定常運動するヘアピン渦、バースト渦、低速ストリーク構造などの乱流渦にマイクロバブルが集 積するときの乱流渦粘性を、実験と数値シミュレーションと融合する手段で計測する。実験において は、2つの手法を併用する。1つは、スピン振動する円筒の内壁にマイクロバブルシートを発生させ、 研究代表者が独自に開発した超音波スピニングレオメトリでバルクの複素粘度を直接計測する。もう 1つは乱流境界層内のマイクロバブルの分布とその非定常応答から、逆解析により複素粘度を推定す る。これらから得られた複素粘度を利用して実験と同じ流れを数値シミュレーションにより再現し、 局所レオロジー効果の機能する範囲を特定するとともに、任意の流動条件における抵抗低減を予測可 能とする局所レオロジー数理モデルを構築する。

(4) 反復的微小気泡発生の利用

マイクロバブル分布と壁面摩擦抵抗の間には位相差が存在することが過去の実験で判明している。 そこで平均摩擦抵抗を下げるアクティブ制御法を開発し、その性能向上の感度を調査する。その目標 は、0.1~10Hzの周波数帯域でマイクロバブル抵抗低減の特性曲線を得ることとする。実験には風洞 実験室水平チャネルを利用する。気泡注入は電気パルス周期制御によりマイクロバブル発生が反復的 となるような制御をかけ、それによる壁面せん断応力の時間応答をデータベース化する。このデータ の解析により、同じマイクロバブル発生流量で平均抵抗低減効果を一定流量発生時の2倍以上に上げ ることを目標とする。

(5) 微小気泡発生法の高機能化

従来までの1次元電極から2次元配列電極にすることで、マイクロバブルの単位面積当たりの発生 流量を大幅に増加させる技術について設計と試験を行う。目標は、同じ電力消費量で、単位スパン長 さ当たりのマイクロバブル発生流量を5倍以上にすることとする。この開発では、船体表面にシート 状の電極配列面を貼り付けるだけでマイクロバブルを高密度発生させることを目標とする。従来の電 気分解によるマイクロバブル発生はファラデー則の理論値に比べて熱損失が大きいが、電極間距離を 狭め、二次元することで電解電圧を下げて高フラックス化させる。このとき、設計限界としての指標 となる臨界マイクロバブルフラックス(CMF)の存在を明らかにする。マイクロバブル発生試験には風洞 実験室小型曳航水槽を利用し、流動環境中でのCMFを明らかにする。

上記の(1)~(5)の項目のうち、(1)(3)(4)については超音波ドップラー流速分布測定法(UVP)を、マ イクロバブル計測に利用できるよう拡張開発することで目標を達成する。また(1)(2)(5)については高 解像度高速度フルカラーカメラにより3次元計測を実現する計測系を開発し、目標を達成する。さら に(1)(2)(3)(4)については数値シミュレーションを併用し、実験データの補完と統一的理解の加速に 役立てる。本課題の3年間で到達する抵抗低減効果に対する目標は、上記の5項目の総合的知見を活かし て、速度境界層内のマイクロバブルの体積率1%以下で平均抵抗低減率20%を達成することとする。ここで 平均抵抗低減率とは、速度境界層厚さδに対して、気泡発生部から下流1000δの区間に作用する壁面摩 擦抵抗の総和について、マイクロバブルによる低下の割合とする。

本課題から得られた成果は、学会・講演会にて公開し、外部の研究者の知見を取り込みながら、さらなる探求を加速させる。また、本課題の成果の獲得の推進と、物理的メカニズムならびに船舶への実装 方法について助言を受けるため、外部評価委員会を設置する。外部評価委員は、流体力学、造船学、海洋 工学、ならびに電気工学の分野の専門家から構成し、1年に一度、成果報告・討論会を設ける。

1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

業務計画書に記載した(1)~(5)の研究項目について、それぞれの達成度を以下に記す.

(1)移動体曲面作用への対応

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減が対象とする壁面の曲率によってどのように変化するかを実験 的に調査した.計画どおり、円柱、楕円柱、翼、および弱い曲率をもつ翼によって曳航水槽実験を行 った.この結果、円柱と楕円柱など強い曲率をもつ物体では流れの剥離がマイクロバブルによって遅 延すること、およびその効果が高いレイノルズ数であるほど顕著となることが発見された.弱い曲率 をもつ物体では、境界層内のマイクロバブルがT-S不安定波の影響でクラウドを形成するが、それが曲 率作用により三次元的に崩壊して壁面に押し戻される構造が発見された.以上の結果から船舶等にお ける利用では、平板でのモデル実験に比べてマイクロバブルが境界層内に停留する作用があり、抵抗 低減効果を高めることが立証された.この発見は当初の予想どおりであり、総合的な達成率は100%と 自己評価できる. 水中のマイクロバブルが負電荷を帯びる性質について調査し、さらに境界層内でその負電荷がクー ロン電位場を作ることを、回流水槽実験によって調査した.クーロン電位場の計測のために、マイク ロバブルの空間濃度分布を立体的に計測する三次元光学計測原理を新たに開発した.この計測原理は 当初の計画では、マイクロバブルのみが対象であったが、クーロン電位場が液相の乱流構造に与える 影響が大きいことが発見されたため、壁面粘性低層内の液相の乱流せん断構造を同時に計測する計測 システムに発展させた.この結果、マイクロバブルの低速ストリークでの集積とバッファー層におけ るクラウド形成に高い相関をもって摩擦抵抗低減作用が生じていることが明らかとなった.この結果 は当初予想を超えるもので世界初の発見である.一方、クーロン力のベクトル場の解析には非常に大 きな計算負荷が発生することが判明し、時間と計算機資源の制約から、境界層全体の応力テンソル場 を計測するには至らなかった(1つのマイクロバブルクラウドでの解析に制限された).以上により 総合的な達成度は90%と判断する.

(3) 局所レオロジー効果の活用

非定常運動するヘアピン渦、バースト渦、低速ストリーク構造などの乱流渦にマイクロバブルが集 積するときの乱流渦粘性を実験的に調査した.このために研究室で独自開発した超音波スピニングレ オメトリを利用し,さらにマイクロバブルによる複素粘度の空間分布計測に拡張した.これらの実験 計測手法の開発は当初計画どおり進んだ.この結果として高速せん断流の環境でマイクロバブルが楕 円変形を呈し,複素粘度の実部が従来理論値より遙かに大きな増加することが発見された.また,複 素粘度の虚部を構成する弾性が初めて実測された.以上により当初計画どおり,新しいレオメトリの 原理の開発と,それを応用した新知見の獲得ができた.一方,得られた実測データを利用して数値シ ミュレーションにより現象を再現することまでは到達しなかった.その理由は、せん断歪み速度とせ ん断歪み率の2つのパラメータで複素粘度が決定するが、数値シミュレーションの実施に必要な包括 的なレオロジーデータの取得にさらなる時間を要することが判明したためである.具体的には当初予 想よりも複素粘度の振る舞いがダイナミックであり、単純な線形理論式では妥当性に乏しいと判断し たためである.以上により達成度は90%と判断する.

(4)反復的微小気泡発生の利用

マイクロバブル分布と壁面摩擦抵抗の間には位相差が存在することが過去の実験で判明している。 そこで平均摩擦抵抗を下げるアクティブ制御法を開発し、その性能向上の感度を調査した.このため に高電流条件の電気分解マイクロバブル発生技術にオンオフの周波数制御を課す試験を実施した.こ の結果,0.1Hzから5Hzまでのマイクロバブル発生が正しく機能することを明らかにした.さらにこれ を水平乱流チャネルに適用し,連続発生に比べて周期的発生がマイクロバブルを壁面に一様に分散さ せる作用があることを発見した.この結果,同じマイクロバブル発生流量でも,平均抵抗低減効果を 一定流量発生時の2倍以上に上げる目処がついた.なお,マイクロバブルが高速で移流する際の三次元 分布を測定するために斜めレーザーシート法を新たに考案・設計・導入した.この計測技術の開発は 当初計画にはなかったが,本課題の実施を通じて新たに完成したマイクロバブル乱流境界層の内層構 造を計測する新しいツールであり,今後,広く活用できる.以上により達成度は120%と判断する.

(5) 微小気泡発生法の高機能化

従来までの1次元電極では単位壁面積あたりのマイクロバブルの発生量が少なかった.そこで電極を2 次元配列することで,これを改善する技術開発を実施した.4種類の二次元配列電極を設計し,このう ちジグザグ電極方式が最適であるとして気泡発生試験を実施した.このジグザグ電極方式は,アノー ドとカソードの間の電解抵抗が最小化し,かつ水流中でのマイクロバブルの放出が最大化する幾何学 構造を有する.また,マイクロバブルの体積流量計測の結果から,この方式がファラデー則の理論値 どおりの性能をもち,熱損失が小さいことを確認できた.さらにこれを水平乱流チャネルに装着して, 実際のマイクロバブル発生試験を実施したところ,正常に機能し,当初の期待どおり大量のマイクロ バブルが境界層内に導入されることが確認された.以上により達成度は100%である.

以上の5項目について、特段、計画が失敗したものはなく、部分的には当初計画を越えて発展した ものが含まれることから、総合的な達成度は95%と自己評価したい.

1.2 研究課題終了後の将来性

本成果は、マイクロバブルの注入によって摩擦抵抗低減を図る、広い分野で活用される現象であり、 そのメカニズムとパラメータ依存性を明らかにした点で、多くの専門家が参照するものと期待される. 船舶における省エネルギー技術、水中ビークルの燃費向上、長距離の液体燃料パイプラインにおける 圧力損失の低減、さらにはビルや工場における24時間365日稼働する冷暖房用の流体配管システムで も、定常的なエネルギー損失の節減技術として今後の利用が想定される. さらには本課題で獲得され た成果は、乱流を制御するという長年の挑戦に対する明確な答えにもなっており、今後、当該分野で 我が国が先導して国際的に開拓すべき学術領域でもある. 今後、代表者らのグループがイニチアチブ をとって、この学術と技術を、21世紀後半へと橋渡しし、地球温暖化の抑制を初めとする人類共通の 諸問題の解決に貢献していく.

1.3 副次的成果や目標を超える成果

本課題の遂行において、現象論的な数々の発見とは別に、それらの発見を導いた全く新しい計測技術の開発は、副次的成果として社会に還元できるものと認識される. このうちカラーグラデーション 立体照明法は、単視点(カメラ1台)でマイクロバブルやトレーサ粒子の三次元座標と三次元速度ベ クトル分布を空間分布として取得できるもので、PIV(粒子画像流速測定法)の技術を大幅に更新し、 多くの研究者、技術者が簡素な装置で実現できるものと言える.

1. 4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

本課題の遂行期間内では、得られた成果を直ちに発表するに至っていないが、今後、国際学術雑誌 に複数の論文として発表する予定である.具体的には以下を計画している. (1)カラーグラデーション立体照明法によるマイクロバブルの三次元計測(Experiments in Fluids) (2)マイクロバブルの周期的発生による乱流せん断応力変調作用(Journal of Fluid Mechanics) (3)超音波スピニングレオメトリによる複素粘度の計測(International Journal of Multiphase Flow) (4)プラチナフィルムによる電気分解の高密度化技術(Chemical Engineering and Science)

1.5 研究実施体制とマネジメント

本課題の遂行においては外部評価委員を設置し,幅広い専門領域の研究者と技術者から助言を得て 成果の獲得を推進する方式を採用した.この方式は課題の計画に沿った進展を後押しするだけでなく, 本課題のプレゼンスを内外に示す効果があった.

1.6 経費の効率的執行

とくに特筆すべき事項はない.

2. 平成29年度(報告年度)の実施内容

2.1 実施計画

①マイクロバブル乱流境界層の弱い曲面効果の解明

平成28年度に実施した曳航水槽実験の結果、円柱など強い曲率の物体ではマイクロバブルによる剥離点 の移動が僅かであり、効果が微弱であることが明らかとなった。そこで回流水槽設備を利用し、主流方向 に弱い曲率をもつ壁面における乱流渦構造の変化と境界層剥離のメカニズムを実験的に調査する。弱い曲 率とは、船舶における境界層の曲率と同じように、曲率半径が境界層厚さの100倍以上となるような穏やか な曲面を指す。マイクロバブル注入による効果は、平均低速ストリーク間隔、壁座標方向のマイクロバブ ル濃度分布、およびヘアピン渦イベントに対するマイクロバブル濃度の三次元構造として計測する。これ らの計測は、平成28年度に開発した 3D Color PTVシステムにて行う。なお施設が利用可能である場合には、 海上技術安全研究所の400メートル曳航水槽設備にて、本項目の実験を実施する。

②マイクロバブル群内の突発性クーロン力作用の解析

平成28年度に実施した小型回流水槽実験により、境界層内のマイクロバブル立体濃度分布のデータベースを取得するとともに、マイクロバブルが高濃度の群を不規則に形成し、乱流境界層の内層構造に大きな影響を与えていることが判明した。そこで小型回流水槽を利用してデータベースを拡張するための実験を実施する。拡張されたデータベースからクーロン力の時空間依存値を解析する。具体的には電磁気学理論により取得可能なクーロン力がもたらす乱流渦構造の速度勾配テンソルの各成分を計測する。すなわちせん断歪みの6成分、伸張の3成分、および回転速度テンソルの6成分への影響を調査する。このクーロンカの解析には、H28年度に構築した実験・理論の融合解析であるハイブリッド計測システムを用いる。

③マイクロバブルのレオロジー計測による乱流渦粘度の計測

平成28年度の委託業務において円筒のスピン振動によるマイクロバブルのレオロジー計測手法を開発した。そこでこの計測手法を応用・機能拡張し、マイクロバブル懸濁液体乱流物性全般を計測することができる超音波スピニング乱流レオメトリを設計・構築する。この計測手法により、マイクロバブルが乱流運動量伝達の速度に及ぼす影響を、ボイド率、界面積濃度のバルク平均ならびに空間偏差の関数として計測する。空間偏差の検知には、超音波トランスデューサを高密度に配列させたアレイ式超音波イメージング技術を開発・導入する。この技術はアレイプローブとマルチプレクサの購入と、研究実施者による信号処理ソフトウエア開発により構築される。これにより、マイクロバブルの空間粗密構造と乱流渦粘度の相関関係をデータベース化する。

用語説明

アレイプローブ 超音波トランスデューサを高密度に空間配列したデバイスのことであり、これにより超 音波パルスの送受信を高速反復させることで多次元の情報を得ることが可能となる。

マルチプレクサ 超音波トランスデューサへの電圧の送信・受信を双方向に行う電子回路を、多数のチャンネルで並列化する電気回路であり、アレイプローブと組み合わせて利用する。

④電気分解による反復的気泡注入法の周波数応答の調査

平成28年度までに周期的な電気分解の試験を終え、その結果、アノードとカソードの両極にプラチナワ イヤーを採用することでマイクロバブル発生の応答性が確保できることを確認した。そこで水平チャネル 流路にこれを装着し、1秒~10秒の範囲でオンオフ制御をかけたときの下流におけるマイクロバブルの 移流の周波数応答を調査する。この結果を気液二相流の数理モデルで整理し、波動方程式の成長と減衰の 係数を求める。

⑤電気分解素子の二次元配列基盤の試作と水中適用試験

平成28年度は電気分解用の電極となるワイヤーを流れ方向にアノード・カソード・アノード・カソード という並び方で交互に配置し、準2次元のマイクロバブル発生面を設計した。そこでこの電気分解素子を試 作し、水中での動作試験を実施する。試験の評価量は、マイクロバブルの体積フラックス限界 (CHF= Critical Hydrogen Flux:単位は m³/m² sec) である。試験に用いる水槽は小型曳航水槽とし、水槽内に電解質を入れた場合のCHFの変動も調査する。

⑥課題の総合的推進

本課題の成果の獲得の推進と、物理的メカニズムならびに船舶への実装方法について助言を受けるため、 外部評価委員会を設置し、成果報告・討論会を開催する。平成29年度の成果報告・討論会は2月または3月 に半日をかけて開催する。会場は平成28年度と同じく東京都内の施設を予定している。

2.2 研究実施日程

			5	実	方	施	E	3	利	Ī		
研究実施内容	第1年度			第2年度			第3年度(なし)					
	1/四	2/四	3/四	4/四	1/四	2/四	3/四	4/四	1/四	2/四	3/四	4/四
研究代表者 村井祐一												
マイクロバブル乱流境界 層の曲面効果の可視化												
マイクロバブル群におけ るクーロンカ分布の計測 システムの設計												
電気分解による反復的気 泡注入法の設計				┢								
電気分解素子の二次元配 列基盤の設計												
マイクロバブル乱流境界 層の弱い曲面効果の解明							┝─╸	•				
電気分解による反復的気 泡注入法の周波数応答の 調査							•					
課題の総合的推進												
研究分担者 田坂裕司												
マイクロバブルのレオロ ジー評価技術の設計												
マイクロバブルのレ オロジー計測による 乱流渦粘度の計測					•							
マイクロバブル群内の突 発性クーロンカ作用の解 析												

研究分担者 朴 炫珍							
電気分解素子の二次元配 列基盤の試作と水中適用 試験			•	4			

2.3 研究成果の説明

2.3.1 マイクロバブル乱流境界層の弱い曲面効果の解明

平成28年度に実施した曳航水槽実験の結果、円柱など強い曲率の物体ではマイクロバブルによる剥離点 の移動が僅かであり、効果が微弱であることが明らかとなった。そこで曳航水槽設備を利用し、主流方向 に弱い曲率をもつ壁面における乱流渦構造の変化と境界層剥離のメカニズムを実験的に調査した。計画時 点ではこの試験に小型回流水槽を利用する予定であったが、小型回流水槽では上流における水流の乱れが 大きく、弱い曲率の作用を可視化するには不適当であることが判明した.そこで乱れをまったく持たない 静止水中に物体を移動させる曳航水槽設備での試験に切り替えた.ここで言う弱い曲率とは、船舶におけ る境界層の曲率と同じように、曲率半径が境界層厚さの100倍以上となるような穏やかな曲面を指す。マイ クロバブル注入による効果は、平均低速ストリーク間隔、壁座標方向のマイクロバブル濃度分布、および ヘアピン渦イベントに対するマイクロバブル濃度の三次元構造として計測した。これらの計測は、平成28 年度に開発した 3D Color PTVシステムにて行った。

(1) 実験装置

長さ5000 mm,幅 500 mm,高さ500 mmの水槽に,5000 mmの稼働区間をもつリニアスライダを設置した. スライダには試験対象とする物体を装着し、それを水中で曳航させた.物体は曲率をもつ板のモデルとして、図1に示すような水中翼を利用した.水中翼の型式は NACA0015 の対称翼である.この対称翼は、弦長が264 mm,最大肉厚が 40 mmである.この形状がもつ翼表面の曲率半径は前縁部で 20 mm,翼中央部で 300 mm,翼後端部で 1000 mmである.曳航速度は 75~150 mm/sとした.このとき翼弦長で定義されるレイノルズ数の範囲は、20,000<Re<40,000、摩擦レイノルズ数の範囲は20<Re て<500である.このレイノルズ数の領域では、翼表面の境界層が乱流化し、乱流境界層を形成する.また、翼表面の曲率に伴う遠心加速度は、前縁部で a=1.12 m/s²、中央部で a= 0.075 m/s²、後端部で a=0.013 m/s² である.これらの遠心加速度は、単相流においては翼周りの流れを左右しないが、マイクロバブル混入時では、マイクロバブルを壁面に押しつける向心力として作用する.この実験では、この向心力に伴うマイクロバブル乱流境界層の構造を可視化した.



図1. 曲率をもつ物体表面のマイクロバブル流れの可視化装置の概略図

対称翼のスパン方向長さは 200 mmとした.またスパン方向を重力加速度の方向に一致させた.これによ り翼の中央部分の水平面で見たとき、マイクロバブルの浮力は面外成分となり、無重力としてのマイクロ バブル流れと対応付けをすることができる.マイクロバブルの可視化方法はレインボウ階層照明法を採用 した.この可視化方法はH29年度に報告した Color 3D PTV法と同じである.今回の実験では、この方法を 物体まわりの乱流境界層の内層構造を可視化する目的から、厚さ21 mmの層の内部に6色のカラーコードを 集中させる方法を採った.また、物体の曲率に対応させるため、液晶プロジェクタからの投影において物 体の形状に合致するような物体適合レインボウ階層照明法 (Body-fitted Rainbow Color-Coded Recursive Layer Illumination)を考案・設計し、採用した.ただし翼全体をカバーするほどの光源の広さを持たな いため、翼の前縁部から中央部の最大肉厚点までの区間Aと、後端付近のみを可視化する区間Bに分割して 可視化・撮影を行った.

(2) 実験結果

図2に、レインボウ階層照明法による対称翼の前縁付近の境界層内におけるマイクロバブルの立体分布 の可視化結果の一例を示す. 同図で(a)は翼が静止しているときの状態で、マイクロバブルを前縁付近で 線上に発生させたときの画像である. 同図(b)は翼を曳航速度 U= 75 mm/sで移動させたときの様子であ る、カラーコードは、壁面に最も近い部分が紫色、壁面から離れるにつれて青色、水色、緑色、黄色、赤 色となる.よって翼の中央部で紫色のマイクロバブルが多数,観測されていることは、曲率の作用に伴っ て多数のマイクロバブルが壁面に集積する効果を説明している. また前縁から30 mmまでの区間ではマイ クロバブルが筋状に分布し、それらが水色で発色している.これはマイクロバブルが乱流境界層のうちバ ッファー層に多く集中し、しかも縦渦や低速ストリークのスパン方向間隔に従って粗密分布を形成するこ と示している. さらに翼中央部では、これらバッファー層のマイクロバブルのうち、大きな塊に成長した ものだけが選択的に緑色に発色している.これはバッファー層にあるマイクロバブルが相互に集積してマ イクロバブルのクラウドに成長し、それが対数層まで飛び出していることを表している。以上のように、 レインボウ階層照明法により曲率をもつ物体の乱流境界層における内部のマイクロバブルの運動形態が明 らかになった、また、曲率の効果は、遠心加速度によってマイクロバブルを粘性低層に保持する作用と、 バッファー層にあるマイクロバブルのクラウドを対数層あるいは外層に吐き出す作用の、2つが観測され た.前者は、摩擦抵抗低減を保持・促進する作用をもち、後者はそれを低下させる作用をもつと考えられ る.



(a) 曳航開始前の状態 (b) 曳航速度 U=75 mm/sにおける状態 図 2. 翼前縁近傍におけるマイクロバブルのレインボウ階層照明の結果

図3と図4は、対称翼の曳航速度を U=75 mm/sから U=150 mm/sの範囲で4段階に変更したときの前縁付 近のマイクロバブルの立体分布の映像である.これらにおいてマイクロバブルが右斜め下方に傾斜して移 流しているが、その理由はマイクロバブルの浮力による浮上(図では下方向)の作用による.この浮上の 作用は重要な問題ではなく、境界層の厚み方向、すなわちマイクロバブルの発色のパターンにのみ焦点を 当てて考察する.図3の(a)と(b)を比較すると、曳航速度Uによる差は、さほど顕著ではない.これに対 して図3と図4を比較すると、曳航速度Uの上昇は、マイクロバブルの粗密分布をより明確にさせる作用 をもたらすことが判る.例えば図4(b)の最大曳航速度の条件では、マイクロバブルが緑に発色する大き なクラウドを形成し、それが下流でさらに成長して黄色に発色している.このことは、曳航速度の増加 が、マイクロバブルのクラウド形成を活発化させることを意味する.マイクロバブルのクラウドが活発に 発生する理由は、乱流境界層内の乱流渦の圧力勾配の増強に対応する.すなわち乱流渦内の個々の圧力勾 配がマイクロバブルと水流の間の相対速度を誘発し、渦中心にマイクロバブルが多数集積することを意味 する.同時に、曲率による遠心加速度も増強し、それがマイクロバブルのクラウドを壁面に引き戻す作用 を発生させる.これにより大規模に成長したクラウドの中央部で壁面に向かう加速度を発生させ、クラウ ドが崩壊する.図4(b)の写真をみると、1つのクラウドが緑色、黄色、空色という異なる色で発色して いることから、マイクロバブルのクラウドの三次元的な崩壊が発生していることが裏付けられる.



(a) 曳航速度 U=75 mm/s
 (b) 曳航速度 U=100 mm/s
 図 3. 翼前縁近傍におけるマイクロバブルのレインボウ階層照明の結果



(a) 曳航速度 U=125 mm/s(b) 曳航速度 U=150 mm/s図 4. 翼前縁近傍におけるマイクロバブルのレインボウ階層照明の結果

図5は、対称翼の後端付近でのマイクロバブルの立体分布である.曳航速度について3つの条件で、同 一の可視化空間での結果を並べたものである.曳航速度がU=75 mm/sの場合は、マイクロバブルの多くが 紫色に発色しており、翼の表面付近の粘性低層に分散していることが説明できる.これに対して曳航速度 を増加させると、マイクロバブルの多くが水色に発色し、バッファー層にその位置をシフトしていること が判る.また、翼の前縁付近で観測された筋状の分布は緩和され、滑らかで拡散的な分布をもつことが判 る.すなわち物体の曲率の影響で、上流で形成されたマイクロバブルのクラウドは三次元的に崩壊し、そ の後、境界層内のせん断層に沿って流れ方向に拡散したと理解することが出来る.このように曲率の影響 は、クラウドの崩壊と境界層内への再分散を促進し、摩擦抵抗低減を促進する作用をもつことを説明でき る.なお、さらに高速の曳航実験は、リニアスライダ装置の速度の上限により実施できなかった.しかし 本結果をふまえれば、さらに高速化した条件では、マイクロバブルがさらに境界層内に一様に分布するよ うになることを容易に推測することができる.



図5. 翼後端付近におけるマイクロバブルのレインボウ階層照明の結果



図6. 翼前縁付近におけるマイクロバブルのカラータイムライン画像

以上の結果について、時間変動も可視化するために、図6と図7に、タイムライン画像を作成した結果 を示す.フレームレート120 pfsの動画を短冊状にラインサンプリングし、それを時間軸で連結したもの で、横軸は5秒間の時間である.ただし流れを右方向とした解釈を促すために時間軸は、右から左に進行 するよう作画した.図6は前縁付近の結果であり、この図から曳航速度Uが増加すると、マイクロバブル がクラウドを頻繁に形成するようになることが判る.なおU=75 mm/sの場合に時間方向に周期的に振動す る縞模様が見える.これは層流境界層のT-S不安定波であり、それがクラウドの発生のきっかけを与える 擾乱となっていることが読み取れる.従ってクラウド発生周波数はT-S不安定波が決めていると言える. その周波数は12Hz程度であることが図より計測できる.図7の下流における結果では、T-S不安定波の影 響は緩和され、時間方向にも拡散的な分布に遷移している.



図7. 翼前縁付近におけるマイクロバブルのカラータイムライン画像

2.3.2 マイクロバブル群内の突発性クーロン力作用の解析

乱流境界層内のマイクロバブルが負電荷を帯びることによる乱流渦の制御性を明らかにするため に、マイクロバブル群の三次元計測を実施し、理論解析と融合することで帯電に伴うクーロン力の分 布を割り出した.このクーロン力の測定により、マイクロバブルどうしの合体抑止臨界、ならびに再 層流化作用に関する定量的なデータを取得した。さらにこれらの現象が、摩擦抵抗低減の何割を占め るかを明らかにした。この手段として、実験には小型回流水槽を利用し、カラーグラデーション PTV 法を開発した。数値解析では実験データを入力とするクーロン力のシミュレーションソフトウエアを 開発・完成させた。

(1) 実験装置

図8(a)に計測方法の概要を示す.小型回流水槽の中央部に鉛直な平板を設置し,この表面上に電気分解 によるマイクロバブルを発生させる.このマイクロバブルを含む境界層をカラーグラデーション立体照明 し,マイクロバブルの三次元分布を計測する.H29年度は,このカラーグラデーション立体照明のみならず, 壁面の粘性低層の流れを同時に可視化するため,高速回転ディスク式の照明制御装置を設計・製作し,レ ーザーシートによる粘性低層の壁面せん断応力ベクトル分布も同時に計測した.同図(b)は,これによるマ イクロバブルの壁面に垂直な座標における時間平均濃度分布を示す.×印はレーザーシートによるマイク ロバブルの濃度分布で,マイクロバブルがクラウドを形成していても誤差なしで正確に計測されている例 である.これに対して、○と△のプロットはカラーグラデーション立体照明によるマイクロバブルの濃度 分布計測結果である.レーザーシート計測との間で,0<y<50mmの区間で差異が発生している.この差異は, マイクロバブルがクラウドを形成することによるカラーグラデーション立体照明のバイアス誤差(過小評 価誤差)である.換言すれば,この差の大きさと区間が、マイクロバブルのクラウドが発生する区間であ るとして評価することができた.



図8. クーロン力が顕在化するマイクロバブルクラウドの発生位置の計測

(2) 実験結果

カラーグラデーション立体照明法により,壁座標(0<v<20mm)を6層に分離して,それぞれのマイクロバ ブルクラウドに伴うクーロン電位を計測した. 図9にその結果を示す. この結果より, クーロン電位が最 大となるのはマイクロバブルクラウドの中心であること、クーロンカベクトルの大きさが最大となるの は、クラウドの境界付近であることが判明した. すなわちクーロン力の作用は、マイクロバブルのクラウ ドを外側に肥大させる力を発生させる.これは乱流渦の中心付近に集中しようとする個々のマイクロバブ ルの運動に抵抗を与えるもので、その作用・反作用で、乱流渦が肥大化する効果をもたらすことを説明す る.図10はコロイド分散化学の研究領域で発表されている孤立気泡のゼータ電位の計測結果である.こ こで言うゼータ電位とは気泡界面の電気二重層の自然形成に伴う液相側に生じる電位のことである.この 界面のゼータ電位を気泡中心の集中電荷として置換することでクーロンポテンシャルが定義され、気泡界 面からの距離の2乗に反比例して、気泡から離れるほどクーロン電位が低下することが判っている.本研 究で実測されたマイクロバブルのクーロン電位は、最大で -650mVを記録した. すなわち孤立気泡が作る -20mV程度の最大クーロン電位の30倍を超える. またこれに伴うクーロン力は 0.035pNを記録した. この 力の大きさはマイクロバブルに作用する揚力と同程度であり、マイクロバブルの、とくに乱流渦内の運動 に大きな影響をもつことが判明した.なお、クーロン力はポテンシャル由来の力であるため乱流渦の回転 運動には直接寄与しないことが理論的に示された.よってマイクロバブルと乱流渦のクーロン力に起因す る干渉は,発散作用に絞られることが明らかとなった.



(a) 計測位置 (b) 6層の分布 (c) y=10mmにおけるクーロン電位とベクトル 図 9. マイクロバブルクラウド内部に発生するクーロンポテンシャルと反発力ベクトル分布

最大クーロン電位 Ω_C= -650mV. 最大クーロン力 F_C= 0.035 pN を計測



図11はクーロン力の影響を受けたマイクロバブルのクラスターが粘性低層の水流に与える影響を可視 化した例である.同図(a)は粘性低層におけるマイクロバブルの分布で,粗密を伴って移流することが確 認できる.これに対して同図(b)は同じ時間における液相の速度ベクトル分布の計測結果である.粘性低 層の速度ベクトルはそのまま壁面せん断応力ベクトルに比例することから,図12に示すように(a)壁面 せん断応力の分布と,(b)レイノルズせん断応力に分解して評価することが出来た.さらに速度3成分のう ち2成分どうしの相関を計測した結果を図13に示す.これらの結果から,マイクロバブルが存在すると きは壁面せん断応力が平均で15%低下すること,低速ストリーク部分にマイクロバブルが多く分布するこ と,さらにはイジェクション部でマイクロバブルが粘性低層から消えることなど,詳細な空間構造が明ら かとなった.マイクロバブル乱流境界層の低層部分についてこのような結果を得たのは世界で例がなく, 本研究からの新しい知見である.



(a) 粘性低層のマイクロバブル (b) 壁面せん断応力ベクトル分布 図11.マイクロバブルクラウドのクーロン力により影響を受ける粘性低層の流動構造



(a) 瞬時壁面せん断応力分布 (b) 瞬時レイノルズせん断応力分布 図12. マイクロバブルクラウドのクーロン力により影響を受ける粘性低層の流動構造



(a)u'v'相関分布 (b)v'w'相関分布 (c)u'w'相関分布 図13.壁面近傍のレイノルズせん断応力を構成する速度変動相関の計測結果

2.3.3 マイクロバブルのレオロジー計測による乱流渦粘度の計測

平成28年度の委託業務において円筒のスピン振動によるマイクロバブルのレオロジー計測手法を開発した。そこでこの計測手法を応用・機能拡張し、マイクロバブル懸濁液体乱流物性全般を計測することができる超音波スピニングレオメトリを設計・構築した。この計測手法により、マイクロバブルが乱流運動量伝達の速度に及ぼす影響を、ボイド率、界面積濃度のバルク平均ならびに空間偏差の関数として計測した。空間偏差の検知には、超音波トランスデューサを高密度に配列させたアレイ式超音波イメージング技術を開発・導入した。この技術はアレイプローブとマルチプレクサの購入と、研究実施者による信号処理ソフトウエア開発により構築された。これにより、マイクロバブルの空間粗密構造と乱流渦粘度の相関関係をデータベース化した。

(1) 実験装置

図14に超音波スピニング乱流レオメトリの計測機材の概要を示す.振動回転する円筒の内部に対象と する流体を封入し,超音波ドップラー法で流体の速度分布を空間と時間の関数として計測する.円筒内に は2カ所の気泡発生ノズルを設置し,そこから静かに気泡を浮上させることでノズルが位置する半径の上 方に筒状に分布する気泡カーテンが形成される.この様子を図15に示す.この気泡カーテンの外側と内 側の間で,運動量伝達率(すなわち複素粘度)がどう振る舞うかを計測した.今回の実験では,高速流の 環境でマイクロバブルが乱流せん断変形を受けるときの,マイクロバブルのレオロジー特性を調べた.こ のとき,マイクロバブルは実すとしてマイクロメートルサイズである必要はなく,流体力学の力学的相似 性から,1ミリの気泡でも同じ結果を得ることが保証されている.このときの無次元数はキャピラリー数 Caである. Ca数が0.05以下では気泡は球形を保つのに対して、0.05<Ca<1では楕円形に変形する. Ca>1で は降伏変形状態となり周囲の液体の流れの変形に服従して際限なく変形する. 船舶など高速水流中(例え ば8m/s)の中では、直径50ミクロンのマイクロバブルはキャピラリー数が 0.05<Ca<1の範囲にあること から、直径1mmの気泡に 0.1m/sのせん断流を与えれば、無次元数による整理によって同じ結果を得る.



図14. 気泡カーテンせん断層を対象とした超音波スピニングレオメトリの実験装置



図15.円筒内に発生させた気泡カーテンの外観写真

実験円筒は内直径 2*R* = 150 nm,高さ 450 nm のアクリル製円筒容器で,供試流体には動粘性 500nm²/s (25°C)のシリコンオイルを用い,これを高さ 450 nm まで満たした. 超音波トランスデューサー (4 MHz)の計測線 (図中の中赤線)を細針先端から高さ 200 nm,円筒中心から *y* = 15 nm 離して固定した. 流体中に気泡を連続注入するために,同図の灰色で示される固定具を円筒内に設置し,回転運動とは独立させた. 内径 0.1 nm の細針を治具底部の円盤に設置し,円筒を f_r = 0.167 Hz, 10 回転することで,直径 *d* ≈ 1 nm の微細気泡を生成した. この時,円筒内の 0.8 < r/R < 0.9 に気泡がカーテン状に分布した. その後,周波数 f_0 = 1 Hz,振動回転角 Ω の正弦波速度の振動を加え,気泡変形を伴う流速変動を計測する. 図中の赤線で示される超音波計測線上において,円筒内部に伝播する非定常な振動せん断流れを流速変動として計測した.この流速変動が周方向一方向流れとして近似できる場合,周方向流速成分が正しく計算される. この定常回転と振動回転を繰り返し行うことで,計測データを50 回取得した.

(2) 実験結果

図16に、円筒内の速度分布応答の結果を示す.気泡がない場合と気泡がある場合の両方で、壁面 (r/R=1.0)から伝わる運動量が時間とともに円筒の内側に伝播する様子が計測された.気泡がある場合で は、高速度カメラによる撮影の結果(同図右側)、変形率20%程度の気泡変形振動が確認された.円筒側 面から気泡の変形を観察すると、気泡は球形、楕円形、球形という変形過程を振動回転一周期内で繰 り返すことが確認された.これはCa=0.5に対応する.



図16. 速度分布応答特性の気泡による差異と気泡変形運動の関係



図17. 気泡カーテン層における複素粘度(粘性係数と弾性係数)の計測結果

この結果をフーリエ変換することで、図17に示すような複素粘度のデータを取得することに成功した. 同図で(a)は複素粘度のうち実部を構成する粘性係数である. 横軸はせん断歪み速度で,速度分布の空間微 分により計測される. 色の違いは円筒の振動振幅の違いであり,それぞれ粘性係数が高くなる部分が気泡 カーテンが存在するところに符合する. すなわち気泡が存在する層では粘性係数が液体のそれより最大で 50%増加することが判明した. この粘度上昇は従来の定常変形理論(たとえばEinstein(1906)の理論)では 説明できない. すなわち非定常なせん断環境で気泡が変形を伴うときに発生する急激な粘度上昇と理解す ることができる. この事実は,乱流境界層中においてマイクロバブルが楕円変形を繰り返すとき,その場 の粘性係数が局所的に大きく増加することを意味し,乱流渦を鎮圧する作用があることを証拠づけるもの である. 同図(b)は複素粘度のうち虚数部である弾性係数の計測結果である. 弾性係数は気泡なしの単相時 には0であるのに対して気泡が存在することで,その界面張力(球形への復元力)から発生する. 弾性係 数は流体の変形に抵抗するものであり,乱流境界層内のスイープ,イジェクション,バーストなどの非定 常変形運動を抑える作用がある. 今回の計測結果は10~20Pa程度の弾性係数をもつことがわかり,これは 局所せん断応力のオーダーと等しいことから,弾性係数の乱流干渉に対する貢献は大きいことが判明した.

2.3.4 電気分解による反復的気泡注入法の周波数応答の調査

平成28年度の研究により周期的な電気分解の試験を終え、マイクロバブル発生の応答性が確保できることを確認した。そこで水平チャネル流路にこれを装着し、周期的に電流にオンオフ制御をかけたときの下

流におけるマイクロバブルの移流の周波数応答を調査した。

(1) 実験装置

図18は、電気分解装置を水平チャネル流路に装着したときの構造を示す.チャネル上部壁面から電極 構造が突出しないようにフラッシュマウント型の設計とした.図19はマイクロバブルの立体分布の計測 方法の概要図である.電極部の下流 300mmの位置に、斜め下方からチャネル内部に入射するレーザーシー トを設定し、上部のカメラでレーザーシートを通過するマイクロバブルの散乱光を撮影した.斜めである ことで、画像上のマイクロバブルの光散乱位置だけで、マイクロバブルのチャネル内の鉛直方向座標が特 定される.また、マイクロバブルは殆どが水平に移流するため、レーザーシートの厚みの範囲内では画面 を横切るように撮影される.これにより4時刻追跡法を適用してマイクロバブルの速度分布を計測すること ができる.このような光学計測の原理で、マイクロバブルの位置ベクトルと速度ベクトルの三次元計測が 可能となる.この方法は本課題で新たに考案したものであり、今後のマイクロバブル境界層の三次元計測 において広く活用できるものと予想される.



図18.水平チャネル流路への電気分解マイクロバブル発生装置の装着



図19. 水平チャネル流路におけるマイクロバブルの3次元分布のレーザー計測方法

(2) 実験結果

図20は高速度ビデオカメラで撮影された瞬間画像の一例である. 画角は50×50mmで, 輝度階調は 256, 画素数は1024×1024 pixである. 白い点がレーザーシート面内を通過して光散乱したマイクロバブ ルである. これを画像処理(二値化・ラベリング)により個々のマイクロバブルの画像座標を測定し, さ らに斜めレーザーシートの幾何学関係を使って奥行き座標に変換した.

図20の画像を8秒間(8×60=480フレーム)の時系列データ全体で展開したものが図21である.この 図は、水平チャネルの上半分20mmの範囲におけるマイクロバブルの全ての三次元分布を表したものであ る.さらに、レーザーシート面内を通過する連続4時刻のマイクロバブルの位置の追跡により、マイクロ バブルの主流方向とスパン方向の速度成分2つが計測された.これをマイクロバブルの位置に重ねて表示 したものが図22のマイクロバブル速度ベクトル分布である.この速度ベクトル分布から、壁面から離れ た対数則領域では、マイクロバブルがクラウドを作って間欠的に移流することが確認できた.



図20. 高感度高速度ビデオカメラによって撮影されたマイクロバブルの瞬時画像



図21. 水平チャネル上半分の乱流境界層中のマイクロバブルの三次元分布の計測結果



図22.水平チャネル中のマイクロバブルの三次元速度ベクトル分布の計測結果

図23は、マイクロバブルの三次元分布を鉛直方向(壁座標y方向)に4分割して、それぞれの層内でのマイクロバブルの断層内の粗密分布パターンを可視化した結果である.粘性低層(0<y<1mm)ではマイクロバブルがほぼ一様に分散するのに対して、バッファー層(1<y<3mm)では粗密波が縦波として出現するこ

とが判明した. さらに対数層から外層(y>3mm)ではマイクロバブルのクラウドが間欠的に通過することが 明らかとなった. このことは、マイクロバブルが壁面摩擦の抵抗低減を生じさせる際に、自然にマイクロ バブルのボイド波が発生することを示している.



図24. マイクロバブル注入に伴う乱流速度変動構造の差異の計測結果

従来までは、気泡の大きさが数ミリの場合に顕著なボイド波が発生することが知られていたが、マイク ロバブルの場合でもボイド波が内在することを突き止めたのは、世界初である.このことからマイクロバ ブルにおいても周期的な発生が、抵抗低減を促進することを裏付けるものとなった.図24は、(a)マイ クロバブルなし、(b)マイクロバブルの連続発生、および(c)マイクロバブルの周期的発生の3つの場合 で、水平乱流チャネル内の乱流速度変動構造を比較したものである.この結果から、それぞれの速度分布 が疑似カラー表現された色合いから、乱流構造がマイクロバブルによって変化していることが明らかとな った.

2.3.5 電気分解素子の二次元配列基盤の試作と水中適用試験

平成28年度は電気分解用の電極となるワイヤーを流れ方向にアノード・カソード・アノード・カソード という並び方で交互に配置し、準2次元のマイクロバブル発生面を設計した。そこでこの電気分解素子を 試作し、静止水中での気泡発生流量試験と、水平乱流チャネル中での動作試験を実施した。

(1) 実験装置

図25は、設計した二次元配列電極の構造図である.同図(a)は、銅線のアノードとプラチナ線のカソ ードを僅かに話して1本としたペアのワイヤー電極を使うもので、これを二次元化するためにサーペンタ イン形の正方領域で高濃度化し、それを複数繰り返す方式である.同図(b)は、(a)の構造をさらに横方向 に配列したものである.同図(c)は、アノードにプラチナ白金フィルム(肉厚は100nm)を、カソードに銅 線を用いたもので、両者が接触しないようビスで間隙を固定したものである.ここでカソードの銅線はジ グザグ配置させ擬似的な二次元化を実現する.同図(d)は、(c)の構造を多数並列に配列したものである.



図25. 電気分解マイクロバブル発生における二次元配列化の設計

(2) 実験結果

図25に示した4種類の二次元電極について製作した.しかし(a)のサーペンタイン型の方式はアノード とカソードの間隙を保証するような微細加工に失敗した.その理由はワイヤーの屈曲箇所が多すぎて,一 部でも接触すると電気ショートを発生するためである.従って方式(b)についても実現することが出来なか った.サーペンタイン型の二次元電極は,半導体電気回路をプリントする機材が必要であり,さらに研究 資金があれば外注によって製作可能である.そこでジグザグ電極(c)を主要な方法として採用した.図26 (a)に,ジグザグ電極によるマイクロバブル発生装置の設計図を,同図(b)に実際に製作した電極板を示す.



(a) 設計図 (b) 製作した電極の外観写真 図 2 6. 低電流で高濃度のマイクロバブルを発生させるジグザグ電極の設計と製作

図27に、静止水中でジグザグ電極によるマイクロバブルの発生性能を試験した例を示す.電源には低 電流電源を利用し、500~2000mAまでの三段階でのマイクロバブルの写真を示す.同図で左側の3つは、 通電開始から0.5秒のとき、右側の3つはほぼ定常状態に達した5.0秒のときのものである.この結果か ら、ジグザグ電極が正常にマイクロバブルを発生させることが可能であること、および従来の1本のワイ ヤからの発生に比べて高濃度のマイクロバブルを発生させることができていることを確認した.また、定 常状態におけるマイクロバブルの数密度は、1ccの水あたり300以上であった.すなわちMKS単位でのマイ クロバブル数密度は n = 300×10⁶ = 3×10⁸ (個/m3) である.なお、電流を増加するほどマイクロバブル の平均気泡サイズが増加した.このことは、マイクロバブルの浮上速度がマイクロバブルの直径に比例す るストークス抗力理論から推算できる.電流を500mAから2000mAに増加したとき、マイクロバブルのサイ ズは2倍となった.すなわち電流の平方根に比例してマイクロバブルの直径が増加し、電流に比例してマ イクロバブルの表面積(あるいは界面積濃度)が増加する.電気分解は気液界面の面積に比例する原理か ら、上記のことは物理的にも正しいと言え、ゆえに本電極が正常に機能していると結論された.



 T=0.5 sec
 T=5.0 sec

 図42.静止水中でのマイクロバブルの発生性能試験

電流 [A]	電圧 [V]	気泡発生量 [ml/s]
0.5	23	0.0833
1.0	45	0.177
2.0	79	0.350

表1 ジグザグ電極によるマイクロバブルの発生気体流量の計測結果

表1は、静止水中におけるジグザグ電極のマイクロバブルの発生流量を計測した結果である.この流量 は、水中にビーカーを設置して、その中に取り込まれるマイクロバブルの体積を5分間計測して求めたもの である.この結果より、マイクロバブルの体積流量は電流にほぼ正比例しており、ファラデー則に従って 正常に電気分解が生じていることが確認できた. 図28は、ジグザグ電極型のマイクロバブル発生装置を水平チャネル流路に装着し、マイクロバブルの 発生の様子を撮影したものである.電流は100mAから2000mAまで4段階で試験を行った.この結果、マイク ロバブルが高濃度に発生し、そのまま濃度を保って下流に流されることが確認できた.しかしながら水流 中では、マイクロバブルが一部、電極のすぐ下流で合体し、大きな気体の塊となることが判明した.これ は、ジグザグ電極の頂部から固有の縦渦が液体中に発生し、高濃度のマイクロバブルを過剰に集積させた ためと考えられる.この気体停留を防止する方法として、ジグザグ電極を水流中に突き出さずにすること が挙げられる.なお、気体の停留は電極の付近のみであり、下流では十分に分散した状態でマイクロバブ ルが放出された.この水平チャネルにおけるマイクロバブルの濃度特性については、2・3・6節で報告 したとおりである.



図28. 水平乱流チャネル中でのジグザグ電極によるマイクロバブルの発生性能

2.3.6 課題の総合的推進

本課題の成果の獲得の推進と、物理的メカニズムならびに船舶への実装方法について助言を受けるため、外部評価委員会を設置し、成果報告・討論会を開催した。

平成28年度においては、外部評価委員として、大学の名誉教授(船舶海洋工学、とくに気泡とキャビテ ーションが専門)、大学の准教授(船舶海洋工学、とくに気液二相流が専門)、独立行政法人・海上技術安 全研究所の流体制御研究グループ長(船舶の空気潤滑技術に詳しい専門家)、ならびに造船会社の事業統 括部長(造船のR&Dにおける新技術企画に詳しい専門家)より助言を頂いた.またこれら委員の方に参集し て頂き、平成29年3月10日に、東京都で本プロジェクトの成果報告・討論会を開催し、本課題の成果の獲得 を推進した。

平成29年度においては、上記の委員の方から継続的に助言を受けるとともに、特に海外動向について十 分な把握のうえで成果を推進するため、米国における船舶の空気潤滑法でリードするミシガン大学船舶海 洋工学科の教授と、マイクロバブルによる管路摩擦抵抗低減を展開するテキサスA&T大学原子力工学科の教 授との合同セミナーを北海道大学で開催した.さらに本課題に関わる欧州での動向と技術助言のため、ス イス連邦工科大学のシニアサイエンティストにも助言を継続的に受けた.なお、平成30年3月に、以上の外 部評価委員を招聘しての成果報告・討論会を企画したが、当日、北海道を襲った暴風雪の嵐により北海道 を発着する全ての航空便が欠航となったためやむを得ず中止とした.しかしながら、その後、直ちにメー ルベースで個別に助言を得ることができたため、本成果を推進することができた.

3. 成果の外部への発表及び活動

・研究成果の刊行に関する一覧: なし

・研究成果による知的財産権の出願:なし

・成果の実用化の見通し:

本課題は実用化ではなくメカニズムの解明を目的としたものである。今回の成果から、マイクロバブル による乱流摩擦抵抗低減のメカニズムの一部が明らかとなった。これにより船舶,水中高速移動体,な らびにパイプラインなどの実際の抵抗低減システムの設計が可能となる。この観点では実用化に向けた 見通しがある。

なお、本課題の遂行期間内では、得られた成果を直ちに発表するに至っていないが、今後、国際学術雑誌に複数の論文として発表する予定である.具体的には以下を計画している. (1)カラーグラデーション立体照明法によるマイクロバブルの三次元計測(Experiments in Fluids) (2)マイクロバブルの周期的発生による乱流せん断応力変調作用(Journal of Fluid Mechanics) (3)超音波スピニングレオメトリによる複素粘度の計測(International Journal of Multiphase Flow) (4)プラチナフィルムによる電気分解の高密度化技術(Chemical Engineering and Science)

4. まとめ、今後の予定

6つの項目について、それぞれ新しい計測技術が開発され、それを使った従来まで未解明であった新知 見を得ることができた.今後は、これらを元に、広く学術と産業の双方に利用できるようなマイクロバブ ルによる摩擦抵抗低減メカニズムの解明をさらに進める予定である.