気液二相流の特徴を利用した摩擦抵抗低減*

Frictional Drag Reduction with Functional Use of Gas-Liquid Two-Phase Flow Characteristics

村 井 祐 一**
MURAI Yuichi

Abstract Drag reduction using bubbles are now in operation for marine vessels, and recorded significant fuel saving. Beside it, fluid mechanics inside high-speed bubbly turbulent boundary layer is highly complex. Efforts by scientists and engineers in Japan straggled in the last 30 years and recently reached the goal. They found further potential of technical improvement with recent experimental discovery on bubbles' organizing behaviors.

Keywords: Drag reduction, Turbulent flow, Friction control, Bubble, Microbubble

1. はじめに

船舶の気泡による摩擦抵抗低減は、これ以上やっても実用化の見通しが立たないのではないかと考えていた。2017 年現在、これと正反対の議論の真っ只中にある。過去 10 年の間に、実船で幾つもの成功を収め、さらなる性能向上の伸び代が発見された。研究開発への再投資が始まる。伸び代の大部分は、大学・高専における混相流研究者とそれを支援する研究室の学生達が発掘したものと言えるかも知れない。得られる教訓は、ラボでの二相流の実験を両眼でよく観察することが如何に大切かであろう。元々の始まりは 1973 年に文献で登場する。船体をワイヤでぐるりと囲み、電流を流すと、水電解で発生したマイクロバブルが摩擦抵抗を減らすというものである。40 年を超える研究は、アメリカの McCormick & Bhattacharyya による発表[1]が原点にある。その後の研究で、数百の論文や技術報告書が発表された。この技術課題は、なぜ 40 年も経過している

のだろうか。現代の日進月歩の R&D のペースに比べて遅い。その理由には、難易度の高い、混相乱流境界層制御の問題が潜んでいた。気体を船底に吹き込めば、いつも抵抗が減るというような単純な関係が成り立たない。お風呂の中で浮上するたった 1 つの気泡の動きでさえ、決定論的には予測できないという物理が、結果を左右している。高速の乱流せん断層の中で、1 つの気泡がどう振る舞うかを究明し、予測し、制御することが出来るようになって、初めて流体力学的に裏付けられた設計が可能となる。それには確かに 40 年を要した。本稿では、サブミリスケールの微細気泡が、百メートルを超える船舶の性能を変化させるという現象について、その物理を理解しようとする立場から述べる。

2. 物理の理解に向けて

1980 年代から、世界中の研究者による摩擦抵抗低減の物理的な研究が開始された。微小気泡が抵抗を減らす事実を説明する初期の仮説は、乱流境

*2017.10.26 受付

** 北海道大学大学院 工学研究院 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
TEL: (011)706-6372 FAX: (011)706-7889 E-mail: murai@eng.hokudai.ac.jp

界層内の平均密度の低下に伴うレイノルズせん断応力の減少とされた。気泡を含ませることで乱流の慣性由来の摩擦が低下するという説である。微細気泡が、乱流のバッファ層の局所粘度を増加させ、乱流渦をかき消すというシナリオであった[2]。この定性的な説明は、同時並行に進められている検証実験のデータとは整合しなかった。密度や粘度といった物性値の変化だけで整理する均質流モデル型の解釈は、その後、破綻したと言えよう。そもそも単相流の高レイノルズ数乱流境界層の内層構造でさえ、今の時代のように詳しく分かっていなかったため無理もない。調査が進むほど、二相流の高レイノルズ数乱流境界層は、想像以上に高度であるとの認識が広がった。1992年までの成果は、当該分野でリードしていた Markle & Deutch によりレビュー論文[3]として発表されている。

著者が博士課程の学生のころ、東大船舶のグループが、微小気泡による抵抗低減技術の勉強会を組織した。日本経済のバブル崩壊後、1993～2000年の期間、省エネ促進、原油価格高騰、温暖化対策という多数の要因が研究を推進させた。ラボでの実験でも高度な計測技術が続々と投入された。2000～2010年は、気泡による潤滑技術の開発研究は内外で拡大し、研究人口でもピークを迎えた。欧・米・日の研究機関・企業が互いに競争しつつも国際会議で情報交換を密にした。それらの成果は、2010年に Ceccio がレビュー論文[4]にまとめている。

3. 流動様式線図の作成

空気潤滑法 (air lubrication) という用語がある。これは境界層に空気を混入させて潤滑の効果を得るという方法の総称である。この用語は、乱流境界層中に気泡を吹き込むと、その流量に応じて抵抗低減効果が生まれると言わんばかりである。しかし実際には、単純な因果関係はない。実験では、空気流量に比例どころか、二相流としての波動や分散が発現し、整理が困難な状況に追い込まれる。無理矢理、非常に長時間の平均を施すことで、摩擦抵抗低減率を空気流量 (あるいはボイド率) の関数としてねじ込んでいるのが実情である。このように因果関係の物理が説明できないまま設計した抵抗低減システムは、運まかせの結果しか出てこない。

Fig. 1 Transition diagram of drag reduction.

Fig. 1は、過去の多数の論文で発表されているデータに、著者のデータを重ねて、摩擦抵抗低減メカニズム遷移線図なるものを描いたものである[5]。この図の言わんとすることは、抵抗低減メカニズムが複数あり、二次元パラメータ空間で領域分けされているということである。二相流に J_G と J_L をパラメータとした流動様式線図があるとおり、平板境界層の二相流にも抵抗低減の遷移線図がある。そしてこの線図こそが、気泡による摩擦抵抗低減の設計パレットの役割を果たす。各領域の特性を理解して、実用化設計をスタートさせる事が出来る。

Fig. 1は遠目に見ると2つの領域に大別される。左上の微細気泡領域と、右下の空気膜領域である。実用化でも、これらが二大勢力を作っている。図中の G は、抵抗低減ゲインである。境界層内にボイド率1%の空気を注入すると、抵抗低減が $G\%$ 得られるという定義による。大気泡や空気膜では $G \sim 1$ となる。壁面を空気で覆った面積分だけ抵抗が減るということである。空気膜法は船底が平らでゆっくりした走行時に機能する。速度を上げると K-H 不安定や砕波により機能を失う。図の左肩には $G > 100$ となるマイクロバブル領域がある。この領域では乱流遷移が遅延する現象や乱流が再層流化する現象などが観測されている。100ミクロン以下のマイクロバブル実験では、ボイド率が僅か 0.01%でも 10%もの抵抗低減を得ている。これは複数の研究機関で異なる体系での実験をしても再現性をもつことが判明している。マイクロバブル領域の右側にある $5 > G > 1$ の領域は 0.1～1 mm 程度の気泡による抵抗低減の領域である。この区間では、乱流渦サイズと気泡サイズが同程度となり、気泡群がレイノルズせん断応力生成イ

ベントに直接干渉する。分かりやすく言うならば、乱流中のスweepやイジェクションを、気泡の俊敏な運動によって吸収し、乱流渦の活動を緩和させるということである。気泡の運動による乱れの吸収には、形状変形による作用と並進運動による作用がある。どちらも、液相中の乱れを一時的に吸収し、時間差で周囲に再放射するというバネのような効果である。つまり乱れそのものを沈静化するのではなく、乱れがもたらす運動量交換の方向を変化させるというものである。

Fig. 1 の中に横たわる黒い領域は、摩擦抵抗が殆ど減らない場合や、逆に摩擦が増えるような「逆効果」となる気泡注入条件である。左下の層流域では球形気泡による実効粘度の増加が、中段の遷移域では気泡それ自体が作り出す疑似乱流 (pseudo turbulence) が、そして右肩は気膜のせん断崩壊によるスラグ状の不安定流動が、それぞれ壁面摩擦を増大させる。逆効果の谷は過去の幾多の論文には明示されていない。失敗例は論文にならないというバイアスが作用しているためであろう。実際、数々の抵抗低減の成功例は、この黒い領域でプロットがなくなる。この谷が、空気潤滑法を、微細気泡法と空気膜法に二分している。

4. マイクロバブルの作用

それはずばり、実効粘度 (effective viscosity) による説明の復活である。球形記法ではボイド率 α に対して実効粘度が $1+\alpha$ 倍になる。Stokes-Einstein 粘度の気泡版である。気泡が無抵抗に大変形する場合は、実効粘度が $1-(5/3)\alpha$ 倍になる (Fig. 2 の左を参照)。つまり気泡は粘度を下げる効果に切り替わる。様々な気泡流は、これら 2 つの状態を遷移し、シアシニング性 (shear-thinning property) をもつ。表面張力と粘性力の比であるキャピラリー数が $Ca > 0.1$ となると、このような非ニュートン性が顕在化する。ラボでのマイクロバブルの多くは通常環境で $Ca < 0.1$ であるが、船舶では速度 5~10 m/s、境界層厚さ 10~50 mm 程度であり、100 ミクロン程度の小さい気泡でも $Ca > 0.1$ となる。実際の船舶乱流境界層中では、マイクロバブルを取り囲む液体塊は 100~1kHz のオーダーで乱流渦変形する。ここで問われるのがマイクロバブル懸濁液の粘弾性である。Fig. 2 の右側に例示したように、せん断歪み速度を高速振動させたときに、瞬時でみ

るとその場のせん断応力と気泡変形は非平衡状態となっており、気液界面張力由来の弾性が主役を担う。マイクロバブルと言うと、私達は通常、球形を想定しまうが、5 m/s を超える水流中の壁面境界層では、マイクロバブルは、周囲応力場と相互干渉する変形気泡として特徴的な作用をもたらす。このレオロジー現象の力学的相似性はダイナミック Ca 数 (せん断歪み加速度の指標) で規格化され、数ミリの気泡でも再現できる [6]。実効粘度を拡張した複素粘度 (complex viscosity) として整理が試みられている。

Fig. 2 Rheology of bubbly liquids.

マイクロバブルだけが持つ他の効果に、気液間のスリップ速度の規則性が挙げられる。ミリサイズの気泡とは異なり、マイクロバブルの並進運動を支配する力が抗力と圧力勾配力の 2 種だけに絞られるためである。乱流の不規則な非定常渦運動に対してマイクロバブルが秩序をもつ応答を示し、その結果、気液間の干渉が構造化する。このことが高い抵抗低減ゲインを作り出している。希薄濃度の場合はマイクロバブルをポイントフォースモデルで扱った DNS [7] や、テイラー渦の乱流遷移の遅延を実証する実験 [8] により、立証されている。マイクロバブルの濃度が高めになると、構造化した干渉がマイクロバブルのクラスターを誘発する。クラスターは個々の渦の中に数百個以上で形成され、瞬時局所の体積率は最密充填限界に近づく。このとき液体の 1000 倍に達する実効粘度を発生させる [9]。乱流中の渦核の運動を鎮圧・凍結する効果があるとして、現在も実験が進められている。なお、このような高集積型のクラスターが水中に発生するとき、クーロン力による反発効果が無視できなくなる。それが法線応力差や第 2 種粘性の変調も生じるとして、基礎研究が進んでいる。

5. ボイド波の積極的利用

水平チャネルでの気泡流の実験において、上流で供給する気体流量を一定に制御しているにも関わらず、下流で二相流の脈動が発達した。気泡サイズが数ミリ程度、流速は 2m/s 程度である。流路ループ全体の設計不良だと考え、長い間、脈動を除去する試行錯誤に時間を消費した。それが解決せぬまま、壁面せん断応力を計測したとき重要な発見が飛び出した。ボイドの脈動があるほうが、抵抗低減をむしろ促進していたのである[10]。そこで空気流量に人工的な脈動を与えてみた。その結果、抵抗低減がさらに向上するという実験結果を得た[11]。著者らはこれをボイド波による抵抗低減促進効果と解釈し、本腰を入れた研究に着手した。特筆すべきは、一定空気流量を流すときに抵抗低減が負に落ち込んでいた条件でさえも、ボイド波の人工的誘発によって正の効果に反転したことである。この非定常二相流の乱流境界層応答については、特殊な光学的可視化法[12]や超音波ドップラー法[13]により、その内部構造の究明が進められた。その知見は、Fig. 1 に示した逆効果の谷を解消することも可能だと、期待が高まった。同時に、そもそも一定空気流量を注入しても下流で常にボイド波が自然成長することには、流体力学的に重要な示唆が含まれていないか、という問いが共同研究者の間で議論された。他方、悲観的立場からは、ボイド波による抵抗低減は、壁で囲まれた水平チャネル内部流のみであるかも知れない、という懸念が強くなった。

2014 年、広島大学の 100m 曳航水槽施設を利用し、北海道大学が設計・製作した全面透明のアクリルモデル船を走らせた。Fig. 3 に曳航電車への装着時の外観写真を示す。船底の気泡の分布状態、気泡サイズ、気泡変形、壁面せん断応力分布を総合的に計測するモデル船である。二相流としての再現性を問う観点から、通算で 500 往復以上の繰り返し実験をこなした。その結果、気泡によって船底の摩擦抵抗低減が生じるとき、Fig. 4 に示すような明瞭なボイド波が現れることを観測した。上流の気泡発生点での空気流量の脈動は一切ないことも確認済みである。下流で成長したボイド波の周波数は、船速 2m/s では 4Hz、船速 3m/s では 7Hz であった。これにより、開いた系で壁面から発達する片側乱流境界層においても、ボイド波の形成が抵抗低減を促進するという因果関

係が存在することを確認した[14]。さらには、この現象の理論的解釈として、二流体モデルを基礎式とし、壁面摩擦抵抗とボイド率の間で、波動方程式を共有することを導いた。

Fig. 3 Fully transparent model ship.

Fig. 4 Timeline image of downstream void waves.

2017 年、同じモデル船を再び走らせた。今度は、空気流量に人工的な脈動を付与した実験を実施した。自然に成長するボイド波の周波数に比べて、人工的な周波数が高い場合と低い場合で、抵抗低減にどのような違いが現れるかを問う試験である。この結果は 2018 年の混相流シンポジウムで発表する。

6. 船舶用の気泡発生システム

船舶の航行速度では、1~100mm の気体の存在は不安定であり、微細気泡に分裂するか、空気膜に合体するかのいずれかである。初期に 2mm 程度の気泡を吹き込んだ場合は、分裂のほうが卓越し、境界層中の乱流せん断応力に支配された臨界ウェーバー数に低下するまで、分裂を繰り返す。その結果、概ね 200~500 ミクロン程度の微細気

泡となって下流に流れていく。ここでポイントとなるのは、これらのサイズの気泡は最大限の変形能をもつことである。分裂するかしらないかの臨界ウェーバー数の直下で、気泡サイズが最大頻度をとるためである。このことが複素粘度で代表される気泡群の乱流レオロジーを主要メカニズムとして議論しなければならない理由となっている。

このような理解の上で、著者のグループでは水中翼を利用した気泡発生システムを設計した。微細気泡を効果的に発生させること、そのための必要動力を最小化すること、この2つを目的とし、5年間の NEDO プロジェクト助成事業を遂行した。連携企業のランドエンジニアリング社がその実用化試験を実施した。

Fig. 5 Hydrofoil bubble generators for large ship.

Fig. 5(a) は、船底や船側の表面に装着する水中翼の動作原理イメージである。迎角を与えた翼は水流を受けることでその上部に負圧領域を形成する。この負圧領域が大気圧まで低下すると、空気導入管から自然に空気が流入するという仕組みである。翼の下流では一旦、空気だまりが形成されるが、翼の表面から偏向して回り込む水流の碎波作用で、気液界面を攪乱させ微細気泡を発生させる。ここでできた微細気泡は水流に流され下流の境界層内を移流する。これと同時に、空気溜まりには連続的に空気導入管から給気が生じる。このシステムは負圧利用式であり空気圧縮機やプロアなど外部動力が不要なのが最大の特徴で Winged Air Induction Pipe (WAIP)と名付けられ製品化された。Fig. 5の(b)～(d)はドックで施工中の船側部に見える WAIP の写真と、実際の気泡発

生の様子である。この二相流専用の翼は、船速によらず境界層内に一定のボイド率を供給する性質があることが判った。そのような幸運な機能がなぜ生じるかは、気液の各相が翼を介して合流・微細化するときの二相流のダイナミクスの問題である。ただし水中翼型気泡発生法は、二相流専用としての翼型として未だ発展途上段階にある。さらなる高機能化に向けて開発が進められている。

7. 船舶の抵抗低減への応用

Fig. 6 は、微小気泡式の船舶抵抗低減船で著者が研究に関わった船舶の外観写真である。

Fig. 6 Vessels applying bubble drag reduction.

最初は(a)釣り船で、2つの WAIP を取付け 4%の正味省エネを確認した。(b)の客船では10個の WAIP を船底に装着し、16%の燃費削減に成功した。(c)の貨物フェリーでは34個の WAIP を装着し、148日間にわたる商用航路の統計で9%の燃費削減の結果を得た。ここで9%とは148日間で55000リットルの燃料の節約を意味している。(d)

の貨物船では ISO 規定の船舶性能試験ガイドラインに従った試験の結果、10%の省エネを確認した[15]。(e)は海上安全技術研究所、東海運、三井造船、大阪大学との共同で、セメント運搬船の試験で、5%の正味省エネを得た。ただしこの例で WAIP システムは搭載していない。著者らのグループは超音波ドップラー流速分布計 (UVP) を利用して船底の二相流計測を分担した[16]。(f)の大型コンテナ船では 124 個の WAIP を搭載したが、正味抵抗低減の獲得に至らなかった。これはエンジニアの誤操作で、ブローによる過剰空気供給を行ってしまい WAIP の負圧特性を相殺してしまったためである。現在、制御系の改善を検討中である。

著者の科研プロジェクトチームで一部連携している三菱重工業の空気潤滑船 MALS [17]は世界をリードする実績で大変に有名である。米国、韓国、オランダでも試験が進んでいる。40 年以上にわたって試行錯誤が反復されてきた船舶の空気潤滑法は、二相流のダイナミクスの理解の進展とともに再び加速しようとしている。

8. おわりに

国際海事機関(IMO) は長期的数値目標として 2050 年までに海運分野の温暖化ガスを 50%削減すると発表している。内閣府は IoT の海運版として 2017 年に「*i-shipping* 構想」を発表した。船体の抵抗を減らすための気泡を利用する技術はその基幹的な手段としてブーストをかけなければならない。しかし短期的に結果を出すことに焦らず、二相流を現場でよく観察することが、結局のところ近道になることを忘れてはならない。

参考文献

- [1] McCormick, M. and Bhattacharyya, R., Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis, *Nav. Eng. J.*, Vol. 85, 11–16 (1973).
- [2] Marie, J. L., A Simple Analytical Formulation for Microbubble Drag Reduction, *J. Physico. Chem. Hydrodyn.*, Vol.13, 213–220 (1987).
- [3] Merkle, C.L. and Deutsch, S., Microbubble Drag Reduction in Liquid Turbulent Boundary Layers, *ASME Appl. Mech. Rev.*, Vol. 45, 103–127 (1992).
- [4] Ceccio, S. L., Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 42, 183–203 (2010).
- [5] Murai, Y., Review - Frictional Drag Reduction by Bubble Injection, *Exp. Fluids.*, Vol. 55, No. 1773 (2014).
- [6] Tasaka, Y., Kimura, T. and Murai, Y., Estimating the Effective Viscosity of Bubble Suspensions in Oscillatory Shear Flows by Means of Ultrasonic Spinning Rheometry, *Exp. Fluids*, Vol. 56, No. 1867 (2015).
- [7] Ferrante, A. and Elghobashi, S., On the Physical Mechanism of Drag Reduction in a Spatially Developing Turbulent Boundary Layer Laden with Microbubbles, *J. Fluid Mech.*, Vol. 503, 345–355 (2004).
- [8] Watamura, T., Tasaka, Y. and Murai, Y., Intensified and Attenuated Waves in a Microbubble Taylor-Couette Flow, *Phys. Fluids*, Vol. 25, No. 054107 (2013).
- [9] Murai, Y., Shiratori, T., Kumagai, I., Ruehs, P.A. and Fischer, P., Effective Viscosity Measurement of Bubble/Particle Mixture at High Volume Fraction by Interfacial Rheometry, *Flow Meas. Instr.*, Vol. 41, 121–128 (2016).
- [10] Oishi, Y., Murai, Y., Tasaka, Y. and Takeda, Y., Frictional Drag Reduction by Wavy Advection of Deformable Bubbles, *J. Physics Conf. Ser.*, Vol. 147, No.012020, 1–14 (2009).
- [11] Park, H. J., Tasaka, Y., Oishi, Y. and Murai, Y., Drag Reduction Promoted by Repetitive Bubble Injection in Turbulent Channel Flows, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 75, pp. 12–25 (2015).
- [12] Park, H. J., Tasaka, Y., Oishi, Y. and Murai, Y., Vortical Structures Swept by a Bubble Swarm in Turbulent Boundary Layers, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 116, pp.486–496 (2014).
- [13] Park, H. J., Tasaka, Y. and Murai, Y., Ultrasonic Pulse Echography for Bubbles Traveling in the Proximity of a Wall, *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 26: 125301 (2015).
- [14] Park, H. J., Oishi, Y., Tasaka, Y. and Murai, Y., Void Waves Propagating in the Bubbly Two-Phase Turbulent Boundary Layer Beneath a Flat-Bottom Model Ship During Drag Reduction, *Exp. Fluids*, Vol. 57, No. 178 (2016).
- [15] Kumagai, I., Takahashi, Y. and Murai, Y., A New Power-Saving Device for Air Bubble Generation Using a Hydrofoil for Reducing Ship Drag, *Ocean Eng.*, Vol. 95, pp. 183–195 (2015).
- [16] Murai, Y., Ohta, S., Shigetomi, A., Tasaka, Y. and Takeda, Y., Development of Ultrasonic Void Fraction Profiler, *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 20, No.114003 (2009).
- [17] Mizokami, S., Kawakita, C., Kodan, Y., Takano, S., Higasa, S. and Shigenaga, R., Experimental Study of Air Lubrication Method and Verification of Effects on Actual Hull by Means of Sea Trial. *Mitsubishi Heavy Ind. Techn. Rev.*, Vol. 47, No. 3, 41–47 (2010).