

〔原著論文〕

マイクロバブル研究の進展

*岡山大学大学院自然科学研究科

柳 瀬 眞一郎†

岡山大学大学院医歯薬学総合研究科

松 浦 宏 治

マイクロバブルを含む流れ、液体の研究について、最近の発展を著者らの研究を基にして解説する。最初に、マイクロバブルの一般的な物理的・化学的性質を説明する。次に、マイクロバブルを含む流れによる抵抗低減、熱伝達抑制効果に関する実験結果を述べ、最後にマイクロバブルを含む水による疎水性汚れの洗浄効果を紹介し、今後の研究発展の参考としたい。

Recent Development of the Micro-bubble Science

Shinichiro YANASE, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

Koji MATSUURA, Graduate School of Medicine, Dentistry and Pharmaceutical Sciences, Okayama University

(Received 29 May, 2015; in revised form 20 August 2015)

Recent development on the research of fluid containing micro-bubbles is addressed. First, basic physical and chemical properties of micro-bubbles are explained. Then the experimental results of flows containing micro-bubbles are shown from the viewpoint of drag reduction and suppress of heat transfer. Finally, cleaning effect using micro-bubble fluid on a hydrophobic stain is addressed, and a future study plan is given.

(KEY WORDS): micro-bubble, drag reduction, heat transfer, cleaning effect

1 序論

マイクロバブルとは液体（主に水）の中の、微小気泡の総称である。もちろん、自然界にも存在する可能性はあるが、通常は、人工的に生成される。気体としては空気が多いが、酸素、水素、オゾンもよく用いられる。マイクロバブルの直径は、通常、数10 μm で、100 μm 以下のものを指す場合が多い。一方、ナノバブルは、直径が1 μm 以下であり、多くは数百nmと推定されている。これらについて、近年活発に研究されていることはよく知られているが、その動機については以下のようなものである。最初にマイクロバブルが有名となったのは、カキの養殖であって、十分な酸素を供給するため、マイクロバブル発生装置が利用された¹⁾。ただし、この成功の原因が、マイクロバブルの特性を利用したものであるか、あるいは単に水中に酸素を供給したためであるかは若干疑わしいが、ともかくこれで一気にマイクロバブルの存在が知られるようになった。次に、浴槽内での利用で、

現在でも多くのメーカーがマイクロバブル発生装置を付けた浴槽を販売している。うたい文句は、血行がよくなり体が温まるという点であるが、これがどの程度の医学的根拠を持つのかはいささか不明である。さらに、船舶の燃料消費を抑えるため、マイクロバブルを用いた抵抗低減の試みが、いくつかの造船会社によって実行されている²⁾。これは、船底の境界層に気泡を注入するものであるが、マイクロバブルと称しているが実際の大きさは、はるかに大きい直径（中心値が0.5 mm）を持つものであり、どのような機構で抵抗低減が実現されているかについてもそれほど明らかではない。

以上述べたように、マイクロバブルは、多くの分野で様々な効果・効能があると期待され、研究されているが、その本当の物理的・化学的メカニズムはそれほどよく理解されているとは言えない。このような状況において、さらにナノバブルの研究が進んでいる。これは先ほど述べたように直径が1 μm 以下の気泡であるが、現在、光学的に観測できる気泡の大きさは、数 μm が限界であり、水中に分散しているナノバブルの存在は、光散乱法またはゼータ電位計を用いて、間接的に推定されるのみ

*〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1

†E-mail: yanase@okayama-u.ac.jp

である³⁾。

近年、著者らは、マイクロバブルの効果として、円管内流の抵抗低減、疎水性汚れの洗浄に関して、定量的な結果を得ることができた。特に、後者に関しては、そのメカニズムについてもある程度の知見が得られた。本論文では、これらの内容を中心にして、マイクロバブルの一般的な解説を行う。

2 マイクロ・ナノバブルの物理的・化学的性質

水中の気泡の形状は、重力効果を見れば、球面状となる。その理由は、気液界面に働く表面張力が曲面の曲率によって決まるため、球面でなければ表面張力のバランスが破れ、平衡形状を維持できなくなるためである。本論文で問題としているマイクロ・ナノバブルは直径が非常に小さいため、重力効果は無視できると考えられる。さらに、周囲の流体のせん断の影響により、球面から変形する可能性があるが、これも考察から除くことにする。まず、どれくらいの表面張力が働き、気泡の内外圧力差がどれくらいになるかを考えてみよう。球の半径を R とし、空気と水の界面の表面張力を σ とすると、球の内外圧力差 p は

$$p = \frac{2\sigma}{R} \quad (1)$$

となる。マイクロバブルの代表値として $R = 15 \mu\text{m}$ 、 20°C での値 $\sigma = 72.75 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ を代入すると、 $p = 9.70 \times 10^3 \text{ Pa} = 0.0958 \text{ atm}$ となる。また、ナノバブルの代表値として $R = 150 \text{ nm}$ を代入すると、 $p = 9.58 \text{ atm}$ となる。マイクロバブルでの内外圧力差は、大気圧と比べて、それほど大きな値ではないが、ナノバブルでは非常に大きく、ナノバブルの特異性が明らかである。

次に、気泡に浮力が働き上昇するときの終端速度を求めてみよう。最初に理想的な場合として、水中に分散し、周りに不純物が無い環境の気泡を考える。非常にレイノルズ数が小さい場合を考え、ストークス近似が成立すると仮定すると、気泡に働く抵抗力は、気泡の上昇速度を U 、水の粘性係数を μ とすると

$$F = 4\pi\mu UR \quad (2)$$

で、その大きさは、固体の場合の $2/3$ 倍である。さらに重力と浮力の差は、気体の密度を見れば、 ρ を水の密度、 g を重力加速度として

$$F_g = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho g \quad (3)$$

であるから、終端速度を求めるため、 $F = F_g$ と仮定すると

$$U = \frac{R^2 \rho g}{3\mu} \quad (4)$$

が得られる。半径 $15 \mu\text{m}$ のマイクロバブルでは、 20°C での値 $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ を用いると、 $U = 4.08 \times 10^{-2} \text{ m/s} = 2.45 \text{ m/min}$ となり、2秒も経過すれば、10 cm 上昇し、通常の容器では外部へ出ていくことがわかる。したがって、マイクロバブルの効果をも十分に調べるためには、常時新しいマイクロバブルを製造するような装置が必要であることがわかる。一方、半径 150 nm のナノバブルでは、 $U = 4.08 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 1.47 \text{ cm/h}$ となり、かなりゆっくりと上昇することがわかる。水道水を用い、後述するせん断方式によってわれわれの研究室で作成したマイクロバブルの観測によれば、上昇速度はすぐに終端速度に達するが、その値は、気泡ではなく、どちらかと言えば、固体球の抵抗値 $F = 6\pi\mu UR$ に対応する値

$$U = \frac{4R^2 \rho g}{9\mu} \quad (5)$$

でよく表されていることが示された⁴⁾。この原因は、不純物の存在のため、気泡の界面が固体的な性質を持っているためであると考えられている。これらの現象に対しては、サブミリスケール直径の気泡に対する富山等の詳しい研究⁵⁾があり、抗力係数 C_D の構成方程式が提示されている。また、本解説の内容と関連して、界面活性剤が気泡の運動に与える影響に関する詳細な解説が Takagi and Matsumoto⁶⁾ によって与えられている。そこでは、気泡近傍が界面活性剤等と相互作用することによっても、気泡界面がより固体的な性質を持つことが可能である現象が述べられている。

重力以外の力の影響を調べてみよう。気泡速度を一定と仮定すると、バセット (Basset) 項が残るが^{7,8)}、この項は時間とともに、 $t^{-1/2}$ に比例して減少するため、影響を与えないと考えられる。一方、ブラウン運動に起因する力を調べてみると、 20°C (293 K) では、マイクロバブルでは無視できるが、ナノバブルでは、非常に大きな影響を受けることがわかる。そのため、ナノバブルの軌跡は、力学的な運動方程式だけでは予想することができないことは明らかである。

なお、マイクロバブルはしばしば単一状態ではなく、クラウド状に空間分布をしている場合があり得る。その場合、ここで述べた水中の単一気泡を想定した議論は、常に成立するとは限らないが、マイクロバブル (ナノバブルも含めて) の研究の基礎知識として、ここで触れることにした。また、数値解析との対応を考える場合には、

なるべく少数のマイクロバブルを発生させ、計算との比較をするのが便利であり、そのための基礎ともなる。

マイクロバブルは、表面電荷に起因する静電相互作用を有する。マイクロ粒子表面におけるイオン分布のモデルである電気二重層について、図1に示す。表面電位は無窮遠を基準とした粒子表面の電位を示す。マイクロバブルの表面電位は現在のところ計測が極めて困難である。種々の分析装置を用いて計測が可能な「ゼータ電位」は無窮遠を基準とした粒子の「すべり面」における電位である。

マイクロバブルのゼータ電位はその直径が20~30 μm の場合は-30 ~ -40 mV程度であるが、マイクロバブルの直径が小さくなるにつれて低下すると報告されている^{3,9)}。マイクロバブル表面からイオン拡散層に存在するイオンの種類と構成が分かれば、マイクロバブル直径とゼータ電位との関連について理解が進むと思われる。マイクロバブルにおいてゼータ電位がマイナスになっていることは、上記すべり面において陰イオンが多数存在することに対応すると考えられる。その場合にはマイクロバブル同士が直ちに融合せず、溶媒内で分散された状態で存在することを示唆している。

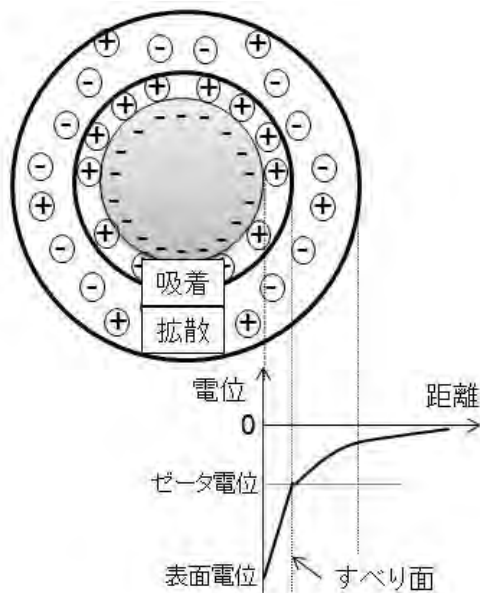


図1 電気二重層による表面電位とゼータ電位の模式図。粒子表面からすべり面までのイオンは粒子に吸着しており、すべり面から外側のイオンは粒子と共に動くものと周りの溶液内に留まるものとに分けられる。

最近の海外からのナノバブルに関する実験的研究報告に関しては、平坦な基板上に発生した直接観察が可能なナノバブルの性質についての研究がほとんどである¹⁰⁾。

¹¹⁾。その代表的な例としては、基板上に生成した直径500 nm以下のナノバブルと原子間力顕微鏡(AFM)プローブ間に働く力を計測した報告がある¹¹⁾。この力は弾性的であり、ナノバブルの直径が小さくなるにつれて、プローブ-ナノバブル間に働く力とナノバブルに由来する弾性率が上昇する。現在のところ、この弾性率が上昇する理由についてはよくわかっていない。Walczyk et al.は、AFMを用いて基板上に発生したナノバブルの物性を正確に見積もることの難しさについて言及し、親水的かつ先端が細いプローブを用いることを提案している¹²⁾。ナノバブルの表面張力 σ は、マクロスケールの気泡とほぼ同じであるため、彼らは、ナノバブルは気体分子が凝集したモデルではないと考えている¹²⁾。また、直接観察が困難である溶媒内に分散したナノバブルが有する性質の理解についても今後研究が進んでいくと思われる。

3 マイクロバブル水の生成方法

本解説では、マイクロバブル水とはマイクロバブルを含む水を意味することにする。今日用いられるマイクロバブル水の生成方法は数多いが、ここでは本研究室で用いている、マイクロバブル水の生成のための、2つの方法について簡単に説明する。

3.1 セン断法

この方法は、管内流の抵抗低減研究に用い、大量にマイクロバブルを生成するのに適している。生成原理は、サイクロンの中に、ポンプから接線方向に水を注入すると、内部に旋回流が発生する。サイクロン中心部分へ、外部から管を通して送入された空気が、低圧の回転中心部分で空気柱となり、サイクロン出口で加速された旋回流のために切断・粉碎され、微小気泡が生成される。図2に、本研究で用いた装置を示す。対面式のせん断発生装置は、山本恭二岡山大学名誉教授が、岡山大学現役当

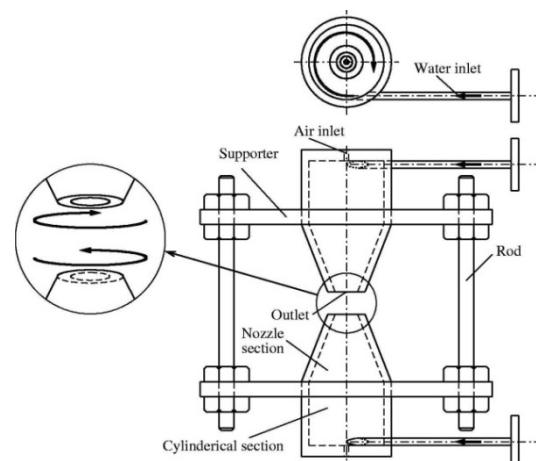


図2 セン断法

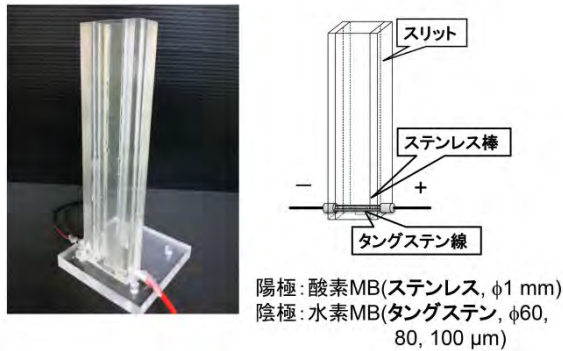


図3 電気分解法によるマイクロバブル発生装置

時に開発したもので、対面式でないものよりも、幾分か、マイクロバブル発生効率が高いことがわかっている¹³⁾。

3.2 電気分解法

この方法は、洗浄の研究に用いた。図3に示すように、水中にタングステン線を張り電流を流すことによって水を電気分解し、陰極から発生した水素気泡をマイクロバブルとして利用する。この方法では、大量のマイクロバブルを生成することはできないが、装置がコンパクトとなり、取り扱いが容易である。

これ以外にも、ベンチュリ管式、加圧溶解法、球状衝撃波、振動多孔板を用いた方法など多くのマイクロバブル生成法が実用化されているが、それに関しては近年いくつかのハンドブックが出版されているので、それらを参照していただきたい^{3,14)}。

4 マイクロバブルによる管抵抗低減効果

マイクロバブルを含む水による抵抗低減効果は比較的以前から注目されている。例えば平板における抵抗低減については、多くの研究成果がある¹⁵⁾。しかし、最も典型的な形態である円管内流における抵抗低減効果の研究は、著者らの知る限りでは、Serizawa et al.¹⁶⁾による鉛直円管内流だけであったため、Shatat et al.¹⁷⁾では円管軸を水平にして、測定を行った。

図4に、実験装置図を示す。せん断法によるマイクロバブル生成装置④で生成されたマイクロバブル水は、ポンプ⑧により、実験用テストセクション⑫へ注入され、測定後、回収される循環型となっている。マイクロバブルの平均半径は約50 μmで、水中における気体の体積比率で定義されるボイド率 α_f は0.21から0.44まで変化させた。なお、直円管の内径は22 mm、ヘリカル管では内径20 mmの管を用いた。また、5章で述べる熱伝達抑制効果の実験では、管内径は全て14.4 mmである。

マイクロバブルを含まない通常の水なら、低レイノ

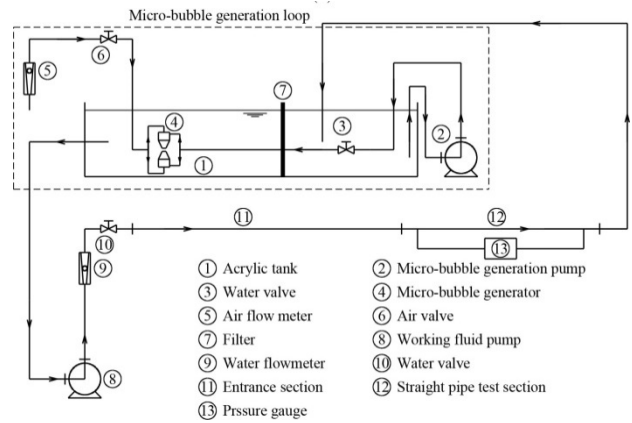


図4 マイクロバブルによる管抵抗低減効果検証の実験装置図。管内径は22 mmである。

ルズ数 $Re = d_p U / \nu < 2.3 \times 10^3$ では、通常の管抵抗係数 λ の1/4で定義された管抵抗係数 f は

$$f = \frac{16}{Re} \quad (7)$$

となることがよく知られている。ここで d_p は管直径、 U は管軸方向平均速度、 ν は動粘性係数である。また、比較的高いレイノルズ数ではブラジウスの公式

$$f = \frac{0.0791}{Re^{1/4}} \quad (8)$$

に従う。図5に、水平直管での測定結果と、式(7)、(8)、さらに鉛直管におけるSerizawa等¹⁶⁾の結果を示す。

図6には、管抵抗係数 f のマイクロバブルを含まない流体の抵抗係数 f_w に対する比

$$DR = 100 \times \frac{f_w - f}{f_w} \quad (9)$$

を示す。最大で、50%以上の低減率が得られていることがわかる。この結果からわかるように、水平管ではSerizawa等の結果¹⁶⁾ほど顕著ではないものの、乱流遷移の遅れが見られる。ボイド率を大きくすると、一層乱流遷移レイノルズ数が大きくなる。ただし、これ以上ボイド率を上げた場合、水平管では気泡が管上部へ集まり、合併によって大きな気泡を形成し、乱流遷移を遅らせる効果は発生しなくなった。なお、ヘリカル管でも、その大きさは減少するが、管抵抗の低減効果が得られている。

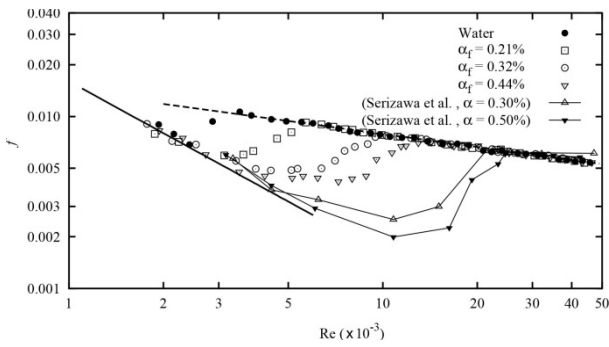


図5 管抵抗係数

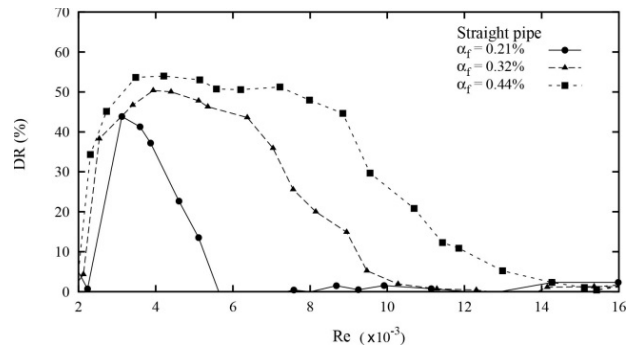


図6 管抵抗低減率

この節の最後に、マイクロバブルの注入により抵抗低減が生じる理由について、著者の見解を述べたい。界面活性剤を注入した場合は、分子の鎖状構造形成が乱流渦の発生を妨げると言われているが、マイクロバブルではそのようなことはたとえバブルがクラウドを形成しても、起こる可能性が低いと思われる。後でマイクロバブルによる洗浄に関して説明するように、バブル表面の電気的性質が、乱流渦の抑制に何らかの役割を果たしているのではないかと考えている。また、Serizawa 等による鉛直管の結果がより大きな抵抗低減を示しているが、著者らによる、円管軸を水平面から数10度傾けた実験でも、水平管と同様の結果が得られていることから推定すると、低減率の差は、管軸の重力方向との角度ではなく、むしろ

実験方法の様々な要因に起因するのではないかと予想している。

5 マイクロバブルによる熱伝達抑制効果

一般に、抵抗低減と熱伝達抑制効果は共に発生すると考えられている。その理由は、抵抗・熱伝達どちらも乱流渦によって促進されるため、何らかの効果によって乱流渦の発生が抑制されると、どちらの効果も減少すると予想されるからである。それでも、もしマイクロバブルに独自の熱伝達促進効果があるなら、乱流渦の抑制を補う熱伝達効果が観測される可能性があるため、それを調

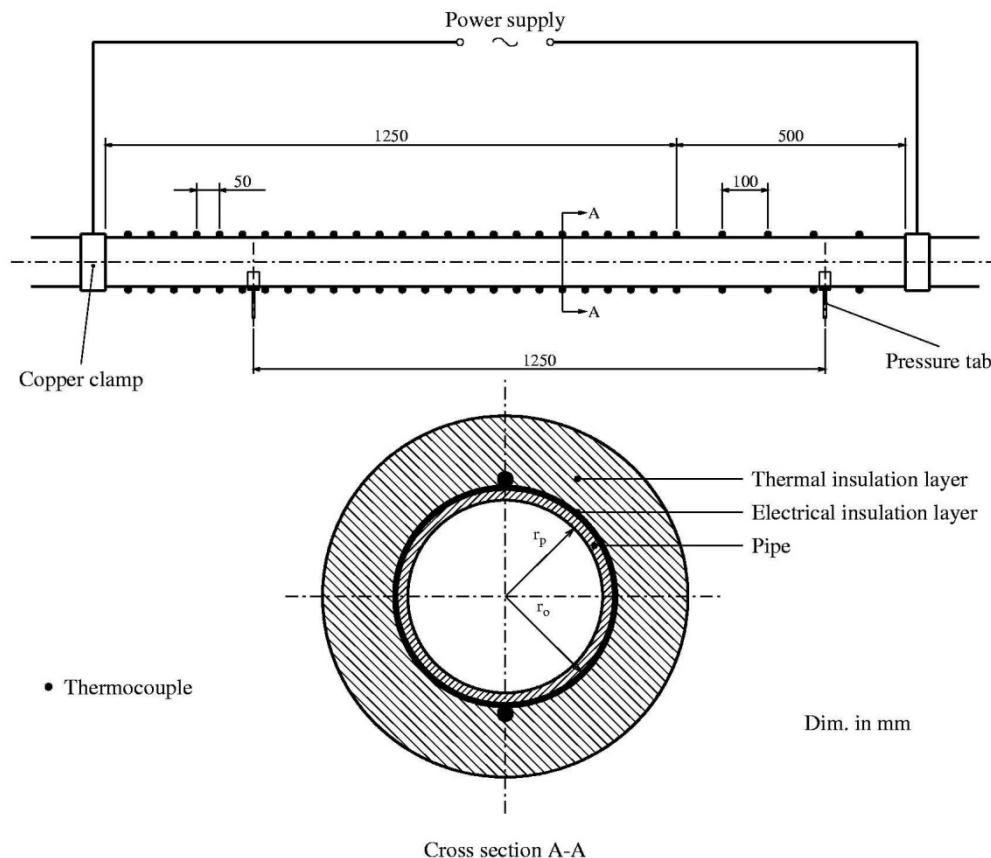


図7 熱伝達実験装置図

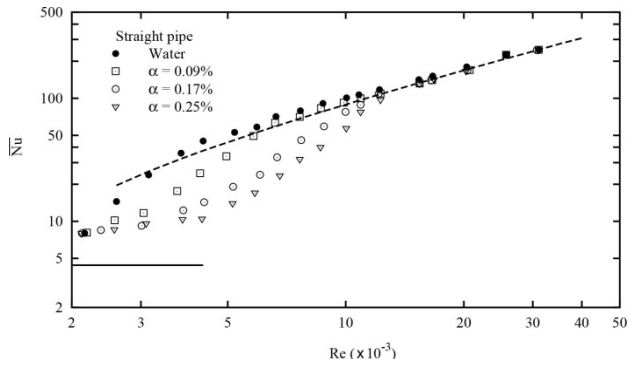


図8 ヌッセルト数

べてみた。しかし、直管において熱伝達効果を調べた結果、強い熱伝達抑制が発生することがわかった。したがって、マイクロバブルの注入による、乱流渦発生を抑制する（あるいは乱流への遷移を遅らせる）効果を補うほどの、マイクロバブルによる熱伝達促進効果は存在しないことが示された。ここではShatatの博士論文¹⁸⁾に従い、直管内流の熱伝達抑制効果を紹介する。

実験は、図7に示すように、直管の周りに断熱材を巻き、熱電対を取り付け、温度の測定を行った。得られたヌッセルト数 \overline{Nu} の結果を図8に示す。実線は直管層流の値 $\overline{Nu} = 4.36$ 、破線は、乱流に対してGnielinski¹⁹⁾によって提案された値

$$\overline{Nu} = \frac{(f/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/2)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (10)$$

である。ここで Pr はプラントル数である。これからわかるように、マイクロバブルを注入することによって乱流遷移が遅れ、そのために乱流渦が減少し、熱伝達が減少していることが示されている。

$$HTR = 100 \times \frac{\overline{Nu}_w - \overline{Nu}}{\overline{Nu}_w} \quad (11)$$

図9には、式(11)で与えられる、ヌッセルト数 \overline{Nu} の、マイクロバブルを含まない流体のヌッセルト数 \overline{Nu}_w に対する比 HTR を示す。最大抵抗低減率と比べて、最大熱伝達抑制率は約22~35%大きいことがわかる。なお、これらの低減率（抑制率）は、抵抗については管抵抗係数、熱伝達については熱伝達率で計算されているため、全く同じ基準の評価ではない。したがって、両者の定量的な比較は必ずしも可能ではない。

われわれの実験はいわゆる強制熱伝達に関する研究であるが、自然対流による熱伝達では、これとはかなり異なった結果が得られている。Kitagawa et al.²⁰⁾ による鉛

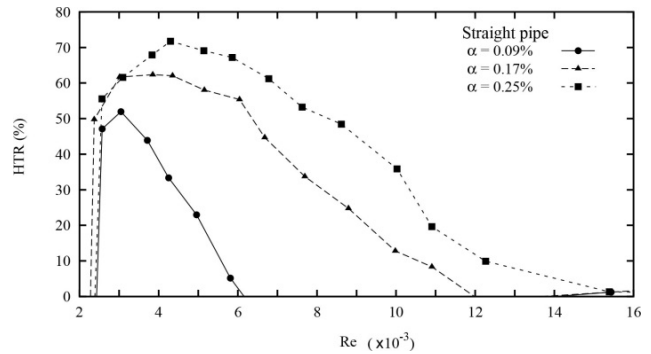


図9 熱伝達抑制率

直流体層の実験では、局所熱伝達係数が層流領域では1.6~2.0倍、遷移領域では1.5~2.0倍に増加していることが示された。論文によれば、層流領域の増加は混合効果の増加にあり、遷移領域での増加は乱流化の促進にあると述べられている。この結果は、マイクロバブルの流れの遷移に与える影響が極めて複雑であることを示している、円管内流での乱流遷移に関しても、さらなる研究が必要であることを示唆している。

6 マイクロバブルによる洗浄

マイクロバブルを用いた洗浄の応用は幾つか提案されているとともに一部は実用化されている^{1,3,21,22)}。マイクロバブルは疎水的粒子や界面に吸着するため、洗浄への応用展開が可能であるが、前述の抵抗低減や、熱伝達抑制効果と同様、定量的な研究成果は乏しく、洗浄機構面の物理的・化学的理解は進んでいない。われわれはマイクロバブルによる洗浄機構について理解するために、図3に示す電気分解法のマイクロバブル発生装置を用いて、疎水性ポリマーインクの洗浄実験を行った²³⁾。

マイクロスコープを用いて観察された本実験のマイクロバブルの直径は、30~50 μm であった。ポリマーインクの重量を測定することにより、疎水性インクの洗浄量は、発生したマイクロバブルの数と正の相関があることが示された。また観察により、マイクロバブルが疎水性インクの表面に吸着することがわかった。マイクロバブルは、溶存気体の吸収と、他のマイクロバブルとの合併によってその直径を増大させることが見られた。したがって、洗浄する物質に吸着したマイクロバブルが、直径が洗浄物質上で増大することに伴う浮力の増加によって剥離するのに伴い、疎水性インクが洗浄されることが、洗浄機構の本質的な機構であると推測している。この想定の様式図を図10に示す。この機構は、マイクロバブルおよび洗浄物質表面の物性についてさらに理解が進めば、他の様々な分野に応用できると考えている。

マイクロバブルによる洗浄技術の歯学・医学分野への応用も進められている。例えば、尿道カテーテル内や口腔内に形成するバイオフィームが、医学的に課題となっている。実際、直径 1 mm 以下の流路等の微細空間内に、バイオフィームが形成される。このようなバイオフィームを洗浄・殺菌するために、マイクロバブルが利用できると考えられる。そこで、われわれのグループでは、図 3 のマイクロバブル発生装置を用いて、土壌や多様な水系に広く分布する一般的な細菌の一種である *Micrococcus Luteus* のバイオフィーム洗浄実験を行った²⁴⁾。



図 10 疎水性インク洗浄実験で見出した、マイクロバブルを用いた洗浄機構の模式図。平行四辺形が疎水性インクを、丸い粒子がマイクロバブルを示す。

スライドガラス上にバイオフィームを作製し、図 3 に示す発生装置から発生するマイクロバブルを用いてバイオフィームの除去可能性を検討した。マイクロスコープ観察により、このバイオフィームにマイクロバブルが吸着することを確認した。また、実験後のバイオフィームを *Cristal Violet* で染色したところ、30 分間処理した後の試料においてはその輝度が低下していたことから、バイオフィーム層の厚みを減らす効果があると考えている。このマイクロバブルによる洗浄効果と殺菌剤を併用することによって、バイオフィーム内の菌を効率的に殺菌できる可能性が考えられる。

7 結言

著者らの研究に基づいて、マイクロバブルを含む流れによる抵抗低減、熱伝達抑制効果に関する実験結果を述べ、マイクロバブルを含む水による、疎水性汚れの洗浄効果を紹介した。これらは近年非常に注目されているテーマであり、大学、企業による多くの研究が報告されているが、データの厳密な検定を伴った研究はまだそれほど多くない。現時点では、マイクロバブル水のミクロな物理的、化学的、力学的機構には不明な点が多いが、著者らの一連の研究の結果から、マイクロバブルが多くの工業的応用の可能性を内包していることが明らかとなった。近い将来、各分野にわたって多彩な成果を生むことが期待される。

謝辞: 最初に、対面型マイクロバブル発生装置を開発し、研究室にマイクロバブル研究のきっかけを導入していただいた、山本恭二岡山大学名誉教授に深く感謝する。また、直管、ヘリカル管の優れた実験を行った Shatat 博士、マイクロバブル洗浄実験に携わった小山和晃、小川慧、笠木信哉君、マイクロバブルの抵抗低減効果の再現実験により、実験結果に保障を与えた河内俊憲博士に感謝する。なお、本研究は日本学術振興会科学研究補助金、基盤研究 (C24560196)、2012 年度糧食研究会研究によっている。

引用文献

- 1) 大成博文：マイクロバブルのすべて，日本実業出版社，(2006)。
- 2) 永松哲郎他：青雲丸を用いたマイクロバブルの摩擦抵抗低減実船実験—後編：実船実験一，日本造船学会論文集 192(2002)15-28。
- 3) 微細気泡の最新技術 Vol.2，エヌ・ティー・エス，(2014)。
- 4) 岩崎 正晃：マイクロバブルに関する実験的研究 (画像解析)，岡山大学自然科学研究科博士前期課程機械システム工学専攻 (機械系) 2010 年度修士論文 (2011)。
- 5) 富山明男，片岡勲，坂口忠司：気泡の抗力係数に関する研究 (第 1 報，静止液体単一気泡の抗力係数)，機論 B 編，61 巻 587 号 (1995)。
- 6) Takagi, S. & Matsumoto, Y.: Surfactant Effects on Bubble Motion and Bubbly Flows, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 43 (2011) 615-636。
- 7) Corrsin, S. & Lumley, J.: On the equation of motion for a particle in turbulent fluid, *Appl. Sci. Res. A6*, 114(1956)114-116。
- 8) Maxey, M. R. & Riley, J. J.: Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow, *Phys. Fluids* 26 (1983) 883-889。
- 9) Takahashi, M., Chiba, K. & Li, P.: Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus, *J. Phys. Chem. B*, 111 (2007) 1343-1347。
- 10) Zhang, X. & Lohse, D.: Perspectives on surface nanobubbles, *Biomicrofluidics*, 8 (2014) 041301-1-11。
- 11) Zhao, B., Song, Y., Wang, S., Dai, B., Zhang, L., Dong, Y., Lü, J. & Hu, J.: Mechanical mapping of nanobubbles by PeakForce atomic force microscopy, *Soft Matter*, 9 (2013) 8837-8843。
- 12) Walczyk, W. & Schönherr, H.: Characterization of the interaction between AFM tips and surface nanobubbles, *Langmuir*, 30 (2014) 7112-7126。

- 13) 上田 健士：マイクロバブル発生装置の開発と画像処理解析，岡山大学工学部機械工学科 2005 年度学位論文 (2006).
- 14) 丸山茂夫編：マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック，ネヌ・ティー・エス，(2006).
- 15) Murai, Y.: Frictional drag reduction by bubble injection, *Exp. Fluids*, 55:1773 (2014).
- 16) Serizawa, A., Inui, T., Yahiro, T. & Kawara, Z.: Laminarization of micro bubble containing milky bubbly flow, *Proc. the 3rd European-Japanese Two-Phase Flow group Meeting*, Certosa di Pontignano, Italy, (2003).
- 17) Shatat, M. M. E., Yanase, S., Takami, T. & Hyakutake, T.: Drag reduction effects of micro-bubbles in straight and helical pipes, *J. Fluid Sci. Tech.*, 4 (2009) 156-167.
- 18) Shatat, M. M. E.: Influence of Micro-Bubbles on the Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Water Flow in Straight and Helical Pipes, Ph.D. Thesis, The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, March, (2010).
- 19) Gnielinski, V.: New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *Internat. Chem. Eng.*, 16 (1976) 359-368.
- 20) Kitagawa, A. & Murai, Y.: Natural convection heat transfer from a vertical heated plate in water with microbubble injection. *J. Chem. Eng. Sci.*, 99 (2013) 215-224.
- 21) 宮本誠，上山智嗣，マイクロバブルを用いた洗浄技術，はじめての洗浄技術，工業調査会，(2005).
- 22) 宮本誠，上山智嗣，マイクロバブルの世界，森北出版，(2011).
- 23) Matsuura, K., Ogawa, S., Kasaki, S., Koyama, K., Kodama, M. & Yanase, S.: Cleaning polymer ink from a glass substrate using microbubbles generated by a hydrogen bubble method, *Sep. Purif. Tech.*, 142 (2015) 242-250.
- 24) 松浦宏治：2012 年度糧食研究会研究報告書 (2013).