金属表面への付着汚れに対するマイクロバブル混合液の洗浄効果*

Washing Effect of Microbubble Mixture on the Soiled Model Attached on a Metal Surface

小林 嵩 季** 牛 田 晃 臣*** 小 浦 方 格*** 瀬 戸 光 一†

KOBAYASHI Takaki USHIDA Akiomi KOURAKATA Itaru SETO Kouichi

樋 渡 忠†† 佐 藤 大 祐††† 鳴 海 敬 倫***

HIWATASHI Tadashi SATO Taisuke NARUMI Takatsune

Abstract We washed a soiled stainless-steel (SUS304) surface with attached starch paste as the soiled model because of investigating washing effect of microbubble mixtures generated by a swirling method (S-MB), a pressurized method (P-MB), and a pressurized method with a pressurized tank (NP-MB). Compared with the resultant washing rate of tap water alone, relatively high washing effect of microbubble mixtures was obtained. Furthermore, the washing effect of P-MB approximately agreed with those of S-MB. For understanding the experimental results, particle diameter change against elapsed time and static contact angle of interface between solid surface and droplet of test fluids was discussed. Particle diameters of all microbubble mixtures were changed as elapsed time. Elapsed time until collapse of P-MB higher than that of S-MB. Moreover, NP-MB exhibited highest elapsed time until collapse. Moreover, static contact angle of microbubble mixtures was lower than that of tap water alone. Correlation between washing effect and contact angle was obtained. The obtained knowledges were beneficial for many applications using fine bubble mixtures.

Keywords: Microbubble, Starch paste, Washing rate, Particle diameter, Contact angle

1. 結 論

従来から、ファインバブルを用いた洗浄技術に関する研究が行われてきた[1-3]。ファインバブルとは、粒径 100 μm 以下の微細な気泡のことであり、粒径 1 μm 以上が「マイクロバブル」、粒径 1 μm 以下が「ウルトラファインバブル」と定義されている。ファインバブルの特徴として、通常サイズの気泡の場合に比べ、水中での滞在時間が長

い、比表面積が大きい、負に帯電する表面電位特性などが報告されている[4]。また、気泡内部の気体は主に空気であり、界面活性剤などの化学物質を使用しない点も特徴の 1 つである。そのため、環境負荷低減型（ケミカルフリー）の洗浄技術として注目されており、様々な洗浄物を対象とした洗浄効果が報告されている。また、筆者らの研究グループにおいても洗濯洗浄や生野菜洗浄など

* Received: 21 September 2019 / Accepted: 15 December 2019 / Published online: 7 February 2020

** 新潟大学大学院 自然科学研究科

*** 新潟大学 自然科学系（工学部） 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

TEL: (025)262-7009 FAX: (025)262-7009 E-mail: ushida@eng.niigata-u.ac.jp

† 有限会社イワセ

†† フューテックニイガタ合同会社

††† 新潟大学 研究推進機構 超域学術院

への応用可能性を報告してきた[5-7]。一方、従来の研究において、ファインバブルの主な発生手法として、高速旋回方式が使用されてきた。この方式は、吸入孔から取り込んだ外気による安定的なファインバブル発生が可能であり、混合する気体量や成分を調整することができる大きな利点を有する。しかしながら、配管や装置に組み込む際、吸入孔設置のためのスペースや気体吸入孔などの確保が必要であり、応用の際のボトルネックの1つとなっている。一方、高速旋回方式とは異なる発生手法の1つに加圧溶解方式が挙げられる。この方式は、液体中の溶存気体を利用してファインバブルを発生させる手法である。高速旋回方式の場合と大きく異なる点として、気体吸入孔が不必要であり、配管や装置への応用に制約が少ない。すなわち、高速旋回方式におけるボトルネックの解決が期待される。しかしながら、発生量の安定性や気体混合量の調整などの課題も存在し、高速旋回方式によるファインバブルの場合に比べ、同様の特性を有するか否かを含めた知見が不足しているのが現状である。このような状況に鑑み、本研究では、ファインバブルの中でも直接観察が可能なマイクロバブルに着目し、高速旋回方式および加圧溶解方式により発生させたマイクロバブルによる流水洗浄実験に対する洗浄効果を検討し、時間経過に対する粒径の変化および静的接触角の測定により考察を行う。それらを通して、加圧溶解方式により発生させたマイクロバブルの特性に関する知見を得ることを目的とする。

2. 試験流体

本研究では、水として水道水を使用した。以下、TWと呼ぶ。pH計(HI 98106, HANNA Instruments Co. Ltd.)により測定したpHは、 $\text{pH}=6.1 \pm 0.1$ となった。また、以下に示す3種類のマイクロバブル発生装置を使用して、TWにマイクロバブルを混合した。1つ目に、高速旋回方式によるマイクロバブル発生装置(OM1-C200, Aura-Tech Co. Ltd.)を使用した。 $\text{pH}=6.0 \pm 0.1$ である。この方式は、外部から取り込んだ気体を水とともに旋回させることによりマイクロバブルを発生させる。気体として、空気を使用した。以下、S-MBと呼ぶ。2つ目に、加圧溶解方式によるマイクロバブル発生装置(Nano-Mixer, Iwase Co. Ltd.)を使用した。この方式は、液体中の溶存気体をマイクロバブル

化する方式であり、外部からの気体供給を必要としない。本研究においては、水道水を使用しているため、溶存気体は空気となる。なお、市販のポンプ(MD-100RM, Iwaki Co. Ltd.)の排出口に接続して使用した。 $\text{pH}=6.0 \pm 0.1$ である。以下、P-MBと呼ぶ。3つ目に、加圧タンクを追加した加圧溶解方式のマイクロバブル発生装置(Micro-Attack V, Iwase Co. Ltd.)を使用した。上記のP-MBの発生の際に使用した発生装置に2つの加圧タンク(内径100 mm、高さ250 mmおよび内径100 mm、高さ220 mm)を追加(発生装置の上流側)し、水の溶存空気量を増加させ、マイクロバブルの発生量を向上させている。 $\text{pH}=6.0 \pm 0.1$ である。以下、NP-MBと呼ぶ。また、マイクロバブル混合液においては気体混合量を表すボイド率が重要である。そこで、各マイクロバブル混合液のボイド率 α を以下の手順で測定した。ガラスビーカー内に満たされた5.0 LのTWに各発生装置を使用してマイクロバブルを発生させる。その後、22 °Cの室温にて60分間放置し、体積の減少量から算定したみかけのボイド率は、 $\alpha=0.16 \pm 0.1\%$ (S-MB)、 $\alpha=0.17 \pm 0.1\%$ (P-MB)、 $\alpha=0.97 \pm 0.1\%$ (NP-MB)となり、S-MBおよびP-MBの場合はほぼ同じ値となった。また、NP-MBの場合は加圧タンクを追加しているため、5倍以上高い値となった。なお、本測定におけるボイド率は、水の蒸発量を考慮していないため、「みかけ」のボイド率である。しかしながら、同一条件で測定を行っており、相対関係に変化はないと考えられる。

3. 汚れモデル

洗浄対象として、市販のデンプンのり(ヤマト糊, Yamato Co. Ltd.)を使用した。デンプンのりは、デンプン($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)と水を主成分としており、水溶性である[8]。使用する際は容器から直接取り出したゲル状のデンプンのりを使用し、加水や乾燥は行わない。また、デンプンのりの特性を把握するため、隙間100 μm 、角度2°のコーンプレート(外径35 mm)を取り付けた応力制御型レオメータ(HAAKE MARS III, Thermo Scientific Co. Ltd.)を使用し、ひずみ1%における定常せん断粘度 η とせん断速度 SR の関係をFig. 1に示す。これを見ると、せん断粘度がせん断速度に依存し減少するシアニングを有する非ニュートン粘性を有

Fig. 1 Shear viscosity η plotted against shear rate SR of starch paste via stress-controlled rheometer with strain; 1 %.

Photo 1 Schema of the soiled model and image of stainless-plate attached starch paste.

することが分かった。べき乗則モデル (式(1)) により評価される擬塑性粘度は、 $m = 2.15 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ 、構造粘度指数は、 $n = 0.364$ となった。

$$\eta = m(SR)^{n-1} \quad (1)$$

また、計量容器による容積 15 mL のデンプンのりの質量測定から算定した密度は、 $\rho = 1.13 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ となった。なお、半透明の白色であるため、ブリリアントブルーFCF (青色 1 号、Wako Pure Chemical Industries Co. Ltd.) を混合 (0.40 wt%) し、着色した。ブリリアントブルーFCF 混合が粘度および密度に影響しないことを予備実験にお

Fig. 2 Schematic diagram of (a) the experimental apparatus for measuring washing effect via flow-washing and (b) the used plate (stainless-steel, SUS304).

いて確認している。汚れモデルの例を Photo 1 に示す。

4. 実験装置

Fig. 2 に実験装置の概要を示す。アクリル製タンク (幅 800 mm、高さ 300 mm、奥行 300 mm) に洗浄部 (幅 110 mm、高さ 50 mm、長さ 600 mm) が接続されている (Fig. 2(a))。タンク下部が水道と直結されており、一定の流量で水を流動させることができる。このとき、洗浄部に汚れモデルを付着させた金属板を設置 (洗浄部入口から 355 mm の位置) し、以下の手順で流水による洗浄を行う。まず、デンプンのりを付着させた金属板を実験装置に設置する。次に、タンク内において高さが 240 mm 程度 (洗浄部へ流動しない程度の目

安高さ)まで水道水を溜める。この際、一度水道蛇口を閉じて、ポンプ循環によりマイクロバブルを発生させる(発生装置を取り付けたポンプを300秒間稼働させる)。その後、再度水道蛇口を開けて、流量($Q = 5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)の条件により、洗浄部に試験流体を流動させる。この際、マイクロバブルの発生は洗浄終了まで常時に行った。なお、水道水によるマイクロバブル量の低下が考えられるが、目視にて白濁状態に影響はないことを確認しており、すべての発生装置において同一条件で実験を行っているため、相対関係に影響はないと考えられる。また、前述の汚れモデルを金属板に付着させて被洗浄物とした。Fig. 2(b)に示すように、直径90 mm(厚さ1 mm)の金属板に直径80 mm(厚さ1 mm)の金属板を接着し、1 mmの段差がある形状とした。汚れモデルを付着させ、ある程度均一になるようにヘラで延ばす。洗浄前の平均付着量は、2.0 gである。金属板上での汚れモデルの厚さは約0.5 mmであり、洗浄部での液面高さ約7 mmに比べ、十分に小さい。また、流量 Q を液面高さ7.0 mmおよび流路幅110 mmで除した平均流速は $V = 0.65 \text{ m/s}$ であり、流動におけるみかけのせん断速度は $SR_{app} = 9.2 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$ である。レオメータ内のクエット流れと洗浄時の自由表面流れの違いはあるが、デンプンのりのせん断粘度は、 $\eta = 1.1 \times 10^1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ と算定することができる。また、液面高さを代表長さとした場合の水単層を仮定したレイノルズ数は、 $Re = 4.5 \times 10^3$ である。

5. 実験結果

5.1 評価方法

試験流体の洗浄効果を定量的に評価するため、質量変化量 ΔM および洗浄速度 W を定義した。

$$\Delta M = m_w - m_0 \quad (2)$$

$$W = \frac{d(\Delta M)}{d(t_w)} \quad (3)$$

ここで、 m_0 はデンプンのりの初期質量、 m_w は洗浄後のデンプンのりの質量、 t_w は洗浄時間である。洗浄後の質量は洗浄後に金属板を洗浄装置から取り出し、校正済みの電子天秤(MP400, Mettler Toledo International Inc.)を用いて測定した。取り出した金属板は、汚れモデルおよび水分を拭き取

Fig. 3 Experimental results for plotting mass change ΔM against washing time t_w for test fluids (TW: tap water, S-MB: microbubble mixture generated by the swirling method, P-MB: microbubble mixture generated by the pressurized method, and NP-MB: microbubble mixture generated by the pressurized method with the pressurized tank). Also, liner gradient between ΔM and t_w is defined as washing rate W .

った後、再度汚れモデルを付着させて実験に用いた。そのため、本実験における洗浄時間は連続した洗浄を示すものではなく、任意の洗浄時間まで汚れモデルを洗浄した結果となる。また、洗浄速度 W は、 ΔM および t_w の関係を最小二乗法により線形近似し、その傾きから算定した。

5.2 洗浄実験結果

Fig. 3に実験結果を示す。縦軸は質量変化量 ΔM 、横軸は洗浄時間 t_w である。試行回数10回の平均値をプロット表示、最大値と最小値の範囲をバーとして示す。まずは、水(TW)の実験結果について示す。 $0 \text{ s} < t_w < 60 \text{ s}$ の範囲では、 ΔM は正の値となった。これは、洗浄後質量が初期質量よりも増加したことを意味する。つまり、流水への接触直後の時間帯においては、水溶性のデンプンのりが水を吸収していると考えられる。また、 $t_w = 90 \text{ s}$ 以降では、 ΔM が負の値となり、 t_w の増加につれて、 ΔM の値が減少した。すなわち、流水

Photo 2 Example for particle diameter D_p against elapsed time t_e (apparent elapsed time until collapse t_{app}) of P-MB.

により洗浄が行われていることが分かる ($t_w=600$ sにおいては、 $\Delta M=-1.12$ gである)。

次に、マイクロバブル混合液の実験結果について示す。 $0 \text{ s} < t_w < 60 \text{ s}$ の範囲では、TW の場合と同様に ΔM が正の値となった。また、 $t_w=600$ sにおいては、 $\Delta M=-1.28$ g (S-MB)、 $\Delta M=-1.24$ g (P-MB)、 $\Delta M=-1.32$ g (NP-MB) となり、TW の場合よりも高い質量変化(洗浄効果)となった。なお、上記の差は、有意水準 5 % の t-検定により、有意性を確認している。また、誤差を考慮して、60 s から 600 s までの洗浄時間範囲における質量変化量を線形近似して算定した洗浄速度 W で比較した場合、水の洗浄速度 $W=2.30$ mg/s に対し、 $W=2.48$ mg/s (S-MB)、 $W=2.43$ mg/s (P-MB)、 $W=2.74$ mg/s (NP-MB) となり、式(4)に示すような水の値に対する上昇率 β は、 $\beta=7.8$ % (S-MB)、 $\beta=5.6$ % (P-MB)、 $\beta=19.1$ % (NP-MB) となった。

$$\beta = \frac{W|_{mb}}{W|_{tw}} \quad (4)$$

すなわち、加圧溶解方式によるマイクロバブルにおいても高速旋回方式によるマイクロバブルと同様の洗浄効果を有することを確認することが

できた。さらに、加圧タンクを追加した加圧溶解方式によるマイクロバブルにおいては、最も高い洗浄効果を有することが分かった。

6. 考 察

前述の通り、マイクロバブル混合液による洗浄の高効率化を確認することができた。また、知見の少ない加圧溶解方式によるマイクロバブルの洗浄効果は高速旋回方式による場合と同程度である(溶存気体量を増加させた場合は向上する)ことが分かった。ここでは、マイクロバブルの特性の 1 つである粒径の時間変化および洗浄に大きく関係する物理量の 1 つである濡れ性について考察を行い、実験結果と考察をまとめる。

6.1 粒径の時間変化

通常サイズの気泡は浮力により上昇し気液界面において破断する一方、マイクロバブルは液体中における自己圧壊が報告されており、液体中において時間経過により粒径が小さくなる[9]。通常サイズの気泡とは異なる現象であるため、マイクロバブルを特徴付ける物理量の 1 つと考えることができる。そのため、発生装置を 300 秒間動作させた後、採水しガラス平板に挟み倒立型顕微鏡

Fig. 4 Particle diameter D_p as a function of elapsed time t_e (apparent elapsed time until collapse $t_{app} = t_e - 300$) for (a) S-MB, (b) P-MB, (c) NP-MB, and (d) all data.

(IX71, Olympus Corporation)により直接観察を行った。Photo 2 に P-MB の場合の一例を示す。採水直後(発生装置稼働開始からの経過時間 $t_e = 360$ s、観察開始からの経過時間 $t_{app} = 60$ s) の場合、 $D_p = 39.0 \mu\text{m}$ であり、 $t_e = 560$ s ($t_{app} = 260$ s) において、 $D_p = 22.8 \mu\text{m}$ 、 $t_e = 660$ s ($t_{app} = 360$ s) の時点で自己圧壊に至った。Fig. 4 に測定結果を示す。なお、プロットは 10 点の平均値を表し、バーは最大値と最小値の範囲を表す。S-MB の場合、時間経過により、初期平均粒径 $42 \mu\text{m}$ から粒径が

徐々に小さくなり、従来の研究と同様に自己圧壊を確認することができた (Fig. 4(a))。また、 $t_e = 460$ s において、自己圧壊に至ることが分かる(発生装置稼働時間を考慮すると、 $t_{app} = 130$ s が自己圧壊に至るまでの正味時間となった)。

次に、P-MB の場合、初期平均粒径が $45 \mu\text{m}$ から粒径が徐々に小さくなり、S-MB の場合と同様の傾向を示した一方、自己圧壊に至る経過時間が $t_e = 660$ s ($t_{app} = 330$ s) となった。これは、S-MB の場合よりも 200 s も長い(約 2.5 倍)。すなわち、

P-MB の場合の方が自己圧壊に至るまでの時間が長いことが分かった (Fig. 4(b))。

最後に、NP-MB の場合について示す (Fig. 4(c))。初期平均粒径 $59\text{ }\mu\text{m}$ となり、上記 2 つの場合よりも少し大きな値となり、測定開始直後は粒径が増加した。その後、徐々に小さくなり、自己圧壊に至った。また、自己圧壊に至るまでの経過時間が $t_e = 1200\text{ s}$ ($t_{app} = 870\text{ s}$) と長い点も特徴的な結果となった。

以上のように、S-MB と P-MB を比較すると、マイクロバブルの初期粒径はほぼ同じ値となることや時間経過により粒径が小さくなることについては同様の傾向を示した。しかしながら、自己圧壊に至るまでの時間については、P-MB の方が約 2.5 倍長いことが分かった (Fig. 4(d))。これは、発生方式に起因することが考えられる。S-MB の場合は水として (金属イオンや目視では確認できない程度のゴミなどの不純物を含んだ) 安定状態にある水道水に外気をマイクロバブル化し混合する方式である。一方、P-MB の場合は、水として安定状態にある水道水中の溶存空気をマイクロバブル化している。つまり、発生装置に入る前の水道水の安定状態からマイクロバブル化した後の不安定状態への状態変化の点で考えると、(ほぼ同程度のボイド率であることを踏まえても) 強制的に空気を混合している S-MB の方がマイクロバブル混合による状態変化の割合が大きいと推察することができる。そのため、安定状態からの状態変化が小さい P-MB の方が自己圧壊に至る時間が長くなったと考えられる。また、NP-MB の場合も加圧タンクによる溶存空気量増加により安定状態からの状態変化は大きいと考えられる。そのため、一度、粒径が大きくなると考えることができる。しかしながら、ボイド率が高いため、マイクロバブル発生量が多い。そのため、マイクロバブル間の相互作用 (例えば、表面電位特性に起因する相互作用など) が上記 2 つの場合よりも大きくなる[10]。つまり、ある程度の粒径 (本研究の場合は約 $87\text{ }\mu\text{m}$) において、電気的な安定状態となり、通常マイクロバブルの特性と同様 (時間経過により粒径が減少する。) になると考えられる。なお、これらを明らかにするためには、脱イオン水や超純水などを使用して、使用する水の条件を変化させることにより検討することが必要と考えられ、今後の課題である。

Photo 3 Example for a droplet of TW on Teflon surface. Definition of static contact angle θ_s (Interface between solid surface and test fluids).

また、洗浄実験において、洗浄部入口から金属板に到達するまでに要する時間が約 0.55 秒 ($= 355 \times 10^{-3} \div 0.65$) であるため、一連の粒径測定から、自己圧壊前の状態でマイクロバブルが洗浄部に到達している。

6.2 濡れ性

従来研究において、洗剤の主成分である界面活性剤水溶液を使用した布洗浄を対象とした実験について、洗浄率と濡れ性の関係 (洗浄率向上と濡れ性向上の相関) が報告されている[11]。また、ウルトラファインバブル混合液においても同様の関係を有することも報告されている[5]。しかしながら、上記の関係はリング法 (du Noüy 法) を使用した静的表面張力により得られた関係である。この手法は高い精度で表面張力が測定可能である一方、測定に時間を要する (数分～10 分程度) ことが課題である。特に、マイクロバブルのように、時間経過により粒径が変化 (10 分程度で消失) する場合は不向きである。そこで、固体表面に液体を滴下し静的接触角を測定して濡れ性について考察を行う。本手法は、リング法に比べ、使用する液体量が少なく、測定時間が圧倒的に短い (数秒程度) ことが特徴である。本研究では、固体にテフロン面を使用し、試験流体を $30\text{ }\mu\text{L}$ 滴下する。その際、ハイスピードカメラ (VW9000, Keyence Co. Ltd., Japan) を使用して撮影、画像解析を行い静的接触角 θ_s を測定した。TW の測定例を Photo 3 に示す。この場合、 $\theta_s = 106^\circ$ である。

Fig. 5 Static contact angle θ_s versus test fluids.

実験結果を Fig. 5 に示す。プロットは 10 点の平均値を表し、バーは最大値と最小値の範囲を表す。これを見ると、3 種類のマイクロバブル混合液の接触角は、水の値に対して、低い値となった。なお、有意水準 5% の t-検定により、有意性を確認している (Fig. 5 中のアスタリスクは、水の値に対して有意差があることを示している。)。具体的には、 $\theta_s = 105^\circ$ (TW)、 $\theta_s = 99.3^\circ$ (S-MB)、 $\theta_s = 101^\circ$ (P-MB)、 $\theta_s = 98.3^\circ$ (NP-MB) となった。このとき、S-MB、P-MB、NP-MB の接触角の 3 つの値に有意差がないことも確認している。つまり、マイクロバブル混合により、水の値に比べ、接触角が低下 (濡れ性が向上) しており、従来の研究 [5, 11] と同様の関係を有することが示唆された。一方、洗浄率と濡れ性の関係を考えると、水の場合に比べ、洗浄率が向上した点についてはマイクロバブルが混合されたことによる濡れ性向上が要因と考えられる。しかしながら、マイクロバブル混合液ごとの違いについては濡れ性以外の要因に起因する可能性がある。特に、ウルトラファインバブル混合液を使用した筆者らの先行研究 [5] とは異なる要因に基づくと考えられる。

次に、ボイド率と濡れ性の関係について考察を加える。S-MB および P-MB の場合、ほぼ同じボイド率であり、静的接触角の値も同程度である。しかしながら、NP-MB の場合は、上記 2 つの場合に比べ、ボイド率が 5 倍以上高いにもかかわらず、静的接触角の値が上記 2 つの場合と変わらな

い (有意差が存在しない)。静的接触角は静止状態における固液界面 (厳密には三相界面) の表面エネルギーのつり合いを表すものである [12]。つまり、固液界面に作用するマイクロバブルの数により濡れ性が変化すると考えることができる。すなわち、NP-MB の場合も S-MB および P-MB の場合と同程度のマイクロバブルが固液界面 (および界面近傍) に作用しているため、濡れ性の変化が発現しなかったと考えることができる (固液界面に作用しないマイクロバブルは、バルク中に存在している)。なお、これらを明らかにするためには、静止状態ではなく動的 (例えば、液滴を滑落させた) 状態における接触角 (動的接触角) などの測定を踏まえて検討することが必要である。特に、流水洗浄においては動的な現象となるため、洗浄率の違いを深く考察できると考えられるが、今後の課題である。

6.3 まとめ

実験結果および考察をまとめると、流水洗浄における洗浄率向上と濡れ性向上の関係が成立していることを確認することができた一方、発生方式やボイド率との関係は未解明な部分が多い。この点については、本研究で使用した方式とは異なる発生方式の使用やボイド率の変更などを行い系統的に考える必要がある。マイクロバブルの特性をより深く理解する上では有用な知見に成り得るが、加圧溶解方式によるマイクロバブルに関する知見を得ることを主旨とする本研究においてはそこまで踏み込まないものとする。しかしながら、洗浄効果に関して系統的な整理を行うための考察を加える。式 (5) に示すような水の値に対する濡れ性の上昇率 γ は、 $\gamma = 5.7\%$ (S-MB)、 $\gamma = 3.9\%$ (P-MB)、 $\gamma = 6.8\%$ (NP-MB) であり、洗浄速度の上昇率と濡れ性の上昇率の関係を Fig. 6 に示す。

$$\gamma = \frac{\theta_s|_{mb}}{\theta_s|_{nw}} \quad (5)$$

縦軸は洗浄速度の上昇率 β 、横軸は濡れ性の上昇率 γ である。また、べき乗の関係を仮定した場合、 $\beta = 0.943 \times \gamma^{1.39}$ となった。この関係は水のみの場合に対する洗浄速度および濡れ性の上昇率の関係を示すものである。本研究における条件ではマイクロバブル混合液の値は 3 点のみと限定的であるが、べき乗指数が 1.39 であることを考慮す

Fig. 6 β (ratio between washing rate of microbubble mixture and that of TW) plotted against γ (ratio between static contact angle of microbubble mixture and that of TW). Solid-line is power-law relationship by the resultant values.

ると、マイクロバブル混合による濡れ性上昇に起因して洗浄率が上昇する、つまり、濡れ性向上の効果がマイクロバブルによる洗浄を効率的に行うためには重要となることを意味している。

以上の通り、高速旋回方式および加圧溶解方式によるマイクロバブル混合液を対象として、洗浄効果および特性に関する知見を得ることができた。特に、加圧溶解方式によるマイクロバブルも高速旋回方式によるマイクロバブルと同程度の洗浄効果を有し、加圧タンクなどの利用による効果向上に関する知見は応用の際の有益な知見と考えられる。しかしながら、特性変化を踏まえた洗浄効果のメカニズムについては依然として未解明な部分も多く、今後は被洗浄物を変更するなどの実験を行い多角的な考察が必要と考えられる。

7. 結 論

本研究では、高速旋回方式および加圧溶解方式（加圧タンクを追加した加圧溶解方式）により発生させたマイクロバブル混合液の洗浄効果について、デンプンのりを対象とした流水洗浄実験により評価し、マイクロバブルを特徴付ける物理量である自己圧壊に至るまでの時間および洗浄効

果に関する物理量である接触角についての考察を行い、以下の知見を得た。

水の場合と比べ、マイクロバブル混合液の汚れの除去率が高い値を示した。また、加圧溶解方式により発生させたマイクロバブル混合液は、高速旋回方式により発生させたマイクロバブル混合液と同程度の洗浄効果を有することが分かった。さらに、加圧タンクを追加し、マイクロバブルの発生量を増加させた場合はより高い値を示した。

直接観察により測定した粒径の時間経過に対する変化について、加圧溶解方式により発生させたマイクロバブルの測定開始時の平均粒径は、高速旋回方式により発生させたマイクロバブルの場合と同程度であった一方、自己圧壊に至るまでの時間は2.5倍程度長くなった。さらに、加圧タンクを追加した場合は、一度粒径が大きくなってから徐々に減少し自己圧壊に至り、自己圧壊に至るまでの時間も他2つの場合よりも長くなった。

濡れ性の評価として、テフロン面に対する静的接触角測定を行い、マイクロバブル混合液による接触角減少（濡れ性向上）を確認し、布を対象とした洗浄実験で得られている従来の研究の関係と同様の関係（洗浄効果上昇と濡れ性上昇）を有することが分かった。

謝 辞

実験装置の作製の際、新潟大学 技術専門職員 萱場龍一氏に多大なご協力を頂きました。また、実験の一部は、新潟大学 流体力学研究室 富澤郁海氏にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

D_p	: particle diameter	[μm]
m	: dilatant viscosity	[$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$]
m_0	: initial mass	[g]
m_w	: mass after washing	[g]
n	: power law index	[-]
Q	: flow rate	[m^3/s]
Re	: Reynolds number	[-]
SR	: shear rate	[s^{-1}]
SR_{app}	: apparent shear rate	[s^{-1}]
t_{app}	: apparent time until collapse	[s]
t_e	: elapsed time	[s]
t_w	: washing time	[s]

V	: mean velocity	[m/s]
W	: washing rate	[mg/s]

Greek letters

α	: apparent void fraction	[%]
β	: ratio between washing rate of microbubble mixture and that of tap water	[%]
γ	: ratio between contact angle of microbubble mixture and that of tap water	[%]
ΔM	: mass change	[g]
η	: shear viscosity	[Pa·s]
θ_s	: static contact angle	[°]
ρ	: density	[kg/m ³]

Subscripts

mb	: microbubble
tw	: tap water

参考文献

- [1] Tano, Y., Iizuka, A., Shibata, E. and Nakamura, T., Physical Washing Method for the Removal of Press Oil Using the High-Speed Movement of Microbubbles Under Ultrasonic Irradiation, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 52(44), 15658-15663 (2013) (doi: 10.1021/ie401991c).
- [2] Tamura, N., Kaneko, A., Uesawa, S., Abe, Y. and Ike, M., Development of Non-Chemical Micro-Bubble Washing Technology Using a Venturi Tube, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 27(5), 577-584 (2014) (doi:10.3811/jjmf.27.577).
- [3] Minagawa, H., Sugimoto, K., Kurimoto, R. and Yasuda, T., Basic Study on Immersion Cleaning Using Microbubble Water, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol. 17(4), 298-303 (2018) (doi: 10.11395/jjssem.17.298).
- [4] Han, M. Y., Kim, M. K. and Ahn, H. J., Effects of Surface Charge, Micro-Bubble Size and Particle Size on Removal Efficiency of Electro-Flotation, Water Science and Technology, Vol. 53(7), 127-132 (2006) (doi:10.2166/wst.2006.216).
- [5] Ushida, A., Hasegawa, T., Takahashi, N., Nakajima, T., Murao, S., Narumi, T. and Uchiyama, H., Effect of Mixed Nanobubble and Microbubble Liquids on the Washing Rate of Cloth in an Alternating Flow, Journal of Surfactants and Detergents, Vol. 15(6), 695-702 (2012) (doi:10.1007/s11743-012-1348-x).
- [6] Ushida, A., Hasegawa, T., Amaki, K. and Narumi, T., Effect of Microbubble Mixtures on the Washing Rate of Surfactant Solutions in a Swirling Flow and an Alternating Flow, Tenside Surfactants Detergents, Vol. 50(5), 332-338 (2013) (doi:10.3139/113.110265).
- [7] Ushida, A., Koyama, T., Nakamoto, Y., Narumi, T., Sato, T. and Hasegawa, T., Antimicrobial Effectiveness of Ultra-Fine Ozone-Rich Bubble Mixtures for Fresh Vegetables Using an Alternating Flow, Journal of Food Engineering, Vol. 206, 48-56 (2017) (doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.03.003).
- [8] Food Science Handbook Editorial Committee ed., Food Science Handbook (in Japanese), 161, Kyoritsu Publishing, Tokyo (1978).
- [9] Li, P., Takahashi, M. and Chiba, K., Degradation of Phenol by the Collapse of Microbubbles, Chemosphere, Vol. 75(10), 1371-1375 (2009) (doi:10.1016/j.chemosphere.2009.03.031).
- [10] Takahashi, M., ζ Potential of Microbubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas-Water Interface, The Journal of Physical Chemistry B, Vol. 109(46), 21858-21864 (2005) (doi:10.1021/jp0445270).
- [11] Karasawa, M., Hasegawa, T., Komaki, M. and Narumi, T., Washing Method by Introducing Air Into an Alternating Flow System, Journal of Oleo Science, Vol. 55(10), 521-527 (2006) (doi: 10.5650/jos.55.521).
- [12] Kwok, D. Y. and Neumann, A. W., Contact Angle Measurement and Contact Angle Interpretation, Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 81(3), 167-249 (1999) (doi:10.1016/S0001-8686(98)00087-6).