

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500919

研究課題名(和文) 洗浄における洗剤使用量低減化の試み—ナノバブル水の流動特性と洗浄性能の解明—

研究課題名(英文) Try for Reduce the Amount of Detergent Usage for Washing-Investigation of the Flow Behavior and Washing Effects of Nano bubbled Water-

研究代表者

天木 桂子 (AMAKI, Keiko)

岩手大学・教育学部・准教授

研究者番号：80193019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：洗浄機構に関わる物理的、機械的作用を流体力学の面から検証するため、洗浄液の流れを積極的に活用することを目的とし、現在洗浄液の主流である界面活性剤水溶液に代わる溶液を提案し、その使用量を低減化することを目指した。代替流体の候補は、微小な気泡を泡含させたマイクロバブル水およびナノバブル水で、その流動挙動を単純化したモデル流路を作成して実験を行い界面活性剤水溶液と比較検討した。その結果、マイクロバブル水、ナノバブル水とも水に比べて流動時の抗力が低く、明確な抵抗減少効果を示した。これは界面活性剤水溶液の結果と一致しており、マイクロ・ナノバブル水が流体力学的に代替溶液として使用できる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：The effect of fluid force on micro and nano-bubble water has been experimentally investigated. It was conducted on the flow of micro and nano-bubble waters through mesh screens to mimic cloth washing. Pressure losses across the mesh screens were measured for water, several aqueous surfactant solutions and micro and nano-bubble waters. A reduction of pressure losses was observed for flow of micro and nano-bubble waters and aqueous solutions of surfactants through mesh screens. And a reduction of pressure losses of micro bubble water is bigger than that of nano-bubble water.

These mean that micro and nano-bubble waters provide an effect to reduce the drag of flow through yarns or fibers and to increase the flow rate, resulting in easier removal of soil than water. And these results of micro and nano-bubbled waters were very similar to aqueous solutions of detergent. It means micro and nano-bubble waters can substitute for detergency solutions on the field of fluid mechanics.

研究分野：複合領域

キーワード：洗浄 抵抗減少効果 ナノバブル水 マイクロバブル水 界面活性剤水溶液 流動特性

1. 研究開始当初の背景

洗浄における汚れ除去機構を考える場合、化学的洗浄作用と物理的洗浄作用の2点からアプローチする必要がある。化学的作用に関しては、洗剤の主成分である界面活性剤の界面化学的作用を中心にこれまであらゆる観点から多くの分析が試みられている。一方、物理的作用は、基質や汚れに対して与えられる外部からの機械力を主とするものである。このような機械力を洗浄に積極的に活用することは、汚れ除去には有効だが、同時に基質の損傷、劣化をもたらすことも避けられない。

本研究は、この点を改善するつまり汚れ除去と基質損傷の低減の両方を満足させるねらいから、これまで洗浄液の持つ流体力に着目して研究を行ってきた。すなわち、基本的なモデル流路を作成し、洗浄液の主成分である界面活性剤水溶液の流動上の特徴を、水との比較から明らかにした。

その結果、界面活性剤水溶液は、せん断流や垂直流下では水に比べて流動時の抵抗が低く、明らかな抵抗減少効果が認められた。これは、界面活性剤水溶液が汚れまわり、および繊維間隙を通過する際に水に比べて流れやすいことを示しており、大きな流速をもたらすことを示唆するものである。この点で、流体による機械力を増加させ、汚れを除去しやすくしているものと推察され、これまでわかっている界面化学作用とともに、界面活性剤水溶液の流動上の優位性を示す結果となった。

一方で、こうした界面活性剤水溶液は、家庭排水や工場排水として河川や湖沼などの自然界に流出した場合、有機物の生分解性やスカムの発生など環境負荷をもたらすことは避けられず、その影響は無視できない。これらのことから、洗浄の際に使用する量の低減を含め、界面活性剤水溶液にたよらない洗浄方法を探る必要も考えなければならない時期に来ている。

2. 研究の目的

本研究は、1 で述べた結果を踏まえ、さらに実験を進める。界面活性剤水溶液は、水に比べて流動時の優位性が示唆されたものの、環境負荷を考慮すると、界面活性剤水溶液に代わる新たな流体を提案する必要がある。

本実験は、この代替溶液候補として水に微小な気泡を包含させたマイクロバブル水およびナノバブル水(以下マイクロ・ナノバブル水)を対象に、新たな洗浄液として利用する可能性を探ることを目的として、その流動特性を測定するものである。実験の結果、マイクロ・ナノバブル水の流動特性が界面活性剤水溶液と比較して類似する傾向が示唆されれば、洗浄場面での有効活用が期待される。本研究では、得られた結果を水、および界面活性剤水溶液と比較し、マイクロ・ナノバブル水の流動上の特徴を検証する。

3. 研究の方法

(1) 使用流体

対象とした流体は、水としてイオン交換水、マイクロバブル水、ナノバブル水の3種で、比較対象として、界面活性剤水溶液(LAS, AE(10))を用いた。

マイクロバブル水は、マイクロバブル発生装置(株オーラテック社製 O-MaxType1 C200)を用い、イオン交換水で満たしたヘッドタンク内にセットして循環させながら調製した。測定中もそのまま稼働させながら実験を行った。得られたマイクロバブルの気泡径は、10-200 μm(粒度分布ピークは20 μm)である。

ナノバブル水は、ナノバブル発生装置(株テックコーポレーション社製マジックナノ MN-20)を用い、イオン交換水を満たしたヘッドタンク内または水槽内にセットして循環させながら調製した。得られたナノバブルの気泡径は、50-200nm(粒度分布ピークは80nm)である。

界面活性剤水溶液は、陰イオン系の直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム:LAS(ナカライテスク)および非イオン系のポリオキシエチレンアルキルエーテル:AE(10)(SIGMA)を用い、いずれもイオン交換水で0.01mol/Lに調製した。

(2) 実験装置

Fig.1 に装置の全体図を示す。ヘッドタンク、流路、マンメータの3つの部分から成り立っており、ヘッドタンク内に満たした流体がコック1から流れ出し、流路部を通過して排水される。途中、流路部の上面2箇所に開けられた圧力検出孔は、デジタルマンメータ(司測研株式会社 DisitalManometerModel PZ-77)に接続され、流動による圧力損失(h mm)として表示される。

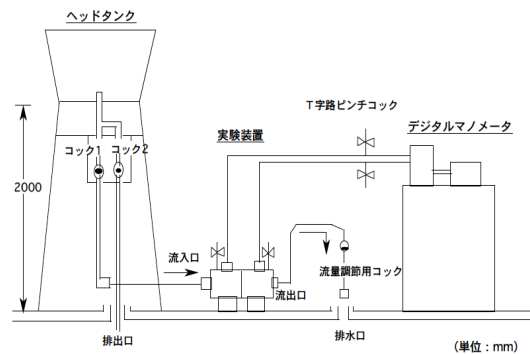


Fig.1 実験装置全図

(3) 流路

使用した流路図をFig.2に示す。全長453mm、縦40mm 横25mmの矩形流路は、内部に縦30mm、横15mmの内部断面を持ち、全体を厚さ5mmの透明アクリル板で構成されている。流路中央

のフランジ部分には流れ方向に対して垂直になるように、糸密度と空隙率（オープニングエリア;OA）の異なる各種メッシュを挟んでいる。またその前後にアクリル板とゴムパッキングを挟んでメッシュを固定している。

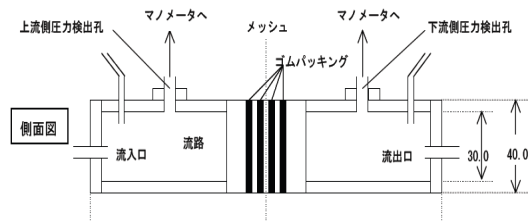


Fig.2 流路図

このアクリル板とゴムパッキングは、中央部が 10×10mm, 15×15mm の正方形, 5mm の円形に切り抜かれているものの 3 種があり、これが溶液通過部となって流路断面を決定している(Fig.3)。さらに、ヘッドタンクからの溶液流入口と、排水口に向かう流出口には、内径 6mm のビニールチューブが接続されている。

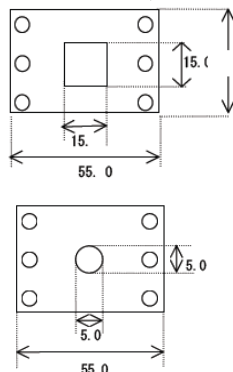


Fig.3 溶液通過部

(4) 布モデル(メッシュ)

布モデルとして使用したメッシュは、ポリエステル製 8 種(モノフィラメント, 糸密度 230-355 本/inch), である。なお、ポリエステルは吸水性がほとんどないため、水中で膨潤するなどの影響がなく、実験前後で形状に変わらないと判断した。さらに、材質の違いを比較する目的で、ステンレス製メッシュ 3 種(糸密度 200-300 本/inch)を使用した。

(5) 測定方法

流路中央部に所定のメッシュを挟んでボルトナットで固定し、全体を組み立てる。ヘッドタンクから溶液を流しながら流路内を満たしすべての部分から気泡を抜く。マンメータの数値を 0 に合わせた後実験を開始する。まず、流量調節用コックを開けてヘッドタンクから溶液を流出させる。そのまま放置し、約 3 分後にマンメータに表示される圧力差 h (mm) を記録する。同時に流出口から流出する溶液を一定時間採取し、重量を計って流量を算出する。以降、徐々に流量を増加させながら極少流量から最大流量まで約 15 回測定する。

(6) 抗力の算出

マンメータに示される圧力差 h (mm) は、溶液がメッシュ間隙を通過したことによって生じる圧力損失を示す。この h を抗力 D (N) によるものと考え、運動量の法則から導かれ

る式により抗力 D を算出する。

$$D = A \cdot g \cdot h$$

A : 流路断面積(m^2), g : 溶液の密度(kg/m^3), g : 重力加速度(m/sec^2)

同時に採取した溶液重量より、単位時間当たりの流量 Q (m^3/sec) を式 から算出する。

$$Q = W / (\rho \cdot T)$$

W : 溶液採取重量(kg), T : 溶液採取時間(sec)

この時の流路内平均速度を V_a (m/sec) とすると、式 で与えられる。

$$V_a = Q / A$$

さらに、この平均流速 V_a を代表流速、メッシュを構成するフィラメントの線径 L (m) を代表長さにとった場合のこの流れにおけるメッシュ通過時の平均レイノルズ数 Re を式 から算出した。

$$Re = L \cdot V_a / \nu$$

L : メッシュの線径,

ν : 溶液の動粘度 ($= \mu / \rho$)

式 で得られた抗力 D は、抗力係数 C_D として次の式 によって無次元化した。

$$D = 1/2 \cdot C_D \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S$$

S : メッシュ通過時のフィラメント占有面積 (m^2): $A \times (1 - \text{各メッシュの } OA)$

次に流量 Q をメッシュの有効通過面積 ($A \times OA/100$) で除した値を V とし、さらに糸間ピッチ B で除して歪み速度 V/B ($/sec$) を式 により算出する。

$$V/B = (Q / (A \times OA/100)) / B$$

4. 研究成果

(1) ポリエステルメッシュによる抗力

Fig.4 に、15×15mm 流路でのイオン交換水とマイクロバブル水の Re と抗力の関係を、255(36)について示す。 Re の上昇とともに抗力は増加しており、ほぼ 1:1 の線形挙動を示している。また、マイクロバブル水は水に比べて同一 Re での抗力が低く、明らかな抵抗減少効果が認められ、その差も約 1/10 と大きい。これまでの研究で、筆者は界面活性剤

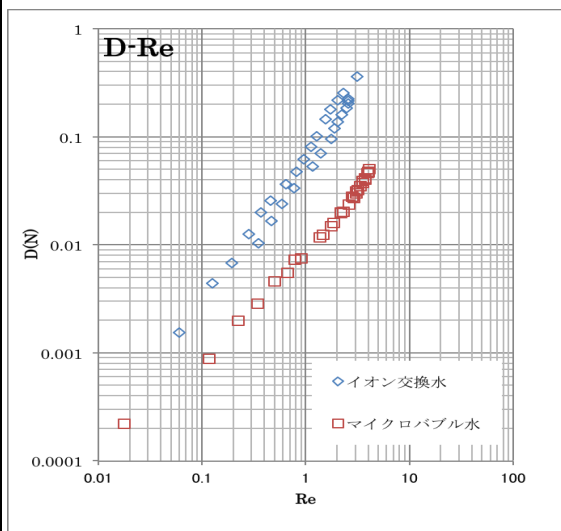


Fig.4 水の種類と抗力の関係

(15×15mm, 255(36))

水溶液の流動挙動でも同様に水に比べて抵抗減少効果を示すことを見出しており、本結果は、マイクロバブル水と界面活性剤水溶液の流動挙動が類似していることを裏付けるものとなった。

Fig. 5に、10×10mm 流路での界面活性剤 LAS および AE(10)の0.01mol/L 水溶液の抗力と比較したものを示す。10×10mm では 15×15mm ほどの差は見られないが、マイクロバブル水の抗力は水に比べて低く、同様に抵抗減少効果が認められた。また、同じく抵抗減少効果を示している2種類の界面活性剤水溶液と比較すると、マイクロバブル水は水と界面活性剤水溶液の間にプロットがあり、やや界面活性剤水溶液に近い。

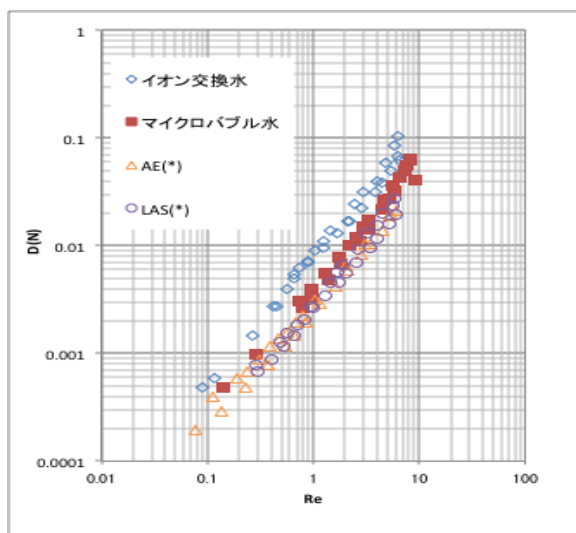


Fig.5 各種流体の抗力
(10×10mm, 255(36))

Fig.6 は、マイクロバブル水の溶液通過部のサイズと抗力の関係である。実験全体を通して溶液通過面積が小さいほど高い Re が得られている。また、同一 Re では 15×15mm の抗力が最も高く、通過しにくいことを示した。これは、水および界面活性剤水溶液と同様の傾向であった。

Fig.7 に、イオン交換水およびナノバブル水の Re と抗力の関係を示す。溶液通過部は 5mm、メッシュは 355(34)で、他のメッシュに比べて比較的差が認められたものを示した。これを見ると、わずかではあるが、ナノバブル水の抗力はイオン交換水に比べて低く、抵抗減少効果を有している。しかし、マイクロバブル水ほど顕著ではない。また、ここで示していない他のメッシュでは、水とナノバブル水の値に差が見られないものもあった。今後 10×10mm, 15×15mm の実験結果を検証する必要があるが、5mm では、ナノバブル水の抵抗減少効果はわずかに認められるのみであった。これは、含まれているバブルサイズが影響を与えていると推察できる。すなわち、ナノバブルはマイクロバ

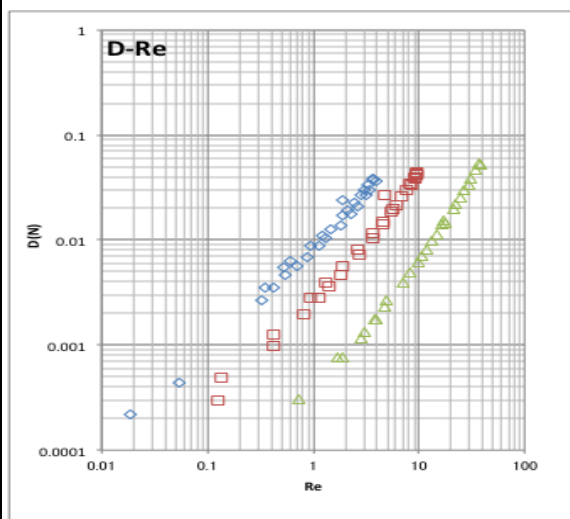


Fig.6 溶液通過面積と抗力の関係
(230(41)) :15×15, :10×10, : 5

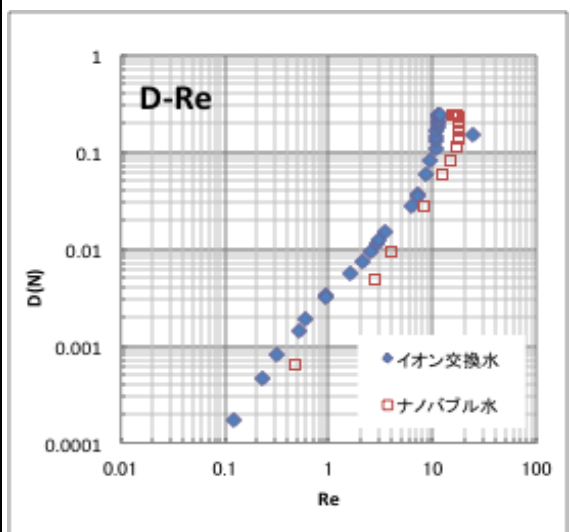


Fig.7 水の種類と抗力の関係
(5, 355(34))

ブルに比べて非常に微小で用いたメッシュの各部分のサイズよりオーダーがかなり小さい、また光透過性も水と同じく完全に透明であることから、物理的には水とほとんど差がなくバブルの有無が流れに影響を与えていないと解釈できる。それに対してマイクロバブルは、用いたメッシュの糸間ピッチや線径と同オーダーであることから、間隙通過時に障害となる可能性があり、バブルの存在が物理的になんらかの影響を与えたと考えられる。

(2) ステンレスメッシュによる抗力

Fig.8 に、ステンレスメッシュ 200 本/inch による Re と抗力の関係を、10×10mm について示す。同一 Re での抗力が最も高いのはイオン交換水で、ナノバブル水、マイクロバブル水はそれに比べて低く、抵抗減少効果が認められる。また、ポリエステルメッシュと同様、マイクロバブル水はナノバブル水よりさ

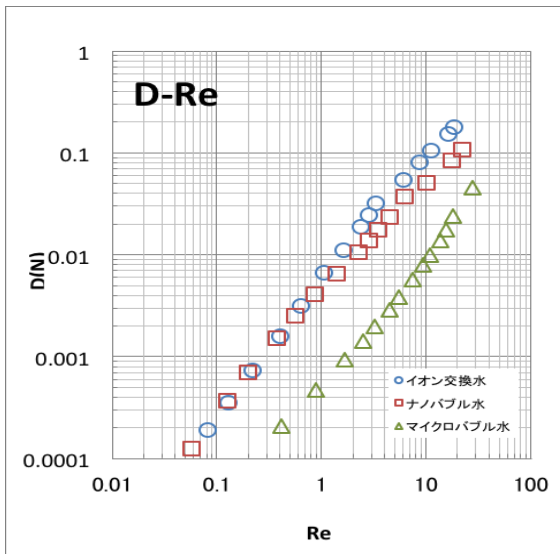


Fig.8 水の種類と抗力の関係
(ステンレス 200 (47), 10×10mm)

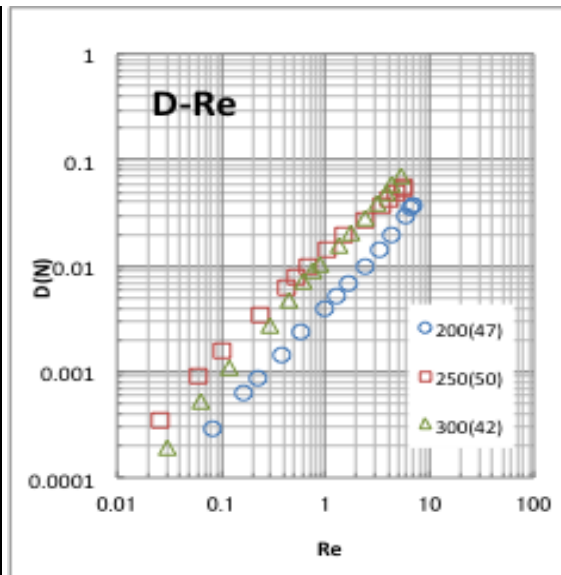


Fig.10 メッシュの種類と抗力の関係
(マイクロバブル水, 10×10mm)

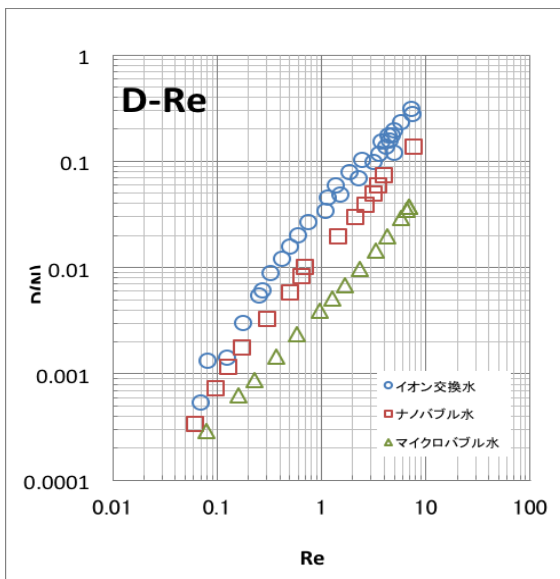


Fig.9 水の種類と抗力の関係
(ステンレス 300(42), 5mm)

らに低いですが、3種の溶液の差はより明確に現れている。Fig.9は、ステンレスメッシュ300本/inchの5mmに関する結果である。Fig.8と同様の傾向が認められるが、イオン交換水とナノバブル水の差はわずかである。

Fig.10, Fig.11は、ステンレスメッシュの種類と抗力の関係を、マイクロバブル水、ナノバブル水について示したものである。いずれも最も抗力が低いのは、200(47)で、これは、糸密度が最も小さいことが影響していると考えられる。他の2種の差はわずかだが、250(50)が300(42)より高く、こちらは糸密度ではなくOAの差の順位と一致している。以上のように、メッシュ間の差は出ているものの、糸密度やOAの順位とは一致せず、さらに構造の異なるメッシュでの検証が必要だ

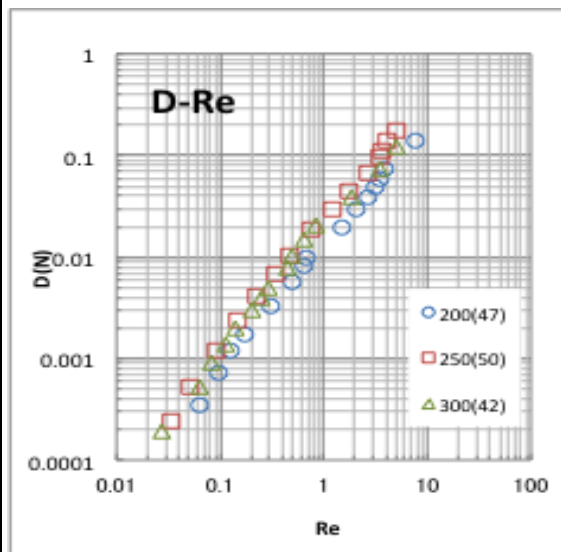


Fig.11 メッシュの種類と抗力の関係
(ナノバブル水, 10×10mm)

と判断された。

また、マイクロバブル水 (Fig.10) は、ナノバブル水 (Fig.11) に比べてメッシュ間の差が大きく、ナノバブル水は違いが現れにくい結果となった。イオン交換水もメッシュ間の差が小さく差が現れていないことから、ナノバブル水の挙動はイオン交換水により近い。これは、ポリエステルメッシュでも言及したように、ナノバブル水の気泡径が非常に微小で、用いたメッシュの各部分のサイズ (特に糸間ピッチ) よりオーダーがかなり小さいのに対し、マイクロバブルは、用いたメッシュの糸間ピッチや線径と同オーダーであることから、間隙通過時に障害となる可能性があり、気泡の存在が物理的に影響を与えたと考えられる。

一方、ステンレスメッシュは、ポリエステルメッシュに比べて、各様液間の差が明確に

現れていた。特に水とナノバブル水は、差は小さいもののすべてのメッシュで明らかにナノバブル水の抗力が低かった。これは、ポリエステルメッシュでは水とほぼ同じ抗力を示す実験条件もあったのとは異なる。さらにマイクロバブル水は水と明らかな差があり、全体として、ステンレスメッシュにより溶液間の差が表れる結果となった。

(3) 洗浄にマイクロバブル水、ナノバブル水を活用する有効性

実験の結果、マイクロバブル水およびナノバブル水は流動時に水とは異なる特徴を有し、それは界面活性剤水溶液で見られた特徴と一致する点が多かった。このことは、マイクロ・ナノバブル水が流体力学的に界面活性剤水溶液と同様の性質を有し、同様に洗浄に寄与することを示すと解釈できる。

マイクロ・ナノバブル水は、界面活性剤水溶液と異なり、有機物を含まず、環境への負荷も少ない。マイクロ・ナノバブル水を洗浄に活用することができれば、界面活性剤水溶液の代替溶液としての可能性が高まる。また、完全代替まではいかなくとも、一部でも代替できれば、現在使用している界面活性剤量の低減が可能となり、その分環境への負荷を軽減できる。本研究は、その可能性が期待できる結果を示した点で有効だったと考えている。

一方、本実験は、マイクロ・ナノバブル水が界面活性剤水溶液と類似していることを明らかにしたが、あくまで流動挙動が一致している点を解明したにすぎない。次の段階としては、より実用的な観点からマイクロ・ナノバブル水を検証するため、洗浄性能の有無を明らかにする必要がある。洗浄力に関しては、通常の水と比較してマイクロ・ナノバブル水がわずかでも有効であることが確かめられれば、その分の界面活性剤使用量を代替でき、環境負荷の軽減をより主張することができるとして期待したい。

洗浄は、日常生活の衣類洗浄にとどまらず、工業、産業のあらゆる場面で行われている。そのほとんどに洗浄剤が用いられ、主成分である界面活性剤を含んだ洗浄液は、家庭排水や工場排水として自然界に有機物として流出し、環境に与える影響は無視できない。今回、界面活性剤水溶液に代わる新たな洗浄液候補としてマイクロバブル水、ナノバブル水の流動特性を明らかにできたことで、この溶液を汚れ除去に効率的に活用できれば、より環境負荷を低減できる可能性がある。本研究は、こうした点への寄与が期待できる成果がある程度得られたと考えている。

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)

[学会発表](計3件)

天木桂子、乾燥ハーブの染色に対するナノバブル水の利用効果、第59回日本家政学会東北・北海道支部研究発表会、2014.9.6、東北女子大学(青森県弘前市)

天木桂子、牛田晃臣、長谷川富市、洗浄機構に関わる流体力の検討-メッシュ間隙を通過するマイクロバブル水およびナノバブル水の流動特性-、第45回洗浄に関するシンポジウム、2013.11.12、江戸川区タワーホール船堀(東京都)

天木桂子、マイクロバブル水およびナノバブル水の各種人工汚染布に対する洗浄効果、第58回日本家政学会東北・北海道支部研究発表会、2013.9.14、尚絅学院大学(宮城県名取市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

天木 桂子 (AMAKI KEIKO)
岩手大学・教育学部・准教授
研究者番号：80193019