

# 研究の動向

## ■ 洗剤液の流れを科学する

### — 汚れ除去に有効な流動挙動を持つ流体を探して —

岩手大学教育学部 天木 桂子

#### 1. はじめに

「洗濯」は、日常生活でかなりの頻度で行われている身近な作業である。「洗濯」というと一般に衣類の洗浄を意味する言葉だが、汚れを落とすという意味では「洗浄」が広く使われ、台所での食器の洗浄、お風呂での身体や髪の毛の洗浄、住居の床や壁などの洗浄なども目的はほぼ同じである。通常、これらの洗浄には液体が用いられ、その多くが洗剤を利用した水溶液である。洗剤液は普通の水や湯で洗うよりもはるかに汚れ除去効果が高いが、これは洗剤液の持つ界面化学的作用が大きくかかわっている。しかし、洗剤液は廃液として排出されると有機物を多く含むことから、少なからず水環境に影響を与えているのも事実である。

一方、外部から汚れや被洗物に直接与えられる機械力（例えば摩擦、衝撃、攪拌など）に代表される物理的作用も汚れ除去には非常に有効である。しかし、被洗物全体への負担も機械力に比例して増加するため、基質（繊維や布）の損傷、劣化をもたらすことも避けられない。

このように、化学的作用と物理的作用は、時に相反する関係にあるため、洗浄条件を設定する際には何を最も優先させるか（例えば、洗浄効果の向上、布損傷の低減、環境負荷軽減など）、を考慮する必要がある。

筆者の研究室では、こうした状況を踏まえ、洗浄効果と基質損傷、さらには環境負荷の3点を満足させる洗浄条件として、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、洗浄液としての洗剤液（実験には界面活性剤水溶液を使用）の流動時の挙動を探り、水などの他の流体と比較することで、洗浄に界面活性剤

水溶液を用いることの有効性を、流体力の面から評価することを目的としている。

本稿では、流体や流れに関して簡単に解説するとともに、これまで本研究室で行ってきた界面活性剤水溶液の流動特性に関する実験結果の一例を紹介する。

#### 2. 流体、流れについて

まず、流体およびその流れに関する基本的な内容を解説する。

##### (1) 流体

物質は固体、液体、気体に大別することができるが、このうち形を容易に変化させて「流れる」運動をする物質を「流体 (fluid)」といい、液体 (liquid) と気体 (gas) がこれにあたる。流体は原子、分子で成り立っているが、一個一個の分子運動ではなく、無数の分子運動が平均化された連続的なものである。したがって、その物理的状態や性質も連続的に変化すると考えてよく、流体力学では流体を連続体として取り扱うことが多い。

流体が形を変えながら流れる運動をする時、流れ方向に沿って移動しようとする動きと同時に、この動きを阻止しようとする力が働き、あたかも引き戻されるような力（せん断力）が生じる。この性質を粘性 (viscosity) と言い、流れにくさを表す指標の一つである。この粘性によって生じるせん断応力が、流れ場における速度勾配に正比例する流体をニュートン流体といい、空気、水、油、水銀のような液体金属などの化学構造が比較的簡単な低分子流体はこれに属するものが多い。界面活性剤水溶液も、一般的に解析時にはニュートン流体として扱っている。

この粘性を示す値を粘度 (Pa・sec) といい、流体の種類によって定まる物質定数である。一般に、流体の粘度は温度依存性が非常に高く、液体では温度とともに粘度は低下して流れやすくなるのに対し、気体では増加して流れにくくなる。したがって実験を行う場合は、流体の

Keiko AMAKI

岩手大学教育学部家政教育科 教授、岩手大学大学院総合科学研究科教授

〔著者紹介〕(略歴) 東京学芸大学大学院教育学研究科修士課程修了、新潟大学大学院自然科学研究科博士課程修了(博士(工学))、岩手大学教育学部助手、同講師、同准教授、スタンフォード大学化学工学科客員研究員を経て現職。

〔専門分野〕被服管理学、流体力学、液体のレオロジー

温度管理が非常に重要になる。しかし実際には大量の流体を扱うほど温度管理は困難になるため（例えば純水の場合10℃～20℃間で粘度が約30%低下する）、解析の際には、流速や流量などの慣性力に由来する測定値を、その実験で用いた流体温における粘度値（粘性力）で除して無次元化したレイノルズ数（Re）と呼ばれる無次元数を用いている。これによって、温度差があっても同一流体（同じ流れにくさを持つ流体）として扱うことができ、より正確な比較ができる。一方、圧力変化による流体の粘度変化は通常の状態では無視し得るほど小さいため、解析時のパラメータとして考慮する必要はほとんどない。

## (2) 流れ

流れは、状態によって分けると、層流（laminar flow）と乱流（turbulent flow）の2つがある。層流は、連続体を構成する各流体粒子がそれぞれ滑らかな線を描いて規則正しく整然と運動する流れであり、乱流は、各流体粒子が複雑に入り混じって不規則な混乱した運動をする流れをいう。Fig. 1は層流と乱流の一例で、線香から煙が立ち昇る状態を模している。一方、管内流れでは、流れ速度が小さいときには層流だったものが速度の増加とともに乱流に変化する（遷移）。遷移は流体の粘性が大きいほど起こりにくく、流動場のスケールが大きいほど起こりやすい。遷移がおこるレイノルズ数を臨界レイノルズ数といい、液体の円管流れでは約2,000である。実世界では乱流が圧倒的に多いが、値の解析を行う際に多くのパラメータを考慮しなければならず非常に複雑になるとともに、影響を与えるパラメータの特定が困難になることから、実験は層流状態を実現し、より単純化した流動場で行うことが多い。

## (3) 抗力

流れの中に物体が存在すると、スムーズに進行できなくなるため抵抗が働く。Fig. 2は、流れの中に置かれた物体に働く力のモデル図である。一様速度Vの流れが物体にあたるときその物体に作用する力は合力Pである。このPを2方向に分力した時、流れに垂直な方向に働く力を揚力（Lift）、流れに並行な方向に働く力を抗力（Drag）という。さらに抗力Dは、物体表面に直角に働く圧力に基づく圧力抗力と物体表面に沿って作用する摩擦抗力に区別される。物体の形状やおかれた姿勢によって両者の比は異なるが、抗力Dは常に両者の和となる。

一般に、物体の受ける抗力D（N）は下記の式で計算される。

$$D = C_D \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \right) S$$

ここで、D：抗力、 $C_D$ ：抗力係数、 $\rho$ ：流体密度、V：

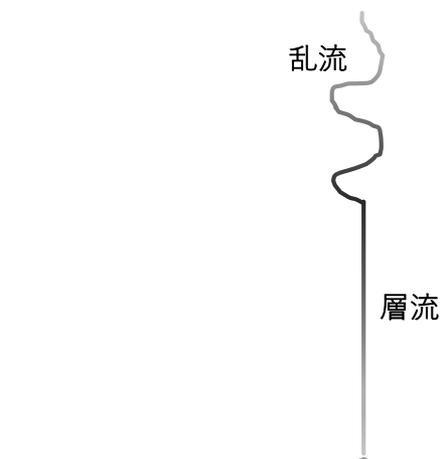


Fig. 1 層流と乱流のイメージ

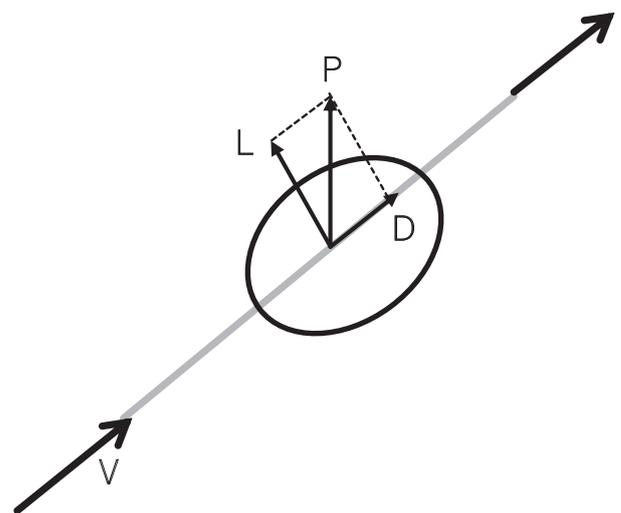


Fig. 2 流れの中におかれた物体に働く力

流速、S：代表面積を示す。抗力係数 $C_D$ は単位を持たない無次元係数で、その値は形状によって決まり流線形化された物体ほど小さな値となる。また、代表面積Sとはこの物体の表面積の大きさを表す基準の面積で、一様流れに垂直な平面に投影した物体の面積、すなわち流れ方向に直角に切った物体の最大面積をとることが多い。

一般的に、模型などを使って抗力などの流体力学的な諸量を求めるときは、気体は風洞実験、液体は水槽実験が行われる。また、流れそのものを評価する場合は円形または矩形断面を持つ管内流路を流動場とすることが多い。流路内に対象流体を流して層流を実現し、ある一定の距離間の圧力損失（圧力差）を流路表面数か所に立てたマンメータ（液柱圧力計）で計測して、抗力に換算して比較する方法が用いられる。この時マンメータ間に障

害物を置けば、その間の圧力差（圧力損失）が、障害物によって生じた抗力（失われ消費された流体力）と考えられることができる。同時に液体温度と密度、流量、流速を測定することで、特定条件下の流れ挙動を解析する。

### 3. 実験

ここからは、筆者が行ってきた実験を紹介する。

#### (1) 実験概要

筆者は、洗浄機構に関わる流体力を明らかにするという観点から、抗力を測定するために2つの実験概要を構築した。1つは、流体が基質に付着している汚れによって生じる抗力で、2つめは、衣類洗浄における基質である布によって生じる抗力の測定である。Fig. 3に実験概要を示す。いずれも、層流中に障害物を置き、生じた抗力  $D$  を上流下流間の圧力差から知るものである。上段の【A】は、矩形流路底面に一定間隔で並べられた汚れモデルであるワイヤーに流体が当たり乗り越えるもので、障害物周りの外部流を想定している。一方下段の【B】は、矩形流路中央部に流れ方向に対して直角に張られた布モデルであるメッシュを挟むもので、流体が糸間隙を通過する内部流を想定している。いずれもワイヤーまたはメッシュを含む長さ  $L$  の区間で生じる圧力損失 ( $P$ ) を測定し、ワイヤーまたはメッシュによって生じた抗力  $D$  に関係づけた。

#### (2) 実験装置および実験方法

Fig. 4は、実験装置の全体図である。流体は、ヘッドタンクから流出し、途中の矩形流路を通過して排水口に至る。流路の上流側と下流側2か所には圧力検出孔を設け、ビニールチューブを介してデジタルマンノメータと接続している。矩形流路は、Fig. 3で示した概要に基づいてアクリル板で作成した2種類（【A】と【B】）がある。さらに、【A】の流路では、ワイヤー径を変えることで異なる汚れの大きさを比較でき、【B】の流路では、織密度の異なるメッシュを挟むことで空隙面積と抗力の関係を比較できる。

実験は、ヘッドタンクに所定の溶液を100ℓ~200ℓ入れ、溶液を流しながら装置内部の気泡を完全に抜いた後、開始した。圧力差の測定は、まず極小流量にして2~3分流した後、流量調節用コックで所定の流量に調節し、マンノメータの数値が安定したのを確かめて読みとった。同時に流出溶液を採取し、重量法により流量を算出した。以降、流量を増加させながら最大流量まで同様に測定した。

#### (3) 抗力の算出

本実験装置は、断面積が一定かつまっすぐな管内流れを実現しているため、解析に用いる流路内流れとして2次元ポアズイユ流を仮定した。その場合の速度分布はFig. 5に示すような2次曲線で表される。

マンノメータに示された圧力差  $h$  (mm) は、ワイヤーま

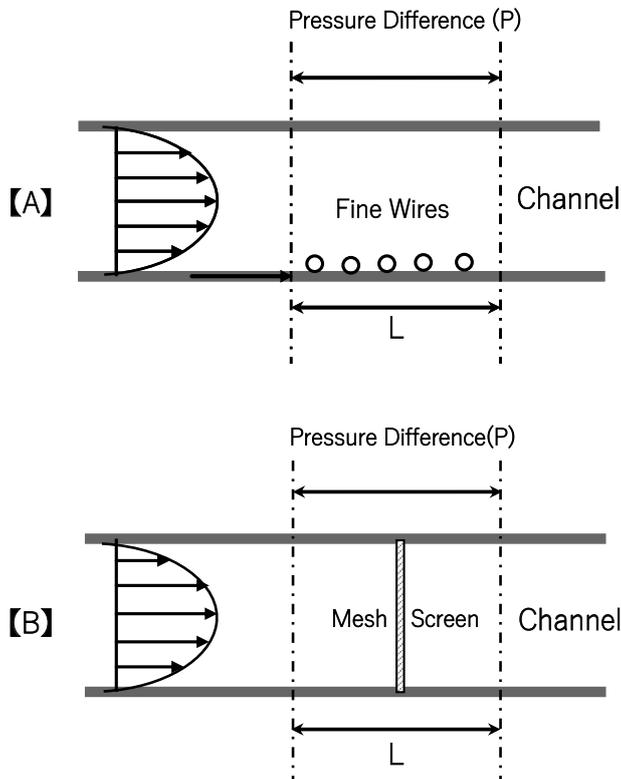


Fig. 3 実験概要

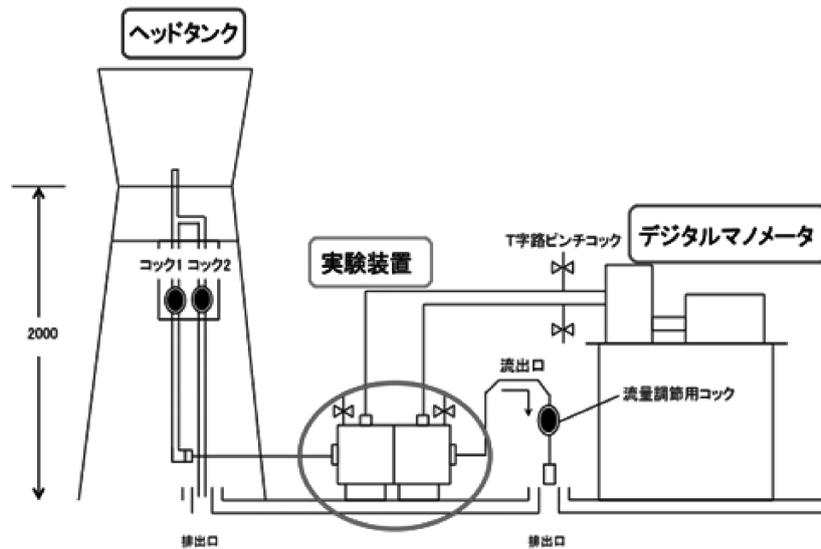


Fig. 4 実験装置全体図

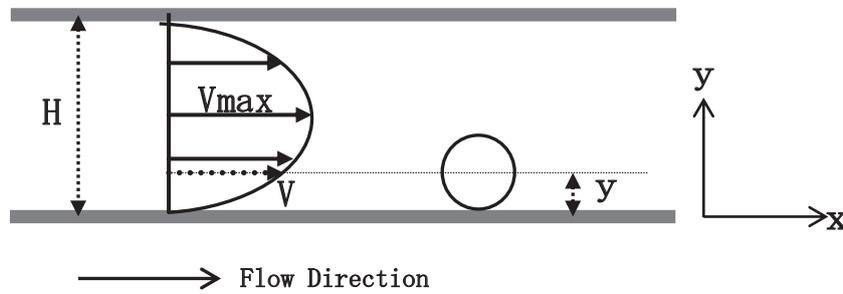


Fig. 5 2次元ポアズイユ流

たはメッシュによって生じた圧力損失を示す。この h を抗力によるものと考え、運動量の法則から導かれる下式により抗力 D (N) を算出した。

$$\text{ワイヤー実験: } nD = A\rho gh$$

$$\text{メッシュ実験: } D = A\rho gh$$

A: 流路断面積 (m<sup>2</sup>), ρ: 流体の密度 (g/m<sup>3</sup>), g: 重力加速度 (9.8 m/sec<sup>2</sup>), h: 圧力差 (mm), n: ワイヤの本数 (本)

また、流路内平均速度 Va (m/sec), を、採取した溶液から算出した流量 Q (m<sup>3</sup>/sec) を用いて計算した。

$$V_a = \frac{Q}{A}$$

さらにワイヤー実験の場合は、ワイヤー中心部での流速 V (m/sec) を算出して解析した。

$$V = \left( -\frac{dP}{dx} \right) \frac{H^2}{2\mu} \left[ \frac{y}{H} - \left( \frac{y}{H} \right)^2 \right]$$

y: 壁面からの距離 (円の半径)

V: 壁面から y 地点での流速

メッシュ実験の場合は、流量 Q をメッシュの有効通過面

積 (オープニングエリア: OA) で除した値 V (m/sec) とした。

また、流路内平均レイノルズ数 (Re) を下式により算出した。

$$\begin{aligned} \text{Re} &= d \cdot V \frac{\rho}{\mu} \\ &= d \cdot \frac{V}{\nu} \end{aligned}$$

d: 代表長さ (m), μ: 流体の密度, ν: 動粘度 (μ/ρ)  
ここで、d: 代表長さは、ワイヤー実験にはワイヤーの直径を、メッシュ実験にはメッシュを構成する糸の直径、を用いた。

#### 4. 実験結果の一例

ここでは、得られた代表的な結果を示し、各種流体の流動挙動を解析する。

##### (1) ワイヤーの抗力

Fig. 6 に、ワイヤー 1 本分の抗力 D と、流路内平均レイノルズ数 (Re) の関係を示す。用いた流体は、水 (イオン交換水)、洗たく用洗剤に含まれる代表的な界面活性剤である LAS (直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリ

ウム) 1.0% (10,000 ppm) 水溶液である。さらに比較としてこの2種より高粘度流体である希薄高分子水溶液 PEO (ポリエチレンオキサイド) 20 ppm (0.002%) を記した。汚れモデルであるワイヤーの径は 50  $\mu\text{m}$  である。代表長さはワイヤー半径とした。

Fig. 6 を見ると、本実験装置では、最小流量から最大流量までに  $Re=10\sim 1,000$  が得られており、層流状態を維持していることがわかる。また、抗力  $D$  は  $Re$  とともに増加し、両者はほぼ一次式をとる。これは、流速 (流量) が高いほど抵抗が大きいことを示している。この時、50  $\mu\text{m}$  ワイヤーによって生じる抗力  $D$  は、 $10^{-5}\text{N}\sim 10^{-4}\text{N}$  のオーダーと非常に小さいものであり、基質に付着した数 10  $\mu\text{m}$  程度の汚れに及ぼす流体力がこの程度であることを示している。

一方、溶液で比較すると、同一  $Re$  での抗力  $D$  が最も高いのは高分子水溶液 PEO で、次いで水、LAS の順である。特に PEO は 20 ppm というわずかな添加によっても水の 2~4 倍と非常に高い抗力を示している。一方、LAS は水よりもやや低い抗力を示し、PEO とは逆の挙動を示した。このように、いずれも水より分子量の大きい溶質の水溶液がその種類によって異なった挙動を示すのは興味深い。しかも界面活性剤水溶液と希薄高分子水溶液は、抗力  $D$  について全く逆の挙動を示している。ここで用いた高分子 PEO は分子量が数 100 万で、水溶液中では細長いひも状 (直鎖状) で存在していると考えられている。水溶液に棒を浸して取り去ると糸を引く現象 (曳

糸性) が見られ、高濃度ほど顕著に糸も長くなることが確認されている。一方ここで用いた界面活性剤は分子量が 300~1,000 程度であるが、臨界ミセル濃度 (cmc) 以上では合せて 1 つのミセルを形成するため、ミセル 1 個の分子量は 1 万以上に及ぶとされている。したがって、界面活性剤水溶液は水と希薄高分子水溶液の中間的性質を有すると予想される。しかし結果は界面活性剤水溶液の抗力が水より低く当初の予想とは異なっていた。

ここで、使用流体の粘性を考えてみる。前述したように、粘性は溶液の流れにくさを示す指標の一つである。壁面せん断応力 ( $\tau_w$ ) と壁面せん断速度 ( $\dot{\gamma}_w$ ) の関係は、ニュートン粘性を有する液体の場合、下式で与えられる。

$$\tau_w = \mu \cdot \dot{\gamma}_w$$

また、 $\tau_w$  と  $\dot{\gamma}_w$  は測定可能な量によってそれぞれ下式で与えられる。

$$\tau_w = \Delta P \cdot \frac{H}{2L}$$

$$\dot{\gamma}_w = 6 \frac{Va}{H}$$

$\mu$ : 粘度,  $L$ : 区間距離,  $Va$ : 流路内平均速度

以上の式を用いて水および界面活性剤水溶液、希薄高分子水溶液の  $\tau_w$  と  $\dot{\gamma}_w$  を本実験装置のワイヤーのない区間の圧力損失 ( $\Delta P$ ) から算出した。Fig. 7 に結果を示す。

Fig. 7 からわかるように、各溶液の実験値は傾き 1.0 の直線にほぼのっており、ニュートン粘性を示している。

また、その絶対値から、粘度は、

希薄高分子水溶液 > 界面活性剤水溶液 > 水

の順に高いことがわかる。一方 Fig. 6 に見る抗力  $D$  は、

希薄高分子水溶液 > 水 > 界面活性剤水溶液

の順であり、両者は一致していない。しかも、粘度は

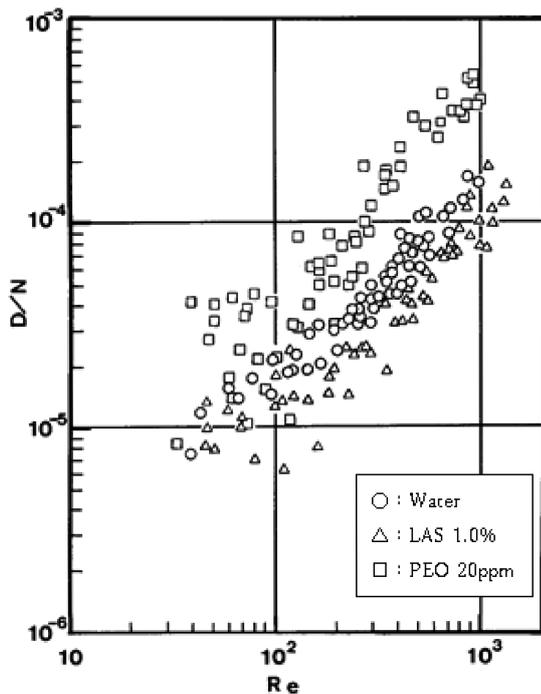


Fig. 6 ワイヤー 1 本分の抗力 (ワイヤー径 50  $\mu\text{m}$ )  
D vs. Re (Water, LAS, PEO)

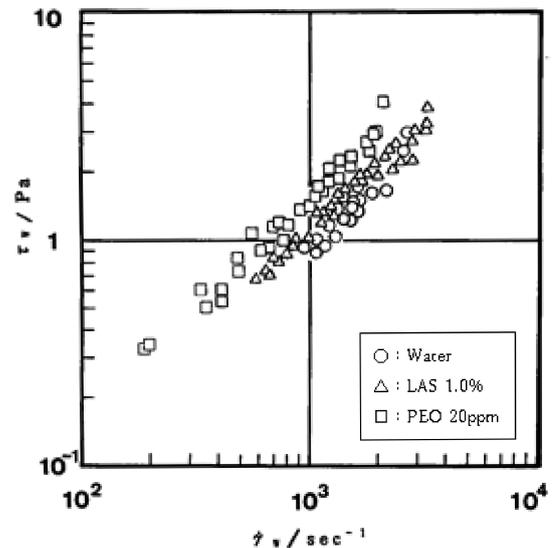


Fig. 7 壁面せん断応力と壁面せん断速度の関係  
(Fig. 6と同じ実験装置で同時に測定)

Fig. 6, Fig. 7ともx軸のReの算出時点ですでに含まれている。したがって各溶液の抗力の変化は粘性だけでは説明できず、他の要因から検証する必要がある。例えば、溶液物性の一つである弾性力、分子間力や、ワイヤーや流路壁に対する分子吸着なども考えられ、この点については現在検討中である。

Fig. 8は、界面活性剤LAS水溶液の濃度と抗力Dの関係を示したものである。これを見ると、濃度の増加とともに同一Reでの抗力が低下していることがわかる。この点に関して、一般に高濃度ほど粘度が高く、界面活性

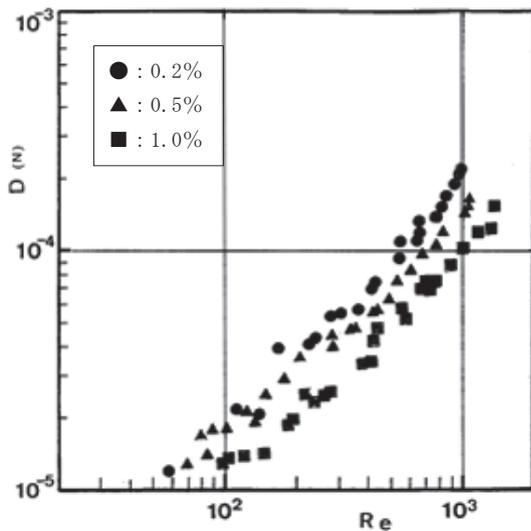


Fig. 8 抗力におよぼす溶液濃度の影響 (LAS)

剤水溶液の場合は形成されたミセルの数も多いため、流れにくい要素を有するにもかかわらず、流動時の抵抗が低下するのは、非常に興味深い。この結果からも、他の物性が寄与している可能性は高い。

この実験を、汚れと基質から考えた場合、抗力Dは基質に沿って汚れを移動させようとする力であり、汚れ除去に対して有効な力だと解釈することができる。今回の結果からは、界面活性剤水溶液の抗力は水より低く、ある意味抵抗減少効果を有していることが明らかとなった。そうすると、界面活性剤水溶液は水より流れがスムーズで、汚れ周りを抵抗なく進む特徴があるとも解釈でき、この点からは流体力学的に見て汚れ除去には水よりも有効であるとは結論付けられなかった。

## (2) メッシュによる抗力

次に、各種流体が布や繊維の間隙を通過する流れ（内部流）を想定した実験について述べる。洗浄における内部流とは、繊維間隙や糸間隙などの狭小空間を流体が通過し、その部分に付着した汚れを押し流す力となって働くものと解釈できる。実験には布モデルとなる基質にモノフィラメントメッシュスクリーンを用い、流体がメッシュに垂直に当たり、そこにある複数の間隙を通過する流れをモデル化した流路を作成して行った。メッシュは、水による繊維や糸の膨潤を防ぐためにポリエステルおよびステンレス製である。

Fig. 9に、糸密度の異なる4種のポリエステルメッ

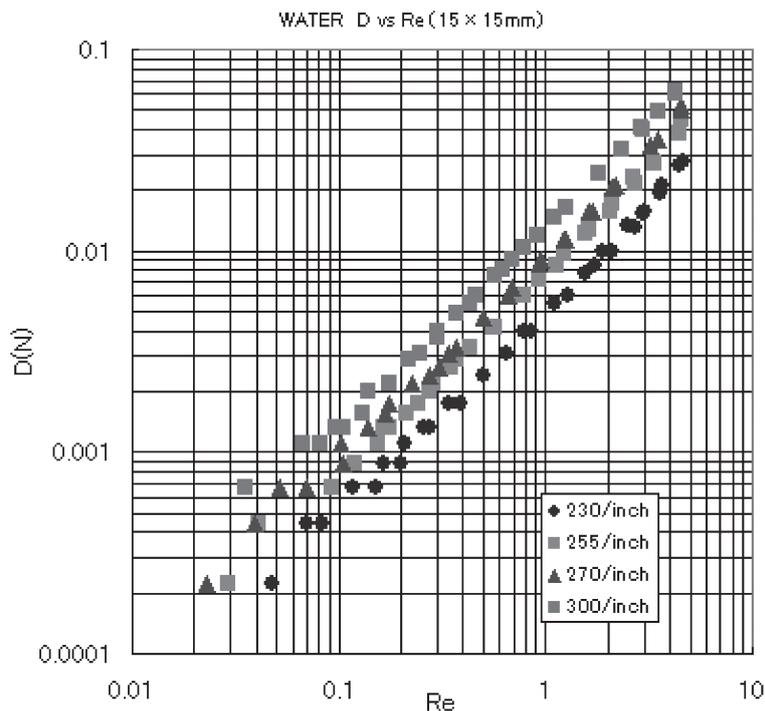


Fig. 9 抗力におよぼすメッシュの糸密度の影響 (イオン交換水)

シユによって生じた抗力と  $Re$  の関係を水について示す。糸密度は230本/inch～300本/inchで、織り糸1本の直径はいずれも  $40\ \mu\text{m}$  である。したがって、糸密度が大きいほど溶液通過可能面積（オープニングエリア：OA）が小さい。

これを見ると、 $Re$  の増加とともに抗力も増加しており、ワイヤー実験と同じ傾向を示した。また、同一  $Re$  での抗力は230本/inch<255本/inch<270本/inch<300本/inchの順で、糸密度が大きくオープニングエリアが小さいメッシュほど抗力が高く、通過しにくいことがわかった。この流路の中央部の断面積は  $15\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$  であり、この範囲に張られたメッシュを通過する流体の抗力  $D$  は  $10^{-4}\ \text{N} \sim 10^{-2}\ \text{N}$  のオーダーであった。また、4種のメッシュ間の動きはほぼ一致しており、全  $Re$  範囲を通じてほぼ平行なグラフとなった。さらに、グラフの傾きが1であることから、 $Re$  が10倍になると抗力も10倍になり、大きく変化することも確かめられた。

Fig. 10 は、水と数種の界面活性剤水溶液の抗力を示したものである。メッシュはステンレス製200本/inch（OA: 47%）である。用いた界面活性剤は、陰イオン系のLAS（直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム）、SDS（ドデシル硫酸ナトリウム）、非イオン系のAE（23）（ポリオキシエチレン（23）アルキルエーテル）、陽イオン系のBC（塩化ベンザルコニウム）の4種で0.5%水溶液である。

これを見ると、水の抗力が最も高く4種の界面活性剤水溶液は全  $Re$  範囲で水より低い値を示している。これは、ワイヤー実験でも見られた現象で、界面活性剤水溶液は水よりメッシュ間隙を通過しやすく、抵抗減少効果を有していると判断できる。

抵抗減少効果については、これまでもある種の流体について管内乱流に対して生じることが報告されている。また、一様流れの中に置かれた円柱や球の抗力係数が臨界  $Re$  数（層流から乱流に変化する時の  $Re$ ）付近で急激に低下すること（乱流抵抗減少）も知られている。しかし、ここでみられる界面活性剤水溶液の抵抗減少効果は、かなり低い  $Re$  から生じており、明らかに層流段階で認められている。メッシュ間隙を通過する流れでも界面活性剤水溶液の抵抗減少効果が認められた原因として考えなくてはならない点が多いが、ワイヤー実験でも述べたように、粘性からは説明ができないため、弾性力のような他の物性の影響を考えなくてはならない。

一方、解析上のいくつかの仮定に関しても考慮する必要がある。例えば、本解析はすべての場面で境界すべりなし流れを仮定しているが、界面活性剤水溶液と実験で用いたポリエステルやステンレスのような固体基質（硬質界面）間の境界すべりが関係する可能性である。この点については、ニュートン流体と基質間の境界すべりに関する成果として多くの研究者が認めている。しかし、すべり効果を完全に無視することはできないとしても、

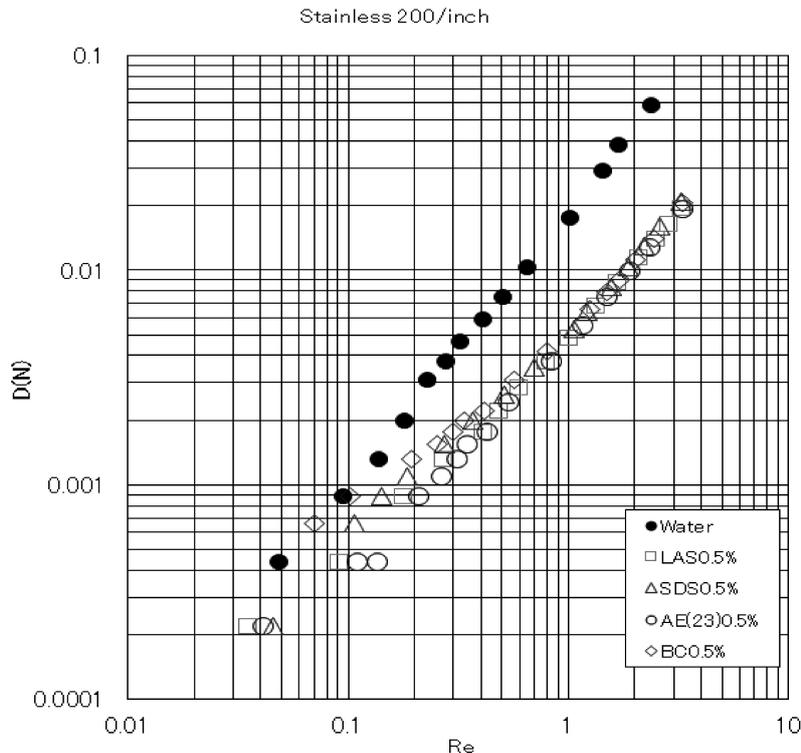


Fig. 10 溶液の種類と抗力の関係（ステンレスメッシュ 200/inch）

これが抵抗減少効果をもたらす主な原因だとは考えにくい。すなわち、現段階では、実際に本実験で認められた界面活性剤水溶液が有するメッシュ間隙を通過する流れにおける抵抗減少効果を、これまでの定説であった管内流れにおける乱流抵抗減少のメカニズムを用いて説明することは難しい。さらに、界面活性剤分子中の親水基と親油基の存在とともに、活性剤分子と基質壁面間の境界領域における複雑な相互作用が関係していると考えなくてはならないなど、解決すべき問題は多岐にわたっている。現時点では、この点について、適切な解析メカニズムを構築することが課題として求められている。

### (3) メッシュを通過する流れの解釈と解析

ここでは、洗浄液が布間隙を通過する流れをどう解釈し解析を行うかを考える。

Fig. 9 に示すように、抗力  $D$  はメッシュの糸密度や OA によって異なっている。このようなメッシュ間隙を通過する流れについて解釈する場合、次にあげる 2 つの考えが成り立つ。1 つは、流れ中に置かれた円柱のような障害物が多数ありその障害物をよける流れとの考え方である。この場合は、解析に糸にかかわるパラメータを考慮する必要がある。しかし、ここで使用した 4 種のポリエステルメッシュは、いずれも糸径が  $40\ \mu\text{m}$  と同一であり、これでは糸密度による抗力の差を説明できない。もう 1

つは、流れの先にオリフィス（小孔）が多数ありその空間を通過する流れとの考え方、この場合は、空隙に関わるパラメータを考慮する必要がある。

ここでは、後者の空間に着目する考え方をもとにメッシュの 1 間隙の 1 辺の長さ（オープニング径： $B$ ）を用い、メッシュ通過時の流速  $V$  を  $B$  で除した  $V/B$  (/sec) をひずみ速度として Fig. 9 を整理した。結果を Fig. 11 に示す。これをみると、 $Re$  で整理した Fig. 9 ではメッシュの影響が明確に表れていたが、 $V/B$  で整理すると完全に 1 つの直線上にプロットされ、メッシュ間の差がほぼ消失している。このことは、この流れには空間にかかわるパラメータ（ここではオープニング径  $B$ ）が大きく影響していることを示しており、今後の流れ解析にも非常に有用な知見となった。

このように、複数の条件下で得られた実験値の差が生じる原因を探る場合、解析式に持ち込むパラメータの選択によって解決することがある。持ち込んだパラメータによって値の差が解消されたり、条件が異なる値がグラフ上でうまくつながれば（一般的に「整理された」と表現する）、そのパラメータが重要な原因であったことがわかる。上記の例によると、流体がメッシュにあたって通過する流れに関しては、メッシュを構成する糸（障害物）まわりの流れではなく、多数の空間内部を通る流れとみなして計算するほうがこの流れの解釈にはより適切であ

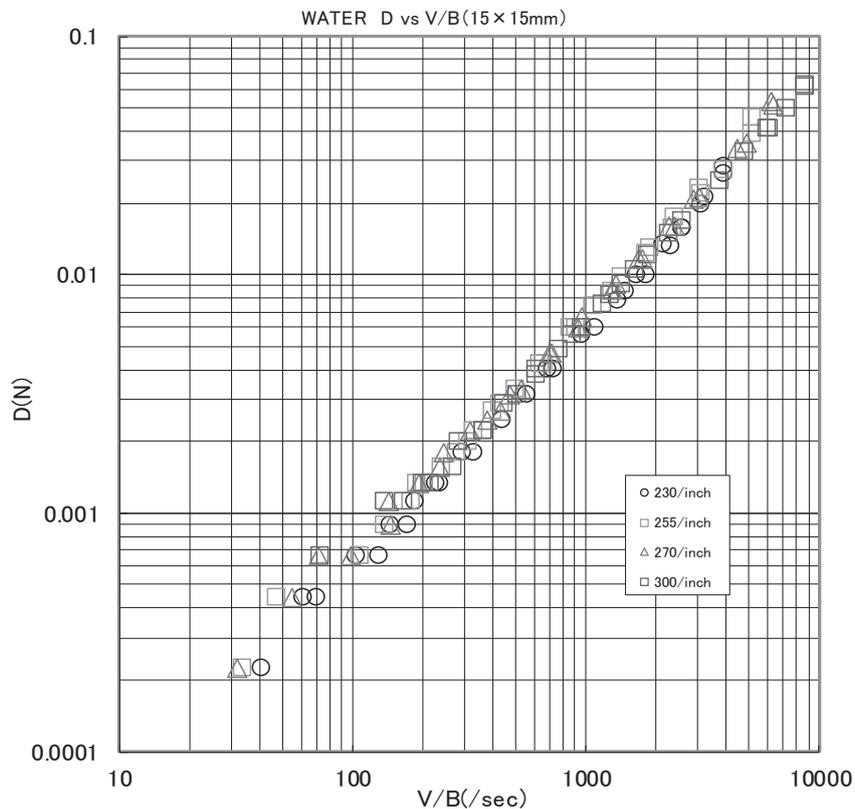


Fig. 11 イオン交換水の抗力とひずみ速度の影響

るということになる。

## 5. まとめ

本稿で紹介した管内流れに関する2つの実験を通して得られた結果の中で、最も注目すべき点と考えられるのは、界面活性剤水溶液は水よりも抗力が低く抵抗減少効果が見られ、流路内をスムーズに流れることであった。

ワイヤー周りの外部流の実験で測定された抗力を、汚れを基質に沿って押し流そうとする力だと解釈すると、水より抗力が低い界面活性剤水溶液は、汚れ除去に及ぼす力という点で必ずしも有利とはいえない。しかし、水に比べて管内流れがスムーズになることは間違いない。一方、この流れをモデル化した数値解析（本稿では省略した）では、揚力（流れを浮かせる方向の力）面での寄与が示唆されており、界面活性剤水溶液の優位性が揚力から説明できる可能性があることを記しておく。

一方、メッシュ間隙を通過する内部流の実験では、界面活性剤水溶液の抗力が水より小さく通過しやすかったことから、水に比べて織り糸、繊維間を容易に流れる性質を有していると解釈できる。したがって、界面活性剤の効果は、界面科学的に汚れの付着力を弱めることにとどまらず、織り糸、繊維間に大きな流速をもたらすことによって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測できる。

以上のように、汚れ除去に対して界面活性剤水溶液が流体力学的にも水より有効である可能性が示唆されたことから、化学作用とともに界面活性剤水溶液の役割をより高く評価できる。また、洗浄に流体力によってもたらされる機械力をうまく活用することで、界面活性剤の化学作用の一部を流体力によって代替させる可能性が示唆され、将来的には洗剤使用量の低減へとつながることを期待させるものであった。

洗浄に関わる要因は多くあるが、機械力を中心とした物理作用からの研究は、界面化学作用からの研究に比べて少なく、流動挙動の面から解析しているものはさらに少ない。昨今の日本の家庭洗濯事情は、布損傷の軽減、

短時間仕上げ、節水を含むエコロジー貢献、除菌などが重視される傾向にあり、洗浄力を第1に考えてきた時代とは変化している。そのような中、機械力としては比較的優しい作用である流体力を有効活用することで、これらの課題に応えるべく、今後の研究をすすめて、成果も期待したいと考えている。

## 文 献

- 天木桂子, 長谷川富市, 近野正昭 (1993). 洗浄機構に関する流体力の検討第1報: 壁面に付着した微小円柱に対する界面活性剤水溶液および希薄高分子水溶液の抗力. 日本レオロジー学会誌. Vol. 21, 41-45.
- Amaki, K.; Hasegawa, T.; Narumi, T. (2008). Drag Reduction in the Flow of Aqueous Solutions of Detergent Through Mesh Screens. *Nihon Reorogi Gakkaishi*. Vol. 36, 125-131.
- Hasegawa, T.; Tomita, Y. (1974). A Study on Anomalous Turbulent Flows of Non-Newtonian Fluids: 3<sup>rd</sup> Report, Experiment and Analysis in Transitional Region. *Bulletin of the JSME*. Vol. 17, Issue 103, 73-82.
- Hasegawa, T.; Tomita, Y.; Mochimaru, Y. (1972). A Study on Anomalous Turbulent Flows of Non-Newtonian Fluids: 2nd Report, Transitional Region from Laminar to Turbulent Flow. *Bulletin of the JSME*. Vol. 15, Issue 87, 1093-1103.
- 飯田明由, 小川隆申, 武居昌宏 (2009). 基礎から学ぶ流体力学. オーム社, 36-38.
- 牧野光雄 (1991). 流体抵抗と流線形—流体力学的にみた乗り物の形状デザイン—. 産業図書. 13-16, 36-37.
- 松本洋一郎監修, 山口浩樹著 (2006). 道具としての流体力学. 日本実業出版社, 25.
- 森川敬信, 鮎川恭三, 辻裕 (1993). 新版流れ学. 朝倉書店, 68-83.
- 須藤浩三, 長谷川富市, 白樫正高 (1995). 流体の力学. コロナ社, 1-9, 61-69.
- 谷田好通 (1994). 流体の力学. 朝倉書店, 1-7.
- 富田幸雄 (1989). 水力学—流れ現象の基礎と構造—. 実教出版, 63-77, 152-159.