

1. はじめに

洗浄における汚れの除去機構を考える場合、化学的作用と物理的作用の2点からアプローチする必要がある。化学的作用とは、主として各種洗剤の主成分である界面活性剤の働きによる浸透、分散、乳化、可溶化、再汚染防止、張力低下などの界面化学的作用によって汚れ除去が行われるメカニズムである。これらに関しては、従来からあらゆる観点で多くの研究が行われており、界面活性剤水溶液の有効性が確かめられている。一方、物理的作用とは、主として汚れや被洗物に外部から与えられる機械力で、摩擦、衝撃、攪拌などである。また、物理作用の寄与率は、全洗浄力の40-50%を占めるという報告もある。洗浄にこうした機械力を積極的に活用することは、汚れ除去には有効だが、同時に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（繊維や布地）の損傷、劣化をもたらすことは避けられない。

筆者は、この点を改善する、すなわち洗浄効果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、洗浄液としての界面活性剤水溶液の流動時の挙動特性を解明しながら、結果を水など他の流体と比較することで、洗浄に界面活性剤を用いることの有効性を流体力学的にも明らかにすることを目的とした。

2. 試料

2-1. 界面活性剤

界面活性剤とは、水と油の両方に親和性を持つ物質の総称で、ひとつの分子中に親水基と疎水基（親油基）を含み、界面張力を低下させる特徴を持つ。また、水溶液中での界面活性剤分子は、低濃度では単独で存在するがある一定の濃度以上になると分子集合体（ミセル）を形成する。形成されるミセルは活性剤の種類によって異なり、例えば、球状、ひも状、ラメラ状などがあるが、洗浄に用いられるのは球状ミセルがほとんどである。ミセルがはじめて形成される濃度をcmc（臨界ミセル濃度）といい、cmcを境にして界面活性剤水溶液の物性が大きく異なるため、洗浄もcmc以上の濃度で行われる。

2-2. 使用流体

本研究で対象とした流体を以下に示す。

イオン交換水・・・他の溶液の溶媒としても使用

界面活性剤水溶液・・・濃度は0.1-1.0w%, CTABは0.0005-0.001mol/l

（球状ミセルを形成）陰イオン系 LAS（ラウリルベンゼンスルホン酸ナトリウム）

SDS（ラウリル硫酸ナトリウム）

非イオン系 AE(10)（ポリオキシエチレン(10)ラウリルエーテル）

AE(23)（ポリオキシエチレン(23)ラウリルエーテル）

陽イオン系 BC（ベンザルコニウムクロライド）

（ひも状ミセルを形成）陽イオン系 CTAB（セチルトリメチルアンモニウムブロマイド）水溶液に NaSal（サリチル酸ナトリウム）またはHSal（サリチル酸）を、重量モル比1:0.5, 1:1, 1:1.5の割合で添加したもの。CTABとNaSal, HSalは1:1で結合して1つのひも状ミセルを形成する。

希薄高分子水溶液・・・濃度は10-20ppm

（ひも状構造）PEO（ポリエチレンオキサイド）

（網目状構造）PAA（ポリアクリルアミド系高分子、商品名:separan）

微粒子分散液・・・濃度は0.01-0.1w%

アルミノケイ酸ナトリウム（A型ゼオライト）

2-3. 汚れモデル（ワイヤー）および布モデル（メッシュ）

汚れモデルとして用いたワイヤーは、タングステン製で、径は $\phi 20 \mu\text{m}$ と $\phi 50 \mu\text{m}$ の2種である。

布モデルとして用いたメッシュは、糸密度やオープニングエリアが異なるNBC工業(株)社製ポリエステル8種、およびステンレス3種（いずれもモノフィラメント）の合計11種類である。いずれのワイヤー、

メッシュとも溶液中で正または負に帯電する。また、溶液中では膨潤などの形状変化はほとんどないと見なしてよく、従って実験前後での形状変化はないとした。以下にメッシュの諸元を示す。

糸密度 (本/inch)	組織	線径 (μm)	オープニング (μm)	オープニング 比7 (%)	厚さ (μm)	透過体積 (cm^3/m^2)
ポリエステル 230	平織	40	70	41	62	25
ポリエステル 255	平織	40	60	36	62	22
ポリエステル 270	平織	40	54	33	62	20
ポリエステル 300	綾織	40	45	28	72	20
ポリエステル 230	平織	45	65	35	69	24
ポリエステル 305	平織	33	50	36	52	19
ポリエステル 305	平織	35	48	34	54	18
ポリエステル 355	平織	30	42	34	49	17
ステンレス 200	平織	40	87	47	83	39
ステンレス 250	平織	30	71	50	63	31
ステンレス 300	平織	30	54	42	68	28

3. 実験方法

3-1. 実験概要

実験の概要は、Fig1 に示すように、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、および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の抗力 (D) を、上流下流間の圧力差から知るものである。すなわち、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に関係づけた。

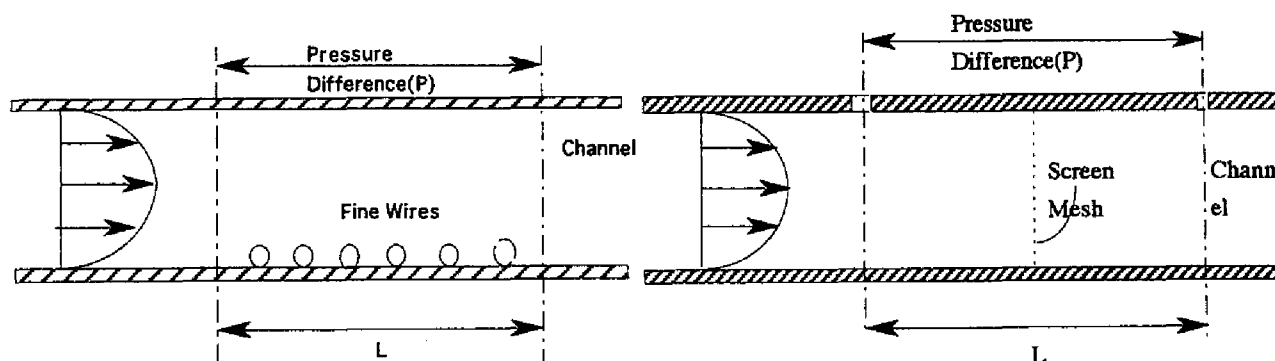


Fig1. Schematic Explanation of Experiment

3-2. 実験装置

Fig2 に実験装置の概略を示す。

ワイヤーの流路は、幅40mm、高さ1mmの矩形断面を持ち、厚さ1mmのステンレス製シックネスゲージを長さ530mmの透明アクリル板2枚で挟むことにより構成されている。流路下面のアクリル板には、1mm間隔で $\phi 20 \mu\text{m}$ または $\phi 50 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤーが121本張られている。流路上面には、最両端のワイヤー前後に1カ所ずつ圧力検出孔が開けられており、ビニールチューブを介してマンオメータへと接続されている。

メッシュの流路は、長さ163mm、縦40mm、横16mmの長方形断面を持ち、全体が厚さ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アクリル板2枚と溶液の漏れを防ぐためのゴムパッキングを挟んでいる。両方とも中央部が15mm \times 15mmの正方形に切り取られており、これが溶液通過部となって流路断面を決定している。流路上面にはメッシュ前後に圧力検出孔が設けられており、

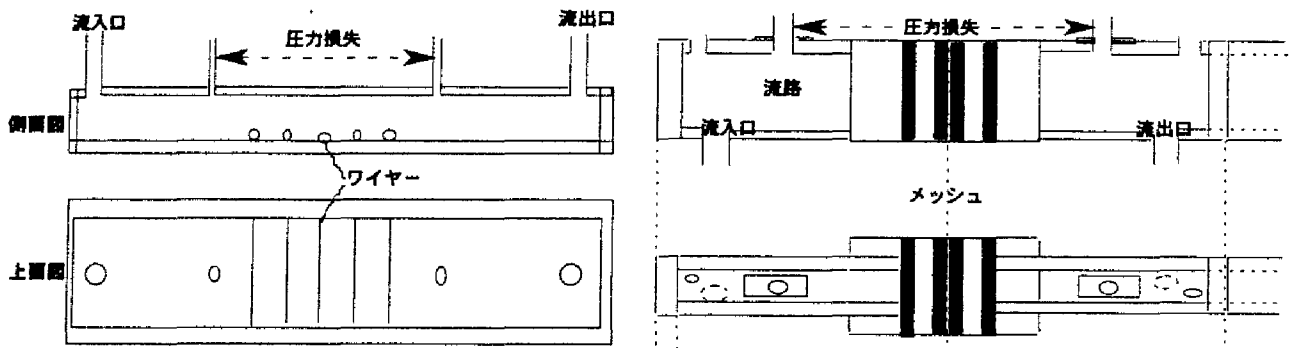


Fig2. Schematic Representation of Channel

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。

これらの装置で溶液は、ヘッドタンクから流入口に流れ込み、上流側圧力検出孔、ワイヤーまたはメッシュ部、下流側圧力検出孔を通過して流出口に至る。

3-3. 実験方法

Fig3は実験装置の全体図である。ヘッドタンクに所定の溶液を約100-200ℓ入れ、溶液を流しながら装置内部の気泡を抜いた後、実験を開始した。差圧の測定は、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て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 Q (m³/sec)を算出した。以降、徐々に流量を増加させながら最大流量まで同様に測定した。

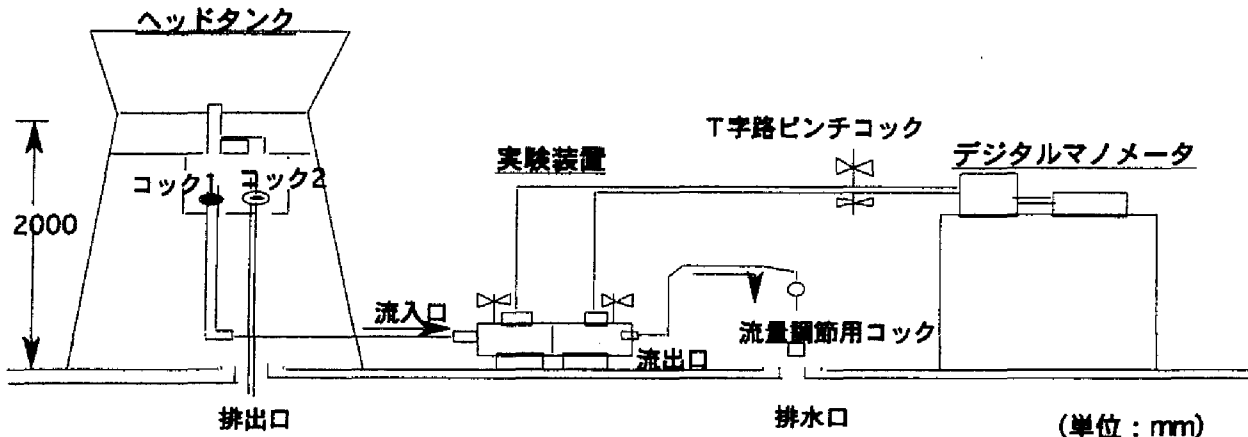


Fig3. Schematic Representation of Experimental Apparatus

3-4. 抗力の算出

今回の実験では流路内の流れとして2次元ポアズイユ流を仮定しており、速度分布は2次曲線で表される (fig4 参照)。

マンノメータに示された差圧 h (mm)は、ワイヤーま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。

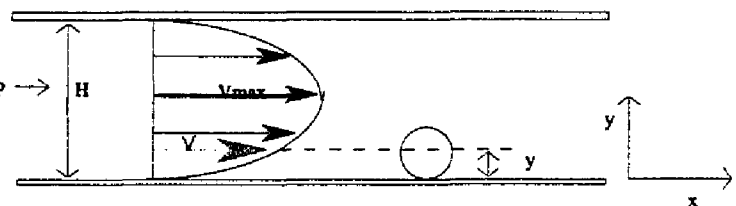


Fig4. Two-dimensional Poiseuille Flow

ワイヤー実験: $nD = A\rho gh$, メッシュ実験: $D = A\rho gh$

A : 流路断面積 (m²), ρ : 流体の密度 (g/m³), g : 重力加速度 (9.8 m/sec²),

h : ワイヤーまたはメッシュによる差圧 (mm), n : ワイヤーの本数

また、流路内平均流速 Va (m/sec)を、採取した溶液から算出した流量 Q を用いて計算した。

$$Va = Q/A$$

Q : 流量 (m³/sec)

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。

$$V = \left(- \frac{dP}{dx} \right) \frac{H^2}{2\mu} \left(\frac{y}{H} - \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right) \quad \begin{array}{l} V: \text{壁面から } y \text{ の地点での流速,} \\ y: \text{壁面からの距離} \end{array}$$

また、流路内平均レイノルズ数 (Re) を以下の式により算出した。

$$\begin{aligned} Re &= d \cdot V \rho / \mu & d: \text{代表長さ} \\ &= d \cdot V / \nu & \mu: \text{流体の粘度, } \nu: \text{動粘度 } (\mu / \rho) \end{aligned}$$

なお、 d : 代表長さは、ワイヤー実験にはワイヤーの直径としたが、メッシュ実験には、流路断面周径、線径、オープニングなどを用いた。そのため、グラフによって Re のオーダーが一定していない。

4. 結果および考察

ここでは、得られた結果のうち代表的なもののみを紹介する。

4-1. ワイヤーの抗力

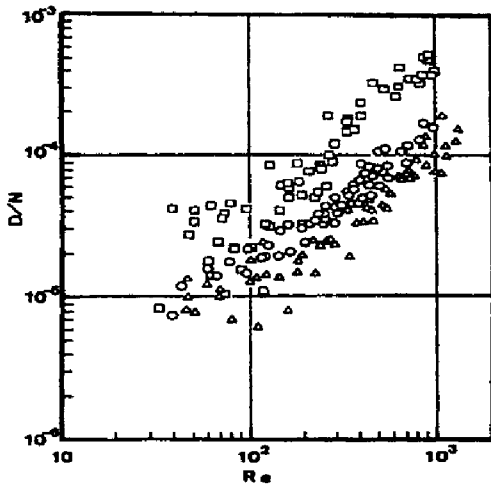


Fig5. Drags of onewire

(○:water, △:LAS1.0%, □:PEO20ppm)

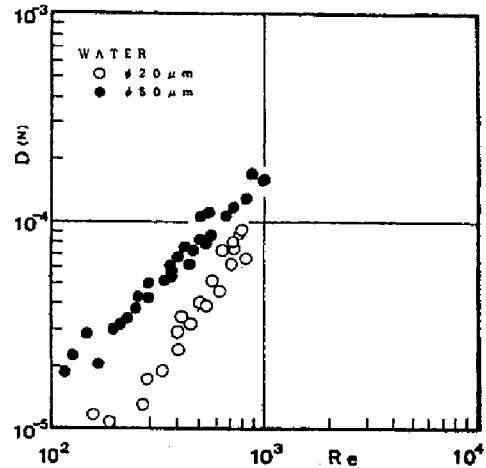


Fig6. Drags of one wire (Water)

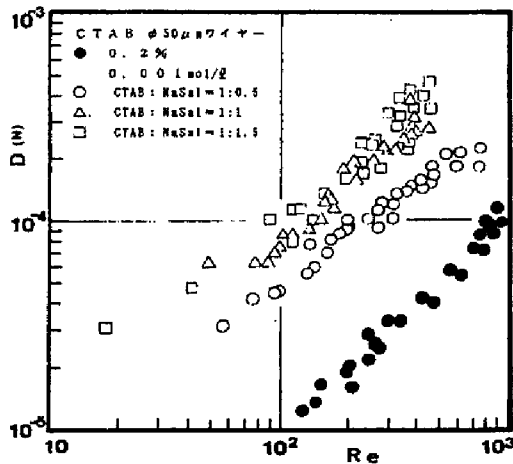


Fig7. Drags of one wire (CTAB+NaSal)

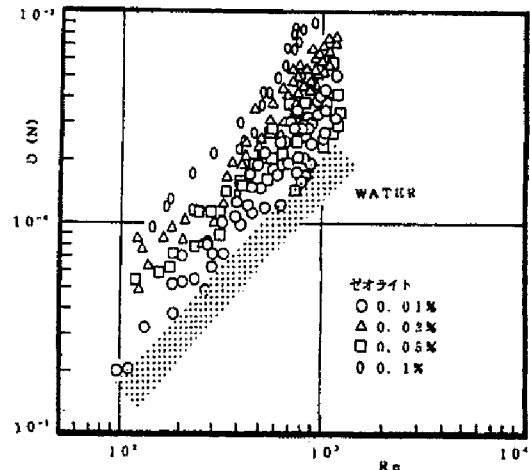


Fig8. Drags of one wire (Zeolite)

Fig5-Fig8 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。

溶液別の結果である Fig5 を見ると、高分子である PEO が最も高く、次いで水、LAS の順である。特に PEO は、20ppm 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 とは逆の挙動をとっている。この 3 種の溶液の粘度を比較すると、最も高いのは PEO で、以下 LAS、水の順であり、抗力の順位とは一致せず、当初の予想とは異なる結果であった。このことから、各溶液の抗力の違いは粘度だけでは説明できず、溶液の他の物性、例えば弾性

や分子間力などの点からも検討する必要があると判断された。

Fig6は、ワイヤー径の影響を水について示したものである。径の大きい50 μm は20 μm より抗力が高く、流体力が損失していることが明らかであった。この傾向は水以外のすべての溶液で認められ、汚れが大きいほど流体力の影響を受けやすいと判断された。

Fig7はひも状ミセルを形成するCTAB+NaSal水溶液の結果である。CTAB単独溶液に比べてNaSal添加溶液はいずれも抗力がかなり高く、しかも添加溶液の抗力はNaSalの割合が多いほど高い。しかし、1:1と1:1.5の差がわずかなのに対し、1:1と1:0.5の差は大きいことから、形成されたミセルの数に依存すると考えられた。すなわち、CTAB+NaSal/W系内に形成されるミセルは、CTA⁺とSal⁻の1:1コンプレックスであることが知られており（このミセルは電氣的に中性でミセル間の静電的相互作用は少ない）、1:1と1:1.5は形成されたミセル数は同じである。それに対して1:0.5で形成されたミセル数は半分であり、この差が抗力に反映したと判断できる。さらに、この溶液は粘度が非常に高く、水にはないといわれる弾性力を持つことも知られており、こうした事実をふまえて、今後結果の解析に反映させたいと考えている。

Fig8は、溶液ではなくゼオライト（金属イオン補足剤として多くの市販衣類用洗剤に配合されている、アルミノケイ酸塩とも言う）分散液の結果である。全体的に水に比べて高い抗力を示し、濃度の増加とともに高くなっていることから、微粒子がワイヤーに衝突する際の影響によるものと考えられた。

このように、水、界面活性剤水溶液、希薄高分子水溶液、微粒子分散液は抗力に関してそれぞれ異なる傾向を示す。これを実際の洗浄系から考えると、抗力の高い流体はワイヤーに対してより多くの力を及ぼし消費していることから、流体力の面からは水より汚れ除去に有効であると解釈できる。従って、例えば市販洗剤に高分子物質を少量配合することで、流体力を活用できる可能性があり、既に配合されているゼオライトは金属封鎖剤としての役割の他の作用として、界面活性剤の化学的作用とともにより高い洗浄力の獲得が期待できる。しかし、市販洗剤の主成分であるLASなどの界面活性剤水溶液の抗力は水より低い結果となり、本実験からは流れ挙動の面でその優位性を述べることはできなかった。

4-2. メッシュによる抗力

Fig9とFig10に、ポリエステルメッシュによって生じた抗力を、それぞれ水とLASについて示す。Re算出に用いた代表長さはメッシュの線径である。得られた抗力は糸密度によって異なり、糸密度が高くオープニングエリアが小さいほど高いことがわかる。

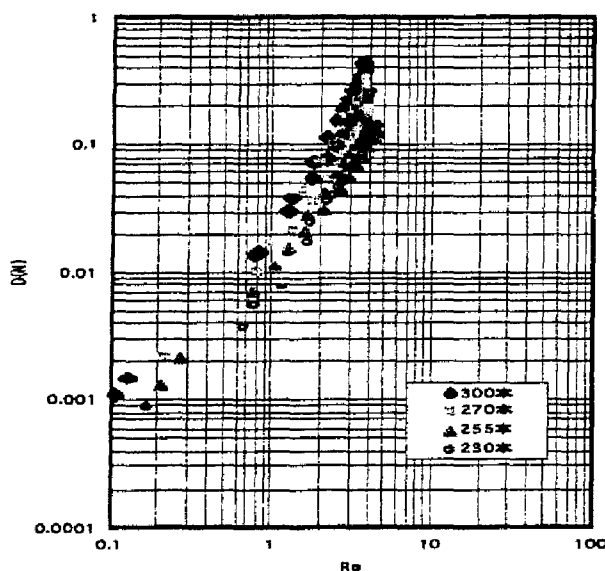


Fig9. Drags of polyester mesh screen (Water)

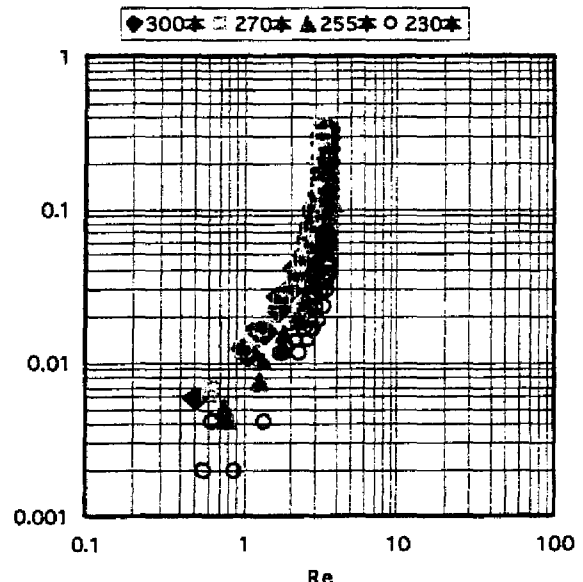


Fig10. Drags of polyester mesh screen (LAS 0.01 mol/l)

また、高Reでグラフの立ち上がりが認められる。水は最後の3-4プロットのみだが、LASはかなり早い段階から立ち上がっており、その傾向が顕著である。これは、流量がそれほど上昇していないにもかかわらず抗力のみが増加し続け、メッシュを通過しにくくなっていることを示しており、大変興味深い。水に関しても、さらに高いRe範囲が測定可能ならば、LASと同様顕著な立ち上がりが認められると予想で

きる。逆に、LASについて低Re範囲を測定できれば、ほぼ比例関係が得られるであろう。この原因については、現在検討中だが、ひとつの判断として、立ち上がりが見られるRe範囲ではやや乱流傾向（完全な乱流ではなく、層流から乱流に移る分岐点）になっている可能性があると考えている。現在追実験を行っており、詳細を検討している段階である。

Fig11, Fig12に、ステンレスメッシュによって生じた抗力を各溶液について示す。Re算出に用いた代表長さとして流路断面周径を用いたため、オーダーが異なっていることをご容赦されたい。

これを見ると、両グラフとも抗力が最も高いのは水で、界面活性剤水溶液は同じかやや低い傾向が見られる。これは、界面活性剤のイオン性に関係なく4種に見られることから、球状ミセルを形成する界面活性剤水溶液に共通した傾向だと判断できる。このことは、水に比べて界面活性剤水溶液がメッシュ間隙を通過しやすいことを意味しており、水より高い粘度を持ち、分子集合体であるミセルを有する界面活性剤水溶液の方が流れやすいことは、当初は予想し得なかった。前述したように、ワイヤー実験でもこの傾向が認められていることから、界面活性剤水溶液が流動時にどのような挙動をとるかを水と比較しながらさらに明らかにする必要がある。ひとつの観点として、流動時のミセルの分子配向状態やミセル自身の変形が関係していると予想しており、この点については複屈折、二色性などの実験を行いながら現在解析中である。

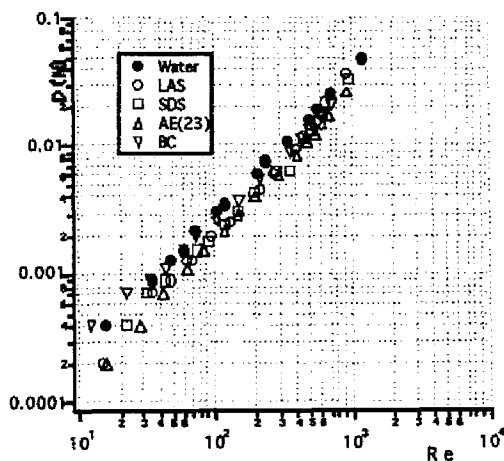


Fig11. Drags of stainless mesh screen(300/inch)

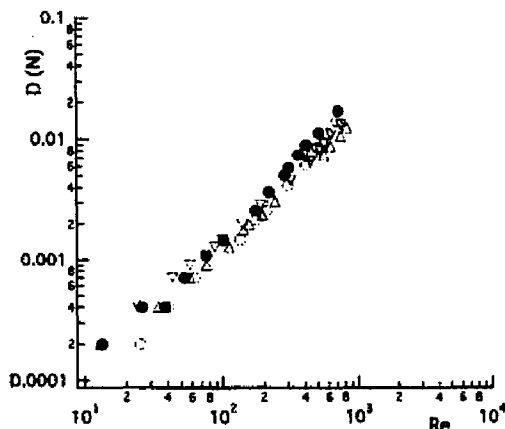


Fig12. Drags of stainless mesh screen (250/inch)

Fig13に糸密度が同一でオープニングエリアが異なる2種のポリエステルメッシュの抗力を、Fig14にはオープニングエリアが同一で糸密度が異なる2種のポリエステルメッシュの抗力を示す。いずれも水の結果である。Re算出に用いた代表長さは、流路断面周径である。

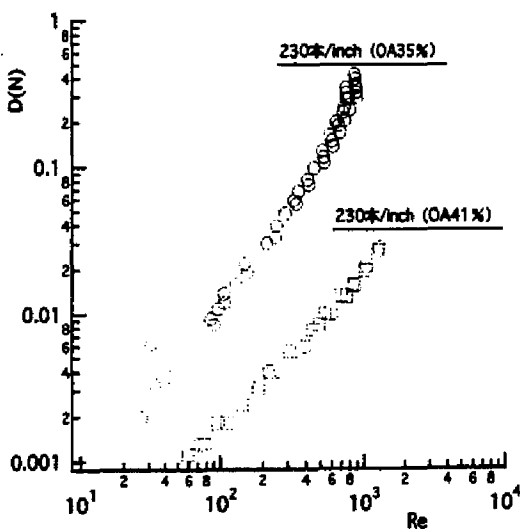


Fig13. Drags of polyester mesh screen (Water)

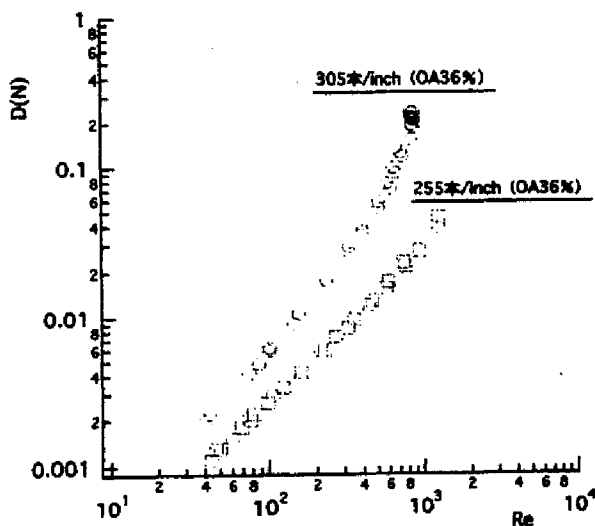


Fig14. Drags of polyester mesh screen (Water)

Fig13はオープニングエリアに6%の差があるメッシュで、35%メッシュは41%メッシュより1本あたりの糸の太さ(線径)が大きい。これを見ると、明らかにオープニングエリアの小さいものほど抗力が高くメッシュを通過しにくいことがわかる。また、わずか6%の差であるにもかかわらず、抗力の差は約10倍前後と大変大きい。一方Fig14は、溶液通過部の全面積は同一で、糸密度が異なるメッシュの結果だが、糸密度が高い305本/inchの抗力が高い。305本/inchは小さい間隙が数多くあり、255本/inchはそれに比べて1つの間隙は大きい数が少ない。このことは、間隙の数が多いほど溶液が通過しにくいことを示しており、抗力はオープニングエリアではなく、糸密度に依存しやすいと判断できる。

Fig15およびFig16に、ひも状ミセルを形成する陽イオン界面活性剤CTAB水溶液の抗力を示す。Re算出に用いた代表長さは、流路断面周径である。Fig15は、CTABにNaSalを添加した溶液で、メッシュはポリエステル255本/inch、Fig16は、CTABにHSalを添加した溶液で、メッシュはステンレス200本/inchの結果である。これらの溶液は、流動時に弾性力があることが知られており、粘性も水に比べて20-30%程度高い。

結果を見ると、これまで挙げたグラフとは異なり、低Re範囲と高Re範囲ではReの上昇に伴って抗力も増加するが、途中のあるRe範囲でプラトー部分を持つ形状となった。プラトー部分は、流量(流速)が増加しても抗力に全く変化がないことを示しており、流れやすさ(流れにくさ)に流量が影響しない範囲があると解釈でき、ひも状ミセルを有する溶液の特徴と言える。(分子構造がひも状である希薄高分子水溶液PEOにはこの傾向は認められない。)この点について、プラトー前後(低Re範囲と高Re範囲)のグラフの傾きがほぼ同一であることから、プラトー部分に入る直前に分子構造、配向に何らかの変化が生じ、それが元に戻るとともにプラトーも終了する可能性を考えている。

また、抗力Dの値を比較すると、Fig15、Fig16とも、最も低いのは1:0.5で、次いで1:1、1:1.5の順であった。しかし、1:1と1:1.5の差はわずか、1:0.5はそれに比べて約1/2の値をとっている。これは、形成されるミセルの数に影響を受けていると判断できる。すなわち、CTABとNaSal、HSalは、1分子ずつが結合して1つのミセルを形成するため、1:1溶液と1:1.5溶液で形成されたミセルの数は同じである。一方、1:0.5溶液は、形成されたミセルの数がその半分である。このことは、1:0.5溶液の抗力が1:1、1:1.5溶液の約1/2であることに一致している。現在、添加比を変えて調製した(例えば1:0.3、1:0.7など)溶液について実験を行っており、抗力値とミセルの数に関してさらに詳しい解析を試みている。なお、CTAB:HSal/W系に形成されるミセルはCTA⁺イオンとHSal分子との1:1コンプレックスであり、形成されたミセルは正に帯電した表面を持っていると考えられているため、ミセルどうしの静電的相互作用はCTAB+NaSal系に比べるとかなり高いことが期待される。しかし、本実験の結果にはメッシュ自身の帯電性も含めて、こうした電気的影響は現時点ではほとんどないと考えている。

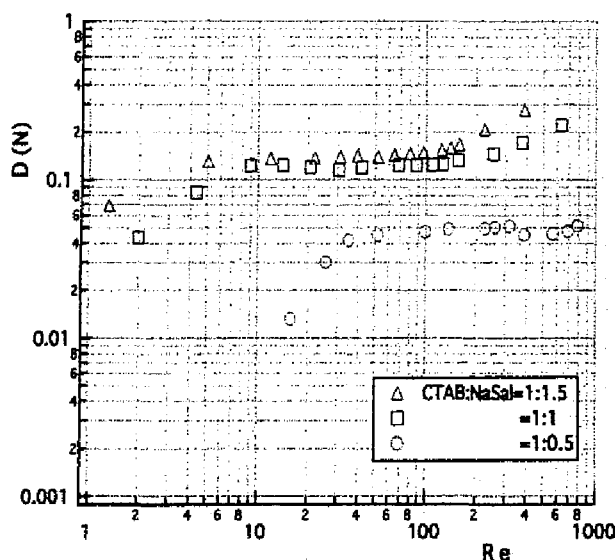


Fig15. Drags of polyester mesh screen
(CTAB+NaSal : 0.001mol/ℓ)

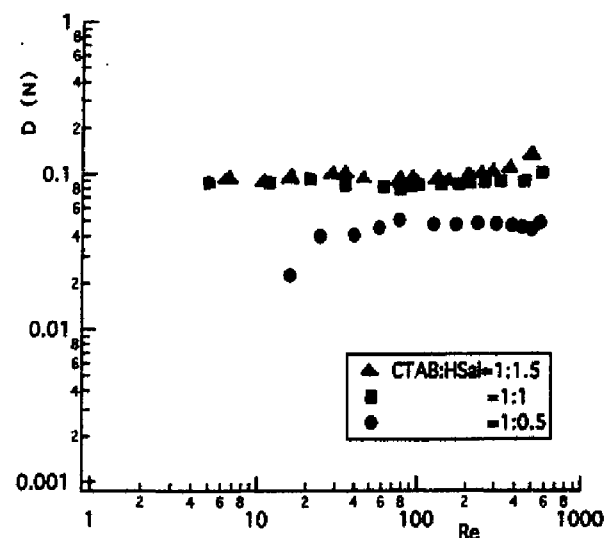


Fig16. Drags of stainless mesh screen
(CTAB+HSal : 0.001mol/ℓ)

以上のように、メッシュを通過する流れで生じる抗力を測定した結果、流体やメッシュの種類でそれぞれ特徴的な傾向を示した。これを実際の洗浄場面から考えると、抗力が高いことが洗浄性に有効か否かは見解が分かれるところであろう。例えばメッシュに汚れが付着している場合、メッシュを通過しにくいことがその汚れを除去する（実際には押し流すことになると考えられるが）のに有利に働くか解釈できるかという点である。ワイヤー実験では、汚れモデルによって生じた高い抗力は洗浄性にも有利だと解釈した。メッシュ実験では、球状ミセルを形成する界面活性剤水溶液の抗力は水より低い結果を示し、メッシュ間隙を通過しやすいことが明らかとなったが、これはメッシュそのものへの負担が少なく基質の損傷は少ないという当初の目的のひとつを達成したことになるとの解釈は成り立つ。しかし、次段階では汚れを介在させた実験を試みる必要が感じられた。

5. まとめ

界面活性剤水溶液の流動時の特徴を探る目的で、矩形流路を用いた層流中で、汚れモデルや布モデルを用いた流動実験をしたところ、いくつかの興味ある知見が得られた。得られた結果をまとめると以下のようになる。

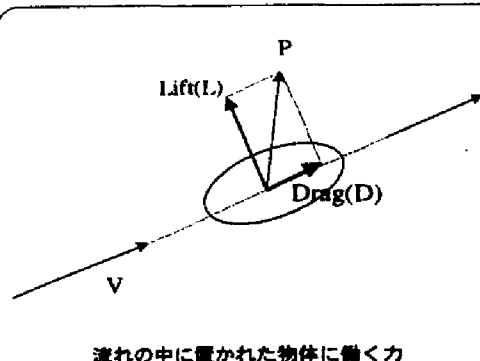
- (1) ワイヤー実験、メッシュ実験とも、抗力は Re の増加とともに上昇する。
- (2) 抗力は、ワイヤー径が大きいほど高く、メッシュでは糸密度が大きくオープニングエリアが小さいほど高い。
- (3) メッシュ実験では、糸密度が同一の場合はオープニングエリアが小さい（フィラメント径が太い）ほど抗力が高い。一方、オープニングエリアが同一の場合は糸密度が大きい（メッシュが細かい）ほど抗力が高い。
- (4) 抗力に与えるメッシュの材質の影響は少ない。（ポリエステルは水中で負に帯電、ステンレスメッシュは正に帯電する。）
- (5) ワイヤー実験、メッシュ実験とも、希薄高分子水溶液の抗力が最も高く、次いで水、界面活性剤水溶液（球状ミセル形成）の順で、粘度の順位とは一致しない。
- (6) ひも状ミセルを形成する CTAB+NaSal/HSal 溶液の抗力は、球状ミセルを形成する界面活性剤水溶液より全体的に高く、抗力の値は形成されるミセルの数に関連する。さらに、メッシュ実験では、ある Re 範囲でグラフにプラトー部分を持つ特異な形状をもつ。

6. 参考

盛岡応用数学小研究会(10/30/2004)

洗浄機構に関する流体力の検討
—界面活性剤水溶液のレオロジー挙動の解明—

岩手大教育 天木桂子



研究の背景

洗浄機構に関わる要因

1. 化学的作用・・・洗浄液の界面化学的效果（浸透、分散、乳化、可溶化など）

↓

界面活性剤の効果はかなり大、しかし河川湖沼などへの配慮が必要

2. 物理的作用・・・被洗物に与えられる外力（摩擦、衝撃、ねじれ、変形など）

↓

大きいほど汚れ除去効果も大、しかし損傷も大

↓

洗浄効果が高くかつ被洗物や環境への影響も少ない方法の解明

洗浄液の持つ流体力の活用

界面活性剤水溶液

—分子中に、親水基と疎水基（親油性）の両方を持つ。

界面に吸着してその界面張力を低下させる。

cmc以上の濃度でミセル（主として球状）を形成する。

↓

流れ挙動の特徴をとらえる

物性値（粘性、弾性など）の測定

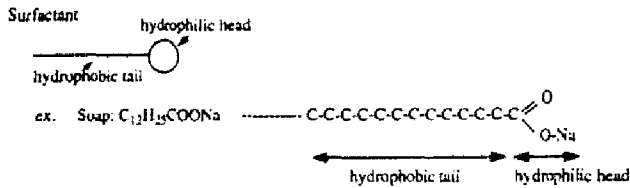
↓

水との比較

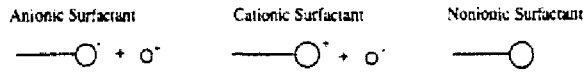
↓

流体力学的にも界面活性剤水溶液は水より汚れ除去に有利か？

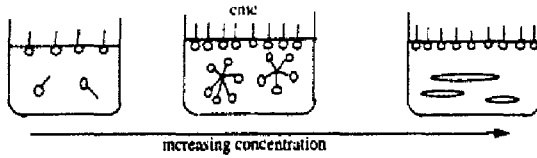
I. Introduction



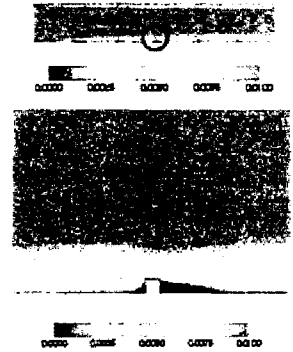
Surfactant Aqueous Solution



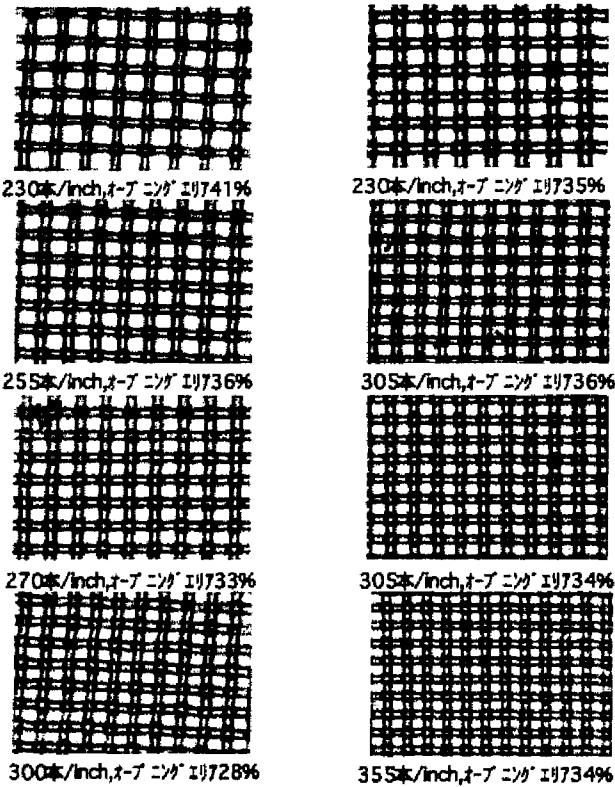
[Micelle]



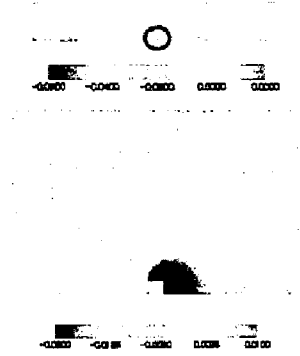
入り口流速 0.01m/s
 流れ方向速度 v [m/s]
 上下壁条件 滑り無し条件
 スパン方向 1mm、左右対称条件
 高さ 1mm、矩形障害物 $50\mu m \times 50\mu m$
 作動流体 水 10°C (293K)
 非圧縮性、完全流体



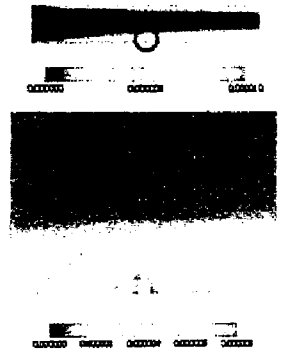
ポリエステルメッシュ



入り口流速 0.01m/s
 圧力 [Pa]
 上下壁条件 滑り無し条件
 スパン方向 1mm、左右対称条件
 高さ 1mm、矩形障害物 $50\mu m \times 50\mu m$
 作動流体 水 10°C (293K)
 非圧縮性、完全流体



入り口流速 0.01m/s
 乱れエネルギー
 上下壁条件 滑り無し条件
 スパン方向 1mm、左右対称条件
 高さ 1mm、矩形障害物 $50\mu m \times 50\mu m$
 作動流体 水 10°C (293K)
 非圧縮性、完全流体



- 線径
- 厚さ
- オープニング
- オープニングエリア
- 透過体積

