論

文

Estimate of the Fluid Force Related to Washing Mechanism 1 Measurement of the Drag of Fine Wires on a Plate Caused by the Flow of Aqueous Solutions of Surfactant and Dilute Aqueous Solution of Polymer

Keiko AMAKI^{*1}, Tomiichi HASEGAWA^{*2}, and Masaaki KONNO^{*2}

^{*1} Faculty of Education, Iwate University,
Ueda Morioka, Iwate, 020 Japan

^{*2} Faculty of Engineering, Department of Mechanical and Production Engineering,
Niigata University, Ikarashi Niigata 950-21 Japan

The effect of fluid force on detergency has been experimentally investigated. More than one hundred wires of 50 μm in diameter, as a model of two dimensional soil, were set so as to adhere to a bottom flat plate of a two dimensional channel. The aqueous solution of surfactant and the dilute aqueous solution of polymer were made to flow through the channel and the pressure drop caused by the wires was measured. The drag and the drag coefficient(C_D) of one wire were estimated with the pressure drop by the use of the law of momentum. The following results are obtained. For all solutions used, the drag increases and the drag coefficient decreases with an increase in the Reynolds number based on the wire diameter taken as the characteristic reference length. The solution of LAS, one of familiar anionic surfactants, gives C_D values lower than the pure water, and the difference becomes marked as the concentration of the solution increases. A nonionic surfactant solution, AE 1.0%, shows a time dependent character; it provides about half of the corresponding C_D value of water within a day since the solution was produced, while it gives nearly the same as that of water after 4 days have passed. The C_D for dilute solution of polymer (PEO 20 ppm) in water is higher than those for water and surfactant solutions. Viscosities of the solutions tested were Newtonian and the magnitudes are in the same order for all three solutions. These results suggest that the variation of C_D observed for the three solutions is not directly related to the solution viscosity but probably to other properties such as elastic force.

Key words: Detergency / Drag / Fine wire / Surfactant solution / Dilute polymer solution

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

天 木 桂 子^{*1}・長谷川 富 市^{*2}・近 野 正 昭^{*2}

(原稿受理：1992年6月8日)

1. 緒 言

洗濯洗浄における汚れの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．化学的作用は，主に市販洗剤に配合されている界面活性剤によってもたらされるもので，浸透・分散・乳化・可溶化・ローリングアップなどが挙げられる．これらに関してはあらゆる観点から多くの研究が行われ，ある程度の解明が進んでいる．

^{*1} 岩手大学教育学部 〒020 盛岡市上田3-18-33

^{*2} 新潟大学工学部 〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050

一方、物理的作用は、布地や汚れに対して与えられる機械力による作用である。これに関しても、これまでいくつかの研究が行われてきた。例えば、洗浄液中での布地の折り曲げや摩擦、衝突の効果^{1)~3)}、遠心力や流体力を利用した固体粒子除去の検討^{4)~8)}、液流の洗浄作用の解析^{9)~12)}、機械力と布の損傷との関係^{13)~15)}などが挙げられる。また、物理的作用の寄与率は、全洗浄力の40~50%を占めるという報告もある¹⁶⁾。

しかし、機械作用の主要因である洗浄液の流動については現時点で不明な点が多い。また、流体の粘弾性が汚れの除去過程において果たす役割もいまだに明らかにされていない。

本研究は、流体力の洗浄機構に対する効果を実験的理論的に解明することを目的とする。特に本報告では、壁面上の層流境界層内に存在する汚れモデルとして2次元流路の底面上に微小円柱を付着させ、これに数種の溶液の層流せん断流を直角に当てることにより生ずる圧力損失を測定し、運動量の法則から微小円柱1本当たりの抗力を算出して溶液種類の違いによる影響を検討する。

2. 実験

2.1 使用流体

界面活性剤水溶液として、陰イオン系のリニア型ラウリルベンゼンスルホン酸ナトリウム (LAS, 試薬1級, ナカライテック), および非イオン系のポリオキシエチレンラウリルエーテル (AE, 試薬1級, 和光純薬ブリジ35) を重量濃度0.2%~1.0%に調製して用いた。いずれも市販の洗濯用合成洗剤に配合されている一般的なものである。

比較対象として、ポリエチレンオキサライド (製鉄化学工業 PEO 18) の重量濃度 20ppm 水溶液を作り、希薄高分子水溶液として用いた。この時、あらかじめ 100ppm の水質安定剤 (明成化学社サンデックスC) を溶解させた。

さらに代表的なニュートン流体である水 (イオン交換水) を用い、これは他の溶液の溶媒としても使用した。水は採取直後多量の空気を含んでおり、そのまま実験を行うと装置内に気泡が生じることが考えられるため、24時間以上経過したものを用いた。

2.2 実験装置

実験の概要は、Fig. 1 に示すように、縦横比の大きい矩形流路の下面に張られたワイヤーの抗力を、上流下流間の圧力差から知るものである。すなわち、ワイヤーを含む長さ L の区間で生じた圧力損失 P と、ワイヤーのない同一長さ L の区間で生じた圧力損失 P_0 の差 ($P - P_0$) を、ワイヤーによって生じた圧力損失と考えた。さらに、この圧力損失を、後述するようにワイヤーの抗

Fig. 1 Schematic explanation of experiment.

Fig. 2 Schematic representation of experimental apparatus.

力に関係づけた。

Fig. 2 に実験装置の概略を示す。幅 40mm、高さ 1mm の矩形断面を持つ流路は、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。重ねた上下 2 枚のアクリル板のまわりをボルトで止め、その内側にゴムパッキングを挟んで溶液のもれを防いでいる。

上下の相対位置決定および流路幅の確保は、4 本のステンレス製ピンによってなされている。流路上面となるアクリル板には、両端から 55mm の所にしんちゅう管が 4 本立っている。溶液流入口であるしんちゅう管 1 はヘッドタンクに接続されており、しんちゅう管 2 は流出口である。しんちゅう管 2 にはビニールチューブが取り付けられ、途中のピンチコックの開閉により流量調節を行う。また、途中 8 か所に開けられた 0.3mm の圧力検出孔は、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。流路下面のアクリル板には、しんちゅう管 1 より 200mm の所から 1mm 間隔で $\phi 50\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーが 121 本張られている。

この装置で溶液は、しんちゅう管 1 から装置内に流れ込み、上流側圧力検出孔、ワイヤー部分、下流側圧力検出孔を通過し、しんちゅう管 2 より流出する。この場合、流路高さを代表長さ、流路内平均速度を代表速度にとったレイノルズ数 (Re) は約 1,000 で、理論上求められる層流助走区間は 123.8mm、また、流路高さ 1mm に対し幅 40mm は十分広いので、流路内の流れは 2 次元ポアズイユ流を仮定する。

2.3 測定方法

ヘッドタンクに溶液を約 100l 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。流量調節は、流出側のビニールチューブに取り付けたピンチコックの開閉により行った。

差圧の測定は、流量調節後 10 分程経過しマンオメータの水頭が一定になった時点でを行った。同時に流量 Q を重量法により測定した。

2.4 抗力の算出方法

Fig. 2 に示す 8 本の圧力検出孔のうち、上流側から数えて 3—4 間のマンオメータの水柱差は、ワイヤー 121 本を含む区間距離 140mm 間に生ずる圧力損失を、他のマンオメータの水柱差は、区間距離 10mm 間に生ずる圧力損失を示す。

本実験では、ワイヤーを含む区間 3—4 で生じた圧力損失から、

ワイヤーのない他の6区間で生じた圧力損失の平均を，区間3-4と同じ距離140mmに換算して引いた値をワイヤーによって生じた圧力損失と考え，これを h とした。

いま，運動量の法則を適用するために，圧力検出孔3，4の位置を上流下流側境界とし，ワイヤー設置区間を含む検査体積をとり，その検査体積の表面（検査面（Control surface））をFig. 1中に示すように点線で表す。ワイヤー径（50 μ m）は流路高さ（1mm）に比較し十分小さく，かつ上流下流側検査面はワイヤー設置区間より10mmずつ離れているので，速度分布は上流下流側検査面で同一で二次元ポアズイユ流れのそれと等しいとみなしてよい。従って，流体の有する運動量は検査面の入口（上流）側と出口（下流）側で変化せず，運動量の法則から，ワイヤー設置による圧力損失に流路断面積をかけた力とワイヤー抗力とがつり合うことになる。このことから次の式(1)を得る。

$$A\rho gh=nD \quad (1)$$

ここに， A は流路断面積， ρ は溶液の密度， n はワイヤーの本数， D はワイヤー1本の抗力である。

本実験で仮定している2次元ポアズイユ流の速度分布は，2次曲線で表される。実験により測定した流量 Q から次の式(2)を用いてワイヤー中心部（壁面から25 μ mの地点）での流速 V を求め，これを代表流速として次の式(3)からワイヤー中心部におけるレイノルズ数（ Re_w ）を算出した。

$$V=\frac{6Q}{Hb}\left\{\frac{y}{H}-\left(\frac{y}{H}\right)^2\right\} \quad (2)$$

$$Re_w=Vd/\nu \quad (3)$$

ここに， H は流路高さ， y は壁面からワイヤー中心部までの距離（=25 μ m）， d はワイヤー直径， b は流路幅， ν は動粘度である。

さらに，式(1)で得られた抗力 D は，抗力係数を C_D として次の式(4)により無次元化した。

$$D=1/2C_D\rho V^2S \quad (4)$$

ここに， S はワイヤーの投影面積である。

3. 結果および考察

3.1 ワイヤーの抗力

Fig. 3に，式(1)により算出したワイヤー1本分の抗力（ D ）と流路内の平均レイノルズ数（ Re ）の関係を，水，LAS 1.0%，PEO 20ppmについて示す。 Re の小さい領域では測定誤差が大きくなり実験値はばらついている。しかし，すべての溶液で D は Re の上昇とともに増加していることがわかる。本実験の場合， $Re=100\sim 1000$ で， $D=10^{-5}N\sim 10^{-4}N$ のオーダーである。

溶液別に D の値をみると，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 D を与え，PEOとは逆の挙動を示している。

3.2 抗力係数

Fig. 4に，式(4)を用いて算出した水の抗力係数（ C_D ）と，ワイヤー中心部でのレイノルズ数（ Re_w ）の関係を示す。全体的に， C_D は Re_w で比較的良好に整理され，右下がりの傾向を有する。

Fig. 3 Drags of one wire.

○; water, △; LAS 1.0%, □; PEO 20ppm

Fig. 4 Drag coefficients for water.

しかし，その下がり方は， $Re_w=1$ 以上で鈍化する傾向がある。

Fig. 5に，LAS 0.2%，0.5%，1.0%水溶液の C_D を示す。図中の斜線は水の値を表している。LASの C_D は，水と同様に Re_w の増加と共に右下がりの傾向を有するが，溶液濃度により異なっており， $Re_w\geq 1$ の領域で明らかに，本実験範囲では濃度が高いほど低い値をとっている。すなわち，0.2%，0.5%は，水とほぼ同じかやや低い C_D を示すのに対し，1.0%は水より明らかに低い値を示す。このことから，濃度が高いLAS水溶液は，水とは異なった流れをしていることが予想される。

Fig. 6は，AE 1.0%の C_D を，溶液作成後の経過時間別にしたものであり，時間経過に伴って C_D が全体的に上昇していることがわかる。すなわち，作成後1日めは C_D が最も低く，4日

Fig. 5 Drag coefficients for LAS solutions.

○; 0.2%, △; 0.5%, □; 1.0%

Fig. 6 Drag coefficients for AE 1.0% solution with the time passage after producing the solution.

○; 1day, △; 3days, □; 4days, ●; 2weeks, ▲; 1month

めまでは時間経過と共に高くなる傾向がみられる。しかし、2週間後、1か月後は比較的値が安定し上昇はみられない。このことから、AEは溶液作成後の初期段階は性質が安定せず、複雑な挙動を示すことがわかる。なお、この時間経過の影響は、もう一つの界面活性剤 LAS では見られなかった。

Fig. 7 に、希薄高分子溶液 PEO の C_D を示す。実験値はかなりばらついてはいるが、界面活性剤水溶液とは異なり、 $Re_w > 1.0$ の範囲で水より高い値を示している。

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、その種類により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溶液は、 C_D について全く逆の傾向を示している。

Fig. 7 Drag Coefficients for PEO 20ppm solution.

今回用いた高分子 PEO は分子量が数100万で、水溶液中では細長いひも状で存在していると考えられている。一方、界面活性剤は分子量は300~400であるが、臨界ミセル濃度 (cmc) 以上の水溶液中では球状ミセルを形成するため、1個の分子量(ミセル量)は1万以上にも及ぶとされている。したがって、界面活性剤水溶液は水と希薄高分子溶液の中間の性質を有すると当初予想された。しかし、今回の結果は LAS や AE の C_D が水より低い場合があり、予想とは異なる内容である。

3・3 溶液の粘性

ここで、使用した溶液の粘性を考える。壁面せん断応力 (τ_w) と、壁面ずり速度 ($\dot{\gamma}_w$) の関係は、ニュートン粘性を有する流体について次の式(5)で与えられる。また、 τ_w , $\dot{\gamma}_w$ は、測定可能な量によってそれぞれ次の式(6)、式(7)で与えられる。

$$\tau_w = \mu \dot{\gamma}_w \quad (5)$$

$$\tau_w = \Delta PH / 2L \quad (6)$$

$$\dot{\gamma}_w = 6V_a / H \quad (7)$$

ここで、 μ は粘度、 L は区間距離、 V_a は流路内平均流速である。

以上の式を用いて、水および界面活性剤水溶液、希薄高分子溶液の τ_w , $\dot{\gamma}_w$ を、前述のワイヤーのない区間の圧力損失 (ΔP) から算出した。水、LAS、PEO の結果を Fig. 8 に示す。(AE については図に示していないが、LAS 1% とほぼ同じ値である。また、Fig. 6 で示された AE の時間依存性は粘度には見られなかった。この理由として、Fig. 8 で見るように、もともと界面活性剤の添加による粘度増加は小さく、仮に粘度に対する時間経過の影響があったとしても、感知できない可能性のあること、また、時間経過の影響は、粘度測定時のせん断流のような単純な流動場では表

Fig. 8 Wall shear stress τ_w versus wall shear rate $\dot{\gamma}_w$.
○; water, △; LAS 1.0%, □; PEO 20ppm

に出ず，ワイヤー抗力測定時のような複雑な流動場の場合に C_D 値の違いとして現れる可能性のあること，などが考えられる。）

この図からわかるように，各流体の実験値は傾き 1.0 の直線にはほぼのっており，ニュートン粘性を示している。また，その絶対値から，粘度は希薄高分子溶液，界面活性剤水溶液，水の順に高いことがわかる。

粘性のこの傾向を C_D と比較すると，PEO については粘度， C_D 共に水より高い。しかし，LAS，AE では粘度は水より高いが C_D は水とほぼ同じか水より低い値をとっている。またさらに，粘度は C_D を示す図の Re_w の中にすでに含まれている。これらのことから，各溶液の C_D の変化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検討する必要がある。また，ワイヤーや流路壁に高分子や界面活性剤が吸着していることも考えられ，この点からの検討の余地も残されている。

このように，水，界面活性剤水溶液，希薄高分子溶液は C_D 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， C_D の高い希薄高分子溶液は，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配合することで，流体力を活用できる可能性があり，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。

4. ま と め

洗浄機構に関する物理的作用を流体力の面から明らかにするため，汚れに関連した基本モデル装置を作成して，実験を行った。

すなわち，汚れモデルを想定した微小円柱を壁面に付着させ，水，界面活性剤 (LAS, AE) 水溶液，希薄高分子 (PEO) 水溶液の層流せん断流を直角に当てることにより生ずる圧力損失を測定し，円柱一本の抗力係数 (C_D) を算出した。

得られた結果は以下の通りである。

- 1) すべての溶液で，円柱の抗力はレイノルズ数とともに増加するが， C_D はレイノルズ数と共に単調に減少する。
- 2) 陰イオン系界面活性剤 LAS 水溶液は，水よりも低い C_D 値を示し，本実験範囲で濃度が高いほどこの傾向は顕著である。非イオン系の AE 1.0% 水溶液は，溶液作成後の経過時間が 1 日程度であると水に比べ 1/2 程度の低い C_D を示すが，4 日程度で水と同程度の C_D となる。
- 3) 高分子 PEO の希薄水溶液は，水，界面活性剤水溶液よりも高い C_D 値を示す。
- 4) 溶液の粘度は，PEO 希薄水溶液，LAS 1.0% 水溶液，水の順に高かったが，これは C_D の傾向とは一致していない。

本研究を行うにあたり，適切なる御助言を賜りました新潟大学工学部流体工学研究室の鳴海敬倫氏に厚く御礼申し上げます。また，実験に御協力いただいた堀川浩人氏，丸山英樹氏，関口弘恵氏，渡邊美千代氏，千葉由美子氏，上野ミユキ氏に厚く御礼申し上げます。

本論文の一部は，日本レオロジー学会第17年会（1990，千葉市），第22回（1990，東京）および第23回（1991，西宮市）洗浄に関するシンポジウムにて発表した。

文 献

- 1) 長谷川富市，多田千代，油化学，**32**，397（1983）
- 2) 長谷川富市，多田千代，油化学，**34**，545（1985）
- 3) 長谷川富市，鳴海敬倫，近野正昭，多田千代，油化学，**36**，419（1987）
- 4) 岩崎芳枝，小林明子，原田弥生，矢部章彦，油化学，**29**，495（1980）
- 5) 岩崎芳枝，小林明子，原田弥生，矢部章彦，油化学，**30**，232（1981）
- 6) Iwasaki Y, Hikage Y, Yabe A, *Text Res J*, **56**, 556（1986）
- 7) 岩崎芳枝，日景弥生，矢部章彦，油化学，**36**，254（1987）
- 8) 岩崎芳枝，矢部章彦，油化学，**39**，654（1990）
- 9) 平松 峻，小谷昭子，繊維製品消費科学会誌，**22**，149（1981）
- 10) 平松 峻，小谷昭子，繊維製品消費科学会誌，**22**，186（1981）
- 11) 平松 峻，小谷昭子，繊維製品消費科学会誌，**23**，31（1982）
- 12) 平松 峻，小谷昭子，繊維製品消費科学会誌，**25**，83（1984）
- 13) 白岩治巳，金城学院大学論集，**24**，1（1984）
- 14) 白岩治巳，山田寿子，繊維製品消費科学会誌，**28**，85（1987）
- 15) 白岩治巳，繊維製品消費科学会誌，**32**，542（1991）
- 16) 柏 一郎，平林 隆，角田光雄，大場洋一，油化学，**20**，304（1971）