洗淨における機械力

Mechanical Force in Textile Washing

長谷川富市

新潟大学工学部機械システム工学科
〒950-2181
新潟市西区五十嵐2の町 8050

Tomiichi HASEGAWA
Mechanical and Production Engineering
Faculty of Engineering
Niigata University
Ikarashi 2-no-cho, 8050
Nishi-ku, Niigata-shi 950-2181, JAPAN

論文要旨：洗濯洗淨における機械力を、布の変形と摩擦に対する寄与および洗液の流れに対する寄与に分け、それぞれについて従来の研究結果を紹介し、その位置づけと意味するところを述べた。また、機械力を積極的に利用して洗淨に必要なエネルギーや洗剤を減らす方法についても言及した。さらに、洗液の流体力学的特性や動的表面張力についても記した。とくに、布に与えたエネルギーはある値以下では洗淨に有効に働くけれども、その値以上では洗淨に有効に働かないこと、および、洗剤水溶液は汚れの付着力を弱めるといふ化学的作用の他に、糸あるいは繊維間流れの流動抵抗を減少させ水に比べて大きな流量を実現させることにより汚れを落とす効果のあることが述べられている。

Abstract: Researches on mechanical force in textile washing have been reviewed. Mechanical force exerts its effect through various factors; bending, friction and elongation of textile, and the flow on the textile surface or the flow between yarns or fibers. The present report mentioned positioning and meaning of researches so far carried out on these factors. Also, the author introduced washing methods developed for the purpose to reduce energy and detergent by utilizing the mechanical force positively. Furthermore, he stated both the fluid property and the dynamic surface tension of liquids concerned with washing. In particular, the following two points were stressed: (1)Energy provided to textile is effective below its certain value, but it is of no use beyond the value and the excess energy is only wasted. (2)Aqueous solutions of detergent 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 in water, as well as the effect to lessen the chemical potential between soil and substrate.

Key words: Mechanical force, Textile washing, Detergent, Surfactant solution, Dynamic surface tension

1 はじめに

一般に、洗濯洗淨の汚れ除去に関わる種々の要因は化学作用と物理・機械作用に大別され（注1）、後者は機械力と呼ばれる。しかし、実際の洗淨における機械力は多種多様であり、かつそれらの多くは単独で作用せず相互に複雑に関係している。したがって、機械力の各要因を単独で取り出し、その効果を議論することが妥当であるという保証はない。しかしながら、解析の手始めとして単純なモデルから始めて各要因の効果を評価し、次第

に実際の洗濯洗淨の解明に近づくことは有効な手段と考えられる。日本における洗濯洗淨の多くは洗液中における布の運動により行われるが、機械力を実験的に調べる場合、Fig. 1のように、機械力の寄与を布の変形（曲げ、せん断、伸び・圧縮）と摩擦（布同士、布と固体壁）および洗液の流れ（布表面上の流れ、繊維糸と繊維間を通過する流れ）に分けて行う。柏らは全洗淨力に対する機械力の割合をある仮定のもとで求め、通常の洗濯機の洗淨条件では、機械作用の寄与は約50%で残り50%が洗剤の界面化学作用の寄与であったと報告している¹⁾。しかし、この残り50%について小林らは洗液に浸漬しただけで洗淨される界面化学作用は約3%で、残り47%は洗

連絡者：長谷川富市
E-mail: hasegawa@eng.niigata-u.ac.jp

Fig. 1 機械力 (実験上の分類)

剤の界面化学作用と機械力の相乗作用であったとし、洗浄における機械力の寄与がより大きいことを強調している²⁾ (注2)。さらに、小林らは各種機械力の効果をモデル装置を用いた実験により調べている³⁾。以下に、今まで得られた機械力に関する研究成果を概観する。

2 布の変形と摩擦に寄与する機械力

2.1 布の変形

洗濯時の衣類はさまざまな変形を受けつつ汚れを落としている。その変形が実際の洗濯洗浄にどの程度の役割を果たしているかを調べる実験が多田によって行われた⁴⁻⁶⁾。その結果、洗浄時に自由変形および振変形(振りによる強制変形)させた場合の洗浄率は、無変形のそれよりも2~3倍も高く、変形の重要性が示された。これと同時に布の変形を定量的に把握するために変形を単純な様式に分類しこれについて解析を行う必要性のあることが指摘された。変形様式は、Fig. 1に示すように、せん断、曲げ、伸び(圧縮)に分けられる。

2.1.1 せん断変形の効果

多田は布地にせん断変形を加えて洗浄効果を調べる実験を行った⁷⁻⁹⁾。実験装置をFig. 2に示す。同一洗浴中

Fig. 2 せん断変形洗浄装置

Fig. 3 繰返しせん断変形洗浄の効果が全洗浄力に占める割合(p)の、共存油性汚れ別比較

に、2枚の汚染布を同時にセットし、一方にはせん断変形を繰り返し加え、他方は変形無しで上下運動を繰り返えさせる。そして、両者の洗浄効率の差からせん断変形による洗浄効果を算出した。実験結果の一部をFig. 3に示す。せん断変形による洗浄効果が全洗浄力に占める割合 p の高さが見て取れる(p の定義については文献8を参照)。他の実験結果を含めて以下の結論が得られた。

1. 布地の上下振動数が100から400spmに増大するにつれて、せん断変形布の洗浄効率曲線は著しく上昇したが、無変形布の洗浄効率の上昇は微弱であった。このことから、洗浄にはせん断変形が大きな効果をもつことが明らかとなった。
2. せん断変形の効果が全洗浄に占める割合は、布地のせん断速度に対応しており、30~90%の範囲に分布した。洗浄時間の大小には対応しなかった。
3. せん断変形の効果は、液状の油性汚れを共存する人工汚染布よりも、固形油共存の人工汚染布の方が大きかった。

2.1.2 曲げ変形および摩擦(布と固体壁間)の効果

布地に特定の曲げ変形(特定の曲率)を与えて洗浄実験を行うために、Fig. 4に示す原理による実験が行われた(実験装置図および説明は省略する)^{10, 11)}。すなわち、布地に一定の曲げ変形を与えるために直径 $2r$ の円柱の中央部を間隔 l_0 だけ細く削りとり、円柱に沿うように布を取り付ける。布に上下の往復運動を与えると円柱に沿って運動する部分(C部、幅 l_1)は、円柱に接触しない状態(A部、曲率 $\kappa=0$)から円柱に接した摩擦ありの状態(C部、曲率 $\kappa=1/r$)への曲げ変形を行う。したがって中央の円柱に触れない部分(B部、幅 l_0)も摩擦無し状態で前記とほぼ同じ曲げを受けることにな

Fig. 4 曲げ・摩擦・液流, 各単独の効果を調べるための洗浄装置原理図

る。この実験により、得られた結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5-1 は、試験布各部について、縦軸に洗浄効率 Φ_1 、横軸に変形の往復回数 (cycles) をとったものである¹⁰⁾。この図から、各部の Φ_1 の値は大きい順に C, B, A, 比較資料 (浸漬洗浄布) であり、往復回数が増すと上昇する傾向にあるが、A, B, C 部は 1,000 回付近まで、浸漬洗浄布では 200 回相当時間付近まで上昇して以後はほぼ一定値となっている。また、この図の往復回数の多いところを

Fig. 5-1 往復回数に対する A, B, C 各部の洗浄効率 (Φ_1)。ここにおける Φ_1 は、正確には反射洗浄率 (%) というべきものであり、次式で定義される。
$$\Phi_1 = 100 \times \frac{R_w - R_s}{R_0 - R_s}$$
 ここで、 R_w : 洗浄後の各部の反射率, R_s : 洗浄前の汚染布の反射率, R_0 : 汚染前の原白布の反射率, である¹⁰⁾。

Fig. 5-2 B, C 部の裏面における洗浄効率 (曲げの効果)

Reciprocating cycles=300;
 Φ_2 means bending effect.

Fig. 5-3 布地の曲げ曲率 (κ) に対して表わされた、機械力の最大達成値をもとに算定した曲げによる洗浄効率 (Φ_2)。
 Φ_2 は曲げの効果をj示すために導入した洗浄効率 (%) で、次式で定義される¹⁰⁾。
$$\Phi_2 = 100 \times \frac{B-A}{R_0-A}$$
。ここに、 $B-A$ は曲げによる効果, R_0-A は機械力によって達成される最大洗浄効果を表わし, A, B は、それぞれ、Fig. 4 に示す A, B 各部の (布の表の) 反射率である。図中の実線 $f(\kappa) = \frac{2E}{Ar}$ は布地に与えた単位面積当たりのエネルギー (J/m^2) であり、別の実験から求められたものである¹⁰⁾。ここに、 E は布地に与えたエネルギー, Ar は布地面積を示す。また、図中の α は (m^2/J) の次元をもつ実験定数である。

見ると、曲げ・摩擦・液流・浸漬の効果を含む C 部の Φ_1 が約 60%、浸漬効果のみの Φ_1 が約 15% である。したがって、この場合の機械力 (これは曲げ・摩擦・液流から成る) が、全洗浄効果に占める割合は $(60 - 15)/60 = 0.75$ となる。この実験では曲げに使用した円柱直径が 6 mm であるが、同種の実験で直径 10 mm の円柱を使用した場合の上記数値は 0.82 となる¹⁰⁾。このことを考え合わせると、本実験の全洗浄に占める機械力の割合は約 8 割である。しかし、この実験はせん断変形の効果を含ま

Fig. 5-4 曲げの効果と摩擦の効果が全洗浄効果に占める割合 (ρ)。

$\rho(\text{friction})$ および $\rho(\text{bending})$ は各々全洗浄効果に対する曲げおよび摩擦の効果の占める割合を示し、次式で定義される。

$$\rho(\text{friction}) = 100 \times \frac{C-B}{C-R_s},$$

$$\rho(\text{bending}) = 100 \times \frac{B-A}{C-R_s}. \quad \text{ここに, } A, B, C \text{ は,}$$

Fig. 4 に示す, A, B, C 各部の (布の表の) 反射率である¹⁰⁾。

ないため、実際の洗浄では機械力がさらに大きな割合を占めることが考えられる。このことは、小林ら²⁾の結果と同様に、洗浄における機械力の寄与が極めて大きいことを示唆している。Fig. 5-2 は B, C 部の布地裏 (すなわち円柱側の布地面と反対の布地面、布地は C 部の表で円柱と接している) における Φ_1 の値を示す。これによれば、布地裏は B, C 部ともほとんど差がなく、かつ Fig. 5-1 と比較するとそれは B 部の表とほぼ同じ値であることが分かる。このことは、曲がりの効果が表・裏に関してほぼ同等であることを示している。Fig. 5-3 は曲げの効果を表す洗浄効率 Φ_2 を曲げの曲率 κ に対して示している。これによれば、 Φ_2 は κ が 0.2 mm^{-1} 程度までは κ に対し単調に増加するが、それ以上曲率を大きくしても洗浄効果は上がらないことが分かる。したがって、曲げの効果にはある臨界の曲率がありその曲率を超えて布に曲げを与えても洗浄効率はほとんど上昇しないことが分かる。また、図中の曲線は別の実験から求めた布に与えたエネルギーを示す¹⁰⁾ が、 Φ_2 は、 κ が小さい範囲でエネルギーに対応して増加するけれども、上記の臨界曲率 ($\kappa = 0.2 \text{ mm}^{-1}$) を超えるとエネルギー曲線から離れ、与えたエネルギーは洗浄に有効に働かないことが分かる。なお、平松らは種々の洗浄様式について、洗浄効率がエネルギーによって整理できることを示した^{12,13)}。Fig. 5-4 は曲げおよび摩擦の効率が全洗浄効果に占める割合 ρ を往復回数に対して表している¹⁰⁾。これによれば往復回数の少ないところで摩擦による洗浄比が高く、曲げによる

それは低いが、回数 1,000 を超えると両者ともほぼ同じ値を示している。つまり、摩擦の効果は洗浄の初期のころに顕著であり、曲げの効果は摩擦の効果より時間的に遅れて表れるが、時間が経過すると (本実験では回数 1,000 以上)、両者ともほぼ同じ割合に落ち着くことが分かる。したがって本実験の洗浄について、曲げの効果 30%、摩擦の効果 30% で残りのほぼ 40% が液流と洗剤による効果ということができよう。

2.1.3 伸びと圧縮

布に伸びや圧縮そのものを与えて洗浄効果を調べた実験が小林らにより行われた³⁾。これによれば引張・圧縮による洗浄効果は他の機械力と比較し、かなり小さいことが分かる。一般に、洗浄時において布の伸びや圧縮は単独で生じることは少なく、多くはせん断変形に伴って生じると考えられる (材料力学の教えるところによれば、材料はせん断の主方向に伸ばされその直角方向で圧縮を受ける)。したがって、伸びや圧縮を単独で調べた実験例は少なく、上記以外に見当たらないようである。

2.2 摩擦

Fig. 1 に示すように、摩擦には布同士、および、布と固体壁の場合が考えられる。布と固体壁については前述した¹⁰⁾ ので、ここでは省略する。一方、布同士の摩擦については、それのみを取り出して洗浄効果をみた実験は見当たらないようである。しかし、これと似た条件の実験が、実用的観点から、ブラシ洗いに対する実験として行われ、以下の結論が得られた^{14,15)}。すなわち、まず、モデル実験から、(i) ブラシヘアが合成繊維の場合は、供試ブラシ間の洗浄効率の順位と、累積摩擦洗浄仕事量の順位、ヘアの太さの順位、ヘア束の曲げ剛さの順位がよく一致すること、(ii) ブラシヘアが動物性・植物性の天然繊維の場合は、上記の関係は必ずしも一致しないこと、(iii) 同一ブラシについて、垂直加重が増すと、ヘアが挫屈しない条件下では、累積摩擦洗浄仕事量も洗浄効率も増大すること、次に、人力による実験から、(iv) 8 種類のブラシの洗浄効率の大小の順位は、モデル実験による結果とほぼ一致すること、(v) 各ブラシヘア間隙に含まれる洗剤液量の大小の順位は、各ブラシの洗浄力の順位と一致しないこと、が明らかとなった。

3 洗液の流れに寄与する機械力

3.1 布表面上の流れ

基質上にある固形汚れの剥落に関して Visser は回転二重円筒間の流れを用いたモデル実験を行った^{16,17)}。すなわち、内筒上に貼り付けられたセルロース膜上にポリスチレン粒子を付着させ、高速で内筒を回転させると粒子はせん断流による抗力と遠心力を受ける。剥落した

粒子の数を数えることにより、液のPHやVan der Waals力の影響を調べた。また、日景らは、2次元流路内の層流せん断流れにおいて固体壁に付着した粒子の剥離状態を一連の実験により観察した¹⁸⁻²⁰⁾。用いた粒子は、ポリスチレンラテックス粒子、ポリスチレン粒子、ガラス粒子である。また、供試基質はセルロース、ガラス、アセテート、ポリエステル⁴の4種類であった。この結果、粒子種類に関わらず、剥離し難さの度合いは、セルロース<ガラス<アセテート<ポリエステルの順であった。さらに、粒子径の大きい粒子ほど剥離に大きな力が必要であった。天木らは汚れモデルを想定した微小円柱を壁面に付着させ、水と界面活性剤 (LAS, AE) 水溶液の層流せん断流を微小円柱に直角に当てることにより円柱の抗力を算出した²¹⁾。この結果、LAS, AE 水溶液ともに水よりも低い抗力値を与えることを示した。渡辺らは壁面近傍の微小円柱を過ぎる粘弾性流体の流れによる抗力と揚力を数値解析により求め、以下のこと等を明らかにした²²⁾。抗力係数 C_D は弾性力と粘性力の比であるワイセンベルク数 W_i に対して大きく変化しない。これに対し、揚力係数 C_L は W_i とともに線形的に減少する (C_L は W_i が負値をとる場合は増加する)。 C_L のこの変化は C_D の変化と比較すると非常に大きい。以上の研究から、洗液が粘弾性を有していればそれが洗浄性に大きく影響することが予想される。

3.2 繊維および繊維間を通過する流れ

長谷川らは、洗液流に垂直に置かれた人工汚染布の洗浄性を実験的理論的に解析し、布地貫流による洗浄効率を表す式を提案した²³⁾。また、天木らは、矩形流路内に流れに直角に張られたメッシュスクリーンを通過する水と界面活性剤水溶液の圧力損失を測定した²⁴⁾。この結果、洗濯洗浄で用いられる数種類の界面活性剤については、水よりも小さな圧力損失が見出された。このことは、これらの界面活性剤水溶液は水と比較して繊維・繊維間を容易に流れるという性質を有していることを示している。したがって、洗剤の効果は、化学的に汚れの付着力を弱めることに止まらず、繊維・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、汚れを落とし易くしているものと推測される。

以上実験的に機械力を解析する方法およびその結果について述べた。次は、機械力を積極的に利用する洗浄方法について述べる。

4 機械力を積極的に利用する洗浄方法

4.1 叩き洗い

洗濯機が普及する以前から、叩き洗いは人力による他の洗濯技法に比べて洗浄力の高いことが知られていた。

これに着目して、多田は叩き棒による叩き洗いの洗浄性に関する実験的観察を行い、以下の点を明らかにした^{25, 26)}。(i) 積層された被洗布の各層の洗浄効率は一様でなく、洗浄力の高い順位は最表層 >> 最下層の数層 > 中間層であった。(ii) 渦巻き式標準洗濯機による洗浄効率に比較して、最表層の洗浄効率はそれより明らかに高かった。その他の層ではそれより低くて実用の洗浄力は得られなかった。(iii) したがって、衣類の汚れた部分を次々に表層に出して叩けば、効率の良い洗浄ができることが分かった。(iv) 表層の洗浄力は、2種の供試叩き棒の重さの影響はあまり受けなかった。このことは、本稿2・1・2で述べたように、ある限度を超えると布に与えたエネルギーは有効に働かなくなることに対応している。叩き洗いに関する研究は、モデル実験装置を用いて現在も進行中である²⁷⁻³⁰⁾。

Fig. 6-1 規格化した無次元動的表面張力 (σ_0) 対 生成時間 (t)。図中の実線、点線は式(1)を表す。

Fig. 6-2 実験定数(K) 対 濃度(C)

4.2 交番流による洗浄

長谷川らは、布の曲げ・摩擦、布地の貫流などの機械力を積極的に利用して洗浄力を高めようとする実験をモデル機により行った³¹⁾。その結果、市販の洗濯機による洗浄効率を大きく上回る洗浄効率を得ることができた。さらに、唐澤らはこの交番流で用いる洗液に気泡を混入させることにより、洗浄効率を落とすことなく使用洗剤量を50%程度削減できることを示し、洗浄効率は洗液の動的表面張力と密接に関係していることを明らかにした³²⁾。

5 動的表面張力

前節で述べたように、機械力に気泡の効果を加えると洗浄効率が大きく上がるが、この場合、洗液の通常の(静的)表面張力ではなく動的表面張力が重要となる。これについて、長谷川らは、従来複雑な過程のために数値計算から求めざるを得なかった動的表面張力について、界面活性剤分子の水面上での運動をモデル化することによって次に示す簡便な式を導いた³³⁾。

$$t = \frac{K}{2} \left(\frac{1}{\sigma_\theta} + \frac{1}{2} \log \left(\frac{2 - \sigma_\theta}{\sigma_\theta} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

ここに、 t は界面生成後の経過時間 (表面時間)、 σ_θ は規格化された無次元動的表面張力、 K は実験定数で、界面活性剤分子が水面で回転運動をするために要する時間の目安を意味する。Fig. 6-1 に AE(23) に対して得られた実験値と式(1) との比較を示すが、 K として同図下に記す値を取ると、両者はよく一致することが分かる。また、Fig. 6-2 は種々の界面活性剤水溶液に対する K を濃度 C [ppm] に対して示すが、各種の界面活性剤に対して両者は両対数グラフで一本の直線で表され、

$$K = 185C^{-1.19} \quad (2)$$

の関係にあることが分かった³³⁾。

6 おわりに

以上述べてきたように、洗浄全体に占める機械力の寄与は誠に大きなものがあり、機械力をさらに有効に利用すれば洗剤使用量の大幅な削減が可能である。しかし、大きな機械力を与えればそれに見合った洗浄率が得られるかというところではなく、ある限界を超えると与えた機械エネルギーは洗浄に有効に利用されずに無駄となってしまう。したがって、洗剤使用量削減という目的の他にエネルギー的にも機械力を有効に利用した高効率の洗浄方法が望まれる。このような新たな洗浄方法の開発は、産官学の共同研究に最も適したテーマの一つであり、多方面の方々がこれに参加されて開発を進め、機械力を有効に利用した新たな洗濯機が一般に使われる日の

早からんことを期待するものである。

謝 辞

本総説執筆に当たり、筆者を洗濯洗浄の研究に導いてくださり、また、今回は貴重な資料を提供して戴いた多田千代先生に深く感謝申し上げます。また、筆者に本総説執筆の機会を与えてくださり、加えて有益なコメントと多くの文献を賜りました、お茶の水女子大学教授駒城素子先生に心からの謝意を表します。

注1：本文中の「化学作用」および「物理・機械作用」を、文献1), 2), 3)では、それぞれ「物理化学作用」および「機械作用」としている。本総説では、物理学が力学を含む学問体系であることに鑑み、機械作用と一緒にして物理・機械作用とした。化学に物理化学という分野があって、その関係で物理化学という用語を使うことも理解できるが、ここでは上記の理由で、洗浄を化学作用と物理・機械作用とに分類している。

注2：文献1), 2), 3)では、水のみによる洗浄効果が機械力による効果であるとし、洗剤を溶かした水溶液(以下、これを洗液といい、洗浄に水のみを使う場合は単に水ということにする)中で布に機械力が加わった場合の効果を相乗効果と称している。本総説では、洗浄に洗液を用いることを前提として、浸漬洗浄効果を機械力が零の洗浄効果(すなわち、化学的作用による洗浄効果)とし、何らかの機械力が加わった場合に得られる洗浄効果から浸漬洗浄効果を差し引いた残りを機械力による効果とする。

文 献

- 1) 柏 一郎, 平林 隆, 角田光雄, 大場洋一, 油化学, 20, 304-9 (1971).
- 2) 小林 晃, 森 国人, 岸本由信, 永井真一, 天野美俊, ナショナルテクニカルレポート, 18, 705-13 (1972).
- 3) 小林 晃, 森 国人, 中澤敏一, 第6回洗浄に関するシンポジウム要旨集, 31-6 (1974).
- 4) 吉永フミ, 多田千代, 西出伸子, 「被服整理学」, 光生館, 昭和63年新版第1刷, p.110
- 5) 多田千代: 県立新潟女子短大研究紀要, No.10, 111-7 (1973). 吉永フミ, 多田千代, 西出伸子, 「被服整理学」, 光生館, 昭和63年新版第1刷, p.111
- 6) 多田千代: 家政学雑誌, 昭和59年度学会賞受賞記念論文, 35 (8), 519-528 (1984).
- 7) 多田千代: 家政学雑誌, 30 (2), 178-82 (1979).
- 8) 多田千代: 家政学雑誌, 30 (3), 278-85 (1979).
- 9) 多田千代: 家政学雑誌, 30 (8), 691-6 (1979).
- 10) 長谷川富市, 多田千代, 油化学, 32 (7), 397-402 (1983).
- 11) 長谷川富市, SEN'I GAKKAISHI (繊維と工業), 61 (9), 232-4 (2005).
- 12) 平松 俊, 小谷昭子, 繊維製品消費科学, 22 (5), 186-90

- (1981).
- 13) 平松 俊, 小谷昭子, 繊維製品消費科学, 25 (2), 83-6 (1984).
- 14) 多田千代, 矢崎浄子, 家政学雑誌, 34 (11), 705-12 (1983).
- 15) 多田千代, 矢崎浄子, 家政学雑誌, 34 (12), 788-797 (1983).
- 16) J. Visser, *J. Colloid Interface Sci.*, 34 (1), 26-31 (1976).
- 17) J. Visser, *J. Colloid Interface Sci.*, 55 (5), 664-76 (1976).
- 18) 日景弥生, 岩崎芳枝, 矢部章彦, 繊維製品消費科学, 34 (3), 135-41 (1993).
- 19) 日景弥生, 岩崎芳枝, 矢部章彦, 繊維製品消費科学, 34 (12), 660-7 (1993).
- 20) 日景弥生, 岩崎芳枝, 矢部章彦, 繊維製品消費科学, 35 (1), 41-9 (1994).
- 21) 天木桂子, 長谷川富市, 近野正昭, 日本レオロジー学会誌, 21 (1), 41-5 (1993).
- 22) 渡辺 博, 長谷川富市, 鳴海敬倫, 玉野 健, 日本機械学会論文集 (B 編), 61-582, 393-8 (1995).
- 23) 長谷川富市, 多田千代, 油化学, 34 (7), 545-50 (1985).
- 24) K. Amaki, T. Hasegawa & T. Narumi, *Nihon Reoroji Gakkaishi (J. Soc. Rheology, Japan)*, 36 (3), 125-31 (2008).
- 25) 多田千代, 家政学雑誌, 30 (8), 683-90 (1979).
- 26) 多田千代, 家政学雑誌, 33 (9), 474-81 (1982).
- 27) 落合 綾, 駒城素子, 萱場龍一, 長谷川富市, 第33回洗淨シンポジウム要旨集, 53-7 (2001).
- 28) 落合 綾, 駒城素子, 萱場龍一, 長谷川富市, 第15回繊維連合研究発表会講演要旨集, 91 (2002).
- 29) 元木加世, 駒城素子, 長谷川富市, 第38回洗淨シンポジウム要旨集, 39-42 (2006).
- 30) 元木加世, 駒城素子, 長谷川富市, 繊維学会予講集, 241 (2007).
- 31) 長谷川富市, 鳴海敬倫, 近野正昭, 多田千代, 油化学, 36 (6), 418-25 (1987).
- 32) M. Karasawa, T. Hasegawa, M. Komaki & T. Narumi, *J. of Oleo Sci.*, 55 (10), 521-27 (2006).
- 33) T. Hasegawa, M. Karasawa & T. Narumi, *J. Fluids Eng.*, 130, 081505 (2008).