報 文

洗浴中における布地の繰り返しの曲げ変形と摩擦の効果

長谷川 富市*・多田 千代**

* 新潟大学工学部機械工学科 (新潟市五十嵐 2-8050)

** 県立新潟女子短期大学 (新潟市海老ヶ瀬 471)

Effects of Repeated Bending and Friction on Soiled Fabric in Washing Bath

Tomiichi HASEGAWA* and Chiyo TADA**

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Niigata University (2-8050, Ikarashi, Niigata-shi)

** Niigata Women's College (471, Ebigase, Niigata-shi)

Washing experiments were performed by implementing different modes of action on a single sheet of artificially soiled cotton fabric: bending alone at one portion and a combination of bending and friction at another. The degrees of reflection at different portions were measured to separately evaluate the effects of bending and those of friction. A simple device was employed to measure the energy given to fabric sheets when they are bent at some curvatures. The energy data were used to assess the washing effects based on bending.

The results obtained were as follows.

- 1) In washing, the effects of friction appeared in a short period of time, but those of bending took more time to appear.
- 2) The effects of bending and friction were both approximately 30 percent of the entire washing effects.
- 3) The effects of bending increased monotonously with the curvature until it reached 0.2 (1/mm); and there was no increase any longer for greater curvatures.
- 4) The effects of bending were practically equal independent of positive and negative curvatures (front and reverse sides of the sheet).
- 5) The washing effects based on bending were practically proportional to the energy given to the sheet for a curvature of 0.2(1/mm) or less.

1 結 言

洗濯洗浄に関する機械作用の効果については、すでにその重要性がたびたび指摘され、かつ多くの研究も行われている。しかし現象の複雑さのためにその説明は充分なされていないと言え難い。

たとえば柏ら¹⁾は、洗濯機洗浄における洗浄力は、洗剤の界面化学作用による洗浄力と洗濯機の機械作用による洗浄力の和で表されると仮定し、また、水で洗浄した場合の洗浄力は洗浄に寄与する機械力に等しいと考えて、全洗浄力に対する機械力の割合を求め、通常の洗濯機の洗濯条件では、機械作用の寄与は約 50% 程度で、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。しかしこの残り 50% について小林ら²⁾は、洗剤に浸漬しただけで洗浄される界面化学作用は約 3% で、残り 47% は洗剤の界面化学作用と機械作用の相乗作用であったと、洗浄における機械作用の寄与のより大きいことを強調している。

ところで洗濯機の機械作用による布地の動きは極めて複雑で、そのままでは解析的研究が困難であることから、その機械作用をいくつかの素作用に分け、適したモデル装置を試作することによって各素作用単独の効果を分離し検討する試みが一方で進められてきた^{3)~8)}。本研究もその一連のものである。すでに小林ら⁶⁾は、洗浴中で布地に加わる力を、摩擦力、曲げ力、引っ張り力、圧縮力、衝突力と一応仮定し、主としてこれら単体機械力が

加わるモデル試験機を試作して各洗浄力を測定し、仕事量を一定とした場合の各機械力間の比較を試みた結果、曲げ力、布地相互の摩擦力、布地とプラスチック間の摩擦力による洗浄効果が他の力の場合より大きかったことを報告している。

ここで曲げ力を与えるために用いられたモデル装置に着目すると、それは久保田⁴⁾や多田⁵⁾が振り洗浄に関する研究に用いた装置とほぼ同原理のもので、汚染布の下端を洗浄槽の底部に、上端を振り腕に取り付け、振り腕に単振り運動を行わせることにより、洗浴中の汚染布に曲げ変形（以下これを曲げと略称する）を繰り返させて洗浄するしくみである。汚染布の長さや振り速度の条件を変えることで布地の曲率をある程度変化させることができる。しかし、この方法では布地に特定の曲率を与えることには困難があり、また曲げの効果のほかに液流の効果、布地の引っ張り効果などが加算され、これらの効果を差し引くことは容易でない。したがって、洗浴中の布地の曲げ単独の効果を追求するための方法としてはなお検討の余地があると考えられる。

筆者らも、この目的のための装置の試作を続けてきた⁶⁾が、布地に特定の曲率を与えようとすると物体との接触が必要となり、また物体との接触を避けると曲率が不明確となる困難さが残されていた。

本報では、これまでの装置をさらに改良し、同一汚染布上に、ほぼ定まった曲率を無接触で与えた部位と、曲げプラス摩擦を与えた部位とを実現させて洗浄実験を行い、そのおのおの部位の表面反射率測定値から、曲げと摩擦の効果を別々に評価した。また最近、平松⁷⁾は、液流の洗浄作用を、液流から被洗物に与えられるエネルギーで説明している。そこで、ある曲率の曲げにおいて、布地に与えられたエネルギーを簡便な装置によって求め、それによって洗浄率のデータ整理を試みた。本報はそれらの結果について述べたものである。

2 実 験

2.1 実験装置の原理

Fig.-1 の (a) に本実験装置の原理を示す。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（幅 l_1 ）は、円柱に接触しない状態（曲率 $\kappa=0$ ）から円柱に接した状態（曲率 $\kappa=1/r$ ）への変形を行う。したがって中央の円柱に触れない部分（幅 l_0 ）も前記とほぼ同じ曲げを受けることになる。これにより洗浄実験を行えば、Fig.-1 の (b) に示したように、幅 l_0 の部分 B では他の固体に無接触で曲げ変形したときの洗浄の効果を、幅 l_1 の部分 C では曲げと同時に円柱との摩擦による効果を、また、無変形・無接触で上下動の

(a) Schematic arrangement
(b) Washed parts of soiled fabric

Fig.-1 Principle of experimental washing device.

みを繰り返す部分 A では液流のみの効果のみをみることができる。

2.2 実験装置の概要

実験装置の駆動部を Fig.-2 に示す。駆動部は、モーター部、クランク部、スライド部から成り立っている。モーター①による回転力が V ベルトによってクランク円板③に伝達され、コネクティングロッド④を介してスライド部で往復運動に変換される。次に、これと連結したスライドバー⑥がリニアモーションベアリングを通して往復運動をする。クランク円板には中心から 30 mm の位置に穴が空いてあり、そこに差し込んだピンをコネクティングロッド④の回転軸として、60 mm のストロー

Fig.-2 Whole view of the driving part of the experimental device.

Fig.-3(a) Front view of the washing tank.

Fig.-3(b) Side view of the washing tank.

クが得られるようになっている。

洗浄槽及び布変形部の詳細を Fig.-3 (a),(b) に示す。洗浄槽は厚さ 10 mm のアクリル板製である。洗浄槽上部には糸案内溝付き円柱⑤を取り付けたやぐら⑥を固定し、図のようにナイロン製糸③を張り、スライドバー①の水平往復運動を垂直運動に変換して布に伝達させる。また糸の張り具合は糸長さ調整ねじ④で調整を行っている。汚染布はステンレス製取り付け金具⑨に挟み込み、ねじ止めしている。汚染布に曲げを与えるための円柱は、直径 3.4 mm (ステンレス製パイプ)、6.0 mm (真ちゅう)、10.0 mm (真ちゅう)、15.0 mm (真ちゅう)、22.0 mm (塩化ビニル製パイプ) の 5 種類である。また各円柱表面は布地に比較し充分滑らかに仕上げてある。3.4 mm の場合のみ、厚さ 2 mm のアルミ板にステンレス製パイプを間隔 l_0 だけあけて接着したものを使用した。

2.3 供試人工汚染布

日本油化学協会法に準じて調製した人工汚染布を 150 × 45 mm に裁断して用いた。ただし、この一連の研究において、今後、真の洗浄率を求めることが予定されているので、固体粒子汚れにはカーボンブラックのかわりに、クロロホルムに易溶性の黒色粒子フェリックオキシネートを研究室で調製して用い、油性汚れにはパルミチン酸 (試薬 1 級, 融点 63.1°C) を用いた。

2.4 洗浄条件

洗液は、水道水に JIS の指標洗剤を 0.4% 濃度で溶解したものを、1 回の洗浄に 4000 ml 用いた。液温は 25 ± 2°C の範囲内に保った。

汚染布の往復運動速度は 120 cpm に一定した。予備実験において、30 ~ 180 cpm の間で往復速度を変えたが、Fig.-1 の (b) に示した A・B・C のいずれの部位においてもその表面反射率に有意差が認められなかったからである。

洗浄後の汚染布は 25 ± 2°C の水道水 2000 ml に 30 s 浸漬するだけのすすぎを行い、その後、自然乾燥させた。

機械力の加わらない比較資料として各条件の実験にお

いて、同質の汚染布をその洗浄槽の機械力の及ばない底部の隅に置き、その洗浄実験と同じ時間だけ浸漬しておいた。

2.5 洗浄効果の算定

洗浄前と洗浄後の各部の表面反射率を、布地の表裏について各 3 か所ずつ、平沼反射率計 SPR-3 型、G フィルターを用いて測定し、一般に用いられる反射洗浄率を ϕ_1 とし、 ϕ_1 を常法により次式で求めた。

$$\phi_1 = 100(R_w - R_s)/(R_0 - R_s)\% \quad (1)$$

ここに、 R_0 : 汚染前の原白布の反射率、 R_s : 洗浄前の汚染布の反射率、 R_w : 洗浄後の各部の反射率である。なお ϕ_1 は布地の表・裏別々に求めた。ここで洗浄布の表・裏とは円柱側を表とし、反射側を裏としている。つまり、布地は C 部の表で円柱と接している。

つぎに、曲げと摩擦による各効果を分離させて見るために、次式で定義される補正洗浄率 ϕ_2 を考えた。

$$\phi_2 = 100 \Delta R/(R_0 - A)\% \quad (2)$$

ここに、 ΔR は $(B - A)$ または $(C - B)$ を表す。また、 A, B, C は Fig.-1(b) に示す A, B, C 各部の表面反射率である。 ϕ_2 は A 部を基準とした曲げと摩擦による洗浄率の値を示すものと考えられる。

さらに、曲げ $(B - A)$ 、摩擦 $(C - B)$ が全体の反射率 $(C - R_s)$ に占める割合を洗浄比 ρ として求めた。つまり

$$\rho = \Delta R/(C - R_s) \quad (3)$$

2.6 布地に与えたエネルギーの算定

布地の曲げに必要なエネルギーは次のようにして求めた。すなわち、Fig.-4 の (a)・(b) に示すように、2 枚のアクリル板 (100 × 55 mm, 厚さ 1 mm) の片方の端 YY を布地で結合して 2 枚の平板が YY 軸に直角な面内で自由に回転できるようにする。この際、YY 軸回りの回転に対する抵抗が事実上無視し得ることはあらかじめ実験的に確かめておいた。そして板の他端 ZZ に曲げを生じさせる試料布を取り付ける。いま、全体を糸でつるし、試料布側 (ZZ 側) の糸を P 点で 2 本に分け、角度 θ をつけて両方の平板に結んでおくと、全体の重量を mg (m は質量、 g は重力加速度) とすれば、布を曲げるために働く水平力 F は、力のつり合いから

$$F = \frac{mg}{4} \tan \frac{\theta}{2}$$

で与えられる。布地が力 F を受けたとき、曲げを受けない状態から x だけ変位していたとすれば (Fig.-4(b) 参照)、この状態になるまでに布地の受けたエネルギー $2E$ は、

$$2E = \int_0^x 2F dx$$

で与えられる。すなわち、 $2E$ は、 F 対 $2x$ のグラフの下側の面積で与えられることになる。 F は、糸の分岐

点Pの位置を変化させ θ を変えることによって変化させることができる。このようにして、種々の θ の値と、このときの試料布の曲げ曲率 κ とを写真撮影から求め、 κ に対する $2E$ を計算した。試料布は 40×45 mm, 20×45 mm, 10×45 mmの大きさのものを、乾いた状態と洗液に浸漬して引き上げた直後の湿った状態とで実験に供した。

(a) General view
(b) Schematic arrangement

Fig. 4 Device for measuring energy.

3 結果と考察

3.1 各部の洗浄率 ϕ_1 の比較

Fig. 5-6-7 に ϕ_1 の実験値の例を示す。各部の ϕ_1 は $C > B > A$ 比較試料（浸漬洗浄布）の順であり、往復回数が増すと上昇する傾向があるが、A・B・C部は1000回付近まで、浸漬洗浄布では200回付近まで上昇して以後頭打ちとなっている。Fig. 7 には B・C 部の裏における ϕ_1 の値を示す。これによれば、B・C 部の裏における ϕ_1 にはほとんど差がなく、かつ Fig. 5 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わかる。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。図は省略したがA部にも、また浸

Fig. 5 Detergency vs. reciprocating cycles.

Fig. 6 Detergency vs. reciprocating cycles.

Fig. 7 Detergency vs. reciprocating cycles.

漬洗浄布にも表・裏の差は認められなかった。

3.2 曲げの曲率と洗浄率 ϕ_2 の関係

次に ϕ_2 については横軸に曲率 κ をとって Fig. 8,

Reciprocating cycles=300;
 ϕ_2 means bending effect.

Fig. 8 Modified detergency vs. curvature.

Reciprocating cycles=1000;
 ϕ_2 means bending effect.

Fig. 9 Modified detergency vs. curvature.

Φ_2 means friction effect.

Fig.-10 Modified detergency vs. curvature.

9, 10 に示した。これによれば曲げの効果 $\Phi_2=100(B-A)/(R_0-A)\%$ は曲率 κ と共に増加するが $\kappa > 0.3$ 1/mm 以上では大きな増加は認められない。一方摩擦の効果 $\Phi_2=100(C-B)/(R_0-A)\%$ は Fig.-10 に示すように κ 及び円柱材質の影響を大きくは受けないようである。

3.3 曲げと摩擦の洗浄比 ρ の比較

ρ については横軸に往復回数をとって Fig.-11 に示す。

Fig.-11 Ratio of repeated bending and friction effect to detergency.

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大きく、曲げによるそれは小さいが、回数 1000 以上になると両者ともほぼ同じ比となっている。つまり、摩擦の効果は洗浄の初期のところに顕著であり、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（例えば本実験では回数 1000 以上）、両者ともほぼ同じ割合に落ちつくことがわかる。したがって最終的な実験値について、およそ、曲げの効果 30%、摩擦の効果 30% で残りのほぼ 40% が水流と洗剤による効果ということができよう。

また、先に Fig.-5, 6 において比較試料として示しておいた浸漬洗浄布の洗浄率に着目し、これが全洗浄力に占める割合をみると 15~20% 程度となっている。この値はさきに述べた小林ら²⁾の測定値より大きい、それは今回用いた油性汚れがパルミチン酸であり、洗剤がアルカリ性であったから、いわゆるセッケン形成機構がはたらいて、界面化学作用の寄与が小林らの場合よりも

大きかったためと理解される。それにしても残りの 80~85% は機械作用なしでは生じない効果であるから、小林ら²⁾の主張のとおり、洗浄における機械作用の寄与の極めて大きいことがここでも確認される。

3.4 布地に与えたエネルギー

乾いた布の布地長さ 200 mm の場合の F 対 $2x$ のグラフを Fig.-12 に示す。図中のデータには対応する布の曲げ曲率 κ の値を付記した。ただしこの場合、 $2x$ が 5 mm 以上になると布地が曲率一定で曲がらなくなる

Fig. 12 Bending force vs. displacement

↑ indicates the data for the fabric washed with the reciprocating cycles 1000 and the bending curvature 0.33 1/mm.

Fig.-13 Energy per unit area vs. curvature.

ので、その場合は曲がり部先端の曲率を参考として図中に括弧づきで示した。 $2E$ を求める際にはこの部分は使用していない。また同図中には、 $2x$ までの布に与えたエネルギー ($2E$) が斜線で示してある。以上のようにして求めたエネルギー ($2E$) を試料布の面積 A_r で割り、単位面積当たりのエネルギーに換算した。その値 $2E/A_r$ を、試料布の乾いた状態と湿った状態とに分けて Fig.-13 に示した。これによれば、 $2E/A_r$ は、乾いた状態、湿った状態それぞれに、布の大きさに無関係に曲

率 κ の関数となっている。また、その値は、ある曲率以下で急激に減少しており、このことは、ゆるやかな曲げはごく小さなエネルギーによって生じさせ得ることを示している。また同図によれば、エネルギーが急激に落ち込む曲率は、湿った布の方が乾いた布より大きくなっており、さらに、曲率がほぼ 0.1 1/mm 以上では、湿った布、乾いた布の区別なく、曲げに必要な単位面積当たりのエネルギーは、曲率と両対数グラフで直線関係にあることがわかる。さらに、同図中には、繰り返し数 1000 回・曲げ曲率 0.33 1/mm の条件下で洗浄実験を行った後の布に対して、同様な手順で求めた曲げに必要なエネルギーの実験値が示されている。これらは洗浄を行わない布に対する値とほぼ同じ値を示しており、このことは、少なくとも繰り返し数 1000 回程度までは洗浄を行っても布の物性値に大きな変化がないことを示すものと考えられる。

以上のように、布の状態（湿っているか、乾いているか）を指定すれば、曲げ変形に必要な単位面積当たりのエネルギーは試料の大きさには無関係に曲率で整理されることがわかる。すなわち、 $2E/A_r = f(\kappa)$ 、ただし $f(\kappa)$ は Fig.-13 中の曲線で表される関数、と書くことができる。

3・5 洗浄実験値のエネルギーによる整理

曲げによる洗浄実験値を上記で求めたエネルギーで整理してみる。曲げによる洗浄が付与したエネルギーによって決まるならば、 $\phi_2 = 100(B-A)/(R_0-A)\%$ は、 $2E/A_r = f(\kappa)$ の関数として表されるはずである。いま、最も単純に、 $\phi_2 = \alpha \cdot f$ 、 α は定数、としてみる。Fig.-8（往復回数 300）に $\alpha = 200 \text{ m}^2/\text{J}$ 、Fig.-9（往復回数

1000）に $\alpha = 350 \text{ m}^2/\text{J}$ とした場合の $\alpha \cdot f$ の曲線が示されている。これによれば、洗浄実験のデータは、曲率 κ の小さい範囲（ $\kappa < 0.2 \text{ 1/mm}$ ）でほぼ $\alpha \cdot f$ によって表されることがわかる。また、 $\kappa > 0.2 \text{ 1/mm}$ では $\alpha \cdot f$ の値より洗浄率の値の方が低下している。このことは、曲げの曲率がある程度（今の場合 $\kappa = 0.2 \text{ 1/mm}$ ）以上大きくなると洗浄率は与えたエネルギー程上昇しないことを示すものと思われる。この点については今後さらに検討したいと考えている。

なお、今後は、曲げ洗浄以外の洗浄様式、たとえば、摩擦、衝撃、水流などにおいて上記と類似の α を求め、互いに比較を行えばどの洗浄方法が最も効果的であるのか等の論議が可能となり興味深いものと思われる。

最後に、本研究の遂行に助力いただいた新潟大学技官近野正昭氏、県立新潟女子短期大学 長井久美子氏に厚く感謝申し上げます。

（昭和 58 年 3 月 11 日受理）

文 献

- 1) 柏 一郎, 平林 隆, 角田光雄, 大場洋一, 油化学, **20**, 304 (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 (1972)
- 3) R.E. Wolform, A.C. Naessle, *Am. Dyestuff Rep.*, **42**, 53 (1953)
- 4) 久保田力, 工化, **60**, 547 (1957)
- 5) 多田千代, 県立新潟女子短期大学 研究紀要, No. 10, 111 (1973)
- 6) 小林 晃, 森 国人, 中沢敬一, 日本油化学協会第 6 回洗浄に関するシンポジウム講演要旨, 31 (1974)
- 7) 多田千代, 家政誌, **30**, 178, 278 (1979)
- 8) 長谷川富市, 多田千代, 第 13 回洗浄に関するシンポジウム講演要旨, 55 (1981)
- 9) 平松 峻, 小谷昭子, 織消誌, **22**, 149 (1981)