

キャビテーション気泡崩壊圧による繊維の洗浄

岩井善郎* 藤枝 徹* 岡田庸敬*

A Study of Washing of Fabrics
by Cavitation Bubble Collapse Pressures

Yoshiro IWAI*, Toru FUJIEDA*, Tsunenori OKADA*

(Received Feb.10, 1989)

Washing of fabrics by cavitation bubble collapse pressures was studied using a magnetostrictive vibratory device. The process of removing Fe_2O_3 soil particles attached on nylon cloth was observed with the naked eye and by a scanning electron microscope. When the fabrics were exposed to cavitation bubble collapse pressures only for 2 minutes, the percentage of soil removal was more than 90%, which was extremely high compared with those obtained by the ordinary washing procedure such as the laundry tester and the commercial ultrasonic cleaning device. Thus, we found that the application of cavitation bubble collapse pressures in the washing of fabrics may be useful.

1. 緒 言

時計, カメラ, ベアリング, トランジスタなど複雑な形状の精密部品の洗浄に水中での超音波振動が用いられている。これは表面に付着した粒子のよごれに超音波エネルギーを与えて機械的に脱落させようとするものである。しかし、繊維や布などは超音波エネルギーを吸収しやすく、このような洗浄方法は機械部品や電子部品に対するほど有効でないといわれている。

一方、液中で固体を超音波振動させると直径数 $10\mu m$ 程度の多数のキャビテーション気泡が発生し、崩壊する。著者ら¹⁾²⁾³⁾は、この際に発生する衝撃圧(気泡崩壊圧)は軟鋼表面に衝撃的にピットを発生させるほど大きいものから非常に小さいものまで様々な大きさに分布していることを明らかにした。また気泡崩壊圧は極めて微小な面積に局所的に作用するので、このようなキャビテーション気泡を繊維表面で崩壊させれば、繊維に付着した微細なよごれの結合をその衝撃圧によって破壊し機械的に除去して、洗浄効率を飛躍的に向上できることが考えられる。

本研究は、このような着想を機械材料の耐キャビテーション・エロージョン評価試験に用いられる磁歪振動装置で発生させたキャビテーション気泡を汚染布の表面で崩壊させて検討したものである。すなわち、キャビテーション気泡崩壊圧が作用したときの繊維の洗浄過程をマクロ的にまたミクロ的に観察して、キャビテーションの強さと洗浄効率の関係を明らかにし、他の洗浄方法による結果と比較することによってキャビテーション気泡崩壊圧を利用した繊維の洗浄について考察した。

2. 実験方法

2.1 汚染布

試験に用いた汚染布は100mm×100mmに切断したナイロン布に平均粒子径0.15μmの酸化鉄(Fe₂O₃)を付着させたものである。外観は一様に赤色で、表面反射率は約20%である。走査電子顕微鏡で観察すると、図1に示すように1本1本の繊維とそのすきまに汚染粒子が付着している。

2.2 試験装置および試験方法

2.2.1 磁歪振動法による洗浄試験

図2に磁歪振動法を用いた洗浄試験の概略図を示す。磁歪振動子の増幅ホーンの先端にSUS304ステンレス鋼の直径18mmのディスクを取り付け、ディスクを共振周波数14.5kHz、ディスク端面の全振幅40μmで振動させた。これとあるすきまを隔てて平行に幅30mm、長さ100mmの汚染布を対向させて、キャビテーション気泡を衝突させた。布は長手方向に動かない程度に引張った状態で両端部約30mmをアクリル製の取り付け台に固定した。汚染布に作用するキャビテーションの強さはディスクと汚染布のすきまに依存するが、本実験では5mmと10mmで行った。試験水槽には4.0lの水道水を入れて、電子恒温装置との間を1.5l/minで循環させて液温を20±1℃に保持した。

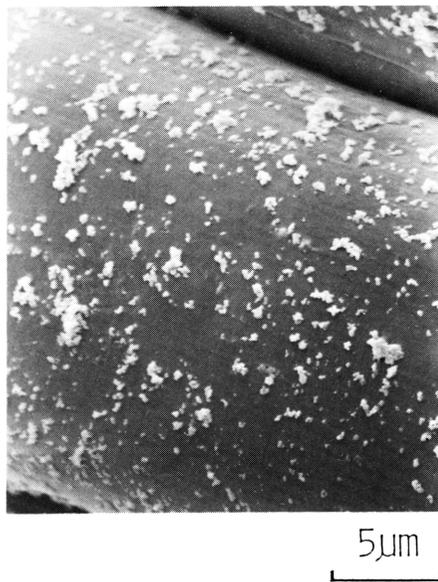


図1 汚染布の顕微鏡写真

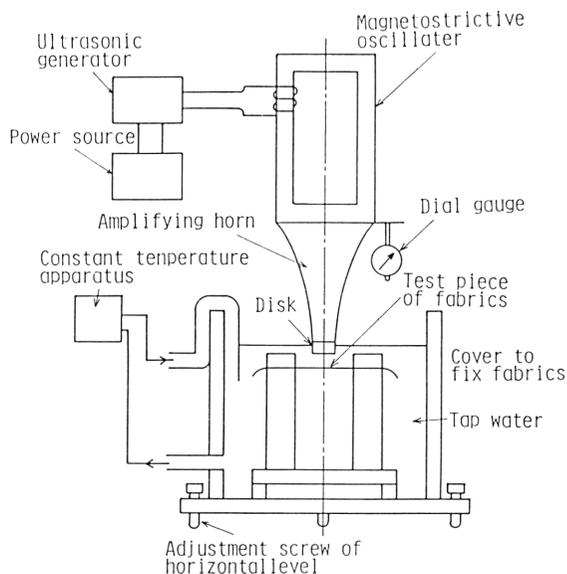


図2 磁歪振動法を用いた洗浄試験の概略

2.2.2 種々の洗浄試験

キャビテーション気泡崩壊圧による洗浄と比較するために、市販の小型超音波洗浄器(周波数41kHz、高周波出力35W)による試験を行った。30mm×30mmに切断した汚染布を150ccの水道水(容器は200ccの広ロビン)に浸し、広ロビン超音波洗浄器の洗浄槽に設置して洗浄した。また機械力による洗浄効果を調べるために染色洗濯堅牢度試験機S.J.K, LAUNDRY TESTERを用いて試験を行った。すなわち、300ccの洗浄ビンに30mm×30mmの汚染布とゴム球(直径15mm、質量2.66g)を入れ、20℃の水道水100ccを入れて、洗浄ビンを毎分50回で回転させた。汚染布に作用する機械力を変化させるためにゴム球の個数は8個と24個の2種類で行い、比較のため市販の粉石鹼を水道水100ccに0.133g入れた試験も行った。

いずれの洗浄方法でも所定時間試験を行い、流水で1分間すすぎ洗いをしたのち室内に吊り下げて乾燥させ、目視および走査電子顕微鏡による観察を行った。なお洗浄時間ともなう汚染布の変化は一枚の試験布について連続観察できないので、同じ汚染布から切り出した試験布を種々の洗浄時間で試験したものについて観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 磁歪振動法で発生するキャビテーション気泡と崩壊圧(衝撃力)

図3は磁歪振動装置で発生したキャビテーション気泡群が汚染布に作用する様子を瞬間画像観察装置を用いて撮影したものである。振動ディスクの端面近傍に多数のキャビテーション気泡が発生して白くみえる。気泡群はディスク端面から離れるともなう分散するが、個々の気泡は成長して汚染布に衝突している。このときの気泡径は最も大きいもので約数100 μm 、大部分は数 μm ～数10 μm 程度の非常に小さいものである。また汚染布の下方には気泡がほとんどみられないことから、布に衝突したキャビテーション気泡の大部分は繊維表面近傍で崩壊したものと考えられる。

このようなキャビテーション気泡の崩壊によって発生する崩壊圧(衝撃力)は、 piezo圧電素子を用いた圧力検出器(受圧面の直径は2mm)を振動ディスク端面より5mmあるいは10mm離れた位置に対向して設置し、振動子の1～2周期間(サンプリング間隔110 μs)に発生する複数の気泡崩壊の中の最大衝撃パルスを5分間(約296万回)計測した¹³⁾。図4は衝撃力のパルス高さの累積度数分布である。ここで衝撃パルスは計測回路からの出力電圧10Vを255等分したものを1単位としている。図には衝撃力に換算した目盛も示してある。大きな衝撃力の発生頻度は加速度的に減少しているが、純銅と軟鋼表面に直径4 μm 以上のくぼみまたはピットを発生させるパルス高さはそれぞれ30パルス高さ、42パルス高さ以上¹⁾で、非常に大きな衝撃圧力が発生することがわかる。これらの結果は圧力検出器のステンレス鋼の平滑な受圧面近傍で崩壊するキャビテーション気泡によって発生する衝撃力であって、布に作用する気泡崩壊圧(衝撃力)としてそのまま適用することはできないが、磁歪振動法による洗浄では繊維の微小な面積にかなり大きな崩壊圧が作用することを示唆している。

3.2 洗浄面の観察

3.2.1 目視観察

図5-(a)、(b)に種々の方法で洗浄試験を行なったときの洗浄時間ともなう汚染布の変化を示す。磁歪振動法では、試験開始直後から水が赤く変色するのがみられ、キャビテーション気泡の作用によって、汚染布から汚染粒子が脱落することがわかる。ディスクとすきま10mmで設置された汚染布

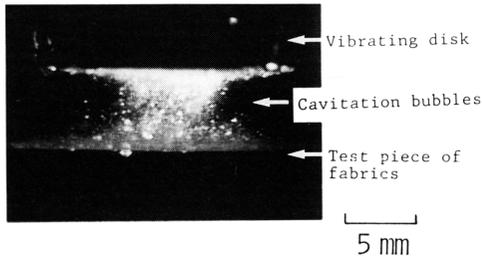


図3 汚染布に作用するキャビテーション気泡群の様子(せん光時間約4 μsec)

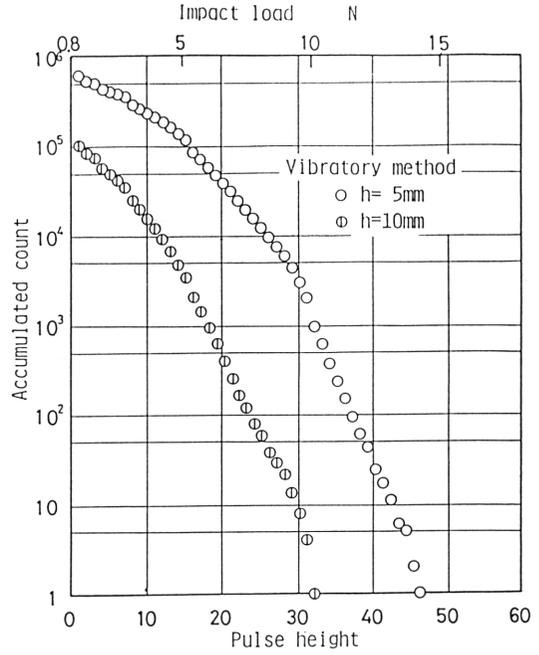


図4 キャビテーション気泡の崩壊にともなう衝撃力のパルス高さの累積度数分布

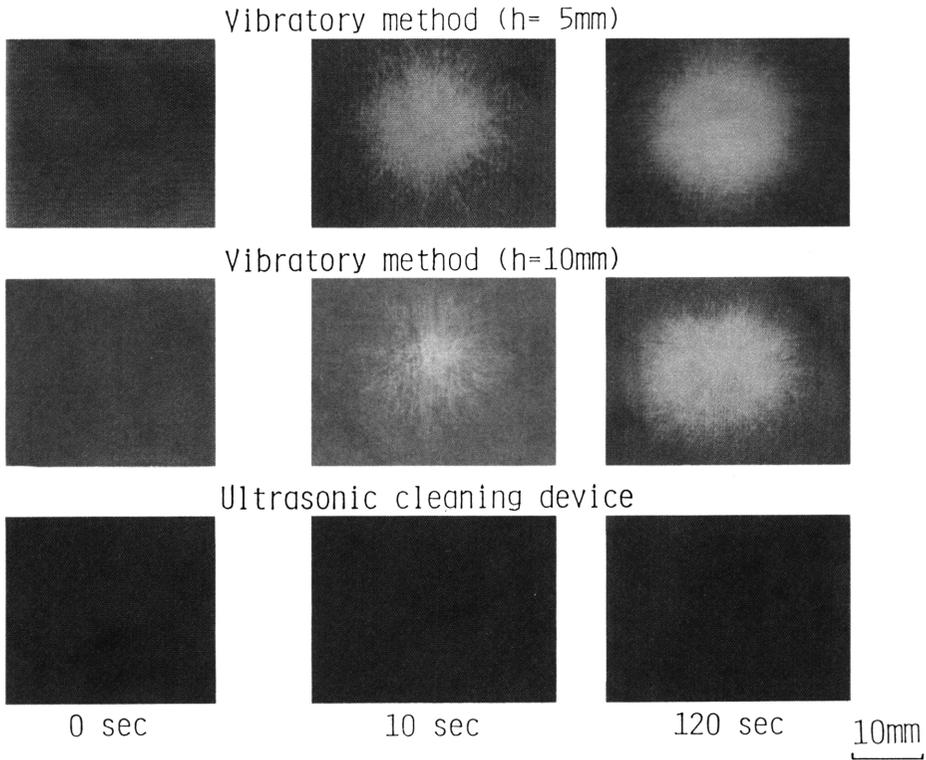


図5-(a) 洗浄時間ともなる汚染布の変化(磁歪振動法, 超音波洗浄器)

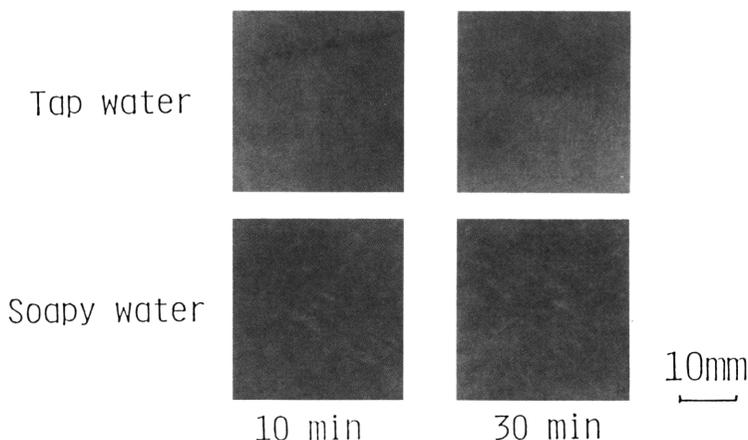


図5-(b) 洗浄時間ともなる汚染布の変化(染色洗濯堅牢度試験機)

は、10秒後にディスクに対向した部分が円形に洗浄前の赤色が薄くなる。この領域は洗浄時間ともなって広くなるとともに一層白っぽくなり、120秒後では、ディスクの面積(直径18mmの円)よりも大きくなる。しかし、この時点でも完全な白色にはなっていない。ディスクとのすきまを半分の5mmにして汚染布に作用するキャビテーションの強さを大きくすると、汚染布の白色に変わる面積は、10秒後にはディスクの面積とほぼ同じになり、その後ほとんど変化しなかった。この領域は目視観察では素地の白色とほとんど同じで、洗浄効果が非常に大きいことがわかった。

市販の超音波洗浄器による洗浄では、布は広口ビンの中で揺動しているだけで、120秒後でも布の端の赤色が若干薄くなる程度であった。これに対して染色洗濯堅牢度試験機による洗浄では、ゴム球が8個、24個の場合ともに120秒の洗浄ではほとんど変化は見られなかった。そこでさらに長時間洗浄試験を行なったが、図5-(b)に示すように30分後でも汚染布の色はあまり変化しない。また粉石鹼をいれて洗浄した場合でも汚染布全体の色がやや薄くなる程度である。これらの結果からキャビテーション気泡崩壊圧による洗浄が非常に効果的であることがわかる。

3.2.2 走査電子顕微鏡観察

汚染布が洗浄される様子を明らかにするために、洗浄後の汚染布の白くなった領域の中央部付近を倍率5,000倍の走査電子顕微鏡で観察した。一例として磁歪振動法による洗浄後の表面を図6に示す。洗浄後には図1の洗浄前で見られたような汚染粒子のかたまりはほとんど見られず、小さな粒子がわずかに残っている程度である。ディスクと布のすきまが小さく汚染布に作用するキャビテーションの強さが大きい場合でも、残留している粒子の大きさに違いはほとんどみられないが、その数は減少している。これらのことからキャビテーション気泡崩壊圧は繊維表面に局所的に作用し、汚染粒子のかたまりを破壊して脱落させるものと考えられる。

3.3 洗浄効率

洗浄の度合を定量的に評価するために、走査電子顕微鏡写真で任意に繊維表面上の $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ の面積を抽出して、そのなかに残留する汚染粒子の数を測定した。測定は4箇所について行い、その平均値を求めた。図7-(a)は磁歪振動法と超音波洗浄器における洗浄時間ともなる汚染粒子数の変化を示したものである。いずれの方法でも残留している粒子の数は洗浄開始直後に急激に減少

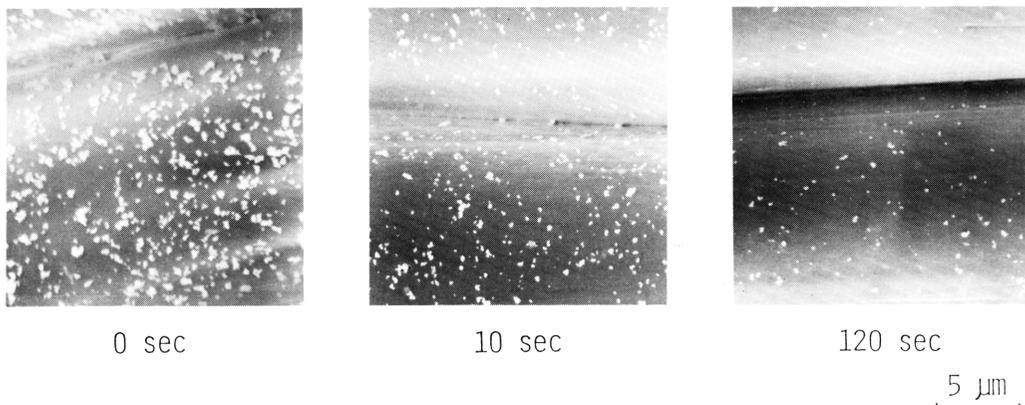
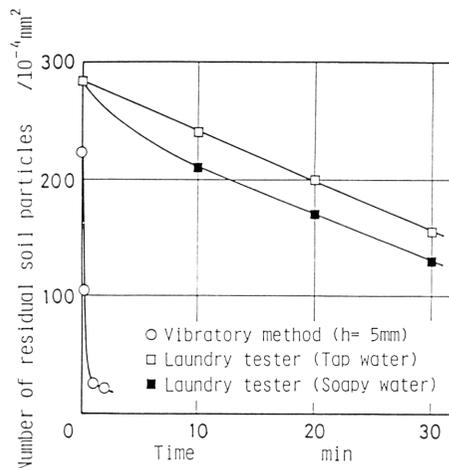
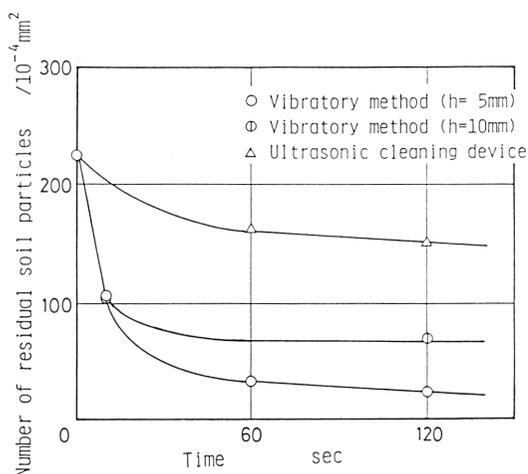


図6 磁歪振動法による洗浄後の繊維表面
(振幅：40μm, 汚染布と振動ディスクのすきま：10mm)



(a) 磁歪振動法と超音波洗浄器 (b) 染色洗濯堅牢度試験機

図7 洗浄時間ともなう繊維表面上の汚染粒子数の変化

し、その後ゆるやかに減少する。図7-(b)は染色洗濯堅牢度試験機による試験結果であるが、図7-(a)の磁歪振動法や超音波洗浄器に比べて長時間洗浄しているにもかかわらず、残留している汚染粒子の数は非常に多い。さらに粉石鹼を入れて化学的作用を付加した場合でも汚染粒子の残留量はかなり多い。

これらの測定から洗浄効率を次式により求めた。

$$\text{洗浄効率} = \frac{N_0 - N}{N_0}$$

ここで、

N_0 : 洗浄前の汚染粒子の数

N : 洗浄後の汚染粒子の数

である。洗浄時間ともなう洗浄効率の変化を図8に示す。磁歪振動法では、すきまが5mmと10mm

のいずれの場合でも洗浄効率は洗浄開始後10秒で約50%にも達し、その後洗浄効率はゆるやかに増加し、120秒後にはすきま5mmで約90%、すきま10mmで約70%に達する。一方、超音波洗浄器による洗浄ではわずか30%程度の効率しか得られない。また染色洗濯堅牢度試験機による洗浄では、120秒後で数%の効率、30分後でも効率は約45%である。したがって磁歪振動法を用いた洗浄の洗浄効率は飛躍的に向上することがわかる。これはキャビテーション気泡崩壊圧を利用した洗浄では、繊維表面に付着した汚染粒子に機械的エネルギーを付加することによって粒子を脱落させる方法と異なり、繊維と汚染粒子の界面で微細な気泡が崩壊して衝撃圧力が作用しその結合を局部的に破壊させるため洗浄効率が非常に向上したものと考えられる。以上の結果から、キャビテーション気泡崩壊圧を利用した洗浄方法は局部的な頑固な汚れに対して有効な手段と考えられるが、キャビテーション気泡を繊維表面で効率よく崩壊させることが必要である。

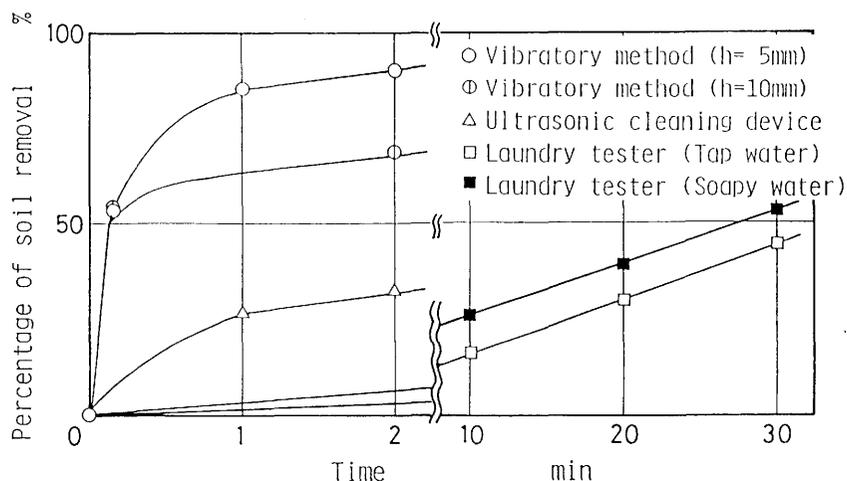


図8 洗浄時間ともなり洗浄効率の変化

4. 結 言

酸化鉄を付着させた汚染布にキャビテーション気泡崩壊圧を作用させることにより洗浄を行い、他の洗浄方法の結果と比較して以下のことが明らかになった。

- (1) 磁歪振動装置で発生するキャビテーション気泡を汚染布に作用させると、赤色の汚染布はわずか数秒で白色になった。その程度は作用するキャビテーションの強さが大きいほど顕著であった。超音波洗浄器および染色洗濯堅牢度試験機による洗浄では汚染布の色変化はほとんど見られなかった。
- (2) 高倍率の走査電子顕微鏡で、洗浄前の繊維表面に付着した汚染粒子数と所定時間洗浄後の残留汚染粒子数を測定することにより洗浄効率を求めると、磁歪振動法による洗浄効率は洗浄時間120秒後に70~90%にも達したが、超音波洗浄器で30%程度、染色洗濯堅牢度試験機でわずか数%程度であった。

以上のことから、キャビテーション気泡崩壊圧による繊維の洗浄は有効な手段となり得ることが明らかになったが、繊維表面での気泡崩壊の程度が洗浄効率に著しく影響するので、これに適したキャビテーション発生装置に関する研究が今後必要である。

謝 辞

本研究は昭和60, 61年度財団法人繊維工業研究協会の助成によるものである。研究にあたって汚染布は大阪市立大学生活科学部 皆川基教授の研究室からご提供いただいた。また染色洗濯堅牢度試験機による洗浄試験は福井大学教育学部家庭科 青木一三教授に指導していただいた。ともに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 岡田庸敬, 粟津 薫, 岩井善郎, 日本機械学会論文集(A編), 51, 471 (1985) 2656.
- (2) 岡田庸敬, 岩井善郎, 日本機械学会誌, 91, 831 (1988) 168.
- (3) 岩井善郎, 田中貞樹, 岡田庸敬, 日本機械学会論文集(A編), 54, 500 (1988) 861.