Prediction of Clothing Pressure Distribution by Using Finite Element Method — Prediction of Clothing Pressure for Pants —

ISHIMARU Sonoko^a, ISOGAI Yumiko^a, MATSUI Mariko^a,
NEGISHI Kiyoshi^a, NONOMURA Chisato^a, YOKOYAMA Atsushi^b

^a Research Center TOYOBO CO., LTD, Otsu, Shiga, 520-0292, Japan

^b Division of Advanced Fibro-Science, Graduate School, Kyoto Institute of Technology,
Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585, Japan

Received 24 March 2009; accepted for publication

Abstract

Clothing pressure is evaluated by clothing a human body or dummy and measuring pressure using pressure sensors. In order to predict clothing pressure using the experimental tensile properties of knitted fabrics without making actual clothes, we have developed a finite element method involving a numerical model consisting of a “hyper-elastic shell with a truss model”, which expresses anisotropy and nonlinearity as a knitted fabric extension characteristic. In this report we introduce an application example using pants. The clothing pressure values predicted using this computer simulation proved to be very close to the actually measured values.

Key Words: Clothing Pressure, Finite Element Method, Pants, Knitting Fabric

有限要素法を用いた衣服圧分布の予測計算 — スパッツの衣服圧計算 —

石丸園子^{a,*}, 磯貝悠美子^a, 松井まり子^a, 根岸聖司^a, 野々村千里^a, 横山敦士^b

^a 東洋紡績株式会社総合研究所, ^b 京都工芸繊維大学大学院

1. 緒 言

衣服の快適性の主要因には、熱・水分特性に関する衣服内温湿度、衣服が皮膚を押し付ける衣服圧、および肌触りがあると言われている [1]。そのうち、衣服圧については、適切な圧力を身体に付与することで、運動機能性の向上、体型補正効果、自律神経系の反応制御、動脈瘤の予防など、さまざまな機能を発現させることができる。また、適当な圧力分布を実現することで、快適感を高めることもできる。あるいは、衣服圧を極力低くすることが心理生理的に望ましいケースもある。これらの機能は、日常着用するアンダーウェアから、ファンデーション、スポーツウェア、メディカル用途など、

幅広い用途で要求されている。

ところで、適切な衣服圧を示す衣服設計を行うためには、縫製した衣服を用いて、身体にかかる圧力を測定しなければならない。目標の衣服圧レベルに合致するよう衣服圧を変更するためには、衣服を縫製し直さなければならず、変更のたびに縫製工程が入り効率が良い開発とは言えない。また、衣服圧計測は、人体と衣服の間にエアパックなどの受圧部を挿入し接触圧を測定する方法が一般的であるが、計測点が数箇所に限られるため、衣服圧の分布状態を正確に把握できず、精度の高い衣服設計は困難である。そこで、適切な衣服圧分布を示す衣服設計を効率的・効果的に行うために、縫製工程を経なくても、生地と型紙から衣服圧および衣服圧分布を予

* 連絡先：東洋紡績(株)総合研究所 520-0292 滋賀県大津市堅田 2-1-1
E-mail: sonoko_ishimaru@toyobo.jp, Tel: 077-571-0049, Fax: 077-571-0121

測・計算する技術が望まれている。

衣服圧の計算をするためには、衣服を構成する生地の変形挙動と同様の挙動を計算で再現しなければならない。生地変形挙動のモデル化の研究例を、いくつか紹介する。

今岡ら [2], 有限要素法を用い、引張特性、曲げ特性、重さから材料定数を求めているが、引張特性については、ほとんど伸びないと仮定している。具体的には、織物の伸長変形を対象としており、KES での EMT (500gf/cm 荷重下の伸長率) が 10% 以下のケースにおける研究である。従って、編物のような EMT が 10% を大きく超えるケースには適用困難と考えられる。本方法による衣服圧予測法を庭屋 [3] らが提案しているが、EMT 5% 未満の生地を対象とした衣服圧計算にとどまっている。

また、井上ら [4, 5] は、非線形性を有する生地の伸長変形特性を経験的に直線化するリニアライジング法を提案している。一軸拘束二軸引張り試験で求まる応力-ひずみ曲線を線形化し、線形弾性理論を適用して材料定数を求め、大変形時の応力-ひずみ曲線を予測することを可能にした。生地の応力-ひずみ関係は、基本的に下に凸の曲線としているが、上に凸の曲線となる生地もあり、応力-ひずみ曲線の適用範囲は限定されるものと考えられる。また、伸長ひずみが大きい場合、一直線近似できないものもあり、本方法が適用できない場合もあると考えられる。

また、X. Zhang ら [6, 7] は、有限要素法および有限差分法による衣服圧計算手法を提案している。生地を弾性シェルとし、材料定数は KES を用いて、弾性率、密度、ポアソン比を求めており、布帛の変形挙動は、第 2 Piola-Kirchhoff 応力および Green-Lagrange ひずみに相当するとし、非線形伸長変形を考慮している。しかし、布帛の大きな特徴の 1 つである異方性についての考慮がなされていない。

Jinlian Hu [8] は、KES の実測値 WT, EMT より応力-ひずみ曲線を表現する式を提案し、さらに弾性率を算出する方法を提案しているが、汎用性があるかどうかの議論は十分されていない。

D. E. Breen ら [9] は、パーティクルモデルにより、織物の異方性かつ非線形変形モデルを提案しているが、曲げ変形、せん断変形を対象としており、伸長変形に適用できるかは言及されていない。また、編物も対象としてない。

以上、従来の主な研究例を示したが、生地の伸長変形の特徴である、異方性、非線形性の両特性を実現するモデルはない。

本研究では、編物で構成された衣服を身体に密着させて着用する場合の衣服圧を予測・計算する技術を構築することを目的とする。本報では、そのために必要となる編物を想定した、大変形にも適用できる異方性、非線形性を考慮した生地伸長変形モデルを提案する。また、そのモデルを用いて、スパッツの衣服圧を計算し、実測値との対応関係を検証する。

2. 編物モデル

一般的な編物の荷重-伸長率曲線の例を Fig. 1 に示す。ウェール方向、コース方向、バイアス方向の荷重-伸長率曲線はそれぞれ異なる曲線を描き、伸長変形挙動に異方性を示す。また、その荷重-伸長率の関係は曲線を描き、非線形性を示す。これは、編物は糸がループ状に絡んだ繊維構造物であるため、伸長初期段階では、ループの形状が変形し低荷重で伸長されるが、伸長後期段階では、糸そのものが伸ばされるために高荷重をかけなければ伸長しない現象を表している。実際に編物を伸長させたときのループの変形写真を Fig. 2 に示す。伸長初期はループが変形し、伸長後期には糸自体が伸びていることが観察される。また、ループの固定部、浮き部が存在し、その形態がウェール方向、コース方向、バイアス方向で異なることが観察される。この編物の伸長変形写真より、荷重-伸長率の関係に、非線形性、異方性が生じることが理解される。さらには、ループの変形は対称的に生じないので、編物の伸長変形は直交異方性が成立する変形ではないことがわかる。

このような編物の伸長変形の非線形性、異方性、および直

Fig. 1 Load-elongation rate curves of knitting.

Fig. 2 Knitting elongation phenomenon.

交異方性が成立しない特徴を考慮して、編物モデルを考案した。具体的には、等方性の成分と異方性の成分を分離したモデルとし、その両方の成分に非線形性を付与する構成を考えた。

等方性成分をベース部分（母材）と考え、その成分に非線形性を持たせる。非線形性を表現する方法として、超弾性体モデルを適用した。超弾性体を表すモデルには、Neo-Hookean モデル、Mooney-Rivlin モデル、Ogden モデルなどが挙げられる。Neo-Hookean モデルは簡易的に非線形性を表現することができるモデルであるのに対し、Mooney-Rivlin モデル、Ogden モデルは高次関数により非線形性を表現するためやや複雑なモデルである [10, 11]。Fig. 3 に Neo-Hookean モデルと Ogden モデルとを比較した結果の一例を示す。編物の厚みを 1mm と仮定して計算した公称応力－公称ひずみの関係である。以下、応力は全て編物の厚みを 1mm と仮定した値を用いることとする。実験値の非線形性挙動と比較すると、Neo-Hookean モデル、Ogden モデルとも、伸長率 30% までは実測値に合致した値を示すが、伸長率が 30% を超えると、実測値とのかい離が大きくなる傾向を示す。しかしながら、Neo-Hookean モデルと Ogden モデルの両者には、大きな差異は認められなかったため、パラメーターが少なく、単純系で取り扱いやすい Neo-Hookean モデルを採用することとした。具体的には、バイアス方向の応力－ひずみ関係を等方性成分のモデルに適用した。

異方性の成分は、ウェール方向とコース方向に別々の応力－ひずみ特性を与え、しかも、ウェール方向とコース方向の成分は独立し相互作用がないモデルとした。これは、編物を構成するループの変形形状から、編物の伸長変形挙動には直交異方性は成立しないが、巨視的にはウェール方向とコース方向に材料主軸があると考え、編物の変形に伴い双方の主軸の成す角度が変化する現象を捉えたモデルであり、編物の伸長変形を、斜交異方性と仮定したモデルである。

これらの等方性の成分と異方性の成分を重ね合わせて、非線形性と異方性を実現するモデルとした。モデルの考え方を、次式に示す。

Fig. 3 Comparison of Neo-Hookean and Ogden models.

$$E_{\text{wale}} = E_{\text{aniso, wale}} + E_{\text{iso}} \quad (1)$$

$$E_{\text{course}} = E_{\text{aniso, course}} + E_{\text{iso}} \quad (2)$$

$$E_{\text{bias}} = E_{\text{iso}} \quad (3)$$

- E_{wale} ; ウェール方向の弾性率
- $E_{\text{aniso, wale}}$; ウェール方向の異方性成分の弾性率
- E_{iso} ; 等方性成分の弾性率
- E_{course} ; コース方向の弾性率
- $E_{\text{course, aniso}}$; コース方向の異方性成分の弾性率
- E_{bias} ; バイアス方向の弾性率

このとき、等方性成分と異方性成分の両成分の重ね合わせによる重複する応力を生じさせないため、重複した応力を除いた力を異方性成分に与えた。具体的には、ウェール方向、コース方向の実測の応力－ひずみ曲線の剛性から、バイアス方向の応力－ひずみ曲線から Neo-Hookean モデルにより求めた等方性成分の剛性を減算する方法をとった。ウェール方向、コース方向の実測の応力－ひずみ曲線は非線形性を有し、等方性成分も非線形性を示すモデルであり、結果として、異方性の成分にも非線形性を付与することができる。本モデルにおいて、Neo-Hookean モデルだけでは Fig. 3 に示すように伸長率約 30% を超えると実測値とのかい離し、非線形性の表現に限界があるが、異方性の成分を付加することで、少なくともウェール方向とコース方向では実変形挙動に近い非線形性を表すことができる。言い換えれば、実変形挙動に合わせ込むようなモデルである。

以上の編物モデルを、汎用の有限要素法ソフトウェア ABAQUS (Ver. 6.7) を用いて実現した。等方性成分にはシェル要素を適用し、ウェール方向、コース方向の異方性成分にはトラス要素を適用した。ベース部分となる等方性成分には、衣服を着用する場合、編物を曲げながら人体に着付ける計算が必要になることを考え、編物の曲げ変形も表せるシェル要素を採用した。

シェル要素とトラス要素のイメージ図を Fig. 4 に示す。等方性成分 E_{iso} は、シェル要素として、

Fig. 4 Schematic diagram of Shell and Truss model.

$$E_{iso} = E_{bias} \quad (4)$$

で表され、異方性成分 E_{aniso} は、トラス要素として、ウェール方向、コース方向の各々で、

$$E_{aniso, wale} = E_{wale} - E_{bias} \quad (5)$$

$$E_{aniso, course} = E_{course} - E_{bias} \quad (6)$$

と計算され、式 (1) (2) (3) の変形で各値を求めることができる。

さらに、詳細に言い換えるならば、局所座標上の弾性率 E_{11} , E_{22} は、式 (7), (8) より求めることができる。

$$E_{11} = E_{bias} + E_{truss} (wale) = \frac{\partial^2 W_{neo}}{\partial \varepsilon^2} + E_{truss} (wale) \quad (7)$$

$$E_{22} = E_{bias} + E_{truss} (course) = \frac{\partial^2 W_{neo}}{\partial \varepsilon^2} + E_{truss} (course) \quad (8)$$

シェル要素が等方性のベース部分を構成し、トラス要素がベース部分を補強する役割を果たす。ウェール方向、コース方向の異方性成分を構成するトラス要素は、シェル要素のせん断変形に追従して傾き、トラス同士の相互作用は発生せず、双方のトラスの成す角度が変化するように設定した。その変形挙動のイメージ図を Fig. 5 に示す。

以上の編物モデルのフローチャートを Fig. 6 に示す。

なお、身体にかかる衣服圧（接触圧）は、荷重-変位曲線の回復過程の剛性が大きく寄与するとも言われているが、本報は、まず伸長時の荷重-変位挙動だけで検討した。

3. 単軸変形挙動

3.1 実験方法

用いた試料は、素材混率が、綿 40%, レーヨン 40%, ナイロン 15%, ポリウレタン 5% の丸編（ペア天竺組織）の編物で、ウェール数が 32 ウェール /inch, コース数が 35 コース /inch の編目密度を示す。試料サイズ 25mm × 50mm の編物を単軸引張り試験により、50% 伸長させたときの荷重-伸長率曲線を求めた。長さ 25mm の一端を固定し、もう一方の

Fig. 5 Schematic diagram of element deformation with Truss rotation.

Fig. 6 Flow-chart of shell with Truss model.

一端を把持して引張る。このとき、把持部の幅は変化しないように両端とも 25mm の幅は固定した。ウェール方向、コース方向、バイアス方向のそれぞれの方向の引張り試験結果を Fig. 7 に示す。また、サンプルに、5mm × 5mm の格子状のマーキングをして、引張り試験を実施し、伸長変形挙動の画像も取得した。

3.2 計算方法

試料サイズは単軸引張り試験サンプルと同様に 25mm × 50mm とし、10 分割 × 20 分割のメッシュで構成した。その要素分解図を Fig. 8 に示す。厚みは 1mm とし、非圧縮性と仮定し、初期断面積は 25mm² とした。実際の引張り試験と同様に、長さ 25mm の一端を固定し、もう一方の一端を把持し、50% の伸長率、すなわちサンプル長が 50mm から 75mm になるまで引張る計算を実施した。このとき、把持部の幅は変化しないように両端とも 25mm で固定させ、実際の引張り試験と同様にした。編物のウェール方向、コース方向、バイアス方向のそれぞれについて計算した。

Fig. 7 Load-elongation rate curves of experiment.

Fig. 8 Finite element division and boundary conditions.

3.3 計算結果

本モデルにより、編物伸長変形を計算した結果を示す。

まず、等方性の成分であるシェル要素の材料定数を求めた。編物のバイアス方向の単軸引張り試験より求められた荷重－伸長率曲線を、公称応力－公称ひずみの関係に換算し、さらに、真応力－対数ひずみの関係に換算し、この曲線の初期勾配である弾性率 $E = 6.12 \times 10^{-2}$ MPa を求めた。そして、この弾性率を Neo-Hookean モデルに適用した。Neo-Hookean のひずみエネルギー関数 W [10, 11] は、

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (9)$$

C_{10} ; 実測値から得られる材料定数

I_1 ; 弾性ひずみの不変量

で表され、 I_1 は、

$$I_1 = \lambda_{12} + \lambda_{22} + \lambda_{32} \quad (10)$$

で定義される。 λ_1 , λ_2 , λ_3 は、それぞれ主軸方向の伸長比である。 C_{10} は、ヤング率 E から

$$C_{10} = E/6 \quad (11)$$

のように、求めることができ、(3)式を用い、等方性成分のシェル要素の材料定数 $C_{10} = 1.02 \times 10^{-2}$ MPa を算出した。

次に、異方性の成分であるトラス要素の材料定数を求めた。ウェール方向の単軸引張り試験結果を、真応力－対数ひずみの関係に換算した剛性から、バイアス方向の荷重－変位曲線からフィッティングし Neo-Hookean モデルを適用して求めたシェル要素の真応力－対数ひずみ曲線の剛性を減算し、その減算値により形成される曲線を多項式で近似し弾性率を求め、トラスの材料定数を算出した。

以上の方法により、シェル要素の剛性と、トラス要素の剛性を加算し、ウェール方向の真応力－対数ひずみ曲線を計算

した。ウェール方向の単軸引張り試験結果、トラス要素の計算結果、およびウェール方向の応力－ひずみ関係の計算結果を Fig. 9 に示す。計算により求めた応力－ひずみ曲線は、実験による応力－ひずみ曲線にほぼ一致した。同様の方法で求めた、コース方向の計算結果を Fig. 10 に示す。

Fig. 9 Stress-strain curves for wale direction.

Fig. 10 Stress-strain curves for course direction.

Fig. 11 Stress-strain curves for all direction.

このようにして得られた結果を Fig. 11 にまとめて示す。ウェール方向、コース方向、バイアス方向それぞれの、計算値と実験値の応力-ひずみ曲線である。バイアス方向においては、対数ひずみ約 0.3 (伸長率約 35%) までは、実験値にほぼ一致するが、それを超えると実験値と乖離する傾向を示す。一方、ウェール方向、コース方向の計算値は高伸長率においても実験値とほぼ等しい値を示す結果を得ることができた。Neo-Hookean モデルによる非線形性の表現の限界を、トラス要素を加え、編物の変形挙動に合わせ込むモデルにすることで、異方性を表現すると同時に、非線形性の表現を補完することができた。

この編物の、伸長率 50% 時の実際の伸長変形写真と計算での伸長変形画像を Fig. 12 に示す。コース方向において、単軸引張り試験で伸長時に編物中央付近の幅が狭くなる挙動が、計算でも同様に示されることを確認した。また、バイアス方向において、単軸引張り試験で、格子形状がねじれながら引張られる挙動を計算でも表すことができた。

ところで、本モデルは編物の伸長変形の特徴である、異方性、非線形性を考慮したモデルである。仮に、等方性線形モデルとして、ウェール方向、コース方向、バイアス方向の平均弾性率 $E = 6.81 \times 10^{-2}$ MPa を用いて計算した場合、Fig. 13 のような伸長変形画像を示し、格子形状がねじれる現象は表せなかった。よって、本モデルは編物の変形挙動を表すことができる精度の高いモデルと言える。

Fig. 12 Comparison of deformation behavior under uniaxial tensile test between experiment and FEM results.

Fig. 13 Comparison of deformation behavior under uniaxial tensile test between experiment and linear isotropic model.

4. 衣服圧計算

上記の編物モデルを用い、スパッツ着用時の衣服圧を計算した。本報では、衣服圧計算において、人体モデルとスパッツとの間の摩擦は生じないものとして計算した。また、人体モデルは剛体として計算し、人体側の変形は考慮しなかった。部位により硬さの異なる人体では計算結果の検証をすることが困難であり、本報では、まずは計算結果の検証が可能な剛体の人体モデルを対象とした。

人体データは、20 歳代の日本女性の平均的モデルであるマネキン WD-20 (株七彩製) から、三次元計測により表面形状のデータを取得し、剛体として定義した。衣服の型紙データは、スパッツの形状データを用いた。

スパッツ着用時の衣服圧のコンター図を Fig. 14 に示す。青色部分は衣服圧が低く、緑色部分は衣服圧が高いことを意味する。衣服圧の実測値との比較をするために、エイ・エム・アイ社製のエアバックをマネキン WD-20 に貼付して衣服圧を実測した。Fig. 15 にマネキンにエアバックを貼付した写真を示す。写真のエアバック位置で、ヒップラインの衣服圧を計測した。Fig. 16 に、ヒップラインの衣服圧計測値と、計測部位を通るラインの衣服圧計算結果を示す。実線が計算値、①～④が実測値である。同様に、足首から腰部のラインの衣服圧計測値と、計測部位を通るラインの衣服圧計算結果を Fig. 17 に示す。下腿部②、膝部③、大腿部④⑤の衣服圧が、足首①、腰部⑥に対し高く、実測値と同様の傾向を示すことを確認した。

また、スパッツ着用時の伸長挙動を観察するため、Fig. 18 に後面部の実装着時の写真と計算画像とを並べて示す。実装着の写真は、1cm 間隔の格子線を引いたスパッツをマネキン WD-20 に着用させた写真である。膝後面はあまり伸ばされず、大腿部から臀部周辺にかけて大きく生地が伸ばされる、という実装着の傾向が計算結果にも表れている。Fig. 19 に臀部のコース方向の伸長率の計算値と実測値を、Fig. 20 に臀部のウェール方向の伸長率の計算値と実測値を示す。コース方向は、臀部よりも大腿部の伸長率が高く、ウェール方向は、大腿部よりも臀部の伸長率が高い傾向が、計測結果と同様であることを確認した。

ところで、異方性非線形モデルと等方性非線形モデルとの計算結果に違いがあるか検討した。Fig. 21 に応力-ひずみ曲線の計算結果を異方性非線形モデルの計算結果と合わせて示す。等方性非線形モデルは、ウェール、コース、バイアス方向の弾性率の平均値を用いて Neo-Hookean モデルを適用した。この結果を用いて計算した衣服圧のコンター図を異方性非線形モデルの計算結果と合わせて Fig. 22 に示す。また、足首から腰部にかけての Fig. 17 と同じラインの衣服圧の計算結果と実測値を Fig. 23 に示す。等方性非線形モデルは異方性非線形モデルに対し、400mm～600mm の位置、すなわち大腿部④⑤付近の衣服圧が高い傾向を示す。これは、大腿部付近のコース方向の伸長率が約 50% と高く、高伸長時の応力-ひずみ曲線の精度の違いが表れていると考える。

Fig. 14 Clothing pressure distribution by FEM.

Fig. 15 Measuring position of clothing pressure using air-pack sensor.

Fig. 16 Comparison of clothing pressure at hipline between experimental and FEM results.

Fig. 17 Comparison of clothing pressure from ankle to waist between experimental and FEM results.

Fig. 18 Comparison of deformation behavior under wearing pants between experiment and FEM results.

Fig. 19 Comparison of elongation rate in the course direction between experimental and FEM results.

Fig. 20 Comparison of elongation rate in the wale direction between experimental and FEM results.

Fig. 21 Stress-strain curve for anisotropic and isotropic models.

Anisotropic model

Isotropic model

Fig. 22 Clothing pressure distribution by FEM.

Fig. 23 Comparison of clothing pressure from ankle to waist between anisotropic and isotropic models.

5. 結 言

従来、編物の伸長変形の特徴である、異方性、非線形性の両特性を実現する伸長変形モデルはなかった。本研究では、身体に密着させて着用する、編物で構成される衣服の衣服圧を予測・計算する技術を構築するため、大変形にも適用できる、異方性、非線形性を考慮した編物伸長変形モデルを提案した。

等方性の成分と異方性の成分を分離したモデルとし、その

両方に非線形性を与え、最終的に両成分を重ね合わせるモデルを考案した。等方性の成分をベース部分と考え、非線形性を付与するため、超弾性体を表す Neo-Hookean モデルを適用して、バイアス方向の応力-ひずみ曲線より材料定数を求めた。異方性の成分は、ウェール方向とコース方向に材料主軸が存在し、その主軸は等方性成分であるベース部分の変形に追従する斜交異方性のモデルとし、ウェール方向とコース方向の剛性から等方性成分の剛性を減算した応力-ひずみ曲線により材料定数を求めた。このモデルを、汎用の有限要素法ソフトウェア ABAQUS (Ver. 6.7) を使い、等方性成分をシェル要素、異方性成分はトラス要素を適用して実現した。本モデルにより、スパッツの衣服圧を計算した結果、衣服圧、および、伸長率ともに、実測値と対応の良い結果を得ることができた。

謝 辞

本研究において、数値解析を行うにあたり、(株)メカニカルデザイン小林卓哉様、大井秀哉様の多分のご協力を得ましたことを、ここでお礼申し上げます。また、本研究は、経済産業省のエネルギー使用合理化技術開発費補助金（エネルギー使用合理化繊維関連次世代技術開発（心理生理快適性素材の開発））の成果であることを記載いたします。

References

- [1] Harada T (1983) Sen-i Kikai Gakkaishi, **36**, 212-21
- [2] Imaoka H, Okabe H, Akami H, Shibuya A, Aisaka N, Matsuda R (1988) Sen-i Gakkaishi, **44**, 229-237
- [3] Niwaya H, Imaoka H, Shibuya A (1996) Sen-i Gakkaishi, **52**, 99-104
- [4] Inoue M, Sukigara S, Niwa M (1992) J Jpn Res Assn Text End-Uses, **33**, 254-260
- [5] M.Kageyama, S. Kawabata, M. Niwa (1988) J. Text. Inst, **4**, 543-567
- [6] X.Zhang, K. W. Yeung, Y. Li (2002) Textile Res. J, **72**, 245-252
- [7] K. W. Yeung, Y. Li, X.Zhang (2004) J.Text. Inst., **95**, 59-79
- [8] Jinlian Hu (1995) Textile Asia, November, 77-80
- [9] D. E. Been, D. H. House, M. J. Wozny (1994) Textile Res. J, **64**, 663-685 (1994)
- [10] Hisada T, Noguchi H (2002) "Hisenkei yuugenyousohou no kiso to ouyou", p60-63, Maruzen
- [11] Nonomura C, (2006) Seikei-Kakou, **18**, 397-409