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

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

^aResearch Center TOYOBOKO CO., LTD, Otsu, Shiga, 520-0292, Japan,

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

Received 20 August 2009; accepted for publication 14 January 2010

Abstract

Generally, the clothing pressure is measured with the sensor set on the surface of the human body or the dummies. It is not possible to measure the clothing pressure without sewing process. We have developed the technology to simulate the clothing pressure without sewing clothing by using the numerical analysis technique. In this research, the numeric knitting model reported with the previous paper is used, and how to contact clothing pattern with sleeves to the human body model is described. Concretely, a temporary body is existed between the human body model and clothing pattern. After the clothing pattern can be contact to the temporary body, it can be contact the human body model. With this method, the clothing pressure values predicted using this computer simulation proved to be very close to the actually measured values. In this study, we show short-sleeved underwear.

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

有限要素法を用いた衣服圧分布の予測計算 —アンダーウェアの衣服圧計算—

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

* 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

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測・計算する技術が望まれている。

衣服圧を予測・計算するために必要な生地変形挙動のモデル化について、前報の「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—」において報告した [2]。身体に密着させて着用する編物からなる衣服が対象であり、編物は大きく引き伸ばされることになる。そのため、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。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が良好であることも報告した。

本報では、前報の編物モデルを用い、衣服を人体に着用させる過程について述べる。

まず、衣服を人体に着用させる計算方法について、従来の研究をいくつか以下に示す。庭屋ら [3][4] は、有限要素法を用い、衣服を人体に着用させたときの衣服圧を計算する手法を提案している。その計算は、衣服が人体の表面を越えて内部に入らないという制約を設定しており、衣服が人体にある程度接触すれば、人体と衣服との間にゆとりが存在している部分があっても、それ以上衣服は人体に入り込まない。すなわち、伸長率の高い編物からなる衣服の場合、人体に密着して着用させることができないケースもある。

X.Zhang ら [5] は、有限要素法を用い運動方程式を解いて、ショーツとノースリーブのアンダーウェアを人体に密着させて着付ける方法を提案している。また、K.W. Yeung ら [6] は、同様の方法で、ズボンを人体に密着させて着付ける方法を提案している。しかしながら、これらは衣服の形状を直接人体に着付ける方法であり、袖のある複雑な構造の衣服を人体に密着させて着用させることは困難だと思われる。また、計算した衣服圧を実測値と厳密に比較をしておらず、計算精度についての言及がなされていない。

このように従来の研究では、ゆとりがなく人体に密着する衣服、かつ、単純な筒状の衣服ではなく袖と身頃を縫製する複雑な形状の衣服を着付ける計算技術は構築されていない。

本報では、前報で報告した編物モデルを用い、袖のある複雑な形状の衣服を人体に密着させて着用させる衣服の着付け技術を構築することを目的とする。また、衣服圧の計算結果と、実測値との対応関係を検証する。

2. 着付けモデル

2.1 着衣過程

通常、型紙どおりに裁断された生地で衣服を縫製した後、人はその衣服を着衣する。アンダーウェアやTシャツのようにボタンのない衣服は、頭を襟ぐりに、腕を袖に通して着衣する。その着衣過程の一例を、Fig. 1 に示す。まず、衣服を頭部に通し、次に腕を通し、そして衣服の一部がつっぱるこ

Fig. 1 Photograph of dressing process

とがないように着衣する。この過程で、編物は引張り伸ばされながら身体にフィットする。編物は着衣の途中でさまざまな変形を受けるが、その変形過程を経ることで着衣後の衣服圧が変動するかを検討した。

素材混率がポリエステル 75%、ポリオレフィン 25% の経編の編物からなる半袖アンダーウェアを、20 歳代の日本女性の平均的モデルであるマネキン WD-20（株式会社七彩製）に着付け、衣服圧を、エイ・エム・アイ社製衣服圧測定装置を用い、直径 2cm のエアバックにより計測した。衣服圧は背部、胸部、腹部、肩部の 4 箇所計測した。着衣して衣服圧を計測する、という過程を 3 回実施した。

衣服圧計測結果を Table1 に示す。同じ測定位置での着衣 3 回の衣服圧計測値の違いは約 0.1kPa であり、ほぼ同値を示すと判断される。また、衣服圧が高い部位から順に、胸部、肩部、背部、腹部の順であることも再現した。3 回の着衣において、胸部を通す、あるいは腕を通す過程で編物はさまざまな形状に伸ばされ、逆に伸ばされない部分ではしわがかなり発生し、毎回、同じ伸長変形挙動をとるわけではないが、衣服圧はほぼ同値を示した。また、着衣後の形状は、毎回、ウエスト部に少し皺が発生し (Fig. 1)、裾部の位置はほぼ同じ高さで安定した。すなわち、衣服を構成する編物が、着衣過程でさまざまな伸長変形を受けても、衣服圧はほぼ同値、着衣後の衣服形状は同様の状態に安定したことから、最終的

Table 1 Clothing pressure in dressing times

	Back	Chest	Abdomen	Shoulder
1	0.42	1.56	0.38	1.29
2	0.36	1.44	0.32	1.37
3	0.39	1.53	0.28	1.33

(kPa)

に力学的バランスがとれた安定した状態に着衣されていると推測した。

着衣計算において、縫製した衣服を人体モデルに着付けることは困難である。特に、袖のある複雑な形状をした衣服を着衣させる計算は非常に難しい。しかし、本結果から、縫製された衣服を人が伸ばしながら着衣する実際の着衣過程と異なっても、最終着衣状態を力学的に安定させることにより、実際の衣服圧と同等の値を計算できると考えた。具体的には、型紙形状の編物を必要に応じて伸ばした後、型紙形状の編物同士を縫合しながら、人体モデルに型紙形状編物を着付ける方法でも問題ないと考えた。実際の着衣過程と、本報で提案する計算の着衣過程を Fig. 2 のフローチャートに示す。

2.2 着衣方法

人体形状には凹凸がある。従来の着衣計算では、人体モデルに衣服が接触した段階で計算を終了する。すなわち、衣服が人体モデルの凹部に入り込まない手法が多い。しかし、身体に密着させて着衣する衣服では、人体の凹部にも衣服が接触しなければならない。

腕部を例として、袖を腕部に密着させて着付けることができるか、袖の型紙形状編物の幅が、腕部の周長より短い、すなわち腕部に密着するように設計した袖の型紙形状編物を用いて着衣計算を試みた。型紙形状編物を人体に直接接触させる計算方法をとった。Fig. 3 に腕部に袖の型紙形状編物を配

置した着付け前、および着付け計算後の図を示す。Fig. 3 の右図から、袖口、袖ぐり部分が腕部に密着せず型紙形状編物が余っていることがわかる。また前腕部分にも皺が発生し、腕部に密着していないことがわかる。このように、型紙形状編物を人体モデルに直接着付けると、本来、人体に密着するように設計した衣服であるにも拘らず、人体モデルに密着させて着衣させる計算ができないことが分かった。

凹部のある人体モデルへの型紙形状編物の接触過程において、人体に接触した部分は接触した時点から伸ばされるのに対し、非接触部分は伸ばされない状態が続く結果、伸びすぎて余った部分が皺を発生させたと推測される。そこで、余分な伸長を防ぐ着衣過程がとれば、着衣過程で皺を発生させることなく、型紙形状編物を人体モデルに密着させた着衣が可能になると予想される。具体的には、人体モデルと型紙形状編物の間に、凹凸の少ない中間体を配置させ、型紙形状編物を人体モデルに着付ける前に、中間体に着付け、その後、中間体を取り除き人体モデルに着付ける方法を考えて。

Fig. 4 に腕部に中間体を配置した図、および、中間体を配置した場合の着衣計算結果を示す。Fig. 4 の右図に示すように、袖口、袖ぐりに型紙形状編物が余ることなく、前腕部にも皺が発生することなく、腕に密着させて着付けることができた。

以上、型紙形状編物を縫合しながら着衣させる着衣過程をとり、かつ、人体モデルと型紙形状編物との間に中間体を配置する着衣方法をとることにより、袖のある複雑な衣服を人体に密着させる着衣計算ができると考えた。

1. Actual dressing process

2. Numerical dressing process

Fig. 2 Dressing process

Fig. 3 Position of arm pattern and result of dressing without temporary body

3. 方 法

3.1 着付け準備

素材混率がポリエステル 75%, ポリオレフィン 25% の経編物の試料 1 と、素材混率がポリエステル 84%, ポリオレフィン 16% の天竺組織の丸編物の試料 2 の 2 種類を用いた。

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 - 伸長さ率曲線を求めた。長さ 25mm の一端を固定し、もう一方の一端を把持して引張る。

Fig. 4 Position of arm pattern and result of dressing with temporary body

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. 5 および Fig. 6 に示す。本試験結果から、前報と同様に材料定数を決定した。

計算方法も前報 [2] と同様である。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 × 20 の要素分割とした。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。要素分解図を Fig. 7 に示す。

真応力 - 対数ひずみ曲線の実測値と、前報と同じ編物モデルで計算した結果を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。Fig. 8 は試料 1、Fig. 9 は試料 2 の結果である。試料 2 のバイアス方向の計算値が、高伸長率部分で実測値からややはずれているが、

Fig. 7 Finite element division and boundary conditions

Fig.5 Load-elongation rate curves of experiment

Fig. 8 Stress-strain curves for all direction (Sample1)

Fig. 6 Load-elongation rate curves of experiment

Fig. 9 Stress-strain curves for all direction (Sample2)

その他はほぼ実測値と同値の計算結果を示した。

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 から三次元計測により表面形状のデータを取得した。そして、その人体の三次元データを要素分割し、かつ、型紙形状の編物を着付けしやすく腕と躯幹部との間の角度を大きくし、人体モデルを作成した。Fig. 10 にマネキンの写真、および、人体モデルを示す。なお、本報における人体モデルは剛体であり、三角形要素に分割した。分割数は18370である。

型紙データはアパレルCADデータを利用した。前身頃、後身頃、袖部から構成される半袖アンダーウェアの型紙を使用し、CADデータを要素分割した。Fig. 11 にCADデータ、および、要素分割した型紙を示す。また、異なる編物を部分的に配置した場合の衣服圧分布挙動を観察するため、後身頃の中央部分のみ試料1を用い、その他は試料2を用いる型紙データも作成した。そのアンダーウェアの後身頃を要素分割した型紙データも Fig. 11 に示す。編物試料1で縫製されたアンダーウェア

を試料1、編物試料2で縫製されたアンダーウェアを試料2、編物試料1と編物試料2を組み合わせで縫製されたアンダーウェアを試料Aとする。試料1と試料2は、アンダーウェアの身丈方向に編物のウェール方向、幅方向にコース方向を配置した。試料Aは、後身頃の中央部分の試料1は身丈方向に編物のコース方向、幅方向にウェール方向を配置し、その他の試料2を使用している部分は、身丈方向に編物のウェール方向、幅方向にコース方向を配置した。試料Aは、肩甲骨付近の衣服圧を高くすることはできないか、と考え、編物1の配置方向を幅方向に応力の高いウェール方向を配置した。

衣服圧の実測は、半袖アンダーウェアを縫製し、マネキン WD-20 に着用させて、直径2cmのエアパックをマネキン WD-20 に貼付して計測した。

なお、衣服圧は、編物の荷重 - 変位曲線の回復時の残留応力と関係があると言われているが、本報では回復時の考慮はしていない。本来あるべき姿までは到達していないが、その問題点は今後の課題としたい。

3.2 着付け計算

型紙形状編物の人体モデルへの着衣方法を具体的に示す。なお、以下の着付け計算は、汎用の有限要素法ソフトウェア ABAQUS(Ver.6.7)を用いた。まず、Fig. 12 に示すように、人体モデルの周辺に、型紙形状編物を配置した。次に、左右の腕、および肩部に Fig. 13 に示す円筒状の中間体を配置した。中間体に必要な条件は、凹凸がないこと、人体モデルと型紙形状編物との間に配置されること、型紙形状編物の長さよりも長いことである。型紙形状編物を、縫合しながら一旦中間体に着付け、その後、中間体を取り除き人体モデルに着付ける、という2段階の過程をとることで、型紙形状編物を人体モデルに密着させて着衣させることを試みた。腕部の中間体は、袖を人体に着付けるときに、一旦接触させる仮の腕部であり、肩部の中間体は、前身頃、後身頃を人体に着付けるときに、肩部に接触する前に、一旦接触させる仮の肩部である。

型紙形状編物を人体モデルに着付ける着衣過程において、

Fig. 10 Mannequin (WD-20) and human body model

Fig. 11 Apparel CAD and pattern data for FEM

Fig. 12 Position of pattern for human body model

Fig. 13 Position of temporary body for dummy

Fig. 14 Sewing node at armhole

最終縫合点が人体のどの位置になるのか指定することはできないので、直接着付けることは難しい。そこで、型紙形状編物を人体モデルに接触させる前に、一旦、安定するポイントで型紙形状編物を縫合し、その後人体モデルに密着させる、という段階的な手順を取る方法を考えた。特に、肩部分のように、腕、前身頃、後ろ身頃の3つの型紙形状編物を着付ける場合、一度に3つの型紙形状編物を縫合することは非常に難しいので、腕部と身頃部を別々に縫合し、Fig. 14に示すように、両者の袖ぐり縫合部分を明確にして縫合する方法とした。具体的には、多点拘束を定義し、運動方程式を解く方法とした。多点拘束の定義に従い、ダミーの接合点を設定し縫合する方法である。Fig. 15に示すように、前身頃の接点Fと後身頃の接点Bを縫合させる場合、ダミーの接点Dを設定し、各接点の変位量を Δf 、 Δb 、 Δd と設定し、 $\Delta b + \Delta d - \Delta f = 0$ の関係に基づき各接点を移動し、 $\Delta d = 0$ すなわち接点Fと接点Bを一致させることによって縫合を成立させることができる。接点Dは型紙形状編物と人体モデルのほぼ中間に配置するが、厳密に決める必要はない。直接、人体に向かって型紙形状編物を縫合および着付けをするのではなく、ダミー接点Dを用いて一旦縫合することにより、型紙形状編物を人体モデルに着付けるステップにスムーズに進む着衣過程を取ることができ、複雑な型紙形状編物でも着衣計算が可能になると考えた。

着付けの具体的な過程をFig. 16に示す。まず、STEP1は伸長過程であり、前身頃を伸長させ、かつ、袖を腕に近づける。このとき、袖が腕に食い込まないように、腕と袖の接触定義はせず、腕部の中間体と腕との間に接触定義をする。次に、STEP2は型紙形状編物の縫合過程であり、前身頃と後身頃の肩部と脇部を縫合し、かつ、左右の袖下部をそれぞれ縫合し筒状にする。このとき、前身頃と後身頃は腕部の中間体と肩部の中間体との間に接触定義を設定し中間体を通り抜けないようにすると同時に、袖も腕部の中間体との接触定義を継続する。STEP3では、前身頃と後身頃を人体に近づける。このときの接触定義は、STEP2と同様である。STEP4では、肩部および脇部が縫合された前身頃、後身頃と、袖下部が縫

Fig. 15 Sewing node

合された袖の袖ぐり部分を縫合し、かつ、前身頃と後身頃は人体モデルに接触させる過程をとる。このとき、袖と腕部の中間体との接触定義をはずし、袖と人体モデルとの接触定義に変える。この過程で衣服の縫合は完成する。STEP5では、縫合された型紙形状編物を人体モデルに接触させる。ここでは腕部の中間体だけでなく、肩部の中間体も接触定義からはずし、人体モデルと袖および身頃の型紙形状編物との接触定義をする。このSTEP5で、人体モデルに型紙形状編物を密着させて着用させる過程を終了する。ここまでのSTEPの計算は、裾部の位置を指定しているが、STEP6では、その裾部分の拘束を解除する過程であり、衣服が自然にずれ上がる現象をも考慮する。なお、本報では、人体モデルの表面は摩擦抵抗0とし摩擦がないものとして計算した。

以上の方法で計算することにより、袖部と身頃が存在する肩部周辺が複雑な縫合形状となる衣服であっても、人体モデルに型紙形状編物をほぼ密着させて着付けることを可能にした。

Fig. 16 Wearing process

Fig. 17 Clothing pressure distribution

Fig. 18 Clothing pressure distribution of each sample

4. 衣服圧計算結果

着付け計算後の、衣服圧コンター図を Fig. 17 に示す。試料1、試料2の前面、背面のそれぞれの衣服圧分を Fig. 18 に示す。青色部分は衣服圧が低く、緑色、赤色になるにつれて、衣服圧が高くなることを意味する。

衣服圧の実測は、エイ・エム・アイ社製のエアバック式圧

力センサを用い、Fig. 19 に示す胸中央部から脇を通り背部までのライン上に位置する①～⑤の5箇所で計測した。

衣服圧実測位置上のラインの衣服圧計算結果、および、①～⑤の衣服圧実測値を Fig. 20 に示す。実線が計算値、①～⑤が実測値である。計算による衣服圧は、実測値に近い値を示していると判断した。また、試料1と試料2とを比較すると、試料2の方が衣服圧が低い傾向を示し、衣服圧実測値と

Fig. 19 Measuring position of clothing pressure using air-pack sensor

Fig. 20 Comparison of clothing pressure at bust line between experiment and FEM

同じ傾向を示すことも確認した。なお、胸の谷間のような窪んだ部分、あるいは、肩甲骨間の窪んだ部分は、編物の張力のため人体に型紙形状編物が密着しておらず、衣服圧が0になっている。これは実際の着衣に近い状態を再現していることを示している。

さらに、Fig. 11の右図に示す型紙データに従い、試料1を後身頃の中央部分に用い、その他は試料2を用いたアンダーウェア（試料A）の衣服圧計算値が、試料1、試料2とどのように異なるか比較した。胸囲の衣服圧分布を観察するため、Fig. 21の左図に示すように、胸中央部を0とし、要素分割数に合わせて64番目までの衣服圧を求めた。そして、Fig. 21の右図に示すように、胸囲10ラインの衣服圧を計算し、10ラインの平均衣服圧を算出した。Fig. 22に衣服圧計算結果を示す。要素分割番号7付近、および57付近はバスト周辺、要素分割番号20前後、および45前後は、肩甲骨周辺を表

す。試料Aは、バスト周辺の衣服圧は試料2と同等であるが、肩甲骨周辺の衣服圧は、試料2よりも大きい。すなわち、全体の締め付け感を大きくすることなく、部分的に肩甲骨周辺の衣服圧を高める衣服設計を目的とした場合に、衣服を縫製し衣服圧を実測しなくても、望ましい生地を使い方を計算により見出すことができることが示唆された。

5. 結 言

前報[2]では、身体に密着させて着用する、編物からなるウェアの衣服圧を予測・計算する技術を構築することを目的とし、そのために必要となる、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考案した。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が良好であることを紹介した。本報では、前

Fig. 21 Calculation line of clothing pressure

Fig. 22 Clothing pressure at bust area by FEM

報の編物モデルを用い、型紙形状編物を人体モデルに着衣させる計算手法について考案した。

縫製後に着衣する、という実際の着衣過程とは異なり、型紙形状編物を縫合しながら着衣させる着衣過程をとり、かつ、型紙形状編物を直接人体モデルに着付けるのではなく、人体モデルと型紙形状編物との間に中間体を配置し2段階の着衣方法をとることにより、袖のある複雑な衣服であっても人体に密着して着衣させることを可能にした。また、衣服圧実測値との対応関係が良好なことも確認した。さらに、本計算技術は、適切な衣服圧分布を示す衣服設計に活用できることが示唆される結果も得た。

＜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**, 212-217
- [2] Ishimaru S, Isogai Y,Matsui M, Negishi K, Nonomura C, Yokoyama A(2009) J.Tex Eng, **55**, 179-186
- [3] Niwaya H, Imaoka H, Shibuya A,(1988) Sen-i Gakkaishi, **52**, 248-252
- [4] Niwaya H, Imaoka H, Shibuya A (1996) Sen-i Gakkaishii, **52**, 76-81
- [5] X.Zhang, K.W.Yeung, Y.Li (2002) Textile Res.J, **72**, 245-252
- [6] K.W.Yeung, Y.Li, X.Zhang (2004) J.Text.Inst, **95**, 59-79