

# 全方位二軸変形試験法から導かれた ひずみエネルギー密度関数を用いた 衣服圧の CAE シミュレーション

福井大学 山下 義裕  
(共同研究者) IDAJ株式会社 石川 覚志

## Study on CAE Simulation of Garment Pressure Using Strain Energy Density Function Derived from Biaxial Deformation Test Method

by

Yoshihiro Yamashita  
*University of Fukui,*  
*Research Center for Fibers and Materials*  
Satoshi Ishikawa  
*IDAJ*

### ABSTRACT

To predict garment pressure accurately, it is essential to model the biaxial deformation behavior of textiles by considering yarn properties and weave structure. Yarn's mechanical properties are nonlinear, and assuming a Poisson's ratio of 0.5, we can employ a hyperelastic model to simulate large deformation behavior. In this study, we approximate the mechanical properties of spun yarn using an equivalent model of a homogeneous monofilament. We use CAE software, Abaqus, to simulate the biaxial tensile behavior of a plain weave. We estimate the stress-strain relationship by fitting the strain energy density function to the Mooney-Rivlin approximation, which is based on biaxial deformation in the course direction. This direction closely resembles the deformation experienced when wearing a garment. We also utilize CAD data for

a general-purpose mannequin and a shirt. When we compared the results with the measured garment pressure of a T-shirt worn on a mannequin, we found that they were in good agreement with the measured garment pressure.

#### キーワード

衣服圧, CAEシミュレーション, ひずみエネルギー, ニット, 編物, 二軸変形

#### Keyword

Garment pressure, CAE Simulation, Strain energy, Knit, Knitted fabric, Biaxial deformation

## 要 旨

着衣の衣服圧を予測する方法の一つとして、糸の特性から織構造をモデル化することで織物の二軸変形挙動を予測することは重要である。糸の力学特性は非線形である。糸のポアソン比を0.5と仮定すれば超弾性体モデルを用いて大変形挙動をシミュレーションが可能である。本研究では紡績糸の力学特性を均質なモノフィラメントの等価モデルで置き換えて近似し、平織物の二軸引張挙動をCAEソフトのAbaqusを持ちいてシミュレーションした。またニットの編構造からなるTシャツの全方位二軸試験を行い着衣時の変形に一番近いと判断したcourse方向への二軸変形からひずみエネルギー密度関数をMooney - Rivlinの近似式にあてはめて応力-ひずみ関係を推測し、汎用のマネキンとシャツのCADデータをもとにCAEによる衣服圧シミュレーションを行い、一方でマネキンにTシャツを着用させた時の実測の衣服圧と比較したところ良い一致を得た。

## 緒 言

近年はアパレルCADの進歩によりマネキンの3次元人体モデルから平面の型紙を作り出すことが一般的になっている。衣服圧について金井ら<sup>1)</sup>は人体とソフトマネキンを用いてズボン着用時の衣服圧と主観評価の間に良い相関がみられたこと、

ソフトマネキンで計測された衣服圧は人体よりも2~3倍大きな値であることを示した。小澤ら<sup>2)</sup>はDressingSim - Clothを用いて衣服圧を実測と比較しchest部で実測値が4.2hPaであったのに対して計算値は3.5hPaと良い一致を示したことを報告した。加藤ら<sup>3)</sup>はコンプレッションタイトの衣服圧が10~30hPaでありそのニット素材の力学特性と走行時の生理的影響との関係を調査した。Gongら<sup>4)</sup>は衣服生地 of 伸長による応力-ひずみ曲線と衣服圧-ひずみが比例関係にあることを示した。村崎ら<sup>5)</sup>はブラジャーのバックパネル部の衣服圧が中央部で4.6hPa, エッジ部で23~25hPa (20歳代) と報告している。Songら<sup>6)</sup>は着圧ストッキングの衣服圧が弱タイプで10~25hPa, 強タイプが10~35hPaと報告している。Xuら<sup>7)</sup>はストッキング, パンツ, ジーンズの衣服圧を測定していずれも11.6hPa以下であると報告している。一方Horibaら<sup>8)</sup>はガードル素材の応力-ひずみ曲線から得られた弾性率とポアソン比を用いてLS - DYNAによるガードルのCAEシミュレーションと実測の衣服圧を測定してよい一致が得られたことを報告している。

実際の着衣は糸を織機や編機を用いて2次元の布を作製してそれを縫製により仕上げられる。そのため糸と織物や編物の構造をCADでモデル化し、そこに力学特性を与えてあげることで出来上がる布の力学特性が推定できる。しかし織物や編

物の応力-ひずみ曲線の非線形性と着衣の衣服圧の関係はまだ不明確な点が多い。1本の糸の力学特性を用いて織物や編物をまずシミュレーションし、それを着衣に展開するのが理想である。これまで織物は複合材料の補強材としてのCAE解析の報告は多いが、織物<sup>11-14)</sup>や編物<sup>15)</sup>の単体での報告は少ない。一方で着衣の糸はモノフィラメントだけでなく短繊維撚糸からなる紡績糸が主流で、さらに織られたり編まれたりする工程で糸の特性が大きく変化するため、今回はモノフィラメントで織られた平織の均等二軸変形をシミュレーションし、糸や織物の解析結果が着衣の実用的なCAEデータとして利用可能かも検討した。糸や織物や編物からなる材料の力学特性は非線形であるためCAE解析に卓越した世界中で広く用いられている汎用ソフトであり利用者も多いAbaqusを用いた。その後に着衣の力学特性をニットのwale/course方向(0°方向)とそれらの45°方向(せん断方向)に切り出した素材の二軸試験を行い

CAE解析が活用できるかどうかとも検証した。

## 1. 実験

### 1.1 二軸測定

二軸測定はカトーテック(株)BX5450で行った(図1)。ひずみを計算する初期長としての有効試験幅はX,Y方向それぞれ50mmである。二軸測定はX方向とY方向に同じ量のひずみを加える均等二軸変形(equal biaxial)、XもしくはY方向のいずれかの変形を固定した一軸拘束二軸変形(pure shear)、Y方向を固定せず自由にした一軸変形(uniaxial)などがある。ひずみ速度は200%/minである。

### 1.2 平織物

モノフィラメント糸(直径10 $\mu$ m)からなり経緯方向に45本/cmの糸密度で構成された平織物(図2a)を参考にモデル化(図2b)した。

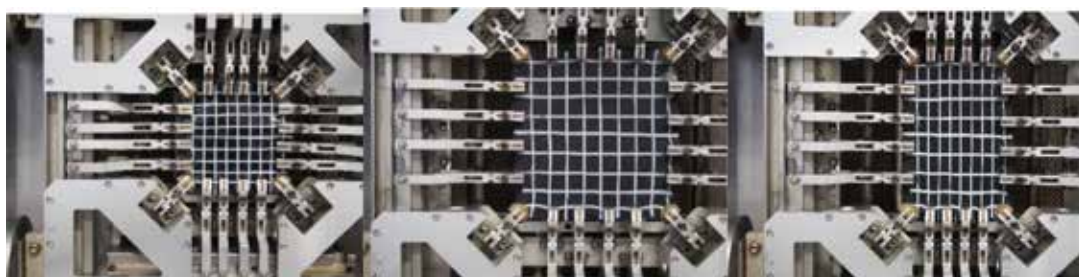


図1 二軸試験装置(左)未変形,(中)均等二軸変形,(右)一軸拘束二軸変形

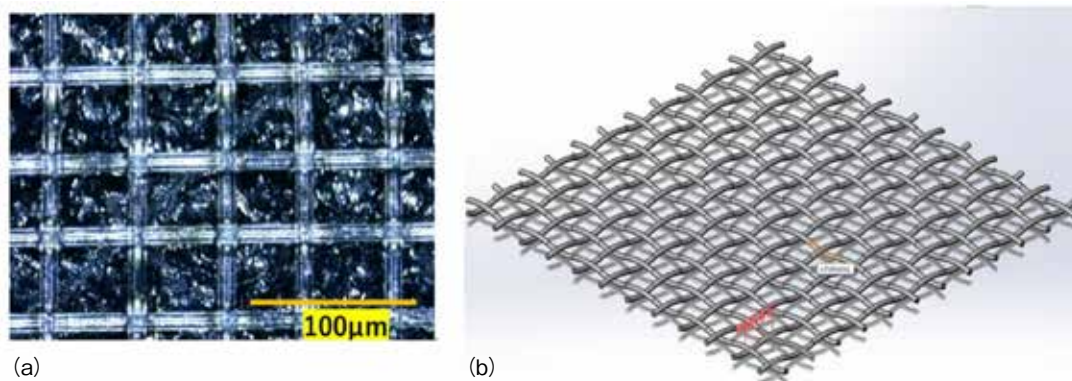


図2 モノフィラメント糸からなる平織物(a)とCAE解析のためのモデル(b)

### 1. 3 着衣

用いた着衣のTシャツは平編ニット(天竺編み)からなり胸囲84cm(サイズS), 生地の日付重量167g/m<sup>2</sup>, 厚み0.5mm, 33Guage/inchである。布の引張試験では通常はチャック部の布の単位幅あたりの力で表示されることが多い。しかしCAE解析では応力で表す必要があるため, 二軸測定のを布のチャック間幅50mmにTシャツは厚み0.5mmをかけてつかみ部の布の断面積25mm<sup>2</sup>で力を割ることで応力を算出した。応力はSI単位に換算して計算に用いた。

### 1. 4 衣服圧

衣服圧の測定は(株)エイエムアイ・テクノ製AMI3037-SB-hP(測定圧力範囲0~200hPa)でエアバックは直径20mmを用いて着衣を着せたメンズマネキンの胸部と腹部ならびに肩, 腰の着衣との隙間にエアバックセンサーを挟み測定した。マネキンは紳士(M)で本体高さ166cm, 肩幅45cm, 胸囲90cm, 胴囲76cm, 腰囲90cmである。

### 1. 5 ひずみエネルギー密度関数の算出

糸の力学特性はモノフィラメント織物から取り出して測定し, ポアソン比0.5の非圧縮材料と仮定して糸の一軸伸長の応力ひずみ曲線から(1)式の係数を求めた。糸のポアソン比は0.5以上

の場合もありうるし, ウレタン繊維を含む糸の場合は0.5より小さい場合もありうる。糸のポアソン比の測定の報告はほとんどなく鮑ら<sup>11)</sup>はいくつかの織物のポアソン比を測定しニットに近いものは0.49~0.57であると報告している。Horibaら<sup>8)</sup>はニットのポアソン比として0.49を用いている。

ゴム材料を仮定すればその力学挙動は(1)式に示すひずみエネルギーWで定義することが可能である。

$$W = \sum_{i,j} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^{N_1} D_i (J - 1)^{2i} \quad (1)$$

W: Mooney-Rivlin近似によるひずみエネルギー  
C<sub>ij</sub>, D<sub>i</sub>: 定数

I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>: ひずみの不変量

Wはエネルギーであるのでこれをひずみで微分することで常に任意のひずみでの応力を得ることができる。今回は体積圧縮にかかわるD項は無視した。

### 1. 6 CAE解析

図3はCAE解析の流れを示す。紡績糸の場合もモノフィラメントと見立てて, 一軸伸長の応力-ひずみ曲線から(1)式の係数を得る。次に糸が経糸と緯糸からなる織物のモデルを作製してその織

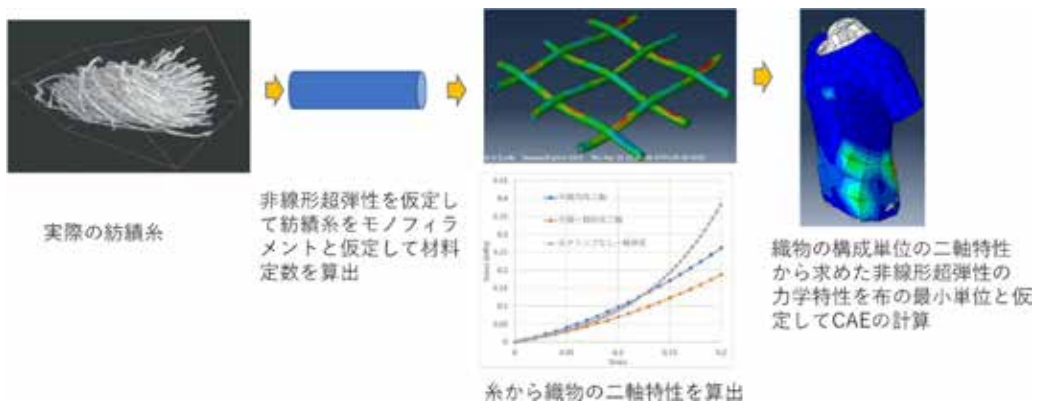


図3 糸の力学特性から着衣の力学特性を算出するCAE解析の流れ

物に均等二軸変形と一軸拘束二軸変形を与えて応力-ひずみ曲線を得てこれを織物の力学特性と仮定して再度 (1) 式から係数を得る. この時糸の交差部の摩擦係数は0 ~ 10の間で変化させて実際の変形状態に近い値を採用する. 最後に得られた織物の係数を着衣の力学特性と仮定して着衣をマネキンに着用させ, さらにCAE解析を行う. 実際の織物布では経糸と緯糸と45度方向では異方性が生じるが今回は織物布は等方性と仮定した.

CAE解析はAbaqus2020ならびにAbaqus6.14 (ダッソー・システムズ) を用いてモノフィラメントからなる平織物の解析には陽解法を着衣の解析は陰解法で行った. 着衣解析の手順の詳細を以下に示す. マネキンとシャツのCADデータはFree3D CAD<sup>9)</sup> のstepファイルを用いた. まず実測用マネキンの胸囲93.5cmに人体モデルマネキ

ンCADの胸囲が一致するサイズにCADモデルを修正する (図4). 次にシャツCADは胸囲93.5cmにした剛体人体モデルマネキンCAD (M) よりも一回り小さいサイズ (S) にする (図5 (左)). 初期状態では接触を無視してシャツは人体の内側に一部がもぐりこんだ状態になる. シャツの材料特性に非線形ひずみエネルギー密度関数の係数を設定後, シャツを人体モデルマネキンと接触しないまでに膨らませる. 最後にシャツに加えた内圧を取り除いて人体モデルマネキンにシャツが接触するまで縮める (図5 (右)).

## 2. 結果と考察

### 2.1 モノフィラメントからなる平織物のCAE解析

平織物の二軸伸長実測結果とモノフィラメント

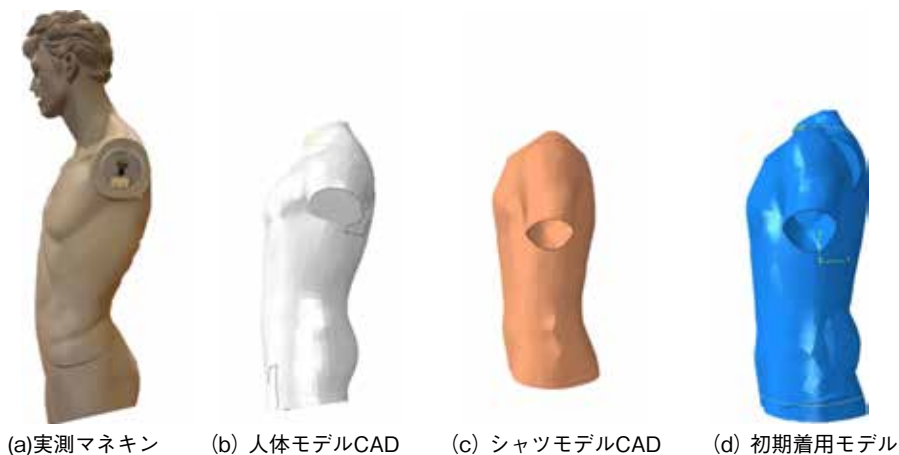


図4 衣服圧測定に用いたマネキン (a) と解析に用いたCADモデルの外観

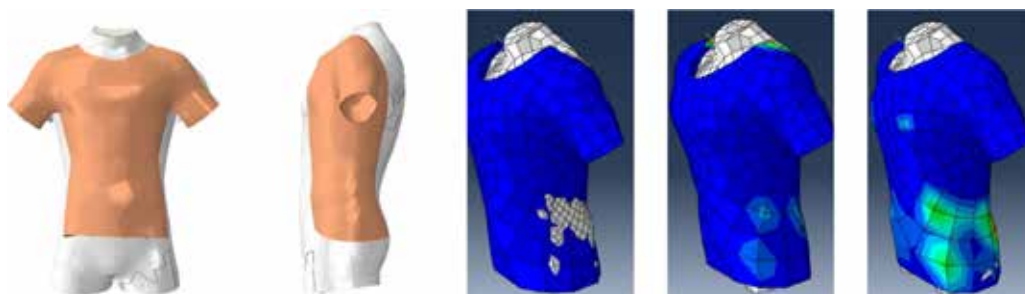


図5 シャツをマネキンに対して一回り小さいサイズ (左) にして伸長させてから着用 (右)

糸がゴム弾性体であると仮定し(1)式から求めた解析値との比較を図6に示す。図7は糸同志の摩擦係数が1.0の場合のCAE解析による未変形の状態(グレー)と均等二軸伸長ひずみ変形状態を比較した結果である。図8は二軸均等伸長における経糸と緯糸の交差部の変形状態を示す。実測織物では初期に糸のクリンプから生じるたわみの引き伸ばすための力は小さくほとんど応力-ひずみ曲線は線形変形を示し、その後伸長と共に上に凸のカーブを描きながら応力が増大する。一方、CAE解析では糸のクリンプを引き伸ばすことで生じる力のために初期の応力-ひずみ曲線のわずかな立ち上がりが見られ、その後はほぼ線形的に変化し

た後ひずみが6%を超えるとややカーブは上に凸になる。経糸と緯糸が交差部で接触するまではほぼ均質に糸は伸長されていること、接触後は交差部で糸同士が拘束されて、交差間部分間の糸がより伸ばされることで応力-ひずみ曲線の立ち上がりが生じていることがわかった。また図8からは交差部に接触圧縮の大きな力が発生していることがわかった。しかし次のような課題があることも分かった。

図9に示すようにCAE解析では糸同志の摩擦係数が0, 1.0, 10.0の場合を比べると摩擦係数が1.0以上の時の変形挙動の方が明らかに実測に近いことが分かった。ここで用いている摩擦係数

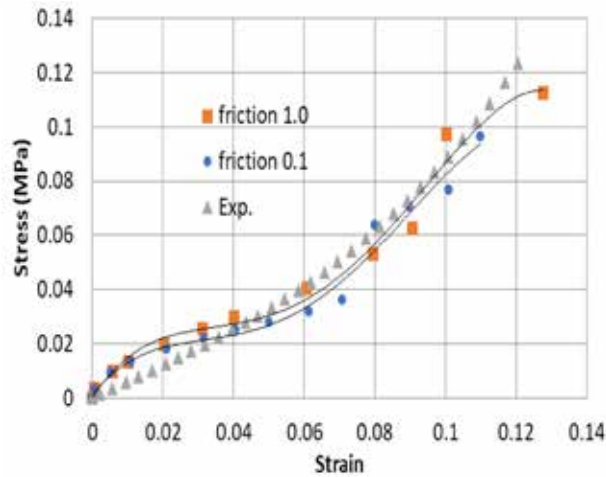
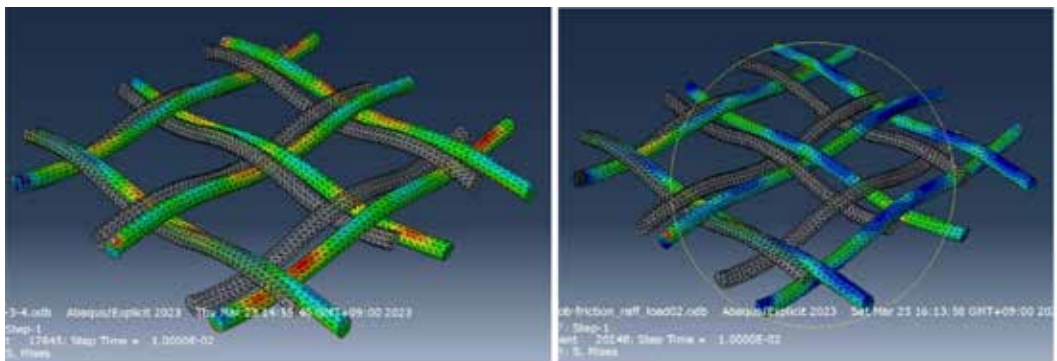


図6 モノフィラメント平織物の均等二軸変形の実測とCAE解析(Cal.)の比較



(a) ひずみ10%

(b) ひずみ20%

図7 CAE解析による変形前(グレー)と変形後の変形状態の比較(摩擦係数1.0)

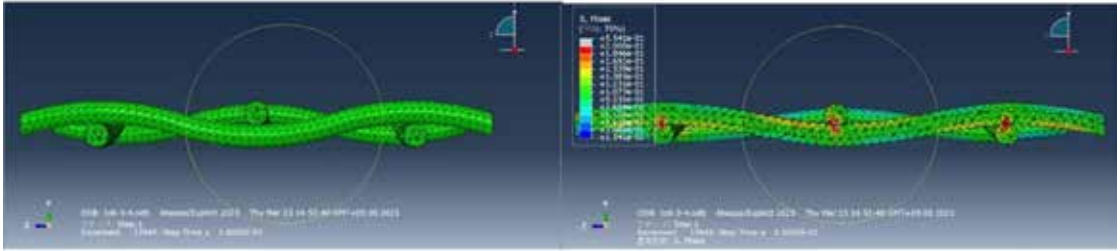


図8 (a) 変形前(左)と10%ひずみ後(右)の経糸と緯糸の交差部の断面全体

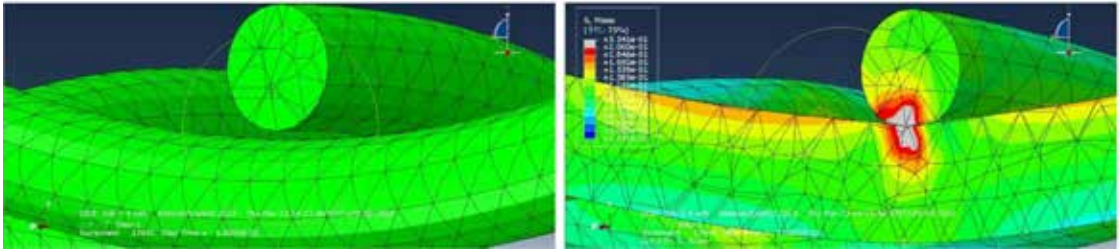
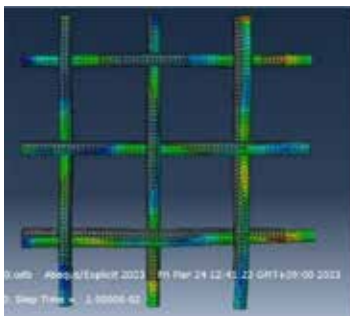
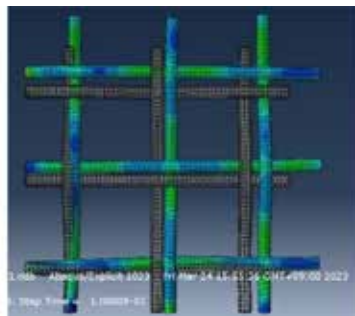


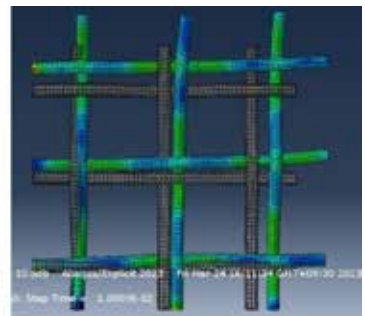
図8 (b) 変形前(左)とひずみ10%後(右)の交差部の拡大(摩擦係数1.0)



(a) 摩擦係数0



(b) 摩擦係数1.0



(c) 摩擦係数 10.0

図9 摩擦係数の違いによる糸の滑りの比較(ひずみ10%)

はKESで測定されるMIUとは直接関連しないので、実際の変形に近い状態の摩擦係数を与えることになる。しかし、糸同志の摩擦係数はフィラメント糸では推測が可能であるが、紡績糸は撚りの程度で大きく異なる。この摩擦係数の推定は糸からだけでは難しい。さらにモノフィラメント糸からなる織物のクリンプはある程度実測可能であることからCADモデルを作ることが可能であったが、紡績糸は糸の太さムラもあり、CADモデルを正確に作製することも必要である。さらに多く

の Apparel 用着衣は紡績糸の編物からなるものも多いため、今後は紡績糸の力学特性、紡績糸の交差による摩擦係数の測定、ループを持つ紡績糸編物のCADモデル化などがさらに必要となることが分かった。図10に示すいくつかの織物や編物のCADデータなどを上手に活用することも有用である。

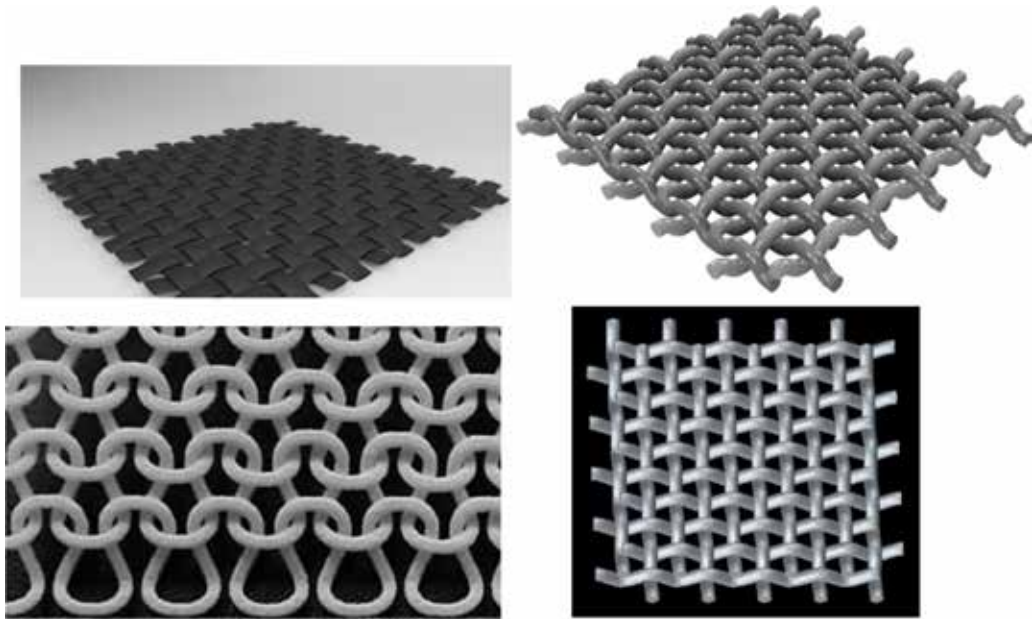


図10 織物や編物のCADモデル<sup>16)</sup>

## 2.2 着衣の衣服圧とシミュレーションの適合性評価

Tシャツの二軸試験の結果を図11に示す。Tシャツはwale方向が身長方向、course方向が胴体周り方向である。wale/courseが $0^\circ/90^\circ$ になるように切り出した生地ではwale方向はcourse方向よりも引張応力が高いことがわかる。wale/courseに対して $45^\circ/45^\circ$ になるように切り出した生地(図11(b)と(c))からはせん断方向の力学特性の異方性が小さいことがわかる。ところで実際の着用では一番よく伸びている胸部の前と後ろはcourse方向のひずみが平均して12.0%、wale方向が8.0%であったが、それ以外の部分では伸びはcourse方向が支配的であったので、多くの場合course方向に伸びた状態で着用していると思われる。そこで図11(b)のcourse方向に伸長した場合の均等二軸、一軸拘束二軸、一軸の応力-ひずみ曲線をひずみエネルギー密度関数をシミュレーションに使用した。

それぞれの変形におけるひずみエネルギー密度関数の係数は一軸拘束二軸に一番フィットするよ

うに算出したものである。その特徴としてはwale方向に硬く、course方向は柔らかいことが図11の応力-ひずみ曲線からわかる。この硬さは特に図11(a)の $C_{02}$ の値が他と比べて非常に大きいことに反映される。本研究では係数自体を比較することはまだ不十分であり、今後さらに正確に解析を進めるためにはそれぞれのMooney - Rivlin係数と編構造を関係づけて考察することが必要になる。

図12(a)はマネキンにTシャツを着用させた状態で衣服圧を測定した個所を、図12(b)はそのシミュレーション結果を示す。表1はTシャツの衣服圧の実測とシミュレーションを比較した結果を示す。

実測マネキンと測定した実際のTシャツはCAD-マネキンやCAD-Tシャツではそれぞれサイズが幾分異なるにもかかわらず実測とシミュレーションの誤差は $\pm 15\%$ 程度であり衣服圧が小さいことからこの誤差はある程度実測と解析が一致していると考えられ、Abaqusの非線形解析を用いて編物からなる着衣の衣服圧を推定するこ



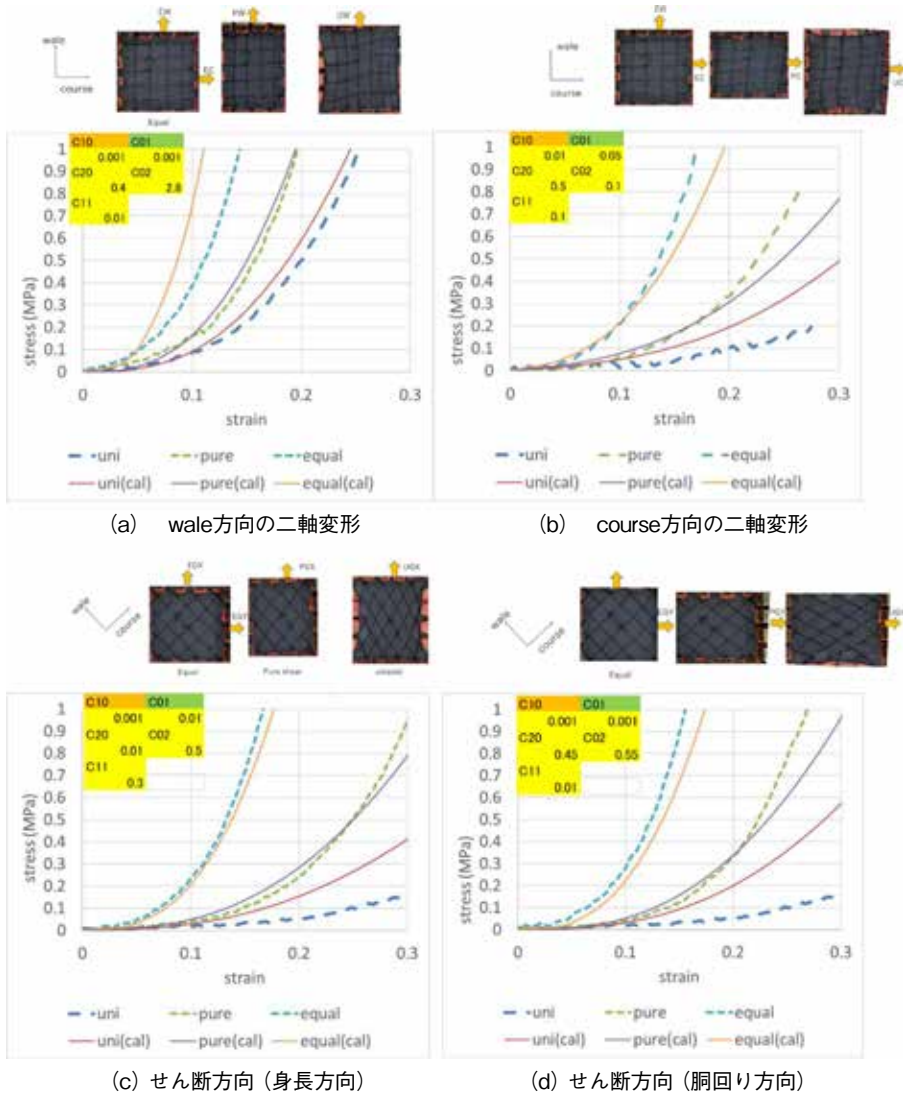


図11 二軸変形の応力-ひずみ曲線とひずみエネルギー密度関数の(1)式の係数



図12 (a) マネキンにTシャツを着用時の衣服圧測定位置 (b) 衣服圧シミュレーション

表1 図12 (a) 位置における衣服圧の実測 (exp) とCAEシミュレーション (cal) の比較

	unit: kPa			unit: kPa	
	cal	exp		cal	exp
①	8.3	10.0	④	2.3	4.0
②	0.0	3.0	⑤	0.0	3.0
③	12.2	8.0	⑥	5.1	6.0

とは可能であると考えられる。一方今後さらに複数の着衣によるシミュレーションを行う必要がある。

### 3. まとめ

ニットのような全等方性に近い素材はゴム材料の解析で確立されたひずみエネルギー密度関数を用いた非線形解析をすることにより、ニット製品の体との密着性、衣服圧の関係を推定する手法としての活用の可能性を示唆することができた。今後は二軸測定から得られたひずみエネルギー密度関数を用いAbaqusなど非線形CAE解析に優れたシミュレーションを行うことで着用時の衣服圧を正確に推定できることが期待される。

### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、多大なご援助をいただいた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く感謝申し上げます。またこれまでアパレルのCAE解析に実績のあるメカニカルデザインの小林卓哉氏から貴重な助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

### 文 献

- 1) Kanai Hiroyuki, Ogawa Kentaro, Sasagawa Tetsu, Shibata Kiyohiro, Kawauchi Kei, Development of Kinematic Soft Dummy and Application on Clothing Pressure Measurement of Men's Suit Pants, *Journal of Fiber Science and Technology*, 77 No.11 Page.274-288 (2021)
- 2) 小澤明裕, 草野拳, 角奈那子, 田川武弘, 衣服シミュレーションを用いたスポーツウェアの伸長変形解析, *Journal of Textile Engineering*, 66 No.4 Page.55-61 (2020)

- 3) 加藤礼菜, 坂下理穂, 諸岡晴美, LIN Shih-ping, SHEN Pei-te, コンプレッション型ランニングタイトの圧力が走行時の筋電図, 心電図および呼吸機能に及ぼす影響, *繊維製品消費科学*, 61 No.5 Page.381-390 (2020)
- 4) Gong Yun-Qi, Mei Shun-Qi, Stretch elasticity and garment pressure of shaping-underwear fabric, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 684 No.1 Page.012010 (6pp) (2019)
- 5) 村崎夕緋, 諸岡晴美, 渡邊敬子, 審美性評価のための三次元計測装置を用いたブラジャー着用時の背部シルエットの定量化, *繊維製品消費科学*, 60 No.3 Page.248-254 (2019)  
加藤礼菜, 坂下理穂, 諸岡晴美, 渡邊敬子, 生体負荷軽減効果からみたコンプレッション型ランニングタイトの設計—筋電図および心電図測定を中心に—, *繊維製品消費科学*, 62 No.2 Page.122-130 (2021)
- 6) SONG Jing, 田村照子, 就寝用着圧ストッキングのむくみ解消効果並びに足先血流に及ぼす影響, *日本衣服学会誌*, 60 No.2 Page.67-73 (2017)
- 7) XU Xianmin, 田村照子, 佐藤真理子, ストレッチ性下衣の静的衣服圧分布・動的衣服圧変動—着衣断面形状, 皮膚伸縮特性及び素材の強伸度特性からの考察—, *繊維製品消費科学*, 58 No.10 Page.823-832 (2017)
- 8) Horiba Yosuke, Amano Takumi, Inui Shigeru, Yamada Takato, Proposal of Method for Estimating Clothing Pressure of Tight-Fitting Garment Made from Highly Elastic Materials: Hybrid Method Using Apparel CAD and Finite Element Analysis Software, *Journal of Fiber Science and Technology*, 77 No.2 Page.76-87 (2021)
- 9) <https://free3d.com/ja/3d-models/> タイトル Free 3D model 閲覧日 2023年7月4日
- 10) 鮑力民, 高寺 政行, 篠原 昭, 一軸伸張による織物の見掛けのポアソン比測定における誤差の評価, *繊維学会誌*, 53, No.1.pp20-26 (1997) <https://doi.org/10.2115/fiber.53.20>
- 11) Sun Yiwan, Sun Yiwan, Cai Lihai, Shao Weiguang,

- Liu Wenyan,” Finite element analysis of biaxial tensile mechanical properties and burst properties of woven fabric for layflat hose, *Polymer Composites*, 43 No.11 Page.8060-8071 (2022) doi: 10.1002/pc.26947
- 12) Stolyarov O., Ershov S.,” Experimental study and finite element analysis of mechanical behavior of plain weave fabric during deformation through a cross-section observation”, *Materials Today Communications*, 31 Page.Null doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103367 (2022)
- Liu Dani, Shakibajahromi Bahareh, Dion Genevieve, Dion Genevieve, Breen David, Breen
- 13) Thompson Adam J., El Said Bassam, Ivanov Dmitry, Belnoue Jonathan P-H., Hallett Stephen R.,” High fidelity modelling of the compression behaviour of 2D woven fabrics”, *International Journal of Solids and Structures*, 154 Page.104-113 (2018) doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.06.027
- 14) David, Kotsos Antonios, “A Computational Approach to Model Interfacial Effects on the Mechanical Behavior of Knitted Textiles”, *Journal of Applied Mechanics*, 85 No.4 Page.Null (2018) doi: 10.1115/1.4039046
- 15) <https://grabcad.com/library/fabric-weave-mesh-1>, HPタイトル GrabCAD Library, 閲覧日 2023.7.14