

3D-CG を利用した異方性超弾性体シミュレーション及び 筋骨格シミュレーションによるスポーツウエアの設計手法

島名 孝次^{*1}, 中島 求^{*2}, 松田 昭博^{*3}, 大森 一寛^{*1}

A new method for designing sportswear by using three dimensional computer graphic based anisotropic hyperelastic models and musculoskeletal simulations

Takatsugu SHIMANA^{*1}, Motomu NAKASHIMA, Akihiro MATSUDA, Kazuhiro OMORI

^{*1} Research and Development Dept., Mizuno Corporation
1-12-35, Nanko-Kita, Suminoe-Ku, Osaka, 559-8510, Japan

The purpose of this study is to develop a new method for designing compression sportswear from the viewpoint of force by simulation. Applied simulation techniques are 1) skin strain simulation, 2) fabric strain simulation using the anisotropic hyperelastic model, and 3) musculoskeletal simulation. For skin strain simulations, a three dimensional computer graphic (3D-CG) polygon strain was calculated as a skin strain using a 3D-CG model that simulates the human body (CG-Human-Model). The initial strain and the strain caused by physical exercise were given to the polygon model representing the shape of the sportswear (CG-Sportswear-Model). The strain of the CG-Human-Model was given to the CG-Sportswear-Model. In-plane and out-of-plane forces resulting from the CG-Sportswear-Model are calculated using anisotropic hyperelastic models. These forces were given to the musculoskeletal simulation as the external forces, and muscle activity required for any given physical exercise (e.g. swimming motion) was calculated. Information of forces and muscle activity are very useful in designing compression sportswear. It is believed that this new method for designing compression sportswear based on simulation is a sophisticated technique because this method takes into account not only forces resulting from sportswear but also the effect of these forces on physical exercise.

Key Words : Compression sportswear; 3-dimensional computer graphics; anisotropic hyperelastic model; musculoskeletal simulation

1. 緒 言

近年、様々な種類のコンプレッション系スポーツウエア（以下コンプレッションウエア）が発売されており、日本国内を見てもその市場規模は2012年度261億円とされている⁽¹⁾。先行研究では、これらのコンプレッションウエアが運動のパフォーマンスを高める⁽²⁾⁽³⁾、運動後の疲労回復を促進する⁽⁴⁾⁽⁵⁾等の効果を有することが報告されており、これらの効果が衣服圧による循環器系への影響によるものと示唆されている。衣服圧とは衣服が身体に及ぼす皮膚面に垂直方向の力のことであり、コンプレッションウエアの機能性に影響を与える重要な設計パラメータであることから、有限要素法によって衣服圧を推定する試みが報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。一方、衣服が身体に及ぼす力は、垂直方向だけでなく接線方向にも働くが、これら垂直及び接線方向の力がキネティクスの観点から身体運動にどのような影響を及ぼすかは明らかではない。換言すると、これらの影響を知ることができれば、コンプレッションウエアの設計を高度化することが可能であると考えられる。

そこで、本研究ではコンプレッションウエアが身体に及ぼす力及びこれらの力が身体運動に及ぼす影響をシミュレーションから推定し、コンプレッションウエアを設計支援するシステムを構築することを目的とした。

^{*1} ミズノ(株)研究開発部 (〒559-8510 大阪市住之江区南港北 1-12-35)

^{*2} 正員, 東京工業大学 機械制御システム専攻 ^{*3} 正員, 筑波大学 システム情報系
E-mail: tshimana@mizuno.co.jp

なお、図1は本システムのフローチャートを示したものである⁽⁸⁾。

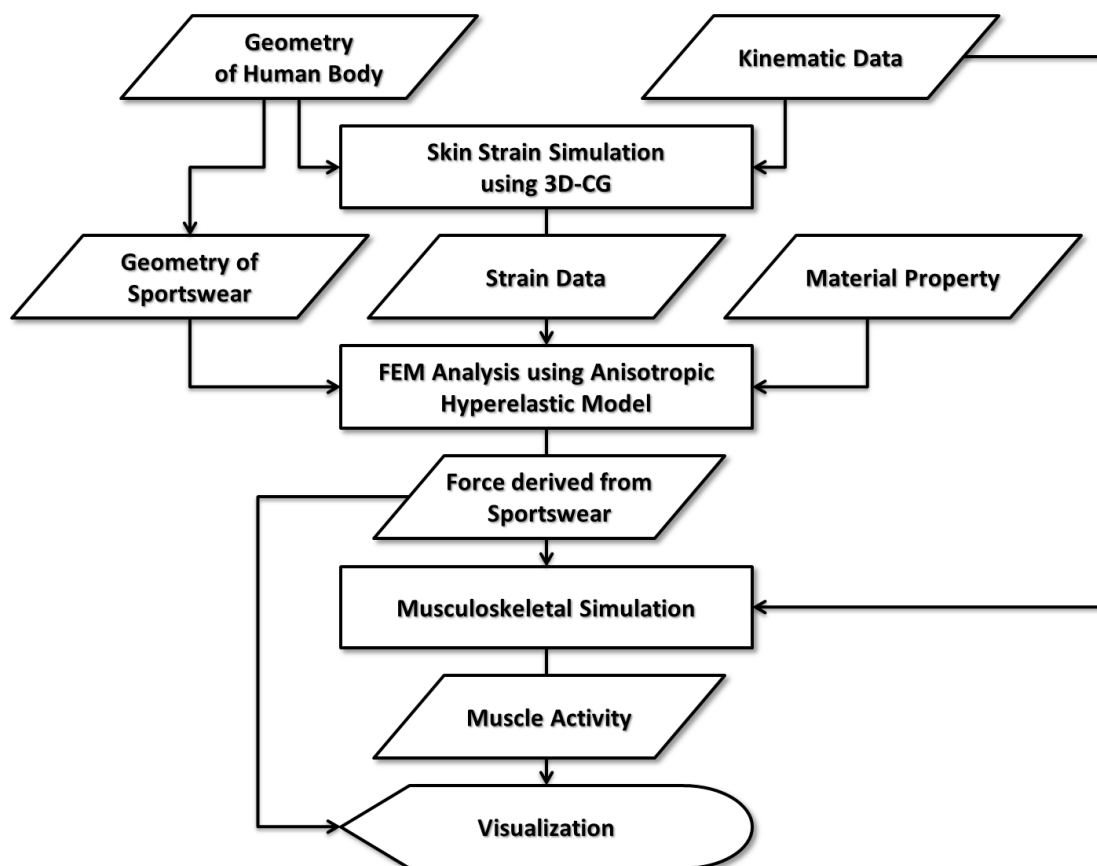


Fig. 1 Flowchart of a new method for developing compression sportswear.

2. 皮膚歪みシミュレーション

コンプレッションウェアは、生地と皮膚表面が密着しているために、運動に伴う生地の伸縮による歪みは皮膚のその影響を受け、その歪み量や方向は両者で近似していると考えられる。従って、皮膚の歪みが分かれば、生地の歪み、ひいては生地が発生する力を推定することも可能であろう。そこで、本研究ではまず皮膚歪みを求める必要がある。しかし、皮膚の歪みを実測することは非常に困難なため、本研究では島名ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が報告した3D-CGを利用した皮膚歪みシミュレーションを用いることとした。

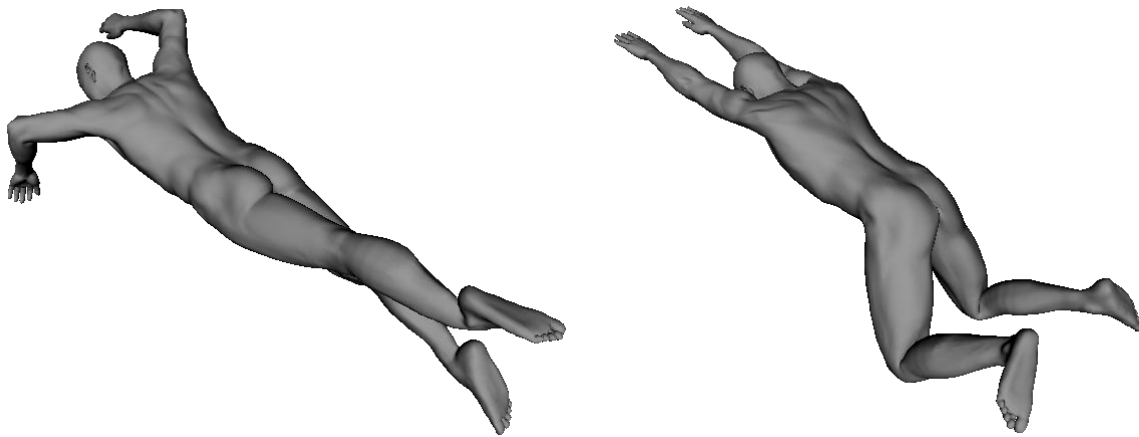
2.1 人体を模した3D-CGモデル(人体CGモデル)

本研究で使用した人体CGモデルは、商用の3D-CGソフトウェアであるAutodesk[®] MAYA[®]で作成された接点数57416、ポリゴン数63376のものであった⁽¹⁰⁾。本モデルは仮想的な骨を内部に有し、肩甲骨上腕リズムや関節運動に伴う筋のつぶれだけでなく、皮膚歪みをシミュレートするようにモデリングされている。

この人体CGモデルのアニメーションを作成するために必要な運動学データは、モーションキャプチャーシステムを利用して取得する。得られたマーカーの三次元座標データは、Autodesk[®] MotionBuilder[®]を利用して人体の各セグメントの運動に変換され、人体CGモデルのアニメーションが作成される。なお、モーションキャプチャーが困難な場合(水中運動等)は、撮影された映像を基に手動でアニメーションを作成することも可能である。図2(a)及び図2(b)は、本モデルを使用して作成されたクロール泳及び平泳ぎ中のアニメーションの一コマである。

2・2 皮膚（ポリゴン）歪みの算出

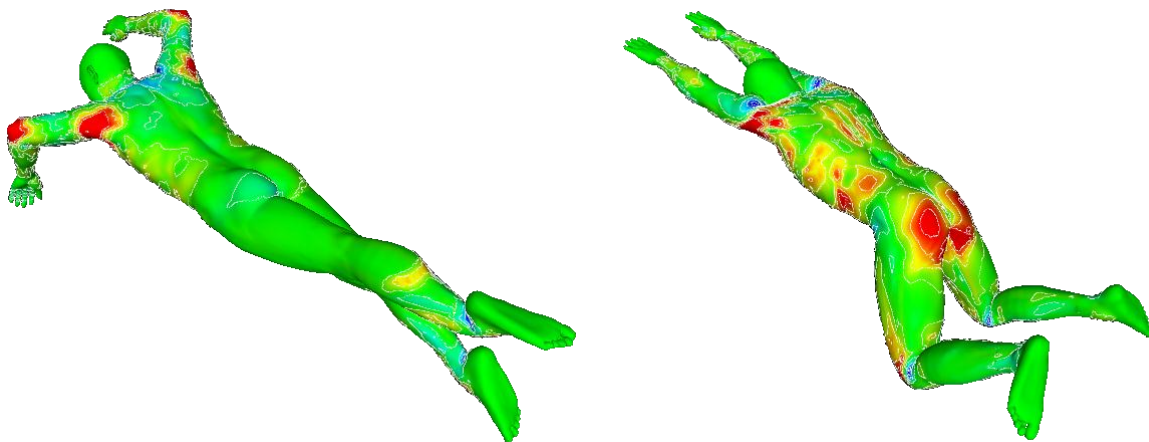
一般的に3D-CGは、3~4点の接点からなるポリゴンの集合体として表される。本シミュレーションでは、皮膚歪みをポリゴンの歪みと考え、このポリゴンを構成する接点の三次元座標を利用して算出した。即ち、ポリゴンを構成する接点の三次元座標から歪み前（解剖学的基本姿勢時）のポリゴンの座標が、歪み後（動作時）の座標となるような変換行列を求め、歪み成分を抜き出すことによって歪み量及び歪みベクトルを求めた⁽⁹⁾。このような計算をアニメーションの全フレームの全ポリゴンを対象に行い、全身の皮膚歪みデータを求めた。図3(a)及び図3(b)は、クロール泳及び平泳ぎ中の一コマにおける皮膚歪みを可視化したものである。



(a) Front crawl

(b) Breast stroke

Fig. 2 3D-CG Model used in this study



(a) Front crawl

(b) Breast stroke

Fig. 3 Example of visualized skin strain during swimming

3. 異方性超弾性体シミュレーション

ここでは、皮膚歪みによって生じる生地歪みが発生する力の求め方について概説する⁽¹¹⁾。

全身の皮膚歪みは既に求まっているので、この歪みに異方性超弾性体モデルを適用して発生する力を求めることも可能であるが、衣服に覆われていない部分の計算が無駄になることや、そもそも衣服に覆われている部分の定義が曖昧になってしまう。そこで本研究では衣服の形状を模したメッシュモデルを作成し（図4）、そのメッシュモデルを対象に異方性超弾性体モデルを適用することとした。具体的には、メッシュモデルの接点と3D-CGの接点とを予め対応付けておくことで、皮膚歪みをこの衣服メッシュモデルに適用するものとした。なお、コンプ

レッションウェアは元の寸法が人体の寸法よりも小さく、着用した時点で伸ばされて初期歪みを有している。そのため、この初期歪みについても予め衣服メッシュモデルに適用しておくこととした。

歪みから応力を推定するための異方性超弾性体モデルには、Nagaoka et al.⁽¹²⁾ が報告したモデルを利用した。このモデルは、Tanabe et al.⁽¹³⁾ によってコンプレッションウェア（水着）への適用性が示されている。図 5(a)及び図 5(b)は、クロール泳及び平泳ぎ中の水着に生じるミーゼス応力を可視化したものである。

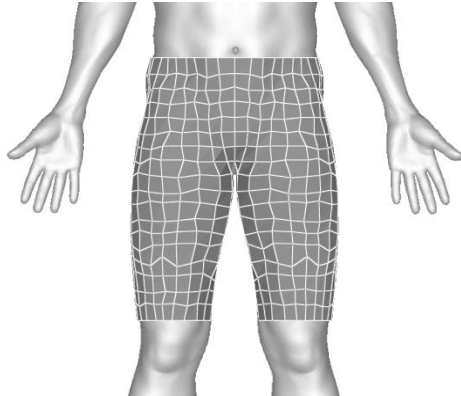
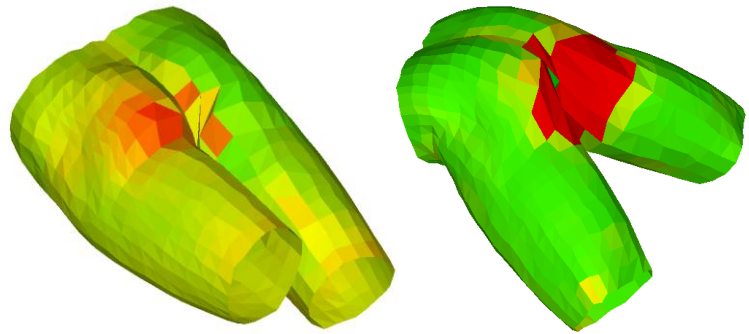


Fig. 4 The mesh model representing man's swimwear



(a)Front crawl

(b)Breast stroke

Fig. 5 Distribution of von Mises stress during swimming

本シミュレーションでは、モデルへの入力パラメータを変えることで、異なる特性の生地を衣服メッシュモデルに適用することが可能である。更に、設計コンセプトに応じて、メッシュごとに与えるパラメータを変えることで、異なる特性を持つ複数の生地の組み合わせを再現することも可能である。このように異なる境界条件下で求めた結果を比較することで、設計の事前検証が可能となり、コンプレッションウェアの設計がより効率的、効果的に行えるものと考えられる。

3. 筋骨格シミュレーション

一般的に筋骨格シミュレーションは、逆動力学的に求めた関節トルクから最適化計算によって筋出力を推定する手法で、SIMM[®] (MusculoGraphics[®], Inc.), AnyBody Modelling System[®] (AnyBody Technology[®], Inc.) or OpenSIM (NCSSR)などのソフトウェアが実用化されている。

その入力には身体の運動学的データ及び身体に作用する外力データである。外力としては、床反力や流体力といったものが一般的であるが、本研究においては前節で求まるコンプレッションウェア由来の力についても入力として扱う⁽¹⁴⁾。このウェアが発生する力は、衣服メッシュモデルの各接点に働く荷重として与えられる。そこで、この荷重と接点-関節中心間距離との積から関節トルクを求め、筋骨格シミュレーションに与えることとした。

図 6 に解析結果の例を示す。これら図 6(a)及び(b)は、それぞれクロール泳及び平泳ぎの 1 ストローク中に発揮した股関節運動に関連した筋の筋力平均値である。ここで算出された筋力は、コンプレッションウェアが発生した力の影響も考慮された結果である。このような筋力や筋パワーといった最終的な解析結果は、設計の有用な評価パラメータとして使用することが可能であり、コンプレッションウェアの設計をより高度化するものと考えられる。

4. 結 語

本研究では、3D-CG を利用した皮膚歪みシミュレーション、異方性超弾性体シミュレーション及び筋骨格シミュレーションからなる新しいコンプレッションウェアの設計支援手法について述べた。これまで、コンプレッションウェアは、定性的な過去の経験に基づいて設計されることが多く、開発が完了するまでに場合によっては数多くのサンプルを作成する必要があった。しかし本研究で示した設計支援方法によって、定量的で効果的、効率的な設計が可能になると考えられる。

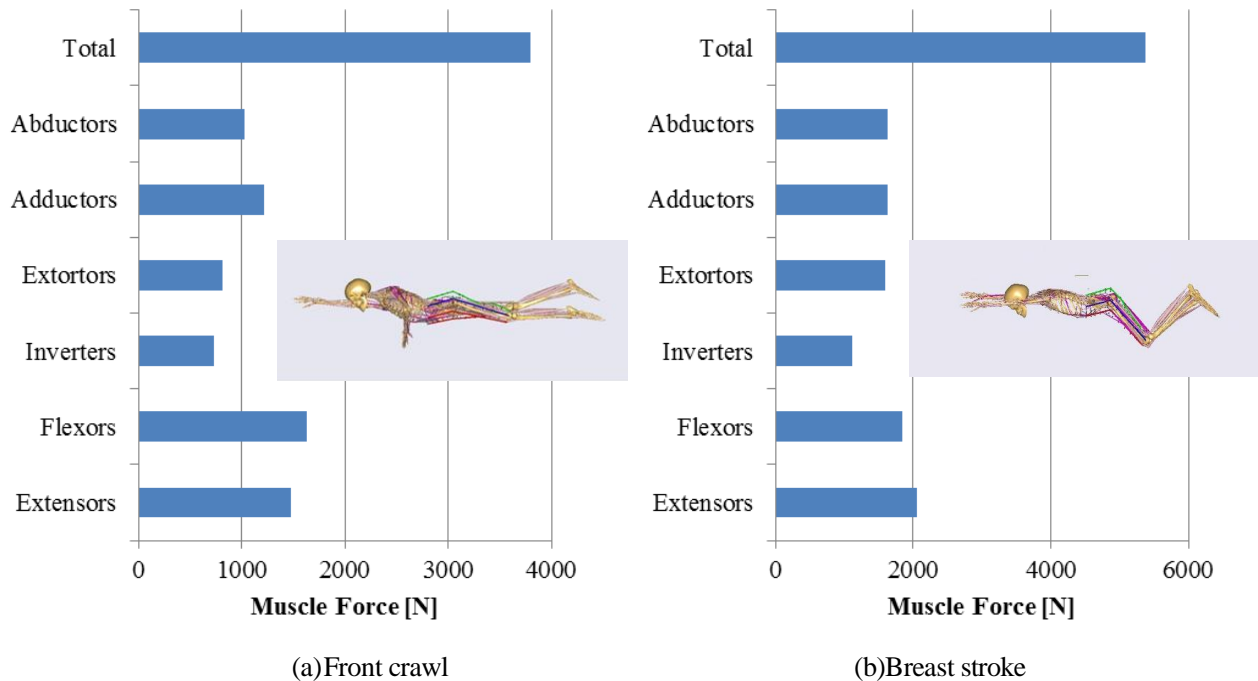


Fig.6 Example of analysis: average muscle force of hip joint muscles in swimming

文 献

- (1) (株) 矢野経済研究所, “2013 年度版 スポーツアパレル市場動向調査”, 2012.
- (2) Doan B. K., Kwon Y. H., Newton R. U., Shim J, Poppe E. M., Rogers R. A., Bolt L. R., Robertson M, and Kraemer W. J., “Evaluation of a lower-body compression garment”, *Journal of Sports Science*, Vol. 21(2003), pp.601–608.
- (3) Kemmler W., vonStengel S., Köckritz C., Mayhew J., Wassermann A., and Zapf J., “Effect of compression stockings on running performance in men runners”, *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol. 23, No. 1(2009), pp. 101–105.
- (4) Duffield R, and Portus M., “Comparison of three types of full-body compression garments on throwing and repeat-sprint performance in cricket players”, *British Journal of Sports Medicine*, Vol. 41(2007), pp. 409–414.
- (5) Kraemer W. J., Flanagan S. D., Comstock B. A., Fragala M. S., Earp J. E., Dunn-Lewis C., Ho J-Y, Thomas G. A., Solomon-Hill G, Penwell Z. R., Powell M. D., Wolf M. R., Volek J. S., Denegar C. R., and Maresh C. M., “Effects of a whole body compression garment on markers of recovery after a heavy resistance workout in men and women”, *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol. 24, No. 3(2010), pp. 804–814.
- (6) Abbas M. S., Mansour R., and Zeynab S., “The Analytical Study of garment Pressure on the Human Body Using Finite Elements”, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 16, No. 3(2008), pp. 69-73.
- (7) Wang J. M., Luo X. N., Li Y., Dai X. Q. and You F., “The Application of the Volumetric Subdivision Scheme in the Simulation of Elastic Human Body Deformation and Garment Pressure”, *Textile Research Journal*, Vol. 75(2005), pp. 591-597.
- (8) Shimana T., Nakashima M., Matsuda A., Omori K., “A new method for designing sportswear by using three dimensional computer graphic based anisotropic hyperelastic models and musculoskeletal simulation”, *Procedia Engineering*, Vol. 60 (2013), pp. 331-336
- (9) 島名孝次, 辻中克弥, 渡辺良信, “3D-CG 上のポリゴン歪み解析手法の確立と皮膚歪みシミュレーションへの適用”, ジョイントシンポジウム講演論文集、No. 06 (2006), pp. 60-63.
- (10) 島名孝次, 辻中克弥, 渡辺良信, “3D-CG を用いた皮膚歪みシミュレーションのスポーツウエアへの適用”, ジョイントシンポジウム講演論文集、No. 07 (2007), pp. 307-310.
- (11) Matsuda A., Tanabe H., Nagaoka T., Nakashima M., Shimana T., Omori K., “3D-CG based stress calculation of competitive swimwear using anisotropic hyperelastic model”, *Procedia Engineering*, Vol. 60 (2013), pp. 349-354

- (12) Nagaoka T., Matsuda A., Shimana T., and Omori K., “A Proposal of Material Modeling for Swimwear Considering Anisotropy and Viscosity”, *Procedia Engineering*, Vol. 34(2012), pp. 700–705.
- (13) Tanabe H., Matsuda A., Shimana T., and Omori K.,” Numerical analysis of competitive swimwear using finite element method”, *Procedia Engineering*, Vol. 34(2012), pp. 718–723.
- (14) Nakashima M., Hasegawa T., Matsuda A., Shimana T., Omori K., “3D-CG based musculoskeletal simulation for a swimmer wearing competitive swimwear”, *Procedia Engineering*, Vol. 60 (2013), pp. 367-372