

## 3D-CG モデルを用いた競泳用水着の異方性超弾性モデルによる応力解析

田中 宏和<sup>\*1</sup>, 松田 昭博<sup>\*2</sup>, 中島 求<sup>\*3</sup>, 島名 孝次<sup>\*4</sup>

### 3D-CG Based Stress Calculation of Competitive Swimwear Using Anisotropic Hyperelastic Model

Hirokazu TANAKA<sup>\*1</sup>, Akihiro MATSUDA<sup>\*2</sup>,  
Motomu NAKASHIMA<sup>\*3</sup> and Takatsugu SHIMANA<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> Tsukuba University, Department of Engineering Mechanics and Energy  
Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

A new design method for designing competitive swimsuits using 3-dimensional stress calculation was investigated in this paper. An anisotropic hyperelastic modeling of swimwear fabric was developed from the results of tensile loading tests. 3-dimensional stress distributions of swimwear in swimming motions were calculated by the anisotropic hyperelastic model. The displacement fields of 3D-CG human model which reproduce swimming motion of human body were applied to stress calculation. For the material modeling, the uniaxial cyclic tensile loading tests were conducted to obtain the mechanical characteristics of competitive swimsuits. From loading test results, the mechanical characteristics of swimwear fabrics show anisotropy and the stiffness of the fabric shows hardening along with stretching. The cyclic tensile loading test results show stiffness reduction which depended on the maximum deformation. To take the anisotropy and stress reduction into account for the material modeling, a stress softening model for anisotropic hyperelastic model using stiffness ratio of warp or weft was proposed. In this paper, 3-dimensional stress distributions of swimwear were calculated by the proposed anisotropic hyperelastic model. A polygonal model of the swimwear was prepared and deformation of swimwear was adapted to the skin of 3D-CG human model in swimming motions. From the calculated results, stress distributions were possible to be visualized on the 3D-CG swimwear model.

**Key Words** : Swimwear, Anisotropic, Stress Softening, 3D-CG, Numerical Simulation, Stress Calculation

## 1. 緒 言

現在の競泳用水着は、高い伸張性を有した繊維で作られており、ゴム材料のような弾性挙動を示し、身体を強く締め付けることができる。それにより身体の振動を減らすことができる。また、身体の形状を整えることで形状抵抗を減少させることができるなどの理由から、流体抵抗が軽減され記録の短縮が可能になると考えられている。さらに水着素材は伸長方向によって剛性が変化する異方性を示す。そのため、水着の設計において、その素材の張力や異方性を適切に配置することにより、泳ぐ姿勢をサポートしつつ、水泳の挙動に対して柔軟に伸縮することが可能であると考えられる。しかし、競泳用水着に用いられる織物素材は繰り返し変形の影響を受け、1回目の引張時と2回目以降の引張時では剛性が低下することがわかっている。そして、その剛性低下の割合は経験した最大伸びに応じて変化する。そのため、水着素材を選択し、異方性と軟化特性を考慮して水着素材を配置することは容易ではなく、これまでは、サンプルの試作と水泳選手からの評価を繰り返して設計されているのが現状である。

<sup>\*1</sup> 学生員, 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>\*2</sup> 正員, 筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>\*3</sup> 正員, 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械制御システム専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>\*4</sup> 非正員, ミズノ株式会社 (〒559-8510 大阪府住之江区南港北 1-12-35)

E-mail: s1320940@u.tsukuba.ac.jp

本研究の目的は、数値シミュレーションを用いて水泳動作中の競泳用水着と人体の相互作用を得ることで、競泳用水着の高度な設計手法を開発することである。そのために、軟化特性を考慮した異方性超弾性モデルを用いた水着の材料モデルを作成し、実際の泳者をモデリングした 3D-CG の変位場を用いて着用時および競技中に競泳用水着に生じる応力を評価した。材料モデルの作成においては、一軸繰返し引張試験を実施し、競泳用水着の力学特性を評価した。また、水着の力学特性を再現するために、異方性超弾性モデルを導入した<sup>(1)</sup>。

3D-CG モデルを用いた応力評価においては、競泳用水着のサブメッシュに対して CG モデルの変位場を用いて、水着に生じる応力等々を評価する数値シミュレーションを行い、競泳用水着の設計の高度化への適用性を検討した<sup>(2)</sup>。

## 2. 異方性超弾性モデルと材料試験

### 2.1 異方性超弾性モデル

水着素材の異方性を考慮した力学モデルとして、異方性超弾性モデルを適用した。異方性超弾性モデルは材料の力学特性をひずみエネルギー関数  $W$  によって再現する。ひずみエネルギー関数  $W$  を右 Cauchy-Green テンソル  $\mathbf{C}$  で偏微分することで、2nd Piola-Kirchhoff 応力テンソル  $\mathbf{S}$  が以下のように得られる。

$$\mathbf{S} = 2 \frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}} \quad (1)$$

ここで、右 Cauchy-Green テンソル  $\mathbf{C}$  は変形勾配テンソル  $\mathbf{F}$  により以下のように表される。

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} \quad (2)$$

なお、変形勾配テンソル  $\mathbf{F}$  は時刻  $t_0 = 0$  での基準配置における物質点  $\mathbf{X}$  と、現時刻  $t$  での現在配置における物質点  $\mathbf{x}$  により定義される。

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} \quad (3)$$

また、ひずみエネルギー関数  $W$  は以下に示す右 Cauchy-Green テンソル  $\mathbf{C}$  の主不変量  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  により表すことが可能である。

$$I_1 = \text{tr} \mathbf{C} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \{ (\text{tr} \mathbf{C})^2 - \text{tr}(\mathbf{C}^2) \} \quad (5)$$

$$I_3 = \det \mathbf{C} \quad (6)$$

異方性を考慮するために、上記の主不変量に加えて、構造テンソル  $\mathbf{M}^{(a)}$  を導入した不変量を追加する。構造テンソル  $\mathbf{M}^{(a)}$  は、基準配置における繊維方向を表す単位ベクトル  $\mathbf{n}^{(a)}$  によって定義される。

$$\mathbf{M}^{(a)} = \mathbf{n}^{(a)} \otimes \mathbf{n}^{(a)} \quad (7)$$

ここで、上式中の  $a$  は繊維の種類を表し、本研究では平織り織物を扱うために  $a=1,2$  とした。また、右 Cauchy-Green テンソル  $\mathbf{C}$  と構造テンソル  $\mathbf{M}^{(a)}$  によって異方性不変量  $J_4^{(a)}$ ,  $K_1^{(a)}$  は以下のように定義される。

$$J_4^{(a)} = \mathbf{C} : \mathbf{M}^{(a)} \quad (8)$$

$$K_1^{(a)} = (I_3 \mathbf{C}^{-1}) : \mathbf{M}^{(a)} \quad (9)$$

本研究では、ひずみエネルギー関数  $W$  を等方性成分  $W_{iso}$  と異方性成分  $W_{ani}$  の和として表現した。

$$W = W_{iso} + W_{ani} \quad (10)$$

等方性成分  $W_{iso}$  には、自然状態条件が扱いやすく、材料定数の総数を抑えられる Mooney-Rivlin モデルを用いた<sup>(3)</sup>。

$$W_{iso} = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + p(J - 1) \quad (11)$$

ここで、 $\bar{I}_1$ 、 $\bar{I}_2$  は右 Cauchy-Green テンソル  $\mathbf{C}$  を修正右 Cauchy-Green テンソル  $\bar{\mathbf{C}}$  に置き換え、体積変形を除去した修正不変量である。また、 $J$  は体積変化率、 $C_1$ 、 $C_2$  は材料定数、 $p$  は静水圧を表す。

$$\bar{I}_1 = \text{tr} \bar{\mathbf{C}} = \text{tr}(I_3^{-1/3} \mathbf{C}) \quad (12)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{2} \{(\text{tr} \bar{\mathbf{C}})^2 - \text{tr}(\bar{\mathbf{C}}^2)\} = \frac{1}{2} \{(\text{tr}(I_3^{-1/3} \mathbf{C}))^2 - \text{tr}(I_3^{-2/3} \mathbf{C}^2)\} \quad (13)$$

$$J = \det \mathbf{F} \quad (14)$$

次に、異方性成分  $W_{ani}$  には、繊維の伸長方向とせん断方向の剛性をそれぞれ独立に調整可能である、次式で表される異方性超弾性モデルのひずみエネルギー関数を導入した<sup>(4)</sup>。

$$W_{ani} = \frac{1}{4} \left[ \frac{C_J^{(1)}}{d_J^{(1)}} \{ (J_4^{(1)})^{d_J^{(1)}} - 1 \} + \frac{C_K^{(1)}}{d_K^{(1)}} \{ (K_1^{(1)})^{d_K^{(1)}} - 1 \} \right] - \frac{1}{4} \{ (C_J^{(1)} - C_K^{(1)})(J_4^{(1)} - 1) + C_K^{(1)} \ln(J^2) \} \\ + \frac{1}{4} \left[ \frac{C_J^{(2)}}{d_J^{(2)}} \{ (J_4^{(2)})^{d_J^{(2)}} - 1 \} + \frac{C_K^{(2)}}{d_K^{(2)}} \{ (K_1^{(2)})^{d_K^{(2)}} - 1 \} \right] - \frac{1}{4} \{ (C_J^{(2)} - C_K^{(2)})(J_4^{(2)} - 1) + C_K^{(2)} \ln(J^2) \} \quad (15)$$

ここで、 $C_J^{(1)}$ 、 $C_K^{(1)}$ 、 $d_J^{(1)}$ 、 $d_K^{(1)}$ 、 $C_J^{(2)}$ 、 $C_K^{(2)}$ 、 $d_J^{(2)}$ 、 $d_K^{(2)}$  は材料定数である。

## 2・2 軟化関数の導入

水着素材における剛性低下の割合は、織られている縦糸、横糸が経験した伸びの最大値に依存して変化する。そのため、縦糸、横糸の伸長を表す不変量  $I_4^{(1)}$ 、 $I_4^{(2)}$  をそれぞれ用いて、縦糸、横糸が経験した伸長の最大値を  $I_{4 \max}^{(1)}$ 、 $I_{4 \max}^{(2)}$  と定義した。この  $I_{4 \max}^{(1)}$ 、 $I_{4 \max}^{(2)}$  を用いて剛性比の低下を表す軟化関数  $S_f^{(1)}$ 、 $S_f^{(2)}$  を以下のように提案した。

$$S_f^{(1)}(I_{4 \max}^{(1)}) = 1 - a_1 \left[ 1 - \exp \left\{ -\gamma_1 (I_{4 \max}^{(1)} - 1) \right\} \right] \quad (16)$$

$$S_f^{(2)}(I_{4 \max}^{(2)}) = 1 - a_2 \left[ 1 - \exp \left\{ -\gamma_2 (I_{4 \max}^{(2)} - 1) \right\} \right]$$

ここで $a_1, a_2, \gamma_1, \gamma_2$ は材料定数であり、それぞれ無次元数である。軟化関数 $S_f^{(1)}, S_f^{(2)}$ は縦糸、横糸のそれぞれのポテンシャル低下を表している。そのため、2nd-Piola-Kirchhoff 応力テンソルの異方性成分 $\mathbf{S}_{ani}^{(1)}, \mathbf{S}_{ani}^{(2)}$ のそれぞれに軟化関数 $S_f^{(1)}, S_f^{(2)}$ を導入することで、軟化特性を考慮した縦糸、横糸それぞれに関する2nd-Piola-Kirchhoff 応力テンソル $\mathbf{S}'_{ani}^{(1)}, \mathbf{S}'_{ani}^{(2)}$ が導かれる。

$$\begin{aligned}\mathbf{S}'_{ani}{}^{(1)} &= 2 \frac{\partial W_{ani}^{(1)}(\mathbf{C}, \lambda_{\max})}{\partial \mathbf{C}} \\ &= 2S_f^{(1)}(I_4^{(1)}_{\max}) \frac{\partial W_{ani}^{(1)}(\mathbf{C})^\circ}{\partial \mathbf{C}} + 2 \frac{\partial S_f^{(1)}(I_4^{(1)}_{\max})}{\partial \mathbf{C}} W_{ani}^{(1)}(\mathbf{C})^\circ \\ \mathbf{S}'_{ani}{}^{(2)} &= 2 \frac{\partial W_{ani}^{(2)}(\mathbf{C}, \lambda_{\max})}{\partial \mathbf{C}} \\ &= 2S_f^{(2)}(I_4^{(2)}_{\max}) \frac{\partial W_{ani}^{(2)}(\mathbf{C})^\circ}{\partial \mathbf{C}} + 2 \frac{\partial S_f^{(2)}(I_4^{(2)}_{\max})}{\partial \mathbf{C}} W_{ani}^{(2)}(\mathbf{C})^\circ\end{aligned}\tag{17}$$

$W_{ani}^{(1)}(\mathbf{C}, \lambda_{\max}), W_{ani}^{(2)}(\mathbf{C}, \lambda_{\max})$ は最大伸び $\lambda_{\max}$ を経験したときのひずみエネルギー関数の異方性成分である。 $W_{ani}^{(1)}(\mathbf{C})^\circ, W_{ani}^{(2)}(\mathbf{C})^\circ$ は軟化特性を排除したひずみエネルギー関数の異方性成分である。軟化特性の影響の有無について図1に示す。図1に示す通り、未載荷の状態から単調に引張を与えた場合、経験した最大伸びは更新され、軟化関数 $S_f^{(1)}, S_f^{(2)}$ の値は小さくなる。そのため、軟化特性の影響を取り除いた応力は単調引張試験から得られる応力よりも実際には高くなる。

### 2・3 一軸繰返し引張試験

水着素材の力学特性を再現するため一軸繰返し引張試験を行った。試験片の材料はナイロン73%、ポリウレタン27%から成る織物素材を用いた。試験片の概要を図2に示す。試験片の寸法は図2に示すように幅30mm、引張長さ120mm、厚さ0.2mmである。異方性について考慮するため縦糸と引張方向が成す角度を繊維配向角 $\theta$ として設定し、繊維配向角 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ となる7種類の試験片を用いた。図3は試験中の試験片と試験に用いた治具について示す。

設定した最大伸び $\lambda_{\max}$ に対し5回連続で引張試験を実施した。その設定した最大伸び $\lambda_{\max}$ は伸び1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8とした。なお、5回の繰返し引張後に最大伸びを0.1ずつ大きくした。また、変形速度は1mm/secとした。

図4には、繊維配向角が $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ で、最大伸び $\lambda_{\max}$ が1.4, 1.6, 1.8とした2回目の試験結果と軟化関数を導入した異方性超弾性の理論解を示す。この図4より、提案した構成式が試験結果を精度良く再現できることを示した。

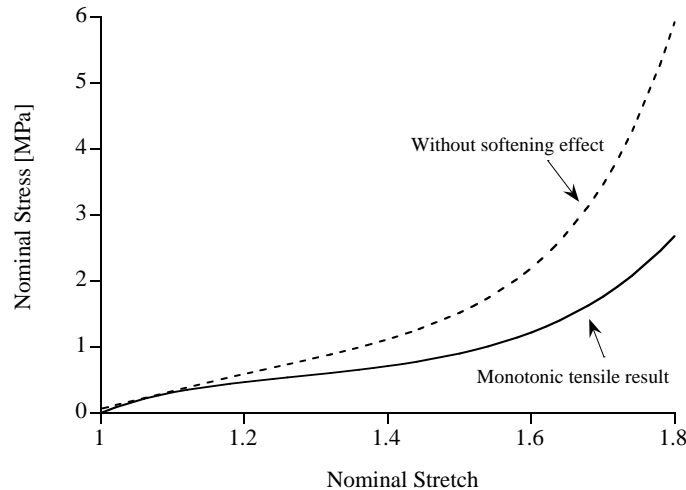


Fig.1 Effect of the stress-softening

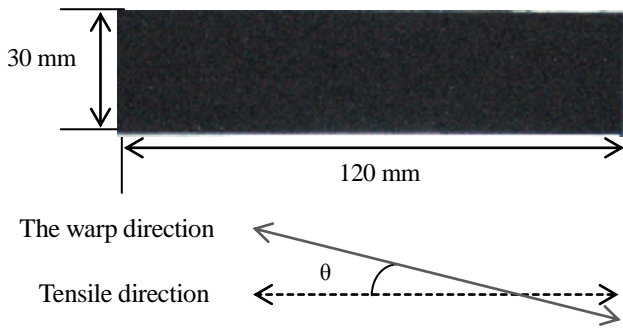


Fig.2 Specimen and fiber  $\theta$  in cyclic loading test

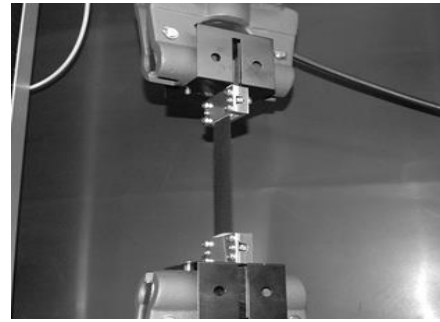


Fig.3 Fixture and specimen of cyclic loading tests

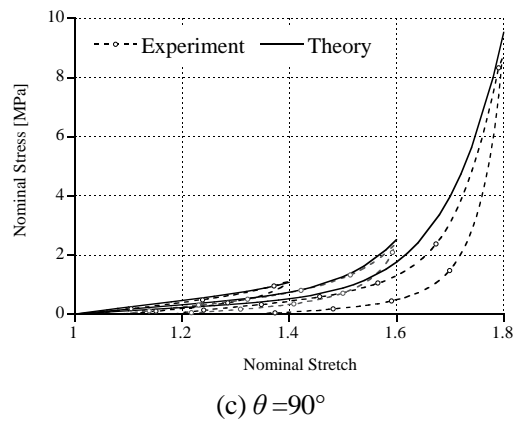
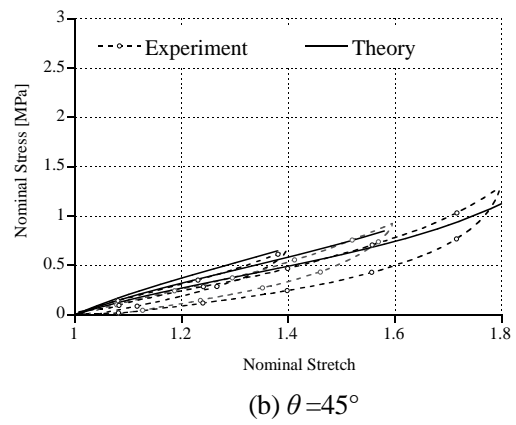
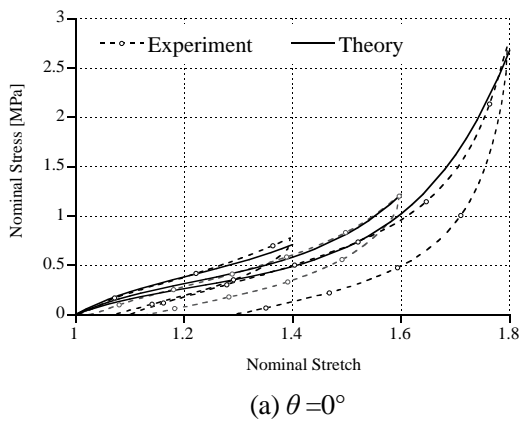


Fig. 4. Comparison of cyclic loading test and theoretical calculation by nominal stress

### 3. 競泳用水着の3次元応力解析

人体の動作と皮膚の伸びをモデリングした三次元コンピューターグラフィックス (3D-CG) モデル<sup>(2)</sup>の変位場を用いて、競泳用水着を着用した場合の応力等を算出することによって、競泳用水着の設計法を創出することについて検討した。応力等が得られることにより、水泳動作時の水着による力が可視化され、水着と人体の相互作用を評価することができる。使用した 3D-CG モデルは、人間の骨格と水泳時の皮膚の伸びを再現しているもので、図 5 に示す CG モデルは、57416 節点、63376 要素で人体を構成している。

また、本研究では新たに、CG モデルの節点情報を基に図 6 に示す水着のサブメッシュを作成した。水着のメッシュは、680 節点、481 要素であり、計算コストを低く抑えることができる。

今回用いた CG モデルはクロール、背泳、平泳ぎ、バタフライの 4 泳法の 1 サイクルの動作を模擬している。一例としてクロールの 1 コマを図 7 に示す。また、クロールにおける水着のメッシュを図 8 に示す。

本研究では、水着と皮膚は密着していると仮定し、皮膚の伸びは、水着の伸びと同等であると定義した。そこで、水着のメッシュの各要素の変位場から変形勾配テンソル  $\mathbf{F}$  を計算し、2nd Piola-Kirchhoff 応力テンソル  $\mathbf{S}$  を算出した。なお、着用した際に生じる初期伸びは幅方向に 1.5、体長方向に 1.2 を与えた。結果の一例を図 9(a) に示す。図 9(a) に示した結果は、Cauchy 応力  $\mathbf{T}$  から算出したミーゼス応力  $\sigma_{VM}$  である。Cauchy 応力  $\mathbf{T}$  とミーゼス応力  $\sigma_{VM}$  は、以下の式で定義される。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{J} \mathbf{F} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{F}^T \quad (18)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yx}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2 + \sigma_{zy}^2) \}} \quad (19)$$

図 9(a) のミーゼス応力分布では、赤い部分に最も大きな変形が生じ、大きな応力が発生している。また、青い部分には応力が発生していないことを表している。図 9(b) に示す体長方向の応力の最大値から、右足と左足のピークが交互に表れ、バタ足による水着の応力の上昇が見られた。また、このクロールの CG モデルは、左腕で掻く際に息継ぎをするため右半分の水着の応力が大きく生じている。以上のシミュレーションを競泳用水着の設計に導入することで、水泳動作時の水着素材と人体の相互作用が分かるようになり、より高度な競泳用水着の設計を行うことができる。

### 4. 結言

本研究では、競泳用水着の力学特性を再現できる異方性超弾性モデルと 3D-CG の変位場を用いた数値シミュレーションによる競泳用水着の設計の高度化を検討した。経験した引張変形に応じたそれぞれの剛性と初期の剛性を比に表し、その比を最大伸びの関数で表す軟化関数を提案した。さらに、提案した軟化関数を異方性超弾性モデルに組み込むことで、水着素材の異方性と軟化特性を考慮した超弾性モデルを提案した。一軸繰返し引張試験を実施し、試験結果をもとに材料定数を同定し、理論解と実験値の比較を行なうことで提案モデルの有用性について検討した。さらに 3D-CG モデルの変位場を用いた数値シミュレーションを行った。その結果、解析上で水泳動作中の水着の応力を可視化することができ、水着と人体の相互作用が得られ、提案した設計手法の適用性を示した。

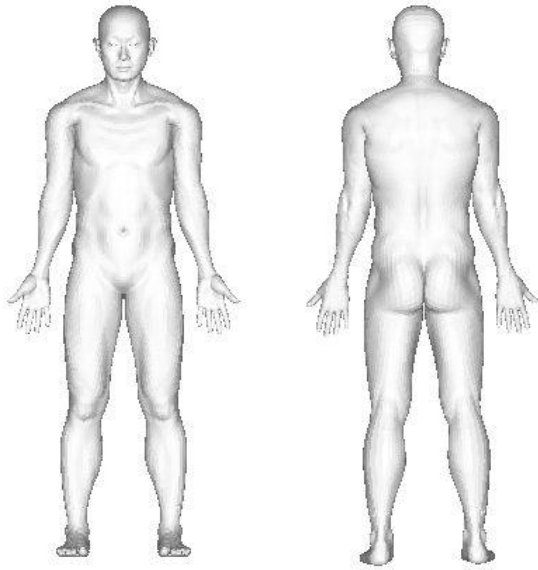


Fig.5 3D-CG model

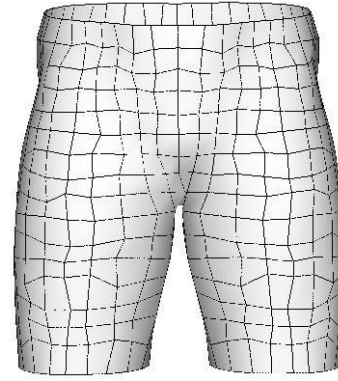


Fig.6 Mesh of swimsuit

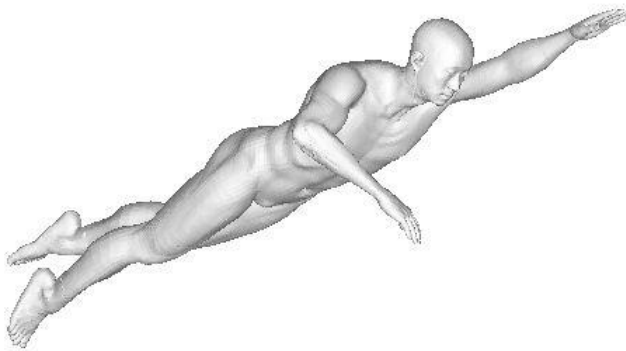


Fig.7 3D-CG of crawl

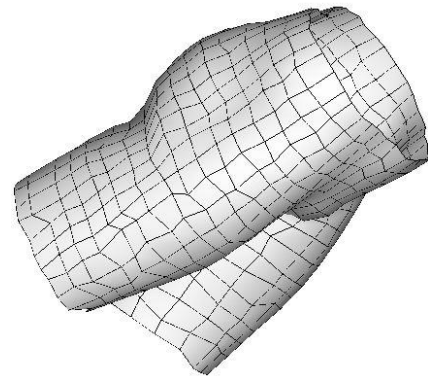
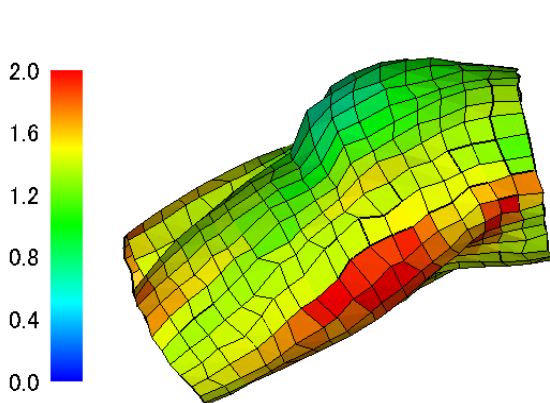
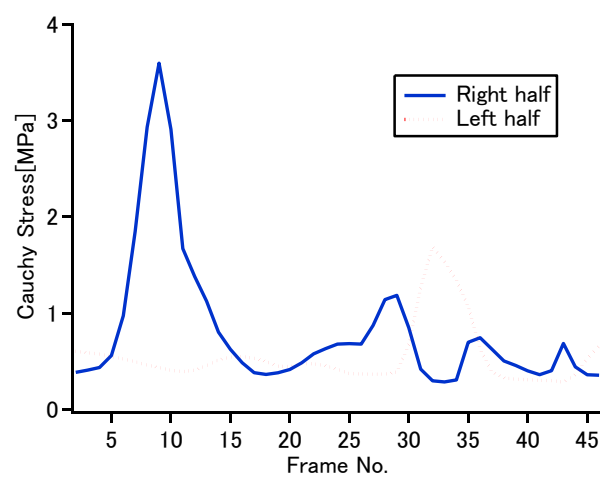


Fig.8 Mesh of crawl



(a) Snapshot of the Mises stress distribution of polygonal swimwear model in crawl



(b) Relationships between maximum Cauchy stress and frame number of 3D-CG calculation

Fig. 9 Result of stress calculation of competitive swimwear

## 文 献

- (1) 永岡丈弥, 田邊宙夢, 島名孝次, 大森一寛, “松田昭博繰返し変形を考慮した水着素材の材料特性に関する研究”, 筑波大学大学院, 2013
- (2) 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.06-35, pp.60-63, 2006.
- (3) Rivlin, R. S., and Saunders, D. W., “Large elastic deformations of isotropic materials VII. Experiments on the deformation of rubber”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 243, No. 865 (1951), pp. 251-288.
- (4) 浅井光輝, 木村嘉之, 園田佳巨, 西本安志, 西野好生, “異方性粘性・超弾性体による織布強化ゴムの構成式モデリング”, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.194-205, 2010.
- (5) 田邊宙夢, 永岡丈弥, 島名孝次, 大森一寛, 松田昭博, “水着素材の異方性を考慮した力学モデルを用いた競泳水着と人体の相互作用シミュレーションに関する研究”, 筑波大学大学院, 2013
- (6) 青木美枝, 吉澤正尹, 三澤利博, 浜田敏彦, “スポーツウェアによる皮膚圧迫と運動パフォーマンスに関する基礎的研究”, *デサントスポーツ科学*, Vol.17, pp.296-305, 1996.
- (7) Holzapfel, G. A., and Gasser, T. C., “A viscoelastic model for fiber-reinforced composites at finite strains: Continuum basis, computational aspects and applications”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.190 (2001), pp.4379-4403.
- (8) Schroder, J., and Neff, P., “Invariant formulation of hyperelastic transverse isotropy based on polyconvex free energy functions”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.40 (2003), pp.401-445.
- (9) Gornet, L., Markmann, G., Desmorat, R., and Charrier, P., “A new isotropic hyperelastic strain energy function in terms of invariants and its derivation into a pseudo-elastic model for Mullins effect”, *Constitutive Models for Rubber VII* (2011), pp. 265-272, ISBN