

# 生体軟組織の圧迫変形に関する有限要素解析

– 超弾性設定が乳房変形に与える影響 –

## FINITE ELEMENT ANALYSES FOR COMPRESSIVE DEFORMATIONS OF SOFT BIOMATERIALS

### – EFFECT OF HYPERELASTIC CONFIGURATIONS ON BREAST DEFORMATION –

村瀬晃平<sup>1)</sup>

Kohei MURASE

1) 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 E-mail: murase@mech.nagoya-u.ac.jp)

In order to reveal the relationship between the deformed shape of the brassiere-wearing breast and the internal tissue distributions of the breast, the finite element (FE) simulations were applied to the simply modified breast model. Mammary tissues were assumed as two kinds of material constructions, elastic and Neo-Hookean hyperelastic model in order to reproduce the MRI experimental results. The lift-up simulations of the brassiere cup were performed by changing the ratios of the mammary glandular tissues in the breast under gravity loading. The FE results showed that the deformation at the upper breast was increased, as the ratio of the mammary glandular was higher. The Neo-Hookean model had better agreements with the MRI deformation than elastic ones. These results indicate not only of the mammary glandular ratio but also of the material construction of the human soft tissues are important for more cosmetic wearing designs of brassieres.

**Key Words** : Hyperelastic, Neo-Hookean, Brassiere-wearing, Mammary glandular

#### 1. 緒言

血管や皮下脂肪をはじめとする生体組織の多くは軟材料から構成されている。筋肉を除くこれらの多くは荷重を支持する骨格と直接結合しておらず、姿勢変化による変形が大きい。とくに乳房や臀部は、日常生活において着衣によって長時間拘束されているうえ、美容的な観点から強い圧迫締め付けを受けることが多い。

とくに女性用ブラジャーには下垂しやすい乳房を支持し、上着など外部刺激から守る機能的役割を持つ。現在では単純にアンダーバストと乳頭を通過するバスト周長の差からブラジャーを選択する、カップサイズ方式が広く用いられている。しかしながら乳房のサイズ、乳腺占有量、分布様式、硬さの違いの個体差が大きいだけでなく、授乳期前後や加齢による時間的影響も大きい<sup>1)</sup>。このため被服衛生分野では従来から、カップサイズの違いは十分なブラ

ジャー選択指標ではないとの指摘が報告されている<sup>2)</sup>。

筆者らはこれまでに、乳房サイズがほぼ同じ被験者女性3名(70Cカップ2名, 70Eカップ1名)について、適正サイズのブラジャーによる乳房の支持機能について縦型MRI装置により計測している<sup>3)</sup>。Fig.1は、ブラジャー未着用の乳房と、乳房下辺(バージスライン)に沿った樹脂ワイヤーが乳房全体を持ち上げる、「4分の3カップ型」と呼ばれる汎用市販ブラジャーを着用した乳房のMRI画像を三次元再構築したものである。本図でも認められるように、乳腺量の少ない被験者の乳房ほど、ブラジャー着用時の乳房上部表面全体に認められる隆起が少ない。このことから乳房の変形と乳腺量にはなんらかの定性的な関連があると考えられる。

いっぽう、実際の着用では女性の体型、ブラジャーの取り付け方が千差万別であり、個体差の大きな乳房が正しく装着された状態を判別するのは非常に難しい。このため、ブラジャーが正しく装着された状態で、乳房の整容効果と乳腺量の関係を明らかにするためには、個体差の大きな乳

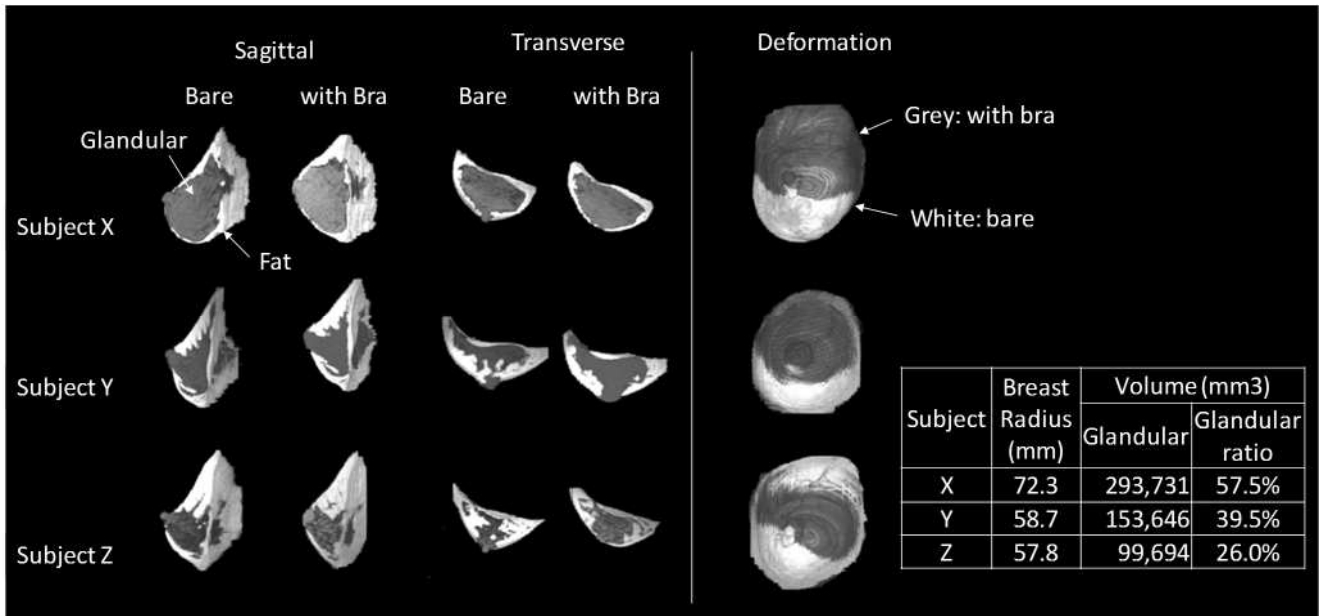


Fig. 1 MR image reconstruction of bare and brassiere-wearing breasts.

乳房の三次元形状を単純化し、乳房内の乳腺占有率のみを変更させた有限要素シミュレーションによる調査が極めて有効と考えられる。

そこで本研究では、二種類の材料モデルを用いた有限要素解析によって、ブラジャー着用による変形挙動を調査した。シミュレーションによって得られる変形結果と MRI 計測結果と比較することで、乳房変形調査のための材料定式化と、乳房内部構造が変形に与える影響を検討した。

## 2. 方法

本研究では乳房輪郭を半球形の単純形状としてモデル化し、有限要素メッシュを準備した。モデル半径は Fig.1 に掲載した被験者の乳房半径をもとに 60mm と設定した。乳房内の乳腺占有率および分布を MRI 計測結果と近似するように、Type-A(乳腺含有率 58.9%)、B(同 40.1%)、C(同 24.5%)の解析モデルを作成した。なお大森ら<sup>4)</sup>はマンモグラフィ計測によって、今回の被験者らよりもさらに乳腺量が低いケースの報告をしている。そこで老化や体質等により乳腺が消失した、または存在しない場合も想定し、乳房内部がすべて脂肪で構成された Type-D(同 0%)も用意し、あわせて四種類のモデルを準備した。それぞれのモデル形状を Fig.2 に示す。今回のモデル化では皮膚部分は表皮と真皮の複合体とし、厚さ 1mm とした。有限要素メッシュは 1488 個の六面体要素で構成されている。

生体軟組織の材料特性の取得には通常の引張圧縮試験等に抛らない報告例が多く、今回取り扱う乳腺では超音波計測の結果から材料特性を縦弾性係数で近似、推測<sup>5)</sup>したものが用いられている。しかしながら乳房各組織は非常に

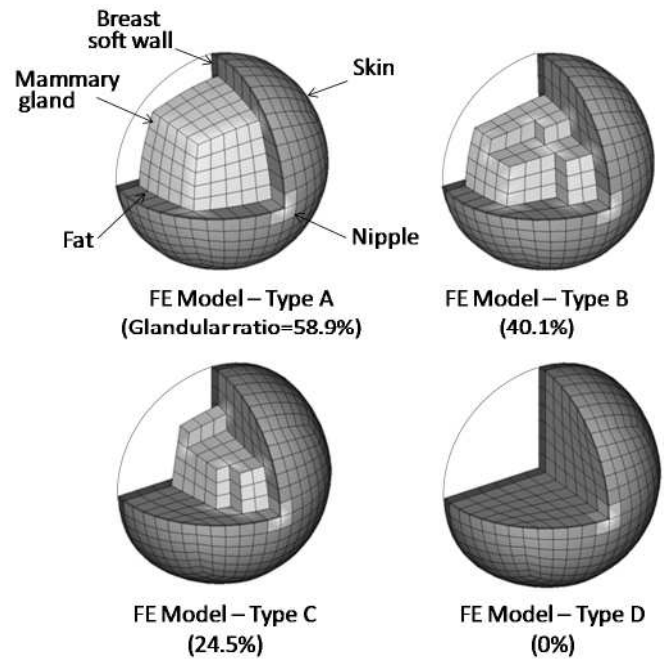


Fig. 2 Views of simplified breast FE meshes.

軟らかく、大変形時の際の応力-ひずみ関係は非線形と考えられる。とくに本研究で取り挙げるブラジャー着用では、乳房の変形において圧縮の作用が支配的で乳房全体の剛性が大きくなると考えられる。そこで今回は、乳房各組織を等方性超弾性体定義のひとつで、軟材料の圧縮時の挙動をよく表現でき<sup>6)</sup>、取り扱いが容易な Neo-Hooke 体と仮定し、従来の線形弾性体と設定した場合と比較した。

Neo-Hooke 体のひずみエネルギー密度関数  $W$  は主伸張比  $\lambda_i$  と伸びの不変量  $I_c$  を用いて、

$$W = C(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) = C(I_c - 3)$$

Table 1 Material properties of FE meshes.

Material	Young's Modulus $E$ [kPa]	Mass Density $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Fat	20.0	0.92
Skin	100.0	0.94
Mammary gland	50.0	1.10
Nipple		
Pectoralis Muscle		

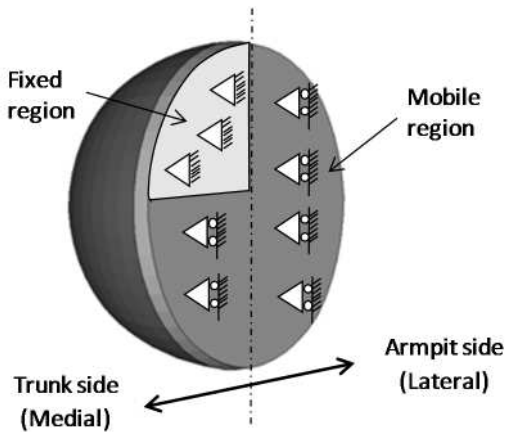


Fig.3 Boundary condition on pectoralis muscle

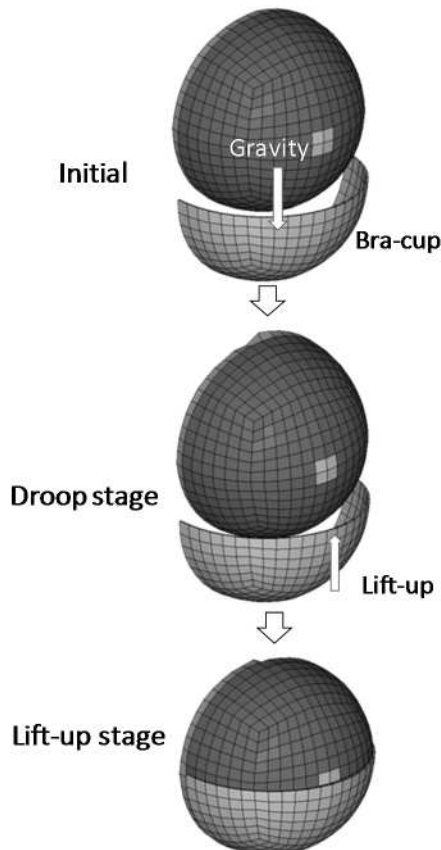


Fig.4 Deformation process of FE analyses

と表すことができる。ここで生体各組織が非圧縮( $\nu=0.5$ )であると仮定し、材料の伸び物性値  $C$  を文献値  $\nu$  の縦弾性係数  $E$  をもとに、以下のように材料定数を設定した。

$$C = \frac{1}{2} \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{E}{6}$$

使用した各材料定数を Table 1 に示す。なお、各組織を線形弾性体と設定した場合のポアソン比は  $\nu=0.499$  とし、体積力を考慮するため密度  $\rho$  を設定した。今回使用した 4 分の 3 カップタイプのブラジャーのカップ部(内径 120mm)の周囲部には通常、乳房を持ち上げるため乳房組織よりはるかに剛性が高い金属ワイヤーや樹脂が取り付けられているため本解析では剛体と定義した。

乳房後方は体幹上方で固定され、脇側の変形が大きいことが知られている<sup>9)</sup>。また背部で胸骨と固定された胸筋と繋がっている。そこで本解析では Fig.3 に示すように、乳房背面側に厚さ 10mm の胸筋様組織を付加し、マンモグラフィ診断時に固定組織拘束(Fixed tissue)と可動性組織拘束(Mobile tissue)と呼称される拘束を再現した。すなわち、胸筋組織背面の内側上部面を完全拘束し、それ以外の 3/4 面は前後方向の変位のみ拘束することとした。

解析概略を Fig.4 に示す。はじめに乳房モデルに鉛直下向き重力を与えて下垂変形させた。このとき解析モデル乳頭部は背部胸筋部の拘束の影響により、やや体幹側に移動しつつ下垂する。その後、ブラカップの中心軸を下垂時の乳頭位置に合わせ、乳頭位置が下垂前の状態になるまで挙上させた。なお、実際のブラジャー着用手順は様々存在すること、着用過程で大きなゆがみなどは調節されることを考慮し、本解析ではブラカップと乳房間の摩擦は無いと仮定した。重力はカップ挙上が完了し解析が終了するまで常時作用させた。解析には LSDYNA Ver.7.1 (富士通社製) の静的非線形構造解析機能を用いた。

### 3. 結果

ブラカップ非着用で重力下垂した場合、およびブラカップ着用により隆起した場合の乳房輪郭の変形を重ね合わせた結果を Fig.5 に示す。本図下段の、生体組織を Neo-Hooke 体と設定した場合の変形結果では、上段の線形弾性体と設定した場合と比較してブラカップ着用による隆起が乳房上部全体へ広がっており、前述の MRI 計測結果と近似している。乳腺含有率 25% とすくない Type-C については、Neo-Hooke 体と設定した場合に乳房上部が隆起する量が少なく、実験結果と同様の変形を示した。いっぽう図の上段の線形弾性体の場合では背面拘束されている体幹側しか隆起しなかった。生体組織を超弾性体と設

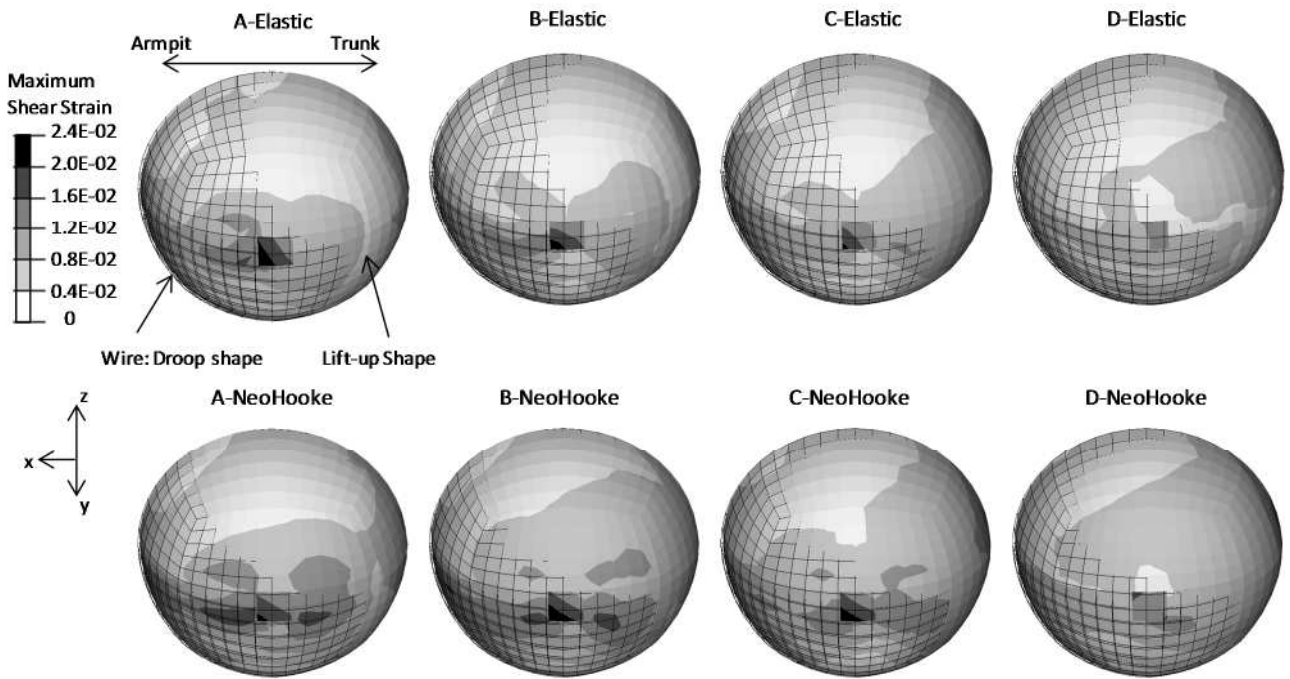


Fig. 5 Droop and lift-up deformations and contour distributions of maximum shear strain

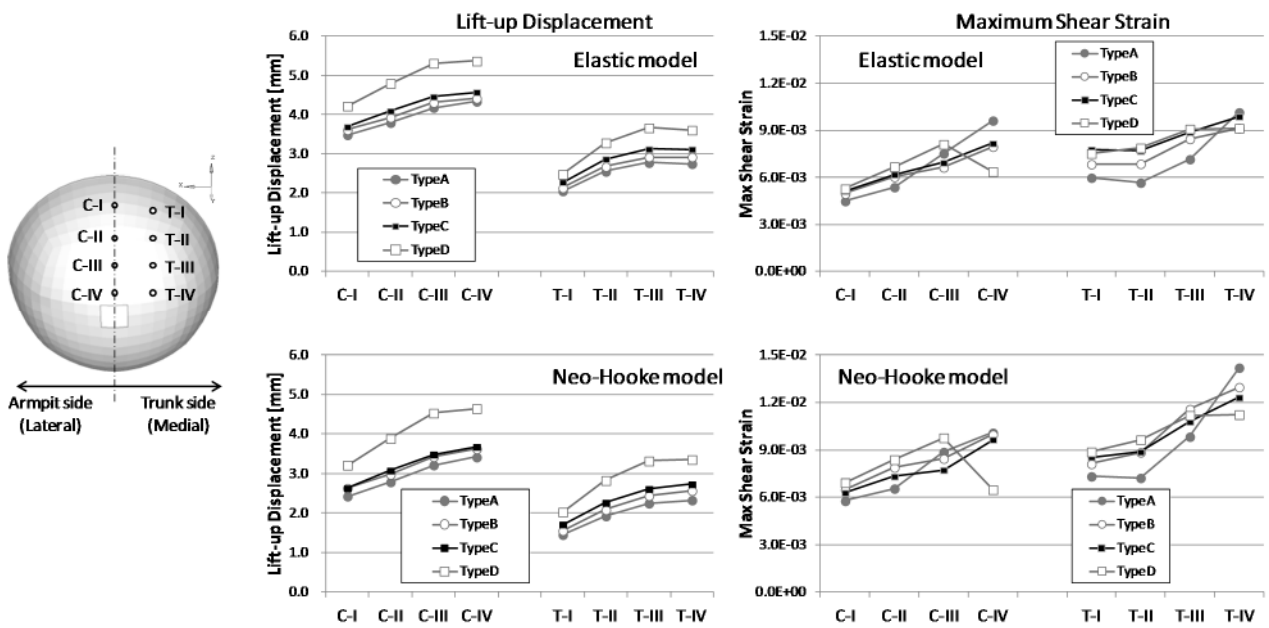


Fig. 6 Lift-up displacement and maximum shear strain at observing regions on skin surface.

定したことにより、圧縮に伴い乳房内部の剛性が上昇し、結果として乳房上部全体が隆起したと考えられる。表皮部分の最大せん断ひずみ分布において Neo-Hooke 体と設定した場合のほうが、線形弾性体と設定した場合に比べやや高く幅広く分布していることも、同様の理由によるものと考えられる。

整容的、美容的にも重要と考えられる、乳房中央から体幹側の上部輪郭に 8 箇所の計測点(乳房中央部 C-I~IV、

体幹部 T-I~IV)を設定した。それぞれの観察点で下垂状態からブラカップによる挙上時の鉛直向き隆起量と、表皮部分での最大せん断ひずみ量を調査した。結果を Fig.6 に示す。

下垂時から挙上までの変位では、線形弾性体、Neo-Hooke 体と設定した場合のどちらでも、乳房内部がすべて脂肪で占められているモデル Type-D(乳腺率 0%)の隆起は、どの計測点でも Type-A(乳腺率 60%)の約 1.4

倍程度と突出している。一方、乳腺の含まれているモデル Type-A~C では、線形弾性体、Neo-Hooke 体と設定した場合のどちらでも各計測位置での差異は 0.5mm 程度である。これらは乳腺が背部の胸筋部位とつながっているために、変形が抑制されたと考えられる。このことから乳房内の占有率にかかわらず、乳腺がブラジャー着用時の乳房変形に影響を与えており、加齢や体質により乳腺が著しく少ない、または消失した乳房では、隆起も大きいが動揺も大きくなることが予想される。

Neo-Hooke 体と設定した場合の解析結果から最大せん断ひずみ量を計測したところ、乳房体幹側下部の T-IV では乳腺が最も多いモデル Type-A でもっとも大きく 14.2mε となり、乳腺量が少なくなるにつれ減少した。これに対し上部の T-III および II では Type-A のひずみ量はそれぞれ 9.84 mε, 7.23 mε, と急激に減少し、乳腺が少ない Type-B, C のほうが大きかった。乳腺率が異なっても隆起量が変わらず、上皮表面のせん断ひずみが増加すれば、内部に乳腺が少ない場合には表皮にしわが発生する可能性が考えられる。

#### 4. 考察

ブラジャーは乳房振動の不快感を抑制するサポーターとしてだけではなく、身体を美しく見せる、整容的な役割が期待される。岡部ら<sup>9,10</sup>は乳房の硬さが動作時の乳房振動と相関が高いことを指摘しており、近年では身体への圧迫を考慮した CAE によるブラジャー設計<sup>11,12</sup>も研究がはじまるなど、より乳房内部の材料特性を表現できる材料モデルの開発が求められている。しかし乳腺は十数個の乳腺葉、主乳管から分岐する多数の乳管と末端に続く小葉で構成される複雑な生体組織である。また癌化しやすく<sup>13</sup>、力学試験を行うために正常組織を生体外へ取り出すことも困難なため、脳<sup>14</sup>や筋肉<sup>15</sup>のように汎用的な材料構成式を導出するための力学試験データも充分蓄積されていない。

今回の研究では縦型 MRI によるブラジャー着用時と非着用時の女性の乳房形状の変化を有限要素解析で再現し、乳房内部の乳腺が変形に影響を調査した。乳房挙上時の輪郭の変形結果、および上皮の最大せん断ひずみ分布の結果から、乳房形状を単純化した有限要素解析であっても、今回使用した Neo-Hooke 体のような超弾性体構成式を考慮することにより、圧迫の支配的なブラジャー着用変形を模擬することが可能なことが示された。同様の限定条件下である着衣や医療用サポーターによる拘束などのへの展開も可能と考えられる。

今後は今回扱わなかった、輪郭形状の個体差を考慮した

より実際に近い、カップサイズの異なる乳房モデルについても、ブラジャー着用時の変形に超弾性特性の設定が有効であることを示すべく調査していく予定である。

#### 謝辞

本研究に関し、ブラジャー着用前後の MRI 計測データをご提供いただき、被服管理の観点からブラジャーの整容効果についてご助言を賜りました、華頂短期大学 乾眞理子先生に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- (1) 諸岡晴美, 福田玲子, 中橋美幸, 諸岡英雄, 佐々木ヒサエ, 補整用ブラジャーの下部胸囲部分における衣服圧と着用感. 繊維学会誌, 61(2), 55-60, 2005.
- (2) 藤上明子, 岡部和代: ブラジャーのカップ形状と伸び特性が衣服圧に及ぼす影響ならびに着用感との関係. 生活造形, 56, 47-55, 2011.
- (3) Inui, M., Murase, K., Tsutsumi, S.: Investigation breasts' form and internal structure by wearing a brassiere from MRI images, International Journal of Clothing Science and Technology, 24(2/3), 170-180, 2012.
- (4) 大森直樹, 芦田健次, 藤田修: 乳腺含有率の推定および推定値に対する年齢階級と圧迫乳房厚の統計的影響関係の分析, 日本放射線技術学会雑誌, Vol.59(6), 737-745, 2003.
- (5) Krouskop, T. A., Wheeler, T. M., Kallel, F., Garra, B. S., Hall, T.: Elastic Moduli of Breast and Prostate Tissues under Compression, Ultrasonic Imaging, 20(4), 260-274, 1998.
- (6) M. Levinson M., Burgess, I.W. : A comparison of some simple constitutive relations for slightly compressible rubber-like materials, International Journal of Mechanical Sciences, 13(6), 563-572, 1971.
- (7) 理化学研究所人体力学シミュレーション 物性値データベース - <http://cfd-duo.riken.go.jp/cbms-mp/>
- (8) 日本医学放射線学会, 日本放射線技術学会編: マンモグラフィガイドライン, 医学書院, 6-11, 1999.
- (9) 岡部和代, 黒川隆夫, ブラジャー着用時と非着用時の運動中の乳房振動特性, 日本家政学会誌, 54(9), 731-738, 2003.
- (10) 岡部和代, 黒川隆夫: ブラジャー着用時の乳房振動

と衣服圧変動との関係, 人間生活工学, 5(4), 24-29. 2004.

- (11) Hong J., C., D., W., Q., & P., R., A study of the relationship between clothing pressure and garment bust strain, and Young's modulus of fabric, based on a finite element model, Textile Research Journal, 81(13), 1307-1319, 2011.
- (12) Zhou, J., Yu, W., Ng, S.-P.: Studies of three-dimensional trajectories of breast movement for better bra design, Textile Research Journal, 82(3), 242-254, 2012.

(13) Ueno E, et al : Dynamic tests in real-time breast echography. Ultrasound Medical Biology, 14, 53-57, 1988.

(14) 大西壮馬, 田中英一, 村瀬晃平他 : 横等方性および粘弾性を考慮した脳組織構成式の定式化, 機講論, No.15(67), 453-454, 2015.

(15) 谷航大, 田中英一, 村瀬晃平他 : 負荷-速度関係を表現可能な骨格筋構成式の定式化, 機講論, No.15(67), 443-444, 2015.