

# 運動に伴う乳房振動の特性分析と スポーツブラジャーの防振デザインへの反映

京都女子大学 岡部 和代  
短期大学部  
(共同研究者) 京都工芸繊維大学 黒川 隆夫

## Analysis of Breast Vibration While Exercising and Its Reflection to Vibration Proof Design of Sports Brassiere

by

Kazuyo Okabe  
*Kyoto Women's Junior College*  
Takao Kurokawa  
*Graduate School of Science and Technology,  
Kyoto Institute of Technology*

### ABSTRACT

Brassieres have functions of adjusting breast shape and controlling breast vibration. Sports brassieres are used for restraint of breast vibration during exercise. However, characteristics of breast vibration during exercise are not known well. In the present paper, we clarified effects of restraints by a sports brassiere and proposed a method to reflecting the characteristics of breast vibration on brassiere design. In the experiment of breast vibration, subjects walked (2steps/sec) or ran (3steps/sec) on a treadmill under two conditions (1) naked and (2) wearing a sports brassiere. We recorded the change of coordinate values of the predetermined points on the left breast. After calibrating the measured data and subtracting body movements from them we extracted the vibration of the breast. As a result of a discrete Fourier transformation (DFT), it was found that soft parts of the breast vibrated largely, breast vibration was influenced by an exercise period and there were effects of restraint by a sports brassiere. On the other hand, we used a three-dimensional body shape model for simulating change of shape and designing of

clothes. We proposed a method of designing of a sports brassiere. In order to control and decrease breast vibration during exercise, especially to restrain upper-down direction of vibration, we need to design sports brassieres taking the magnitude of pressure and the parts to impose the pressure into consideration.

## 要 旨

スポーツ時の乳房の揺れを抑制することはスポーツブラジャーに求められる重要な機能であり、運動の記録に影響を与える重要な因子である。本研究ではこのようなスポーツブラジャーを取りあげ、その着用前後で運動時の乳房振動特性がどのように変化するかを分析するとともに、防振デザインを考慮に入れたスポーツブラジャー設計へのアプローチについて検討した。

乳房の振動実験の結果、以下のことが判明した。

①裸体時の乳房振動は運動に応じた周期を持っていた。振動は乳房の柔らかい部位で大きく、振幅は左右方向より上下方向に大きい。

②歩行時は内輪と中輪が同程度の振動を示すが、走行時には体側側の振動がより大きくなる。

③乳房振動はスポーツブラジャーの着用によって抑制されたが、歩行の周期は除去できなかった。特に走行時の乳房振動の抑制効果は小さく、体側側の防振が図れていない。防振デザインを目的とするスポーツブラジャーは体側側の圧力を強くする必要があり。

上記振動実験の結果を、特定構造の曲面からなる3次元人体形状モデルの制御点に反映することで、スポーツブラジャーに防振機能を付加した設計を行うことができる。

## 緒 言

ブラジャーは運動に伴って生ずる乳房の振動を抑制する機能を持ち、それは整容性とともブラジャーに求められる重要な機能である。特にスポ

ーツにおいて防振性は運動の記録に影響を与える重要な因子である。しかし運動時の乳房とブラジャーの関係は複雑<sup>1)</sup>で、乳房振動と柔らかさ、ブラジャーの圧迫と運動適合性、運動時の着くずれや着用感など、スポーツブラジャーの設計時に考えるべき因子は多い。乳房の振動については、運動による乳房各部の振動を高速度カメラで捉えた報告<sup>2)</sup>や人体加速度計で捉えた報告<sup>3)~4)</sup>、赤外線位置測定装置で捉えた報告<sup>5)~6)</sup>や、運動解析システムで捉えた報告<sup>7)</sup>があるが、複雑に絡み合う要因に解明すべき点が多く残されている。さらにブラジャー設計では乳房部の軟組織の力学的挙動を予測して、その動態特性をデザインシステムの中に組み込む必要があるが、乳房の振動を体幹部の動きと分離して抽出し、その特性を反映させた乳房動態のモデリングは見当たらない。

本研究では、乳房振動と関わりの深い乳房の弾性を捉えた上で、ブラジャー着用前後の乳房の動きを運動画像解析システムで追跡した。この結果から、体幹部の動きと乳房の動きを分離し、乳房の振動分析を行った。また人体の3次元形状計測値に基づいてモデリングを行い、得られた人体形状モデルの胸部の制御点を明らかにして、スポーツブラジャーの防振デザインへアプローチすることを目的とした。

## 1. 研究方法

乳房振動の特性をスポーツブラジャーの防振デザインへ反映するためには、裸体時のみならずブラジャー着用時の乳房振動を捉える必要がある。しかしブラジャーを着用すると乳房の観察が困難

である。そこで振動実験では市販されているスポーツブラジャー（かぶり型Mサイズ）のカップ部の装飾部分を取り除き、基盤部位をマーキセット（タテ、ヨコ共に全く伸びず透ける生地）のみにすることでブラジャー内部にある乳房部上の測定点を追跡可能とした。

乳房は胸郭に対して方向性を持っており、左右の乳房部のデータを同時に取り込むことが困難であるため、左乳房部を実験対象とした。左乳房部上の測定点は図1に示す通りで、No. 25が乳頭点である。乳房下端の基底曲線（乳房下皮膚線）から乳房を持ち上げた際胸部部に生じる皮膚溝に至るほぼ円形のラインを外輪（No. 1～8）とし、乳頭点との実距離を3等分して中輪（No. 9～16）と内輪（No. 17～24）として測定点を設定した。乳房の弾性の測定はNo. 1～24の24点で行った。また乳房の振動実験の測定点は、運動による測定点間の交錯を回避し、かつ乳房振動を捉えるのに過不足のない点として、図中の網掛けで示す15点を予備実験後に決定した。なおアンダーバストラインと正中線の交点は体幹部の動きを捉えるための基準点（No. 0）とした。また測定点の方向をa～hの記号で示す。

被験者は年齢22～25歳でアンダーサイズ70の標準体型の若年女子7名で、乳房サイズはBカップが4名、Cカップが3名であった。

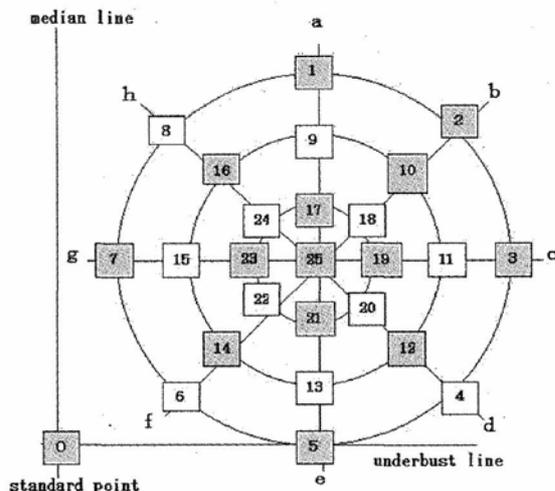


図1 左乳房部上の測定点

### 1. 1 乳房の弾力性の測定

乳房各部の弾性をデジタルフォースゲージ（DFG-1K:日本電産シンポ(株)製）を用いて測定した。計測アダプター（φ8mm）を皮膚曲面に垂直に3mm, 6mm, 9mmと押し込み、アダプターの先端から一定距離（3mm, 6mm, 9mm）に取り付けた透明プラスチック円盤（φ20mm）が皮膚に接触した時の押し込み力（gf）を読み取った。測定はそれぞれ3回繰返し、乳頭点を除く24点の測定値を得た。なお、各測定値に対して3種の値が得られ、このままでは乳房の硬さを表現するのに不便である。そこで3mm, 6mm, 9mmと押し込んだ時の値に指数関数（ $y=ae^{bx}$ ）をフィッティングした後、押し込み0mm時すなわち力を加えないと仮定した時の値を算出し、これを乳房の硬さ指標とした。この値が大きいほど乳房が硬いことを意味する。

### 1. 2 乳房の振動実験

被験者にトレッドミル（4km/h）上で歩行（Walking）と走行（Running）を行わせ、裸体時と透明スポーツブラジャー着用時の乳房の動きを運動画像解析システム（MA-K100:株村製）で取り込んだ。実験にはメトロノームを併用して歩行（2steps/sec）と走行（3steps/sec）を行わせ被験者が安定して同じ運動が反復できるようにした。また画像取り込みは左乳頭点が画像の中央、正面にあるようCCDカメラとトレッドミルを配置し、乳房が胸郭に対して持っている方向性を排除した。運動時の測定点（図1）の動画を30sec間取り込み、そのうちの安定した中央6sec間の画像を用いて測定点の2次元座標値の変動を求めた。

### 1. 3 人体3次元形状計測

裸体時とスポーツブラジャー着用時の体幹部形状を3次元計測機（VIVID700:ミノルタ(株)）で計測した。計測データはレーザービームによる光切断

法で得られるが、それは体表上の不特定多数（約1mmピッチ）の座標値である。そこで特定構造をもった曲面からなる3次元人体形状モデル<sup>8)</sup>を利用し、3次元計測値を体表点にフィッティングして基準化した体形データを得た。この体形データを以下の研究で利用した。

## 2. 結果

### 2.1 乳房の弾性

乳房の硬さ指標を測定点別、被験者別に求め、これを被験者7名で平均したものが図2である。図中のa~hは測定点の方向を示す。

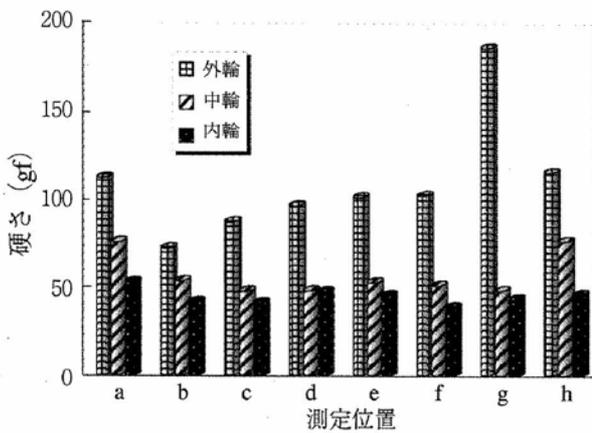


図2 乳房の位置別の硬さ

乳房の中で最も柔らかい部位は内輪に集中しており、どの測定方向でも値が小さい。中輪は内輪に近い値であるが、a, h方向すなわち乳頭の上は下方より硬い。外輪はいずれの位置でも硬く、特に胸骨付近のg方向は硬い。この位置は脂肪層が薄く9mm押し込むことができない被験者もいて、飽和状態に近い値を持つ。外輪でも比較的柔らかい位置は前腋点に近いbや体側方向のcである。被験者の乳房全体の硬さを内輪と中輪の平均から求めると、その指標は30~80gfの範囲にあり、乳房の大きい被験者の方が柔らかい傾向にあった。

## 2.2 乳房振動の特性分析

### 2.2.1 裸体時の乳房振動

実験時に取り込んだスケールを基に較正值を設定し、測定点の移動を実寸に換算してX（左右方向）、Y（上下方向）の座標値を算出した。図3および図4は0.033sec間隔に取り込んだ15点の6sec間の軌跡で、図3が歩行時の、図4が走行時のものである。被験者は6sec間に歩行時で約6歩、走行時で約9歩の繰返し運動を行った。その間、乳房が左右上下に繰返し移動し、測定点は円や8

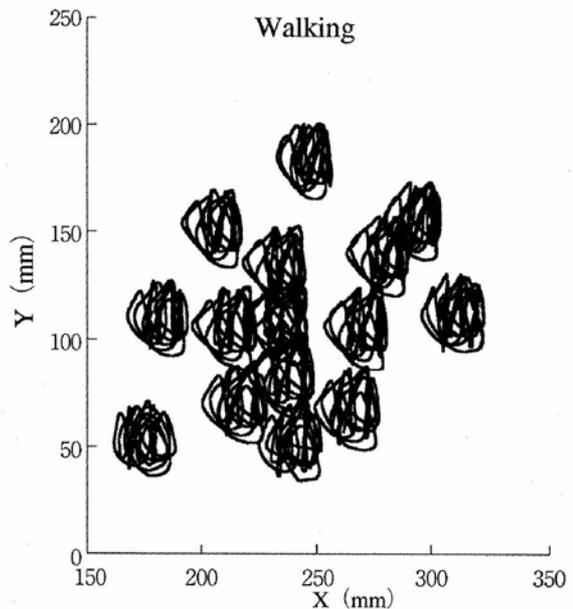


図3 歩行時の乳房測定点の軌跡

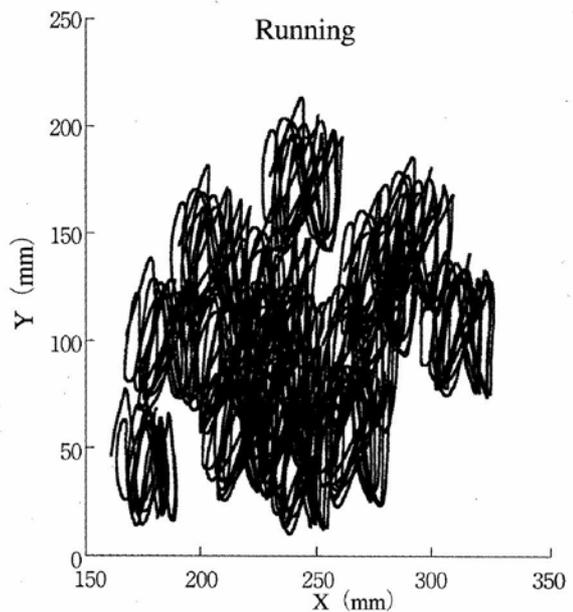


図4 走行時の乳房測定点の軌跡

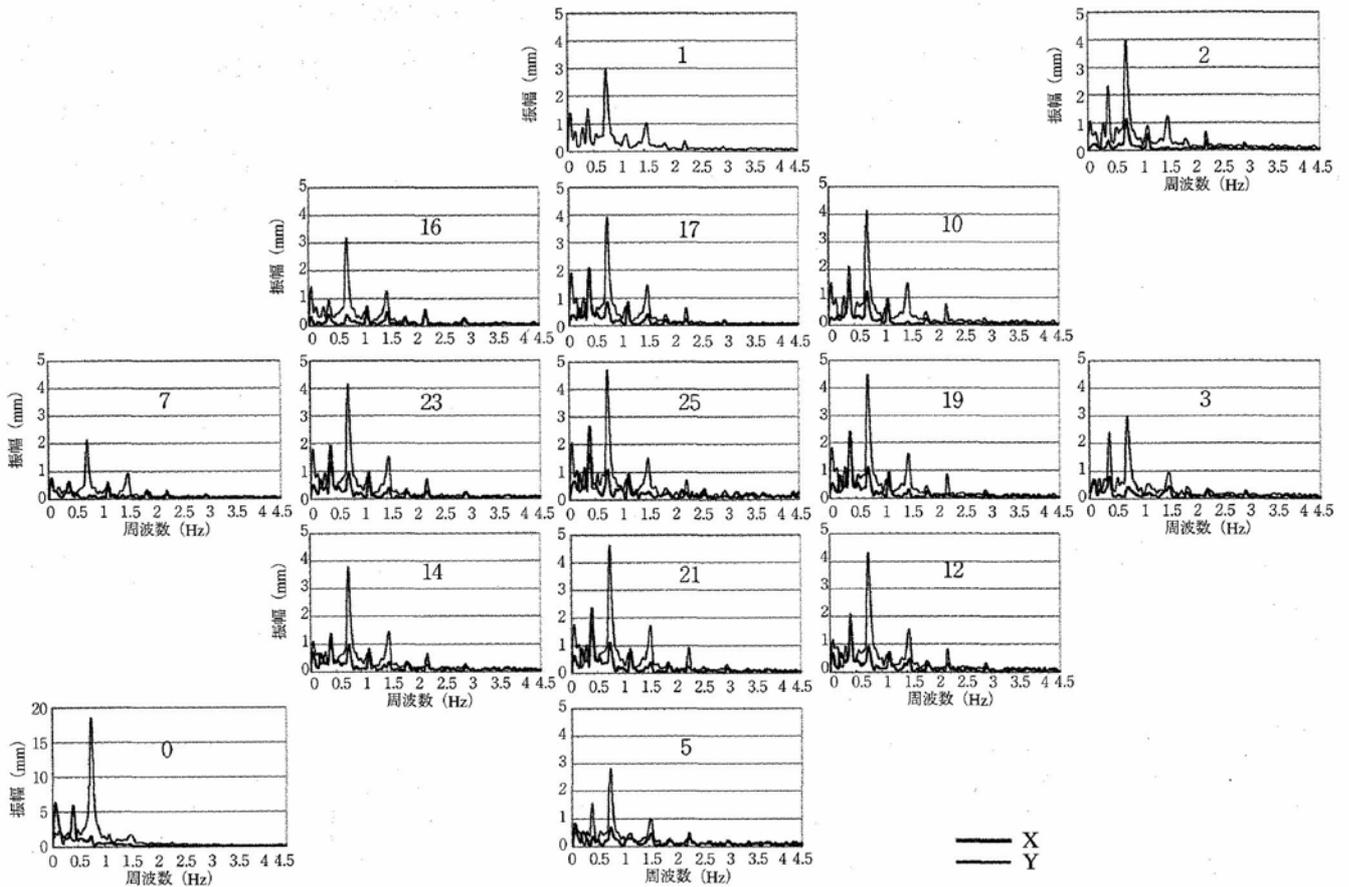


図5 走行時の乳房部測定点別の振動特性 (裸体時)

の字を描くような軌跡を示した。これを元データとして乳房の振動を抽出した。

まず、乳房から隔たった基準点の動きを体幹部の動きとし、乳房各部の点の値から基準点の値を減じ、時々刻々の各点の値を修正した。次に歩行周期に応じた体軸回りの回転の影響を取り除く補正<sup>7)</sup>を行って得た値を振動データとした。このデータで6sec間のX,Yの振動を描くと複雑で細かい波の繰り返しを示した。そこで振動特性を明らかにするために離散フーリエ変換を用いて周波数解析を行った。走行時の周波数解析結果を測定点別に図5に示す。横軸は周波数、縦軸は振幅でXとYの結果を重ねている。体幹部の上下運動の周期は走行時が0.75Hz、歩行時が0.5Hzである。基準点 (No. 0) で捉えた体幹部の左右運動には、上下運動の場合よりも周波数の小さい2つのピークがあり、走行時では0.05Hzと0.4Hzに現れた。乳房上の各点も基準点と同じ周波数でピークとな

るスペクトルを示すことから、歩行周期の影響を受けていることが分かる。

測定点別の振幅は、乳頭点やその近傍にある内輪や中輪で大きい。特に乳頭点の上下に位置するNo. 17, No. 21や体側側のNo. 10, No. 19, No. 12で振幅が大きくなる。歩行時は走行時よりも全体に振幅が小さく、内輪と中輪との振幅に差がない。走行時の振動特性はこの体側側の振幅の大きさにあると云える。外輪は振幅が小さく、特に正中線に近いNo. 7やNo. 1は小さい。しかし走行時には前腋点に近く柔らかいNo. 2は振幅が大きくなった。このように乳房の位置によって振動特性に差が認められるが、振幅の大きさはXよりY方向に大きいことが分かった。なお、被験者別の振動は乳房の柔らかく大きい方に強く現れる傾向にあった。これは乳房部の弾性が振動特性に影響したためと考えられる。

## 2. 2. 2 スポーツブラジャー着用時の乳房振動

スポーツブラジャー着用時の乳房の振動データを周波数解析した結果、歩行時については図6、走行時については図7を得た。図はX、Y別に測定点14点の結果を重ねたものである。歩行時も走行時もスポーツブラジャー着用によって振動が抑制され、裸体時より振幅が小さい。ブラジャー着用前後の振幅から防振率を求めると、歩行時では最大58.2% (No. 10のX)、走行時では最大60.4% (No. 12のX)で、上下方向より左右方向に振動の抑制効果が認められた。

歩行時は、左右方向には振幅が小さいが上下方向は周波数0.5Hzでピークとなるスペクトルを持ち、歩行の周期に応じた振動が現れた。すでに報告<sup>9)</sup>したフルカップブラジャーの場合には振幅の小さい複雑な振動で、X,Yともに周期が認められなかった。スポーツブラジャーは乳房の内輪や中輪の柔らかい部位を垂直に押さえる構造をもっており、整容を目的としたブラジャーのように局所

に強い圧力がかかっていない。両者の振動の相違はブラジャーの力学的な作用が異なるためと考えられる。

走行時は上下・左右方向共に走行周期に応じた振動が現れ、裸体時に似たスペクトルを示し、特に上下方向の振動が大きくなった。このスポーツブラジャーは振動を抑制する力が弱く、運動が強くなると乳房は裸体時に近い特性を示すと考えられる。裸体時の乳房振動特性は2. 2. 1で報告したように、運動の強弱や部位により異なる。スポーツブラジャーのデザインに防振性を反映するためには、部位による圧力を変化させて振動をコントロールする必要がある。

## 2. 3 人体形状モデルへの適用

3次元人体形状モデル<sup>10)~11)</sup>は特定構造をもつ曲面で構成され、頸椎点高からクロッチ高までの体幹部の体表点にフィッティングして体形データを得る。図8はこの曲面を背部正中線で切断して展開し、曲面座標 ( $u,v$ ) で表現したものである。

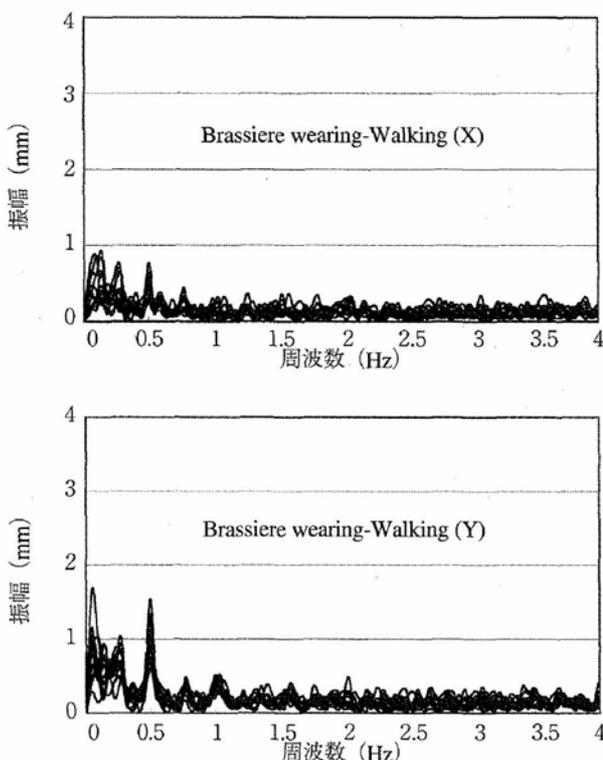


図6 スポーツブラジャー着用歩行時の乳房振動特性

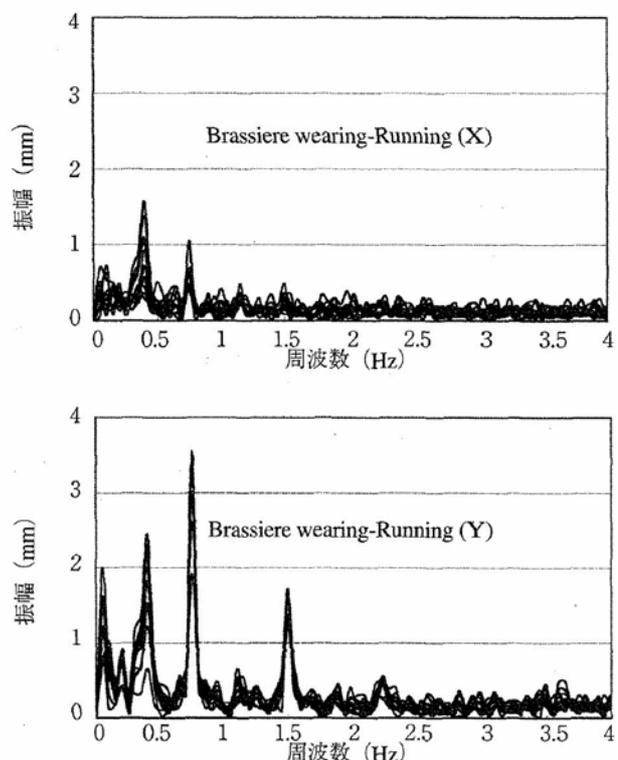


図7 スポーツブラジャー着用走行時の乳房振動特性

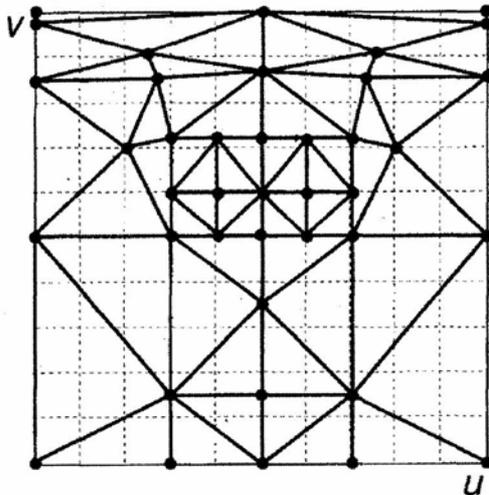


図8 3次元人体形状モデルの曲面座標上の基準点配置

描かれた三角形の頂点を体表上に定義される肩峰点、乳頭点、腸棘点など35個の基準点に割り付けることにより、任意の体表上の点を人体モデルの曲面上の点に1対1に対応させた。

曲面には双3次Bスプライン曲面

$$p(u,v) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} = N_{i3}(u)N_{j3}(v)V_{ij} \cdots \cdots (1)$$

を採用した。ここで  $P(u,v)$  はスプライン曲面座標  $(u,v)$  に対応するモデル表面の3次元座標である。

$N_{i3}(u)$ ,  $N_{j3}(v)$  はそれぞれ  $i, j$  によって台が決まる3次のBスプライン基底関数である。モデルの形状は(1)式を3次元人体データに最小2乗フィッティングして、体形データ  $V_{ij}$  (一般に制御点と呼ばれる)を得ることで決定できる。全ての  $V_{ij}$  の値が決まれば双3次Bスプライン曲面の形状が一意に定まり、人体データに近似したモデルが得られる。従って、 $m(n+1)$  個の  $V_{ij}$  のデータからモデル形状を再構築して、コンピュータ画面上でシミュレーションすることや外力に対する変形のシミュレーションが可能となった。

本モデルのポイントは図8の基準点の配置と  $m=30$ ,  $n=25$  という値にあり、これらは多数の成人女子の計測データにフィッティングを繰り返

て誤差が小さくなるように決定したものである。黒川らは、このスプライン曲面によって人体形状のほとんどを高精度(誤差2mm程度以下)で記述できることを示した<sup>12)</sup>。

ところでブラジャー着用による体形の変化は乳房とその近傍の体表に限定される。着用前のある制御点を  $V_{ij}$ 、それに対応する着用後の制御点を  $V'_{ij}$  と表わせば、 $V'_{ij}$  が  $V_{ij}$  と異なる値をとるのは少数個であることが判明している<sup>13)</sup>。そこでブラジャー着用によって形態が変化する制御点については乳房に外的な力を加えることができるようにした。この場合、着用時の形状は乳房とブラジャーの力学的な相互作用の平衡点として決定されるため、乳房の弾性や外力に対する変形量を入力し、モデルに反映させる必要がある。黒川らは人体形状モデルに内部組織を加えた非線形ばねモデルを導入し、それに力を加えた場合の形状変化が実験で得られる身体特性と一致するようにモデルの力学的性質を定めることで乳房変形のシミュレーションを試みている<sup>14)~15)</sup>。

また再構築されたモデル形状は、構成する曲面を展開すれば型紙作成に結びつけることができる。平面への展開はBスプラインの曲面座標軸と平行にモデル曲面を平面とみなせるまで再分割して生じる四辺形を規則的に平面上に配列することで行う。この展開図そのままでは細かく分割されていてデザインには利用しにくいだが、各四辺形を上下左右または左右に接続してゆき、接続が不可能な部分をダーツとして残せば型紙様の展開図が得られる。乳房部では四辺形の接続中心を適切に選べば、デザイナーの作成するブラジャーパターンに比較的近いものが得られることが確認されている<sup>16)</sup>。

スポーツブラジャーの防振デザインへの反映を図るために3次元人体形状モデルを利用して形状を記述するとともに、生体から得られた情報を変形規則に導入することができる。運動時の乳房振

動は内輪や中輪に大きく現れ、運動が大きくなると体側側がより顕著となることから、スポーツブラジャーの防振機能を最大に考えるなら、これらの部位に振動抑制のための力を加えると効果的である。

現在のスポーツブラジャーの種類は非常に少ない。スポーツの種目によって要求される防振性は異なる筈であり、防振性をデザイン過程で自由に制御できる必要がある。本研究で得られた知見を基に、乳房に加えるべき力とその部位を変えることで、要求される機能を実現することが可能と思われる。

### 3. 考 察

スポーツブラジャーを設計するには乳房の振動特性や、振動と弾性との関連、ブラジャー着用時の乳房部の変形規則などを明らかにし、人体形状モデルで表現することが必要である。そのため本研究では乳房の部位別の弾性を調べるとともに歩行時と走行時の乳房の振動を体幹部の動きから分離して抽出し、周波数解析を用いて分析した。その結果、裸体時の乳房振動は複雑な振動を繰り返し乳房の柔らかい部位で大きいことが判明した。スポーツブラジャーを着用しても運動による周期の影響があり、特に上下方向に大きく現れることが分かった。胸部の3次元形状データのモデルを利用し、制御点に振動特性を反映すると、スポーツブラジャーの防振性を制御して、必要な機能を実現するデザインへと展開できる。

### 謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究に対して助成をいただいた財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝する。また本研究を遂行するにあたり、多大なる協力をいただいた京都女子大学共同研究者の大神晃氏ならびに実験に協力頂いた被験者の方々へ謝意を表する。

### 文 献

- 1) 竹内：乳房の運動とブラジャー，人間工学，20，No.2，65-68（1984）
- 2) 樋口，中村：スポーツブラジャーの運動機能性，デサントスポーツ科学，7，266-273（1986）
- 3) 樋口，沖浜，田中：ブラジャーの機能性に関する研究（第1報），ブラジャーの防振効果について，家政学雑誌，23，No.3，179-183（1972）
- 4) 奥野，福地，田中：スポーツウェアにおけるブラジャーの機能性について，デサントスポーツ科学，4，301-309（1983）
- 5) 黒川：運動に伴う乳房の振動について（1）ブラジャー着用時との比較，Body Lines，3，No.1，23-42（1981）
- 6) 黒川：運動に伴う乳房の振動について（2）ブラジャー着用時との比較，Body Lines，3，No.2，61-64（1981）
- 7) 岡部，黒川：歩行に伴う乳房の振動分析，平成12年度日本人間工学会関西支部大会講演論文集，112-115（2000）
- 8) 黒川：人体形状の計測・記述とその応用，計測と制御，36，No.2，77-83（1997）
- 9) 岡部，伊神，大神，黒川：ブラジャー着用に伴う乳房の振動特性の変化，日本家政学会第53回大会研究発表要旨集，192（2001）
- 10) 黒川：アパレル分野における体形モデルとその応用，繊維学会誌，54，No.6，204-208（1998）
- 11) 黒川，篠崎：身体形状の記述とシミュレーション，シミュレーション，13，No.1，10-19（1994）
- 12) 森：着装シミュレーションのための3次元人体形状のモデリング，京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科先端ファイブプロ科学専攻修士論文（1999）
- 13) 大神，岡部，黒川：3次元モデルを用いたブラジャー着用による乳房形状変化の解析，日本人間工学会平成12年度関西支部大会講演論文集，108-111（2000）
- 14) 山田，黒川，岸本，篠崎：人体軟組織のパネ・モデルと外力による変形のシミュレーション，日本人間工学会平成7年度関西支部大会講演論文集，49-52（1995）
- 15) 山田，岡本，黒川，岸本，篠崎：パネを用いた人体軟組織のモデリングと外力による変形のシミュレーション，京都工芸繊維大学地域共同研究センター研究成果報告集，6，21-26（1997）
- 16) 黒川，西村：3次元人体モデルを利用した型紙作成Ⅱ，人体形状モデルの導出と日本人女性への適

用, 京都工芸繊維大学アパレル科学研究センター  
研究報告, 10, 132-141 (1992)