

### 3. 日本人高齢者の身体部分慣性係数の算出と推定式の作成

#### 3.1 目的

身体運動のバイオメカニクス的研究では、運動中の身体に作用する外力を計測したり、内力を推定したりするが、そのためには kinematic なデータに加えて、質量、質量中心位置、慣性モーメントなどの身体部分の慣性特性に関する情報、すなわち身体部分慣性係数(Body Segment inertia Parameters, 以下 BSP)が必要である。

身体部分の慣性特性は年齢差、性差、人種の違いなどの影響を受けることが指摘されている(Reid and Jensen, 1990; Jensen, 1993; 横井 1993)ので、動作解析の際には分析対象となる被験者の特性に合った BSP を用いる必要がある。日本人高齢者の動作をバイオメカニクス的に解析する際には日本人高齢者の BSP を用いる必要があり、そのためには、事前に日本人高齢者の身体部分の慣性特性が知られている必要がある。

これまでに、日本人の身体部分慣性特性に関する報告は幼少年(横井ら, 1986)、成人(松井, 1958)、青年アスリート(阿江ら, 1992) などについてのものがあるが、日本人高齢者については、数体の屍体についての報告(Mori and Yamamoto, 1959; Fujikawa, 1963) 以外は見当たらない。

本研究の目的は、Jensen(1978)の数学モデル(積層楕円板近似モデル)を応用した阿江ら(1992)のモデルを用いて、日本人高齢者の身体部分の質量、質量中心位置、主慣性モーメントを算出し、得られたデータをもとにこれらの推定式を作成することである。

#### 3.2 方法

##### 3.2.1 数学モデル

本研究では Jensen の数学モデルを応用した阿江らの方法を用いて、身体部分（頭部、胴体、上腕、前腕、手、大腿、下腿、足の 8 種類、さらに胴体を上胴、下胴に二分）の質量、質量中心位置、質量中心を通る 3 つの主軸まわりの主慣性モーメントを算出した。図 3-1 は本研究で用いた数学モデルおよび身体部分の部分長を規定する身体ランドマークの位置を示したものである。このモデルに関する仮定は以下の通りである。

- ① 身体は 14 あるいは 15 個（胴体を二つに分けた場合）の剛体からなり、これらの剛体は各関節の一点で連結されている。
- ② 身体各部分の密度は均一である。したがって、身体各部分の質量中心は体積中心と一致する。
- ③ 身体各部分は厚さ 2cm の楕円板が有限個集まってできており、左右の上肢および下肢の形態は同一である。
- ④ 身体各部分の密度は Dempster(1955) および Chandler et al.(1975) が報告した屍体標本の密度のいずれかと等しい。
- ⑤ 身体部分  $j$  の 3 つの慣性主軸は身体部分  $j$  の両端点を結ぶ軸（長軸： $z_j$  軸）、身体部分  $j$  の前額面内にあり、長軸に垂直な軸（左右軸： $x_j$  軸）、長軸と左右軸の両方に垂直な軸（前後軸： $y_j$  軸）と一致する。

### 3.2.2 被験者

被験者は 62～86 歳の男性 90 名と 61～83 歳の女性 89 名の計 179 名であった。表 3-1(a)および表 3-1(b)は被験者の年齢および身体特性を示したものである。なお、表 3-1(b)において、頭の部分長は頭頂点から両耳珠点間の midpoint までの長さ、胴体の部分長は胸骨上縁から両大転子間の midpoint までの長さ、上胴の部分長は胸骨上縁から腋下線上の最下肋骨下縁点間の midpoint までの長さ、下胴の部分長は腋下線上の最下肋骨下縁点間の midpoint から両大転

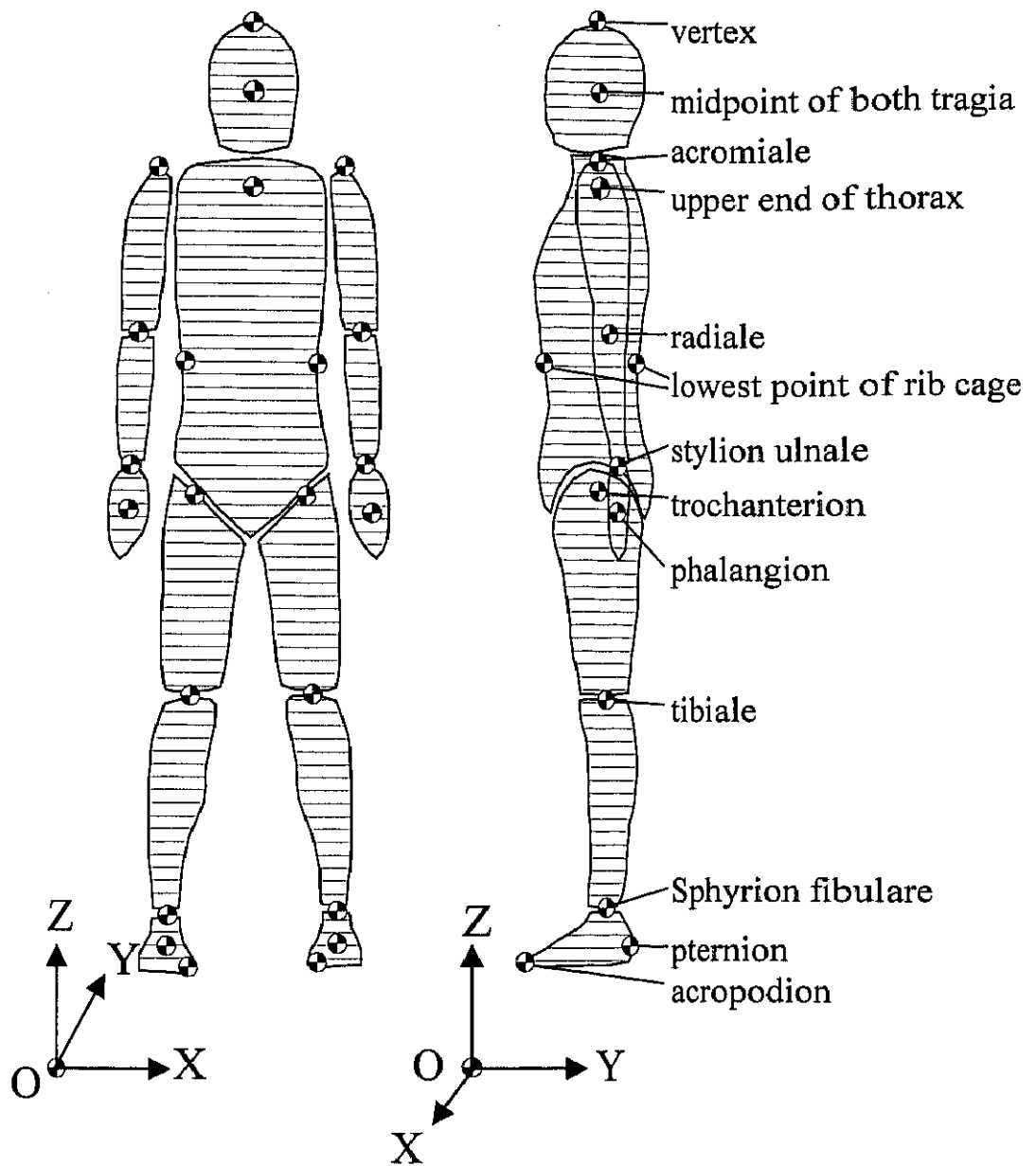


Figure 3-1  
 Mathematical model based on stacked elliptical  
 cylinders and body landmarks

Table 3-1(a)  
 Characteristics of the subjects (age, stature, body mass)

		Age (yr.)	Standing height (cm)	Body mass (kg)
Male (n=90)	Mean	75.1	158.3	57.1
	SD	5.4	6.7	10.6
	Range	61.9-86.2	140.3-174.1	36.8-86.5
Female (n=89)	Mean	73.0	146.7	50.9
	SD	4.7	5.0	8.2
	Range	61.3-82.8	137.1-157.4	31.6-69.8

Table 3-1(b) Characteristics of the subjects (Segment length)

		Segment Length (m)									
		Head	Torso	Upper arm	Forearm	Hand	Thigh	Shank	Foot	Upper torso	Lower torso
Male (n=90)	Mean	0.143	0.483	0.287	0.235	0.081	0.354	0.354	0.245	0.293	0.194
	SD	0.008	0.041	0.018	0.015	0.008	0.025	0.024	0.013	0.032	0.025
	Range	0.125-0.160	0.344-0.593	0.231-0.320	0.204-0.275	0.056-0.100	0.296-0.413	0.299-0.408	0.197-0.274	0.171-0.358	0.132-0.255
Female (n=89)	Mean	0.142	0.442	0.275	0.221	0.076	0.329	0.327	0.230	0.253	0.192
	SD	0.007	0.036	0.014	0.011	0.008	0.024	0.019	0.009	0.024	0.023
	Range	0.124-0.164	0.354-0.563	0.240-0.301	0.193-0.250	0.058-0.094	0.260-0.368	0.285-0.371	0.201-0.249	0.188-0.307	0.145-0.273

※ Head segment length is the length between the vertex and the midpoint of both tragia.

Torso segment length is the length between upper end of the thorax and the midpoint of both trochanter majors.

Upper torso segment length is the length between upper end of the thorax and the midpoint of both lowest ribs.

Lower torso segment length is the length between the midpoint of both lowest ribs and the midpoint of both trochanter majors.

Foot segment length is the length between the toe and the heel.

子間の中点までの長さ，足の部分長はつま先から踵までの長さとした．これらの被験者は年齢，身長，体重とも広い範囲に分布していた．このことから，これらの被験者の身体部分慣性特性は日本人高齢者の基準値として用いることが可能であると考えられる．また，これらの被験者から得られる BSP の推定式は，表 3-1(a)に示した身長および体重の範囲内の形態を有する高齢者，すなわち，多くの日本人高齢者に適用できると考えられる．

### 3.2.3 写真撮影

写真撮影に先立って，被験者の身長と体重を測定した．次に以下の方法で被験者の立位姿勢を写真撮影した．

被験者に競泳用の水泳帽と水着を着用させ，図 3-1 に示したように身体上にランドマークを貼付した．次に自作の写真計測用フレーム（正面に 2cm 間隔で黒糸が水平に張っており，内側に正面と 45° の角度で鏡が取り付けられている．写真 3-1 参照）の中に被験者を立たせ，被験者の正面から 35mm スチルカメラを用いてスライド写真を撮影した．このようにして，被験者の正面像および鏡に映った側面像を一枚のスライド写真上に得た（写真 3-2 参照）．

### 3.2.4 データ処理

#### 3.2.4.1 BSP の算出

撮影したスライド写真をスライドプロジェクターによりデジタルタイザ（3050 dots × 3050 dots，分解能：10 dots/mm）上に投影した．被験者の正面および側面像の身体上の分析点（フレームに張った糸と身体の縁の交点および関節中心等に貼付した身体ランドマーク）の座標をデジタルタイザを用いて読み取った．

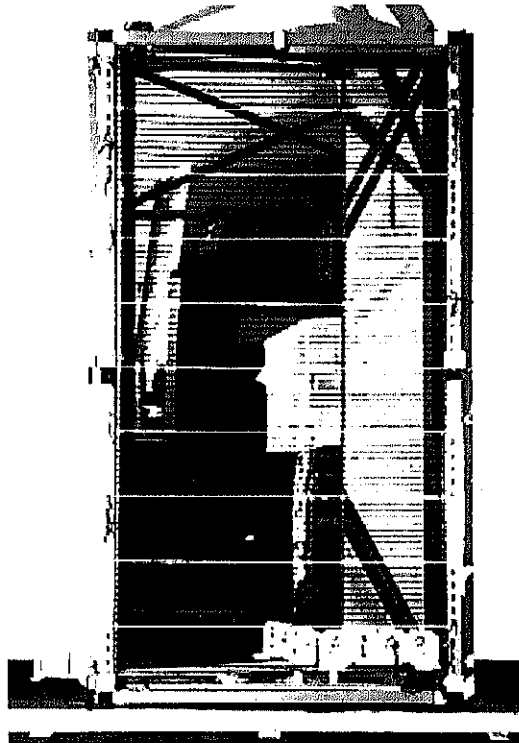


Photo 3-1  
Frame used for photogrammetry



Photo 3-2  
Posture of subject during photographed



これらの分析点の座標から、身体各部分を構成する楕円板の径と厚さおよび身体各部分の部分長を算出し、フレーム上のランドマークの座標をもとに実長に換算した。個々の楕円板の長径、短径、厚さ、および密度から各楕円板の体積、体積中心位置、慣性モーメントを求めた(図 3-2)。

本章 2.1 節で述べた数学モデルおよび仮定に基づけば、身体各部分  $j$  の質量 ( $M_j$ )、質量中心位置 ( $X_j, Y_j, Z_j$ )、慣性モーメント ( $I'_{x_j}, I'_{y_j}, I'_{z_j}$ ) は個々の楕円板の体積、体積中心位置、慣性モーメントおよび身体部分の密度を用いて、以下の式により算出される(図 3-3)。なお、ここでの  $X, Y, Z$  は計測フレームの左下端を原点とする絶対座標系  $\Sigma(OXYZ)$ (図 3-1 参照) を身体部分  $j$  の質量中心位置を原点とするように平行移動した座標系  $\Sigma_j(O_jX_jY_jZ_j)$  の 3 軸方向を意味する。

$$M_j = \sum_{i=1}^{n_j} (d_j \cdot v_{ij}) \quad (3.1)$$

$$X_j = \sum_{i=1}^{n_j} (d_j \cdot v_{ij} \cdot x_{ij}) / M_j \quad (3.2)$$

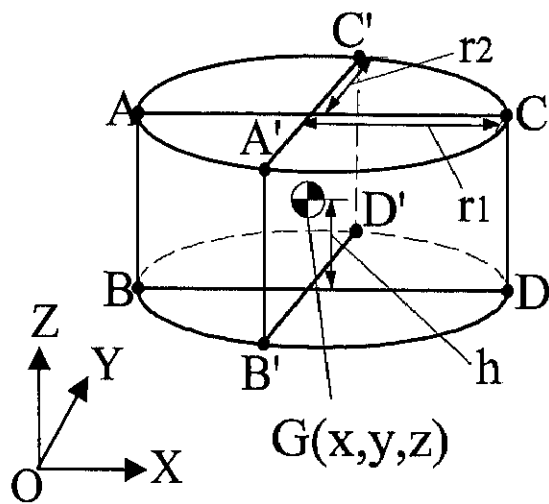
(  $Y_j, Z_j$  も同様 )

$$I'_{x_j} = \sum_{i=1}^{n_j} (I_{x_{ij}} + d_j \cdot v_{ij} \cdot ((y_{ij} - Y_j)^2 + (z_{ij} - Z_j)^2)) \quad (3.3)$$

(  $I'_{y_j}, I'_{z_j}$  も同様 )

ここで、 $n_j$  は身体部分  $j$  を構成する楕円板の数、 $d_j$  は身体部分  $j$  の密度、 $v_{ij}$  は楕円板  $ij$  (身体部分  $j$  の  $i$  番目の楕円板) の体積、 $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$  は楕円板  $ij$  の体積中心位置、 $I_{x_{ij}}$  は楕円板  $ij$  の左右軸まわりの主慣性モーメントである。

これらの式からもわかるが、BSP を算出する際には、身体各部分の密度  $d_j$  が必要である。本研究では、Dempster(1955) が報告した 7 体の屍体



$$A = (x_1, z_1) \quad A' = (y_1, z_2)$$

$$B = (x_2, z_5) \quad B' = (y_2, z_6)$$

$$C = (x_3, z_3) \quad C' = (y_3, z_4)$$

$$D = (x_4, z_7) \quad D' = (y_4, z_8)$$

$$r_1 = (|x_1 - x_3|/2 + |x_2 - x_4|/2)/2$$

$$r_2 = (|y_1 - y_3|/2 + |y_2 - y_4|/2)/2$$

$$h = \left| \left( \sum_{i=1}^4 z_i \right) / 4 - \left( \sum_{i=5}^8 z_i \right) / 4 \right| / 2$$

Volume (v)

$$v = \pi \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot (2 \cdot h)$$

Moment of inertia (Ix, Iy, Iz)

$$I_x = v \cdot d \cdot (r_2^2/4 + h^2/3)$$

$$I_y = v \cdot d \cdot (r_1^2/4 + h^2/3)$$

$$I_z = v \cdot d \cdot (r_1^2 + r_2^2)/4$$

d..... Density of the segment

Location of center of volume (G(x,y,z))

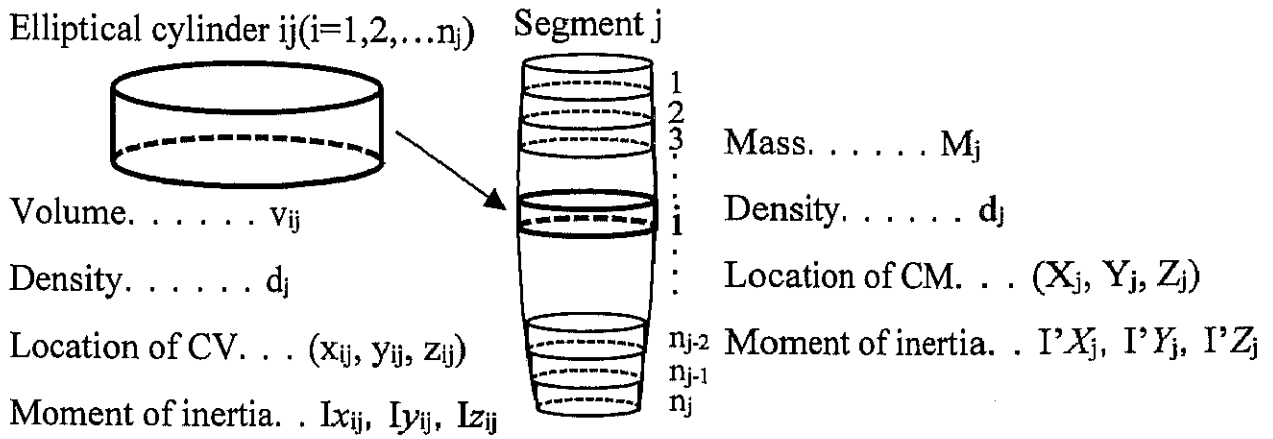
$$x = \left( \sum_{i=1}^4 x_i \right) / 4$$

$$y = \left( \sum_{i=1}^4 y_i \right) / 4$$

$$z = \left( \sum_{i=1}^8 z_i \right) / 8$$

Figure 3-2

Method of calculating the volume, location of center of volume, and moment of inertia for each elliptical cylinder



**Mass of segment  $j$  ( $M_j$ )**

$$M_j = \sum_{i=1}^{n_j} (d_j \cdot v_{ij})$$

**Location of CM of segment  $j$  ( $X_j, Y_j, Z_j$ )**

$$X_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (d_j \cdot v_{ij} \cdot x_{ij})}{M_j}$$

$$Y_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (d_j \cdot v_{ij} \cdot y_{ij})}{M_j}$$

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (d_j \cdot v_{ij} \cdot z_{ij})}{M_j}$$

**Moment of inertia of segment  $j$  ( $I^X_j, I^Y_j, I^Z_j$ )**

$$I^X_j = \sum_{i=1}^{n_j} (I_{xij} + d_j \cdot v_{ij} \cdot ((y_{ij} - Y_j)^2 + (z_{ij} - Z_j)^2))$$

$$I^Y_j = \sum_{i=1}^{n_j} (I_{yij} + d_j \cdot v_{ij} \cdot ((z_{ij} - Z_j)^2 + (x_{ij} - X_j)^2))$$

$$I^Z_j = \sum_{i=1}^{n_j} (I_{zij} + d_j \cdot v_{ij} \cdot ((x_{ij} - X_j)^2 + (y_{ij} - Y_j)^2))$$

Figure 3-3  
Method of calculating the mass, location of center of mass, and moment of inertia for each body segment

標本（実際には、Dempster は 8 体の屍体標本を用いているが、そのうち 1 体は頭部および胴体の値が示されていないため割愛した）および Chandler et al.(1975) が報告した 6 体の屍体標本の密度をもとに、以下のようにして各被験者に最適の密度を決定した。

Dempster および Chandler et al. は四肢の左右両側の密度を報告しているので、右側および左側を別個と考えると計 26 例の身体部分密度の組が得られる。そこで、これらの密度の組を用い、各被験者について 26 組の身体部分質量を求めた。その後、これらの身体部分質量から体重を推定し、推定体重と実測体重の誤差を最小にする身体部分質量の組を決定した。そして、決定された身体部分質量の算出に用いた密度の組をその被験者に最適の密度とし、BSP の算出に用いた。

#### 3.2.4.2 慣性モーメントの軸変換

ここまでの過程で得られた身体各部分の慣性モーメント ( $I'_{x_j}, I'_{y_j}, I'_{z_j}$ ) は座標系  $\Sigma_{j'}(O_j X_j Y_j Z_j)$  における 3 軸まわりの値である。写真撮影の際の被験者の姿勢（写真 3-2 参照）からわかるように、身体各部分の長軸は座標系  $\Sigma_{j'}(O_j X_j Y_j Z_j)$  の  $Z_j$  軸（絶対座標系の  $Z$  軸と平行な軸、すなわち重力方向）からずれているため、身体各部分の慣性モーメントを身体各部分の重心位置を原点とし、身体各部分の長軸を  $z_j$  軸とする座標系  $\Sigma_j(O_j x_j y_j z_j)$  の 3 軸まわりの値に変換する必要がある。

座標系  $\Sigma_{j'}(O_j X_j Y_j Z_j)$  における身体部分  $j$  の慣性テンソルを  $I'_{j'}$ 、座標系  $\Sigma_j(O_j x_j y_j z_j)$  における身体部分  $j$  の慣性テンソルを  $I_j$  とすると、 $I'_{j'}$  と  $I_j$  の間には以下の関係が成り立つ（広瀬，1995）。

$$I_j = R_j I'_{j'} R_j^T \quad (3.4)$$

ここで  $R_j$  は座標系  $\Sigma_{j'}(O_j X_j Y_j Z_j)$  から座標系  $\Sigma_j(O_j x_j y_j z_j)$  への座標回転行列で

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = R_j \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

の関係を満たし、

$$R_j = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

で表される。ここで  $l_i, m_i, n_i$  ( $i=1,2,3$ )は方向余弦を示す。

式 3.4 を用いて慣性テンソルの軸変換を行った。変換後の慣性テンソルの非対角成分（慣性乗積）は必ずしも 0 にはならないが、身体各部分の長軸とそれに直交する 2 つの軸を慣性主軸と仮定し（3.2.1 数学モデルの仮定⑤参照。すなわち慣性乗積を 0 と仮定することと同義である）、変換後の慣性テンソル  $I_j$  の対角成分を身体各部分の主慣性モーメントとした。

また、以下の式により回転半径 ( $k_{xj}, k_{yj}, k_{zj}$ ) を算出した。

$$k_{xj} = \sqrt{(I_{xj} / M_j)} \quad (3.7)$$

（  $k_{yj}, k_{zj}$  も同様）

ここで  $I_{xj}$  は  $\Sigma_j(O_j x_j y_j z_j)$  における身体部分  $j$  の  $x_j$  軸回りの慣性モーメントである。

なお、 $\Sigma_j(O_j x_j y_j z_j)$  の定義方法の詳細については、巻末の付録に示した。

### 3.2.4.3 統計処理

身体部分慣性係数の性差、世代差、人種差の検定には独立 2 群の t 検定

を用いた。有意水準は危険率 5%未満とした。

#### 3.2.4.4 BSP の推定式の作成

得られた身体各部分の質量，質量中心位置，主慣性モーメントを目的変数とし，年齢，身長，体重，部分長を予測変数としてステップワイズ法による重回帰分析を行った。

まず，4つの予測変数の全てを回帰式に投入し，標準偏回帰係数が有意でない変数を1つずつ排除し，回帰式に残った変数の標準偏回帰係数の全てが有意 ( $p < 0.05$ ) となった時点で分析を終了した。最終的に残った回帰式を BSP の推定式とした。

### 3.3 結果

#### 3.3.1 数学モデルの妥当性

本研究で用いた数学モデルの妥当性を，得られた BSP を用いて算出した推定体重の誤差によって検証した。

表 3-2 は推定体重の実測体重からの誤差を平均誤差，標準誤差 (RMS) および最大誤差で示したものである。推定体重と実測体重の平均誤差は，男性では  $-0.07 \pm 0.54\%$  (最大誤差:  $-2.03\%$ )，女性では  $-0.01 \pm 0.45\%$  (最大誤差:  $-1.27\%$ ) であった。これらの値は同様のモデルを用いた横井ら (1986)，阿江ら (1992) の報告 (横井:  $-1.14\%$ ，阿江:  $2.1\%$ ) よりも小さく，Jensen et al. (1993) の報告 ( $0.05\%$ ) とほぼ同様であった。このことより，本研究で用いた数学モデルは，日本人高齢者の BSP 測定に用いた場合の測定誤差が先行研究と比較しても小さく，日本人高齢者の BSP の測定においてこのモデルを用いることの妥当性は高いといえる。

Table 3-2 Estimation error of body mass (%)

		n	Mean $\pm$ SD	RMS.	Max.
This study	Male	90	-0.07 $\pm$ 0.54	0.54	-2.03
	Female	89	-0.01 $\pm$ 0.45	0.45	-1.27
Yokoi <i>et al.</i> (1986)		255	1.65	-	-
Ae <i>et al.</i> (1992)	Male	215	2.1 $\pm$ 1.3	-	-
	Female	80	1.9 $\pm$ 1.4	-	-
Jensen <i>et al.</i> (1993)		19	0.05 $\pm$ 2.96	-	-

Estimation error (%) = ( ( Body Mass estimated - Body Mass measured ) / Body Mass measured )  $\times$  100

### 3.3.2 日本人高齢者の身体部分慣性係数

表 3-3 は身体各部分の質量比，質量中心比，質量中心を通る 3 つの慣性主軸まわりの回転半径比を男女各々の平均値で示したものである。ここで，質量比は身体質量に対する部分質量の比，質量中心比は部分長に対する中枢端（上端）から質量中心位置までの距離の比，回転半径比は部分長に対する回転半径の比のことである。ただし，頭の部分長は頭頂点から両耳珠点間の中点までの長さ，胴体の部分長は胸骨上縁から両大転子間の中点までの長さ，上腕の部分長は胸骨上縁から腋下線上の最下肋骨下縁点間の中点までの長さ，下腕の部分長は腋下線上の最下肋骨下縁点間の中点から両大転子間の中点までの長さ，足の部分長はつま先から踵までの長さとした。また，足の質量中心比は部分長に対するつま先から質量中心までの距離の比とした。表 3-3 における \*印は危険率 5%水準で，†印は危険率 1%水準で有意な性差が認められたことを意味する。また，+は男性の値が女性よりも有意に大きいことを，-は小さいことを意味する。

質量比では前腕，手，足，上腕は男性の方が大きく，大腿，下腿，下腕は女性の方が大きかった。

質量中心比では頭部，手，大腿，下腕は男性の方が大きく，胴体，上腕，足は女性の方が大きかった。質量中心比が大きいことは身体部分の質量中心位置が（立位姿勢において）より下方（足ではより後方）にあることを意味する。

回転半径比では頭部，足は 3 軸とも男性の方が大きく，大腿，上腕は 3 軸とも女性の方が大きかった。その他の部分については，下腿の X 軸（左右軸）まわりの回転半径比，上腕の Y 軸（前後軸）まわりの回転半径比および手の Z 軸（長軸）まわりの回転半径比は男性の方が大きかった。また，胴体，前腕，下腿の Z 軸まわりの回転半径比は女性の方が大きか



Table 3-3 Body segment inertia parameters of Japanese elderly male and female

Segment	Male					Female				
	%Mass (%)	%CM (%)	Radius of gyration			%Mass (%)	%CM (%)	Radius of gyration		
			%kx (%)	%ky (%)	%kz (%)			%kx (%)	%ky (%)	%kz (%)
Head	9.1 (1.1)	86.9 †† (4.7)	50.7 †† (2.8)	52.0 †† (3.2)	41.8 †† (2.4)	8.8 (1.1)	83.8 (4.0)	48.1 (2.7)	50.2 (2.7)	40.3 (2.2)
Torso	49.7 (2.9)	49.8 †- (3.3)	36.8 (2.0)	37.2 (1.9)	19.9 †- (2.6)	49.3 (3.3)	51.5 (2.6)	36.8 (1.6)	37.0 (1.6)	21.4 (2.9)
Upper arm	2.5 (0.3)	54.9 †- (1.6)	25.5 (1.3)	25.6 *† (0.8)	11.8 (2.0)	2.5 (0.3)	56.9 (2.1)	25.1 (1.8)	25.3 (0.9)	12.4 (2.5)
Forearm	1.7 *† (0.2)	42.7 (2.1)	28.6 (1.1)	28.6 (1.1)	11.2 *- (1.2)	1.6 (0.2)	42.3 (1.9)	28.9 (1.2)	28.8 (1.2)	11.5 (1.3)
Hand	0.8 †† (0.2)	82.0 †† (10.1)	54.5 (5.2)	53.7 (5.2)	29.2 *† (3.8)	0.6 (0.1)	76.3 (8.5)	53.5 (4.9)	52.5 (4.3)	27.9 (3.7)
Thigh	9.2 †- (0.8)	48.1 *† (2.2)	27.2 †- (1.1)	28.3 †- (0.9)	17.1 †- (1.8)	9.8 (1.0)	47.4 (1.9)	27.7 (1.2)	28.9 (0.9)	18.1 (2.1)
Shank	4.7 *- (0.5)	42.3 (1.5)	26.3 *† (1.5)	28.4 (0.9)	14.4 †- (2.3)	4.8 (0.5)	42.4 (1.8)	25.7 (2.0)	28.4 (0.8)	16.0 (2.6)
Foot	1.7 †† (0.2)	58.1 †- (1.8)	23.3 †† (0.7)	12.6 †† (0.9)	23.5 †† (0.8)	1.5 (0.3)	59.1 (2.2)	22.6 (0.9)	12.2 (0.6)	22.9 (0.9)
Upper torso	28.8 †† (2.7)	40.9 (5.2)	41.3 †- (2.6)	40.1 †- (3.7)	32.7 †- (5.3)	26.0 (2.7)	41.7 (3.8)	42.8 (3.0)	41.9 (3.6)	36.2 (5.0)
Lower torso	20.9 †- (2.9)	60.5 †† (4.4)	49.2 (4.4)	48.1 (4.2)	48.2 (6.4)	23.4 (2.6)	58.7 (3.7)	49.3 (4.5)	47.8 (4.5)	49.8 (6.3)

1) '\*' and '†' mean significant difference between genders (\* p<0.05, † p<0.01, + Male>Female, - Male<Female) .

2) The figures in parenthesis mean standard deviation.

3) %Mass is percentage of each segment mass to the body mass.

4) %CM is percentage of the distance between the segment's proximal end (upper end of thorax for the upper torso, midpoint of both low for the lower torso, toe for the foot) and the segment CM to the segment length.

5) %kx, %ky and %kz are the percentages of radius of gyration to the segment length.

った。

### 3.4 考察

#### 3.4.1 高齢者の身体部分慣性特性にみられる性差

図 3-4 は高齢者の身体部分質量比，質量中心比，回転半径比における性差を図示したものである。

本研究で算出した男女の BSP の平均値は，質量比および質量中心比ではそれぞれ 7 部分に，左右軸（X 軸）まわりの回転半径比および前後軸（Y 軸）まわりの回転半径比ではそれぞれ 5 部分に，長軸（Z 軸）まわりの回転半径比では 8 部分に有意な性差がみられた。

これらの結果は，性別による形態の差が身体部分慣性特性に反映されたものと考えられる。したがって，高齢女性の動作分析に高齢男性の身体部分慣性係数を用いること，あるいは高齢男性の動作分析に高齢女性の身体部分慣性係数を用いることは望ましくないことが示唆される。

#### 3.4.2 高齢者と青年の身体部分慣性特性の比較

本研究で得られた日本人高齢者の BSP を日本人青年のもの（阿江ら，1992）と比較する。表 3-4 は高齢者と青年の BSP を各々の平均値で示したものである。表中の \* 印は危険率 5% 水準で，† 印は危険率 1% 水準で有意な世代差が認められたことを意味する。また，+ は高齢者の値が青年よりも有意に大きいことを，- は小さいことを意味する。また，図 3-5 は高齢男性と青年男性の身体部分慣性特性の違いを図示したものである。

##### 3.4.2.1 質量比

男性では全ての身体部分の質量比について，女性では手を除く身体部分の質量比について，高齢者と青年で有意な差がみられた。男女とも高齢

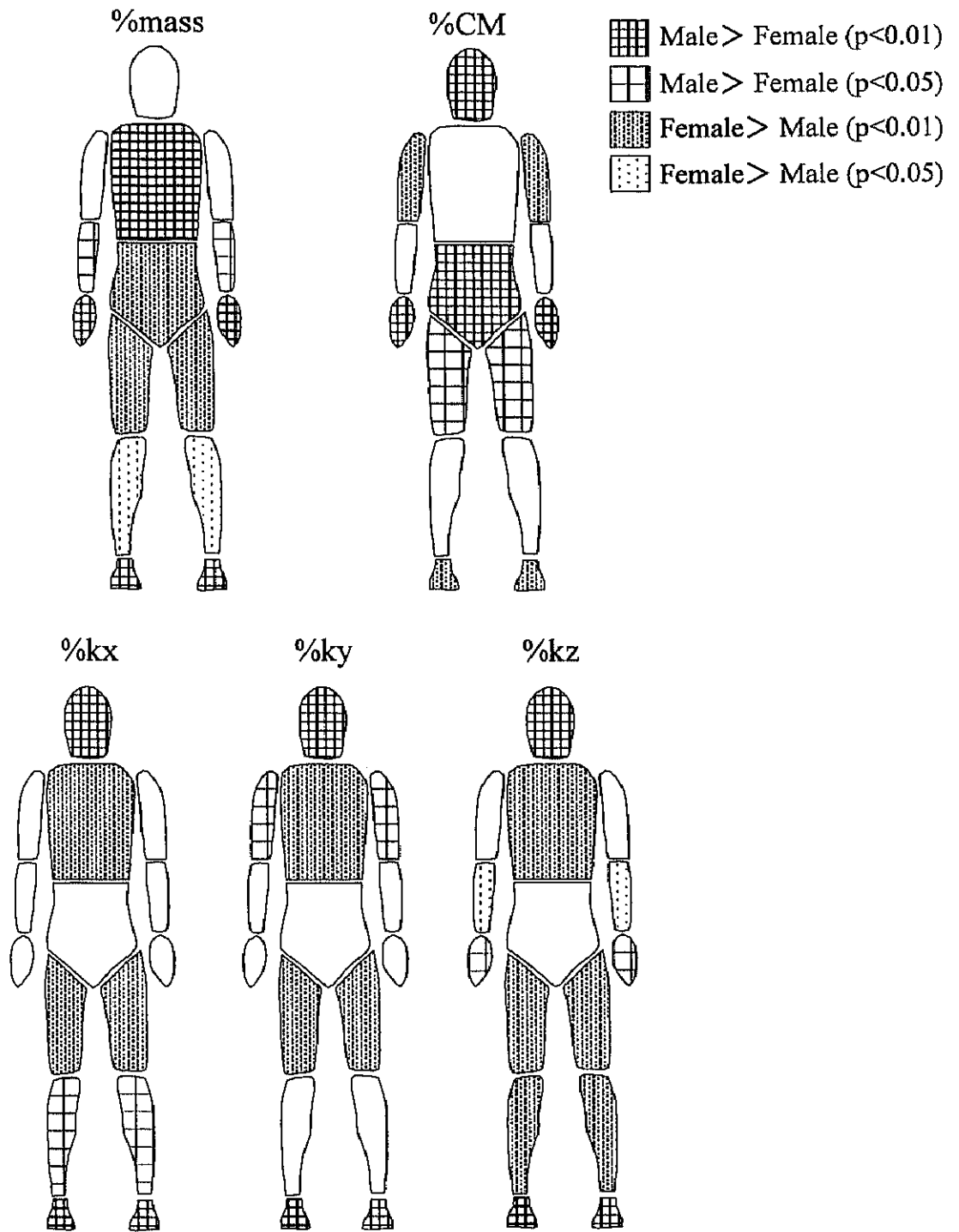


Figure 3-4  
 Differences of body segment inertia characteristics between the genders  
 (Japanese elderly male VS. Japanese elderly female)

Table 3-4 Comparison of the body segment inertia parameters between the elderly and the young

Segment	Elderly Male					Young Male				
	%Mass (%)	%CM (%)	Radius of gyration			%Mass (%)	%CM (%)	Radius of gyration		
			%kx (%)	%ky (%)	%kz (%)			%kx (%)	%ky (%)	%kz (%)
Head	9.1 †† (1.1)	86.9 †† (4.7)	50.7 †† (2.8)	52.0 †† (3.2)	41.8 †† (2.4)	6.9 (0.7)	82.1 (4.1)	47.9 (2.2)	45.4 (2.1)	36.3 (1.9)
Torso	49.7 *† (2.9)	49.8 (3.3)	36.8 †† (2.0)	37.2 †† (1.9)	19.9 †† (2.6)	48.9 (2.2)	49.3 (1.6)	34.6 (0.8)	35.7 (0.8)	16.7 (0.9)
Upper arm	2.5 †- (0.3)	54.9 †† (1.6)	25.5 †- (1.3)	25.6 (0.8)	11.8 †† (2.0)	2.7 (0.3)	52.9 (1.8)	26.2 (0.7)	25.7 (0.7)	10.7 (1.0)
Forearm	1.7 †† (0.2)	42.7 †† (2.1)	28.6 †† (1.1)	28.6 †† (1.1)	11.2 *- (1.2)	1.6 (0.2)	41.5 (2.0)	27.9 (1.1)	27.7 (1.0)	11.5 (1.2)
Hand	0.8 †† (0.2)	82.0 †- (10.1)	54.5 †† (5.2)	53.7 †- (5.2)	29.2 †- (3.8)	0.6 (0.1)	89.1 (10.8)	51.9 (6.4)	57.1 (7.0)	31.4 (4.5)
Thigh	9.2 †- (0.8)	48.1 *† (2.2)	27.2 †- (1.1)	28.3 †† (0.9)	17.1 †† (1.8)	11.0 (0.8)	47.5 (1.8)	27.8 (0.9)	27.0 (0.9)	15.2 (0.9)
Shank	4.7 †- (0.5)	42.3 †† (1.5)	26.3 †- (1.5)	28.4 †† (0.9)	14.4 †† (2.3)	5.1 (0.4)	40.6 (1.5)	27.4 (0.9)	27.1 (0.9)	9.7 (0.6)
Foot	1.7 †† (0.2)	58.1 †- (1.8)	23.3 †† (0.7)	12.6 †† (0.9)	23.5 †† (0.8)	1.1 (0.2)	59.5 (2.6)	17.7 (3.0)	8.8 (1.3)	18.2 (3.1)
Upper torso	28.8 †- (2.7)	40.9 †- (5.2)	41.3 †† (2.6)	40.1 †† (3.7)	32.7 †† (5.3)	30.2 (1.8)	42.8 (2.0)	35.0 (1.2)	38.1 (1.5)	26.6 (1.8)
Lower torso	20.9 †† (2.9)	60.5 (4.4)	49.2 †† (4.4)	48.1 (4.2)	48.2 †† (6.4)	18.7 (1.5)	60.9 (3.0)	42.5 (2.7)	47.3 (3.0)	43.5 (3.8)

Segment	Elderly Female					Young Female				
	%Mass (%)	%CM (%)	Radius of gyration			%Mass (%)	%CM (%)	Radius of gyration		
			%kx (%)	%ky (%)	%kz (%)			%kx (%)	%ky (%)	%kz (%)
Head	8.8 †† (1.1)	83.8 †† (4.0)	48.1 †† (2.7)	50.2 †† (2.7)	40.3 †† (2.2)	7.5 (0.9)	75.9 (5.2)	45.1 (2.8)	42.6 (2.4)	35.0 (2.5)
Torso	49.3 †† (3.3)	51.5 †† (2.6)	36.8 †† (1.6)	37.0 †† (1.6)	21.4 †† (2.9)	45.7 (2.5)	50.6 (1.8)	34.3 (0.9)	35.5 (0.9)	17.0 (0.8)
Upper arm	2.5 *- (0.3)	56.9 †† (2.1)	25.1 †- (1.8)	25.3 †- (0.9)	12.4 †† (2.5)	2.6 (0.2)	52.3 (1.7)	26.5 (0.9)	26.0 (0.9)	10.7 (0.9)
Forearm	1.6 †† (0.2)	42.3 (1.9)	28.9 †† (1.2)	28.8 †† (1.2)	11.5 †- (1.3)	1.5 (0.1)	42.3 (2.2)	27.7 (1.1)	27.5 (1.0)	12.2 (1.2)
Hand	0.6 (0.1)	76.3 †- (8.5)	53.5 (4.9)	52.5 †- (4.3)	27.9 †- (3.7)	0.6 (0.1)	90.8 (10.2)	52.7 (5.9)	57.3 (6.6)	30.3 (4.6)
Thigh	9.8 †- (1.0)	47.4 †† (1.9)	27.7 †- (1.2)	28.9 †† (0.9)	18.1 †† (2.1)	12.3 (0.9)	45.8 (2.4)	28.5 (1.2)	27.8 (1.1)	15.7 (1.5)
Shank	4.8 †- (0.5)	42.4 †† (1.8)	25.7 †- (2.0)	28.4 †† (0.8)	16.0 †† (2.6)	5.3 (0.4)	41.0 (1.5)	27.5 (1.0)	27.2 (0.9)	10.2 (0.7)
Foot	1.5 †† (0.3)	59.1 (2.2)	22.6 †† (0.9)	12.2 †† (0.6)	22.9 †† (0.9)	1.1 (0.2)	59.4 (2.4)	18.4 (2.6)	9.0 (1.3)	18.9 (2.7)
Upper torso	26.0 *- (2.7)	41.7 †- (3.8)	42.8 †† (3.0)	41.9 †† (3.6)	36.2 †† (5.0)	26.7 (1.8)	43.8 (1.9)	34.9 (1.1)	38.0 (1.4)	27.3 (1.9)
Lower torso	23.4 †† (2.6)	58.7 (3.7)	49.3 †† (4.5)	47.8 (4.5)	49.8 †† (6.3)	19.0 (1.8)	59.7 (4.5)	41.1 (2.8)	47.1 (3.1)	44.0 (3.7)

- 1) '\*' and '†' mean significant difference between age groups (\* p<0.05, † p<0.01, + Elderly>Young, - Elderly<Young).
- 2) The data for the young is cited from Ae *et al.* (1992).
- 3) The figure in parenthesis means standard deviation.
- 4) %Mass is percentage of each segment mass to the body mass.
- 5) %CM is percentage of the distance between the segment's proximal end (upper end of thorax for the upper torso, midpoint of both lower for the lower torso, toe for the foot) and the segment CM to the segment length.
- 6) %kx, %ky and %kz are the percentages of radius of gyration to the segment length.

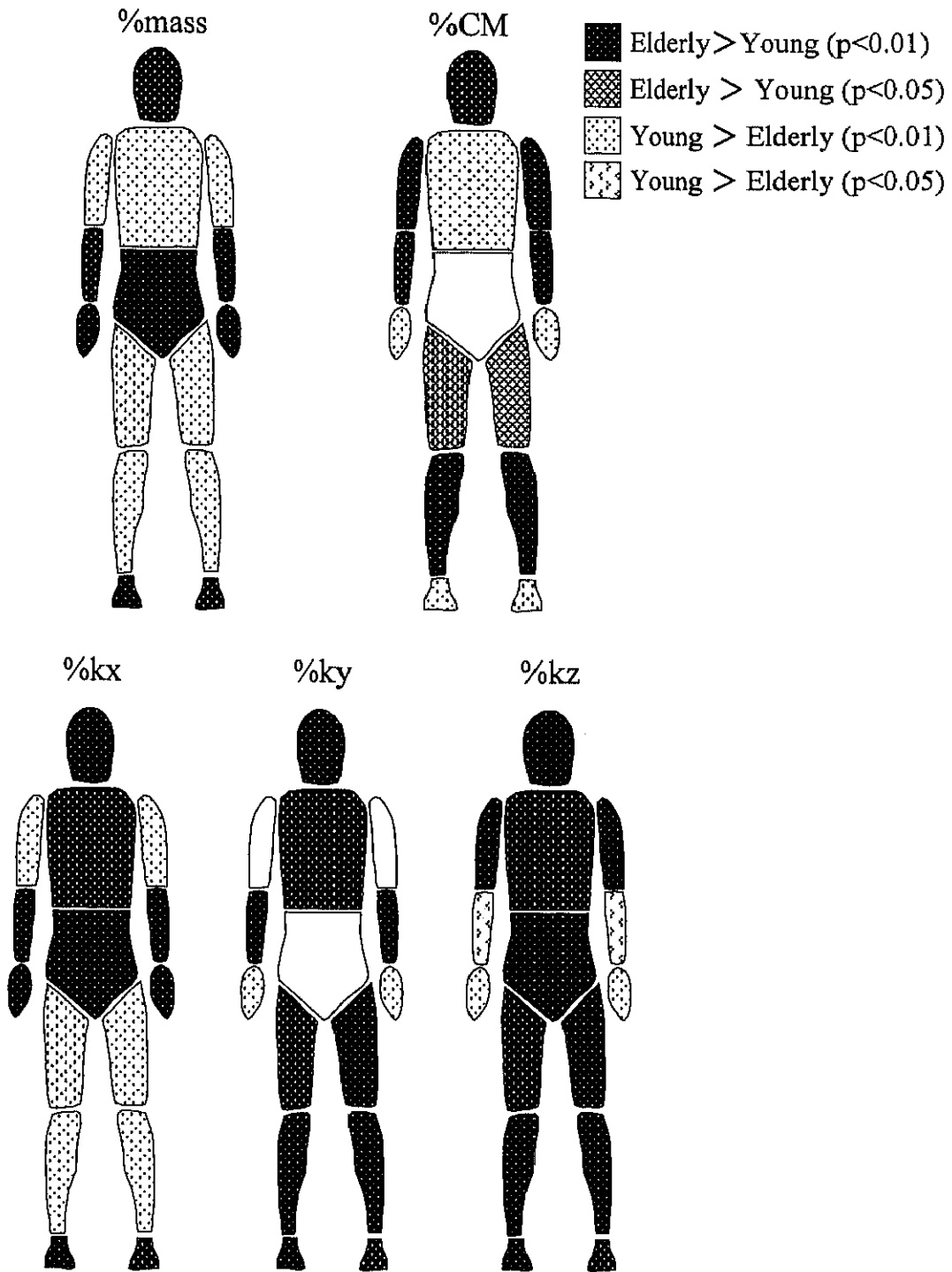


Figure 3-5

Differences of body segment inertia characteristics between the generations  
 ( Japanese elderly male VS. Japanese young male )

Data of young is cited from Ae *et al.* (1992).

者では上腕，大腿，下腿，上腕の質量比が青年よりも小さかった。これらの差が生じた理由として，阿江らが用いた被験者は競技者であり，これらの部分の筋量が大いと考えられること，高齢者では加齢にともなう筋量の減少が生じていると考えられることなどがあげられる。

#### 3.4.2.2 質量中心比

男性では胴体と下腕を除く身体部分の質量中心比について，女性では前腕，足および下腕を除く身体部分の質量中心比について高齢者と青年で有意な差がみられた。質量中心比では高齢男性は頭部，上腕，前腕，大腿，下腿が，高齢女性は頭部，胴体，上腕，大腿，下腿が青年よりも大きかった。このことから，高齢者は青年に比べ，四肢の身体部分ではより遠位端側に質量中心が位置しているといえる。特に上腕，大腿，下腿は青年よりも質量比が小さい部分であることから，これらの部分の質量中心位置がより遠位端側にあるのは中枢端に近い部分の質量の減少が原因の一つとして考えられる。

#### 3.4.2.3 回転半径比

回転半径比では，男女の各軸とも8～10の身体部分で高齢者と青年で有意な差がみられ，その大部分で青年よりも高齢者が大きかった。このことより，高齢者では青年に比べて，質量や部分長のわりには身体部分が回転しにくいという形態的特徴をもつといえる。

以上のことから，日本人高齢者は日本人青年と異なる身体部分慣性特性をもつことが明らかになった。したがって，高齢者の動作分析において青年のBSPを用いることは望ましくないと考えられる。また，このようなBSPの相違は動作分析データのみではなく，様々な動作自体にも影響を及ぼすと考えられる。

### 3.4.3 人種間にみられる身体部分慣性特性の違い

本研究で得られた日本人高齢者の身体部分慣性特性をカナダ人（白人種）高齢者のもの（Jensen et al., 1993; 1994）と比較する。ただし，Jensen et al.は質量中心についての報告を行っていないので，ここでは身体部分の質量，質量比，慣性モーメントについての比較を行う。また，彼らは質量および慣性モーメントについては平均値と標準偏差を，質量比については平均値のみを報告しているため，質量および慣性モーメントについては統計的な差の検討を行い，質量比については平均値のみの比較を行うことにする。

表 3-5(a)および表 3-5(b)は日本人高齢者とカナダ人高齢者の身体部分質量，慣性モーメントおよび質量比を平均値で示したものである。表 3-5(a)における\*印は危険率 5%水準で，†印は危険率 1%水準で有意な人種差が認められたことを意味する。また，+は日本人の値がカナダ人よりも有意に大きいことを，-は小さいことを意味する。また，図 3-6 は日本人高齢男性とカナダ人高齢男性の身体部分慣性特性の違いを図示したものである。

#### 3.4.3.1 質量，質量比

男女とも下胴の質量はカナダ人で顕著に大きく，逆に上胴では日本人の方が大きかった（表 3-5(a)参照）。本研究では上胴と下胴の境目を最下肋骨下縁としたが，Jensen et al. は剣状突起としているので，この差は上胴と下胴の分け方の違いによるものである。

上胴と下胴を除けば，男性では上腕，前腕，大腿，下腿，足の質量，女性では頭部，上腕，大腿，下腿，足の質量において日本人の方がカナダ人よりも小さかった。男女とも上腕および大腿でカナダ人との差が顕著であった。このようにカナダ人に比べ，日本人で身体部分質量が小さいのは，

Table 3-5(a) Comparison of the body segment inertia between Japanese and Canadian  
( segment mass and segment moment of inertia )

Segment	Japanese Elderly (Male)				Canadian Elderly (Male)			
	Mass (kg)	Moment of inertia			Mass (kg)	Moment of inertia		
		Ix (kg·cm <sup>2</sup> )	Iy (kg·cm <sup>2</sup> )	Iz (kg·cm <sup>2</sup> )		Ix (kg·cm <sup>2</sup> )	Iy (kg·cm <sup>2</sup> )	Iz (kg·cm <sup>2</sup> )
Head	5.08 (0.55)	270.7 †+ (58.1)	283.3 †+ (58.4)	182.4 †+ (32.6)	5.52 (0.80)	204.4 (28.9)	210.7 (30.9)	144.7 (22.2)
Torso	28.56 (6.4)	9108.9 (2752.4)	9315.6 (2828.3)	2680.2 (1000.5)	40.99			
Upper arm	1.43 †- (0.32)	78.3 †- (24.9)	78.4 †- (23.1)	17.2 †- (7.6)	2.56 (0.43)	197.7 (44.0)	211.9 (46.3)	37.0 (12.0)
Forearm	0.97 *- (0.18)	44.4 *- (12.3)	44.4 *- (12.3)	6.9 (2.3)	1.40 (0.34)	77.1 (24.2)	78.4 (25.1)	12.3 (5.5)
Hand	0.43 (0.11)	8.4 (3.3)	8.2 (3.3)	2.4 (1.0)	0.52 (0.16)	13.1 (5.9)	11.0 (4.7)	3.9 (2.0)
Thigh	5.27 †- (1.05)	495.1 †- (141.5)	535.5 †- (154.9)	198.9 (73.0)	7.54 (1.14)	1039.4 (272.2)	1081.6 (265.5)	241.1 (55.5)
Shank	2.67 †- (0.49)	237.4 †- (75.0)	274.5 †- (80.8)	71.5 †+ (28.3)	3.40 (0.34)	362.1 (56.1)	369.0 (56.7)	53.0 (9.2)
Foot	0.98 *- (0.17)	32.6 †- (9.1)	9.6 (3.0)	33.2 †- (9.3)	1.12 (0.16)	42.9 (11.3)	9.9 (2.4)	44.7 (11.9)
Upper torso	16.47 †+ (3.49)	2477.3 †+ (871.8)	2292.0 †+ (718.7)	1510.6 *+ (498.9)	11.53 (0.80)	1214.7 (223.8)	839.7 (100.2)	1304.6 (165.6)
Lower torso	12.09 †- (3.51)	1136.9 †- (538.8)	1097.9 †- (536.2)	1097.7 †- (553.7)	29.46 (4.88)	5908.7 (1606.1)	5352.1 (1593.5)	3564.1 (962.6)
Whole body	57.12 (10.57)				79.57			

Segment	Japanese Elderly (Female)				Canadian Elderly (Female)			
	Mass (kg)	Moment of inertia			Mass (kg)	Moment of inertia		
		Ix (kg·cm <sup>2</sup> )	Iy (kg·cm <sup>2</sup> )	Iz (kg·cm <sup>2</sup> )		Ix (kg·cm <sup>2</sup> )	Iy (kg·cm <sup>2</sup> )	Iz (kg·cm <sup>2</sup> )
Head	4.41 *- (0.47)	208.2 †+ (47.2)	225.3 †+ (45.3)	144.9 *+ (25.9)	4.74 (0.50)	143.6 (34.6)	164.0 (29.4)	127.0 (27.3)
Torso	25.25 (5.16)	6690.1 (1743.9)	6779.0 (1759.8)	2324.1 (843.9)	29.64			
Upper arm	1.29 †- (0.25)	62.5 †- (18.8)	62.9 †- (17.1)	15.8 †- (8.8)	2.08 (0.35)	137.4 (38.5)	144.2 (40.7)	25.3 (7.7)
Forearm	0.84 (0.16)	34.5 (9.9)	34.4 (9.9)	5.6 *+ (2.1)	0.72 (0.29)	47.6 (37.6)	48.6 (40.0)	4.7 (1.1)
Hand	0.31 (0.07)	5.0 *- (1.6)	4.9 (1.6)	1.4 (0.4)	0.32 (0.07)	6.3 (2.1)	5.1 (2.1)	1.7 (0.6)
Thigh	4.95 †- (0.86)	416.6 †- (111.4)	451.4 †- (115.8)	178.1 †- (55.2)	8.18 (1.11)	1190.3 (276.4)	1227.3 (283.8)	272.7 (62.3)
Shank	2.46 *- (0.43)	176.9 †- (56.9)	213.0 *- (54.6)	68.2 †+ (23.7)	2.79 (0.36)	247.7 (61.8)	248.8 (63.1)	39.8 (8.2)
Foot	0.77 *- (0.11)	21.2 †- (5.2)	6.1 (1.5)	21.8 †- (5.5)	1.01 (0.33)	26.1 (5.3)	5.5 (1.2)	26.8 (5.1)
Upper torso	13.26 †+ (2.88)	1584.1 †+ (555.7)	1509.3 †+ (498.5)	1134.4 †+ (428.5)	9.99 (1.86)	991.8 (312.9)	747.9 (227.4)	854.7 (251.0)
Lower torso	11.99 †- (2.73)	1078.9 †- (344.6)	1025.8 †- (370.2)	1115.6 †- (412.6)	19.65 (1.83)	2851.3 (432.1)	2526.7 (417.4)	1926.0 (343.4)
Whole body	50.86 (8.19)				64.14			

- 1) '\*' and '†' mean significant difference between race groups (\* p<0.05, † p<0.01, + Japanese>Canadian, - Japanese<Canadian).
- 2) The data for the Canadian is cited from Jensen *et al.* (1993; 1994).
- 3) The figure in parenthesis means standard deviation.
- 4) Ix, Iy, and Iz of foot are about transverse axis in the standing posture, longitudinal axis (axis through the to and vertical axis in the standing posture, respectively).
- 5) There are some blank spaces because the data were not reported.



Table 3-5(b) Comparison of the body segment inertia between Japanese and Canadian (%mass)

Segment	Japanese Elderly		Canadian Elderly		Difference (%)	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female
Head	9.1	8.8	6.9	7.4	+24.2	+15.9
Torso	49.7	49.3	51.5	46.2	-3.6	+6.3
Upper arm	2.5	2.5	3.2	3.2	-28.0	-28.0
Forearm	1.7	1.6	1.8	1.1	-5.9	+31.3
Hand	0.8	0.6	0.7	0.5	+12.5	+16.7
Thigh	9.2	9.8	9.5	12.8	-3.3	-30.6
Shank	4.7	4.8	4.3	4.4	+8.5	+8.3
Foot	1.7	1.5	1.4	1.2	+17.6	+20.0
Upper torso	28.8	26.0	14.5	15.6	+49.7	+40.0
Lower torso	20.9	23.4	37.0	30.6	-77.0	-30.8

1)The data for the Canadian is cited from Jensen et al. (1994).

2) Difference (%) = ( ( Japanese data - Canadian data ) / Japanese data ) × 100.

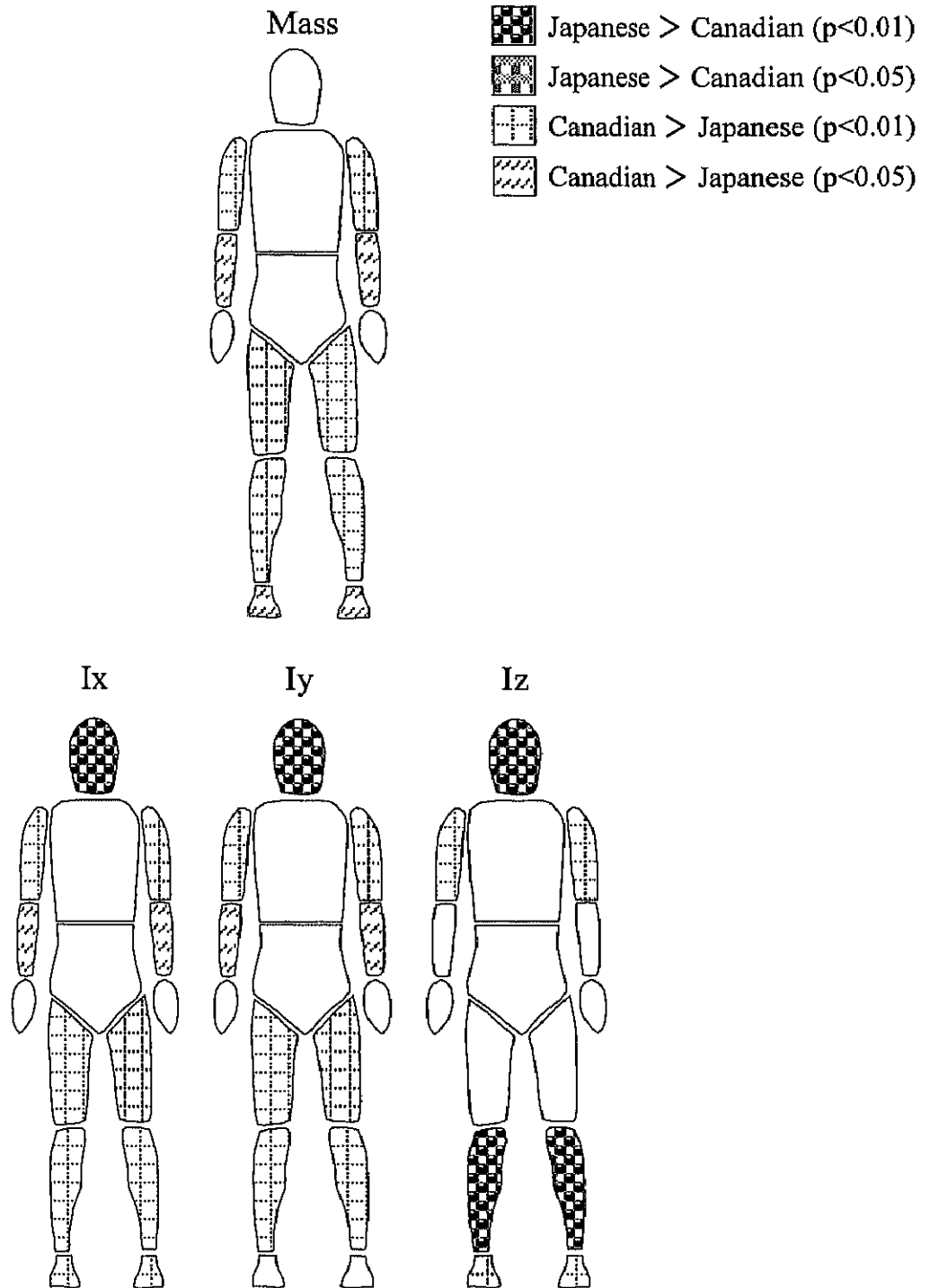


Figure 3-6

Differences of body segment inertia characteristics between the races  
 ( Japanese elderly male VS. Canadian elderly male )

Data of Canadian is cited from Jensen *et al.*(1994). Upper and lower torsos are excluded from the comparison because the definition of boundary of the upper and lower torsos is different between this study and the study of Jensen *et al.* (1994).

主に体重の差によるものであると考えられるが、その程度は部分間で大きく異なっていた。身体部分質量比は男性では頭部、手、下腿、足で日本人の方が大きく、女性では頭部、胴体、前腕、手、下腿、足で日本人の方が大きかった（表 3-5(b)参照）。

表 3-5 でみられた質量および質量比の比較は、日本人高齢者とカナダ人高齢者の身体部分質量は絶対値が異なるだけでなく、質量分布も異なることを示している。身体部分の質量比の比較から、日本人ではカナダ人に比べて、四肢の中枢側の身体部分と末端側の身体部分との質量比の差が小さいことがわかる。言い換えると、カナダ人は日本人よりもより先細りの四肢をもっているといえる。

#### 3.4.3.2 主慣性モーメント

前述のように上胴と下胴の差は定義の違いによるものであるので、比較の対象からは除くことにする。

男性、女性とも、頭部の主慣性モーメントは全ての軸まわりについて日本人がカナダ人よりも有意に大きかった。また、男性では下腿の Z 軸まわりの慣性モーメントが、女性では前腕と下腿の Z 軸まわりの慣性モーメントがカナダ人より日本人で有意に大きかった。上腕と大腿では、特に日本人とカナダ人の差が大きく、X 軸および Y 軸まわりの慣性モーメントはカナダ人の方が 2~2.8 倍も大きかった。また、下腿の質量は男女とも日本人の方が小さいにもかかわらず、Z 軸まわりの慣性モーメントは男女とも日本人の方が大きかったことから、カナダ人に比べ日本人の下腿は太いことが推測できる。

このように、身体部分の質量および慣性モーメントが日本人とカナダ人で異なるのは、被験者の年齢層がわずかに異なる（本研究；男性 62-86 歳，女性 61-83 歳，Jensen et al.；男性 63-75 歳，女性 63-75 歳）ことより

も,日本人高齢者とカナダ人高齢者の形態的相違が大きく反映されたものであると考えられる。

#### 3.4.4 加齢にともなう身体部分慣性特性の横断的变化

表 3-6 は身体各部分の慣性特性と年齢の相関係数を示したものである。これらの相関係数は本研究の被験者の年齢範囲における加齢にともなう身体部分慣性特性の横断的变化の有無を表しているといえる。

年齢との有意な相関 ( $p < 0.05$ ) が多くの部分の質量および慣性モーメントにみられた。男性では全ての部分の質量と年齢との間に有意な負の相関がみられた。女性では胴体, 上腕, 大腿, 下腿, 下胴の質量と年齢との間に有意な負の相関がみられた。これらの結果は主に, 体重が加齢にともない減少することに影響されたものであると考えられる。なお, 年齢と体重との相関は男性で  $-0.357$  ( $p < 0.01$ ), 女性で  $-0.272$  ( $p < 0.01$ )であった。

質量比は男性では頭部, 胴体に, 女性では頭部, 手, 足に年齢と有意な相関が認められた。これらのうち, 男性の頭部, 女性の頭部, 手, 足では相関係数は正であった。これらの部分は他の部分よりも骨が占める割合が大きい部分である。これらについては, 骨以外の組織が占める割合が大きい部分 (大腿, 上腕など) で筋などの他の組織が減少することにより, 部分の質量が減少し, 相対的に骨が占める割合が大きい部分の質量比が増大したと推測できる。しかし, 相関係数はいずれも低かったので, 身体部分の質量と年齢との関係は, 横井ら(1986)が報告した幼少期にみられるほど強いものではないといえる。

#### 3.4.5 身体部分慣性係数の推定式

表 3-3 に示した BSP の平均値と個人の体重および部分長の測定値を用

Table 3-6 Correlation coefficients between body segment inertia parameters and age

Male						
Segment	Mass	%Mass	%CM	Moment of inertia		
				Ix	Iy	Iz
Head	-0.267 *	0.306 **	-0.095	-0.189	-0.215 *	-0.213 *
Torso	-0.362 **	-0.296 **	-0.230 *	-0.395 **	-0.406 **	-0.280 **
Upper arm	-0.359 **	-0.120	-0.153	-0.315 **	-0.305 **	-0.065
Forearm	-0.390 **	-0.077	0.085	-0.269 *	-0.264 *	-0.387 **
Hand	-0.210 *	0.090	0.008	-0.122	-0.199	-0.223 *
Thigh	-0.244 *	0.206	-0.049	-0.152	-0.175	-0.261 *
Shank	-0.266 *	0.171	0.075	-0.330 **	-0.226 *	0.144
Foot	-0.290 **	0.122	-0.111	-0.257 *	-0.274 **	-0.215 *
Upper torso	-0.359 **	-0.102	-0.281 **	-0.385 **	-0.336 **	-0.292 **
Lower torso	-0.308 **	-0.199	0.101	-0.288 **	-0.227 *	-0.283 **
Female						
Segment	Mass	%Mass	%CM	Moment of inertia		
				Ix	Iy	Iz
Head	-0.175	0.242 *	-0.113	-0.161	-0.115	-0.130
Torso	-0.229 *	-0.070	-0.079	-0.269 *	-0.276 **	-0.182
Upper arm	-0.277 **	-0.086	0.113	-0.270 *	-0.289 **	-0.112
Forearm	-0.128	0.166	0.120	-0.126	-0.118	-0.092
Hand	0.068	0.278 **	-0.043	0.092	0.071	0.036
Thigh	-0.296 **	-0.067	-0.059	-0.216 *	-0.242 *	-0.340 **
Shank	-0.340 **	-0.128	0.031	-0.411 **	-0.311 **	0.122
Foot	0.006	0.283 **	0.042	-0.025	0.017	-0.031
Upper torso	-0.182	0.041	-0.084	-0.162	-0.134	-0.143
Lower torso	-0.242 *	-0.133	0.052	-0.280 **	-0.216 *	-0.217 *

\* p<0.05 \*\* p<0.01

いれば、個人の形態的特徴を反映した身体部分の質量、質量中心位置、主慣性モーメントを得ることができるであろう。しかし、より精度良くBSPを推定できるように、本研究では重回帰分析を用いて身体部分の質量、質量中心位置、3軸まわりの主慣性モーメントの推定式の作成を試みた。

推定式の実用性を考慮すると、予測変数は、測定が容易で、その測定値の信頼性および再現性が高いものであることが望ましい。本研究では、年齢、身長、体重、部分長の4つをBSPの予測変数として選択し、ステップワイズ法による重回帰分析を行った。

表3-7～表3-9は得られた推定式の係数を示したものである。また表中には重相関係数(R)および推定値と測定値の標準誤差を示した。ここでの重相関係数は身体各部分の慣性特性の推定値と測定値の相関を示すものである。男女とも前腕、下腿および足の質量中心比の重回帰分析では、どのステップにおいても、4つの予測変数（年齢、身長、体重、部分長）の全てが有意な回帰係数をもたなかった。したがって、これらについては、表中の推定係数の切片（ $b_0$ ）の箇所に質量中心比の平均値を示した。

重相関係数は質量では0.576～0.979、質量中心比では0.328～0.798、主慣性モーメントでは0.561～0.972と全て1%水準で有意であり、しかもそのほとんどが高い値であった。このことは、これらの推定式により、日本人高齢者のBSPの推定が可能であることを示唆している。

### 3.5 要約

ここでは、数学モデルを用いて日本人高齢男女の身体部分慣性係数(BSP)を算出した。また、ステップワイズ重回帰分析法を用いて、年齢、身長、体重、部分長を予測変数とする高齢男女のBSPの推定式を作成した。その結果、以下のことが明らかになった。

Table 3-7 Coefficients of estimation equation for the segment mass

	Segment	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	R	Standard error (kg)
Male	Head	0.29733	-	-	0.03502	19.40059	0.803	0.331
	Whole torso	9.41082	-	-14.07063	0.61885	12.56593	0.979	1.320
	Upper arm	0.45388	-0.00532	-0.95366	0.02726	4.62430	0.925	0.123
	Forearm	-0.23522	-0.00388	-	0.01304	3.18960	0.897	0.082
	Hand	-1.05031	-	0.76241	-	3.32804	0.614	0.086
	Thigh	-3.61530	-	-	0.08379	11.59403	0.929	0.393
	Shank	-1.25106	-	-	0.03406	5.58041	0.875	0.240
	Foot	-1.01815	-	-	0.00684	6.56000	0.787	0.108
	Upper torso	1.41482	-	-5.80422	0.27621	28.90835	0.920	1.389
	Lower torso	8.50783	-	-14.89843	0.30706	49.49505	0.955	1.059
Female	Head	-0.61367	-	-	0.03711	22.12211	0.781	0.296
	Whole torso	10.61688	-	-15.76407	0.62397	13.61508	0.971	1.262
	Upper arm	-0.93173	-	-	0.02141	4.09693	0.795	0.153
	Forearm	-0.10555	-	-0.63963	0.01624	4.78388	0.864	0.084
	Hand	-0.72577	0.00330	0.33011	0.00249	2.37068	0.576	0.054
	Thigh	-3.88222	-	-	0.08634	13.49672	0.901	0.376
	Shank	-1.97321	-	-	0.03738	7.73813	0.878	0.206
	Foot	-0.77528	-	-	0.00382	5.88468	0.641	0.088
	Upper torso	8.53200	-	-10.63016	0.31219	17.54475	0.890	1.337
	Lower torso	3.58737	-	-10.45922	0.30083	44.01424	0.968	0.694

Estimate equation: Segment mass (kg) = a<sub>0</sub> + a<sub>1</sub>×AGE + a<sub>2</sub>×SH + a<sub>3</sub>×BM + a<sub>4</sub>×SGL

where AGE is chronological age (yr.), SH is standing height (m), BM is body mass (kg) and SGL is the segment length (m).

Table 3-8 Coefficients of estimation equation for the segment CM ratio

	Segment	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	R	Standard error
Male	Head	1.18626	-	-	0.00180	-2.93363	0.535	0.040
	Torso	0.71663	-	-0.33037	0.00175	0.42223	0.673	0.025
	Upper arm	0.60733	-	-	0.00053	-0.30866	0.428	0.015
	Forearm	0.427 <sup>¶</sup>	-	-	-	-	-	-
	Hand	0.57277	-	0.38063	-	-4.38965	0.368	0.095
	Thigh	0.61032	-	-0.16221	0.00087	0.21785	0.373	0.021
	Shank	0.423 <sup>¶</sup>	-	-	-	-	-	-
	Foot	0.581 <sup>¶</sup>	-	-	-	-	-	-
	Upper torso	0.57081	-	-0.39396	0.00227	1.13442	0.798	0.032
	Lower torso	0.80937	-	-	-	-1.04893	0.585	0.036
	Female	Head	1.10042	-	-	0.00178	-2.48271	0.502
Torso		0.37578	-	-	-	0.31545	0.439	0.023
Upper arm		0.49021	0.00105	-	0.00163	-0.29465	0.608	0.017
Forearm		0.423 <sup>¶</sup>	-	-	-	-	-	-
Hand		0.78349	-	0.40873	-0.00315	-6.08294	0.592	0.069
Thigh		0.43579	-	-	0.00075	-	0.328	0.018
Shank		0.424 <sup>¶</sup>	-	-	-	-	-	-
Foot		0.591 <sup>¶</sup>	-	-	-	-	-	-
Upper torso		0.39912	-	-0.22305	0.00196	0.97061	0.778	0.024
Lower torso		0.55097	-	0.19633	-0.00151	-0.91445	0.626	0.030

Estimate equation: Segment CM (ratio) = b<sub>0</sub> + b<sub>1</sub>×AGE + b<sub>2</sub>×SH + b<sub>3</sub>×BM + b<sub>4</sub>×SGL

where Segment CM (ratio) is the ratio of the distance between the segment's proximal end (upper end of thorax for the upper torso, midpoint of both lowest ribs for the lower torso, toe for the foot) and the segment CM to the segment length, AGE is chronological age (yr.), SH is standing height (m), BM is body mass (kg) and SGL is the segment length (m).

¶ The data of forearm, shank and foot is not from multiple regression analysis but the mean value. See text for the detail.



Table 3-9(a) Coefficients of estimation equation for the segment principal moment of inertia (for male)

Segment	c <sub>0</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	R	Standard error (kg·cm <sup>2</sup> )	
Ix	Head	-275.56	-	-	2.9967	2619.6	0.734	39.95
	Torso	-14049.5	-	3206.6	203.60	13356.9	0.972	653.39
	Upper arm	-88.026	-0.50220	-59.735	1.5643	728.59	0.894	11.42
	Forearm	-106.68	-	-	0.63024	489.39	0.892	5.61
	Hand	-38.505	-	22.108	-	147.40	0.683	2.40
	Thigh	-1116.2	-	-	8.1863	3235.2	0.899	62.57
	Shank	-585.91	-	-	3.2004	1810.6	0.850	39.95
	Foot	-92.276	-	-	0.27358	445.93	0.836	5.04
	Upper torso	-3958.3	-	-	50.966	12032.4	0.914	358.00
	Lower torso	489.62	-	-2222.7	42.460	8952.0	0.915	220.85
Iy	Head	-204.36	-	-	2.9653	2223.0	0.688	42.83
	Torso	-10995.8	-	-	212.54	16912.2	0.964	757.20
	Upper arm	-190.90	-	-	1.3455	670.08	0.918	9.26
	Forearm	-106.75	-	-	0.62391	491.06	0.891	5.63
	Hand	-38.926	-	22.877	-	135.03	0.671	2.44
	Thigh	-1273.2	-	-	9.0696	3651.0	0.918	62.04
	Shank	-697.99	-	-	3.0878	2250.5	0.892	36.96
	Foot	-17.693	-	-	0.13132	80.575	0.711	2.11
	Upper torso	-2700.8	-	-	45.986	8078.2	0.904	311.16
	Lower torso	670.47	-	-2415.8	41.215	9758.7	0.912	223.60
Iz	Head	-60.910	-	-	2.0709	872.92	0.761	21.42
	Torso	2404.4	-	-2695.3	105.20	-3035.2	0.945	334.33
	Upper arm	-33.950	-	-	0.32955	112.57	0.593	6.19
	Forearm	-3.5836	-	-	0.18281	-	0.834	1.28
	Hand	-8.8817	-	5.0489	0.02221	25.354	0.602	0.83
	Thigh	-386.36	-	-	5.7882	720.25	0.910	30.67
	Shank	-299.26	1.7956	-	1.0136	502.92	0.647	21.96
	Foot	-93.138	-	-	0.30492	444.71	0.843	5.04
	Upper torso	677.90	-	-1171.4	47.040	-	0.907	212.92
	Lower torso	1292.6	-	-2595.7	52.140	4812.2	0.930	206.54

Estimate equation: Segment principal moment of inertia (kg·cm<sup>2</sup>) = c<sub>0</sub> + c<sub>1</sub>×AGE + c<sub>2</sub>×SH + c<sub>3</sub>×BM + c<sub>4</sub>×SGL

where AGE is chronological age (yr.), SH is standing height (m), BM is body mass (kg) and SGL is the segment length (m).

Except for foot, X, Y and Z axis are transverse, anteroposterior, and longitudinal axes, respectively. Ix, Iy, and Iz of foot are about transverse axis in the standing posture, longitudinal axis (axis through the toe and heel), and vertical axis in the standing posture, respectively. Note that the unit of the values from the equations is not kg·m<sup>2</sup> but kg·cm<sup>2</sup>.

Table 3-9(b) Coefficients of estimation equation for the segment principal moment of inertia (for female)

Segment	c <sub>0</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	R	Standard error (kg·cm <sup>2</sup> )
Ix Head	-271.08	-	-	2.9035	2336.3	0.661	35.83
Torso	-9078.3	-	-	161.21	17128.7	0.966	458.27
Upper arm	-162.26	-	-	1.0878	615.81	0.739	12.83
Forearm	-64.139	-	-37.282	0.64767	546.00	0.829	5.63
Hand	-20.431	0.07853	7.2146	0.05041	87.212	0.650	1.21
Thigh	-1000.5	-	-	8.3360	3021.3	0.885	52.51
Shank	-329.20	-2.0967	-	2.8770	1570.0	0.820	33.10
Foot	-56.831	-	-	0.12513	311.82	0.662	3.93
Upper torso	-2609.9	-	-	45.513	7427.3	0.866	280.90
Lower torso	-267.31	-	-1194.6	34.699	6950.7	0.955	104.11
Iy Head	-223.51	-	-	2.9558	2103.3	0.674	33.88
Torso	-8978.1	-	-	163.76	16808.8	0.964	475.41
Upper arm	-175.34	-	-	1.0176	677.95	0.830	9.63
Forearm	-61.218	-	-39.467	0.66101	543.52	0.828	5.65
Hand	-19.649	0.06612	7.3155	0.03874	92.443	0.654	1.20
Thigh	-1056.1	-	-	8.8444	3217.9	0.905	49.95
Shank	-539.37	-	-	3.3179	1786.9	0.893	24.86
Foot	-13.876	-	-	0.04356	77.401	0.604	1.22
Upper torso	-1712.3	-	-	45.410	3604.3	0.839	274.09
Lower torso	-725.46	-	-1006.0	35.673	7362.8	0.934	134.09
Iz Head	-82.017	-	-	1.9756	890.83	0.709	18.51
Torso	-821.93	-	-	98.505	-4219.1	0.891	388.29
Upper arm	32.808	-	-73.143	0.56702	223.33	0.561	7.42
Forearm	3.5807	-	-11.962	0.21656	38.661	0.818	1.21
Hand	-5.5333	0.02191	2.3076	0.02102	11.068	0.575	0.37
Thigh	-303.48	-	-	5.3007	644.72	0.830	31.20
Shank	-11.287	1.1744	-199.69	1.5597	634.79	0.614	19.16
Foot	-61.995	-	-	0.15097	331.14	0.681	4.06
Upper torso	1021.7	-	-1554.0	47.026	-	0.833	240.04
Lower torso	273.60	-	-1725.7	47.654	4947.6	0.956	123.57

Estimate equation: Segment principal moment of inertia (kg·cm<sup>2</sup>) = c<sub>0</sub> + c<sub>1</sub>×AGE + c<sub>2</sub>×SH + c<sub>3</sub>×BM + c<sub>4</sub>×SGL

where AGE is chronological age (yr.), SH is standing height (m), BM is body mass (kg) and SGL is the segment length (m).

Except for foot, X, Y and Z axis are transverse, anteroposterior, and longitudinal axes, respectively. Ix, Iy, and Iz of foot are about transverse axis in the standing posture, longitudinal axis (axis through the toe and heel), and vertical axis in the standing posture, respectively. Note that the unit of the values from the equations is not kg·m<sup>2</sup> but kg·cm<sup>2</sup>.

- ①日本人高齢男女間には、身体部分慣性特性に有意な性差がみられ、前腕、手、足、上腕の質量比は男性が、大腿、下腿、下腕の質量比は女性が大きかった。
- ②日本人高齢者と日本人青年の身体部分慣性特性には有意な差がみられ、高齢者の上腕、大腿、下腿、上腕の質量比は青年よりも小さかった。
- ③日本人高齢者とカナダ人高齢者の身体部分慣性特性には有意な差がみられ、日本人では四肢の中枢に近い部分（上腕、大腿）と末端に近い部分（前腕、手、下腿、足）の質量比の差がカナダ人よりも小さかった。
- ④本研究で作成した推定式から得られる BSP の推定値と測定値の間には、質量では 0.576～0.979、質量中心比では 0.328～0.798、主慣性モーメントでは 0.561～0.972 と高い相関関係がみられた。したがって、本研究で作成した推定式から、日本人高齢者（男性 61.9-86.2 歳、女性 61.3-82.8 歳）の BSP を推定することが可能であると考えられる。