

国内一流競技者の競技別身体部分慣性係数

Body segment inertial parameters for Japanese elite athletes in various competitive events

横澤俊治¹、辻村諒太²、窪康之¹、高橋英幸¹、岡田英孝³

要 旨

本研究では、日本人アスリート 683 名の精密な身体部分慣性係数を算出し、その競技別平均値を提示した。光学式人体形状計測装置から得られた身体表面の 3 次元位置座標データから、CAD ソフトウェアによって各身体部分の体積、質量中心比、および密度を 1 g/cm^3 と仮定した慣性モーメントを算出した。さらに、別途計測した MRI による横断面画像をもとに身体部分密度を推定し、この情報を CAD データに付加することによって身体部分質量比、慣性モーメントを算出した。アスリートを対象として身体重心やキネティクスの変量进行分析するには、本資料における当該種目の身体部分慣性係数平均値を利用することが可能となった。

Key words: 身体部分慣性係数、身体部分密度、3 次元 CAD、ボディーラインスキャナー、MRI

¹国立スポーツ科学センター、²川崎重工業株式会社、³電気通信大学

〒115-0056 東京都北区西が丘 3-15-1

TEL 03-5963-0224

FAX 03-5930-0232

E-mail toshiharu.yokozawa@jpnpsport.go.jp

受付日：2015 年 3 月 9 日

受理日：2015 年 7 月 3 日

I. 背景

身体部分慣性係数 (body segment inertial parameters; BSP) とは身体部分の質量、質量中心比、慣性モーメントの総称であり²⁾、トップアスリートの BSP を知ることは形態に関する競技特性の把握に寄与すると考えられる。また、動作解析において身体重心や関節トルク、関節トルクパワー、角運動量などのキネティクスの変量を算出する際には BSP の情報が必須となる。

BSP の算出方法は、屍体標本を用いた直接法、生体標本から組織を識別する方法、数学モデルによる方法に大別される。屍体標本を用いた研究としては Dempster (1955)⁸⁾ や Clauser et al. (1969)⁷⁾、Chandler et al. (1975)⁵⁾ の報告が代表的である。この手法は実測であるという利点があるが、対象の多くが高齢者でありアスリートにそのまま用いるのは不適切であろう。一方、生体標本を用いたものには水置換法^{18), 19)}、放射線照射法^{9), 12)}、磁気共鳴画像法 (以下 MRI)^{4), 6)} などが報告されている。これらの手法では識別された組織の密度が既知であれば BSP を求めることができるが、いずれも全身について測定するには膨大な時間を要するため、多くの被験者に対して収集することは困難となっていた。数学モデルによる方法は、身体部分を特定の幾何学形状の剛体と仮定して体積を計測し、身体部分ごとに一定の密度を乗じるもので、アスリートを対象としたものとしては阿江ら (1992)¹⁾ の係数が代表的である。阿江らは身体部分を積層楕円板に近似して写真計測から体積を求める方法を採用し、被験者数が男子 215 名、女子 80 名と多く、幅広い体型を有していることや、直接計測していないアスリートにも応用できるような体重や部分長から BSP の推定式を作成していることが特徴である。

近年、3次元スキャナーなど形状計測技術の発展により、身体形状を短時間かつ厳密に計測できるようになってきた^{3), 13), 22), 23)}。この技術を活用することで多くのアスリートの全身形状データが比較的速やかに取得できると考えられる。一方、従来

の数学モデルによる方法では身体部分の体積から質量を求める際に、高齢者などの屍体標本にもとづく密度を性別や年齢に関わらずそのまま適用しているが、形態や組織が明らかに異なるアスリートに適用するには限界があると考えられる。

Pearsall et al. (1994)²⁰⁾ は、成年男性を対象として MRI による断面画像から体幹の密度を算出する方法を提案しており、岡田ら (2013)¹⁷⁾ はこれを全身に応用した。以上の手法を取り入れることでより正確な BSP 算出が可能になると考えられる。

以上のことから、精巧な人体形状計測と MRI による身体部分密度算出を併用して多数のトップアスリートの精密な BSP を算出し、これを競技種目ごとに整理することによって競技特性の把握やキネティクスの分析の精度向上が期待できる。そこで本研究では、多くの日本人トップアスリートの精密な BSP を算出し、その競技種目別平均値を提示することを目的とした。

II. 方法

1. 被験者

被験者は日本人トップアスリート 683 名 (男性 363 名、女性 320 名、35 競技 54 種別) とした。各競技種目における被験者の特性は表 1 に示した。いずれも国内の各競技団体の強化指定選手であり、国内一流アスリートである。

Table 1. Characteristics of the subjects for each event.

男子	人数	年齢	身長	体重	女子	人数	年齢	身長	体重
競技種目		[yr]	[m]	[kg]	競技種目		[yr]	[m]	[kg]
陸上競技・短距離、ハードル	8	24.9	1.782	71.4	陸上競技・短距離、ハードル	7	23.7	1.642	51.8
陸上競技・中長距離	16	26.0	1.729	58.1	陸上競技・中長距離	12	27.1	1.613	47.4
陸上競技・跳躍	5	26.0	1.795	68.6	陸上競技・跳躍	9	24.8	1.696	56.2
陸上競技・投擲	7	27.7	1.813	102.5	陸上競技・投擲	6	26.2	1.663	72.5
陸上競技・混成	8	21.6	1.814	76.1	陸上競技・混成	4	23.2	1.698	59.3
競泳	8	23.0	1.784	73.0	競泳	8	24.1	1.678	59.6
飛込	5	21.6	1.671	62.9	飛込	4	19.7	1.593	51.2
水球	8	20.6	1.798	76.0	水球	8	21.2	1.665	58.1
サッカー	6	21.1	1.759	68.9	シンクロナイズドスイミング	8	25.1	1.647	55.6
テニス	8	21.5	1.768	70.3	サッカー	8	24.5	1.618	55.8
ボート	7	27.0	1.800	71.9	テニス	8	24.5	1.623	57.5
ホッケー	8	25.2	1.755	71.2	ボート	6	24.9	1.678	60.1
ボクシング	8	22.7	1.726	64.0	ホッケー	8	26.7	1.631	59.4
バレーボール	8	30.0	1.906	85.3	バレーボール	8	30.0	1.740	66.6
ビーチバレー	4	33.0	1.885	81.8	ビーチバレー	8	30.2	1.742	63.9
体操競技	8	24.1	1.668	57.6	体操競技	8	19.8	1.495	39.9
トランポリン	7	20.0	1.631	57.3	新体操	6	17.6	1.631	47.3
バスケットボール	7	27.1	1.890	83.1	トランポリン	5	13.9	1.576	45.8
レスリング	3	26.7	1.666	66.2	バスケットボール	8	26.2	1.789	70.7
セーリング	7	32.0	1.733	70.7	レスリング	4	26.6	1.625	62.5
ウェイトリフティング	6	25.1	1.721	97.3	セーリング	7	27.8	1.635	59.0
自転車・ロード	3	31.4	1.713	62.4	ウェイトリフティング	5	22.0	1.551	75.2
自転車・トラック	5	24.9	1.762	81.4	ハンドボール	8	29.0	1.698	63.0
卓球	8	23.3	1.726	71.2	自転車・トラック	6	21.6	1.660	64.8
馬術	4	38.2	1.668	60.6	卓球	7	21.3	1.582	53.6
フェンシング	8	25.1	1.743	68.0	フェンシング	8	27.6	1.647	58.6
柔道	8	26.5	1.736	95.0	柔道	8	25.5	1.603	72.4
バドミントン	9	26.4	1.729	66.0	バドミントン	8	24.8	1.637	58.8
ライフル射撃	8	31.4	1.704	65.7	ライフル射撃	7	35.1	1.628	56.2
近代五種	5	27.1	1.762	69.0	カヌー・スプリント	7	25.0	1.653	62.1
ラグビー	7	27.0	1.804	95.7	アーチェリー	8	21.8	1.637	58.1
カヌー・スラローム	4	24.7	1.702	64.2	トライアスロン	8	25.8	1.625	52.7
アーチェリー	8	21.3	1.721	67.8	テコンドー	4	24.3	1.636	59.6
野球	8	27.2	1.790	75.0	スキー・アルペン	8	23.0	1.607	61.9
トライアスロン	8	25.9	1.730	62.8	スキー・クロスカントリー	6	25.4	1.630	55.9
テコンドー	6	23.0	1.756	69.1	スキー・フリースタイル	8	26.9	1.611	55.7
スキー・アルペン	7	24.9	1.757	80.8	スノーボード	7	27.9	1.621	57.5
スキー・クロスカントリー	8	24.8	1.755	71.2	スピードスケート	8	25.5	1.641	60.3
スキー・ジャンプ	8	28.6	1.726	59.5	フィギュアスケート	8	20.8	1.591	48.7
スキー・ノルディック複合	8	22.7	1.716	62.1	ショートトラック	8	21.6	1.600	53.4
スキー・フリースタイル	8	27.3	1.739	73.7	バイアスロン	6	24.7	1.602	57.2
スノーボード	8	22.4	1.725	68.9	アイスホッケー	7	27.2	1.571	56.3
スピードスケート	8	26.5	1.694	67.8	ボブスレー	7	26.6	1.637	67.9
フィギュアスケート	8	21.1	1.658	59.0	リュージュ	3	22.3	1.616	61.8
ショートトラック	8	24.8	1.677	65.1	スケルトン	2	31.5	1.611	61.8
バイアスロン	5	29.9	1.678	63.6	カーリング	8	23.9	1.625	59.2
アイスホッケー	8	21.0	1.751	71.6	全体 (標準偏差)	320	24.9 (5.3)	1.637 (0.071)	58.2 (10.0)
ボブスレー	8	30.2	1.787	87.9					
リュージュ	4	23.6	1.754	76.1					
スケルトン	8	29.0	1.730	76.7					
カーリング	8	21.9	1.715	66.1					
全体 (標準偏差)	363	25.4 (5.3)	1.746 (0.076)	71.5 (13.4)					

2. 人体形状計測

光学式 3 次元人体形状計測装置 (Body line Scanner 3D スポーツ人体計測装置 C8300、浜松ホトニクス社製; 以下、BLS) を用いて被験者の立位姿勢における身体形状を計測した。被験者には水着を着用させ、身体部分を規定するランドマーク 23 点にシールを貼付した。そして装置の中央に立たせ、両足間を約 40cm、両手間を約 110cm 離れた姿勢で計測した (図 1)。光学式三角測量法の原理に基づき、被験者を囲む形で配置した 4 つのセンサーヘッドが頭頂から足部まで移動し、レーザーの光源から対象物までの絶対距離を測定しながら、高さ 2.5 mm 間隔の全身の身体表面の 3 次元位置座標データを取得した。



Figure 1. Measurement of 3-dimensional body geometry by a body line scanner.

3. 全身密度の算出

後述の身体部分密度算出のために全身密度を計測した。全身密度は、体脂肪測定システム (BODPOD、Life Measurement 社製) を用いて被験者が主室に入った際の圧力変化から体容積を求め、体重を体容積で除すことにより算出した。

4. ソリッドモデルの作成

BLS により得られた身体表面の点群座標データを 3 次元 CAD ソフトウェア (SolidWorks 2009、ソリッドワークス社製) に読み込み、身体部分ごとに以下の手順で中身の詰まったモデル、すなわちソリッドモデルを作成した^{13), 22)} (図 2)。まず、3 次元点群座標データを直線で結んだもの (メッシュ) を作成し (図 2a.⇒b.)、これを平滑化した (b.⇒c.)。そしてメッシュの中身を満たし (ソリッド化) (c.⇒d.)、これを部分ごとに切り出して身体部分モデルを作成した (d.⇒e.⇒f.)。身体部分は、阿江ら (1992)¹⁾ の体節区分と同様の定義に従い (表 2 左)、頭、上腕、下腕、左右の上腕、前腕、手、大腿、下腿、足の 15 個とした。

各身体部分の体積、質量中心比、および密度を 1 g/cm^3 とした場合の仮の主慣性モーメントを CAD ソフトウェア上で算出した。これらに、後述する身体部分密度を乗じることにより質量および慣性モーメントを求めることができる。

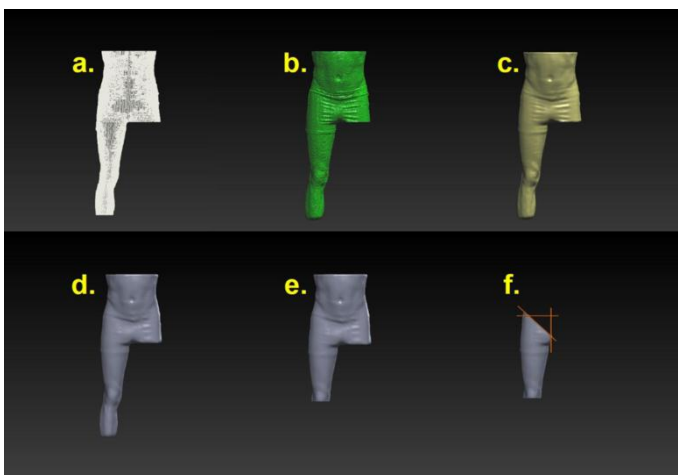


Figure 2.

Procedure for producing the solid model of the body segments.

a. to b.: Building the mesh from 3-dimensional coordinate data.

b. to c.: Smoothing the mesh.

c. to d.: Building the solid model from the mesh model.

d. to e. and f.: Cutting the solid model into the body segments.

Table 2. Definition of the cutting planes and the segment lengths.

部分	切断面定義		部分長定義	
	上端面	下端面	上端点	下端点
頭	なし	第7頸椎高の平面	頭頂点	左右耳珠点の midpoint
上腕	①第7頸椎高の平面 ②肩峰点・脇点・脇点真後ろの任意の点の3点を含む面	左右肋骨下縁の midpoint 高さの平面	胸骨上縁点を含む切断面の面積中心	左右肋骨下縁の midpoint
下腕	左右肋骨下縁の midpoint 高さの平面	股関節中心点, 股点, 股点真後ろの任意の点の3点を含む面	左右肋骨下縁の midpoint	左右股関節中心の midpoint
上腕	肩峰点・脇点・脇点真後ろの任意の点の3点を含む面	橈骨点を含み, 腕の長軸に対して垂直な面	肩峰点および脇点を含む切断面の面積中心	橈骨点面を含む切断面の面積中心
前腕	橈骨点を含み, 腕の長軸に対して垂直な面	茎突点を含み, 腕の長軸に対して垂直な面	橈骨点を含む切断面の面積中心	茎突点を含む切断面の面積中心
手	茎突点を含み, 腕の長軸に対して垂直な面	なし	茎突点を含む切断面の面積中心	第三中手骨頭を含む切断面の面積中心
大腿	股関節中心点, 股点, 股点真後ろの任意の点の3点を含む面	脛骨点高さの平面	股関節中心	脛骨点を含む切断面の面積中心
下腿	脛骨点高さの平面	果点高さの平面	脛骨点を含む切断面の面積中心	果点を含む切断面の面積中心
足	果点高さの平面	床面	つま先点	踵点

5. 身体部分密度算出

A. 断面画像の収集

本研究では Pearsall et al. (1994)²⁰⁾ の方法を応用し、アスリートを対象として MRI により全身をスキャンし、断面画像から身体部分ごとに身体部分密度を算出する方法を用いた¹⁷⁾。密度算出の手順は下記に示す通りである。

様々な競技を専門とするアスリート男子 14 名 (年齢 22.0±1.9 歳、身長 1.746±0.076 m、体重 68.9±13.5 kg)、女子 13 名 (年齢 20.9±1.1 歳、身長 1.628±0.101 m、体重 56.8±12.2 kg) を対象とした。3 テスラの MRI 装置 (Magnetom Verio, Siemens 社製) を用い、腕を頭上に伸ばした仰臥位姿勢で 10mm 間隔の全身の連続横断面を撮像した。さらに、II-3 と同様の方法で BODPOD により全身密度を算出した。

B. データ処理

MRI 連続横断面のうち分析対象の画像 (後述) について、筋、脂肪、皮質骨、海綿骨、皮膚、肺、脳、その他の内臓、神経、血管の 10 種類の身体

組織と空洞の識別をした (図 3)。識別作業はメーラーとレイフによる MRI 画像例^{14), 15), 16)} を参照し、ペイントツール (SAI, Systemax 社製) を用いてトレースした。組織密度は組織ごとに Huang et al. (1976)¹¹⁾、Clauser et al. (1969)⁷⁾、Shi et al. (1990)²¹⁾、Woodard and White (1986)²⁴⁾、Erdmann et al. (1990)¹⁰⁾ の報告を参照した (表 3)。

身体部分ごとにどの部位 (上端から何%部位) の MRI 画像が身体部分密度を適切に推定できるかを検討するために、まず対象者のうち男女 3 名ずつについて部分によって異なる間隔 (密度変化の繊細さに応じて 1cm、2cm、4cm 間隔のいずれか) で組織の識別を行った¹⁷⁾。隣接する断面間の各組織の体積を円錐台に近似して算出し、身体部分ごとに積算して組織別体積を得た。そして、各身体部分密度 (ρ) を組織別の体積 (V_i)、身体部分の体積 ($\sum V_i$) および組織密度 (ρ_i) から算出した (式 1)。

$$\rho = \frac{\sum (V_i \times \rho_i)}{\sum V_i} \quad (1)$$

この身体部分全体の密度 (ρ) と各断面画像から算出した密度 (その断面位置での密度) を比較し、部分密度との相関が高い (すなわち精度良く部分密度を推定できる) 断面を特定した。その結果、頭は上端より 70% 部位、同様に上腕は 50% 部位 (ただしこれに 1.20 を乗ずる)、下腕は 40% 部位、上腕は 50% 部位、前腕は 50% 部位 (1.01 を乗ずる)、手は 25% 部位 (0.98 を乗ずる)、大腿は 50% 部位、下腿は 50% 部位、足は 50% 部位 (0.95 を乗ずる) が選択された (以下、選択断面)。続いて、残りの男子 11 名、女子 10 名の対象者について各身体部分でこの部位に最も近い断面を選択し、選択断面密度から身体部分密度を推定した。上腕、前腕、手、足については選択断面密度に上述の係数を乗じたものを身体部分密度とし、それ以外の身体部分については選択断面密度をそのまま身体部分密度とした。身体部分密度は左右で分析した部分については平均した。

さらに、男女別に BODPOD による全身密度と各部分の密度との相関係数を求め、全身密度との相関係数が有意だった部分については回帰式を立てて BSP 算出の際に各被験者の全身密度から部分密度を推定し、有意でない部分については男女別平均値を本人の部分密度として採用した。

6. 密度を考慮した BSP 算出

全被験者について、II-4 で算出した身体部分体積に II-5 で算出した身体部分密度を乗ずることににより身体部分質量を求めた。さらにこの総和が身体質量と等しくなるように、各部分密度に共通の係数を乗じて補正し、身体部分質量を再計算した。また、密度を 1 g/cm^3 とした場合の仮の主慣性モーメントに補正後の身体部分密度を乗じて 3 つの慣性主軸 (x 軸: 左右軸, y 軸: 前後軸, z 軸: 上下軸) まわりの主慣性モーメント (以下、単に“慣

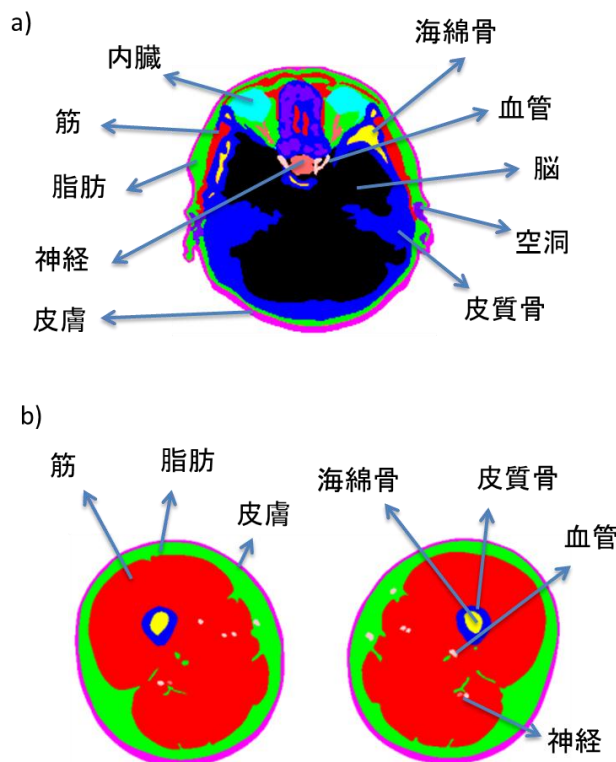


Figure 3.

Identification of the body tissues.

- a) A sample of the cross-sectional image of the head,
- b) A sample of the cross-sectional image of the thighs.

性モーメント” とする) を算出した。さらに、表 2 右の定義¹⁾に従って各身体部分の部分長を計測し、質量比 (体重に対する身体部分質量の比)、質量中心比 (上端点から質量中心位置までの距離の部分長に対する比)、回転半径比 (回転半径の部分長に対する比; 式 (2)) を算出した。

$$\text{回転半径比} = \frac{1}{\text{部分長}} \sqrt{\frac{\text{慣性モーメント}}{\text{部分質量}}} \quad (2)$$

7. 統計処理

全体平均 (母集団) と競技別平均値との差を検定するために z 検定を行った。有意水準は 5% 未満とした。

Table 3. Density of the body tissues applied to this study (unit: g/cm^3).

a) Huang et al. (1976), b) Clauser (1969), c) Shi et al. (1990), d) Woodard and White (1986), e) Erdmann et al. (1990).

筋 a	脂肪 a	皮質骨 b	海綿骨 b	皮膚 c	肺 a	脳 a	内臓 d	神経 e	血管 a
1.067	0.902	1.800	1.105	1.060	0.255	1.040	1.051	1.112	1.025

III. 結果と考察

MRI 画像を用いた身体部分密度および BSP の推定方法では、身体部分のうち一部の断面のみから推定している点、組織密度を一律に適用している点 (表 3)、撮像肢位が BLS による形状計測時と異なることなどにより誤差が生じている可能性がある。ただし、断面を小刻みに分析した男女 3 名について、選択断面 (例えば上腕では 50% 部位の 1.20 倍) の密度を 1~4cm 間隔で求めた厳密な身体部分密度と比較すると、いずれの身体部分においても RMS 誤差は 2% 未満であった。さらに MRI 画像から身体部分密度を推定した被験者について、CAD による身体部分体積と推定身体部分密度を元に総質量を算出した結果、体重との RMS 誤差は 1.72% と小さかった。従来はアスリートの BSP 算出時に屍体標本から得られた身体部分密度を適用していたことを踏まえると、本研究の一連の手法により BSP 推定精度を高めることができたと考えられる。

表 4 は MRI から算出した男女別の身体部分密度について、平均値、全身密度との相関係数、および全身密度からの推定式を示したものである。男女ともに、下腕、上腕、大腿は全身密度との間に有意な相関がみられた。表 3 に示したように脂肪の密度は他の組織と比較して小さく、下腕、上腕、大腿における脂肪量が全身密度に影響していたと

考えられる。したがって、全身密度との間に相関がみられた身体部分について回帰した部分密度を採用することにより、体脂肪の個人差を考慮したより厳密な BSP の推定が可能になったと考えられる。一方、上腕の密度は他の部分に比べて著しく小さかった。これは肺の組織密度が小さいことに起因しており (表 3)、このことから身体重心の分析や体幹のキネティクスの分析では体幹を上下に区分して異なる密度を適用することが重要であろう。

本研究により算出した身体部分の質量比 (表 5、表 6)、質量中心比 (表 7、表 8)、回転半径比 (表 9、表 10) の競技種目別平均値一覧を男女別に示した。なお、四肢については左右の平均で示した。アスリートを対象として身体重心やキネティクスの変数を分析する際には、当該競技の平均値を活用して以下の手順で BSP を得ることが可能である。

- ・部分質量：表 5、表 6 の競技種目別部分質量比に本人の体重を乗じる。
- ・質量中心比：表 7、表 8 の競技種目別平均値をそのまま適用する。
- ・慣性モーメント：式(3)より算出する。

慣性モーメント

$$= \text{部分質量} \times (\text{回転半径比} \times \text{部分長})^2 \quad (3)$$

ここで、回転半径比は表 9、表 10 より、部分長は本人の身体分析点より得る。

Table 4. Density of the body segments and the correlation coefficients to the whole body density (unit: g/cm³). * and ** indicate the significant correlations between the segment density and the whole body density at p<0.05 and p<0.01 respectively. “a” and “b” indicate the coefficients of the estimate equation y=ax+b (x: the whole body density, y: the corresponding segment density).

身体部分	頭	上腕	下腕	上腕	前腕	手	大腿	下腿	足
平均密度	1.09	0.892	1.054	1.051	1.083	1.066	1.054	1.075	1.082
(標準偏差)	(0.016)	(0.033)	(0.014)	(0.014)	(0.010)	(0.011)	(0.010)	(0.014)	(0.018)
男子 相関係数	0.064	-0.338	0.754	0.843	0.769	0.475	0.668	0.682	-0.082
	n.s.	n.s.	**	**	**	n.s.	*	*	n.s.
推定式係数			a=0.920 b=0.068	a=0.993 b=-0.014	a=0.640 b=0.396		a=0.576 b=0.436	a=0.855 b=0.158	
平均密度	1.083	0.892	1.034	1.005	1.054	1.053	1.009	1.037	1.054
(標準偏差)	(0.020)	(0.031)	(0.020)	(0.011)	(0.016)	(0.012)	(0.012)	(0.011)	(0.032)
女子 相関係数	-0.258	-0.455	0.929	0.709	0.502	0.37	0.771	0.521	0.169
	n.s.	n.s.	**	*	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.
推定式係数			a=1.404 b=-0.440	a=0.631 b=0.342			a=0.691 b=0.284		

Table 5. Average of segment mass expressed as a percentage of total body mass for each event in males (unit: %).

競技種目	人数	頭	上胴	下胴	上腕	前腕	手	大腿	下腿	足
陸上競技・短距離、ハードル	8	7.77	26.12	17.51	2.62	1.39	0.60	13.49	4.84	1.36
陸上競技・中長距離	16	8.79	27.21	16.94	2.38	1.28	0.62	13.08	4.78	1.39
陸上競技・跳躍	5	8.13	26.07	18.75	2.51	1.44	0.61	12.86	4.69	1.43
陸上競技・投擲	7	6.20	26.71	18.97	3.02	1.53	0.55	13.38	4.45	1.13
陸上競技・混成	8	7.45	26.17	16.72	2.77	1.46	0.59	13.88	4.79	1.34
競泳	8	7.83	29.09	16.37	3.01	1.49	0.59	12.71	4.33	1.22
飛込	5	8.93	27.27	15.29	2.77	1.59	0.61	13.16	4.81	1.32
水球	8	7.67	28.41	17.00	2.90	1.61	0.61	12.67	4.38	1.29
サッカー	6	7.88	26.42	16.82	2.57	1.44	0.62	13.64	4.79	1.39
テニス	8	7.73	25.87	16.96	2.46	1.46	0.64	13.94	4.85	1.37
ボート	7	7.65	27.54	17.24	2.55	1.54	0.64	13.20	4.50	1.36
ホッケー	8	7.63	26.89	16.62	2.60	1.54	0.61	13.68	4.69	1.33
ボクシング	8	8.68	28.19	17.13	2.81	1.57	0.64	12.14	4.50	1.35
バレーボール	8	7.31	26.75	17.20	2.70	1.46	0.63	13.62	4.59	1.39
ビーチバレー	4	7.42	26.67	16.25	2.73	1.42	0.59	14.11	4.73	1.26
体操競技	8	8.85	29.00	15.50	3.24	1.83	0.82	11.65	4.40	1.38
トランポリン	7	9.05	26.83	17.33	2.54	1.40	0.64	12.89	4.55	1.37
バスケットボール	7	7.29	26.07	17.52	2.71	1.46	0.63	13.57	4.80	1.39
レスリング	3	8.26	28.12	15.67	2.97	1.64	0.69	13.21	4.23	1.24
セーリング	7	8.40	28.08	17.59	2.69	1.50	0.65	12.61	4.26	1.26
ウェイトリフティング	6	6.48	27.94	18.26	3.01	1.62	0.59	13.19	4.15	1.10
自転車・ロード	3	8.90	26.46	17.57	2.49	1.47	0.68	13.26	4.35	1.28
自転車・トラック	5	7.35	26.34	17.42	2.48	1.49	0.60	14.21	4.42	1.25
卓球	8	8.02	26.88	17.57	2.55	1.39	0.57	13.44	4.50	1.31
馬術	4	8.45	28.08	17.61	2.63	1.46	0.69	12.60	4.19	1.35
フェンシング	8	8.29	26.91	16.30	2.68	1.47	0.62	13.68	4.47	1.33
柔道	8	7.11	28.56	17.92	2.92	1.60	0.63	12.33	4.48	1.24
バドミントン	9	8.07	26.56	17.05	2.55	1.40	0.61	13.53	4.72	1.35
ライフル射撃	8	8.32	27.32	18.31	2.45	1.37	0.60	12.82	4.39	1.38
近代五種	5	7.90	27.86	16.40	2.82	1.48	0.61	12.85	4.88	1.28
ラグビー	7	6.65	28.00	17.75	2.80	1.41	0.54	13.23	4.65	1.17
カヌー・スラローム	4	8.10	27.71	16.03	2.92	1.67	0.67	12.83	4.62	1.36
アーチェリー	8	8.39	24.76	19.32	2.56	1.40	0.63	13.20	4.61	1.37
野球	8	7.57	26.63	17.08	2.63	1.47	0.63	13.79	4.58	1.26
トライアスロン	8	8.26	28.62	16.10	2.63	1.32	0.64	13.11	4.43	1.39
テコンドー	6	8.25	25.87	16.34	2.57	1.49	0.61	13.66	5.06	1.38
スキー・アルペン	7	7.34	27.14	17.75	2.70	1.51	0.60	13.34	4.51	1.23
スキー・クロスカントリー	8	7.66	26.95	17.46	2.72	1.39	0.59	13.35	4.57	1.33
スキー・ジャンプ	8	8.73	25.73	17.02	2.48	1.46	0.67	13.59	4.67	1.39
スキー・ノルディック複合	8	8.37	26.28	15.95	2.61	1.47	0.62	13.92	4.68	1.39
スキー・フリースタイル	8	8.03	27.04	16.48	2.73	1.49	0.59	13.76	4.39	1.26
スノーボード	8	8.23	26.83	16.91	2.68	1.48	0.61	13.55	4.43	1.27
スピードスケート	8	7.70	25.67	17.29	2.53	1.32	0.57	14.49	4.50	1.26
フィギュアスケート	8	8.61	24.48	17.02	2.51	1.43	0.60	14.41	4.67	1.33
ショートトラック	8	8.11	25.30	16.68	2.48	1.35	0.59	14.91	4.33	1.29
バイアスロン	5	8.13	28.14	16.36	2.72	1.41	0.58	13.19	4.55	1.23
アイスホッケー	8	8.11	26.25	16.86	2.76	1.50	0.63	13.79	4.49	1.23
ボブスレー	8	7.29	26.47	17.27	2.83	1.58	0.57	13.60	4.67	1.24
リュージュ	4	8.30	26.16	17.70	2.82	1.58	0.59	13.08	4.55	1.31
スケルトン	8	7.63	26.96	16.79	2.70	1.44	0.61	13.74	4.52	1.30
カーリング	8	8.45	26.13	16.81	2.75	1.51	0.61	13.47	4.66	1.29
全体 (標準偏差)	363	7.96 (0.86)	26.91 (1.48)	17.09 (1.42)	2.68 (0.24)	1.47 (0.13)	0.62 (0.06)	13.37 (0.81)	4.57 (0.31)	1.31 (0.12)

Table 6. Average of segment mass expressed as a percentage of total body mass for each event in females (unit: %).

競技種目	人数	頭	上胴	下胴	上腕	前腕	手	大腿	下腿	足
陸上競技・短距離、ハードル	7	9.17	24.07	18.33	2.26	1.21	0.56	14.15	4.74	1.30
陸上競技・中長距離	12	9.85	25.60	18.80	2.05	1.11	0.58	12.89	4.85	1.39
陸上競技・跳躍	9	8.69	25.14	18.38	2.26	1.21	0.54	13.95	4.68	1.25
陸上競技・投擲	6	7.23	25.95	19.37	2.47	1.40	0.54	13.53	4.59	1.19
陸上競技・混成	4	8.06	25.58	16.57	2.38	1.18	0.52	14.94	4.62	1.24
競泳	8	8.34	27.70	17.96	2.73	1.24	0.51	13.29	4.13	1.10
飛込	4	9.26	25.85	17.77	2.49	1.30	0.56	13.38	4.53	1.29
水球	8	8.71	26.55	17.68	2.63	1.32	0.56	13.45	4.37	1.20
シンクロナイズドスイミング	8	9.07	27.39	18.72	2.74	1.22	0.53	12.86	3.96	1.10
サッカー	8	8.60	25.24	19.02	2.24	1.15	0.54	13.82	4.61	1.22
テニス	8	8.65	24.55	18.94	2.35	1.27	0.55	13.93	4.68	1.17
ボート	6	8.53	24.95	18.42	2.43	1.42	0.55	13.84	4.60	1.22
ホッケー	8	8.41	23.82	18.60	2.33	1.24	0.58	14.30	4.90	1.22
バレーボール	8	7.89	25.23	18.35	2.38	1.27	0.58	14.15	4.61	1.26
ビーチバレー	8	8.00	24.77	18.42	2.50	1.29	0.57	14.26	4.59	1.20
体操競技	8	10.97	25.67	16.87	2.39	1.42	0.69	12.62	4.67	1.45
新体操	6	10.05	24.17	16.96	2.57	1.23	0.60	13.65	4.93	1.43
トランポリン	5	10.15	24.20	18.25	2.39	1.28	0.63	13.19	4.82	1.39
バスケットボール	8	7.55	24.90	18.58	2.44	1.21	0.53	14.31	4.77	1.23
レスリング	4	8.60	26.89	18.51	2.61	1.43	0.58	12.86	4.43	1.09
セーリング	7	8.79	24.26	19.50	2.53	1.36	0.59	13.56	4.48	1.20
ウェイトリフティング	5	7.49	26.31	20.35	2.63	1.38	0.52	13.04	4.29	1.07
ハンドボール	8	8.40	24.90	18.99	2.49	1.26	0.57	13.79	4.57	1.17
自転車・トラック	6	7.91	23.69	18.98	2.29	1.30	0.53	14.60	4.79	1.19
卓球	7	9.10	25.22	18.77	2.31	1.21	0.51	13.79	4.46	1.18
フェンシング	8	8.44	24.26	18.96	2.26	1.25	0.54	14.31	4.63	1.18
柔道	8	7.71	26.29	19.29	2.75	1.46	0.60	12.73	4.63	1.18
バドミントン	8	8.03	25.30	19.69	2.21	1.14	0.52	13.95	4.51	1.17
ライフル射撃	7	9.09	23.76	21.40	2.22	1.21	0.55	12.88	4.74	1.28
カヌー・スプリント	7	8.19	27.11	17.56	2.74	1.40	0.57	13.39	4.34	1.15
アーチェリー	8	8.85	23.56	19.23	2.40	1.30	0.57	13.88	4.81	1.21
トライアスロン	8	8.98	27.64	16.82	2.30	1.20	0.55	13.49	4.50	1.24
テコンドー	4	8.87	24.19	19.07	2.40	1.29	0.55	13.69	4.76	1.24
スキー・アルペン	8	8.25	24.38	18.74	2.40	1.31	0.54	14.27	4.61	1.17
スキー・クロスカンントリー	6	8.60	25.60	19.38	2.53	1.26	0.53	13.38	4.31	1.20
スキー・フリースタイル	8	8.87	24.64	18.71	2.43	1.23	0.54	14.05	4.42	1.21
スノーボード	7	8.75	24.90	19.06	2.39	1.26	0.55	13.66	4.58	1.21
スピードスケート	8	8.22	24.07	17.92	2.21	1.21	0.54	14.95	4.77	1.21
フィギュアスケート	8	9.77	24.35	18.11	2.28	1.22	0.60	13.98	4.46	1.34
ショートトラック	8	9.03	22.96	17.97	2.16	1.14	0.55	15.39	4.56	1.22
バイアスロン	6	8.72	25.15	19.11	2.50	1.24	0.53	13.52	4.56	1.15
アイスホッケー	7	8.85	24.94	19.67	2.36	1.32	0.57	13.58	4.31	1.13
ボブスレー	7	7.65	25.23	19.96	2.41	1.30	0.50	13.44	4.79	1.15
リュージュ	3	8.12	25.27	20.45	2.66	1.31	0.49	13.13	4.31	1.18
スケルトン	2	7.93	25.06	19.48	2.48	1.35	0.53	13.72	4.50	1.18
カーリング	8	8.71	24.37	19.79	2.36	1.28	0.52	13.52	4.66	1.21
全体 (標準偏差)	320	8.67 (1.00)	25.11 (1.53)	18.70 (1.55)	2.40 (0.22)	1.27 (0.11)	0.56 (0.05)	13.73 (0.87)	4.58 (0.35)	1.22 (0.12)

Table 7. Average of segment center of mass location from superior end expressed as a percentage of segment length for each event in males (unit: %).

競技種目	人数	頭	上胴	下胴	上腕	前腕	手	大腿	下腿	足
陸上競技・短距離、ハードル	8	90.6	39.7	62.5	42.2	41.3	73.1	41.6	41.6	58.0
陸上競技・中長距離	16	88.4	41.0	63.5	42.3	41.6	74.8	41.5	41.3	57.4
陸上競技・跳躍	5	94.8	37.9	59.7	42.3	41.7	75.9	41.3	41.7	58.1
陸上競技・投擲	7	91.9	39.8	58.9	41.7	41.7	74.4	43.1	41.7	57.8
陸上競技・混成	8	90.9	39.1	60.2	42.1	41.2	72.3	42.2	41.6	57.3
競泳	8	88.6	39.7	62.4	41.2	41.6	72.0	42.5	41.1	57.5
飛込	5	88.6	37.9	60.7	40.7	42.3	72.6	42.9	41.5	56.5
水球	8	93.4	39.6	61.3	42.6	41.6	72.2	42.3	41.7	57.2
サッカー	6	88.5	40.7	61.7	42.0	42.0	76.4	42.3	41.5	57.0
テニス	8	90.4	40.0	63.7	42.1	41.7	73.5	42.9	41.2	57.2
ボート	7	90.7	40.0	59.8	43.8	41.8	74.8	42.9	41.7	57.6
ホッケー	8	91.4	39.7	60.8	41.2	41.5	76.1	42.3	41.8	57.1
ボクシング	8	89.5	38.8	60.6	42.6	41.2	73.1	42.0	41.4	56.7
バレーボール	8	93.6	40.5	61.6	42.3	41.4	74.4	43.5	40.9	58.4
ビーチバレー	4	87.5	38.8	63.1	40.6	41.3	74.8	42.6	40.8	57.0
体操競技	8	86.8	37.2	66.8	41.6	43.1	74.3	42.0	41.6	56.8
トランポリン	7	87.9	40.1	63.0	41.5	41.7	73.3	42.7	41.8	57.6
バスケットボール	7	91.6	43.1	63.2	42.0	41.9	75.9	42.2	41.5	56.8
レスリング	3	87.3	38.6	65.8	40.7	42.1	73.8	42.5	40.9	58.1
セーリング	7	87.4	41.0	60.9	41.9	42.1	77.8	42.1	41.1	57.3
ウェイトリフティング	6	90.8	39.4	58.1	40.9	42.1	73.1	44.1	41.2	56.0
自転車・ロード	3	90.5	42.0	61.0	41.8	41.3	79.9	42.6	40.5	56.8
自転車・トラック	5	92.8	40.3	63.0	43.1	41.4	73.8	43.2	41.1	57.1
卓球	8	91.4	41.6	61.9	42.6	41.7	76.2	43.1	41.6	57.0
馬術	4	84.6	39.4	62.4	41.8	42.0	76.0	41.3	41.4	58.1
フェンシング	8	89.0	40.9	61.9	40.9	41.7	76.3	42.6	41.0	57.8
柔道	8	88.6	41.7	59.7	42.1	42.0	75.2	43.5	41.8	56.6
バドミントン	9	85.6	40.3	63.6	41.6	41.9	72.7	42.6	41.4	57.0
ライフル射撃	8	90.1	41.2	60.6	41.7	42.0	73.9	42.3	41.1	57.5
近代五種	5	89.1	40.8	58.6	41.8	41.5	77.9	42.1	41.3	56.9
ラグビー	7	88.1	40.7	59.2	41.3	41.7	72.3	43.3	41.6	56.7
カヌー・スラローム	4	87.3	39.4	62.7	41.2	42.1	75.2	42.3	41.8	57.3
アーチェリー	8	89.1	41.1	61.0	41.3	42.2	72.7	42.2	41.6	57.0
野球	8	87.2	42.7	62.2	43.0	41.6	75.7	43.0	41.1	57.0
トライアスロン	8	85.9	40.0	59.5	42.1	41.5	72.6	42.0	41.0	57.7
テコンドー	6	91.5	41.1	61.3	42.9	42.1	74.5	43.0	41.7	56.5
スキー・アルペン	7	89.1	41.2	60.4	41.4	41.9	74.0	43.4	41.4	57.1
スキー・クロスカントリー	8	89.8	39.7	60.2	40.5	41.5	73.6	42.6	41.5	57.4
スキー・ジャンプ	8	90.1	39.1	60.9	41.2	41.7	74.9	41.9	41.8	57.4
スキー・ノルディック複合	8	88.2	38.5	64.4	41.8	41.4	76.0	42.9	41.8	57.1
スキー・フリースタイル	8	95.5	42.0	62.0	40.3	41.3	73.7	43.0	40.9	57.6
スノーボード	8	90.2	39.4	63.1	41.2	41.4	74.4	42.6	41.1	57.8
スピードスケート	8	89.2	40.5	63.3	41.8	41.3	75.0	43.0	41.7	57.7
フィギュアスケート	8	91.1	40.5	63.0	42.7	42.0	72.7	42.8	41.9	56.8
ショートトラック	8	88.7	40.4	65.4	42.0	42.2	74.6	43.0	41.7	57.2
バイアスロン	5	88.1	41.7	60.8	40.2	41.2	77.5	42.5	41.4	57.8
アイスホッケー	8	92.3	41.1	62.0	42.4	41.9	74.5	42.7	41.3	57.4
ボブスレー	8	92.8	41.9	60.2	41.3	41.6	77.0	43.1	41.6	56.8
リュージュ	4	97.1	42.4	59.4	40.4	41.3	77.2	42.8	41.4	56.8
スケルトン	8	90.1	41.9	61.2	41.2	41.6	75.3	42.9	41.9	57.6
カーリング	8	84.4	39.2	61.8	42.6	41.8	75.4	42.8	41.3	56.5
全体 (標準偏差)	363	89.7 (4.9)	40.3 (2.2)	61.7 (2.7)	41.8 (1.4)	41.7 (0.7)	74.5 (3.0)	42.6 (0.9)	41.4 (0.7)	57.2 (0.9)

Table 8. Average of segment center of mass location from superior end expressed as a percentage of segment length for each event in females (unit: %).

競技種目	人数	頭	上脛	下脛	上腕	前腕	手	大腿	下腿	足
陸上競技・短距離、ハードル	7	83.8	39.3	63.1	43.0	41.8	74.8	41.7	41.9	58.1
陸上競技・中長距離	12	82.8	41.6	62.6	43.0	42.1	75.3	41.7	41.5	57.7
陸上競技・跳躍	9	83.6	40.9	62.6	43.0	41.8	75.0	41.7	41.5	57.7
陸上競技・投擲	6	83.5	41.7	60.9	42.3	42.2	77.0	43.1	41.7	57.8
陸上競技・混成	4	85.9	38.3	63.0	42.1	41.3	75.2	42.2	41.4	58.2
競泳	8	81.8	40.2	63.1	41.4	41.4	71.1	42.5	40.9	58.5
飛込	4	81.7	39.7	64.8	41.5	42.2	70.8	42.6	41.6	57.4
水球	8	81.9	39.4	61.4	40.8	42.0	73.1	42.2	41.3	58.0
シンクロナイズドスイミング	8	85.1	41.8	61.9	40.3	41.8	70.9	41.1	40.8	57.5
サッカー	8	82.8	41.7	64.3	40.8	42.0	73.5	42.6	41.3	58.0
テニス	8	82.8	41.8	64.3	41.5	41.9	73.8	42.8	40.7	58.1
ボート	6	83.8	41.6	60.7	43.1	41.8	75.7	43.0	41.6	58.0
ホッケー	8	84.4	40.4	64.2	41.1	42.4	77.0	43.2	41.6	57.3
バレーボール	8	84.3	41.7	62.7	41.7	42.1	75.3	42.7	40.9	57.3
ビーチバレー	8	84.5	42.1	63.6	41.1	42.3	75.3	42.2	40.9	57.5
体操競技	8	81.5	41.7	63.6	43.4	42.4	71.4	42.1	41.7	57.2
新体操	6	84.6	42.8	62.9	40.4	41.9	73.9	41.5	40.8	57.4
トランポリン	5	84.1	42.6	63.9	41.5	42.4	73.8	42.5	41.2	57.0
バスケットボール	8	86.7	41.8	61.9	42.0	41.6	76.0	42.3	40.8	56.9
レスリング	4	92.1	40.7	65.8	39.5	42.7	73.0	42.7	41.6	58.3
セーリング	7	83.7	41.9	63.5	41.3	42.2	76.8	42.6	41.6	57.3
ウェイトリフティング	5	81.1	41.6	61.3	41.8	42.4	74.4	45.0	42.1	56.9
ハンドボール	8	86.3	41.5	62.2	42.0	42.2	76.2	42.2	41.5	57.0
自転車・トラック	6	85.0	41.9	63.8	42.7	42.5	74.5	44.1	41.4	57.8
卓球	7	81.3	41.4	64.1	41.9	42.4	74.1	42.4	41.6	57.8
フェンシング	8	84.1	41.6	64.0	42.6	42.6	75.7	42.7	41.2	58.2
柔道	8	84.4	42.3	62.5	42.3	42.7	73.8	44.1	41.8	57.1
バドミントン	8	83.2	42.3	62.9	41.5	42.3	72.2	42.7	40.8	57.7
ライフル射撃	7	81.6	41.8	61.9	42.0	42.2	74.6	42.5	40.8	58.0
カヌー・スプリント	7	84.3	42.4	62.5	41.3	42.2	74.9	43.0	41.1	57.6
アーチェリー	8	84.0	42.3	65.1	42.5	42.8	73.1	43.2	40.9	57.5
トライアスロン	8	82.8	41.1	63.8	41.8	41.8	74.2	42.3	41.3	58.1
テコンドー	4	84.9	42.4	63.9	42.8	42.7	77.4	43.2	42.0	57.2
スキー・アルペン	8	81.4	42.8	63.5	42.0	42.2	76.8	43.7	40.9	58.0
スキー・クロスカントリー	6	83.8	40.4	61.6	40.8	42.0	73.0	42.3	41.3	57.9
スキー・フリースタイル	8	82.9	41.5	63.2	41.9	41.8	76.5	42.6	41.3	57.7
スノーボード	7	82.4	41.7	62.9	41.4	42.2	76.8	42.8	41.5	57.5
スピードスケート	8	83.9	42.6	64.2	42.9	42.5	75.4	43.3	41.6	57.7
フィギュアスケート	8	82.2	40.7	63.1	42.3	42.5	73.0	42.3	41.7	57.2
ショートトラック	8	83.4	42.6	64.9	42.5	42.6	75.8	43.9	42.1	58.0
バイアスロン	6	84.1	41.8	63.3	41.9	42.2	76.1	42.8	41.5	57.6
アイスホッケー	7	83.9	43.1	63.8	41.3	42.5	73.8	42.8	41.0	57.5
ボブスレー	7	82.5	41.6	61.7	42.0	42.1	74.5	43.1	41.9	57.7
リュージュ	3	80.7	42.8	63.2	42.9	41.8	77.9	41.9	42.0	57.1
スケルトン	2	84.1	44.0	63.9	42.7	42.1	71.8	43.0	41.3	57.2
カーリング	8	84.4	42.3	62.2	40.4	42.3	74.4	42.6	41.4	57.7
全体 (標準偏差)	320	83.6 (3.3)	41.6 (1.8)	63.1 (2.3)	41.9 (1.4)	42.2 (0.6)	74.6 (3.1)	42.7 (1.0)	41.3 (0.8)	57.6 (0.9)

Table 9. Average of segment radii of gyration expressed as a percentage of segment length for each event in males (unit: %).

競技種目	人数	左右軸						前後軸						上下軸														
		上脚		下脚		手		上脚		下脚		手		上脚		下脚		手										
		頭	足	頭	足	頭	足	頭	足	頭	足	頭	足	頭	足	頭	足	頭	足									
陸上競技-短距離・ハートル	8	55.2	36.5	46.1	32.0	28.0	49.6	29.0	26.9	24.3	52.4	43.1	50.2	31.5	28.3	46.1	28.4	26.7	11.1	41.5	32.7	44.1	12.0	10.7	24.6	14.0	9.5	24.9
陸上競技-中長距離	16	54.6	34.8	46.5	32.0	28.4	50.7	29.3	27.5	24.3	51.9	40.3	50.2	31.7	28.6	46.7	28.9	27.4	10.9	39.7	29.5	43.9	11.1	10.1	25.3	13.3	9.2	25.0
陸上競技-短距離	5	58.2	36.3	41.9	32.3	28.2	52.3	29.2	27.4	24.2	55.2	46.4	46.2	31.9	28.6	48.2	28.6	27.3	11.3	41.6	32.2	38.9	12.4	10.6	26.3	14.1	9.4	24.9
陸上競技-投擲	7	55.7	39.3	49.1	32.1	28.1	51.9	29.8	27.1	24.1	52.8	46.4	51.0	32.0	28.6	47.5	28.8	27.0	11.1	43.0	38.0	50.9	15.6	12.8	27.7	16.9	10.5	24.9
陸上競技-埋成	8	55.0	36.2	44.9	32.1	28.0	49.4	29.2	27.4	24.1	52.0	42.7	48.6	31.5	28.2	45.4	28.5	27.2	10.9	41.2	32.1	45.1	12.8	11.2	25.1	14.3	9.3	24.9
競泳	8	54.4	35.5	46.5	31.8	28.1	50.1	29.1	27.3	24.1	51.5	41.9	50.7	31.1	28.3	45.8	28.6	27.1	10.7	40.3	32.1	44.4	13.6	10.9	26.1	14.3	9.6	24.8
飛込	5	54.7	37.4	45.4	32.1	27.9	51.6	29.4	27.1	24.7	51.9	44.6	49.9	31.5	28.2	46.8	28.7	26.9	11.4	41.1	34.6	44.6	13.6	11.1	27.4	15.1	9.7	25.4
サッカー	8	56.7	36.3	45.9	31.9	28.0	50.9	29.7	27.8	24.6	53.5	43.2	48.1	31.2	28.3	46.7	29.3	27.6	11.2	42.1	34.1	42.4	13.5	11.1	26.5	14.6	9.4	25.3
テニス	8	55.4	36.1	47.4	32.7	28.4	50.5	29.4	27.6	24.6	52.6	42.4	51.4	32.2	28.6	46.4	28.9	27.4	10.9	41.1	31.7	45.2	12.5	11.2	26.0	14.5	9.6	25.3
ボート	7	55.5	36.2	43.7	32.0	28.0	50.6	29.4	27.9	24.2	52.7	42.2	47.7	31.6	28.4	46.8	28.9	27.7	10.8	41.3	31.8	42.4	12.7	11.7	25.3	14.5	9.3	25.0
ボクシング	8	56.1	35.9	45.6	32.3	27.9	54.2	29.4	27.5	24.6	53.4	42.1	49.6	31.7	28.1	49.7	28.8	27.3	11.3	42.1	31.9	44.9	13.1	11.0	28.2	15.0	9.6	25.3
バレーボール	8	55.1	35.8	44.5	32.7	28.1	50.0	29.5	27.6	24.4	52.3	42.3	49.8	32.1	28.4	46.0	29.0	27.4	11.1	40.2	31.3	43.9	13.1	11.6	25.8	14.2	9.5	25.2
ビーチバレー	4	57.0	36.2	45.5	31.8	28.2	51.1	29.8	27.5	24.3	54.5	42.4	49.2	31.3	28.5	47.1	28.3	27.3	11.0	41.5	31.7	42.7	12.7	10.9	25.9	14.0	9.5	25.0
体操競技	8	53.9	36.4	49.5	32.1	28.5	51.7	29.4	27.5	24.4	50.8	43.5	52.9	31.2	28.8	47.7	29.0	27.4	11.1	40.0	33.4	45.5	14.3	12.0	27.3	13.2	9.2	25.2
トランポリン	7	54.1	36.2	47.1	32.4	28.4	50.9	29.4	27.6	24.3	51.7	43.1	50.5	31.8	28.6	46.7	28.9	27.4	11.3	40.2	33.1	45.1	13.5	11.5	26.3	15.2	9.9	25.1
バスケットボール	7	56.5	34.2	46.0	32.0	28.2	52.1	29.3	27.5	24.6	53.9	39.7	49.7	31.4	28.5	48.0	28.7	27.4	11.0	39.8	29.8	44.4	12.5	10.7	26.2	14.1	9.5	25.3
レスリング	3	53.4	36.4	45.1	33.7	28.4	49.5	29.2	27.7	23.9	50.5	42.8	55.3	32.8	28.7	45.4	28.6	27.5	10.9	41.2	32.7	49.7	14.8	12.9	26.2	14.7	9.9	24.6
セーリング	7	53.2	36.0	45.8	32.9	28.0	53.1	29.7	27.5	24.5	50.8	42.2	49.9	32.2	28.4	48.7	29.0	27.3	11.3	39.7	32.4	44.6	13.9	11.9	27.7	15.0	9.9	25.2
ウェイトリフティング	6	54.4	39.1	48.4	34.5	28.2	51.0	30.3	27.2	24.6	51.7	46.0	49.8	33.0	28.6	46.6	29.2	27.1	11.7	41.9	37.6	51.7	17.4	14.0	28.5	18.6	10.8	25.6
自転車-ロード	3	56.6	35.2	42.9	32.4	28.0	55.1	29.5	27.4	24.4	53.7	41.2	47.5	31.9	28.2	50.3	29.1	27.2	11.0	42.1	31.9	42.3	12.7	11.0	29.0	14.6	9.2	25.3
自転車-トラック	5	56.7	36.0	48.3	32.2	27.9	51.0	29.8	27.3	24.3	53.5	42.2	51.0	31.5	28.3	46.7	28.8	27.1	11.1	41.9	32.6	47.1	14.3	11.7	27.3	16.6	10.4	25.0
卓球	8	56.0	36.1	47.1	32.2	28.1	52.8	29.5	27.6	24.5	53.1	42.7	50.8	31.4	28.4	48.2	28.9	27.5	11.0	42.1	32.9	45.3	13.8	11.2	27.7	15.7	10.1	25.2
馬術	4	52.0	36.5	47.8	32.1	28.3	51.7	29.5	27.7	24.1	48.8	43.8	51.7	31.6	28.3	47.4	29.1	27.6	10.9	39.9	33.1	47.0	13.4	11.7	26.6	14.6	9.4	24.8
フェンシング	8	55.2	35.2	47.1	32.2	28.1	52.5	29.3	27.2	24.3	52.5	41.4	52.0	31.7	28.3	48.3	28.6	27.1	10.8	41.2	30.6	46.7	12.7	10.8	26.3	14.6	9.4	24.9
柔道	8	54.0	37.1	48.2	33.8	28.7	52.8	30.1	27.4	24.5	51.2	43.9	52.0	32.5	29.1	48.3	29.2	27.2	11.6	41.7	35.2	50.4	16.9	14.0	28.2	17.8	11.0	25.4
ハンドボール	9	52.9	36.5	48.0	32.2	28.2	49.4	29.1	27.4	24.5	50.2	42.7	51.7	31.6	28.4	45.3	28.5	27.2	11.0	39.6	32.3	46.3	12.5	11.0	25.5	14.4	9.5	25.2
ライフル射撃	8	55.3	35.9	45.7	32.3	28.3	50.9	29.6	27.5	24.5	52.2	42.2	50.1	31.8	28.5	46.6	29.2	27.4	11.4	42.0	32.1	45.4	13.7	11.3	26.6	15.0	10.0	25.2
近代五種	5	54.9	35.0	43.1	31.8	28.0	53.5	29.4	27.2	24.1	52.6	40.4	48.0	31.3	28.3	49.2	28.9	27.1	10.8	40.4	29.8	44.8	12.6	11.1	27.4	14.6	9.8	25.0
ラグビー	7	53.9	36.8	47.2	33.0	28.1	50.7	30.0	27.3	24.6	51.4	42.6	51.4	31.9	28.4	46.3	29.1	27.1	11.5	41.2	33.2	48.5	16.0	12.5	27.1	17.3	10.7	25.5
カーヌ-スラローム	4	53.6	36.7	47.0	32.2	28.0	51.2	29.1	27.6	24.1	51.3	43.4	51.1	31.5	28.3	46.8	28.6	27.5	11.1	40.8	33.7	44.6	14.4	11.7	26.7	14.1	9.5	24.9
アーチェリー	8	54.0	36.9	45.4	32.5	28.3	48.7	29.7	27.7	24.7	51.6	43.4	48.4	31.9	28.5	45.1	29.2	27.6	11.4	40.3	33.7	43.1	13.1	11.4	24.5	15.3	9.7	25.5
野球	8	52.9	35.0	47.1	31.7	28.2	52.6	29.3	27.5	24.6	50.7	41.3	51.5	31.0	28.4	48.0	28.7	27.3	11.0	38.1	31.5	45.7	12.9	11.3	27.8	14.7	9.8	25.4
トライアスロン	8	53.4	35.4	44.6	31.6	28.4	49.0	29.5	27.6	24.4	50.7	40.9	49.2	31.2	28.5	45.4	29.0	27.4	11.2	39.6	30.3	44.3	11.7	10.8	24.1	14.1	9.4	25.1
テコンドー	6	56.8	34.9	46.5	31.8	28.1	51.6	29.4	27.2	24.5	53.6	40.9	49.8	31.2	28.4	47.5	28.8	27.0	11.2	41.9	30.0	45.9	12.7	11.0	26.7	14.9	9.9	25.2
スキー-アルペン	7	54.0	36.8	46.7	32.7	28.1	52.3	29.8	27.4	24.4	51.3	43.3	50.4	31.9	28.3	47.7	29.0	27.3	11.3	40.6	34.2	45.7	14.3	11.9	27.6	16.2	9.9	25.2
スキー-クロスカントリー	8	55.8	36.9	44.6	32.6	28.2	50.5	29.5	27.5	24.2	53.1	43.7	48.6	31.9	28.5	46.5	28.9	27.3	10.9	41.2	33.9	42.8	13.9	11.4	25.8	14.9	9.6	24.9
スキー-ジャンプ	8	56.2	36.3	43.7	32.2	28.1	50.6	29.3	27.5	24.5	53.2	42.6	48.3	31.9	28.3	46.6	28.8	27.3	10.8	42.4	31.1	42.3	11.9	10.7	25.4	13.9	9.1	25.2
スキー-ノルディック複合	8	54.6	36.7	47.8	31.8	28.1	54.4	29.9	27.6	24.2	52.1	43.2	51.7	31.2	28.2	50.0	28.4	27.4	10.9	41.0	32.1	46.8	12.7	10.5	28.0	13.8	9.4	25.0
スキー-フリースタイル	8	56.6	35.3	47.3	32.8	28.0	51.2	29.5	27.5	24.4	56.0	40.9	51.4	32.1	28.3	46.7	28.8	27.4	11.3	41.7	31.1	46.8	14.4	11.9	26.9	15.8	10.0	25.2
スノーボード	8	55.2	36.6	48.3	32.2	28.1	51.1	29.5	27.7	24.3	52.1	43.2	52.0	31.7	28.3	46.8	28.9	27.6	11.1	41.5	32.9	47.3	13.8	11.3	26.6	15.0	9.5	25.1
スピードスケート	8	55.5	36.2	46.5	32.0	28.1	51.5	29.3	27.5	24.1	52.7	42.6	49.8	31.5	28.4	47.2	28.7	27.3	11.2	42.1	32.6							

以下では、一覧表から読み取れる競技特性の例を述べる。図 4 は上胴、下胴、および大腿の質量比と質量中心比を男子の競泳、体操競技、スピードスケート、全体平均について示したものである。競泳選手は全体平均と比較して上胴の質量比が有意に大きく ($p<0.01$)、大腿の質量比は小さかった ($p<0.05$)。体操選手については上胴の質量比が有意に大きく ($p<0.01$)、下胴と大腿では小さかった (それぞれ $p<0.05$ と $p<0.01$)。スピードスケート選手では上胴の質量比が有意に小さく ($p<0.01$)、大腿では大きかった ($p<0.01$)。これらの結果は、競泳や体操競技における肩部、胸部やスピードスケートにおける大腿部といったように各運動に必要な部位の筋群の発達が反映された例と言えよう。また、体操選手は身体密度が大きいため (全体平均 $1.072 \pm 0.012 \text{ g/cm}^3$ に対し体操競技平均は $1.091 \pm 0.003 \text{ g/cm}^3$)、部分密度の推定式にもとづき下胴の密度も大きい値が適用された (全体平均 $1.054 \pm 0.011 \text{ g/cm}^3$ に対し体操競技平均は 1.071

$\pm 0.003 \text{ g/cm}^3$)。下胴の密度が大きいにも関わらず下胴の質量比が小さいことは、部分密度の大小よりも体積の方が質量比に大きく影響していたことを示す一例と考えられる。一方、質量中心比については体操競技選手では全体平均と比較して上胴の値が小さく (すなわち質量中心が上部にあり、 $p<0.01$)、下胴の値が大きかった (質量中心が下部に位置していた、 $p<0.01$)。このように、質量中心比についても筋や脂肪の付き方によって競技の特徴が反映されることが確認できた。

一方、柔道やウェイトリフティングといった階級制競技については、サンプル数が少なく階級別データを示すには至らなかった。競技種目別平均値を見ると男子柔道選手は下胴の質量比が大きく頭の質量比が小さいという特徴がみられたが (表 5)、個別に見ると軽量級の選手ではそのような特徴を有していなかった。このような例を考慮すると、階級制競技については階級ごとに複数のサンプルを収集することが今後の課題である。

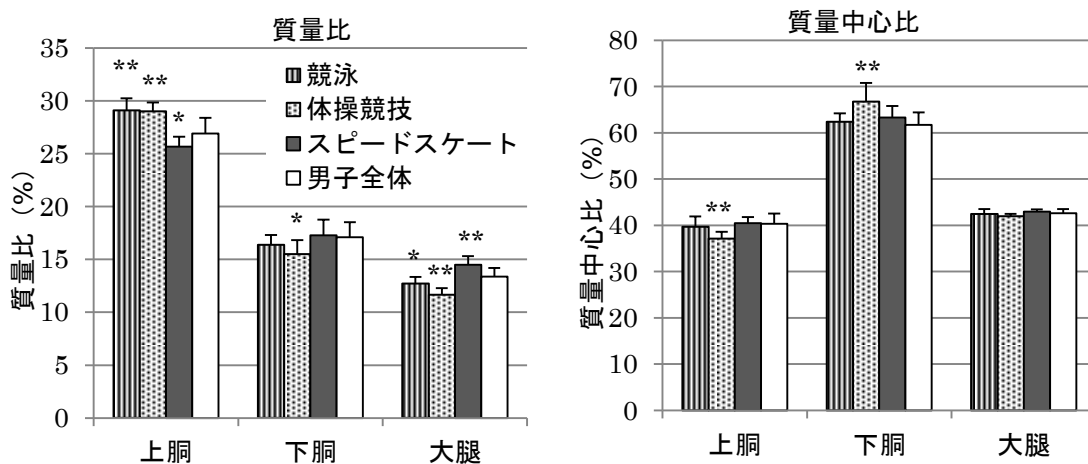


Figure 4. Mass (%) and center of mass location (%) for the upper torso, the lower torso, and the thigh in male swimmers, gymnasts, and speed skaters.

The symbol * and ** indicate significant differences from the population average at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

IV. まとめ

本研究資料では、光学式 3 次元人体形状計測装置による精巧な人体形状計測と磁気共鳴画像装置による身体部分密度算出を組み合わせることによって、日本人トップアスリート 683 名（男性 363 名、女性 320 名）の精密な身体部分慣性係数を算出し、その競技種目別平均値を提示した。アスリートを対象として身体重心やキネティクスの変量を分析する際には、本資料における当該種目の身体部分慣性係数平均値を利用することが可能となった。

V. 謝辞

流通経済大学の高松潤二氏には本研究の発案を含む多くのご助言を戴いた。ここに記して感謝申し上げます。

VI. 参考文献

- 1) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志. 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. バイオメカニズム, 11: 23-33, 1992.
- 2) 阿江通良, 藤井範久. スポーツバイオメカニクス 20 講. 第 1 版, 身体重心とその測定法, 朝倉書店, 東京, 2002, 34-43.
- 3) 阿部敏之, 横澤俊治, 高松潤二, 岡田英孝. 光学式 3 次元人体形状計測装置および 3 次元 CAD ソフトを用いた身体部分慣性係数の算出. 第 30 回バイオメカニズム学術講演会予稿集, 181-184, 2009.
- 4) Bauer JJ, Pavol MJ, Snow CM, and Hayes WC. MRI-derived body segment parameters of children differ from age-based estimates derived using photogrammetry. *J Biomech*, 40: 2904-2910, 2007.
- 5) Chandler RF, Clauser CE, McConville JT, Reynolds HM, Young JW. Investigation of inertia properties of the human body. AMRL Technical Report, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1975, 74-137.
- 6) Cheng CK, Chen HH, Chen CS, Lee CL, Chen CY. Segment inertia properties of Chinese adults determined from magnetic resonance imaging. *Clin Biomech*, 15: 559-566, 2000.
- 7) Clauser CE, McConville JT, Young JW. Weight, volume and center of mass of segments of the human body. AMRL Technical Report, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1969, 69-90.
- 8) Dempster WT. Space requirements of the seated operator. WADC Technical Report. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1955, 55-159.
- 9) Durkin JL, Dowling JJ. Body segment parameter estimation of the human lower leg using an elliptical model with validation from DEXA. *Ann Biomed Eng* 34: 1483-1493, 2006.
- 10) Erdmann WS, Gos T. Density of trunk tissues of young and medium age people. *J Biomech*, 23: 945-947, 1990.
- 11) Huang HK, Wu SC. The evaluation of mass densities of the human body in vivo from CT scans. *J Biomech*, 6: 337-343, 1976.
- 12) Lee MK, Le NS, Fang AC, Koh MTH. Measurement of body segment parameters using dual energy X-ray absorptiometry and three-dimensional geometry: An application in gait analysis. *J Biomech* 42: 217-222, 2009.
- 13) Ma Y, Kwon J, Mao Z, Lee K, Li L, Chung H. Segment inertial parameters of Korean adults estimated from three-dimensional body laser scan data. *Int J Ind Erg*, 41: 19-29, 2011.
- 14) メーラー T, レイフ E. 町田徹 (監訳) CT/MRI 画像解剖ポケットアトラス 1 頭部・頸部. 第 3 版, メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 1994a.
- 15) メーラー T, レイフ E. 町田徹 (監訳) CT/MRI 画像解剖ポケットアトラス 2 胸部・心臓・腹部・骨盤. 第 3 版, メディカル・サイエンス・インターナショナル, 東京, 1994b.
- 16) メーラー T, レイフ E. 町田徹 (監訳) CT/MRI

- 画像解剖ポケットアトラス 3 脊椎・四肢・関節.
第 3 版, メディカル・サイエンス・インターナ
ショナル, 東京, 2008.
- 17) 岡田英孝, 小齊智泰, 小田部一樹, 吉川和利,
横澤俊治. MRI 画像を用いた身体部分密度推定
方法の検討. 第 34 回バイオメカニズム学術講演
会予稿集, 17-18, 2013.
- 18) Park SJ, Kim CB, and Park SC. Anthropometric
and biomechanical characteristics on body segments
of Koreans. *Appl Hum Sci*, 18: 91-99, 1999.
- 19) Plagenhoef S, Evans FG, Abdelnour T. Anatomical
data for analyzing human motion. *Res Q Exerc Sport*,
54: 169-178, 1983.
- 20) Pearsall DJ, Reid JG, Ross R. Inertial properties of
the human trunk of males determined from magnetic
resonance imaging. *Ann Biomed Eng*, 22: 692-706,
1994.
- 21) Shi X, Zheng Z, Shangy H, Du G. Determination of
the density of human tissues: One of the discussions
on the parameters of inertia of the Chinese human
body. *J Norman Bethune Univ Med Sci*, 16: 543-546,
1990.
- 22) 辻村諒太, 小齊智泰, 横澤俊治, 吉川和利, 岡
田英孝. 3 次元 CAD を用いたアスリートの身体
部分慣性係数の算出. 第 33 回バイオメカニズム
学術講演会予稿集, 41-44, 2012.
- 23) Wang J, Gallagher D, Thornton JC, Yu W, Horlick
M, and Pi-Sunyer FX. Validation of a 3-dimensional
photonic scanner for the measurement of body
volumes, dimensions, and percentage body fat. *Am J
Clin Nutr*, 83: 809-816, 2006.
- 24) Woodard HQ, White DR. The composition of body
tissues. *Brit J Rad*, 59: 1209-1219, 1986.

Abstract

Body segment inertial parameters for Japanese elite athletes in various competitive events

The present study estimated precise body segment inertial parameters (BSP) of 683 Japanese elite athletes, and presented the mean values in various competitive events. Three-dimensional coordinate data of the body surface obtained by an optical body line scanner were used to calculate the volume, the location of the center of masses, and the moment of inertia in the case where the density was 1 g/cm^3 for each body segment by using CAD software. In addition, the percentage of segment masses to the total body mass and moment of inertia were calculated by considering the segment densities based on the cross-section image separately measured by MRI. The mean values of the BSP for the particular events provided by this study are available to analyze the body center of gravity and kinetic variables for the athletes.

Key words: Body segment inertial parameters, Body segment density,
Three-dimensional CAD, Body line scanner, MRI