

日本人成人女性における MRI 法による体分節パラメーターの推定

Estimations of body segment parameters in Japanese adult females using MRI methods

古田 なつみ, 船渡 和男

Natsumi FURUTA and Kazuo FUNATO

Abstract

This study aimed to estimate of Body segment parameters (BSPs) in Japanese adult females using magnetic resonance imaging (MRI) methods. Whole-body MR date of 14 Japanese adult females were obtained using 1.5-T MRI scanner. Thirteen tissue areas were identified by MR dates using Fiji/ImageJ software. Body composition and Limb composition were calculated by multiplying each area,10-mm slice thickness and identified tissue densities. Fourteen body segments such as head and neck, trunk, upper arm, forearm, hand, thigh, shank and foot were defined according to the anatomical landmarks in MR dates. Segment mases (%body mass; %BW) and center of masses (%segment length; %SL) obtained from MRI were compared with regression modeling from previous studies.

The results of this study have trended to be smaller in upper arm and forearm than typical values. Females were bigger thigh and shank than males, indicating sex difference affected segment mass. Center of masses (CMs) were affected by the definition of segment lengths. It suggested females accumulated fat mass close to trunk. The CM of trunk in female was lower than previous studies, because upper trunk had lower muscle mass than male. These results suggest to consider the influence of female-specific body segment components.

Key words; Body composition, Magnetic resonance imaging, body segment parameters

I. 緒 言

体分節パラメーター (BSP) は、人体を部位別に分節し、各部位における質量、密度、長さ、質量中心位置、慣性モーメントなどを表す指標である。これらは、スポーツと運動の両方における動作中の力を推定し、分析するために重要な指標の1つである¹⁷⁾。BSPは、直接法 (屍体を分節して計測する手法) あるいは間接法 (各分節の指標を推定する手法) によって計測される。実際に係数として用いられている BSP は、直接法による値が主である。BSPは前述したような物体の物理的な特性を反映する指標であるため、対象集団の持つ特性 (人種、性別、身体組成、形態) の違いにより変化する¹²⁾。従って、上記の集団と異なる特性の集団を対象にこれらの値を用いて分析を行うことは算出誤差を生む原因になることが報告されている¹⁶⁾。

生体は、直接 BSP を計測することはできないため、通常、間接法によって推定した BSP を用いる。その手法は、数式による予測モデル (回帰式^{11, 17)}、幾何学モデル^{6, 20)}、写真法 (2次元^{1, 9)}、3次元¹⁸⁾ 含む) などがある。近年、精度よく個人の BSP を算出する方法として、医療用画像法 (二重エネルギー X 線吸収法: DXA^{12, 16)}、核磁気共鳴画像法: MRI^{7, 15)}) などを用いた算出方法が用いられている。DXA 法は、少量の放射線被爆を伴う方法であり、特定の軟組織の識別ができないことや 3 軸上の BSP が算出不可能などの問題点がある。一方、MRI 法は分析時間と費用はかかるが、放射線被爆をすることなくこれらの組織識別や 3 軸上の BSP を求めることができる。

DXA 法による BSP の算出を試みた先行研究^{3, 12, 16)} は、MRI 法に比べると報告が多く、様々な被験者特性が報告されている。対象者特性の特性に合わせて指標を用いることや、特性別の比較に長けていると考えられる。しかし、慣性モーメント (回転半径) は 1 軸上しか算出できず、複雑な動きの解析を行う際に活用することが難しいと

考えられる。MRI 法による BSP の算出を試みた先行研究では、全身の報告⁷⁾、体幹部をパーツに分けて求めた報告¹⁵⁾ などがある。いずれも中年男性の被験者について報告されたものであり、若年層や女性といった報告は見当たらない。

人体の動きは 3 次元動作も含むため、各体肢における 3 軸上の BSP を求めることは、複雑な動きの動力学分析の推定精度を向上につながると考えられる。特に体幹部は質量比の 40% 以上を占め、様々な組織から構成される部位である。体幹部の BSP の報告^{1, 13, 15)} は様々であり、人種差、体分節定義の影響も報告されている。加えて、女性は第二性徴により、男性よりも胸部や臀部に脂肪が蓄積しやすい特性²⁾ を持つため、従来主として用いられてきた BSP との差異について十分に検討する必要があると考えられる。昨今、競技スポーツにおいても女性競技者の活躍の幅が広がっており、女性における正確な BSP の報告は動力学分析の推定精度を向上させパフォーマンスのさらなる向上に貢献できると考える。

本研究の目的は、日本人成人女性における MRI 法による体分節パラメーターの推定を行い、従来から用いられている屍体、生体分析値、回帰式モデルから算出された値と比較検討することとした。仮説として、日本人成人女性の BSP は、性差の影響により、体幹部や体幹部に近い上腕部や大腿部の BSP が従来報告されている部位と異なることが予想される。

II. 方 法

被験者は、運動習慣のない健康な一般成人女性 14 名 (21.0 \pm 0.6 歳、157.4 \pm 3.2 cm、49.9 \pm 6.3 kg、BMI 20.2 \pm 2.9 kg/m²) を対象とした (表 1)。実験前に書面と口頭による説明を行い、インフォームドコンセントを行って同意を得た。本研究は国士舘大学の倫理審査委員会の承認 (承認番号: 21022) を得て行った。各測定時は 2 時間以上絶食状態かつ水泳帽、スポーツ用下着およびスパッ

ツを着用して計測した。

MRI法による身体組成値算出のためのMR画像は、1.5-T MRI スキャナー（EXCELART Vantage Powered by Atlas, 東芝メディカルシステムズ社）を用いて10mm厚のMR画像を取得した。得られた画像は、画像分析ソフトウェア（Fiji/Image J 2.0.0-rc-69/1.52p; Java 1.8.0_172, National Institutes of Health）を使用して全身の組織量を先行研究と

同様に識別した（図1）。また、各体節の分類は、最も一般的に用いられているDempsterの報告⁵⁾を参考に定義した（表2）。すなわち、全身を頭部および頸部、体幹部、上腕部、前腕部、手部、大腿部、下腿部、足部の14セグメントに分類した。各セグメントの座標系の定義は、X軸：左右方向、Y軸：長軸方向、Z軸：前後方向とし、反時計回りを正とした。

表1 被験者の身体的特徴

		Females (n=14)		
		Range		Mean \pm SD
Age		20.1	- 22.3	21.0 \pm 0.6
Height	(cm)	151.8	- 161.5	157.4 \pm 3.2
Mass(M_{ADP})	(kg)	43.0	- 62.6	49.9 \pm 6.3
BMI	(kg/m^2)	16.5	- 26.5	20.2 \pm 2.9

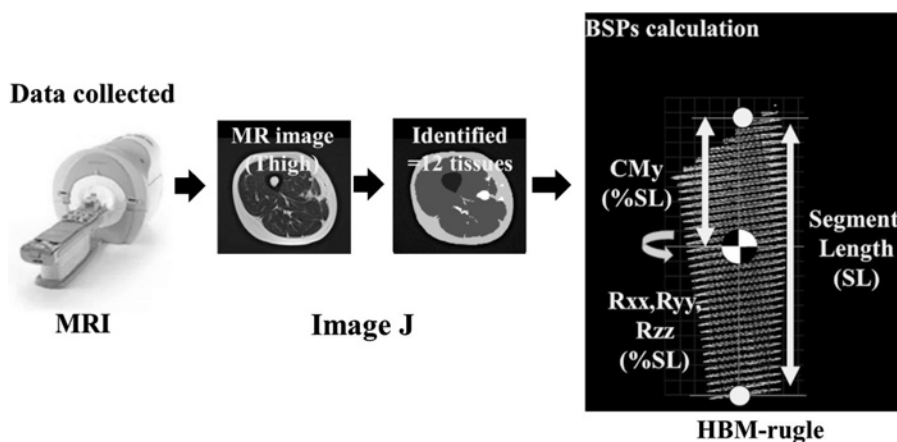


図1 MRI法によるBSP算出の概要（詳しくは本文参考）

表2 体分節定義

segment	Superior end plane	Inferior end plane
Head and neck	vertex	C7 (7th cervical vertebra) plane
Trunk	C7 plane acromion	great trochanter—crotch plane armpit
Upper arm	acromion—armpit plane	lateral epicondyle of humerus plane
Forearm	lateral epicondyle of humerus plane	styloid process of ulna plane
Hand	styloid process of ulna plane	3th fingertip
Thigh	great trochanter—crotch plane	lateral femoral tuberosity plane
Shank	lateral femoral tuberosity plane	lateral malleolus plane
Foot	lateral malleolus plane	sole

相同モデル支援ソフトウェア (HBM-rugle、メディックエンジニアリング社) を用いて以下の式の通り、BSP (セグメント質量、質量中心位置、慣性モーメントおよび回転半径) を算出した。

$$\text{Mass (M)} = \sum_{i,j=1}^N (a_{ij} h \rho_i) \quad (1)$$

$$\text{Center of mass Y axis (CM}_y) = \frac{\sum_{i,j=1}^n [(a_{ij} h \rho_j)(y_0 - y_i)]}{M} \quad (2)$$

$$\text{Motion of Inertia about Y axis (I}_{yy}) = \frac{\sum_{i,j=1}^n [(a_{ij} h \rho_j)\{(x_0 - x_i)^2 + (z_0 - z_i)^2\}]}{M} \quad (3)$$

$$\text{Radius of gyration Y axis (R}_{yy}) = \sqrt{\frac{I_{yy}}{M}} \quad (4)$$

i は画像番号、j は組織番号、a は組織面積、h は画像厚、 ρ は組織密度、x、y および z は各座標、0 は座標の原点 (セグメントの近位端) を表す。セグメント質量は体重比 (%BW)、質量中心位置はセグメント長比 (%SL)、慣性モーメントは、Y 軸と同様に X 軸および Z 軸も算出し、回転半径は %SL とした。セグメントが左右ある場合は両側の平均をセグメントの BSP とした。

統計解析は IBM SPSS Statistics v25 を用いた。先行研究と比較するため、四肢におけるセグメン

ト質量比と質量中心比について回帰式で求めた値と 1 元配置分散分析 (tukey 法) を用いて、比較した。全ての検定の有意確率は 5 % 未満とした。

Ⅲ. 結 果

表 3 に MRI 法と先行研究における体重で正規化した各セグメント質量比の比較を示した。本研究のセグメント質量比は、典型的な報告^{4, 5)}よりも上腕部や前腕部が小さい傾向にあった。一方、頭部および頸部、大腿部や下腿部の質量比は大きい傾向がみられた。

表 4 に MRI 法と先行研究におけるセグメント長で正規化した各質量中心位置比の比較を示した。本研究の質量中心位置比は、典型的な報告^{4, 5)}よりも体幹部はやや下に位置する傾向が見られた。四肢の質量中心位置比は、やや上に位置する傾向が見られた。

表 5 に MRI 法と先行研究におけるセグメント長で正規化した各回転半径比の比較を示した。本研究の質量中心位置比は、先行研究¹⁷⁾の女性の報告とほとんどの部位で同様の傾向を示していた。しかし、体幹部の左右方向の回転半径比

表 3 MRI 法と先行研究における各セグメント質量比 (%BW) の比較

	This study	Dempster	Clauser	Zatsiorsky	Zatsiorsky	Zachary
sex	F	M	M	M	F	F
method	MRI	Cadaver	Cadaver	γ -scan	γ -scan	DXA
published year	2023	1955	1969	2002	2002	2019
age	21.0 \pm 0.6	52-75	28-74	23.8 \pm 6.2	19.0 \pm 4.0	21-39
n	14	8	13	100	15	51
Whole	100	100	100	100	100	100
Head and neck	8.3 \pm 0.7	8.1	7.3a	6.9	6.7	—
Trunk	47.6 \pm 1.3	49.7	50.7b	43.5	42.6	42.2
Upper arm*	2.4 \pm 0.3	2.8	2.6	2.7	2.6	3.4
Forearm*	1.3 \pm 0.1	1.6	1.6	1.6	1.4	1.4
Hand*	0.5 \pm 0.1	0.6	0.7	0.6	0.6	—
Thigh*	11.4 \pm 0.5	10.0	10.3	14.2	14.8	12.3
Shank*	5.1 \pm 0.4	4.7	4.3	4.3	4.8	4.2
Foot*	1.4 \pm 0.2	1.5	1.5	1.4	1.3	—

a:Head, b: Neck and trunk, *mean of both limbs

表4 MRI法と先行研究における各質量中心位置比(%SL)の比較

	This study	Dempster	Clauser	Zatsiorsky	Zatsiorsky	Zachary
sex	F	M	M	M	F	F
method	MRI	Cadever	Cadever	γ -scan	γ -scan	DXA
published year	2023	1955	1969	2002	2002	2019
age	21.0 \pm 0.6	52-75	28-74	23.8 \pm 6.2	19.0 \pm 4.0	21-39
n	14	7	13	100	15	51
Head and neck	51.8 \pm 2.0	43.3	46.4a	50.0	48.4	—
Trunk	55.4 \pm 1.0	49.5	38.0b	43.7	-	42.2
Upper arm*	43.0 \pm 2.7	43.6	51.3	45.0	44.0	49.8
Forearm*	36.3 \pm 2.0	43.0	39.0	42.7	42.6	41.4
Hand*	30.7 \pm 2.0	49.4	48.0	36.9	35.0	—
Thigh*	41.3 \pm 1.3	43.3	37.2	45.5	46.1	45.7
Shank*	38.3 \pm 1.0	43.3	37.1	40.5	40.3	40.4
Foot*	49.2 \pm 1.6 d	50.0d	46.2c	55.6d	59.9d	—

a:Head, b: Neck and trunk, c: medial malleolus-floor, d: acropodion-pternion *mean of both limbs

表5 MRI法と先行研究における各回転半径比(%SL)の比較

	This study			Zatsiorsky			Zatsiorsky		
sex	F			M			F		
method	MRI			γ -scan			γ -scan		
published year	2023			2002			2002		
age	21.0 \pm 0.6			23.8 \pm 6.2			19.0 \pm 4.0		
n	14			100			15		
	Rxx	Ryy	Rzz	Rxx	Ryy	Rzz	Rxx	Ryy	Rzz
Head and neck	30.0 \pm 0.8	24.0 \pm 1.2	31.3 \pm 0.9	30.3	26.1	31.5	27.1	26.1	29.5
Trunk	31.0 \pm 0.7	15.5 \pm 1.1	33.0 \pm 0.7	24.8	14.4	26.7	-	-	-
Upper arm*	27.3 \pm 0.9	10.2 \pm 1.0	27.9 \pm 0.9	32.8	18.2	31.0	32.4	17.3	30.3
Forearm*	28.0 \pm 0.8	9.5 \pm 0.7	28.3 \pm 0.8	29.5	13.0	28.4	27.9	10.1	27.5
Hand*	24.0 \pm 1.0	13.5 \pm 0.8	25.7 \pm 1.0	28.5	18.2	23.3	24.1	15.2	20.6
Thigh*	26.9 \pm 0.4	13.8 \pm 1.2	27.2 \pm 0.4	26.7	12.1	26.7	27.4	12.0	27.0
Shank*	27.5 \pm 0.8	9.5 \pm 0.8	27.7 \pm 0.8	28.1	11.4	27.5	29.7	10.2	29.3
Foot*	24.9 \pm 1.0	25.5 \pm 1.0	11.8 \pm 0.3	24.5	25.7	12.4	29.9	27.9	13.9

*mean of both limbs

(Rxx)と前後方向の回転半径比(Rzz)が男性よりも大きい傾向を示した。

図2にMRI法と先行研究^{11, 17)}の回帰式から算出した四肢のBSP(セグメント質量比および質量中心位置比)の比較を示した。セグメント質量比について、下腿部におけるZacharyらの推定値以外、本研究のセグメント質量比は統計上有意に小さかった($p<0.05$)。また回帰式から求めた値同士でもZatsiorskyの回帰式は、Zacharyらの回帰式で求めた値よりもセグメント質量比が統計上有

意に大きかった($p<0.05$)。質量中心位置比について、Zatsiorskyの回帰式よりも本研究は統計上有意に近位端に近い位置に質量中心が存在した($p<0.05$)。一方、Zacharyらの先行研究よりも本研究は上腕部、前腕部、下腿部において統計上有意に近位端に近い位置に質量中心が存在し、大腿部において統計上有意に近位端から遠い位置に質量中心が存在していた($p<0.05$)。同年代の女性用に作られた回帰式で求めた推定値であっても本研究の結果とはBSPが異なっていた。

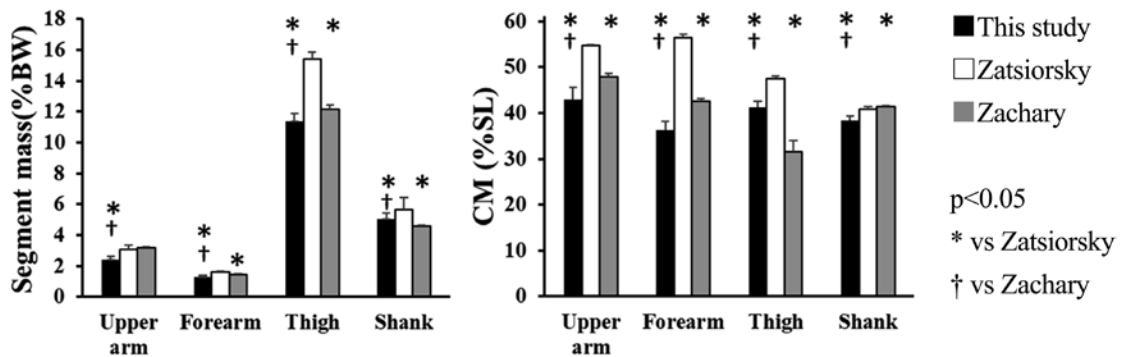


図2 MRI法と先行研究の回帰式から算出した四肢のBSP（セグメント質量比および質量中心位置比）の比較

Ⅳ. 考 察

物体の動力学分析に必要なBSPは、推定誤差を限りなく少なくするために対象とする集団特性に合わせて用いる必要がある。BSPの違いは、屍体または生体か、測定方法や体分節定義によるもの、あるいは性別、人種、年齢、活動レベルなどの違いによる身体組成が影響している¹⁷⁾。本研究は、先行研究¹⁹⁾に報告したように、MRI法で分析した全身の身体組成がゴールドスタンダードである空気置換プレチスモグラフィーと同等であると確認した上で分析している。本研究は生体における日本人成人女性を対象とした結果であり、先行研究がもつ身体組成と異なり、それらがBSPの違いに影響すると予想して考察する。

セグメント質量比について、本研究結果が典型的な報告よりも上腕部や前腕部が小さく大腿部や下腿部が大きいのは、性差による違いが大きいことが考えられる。一般的に分析に用いられているBSPは、Dempster⁵⁾やClauser⁴⁾が報告している直接法で求めた白人男性（高齢者あるいは若年～中高年者）を対象とした報告が主とされている。男女の身体組成を比較した研究によると、男性は上肢の筋量が発達しやすく、女性は下半身の筋量⁸⁾が多いことが報告されている。また女性は下半身の脂肪量が男性よりも蓄積しやすく、加齢とともに増加する脂肪は主に上肢や腹部に蓄積する

報告がある²⁾。従って、本研究のような若い女性では、上肢はあまり筋量や脂肪量がつかず、質量が少ない傾向にあり、相対的に下肢の質量が大きくなったと考えられる。同年代の若い男女を調べたZatsiorsky¹⁷⁾も同様の傾向が見られたことは、性差による影響を顕著に示唆すると考えた。

同じ女性であっても、Zatsiorsky¹⁷⁾やZachary^{11, 12)}らの体幹部とセグメント質量比が大きく異なるのは、下肢と体幹部の体分節定義の違いによる影響が大きいと考える。本研究の下肢と体幹部の体分節定義は、股下と大転子を結んだ線であり、Zatsiorsky¹⁷⁾は、股下と垂直軸に対する37度線（上前腸骨棘あたり）を結んだ線である。Zacharyらは、Chamberの報告³⁾と同様に股下と大腿骨頭を結んだ線である。つまり、本研究は分節部位が下で、先行研究は上に位置する。よって、本研究の方が大腿部の質量比が小さく、体幹部が大きくなる。

Zacharyらは、体幹部の体分節位置の差異によるBSPへの影響も検討している¹³⁾。この結果を支持するのであれば、Zatsiorskyの方法は、大腿四頭筋の起始である腸骨棘近辺が切断部と考えると機能解剖学的に理にかなっているが、股関節中心を主軸に置くと即していない可能性がある。本研究においてもZatsiorskyの分節方法を予備実験で実施した際、内臓を大腿部に分類してしまうケースがあり、皮膚上からも触診しやすいDempster⁵⁾

の定義を採用した。これは女性の方が腹部の内臓組織が多く骨盤が広い¹⁴⁾ことに起因しているかもしれない。さらに、Zacharyら¹¹⁾はDXAを用いてBSPを算出している。DXAは正確な筋量や内臓の組織量などの区別はつかないため、頭部や体幹部のような内臓の多い部位の推定が難しいことも影響しているかもしれない。

質量中心位置比について、本研究結果の頭部および頭部や体幹部は、典型的な報告^{4, 5)}よりも下に位置していた。セグメント近位・遠位端、体分節定義の違いを考慮に入れてもやや下に位置していると考えられる。セグメント質量比でも考察したように、本研究の対象者は、性差によってやや下半身に質量が分布していることが考えられる。加えて、体分節定義もやや下に位置するように分節している影響も考えられる。一方、本研究結果の四肢の質量中心位置比は、やや上に位置していた。これは、体幹に近い近位端側に脂肪量が蓄積する性差¹⁰⁾による影響が考えられる。特に下肢の質量中心位置比の方が近位端に位置することは、上肢より下肢に脂肪が蓄積しやすい若年者²⁾であることも影響しているかもしれない。

回転半径について、ほとんどの研究では慣性モーメント^{4, 5)}や1軸のみ¹²⁾の記載が多いため、3軸の記載があるZatsiorsky¹⁷⁾との比較を中心に論じる。本研究の結果は女性の値と比較するとほとんどの部位でほぼ同等の値を示していた。男性の値と比較するとやや小さい傾向があることから、女性は男性よりも基本的に回転半径が小さい傾向にあることが考えられる。一方で、体幹部の左右方向や前後方向の回転半径は、男性よりも大きい傾向が見られた。女性との比較ができないため、一概に比較することは難しいと考えられるが、これらも性差の影響が考えられる。つまり、第二次性徴による特定部位における脂肪量の蓄積が凹凸の少ない平坦な形態を持つ男性に比べると左右や前後方向への回転半径を増加させる要因になることが示唆された。

V. ま と め

本研究は日本人成人女性におけるMRI法による体分節パラメーターの推定を行い、従来から用いられている屍体、生体分析値、回帰式モデルから算出された値との比較検討を行い、その差異について以下の知見が得られた。

1. 本研究のセグメント質量比は、女性が下半身に筋量や脂肪量が付きやすい性差の影響により、先行研究に比べて上肢が小さく、下肢が大きい傾向がみられた。また体幹部の体分節定義や手法の違いにより、同年代の女性を対象とした研究よりも大きい傾向が見られた。
2. 本研究の質量中心位置比は、体幹部側に脂肪量が蓄積しやすい影響により、四肢の質量中心位置比が近位端側に位置する傾向が見られた。
3. 本研究の回転半径は、概ね先行研究と同様の値を示した。体幹部の左右方向と前後方向は、女性特有の脂肪量蓄積の影響により、先行研究よりも回転半径が大きい傾向が見られた。

以上のことから、日本人成人女性におけるBSPの特徴として、特に上肢のセグメント質量比が小さく、四肢の質量中心位置比が近位端側に位置していた。回転半径について、四肢の回転半径が同様の値であった。一方、体幹の左右方向と前後方向の回転半径が先行研究より大きい傾向を示した。これらの結果は、女性特有の身体組成の影響を示唆するものであった。

参考文献

- 1) AE Michiyoshi, TANG Hai-peng, YOKOI Takashi: 日本人アスリートの身体部位慣性係数, Society of Biomechanisms Japan, 1992.
- 2) Alessandra Coin Elena Ruggiero, Sandro Giannini,

- Mario Pedrazzoni, Salvatore Minisola, Maurizio Rossini, Antonio Del Puente, Emine Meral Inelmen, Enzo Manzato, Giuseppe Sergi : Trunk and Lower Limb Fat Mass Evaluated by Dual-Energy X-Ray Absorptiometry in a 20- to 80-Year-Old Healthy Italian Population, *Ann Nutr Metab*, 61 : 151-159, 2012.
- 3) Chambers April J., Sukits Alison L., McCrory Jean L., Cham Rakié : Differences in geriatric anthropometric data between DXA-based subject-specific estimates and non-age-specific traditional regression model, *J Appl Biomech*, 27 : 197-206, 2011.
 - 4) Clauser C. E., McConville J. T., Young J. W. : WEIGHT, VOLUME, AND CENTER OF MASS OF SEGMENTS OF THE HUMAN BODY, 1969.
 - 5) DEMPSTER WILFRED TAYLOR : Space requirements of the seated operator : geometrical, kinematic, and mechanical aspects of the body, with special reference to the limbs, Wright-Patterson Air Force Base : 183-201, 1955.
 - 6) HATZE H. : A MATHEMATICAL MODEL FOR THE COMPUTATIONAL DETERMINATION OF PARAMETER VALUES OF ANTHROPOMORPHIC SEGMENTS, *J Biomechanics*, 13 : 833-843, 1980.
 - 7) Ho W. H., Shiang T. Y., Lee C. C., Cheng S. Y. : Body segment parameters of young Chinese men determined with magnetic resonance imaging, *Med Sci Sports Exerc*, 45 : 1759-1766, 2013.
 - 8) IAN JANSSEN STEVEN B. HEYMSFIELD, ZIMIAN WANG, and ROBERT ROSS : Skeletal muscle mass and distribution in 468 men and women aged 18-88 yr, *Journal of Applied Physiology*, 89 : 81-88, 2000.
 - 9) Jensen Robert K : Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method, *J Biomechanics*, 11 : 349-358, 1975.
 - 10) Machann J., Thamer C., Schnoedt B., Haap M., Haring H. U., Claussen C. D., Stumvoll M., Fritsche A., Schick F. : Standardized assessment of whole body adipose tissue topography by MRI, *J Magn Reson Imaging*, 21 : 455-462, 2005. doi : 10.1002/jmri.20292.
 - 11) Merrill Z., Perera S., Cham R. : Predictive regression modeling of body segment parameters using individual-based anthropometric measurements, *J Biomech*, 96 : 109349, 2019. doi : 10.1016/j.jbiomech.2019.109349.
 - 12) Merrill Z., Perera S., Chambers A., Cham R. : Age and body mass index associations with body segment parameters, *J Biomech*, 88 : 38-47, 2019. doi : 10.1016/j.jbiomech.2019.03.016.
 - 13) Merrill Zachary, Bova Grace, Chambers April, Cham Rakié : Effect of trunk segment boundary definitions on frontal plane segment inertial calculations, *Journal of Applied Biomechanics*, 34 : 232-235, 2018.
 - 14) Möller Torsten B., Reif Emil, 小林 有香, 町田 徹, 胸部・心臓・腹部・骨盤, (第4版), メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2015.
 - 15) Pearsall D.J., Reid J.G., Ross R. : Inertial properties of the human trunk of males determined from magnetic resonance imaging., *Annals of Biomedical Engineering*, 22 : 692-706, 1994.
 - 16) Rossi Marcel, Lyttle Andrew, El-Sallam Amar, Benjanuvatra Nat, Blanks Brian : Body segment inertial parameters of elite swimmers using DXA and indirect methods., *Journal of Sports Science and Medicine*, 12 : 761-775, 2013.
 - 17) Zatsiorsky Vladimir M. : Kinetics of human motion, 2002.
 - 18) 横澤俊治, 辻村諒太, 窪康之, 高橋英幸, 岡田英孝 : 国内一流競技者の競技別身体部分慣性係数, *JAPANESE JOURNAL OF ELITE SPORTS SUPPORT*, 8 : 11-27, 2016.
 - 19) 古田なつみ, 船渡和男 : 成人女性におけるMRI法とADP法による全身の身体組成評価の差異, *体育・スポーツ科学研究*, 23 : 9-16, 2022.
 - 20) 松井秀治 : 各種姿勢の重心位置に関する研究, *体育学研究*, 2 : 65-76, 1956.