

身体の部分質量比及び内分質量比の測定

～身体を上体（頭部+胴+両上肢）と下体（両下肢）に2分割することを想定して～

永澤 朋子

教科教育専攻 保健体育専修

I：はじめに

動画や静止画像をもとに身体運動に関わる力学量を算出したり、モデルを介して運動様相をシミュレーションするためには、演算の基礎データとして身体の部分質量とその中心位置がわからなければならない。しかし、分析の対象となる個体の部分質量と中心位置を調べることは容易ではなく、現状でこの種の実験や研究を行うときは先行研究のデータに頼らざるを得ない。

当初、身体の部分質量と重心位置の測定は、氷結した死体を切断してバランスプレートや物理振り子法を用い、直接測定する方法がとられていた^{8) 15)}。しかし、この方法は、極めて高精度な測定ができる反面、死体標本を使っているため標本数が少なく、計測データも高齢者に偏っているという問題があった。そこで、生体標本を使い間接的に測定する方法が提唱された。

死体標本を用いた直接法での部分質量および質量中心位置は、1860年にHarlessがWeber兄弟の身体重心の測定に使ったバランスプレートを応用し測定した報告が始まりとされている⁸⁾。この方法は、死体を主要な18のセグメントで切断し、各部分を直接測定している。このとき、死体切断時の体液の損失を防ぎ、正確なデータを得るために切断面を縫い合わせている。また、Fisher and Braune(1889)¹⁶⁾は、Harlessの体液の損失問題を解決するため死体を氷結し、中年白人男性の部分質量と質量中心を測定した。

Dempster(1955)⁶⁾はFisher and Brauneの方法を改良し52~83歳の白人男性で測定を行っている。セグメントの分割はFisher and Brauneに似ているが、より正確に各セグメントを分割するために、関節を曲げてから氷結し4段階に分けて切断している。また切断する前に各セグメントを測定し、推定可能な質量中心はバランスプレートを用いて、各部分体積はArchimedesの原理を応用して測定されている。

Clauser (1969)⁵⁾はDempsterやFisher and Brauneのデータが高年齢者に偏り、若者にそのデータを応用することの妥当性の低さを指摘し、24~78歳の若者から老人までの白人男性の死体を測定した。

また日本では、森と山本が日本人の男女の死体標本を使った研究が報告されている。しかし、この研究の詳細は報告されていない。⁵⁾

上記のように死体標本を用いた方法のほとんどは白色人種の高齢者に偏り、標本数もかなり少ないという問題があるにもかかわらず、これらのデータは現在の研究で広く適用されている。

間接法は1958年に松井¹²⁾が数学リンクモデルを使い日本人成人男女の各部分の質量比と内分質量比の計測を報告したのが先駆けとなった。この研究での部分質量の測定は、身体各部分を円錐や円柱、球などの数学モデルに置き換え、体積を求め、部分の組織に応じ

た一定密度を乗じて算出している。このとき組織分布は骨質量以外筋肉質量と同量と仮定している。各身体の部分質量中心位置に関しても体積計算に利用した数学リンクモデルを使い、算出している。この結果により成人男女の体重との比率から部分質量を、部分の長軸の長さから部分重心位置を求める係数を導きだした。このデータを基に写真から運動中の全身体の重心位置を推定している。

また、1978年に Jensen^{9) 10) 11)} は単純な円錐や円柱のような数学リンクモデルを複雑な人間の体系に置き換えることの妥当性の低さを指摘し、身体部分を厚さ 2cm の楕円板の集合体にモデル化し、45° の鏡を用いた写真撮影により正面と側面を同時に撮影し、そのフィルムからデジタイザーを用いて、各楕円板の体積を算出し密度を乗じて部分質量を求めている。このときの密度は Dempster を参考に密度を均一と仮定している。この方法で、Jensen は高齢化に伴う異なる男女の体形の変化が及ぼす部分質量の違い、成長期の子ども部分質量の変化、体形別（肥満型、痩せ型、がっちり型）部分質量の違いを述べている。

数学リンクモデルの研究は 1990 年に松尾等¹³⁾ により検討されており、そこでは松井の係数の妥当性の低さを述べている。それはどの被験者にも、またどの部分でも一定密度を使っていることが原因であるとし、Jensen のゾーンモデルのように身体を細分化し体積を推定し、それぞれのゾーンの密度がわかれば、より正確な値が導き出されるとしている。これらをふまえ、日本では各母集団に応じた実験が行われている。

横井等(1986)¹⁸⁾ は Jensen のモデルを応用し、写真計測用フレームの中に立たせた被験者を、前方、側方から 2 台の 35mm スチールカメラを用いて同時に撮影し、得られたフィルムから日本人幼少年の身体部分係数を導きだし、子どもの成長に伴い男女で体形が異なり、部分質量、質量中心に差があると述べている。このとき、身体各部分密度は一定としている。

阿江等 (1992)¹⁾ は横井と同様の方法で日本人アスリートの身体部分慣性特性を測定している。この研究は、動作分析を目的としたセグメント分けのため、15（胴を上胴と下胴に分けた）個に分割している。また、密度は Clauser らが報告したものを使い、各部分の密度は一定であると仮定した。この研究の結果は松井²⁾ の一般成人男女と Zatsiorsky and Seluyanov¹⁷⁾ のソビエトのスポーツマンとの比較から、一般成人のデータをスポーツマンに用いることは望ましくなく、また日本人アスリートはソビエトのアスリートより上体が細く、大腿が太いことを指摘し、人種での体格の違いから部分質量と質量中心に差が生じると述べている。

また阿江(1996)²⁾ は、上記と同様の方法で、日本人高齢者の身体部分慣性特性を測定し、性別、年齢、他人種との差を報告している。

近年では Cheng⁴⁾ が、中国人被験者を使い組織分布を明確に認識できる放射線照射法を改良した MRI を使って部分質量と質量中心を測定している。この方法は 20mm の間隔で身体をスキャンし組織分布をより明確に認識することで、体積と密度を乗じて質量を求めることができる。しかしながらこの方法にも問題がある。1 つは 20mm 間隔でスキャンしているため、セグメント分割の境界線をはずしてしまう可能性があり、正確な分節ができない。2 つ目は、画像が鮮明でないため画像処理ソフトウェアを使い組織境界線を強化しているため正確な組織分けができない。3 つ目は、密度を均一と仮定することはデータに影

響をおよぼしている。4 つ目はヒトの複雑な体系の体積を求める困難さを指摘している。このように現在の最先端の技術を使っても身体の体積及び密度を正確に求めることは困難である。

また水置換法が Park¹⁴⁾ により行われ、この方法は Archimedes の原理から十分に水がそそがれた容器に身体の各部分を浸し、その水量の差から容積を求め、各セグメントの密度を乗じて身体の部分質量を算出した。このときの密度は Drillis と Contini の全身体密度から部分密度を計算する方法で推定している。また、部分質量中心は重心測定板から求めている。この測定では先端の部分質量中心の測定は困難であるとし、連携する 5 つのセグメント（例えば、手と前腕、上腕と前腕と手のように）の質量中心の測定を行っている。

Winter¹⁶⁾ は急速解放法により、慣性モーメントと部分質量中心を推定する方法を紹介している。これは、足を拘束するワイヤーロープを急速に切断した時の前方向の力の変化から推定する方法である。

先行研究から、間接法での身体の部分質量は人体各部分の体積、密度をより正確に推定することで実際の部分質量に近い値を算出することができる。また、内分質量は、てこのつりあい原理を利用した重心測定板や身体を数学的モデルに置き換え、座標から推定されている。しかしながら、正確な体積、中心座標を求めることは、人体が複雑な形をしているため困難であると思われる。また、適用される密度は死体標本の偏ったデータであり、条件の異なる被験者に適用するのは妥当性に欠ける。重心測定板を用いる場合、各部分質量が明確でない限り正確な内分質量比を得るのは困難である。

身体の部分質量と重心位置を簡便な方法で高精度に測定するには、古くから行われている重心測定板法³⁾により生体標本を直接測定することが望ましい。これは、測定自体がシンプルで、実験における誤差の出現要素が他の測定法に比べ少ないからである。しかし、重心測定板法がこれまで採り上げられなかったのは、実測値の精度が高いといわれるが所以、これに含まれる測定誤差を考慮せず、単に数学的手法によってのみ部分質量と重心位置を求めようとしていたからではないかと考える。

本研究では、重心測定板法を応用して、視点を変えたアプローチを試み、身体部分質量と重心位置を求める新たな方法を探りたい。

II：方法

本研究では、身体を上体（頭部＋胴＋両上肢）と下体（両下肢）に 2 分割した剛体モデ

ルを想定し（2分割法）、重心測定板法を用いて、それぞれの部分質量比と内分質量比を求める。その解析手順を以下に述べる。

1. 身体を1つの剛体モデルとして考える。（図1参照）

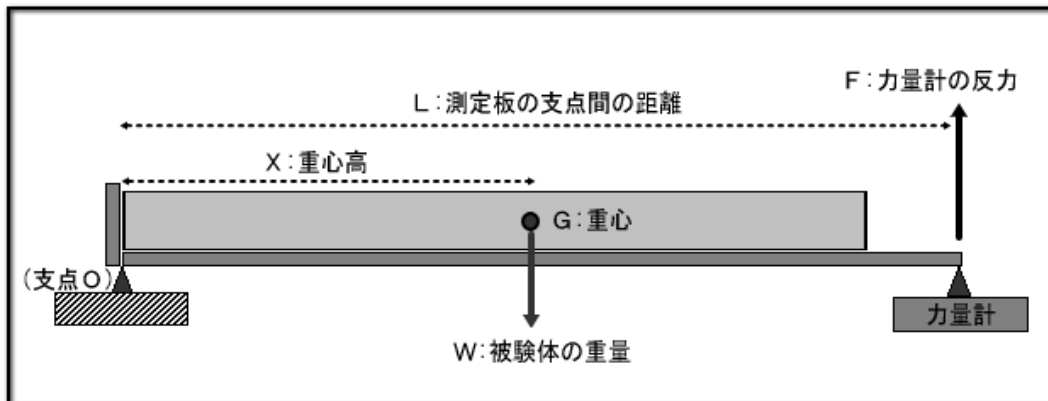


図1：重心測定板法による重心の測定

図1において、身体の重心位置 G
 支点Oから重心までの距離 X
 被験体の重量 W
 力量計の反力 F
 測定板の支点間の距離 L

とすれば、支点Oまわりの力のモーメントのつりあいから、

$$X \times W = L \times F \dots \dots \dots (1)$$

の基本式が導かれる。

2. 身体を上体と下体に2分割した剛体モデルを考える。（図2参照）

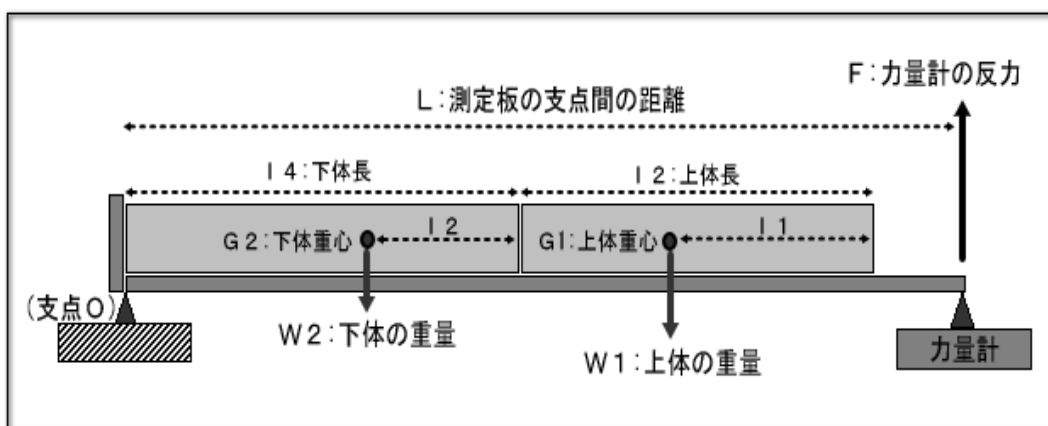


図2：身体を2分割したときの模式図

図2は、図1の剛体を2分割したときの模式図である。これをヒトのからだを上体と下体に2分割したモデルと考え、

図 2 において、上体の重心位置 G_1
 上体の質量比 $mr_1 (=w_1/W)$
 上体の長さ l_2
 上体の中枢端から重心までの距離 l_1
 上体の中枢端からの内分質量比 $lr_1 (=l_1/l_2)$
 下体の重心位置 G_2
 下体の質量比 $mr_2 (=w_2/W)$
 下体の長さ l_4
 下体の中枢端から重心までの距離 l_3
 下体の中枢端からの内分質量比 $lr_2 (=l_3/l_4)$

とすれば、(1)式同様、支点Oまわりの力のモーメントのつりあいから

$$L \times F = \{l_4 + (l_2 - l_2 \times lr_1)\} \times M \times mr_1 + (l_4 - l_4 \times lr_2) \times mr_2 \times M \dots \dots \dots (2)$$

が成り立ち、

$$F = \{[l_4 + (l_2 - l_2 \times lr_1)] \times mr_1 + (l_4 - l_4 \times lr_2) \times mr_2\} \times M / L \dots \dots \dots (3)$$

の関係が導かれる。

(3)式は重心測定板法による実験値(F,W,L)と本実験で求めるべき部分質量比(mr_1, mr_2)および内分質量比(lr_1, lr_2)との関係を示すものであり、本研究ではこれを数値解析の基本式とした。

3. 上体と下体の質量比及び内分質量比の推定をする。

まず、上体と下体の質量比(mr_1, mr_2)及び内分質量比(lr_1, lr_2)の予想される出現範囲と増分値を決める。(表 1 参照)

ここでいう出現範囲とは、被験者の体型が標準的な体型から隔たりがあっても、予想した範囲を超えることはないだろうという各質量比の下限值と上限値のことである。本研究では松井の値¹²⁾をもとに決定した。また、増分値とは、 mr_1, lr_1, mr_2, lr_2 の値を下限値から上限値まで増分するときのステップ値のことで、これをもとに上記出現範囲における4つの質量比のすべての組み合わせを考える。

表 1：上体と下体の部分質量比(mr_1, mr_2)と内分質量比(lr_1, lr_2)の出現範囲と増分値

質量比	下限値	上限値	増分値
mr_1	0.631	0.681	0.001
lr_1	0.60	0.70	0.01
mr_2	0.319	0.369	0.001
lr_2	0.37	0.47	0.01

次に、そのすべての組み合わせについて、(3)式より「仮想値」を求める。このとき表 1 の条件で計算される組み合わせの総数 n は、

$$n=(0.681-0.631+1)\times(0.70-0.60+1)\times(0.369-0.6319+1)\times(0.47-0.37+1)\cdots\cdots (4)$$

となるが、このうち、 $mr1+mr2=1$ の条件を満たさない組み合わせを除外すると、実質「仮想 F 値」を求める組み合わせは 6172 通りとなる。

そして、実験で得られる床反力 F 値と仮想 F 値との差の二乗（実験 F 値－仮想 F 値）² が最も小さい $mr1$, $lr1$, $mr2$, $lr2$ の組み合わせを抽出し、これを各質量比の推定値とする。

本研究で提示した身体を二つに分ける 2 分割法は、分割の対象を変えれば、理論的にはからだのすべての部分に応用できる。例えば、頭部とそれ以外、あるいは、上肢とそれ以外等々である。

なお、本研究の計算処理は、国際規格の JISFullBASIC に準拠した「(仮称)十進 BASIC」¹⁹⁾ により行う。この言語は、計算精度を設定することができ、本研究で扱う数値は、浮動小数点 10 進数で計算され、1000 桁の計算精度を保たれる。作成したプログラムとそのフローチャートは本論文の巻末に付した(資料 1、資料 2-1、資料 2-2 参照)。

II：結果及び考察

1.数値モデルによる検証

まず、本研究の部分質量比と内分質量比を推定する方法が理論的に成立するかどうか、以下に示す標準的体型の被験者モデル(松井の値¹²⁾を参照)を考え、本研究の方法で各質量比が抽出できるのか検証する。

(数値モデル)

条件 1 : 被験体の質量	$M=60\text{kg}$
条件 2 : 上体の質量比	$mr1=0.656$
条件 3 : 上体の中枢部からの内分質量	$lr1=0.65$
条件 4 : 上体長	$l2=0.867\text{m}$
条件 5 : 下体の質量比	$mr2=0.344$
条件 6 : 下体の中枢部からの内分質量	$lr2=0.42$
条件 7 : 下体長	$l4=0.833\text{m}$
条件 8 : 測定台の支点間の距離	$L=2.000\text{m}$

上記モデルの 8 つの条件を前述した(3)式に代入し床反力 F 値を求めると、 $F=27.3513408\text{kg}\cdot\text{重}$ となる。これを床反力の実験 F 値として、 $mr1$, $lr1$, $mr2$, $lr2$ の値を表 1 の予想される出現範囲内で変化させ、(実験 F 値 - 仮想 F 値)²の小さい順に各質量比の組み合わせを抽出すると、以下の出力結果が得られた。

(結果の出力例) : 床反力 F 値を $[F=27.3513408]$ とした場合の上位 5 位までを記載

No.1	$mr1=0.658$	$lr1=0.65$	$mr2=0.344$	$lr2=0.42$	$d^2=0.0000000000000000E+00$
No.2	$mr1=0.647$	$lr1=0.65$	$mr2=0.353$	$lr2=0.40$	$d^2=1.2744900000000000E-09$
No.3	$mr1=0.652$	$lr1=0.63$	$mr2=0.348$	$lr2=0.45$	$d^2=1.4981760000000000E-08$
No.4	$mr1=0.644$	$lr1=0.62$	$mr2=0.356$	$lr2=0.45$	$d^2=1.8352656000000000E-07$
No.5	$mr1=0.651$	$lr1=0.67$	$mr2=0.349$	$lr2=0.37$	$d^2=3.2626944000000000E-07$

この結果は、想定した数値モデルの上体と下体の質量比及び内分質量比を「誤差=0」の組み合わせとして抽出しており、本研究で提示した推定方法が数値解析上、理論的に正しいことを示唆するものと考ええる。

ただ、実際の重心測定板法による実験では、身体の部分長や体質量、床反力などの計測値には誤差が含まれる。このため、今回提示した部分質量比と内分質量比を推定する方法の実用的精度については、人体モデルを作製して、実験的に確認しなければならないと考える。

2. 人体モデルによる検証

そこで、ヒトのからだを上体と下体に 2 分割した人体モデルを作製し、本研究の方法論的妥当性を検証する。この人体モデルは、上体と下体を想定した平板にバーベルプレートを乗せることによって、それぞれの質量と重心位置を調整できるようにしたものである。

検証の手順は以下の通りである。

まず、作製した上体と下体の人体部分モデルの質量比及び内分質量比を重心測定板法により測定する(写真 1、写真 2、表 2)。



写真 1: 上体モデルの測定



写真 2: 下体モデルの測定

次に、上体と下体モデルを合体させた人体モデルを想定して、同じく重心測定板法により床反力 F 値を測定する(写真 3、表 2)。



写真 3: 上体と下体モデルを合体させた人体モデルの測定

これらの手順を経て、本研究では、表 2 に示す条件の異なる 5 種類の人体モデルを設定した。

表 2: 人体モデルも実験値(上体長:0.909m、下体長:0.799m)

モデルNo.	体質量 (kg)	上体		下体		F値 (kg・重)
		質量比	内分質量比	質量比	内分質量比	
モデル 1	74.80	0.637	0.63	0.363	0.45	29.00
モデル 2	64.80	0.660	0.64	0.340	0.41	25.70
モデル 3	53.55	0.659	0.62	0.341	0.43	21.30
モデル 4	42.95	0.644	0.65	0.356	0.40	16.60
モデル 5	41.65	0.664	0.67	0.336	0.41	16.15

表 3 は、表 2 の人体モデル 1~5 の床反力 F 値を実験 F 値とし、前節の「方法」で述べた手法により、各モデルの上体と下体の質量比及び内分質量比を求めたものである。

また、表 4 には、人体モデル各質量比の実測値（表 2）に対する推定値（表 3）の誤差率を示した。

表 4 からわかるように、人体モデルを使った検証の結果、推定誤差の平均は、上体の部分質量比と内分質量比で 1% 未満、下体では、部分質量比が約 1%、内分質量比が約 3% の値を得た。この結果は、本研究で提示した上体と下体の質量比及び内分質量比を推定するための重心測定板法による 2 分割法が、十分実用に耐えうることを示唆するものであると考える。

一方、表 4 にあるように、上体の推定誤差に比べ、下体の推定誤差は部分質量比、内分質量比ともに値が大きくなっている。これには次ぎの理由が考えられる。

今回、実験で使用した床反力の計測器は、0kg・重～100kg・重の範囲で測定可能なものを用いた。この場合、計測範囲の中央値（50kg・重）付近のデータの信頼性は高いが、測定値が中央値から離れるに従って精度が下がるのが一般的である。下体は上体に比べ、質量が小さく、設定した各モデルの部分質量比、床反力 F 値ともに上体に比べ測定精度が低くなったと考えられる。

また、上体と下体の長さの計測においても、下体は上体に比べ値が小さく、測定誤差が同じであれば誤差の割合は下体が大きくなる。このように測定上の誤差の問題が相乗した結果、下体の推定誤差が上体に比べ大きい値を示したものと考える。

表 3: 人体モデルの推定値

モデルNo.	上体		下体	
	質量比	内分質量比	質量比	内分質量比
モデル 1	0.637	0.63	0.364	0.43
モデル 2	0.662	0.63	0.338	0.42
モデル 3	0.648	0.60	0.352	0.44
モデル 4	0.645	0.65	0.355	0.42
モデル 5	0.668	0.67	0.332	0.42

表 4: 人体モデルの実測値に対する推定誤差 (%)

モデルNo.	上体		下体	
	質量比	内分質量比	質量比	内分質量比
モデル 1	0	0	0.28	4.44
モデル 2	0.30	1.56	0.59	2.44
モデル 3	1.67	3.23	3.23	2.33
モデル 4	0.16	0	0.28	5
モデル 5	0.60	0	1.19	2.44
平均	0.55	0.96	1.11	3.33

3. 被験者を使つての上体と下体の質量比及び内分質量比の測定

以上の結果を踏まえ、3 名の男子被験者を対象に、上体と下体の質量比及び内分質量比

の測定を試みた。本研究の重心測定板法による各被験者の実測値を表5に示す。

なお、本実験では、被験者の体質量と床反力F値は、通常市販されているデジタ

表5: 被験者を使った重心測定板法による実験値

被験者	性別	年齢 (歳)	体質量 (Kg)	身長 (m)	上体長 (m)	下体長 (m)	床反力F値 (Kg・重)	
							直立姿勢	逆直立姿勢
Sub. A	Male	23	70.15	1.7728	0.8867	0.8861	29.90	24.55
Sub. B	Male	22	70.25	1.7228	0.8382	0.8846	29.30	23.65
Sub. C	Male	22	81.90	1.7526	0.8356	0.9170	34.50	28.25

※: 重心測定板の支点間の距離=2.2900 m

ル体重計（最小計測単位は50kg・重）を使用して測定した。また、被験者の身長、上体長、下体長、及び、測定板の支点間の距離は1/10mmの精度で読み取れる計測器を使用している。

また、表5に示した床反力F値の逆直立姿勢の測定値は、重心測定板法の実験精度を確認するためのもので、前述した(1)式により、直立姿勢のF値からは踵骨底部から身体重心位置が求められ(写真4)、同様に、逆直立姿勢のF値からは頭頂部からの身体重心位置が算出される(写真5)。理論的にはこの2つの値の和が被験者の身長に等しいはずであるから、これらの値を比較することで実験の測定精度が確認できる。

本実験では、Sub. Aで0.27%、Sub. Bで0.13%、Sub. Cで0.11%の測定誤差があり、3被験者の平均では0.17%となる。これを実測値に換算すると、重心位置のデータには約2mm程度の誤差が含まれることになるが、この値は測定上極めて小さく、本実験の精度は十分に確保されていると考える。

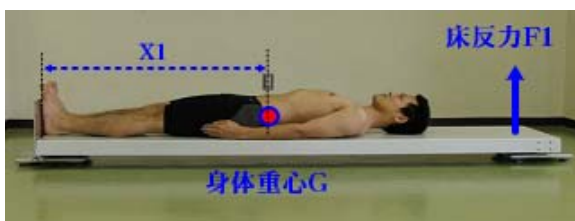


写真4: 直立姿勢時の身体重心の測定
(X1: 踵骨底部から重心までの距離)

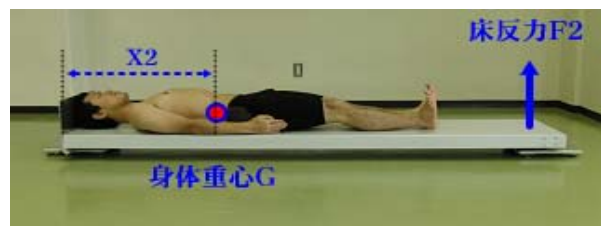


写真5: 逆直立姿勢時の身体重心の測定
(X2: 頭頂部から重心までの距離)

以下、3名の被験者について、重心測定板法より求めた上体と下体の質量比及び内分質量比の演算結果を示す。

1): Sub.Aの結果

No.1 $mr_1=0.656$ $lr_1=0.62$ $mr_2=0.344$ $lr_2=0.43$ $d^2=7.7669065352682062E-10$
 No.2 $mr_1=0.648$ $lr_1=0.61$ $mr_2=0.352$ $lr_2=0.43$ $d^2=1.2501690182567075E-09$
 No.3 $mr_1=0.678$ $lr_1=0.67$ $mr_2=0.322$ $lr_2=0.38$ $d^2=2.0783764307488416E-09$
 No.4 $mr_1=0.637$ $lr_1=0.65$ $mr_2=0.336$ $lr_2=0.39$ $d^2=7.0346512781037738E-08$

No.5 mr1=0.664 lr1=0.65 mr2=0.336 lr2=0.39 $d^2=1.1432655185068172E-07$

2): Sub.B の結果

No.1 mr1=0.646 lr1=0.65 mr2=0.354 lr2=0.38 $d^2=9.5780838826490723E-09$

No.2 mr1=0.661 lr1=0.64 mr2=0.339 lr2=0.43 $d^2=5.3044224806210789E-08$

No.3 mr1=0.668 lr1=0.68 mr2=0.332 lr2=0.37 $d^2=6.1282840221200969E-08$

No.4 mr1=0.642 lr1=0.61 mr2=0.358 lr2=0.44 $d^2=7.4312426559562175E-08$

No.5 mr1=0.654 lr1=0.63 mr2=0.347 lr2=0.43 $d^2=7.4513264586106291E-08$

3): Sub.C の結果

No.1 mr1=0.650 lr1=0.67 mr2=0.350 lr2=0.41 $d^2=3.6128215117942068E-08$

No.2 mr1=0.676 lr1=0.70 mr2=0.324 lr2=0.41 $d^2=5.5964269865181823E-08$

No.3 mr1=0.645 lr1=0.67 mr2=0.355 lr2=0.40 $d^2=9.3605536102667760E-08$

No.4 mr1=0.673 lr1=0.67 mr2=0.327 lr2=0.46 $d^2=9.7943961600000000E-08$

No.5 mr1=0.635 lr1=0.62 mr2=0.365 lr2=0.46 $d^2=2.4945968090692397E-07$

以上の演算結果から、被験者の形態測定値と先に述べた（実験 F 値-仮想 F 値）²の最も小さい質量比の組み合わせをまとめると表 6 のようになる。

表 6: 被験者の形態測定値及び上体と下体の各質量比の推定値

被験者	身長 (m)	体質量 (Kg)	上体長 (m)	下体長 (m)	上体		下体	
					質量比	内分質量比	質量比	内分質量比
Sub. A	1.7728	70.15	0.8867	0.8861	0.656	0.62	0.344	0.43
Sub. B	1.7228	70.25	0.8382	0.8846	0.646	0.65	0.354	0.38
Sub. C	1.7526	81.90	0.8356	0.9170	0.650	0.67	0.350	0.41

表 6 に示された被験者の上体と下体の質量比及び内分質量比の値から、3 名の体型の相対的違いが読み取れる。例えば、Sub. A は、他の 2 名の被験者に比べ、上体と下体の質量差が大きく（上体>下体）、重心位置は上体が高く下体は低い。また、Sub. B は、他の 2 名の中間的な体型をしているが、柔道を専門にしてきたためか下体の質量比率が大きい等々である。

IV : まとめ

身体の部分質量比及び内分質量比の測定には、死体標本を用いる直接法と生体標本を用いる間接法がある。前者の直接法は、高精度の測定ができる反面、標本数は少なく計測データも高齢者に偏る傾向がある。一方、間接法は、測定時の被験者の拘束性が高く、身体部分の密度を予測し体積を近似することが基本的な手法であり、計測時の誤差は少ないとは言えない。そこで、本研究では、より簡便な方法で高精度に身体の部分質量比と内分質量

比を測定する方法を探った。

本研究で提示する方法は、重心測定板法により生体標本を直接測定し、その計測データをもとにコンピュータによる数値解析を行い、身体の部分質量比と内分質量比を求めるものである。その方法を以下に示す。

1. まず、身体を2分割した剛体モデル（モデルA、モデルB）を考える（2分割法）。
2. このとき、モデルの全重量をW、重心測定台の支点間距離をL、分割したモデルAとBの長軸長、部分質量比、内分質量比をそれぞれ l_2 , l_4 , mr_1 , mr_2 , lr_1 , lr_2 とし、重心測定板法によって得られる床反力をFとすれば次式が得られる。

$$F = [(l_4 + (l_2 - l_2 \times lr_1)) \times mr_1 + (l_4 - l_4 \times lr_2) \times mr_2] \times M / L$$

3. この式は、重心測定板法による実測値（F, W, L）と実験で求めるべき部分質量比（ mr_1 , mr_2 ）及び内分質量比（ lr_1 , lr_2 ）との関係を示すものであり、本研究ではこれを数値解析の基本式とした。
4. 次に、松井の値¹²⁾をもとにモデルAとモデルBの質量比（ mr_1 , mr_2 ）及び内分質量比（ lr_1 , lr_2 ）の予測される出現範囲と増分値を決め、これら4つの質量比をそれぞれの増分値で変化させたときのすべての組み合わせについて、上式より「仮想F値」を求める。
5. そして、実験で得られる床反力F値と仮想F値との差の二乗（実験F値－仮想F値）²が最も小さい mr_1 , lr_1 , mr_2 , lr_2 の組み合わせを抽出し、これを求める各質量比の推定値とする。なお、本研究では、国際規格のJISFu11BASICに準拠した「(仮称)十進BASIC」¹⁹⁾を用いて数値解析を行った。

本研究で提示する2分割法は、分割の対象を変えれば、理論的にはからだのすべての部分に応用できる。例えば、頭部とそれ以外、あるいは、上肢とそれ以外等々である。今回は、モデルAを上体（頭部+胴+両上肢）、モデルBを下体（両下肢）と仮定して、測定の方法論的妥当性について検討した。結果を以下に示す。

6. まず、標準的体型の被験者と重心測定板法による実験値の数値モデルを考え、本研究の方法でモデルの部分質量比と内分質量比が抽出できるか解析を試みた。その結果、数値モデルの上体と下体の各質量比は「誤差=0」の組み合わせとして抽出できた。
7. 次に、ヒトのからだを上体と下体に2分割した5つの人体モデルを作製し、それぞれの部分質量比と内分質量比を求めた結果、上体の部分質量比と内分質量比は1%未満、下体については、部分質量比が約1%、内分質量比が約3%の誤差率で推定できた。
8. これらの結果は、身体の部分質量比及び内分質量比を求める測定手段として、重心測定板法を用いる2分割法が有効であることを示唆するものと考えられる。

(参考文献)

- 1)阿江道良ほか：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 (バイオメカニズム学会編)、pp.23-33,東京大学出版会, 1992
- 2)阿江、岡田ほか：日本人高齢者の身体部分慣性特性.バイオメカニズム 13(バイオメカニズム学会編)、pp.125-139,東京大学出版会, 1996
- 3)阿江道良ほか：スポーツバイオメカニクス 20 講.pp34-43, 2002
- 4)C.K.Cheng : Segment inertial properties of Chinese adults determined from magnetic resonance imaging.Clinical biomechanics 15 pp559-566, 2000
- 5)Clauser,C.E.,et al. : Weight,volume and center of mass of segments of the human body,AMRL Technical ReportTR,69-70,Weight-Patterson Air Force Base,OH, 1969
- 6)Dempster,W.T : Space requirements of the seated operator,WADC Technical Report, pp55-159,Wright-Patterson Air Force Base, 1955
- 8)E.Harless : Die statischen Momente der menschlichen Gliedmassen.Abhandl.d. mathem.-physiki.klass.d.Kgl.Bayer.Akad.d.Wissensch.8, 1856
- 9)Jensen,R.K : Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method,J.of Biomechanics,11,pp349-358, 1978
- 10)Jensen,R.K : Body segment mass,radius and radius of gyration proportions of children, ,J.of Biomechanics,19,pp359-368, 1986
- 11)Jensen,R.K : Distribution of mass to the segments of elderly males and females,J.of Biomechanics,27,pp89-96, 1994
- 12)松井秀治：運動と身体の重心－各種姿勢の重心位置に関する研究－.体育の科学社, 1958
- 13)松尾彰文,他：日本人女性の部分質量と重心位置の検討.東京大学教養学部体育紀要 24.pp37-54, 1990
- 14)S.J.Park : Anthropometric and biomechanical Characteristics on body Segment of Koreans.Applied human science 18(3)pp91-99, 1999
- 15)W.Braune ,O.Fisher : Uber den Schwerpunkt des menschlichen Körpers mit Rücksicht auf die Ausrüstung des deutschen Infanteristen. Abhandl.d.Mathem-Naturw. Klass. d.Königl. Sächs. Akad. d. Wissensch.15, 1889
- 16)WhinterDA : Biomechanics and Motor Control of Human Movement.2 nd ed,pp64-66,Wiley Interscience, 1990
- 17)Zatsiorsky,V.& Seluyanov,V. : The mass and inertia characteristics of the main segments of the human body,Biomechanics VIII-B pp1152-1159, 1983
- 18)横井孝志,他：日本人幼少年の身体部分係数.体育学研究 31:53-66, 1986
- 19) URL:<http://hp.vector.co.jp/authors/VA008683>

(指導教官 大島義晴)