

# 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、身体の部分質量とその重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重心位置を調べることは容易ではなく、現実的には、この種の実験・研究を進めるためには先行研究の統計的データが使われる。

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、測定する方法がとられていた<sup>5)</sup>。この方法は極めて高精度な測定ができる反面、屍体標本を使っているため標本数が少なく高齢者に偏っているという問題がある。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。

しかしながら、間接法での部分質量と重心位置は、MRI<sup>2)</sup> や数学リンクモデル<sup>3)</sup> を用い、身体部分の密度を予測し体積を近似することが基本的手法であり、被験者の拘束性も高く、計測時の誤差は少ないとは言えない。

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<sup>1)</sup>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。

そこで、本研究では、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、身体の部分質量と重心位置を求める新たな方法を提示し、その方法論的妥当性について検討した。

## 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考え(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。その解析手順は以下の通りである。

### 1. 重心測定板法による数値解析のための基本式を求める

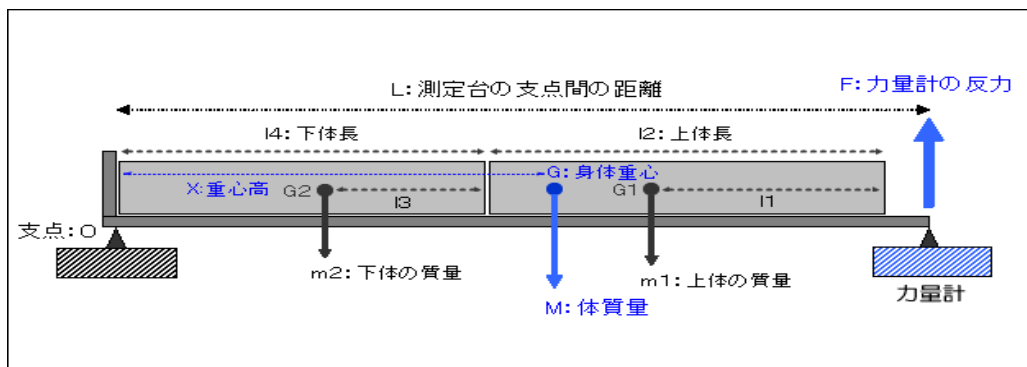


図 1: 身体を2分割したときの重心測定板法の模式図

図 1 において、被験体の全質量をM、重心測定台の支点間の距離をL、分割した上体と下体の長

軸長、部分質量比、内分質量比をそれぞれ  $l_2, l_4, mr_1(=m_1/M), mr_2(=m_2/M), lr_1(=l_1/l_2), lr_2(=l_3/l_4)$ 、測定によって得られる床反力を  $F$  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、  

$$F = [(l_4 + (l_2 - l_2 \times lr_1)) \times mr_1 + (l_4 - l_4 \times lr_2) \times mr_2] \times M / L \dots \dots \dots (1)$$

が導かれる。この式は、重心測定板法による実験値 ( $F, M, L$ ) 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。

## 2. 上体と下体の質量比及び内分質量比を推定する

次に、松井の値<sup>4)</sup>をもとに上体と下体の質量比 ( $mr_1, mr_2$ ) 及び内分質量比 ( $lr_1, lr_2$ ) の予測される出現範囲と増分値(表 1 参照)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、(1)式より「仮想 F 値」を求める。

※：本研究で計算される総組み合わせ数  $n$  は、表 1 の条件から  $n = 314721 (= 51 \times 11 \times 51 \times 11)$  となる。このうち、 $mr_1 + mr_2 = 1$  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。

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

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)<sup>2</sup> 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。

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、本研究では、数値解析のプログラミング言語として、国際規格の JIS Full BASIC に準拠した「(仮称)十進 BASIC」<sup>6)</sup> を使用した。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 桁の計算精度が保たれる。

## III: 結果及び考察

### 1. 数値モデルによる検証

身体の部分質量比及び内分質量比の測定手段として、本研究で提示した重心測定板法を用いた 2 分割法の理論的妥当性について、標準的体型の下記被験者モデル(松井の値<sup>4)</sup>を想定し、検証した。

(数値モデル)

被験体の質量 $M=60\text{kg}$	上体の質量比 $mr_1=0.656$	上体の中枢部からの内分質量 $lr_1=0.65$
上体長 $l_2=0.867\text{m}$	下体の質量比 $mr_2=0.344$	下体の中枢部からの内分質量 $lr_2=0.42$
下体長 $l_4=0.833\text{m}$	測定台の支点間の距離 $L=2.000\text{m}$	

このモデルの数値を用いて(1)式により、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)<sup>2</sup>の小さい順に各質量比の組み合わせを抽出すると、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。これにより、本研究で提示した測定方法の理論的妥当性が証明されたと考える。

## 2. 人体モデルによる検証

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、本研究の方法論的な妥当性を検証した。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、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。

手順は、作製した上体と下体の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し、これを部分モデルの実測値とする。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 値を測定し、上体と下体の質量比及び内分質量比を求める。これを実験の推定値として、本研究では、重さを変えた 5 種類の人体モデルを設定し、部分質量比と内分質量比の実測値に対する推定値の誤差率を調べた。(表 2)

表 2: 人体モデルの実測値に対する各質量比の推定誤差 (%)

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

表 2 より、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、本研究で提示した重心測定板法による 2 分割法が、上体と下体の質量比及び内分質量比の測定方法として実用性があることを示すものと考えられる。

一方、表 2 にあるように、上体の推定誤差に比べ、下体の誤差は部分質量比、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である。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。本実験でも人体モデルの下体は上体に比べ、質量が小さく、床反力 F も小さくなる。このため、設定した各モデルの部分質量比、床反力 F 値ともに下体の測定精度が低くなったと考える。

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られる。

## 3. 被験者を使っ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。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。結果は表3に示す。

表3: 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

被験者を使つての実験では、実験精度を確認するため、逆直立姿勢の測定をおこなっている。重心測定板法より直立姿勢のF値からは腫骨底部からの身体重心位置が求められ、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。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%となった。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。

#### V:まとめ

本研究では、重心測定板法を用い、身体を2分割して部分質量比と内分質量比を求める方法を提示した。実験では、分割する対象を上体と下体とし、2分割法の方法論的妥当性を探つた。結果は、提示した2分割法が身体の部分質量比と内分質量比を求めるための方法として実用性があることを示すものであった。これにより、今後、研究は、分割する対象を変えた数値解析の手法を構築していくとともに、実験の測定精度を上げるためのフィルタリングの手法についても検討しなければならないと考える。

#### 主要引用文献

- 1)阿江道良ほか:「スポーツバイオメカニクス20講」, pp34-43, 2002
- 2)C.K.Cheng: Segment inertial properties of Chinese adults determined from magnetic resonance imaging, Clinical biomechanics vol.15, pp559-566, 2000
- 3)Jensen,R.K: Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method, J.of Biomechanics 11, pp349-358, 1978
- 4)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
- 5)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
- 6)URL:<http://hp.vector.co.jp/authors/VA008683>

(指導教官 大島義晴)