

# 体肢連続横断切片の組織別断面積および 密度による部分重量推定法の検討

松尾 彰文\* 福永 哲夫\* 内野 滋雄\*\*

\* 東京大学教養学部

\*\* 東京医科大学第1解剖

## The Estimation of Segmental Weight of Human Extrimities from Serial Cross-Sectional Areas and Densities of Tissues

Akifumi Matsuo\*, Tetsuo Fukunaga\* and Shigeo Uchino\*\*

\* Department of Sports Sciences, College of Arts and Sciences, University of Tokyo

\*\* Department of Anatomy Tokyo Medical College

### Abstract

The purpose of this study was to determine mass of segment of human extremities using cross-sectional geometry, and weight and density distribution of series sections of cadaver. The female cadaver body (body height is 144.2 cm, weight is 36.8 kg) divided to 15 segments such as head, neck, trunk, upper arm, forearm, hand, thigh, leg and foot at the center of joint. The segmental weight, volume and center of gravity were measured, and then the cadaver was sawed vertically against longitudinal axis 2 cm interval. The segmental volume of series sections were measured by under water weighing method. Cross-sectional pictures of each section were photographed by 35 mm camera. The cross-sectional area (CSA) of fat, muscle and bone were estimated by using a computer digitizing technique. The weights of  $i$ th sections were calculated as follows,

$$\text{West}_i = (A_{f_i} D_f + A_{m_i} D_m + A_{b_i} D_b) t_i$$

where  $A_{m_i}$  is CSA of muscle,  $A_{b_i}$  bone,  $A_{f_i}$  fat,  $t_i$  is the thickness of series section which was calculated from its volume and whole area. There were high correlation of coefficient ( $r = 0.999$ ,  $p < 0.001$ ) between  $\text{West}$  and  $\text{Wm}$  (measured weight) of series sections. The differences between  $\text{West}$  and  $\text{Wm}$  ( $0.15 \pm 0.15$  g (mean  $\pm$  SD)) was statistically insignificant. This result indicates that the weight of body segments can be estimated acculately from the tissue CSA of series section, and then the possibility for estimation the segmental weight living human body from in vivo human body.

バイオメカニクス研究の最も基礎的な指標のなかに身体の部分重量および重心位置がある。

日本人の部分重量や重心位置は松井が幾何学モデルをもちいて数学的に算出した。松尾たち(1990)は松井の方法に従って健康な女性34名の部分重量および重心位置を求め身体重心位置を推定した結果、身長が160cm以上では推定誤差が10cm程度になることを報告した。

Zatsiorski and Seluyanov (1983)はX線を用いて横断面の密度を推定し、同時に測定した断面積から部分重量を算出した。Huang and Suarez (1983)やAckland たち(1988)はCT法により求めた断面の密度と断面積から部分重量を推定した。

Jensson (1978)や横井ら(1986)はゾーンモデルを用いて部分重量と部分重心位置を推定した。この方法では写真から身体の各部を2cmごとに前後、左右の径を続取りゾーンの容積を知り、ついで密度をかけて重量を算出する。密度は身体のどの部分でも同じ値を用いている。この方法では幾何学モデルよりも容積の推定精度は向上する。

本研究では屍体の体肢の連続切片を作成し、体肢の組織別の面積比と密度の関係を検討することを目的とした。さらに横断面積と密度から重量を推定する方法の妥当性を明らかにしようとした。

## 方法

### 1. 被検体

本研究の被検体は女性の屍体1体であった。この屍体は解剖実習用に固定剤で標本化されたものである。その身体的特性は表1に示した。

Table 1. Characteristics of Subject.

Body Height	144.2 cm
Body Weight	36.8 kg
HCG	84.2 cm
% HCG of Body Height	58.4 %

### 2. 体肢の切断

本研究では従来の研究報告(Clauserたち:1969, Hanovan:1964)に従って屍体を頭部、頸部、胴体、上腕、前腕、手、大腿、下腿と足の部分に切断して分けた。

体肢の切断面はClauser たち(1969)の方法に従って、肩、肘、手、股、膝、足関節の中心と切断面が一致するようにした。

### 3. 容積、重量、重心位置の測定

本研究では左側の体肢について分析した。

各部分の容積(V)、密度(d)は水中秤量法により求めた水中重量(UWWt)および空中での重量(W)から次の式を用いて算出した。

$$V = \frac{W - UWWt}{d_w} \dots\dots\dots 1)$$

$$d = \frac{W}{V} \dots\dots\dots 2)$$

ここで $d_w$ は水の密度である。

切断した各部分の重量、重心位置(近位からの距離)、密度、体積は表2のとおりであった。

### 4. 連続切片の作成

切断された各部位は凍結させた後に、各部分の長軸と直角の面にそって電動切断器で20mmごとに切断し、連続切片を作成した(図1)。切片を自然解凍した後に、横断面を撮影し、重量、水中重量と厚さを測定した。横断面の撮影には35mmカメラとカラーフィルムを用いた。

Table 2. Measured segmental parameters of upperarm, forearm, thigh, and leg.

	Weight		Length cm	Center of gravity % of length		Volume cc	Density g·cm <sup>-3</sup>
	g	% of Body Weight		cm	%		
Upper arm	700	1.96	26.3	14.9	56.7	685	1.022
Forearm	470	1.32	20.5	8.4	41.0	443	1.061
Hand	256	0.72	*	*	*	240	1.067
Thigh	2202	6.18	30.8	14.5	47.1	2142	1.028
Leg	1393	3.91	31.3	12.6	40.3	1350	1.032
Foot	639	1.79	20.5	8.7	42.4	623	1.026

5. 切片の重量, 体積, 密度の算出法

切片の重量および水中重量の測定には 0.001 g まで測定できる計りを用いた。切片の体積および密度は重量と水中重量から, 先の 1 式および 2 式を用いて算出した。

6. 切片の横断面積の測定

切片の断面を 35mm カメラでフィルムに撮影したネガフィルムをビデオカメラを介して画像解析装置 (LA-555 EWS: ピアス社製) に取込み, 組織別の断面積を求めた。本研究では全断面積 ( $WA_i$ ), 骨断面積 ( $BA_i$ ), 筋断面積 ( $MA_i$ ), 脂肪断面積 ( $FA_i$ ) について求めた。皮下脂肪断面積の中には血管, 筋膜等が含まれている。

組織別の断面積を求めるために切片の輪郭, 皮下脂肪と筋および筋と骨の境界線を引いた (図 1)。

本研究で用いた画像処理装置 LA-555 EWS は  $512 \times 512$  画素の分解能を持ち, 図形の面積などの計算を行なえる装置である。この装置を用いて 25 から 400  $cm^2$  の校正用の長方形の面積を測定した結果, 測定誤差は 2.5 % 以内であった。

7. 切片の重量の推定

切片の重量は組織別の断面積, それぞれの組織の密度と切片の厚さから推定した。組織別の密度は Clauser たち (1969) の報告した値 (骨: 1.101, 筋: 1.087, 脂肪等: 0.960) を用いた。

切片の厚さは 2 つの方法により求めた。まず切片の上下および左右の端の厚さを測定し, その平均値を切片の厚さの実測値 (MT) とした。

$i$  番目の厚さの推定値 ( $ET_i$ ) は  $i$  番目の切片の体積 ( $V_i$ ) および断面積 ( $WA_i$ ) から次の

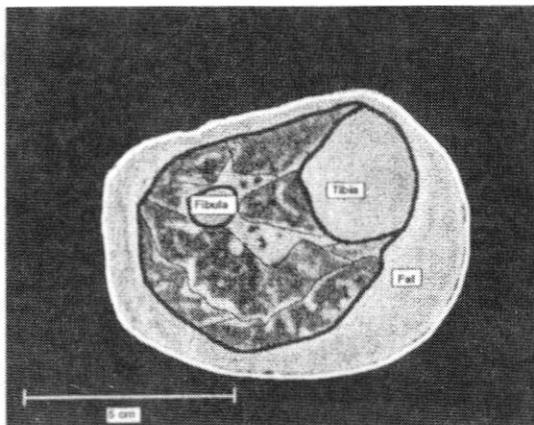
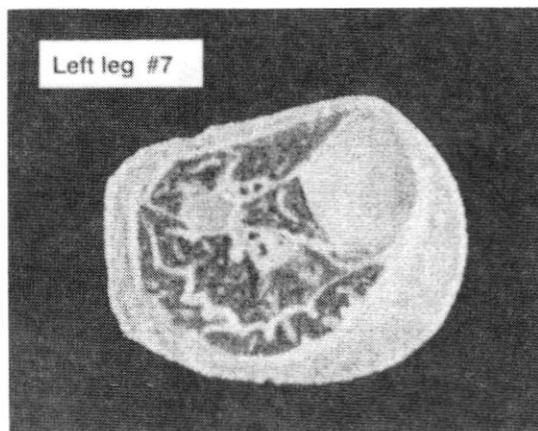
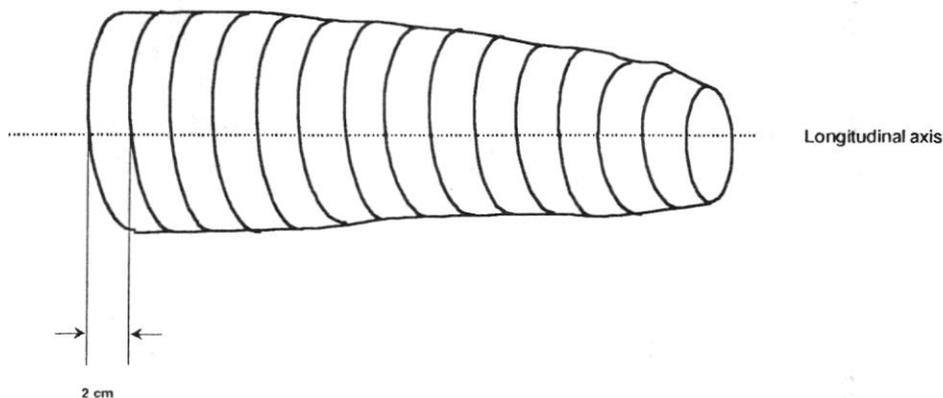


Fig. 1. Series section of cadavers limb.

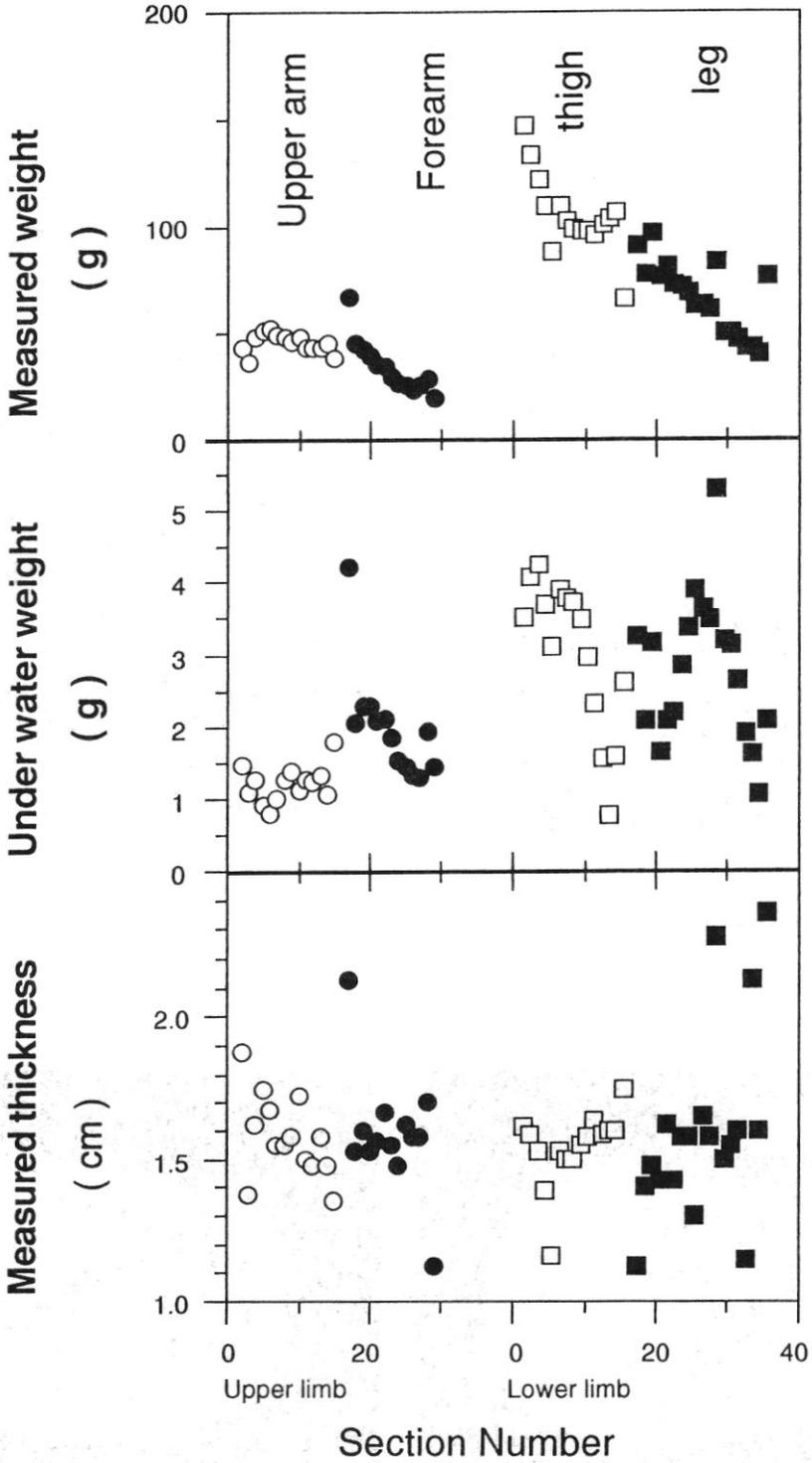


Fig. 2. Measured weight, under water weight, and thickness of series sections.

式により算出した。

$$ET_i = \frac{V_i}{WA_i} \dots\dots\dots 3)$$

実測値の厚さで推定した切片の重量を m I, 推定値の厚さの重量を m II とした。i 番目の切片の重量は,

$$m I_i = (FA_i \cdot FD + MA_i \cdot MD + BA_i \cdot BD) \cdot MT_i \dots\dots\dots 4)$$

$$m II_i = (FA_i \cdot FD + MA_i \cdot MD + BA_i \cdot BD) \cdot ET_i \dots\dots\dots 5)$$

となる。

ここで, FA<sub>i</sub>は脂肪およびその他の組織面積, MA<sub>i</sub>は筋断面積と BA<sub>i</sub>は骨断面積, FDは脂肪の密度, MDは筋の密度, BDは骨の密度である。

**[結果および考察]**

本研究では屍体の左側の upper limb と lower limb を電動の切断器で 20mm ごとに切断した。切断した切片の空中での重量 (Wa), 水中重量 (Ww), 厚さ (MT), 断面積 (CSA) および切断面を大きく筋, 皮下脂肪, 骨の 3 つの組織にわけてそれぞれの面積を測

定した。

切片の重量, 厚さ, 水中重量についてみたものが図 2 である。図中の横軸は切片の番号で, 体肢の近位から遠位に向って順に付けられたものである。

Wa についてみると, upper limb では最大が 66.5 g, 最小が 19.7 g であり, 遠位の切片ほど軽くなる傾向であった。lower limb では最大が 147 g, 最小が 40.4 g であり, upper limb 同様に遠位ほど軽くなる傾向であった。

MT についてみると upper limb および lower limb ともに最大値が 24mm, 最小値が 11mm, 平均 15.8mm であった。本研究では upper limb と lower limb を電動の切断器で 20mm 間隔の等分線で切断したにもかかわらず, 切断後の厚さは平均値で 15.8mm に減少していた。これは切断時の鋸の刃しろによるものと考えられる。

Ww は最大 5.3 g から最小 0.8 g の範囲の値を示し, upper limb よりも lower limb のほうが全体的に重い値を示す傾向がみられた。

本研究では水中重量法により切片の Ww を測定し, このデータから切片の体積, 密度を算出した。図 3 では upper limb と lower limb の切片密度について示

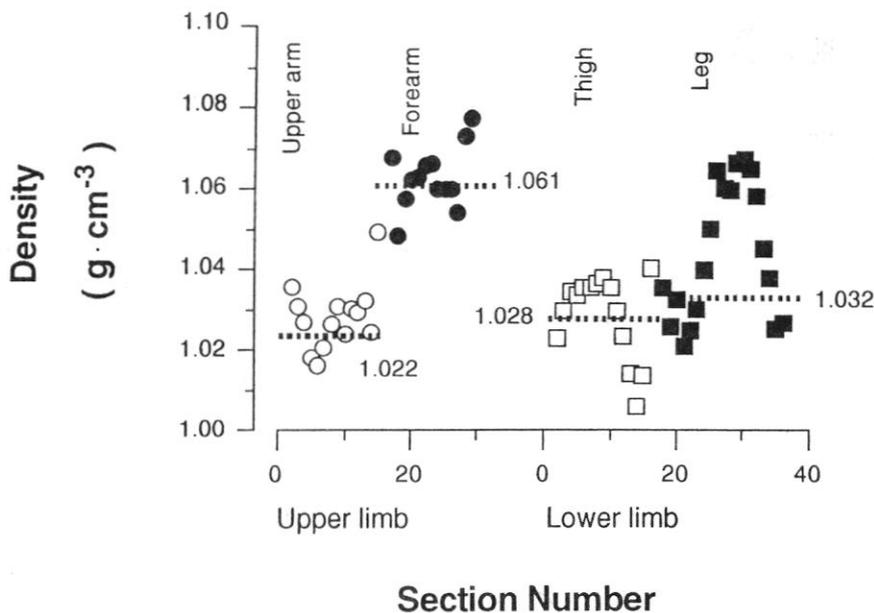


Fig. 3. Density profile. Broken line indicated the density values before sawing of segment.

したものである。図中の破線は切断前の各部位の密度である。切片の密度は最大で1.078, 最小で1.007の範囲の値を示し, どの部位でも関節部分と中央部が他の部分よりも高い値を示す傾向がみられた。特に下肢の末端部である下腿ではこの傾向が顕著であった。Ackland, T.R. たち(1988)は男性の屍体の下腿の切片密度を測定した結果, 最大で1.15, 最小で1.056であり, 密度は関節部と中央部では高い値を示す傾向があることを報告した。彼等の報告した切片の密度と本研究結果との間にみられる差は, 本研究では女性の屍体を用いており, 男女間の脂肪量の差の影響によりこの差が生じたものと考えられる。一方, 切片の密度が関節部と中央部では高い値を示す傾向があることは本研究結果とよく一致し, このような傾向は他の部位でも認められた。

全切断面(WCSA), 筋(MCSA), 骨(BCSA), および皮下脂肪(FCSA)の断面積についてみたものが図4である。WCSAについてみると上肢では上腕近位部の34.6 cm<sup>2</sup>から前腕部の手関節付近の

13.6 cm<sup>2</sup>まで遠位ほど小さい値を示す傾向がみられた。下肢でも大腿近位部の42.2 cm<sup>2</sup>を最大に下腿の最も細い部分である足関節付近の26.3 cm<sup>2</sup>まで遠位ほど小さい値を示す傾向であったが, 膝関節や足関節では前後の切片よりも大きい値を示した。筋の断面積はどの部位でも中央部分が大きく, 骨の断面積は関節部分が太く, 中央部では細くなる傾向がみられた。

身体の組織の密度についてみると, Clauser たち(1969)の屍体での報告によると骨が1.10 g cm<sup>-3</sup> 筋が1.087 g cm<sup>-3</sup>, 脂肪が0.96 g cm<sup>-3</sup> である。特に骨では粗な組織では1.10 g cm<sup>-3</sup>, 密な部分では1.4 g cm<sup>-3</sup> であるとされている。組織により密度が異なることから切片の密度はそこで構成されている組織の割合により異なる。

切片の密度とその断面積に対する組織別の断面積の比率との関係についてみたものが図5である。図の上から皮下脂肪(%脂肪), 筋(%筋), 骨(%骨)の断面積比率の順である。

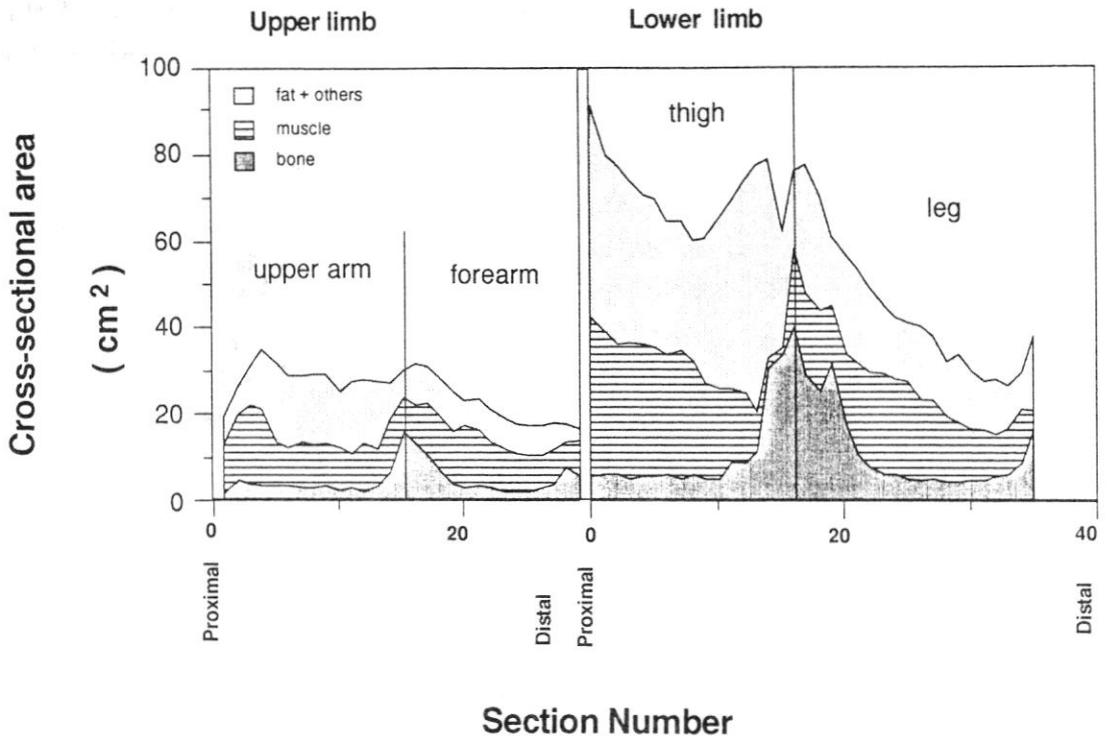


Fig. 4. Cross-sectional areas of tissues.

切片密度と%脂肪との関係についてみると、両者の間には統計的に有意な負の相関関係 ( $r = 0.613$ ,  $p < 0.001$ ) がみられ、切片の密度は  $1.00 \text{ g cm}^{-3}$  に増大するにともない皮下脂肪の断面積比率は60%から20%に減少する傾向がみられた。%筋についてみると、統計的に有意な正の相関関係 ( $r = 0.525$ ,  $p < 0.001$ ) がみられ、切片の密度が  $1.00 \text{ g cm}^{-3}$  から  $1.08 \text{ g cm}^{-3}$  へ増大するにとも

ない筋断面積比率は20%から60%へと増大する傾向がみられた。一方%骨との関係でみると、統計的な有意な関係はみられなかった。これらのことは皮下脂肪の割合が多く、筋の割合が少ないほど密度は小さくなり、反対に、皮下脂肪が少なく、筋の割合が多いほど密度は大きくなる傾向があることを示している。

切断面の組織別の断面積と厚さから組織別の体積を算出し、体積とその組織の密度の積から切片の重量を推定した。図6では切片の実測重量と推定重量(実測厚)の関係のみたものである。上の図の両者の両係下の図は実測重量と両者間の差の関係についてみたものである。切片の実測重量と推定重量の間には有意な相関関係 ( $r = 0.946$ ,  $p < 0.001$ ) がみられたが、両者間の差についてみると差の平均値  $3.9 \text{ g}$ 、標準偏差  $\pm 10.3 \text{ g}$ 、最大  $61.8 \text{ g}$  であった。最も差の大きかった切片は大腿部の最遠位端部分である。これは切断のときに切断面が並行にならず、切片の横断面が途中で切られてしまったものであり、厚さの測定誤差が非常に大きくなったものと考えられる。この切片も含めた推定値と実測値の差の平均値が  $3.9 \text{ g}$  であった。切片重量の平均値は  $63.9 \text{ g}$  であった。推定誤差は平均では5%程度であり、推定精度は5g以内であった。

実測した厚さは切片の左右端を測定しているために、中心部で厚く外周部で薄いような全体が均一な厚さではない場合には全体の厚さの評価を誤る可能性が非常に高い。このような厚さの差が生じるのは、凍結して切断したにもかかわらず、厚さ、重量、水中重量の測定は解凍後に実施したことが考えられる。解凍により、切片の外周名の組織がおし潰され、中心部の骨を中心とした部分よりも薄くなった可能性が考えられる。しかしながら、本研究では切片を解凍後にすべての測定をおこなったためこの点に関しては推測の域を脱することができない。

本研究では厚さの概算誤差を少なくするために切片の体積を切片の断面積で除することで厚さを推定した。この推定法で得られた厚さは切片の実測重量と推定重量(推定厚)との関係を示した。

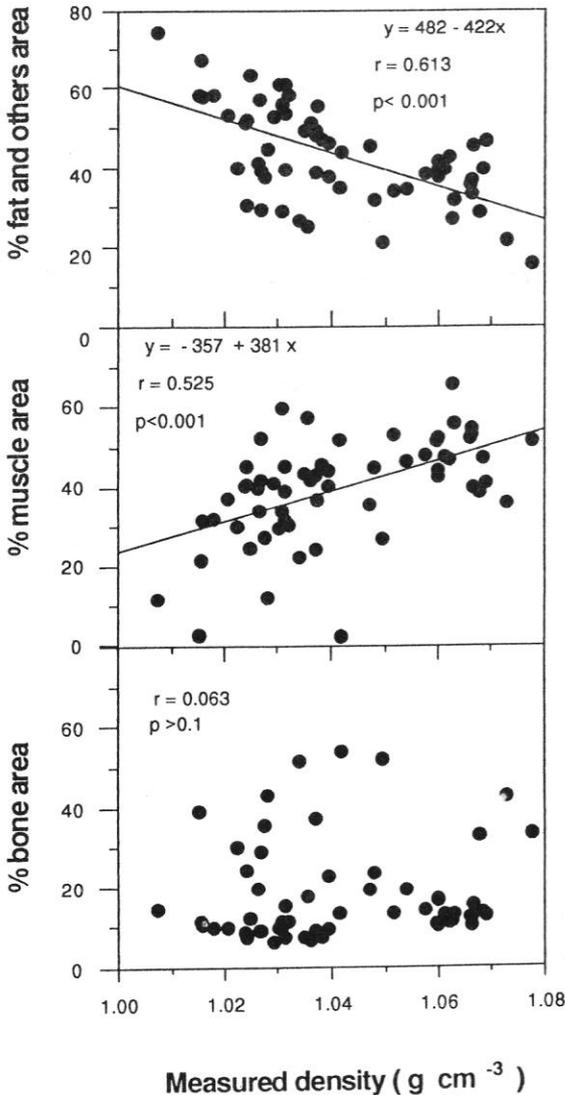


Fig. 5. The relation between density and percent areas of tissues.

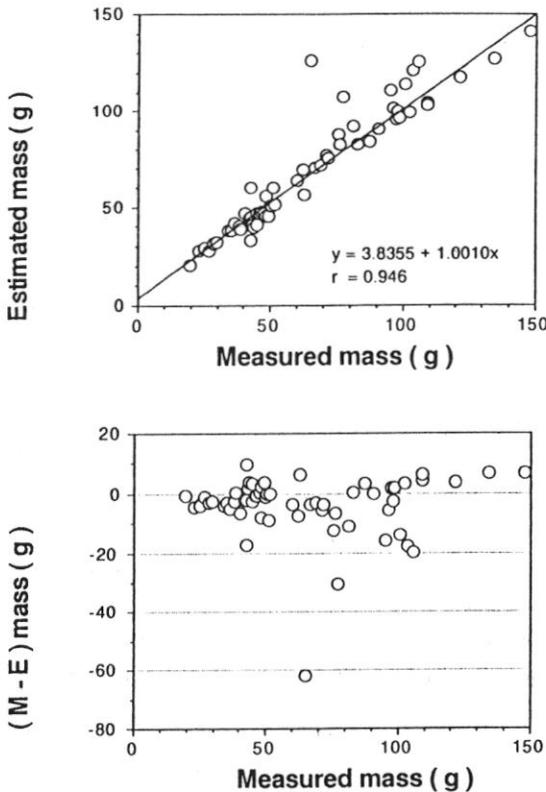


Fig. 6. The relationship of series sectional mass between measured and estimated using measured thickness.

左の図は両者の関係、右の図は実測重量と両者間の差の関係についてみたものである。

切片の実測重量と推定重量の間には有意な相関関係 ( $r = 0.999$ ,  $p < 0.001$ ) がみられたが、両者間の差についてみると差の平均値  $0.15\text{ g}$ 、標準偏差  $\pm 0.15\text{ g}$ 、最大  $1.6\text{ g}$  であった。この差は切片重量の平均値  $63.9\text{ g}$  の  $0.23\%$  に相当した。この場合に差の最大値である  $1.6\text{ g}$  でさえも実測値が  $82.3\text{ g}$ 、推定値が  $81.2\text{ g}$  であり、その差は実測値の  $1.3\%$  に達した。以上のことから組織別の断面積、厚さから重量を推定する方法では厚さの測定精度が高ければ、推定精度は  $1\text{ g}$  以内で、推定誤差は  $1\%$  以内で推定可能であると考えられる。

図8では部位ごとの切片の実測重量の和と推定重量の和についてみたものである。上の図は両者

の関係、下の図は実測重量和と両者間の差についてみたものである。○印が実測厚を用いた推定重量の和、●印が推定厚を用いた推定重量の和である。

推定厚を用いた重量和では実測重量和との差が大腿部の  $33\text{ g}$  から下腿部の  $1.5\text{ g}$  の範囲であった。一方、実測厚を用いた場合には大腿部の  $73.5\text{ g}$  から上腕の  $13.7\text{ g}$  の範囲であった。以上の結果から、身体の各部分の推定誤差は大きい場合は  $4\%$  以内であり、そのときの精度は  $100\text{ g}$  以内であったことが明らかになった。

超音波法、CT法あるいはMRI法等の連続断層撮影を用いることにより、体肢の断面像を得ることは容易である。このような装置でえられた断層像から構成組織を筋、骨、皮下脂肪の3つに大別し、それぞれの組織別の断面積および密度から重量を推定する可能性が認識された。組織別の断層像を3次元に再構築することにより、身体各部の重量の分布を推定することが可能である。さらに、重量分布を3次元座標で示すことにより、部分重心の3次元座標だけでなく、慣性モーメントも推定することが可能であることが考えられる。

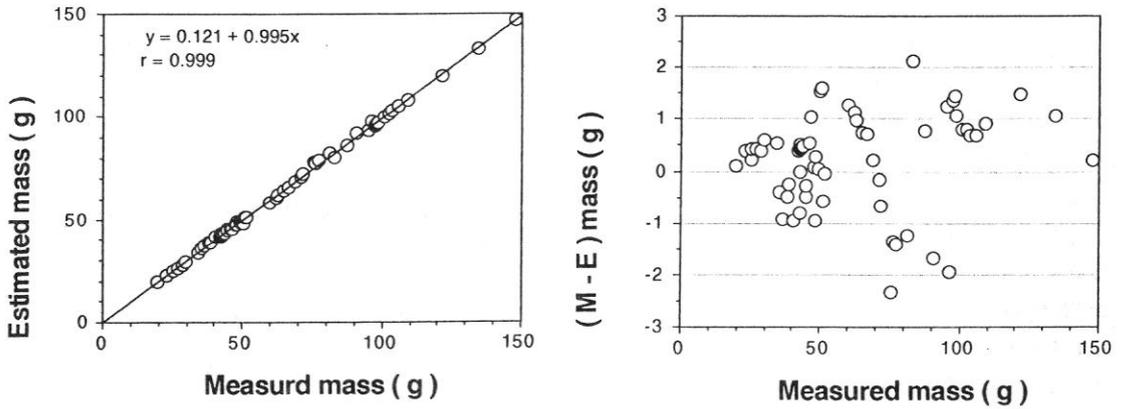


Fig. 7. The relationship of series sectional mass between measured and estimated using estimated thickness.

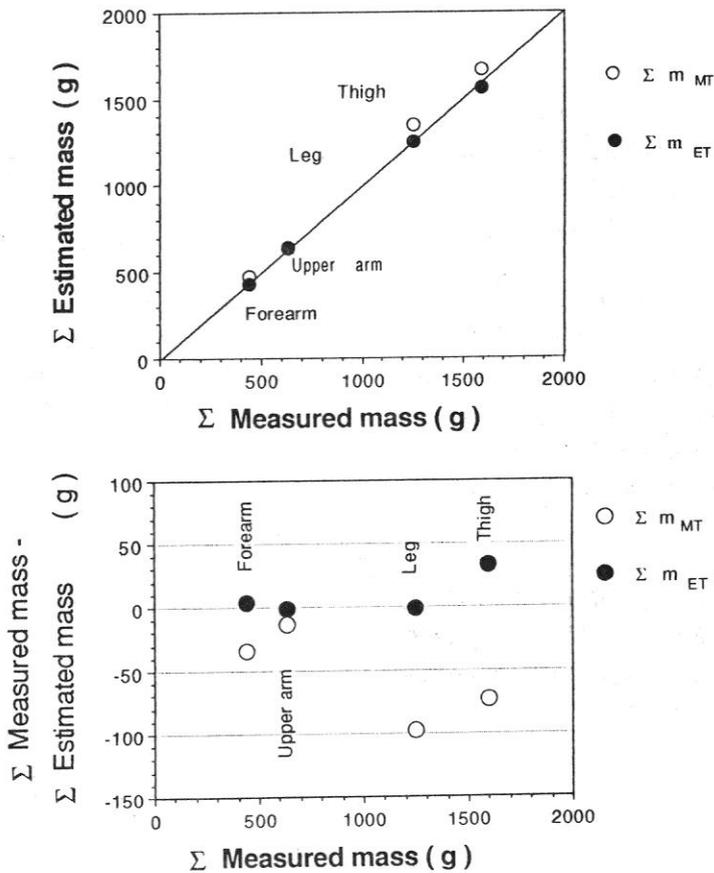


Fig. 8. The relationship of segmental mass between measured and estimated using 2 type thickness.

## [ま と め]

屍体の体肢を切断し、その長軸と直角に2 cmごとにスライスした連続切片の重量、密度、厚および全体、脂肪、筋、骨の組織別横断面積を測定した。さらに、組織別横断面積、密度および切片厚から切片の重量を推定し、実測値と比較した結果以下のことが明らかになった。なお、組織別の密度としては Clauser, C. E. たち (1969) が報告した値 (脂肪:  $0.96 \text{ g cm}^{-3}$ , 筋:  $1.087 \text{ g cm}^{-3}$ , 骨:  $1.101 \text{ g cm}^{-3}$ ) を用いた。

1. 切片の密度とその組織別断面積比率との関係でみると脂肪の比率と密度の間には有意な負の相関関係 ( $r = 0.613$ ,  $p < 0.001$ ) があり、筋の比率と密度の間には有意な正の相関関係 ( $r = 0.525$ ,  $p = 0.001$ ) があった。骨の比率と密度の間には有意な相関関係がみられなかった。

2. 切片の実測値と推定値を比較した結果、切片厚に実測値を用いた場合には両者間の差は最大 61.8 g, 平均値 3.9 g, 標準偏差が 10.3 g であった。一方、切片厚に推定値を用いた場合には両者間の差は最大 2.3 g, 平均値 0.23 g, 標準偏差が 0.93 g であった。

3. 部位ごとに切片の実測値及び推定値の和を比較した結果、推定厚を用いた重量和では実測重量和との差が最大で大腿部の 33 g (全重量の 2.1%) から下腿部の 1.5 g (0.1%) であった。一方、実測厚を用いた場合には大腿部の 73.5 g (4.51%) から上腕の 13.7 g (2.2%) の範囲であった。

## 謝 辞

本研究を行なうにあたり、屍体の切断や論文作成に過大な御援助を頂いた東京医科大学の大久保真人先生、実験を手伝って頂いた多くの方々に対しここに感謝の意を表したい。

## 文 献

- 1) Ackland, R.T., P.W. Henson, and D.A. Bailey; The uniform density assumption: its effect upon the estimation of body segment inertial parameters. *International Journal of Sports Biomechanics*, 4, 146-155, 1988.
- 2) Clauser, C.E., J.T. McConville, and J.W. Young; Weight, volume and center of mass of segments of the human body. *Aerospace Medical Research Laboratory Technical Report*, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA, 1969.
- 3) Hanovan, E.P.; A mathematical model of the human body. *Technical report*, aerospace medical research laboratory TR 64-102, Wright-Patterson Air force base, OH, 1964.
- 4) Jensen, R.K.; Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method. *J. Biomechanics*. 11:349-358, 1978.
- 5) 松井秀治; 各種姿勢の重心位置に関する研究, *体育学研究* 2-2, 65-76, 1956.
- 6) 松尾彰文, 福永哲夫, 船渡和男, 浅見俊雄, 山口孝夫; 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学紀要* 24, 37-54, 1990.
- 7) 横井孝志, 渋川侃二, 阿江通良, 日本人幼少年の身体部分係数, *体育学研究* 31(1), 53-66, 1986.
- 8) Zatsiorski, V. and V. Seluyanov; The mass and inertial characteristics of the main segments of the human body. *Biomechanics VIII-B*, H. Matsui and K. Kobayashi (Eds.) Champaign, IL: Human Kinetics, pp1152-1159, 1983.