

超音波体肢横断面画像撮影システムの開発*

佐藤広徳**, 福田 修***, 辻 敏夫***, 三浦 朗****
久野謙也****, 佐藤陽彦*****, 福場良之****

We constructed the conventional measuring system to visualize the complete cross-sectional image of human extremities using a hand-made water tank with commercial-base ultrasonographic device (3.5 MHz transducer) connected to PC for graphical processing. The water tank in which the subjects can insert and fix their leg or arm, was specially designed to be able to turn and scan the ultrasound probe once around the targeted extremity every arbitrary angle to get several fragmentary graphical images of one cross-sectional plane. To assess the reproducibility of the cross-sectional image using this system, we measured the same plane of thigh in 21 subjects twice on the different days, and compared each body compositional area. There were no substantial difference or bias and the high reproducibility was confirmed. Secondly, in order to assess the system's validity, the cross-sectional images of a thigh by MRI and our developed system were compared in 10 subjects. There was a high correlation between each body compositional area as determined by both systems. It is concluded that our developed ultrasonographic system, in many respects, is superior to other imaging devices, because it is portable, safe, and inexpensive. Our system can exert these advantages in the field survey.

市販の超音波診断装置、自作の水槽およびパソコンを用いてヒトの体肢の周りから任意の角度ごとに横断面画像（断片画像）を撮影し、得られた画像に画像処理を加え、完全な体肢の横断面画像を得る方法を開発した。自作の水槽は、同一平面上でプローブの回転操作が可能で、測定部位（脚または腕）の周りから任意の角度ごとの断片画像が撮影できるように設計されている。

本システムの再現性を確認するために、被検者 21 名の大腿の同一部位を 1 日以上の間隔を置いて 2 度撮影を行い、皮下脂肪、筋および骨のそれぞれの横断面積について比較検討をした結果、本システムの高い再現性が確認された。妥当性に関しては、10 名の被検者を対象に本システムと MRI で大腿の同一部位の撮影を行い、各組織横断面積について比較した結果、MRI による計測値と高い相関性が認められた。

本システムは、可搬性があり、安全でしかも安価なものであるため、フィールドにおける調査的研究に有効であると考えられる。

（キーワード：超音波法、横断面画像）

* 1997 年 9 月 22 日受付
** 広島工業大学
Hiroshima Institute of Technology.
*** 広島大学
Hiroshima University.

**** 広島女子大学
Hiroshima Women's University.
***** 筑波大学
University of Tsukuba.
***** 九州芸術工科大学
Kyushu Institute of Design.

1. はじめに

人間工学、医学、体育学など、ヒトを対象とした学問分野においては、しばしば体肢組成を問題にすることがあるが、ヒトの身体組成は、古くは遺体を解剖することが唯一の方法であり、生体の組成を解明することは長い間非常に困難なことであった。

レントゲンの発明でようやく生体の内部構造情報が入手できるようになり、近年、X線を利用したCT (Computerized Tomography)が開発され¹⁻³⁾、生体のさまざまな部位の横断面画像が撮影できるようになった。MRI (Magnetic Resonance Imaging)もまた、生体の横断面情報を入手する方法^{4,5)}としてCT同様、臨床医学や診断医学の領域で頻繁に使用されているが、CTやMRIは、生体の鮮明な横断面画像情報が得られるものの、両者とも非常に高価であるため、大規模な施設にしか設置することができず、しかもCTはX線照射に伴う身体への悪影響をぬぐいされない。

最近では、ごく波長の短い音波を利用して生体の内部が観察できる超音波診断装置が臨床診断や皮下脂肪厚測定などに利用されている⁶⁻⁹⁾。この装置は音波を用いたものなので身体に対して無害であり、また、安価でコンパクトなため、持ち運びが簡単であるという利点を有する。

しかし、市販の超音波診断装置は体肢の一部を撮影することは可能であるが、完全な横断面画像を撮影することはできない。そこで、既製の超音波診断装置を

用いて測定部位を決定した後、その部位の周りから任意の角度ごとに数回撮影し、得られた横断面画像に対してパソコンによる画像処理を施し、体肢の横断面を合成する方法を開発したので報告する。

2. 体肢横断面撮影システムの構成

2-1. システムの全体構成

本システムは超音波診断装置、円筒形の水槽およびパソコンで構成されている。本研究で使用した超音波診断装置は、市販の廉価な超音波診断装置 (誠鋼社製 SM-206, 外形寸法: 230 mm×380 mm×250 mm, 重量: 7 kg) で、超音波の発現周波数は 3.5 MHz であった (図 1)。市販の超音波診断装置は、いずれの機種も 1 回の撮影では限られた範囲の画像しか得ることができず、体肢の全体像をとらえることができない。本機種の場合も 1 回の撮影では、縦 9 cm, 横 7 cm の長方形の画像しか撮影できない。そこで、同一平面上でプローブの回転操作が可能な水槽を自作し (図 1, 2)、任意の角度ごとの体肢の横断面画像の撮影を行い、得られた各画像 (断片的な画像) に対して、パソコンを用いた画像処理を施すことで、体肢の横断面を合成することを試みた。

本システムは、コンパクトな構成になっており総重量が約 35 kg で運搬が可能なので、実験室のみならず、フィールド調査においても体肢横断面画像が容易に入手できるという特徴を有している。

2-2. 水槽

図 1 の筒 (図 2 は断面概略図) は、同一平面上でプ

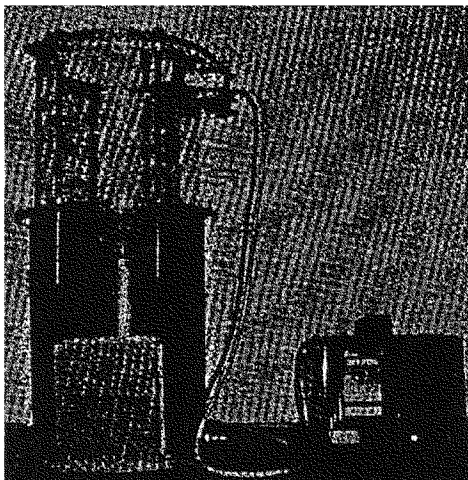


図 1 超音波診断装置と自作の水槽
Fig. 1 Ultrasound apparatus and water tank.

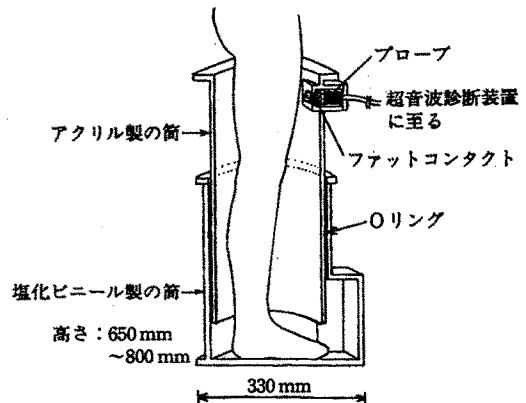


図 2 水槽の断面の概略図
Fig. 2 Illustrated outline of the water tank.

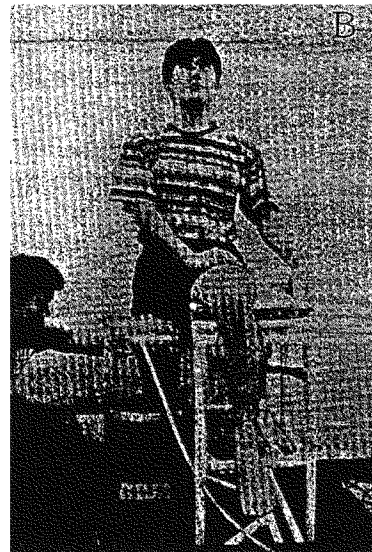
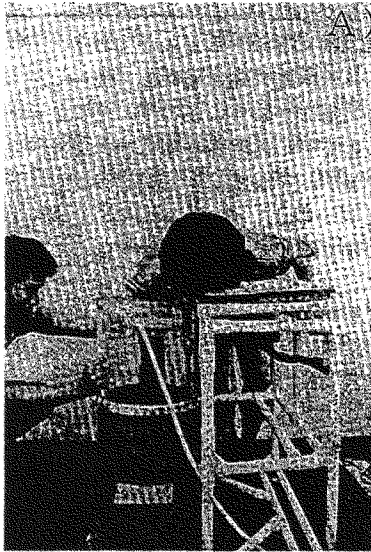


図3 撮影中の姿勢 (A: 上肢, B: 下肢)

Fig. 3 Posture on scanning (A: Upper extremity, B: Lower extremity).

ロープの回転操作が可能な水槽である。この水槽は2層からなる筒状のもので、内側(上部)の筒はアクリル製、外側(下部)の筒は塩化ビニール製である。アクリルで透明な内側の筒は、自由に上下動し、任意の高さでステンレスのボルトとナットで簡単に固定できるようになっている。さらに固定された高さで自由に回転することができ、同一平面上でプローブの回転操作が可能となっている。

アクリル製の筒には、プローブを水平に固定するためのボックスが取り付けられている。ボックスが筒に接する部分には、縦29mm、横80mmの開口部があり、ここを超音波が通過するようになっている。撮影時には、この開口部とプローブとの間にファットコンタクト(誠鋼社製)とよばれるアタッチメントを装着し、水槽からの水漏れを防止している。ボックスの両側のボルトは、プローブの固定の微調整に使用するためのものである。アクリルの筒の側面には、30°と45°ごとにラインが引かれており、撮影時の角度を設定するためのマーカーとなっている。アクリルの筒と塩化ビニールの筒の間には、水漏れ防止、ならびに滑らかな回転操作のためにパッキン(Oリング)が埋め込まれている。塩化ビニールの筒の下部には、下肢の横断面を撮影する際に、撮影部位が筒の中央に置かれるように足先を入れるボックスが設置してある。

2-3. 体肢横断面画像撮影の手順

まず最初に、生体計測によって撮影したい部位の平

面の位置を決定する。例えば我々の場合、大腿部は、大腿長の転子点から50%の位置、上腕部は、上腕長の肩峰点から60%の位置を撮影部位としている。これらのポイントは、それぞれの部位のほぼ最大囲を示す部位である。

次に被検者には、水を満たした水槽の中に撮影体肢を挿入させて固定するように指示し(図3)、実験者はアクリル製の上部の筒を手動で回転させながら任意の角度ごとに横断面画像を撮影していく。撮影部位の大きい大腿部は30°ごとに、そのほかの部位(上腕、前腕および下腿)は45°ごとに撮影を行う。この回転角度は任意に設定可能で、測定する部位の太さに応じて設定することが望ましい。撮影時の姿勢は、上肢は図3-Aのように台上に胸部を乗せ、上肢を水槽内に下垂させる。水槽の底には、取っ手を設置しておき被検者にこの取っ手を軽く握らせ、水槽内での上肢の動揺を最小限にする。下肢は図3-Bのように立位で行い、このとき、撮影しない側の臀部を台の上に置き、身体の動揺をできるだけ軽減させるようにしている。

撮影は、プローブを取り付けている水槽の上部の筒を1回転させるだけなので、短時間(約1~2分)で終了する。

2-4. 体肢横断面画像合成のソフトウェア

画像処理手順は、1)断片画像を取り込む処理、2)取り込んだ断片画像に対し階調/色調補正や強調処理を施す前処理、3)断片画像を全体画像に戻す再現処理の

3段階に分けて行った。

まず、体肢横断面撮影装置により前述のように体肢の横断面をその中心に対して等間隔角度ごとに撮影する。撮影はモニター画面で確認しながら行い、各角度ごとに撮影した断片的な体肢横断面画像は、コンピュータ付属のAVボードを介してハードディスクに取り込み、その後、この画像データをオフラインで処理して全体像を合成する。画像のキャプチャリングには Video Shop Version 3.0 (Avid社) を使用した。このときキャプチャする画像の明るさやコントラストをリアルタイムで調節して、より鮮明な画像を 24 bit, 1677 万色で記録する。

次に、この画像データに対し、筋膜や骨などの特徴を抽出するための前処理を行う。この前処理にはフォトタッチソフトである Photo shop 3.0 J (Adobe社) を使用した。キャプチャリングされた画像データには、なんらかのノイズが混入してしまったものがあるため、必要に応じてノイズ除去のためのフィルタリングを施すことが可能である。また、筋膜や骨などの特徴は、白い色調となって画像中に表れるので、その特徴が観察し難い場合は白い色調が強調されるような補正も可能である。そして、次に行う合成処理で用いるソフトウェアの仕様上の都合により、最後に画像を 8 bit, 256 色のグレースケール画像に変換する。

体肢横断面画像の合成処理には、Macintosh のフリーソフトウェアである NIH Image を利用した⁹⁾。このソフトウェアは米国の National Institutes of Health の研究者である Wayne Rasband 氏が医学・生物学領域の画像処理、画像解析のニーズに合わせて開発したものである。特徴として強力なマクロ機能を兼ね備え

ており処理のほとんどを自動化し、処理にかかる時間を大幅に削減することができる。

体肢横断面画像は断面の中心に対して等間隔角度ごとに撮影されているので、それに合わせた画像の回転変換を行い各画像を重ね合わせる。このとき、複数の画像データが重複する箇所が存在する。それらの箇所に関しては、ピクセル同士の色調を比較して色調の低いほうのピクセルを生かすように重ね合わせる。これにより、色調の低い筋膜や骨などの特徴が合成画像上で観察可能となる。また、合成に使用した断片画像を必要に応じて差しかえることや同一部位の画像を複数枚重ね合わせて特徴を強調することなども可能である。さらに、この NIH Image は面積などを計測する機能も兼ね備えており、本システムでの各組織の横断面積計測にもこの機能を利用した。

本システムによって撮影された大腿部(右側)の超音波横断面画像の1例を図4-A(図4-Bは、同じ部位のMRI画像)に示す。画像からは、皮下脂肪、筋および骨の各組織をはっきりと識別することができる。

3. 再現性・妥当性の検討

3-1. 再現性の実験

(1) 実験方法

同一被検者の同じ部位を1日以上の間隔を置いて2度撮影し、皮下脂肪、筋および骨の各組織横断面積測定のリ再現性について検討を行った。被検者は、大学生男女21名(男性18名、女性3名)で、年齢は21~23歳であった。撮影部位は、転子点から脛骨点までの距

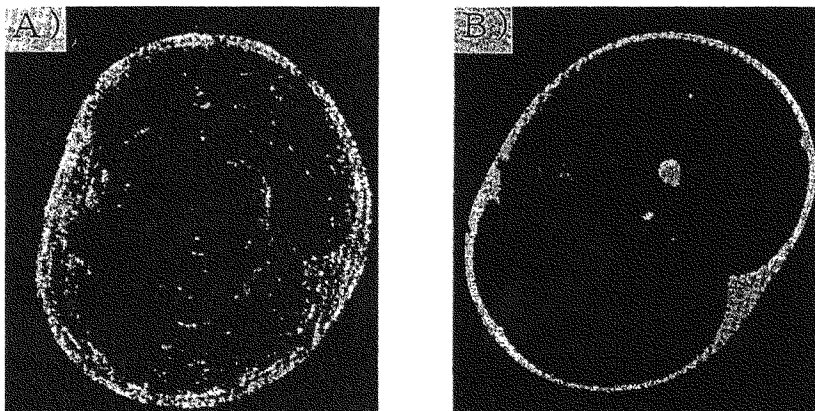


図4 大腿部の横断面画像 (A:本システムによる画像, B: MRI画像)

Fig. 4 Cross-sectional image of right thigh (A: Ultrasound, B: MRI).

離の50%の位置で大腿部のほぼ中央とし、右脚のみについて行った。撮影時の姿勢は、立位とした。

(2) 結果

図5は、1回目と2回目に撮影された大腿部横断面画像より計測された各組織の横断面積をプロットしたものである。1回目と2回目の各組織の横断面積の相関係数は、それぞれ皮下脂肪(0.966)、筋(0.985)、骨(0.957)と非常に高く、1回目と2回目の計測値はほぼ一致した。

3-2. 妥当性の実験

(1) 実験方法

本システムとMRIで体肢の同じ部位を同一日に撮影し、それぞれの各組織横断面画像について検討した。被検者は、成人男女10名(男性7名、女性3名)で、年齢は22~34歳であった。撮影部位は、再現性の実験と同じ部位で、この場合も右脚のみについて行った。MRIの撮影には1.5Tの超電導MR装置(Signa, GE社製)を用いた。撮影時の姿勢は、本システムは立位、MRIは仰臥位であった。

(2) 結果

図6-Aは、本システムとMRIで撮影された大腿部横断面画像より計測された各組織の横断面積をプロットしたものである。本システムによる各横断面積はMRIより全横断面積で7.34±4.97%(平均±標準偏差)、皮下脂肪で5.24±7.51%、筋で8.41±5.09%、骨で6.48±4.64%、全体の平均では約7%大きかつ

た。しかし、図6-Bのように大腿部全横断面積に対する各組織横断面積の比率の相関係数は、皮下脂肪、筋、および骨ともそれぞれ0.993, 0.994, 0.949でidentity line上に分布し、本システムとMRIの差は、皮下脂肪で0.97±0.73%、筋で1.00±0.73%、骨で0.08±0.04%と両者はほぼ一致していた。

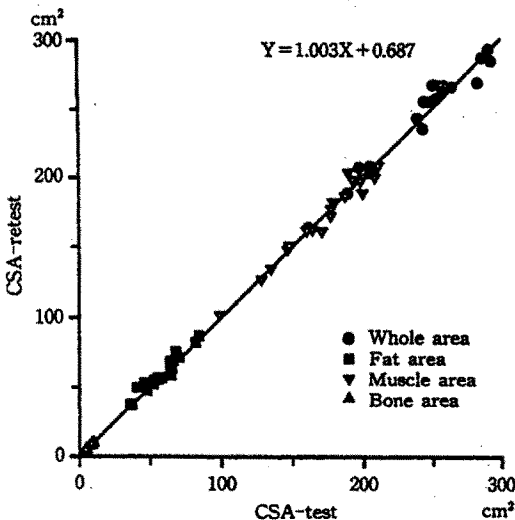


図5 本システムの再現性の検討
Fig.5 Reproducibility of the system (CSA: Cross-sectional area).

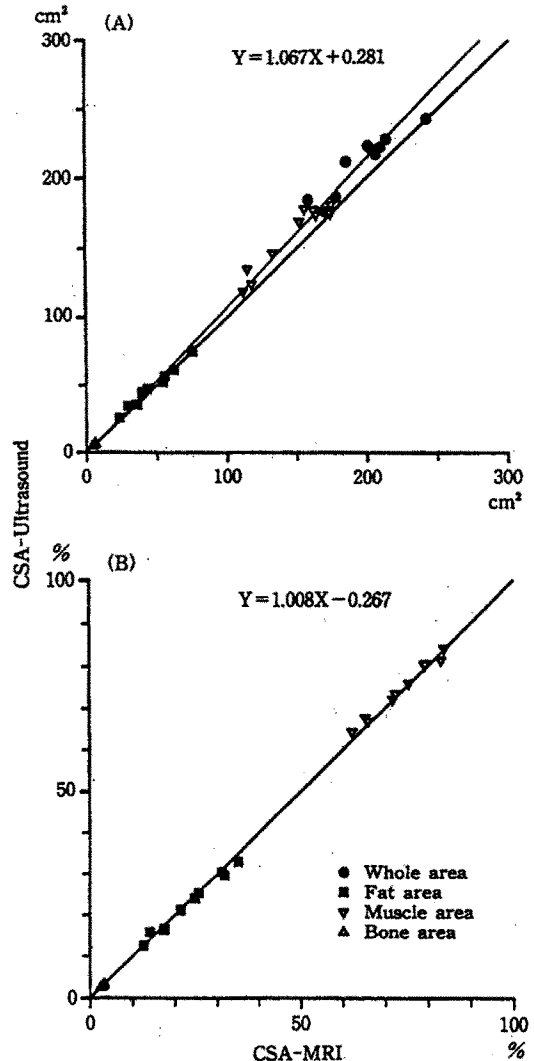


図6 本システムとMRIとの比較 (A:面積の絶対値(cm²), B:全横断面積に対する各組織横断面積の比率(%))
Fig.6 Comparison of fat, muscle, bone and whole cross-sectional area (CSA) of the thigh between ultrasound and MRI methods (A: Absolute area (cm²), B: Relative percentage of each tissue area to the whole area (%)).

4. 考 察

今回、開発した超音波体肢横断面撮影システムは、これまでCTやMRIなどのように高価で、しかも特定の施設でしか得ることのできなかった生体の体肢横断面画像が、安価で簡便に入手することが可能となった。

本システムの信頼性は、再現性・妥当性の実験を行うことで確認した。再現性については、同一被検者の同じ部位を1日以上の間隔を置いて2度撮影し、各組織横断面積測定値の検討を行ったが、1回目と2回目の計測値はほぼ一致しており、本システムの高い再現性が確認された。また、妥当性については、本システムとMRIで体肢の同じ部位を撮影し、各組織横断面積画像について検討した。その結果、本システムによる各組織横断面積はMRIより約7%大きい値を示したが、その理由の1つとして、撮影時の姿勢の違い(本システム:立位, MRI:仰臥位)による影響が考えられる。身体組成を議論する場合、組織量そのものより全体に占める比率を問題にすることが多い¹⁰⁾。なぜなら、組織量そのものだとBody sizeなどの形態的な要因の影響を受けやすく、個人間の量的発達程度を比較することが困難となるからである。そこで、本研究では大腿部全横断面積に対する各組織横断面積の比率についても検討を行った。本システムとMRIの大腿部全横断面積に対する各組織横断面積の比率の相関係数は、皮下脂肪、筋、および骨のいずれも0.9以上と非常に高く、両者の差は各組織とも1%以下とわずかであり、ほぼ一致しているものと判断された。

また、この撮影装置は、軽量でコンパクトに作製されているため、可搬性があり、測定も短時間で行うことができるので、フィールドで展開されるような集団を対象とした調査研究には有効である。例えば、現在の我が国において急激に進む高齢化のなかで、高齢者が自立した日常生活動作を維持していくことは重要な課題であり、この問題に取り組む際には、高齢者の体力評価が必要不可欠となるが、その体力評価の1つとして体肢組成の評価があげられる。上述のように、本システムは手軽にどこでもヒトの体肢横断面画像が撮影可能なので、このような研究を進めるうえで最適な方法になり得るものと考えられる。さらに、本システムを用いることで、より広範囲な集団における体肢横断面情報の収集が可能となり、今後、体肢組成のデー

タの蓄積とそれに基づく現代の日本人の基準値といった新たなデータベースの構築が期待される。

本研究の一部は、勸明治生命厚生事業団第12回(平成7年度)研究助成によるものである。

参考文献

- 1) Maughan, R. J., Watson, J. S. and Weir, J. : Relationship between muscle strength and muscle cross-sectional area in male sprinters and endurance runners, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 50, 309~318, 1983.
- 2) Hounsfield, G. N. : Computerized transverse axial scanning (tomography). Part I. Description of system, *Brit. J. Radiol.*, 46, 1016~1022, 1973.
- 3) Hudash, G., Albright, J. P., Mcauley, E., Martin, R. K., and Fulton, M. : Cross-sectional thigh components : computerized tomographic assessment, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 17(4), 417~421, 1985.
- 4) Fukunaga, T., Roy, R. R., Shellock, F. G., Hodgson, J. A., Day, M. K., Lee, P. L., Kwong-Fu, H. and Edgerton, V. R. : Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging, *J. Othop. Res.*, 10, 926~934, 1992.
- 5) 久野謙也 : MRIによるトップアスリートの軟部組織, *整形外科*, 46(8), 983~989, 1995.
- 6) Weiss, L. W. and Clark, F. C. : The use of B-mode ultrasound for measuring subcutaneous fat thickness on the upper arms, *Res. Quarterly Exerc. Sport*, 56(1), 77~81, 1985.
- 7) 石田良恵, 角田直也, 金久博昭, 福永哲夫 : 超音波皮脂厚計の検討, *体力科学*, 34, 91~97, 1985.
- 8) 湯浅景元, 福永哲夫 : Bモード超音波による皮下脂肪測定の正確度, *体力科学*, 36, 31~35, 1987.
- 9) 沼原利彦, 小島清嗣 : 医学・生物学のための画像解析ハンドブック実践 NIH Image 講座, 羊土社, 東京, 1995.
- 10) 福永哲夫, 金久博昭 : 日本人の体肢組成, 朝倉書店, 東京, 1990.