

遊泳運動負荷時の心駆出率の計測法と 筋発達の三次元的解析法の開発

東京慈恵会医科大学 鈴木直樹
(共同研究者) 同 久能晃 池田道明
セントラルスポーツ研究所 国井実
北海道東海大学 服部正明

Measurement of Cardiac Output during Swimming and the Noninvasive 3D Reconstruction of Muscle at the Thigh Part

by

Naoki Suzuki

*ME Research Unit, The Jikei University
School of Medicine*

Akira Kunou

*Department of Fourth Internal Medicine,
The Jikei University School of Medicine*

Michiaki Ikeda

*Department of First Physiology, The Jikei
University School of Medicine*

Minoru Kunii

Institute of Central Sports

Masaaki Hattori

*Institute for Higher Education Programs,
The Hokkaido Toukai University*

ABSTRACT

A method for the measurement of cardiac function during swimming exercise and the method for the three dimensional (3D) analysis of muscle structure of the thigh part were developed. 2D echography is utilized for the former method. Equipment and ultrasonic probe are modified for the measurement in the water. Swim-mill was used for the

exercise and the cardiac functions were measured by the change in the transverse area of LV between diastole and systole. Ergometer exercise was also performed on the same subject with the same load as the swimming for the comparison of the change of the response between these exercises. The latter method was performed for the reconstruction of 3D image of muscles structure by a noninvasive way.

3D image of the muscles was reconstructed from the MRI using a computer graphics system. After some experiences, it was revealed that these 3D images were effective to understand their shapes and relative locations of each muscle. And the change in the volume of each muscles was also measured quantitatively by this method.

要 旨

遊泳中の心拍出量の計測法の開発ならびに筋発達の三次元的評価法の開発に関する研究を行なった。前者についてはスイムミル装置により被検者に一定量の遊泳運動負荷を与え、超音波断層装置により得た心横断面像から心室内容積の変化を算出し、心駆出率変化の計測を行った。このようにして計測した遊泳中の応答と陸上での運動の比較を行なうために、自転車エルゴメータを用いて同様の項目の計測を行った。

また被検者の筋肉の発達程度を計測するためには核磁気共鳴像を用いて筋横断面像を撮像し、コンピュータグラフィクスによる三次元画像を作成した。これにより大腿部筋肉群の形状を三次元像として観察し、さらに各筋肉ごとの体積の無侵襲的計測を可能とした。

1. 序

遊泳運動は環境が水面下または水中という特殊な環境下であるため、計測に用いる装置が陸上運動に比べて制限される。われわれは遊泳中の心拍出量の変化を経時的にとらえるため、超音波断層装置を用いた手法を考案した。これにより遊泳運動により生ずる心機能の応答特性を計測し、陸上

での同等の運動負荷によって生ずる変化との差異を求めた。

また今まで運動にともなう四肢の筋群の発達の評価法は二次元断層像等を用いた筋の最大直径での計測等、間接的な手法が多かった。

しかしながら筋肉の発達は三次元的方向に発生する現象であり、各筋の形状自体も身長、体格にともなう個人差があるため、一断層像からの評価には限界がある。われわれは核磁気共鳴画像とコンピュータグラフィクス法を用いることにより、筋肉形状の三次元像を得るとともに、本来三次元的に発生する筋の発達を無侵襲的かつ定量的に評価する手法を開発した。

ここでは今回開発したこれらの手法の解説を中心に、得られた結果の報告を行なう。

2. 遊泳中の心拍出量の計測法の開発

2.1 心拍出量手法

遊泳運動負荷による心拍出量の変化と循環動態の変化の定量的解析を目的として、遊泳中の被検者の心拍出量を反映する心駆出率を計測した。そして、同一被検者による陸上での同等の運動量による計測を行ない、遊泳運動という水中環境下での運動に特異的な循環動態の変化の定量的解析を試みた。

被検者に与える運動負荷を定量化し、同じ条件での計測を可能とするためにスイムミル装置を用いた。一定量の遊泳運動負荷を与え、連続的に ECG 計測、呼気ガスの採取を行ないつつ、超音波断層装置による心横断面像の撮影を行った。そしてこれらの心横断面像から左室の拡張期と収縮期での断面積の差を求め、心駆出率を計測した。

まず最初に本手法を実現するために、水中における心横断面像の撮像に必要な超音波断層装置の改良並びに計測手技の確立を行なった。従来、遊泳中の運動負荷に対する心拍出量を得るためには主に呼気中の二酸化炭素濃度の変動から求める手法が取られていた。しかし、この手法ではステップ状に変化する運動負荷に対する過渡応答的な動的变化を解析することは出来ない。このためにわれわれは、一回拍出量の計測も可能な、時間的変化の測定可能なシステムを製作することを行なった。

原理的には超音波断層法を用い、心断層像中の左室容積の変化より心駆出率を計測する手法をとった。通常の超音波断層装置では水中の被検者の計測は難しいため、同装置に超音波プローブを始め数カ所に改良を施した。超音波プローブは共振周波数 3.5MHz のセクタスキャンプローブを用いた。プローブ自体は防水加工し、さらに防水強度が高く、本体まで十分な距離を持つことのできる長さのケーブルによりプールサイドに設置した装置本体と結合した。計測者は潜水具を装着して被検者とともにスイムミルに入り、水中から直接観察できるモニターにより計測部位の検索並びに断層像の撮影を行なうものとした。心横断面像を得るためには被検者の下方から第三・第四肋間にプローブを位置させ、水中から常時モニター上の心断層像を観察しつつ遊泳による被検者の動きによる位置の変動を最小にして計測を行なった。

図 1、図 2 に超音波法による計測風景並びに超音波プローブによる水中での計測手技を示す。

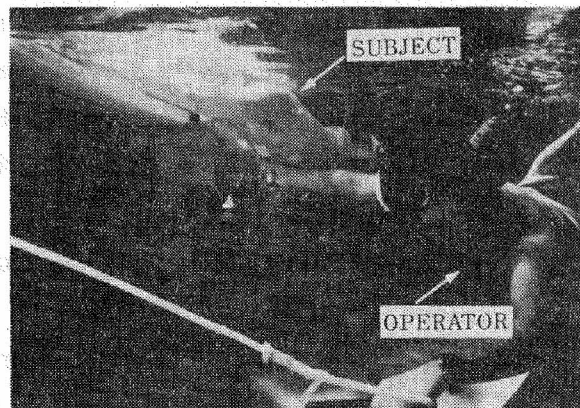


図 1 遊泳運動負荷時の計測風景

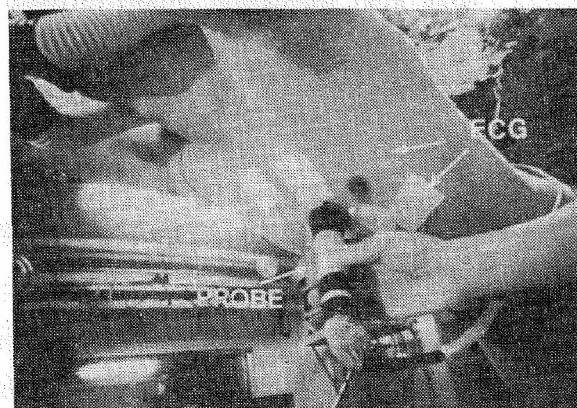


図 2 水中での心断層像の計測法
超音波プローブと ECG 用電極を見ることができる。

一方、被検者からマウスピースを介して得た呼気ガスからは呼気量ならびに酸素分圧、二酸化炭素分圧の変化によるエネルギー消費量を計測した。また陸上運動として自転車エルゴメータ作業を選択し、スイムミルと同等の運動負荷を与え、水中と同様に超音波法および呼気ガス採取によって同項目の計測を行ない、両者の比較を行なった。

2.2 結 果

遊泳運動負荷については流速 0.3~0.4m/sec の水流をスイムミルにて発生させて 3 min の負荷を被検者に与え、その後そのまま水中にて安静にさせ、8 min までの recovery での変化を記録した。自転車エルゴメータに関しても遊泳運動時の負荷と同等の負荷を発生させるため、被検者の酸素摂取量を用い作業負荷終了時の酸素摂取量が等

しい値になるようにして自転車エルゴメータによる負荷を与えた。流速 0.35m/sec の遊泳負荷は 103 W の自転車エルゴメータ作業に相当した。自転車エルゴメータ作業の場合も作業負荷を 3min, 安静時を 8 min として計測を行なった。

図に示す計測例は水泳訓練経験のある健常人 28歳男性である。相互に影響のない程度時間をお

いて計測した 4 回の計測結果の平均値を示す。図 3 に超音波断層像中の左室内腔面積における拡張終期と拡張末期の比から求めた心駆出率の時間的变化を、図 4 に酸素摂取量の変化を示す。

いずれの図においても黒丸印は遊泳負荷を、白丸印は自転車のエルゴメータ負荷を表わす。

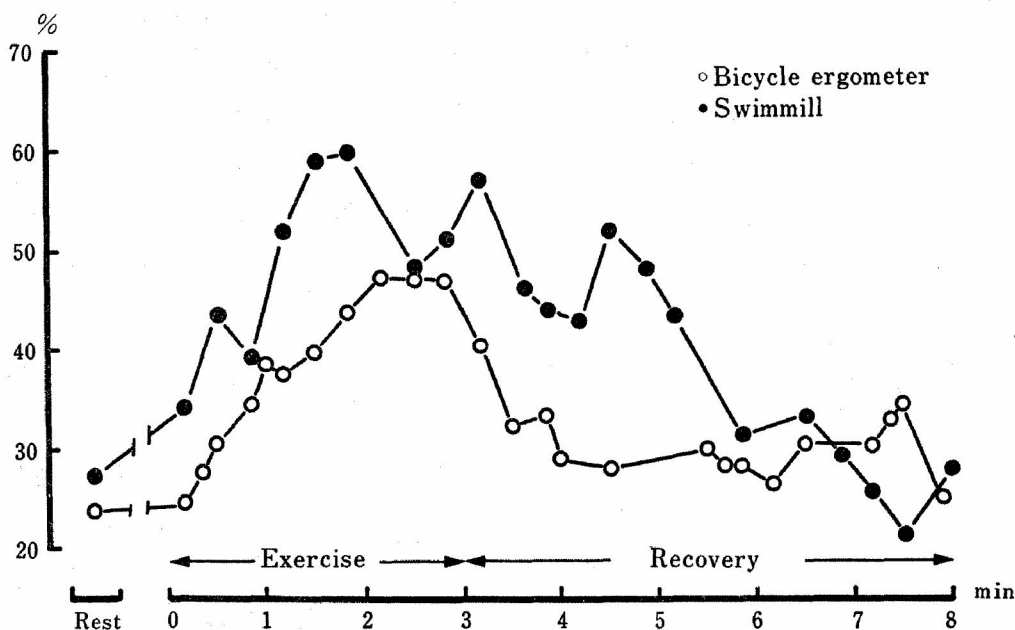


図 3 遊泳および自転車エルゴメータ運動負荷に対する超音波層像より求めた心駆出率の変化

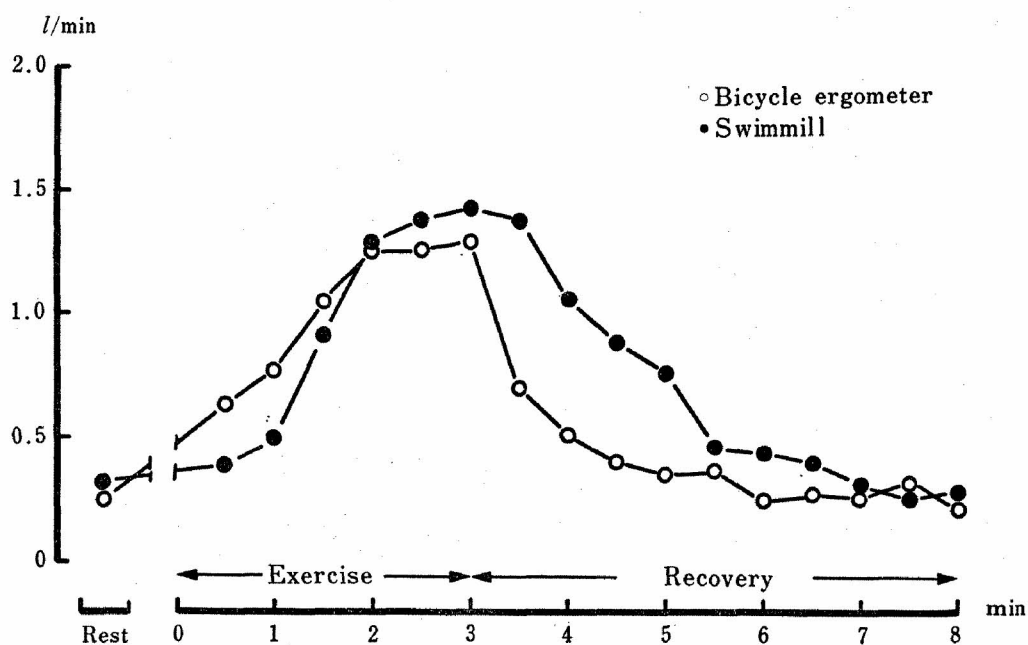


図 4 遊泳および自転車エルゴメータ運動負荷中の酸素消費量の変化

3. 骨格筋の三次元像を用いた運動能力の評価法の開発

3.1 MRIの筋三次元像構築への応用

従来よりX線CT画像や超音波断層像などを用いた二次元情報から身体局所の筋肉量、脂肪量の計測が行なわれているが、いずれも相対的な指標としての評価法であり、絶対的なこれらの量を計測するには至っていない。われわれは三次元像構築法を用い筋肉量の計測並びに筋肉ごとの体積の変化を無侵襲的に計測することを試みた。まず計測部位として遊泳運動に大きな影響を与える、大腿部を選び筋肉量の計測を行なった。

まず用いた三次元画像構築法についてその概要を説明する。

生体用三次元画像技術は、従来医師が診断の際透過像や断層像から想像していた人体の構造や現象を本来の立体的形状に再構成して観察者に供給するために生まれた技術である。さらに三次元画像は臓器、骨格の観察を容易にするだけでなく、画像から任意の部位の距離、体積などを定量的に計測することも可能である。コンピュータグラフィックスにより三次元像の観察を行なう場合に特徴的な機能としては、画像を回転、拡大することにより自由な視点を設けられることが可能であることと、表示されている像の外表面を透明にしたり切開することにより、内部構造の観察を行なうことが可能であることなどがあげられる。

また三次元画像構築に際して核磁気共鳴画像(MRI)の持つ特質として生かすことができるのは、被爆の心配が無く一人の被検者から多くの断層像を得られること、造影剤を使わずに血管内腔を良く抽出できること、自由な断層面を作成出来ること、脂肪、筋肉組織の識別にすぐれていることなどがあげられる。特に筋発達を三次元的解析のためには被爆をとまなわないため連続計測ができ、かつ脂肪、筋肉組織の識別にすぐれている性

質が大きな役割を果たした。

3.2 システム概要および画像構築法

本システムは personal computer を用い、入力した断面像から抽出した輪郭線群に、各画像間の距離情報を与えることにより、三次元像として立体表示する機能を持つ。複数のモデルを同一画面上に表示する際、目的に応じてワイヤフレーム表示とサーフェスモデル表示を併用することもできる。構築された三次元モデルは拡大、縮小、三次元軸上での移動、回転を行なえる。さらに任意の平面によってモデルを割断し、その内部の構造を表示することも可能である。またモデルの全体または任意平面により割断した部分の体積、表面積並びに断面積などの計測も可能である。

原画像入力は、原画像から抽出した輪郭線をデジタイザを介して入力する。また原画像をTVカメラにより直接にとり込み、CRT上で輪郭線の抽出を行なうことも可能である。図5に装置のブロックダイアグラムを示す。

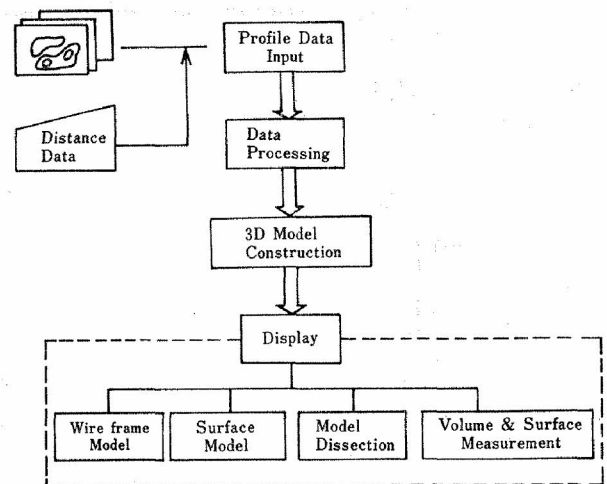


図5 骨格筋三次元像構築用システムのブロックダイアグラム

3.3 画像表示法

三次元モデルとして処理し終った図形は、ワイヤフレーム像またはサーフェスモデルとして表現することができる。

ワイヤフレームとして表示する場合には、原画

像平面と平行な横線と各画像間を結ぶ縦線による四角形の集合体として面表示を行なう方法，三角形ポリゴン自体を表示して三角形の集合体として面表示を行なう方法および，原画像平面に平行な横線のみを表示からの選択が可能である。

さらに，三角形群の色彩を決定し，光源に対する輝度を決定してサーフェスモデル像とする。つまり，図形表面を面として表示し陰影を持たせるためには図形に光を照射する光源と，この光の照射される図形表面の状態を決定する必要がある。本システムでは構築したモデルを置いた仮想空間内に2つの白色光の光源を設定し，この光源により照射されるモデル表面での状態を，反射係数，拡散係数，散乱係数により決定し，数値としてキーボードを介して入力する。これらのパラメータによって決定するモデルの表面処理の過程は次の通りになる。

まず，三次元モデルを構成する各三角形ごとに，面に対する法線ベクトルNを求め， shading 関数によって輝度 I を決定する。拡散光成分を I_p ，反射光成分を I_q すると輝度は

$$I = I_p + I_q \dots\dots\dots (1)$$

となる。上式中，右辺第一項の I_p は想定される図形表面に照射された光が内部で乱反射し，物体表面から全方向に放射される成分である。拡散光は物体の表面の色彩を表現し，表面に与えられる光エネルギーに比例した輝度を持つので Lambert の法則により，

$$I_p = E_L K_p \cos \theta \dots\dots\dots (2)$$

と表現することができる。この式中， E_L は光源エネルギーであり， $|L| = E_L$ である。また K_p は拡散定数， θ はベクトル \vec{N} と照射光とのなす角を表わす。

反射光の表現については Phong Bui Toong の経験法則を用いた。かりに，表示する図形表面で鏡面反射が生ずるとすると単一方向のみ反射光は進むことになる。しかし実際の物体表面では乱反

射を生じ，反射光は広がってぼける。図形表面に実存感を持たせるためにはこの現象の表現を行なう必要があり，反射光の広がりを Phong Bui Toong の経験方法を用いて以下のように表した。

$$I_q = E_L K_q \cos^n \alpha \dots\dots\dots (3)$$

この式において K_q は反射定数， n は散乱定数， α は鏡面反射光成分と視線とのなす角である。

3.4 結 果

原画データを得るために超電導 MRI を用いて被検者の大腿部を横断面方向に15mm 間隔のスピネコー像として撮像した。図6に構築した大腿部筋肉群の三次元像を示す。図中，体表面はワイヤフレーム像とし，各筋肉をそれぞれ色彩の異なるサーフェスモデル像として表示している。

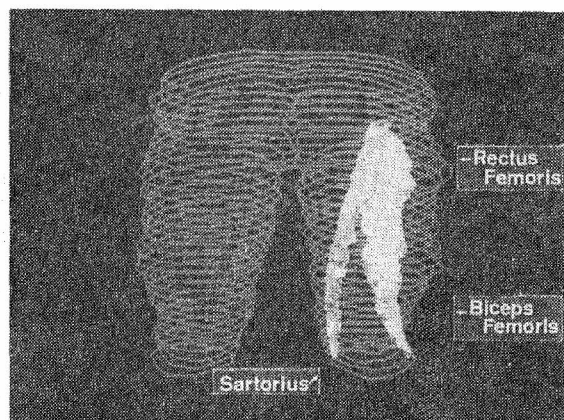


図6 MRI より再構築された大腿部筋肉群の三次元像

図7は同様の表現法にて表示した画像を体軸に対して45° ずつ視点を変え像を回転させた状態を示す。それぞれの筋肉同士の相互的位置関係を見ることができる。これら一連の大腿部における計測においては縫工筋，大腿直筋，大腿二頭筋をそれぞれ独立に三次元像として構築できることがわかった。

三次元像から求めた被検者の伸筋群の体積は右側 1,280.8cm³，左側 1,113.0cm³ であった。これらの値は Alexander & Vernon (1975) らが

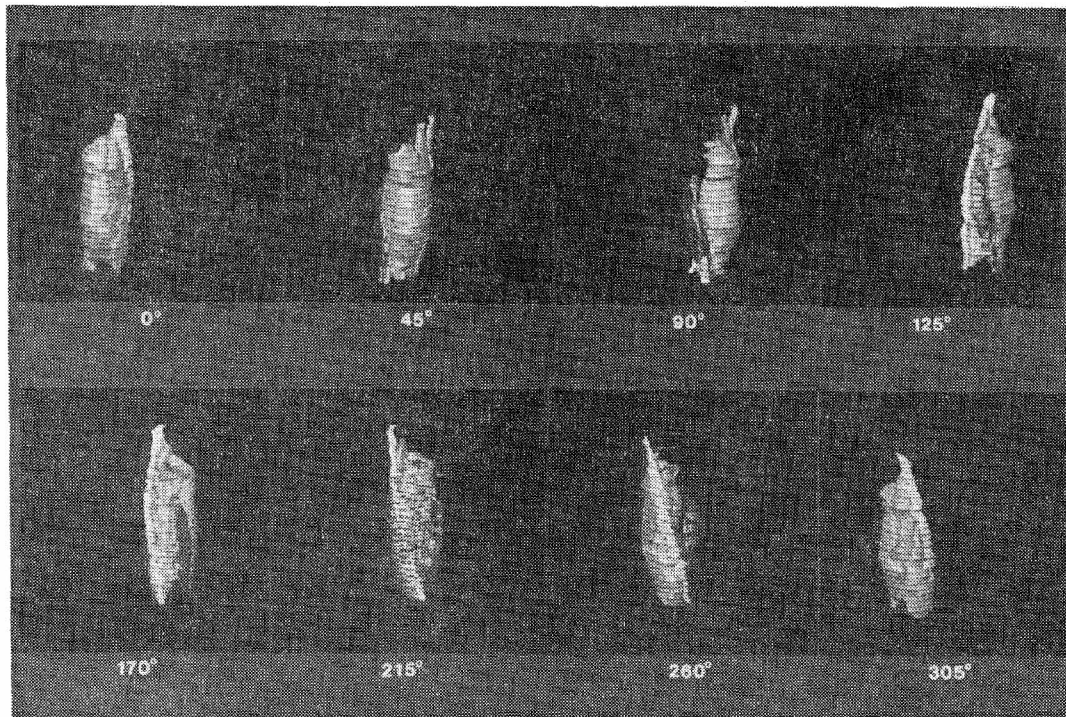


図7 大腿部三次元像を体軸を中心として45°ずつ回転させた像
各筋肉の相互的位置関係を観察することができる。

報告した屍体大腿部にて直接計測した伸筋群の体積 $1,266.66\text{cm}^3$ に非常に良く一致した結果を得ることができた。

以上により本手法では各筋肉ごとの体積並びにその発達度を無侵襲的に数値として評価できることがわかった。

4. 考 察

4.1 遊泳中の心拍出量の計測

今回は計測手法の開発を中心に研究を進めたため、計測例はまだ少なく、結果に対する詳細な検討はここではさし控えるが、若干の考察を試みる。

まず、図4の酸素摂取量の変化を見てみると、酸素摂取量の変化は自転車エルゴメータ作業に対して遊泳負荷の方が低い値を示すのに対し、recovery では常に大きく、回復が遅いことを見ることができる。これは今回の負荷が最大酸素摂取量に至っていないが、一応 Astrand (1963) らによる、遊泳中に得られる最大酸素摂取量は自

転車エルゴメータでの最大作業時に得られた値の約90%に相当するという報告と一致する現象を示している。

一方、心駆出率の変化を見てみると、遊泳運動による心拍出量の増加は陸上運動に比べて速く上昇し、recovery も遅いことが見てとれる。この原因として考えられるのは遊泳中に水圧により生ずる venous return の変化である。外圧の増大は平均血圧の小さい末梢部での血流よりも血圧の高い体幹部での循環量の比率を大きくするという推定も成り立つ。このため心駆出率が上がる割には末梢の酸素分圧は上昇しないことが考えられる。これは酸素摂取量の変化において、負荷中は小さい値であった遊泳中の酸素摂取量が recovery で増大傾向を見せ、回復が遅延していることが裏付けているとも考えられる。しかしながら、まだ計測例は少ないため確定は出来ない。

また今回の計測時 recovery 状態の計測の安静時には遊泳中のような水平の姿勢ではなく、下半身は水底に立って垂直な状態をとっていた。この

ため上半身と下半身では異なる水中圧を受け、venous return の不均一が生じ、これらがデータの解析を複雑にしている可能性もある。今後は遊泳において環境の大きな要素である水中圧をパラメータとして考慮に入れた計測を行っていきたいと考える。また今回の超音波計測法について見ると、図 3 中の心駆出率の変動はスイムミルの水流による被検者の一時的移動により、超音波ビームが心室中央より逸脱したための過小評価であると考えられ、計測時の超音波プローブ保持の部品を付加するだけでこの誤差は軽減することが可能と考えられる。

以上、これら遊泳中の心拍出量並びに循環動態の解析を進めることができれば、運動生理学的な成果だけでなく、venous return が変化した際の循環動態の解析、ならびに無重力状態での循環動態の解析といった幅広い成果が得られると考えている。

4. 2 筋の三次元的評価について

従来、化学分析に用いられていた NMR 現象は X 線 CT 装置の後に続いて生体の断層像を供給する手段として発達し、さらに新しい種々の機能をも持つようになった。初期に MRI は撮像に時間がかかること、空間分解能の劣性などの問題点を持っていたが、超伝導 MRI の開発並びに MRI 画像技術全体の急速な発達とともにこれらは解決された。X 線 CT に比べ、自由に coronal sagittal 像が得られるという利点だけでも三次元画像構築に寄与する情報内容は大きいと言える。

このような MRI を利用した本計測法を用いる事により、今まで困難であった筋肉の発達の三次元的解析ならびに無侵襲的に筋肉の体積を計測する事が可能となった。さらに本手法により各筋肉の形状だけでなく相互の位置を観察できることがわかった。また本手法では各筋肉ごとの体積ならびにその発達度を数値として評価できるため、体力評価、運動能力評価の新しい指標を提案するこ

とが可能であると考えられる。また筋肉ごとの体積計測が無侵襲的に計測出来ることにより運動の種類による運動能力の向上を正確に把握し、次の段階の訓練内容の計画を立てることも可能であると考ええる。

今後他の部位での筋肉の判別がどの程度まで可能か、また核磁気共鳴画像では判別しやすい脂肪量の三次元的分布などの計測を行なって行きたいと考える。

さらに将来、新しい MRI 技術により可能となった血流動態像、chemical shift 像を利用することにより、筋筋肉群の機能的三次元像の再構築などが可能になるものと考ええる。

文 献

- 1) J.G. Shaw, E.C. Johnson, W.F. Voyles and E.R. Greene; Noninvasive Doppler determination of cardiac output during submaximal and peak exercise. *J. Appl. Physiol.* 59(3) : 722—731 (1985)
- 2) R.W. Dixon, Jr. and J.A. Faulkner; Cardiac outputs during maximum effort running and swimming. *J. Appl. Physiol.* 30(5) : 653—656 (1971)
- 3) K.I. Soto, C.W. Zauner and A. B. Otis; Cardiac output in preadolescent competitive swimmers and in untrained normal children. *J. Sports Med.* 23 : 291—294 (1983)
- 4) J.A. Loepky, E.R. Greene, D.E. Hoekenga, A. Caprihan and U.C. Luft. ; Beat-by-beat stroke volume assessment by pulsed Doppler in upright and supine exercise. *J. Appl. Physiol.* 50(6) : 1173—1182 (1981)
- 5) P.O. Astrand and K. Rodahl; *Textbook of Work Physiology.* (運動生理学), 朝比奈一男 監訳, 浅野勝巳 訳, pp.215, 大修館書店
- 6) M. Ikai and T. Fukunaga; Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. *Int. Z. angew. Physiol. einsch. Arbeitsphysiol.* 26 : 26—32 (1968)
- 7) Jeffrey, L.M., Micheal, W.V.; Surface imaging from computerized tomographic scan. *Surgery*

- 94 : 2, 159—165 (1983)
- 8) 安田孝美, 横井茂樹, 鶴岡信治, 他; 頭部CT像の3次元表示の拡張機能, 医用電子と生体工学, 21 : 特別号, 463 (1983)
 - 9) Kevin, R.S., Wann, L.S.; An analysis of three dimensional reconstructive echocardiography. *Ultrasound in Med. & Bio.* 10 : 5, 575—580 (1984)
 - 10) 鈴木直樹, 伊藤幹生; パソコンを用いた各種医用画像のための汎用三次元構築システムの開発と応用, 映像情報, *MEDICAL* 18 : 4, 170—178 (1986)
 - 11) 鈴木直樹, 伊藤幹生; 形態検索のための人体三次元像システムの開発, 映像情報, *MEDICAL* 18 : 25, 1211—1216 (1986)
 - 12) Suto, Y.; Three-dimensional displays of medical images using X-ray CT and MRI. *Toshiba Medical Review*, 6, 1—6 (1986)