

シネ MRI の画像解析による心機能の 定量評価に関する研究

岡山大学医学部放射線医学教室 (指導: 平木祥夫教授)

清 哲 朗

(平成5年11月30日受稿)

Key words : MRI, cardiac function, image processing,
three dimensional reconstruction

緒 言 方 法

心臓疾患の診断, 治療方針の決定において心臓内血流の状態, 心機能の評価は重要な課題であり, 従来そのためには理学的所見に加えて心血管造影, ラジオアイソトープ (RI) 検査, 心エコーなどが用いられてきた。

近年, 心血流を視覚化する画像診断として磁気共鳴画像診断装置 (MRI) が造影剤を使用せず, 放射線被曝のない非侵襲的手法として脚光を浴びている^{1)~11)}。これによる心臓や血流の動的な観察は心電図同期と高速撮像法と組みあわせてデータを収集し画像作成した後, 連続 (シネ) 表示する方法でおこなわれる。心血管造影をはじめとした従来の画像診断による心機能評価の方法は, 主としてある適当な一断面ないし直交する2断面での二次元画像で評価するものであった。この場合, 心臓の局所壁運動や全体的な心機能の評価を行うことはしばしば困難である。MRI は本来三次元的な検査が可能ではあるが, 現存の MRI 装置には心臓の立体的な機能解析, 立体画像表示が可能なアプリケーションは未だ組みこまれていない。

本研究では MR 画像処理システムを構築し, これを用いて心室容積の算出および心室の立体画像構成を行うことにより, 心機能を定量的に評価することの有用性について検討を行ったので報告する。

1. 心臓 MRI の撮像

使用 MRI 装置は静磁場強度1.5 T 超電導型 (シーメンス社製 Magnetom H 15) である。心臓の位置決めのために Turbo-FLASH 法で胸部の冠状断の画像を得た後, 心臓のシネ画像を撮像した。心電図同期 FISP 法 (TR=40 msec, TE=12 msec, Flip angle=20°, Thickness=7 mm, FOV=250mm, Matrix=256×128, 加算回数2回) を用い, データ補間により, 256×256 の画像を得た。

2. 左室および右室の検出と立体画像表示

本研究で構築した MR 画像処理システムの構成を図1に示す。本体のコンピュータには NEC 製 PC-9801を用いた。本システムを用いた心機能の定量評価の処理過程を図2に示す。画像の入力はシャウカステンに掛けられたフィルムからテレビカメラを介して行う。収集された画像ファイルは光磁気ディスク上に保存する。つづいて, 得られた MR 画像から左室および右室の輪郭を検出する。輪郭検出には種々の手法が開発されているが, ここでは左室や右室のような対象物の境界に沿って3×3画素の小領域を考え, 対象物の輪郭を連結した点列として検出する手法を用いている。得られた断面の各時相において左室および右室の輪郭を求め, ディスプレイ上でマウスにより若干の修正を加えた後, Zバッファ法を用いて左室と右室を立体画像表示する。立体画像表示には32ビット グラフィ

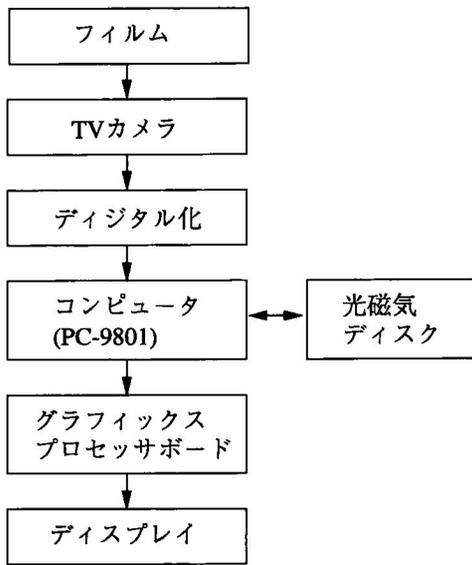


図1 MR 画像処理システムの構成

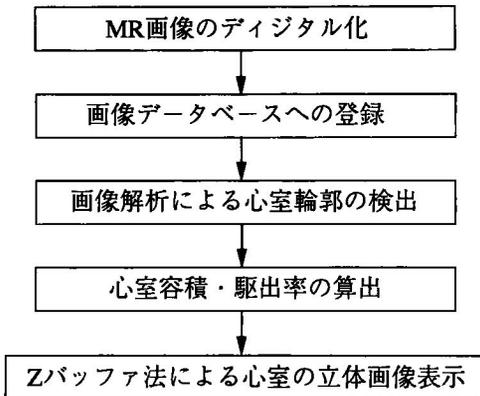


図2 心機能の定量評価の処理過程

ックスプロセッサボードをパーソナルコンピュータの拡張スロットに装着して使用している。このボードを用いることにより、左室および右室の立体動画表示が可能である。

Z バッファ法¹²⁾を用いた立体画像表示の方法を図3、図4に示す。まず左室の輪郭の重心を求める。この重心と同一水平方向上における左室の輪郭との交点 A を求める。この点 A より輪郭を n 等分した点 B, C, D, E... を求める。同様に異なる断面において輪郭線を n 等分した点 A', B', C', D', E'... を求める。ここで A と A' と B, B と A' と B', B と B' と

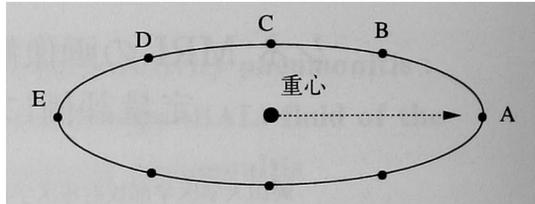


図3 n 等分した輪郭線

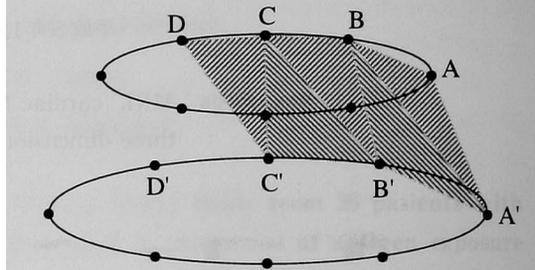


図4 三角形面表示

C, ... のように 3 つの点の座標を用いることにより三角形面が決定できる。この面をカラー表示することにより左室が立体的に表示できることになる。同様にして右室の立体表示を行う。コンピュータのディスプレイは二次元平面であるので、視点の位置によって左室と右室のいずれがより手前にあるかといった奥行情報を求める必要がある。すなわち手前の物を表示し奥にある物は表示しないといった隠面消去を行う必要がある。ここではアルゴリズムが簡単な Z バッファ法を用いて左室および右室を構成する三角形面と視点の位置との奥行情報と面の輝度情報を計算により求める。このようにして左室および右室の立体画像表示が可能になる。

臨床例

心疾患の既往のない健康な 27 歳で MRI を行い、その左室および右室について容積測定および立体画像表示を行った。Turbo-FLASH 法で胸部の冠状断を撮像し、この画面を基準として、心電図同期のシネ MRI を撮像した。体軸に対して垂直方向に肺動脈分岐部から心下縁までをスライス厚 7 mm, スライス間隔 0 mm, 平均 R-R 間隔の約 80% で、1 断面につき 17 枚の経時的なシネ画像を得た。本例では心臓を含む断面は 8 断面であった。図 5 に心電図 R 波より 10 msec 後

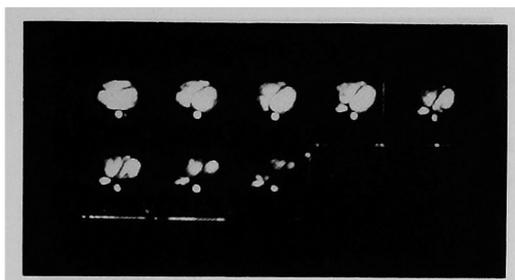


図5 成人ボランティアの心臓を含む8断面のMRI横断像

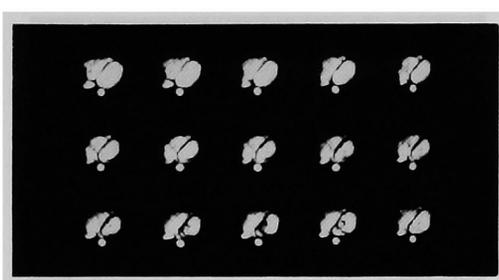


図6 心室中央レベルにおける40 msec 間隔で得られたシネ画像

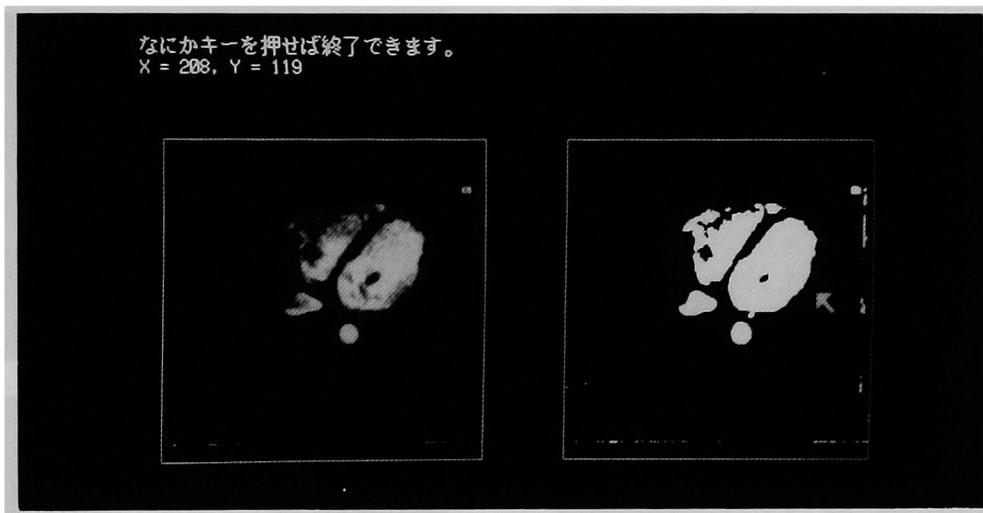


図7 輪郭検出の過程

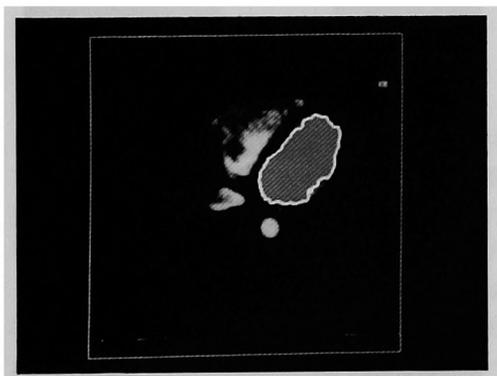


図8 検出された左心室内腔

の、心室を含む連続した断面像を示す。同図の左上から4番目の画像は、心臓のほぼ中央を通る断面における心電図 R 波より10msec 後の画像である。この断面において40msec 間隔で得られた15枚のシネ画像を図6に示す。これらの図

より一番目の画像において心室が最も拡張しているのがわかる。図5の左上から4番目の画像、すなわち図6の左上から1番目における左室輪郭検出の過程を図7に示す。図8に検出された左室の輪郭線と左室の領域を示す。

このようにして得られた左室および右室の輪郭から、Zバッファ法により立体画像表示した結果を図9(a)に示す。同様にしてそれぞれの時相において立体画像表示を行い、これらの立体画像をグラフィックプロセッサを用いて一定時間間隔で表示することにより、左室および右室の立体的な挙動を動画像として表現することができる。図9(a)–(h)は左室および右室を拡張末期から80msec 間隔で表示した結果である。

図10に左室および右室の時間容積曲線を示す。ここで最大容積となる時相が拡張末期に、最小容積となる時相が収縮末期に、それぞれ対応し

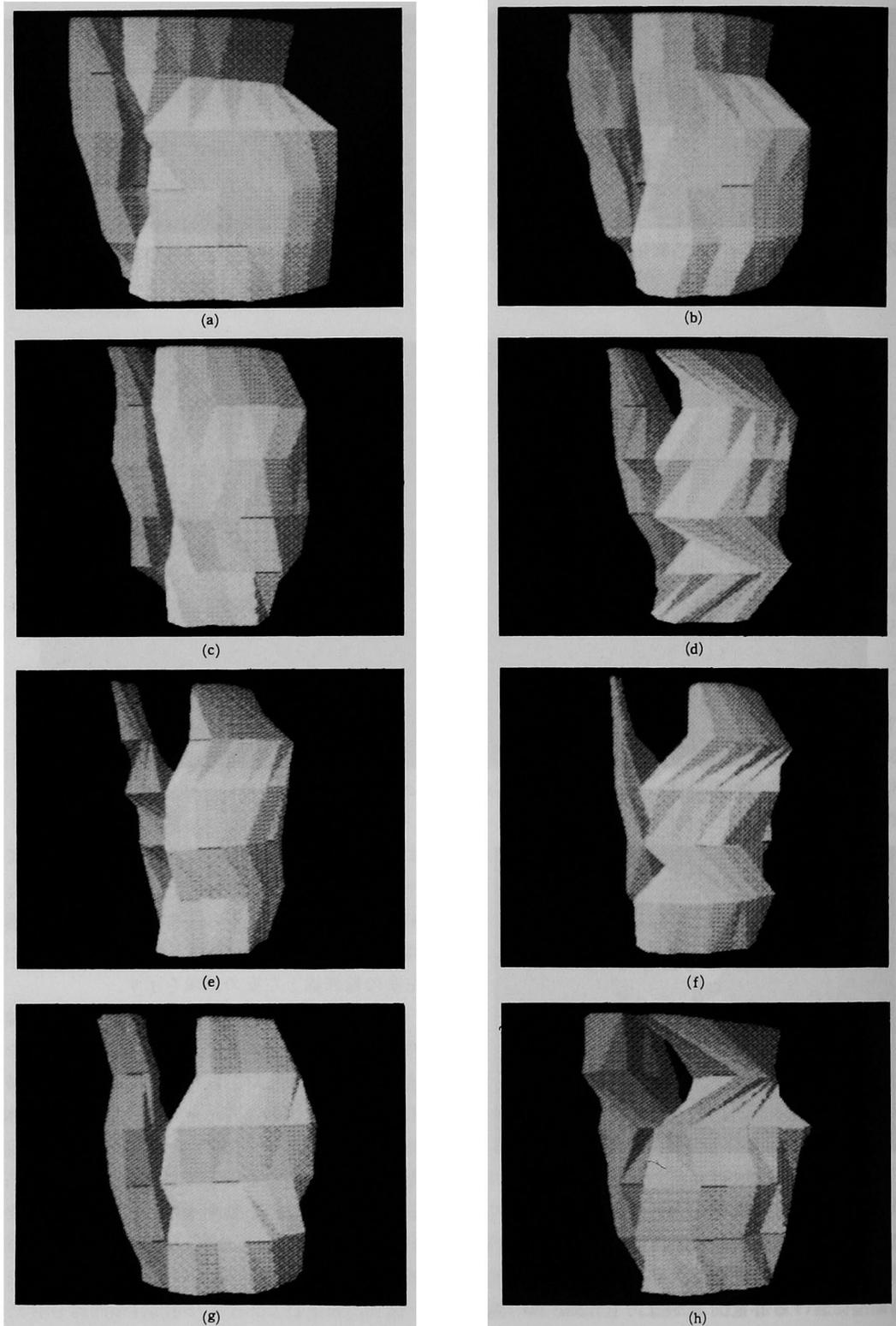


図9 (a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) Zバッファ法による80msec 間隔の心室の立体画像表示
(対象の右前45°からの像。向かって左が左室, 右が右室に対応)

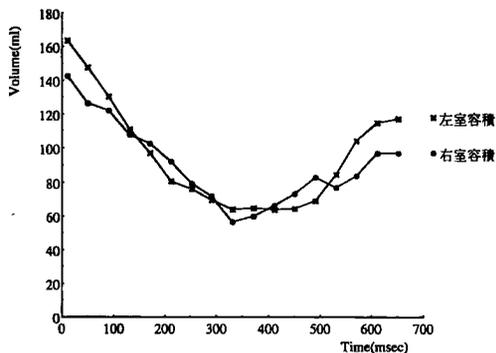


図10 左室および右室の時間容積曲線

ている。本例での左室拡張末期容積は163ml, 収縮末期容積は64mlであり, 左室駆出率 (LVEF) は61%であった。右室拡張期容積は143ml, 収縮末期容積は57mlであり, 右室駆出率は60%であった。この結果から, 本例の心機能は正常であることが示された。比較対象として左心室に関し超音波 M モード法による心機能評価を行った。使用機種は東芝製 SSH-140A である。B モード心エコーにより断面を設定した後, M モード法による計測を行った。収縮期と拡張期の短軸形を計 2 回測定しその平均とした。左室容積は Teichholz 法により算出し, 収縮期心室容積と拡張期心室容積を得て, LVEF を計算した。結果 LVEF は66%と, シネ MRI による結果に近似していた。

考 察

1. 収縮期と拡張期の心室容積から求められる駆出率 (EF) は心機能を評価する上で最も重要な情報 (指標) の一つである。現在の臨床の場では, 心室造影, 心エコー, 心プールシンチグラフィなどにより計測される。正常値 EF は報告者によりばらつきはあるが, 60~70%であれば正常, 50%以下は機能低下と考えられている。

2. 心室造影は空間分解能に優れ, 心室容積算出の golden standard とされてきたが, 観血的で侵襲が大きいためスクリーニングやフォローアップには使いにくい, 造影剤を必要とし造影剤による容積負荷の影響がある, などの問題がある¹³⁾⁻¹⁸⁾。心室容積の算出は左室においては

一般に回転楕円体であるとの仮定に基づく area-length 法により行われる。2 方向 area-length 法の場合, 撮像方向は右前斜位30度, 左前斜位60度で行われる。通常は右前斜位30度のみの撮影から算出する簡略化された 1 方向 area-length 法が使用される。この場合左室の長軸をいつも捉えているとは限らず, 不正確になる症例がある。心筋梗塞患者のように局所壁運動の異常を伴う場合も正確な測定は望めない。area-length 法の欠点を補う方法として, 心室を楕円形のスライスの集合とみなした Chapman 法があり, 心形態異常をともなった症例ではより有用性が高いとされる。また右室は左室に比べ解剖学的に複雑なことから, area-length 法の変法などの幾つかの方法が考案されているが, 決定的なものはないとされている。さらに心室造影は投影像であるため拡大や傾斜による補正が必要であり, 補正による誤差も生じうる可能性がある。

心エコー図は非観血的でリアルタイムに画像が得られ, 臨床的有用性は高いが^{13), 18)-19)}, 超音波を用いた診断手法で体表面からの操作であるため, 特に高齢者, 肥満者では可視範囲が制限されること, 診断精度が術者の技量に依存する, などの問題がある。M モード法による心室容積の算出には各種の幾何学的仮定を必要とし, ことに局所壁運動の異常を伴った心筋梗塞では信頼性が低くなる。断層心エコー図では左室心尖部を全ての症例で正確に描画することは難しく左室長軸を捉えにくい点で問題が残る。心室造影と同様に右室の容積を高い精度で測定するのは困難である。

心室造影および心エコー等で行われている幾何学的仮定に基づく方法では心内腔に突出する乳頭筋, 肉柱を無視することになり, 理論的には容積を過大評価していると考えられる。またいろいろに異なった大きさや型を持ち変形を繰り返す心腔に, 一定の数式による算出法を採用するには多少の無理が伴っている。

超高速 CT を用いた心容積測定は, 高空間分解能を維持した真のリアルタイムの撮影が可能であり, また断層像であるため現在のところ最も精度が高い方法であるが¹⁹⁾⁻²¹⁾装置が大きく高価であり, ごく一部の施設で試みられるに留ま

っている。

心プールシンチグラフィによる容積計測においては放射カウント法、幾何学的方法の2つが用いられる。放射カウント法は Slutky ら²²⁾により確立された形の影響を受けにくい比較的精度の高い優れた方法であるが、心臓をとり囲む体壁による放射線の線源弱、散乱線などの複雑な補正が必要であり²¹⁾⁻²⁴⁾、心房と心室の重なりによる誤差が生じる。幾何学的方法は空間分解能が他の modality に比べ低いのが問題である。

3. MRI は放射線被曝がなく非観血的に心機能の評価が可能である。現在の装置では真のリアルタイムでの撮像は不可能であるが、高度の不整脈の患者を除けば安静時の心室容積の検討は、シネ MRI を用いた方法で十分可能である。MRI を用いた心室容積の算出に関してはすでにいくつかの報告がある^{1)-7),9)-11)}。初期の報告¹⁾⁻⁴⁾は装置の制約もあり心室造影で確立された area-length 法などの幾何学的近似法を用いたものが主体であった。グラジェントエコー法を利用したシネ MRI が実用化され、また比較的短時間で高 SN 比を保ったシネ画像が撮像できる高磁場装置が開発されたため、心全体のシネ画像を撮像し、容積測定を行うことが可能になった⁵⁾⁻⁸⁾。

Dulce らは正常例における左室容積は、幾何学的仮定に基づいた計測で精度の高い計測が可能と報告しているが¹¹⁾、局所壁運動障害を伴う場合や、右室のような複雑な心室容積を正確に計測するには、多くの平行な断面を得て各断面での計測を加算し算出するのが理想と思われる。この方法の場合、全体の撮像に長時間を要するのが最大の問題点である。最近では turbo-FLASH 法などの高速撮像法を応用した高速シネ MRI による検討⁹⁾や特別なハードウェアを加えた MR 装置での echo-planar 法によるリアルタイムの撮像が試みられているが、一般臨床装置で使われるには至ってはいない。

4. 本研究では位置決めが簡単な横断像を用い、撮像マトリクスを少なくすることで、多断面の撮像を比較的短時間で行うことを可能にした。この断面像をもとにして、幾何学的仮定によらない心室容積と駆出率の算出を行った。心

全体を含めたシネ MRI を行った場合、多くの断面の心室輪郭を検出する必要が生じるが、これを人間が用手的にトラックボールなどを用いて行った場合、かなりの複雑さを伴うこと、また再現性に乏しくなることも問題になる。これに対しパーソナルコンピュータ上で半自動化した輪郭検出を行ない効率的なシステムを構築した。

心機能異常の診断の上で機能低下が心全体におよぶものなのか、局限したものなのかを区別するのは重要な点である。これは断面像のみでの観察でもある程度は可能であるが、連続する断面にまたがる異常の評価は容易でない。比較的限られた断面を利用した立体画像の作成は英保らにより報告されている²⁵⁾が、局所壁運動異常を伴う症例の評価では心全体を含んだ断層像からの立体画像が必要になる²⁶⁾。本研究では多断面の撮像を元にして立体構成画像を Z バッファ法で作成しており、任意の視点からの再構成画像を観察することにより、局所壁運動の異常を容易に捉えることを可能とした。

結 論

心疾患の診断および治療方針の決定において、心機能の定量評価は重要な問題である。MRI は造影剤を使用せず、心全体の横断画像を比較的容易に得ることができる。この画像を利用して、各時相での心室容積の測定を従来心室造影などで用いられていたような幾何学的仮定によらない精度の高い算出を行った。心全体の横断像をシネ MRI を撮像し容積算出を行う場合、多くの断面で心内腔を検出する必要が生じるが、本システムではこれをコンピュータ上で半自動化することで、さらに簡便で再現性の高い検査とすることを可能にした。また心室の立体画像表示を行い任意の角度から観察し連続表示することで、局所壁運動の異常を容易に把握できると考えられた。

稿を終えるにあたり、御指導ならびに御校閲を賜った平木祥夫教授に深謝致します。又、研究に際し終始、懇切なる御指導をいただいた教育学部山本秀樹教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) Stratemeier EJ, Thompson R, Brady TJ, Miller SW, Saini S, Winsmer GL, Okada RD and Dinsmore RE : Ejection fraction determination by MR imaging : comparison with left ventricular angiography. *Radiology* (1986) **158**, 775—777.
- 2) Buckawalter KA, Aisen AM, Dilworth RH, Mancini GJ and Buda AJ : Gated cardiac MRI : ejection fraction determination using the right anterior oblique view. *AJR* (1986) **147**, 33—37.
- 3) Sechtem U, Pflufelder PW, White RD, Gould RG, Holt W, Lipton MJ and Higgins CB : Cine MR imaging : potential for the evaluation of cardiovascular function. *AJR* (1987) **148**, 239—246.
- 4) Sechtem U, Pflugfelder PW, Gould RG, Cassidy MM and Higgins CB : Measurement of right and left ventricular volumes in healthy individuals with cine MR imaging. *Radiology* (1987) **163**, 697—702.
- 5) Utz JA, Herfkens RJ, Heinsimer JA, Bashore T, Califf R, Glover G, Pelc N and Shimakawa A : Cine MR determination of left ventricular ejection fraction. *AJR* (1987) **148**, 839—843.
- 6) Caputo GR, Suzuki J, Kondo C, Cho H, Quaipe RA, Charles BH and Parker DL : Determination of left ventricular volume and mass with use of biphasic spin-echo MR imaging : comparison with cine MR. *Radiology* (1990) **177**, 773—777.
- 7) Semelka RC, Tomei E, Wagner S, Mayo J, Kondo C, Suzuki J, Caputo GR and Higgins CB : Normal left ventricular dimensions and function : interstudy reproducibility of measurement with cine MR imaging. *Radiology* (1990) **174**, 763—768.
- 8) Atkinson DJ and Edelman RR : Cineangiography of the heart in a single breath hold with a segmented turboFLASH sequence. *Radiology* (1991) **178**, 357—360.
- 9) Dulce MC, Mostbeck GH, Friese KK, Caputo GR and Higgins CB : Quantification of the left ventricular volumes and function with cine MR imaging : comparison of geometric models with three dimensional data. *Radiology* (1993) **188**, 371—376.
- 10) 岡村正博, 近藤 武, 安野直子, 古田敏也, 坂倉一義, 黒川 洋, 安野泰史, 瓜谷富三, 菱田 仁, 渡辺佳彦, 水野 康, 杉石宗隆 : MRI による左室容積の算出—Modified Simpson 法による検討. *日磁医誌* (1990) **10**, 345—356.
- 11) 松村憲太郎, 中瀬恵美子, 川合一良, 灰山 徹, 橘川信忠, 葛西 醇, 武尾和浩, 清水公治, 山崎一成, 河野和宏 : Gd-DTPA 造影高速シネ MRI を用いた左室血行動態の評価. *日磁医誌* (1992) **12**, 215—221.
- 12) 中前栄八郎 : コンピュータグラフィックス. オーム社, 東京 (1992) pp 117—122.
- 13) 中屋 豊 : 心機能評価法 : 心臓病のイメージ診断, 森 博愛, 小塚隆弘, 松尾祐英編, メディカル葵出版, 東京 (1992) pp129—159.
- 14) Chapman CB, Baker O and Reynolds J : Use of biplane cinefluorography for measurement of ventricular volume. *Circulation* (1958) **18**, 1105—1117.
- 15) Dodge HT, Sandler H and Ballew DW : The use of biplane angiocardiology for measurement of left ventricular volume in man. *Am Heart J* (1960) **60**, 762—776.
- 16) Dodge HT, Sandler H and Baxley WA : Usefulness and limitation of radiographic method for determining left ventricular volume. *Am J Cardiol* (1966) **18**, 10—24.
- 17) Kennedy JW, Trenholme SE and Kasser IS : Left ventricular volume and mass from single plane cine angiocardiology. A comparison of anteroposterior and right anterior oblique methods. *Am Heart J* (1970) **37**, 343—352.

- 18) Teichholz LE, Kreulen T, Herman MV and Gorlin R : Problems in echocardiographic-angiographic correlations in the presence or absence of asynergy. *Am J Cardiol* (1976) **37**, 7—11.
- 19) Diethelm L, Simonson JS, Dery R, Gould RG, Schiller NB and Lipton MJ : Determination of left ventricular mass with ultrafast CT and two-dimensional echocardiography. *Radiology* (1989) **171**, 213—217.
- 20) Steiner RM, Naidech H, Flicker S, Altin R, Eldredge WJ and Cardinal B : Clinical experience with rapid acquisition cardiovascular CT imaging (cine CT) in the adult patient. *Radiographics* (1989) **9**, 283—305.
- 21) Rezaei K, Weiss R, Stanford W, Preslar J, Melvin M and Kirchner P : Relative accuracy of three scintigraphic method for determination of right ventricular ejection fraction : A correlative study with ultrafast computed tomography. *J Nucl Med* (1991) **32**, 429—435.
- 22) Slutsky R, Karliner J, Ricci D, Kaiser R, Pfisterer M, Gordon D, Peterson K and Ashburn W : Left ventricular volumes by gated equilibrium radionuclide angiography : A new method. *Circulation* (1979) **60**, 556—564.
- 23) 安野泰史, 竹内 昭, 江尻和隆, 古田敏也, 下方辰幸, 黒川 洋, 近藤 武, 渡辺佳彦, 水野 康, 古賀佑彦 : Count-base 法を用いた平衡時心電図同期心プールシンチグラフィによる左室絶対容積の算出—第一報 ファントム実験による検討—. *核医学* (1987) **24**, 1717—1722.
- 24) 安野泰史, 竹内 昭, 江尻和隆, 古賀佑彦, 古田敏也, 下方辰幸, 黒川 洋, 金子堅三, 近藤 武, 渡辺佳彦, 水野 康 : Count-base-法を用いた平衡時心電図同期心プールシンチグラフィによる左室絶対容積の算出—第二報 臨床例による検討—. *核医学* (1987) **24**, 1723—1729.
- 25) 英保 茂, 松田哲也, 桜井恒太郎, 河合忠一, 桑原道義 : MRI を用いた心臓の立体構成. *医用電子と生体工学* (1988) **26**, 98—105.
- 26) Hoffman EA, Ritman EL : Shape and dimensions of cardiac chambers : Importance of CT section thickness and orientation. *Radiology* (1985) **155**, 739—744

Quantitative analysis of cardiac function using cine MR

Tetsurou SEI

Department of Radiology,

Okayama University Medical School,

Okayama 700, Japan

(Director : Prof. Y. Hiraki)

Non-invasive techniques for measuring the dynamic behavior of the cardiac ventricle can be invaluable tool for diagnosing heart disease. In this paper, we present methods for quantitative analysis of cardiac function using magnetic resonance images.

A 256×256 magnetic resonance transaxial image of the cardiac ventricle was obtained from a healthy subject. After gray level thresholding and region segmentation, the boundary of the ventricular chamber was extracted. Then, the boundaries of the ventricular chamber were displayed three-dimensionally using the Z-buffer algorithm. Thus, ventricular volume and ejection fraction were calculated. In our example, left ventricular ejection fraction was 61%. These results agree well with the corresponding data obtained by the echo-cardiography.