

心電図同期 MRI 心画像
による左右心室容積および
心機能の定量的評価

Left and right ventri-
cular dimensions and
functions measured by
ECG-gated NMR car-
diac imaging

渡部 幹夫

細田 泰之

Donald B. LONGMORE*

Mikio WATANABE

Yasuyuki HOSODA

Donald B. LONGMORE*

Summary

Experimental studies using static and dynamic phantoms have shown that nuclear magnetic resonance cardiac imaging (MRI) can provide accurate measurements of left ventricular wax cast volumes, wax cavity volumes and pumping volumes.

Ventricular dimensions and functions of 15 normal volunteers were quantitatively studied. A multi-slice spin echo (SE) sequence with ECG-gating identified end-diastole and end-systole. Ventricular volumes were calculated by summing the areas of the cavities in multiple contiguous transverse sections. Stroke volume, cardiac output, and ejection fraction were consequently calculated. The right and left ventricular dimensions and functions were compared using these method.

The stroke volumes of the right (71.3 ± 13.5 ml) and left ventricles (72.5 ± 12.1 ml) were identical. Accordingly, the cardiac outputs of the right (4.8 ± 0.9 l/min) and left ventricles (4.9 ± 0.8 l/min) were identical.

Right ventricular end-diastolic volumes (133.6 ± 18.6 ml) and end-systolic volumes (62.3 ± 10.0 ml) were significantly larger than the corresponding left ventricular volumes (120.2 ± 15.9 ml and 47.7 ± 9.7 ml, respectively) ($p < 0.001$). Right ventricular ejection fraction ($53.1 \pm 5.4\%$) was significantly less than left ventricular ejection fraction ($60.8 \pm 6.2\%$) ($p < 0.001$).

Using MRI, measurements of right and left ventricular dimensions and functions were simultaneously obtained, accurately and non-invasively.

Key words

MRI

ECG gating

Right and left ventricles

Ventricular volume

Cardiac output

順天堂大学医学部 胸部外科
東京都文京区本郷 2-1-1 (〒113)

Department of Thoracic Surgery, Juntendo Uni-
versity School of Medicine, Hongo 2-1-1, Bunkyo-ku,
Tokyo 113

*National Heart and Chest Hospital, MR Unit, 30
Britten Street, London SW 3, United Kingdom

Received for publication November 9, 1985; accepted December 16, 1985 (Ref. No. 31-58)

はじめに

新しい原理による画像診断法として出現して来た nuclear magnetic resonance (NMR) imaging (MRI) は, 技術の進歩によって, 鮮明な生体の画像を提供するようになった¹⁾. 生体に悪影響を与えない非侵襲的画像診断法として, 又, この方法の有する新たな可能性に対して, 大きな期待がもたれる方法である²⁾. 心臓のように運動する臓器においても, ECG gating の方法を用いることにより, 解剖学的な情報と生理学的な情報を得るに十分な画像を撮影することが出来るようになりつつある³⁾. この MRI を用い, 心臓の dimension を定量的かつ正確に測定する可能性を検討するため, 本研究を行った. ブタ実験および健康志願者にて MRI による multi-slice image を用い, area summing up により容積を計算する方法を検討した.

方 法

London National Heart and Chest Hospital Magnetic Resonance Unit に設置された Picker International 製超伝導型 0.5 Tesla NMR system を 0.24 Tesla の磁場にて運転した. System の条件を **Table 1** に示した. 実験 I には spin echo 20 msec をパルス系列として用い, 実験 II と健康志願者のスキュンには spin echo 12 msec を用いた. 得られた値の相対する 2 群においては, 相関係数と回帰直線を求めた. また健康志願者より得られた心臓の demension の評価は, 右室と左室の同一個体における値を比較する方法 (internal comparison) により, 統計学的処理は Student's paired t-test によった.

実験 I

ブタの左室より 12 個の wax cast を作り, アルキメデスの原理による displacement method にてその容積を測定した. ついでこの cast を水中に沈め, その全体を 10 mm 幅の連続する切片に分割画像化する multi-slice program にて,

Table 1. Details of method

Site	National Heart and Chest Hospital London
Machine	Picker International Superconducting 0.5 Tesla system
Operating field	0.24 Tesla
Pulse sequence	Spin echo 20 msec and 12 msec
Image reconstruction method	Two-dimensional Fourier transformation
Average	2
View	256
Line	256
Voxel size	1.76×1.76×10.0 mm

NMRCT スキャンを行った. この画像上の cast の辺縁を, system に付属する tracking 機構を用いて追跡し, その面積を求めた. その値に slice の厚さを乗じて部分体積とし, 全画像からのものを集合して, MRI 画像による容積とした. 以上の 2 種の測定方法による結果を比較した. 次に wax の円柱の内側を複雑に moduling した 12 個の cavity を作り, 水を注いで cast と同様に multi-slice に画像化し, その容積を MRI から求め, 実際に注入した水の量と比較した.

実験 II

圧搾空気を動力として, solenoid valve を組み込んで回路内圧を変更し, パンピングする system を作った. 摘出ブタ左室に pumping system につないだバルーンを挿入し, 容積の変化する左心室を作製した. このブタ左室の最大容積時, 最小容積時を画像化するために, solenoid valve の switch に gating して, 画像を得た. そのプログラムは次の健康志願者に対して行った方法とほぼ同様であり, MRI 画像から容積を求める方法は実験 I と同様である. 設定したバルーンの容積変化と NMR 画像から計算された容積変化を比較した. 実験は 12 個のブタ心臓にて行った.

健康志願者による心臓 dimension の測定

15 名の英国人白人成人 (男 9 名, 女 6 名) で, 胸部冠状断面画像 (coronal section), 矢状断面画像



Fig. 1. NMR images of the chest of a normal volunteer.

Left: coronal section image, right: sagittal section image.

It is easy to define precisely the levels of the pulmonary valve and the diaphragmatic surface of the heart which are the boundaries of contiguous transverse sections.

(sagittal section) により肺動脈弁及び心横隔膜面の高さを決定し、その範囲を拡張末期、収縮末期の 10 mm 厚の横断面画像 (transverse section) とした (Fig. 1).

拡張末期 (ED) は心電図 R 波に gating し、収縮末期 (ES) は心音図の QS_2 時間を R 波に遅延して gating した。Spin echo 12 msec を用いると gating から signal collection までの時間は 24 msec であり、ED, ES の gating として適当と考えた。

一回のスキャンにより、ED 画像一枚と、そこから 20 mm 離れた部位の ES 画像一枚を得るようにプログラムした。この方法では一回のスキャンに約 4~5 分、スキャンを繰り返して心臓の全体にわたる画像を得るのに 60~90 分を必要とした (Figs. 2, 3).

このようにして得られた心室横断面画像に基づき、右室、左室の心内膜面を tracking する方法で面積を求め、スライス厚 10 mm を乗じて部分容

積とし、それを加えて、全心室容積を求めた。この方法により、右室、左室のそれぞれについて EDV と ESV が得られ、その値より一回拍出量 (stroke volume: SV) と駆出率 (ejection fraction: EF) を計算した。SV に検査中の平均心拍数を乗ずることにより、心拍出量 (cardiac output: CO) を計算した (Fig. 4).

成 績

1. 実験 I

ブタ左室 cast の容積測定にて、displacement volume (X) と NMR image volume (Y) の間に $Y=X-0.154$ の回帰式が成立し、 $r=0.95$, $n=12$, $p<0.001$ の有意な相関関係が得られた。

Wax cavity の内腔に満たした水の測定では、measured volume (X) と NMR image volume (Y) の間に $Y=1.112X+1.783$ の回帰式が成立し、 $r=0.99$, $n=12$, $p<0.001$ の有意な相関関係がみられた (Fig. 5).

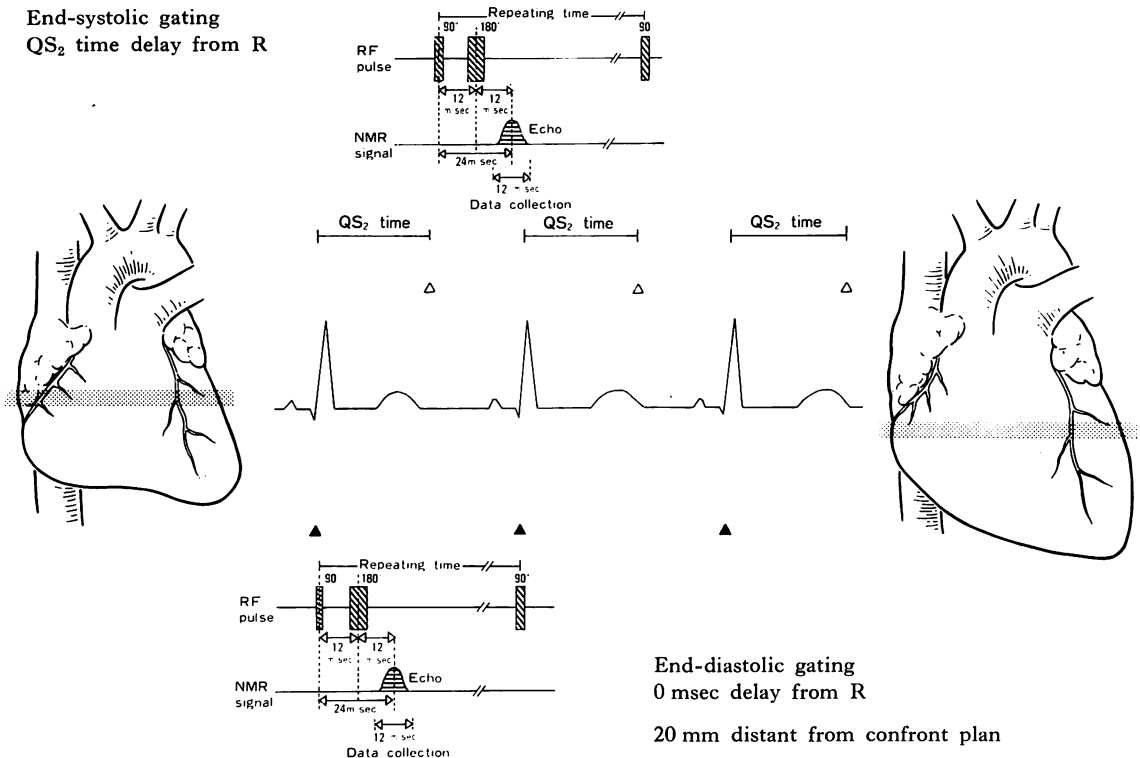


Fig. 2. Diagram showing the cardiac scanning method using MRI for the purpose of measurements of ventricular dimensions.

Pulse sequence of spin echo 12 msec is employed.

Data in diastole and systole are obtained in sections 20 mm apart to avoid interference. A zero delay from the R wave is used for the end-diastolic image and the timing of the S₂ is used for the end-systolic image. Repeating this scanning, multiple contiguous sections of the whole heart in end-systole and end-diastole are imaged for 60-90 min.

Table 2. Comparison of ventricular dimensions and functions of the right and left ventricles in 15 normal volunteers measured using MRI

	RV (X)	LV (Y)	Regression equation			
EDV (ml)	133.6 ± 18.6**	120.2 ± 15.9	Y = 0.682X + 29.1	SEE = 9 ml	r = 0.788	p < 0.001
ESV (ml)	62.3 ± 10.0**	47.7 ± 9.7	Y = 0.665X + 6.3	SEE = 7 ml	r = 0.686	p < 0.01
SV (ml)	71.3 ± 13.5	72.5 ± 12.1	Y = 0.712X + 21.7	SEE = 7 ml	r = 0.795	p < 0.001
CO (l)	4.8 ± 0.9	4.9 ± 0.8	Y = 0.610X + 1.9	SEE = 0.41	r = 0.803	p < 0.001
EF (%)	53.1 ± 5.4*	60.8 ± 6.2	Y = 0.820X + 16.7	SEE = 4%	r = 0.717	p < 0.01

** significantly larger than LV (p < 0.001), * significantly lower than LV (p < 0.001).

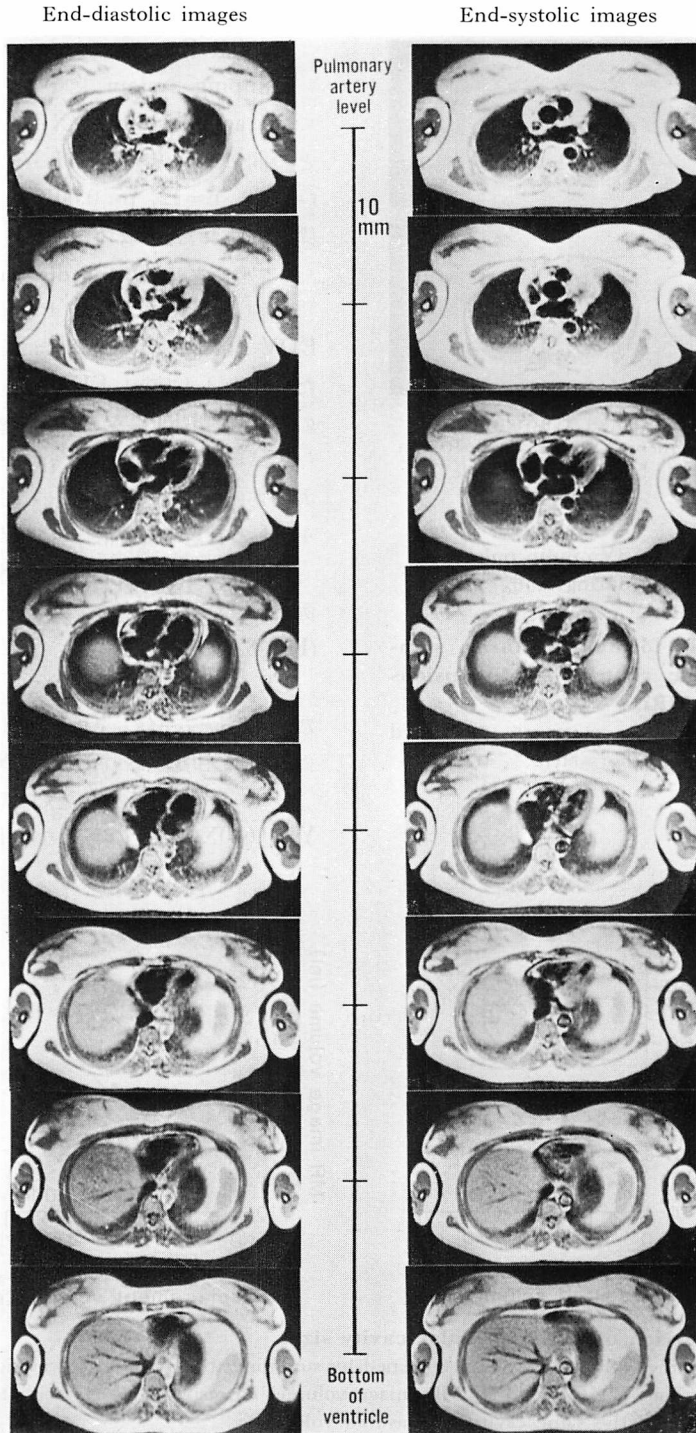
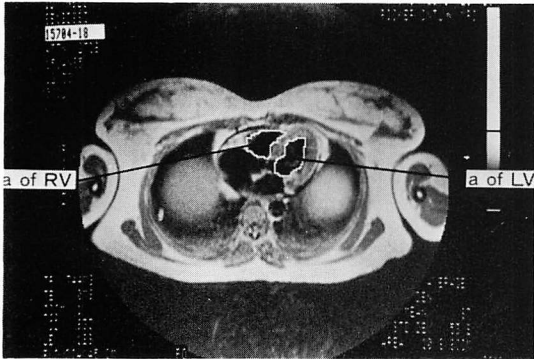


Fig. 3. One series of multiple contiguous section images of a normal volunteer's heart. Changing size of the cardiac cavity from end-diastole to end-systole is precisely demonstrated.



$$\text{Volume of ventricle (V) ml} = \sum v = \sum a \times 10 \text{ mm}$$

$$\text{Stroke volume (SV)} = \text{EDV} - \text{ESV}$$

$$\text{Ejection fraction (EF)} = \text{SV} / \text{EDV}$$

$$\text{Cardiac output (CO)} = \text{SV} \times \text{mean pulse rate during study}$$

a: area, v: partial volume

Fig. 4. Method and formula of area summing up to calculate ventricular dimensions and functions from MRI.

Tracking of ventricular cavity is performed employing the function of the system.

2. 実験 II

Pumping system による volume 変化の測定では, actual volume (X) と NMR volume (Y) との間に $Y = 0.937X - 1.374$ の回帰式が成立し, $r = 0.99$, $n = 12$, $p < 0.001$ と高度に有意な相関関係がみられた (Fig. 6).

3. 健康志願者の心臓 dimension の測定

詳細は Table 2 に記す如くである.

EDV (ml): 右室は左室に比し有意に大であった. 右室と左室の EDV 間に $Y = 0.682X + 29.1$ の有意な相関関係をみた (Fig. 7).

ESV (ml): RV (X) は LV (Y) に比し有意に大であった. 右室と左室の ESV 間に $Y = 0.665X + 6.3$ の有意な相関関係をみた (Fig. 7).

SV (ml): 右室と左室の SV には有意差なく, 両者に $Y = 0.712X + 21.7$ の有意な相関をみた (Fig. 8).

EF (%): 左室は右室に比し有意に大であった. 右室と左室の EF 間には $Y = 0.820X + 16.7$ の有意な相関があった (Fig. 9).

CO (l): 右室と左室はほぼ等しく, 両者に $Y = 0.610X + 1.9$ の有意な相関が得られた (Fig.

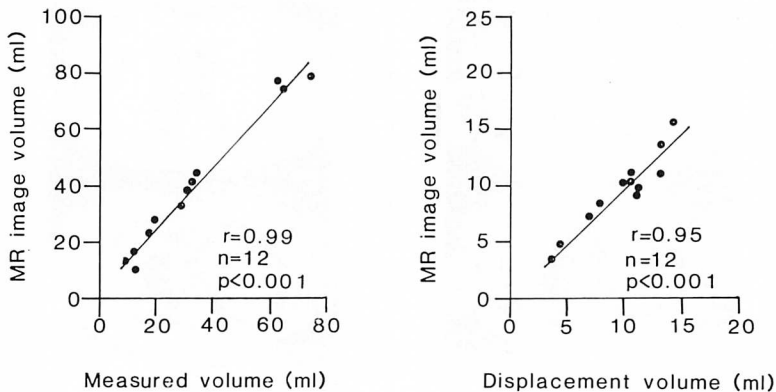


Fig. 5. Comparison of left ventricular cavity sizes.

Left: The volumes of wax cavities determined by summing the areas of the cavities seen in contiguous 10 mm thick NMR sections (MR image volume) correspond closely with the volumes of water required to fill the same cavities (measured volumes).

Right: MR image volumes of wax casts of the porcine left ventricles correspond closely with the displacement volumes.

8).

考 按

心臓の dimension を正確に把握することは、臨床心臓病学においても、心臓生理学においても不可欠の事柄である。それに対し、侵襲的方法である心血管造影法には定量性が確立されている

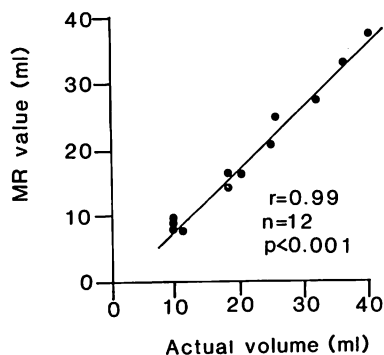


Fig. 6. Comparison of stroke volumes.

The dynamic phantom consisted of a water-filled balloon and pulsed by fixed volume in a pig's heart is used to confirm the accuracy of measurement of changing volumes determined from MRI.

Estimated volumes by MRI and actual volumes of phantoms correlated closely.

が、正確な非侵襲的定量方法には十分なものがなく、その確立が望まれている。実際、この領域における心臓超音波学や RI 診断学の進歩には目ざましいものがある。しかし、左室現象の研究には着実な進歩がみられるものの、右室現象に対する研究は、必ずしも十分であるとはいえない^{4,5)}。

非侵襲的画像診断法としての MRI の有する特性、すなわち造影剤を用いずに血管を抽出することが出来る能力は、心臓循環器病学の研究、臨床に大きな進歩を齎らすものと考えられる⁶⁾。原理的に MRI は正確な位置と距離の情報を提供するものであり⁷⁾、この方法を用いて心臓の dimension の測定を実際の人間で行ったのが本研究である。

まず複雑な物体の容積が正確に測定出来ることを実験 I で確認、さらに変化する容積を正確に測定可能であることを実験 II で確認した。次に健康志願者の左右心室容積、拍出量を心電図 gating を用いた MRI を用いて測定し、現在の生理学上の知識⁸⁾と矛盾しないという結果を得た。

現在までのところ、MRI を用いての心臓 dimension の定量的測定の研究は少ない。その理由の一つは、MRI により運動する心臓の鮮明な画像を得るためには、ある周期に限定した画像を

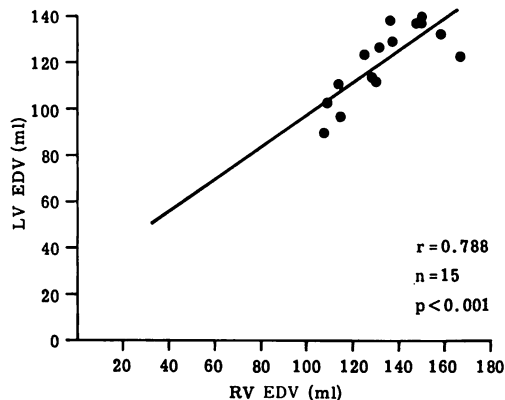
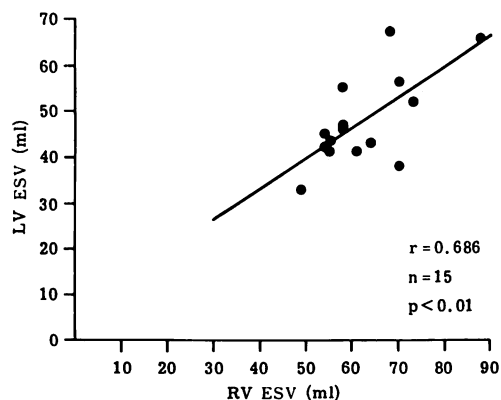


Fig. 7. Comparison of end-systolic and end-diastolic volumes for the right and left ventricles measured from MRI of normal volunteers.

LV and RV=left and right ventricles; ESV and EDV=end-systolic and end-diastolic volumes.

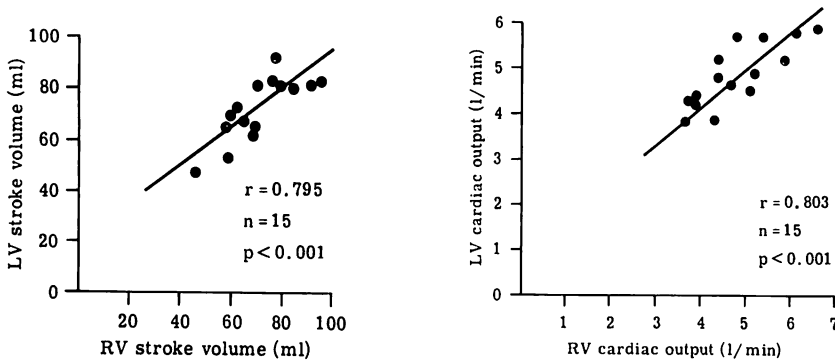


Fig. 8. Comparison of stroke volumes and cardiac outputs of the right and left ventricles measured from MRI of normal volunteers.

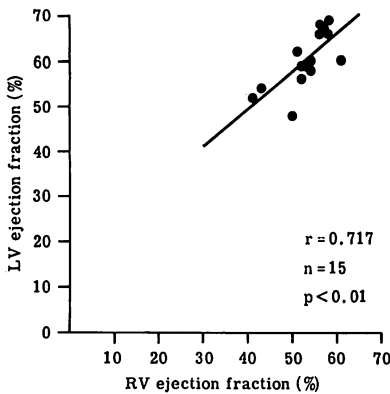


Fig. 9. Comparison of ejection fractions of the right and left ventricles measured from MRI of normal volunteers.

得るための gating が必要であり, 又 MRI system がこの機構を備えるようになったのが比較的最近のことであるためであろう⁹⁾.

現在行われている代表的な心室容積測定法には, 心室造影法により行われる Dodge の方法に代表されるように, 心室を何らかの幾何学的物体に擬して求積するものが多い¹⁰⁾. この方法を NMR 心画像に適用することも試みたが, 心室造影像から得られた値との間に誤差を生じ易い場合が多く, 我々は採用しなかった¹¹⁾.

今回, 我々が行った area summing up の方法は, レントゲン CT を用いて Miller ら¹²⁾や Lip-

ton ら¹³⁾が行った方法に近い. Lipton らは cast にて報告しているが, 実際の人間の心室に適用するには, 造影剤を必要とすることや電離放射線被曝などの点から, 必ずしも容易ではないと考えられる. 数学的な画像化のプロセスがレントゲン CT と同様な MRI CT では, 造影剤を用いずに心筋と心内腔の分離が可能であり, この方法は心室求積法としては最適なものであろう.

この方法における問題点は, 比較的長時間を必要とすることや, 画像の辺縁における partial volume effect の影響等があり, これらの問題は, 別論文にて詳述した¹⁴⁾.

試みに, 心房間短絡を有する心内膜床欠損症例を同様な方法で検査し, 右室, 左室の 1 回拍出量の差から計算した左右短絡量は, 心カテーテルで Fick の原理により計算された短絡量と良く一致した (Fig. 10). この方法による心室 dimension の測定方法は, 心室瘤や単心室症等, 心室容積測定の困難な症例や, 右室容積の評価に対し, 非常に有効な方法となるだろうと考えられる.

結 論

ECG gating NMR cardiac imaging による心横断面画像を用い, area summing up の方法によって, 右室, 左室の EDV, ESV, SV, EF, CO を定量的に測定した. 実験的にこの方法による容

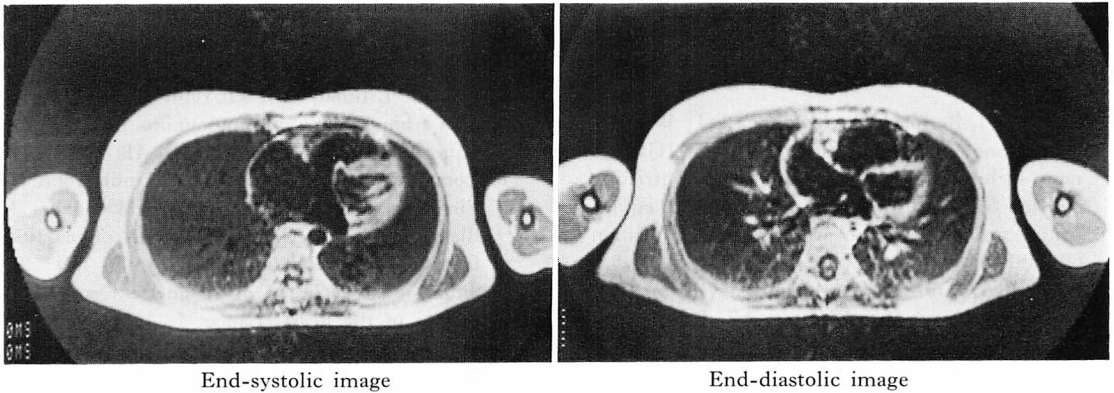


Fig. 10. Transverse sections of a patient with suspected endocardial cushion defect.
The shunt ratio of this patient calculated from MRI is the same as that obtained by the usual method using Fick's principle.

積測定が正確であることを証明し、又健康成人志願者の左右心拍出量が等しいことから、次の結論を得た。

NMR cardiac imaging によって左右心室の容積、拍出量、心機能を非侵襲的に、正確、かつ左右同時に測定することが可能である。

要 約

鮮明な生体内部の画像を提供するようになった NMR を用いて、心臓 dimension の非侵襲的な測定が可能か否かを検討した。

実験的に心室に似た複雑な形態をもつ固体の容積を連続断面画像の area summing up の方法で測定し、実測値と良好な相関を示すという結果を得た。次に心拍動モデルを作製してその拍出量を画像より計算し、実測値との間に良好な相関関係を認めた。

実際に 15 名の健康成人につき、spin echo 12 msec のプルス系列を用いて、心電図 gating により収縮末期および拡張末期の心横断面画像を得た。連続横断面画像として得られた右室、左室の内腔面積を summing up し、心室の拡張末期および収縮末期容量を求めた。この値と検査中の平均心拍数とによって、一拍拍出量、駆出率および心拍出量を計算した。

右室の一回拍出量 (71.3 ± 13.5 ml) は左室のそれ (72.5 ± 12.1 ml) とほぼ等しく、したがって右室拍出量 (4.8 ± 0.9 l/min) も左室のそれ (4.9 ± 0.8 l/min) とほぼ等しかった。

右室の拡張末期および収縮末期容量 (133.6 ± 18.6 ml および 62.3 ± 10.0 ml) は左室のそれ (120.2 ± 15.9 ml および 47.7 ± 9.7 ml) に比較して、それぞれ有意に大であった。

右室駆出率 ($53.1 \pm 5.4\%$) は左室駆出率 ($60.8 \pm 6.2\%$) よりも有意に低値であった。同一個体の左室と右室の間には、各測定値のそれぞれについて、有意の相関関係を認めた。

これらの結果は、心臓生理学における従来の知識に一致するものであり、NMR cardiac imaging を用いて、左右心室の dimension と function が非侵襲的に、同時性をもって、正確に測定されることが証明された。

文 献

- 1) Steiner RE: The Hammersmith clinical experience with nuclear magnetic resonance. Clin Radiol **34**: 13, 1983
- 2) Kaufman L, Crooks L, Sheldon P, Hricak H, Herfkens R, Bank W: The potential impact of nuclear magnetic resonance imaging on cardiovascular diagnosis. Circulation **67**: 251, 1983
- 3) Steiner RE, Bydder GM, Selwyn A, Deanfield J,

- Longmore DB, Klipstein RH, Firmin D: Nuclear magnetic resonance imaging of the heart: Current status and future prospects. *Br Heart J* **40**: 202, 1983
- 4) Maddahi J, Berman DS, Matsuoka DT, Waxman AD, Stankus KE, Forrester JS, Swan HJC: A new technique for assessing right ventricular ejection fraction using rapid multiple gated equilibrium cardiac blood pool scintigraphy. *Circulation* **60**: 581, 1979
 - 5) Levia RA, Gibson T, Aretz T, Gillam LG, Guyer DE, King ME, Weyman AE: Echocardiographic measurement of right ventricular volume. *Circulation* **69**: 497, 1984
 - 6) Higgins CB, Kaufman L, Crooks LE: Magnetic resonance of the cardiovascular system. *Am Heart J* **109**: 136, 1985
 - 7) Lauterber PC: Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature* **242**: 190, 1973
 - 8) Pietras RJ, Kondos GT, Kaplan D, Lam W: Comparative angiographic right and left ventricular volumes. *Am Heart J* **109**: 321, 1985
 - 9) 井上圭介, 佐伯文彦, 山川和夫, 神保昌夫, 南條幸夫: 心血管系の心電図同期 NMR の検討. *NMR 医学* **4**: 64, 1984
 - 10) Wynne J, Green LH, Mann T, Levin D, Grossman W: Estimation of left ventricular volumes in man from biplane cineangiograms filmed in oblique projections. *Am J Cardiol* **41**: 726, 1978
 - 11) Longmore DB, Klipstein RH, Underwood SR, Firmin DN, Hounsfield GN, Watanabe M, Bland C, Fox K, Pool-Wilson PA, Rees RSO, Denison D, McNeilly AM, Burmen ED: The dimensional accuracy of magnetic resonance in studies of the heart. *Lancet* **1**: 1360, 1985
 - 12) Miller SW, Dinsmore RE, Wittenberg J, Maturi RA, Powell WJ Jr: Right and left ventricular volumes and wall measurements: Determination by computed tomography in arrested canine hearts. *Am J Roentgenol* **129**: 257, 1977
 - 13) Lipton MJ, Hayashi TT, Boyd D, Carlsson E: Measurement of left ventricular cast volume by computed tomography. *Radiology* **127**: 419, 1978
 - 14) 渡部幹夫, 細田泰之, Firmin DN, Klipstein RH, Longmore DB: NMR 心画像による左右心室容積, 心機能の同時測定. *心臓* **18**: 626, 1986