

①

主論文

心臓領域における高速 3 次元MRI撮像法の
基礎的・臨床的検討

佐藤 修平

日本医学放射線学会雑誌第59巻第 8 号所載

別 刷

1999. 7. 25

日本医学放射線学会

心臓領域における高速3次元MRI撮像法の 基礎的・臨床的検討

佐藤 修平

岡山大学医学部放射線医学教室

Experimental and Clinical Studies of Fast Three-dimensional MR Imaging of the Heart

Shuhei Sato

MRI has been utilized since its inception to study the anatomy and physiology of the heart. However, the sensitivity of MRI to motion has always posed a major challenge in imaging this organ.

The purpose of this study was to develop a 3D MP-RAGE technique for the heart, and to apply it clinically. In the experimental study, data acquisition timing was discussed by normal volunteers. Changes in magnetization recovery time affected imaging contrast very little in the phantom study.

Fourteen adults and 21 children were examined. In the adults, MP-RAGE images were rated as high in quality in the visual estimation. In the quantitative estimation, the images provided almost the same anatomical information as those of cine MRI. In the children, MP-RAGE was useful for cases of partial anomalous pulmonary venous drainage, particularly in the evaluation of abnormal pulmonary veins.

The 3D MP-RAGE technique was useful in imaging the heart because it was possible to obtain continuous views in the same cardiac cycle and to reconstruct views from any direction after the examination.

Research Code No. : 507.9

Key words : MP-RAGE, Heart, MRI

Received Dec. 1, 1998; revision accepted March 30, 1999
Department of Radiology, Okayama University School of Medicine

はじめに

近年、心臓領域の診断においてもMRIは形態診断¹⁾のみならず機能診断²⁾の上でも重要なモダリティのひとつとなってきている。形態診断においてはスピネコー法(以下SE法)、機能診断においてはシネMRIが主として用いられている。一方、中枢神経領域³⁾や腹部領域⁴⁾ではMP-RAGE(magnetization prepared rapid gradient echo)法をはじめとする高速3次元MRI撮像法が臨床応用されているが、心臓領域にMP-RAGE法を応用したという報告はない。われわれは、心電図同期によるMP-RAGE法を基礎的検討に基づいて開発し、さらにその有用性について臨床例での検討を行ったので報告する。

基礎的検討

MP-RAGE法のシーケンスチャートをFig. 1に示す。1回の180°パルス(magnetization preparation pulse)から反転回復時間(inversion recovery time:以下TI)の後、スライスエコーコードの数だけエコー信号が収集され、磁化回復時間(magnetization recovery time)の後に再び180°パルスに戻る。このサイクルが位相エコーコードの個数だけ繰り返される。このシーケンスを心電図のR波をトリガーとして用いる場合、2つの問題点がある。ひとつは180°パルスを印加してからデータ収集を始めるタイミングの問題である。高速撮像法と言えども、心周期の中で心臓の動きが大きい時にデータを収集したのではアーチファクトのため良好な画像は得られない。そしてもうひとつは、磁化回復時間が心拍数によって異なるために、画像コントラストの差が生じないかという問題である。これらの問題点について、基礎的検討を行った。なお、使用したMRI装置はMagnetom H15(シーメンス社製、超電導1.5T)である。

1. データ収集のタイミングについて

正常人16名(男性10例、女性6例、平均年齢48.6歳)に対して、左室中央部レベルにて短軸断面のシネMRI(2D FISP法)を撮像した。撮像条件は、50/12/30/4(TR/TE/flip angle/excitations)であり、またFOV 350mm、マトリックス 192×

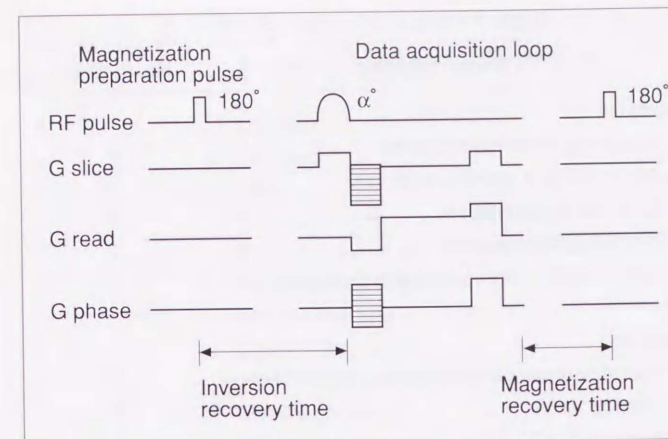


Fig. 1 Diagram of the MP-RAGE sequence. After the inversion pulse, rapid gradient-echo images are acquired throughout the data acquisition loop. After magnetization recovery time, the inversion pulse is repeated.

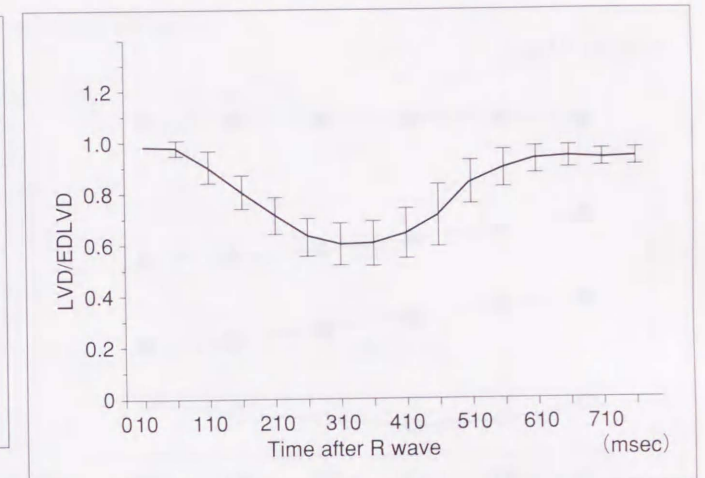


Fig. 2 Changes in left ventricular diameter ratio during one cardiac cycle in 16 normal volunteers, starting from the R peak of electrocardiogram. LVD: left ventricular diameter, EDLVD: end-diastolic left ventricular diameter.

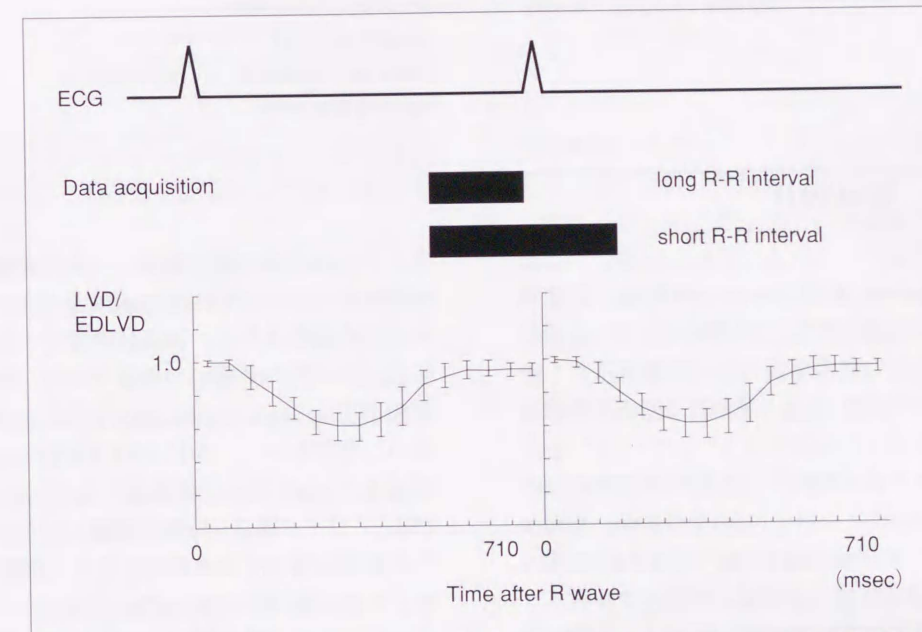


Fig. 3 Timing of data acquisition.

256, スライス厚 5mm, Phase数 13~16とした。それぞれの時相断面において、左室内径を計測し、左室壁運動の解析を行った。心電図のR波からの時間と左室内径を左室拡張末期径で除した値との関係をFig. 2に示す。拡張期では左室の動きが小さいことがわかる。

この結果より、データを収集するタイミングとしては心臓の動きの大きい収縮期よりも、比較的動きの小さい拡張期の方が適していると考えられる。従ってFig. 3に示すように、R-R間隔の十分に長い症例であればR波から500~600msec後からデータの収集を開始すればよいことになる。また小児などのR-R間隔の短い症例では、R波をまたいでデータを収集するようにすれば、拡張期を最大限有効に使えることになる。但しこの場合、撮像時間は2倍近くかかることになる。

2. 縦磁化回復時間が画像コントラストに与える影響の検討

心電図R-R間隔には個人差があり、また同一人でも撮像時間内に変動することもある。それにより生じる縦磁化回復時間の違いが画像コントラストに及ぼす影響をファントムを用いて検討した。方法はあらかじめT1値、T2値を測定した4種類の試料を磁化回復時間を変えて撮像し、画像上の信号強度を測定した。用いた試料はオリーブオイル(T1/T2 = 230/60msec)、塩化マンガン(T1/T2 = 630/70msec)、アルブミン(T1/T2 = 780/130msec)、塩化ナトリウム(T1/T2 = 3280/1680msec)である。結果のグラフをFig. 4に示す。磁化回復時間を12msecから1000msecまで変化した結果、各試料の信号強度が逆転することはなかった。実際の撮像では、磁化回復時間は400~600msec程度の変動と考えられるので、臨床的には画像コントラストに及ぼす影響はほとんど

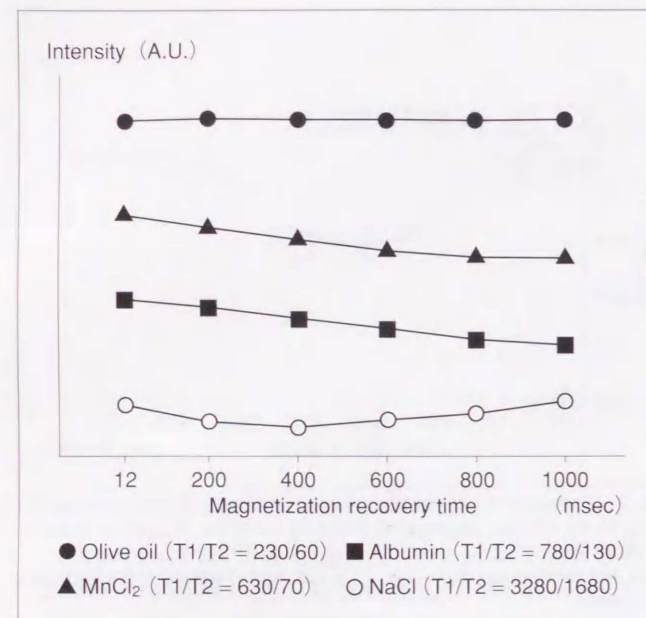


Fig. 4 Effects of magnetization recovery time on signal intensity.

どないことがわかった。

臨床的検討

1. 対象および方法

使用装置は、Magnetom H15 (シーメンス社製、超電導1.5T)で、コイルは成人症例に対しては駆幹用ヘルムホルツコイルを、小児症例に対しては原則として表面コイルを用いた。MP-RAGE法では診断に有用と思われる断面を再構成し、SE法などと比較した。

疾患の性質上、対象を成人症例と小児症例の2つに分けて臨床的検討を行った。成人症例は14例(男性10例、女性4例、平均年齢47.7歳)、小児症例は21例(男児13例、女児8例、平均年齢9.5歳)である。成人症例は心電図または心エコー検査にて心疾患が疑われていた。小児症例は、全例MRI撮像前に心エコー検査で先天性心疾患の診断がなされていた。症例の内訳をTable 1に示す。成人症例は、全例MP-RAGE法に加えて四腔断面像および短軸断面像のシネMRIを撮像した。小児症例は、疾患に応じて適宜シネMRI, magnetic resonance angiography (以下MRA)を追加撮像し、MP-RAGE法と比較検討した。

MP-RAGE法の撮像条件は、12/4/16/4 (TR/TE/flip angle/excitations)であり、TIは心電図のR-R間隔に合わせて300~600msecに設定した。また、FOV 250~320mm、マトリックス128×256、3D partition 32、スライス厚2~4mm、撮像方向は横断または冠状断とした。検査時間はR-R間隔により異なるが、約5分から10分程度である。経静脈性の造影剤は使用せず、通常の呼吸下に撮像を行った。

MP-RAGE法以外の撮像法として、SE法は

Clinical diagnosis	No. of cases
Adults	
Hypertrophic cardiomyopathy	8
Abnormality of electrocardiogram	2
Essential hypertension	2
Dilated cardiomyopathy	1
Arrhythmogenic right ventricular dysplasia	1
Children	
Partial anomalous pulmonary venous drainage	5
Cardiac tumor	3
Asplenic syndrome	3
Kawasaki disease	2
Cor triatriatum	1
Pulmonary atresia	1
Single ventricle	1
Ebstein anomaly	1
Coronary arterial fistula	1
Criss-cross heart	1
Corrected transposition of great arteries	1
Valsalva aneurysm	1

主としてT1強調画像を撮像し、その撮像条件は、心電図R-R間隔/15~25/4 (TR/TE/excitations)である。成人症例でのシネMRIの撮像条件は、基礎的検討での条件と同じである。小児症例でのシネMRIの撮像条件は、25~50/12~20/30/4 (TR/TE/flip angle/excitations)である。MRAは2D FISP法を用い、撮像条件は、25/12/20/4 (TR/TE/flip angle/excitations)である。FOV 250~350mm、マトリックス128~192×256、スライス厚2~5mmは共通とした。なお、小児症例のうち鎮静を保てない児については、燐酸トリクロルエチルナトリウム経口投与(80mg/kg)を行い、さらにセコバルピタールナトリウム静注(4mg/kg)を適宜追加した。

2. 検討項目

1) 成人症例における臨床的検討

画像の評価は、視覚的および定量的に行った。視覚的評価は、MP-RAGE法の元画像、四腔断面像および短軸断面像

Table 2 Background of PAPVD cases

Case	Age	Sex	Anomalous vein	Associated anomaly
1	15	F	RUL → SVC	ASD, PDA
2	13	M	LUL → INNV	none
3	13	M	RUL, RML → SVC	ASD
4	6	F	RUL → RA	none
5	9	M	RUL, RML → LA RLL → IVC	none

SVC: superior vena cava, IVC: inferior vena cava, INNV: innominate vein, RA: right atrium, LA: left atrium, RUL: right upper lobe, RML: right middle lobe, RLL: right lower lobe, LUL: left upper lobe, ASD: atrial septal defect, PDA: patent ductus arteriosus.

Table 3 Results of visual estimation

A: Visualization of ventricular structure			
	Outer contour	Inner contour	
Unclear	0/0/0	0/0/0	
Moderate	0/2/0	7/9/7	
Clear	14/12/14	7/5/7	
B: Nulling of intraventricular blood			
Flow signal intensity	RV	LV	Aorta
Higher than muscle	0/0/0	0/0/0	0/0/0
Muscle intensity	0/0/0	3/2/2	1/0/1
Lower than muscle	14/14/14	11/12/12	13/11*/13
C: Artifact due to respiratory motion			
Severe ghosting	0/0/0		
Mild ghosting	0/2/0		
No ghosting	14/12/14		
D: Overall image quality			
Poor	0/0/0		
Fair	0/2/0		
Good	14/12/14		

(Source images / Short axial images / 4-chamber images)

RV: right ventricle, LV: left ventricle.

*The aorta was not included in the images of three cases.

での再構成画像の3者を比較した。評価は2名の放射線科専門医の合議により、以下の評価項目についてそれぞれ3段階に分類して行った。

- 心筋の明瞭さの程度(明瞭、やや不明瞭、不明瞭)
- 血流信号抑制の程度(肋間筋などの筋肉の信号より高信号、ほぼ同程度の信号、低信号)
- 呼吸運動によるアーチファクトの程度(胸壁のghostingが強く心内構造が不明瞭、軽度のghostingがみられるが心内構造は明瞭、全くghostingがない)
- 総合画像評価(画像が不良で診断困難、画像はやや不良だが診断可能、画像は良好で診断可能)

定量的評価としては、四腔断面像および短軸断面像での再構成画像を、ほぼ同じ断面のシネMRIの拡張期画像と比較した。具体的には、各々の画像上で心室中隔壁厚と左室側壁厚を測定し、症例ごとに対応を持たせたt検定を行い、 $p < 0.01$ で有意とした。

2) 小児症例における臨床的検討

最も症例数の多い部分肺静脈還流異常症(partial anomalous pulmonary venous drainage: 以下PAPVD)について疾患の背景をTable 2に示す。心臓腫瘍の内訳は、結節性硬化症に合併したものが1例、線維腫が疑われたものが2例である。評価は視覚的に行い、他の撮像法と比較検討した。また、その他の疾患に関しても、視覚的にMP-RAGE法の有用性について検討した。

3. 結果

1) 成人症例

視覚的評価の結果をTable 3に示す。心筋の明瞭さは、肺と接する左室の外輪郭はほとんどの症例で明瞭であった。心内腔の血液と接する左室の内輪郭は約半数の症例でやや不明瞭で、特に短軸断面像において不明瞭であった。血流

信号抑制の程度については、右室内腔は全例で筋肉より低信号に描出され、内腔の同定が容易であった。また左室、大動脈もほとんどの症例で内腔は筋肉より低信号であり、血流信号抑制は良好であった。呼吸運動によるアーチファクト、いわゆるghostingの有無については、全例で明らかなghostingは認めなかった。総合画像評価としては、短軸断面像よりも四腔断面像の方が画像が良好であった。

定量的評価の結果をFig. 5に示す。四腔断面像での再構成画像においては、心室中隔壁厚と左室側壁厚はシネMRIと良好な相関を示した。短軸断面像での再構成画像においても両者は有意な相関を示したが、四腔断面像に比較するとやや相関が不良であった。

症例は52歳男性、肥大型心筋症(Fig. 6)。シネMRIの拡張期の画像と、それとほぼ同じ断面のMP-RAGE法の再構成画像を示す。両者は四腔断面像および短軸断面像ともに心筋の状態はほぼ同様に描出されている。

2) 小児症例

a) PAPVD

PAPVDの5症例についての結果をTable 4に示す。SE法では5例とも異常静脈はflow voidとなって描出は困難であった。シネMRIでは5例とも異常静脈の描出は可能であったが、肺動脈の重なりのため、還流部位の正確な診断が困難となる症例もあった。それに対してMP-RAGE法では5症例とも異常静脈の描出および還流部位の正確な診断が可能であり、また撮像後に断面を再構成することによって最適な断面の設定が可能であった。

症例は9歳男児(Fig. 7)。学校健診の胸部X線写真にて、PAPVDを疑われた症例である。SE法のT1強調画像では、異常肺静脈は不明瞭であった。それに対してMP-RAGE法では異常肺静脈が肺野に比べて高信号に描出され、さらに左房

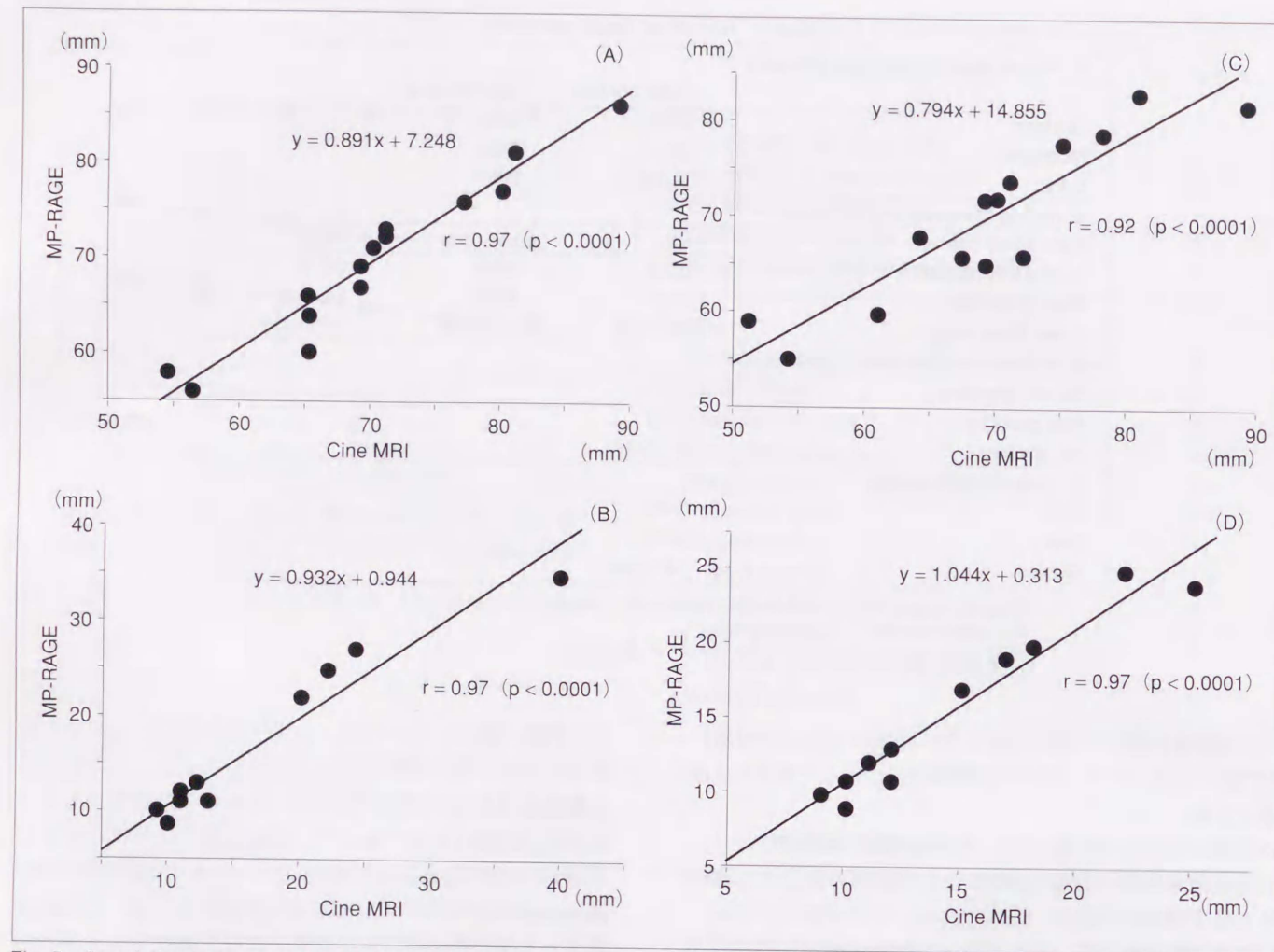


Fig. 5 Correlation between wall thickness measured by cine MRI and that measured by MP-RAGE in four-chamber images. A: Lateral wall, B: septal wall. Correlation between wall thickness measured by cine MRI and that measured by MP-RAGE in short axial images. C: Lateral wall, D: septal wall.

とこの静脈を結ぶ断面で再構成を行うことによって、この静脈は左房に還流することが明らかとなった。

b) 心臓腫瘍

結節性硬化症に合併した1例では、心エコー法にて多発性の横紋筋腫が疑われていたが、腫瘍はSE法のT1強調画像およびT2強調画像にていずれも高信号を呈し、脂肪腫と診断された。MP-RAGE法でも腫瘍は高信号を呈し、脂肪腫の診断が可能であった。また、断面を再構成することにより、心エコー法との比較が容易であった。

線維腫が疑われた2例では、いずれもSE法のT1強調画像およびT2強調画像にて不均一な低信号を呈していた。うち1例は開胸生検によって線維腫の組織診断がなされていた。2例ともほぼ同様の信号パターンを呈しており、MRIでの組織の推定が可能であった。MP-RAGE法でも、腫瘍は低信号を呈していた。右室の線維腫の症例では、右室流出路に沿った断面で再構成することによって、腫瘍が流出路を狭窄している状態が評価できた。

c) その他の先天性心疾患

無脾症候群に合併した複雑心奇形や、クリスクロス心な

どの疾患においては、心房-心室の関係を任意の断面で観察できることは、解剖学的理解を容易にする上で有用であった。しかし、一般的に心内奇形に対しては、心腔と心筋のコントラストがSE法に比べて不良であり、補助的診断に留まるとされた。また、川崎病などの冠動脈疾患に対しても、冠動脈の描出能はシネMRIに比べて劣っていた。

Table 4 Results of PAPVD cases

Case	Echo	SE	Cine MRI	MRA	MP-RAGE
1	○	×	△	○	○
2	○	×	○	/	○
3	○	×	○	○	○
4	○	×	○	△	○
5	×	×	○	△	○

○: definite, △: fair, ×: poor, /: not done.
ECG: echocardiography, SE: spin echo, MRA: magnetic resonance angiography.

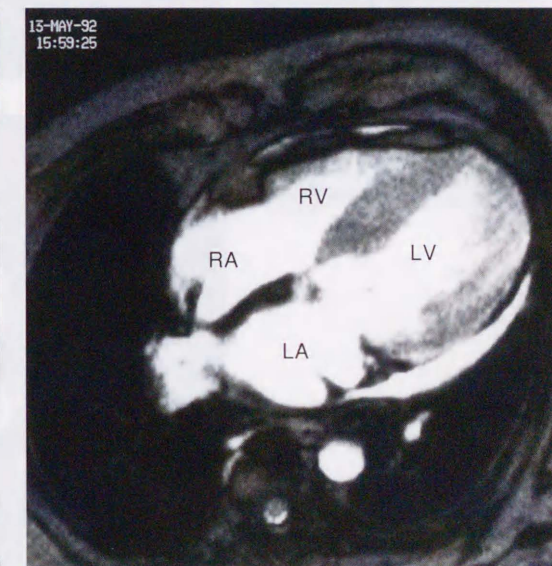
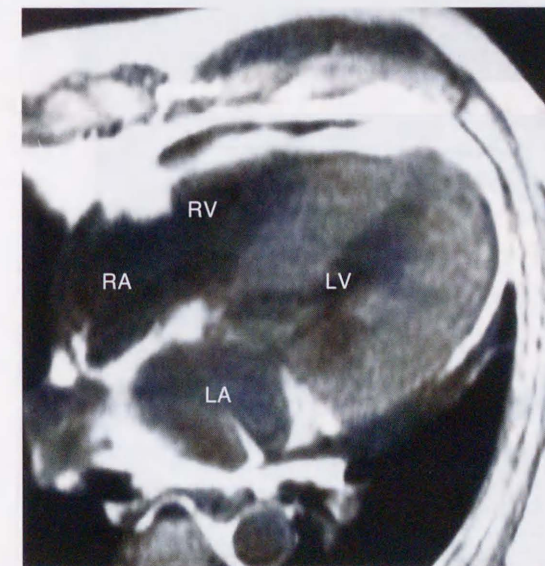
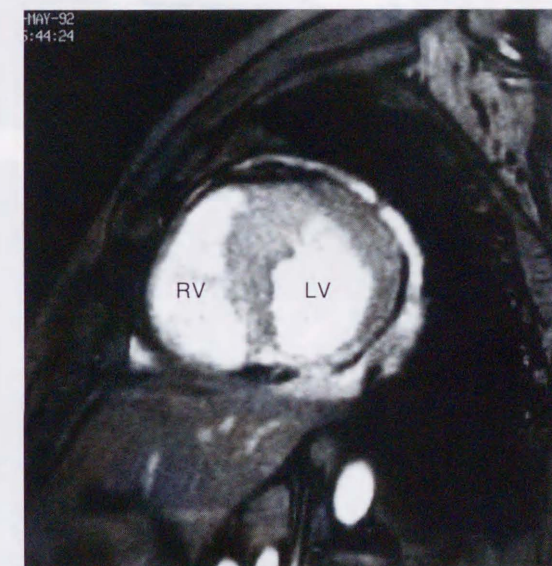
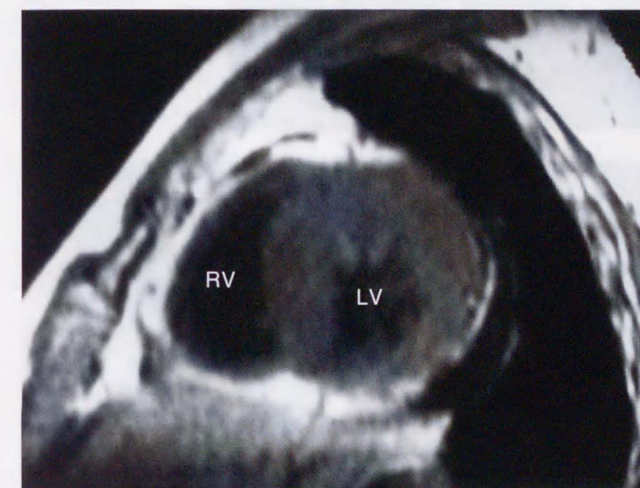
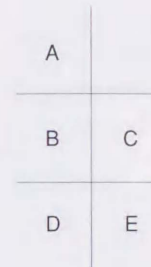
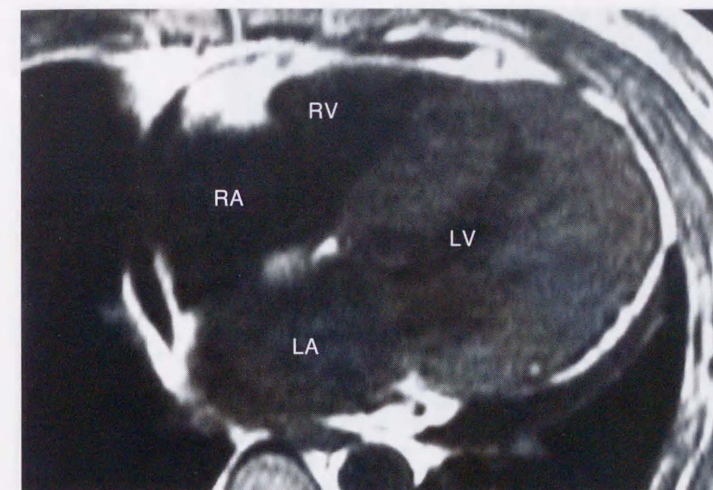


Fig. 6 A 52-year-old man with hypertrophic cardiomyopathy. A: Source image of MP-RAGE. B: Short axial reconstructed image of MP-RAGE. C: Short axial view of cine MRI. D: Four-chamber reconstructed image of MP-RAGE. E: Four-chamber view of cine MRI. LV: left ventricle, RV: right ventricle, LA: left atrium, RA: right atrium.

考 察

MRI装置や撮像シーケンスの進歩は目覚ましく、日常臨床においても高速3次元撮像が可能となってきている⁵⁾。しかし心臓領域は心臓自体の動きおよび呼吸による胸

壁の動きのために、3次元撮像が最も困難な部位とされてきた。心臓領域の3次元画像の報告としては、CT⁶⁾、心エコー法⁷⁾での報告がみられる。Chenら⁸⁾は、電子ビームCTを用いて心電図同期下に20例の先天性心疾患患者に対して3次元撮像を施行し、その解剖学的位置関係の把握に有用であ

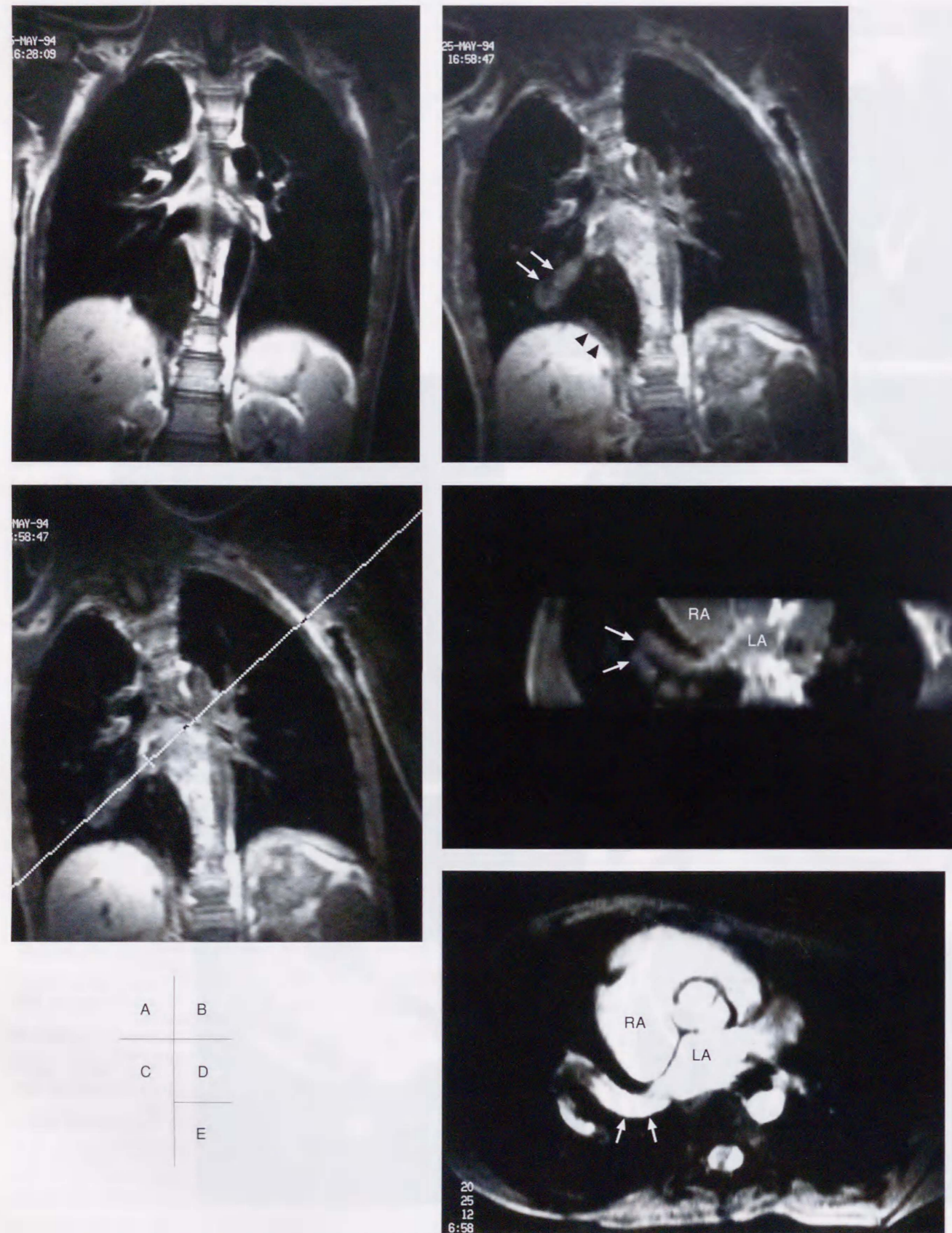


Fig. 7 A 9-year-old boy with partial anomalous pulmonary venous drainage.
 A: Anomalous veins of the right lower lung field were obscure in the coronal view of SE.
 B: Coronal reconstructed image shows the anomalous vein (arrows). The anomalous vein that returns to the inferior vena cava is also seen (arrowheads).
 C: Image created by reforming along the line illustrated in C, which goes through the anomalous vein.
 D: Re-reconstructed image shows that the anomalous vein (arrows) returns to the left atrium.
 E: Cine MRI of almost the same view shows the anomalous vein (arrows).
 LA: left atrium, RA: right atrium.

ったと報告している。電子ビームCTは0.1秒で1スライスの撮像が可能であるが、装置が非常に高価であり、また造影剤を必要とするという欠点がある。Meleら⁷⁾は2次元の心エコー法の画像を3次的に再構成し、左室の大きさや機能を評価しているが、大血管との位置関係の描出にはCT、MRIに比べて劣っていた。

一方、MRIでも3次元撮像の試みが行われてきた⁸⁾⁻¹¹⁾。Wielopolskiら¹¹⁾は、われわれの方法と同様にmagnetization preparation pulseの後にエコープラナー法を用いて3次的にデータを収集することによって、1回の息止め下に心臓全体の撮像を可能にしている。しかし、この撮像法はエコープラナー法が使用できる装置に限られる。それに対してわれわれの方法は、通常の高磁場装置であれば撮像が可能である。

MP-RAGE法の撮像原理については基礎的検討の項で詳しく述べたが、要約するとMP-RAGE法とは、1回の励起から生じる磁化成分について画素数に必要な回数のgradient echoのサイクルを高速で繰り返しながら撮像することにより、短時間で緩和情報を含んだ画像コントラストを得ることを目的とした撮像法である¹²⁾。中枢神経領域³⁾や腹部領域⁴⁾への応用の報告は散見されるが、心臓領域への応用は報告がない。

われわれの心臓領域のMP-RAGE法の利点としては、まず同一心周期の連続した断面が得られるということが挙げられる。次に3次元撮像法であるが故の利点として、撮像後に任意の断面での再構成が可能であることが挙げられる。心臓は疾患によってその形態が大きく変化し、通常のSE法などの2次元撮像法では撮像断面が最適かどうかの判断が検査中には困難なことがある。MP-RAGE法では撮像後に最適な断面を設定することができる。さらにMP-RAGE法はpresaturation pulseを用いることなく血液信号を抑制できるという特徴を持っているが、血液信号はflow voidのような無信号にはならず、PAPVDの症例で述べたように空気である肺野とのコントラストが付くということもひとつの利点である。

一方、欠点としては、高速gradient echo法としては比較的検査時間が長いということ、また呼吸同期を同時にかけることはできず、呼吸性の動きによるアーチファクトは避けられないことなどが挙げられる。

今回、成人症例に対してMP-RAGE法の画像評価を視覚的および定量的に行った。まず心筋の明瞭さに関しては、肺と接する左室の外輪郭はほぼ全例で明瞭であったが、心内腔と接する内輪郭は約半数の症例でやや不明瞭であった。これは、血液信号が無信号とならないMP-RAGE法の特徴による結果と考えられた。しかし、シネMRIとの比較による左室壁厚の定量的評価の結果では両者間に有意差はなく、内輪郭の不明瞭さは臨床的には問題にならないと考えられた。次に血流信号がどの程度低下するかという事に関しては、右室、大動脈ではほぼ全例で骨格筋よりも低信号であったが、左室については内腔が骨格筋とほぼ等信号に描出

され、血流信号の低下が十分でなかった症例が3例みられた。この3例はいずれも肥大型心筋症の症例であり、正常心と比べて収縮速度が速いことがアーチファクトを生じた可能性がある。さらに呼吸運動によるアーチファクトに関しては、ほとんどghostingはみられず、呼吸同期を併用できない装置でも臨床応用は可能と思われた。

次に再構成断面による画像の優劣に関しては、視覚的評価および定量的評価ともに短軸断面像に比べて四腔断面像の方が画像が優れているという結果になった。この理由としては、MP-RAGE法ではボクセルの形がスライス厚方向に長い直方体を呈しており、このため頭尾方向の空間分解能が低下するためと考えられた。しかし、短軸断面像での再構成画像においても、壁厚の評価に有意差はなく、臨床的には問題はないと思われた。

次に小児症例に関しては、疾患が多岐にわたるためにひとくくりの結論を出すことは難しいが、大血管と心房・心室の位置関係が問題となることの多い複雑心奇形においては、任意の断面で再構成が可能である本法は解剖学的変異の理解に有用であると考えられた。現在、小児の先天性心疾患の診断の第一選択が心エコー法にあることは議論の余地はないが、心エコー法にも死角があり、また検査者の技術に依存する部分も大きい。一方、先天性心疾患のMRIによる評価の報告も多いが、主としてシネMRIおよびMRAが有用であったとの報告が多い^{13),14)}。Sechtemら¹³⁾は、シネMRIを用いて心室中隔欠損孔を通過する血流の描出および欠損孔の大きさの評価について良好な成績を報告している。Hartnellら¹⁴⁾は、種々の先天性心疾患をMRAを用いて評価し、主としてシャントを有する疾患において異常血流の描出に有用であったと報告している。われわれも、疾患の種類によってはシネMRIやMRAをルーチン検査に組み入れて撮像している。しかし、先天性心疾患の診断におけるシネMRIやMRAの弱点は、撮像断面が最適であるかどうか検査中には判断しにくいことがある点と思われる。それに対してMP-RAGE法では、撮像後に最適な断面を設定できるという利点があり、従来の撮像法の弱点を補う補助手段として有用と考えられた。

今回MP-RAGE法が特に有用であったPAPVDに関しては、これまでにMRIでの評価の報告も多い¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。Masuiら¹⁵⁾はスピネエコー法で、Baxterら¹⁶⁾はシネMRIでそれぞれPAPVDの診断において、心エコー法や心血管造影に比べて良好な成績を得ている。心エコー法では縦隔外・肺内の構造を明らかにすることは困難であり、実際われわれの検討では異常肺静脈が見逃されていた症例もあった。また、異常肺静脈の還流部位を明らかにすることは、PAPVDの術前情報として最も重要と思われるが、心エコー法のみでの診断は必ずしも容易ではない¹⁸⁾。1回の撮像にて4本の肺静脈を描出することのできるMP-RAGE法は、本疾患に関してはスクリーニングとしても有用であり、シネMRIやMRAと併用することによって、MRIのみでの単独診断も可能と思われた。次に、小児の心臓腫瘍のMRI診断に関しては、結節

性硬化症に合併する横紋筋腫や脂肪腫についての報告が多い^{19),20)}。心臓腫瘍に対してのMP-RAGE法の有用性は、スクリーニング的な検査が可能であるという点と、断面を再構成して正常構造物との位置関係を明瞭にできるという2点と考えられる。今回の症例では、結節性硬化症に合併した多発性の脂肪腫症例が前者にあたり、右室流出路近くの線維腫の症例が後者に相当する。その他の先天性心疾患に関しては、やはり任意の断面を再構成して観察できるということが一番の利点と考えられ、無脾症候群に合併した複雑心奇形や、クリスクロス心などの疾患における有用性が示唆された。

最後に本法は1回の撮像で心臓全体をカバーできるが、それのみでの単独診断には情報不足であり、細部の解剖学的評価にはコントラストの良いSE系の画像が望ましく、また動きの評価にはシネMRIが必須である。しかしながら本法の撮像時間は、成人でも小児でも5分から10分程度であり、通常のSE法やシネMRIに追加して施行することは十分可能であり、形態学的に異常を有するすべての心疾患にそ

の補助診断として有用であると考えられた。

結 語

心臓領域に高速3次元撮像法のひとつであるMP-RAGE法を応用した。基礎的検討にて撮像のタイミングを検討し、拡張期の撮像が可能であることを確認した。また、縦磁化回復時間は画像コントラストにほとんど影響を及ぼさないことも確認した。次に成人症例14例と小児症例21例に臨床応用を試み、十分に臨床応用が可能であるという結果を得た。同一心周期の連続した断面が得られ、また撮像後に任意の断面で再構成が可能であるMP-RAGE法は、心臓領域にも有用であると考えられた。

稿を終えるにあたり、本研究のご指導、ご校閲をいただきました岡山大学医学部放射線医学教室の平木祥夫教授、津野田雅敏助手に深謝いたします。また、ご協力いただきました小児科学教室の鎌田政博助手に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) Crooks LE, Barker B, Chang H, et al: Magnetic resonance imaging strategies for the heart. *Radiology* 153: 459-465, 1984
- 2) Higgins CB, Holt W, Pflugfelder P, et al: Functional evaluation of the heart with magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med* 6: 121-139, 1988
- 3) Zawadzki MB, Gillan GD, Nitz WR: MP RAGE: A three-dimensional, T1-weighted, gradient-echo sequence; Initial experience in the brain. *Radiology* 182: 769-775, 1992
- 4) Lange EE, Mugler JP, Bertolina JA, et al: Magnetization prepared rapid gradient-echo (MP-RAGE) MR imaging of the liver; Comparison with spin-echo imaging. *Magn Reson Imaging* 9: 469-476, 1991
- 5) 戸上 泉, 清 哲朗, 津野田雅敏, 他: MRI 3次元撮像法の臨床. *画像診断* 14: 328-342, 1994
- 6) Chen SJ, Li YW, Wang JK, et al: Three-dimensional reconstruction of abnormal ventriculoarterial relationship by electron beam CT. *J Comput Assist Tomogr* 22: 560-568, 1998
- 7) Mele D, Maehle J, Pedini I, et al: Three-dimensional echocardiographic reconstruction; Description and applications of a simplified technique for quantitative assessment of left ventricular size and function. *Am J Cardiol* 18: 107-110, 1998
- 8) Lenz GW, Haacke EM, White RD: Retrospective cardiac gating: A review of technical aspects and future directions. *Magn Reson Imaging* 7: 445-455, 1989
- 9) Li D, Paschal CB, Haacke EM, et al: Coronary arteries: Three-dimensional MR imaging with fat saturation and magnetization transfer contrast. *Radiology* 187: 401-406, 1993
- 10) Paschal CB, Haacke EM, Adler LP: Three-dimensional MR imaging of the coronary arteries; Preliminary clinical experience. *J Magn Reson Imaging* 3: 491-500, 1993
- 11) Wielopolski PA, Manning WJ, Edelman RR: Single breath-hold volumetric imaging of the heart using magnetization-prepared 3-dimensional segmented echo planar imaging. *J Magn Reson Imaging* 4: 403-409, 1995
- 12) 渡部恒也, 天沼 誠, 榎本京子: MP RAGE法による高速撮像. *日獨医報* 37: 578-588, 1993
- 13) Sechtem R, Pflugfelder P, Cassidy MC, et al: Ventricular septal defect; Visualization of shunt flow and determination of shunt size by cine MR imaging. *AJR* 149: 689-692, 1987
- 14) Hartnell GG, Meier RA: MR angiography of congenital heart disease in adults. *Radiographics* 15: 781-794, 1995
- 15) Masui T, Seelos KC, Kersting-Sommerhoff BA, et al: Abnormalities of the pulmonary veins; Evaluation with MR imaging and comparison with cardiac angiography and echocardiography. *Radiology* 181: 645-649, 1991
- 16) Baxter R, McFadden PM, Gradman M, et al: Scimitar syndrome; Cine magnetic resonance imaging demonstration of anomalous pulmonary drainage. *Ann Thorac Surg* 50: 121-123, 1990
- 17) 鎌田政博, 安原伸吾, 佐藤恭子, 他: 部分肺静脈還流異常症におけるMRIの診断的有用性; MRA, MP-RAGE法などの3次元検査法, シネMRI所見を中心に. *日小循誌* 12: 27-35, 1996
- 18) Anderson RH, Macartney FJ, Shinebourne EA, et al: Pulmonary venous abnormalities. (In) *Pediatric Cardiology*. 509-540, 1987, Churchill Livingstone, Edinburgh
- 19) Matsumura M, Nishioka K, Yamashita K, et al: Evaluation of cardiac tumors in tuberous sclerosis by magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 15: 281-283, 1991
- 20) 佐藤修平, 平木祥夫, 鎌田政博, 他: 小児心臓腫瘍のMRIによる評価. *日小放誌* 10: 76-81, 1994