

特集 循環器の画像診断

3. 小児心臓磁気共鳴画像法 (MRI) : 臨床応用の進歩について

上村 茂

昭和大学横浜市北部病院 循環器センター

Pediatric cardiac magnetic resonance imaging : advances in clinical applications

Shigeru Uemura

Cardiovascular Center, Showa University Northern Yokohama Hospital

Abstract

Cardiac magnetic resonance imaging (C-MRI) has undergone significant changes in the diagnosis of cardiovascular morphology, function, ischemia and infarction with recent improvements in hardware and software techniques. Cine MRI using steady-state free precession (SSFP) sequence has made clear the contrast between the cardiac lumen and muscle. 3.0T magnet has been established to facilitate multi-phasic 3D contrast-enhanced angiography with breath-holding. This article discusses the current state of 3D contrast-enhanced angiography, cine MRI using SSFP, and phase contrast.

Keywords : 3.0T, Phase contrast cine MRI, Pediatric cardiac MRI

はじめに

本年に生じた原子力発電所の災害事故から放射線被ばくが社会的関心を集めている。

MRI検査法の特徴はこの放射線被ばくを生じない利点を有している。放射線被ばくに敏感な欧米ではCardiac MRI (C-MRI)として小児循環器領域では臨床に広く応用されている。著者らはC-MRIの小児領域および先天性心疾患領域での臨床上的有用性を20年来報告してきたが¹⁻³⁾、本邦でのC-MRIの使用は満足すべき状態には至っていない。ただし、漸次、C-MRIの使用施設が増加している。

今回、先天性心疾患の診断に関連する代表的な信号収集系列 (sequence) とその撮影法の特徴 (Table 1) につき説明し、特に最近の進歩であるSSFP (steady state free precession) 法^{4,5)}と3T (テ

Table 1 Appropriate indication and pulse sequence for the use of Cardiac MRI

評価方法	評価目的	信号収集系列
形態評価	先天性心奇形 冠動脈	SE Double IR ; T ₁ MRA (TRICKS)
	心筋肥厚 等	SSFP (cine) Fast GE (cine)
機能評価	壁・弁運動	PC cine
	心拍出量 逆流量	SSFP cine Fast GE cine
心筋性状評価	虚血・心筋梗塞	Perfusion
	心腫瘍	Delayed enhancement Double IR ; T ₁ , T ₂ FAT Suppression

Table 2 Comparison between time-resolved 3D MR-angiography at 3.0 T and cardiovascular CT imaging at multidetector-row CT

	3 Tesla MRI (TRICKS)	MDCT
放射線被ばく	なし	あり
造影剤・副作用 投与量・容量負荷	Gd-DTPA・0.3% 0.4ml/kg・少ない	ヨード系・1% 2ml/kg・あり
空間分解能	MDCTに若干劣る	MRIに勝る
時間分解能	シネMRIではMDCTに勝る	MRIに劣る
任意断面の作成	任意断面で可	MPRは可能
心拍・呼吸の影響	多少あり	多少あり
機械性能による差	大きい	多少あり
撮像時間	TRICKS ; 2~5秒	Dual Source ; 1秒以下
目的血管の 連続3D撮影	可能	関心領域の信号をもとに 1~2相連続撮影は不可
騒音	大	小

スラ)機を用いた検査^{6,7)}の実際、C-MRIの限界についても記載する。

また、代表的心疾患について、MRI法で何がわかるのか、我々の施設で実施している各撮影法によって得た画像および検査結果を示す。

C-MRIの特徴

C-MRIは多列検出器型CT (MDCT) と比較すれば、任意の撮影断面を設定でき、放射線被ばくもない非侵襲的検査法である。また、3T(テスラ)機を用いた造影検査で得られる3次元(3D)像は空間分解能もMDCTと匹敵するようになった(Table 2)。シネMRI法では動画が軽い息止めの短時間で撮影が可能で時間分解能も優れ心機能の評価も正確・容易にできる。さらに、超音波検査法に比べ心・血管の全体像の把握に優れ、骨や肺などの障害なく自在の撮像断面像が得られる。C-MRIの位相画像法を用いれば弁逆流の定量評価も行なえる。心筋虚血・梗塞に関してはMRI造影剤を用いれば心筋シンチ法を凌駕できる検査内容となっている。

C-MRIの欠点としては、ペースメーカー植え込み患者の検査は禁忌であり、ステント・コイル部では映像が出なく(void)なり、不整脈があれば画像は劣化することである^{1~3)}。

また、各種の点滴ラインや機器を使用している

場合、磁場の影響で使用できなく、検査準備に長時間を有し患者状態を変化させる可能性がある。

C-MRI検査についての進歩

信号収集系列(sequence)が急速に進歩し、高分解能高速度撮像法が可能となってきた。特に、SSFP法が実用化され、心腔・血流の信号がより高信号となり、心筋とのコントラストが明瞭となった⁴⁾。また、多チャンネル化した表面コイルを使用すればパラレルイメージ法を用い、撮影時間が1/2以上に短縮できるようになった⁵⁾。その結果、息止め撮影が容易となり、呼吸に基づくアーチファクトが軽減し、画像がより明瞭となった。

3D信号収集系列のKey-hole法⁹⁾を使用すれば時間分解能が飛躍的に上昇し、1秒台で3D像の撮影が可能になってきた。特に3T機が商業ベースで使用可能となり、信号雑音比(S/N)の改善があり、より高速化の実現によって、空間分解能および時間分解能が向上し連続した3Dの撮像が可能となった。

心臓MRIの撮像に関連する基本的事項

信号収集系列(sequence)の名称およびその内容も各装置メーカーによって異なり、画像自体もニュアンスが相違しているため注意が必要である。

1. 代表的な信号収集系列(sequence)とその撮影法の特徴

1) SSFP法(True FISP, FIESTA, Balanced TFE)

SSFP法ではRFパルスを短い間隔で繰り返し照射し定常状態となった際に生じる各種エコーとFID信号を重ねて受信している。SSFP法ではT2緩和時間の長い血液・心嚢水・胸水などは流れの有無に関わらず高信号を呈する。同法はシネMRIや冠動脈MRA、心筋perfusion MRIなどの撮影に使用され最近の心臓MRI検査の中心的な信号収集系列である。

2) 位相画像法(phase contrast法; PC法)⁹⁾

(Fig.1, 2)

位相画像法は双極傾斜磁場をシネMRI法に組み合わせ、位相シフトの変化を撮影画像化する方法である。同法を用いるとあらゆる解剖学的領域の関心領域における流速が測定できる。心時相毎に心腔内や血管内の断面を通過する平均流速を測定できる。同法を用いると非観血的に肺体血流量比や半月弁・房室弁逆流量が定量的に測定できる⁹⁾。

2. Parallel imaging法(SENSE, SMASH, ASSET, iPAT)

本法は複数の受信コイルを用い、その画像間のわずかな差を利用する方法である。そのため、コイル数の逆数に比例して撮影時間の短縮が出来る。本来、造影剤を用いた信号強度の強い撮像法に併用されていたが、SSFP法との相性が良く撮像時間短縮および空間分解能向上に寄与している。

3. MRI造影剤

造影剤投与はT1短縮効果を生じ血液のコントラストを明瞭とする。最近、使用目的の多くは心筋perfusion MRIや遅延造影法のために使用されている。著者らは3T機を使用した連続3D撮影法で造影剤を用いている。

現在、心臓血管系で使用されているMRI造影剤はガドリニウムキレート(Gd)剤である。CT検査で用いられているヨード系造影剤と比較すれば使用量は少なく容量負荷は少なく、副作用発現率も少ない。しかし、腎不全患者では腎性全身性線維

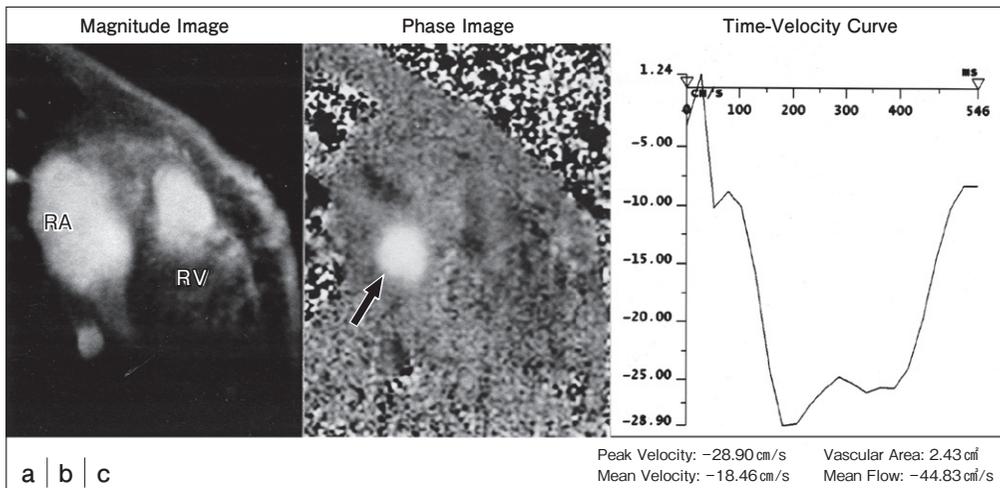


Fig.1 Phase-contrast MR imaging from a 7-year-old girl with ASD (secundum). Direct measurement of the shunt flow through the ASD. The Q_p/Q_s is 2.44 measured by Fick method at cardiac catheterization. The flow through the ascending aortic is 24.10 ml/beat, though the main pulmonary is 53.14 ml/beat and the direct measured shunt flow through the ASD is 24.48 ml/beat by PC MRI. The Q_p/Q_s is 2.20 calculated by phase-contrast MR imaging as the results.

Left figure demonstrates the magnitude image at the same cardiac phase with the phase image. The shape of the ASD is not defined in the magnitude image. Middle figure shows the shape of the ASD by phase contrast (PC) MRI clearly. Right figure shows the time-velocity curve though the ASD.

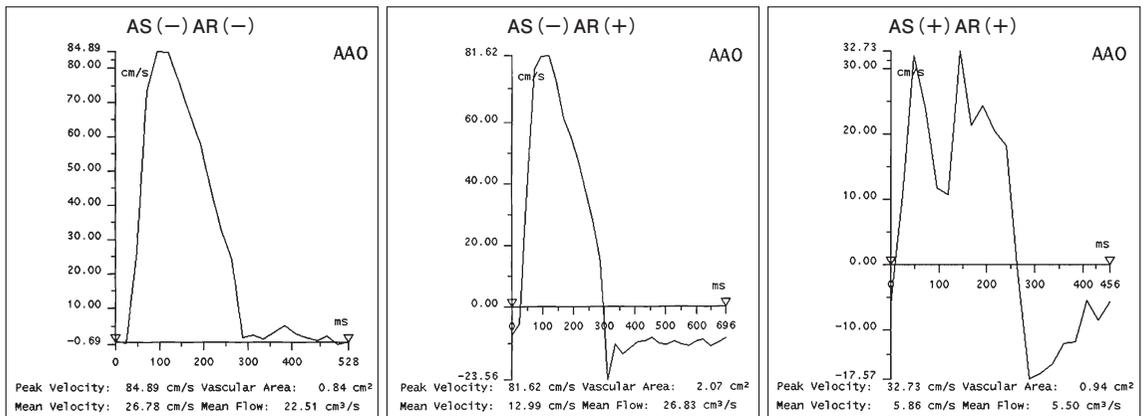


Fig.2 The different shape of the time-velocity curve through the ascending aorta with aortic valve stenosis. Left figure shows the normal flow pattern. Middle figure shows reverse direction during diastolic phase with aortic valve regurgitation. Right figure shows irregular curve during systolic phase with aortic valve stenosis. But the reverse direction curve during diastolic phase is measured clearly and shows regurgitation of aortic valve.

症を遅発発症し致死性的になることが最近判明した。Gd造影剤の腎不全患者への投与は禁忌である¹⁰⁾。

心臓 MR 撮像法の種類と実際

1. シネ MRI 法 (Cine MRI)^{1~3)}

従来のシネ MRI 法は GER 法を用い撮影されている。同一断面で心電図を同期させ異なる心時相毎の画像をそれぞれ収録し、各画像をシネループで動画として観察する方法である。血流のある血管内腔や心腔内は高信号として表示され、乱流を生じると低信号となる。そのため、シネ MRI 法を用いると、短絡血流、弁狭窄・弁閉鎖不全の診断が可能である。さらに左右室の連続した短軸断面を心基部から心尖部まで 10 断面前後で撮影できれば、ワークステーションで心筋の壁運動、駆出率、容積、拡張期機能、心筋重量など心機能の評価が非観血的に定量測定できる。

1) GER 法を用いたシネ MRI 法

従来の GER 法に k 空間分割法を併用し 1 回の息止めで Cine MRI 像の高速撮影が可能となった。ただし、多数の k 空間分割法を用いるほど分解能が悪くなり、画像は劣化するため、脈拍数に応じた k 空間分割数の設定が必要である。一方、GER 法は造影剤による T1 短縮効果を受け鮮明な画像が得られる。

2) SSFP 法を用いたシネ MRI 法 (Fig.3, Fig.4)

SSFP 法はシネ MRI 法の中心的検査法となっている。T2 強調像に近いコントラストを示し、流入効果の少ない停滞した血流でも高信号強度を呈する。そのため、心機能の低下した心不全例にでも良好な血液・心筋コントラストが得られる。通常、parallel imaging 法と併用され、1 断面のシネ MRI 撮像に 10 秒前後の短時間で 1 断面のデータ収集が可能である。

3) タギングシネ MRI 法 (tagging Cine MRI 法)¹¹⁾

同法では低信号の帯 (tag) を撮影断面に様々な方向から直行させ、この帯を含む GER 法を用いたシネ MRI を撮影する方法である。低信号に印加された帯が、血流方向や短絡血流の明示、心筋収縮や拡張の様式の解析が可能となる¹²⁾。

2. Black blood 撮像法

Double IR 法を用い断面の画像を 1 回の息止め (10 秒前後) で撮像する。血流信号が抑制された信号収集系列のためポイントを絞った心筋・血管の迅速な構造診断が出来る。また、T1 強調像や T2 強調像の画像を得ることができ、脂肪抑制法と併用すれば組織性状の診断も出来る。冠動脈壁厚や血管内のアテローム変化の検出にも応用されている。

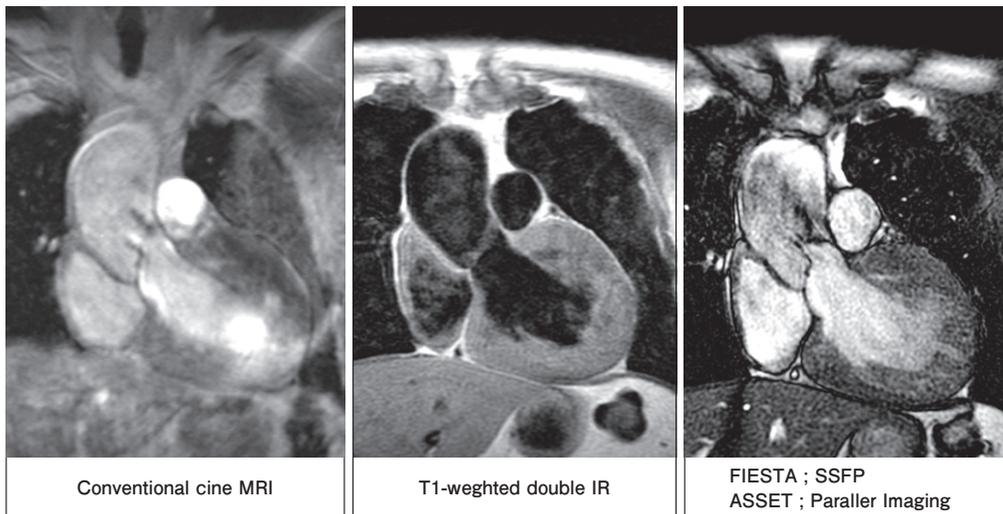


Fig.3 Comparison between the quality of the image taken by different pulse sequences in an adult patient with an aortic valve stenosis, regurgitation and noncompaction of LV. Left image taken with gradient echo mistakenly suggests hypertrophic cardiomyopathy. Middle image taken with T1 weighted double IR mistakenly suggests HCM. Right image taken with steady-state free precession (SSFP) demonstrates noncompaction of LV correctly because the 2 layer structure is delineated clearly.

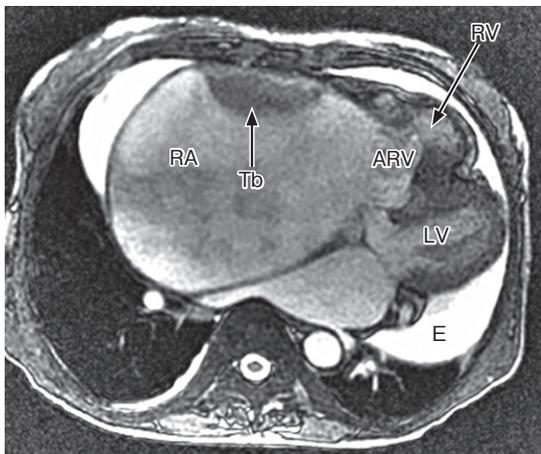


Fig.4 Transverse image during systolic phase from an adult patient with Ebstein disease taken with SSFP sequence. RA; right atrium, ARV; atrialized portion of the right ventricle, RV; right ventricle, LV; left ventricle, E; pericardial effusion, Tb; thrombi.

3. 心筋 perfusion MRI¹²⁾ (Fig.5)

同法はMRI造影剤を急速に静脈注入し、心筋の初回循環 (first pass) の動態を撮像する方法であ

る。このため、非常に高い時間分解能と、心基部から心尖部までの広範囲を網羅するダイナミックな画像を高速に同じ心拍毎に連続して撮像する必要がある。以前はTurbo-FLASH法などの多断面・高速GER法を用いていたが、最近ではfast gradient echo train (FGRET)法が用いられている。FGRET法では1回の励起パルスで4~8つのエコー信号を収集して1画像に相当するk空間に当てはめるため、撮像時間が4~8倍短縮できることとなる。このため、1~2心拍で6~8断面の撮像が可能となった。虚血部は造影剤のfirst passでは造影効果の無い低信号として描出される。

4. 心筋遅延造影法 (late enhancement)¹²⁾ (Fig.6)

造影剤の静脈注入後15~20分後に撮像し、心筋障害部位での造影剤の排出遅延を描出する撮像法である。心筋細胞膜の障害や心筋間質部の増加などで障害心筋部位と正常心筋部位に造影効果 (T1値)が生じる。高い空間分解能を有するdouble IR法で撮像される。

今後、心筋梗塞・心筋線維化など心筋障害の検索に応用可能である。

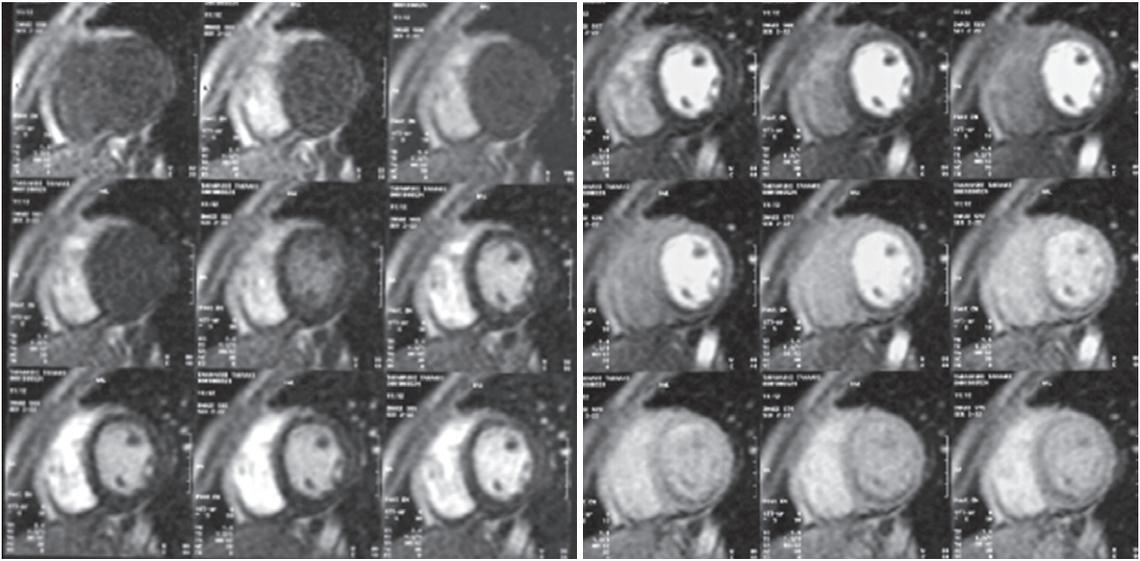


Fig.5 16 contiguous first pass images in a young adult with old myocardial infarction followed by complete occlusion of right giant aneurysm ,10 years earlier. We can recognize easily that the Gd contrast medium is washed away in the order from the RV to the LV and the cardiac muscle. But, a perfusion defect is recognized clearly in the infero-posterior part of LV.

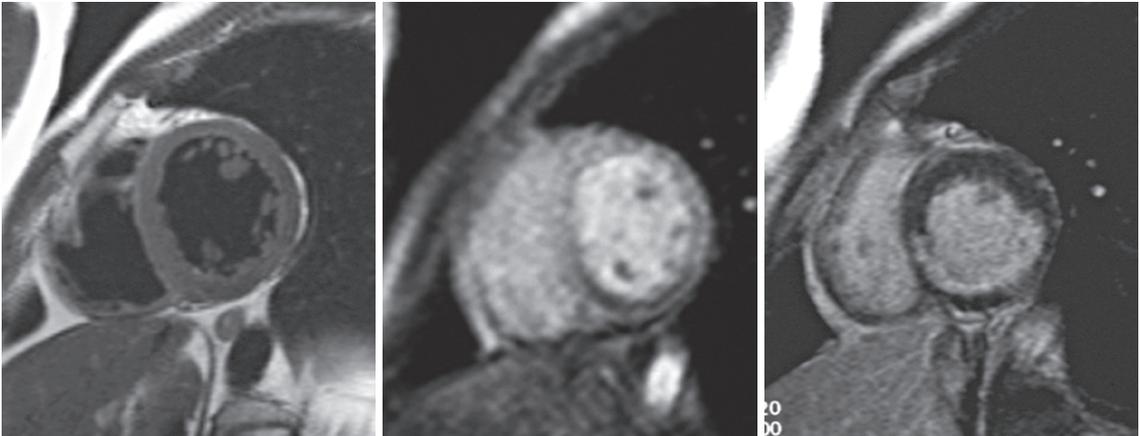


Fig.6 Short axis images taken with different pulse sequences from the same patient in Fig.5. Left image shows no cardiac lesion taken with T2 weighted turbo SE sequence. Middle image shows perfusion defect taken by first pass perfusion sequence. Right image shows late enhancement in the LV muscle. A high signal is recognized in the territory corresponding to the perfusion defect part in less than 1/2 of the wall, and old myocardial infarction is suggested.

5. 冠動脈MR angiography (冠動脈MRA)

同法はMDCTと違い造影剤無しで冠動脈の描出が可能で、カルシウム沈着の影響を受けない利点がある。乳幼児など小児領域では川崎病の冠動脈病変の診断に応用されてきた^{13,14)}。近年、SSFP法の信号収集系列を使用した冠動脈MRAが用いられ、冠動脈像がより明瞭に検出可能となった¹⁵⁾。さらに、RF受診コイルの多列化が進み、横隔膜運動のnavigator echoを用いたwhole heartの信号を収集し三次元冠動脈MRAを撮像できるようになり¹⁵⁾、信号収集時間も3~5分と短縮している。先天性心疾患領域では造影剤を用いない大血管系の検出に応用が可能と考えられる。

6. 造影剤を用いた三次元磁気共鳴血管造影法 (3D MRA) (Fig.7, 8, 9)

Gd造影剤を急速に静脈に注入し血管・心腔を描出する。この際、目的とする部位に造影剤が到達する時間を測定し、撮影を開始する。呼吸を

止め、心電図の同期は無で三次元画像を撮影する。三次元構築法としてVR (volume rendering) 法、MIP (maximum intensity projection; 最大強度投影法) 法とMPR (multiplanar reconstruction/reformatting; 多断面随意再構成) 法がある。同法を用いると肺動脈・肺静脈・大動脈・短絡血管系・大静脈系など心臓内腔以外の血管形態が明瞭に描出できる。

近年、3T機を用いた高速法が普及し連続した高精度画像の多連続撮像が可能となった。

ただし、小児での3T機を用いた心臓血管系の報告は認めていない。

心臓MRIを用いた診断

1. 先天性心疾患の形態診断

先天性心疾患の形態診断では、横断、矢状断、冠状断、の三方向のほか、目的に応じた任意の斜位断を撮影し、上下大静脈、左右心房、左右心室、肺・大動脈、肺静脈と順次診断する。さらに、胸

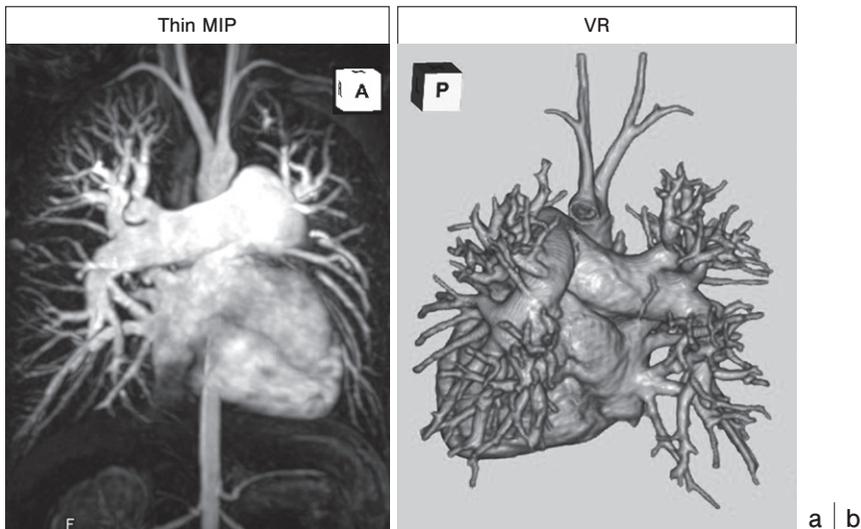


Fig.7 MR cardio-angiographs in a 9-year-old girl with ASD (secundum) and PAPVC (right semi-total type) are taken at 3T and 8 channel-surface coil with breath-holding. Space resolution is 1.2mm x 1.6 mm, slab thickness is 3.0 mm, temporal resolution is 4.0sec, parallel imaging is ASSET factor 2, and number of partitions are 38. Gd is injected at a speed of 3.0ml/sec, total volume is 10.0 ml (0.45/kg), and continuous 11-phases are taken. Left panel shows the connection of rt-PVs into RV by thin MIP. Right panel is VR image seen from the rear. All PVs on the right side are connected into the RA apparently

郭内に占める心臓の大きさや腹部臓器との位置関係も正確に把握できる。特に診断に苦慮することもある複合心奇形・心房臓器錯位症候群などの診断にも有用である。乳幼児など小児で「息止め」が出来ない年齢児の検査では、血液と心筋のコントラストの良いSSFPまたはGER法のシネMRIを

各断面に連続して動画撮影をする。心室や心房の拡大、右室や左室流出路の狭窄の診断は動画的画像として診断が可能である。

造影剤を用いた3D MRAでは、心電図同期を用いず大動脈系、大静脈系、肺動脈(近位部・末梢部)¹⁷⁾、肺静脈などが明瞭に描出できる。特に、修



Fig.8 Oblique MPR images show clearly the connection part between rt-PVS and RA in the same patient of Fig.7.

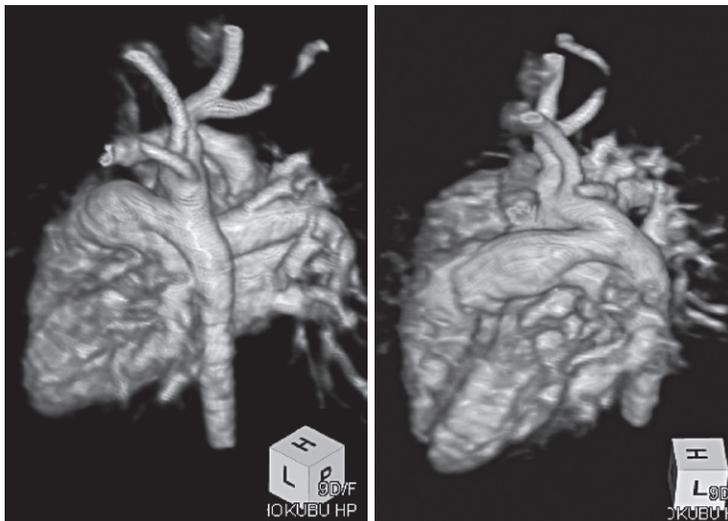


Fig.9

VR images are taken in a 7-day-old girl with PDA, VSD, ASD, PH and 21-trisomy, whose weight is 3044g. Large PDA is recognized, and its size and the 3D position around the PDA can be known clearly.

Parameters of the cardiac MRI are : space resolution is 0.8 mm x 1.0mm, thickness of slab is 1.6mm, number of portions is 36, time resolution is 2.2sec and continuous 13 phases are taken. And, parallel image is ASSET2. Gd is injected at a speed of 0.9ml/sec and total volume is 0.9ml.

正ブラロック・タウジッヒ短絡術やノーウッド手術などの大動脈再建術後、肺静脈還流異常の心内修復術後、グレン手術後など術後の血管系狭窄の観察にも有用である。

2. 短絡・弁狭窄及び閉鎖不全・心機能の診断^{18~20)}

小さな短絡の心室中隔欠損症でも、従来のGER法のシネMRI法では右室と肺動脈を含む冠状断面上で短絡血流が明瞭に検出でき部位診断も可能である¹⁸⁾。

最近、10断面を同時に同一の心時相で撮影できる信号収集系列が開発され、心機能の解析がより正確になった。タギングシネMRI法を用いると血流の方向がより視覚化され、短絡血流などの診断に有用である¹¹⁾。

位相画像法を用いると、肺体血流量比及びすべての半月弁・房室弁閉鎖不全の逆流量を定量的に測定できる。

3. 川崎病の冠動脈病変・心臓合併症の診断^{12,16)}

川崎病の冠動脈瘤・狭窄・カルシウム沈着など冠動脈病変の診断では、MDCTが放射線被ばくを除けば診断価値は高くなっている。しかし、心臓合併症、特に心筋虚血・梗塞の診断についてGd造影剤を用いた心臓MRIはgold standardとしてRI法(心筋シンチグラム法)に勝る結果を示している。今後、放射線被ばくを避ける意味からも、さらに造影心臓MRI法への展開が増加するものと思われる。

結 語

先天性心疾患の形態・短絡・弁逆流及び心機能などの診断に関し、発達した心臓MRI検査は心・血管レントゲン造影法や心臓カテーテル法に匹敵・凌駕する内容を有する。今後、治療には心臓カテーテル手技が、診断には心臓MRI法が用いられると思われる。

川崎病の心臓合併症はMRI造影剤を用いた心臓MRIがgold standardであり、RI法に適宜交代する展開が予測される。

●文献

- 1) 上村 茂, 平山健二, 根来博之, 他: 小児期心疾患に対するMRIの有用性. 小児科 1993; 34: 1559-1566.
- 2) 上村 茂, 武内 崇, 鈴木啓之: 先天性心疾患診断法の進歩—核磁気共鳴画像法—. 循環器科 2003; 53: 4-11.
- 3) 上村 茂, 山邊陽子, 澤田まどか: 先天性心疾患の診断; 核磁気共鳴画像法(MRI)の有用性と限界へのチャレンジ. Heart View 2008; 10: 1176-1187.
- 4) Barkhausen J, Ruehm SG, Goyen M, et al: MR evaluation of ventricular function; true fast imaging with steady-state precession versus fast low angle shot cine MR imaging; feasibility study. Radiology 2001; 219: 264-269.
- 5) Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MB, et al: SENSE; sensitivity encoding for fast MRI. Magn Reson Med 1999; 42: 952-962.
- 6) Lee VS, Hecht EM, Taouli B, et al: Body and cardiovascular MR imaging at 3.0T. Radiology 2007; 244: 692-705.
- 7) 東野 博, 斎藤 実, 井上祐馬, 他: 3T MRIの臨床; 心. 臨床画像 2007; 23: 1282-1292.
- 8) Korperich H, Gieseke J, Esdorn H, et al: Ultrafast time-resolved contrast-enhanced 3D pulmonary venous cardiovascular magnetic resonance angiography using SENSE combined with CENTRA-keyhole. J Cardiovasc Magn Reson 2007; 9: 77-87.
- 9) Lotz J, Meier C, Leppert A, et al: Cardiovascular flow measurement with phase-contrast MR imaging; Basic facts and implementation. Radio Graphics 2002; 22: 651-671.
- 10) Cheong BYC, Muthupillai R: Nephrogenic systemic fibrosis; A concise review for cardiologists. Tex Heart Inst J 2010; 37: 508-515.
- 11) Kimura K, Uemura S, Handa S, et al: Usefulness of saturation pulses in magnetic resonance imaging of partial anomalous pulmonary venous return. Angiology 2001; 52: 331-335.
- 12) Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA, et al: Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detecting of subendocardial myocardial infarcts; an imaging study. Lancet 2003; 361: 374-379.

- 13) Sigeru U, Kenji H, Hiroyuki S, et al : Coronary angiography and segmented CineMRI in single breath-hold to detect the coronary arterial aneurysm following. Kawasaki disease, in "Kawasaki Disease". Hirohisa Kato (Ed.) Amsterudum, Elsevier Science publisher, 1995, p531-538.
 - 14) 上村 茂, 平山健二, 鈴木啓之, 他 : 息止め法を用いないSegmented k space turbo FLASH法に基づく乳幼児の冠動脈病変の描出. Progress in Medicine 1996 ; 16 : 1767-1771.
 - 15) Weber OM, Martin AJ, Higgins CB : Whole-heart steady-state free precession coronary artery magnetic resonance angiography. Magn Reson Med 2003 ; 50 : 1223-1228.
 - 16) Takemura A, Suzuki A, Inaba R, et al : Utility of coronary MR angiography in children with Kawasaki disease. AJR Am J Roentgenol 2007 ; 188 : w534-w539.
 - 17) Kondo C, Takada K, Yokoyama U, et al : Comparison of three-dimensional contrast-enhanced magnetic resonance angiography and axial radiographic angiography for diagnosing congenital stenoses in small pulmonary arteries : Am J Cardiol 2001 ; 87 : 420-424.
 - 18) Arheden H, Holmqvist C, Hansens K, et al : Left-to-right cardiac shunts : comparison of measurements obtained with MR velocity mapping and with radionuclide angiography. Radiology 1999 ; 211 : 453-458.
 - 19) 上村 茂, 武内 崇, 鈴木啓之, 他 : MRI ; 位相画像法を用いた肺体血流量比の測定および房室弁逆流量の定量化の試み. 循環器情報処理 2001 ; 16 : 109-117.
 - 20) 上村 茂 : 僧帽弁疾患の新しい治療戦略 (MRIを用いた僧帽弁逸脱症に伴う僧帽弁閉鎖不全症の診断—特に位相画像法を用いた僧帽弁逆流量測定の有用性について—). 呼吸と循環 2006 ; 54 : 715-722.
-