

中磁場 MRI 装置を用いた息止め心臓シネ MRI の有用性

松村憲太郎¹, 佐藤清人¹, 青野正樹¹, 井下謙司¹
内海直子²¹香川井下病院内科 ²同放射線科

はじめに

0.5 テスラ(T)の中磁場 MRI 装置による心機能解析は、従来の gradient echo を用いた心電図同期シネ MRI 法の撮像時間の長さや画像コントラストの不良などでほとんど施行されていない。現在では主に spin echo を用いた心・大血管の形態診断に使われているのが実情である。心機能評価のためには心周期を正確に識別できる 50 ms 前後の時間分解能が要求され、そのため画像収集の高速化が必要とされる。0.5T の MRI 装置では TR 短縮の限界もあり、このような短い時間分解能が要求される心機能解析は困難であった。近年の高速イメージングの手法として k-space を segment 化する方法が開発され^{1),2)}、心機能評価のための十分な時間分解能が達成されるようになった。しかし、この方法を用いた報告の多くは 1.5T 前後の高磁場装置によるものであり、中磁場装置を用いた心機能評価の報告は少ない。今回 0.5T の中磁場 MRI 装置を用いて息止めシネ MRI を Gd-DTPA 投与下に施行し、左室機能解析が可能であるか否か検討した。

対象および方法

心臓カテーテル検査における左室造影と Gd-DTPA 造影息止めシネ MRI を一か月以内に施行しえた連続71症例のうち、左室造影検査の前後一か月以内に不安定狭心症を発症した1例、息止めシネ MRI 施行中に心室性不整脈が多発した1例、心電図同期が不十分であった2例および体動や呼吸によるアーチファクトのため MRI 画像が不良であった7例を除いた60例を今回対象とした。左室造影は右前斜位 30° 方向で施行し、area-length 法で左室容積を求めた。Gd-DTPA 造影息止めシネ MRI は GE 社製の 0.5T 超伝導型 MRI 装置 (Signa Contour) を用いた。Gd-DTPA 0.05 mmol/kg を生理食塩水 20 ml に希釈し、尺側皮膚静脈より心臓初期循環中に急速注入しながら、呼吸停止下に single slice multi-phase fast gradient echo (以下 Fast Card とする) を用いて施行した。Fast Card における画像収集法を Fig. 1 に示す。心拍数 60 ppm の場合、R-R 間隔は 1000 ms であり、trigger delay 時間 (可変, 通常最小値 10 ms) と trigger window 時間 (R-R 間隔の 20%) を除いた残りの時間でデータ収集する。画像再構成に view sharing の方法³⁾ を用い、phase 1 の後半部分のデータと phase

キーワード middle field MRI system, breath-hold cine MRI, cardiac function, Gd-DTPA, k-space segmentation

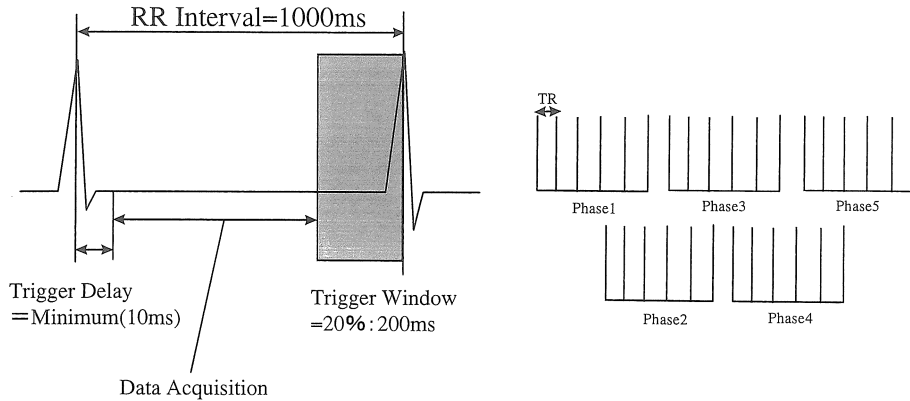


Fig. 1. Data acquisition of single slice multiphase fast gradient-echo (Fast Card)
 Left : Calculation of data acquisition interval.
 Right : Method of view sharing in k-space segmentation. TR : repetition time.

3の前半部分のデータを加えることで phase 2の画像を作成する。最小 TR (12~20 msの間で自動的に設定される) と view per segment (通常 6) の積より phase 1, 3, 5, のデータ収集時間が決定される。TR=16 ms, view per segment=6 なら 1 phase の収集時間は 96 ms であるが, view sharing を用いて実際の viewer に表示される phase to phase time は 48 ms となる。この方法により左室容積計測には実用上十分な時間分解能を得ることができる。フリップ角は 30°, FOV (field of view) は 35×26 cm, matrix は 256×128, 1 回加算でデータ収集した。息止め時間は心電図の R-R 間隔や view per segment に依存するが, 約 15~25 秒であった。日常臨床では心臓 MRI 検査として, 心基部左室短軸断面で単純息止め Fast Card を施行し, 続いて左室水平長軸断面 (4 腔断面) および左室垂直長軸断面と胸部大動脈を Gd-DTPA 造影息止めシネ MRI (以下造影 Fast Card とする) で撮像し, 最後に左室短軸 multi-slice 造影 spin echo を施行している。Fig. 2 に左室水平長軸断面 (4 腔断面) の Fast Card 像 (A : 単純法, B : 造影法) を示す。この断

面の単純 Fast Card では左室血流信号がサチュレーションされやすく, 左室内腔をトレースすることはできないが, Gd-DTPA を急速静注することで左室内腔を十分認識することができる。この症例では TR=16.2 ms, view per segment=6 で, view sharing を用いて frame to frame=48 ms となっている。今回は左室水平長軸断面 (4 腔断面) より拡張末期 (Fig. 3A) および収縮末期 (Fig. 3B) 画像を取り出し, area-length 法を用いて容積を求め, 左室造影と比較検討した。

心臓カテーテル検査と心臓 MRI 検査はいずれも十分な検査の説明と書面での同意を得たのち施行した。統計学的処理は linear regression analysis を用い, p<0.05 をもって統計的有意とした。

結 果

造影 Fast Card 法において, 心電図同期が可能で, 十分な息止めと体動がなければ全例で良好な画像を得ることができた。また息止めが不十分でも拡張末期, 収縮末期画像をほぼ特定で

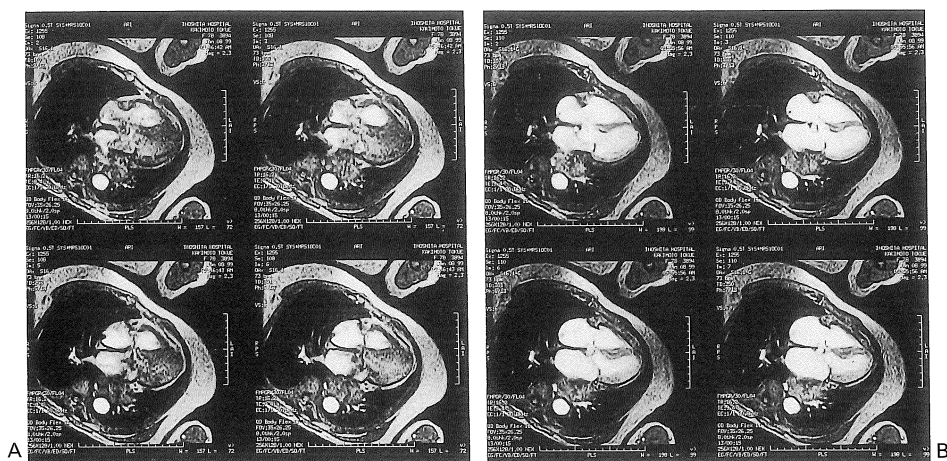


Fig. 2. Sequence shows comparison of single breath-hold cine (Fast Card) unenhanced (A) and contrast-enhanced (B) horizontal long-axis four-chamber MR images. In unenhanced images, left ventricular cavity could not be visualized. On the other hand, good cardiac images were obtained with contrast-enhanced method.

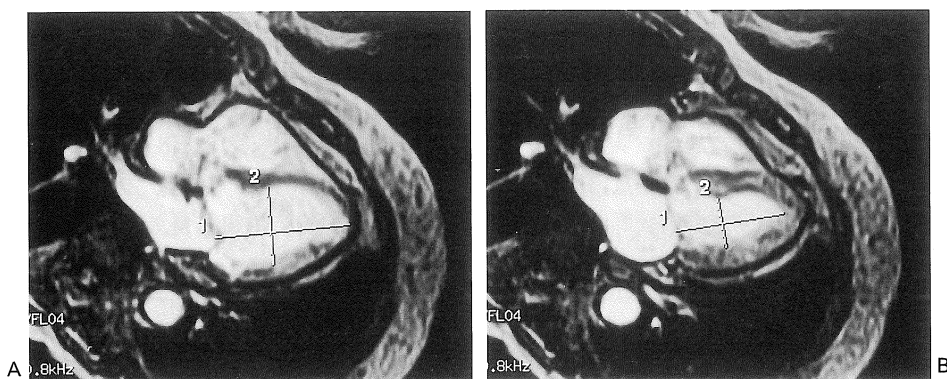


Fig. 3. Contrast-enhanced Fast Card of left ventricular end-diastolic (A) and end-systolic (B) images on horizontal long axis slice. The ventricular volumes were calculated by single plane area-length method.

き、左室容積の算出が可能であった。平均的な息止め時間は21秒で、収集画像は1心周期につき12枚から18枚であった。左室垂直長軸断面、左室水平長軸断面（4腔断面）、左室短軸断面および胸部大動脈長軸断面の位置決めから、左室短軸断面での単純Fast Card、左室長軸の2断面および胸部大動脈での造影Fast Card、そして左室短軸のmulti-slice spin echo

までの全検査時間は15分前後であった。Fig. 4に左室水平長軸断面（4腔断面）での造影Fast Cardと右前斜位30°方向での左室造影の相関を示す。左室拡張末期容積係数は $y = 1.00x(MRI) + 14.0$, $r = 0.904$, $p < 0.001$ の有意な正相関を示したが、MRI法で明らかに過小評価した。また左室駆出分画は $y = 0.961x + 2.8$, $r = 0.936$, $p < 0.001$ の有意な正相

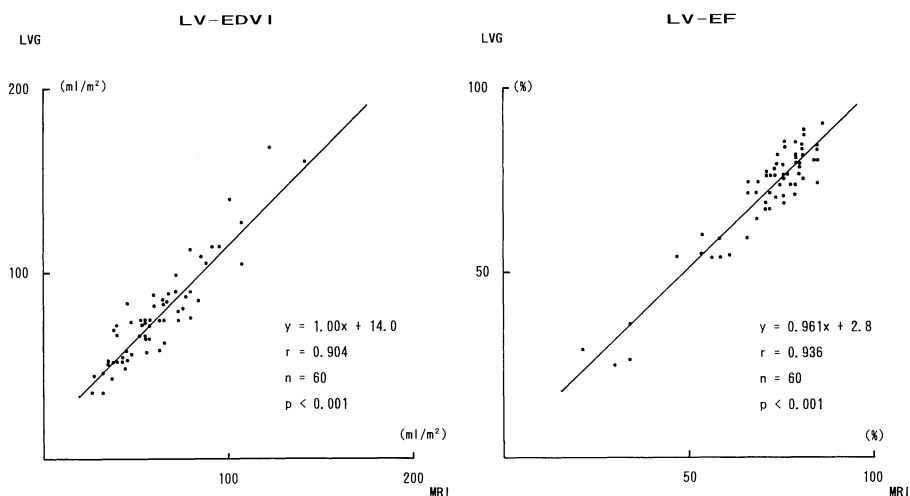


Fig. 4. Graphs showing values for the left ventricular end-diastolic volume index (left panel) and ejection fraction (right panel) obtained using contrast-enhanced Fast Card plotted against those obtained using cine-ventriculography.

関を示した。

考 察

従来の gradient echo 法による心電図同期シネ MRI は弁逆流や左室壁運動の評価に用いられ、一定の評価がなされてきたが^{4),5)}、より手軽なカラードプラー断層心エコー図法を越えるものではなく、また左室機能解析のためには画像コントラストが不十分なため現在ではあまり用いられていない。また従来法では撮像に5~10分前後かかるため、臨床では主に高速 spin echo 法を用いた心・大血管の形態診断に使われるようになってきた。心機能解析の報告の多くは1.5Tの高磁場MRI装置を用いており、0.5Tの中磁場装置による心機能解析の報告は少ない。一方で中磁場装置は本邦で最も普及しており、1.5Tに比しMR信号の弱い中磁場装置による心機能評価が臨牀的にどの程度可能であるか検討する意義は大きい。心機能評価のためには50ms前後の時間分解能が必要であり、また十分な空間分解能を有し、画像コントラ

スが良好でなければならない。現在高速イメージングのための様々なシーケンスが開発されているが、撮像時間の著しい短縮に伴う空間分解能や信号雑音比(S/N)の劣化が問題となっている。現在のMRI装置では50ms前後の時間分解能と良好な空間分解能を得るためにk-spaceをsegment化する方法がspin echo法^{1),2)}においてもgradient echo法⁶⁾においても多く採用されている。20秒前後の息止めでシネMRIを施行するFast Card法は左室短軸断面のsingle slice multi-phaseの画像は造影剤を用いることなく比較的良好に描出可能であるが、左室垂直長軸断面や左室水平長軸断面(4腔断面)は血流信号がサチュレーションされやすく、造影剤を用いない限り左室内腔を十分に描出することはできない。心臓初期循環中にGd-DTPAを投与しながら息止めシネMRIを施行する方法⁷⁾を用いて、左室垂直長軸断面や左室水平長軸断面(4腔断面)をコントラスト良く描出することが可能である。1心周期の全画像を50msから60msの時間間隔で収集し、ワークステーション上で拡張末期と収縮末期の左

室容積を求め、血管造影で求めた左室容積と比較したところ、良好な正相関を示した。MRI法が血管造影法に比し左室容積を過小評価しているが、これは用いた断面が異なること、血管造影では肉柱内に造影剤が入り込んで心腔像を形作るのに比しMRI法では肉柱の表面で心腔を描出しているため⁸⁾、およびFast Card法では心電図R波から10ms前後遅れた時相を拡張末期としているため拡張末期容積を過小評価したと思われる。MRIを用いた左室容積の算出法はこれまでに多数報告されているが、幾何学的仮定を必要としないtrue Simpson法が最も正確と思われる⁹⁾。左室短軸でのFast Card法では血流信号がサチュレーションされにくく造影剤を投与しなくても左室内膜辺縁をトレースすることが可能であり、心基部から心尖部に向かって10mmのスライス厚で順次息止めFast Cardを施行し、各部位の拡張末期や収縮末期画像よりtrue Simpson法で左室容積を算出する手法は、非侵襲性と精度の高さから最も優れた方法と思われる¹⁰⁾。しかし、一定した呼吸停止位置が要求され、また辺縁認識の複雑な後処理のための自動化ソフトが必須であり¹⁰⁾、日常臨床には向かない。現状で左室容積算出の精度を向上させるために、左室垂直長軸断面と左室水平長軸断面(4腔断面)の2断面より左室容積を算出するソフトがワークステーション上にあれば1断面から算出するよりも正確な左室容積を求めることが可能と思われる¹¹⁾。

今回用いた装置では画像再構成の手法としてview sharingを採用しているが³⁾、心時相の正確な特定に若干の問題を残している。Phase to phase timeはTRに依存するが、0.5Tの本装置では画像コントラストを劣化させない条件下でのTR最小値はほぼ16ms前後で、k-spaceを埋めるために約96ms必要とされる。96msの時間分解能では心時相の特定が困難であり、このためにphaseとphaseの間を埋めるview sharingの手法が取られる。1.5T前後の

高磁場装置では最小TRを6msから8msまで短縮可能であり、view sharingの手法を用いなくともk-space segmentationの方法で36msから48ms前後のphase to phase timeが得られる。0.5Tの装置ではMR信号も1.5Tに比し弱く、TR短縮の限界もありview sharingという手法で時間分解能を向上させているが、Fooら³⁾も指摘するように左室拡張末期と収縮末期の心時相の特定は十分であり、有効な時間分解能を有するとされている。心臓初期循環中にGd-DTPAを静脈内投与し、息止めシネMRIを施行する本法は心腔の描出に優れており、左心室輪郭を自動描出することも可能と思われる¹³⁾。本法の欠点はGd-DTPAを使用しなければならないこと、軽度の弁逆流の診断が困難なこと、初期循環時間が著明に短縮したり延長する例では造影剤の左室充盈が不十分になることなどが挙げられる。

結 語

最も普及している中磁場(0.5T)MRI装置を用いて心機能解析を試みた。Gd-DTPAを心臓初期循環中に投与し、左室長軸断面で息止めシネMRI(Fast Card法)を施行することで、左室容積をほぼ正確に、短時間で算出することが可能であった。

文 献

- 1) Edelman RR, Wallner B, Singer A, Atkinson DJ, Saini S : Segmented turbo FLASH : method for breath-hold MR imaging of the liver with flexible contrast. *Radiology* 1990 ; 177 : 515-521
- 2) Atkinson DJ, Edelman RR : Cineangiography of the heart in a single breath-hold with a segmented turbo FLASH sequence. *Radiology* 1991 ; 178 : 357-360
- 3) Foo TKF, Bernstein MA, Aisen AM, Hernandez RJ, Collick BD, Bernstein T : Improved ejection fraction and flow velocity estimates with use of

- view sharing and uniform repetition time excitation with fast cardiac techniques. *Radiology* 1995 ; 195 : 471-478
- 4) Sechtem U, Pflugfelder PW, White RD : Cine MR imaging : potential for the evaluation of the cardiovascular function. *AJR* 1987 ; 148 : 239-246
 - 5) Cranney GB, Lotan CS, Dean L, Baxley W, Bouchard A, Pohost GM : Left ventricular volume measurement using cardiac axis NMR imaging-validation by calibrated ventricular angiography. *Circulation* 1990 ; 82 : 154-163
 - 6) Hernandez RJ, Aisen AM, Foo TKF, Beerman RH : Thoracic cardiovascular anomalies in children : evaluation with a fast gradient-recalled-echo sequence with cardiac-triggered segmented acquisition. *Radiology* 1993 ; 188 : 775-780
 - 7) Matsumura K, Nakase E, Haiyama T, Takeo K, Shimizu K, Yamasaki K, Kohno K : Determination of cardiac ejection fraction and left ventricular volume : contrast-enhanced ultrafast cine MR imaging vs digital subtraction ventriculography. *AJR* 1993 ; 160 : 979-985
 - 8) Rackely CE : Quantitative evaluation of left ventricular function by radiographic techniques. *Circulation* 1976 ; 54 : 862-879
 - 9) 松村憲太郎, 中瀬恵美子, 川合一良, 斎藤孝行, 灰山 徹, 葛西 醇 : MRI を用いた左室容積算出法の検討—5 種類の方法論と左室造影との対比—. *日磁医誌* 1993 ; 13 : 228-238
 - 10) Butler SP, McKay E, Paszkowski AL, Quinn RJ, Shnier RC, Donovan JT : Reproducibility study of left ventricular measurements with breath-hold cine MRI using a semiautomated volumetric image analysis program. *JMRI* 1998 ; 8 : 467-472
 - 11) 岡村正博, 近藤 武, 安野直子, 他 : 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
 - 12) Matsumura K, Nakase E, Haiyama T, Utsunomiya S : Automatic left ventricular volume measurements on contrast-enhanced ultrafast cine magnetic resonance imaging. *Eur J Radiol* 1995 ; 20 : 126-132

Usefulness of Breath-hold Cardiac Cine MR Imaging with a Middle Field MRI System

Kentaro MATSUMURA¹, Kiyoto SATO¹, Masaki AONO¹,
Kenji INOSHITA¹, Naoko UTSUMI²

¹*Department of Internal Medicine, Kagawa Inoshita Hospital
830 Hanaina, Ohmohara-cho, Mitoyo-gun, Kagawa 769-1613*

²*Department of Radiology, Kagawa Inoshita Hospital*

To assess the accuracy of contrast-enhanced, single breath-hold cine MR imaging in calculating left ventricular volume and ejection fraction, we compared MR measurements with those obtained by using cine ventriculography in 60 patients. Fast cine MR images were acquired with a middle field MR system (0.5T). A breath-hold single slice multi-phase fast gradient-echo (Fast Card) sequence was used to obtain fast cine MR images with the following parameters; TR of 16 ms, TE of 3 ms, flip angle of 30 degree, matrix elements of 256×128 , view per segment of 6, field of view of 350×260 mm and one excitation. Left ventricular end-diastolic volume and ejection fraction obtained with contrast-enhanced Fast Card correlated well with those obtained with cine ventriculography (end-diastolic volume, $y=1.00x+14.0$, $r=0.904$, $p<0.001$; ejection fraction, $y=0.961x+2.8$, $r=0.936$, $p<0.001$). Conclusion: Our results show that contrast enhanced breath-hold cardiac cine MR imaging on horizontal long-axis view using a middle field MR system is an accurate method for evaluating left ventricular volume and ejection fraction.