

シネ MRI 法における位相補正の意義—弁逆流疾患における検討—

大西 修作*, 福井 須賀男*, 守田 瑠璃子*
藤井 謙司**, 楠岡 英雄**, 北 畠 顕**
鎌田 武信**, 松浦 元***, 滝沢 修***

*オリオノ和泉病院 循環器センター
**大阪大学 第一内科
***シーメンスアサヒメディテック

緒 言

近年, 心電図同期高速スキャンにより dynamic な MR 画像を得るシネ MRI 法が心血管系の新たな画像診断法として注目されている。本法により造影剤を用いることなく非侵襲的に心血管腔内の血流の描出が可能であり, 従来の画像診断法では得られなかった広い視野での血流画像を得ることができる^{1,2)}。また本法では心血管腔内の乱流の生じる部位で血流信号が欠落することが知られ, この現象は弁逆流やシャント疾患などの診断に応用されている^{3,4)}。しかし, MRI により弁逆流を定量的に評価した報告は少な

い^{5,6)}。そこで今回著者らはシネ MRI 法の画質の改善を計り, 弁逆流の程度を超音波ドプラー検査法でのそれと比較し, シネ MRI による弁逆流の重症度評価の妥当性を検討した。

対象および方法

対象は健常人 5 例と弁逆流疾患 15 例(男性 6 例, 女性 14 例, 年齢 32~84 才)である。疾患別内訳は僧帽弁逆流 (MR) 2 例, 三尖弁逆流 (TR) 8 例, 大動脈弁逆流 (AR) 3 例, 肺動脈弁逆流 (PR) 2 例である。弁逆流の診断は超音波ドプラーカラーフローマッピング (カラードプラー) 法にて行なった。カラードプラー検査

キーワード Cine MRI, valvular regurgitation, phase compensation, color Doppler

は東芝社製 SSH-65 A にて行ない、2.5 MHz のセクタ形プローブを用いた。使用 MR 装置は 1.5 tesla 超伝導型 (MAGNETOM, Siemens AG) であり、心電図同期による高速スキャン (FLASH) シネ MRI 法により一心拍を 17 等分した各時相の gradient echo 画像を得た。Flip angle ; 30°, slice thickness ; 7 mm, pixel size ; 1.5 x 1.5 mm に設定し、繰り返し時間 (TR) は心拍数に依存し 35~55 msec とし、次の 2 つの検討を行なった。

Study 1 : エコー時間 (TE) の画質への影響の検討。血流の速度による位相の乱れに対する TE の影響について検討するため、2 症例 (AR, PR) において、つぎの 4 種類のシネ MR スキャンを行なった。すなわち、通常のシネ MRI のパルス系列 (non-rephasing ; NR) の TE を 12, 10, 8 msec と変えた 3 種類のスキャンと、読み

取り (read-out) 方向とスライス選択 (slice-selection) の 2 方向で血流の速度による位相の乱れを補正 (rephase) する gradient を付加したパルス系列 (rephasing ; R) である⁷⁾。4 種類のスキャンから得られた gradient echo 画像の画質、血流信号、無信号領域を比較した。

Study 2 : 位相補正の画質改善効果の検討。健康人 5 例と弁逆流疾患 13 例を対象に、NR スキャン (TE=12 msec) および R スキャン (TE=16 msec) の 2 種類のパルス系列を用いてシネ MR 画像を得た。NR, R 両者にて得られた画像の、画質、血流信号、信号欠落領域 (area of signal void : ASV) を比較した。弁逆流例については ASV を弁逆流領域と判定し、各症例について ASV の弁口部からの最大到達距離を計測しカラードプラー法での逆流領域と比較した。カラードプラー法での弁逆流の評価は、逆流シグナル (モザイクパターン) 領域の弁口部からの最大到達距離で行なった⁸⁾。撮像断面については、健康例では横断面と左心室長軸を含み横断面に垂直な斜位断面を、弁逆流症例では図 1 の手順で基本断面 (orthogonal plane) とそれに直交するような斜位断面を用いた。

弁逆流描出における断面設定

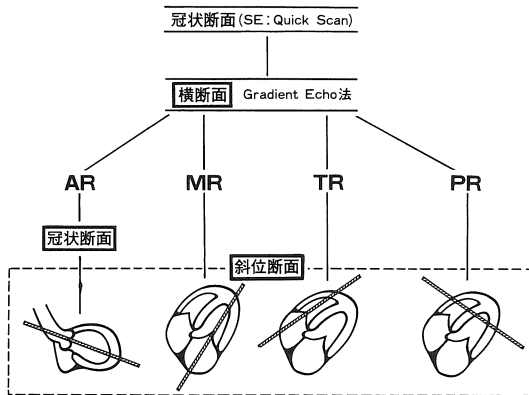
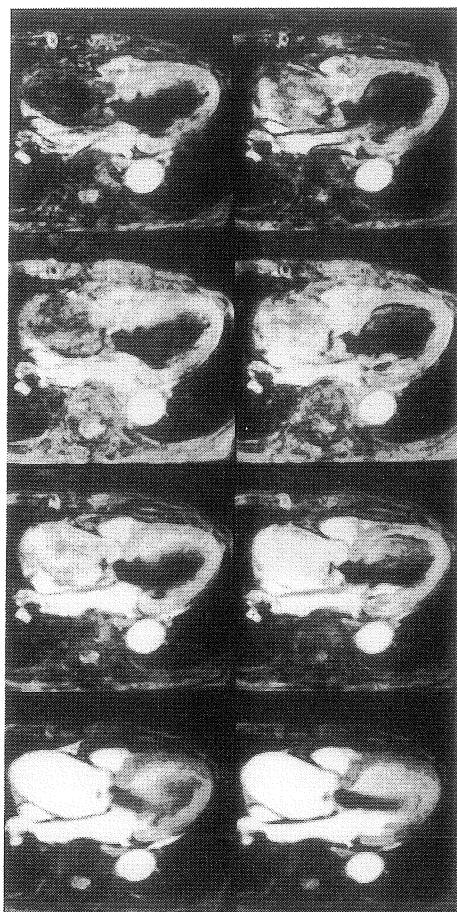


図 1 シネ MRI 法による弁逆流描出のための撮像断面。

AR 例 : 冠状断面と、これに対して垂直な左室長軸斜位断面。MR, TR 例 : 横断面と各心室の長軸方向の斜位断面。PR 例 : 心短軸断面と右室長軸断面または矢状断面。

結 果

Study 1 : 図 2 に AR 症例の TE を変えた 3 種類の NR 画像と R 画像とを示す。TE の短縮にともない、phase-encoding 方向の縞状の motion artifacts が順次減少している。また同様に心血管腔内の血流信号が増強しコントラストの向上がみられ、心室壁と血流の境界や無信号領域の辺縁が明瞭となっている。TE の短縮により、以上のような画質の改善が認められたが、R 画像においては画質の改善がさらに明瞭であった。



Study 2: 位相補正の信号欠落領域に対する影響を検討した。健常人でのシネ MR 画像において位相補正を行わない場合には、壁運動、弁の動き、血液の流入および流出などに応じて心腔内に ASV を認めた。位相を補正した R 画像では、これらの ASV は抑制され大部分が消失した (図 3)。

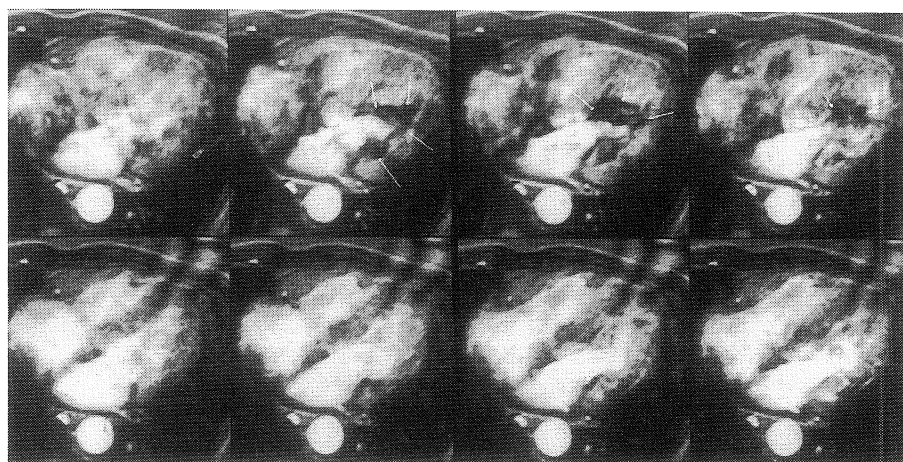
弁逆流疾患の NR 画像では、ASV の辺縁が不明瞭なために 2 例で計測不能であった。この 2 例をのぞく全例で、R 画像での ASV は NR 画像よりも小さく描出され、その到達距離は R 画像

図 2 AR 例の拡張期 2 時相 (530 msec, 706 msec) の斜位横断面シネ画像。

上段より、TE = 12, 10, 8 msec の位相補正を行わない画像、および最下段に位相補正を行なった TE = 12 msec の画像を示す。上段より下段へと順に心血管腔内の信号強度が増加するとともに縞状の artifacts が減少し、画質が改善している。

図 3 健常例の拡張期 4 時相 (440 msec~560 msec) の横断面画像。

non-rephasing 画像 (上段) の左心室内の急速流入血流の周囲に認められる signal void が、rephasing 画像 (下段) では消失している。



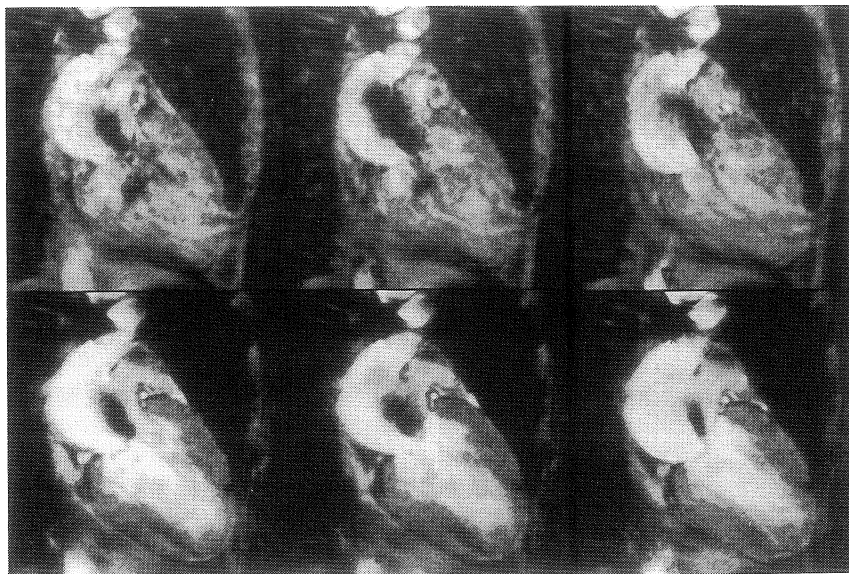


図 4 MR 例の収縮期 3 時相 (100 msec~265 msec) の左房左室垂直断面像。rephasing 画像 (下段) では位相補正により画質が向上するとともに, 逆流による signal void の領域が non-rephasing 画像 (上段) よりも狭く表示されている。

COMPARISON OF CINE MAGNETIC RESONANCE IMAGING WITH COLOUR FLOW MAPPING

— EXTENT OF VALVE REGURGITATION —

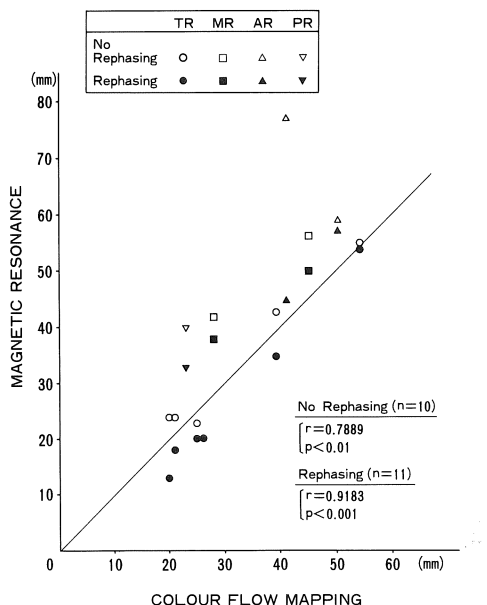


図 5 弁逆流例における, シネ MRI 法での signal void とカラードプラー法での逆流シグナルの弁口部からの到達距離の関係。

のほうで小さかった (図 4)。MRI による弁逆流領域の到達距離とカラードプラー法での逆流シグナル領域の到達距離との間には正の相関を認めた (図 5) が, 相関係数は NR 画像よりも R 画像の方が良好であった [NR ; $r=0.7889$ ($p<0.01$), R ; $r=0.9183$ ($p<0.001$)].

考 案

MRI 法は撮像視野が広く撮像方向にも制約が無いことから, 心血管疾患の検査法として有用である。なかでも gradient echo 法高速スキャンを用いたシネ MRI により心血管腔内血流動態を評価することが可能であり, 弁逆流疾患, 短絡疾患などの心血管疾患の診断に応用されてい

る^{2-4,9,10}。しかし、シネ MRI による弁逆流の定量的評価に関する報告は少ない^{5,6}。本研究では、シネ MRI による弁逆流の重症度評価において、エコー時間の影響と位相補正の効果を検討した。

シネ MRI 法は従来のスピネエコー法と異なり、エコー時間内に撮像スライスを通過する血流からの NMR 信号を高信号として描出する方法である^{1,11}。また本法では心血管腔内に生じる逆流、狭窄などによる乱流では血流信号が欠落することが知られており、本検討でも信号欠落領域により弁逆流を判定した。この信号欠落の生じる原因は次のように考えられている。一般にシネ MR 画像において動きを持ったスピネが傾斜磁場内を通過する場合、スピネからの信号の位相にシフトが生じる。一方、心腔内の乱流の内部では、単位ボクセル内に含まれるスピネ(原子)の速度、加速度および方向にばらつき(乱れ)がある。このために乱流内のボクセル内でのスピネ(原子)からの信号の位相は一様でなく、これらが相殺される結果、そのボクセルからの信号が欠落する^{2,7}。

また、位相の乱れは病的血流のみならず健全な血流動態や心拍動などでも生じ、これがシネ MR 画像全体の画質を低下させる。一般に、スピネの速度による位相のシフトは TE の二乗に比例するため、TE の影響を大きく受ける。本検討でも TE が 12 msec の NR 画像の画質は低く弁逆流の判定が 2 例で不能であったが、わずか 2 msec だけ TE の異なる NR 画像の画質に大きな差異を認め、最も TE の短い(8 msec)スキューンでは位相の乱れが軽減し S/N 比の高い良好な画質が得られた。さらに、phase の乱れを補正する gradient を付加し撮像した R 画像では画質の改善はさらに明瞭であった。なお、study 2 での TE は NR で 12 msec に対し R で 16 msec であり、TE の位相の乱れに対する影響は R 画像の方で、より大きいと予測されたが、実際は位相の乱れは NR 画像の方で大きかった。Rephas-

ing の効果が TE の影響を上回ったと言える。Haacke らは移動するスピネの速度による位相のシフトを補正する extra gradients の付加により spin echo および gradient echo 画像の画質が向上したと報告している⁷。以上の結果から、より高度な画質を得るには gradient の付加による積極的な位相補正が必要であることが示された。

一方、弁逆流の定量的評価については、Pflugfelder らが 26 例の僧帽弁逆流(MR)症例の左心房の信号強度と信号欠落領域をシネ MRI により解析し、エコードプラー法による MR の重症度(3段階)と相関を認めたと報告している⁶。また、Sechtem らはシネ MRI により左心系の逆流病変について regurgitant fraction を求め、心血管造影法により求めたそれと粗な相関を認めたと述べている⁵。しかし、これらの報告ではシネ MRI のパルス系列に位相補正が考慮されていない。本研究では、位相補正(R)画像では NR 画像よりも ASV は小さく描出され、その心腔内での到達距離は短かった。これは逆流領域の周辺部で位相の乱れにより信号を欠落していた voxel が、補正により位相が揃い信号を得たためと考えられる。今回の検討では速度成分による位相のシフトを 3 方向のうち 2 方向でのみ補正した。したがって補正後に残った ASV は、①補正を行っていない phase 方向の速度成分による位相の乱れ、②加速度成分による位相の乱れの 2 者によるものと考えられる。本法での ASV の到達距離とカラードプラー法での逆流シグナルの到達距離との間の相関係数は R 画像の方で良好であった。また本研究では、健康人の NR 画像の心血管内腔に認められた ASV は位相補正により抑制され、この現象も弁逆流の重症度を評価する際に有用と考えられた。

以上の検討から、シネ MRI により弁逆流を評価する際、① TE の短縮に伴い画質が改善すること、②速度による位相の乱れを補正することにより画質が改善すること、③弁逆流の重症度

評価には位相補正後の信号欠落領域を計測することが重要であることが示され、シネ MRI による弁逆流の定量的評価の可能性が示唆された。

文 献

- 1) Haase A, Frahm J, Matthaei D, et al. FLASH imaging. Rapid NMR imaging using low flip-angle pulses. *J of Magnetic Resonance* 67 : 258-266, 1986
- 2) Sechtem U, Pflugfelder PW, White RD, et al. Cine MR Imaging : Potential for the evaluation of cardiovascular function. *Am J Radiology* 148 : 239-246, 1987
- 3) 大西修作, 渥美千里, 福井須賀男, 他. 高速スキャンによる心血管腔内血流動態の検討. *日磁医誌* 8 (1) : 3-9, 1988
- 4) 赤木禎治, 清松由美, 加藤裕久, 他. 先天性心疾患におけるシネ MRI の有用性—形態診断と血行動態評価—. *日磁医誌* 9 (1) : 13-19, 1989
- 5) Sechtem U, Pflugfelder PW, Cassidy MM et al. Mitral or aortic regurgitation : Quantification of regurgitant volumes with cine MR imaging. *Radiology* 167 : 425-30, 1988
- 6) Pflugfelder PW, Sechtem U, White RD, et al. Non-invasive evaluation of mitral regurgitation by analysis of left atrial signal loss in cine magnetic resonance. *Am Heart J* 117 : 1113-9, 1989
- 7) Haacke EW, Lenz GW. Improving MR image quality in the presence of motion by using rephasing gradient. *Am J Roentgenology* 148 : 1251-1258, 1987
- 8) Miyatake K, Izumi S, Okamoto K, et al. Semi-quantitative grading of severity of Mitral Regurgitation by real-time two-dimensional Doppler flow imaging technique. *J Am coll cardiol* 7 : 82-88, 1986
- 9) Simpson IA, Chung KJ, Glass RF, et al. Cine magnetic resonance imaging for evaluation of anatomy and flow relations in infants and children with coarctation of the aorta. *Circulation* 78 : 142-148, 1988
- 10) 西村恒彦, 山田直明, 松尾剛志, 他. 心電図同期 SE 法およびシネ MRI による心筋梗塞の診断. *日磁医誌* 9 (1) : 20-27, 1989
- 11) Nayler GL, Firmin DS, Longmore DB. Blood flow imaging by cine magnetic resonance. *J Comput Assist Tomography* 10(5) : 715-722, 1986

Significance of Phase Compensation in Cine Magnetic Resonance Imaging : Quantitation of Valvular Regurgitation

SHUSAKU OHNISHI,* SUGAO FUKUI,* RURIKO MORITA*
KENSHI FUJII,** HIDEO KUSUOKA,** AKIRA KITABATAKE**
TAKENOBU KAMADA,** HAJIME MATSUURA,***
OSAMU TAKIZAWA***

**Division of Cardiology, Oriono-Izumi Hospital, Fuseya-cho 348-1, Izumi-shi,
Osaka, 594*

***The First Department of Medicine, Osaka University Medical School*

****Siemens-Asahi Meditech*

To evaluate the usefulness of cine magnetic resonance (MR) imaging in a quantitative study of valvular regurgitation, we applied modified cine MR pulse sequences on the 5 healthy volunteers and 15 patients with valvular regurgitation. We obtained cine MR images in two patients with valvular regurgitation using the pulse sequences with different echo time (12, 10, 8 msec) and with extra gradients for phase compensation [Study 1] . Another 13 patients and 5 healthy volunteers were imaged by both of conventional (non-rephased, NR) and phase-compensated (rephased, R) cine MR sequences for the evaluation of the ability of cine MR imaging in a quantitation of valvular regurgitation [Study 2] .

Results : Study 1. The streaking artifacts were diminished and intracavity flow signal was higher in the images with shorter TE. Namely, a cut down of echo time improved the image quality of cine MR, while the improvement was much greater in rephased image. Study 2. R images were better in quality than the NR images. Meanwhile the extent of signal void in cine MR images caused by valvular regurgitation were correlated with the extent of regurgitant signal estimated by Doppler color flow mapping. The area of signal void in R images were smaller than that in NR images in all patients, and the correlation between the length of regurgitant flow in cine MR imaging and that in color flow mapping was better on R than NR images [NR ; $r = 0.7889(p < 0.01)$, R ; $r = 0.9183(p < 0.001)$] . Intracavity signal void observed in NR images in healthy volunteers were suppressed in R images.

Thus cine MR imaging with phase compensation is useful for the quantitation of regurgitant flow.