

## 心機能低下症例における True FISP cine MRI の有用性

佐久間利治<sup>1</sup>, 山田直明<sup>1</sup>, 本岡眞琴<sup>1</sup>, 榎本直之<sup>1</sup>,  
前島 偉<sup>1</sup>, 松田一秀<sup>1</sup>, 浦山慎一<sup>2</sup>, 池尾三樹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国立循環器病センター放射線診療部 <sup>2</sup>同放射線医学部

## はじめに

心臓 MRI (magnetic resonance imaging) において, cine MRI は主に心機能や心筋壁運動を評価するために使用されている. 従来の cine MRI では FLASH (fast low-angle shot) 等の gradient echo 法が用いられ, 血液の撮像面への流入効果を利用して血液を高信号に描出してきた<sup>1),2)</sup>. しかし, 流入効果を利用した cine MRI においては, 心機能が不良な症例や長軸では必ずしも良好な像を得ることができなかった<sup>3),4)</sup>.

最近 SSFP (steady-state free precession) を元にした True FISP (fast imaging with steady-state precession) cine MRI が開発され, 血液と心筋で高いコントラストを得られることが報告されている<sup>5)</sup>. True FISP cine のコントラストは, 主として組織の緩和時間 ( $T_1$ ,  $T_2$ ) によって決まり, 血液の流入効果は比較的小さい. それゆえに特に流入効果の小さい場合, すなわち心機能の不良症例や心室長軸断面において, FLASH 法より高いコントラストが期待される. しかし, 筆者等の知る限り心機能の不良症例に関するまとまった報告はされていない. そこで心機能の不良症例と健常例を対比して True FISP 法の FLASH 法に対する有用性を検討した.

## 対象と方法

対象は, 健常ボランティア 10 例および心機能低下症例 12 例である. 健常者の内訳は, 年齢 20~30 歳 (平均±標準偏差:  $26.5 \pm 3.2$ ) の男性であり, 心周期は 740~1060 ( $910 \pm 85$ ) ms であった. 2000 年 5 月 24 日から 2001 年 2 月 6 日までに当センターで心臓 MRI を施行した後天性心疾患 86 例の中で, 任意に選択した 38 例において比較のための True FISP cine と FLASH cine を追加した. その 38 例中, 心エコー図で測定した左室短軸径短縮率 (percent fractional shortening: % FS) が 30% 未満であった 12 症例を心機能低下症例とした. 12 症例すべてにおいて, True FISP cine と FLASH cine の比較評価が可能な画像が得られた. 心機能低下症例の内訳は, 年齢 31~76 歳 ( $53.9 \pm 13.2$ ) の男性 10 例, 女性 2 例であり, 心周期は 620~1140 ( $822 \pm 155$ ) ms であった. 疾患別では, 拡張型心筋症 8 例, 虚血性心疾患 3 例 (陳旧性下壁梗塞: 1, 急性前壁梗塞+陳旧性下壁梗塞: 1, 虚血性心筋症: 1), 心サルコイドーシス 1 例であった. 心機能低下症例を心エコー図で測定した % FS は, 6~18 ( $11.5 \pm 4.0$ ) % であった (% FS の正常値は 30~50 %<sup>6)</sup>).

使用装置は, Magnetom Symphony (1.5T,

キーワード cardiac MRI, fast imaging, cine, steady-state free precession (SSFP), cardiac function

Siemens AG) であり、装置の最大傾斜磁場強度は 20 mT/m で、その立ち上がり時間は 400  $\mu$ s である。Circular polarization (CP) body array coil を用いて、心電図同期、息止め条件下で左心室短軸中央断面および水平長軸断面を撮像した。

True FISP の撮像条件は、TR : 3.6 ms, TE : 1.8 ms, バンド幅 : 975 Hz/pixel, segmentation 数 : 15 であった。Flip angle (FA) は原則として 70° としたが SAR (surface absorption rate) の制限により一部の対象では値を下げた。その結果、健常例ではすべて 70°、心機能低下症例では 60~70° (67.8  $\pm$  3.1) であった。FLASH の撮像条件は、TR : 7.7 ms, TE : 6.1 ms, flip angle : 20°, バンド幅 : 195 Hz/pixel, segmentation 数 : 7 であった。両方法において slice 厚 (8 mm) と FOV (240  $\times$  320 mm<sup>2</sup>) は同じであった。データ収集 matrix は True FISP : 120  $\times$  128, FLASH : 119  $\times$  128 であった。両方法において位相エンコード方向と読み取り方向に interpolation を行った結果、画像の表示 matrix はデータ収集 matrix の 2 倍となった。撮像時間は、True FISP では 8 心拍、FLASH では 17 心拍であり、1 画像当たりの時間分解能は、共に 54 ms であった。

得られた cine 画像の拡張末期 (end diastolic phase : ED) と収縮末期 (end systolic phase : ES) の像において、左心室内腔、心筋 (心室中隔)、および被写体が存在せず、かつ位相エンコード方向の phase shift artifact が認められない部分 (background) に ROI をとり、信号強度を測定した (Fig. 1)。Signal-to-noise ratio (S/N) は、心内腔信号 ( $S_{cavity}$ ) と心筋信号 ( $S_{myo}$ ) をそれぞれ background 信号 ( $S_{BG}$ ) で除して求めた。内腔心筋コントラスト (C/N) は、心内腔信号から心筋信号を差し引いたものを background 信号で除して求めた。

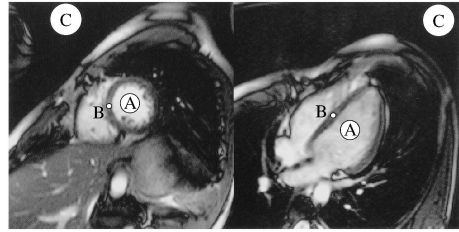


Fig. 1. ROIs to measure signal intensity in left ventricular cavity (A), myocardium (B), and background (C)

$$C/N = (S_{cavity} - S_{myo}) / S_{BG} \dots\dots\dots (1)$$

有意差検定には、Wilcoxon 順位検定を用いた。

## 結 果

得られた S/N の結果を Table 1 に示す。S/N は全体的に True FISP の方が FLASH より低くなったが、特に True FISP における心筋の S/N が低かった。心筋の S/N は、True FISP と FLASH のいずれにおいても、心時相 (ED あるいは ES) と対象 (健常例あるいは症例) によらず一定であった。一方、心内腔の S/N はこれらの条件により変化したが、True FISP の方が変化は小さかった。特に、FLASH では症例の心内腔の S/N が健常例に比べて平均としては著しく低下したのに対し、True FISP ではほとんど同じであった。True FISP と FLASH のいずれにおいても心内腔の長軸の S/N は短軸よりも低くなったが、特に FLASH の長軸の ES における S/N は、健常例でも症例でもその ED や短軸に比べて有意に低くなった ( $P < 0.01$ )。

心内腔と心筋のコントラスト (C/N) は健常例では長軸の ES を除き True FISP と FLASH ではほぼ同等であった。長軸の ES では、True

2001 年 9 月 14 日受理 2001 年 12 月 12 日改訂

別刷請求先 〒565-8565 大阪府吹田市藤白台 5-7-1

国立循環器病センター放射線診療部 佐久間利治

Table 1. Comparison of S/N between True FISP and FLASH

		True FISP		FLASH		
		volunteers	patients	volunteers	patients	
Myocardium	short axis	ED	$7.7 \pm 2.0$	$8.3 \pm 2.8$	$24.8 \pm 6.8$	$22.4 \pm 7.1$
		ES	$8.4 \pm 1.7$	$8.5 \pm 2.2$	$23.4 \pm 6.1$	$20.2 \pm 4.5$
	long axis	ED	$7.0 \pm 1.7$	$7.7 \pm 1.5$	$23.0 \pm 3.8$	$23.2 \pm 8.7$
		ES	$6.8 \pm 1.6$	$7.4 \pm 1.9$	$23.2 \pm 3.0$	$21.6 \pm 5.5$
Cavity	short axis	ED	$31.6 \pm 4.2$	$32.1 \pm 7.0$	$47.3 \pm 12.3$	$40.5 \pm 11.3$
		ES	$33.7 \pm 4.0$	$32.0 \pm 6.0$	$47.7 \pm 10.2$	$37.8 \pm 7.9$
	long axis	ED	$24.2 \pm 4.2$	$25.6 \pm 6.3$	$39.6 \pm 10.8$	$34.0 \pm 12.3$
		ES	$22.2 \pm 3.2$	$24.2 \pm 4.5$	$28.0 \pm 3.7$	$29.3 \pm 7.2$

S/N of FLASH in patients decreased significantly as compared with healthy volunteers except ES in long axis while S/N of True FISP did not change between the volunteers and the patients.

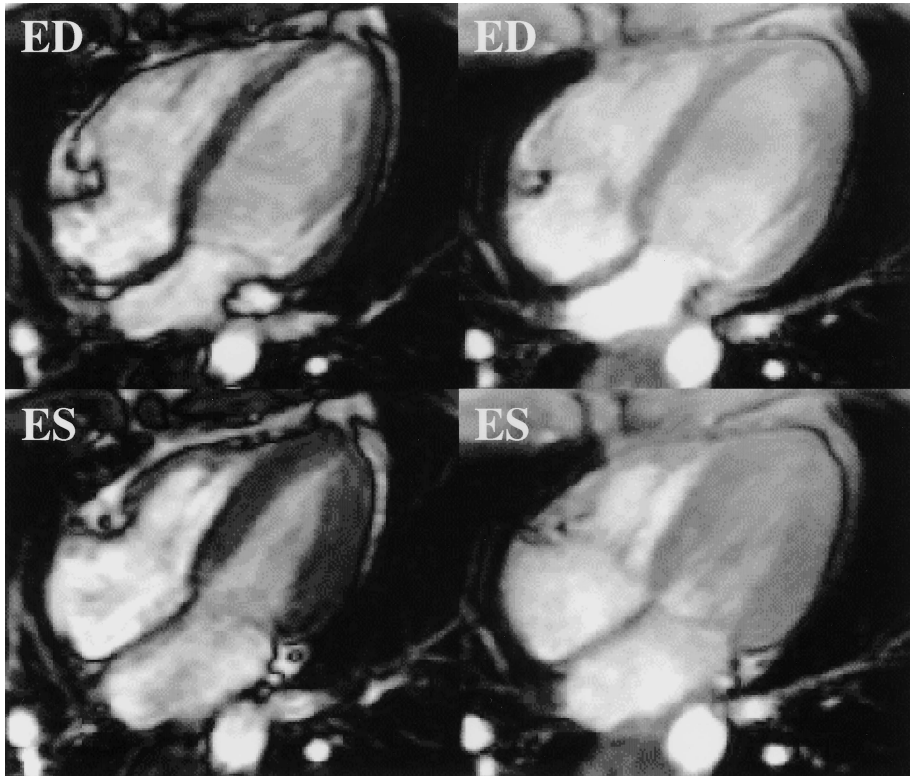


Fig. 2. Long axis view of a healthy volunteer (30-year-old)  
True FISP (left panel) shows high contrast between blood and myocardium at both ED and ES. On the other hand, FLASH (right panel) shows high contrast at ED but low contrast at ES.

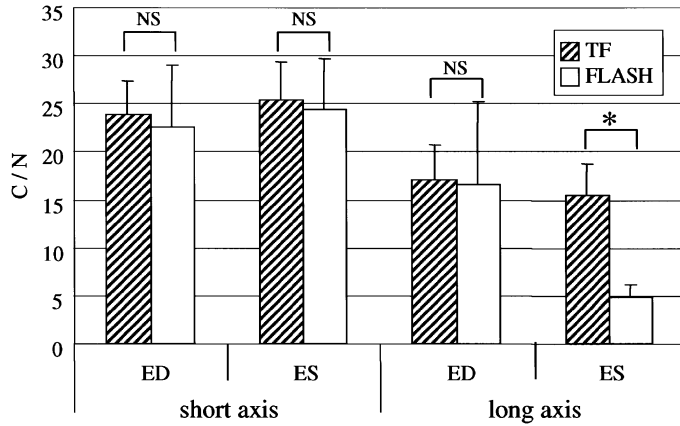


Fig. 3. Comparison of C/N between True FISP (TF) and FLASH in healthy volunteers (n=10)  
C/N of FLASH at ES of long axis is significantly lower than that of True FISP (\*P<0.01).

FISP の C/N が FLASH よりも有意に (P < 0.01) 高くなった (Figs. 2, 3). 一方, 心機能が低下した症例ではすべての項目で, True FISP の C/N が FLASH よりも有意に (P < 0.01) 高くなった (Figs. 4, 5).

### 考 察

心臓 cine MRI において, True FISP では FLASH に比べて, 内腔心筋コントラスト (C/N) の高い画像が得られることが報告されている<sup>5)</sup>が, 心機能低下例における True FISP の有用性についてはまとまった報告がない. そこで本研究では心機能が低下した症例における True FISP の有用性を検討した. その結果, True FISP は心機能低下症例においても健常例と同様に高い内腔心筋 C/N を有することが示された. 今回の内腔心筋 C/N の結果を健常例と心機能低下症例の全体の平均として評価すると, True FISP の短軸で 24.1, 長軸で 16.9, FLASH の短軸で 20.4, 長軸で 9.9 となる. これは, True FISP の内腔心筋 C/N が, 短軸でも長軸でも共に FLASH に比べて高くなった

論文<sup>5)</sup>の結果と同じ傾向である. 高い内腔心筋 C/N は半自動 segmentation の精度を高める<sup>5)</sup>ので, 心臓 cine MRI による心機能評価の適応を拡大すると期待される.

MRI では一般に, 信号強度は撮像因子 (FA, TE, TR) と組織特有の物理特性 (プロトン密度, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) に依存する. しかし, SSFP においては resonance offset angle (引き続いて照射する二つの RF パルスの間に変化するスピンの歳差運動の位相角) にも依存する. そして resonance offset angle は磁場の不均一性や傾斜磁場の不完全な refocus によって変化し, banding artifact の原因になる<sup>7)</sup>. 磁場の不均一性は高磁場ほど強くなる傾向があるため, True FISP は当初 0.2T の低磁場装置における高速撮像法として用いられてきた<sup>8),9)</sup>. しかし傾斜磁場の性能の向上により TR/TE が著しく短縮され, その結果磁場不均一性に伴う resonance offset angle が小さくなり, 高磁場装置においても artifact の少ない画像が得られるようになった. 例えば, 本研究で使用した装置の主磁場の均一性は 0.06 ppm (直径 300 mm の球状領域) であるが, TR = 3.6 ms とす

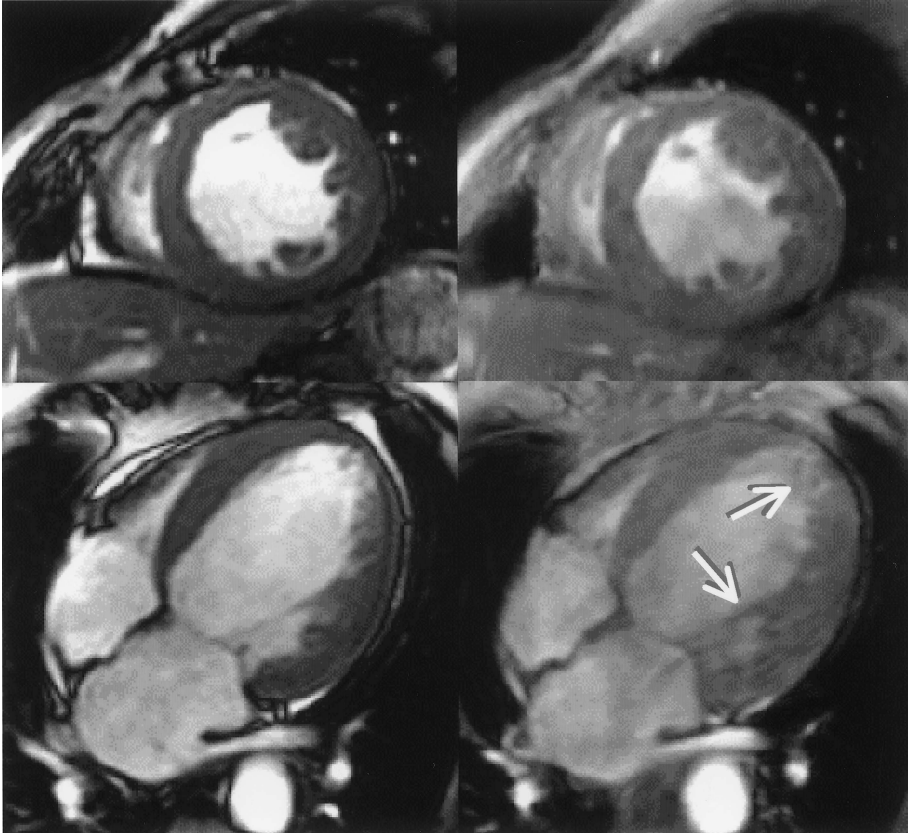


Fig. 4. Short (top) and long (bottom) axis views of a patient with dilated cardiomyopathy (69-year-old male, percent fractional shortening : 13%) True FISP at ES (left panel) showed high contrast between blood and myocardium in both short and long axis views. FLASH at ES (right panel) showed low contrast, resulting in unclear border between blood and myocardium especially in long axis view (arrow).

ると resonance offset angle は約  $10^\circ$  となり無視できる。ただし、被写体が入った場合に生じる磁化率効果によって磁場不均一性が大きくなり、例えば横隔膜周辺では resonance offset angle は上記の計算値 (約  $10^\circ$ ) よりも著しく大きくなり、banding artifact を生じる場合がある。また、傾斜磁場の refocus が不完全であれば大きな resonance offset angle を生じるが、この問題も傾斜磁場の性能の向上により改善した。このように高磁場装置で SSFP が可能になったのは傾斜磁場の性能の向上に負うと

ころが大きい。

SSFP の信号強度式<sup>7),10)</sup>は、TR が  $T_1$  や  $T_2$  に比べて十分短く、かつ  $T_2$  が  $T_1$  に比べて十分短い条件下では、近似的に、

$$S = k \cdot M_0 \cdot f(\theta) \cdot (T_2/T_1) \quad \dots\dots\dots(2)$$

となり、信号 (S) は磁化の大きさ ( $M_0$ ) と  $T_2/T_1$  に比例する。ただし、k は定数、 $\theta$  は flip angle である。磁場強度 1.5T における動脈血の  $T_1$  (1262 ms)<sup>11)</sup> と  $T_2$  ( $T_2^* = 241$  ms)<sup>12)</sup>、心筋の  $T_1$  (995 ms)<sup>11)</sup> と  $T_2$  (68

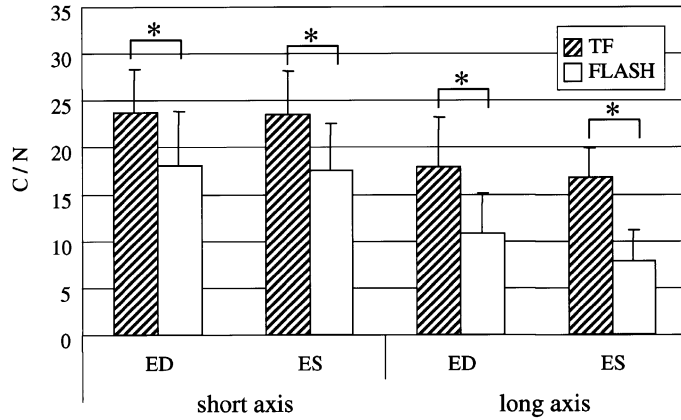


Fig. 5. Comparison of C/N between True FISP (TF) and FLASH in patients with poor cardiac function (n=12)  
C/N of True FISP is significantly higher than that of FLASH in each situation (\*P<0.01).

ms)<sup>11)</sup>より  $T_2/T_1$  を求めてみると、血液は 0.19、心筋は 0.07 となる。ゆえに、内腔（血液）と心筋の信号強度比は 2.8 となる。今回のデータから True FISP における内腔と心筋の信号強度比は短軸で 3.9~4.3、長軸で 3.3~3.5 となったが (Table 2)、これらは  $T_1$  と  $T_2$  から計算した値 (2.8) に近い。このことは、式(2) が大体成り立っていることを示唆している。また、長軸に比べて短軸の信号強度比が大きくなった結果は、短軸では流入効果により内腔の信号強度が増強したことを示唆する。

本結果において、True FISP の S/N は FLASH に比べて低くなった。しかし本質的に True FISP の S/N が低いわけではなく、使用撮像条件のバンド幅が True FISP (975 Hz/pixel) では FLASH (195 Hz/pixel) の 5 倍であったため、S/N が低くなったと考えられる。仮に True FISP のバンド幅を FLASH と同じにしたとすると、True FISP の S/N は本結果の  $\sqrt{5}$  倍となり、内腔では FLASH よりも S/N が高くなる。ただし True FISP のバンド幅を 195 Hz/pixel にすると、TR が 7.7 ms、TE が 3.85 ms に延長するため得策とは言えない

Table 2. Signal Intensity Ratio ( $S_{cavity}/S_{myo}$ ) in True FISP Cine

		True FISP	
		volunteers	patients
short axis	ED	4.3±0.9	4.0±0.6
	ES	4.1±0.8	3.9±0.8
long axis	ED	3.5±0.8	3.4±0.6
	ES	3.4±1.0	3.3±0.4

$S_{cavity}/S_{myo}$  in long axis was lower than that in short axis.

い。

内腔と壁（心筋）の境界の鮮明さは、True FISP では FLASH に対して少なくとも内腔と心筋の C/N に比例して上昇するはずである。なぜなら、FLASH では壁際や肉柱に挟まれた停滞血流の信号が低下するのに対して、True FISP では壁際まで高信号を示すからである。そのため、True FISP では C/N 以上に鮮明さの向上が期待される<sup>13)</sup>。

本研究における誤差要因として最大のものは、信号強度が表面コイルからの距離に依存す

る点である。また、被験者の息の吸い方や心拍動により心筋や内腔の位置が変わるため、必ずしも ROI の場所が同一位置でない、心内腔の ROI は短軸と長軸で見ている領域が異なる点も挙げられる。また、True FISP の撮像において、健常例では flip angle (FA) に  $70^\circ$  を使用したが、症例では SAR (specific absorption rate) の制限から、健常例より平均で約  $2^\circ$  小さい FA ( $60\sim 70^\circ : 67.8 \pm 3.1$ ) を使用した。我々は健常例において心内腔の S/N ( $S_{cavity}$ ) と心筋の S/N ( $S_{myo}$ ) の FA 依存性を検討した。その結果、 $S_{cavity}$  は  $10^\circ$  から  $70^\circ$  まで単調に増加したのに対して、 $S_{myo}$  はほぼ一定であった<sup>14)</sup>。このことから症例でも健常例と同じ FA を用いると、症例の True FISP による内腔心筋 C/N は本研究結果よりも若干高くなった可能性がある。

今回検討した True FISP では FLASH の約半分の撮像時間で高い内腔心筋 C/N が得られ、心機能が低下した症例で有用であることが示された。更に高い slew rate の傾斜磁場をもった装置において TR/TE の短い True FISP で撮像すれば、息止め時間を短縮できるのみならず banding artifact や flow void の少ない、より良好な画像を得ることができると期待される。

## 文 献

- Higgins CB, Holt W, Pflugfelder P, Sechtem U : Functional evaluation of the heart with magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med* 1988 ; 6 : 121-139
- Bluemke DA, Boxerman JL, Atalar E, McVeigh ER : Segmented k-space cine breath-hold cardiovascular MR imaging : part 1. principles and technique. *AJR* 1997 ; 169 : 395-400
- Stillman AE, Wilke N, Jerosch-Herold M : Use of an intravascular T<sub>1</sub> contrast agent to improve MR cine myocardial-blood pool definition in man. *J Magn Reson* 1997 ; 7(4) : 765-767
- Fang W, Pereles FS, Bundy J, Kim R, Wu E, Simonetti O, Finn P : Evaluating left ventricular function using real-time TrueFISP : a comparison with conventional MR techniques (abstr). *Proc Magn Reson Med* 2000 ; 308
- Barkhausen J, Ruehm SG, Goyen M, Buck T, Laub G, Debatin JF : 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 (1) : 264-269
- 千田彰一, 舩形 尚. 心内径・心腔容積・収縮機能の測定. 循環機能検査ハンドブック (総編 北畠 顕). 東京 : 中山書店, 1998 ; 171-177
- Haacke EM, Brown RW, Thompson MR, Venkatesan R. *Fast imaging in the steady state: Magnetic resonance imaging physical principles and sequence design*. USA : Wiley-liss, 1999 ; 467-482
- Duerk JL, Lewin JS, Wendt M, Petersilge C : Remember true FISP? A high SNR, near 1-second imaging method for T<sub>2</sub>-like contrast in interventional MRI at 0.2T. *J Magn Reson* 1998 ; 8 (1) : 203-208
- Lewin JS, Connell CF, Duerk JL, Chung YC, Clampitt ME, Spisak J, Gazelle GS, Haaga JR : Interactive MRI-guided radiofrequency interstitial thermal ablation of abdominal tumors : clinical trial for evaluation of safety and feasibility. *J Magn Reson* 1998 ; 8(1) : 40-47
- Oppelt A, Graumann R, Barfuß H, Fischer H, Hartl W, Schajor W : FISP—a new fast MRI sequence. *Electromedica* 1986 ; 54 : 15-18
- Tadamura E, Hatabu H, Li W, Prasad PV, Edelman RR : Effect of oxygen inhalation on relaxation times in various tissues. *J Magn Reson* 1997 ; 7 : 220-225
- Chien D, Levin DL, Anderson CM : MR gradient echo imaging of intravascular blood oxygenation : T<sub>2</sub>\* determination in the presence of flow. *Magn Reson Med* 1994 ; 32 : 540-545
- Barkhausen J, Ruehm SG, Goyen M, Truemmler KH, Laub G, Debatin JF : MR evaluation of ventricular function: True FISP versus FLASH (abstr). *Proc Magn Reson Med* 2000 ; 1577

- 14) 本岡真琴, 山田直明, 佐久間利治, 堀 祐朗, True FISP による心臓 cine : 最適パラメータの  
平井伸彦, 浦山慎一, 飯田秀博, 高宮 誠 : 検討. 日磁医誌 2000 ; 20(Suppl) : 120

## Usefulness of True FISP Cine MR Imaging in Patients with Poor Cardiac Function

Toshiharu SAKUMA<sup>1</sup>, Naoaki YAMADA<sup>1</sup>, Makoto MOTOOKA<sup>1</sup>,  
Naoyuki ENOMOTO<sup>1</sup>, Isamu MAESHIMA<sup>1</sup>, Kazuhide MATSUDA<sup>1</sup>,  
Shinichi URAYAMA<sup>2</sup>, Miki IKEO<sup>1</sup>

*Department of <sup>1</sup>Radiology and <sup>2</sup>Investigative Radiology, National Cardiovascular Center  
5-7-1 Fujishiro-dai, Suita, Osaka 565-8565*

This study was done to assess the value of True FISP cine in patients with poor cardiac function. True FISP cine and FLASH cine imaging were performed on a 1.5T machine. Both short axis and horizontal long axis imaging sections were used. The imaging sections used a Matrix (120×128), FOV (24×32 cm), and had a slice thickness of 8 mm. The imaging time for True FISP cine was 8 heart beats and 17 heart beats for FLASH cine. The contrast-to-noise ratio between the blood and myocardium (CNR) was measured at enddiastole and endsystole.

The subjects in the study were 10 healthy volunteers (average age 26.5±3.2 years) and 12 patients with hypofunction (average age 53.9±13.2 years). In the volunteers, the CNR of the short axis imaging was similar in both True FISP (24.6±3.7) and FLASH (23.4±5.9). In the patients with poor cardiac function however, the CNR of True FISP was larger than FLASH in both the short and long axis. In the short axis (22.7±6.1 vs. 17.9±5.3, P<0.01) and in the long axis (17.4±4.3 vs. 9.3±4.0, P<0.01). We conclude that True FISP cine has a higher contrast in a shorter imaging time than FLASH cine. True FISP cine is especially useful in patients with poor cardiac function.