

磁気共鳴映像法による心腔
および血管内の血流の画像
化

Flow imaging of the
cardiovascular system
using magnetic reso-
nance imaging

今井 均
榊原 誠
角南 祐子
吉田 勝哉
西本 良博
田口喜代継
渡辺 滋
宿谷 正毅
増田 善昭
稲垣 義明

Hitoshi IMAI
Makoto SAKAKIBARA
Yuko SUNAMI
Katuya YOSHIDA
Yoshihiro NISHIMOTO
Kiyotsugu TAGUCHI
Shigeru WATANABE
Masaki SYUKUYA
Yoshiaki MASUDA
Yoshiaki INAGAKI

Summary

Blood flow images by magnetic resonance imaging (MRI) using a 0.25 T unit were evaluated for nine normal volunteers and 108 subjects with a variety of cardiovascular abnormalities.

Using the non-gated short-spin echo (SE) technique, blood flow in the cardiovascular systems was not imaged in the normal volunteers. Using end-systolic and end-diastolic SE techniques for the normal subjects, blood flow in the cardiac chambers was not clearly imaged. Blood flow in the ascending aorta and aortic arch often did not appear in the gated SE images of the normal subjects. However, blood flow in the descending aorta was often observed in the gated SE images. Blood flow imaging was demonstrated by both non-gated and gated SE techniques in regions where blood flow was relatively slow; for example, in the left atrium of mitral stenosis, in an aortic aneurysm, in a false lumen of an aortic dissection, and in the left ventricle having old myocardial infarction.

Using the non-gated inversion recovery (IR) technique, no blood flow was imaged in the cardiovascular system except in the left atrium of one case with mitral stenosis. Using the non-gated short SE technique, there was good correlation between the thrombus formation and the presence of blood flow images in the left atria of 17 patients with mitral stenosis, and in the aneurysmal portions of the aorta or in the false lumens of aortic dissection of 18 patients. It was suggested that mural thrombi in such diseases were related to the relatively slow blood flow. Blood flow imaging easily distinguished stagnant blood flow from mural thrombi using non-gated short SE, end-systolic SE, and IR techniques.

千葉大学医学部 第三内科
千葉市亥鼻 1-8-1 (〒280)

The Third Department of Internal Medicine, Chiba
University School of Medicine, 1-8-1 Inohana,
Chiba 280

Received for publication August 21, 1987; accepted November 2, 1987 (Ref. No. 30-21)

Thus, blood flow imaging using MRI should become an important means of evaluating the cardiovascular system.

Key words

Magnetic resonance imaging (MRI) Flow imaging Myocardial infarction Mitral stenosis
Aortic aneurysm

はじめに

NMR (nuclear magnetic resonance) が生体の血液測定に有用であることは古くから指摘されていたが^{1,2)}, 最近では MRI (magnetic resonance imaging) による血流の画像化が試みられるようになった³⁾. すなわち静止血液では血液自体の NMR 信号が検出されるのに対して, 高速で流れる血液は NMR 信号を失い, 低(無)信号となるため高信号の心筋壁や血管壁と容易に区別できる. このさい約 8 cm/sec 以下の低速の流体は中等度の NMR 信号を持ち⁴⁾, いわゆる血流画像⁵⁾ (blood flow imaging) として検出できる. しかし現在のところ, これに関する臨床例の報告はまだ少ない^{6,7)}. そこで今回, 我々は超伝導 MR 装置を使用し, 心腔および血管内の血流画像についてその臨床的意義を検討した.

方 法

1. 装 置

MR 装置はピッカー製 0.25 テスラの超伝導タイプを使用した. 装置の主な仕様を **Table 1** に示す.

2. 対 象

対象は健常者 9 例 (男 9 例, 平均年齢 29 歳), 心筋梗塞 25 例 (男 24 例, 女 1 例, 平均年齢 60 歳), 僧帽弁狭窄症 17 例 (うち 12 例に僧帽弁閉鎖不全症を合併: 男 2 例, 女 10 例, 平均年齢 56 歳), 大動脈弁狭窄症および閉鎖不全症 5 例 (男 2 例, 女 3 例, 平均年齢 66 歳), 先天性心疾患 17 例 (男 8 例, 女 9 例, 平均年齢 42 歳), 大動脈瘤 12 例 (男 11 例, 女 1 例, 平均年齢 67 歳), 解離性大動脈瘤 6 例 (男 5 例, 女 1 例, 平均年齢 56 歳),

Table 1. Specifications of the imaging system (Picker International)

Magnet	0.25 Tesla, superconducting
Mode of image	Spin echo method Spin echo imaging Inversion recovery imaging T ₁ imaging, T ₂ imaging Coronal, sagittal, transverse
Image reconstruction	2-dimensional Fourier transform
Pixels	128×128, 256×256
Slice	Single, multiple (4, 8, 16)
Slice thickness	10 mm
Spatial resolution	1-2 mm
Cardiac gating	ECG

その他 21 例 (男 15 例, 女 6 例, 平均年齢 53 歳) の合計 117 例であった.

3. 撮像法

被験者は MR 装置内に安静仰臥位を保ち, 呼吸は平常呼吸をさせた.

パルス系列による撮像方法: 心拍非同期法による spin echo (SE) では, T₁ 強調画像として繰り返し時間 (repetition time: Tr) 300 ミリ秒, エコー時間 (echo time: TE) 24 ミリ秒を使用した (300/24 と表記し, これを short SE とした). なお本機器では Tr は 300 ミリ秒, TE 24 ミリ秒が最低値である. T₂ 強調画像としては SE 1500/60, 1500/40 を用いた (これらを long SE とした). ECG 心拍同期法を **Fig. 1** に示す. 心拍同期 SE 法では R 波をトリガーにし, R 波の頂点を拡張末期 (ED), T 波の頂点を収縮末期 (ES) とした. 心拍同期法では Tr は被験者の RR 間隔により定まる値 (約 600 より 1000 ミリ秒) であり, TE は 40 または 60 ミリ秒を用いた. すなわち, この条件

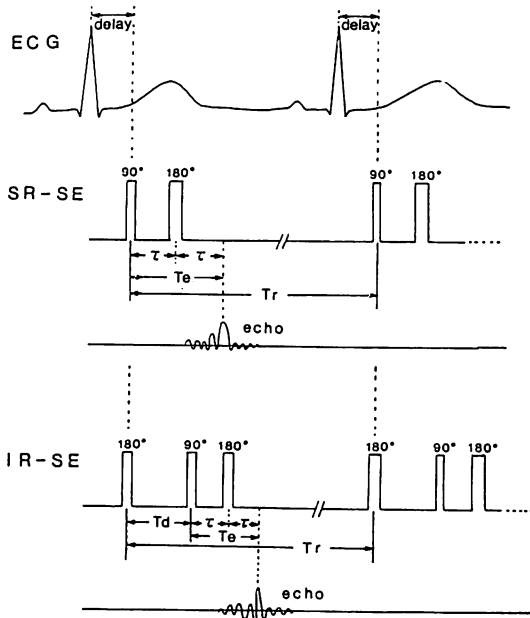


Fig. 1. ECG-gating method and pulse sequence.

では、心拍同期はトリガーの T_e 時間後に約 10 ミリ秒の範囲で画像データを収集している。Inversion recovery (IR) 法では T_r は 1500、待ち時間は 500 または 600 ミリ秒を主に用いた。スライスはシングルスライスを使用し、マルチスライスは、他断面の血流信号が血流画像として影響を及ぼすため、使用しなかった。撮像時間は 1 スライスあたり約 2~6 分であった。撮像方向は横断像を主とし、必要により縦断像を加えた。血流画像とは、心腔および血管腔内に体動および器械によるアーチファクトおよびバックグラウンドによるノイズを除外し、有信号の画像が表われることであるが、その信号強度については心血管壁の MR 信号と同等あるいはそれ以上を高信号、心血管内のわずかな有信号を低信号、両者の中間を中等度信号とした。また血栓との区別は後述の方法によった。得られた画像における血流画像の有無の判定については、MRI 診断に熟練した 3 名の医師の多数決により決定した。

結 果

1. 正常例における心大血管の MR 血流画像

心拍非同期 SE 像 (300/24) において、健常例では冠状断、横断、矢状断像のいずれの場合も、心腔および大血管内は無信号で、血流画像を認めなかった。

Fig. 2 左上, 右上 は 59 歳, 男性の例で、胸郭のほぼ中央の冠状断と横断の心拍非同期の SE (300/24) 像である。また、Fig. 2 左下, 右下 は 63 歳, 女性の例でそれぞれ下行大動脈の心拍非同期矢状断像と冠状断像であり、いずれの例でも心腔、血管腔は一樣に黒く、白で示される高信号の血流画像を認めない。

心拍同期法は健常者 9 例中全例で拡張末期、収縮末期いずれにおいても両心腔に血流画像は認めなかった。一方、下行大動脈では拡張末期でほぼ全例に、収縮末期で多数例に血流画像を認めた。しかし上行大動脈や大動脈弓部では多数例に血流画像を認めなかった。

Fig. 3 は 29 歳, 男性の心拍同期横断 SE 像で、Fig. 3 左 は収縮末期像、Fig. 3 右 は拡張末期像である。収縮末期、拡張末期のいずれにおいても、両心室内と両心房内には血流画像を認めない。また収縮末期の下行大動脈内は血流画像を認めないが、拡張末期の下行大動脈内は白い血流画像を認める。

2. 各種心血管疾患における血流画像

心腔および血管内に血流停滞があると考えられるいくつかの疾患では、それぞれの病態の特徴を示すと思われる血流画像が認められた。すなわち心拍非同期 SE (300/24) 像で、僧帽弁疾患 17 例中 8 例に左房内の血流画像が認められた。心拍同期 SE 像で心筋梗塞 25 例中 5 例の収縮末期および拡張末期像で、梗塞部に近い左室内に著明な高信号の血流画像がみられた。

Fig. 4 は陳旧性、広範囲前壁心筋梗塞で、左室瘤を合併する 74 歳の男性例である。左上隅 1 より 10 までは、R 波より 90 ミリ秒毎に撮像した心

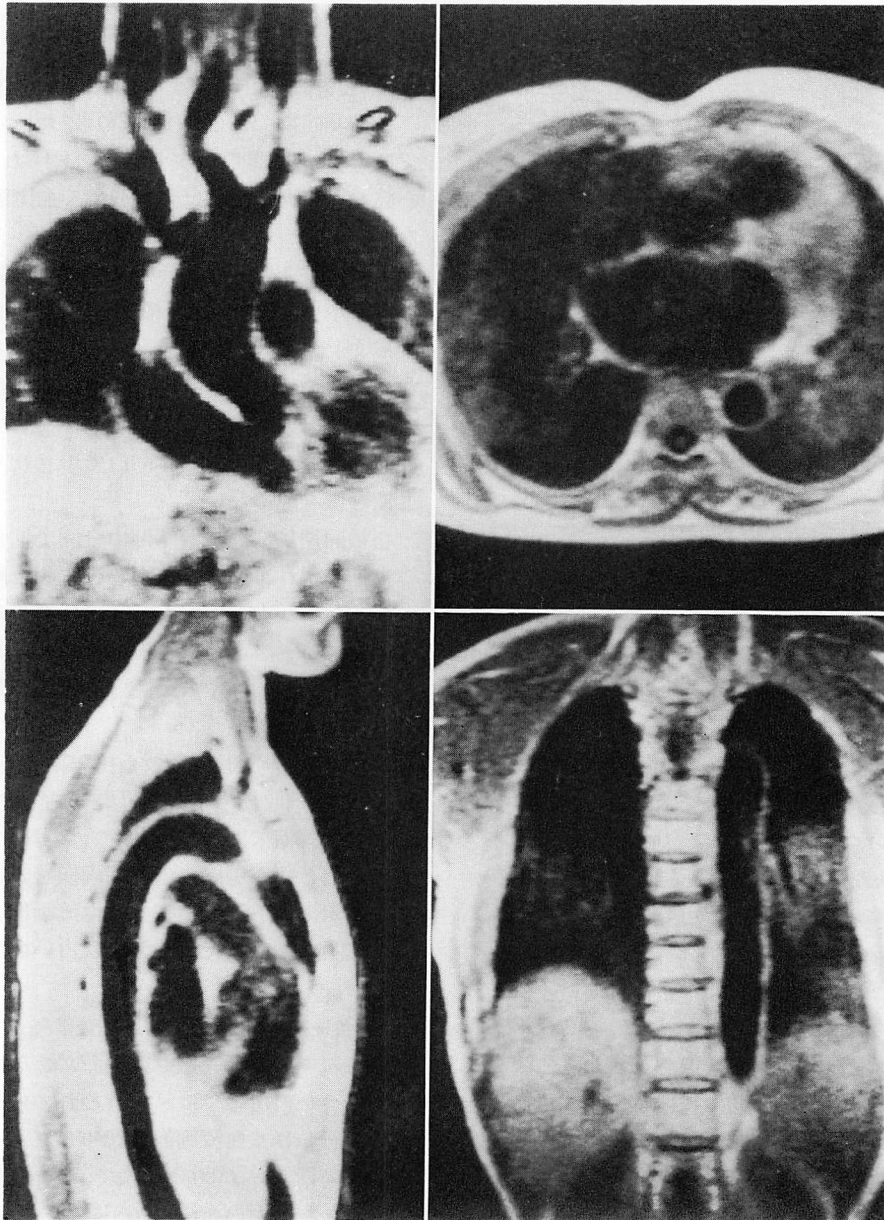


Fig. 2. Non-gated short SE images of normal subjects.

No blood flow is imaged in the cardiovascular system of these 2 normal subjects.

a (top left): coronal image through midthorax.

b (top right): transverse image of the left atrium.

c (bottom left): sagittal image of the descending aorta.

d (bottom right): coronal image of the descending aorta.

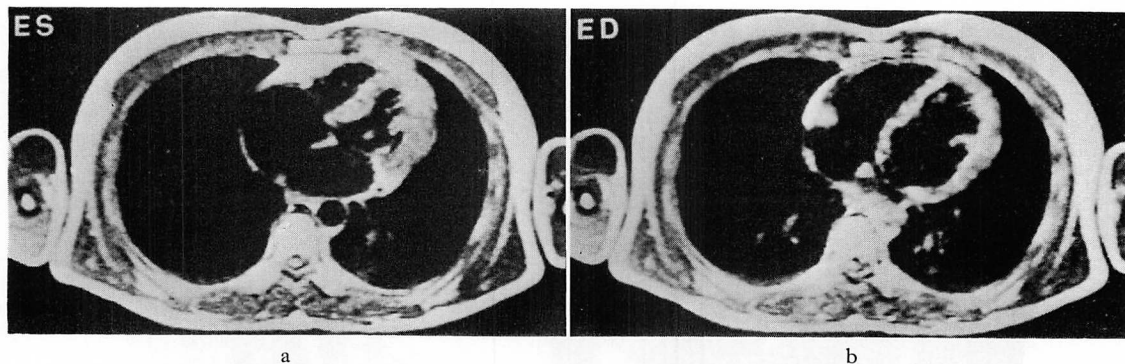


Fig. 3. Gated SE images.

Blood flow is not imaged in all four chambers both in end-systolic (left: ES) and end-diastolic (right: ED) phases. However, blood flow is imaged in the descending aorta in the end-diastolic phase.

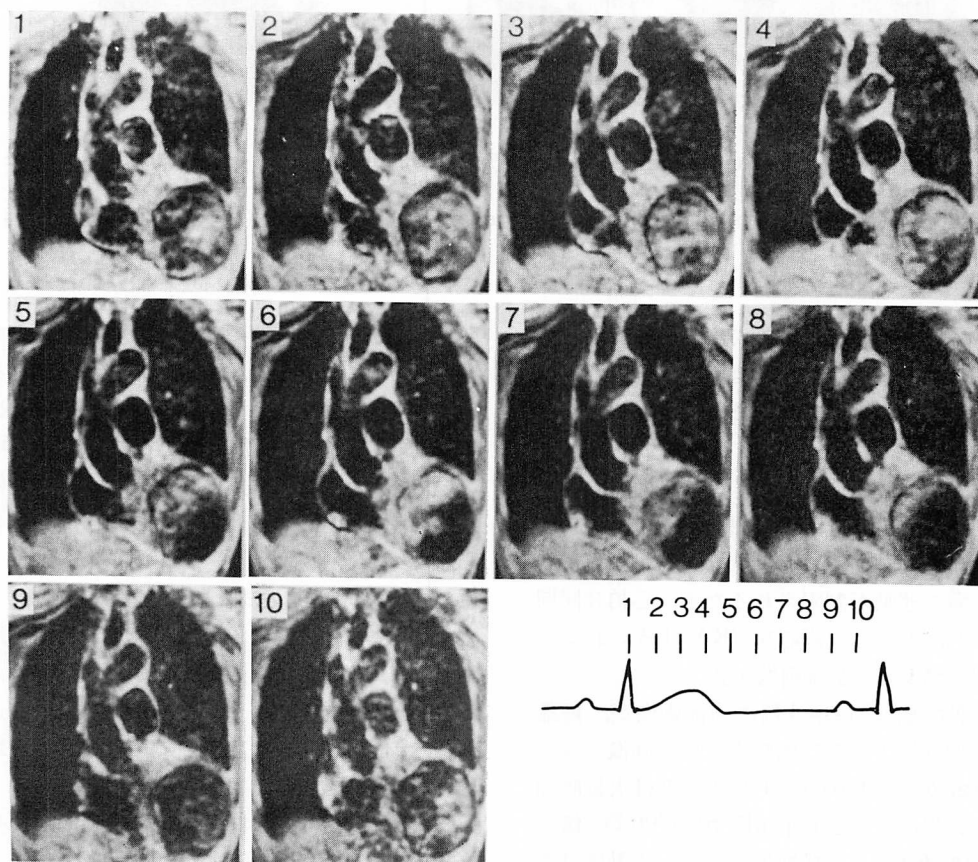


Fig. 4. Gated SE coronal images through the midthorax in a case with old myocardial infarction.

Each image represents one of many sequential phases in the cardiac cycle. The intervals between the images are 90 msec. Note the variable signal intensity pattern in the left ventricle.

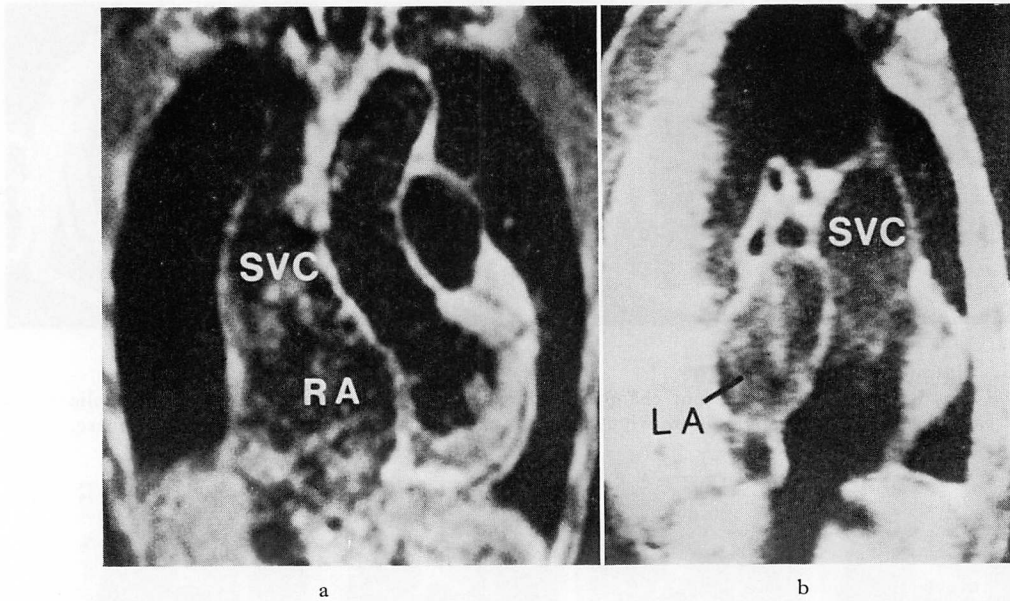


Fig. 5. Non-gated coronal (left) and sagittal (right) SE images in a case with constrictive pericarditis.

Note blood flow images in the dilated right atrium (RA), left atrium (LA), and superior vena cava (SVC).

拍同期法による冠状断 SE 像である。菲薄化した前壁近くの左室内に著明な高信号の血流画像が存在し、それが心周期につれて移動していることが示されている。

Fig. 5 は収縮性心膜炎の 72 歳の男性における心拍非同期 SE (300/24) 像である。**Fig. 5** 左は冠状断, **Fig. 5** 右は矢状断像である。心膜が石灰化し心臓の運動が制限されるため, 心拍非同期 SE 像でも, 拡大した両心房 (RA, LA), および上大静脈 (SVC) に血流画像を認める。

また大動脈瘤 12 例中 3 例に血流画像が, 解離性大動脈瘤 6 例中全例に偽腔内に血流画像がみられた。**Fig. 6** は DeBakey I 型の解離性大動脈瘤例 (71 歳, 男性) の心拍非同期 SE (300/24) 像である。**Fig. 6** 左上の横断像では上行大動脈は拡張し, 剝離内膜によって, 前壁側の血流画像を有する偽腔 (F) と後壁側の無信号の真腔 (T) に区別されている。また下行大動脈は拡張し, 左側の

偽腔内では, 後壁側に高信号の血栓 (th), 血栓の前側より中程度の信号の血流画像を認める。これは偽腔の血流が停滞しているためと考えられる。また **Fig. 6** 左下の冠状断像と **Fig. 6** 右の矢状断像でも真腔は無信号であり, 一方, 偽腔内には中程度の信号の血流画像および高信号の血栓を認める。

3. MRI と超音波法による血流画像の比較

陳旧性心筋梗塞の左室瘤内に心拍非同期 SE (300/24) 像または同期像で血流画像を認めた例では, 超音波カラー Doppler 法で左室瘤内に Doppler 信号を認めないため, 比較的緩慢な血流が存在すると考えられた。

Fig. 7 は 46 歳男性の陳旧性広範囲前壁心筋梗塞例で, 90 ミリ秒毎の心拍同期像により, 左室瘤内にみられた血流画像である。また, 僧帽弁狭窄症の超音波断層像でモヤモヤエコーの見られる左房拡大例には, すべて心拍同期 SE 像でも血

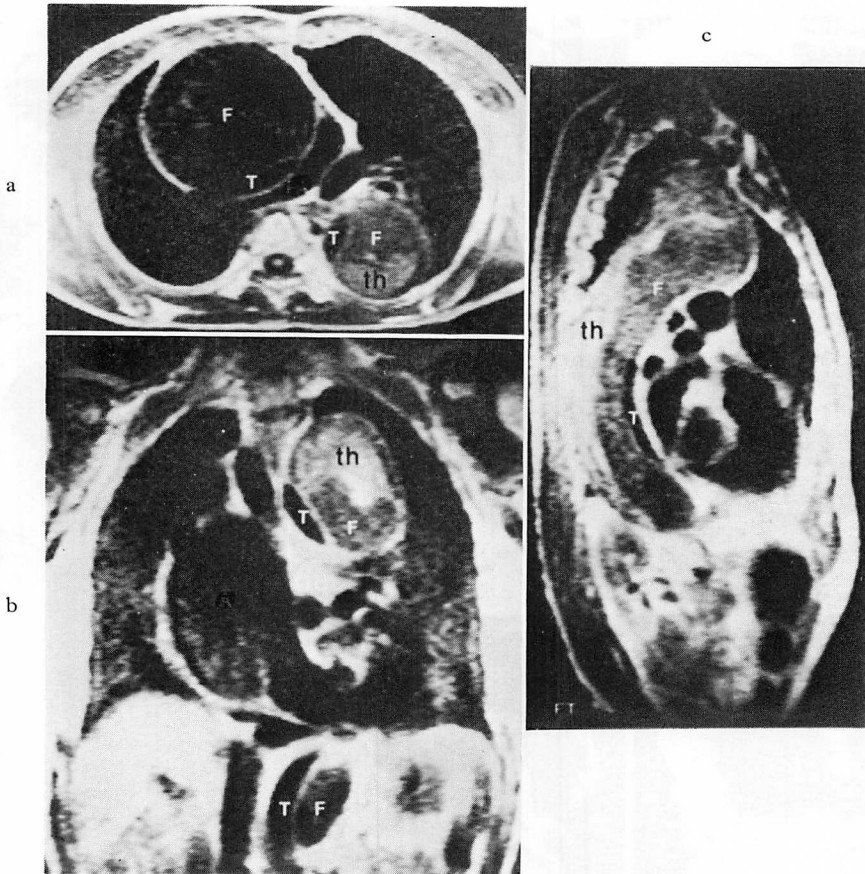


Fig. 6. Non-gated SE images of a case with dissecting aortic aneurysm.

Blood flow is not imaged in the true lumen (T), but is imaged in the false lumen (F) of the ascending and descending aorta. Note that signal intensity of mural thrombi (th) in the false lumen in each image is stronger than that of the blood flow signal of the false lumen (F).

a (top left): transverse image; b (bottom left): coronal image; c (right): sagittal image.

流画像を認めた。

4. 撮像条件による血流画像の差の検討

撮影条件の一つであるパルス系列により、血流画像の差を検討した。一般に血流画像は心拍非同期 SE 法の T₁ 強調画像 (SE 300/24) で認め難かったが、T₂ 強調画像 (SE 1500/24) で認められた 1 例があった。心拍同期 SE 法では、とくに拡張末期像で血流画像が認め易かった。IR 像では血流画像がもっとも認め難かった。

Fig. 8 は僧帽弁狭窄症例で心房細動、左房内

血栓を合併している 52 歳の女性の画像である。左房の同一レベルで、それぞれパルス系列の異なる矢状断像を示している。**Fig. 8** 左の SE 300/24 では、左房の後壁側に高信号の血栓と、前壁側に低信号の血流画像を認める。**Fig. 8** 中央の SE 像 1500/40 では、左房は全域高信号のため血栓は不明である。**Fig. 8** 右の IR 像は、三者中、一番 T₁ が強調されている像で、左房に高信号の血栓を認めるが、血流画像を認めない。

Fig. 9 は解離性大動脈瘤例の下行大動脈の矢

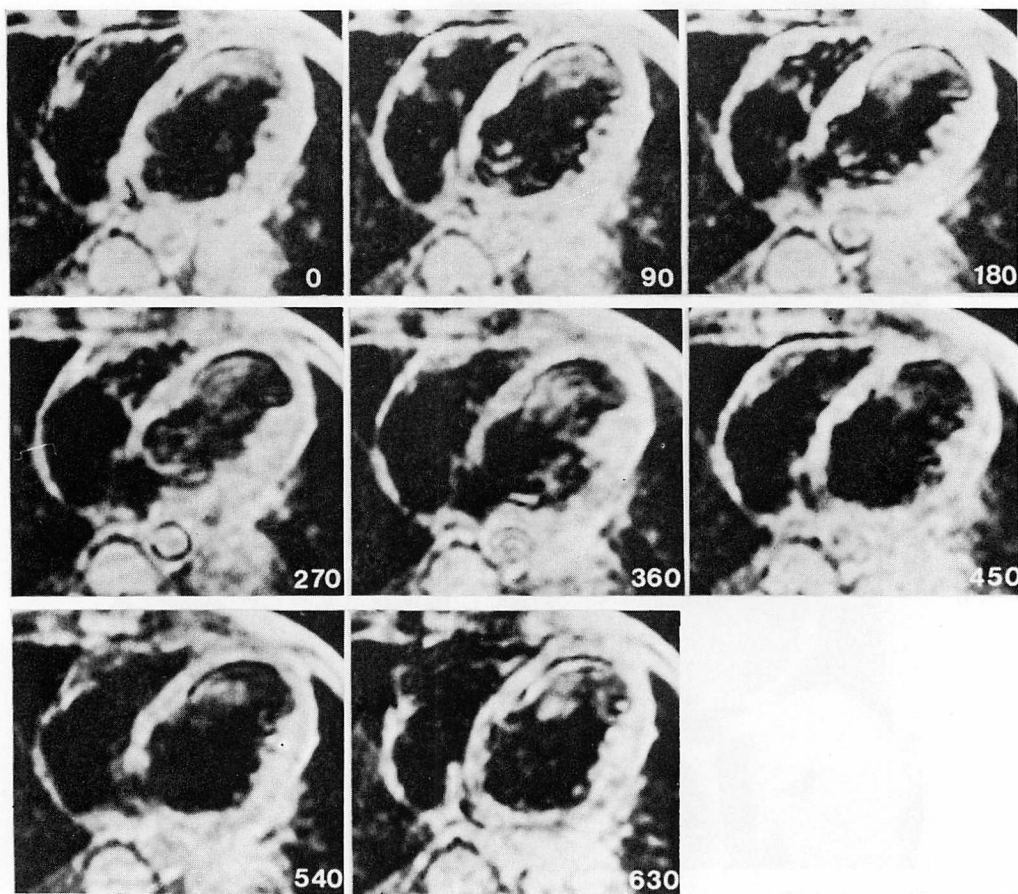


Fig. 7. Gated SE transverse images in a case with old myocardial infarction.

The number of each image represents time delays in msec in the cardiac cycle. Note the variation in signal intensity pattern in the left ventricle.

状断像で、**Fig. 6** と同一例である。**Fig. 9** 左の SE 像 300/24 では下行大動脈に高信号の血栓、血栓より低信号の偽腔、無信号の真腔が見られる。**Fig. 9** 中央の心拍同期 SE 像 (拡張末期) では偽腔の血流の信号は増強し、血栓と逆転している。**Fig. 9** 右の IR 像では偽腔は無信号となり、血栓の境界が明瞭である。

Fig. 10 は解離性大動脈瘤 (DeBakey IIIb 型)、51 歳男性例で、左室下部レベルの下行大動脈横断像である。**Fig. 10** 左上の心拍非同期 SE 像では、真腔の速い血流は無信号に、偽腔の遅い血

流と血栓は高信号となり、血流と血栓を明確に区別できない。**Fig. 10** 左下, 右下のそれぞれ拡張末期と収縮末期 SE 像でも、血流と血栓を明確に区別できない。しかし、**Fig. 10** 右上の IR 像では速い血流と遅い血流とも無信号となり、両者を区別できないが、血栓は高信号となり、血液とは区別できる。したがって、SE 像, IR 像の両者を併用すると、速い血流, 遅い血流, 血栓の区別が可能である。

5. 血流画像と血栓

血流画像は一般に血流の停滞すると考えられる

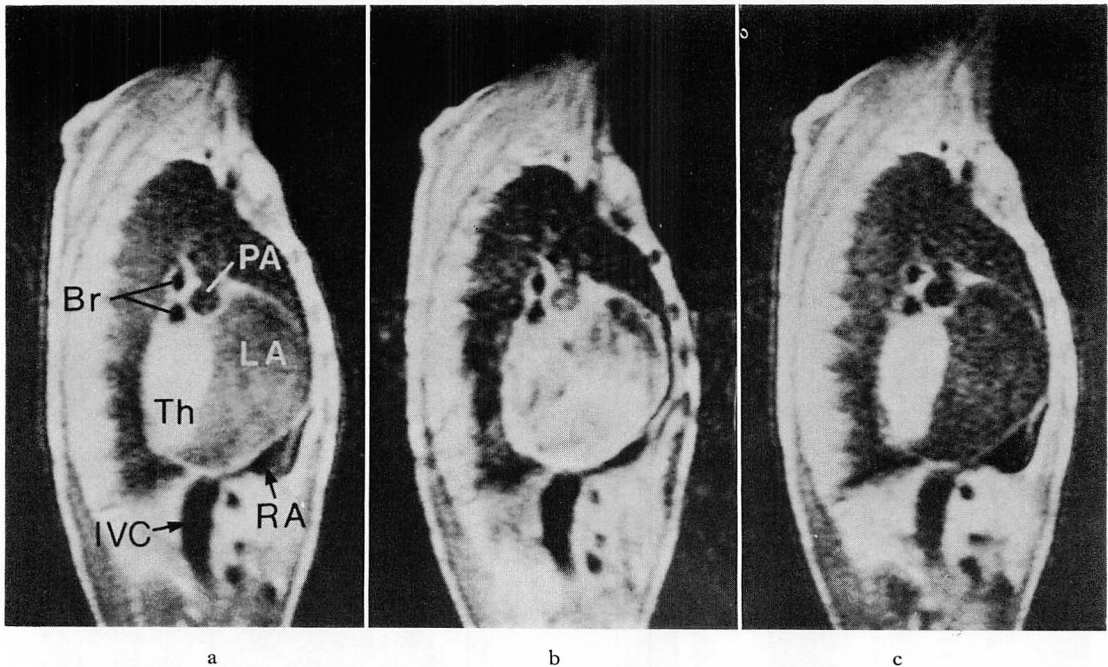


Fig. 8. Sagittal images of the left atrium in a case with mitral stenosis.

In the non-gated short SE image (a: left), signal intensity of blood flow in the enlarged left atrium is weaker than that of a mural thrombus (Br=bronchus; PA=pulmonary artery). In the non-gated long SE image (b: middle), the signal intensity of blood flow is nearly the same as that of the thrombus. In the non-gated IR image (c: right), no blood flow is imaged, though the thrombus is clearly shown.

部位に認められる傾向があったので、僧帽弁狭窄症、動脈瘤および解離性大動脈瘤について、SE 300/24 の条件で、血流画像と壁在血栓の関係を検討した。僧帽弁狭窄症 17 例中、左房内に血流画像を認めたものは 8 例で、このうち 5 例に血栓を合併していた。一方、血流画像を認めなかった 9 例では、血栓を合併している例はなかった。また動脈瘤および解離性大動脈瘤 18 例中、瘤内または偽腔内に血流画像を認めた 9 例ではすべて血栓を合併し、血流画像を認めなかった 9 例では、4 例で血栓を合併、5 例で血栓を合併していなかった (Table 2)。

考 察

MRI により得られる血流画像は CT 装置の機種、パルス系列、撮像のスライス方法など、また

流体の性状、速度、層流、乱流、流れの方向、流体周囲の影響などの原因⁸⁻¹²⁾によりそれぞれ異なり、その解釈は簡単ではない。今回我々は MRI の血流画像の意義を理解し、臨床診断に役立たせるために、健常および各種心血管疾患例に認められた血流画像の様子、パルス系列および血栓との関係について検討した。

流速信号に関する報告によれば、エコー時間内に励起したプロトンがスライス内より流出するため、流速信号は減弱あるいは消滅すると考えられている。また流速だけでなく、乱流のため、血流信号が減弱あるいは消滅することもあると報告されている。したがって、心拍非同期 SE による心血管腔あるいは収縮末期の心腔が無信号なのは、血流が速いため、あるいはそれに乱流が加わっているためと考えられた。しかし今回我々の得

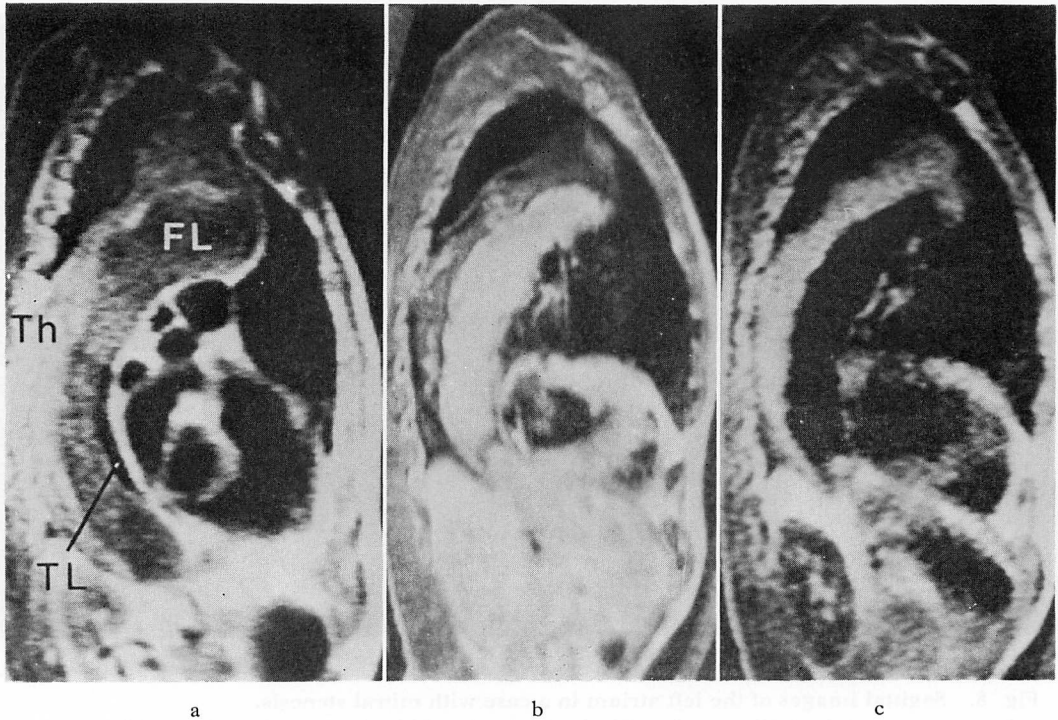


Fig. 9. Sagittal images of a case with dissecting aortic aneurysm through the center of the descending aorta.

In the non-gated short SE image (a: left), signal intensity of a mural thrombus (Th) is stronger than that of blood flow in the false lumen of the descending aorta, and no blood flow images in the true lumen are seen. In the gated SE image (b: middle), however, signal intensity of blood flow in the false lumen is stronger than that of the thrombus. In the true lumen, there is no such image. In the non-gated IR image (c: right), the signal intensity of the thrombus is greater, but the blood flow cannot be imaged in the false lumen. The true lumen is not shown in this image.

た拡張末期像は等容性収縮期を含んでおり、血流がきわめてゆるやかな時相であるため、この時相の両心室腔が無信号となるのは、血流速度の増大よりも、僧帽弁口や三尖弁口から流入する流れによる乱流の発生が影響すると考えられた。血流画像は血流の遅い場合に描出されたが、一般に流速が速いと思われる収縮末期の下行大動脈に血流画像を多く認めたことは、速度や乱流のほかの原因も考えられ、今後の検討が必要である。

IR 像では心拍同期および心拍非同期のいずれにおいても、僧帽弁狭窄症の左房内の1例を除いて、血流画像は認めなかった。IR 像で血流画像

を認める頻度が少ない理由は、パルスの待ち時間が長いと、ゆるやかな流れでも、MR 信号をもつ血液が流れ去ってしまうためと、たとえ血液が静止していても、血液の MR 信号は、パルスの待ち時間のときに、心血管壁や血栓の MR 信号より著明に減少するためである。したがって、IR 像は血流画像と血栓の区別に有用である。

また、血流画像と血栓形成の関係についてみると、僧帽弁狭窄症の左房内、大動脈瘤の瘤内および解離性大動脈瘤の偽腔内に、心拍非同期 SE 像で血流画像を認める例に血栓が多く認められ、血流停滞と血栓形成の関係が示され、一方、超音波

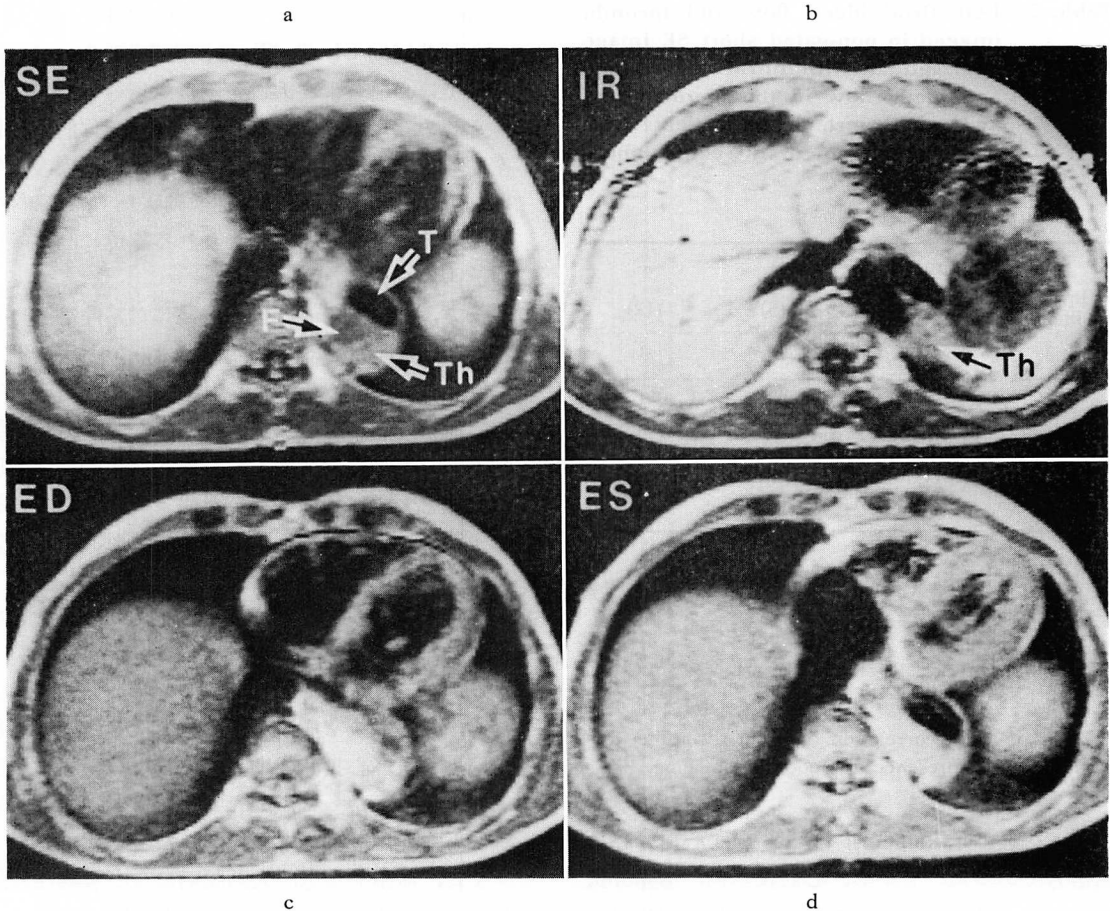


Fig. 10. Transverse images of a case with dissecting aortic aneurysm through the center of the left ventricle.

The false and true lumina of the descending aorta are not distinguished by the end-diastolic SE image (c: bottom left), but are easily distinguished by the non-gated short SE (a: top left) and the end-systolic SE image (d: bottom right). The blood flow image and thrombus formation in the false lumen may be distinguished by the nongated IR image (b: top right).

断層像で僧帽弁狭窄症のために拡大した左房拡大内にもややエコーの見られた例では、心拍非同期 SE 像で血流画像を認め、血液性状の変化も、血流画像に関係している可能性もあると思われた。いずれにせよ、MRI の心拍非同期 SE 像 (T1 強調画像) により血流画像の見られる部位には、何らかの意味で血栓が形成されやすい状態があると思われ、MRI は血栓予防等の治療時期の決定に役立つものと思われた。また血流画像と血栓の

鑑別に IR 像、心拍非同期 SE 像、心拍同期 SE 像の順に有効であった。

結 論

MRI による血流画像を評価するため、健常および各種循環器疾患 117 例について、心・大血管系の血流画像を検討した。

1. MRI により血流を反映する像が描出された。

Table 2. Left atrial blood flow and thrombi imaged in non-gated short SE image in 17 patients with mitral stenosis (top) and blood flow in the thoracic and abdominal aorta in 18 patients with aortic aneurysm or dissecting aneurysm (bottom)

1) Mitral stenosis (17 cases)			
Flow imaging \ Thrombi		+	-
		(5)	(12)
+	(8)	5	3
-	(9)	0	9

2) Aortic aneurysm and dissecting aortic aneurysm (18 cases)			
Flow imaging \ Thrombi		+	-
		(13)	(5)
+	(9)	9	0
-	(9)	4	5

There is good correlation between thrombus formation and the presence of blood flow imaging.

2. 一般に心拍非同期 SE 像では心血管腔は無信号であった。しかし、心筋梗塞例、僧帽弁狭窄症例、大動脈瘤および解離性大動脈瘤例で血流の停滞する部分には、血流画像を認めた。心拍同期 SE 像では、心拍非同期 SE 像より容易に心血管腔の血流画像を認めた。

3. SE 像と IR 像の併用により、血流と血栓を区別できた。

4. 僧帽弁狭窄症例、大動脈瘤および解離性大動脈瘤例では、血流画像を認める時、付近に血栓を認めることが多かった。

要 旨

超伝導型 NMR 装置を使用して磁気共鳴映像 (MRI) を得た 117 例 (健常 9 例, 各種心血管疾患 108 例) を対象に、心腔および大血管腔内に認める高信号領域、いわゆる血流画像 (blood flow

image) について、その臨床的意味を検討した。

心拍非同期 SE 像 (T₁ 強調画像) において、健常例では心腔および大血管内は無信号で、血流画像を認めなかった。しかし、疾患例では僧帽弁狭窄症の左房内、陳旧性心筋梗塞の左室瘤内、大動脈瘤の瘤内、および解離性大動脈瘤の偽腔内など、血流の停滞すると考えられる部位に高信号の血流画像を認めた。

一方、心拍同期 SE 像の心腔には、健常例や心拍非同期 SE 像で血流画像を認めない疾患例では、収縮末期および拡張末期のいずれにおいても、血流画像を認めなかった。しかし陳旧性心筋梗塞の左室瘤内や僧帽弁狭窄症の左房内には、血流画像を著明に認めることがあった。また、一般に上行大動脈や大動脈弓では著明な血流画像を認めなかったが、下行大動脈では、収縮末期および拡張末期のいずれにおいても、血流画像を認めた。

IR 像は SE 像より血流画像を認めることが少なく、僧帽弁狭窄症の左房内の 1 例を除いて、心拍同期および心拍非同期のいずれにおいても血流画像を認めなかった。したがって、IR 像は血流画像と血栓の区別に有用であった。

また、僧帽弁疾患、大動脈瘤および解離性大動脈瘤の心拍非同期 SE 像で血流画像を認める部位には、血流画像の近くに血栓を認めることが多く、血流停滞と血栓形成の関係が示された。

以上、MRI では血流速度の低下している部位に血流画像が描出され、疾患に特徴的な血流情報が得られたため、心血管系疾患の診断に有用であると考えられた。

文 献

- 1) Singer JR: Blood flow rates by nuclear magnetic resonance measurements. *Science* **130**: 1652, 1959
- 2) Battocletti JH, Halabach RE, Sales-Cunha SX, Sances A Jr: The NMR blood flowmeter: Theory and history. *Med Phys* **8**: 435, 1981
- 3) Kaufman L, Crooks LE: Evaluation of NMR imaging for detection and quantification of obstructive

- tions in vessels. *Invest Radiol* **17**: 554, 1982
- 4) Clooks LE, Mills CM, Brant-Zawadzki MB, Hoenninger J, Arakawa M, Watts J, Kaufman L: Visualization of cerebral and vascular abnormalities by NMR imaging: The effects of imaging parameters on contrast. *Radiology* **144**: 843-852, 1982
 - 5) Kaufman L, Crooks LE, Sheldon P, Hricak H, Herfkens R, Bank W: The potential impact of nuclear magnetic resonance imaging on cardiovascular diagnosis. *Circulation* **67**: 251, 1983
 - 6) George CR, Jacobs G, MacIntyre W, Loeig RJ, Go RT, Nose Y, Meaney TF: Magnetic resonance signal intensity patterns obtained from continuous and pulsatile flow models. *Radiology* **51**: 421, 1984
 - 7) Herfkens RJ, Higgins CB, Hricak H, Lipton MJ, Crooks LE, Lanzer P, Botvinick E, Brundage B, Sheldon PE, Kaufman L: Nuclear magnetic resonance imaging of the cardiovascular system: Normal and pathological findings. *Radiology* **147**: 749-759, 1983
 - 8) 柿本茂文, 福田信男, 池平博夫, 鳥居伸一郎, 今井均, 上嶋康裕, 森脇正司: Blood flow imaging by NMR. *NMR 医学* **4**: 6, 1984
 - 8) Bryant DJ, Payne JA, Firmin DN, Longmore DB: Measurements of flow with NMR imaging using a gradient pulse and phase difference technique. *J Comp Assi Tom* **8**: 588, 1984
 - 10) Waluch V, Bradley WG: NMR even echo rephasing in slow laminar flow. *H Assi Tom* **8**: 594, 1984
 - 11) Wehrli FW, MacFall JR, Axel L, Shutts D, Glover GH, Herfkens RJ: Approaches to in-plane and out-of-plane flow imaging. *Noninvasive Medical Imaging* **1**: 127, 1984
 - 11) Mills CM, Brant-Zawadzki M, Kaufman L, Sheldon P, Norman D, Bank W, Newton TH: Nuclear magnetic resonance: Principles of blood flow imaging. *Am J Roentgenol* **142**: 165, 1984
 - 12) Axel L: Blood flow effects in magnetic resonance imaging. *Am J Roentgenol* **143**: 1157, 1984