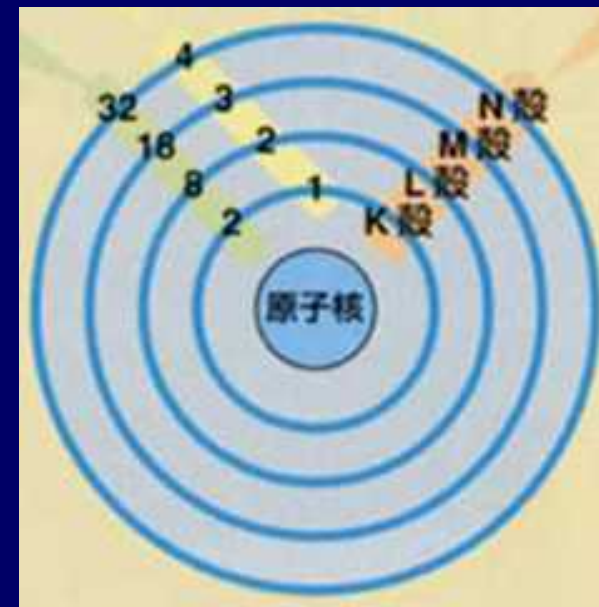


NMR現象を臨床医学へ

1. NMR現象とは
2. NMR信号のイメージング
3. 画像の信号強度と組織性状
4. スピンエコー法 / グラジエントエコー法
5. 常磁性体の影響・MR造影剤
6. 心拍動 / 血流 / 分子運動イメージング
7. 高速撮像法・高磁場イメージング

原子の電子配置

電子殻



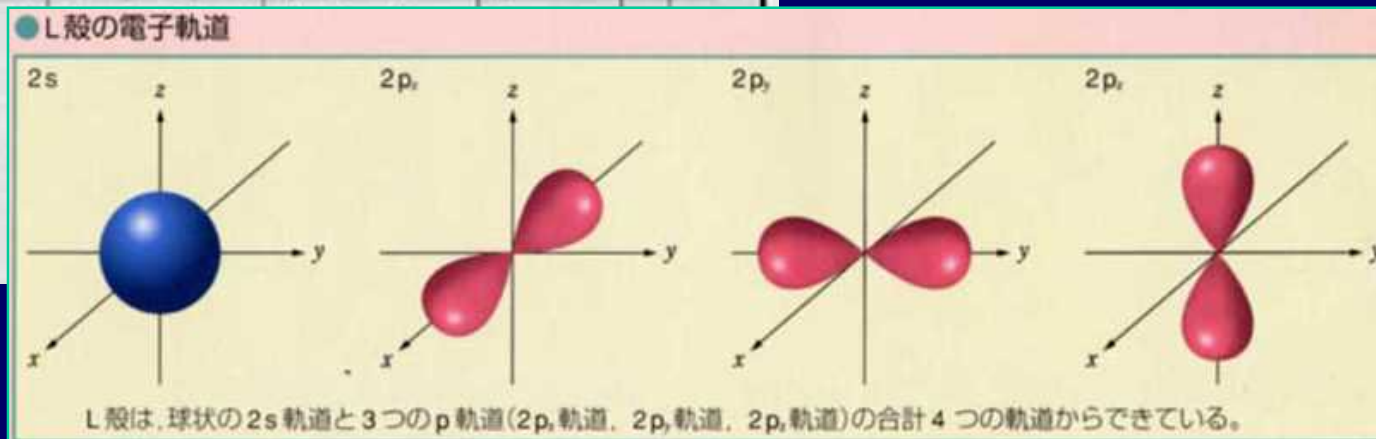
周期	原子番号	元素記号	電子殻																分類			
			K		L			M			N				O					P		Q
			s	s	p	s	p	d	s	p	d	f	s	p	d	f	s	p	d	s		
6	55	Cs	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6				1				典型 元素
	56	Ba	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6				2				
	57	La	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1			2				ランタノイド 遷移元素
	58	Ce	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1	2	6	1			2				
	59	Pr	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6				2				
	60	Nd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6				2				
	61	Pm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	5	2	6				2				
	62	Sm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6				2				
	63	Eu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6				2				
	64	Gd	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	1			2				
	65	Tb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	9	2	6				2				
	66	Dy	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6				2				
	67	Ho	2	2	6	2	6	10	2	6	10	11	2	6				2				
	68	Er	2	2	6	2	6	10	2	6	10	12	2	6				2				
	69	Tm	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6				2				
	70	Yb	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6				2				
	71	Lu	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1			2				
	72	Hf	2	2	6	2	6															
	73	Ta	2	2	6	2	6															
	74	W	2	2	6	2	6															
	75	Re	2	2	6	2	6															
	76	Os	2	2	6	2	6															
	77	Ir	2	2	6	2	6															

L殻の電子軌道

2s

2p_x

2p_y



(数研出版:化学図録)

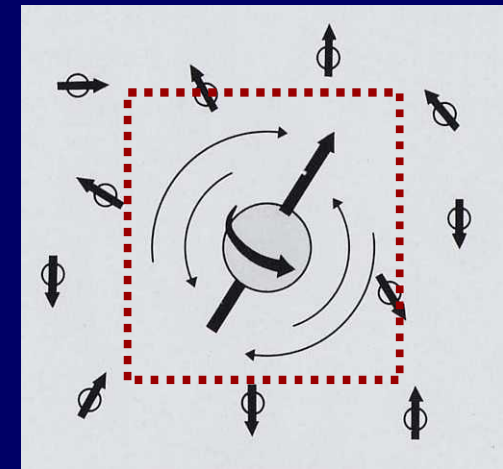
常磁性体・超常磁性体による緩和時間短縮

* 双極子-双極子相互作用の増強:

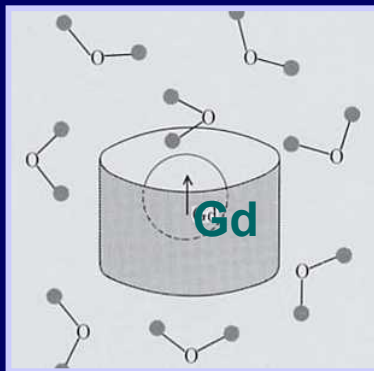
- ・分子の接近が必要
- ・低濃度でT1短縮, 高濃度でT2, T2*短縮

* 磁場不均一性の増強・磁化率効果:

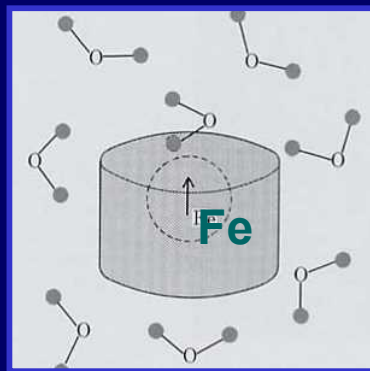
- ・高濃度の局在分布で作用
- ・T2, T2*短縮(特にT2*短縮が強い)



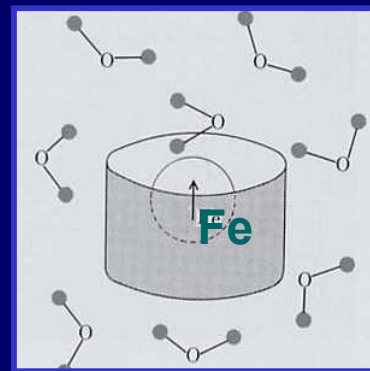
Fe, Gd, Mn...



ガドリニウム造影剤



デオキシヘモグロビン



オキシヘモグロビン

(山田直明:
MRIの基礎
と臨床 より)

造影MRI

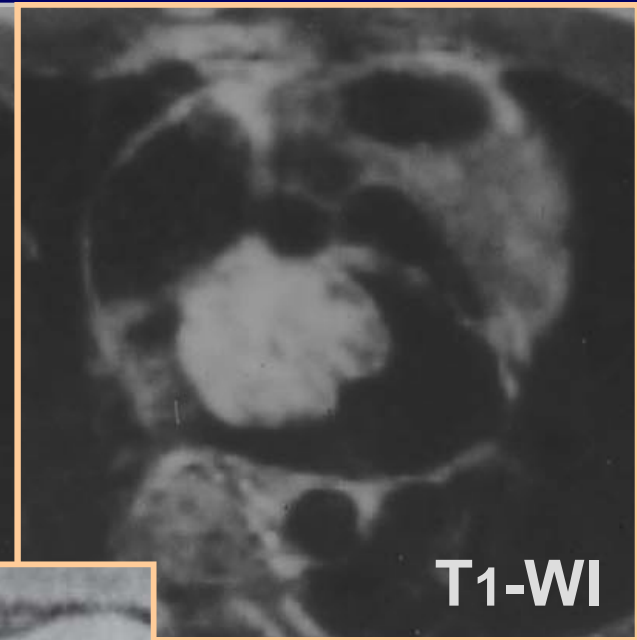
ガドリニウム造影剤
Gd-DTPAなど

心臓腫瘍
左房粘液腫

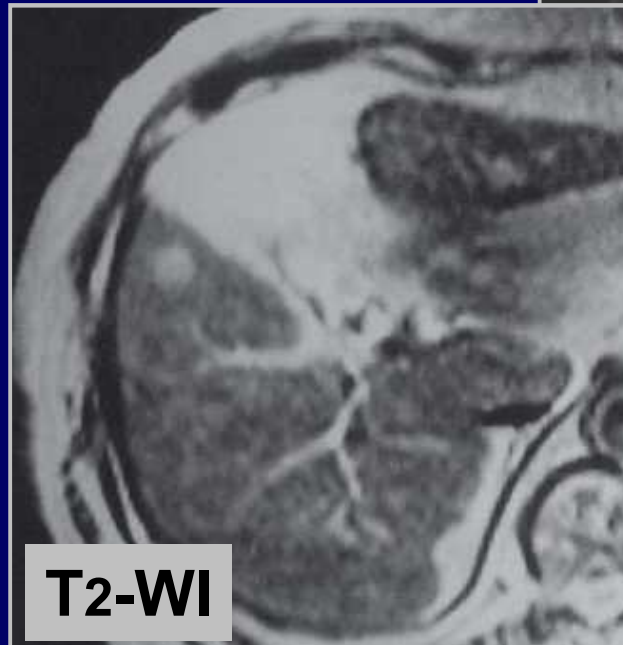
造影前



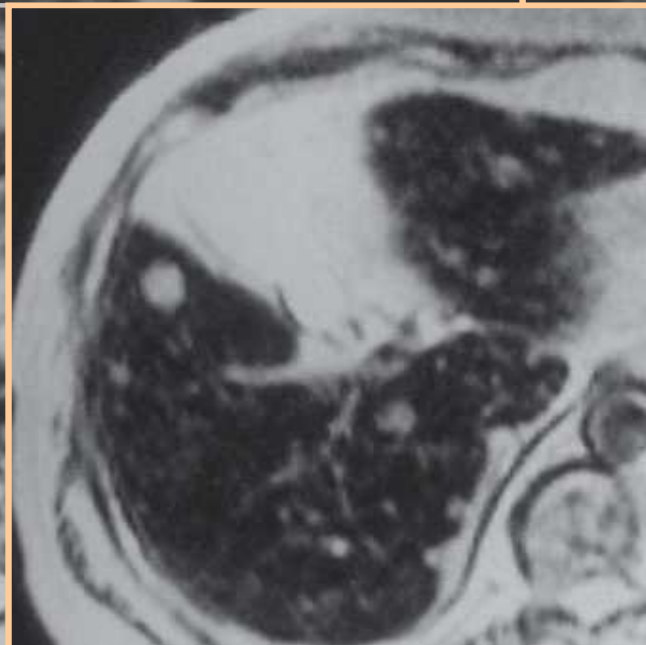
造影後



T1-WI



T2-WI



超常磁性
酸化鉄粒子
SPIO

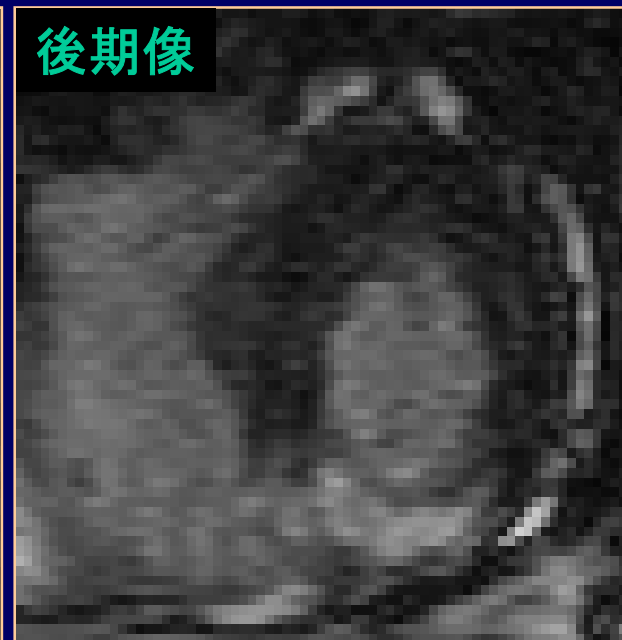
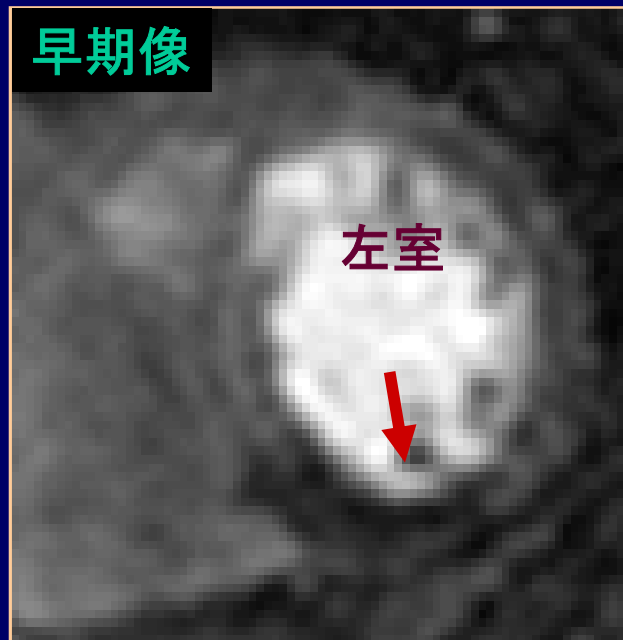
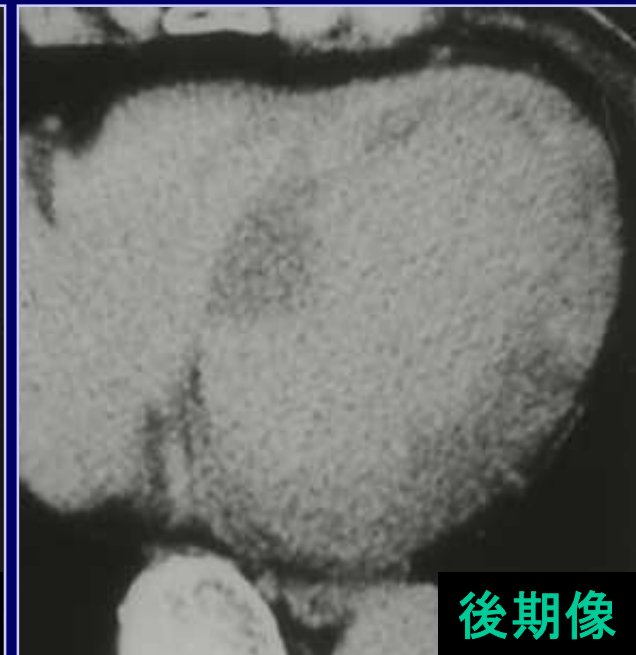
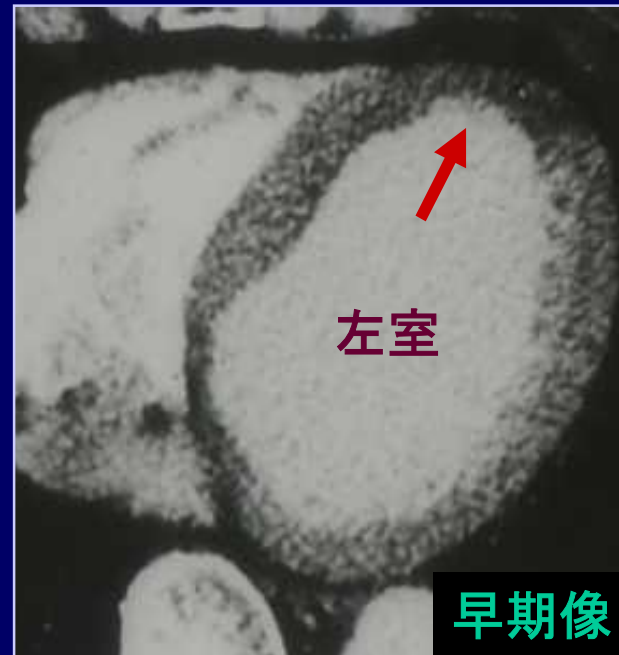
転移性肝腫瘍

(廣橋伸治ほか:
日獨医報 1998 より)

造影CT

ヨード造影剤

前壁心筋梗塞：
発症後2ヶ月



造影MRI

ガドリニウム造影剤

下壁心筋梗塞：
発症後14日

ヨード造影剤

ガドリニウム造影剤

* 一般名: イオパミドール

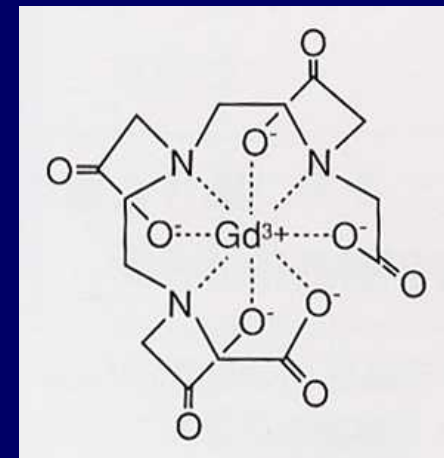
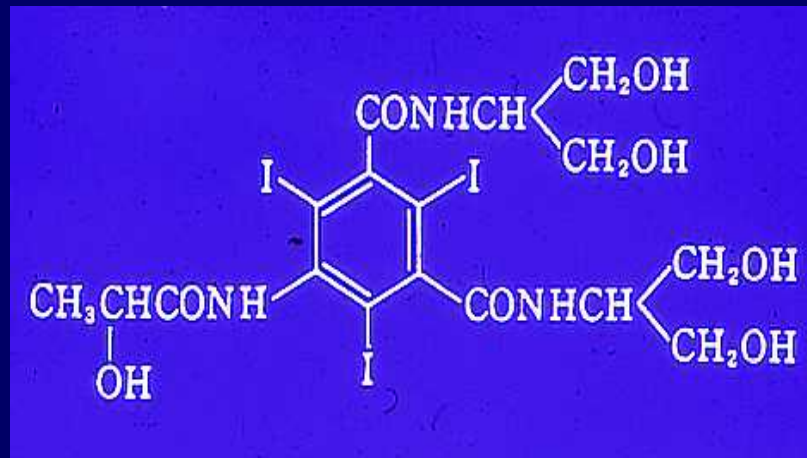
ガドペンテト酸メグルミン

* 分子式: $C_{17}H_{22}I_3N_3O_8$

$C_{14}H_{20}GdN_3O_{10}C_7H_{17}NO_5$

* 分子量: 777.09

742.79



* 体内分布: 細胞外液腔

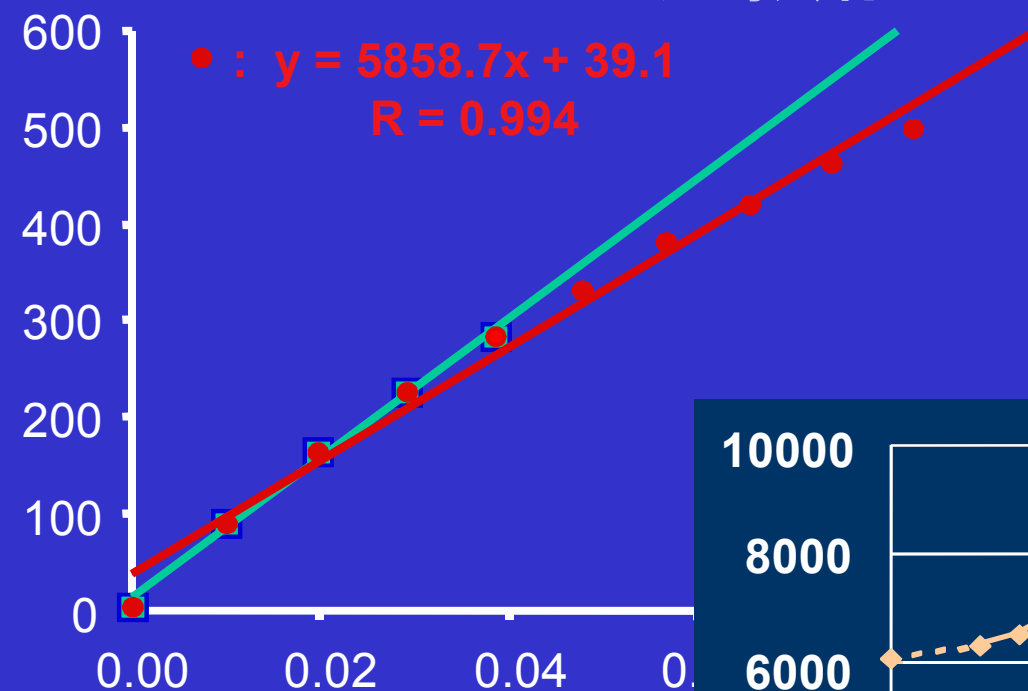
細胞外液腔

* 造影効果: 線形 (vs.濃度)

非線形 (vs.濃度)

造影剤濃度と画像信号強度の関係

CT# (HU) ヨード造影剤



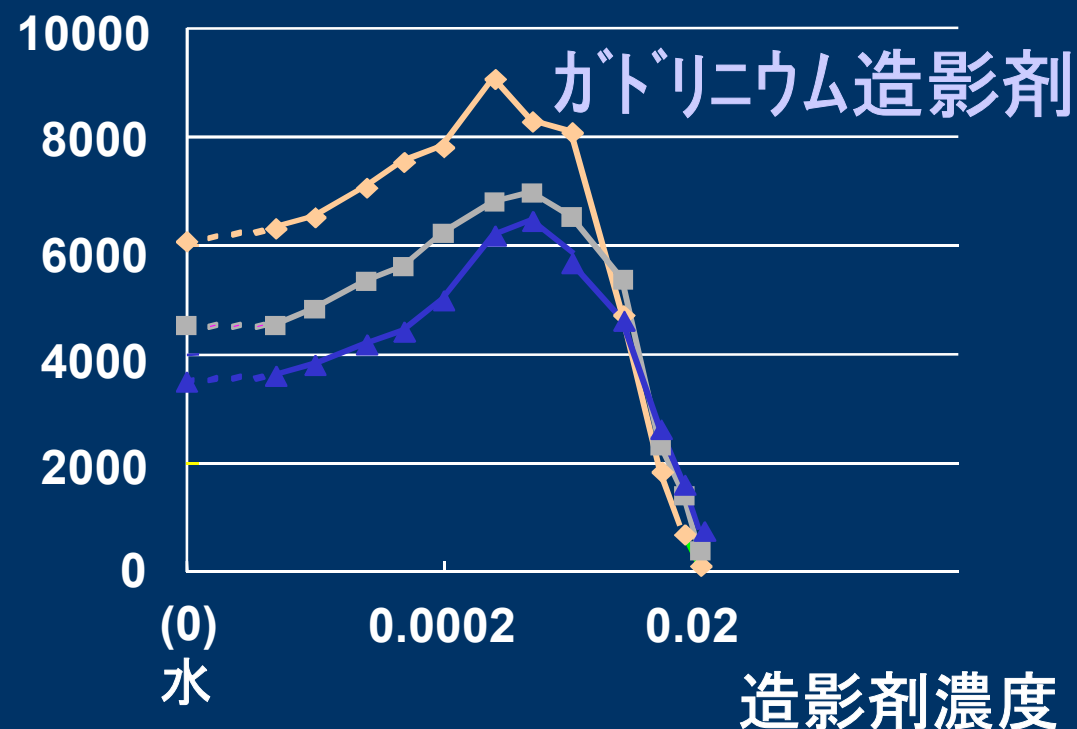
電子ビームCT:

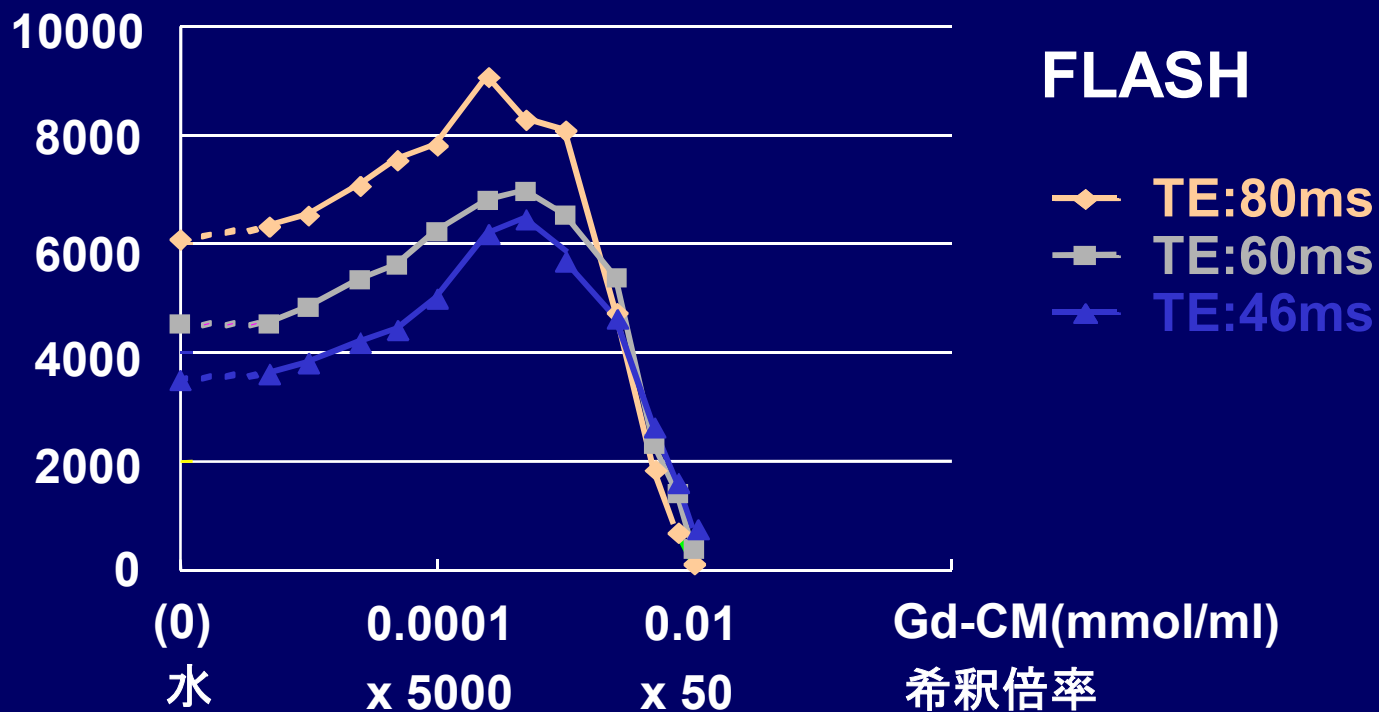
* 管電圧:130kV

* 造影剤:
イオパミドル370mgI

FLASH

◆ TE:80ms
 ■ TE:60ms
 ▲ TE:46ms





$$(1 / T1)_{obs} = (1 / T1)_{tissue} + R1 \times [P]$$

$$(1 / T2)_{obs} = (1 / T2)_{tissue} + R2 \times [P]$$

T1, T2: 緩和時間 1/T1, 1/T2: 緩和速度

R1, R2: 緩和率(relaxivity) [P]: 造影剤濃度

脳出血のMRI

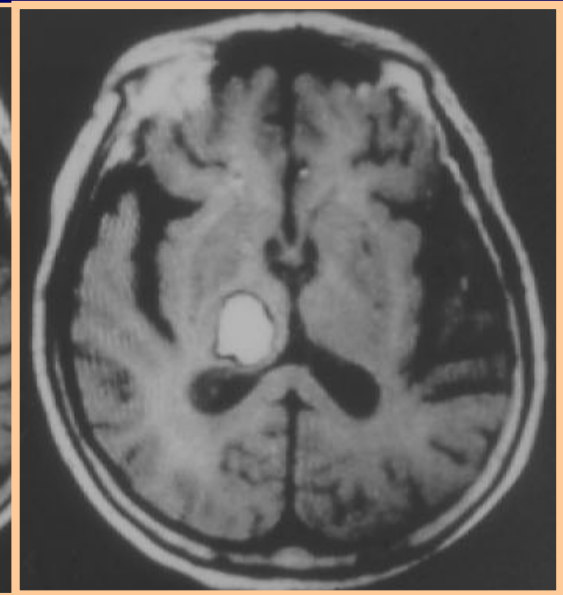
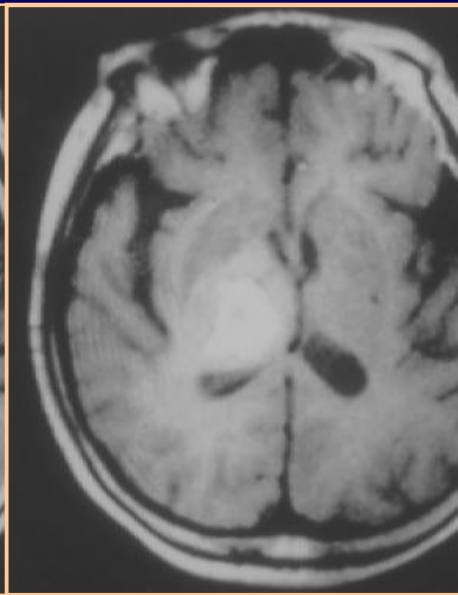
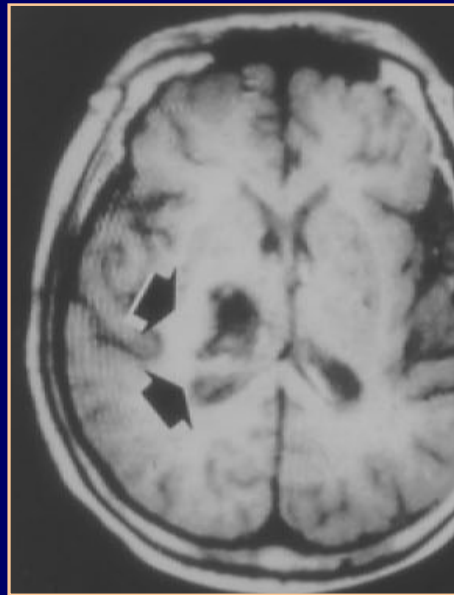
3日

1週間

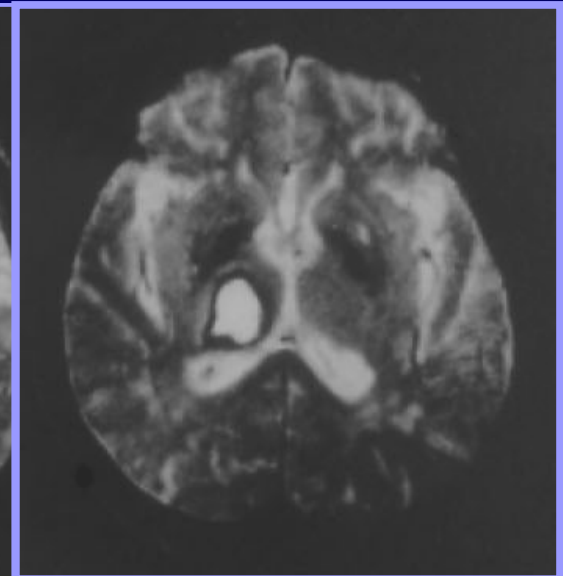
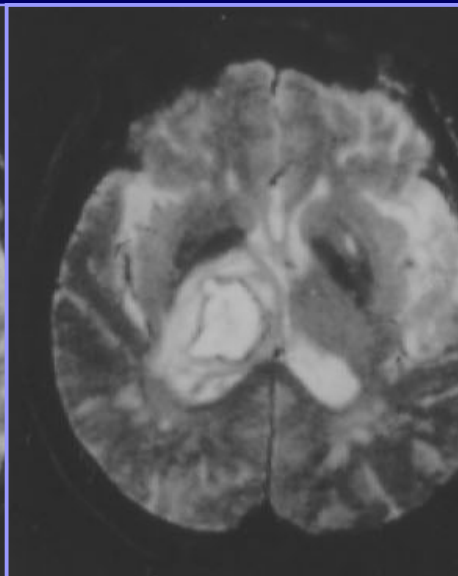
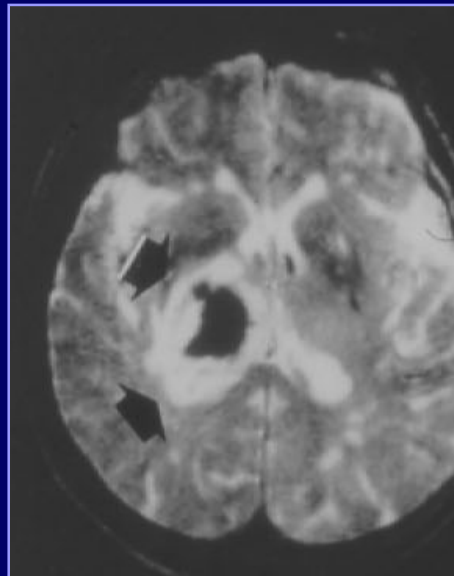
1ヶ月

SE法:

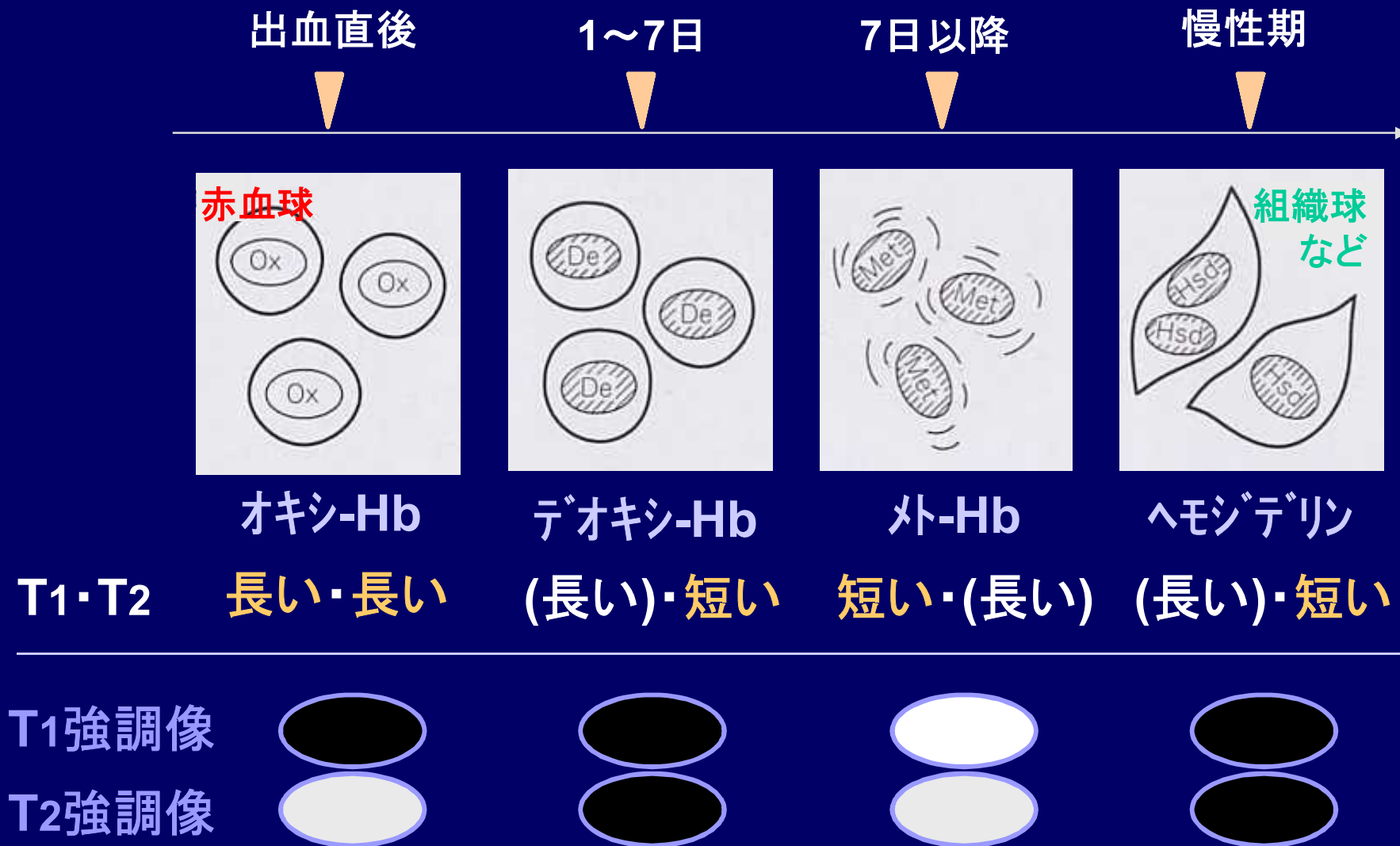
T1-
強調画像



T2-
強調画像



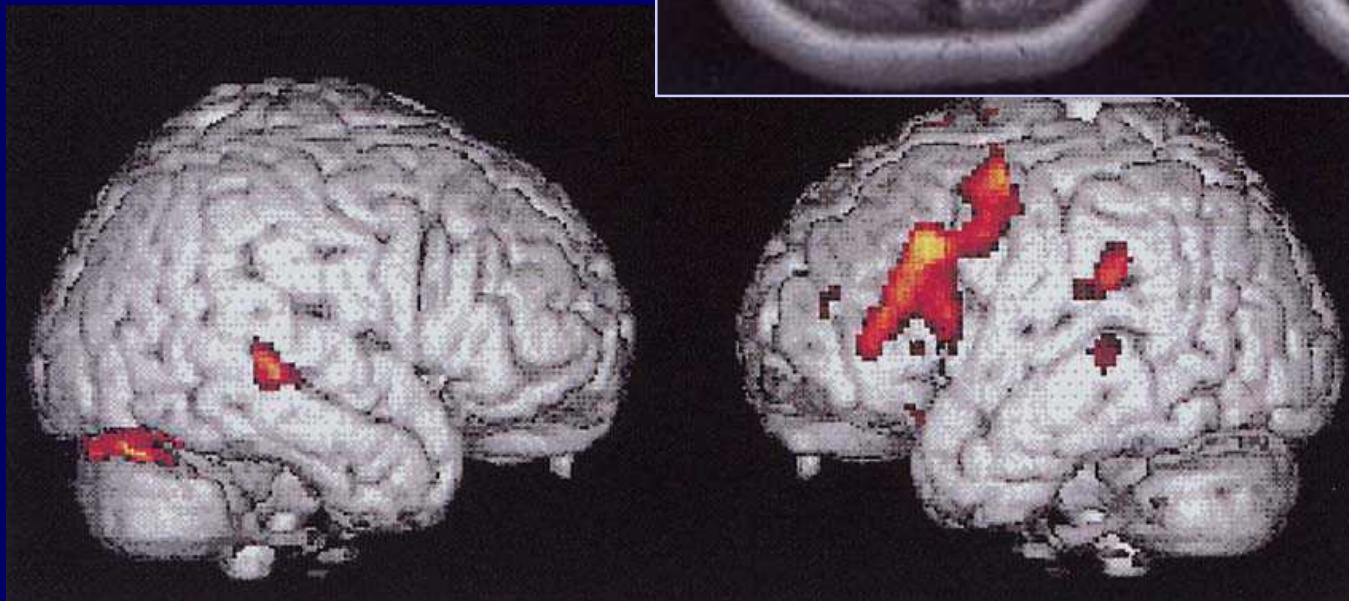
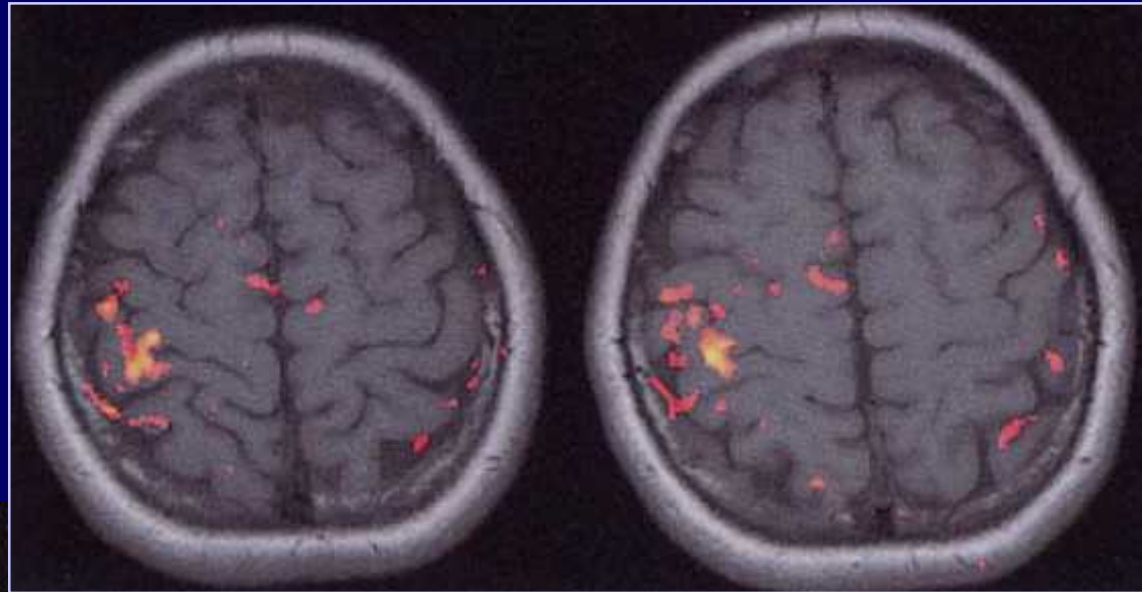
血腫の信号強度変化：ヘモグロビン説 (Gomori)



脳機能画像診断法: functional MRI

BOLD効果による...

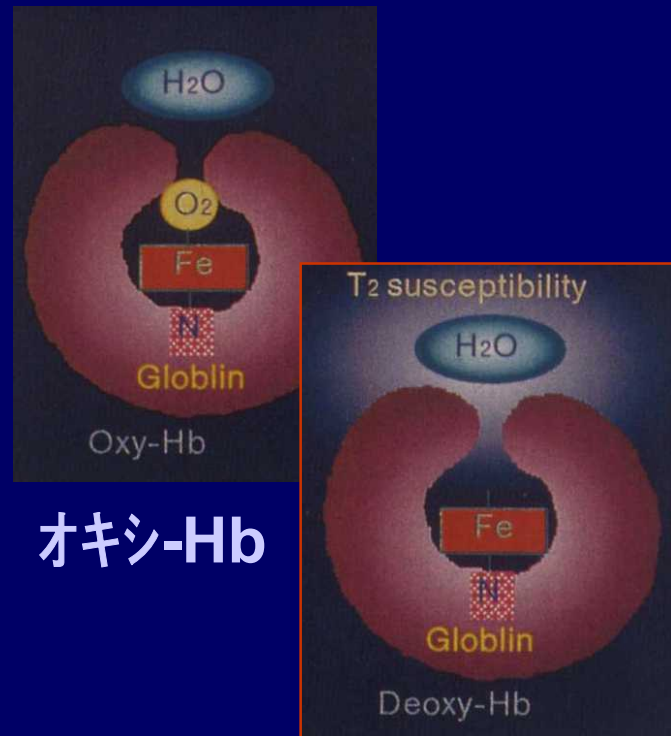
感覚運動皮質
の賦活



言語想定課題
による賦活

(田中忠蔵ほか:ここまでわかる脳機能画像. 画像診断 2002 より)

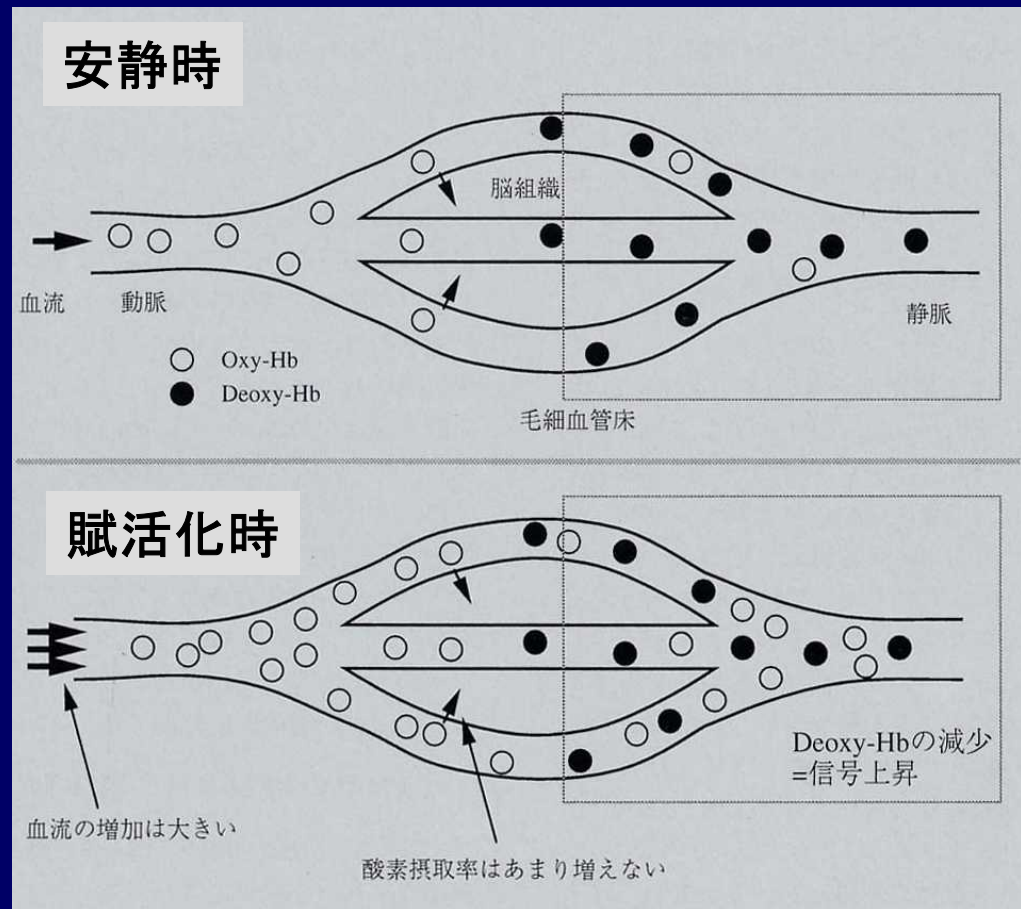
BOLD: blood oxygenation level dependent 効果



オキシ-Hb

デオキシ-Hb

* デオキシ-Hb:
磁化率効果による
信号低下を生じる

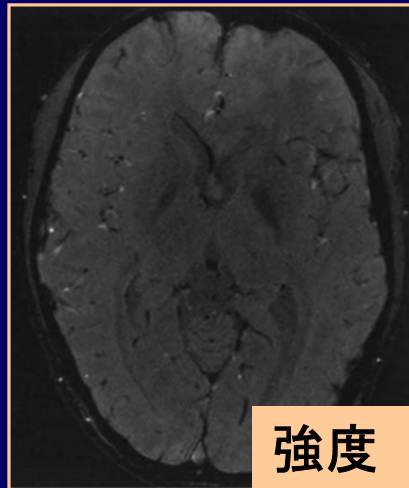


血流-酸素消費ミスマッチ

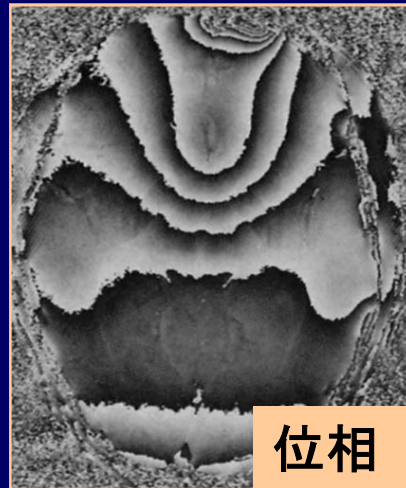
(清 ほか: MRIによる脳機能画像. 日獨医報 1994 より)

SWI: susceptibility-weighted imaging

MinIP表示

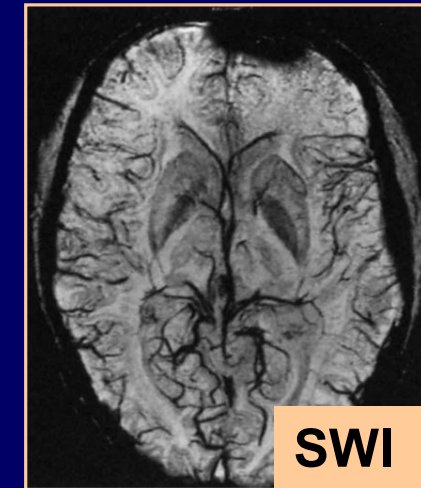


強度



位相

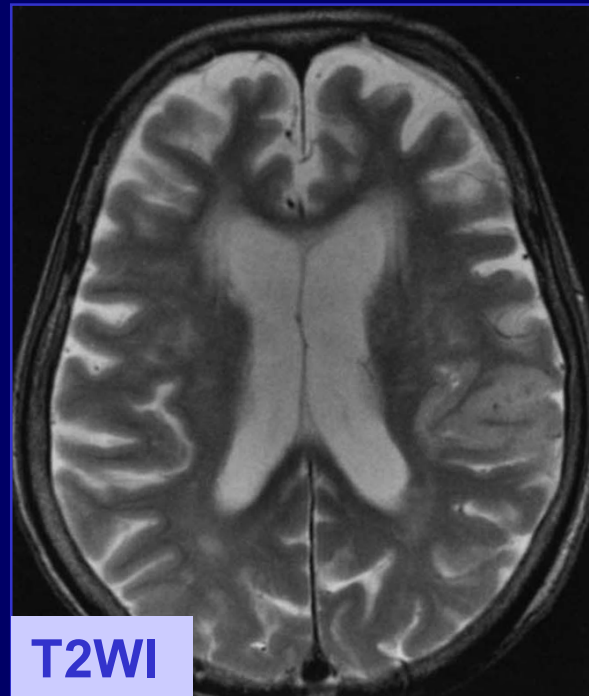
画像処理



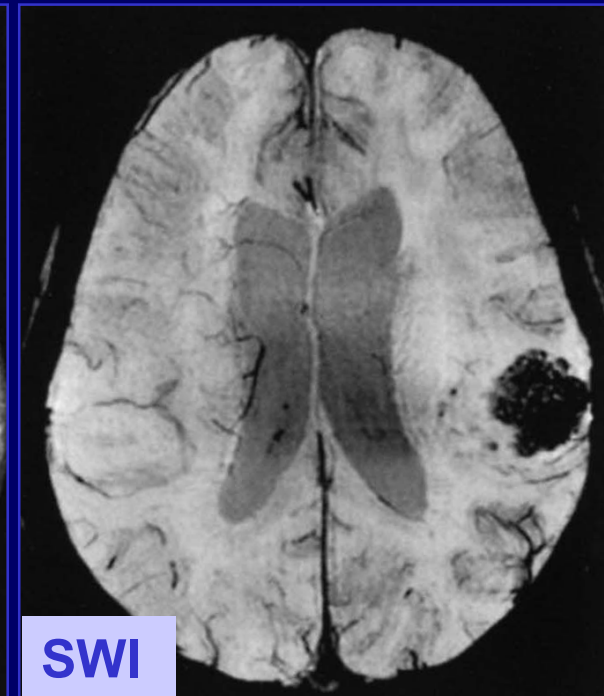
SWI

心原性脳梗塞
出血性脳梗塞
の併発

(金崎 ほか: 急性期脳梗塞の
診断におけるSWIの有用性.
日獨医報 2007 より)

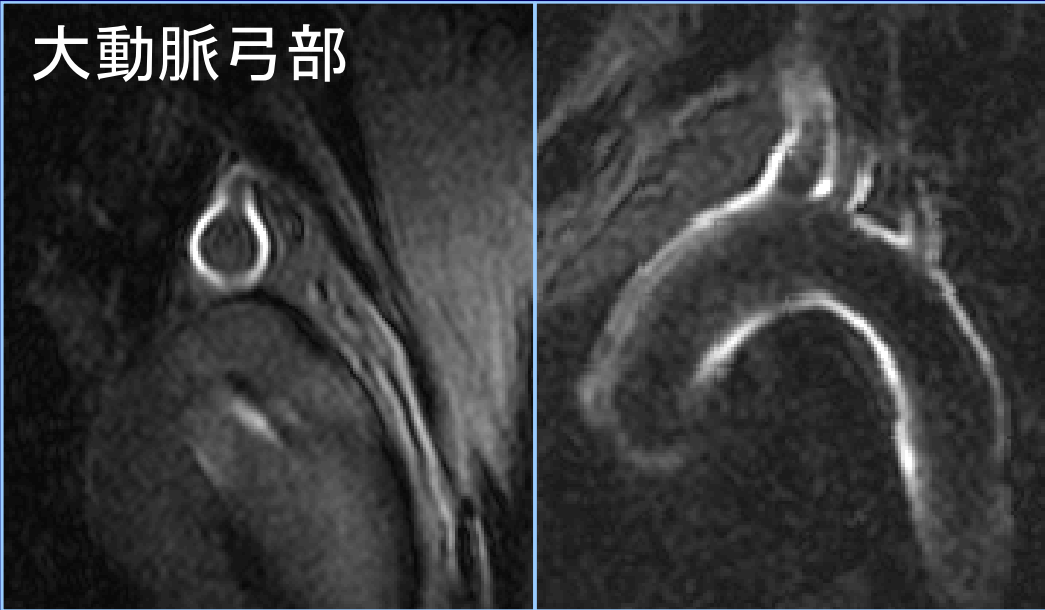


T2WI



SWI

大動脈弓部



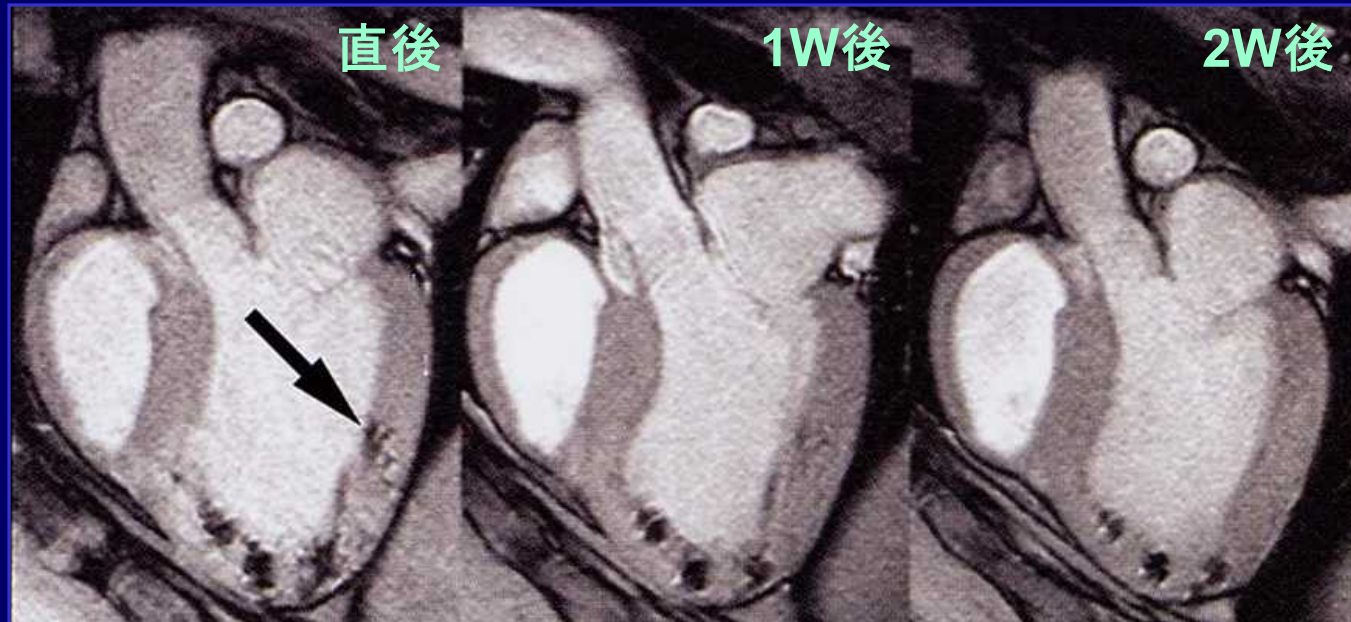
**MR特異性造影剤:
Gadofluorine**

**Watanabeラビット:
静注24時間後**

(提供: Schering AG)

**酸化鉄粒子
標識細胞MR
イメージング**

**心筋梗塞犬:
間葉系幹細胞
移植療法後**



RSNA Newsより (Kraitchman D; Johns Hopkins U, AHA 2005)

腎性全身性線維症 (Nephrogenic Systemic Fibrosis: NSF)

比較的重篤な腎機能障害例に発生する皮膚主体の全身線維症。1997年に患者同定。皮膚の硬化、関節拘縮などを示し劇症型の経過から死亡する場合もある。



(Bayer Schering Pharma パンフレットより)

NMR現象を臨床医学へ

1. NMR現象とは
2. NMR信号のイメージング
3. 画像の信号強度と組織性状
4. スピンエコー法 / グラジエントエコー法
5. 常磁性体の影響・MR造影剤
6. 心拍動 / 血流 / 分子運動イメージング
7. 高速撮像法・高磁場イメージング

生体の動き

* 臓器/組織の動き: 心拍動・呼吸・腸管運動...

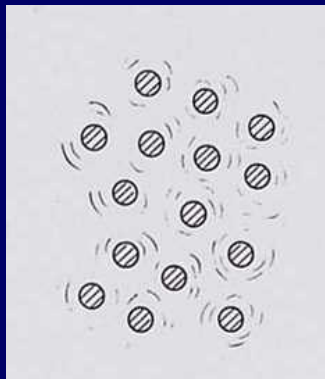
▶ 心電図/呼吸同期撮像・呼吸停止下撮像・シネMR法

* 血液の動き: 血管内血流・臓器灌流

▶ MRアンジオグラフィ・臓器灌流スタディ...

* 分子の熱運動: 回転・並進・伸縮...

▶ 分子拡散イメージング



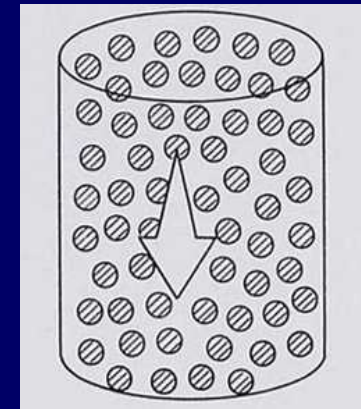
分子
運動



並進～
拡散

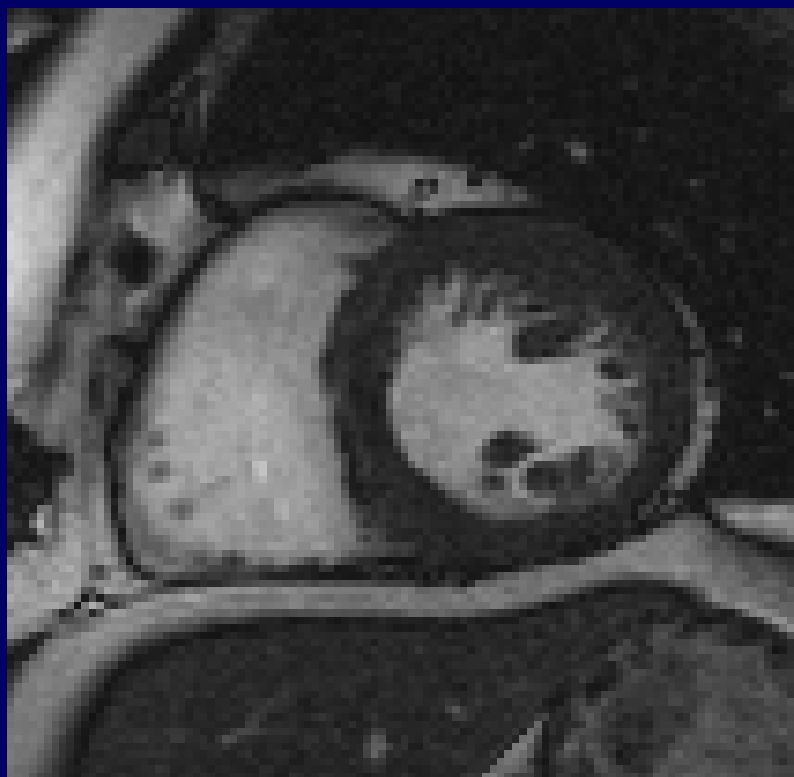
臓器
灌流

血管内血流



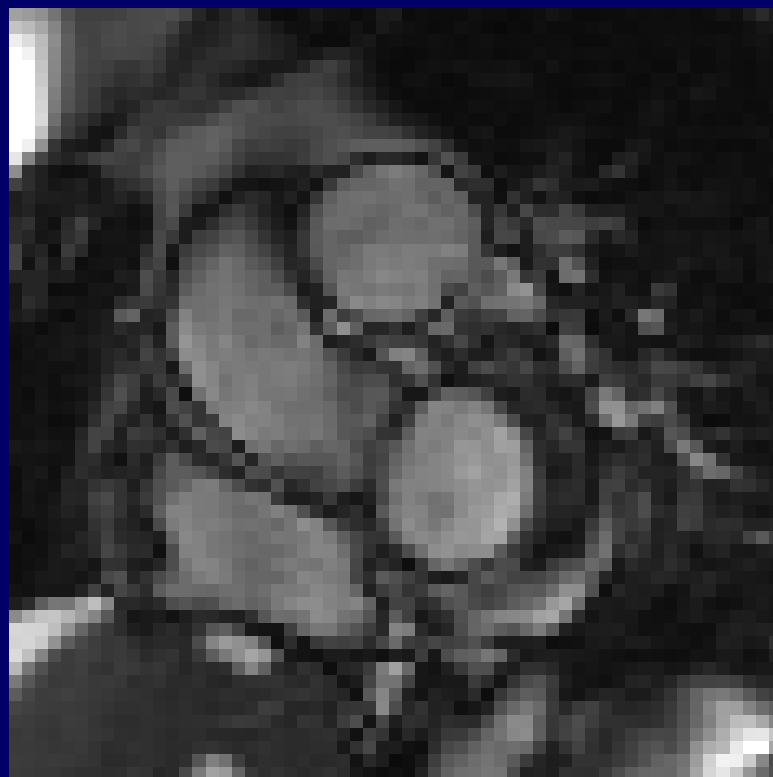
シネMRイメージング:

呼吸停止シネ



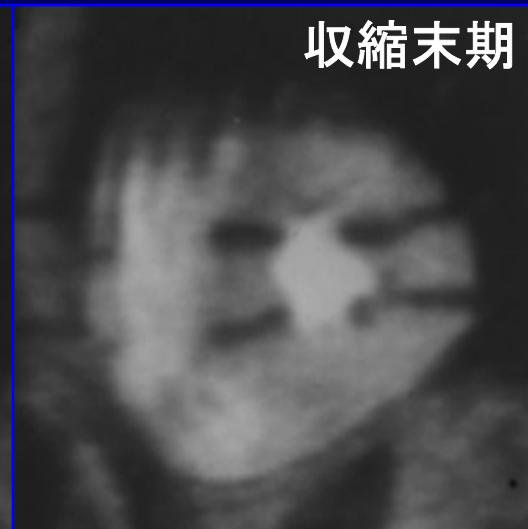
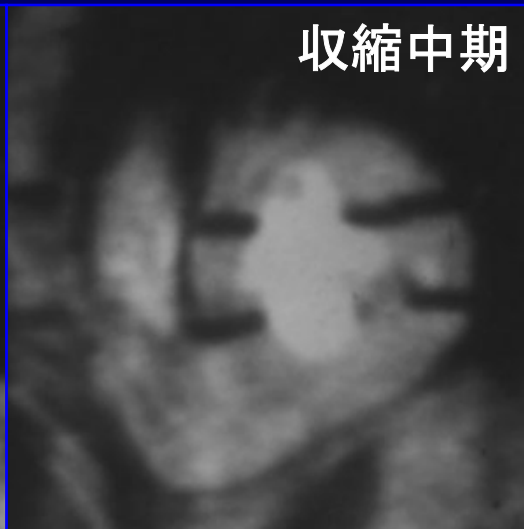
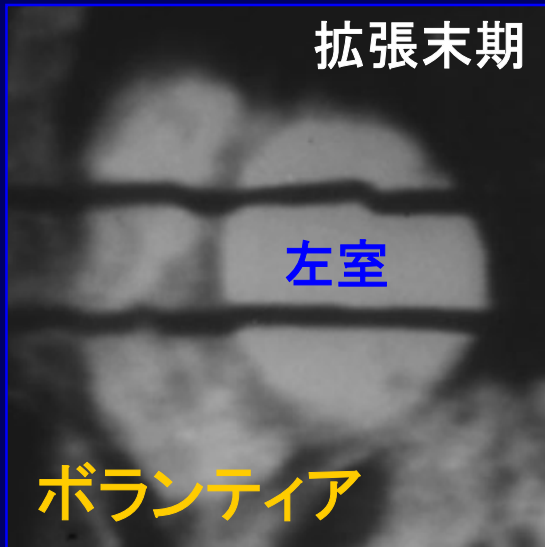
定常状態GRE法;
(True-FISP)

リアルタイム・シネ



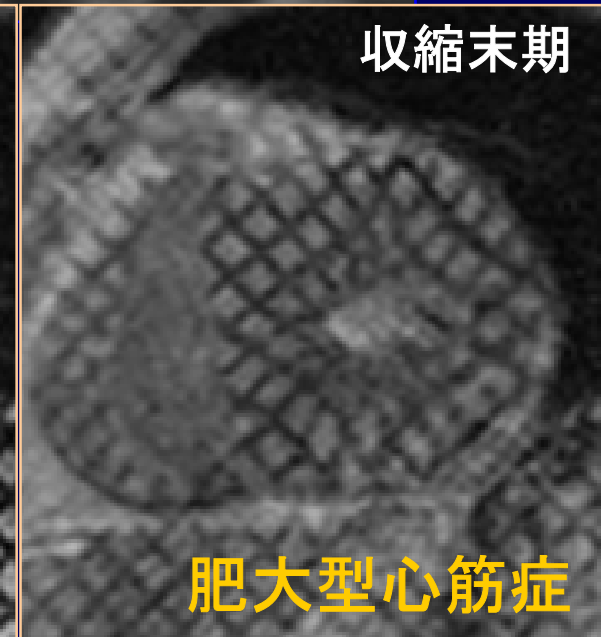
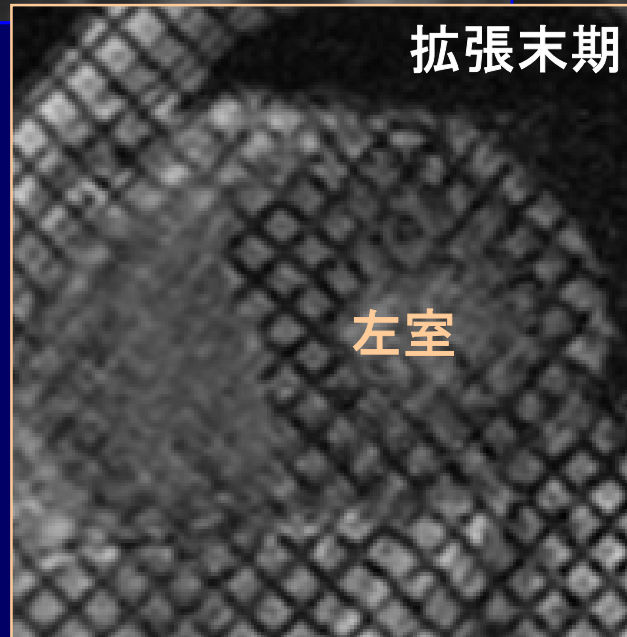
11 frame /s, 128x64

シネMR法の特殊応用：心筋タギング法



プレサチュレーション
タギング

SPAMM
タギング



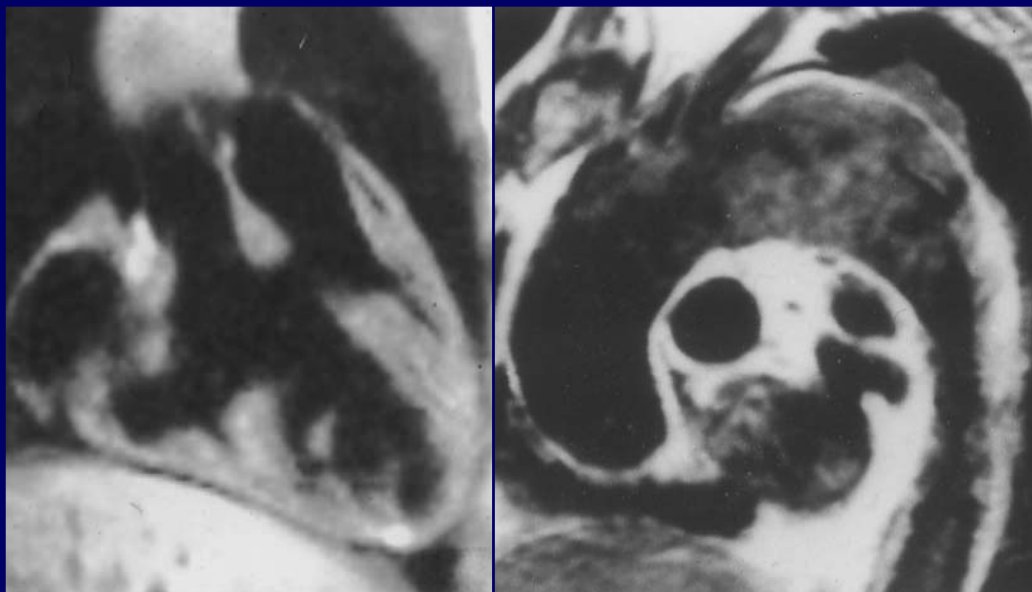
MRIの血流信号

増強要因

- * 流入効果(TOF): 新鮮スピンの断面内流入
 - * リフェーシング: スピン回転位相のばらつきの修正
 - * 造影剤の使用
-

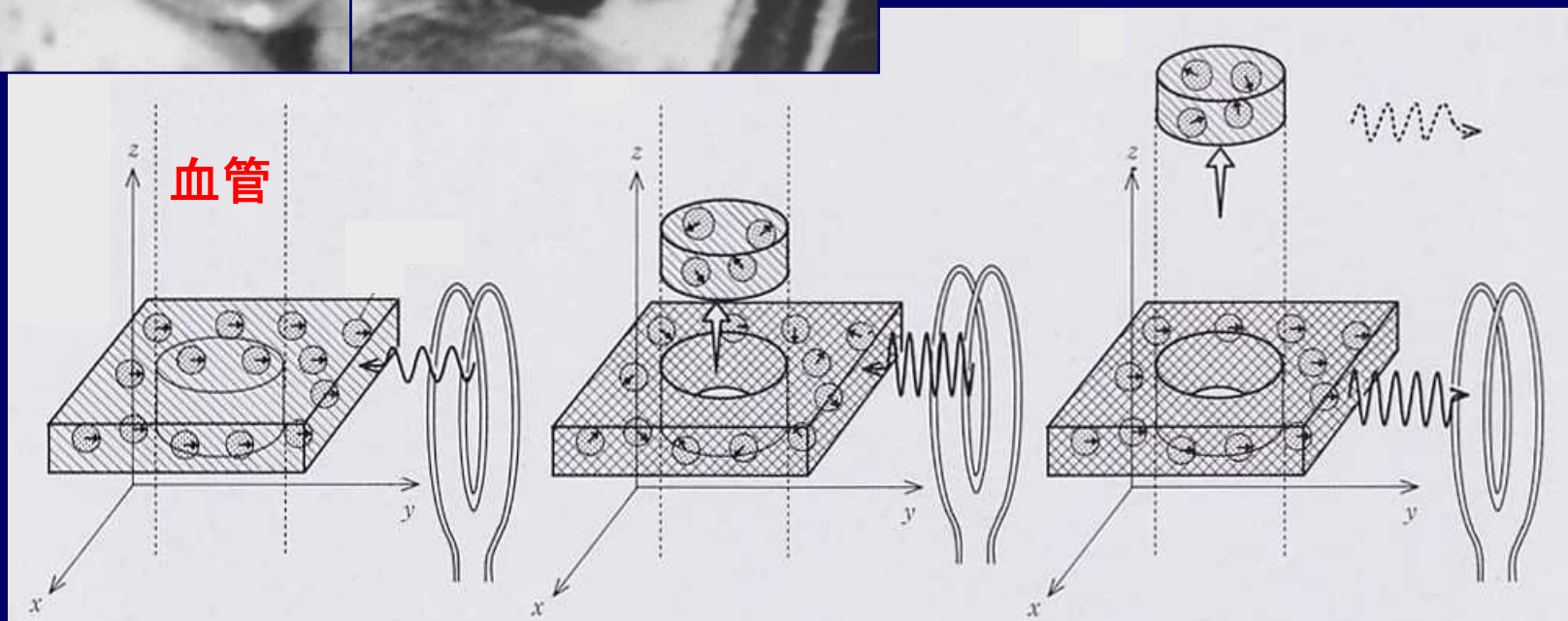
減弱要因

- * 流出効果: スピンエコー法での信号減弱
 - * 上流効果・前飽和: 飽和スピンの断面内流入
 - * ディフェーシング: スピン回転位相のばらつきの増強
-



流出効果とは

スピンエコー画像での
血管内低信号の主原因



△ 90度RF

△ 180度RF

エコー信号

時間

MRIの血流信号

増強要因

- * 流入効果(TOF): 新鮮スピンの断面内流入
 - * リフェーシング: スピン回転位相のばらつきの修正
 - * 造影剤の使用
-

減弱要因

- * 流出効果: スピンエコー法での信号減弱
 - * 上流効果・前飽和: 飽和スピンの断面内流入
 - * ディフェーシング: スピン回転位相のばらつきの増強
-

MR画像の信号強度

対象
核種の
密度

×

TR内
での
縦磁化
の回復

×

$\sin\alpha$

×

TE内
での
横磁化
の減衰

縦磁化の
最初期値

T1を
時定数
とする

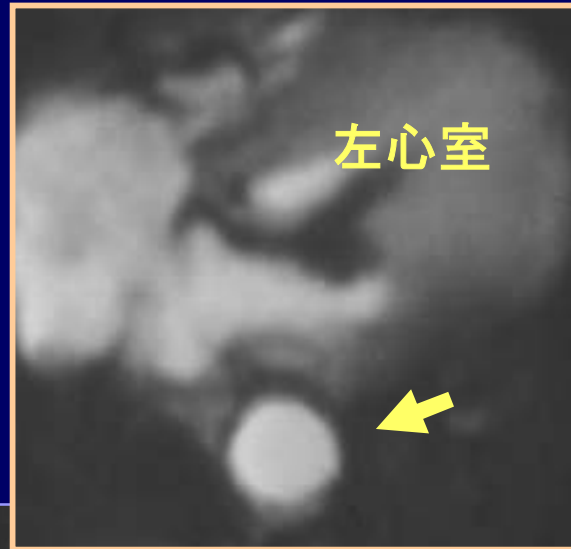
横磁化の
初期値

T2または
T2*を
時定数
とする

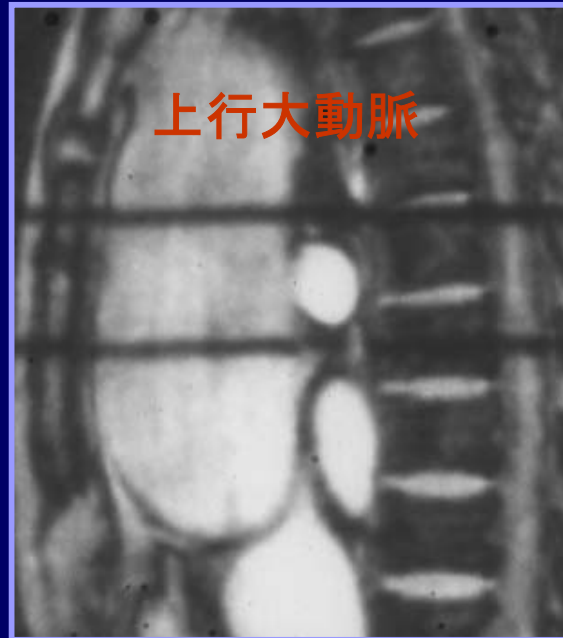
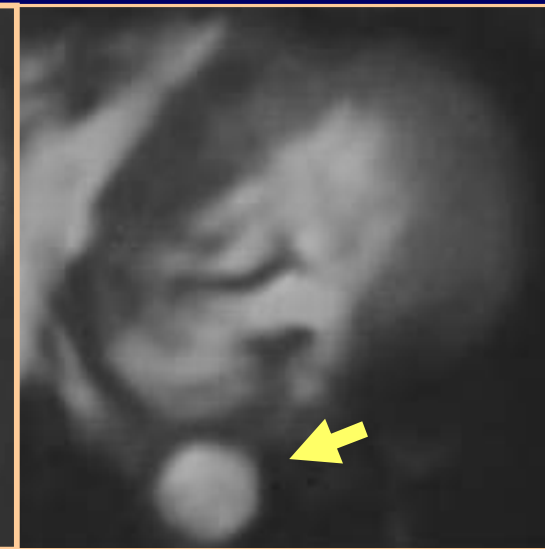
流入効果

TOF:
Time-of-flight

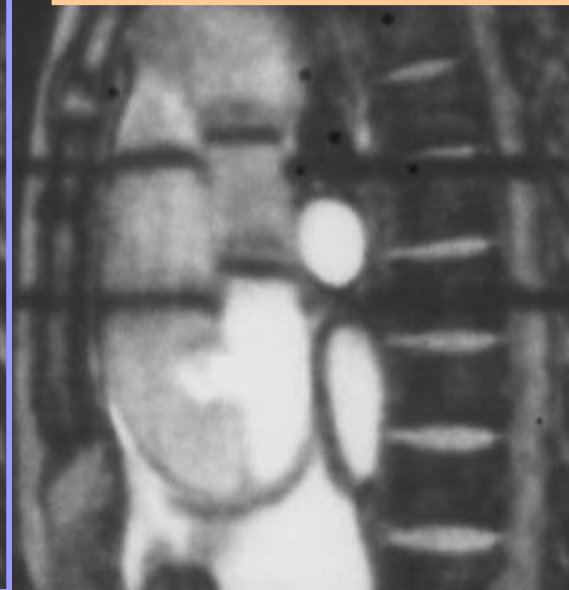
収縮早期



拡張中期



拡張末期



収縮早期

シネMR法:
心電図同期GRE

上流効果

前飽和:
プレサチュレーション

MRIの血流信号

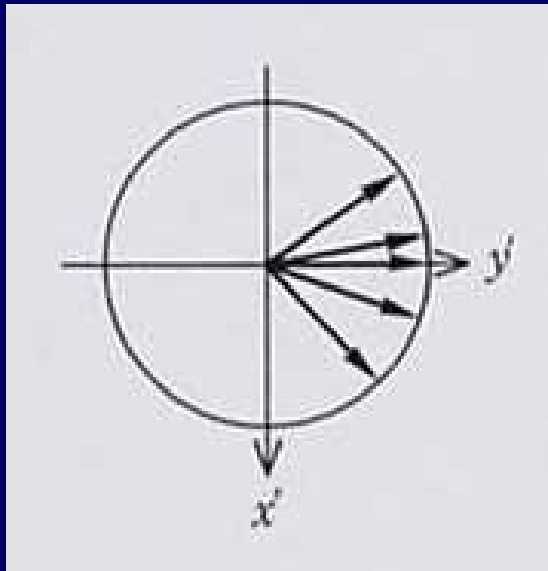
増強要因

- * 流入効果(TOF): 新鮮スピンの断面内流入
 - * リフェーシング: スピン回転位相のばらつきの修正
 - * 造影剤の使用
-

減弱要因

- * 流出効果: スピンエコー法での信号減弱
 - * 上流効果・前飽和: 飽和スピンの断面内流入
 - * ディフェーシング: スピン回転位相のばらつきの増強
-

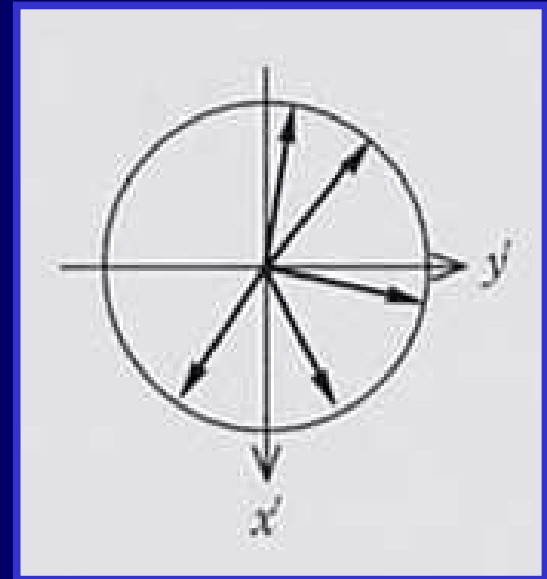
リフェーシング Rephasing



スピン回転位相の
ばらつきの修正

信号増加

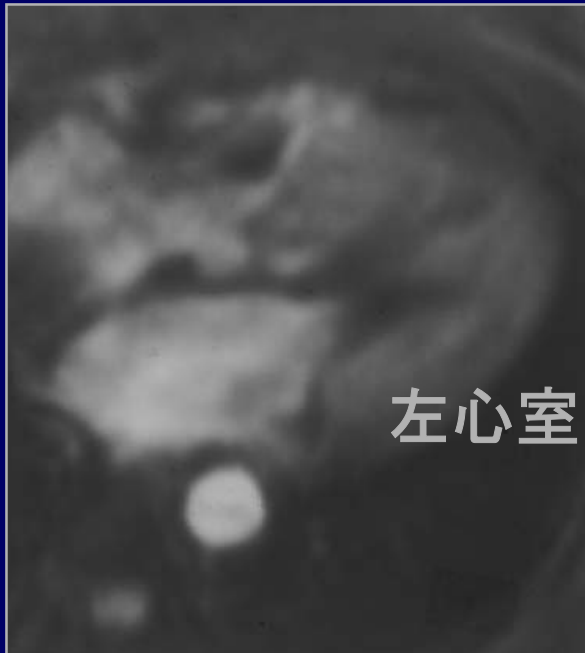
ディフェーシング Dephasing



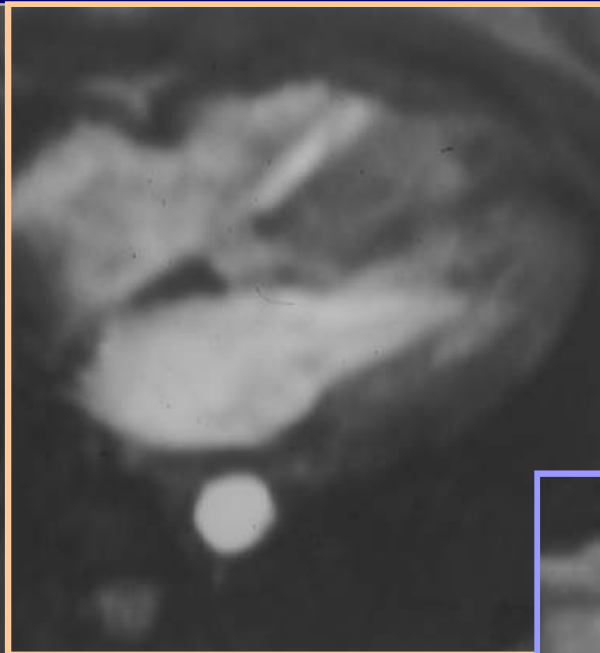
スピン回転位相の
ばらつきの増強

信号減少

リフェーシングとディフェーシング



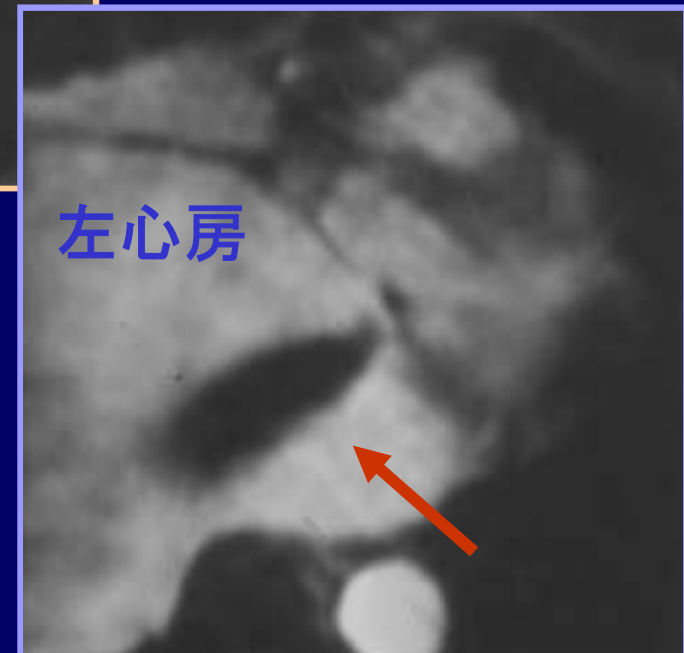
通常シネ



通常シネ
+速度リフェース

シネMR法:
心電図同期スポイルドGRE

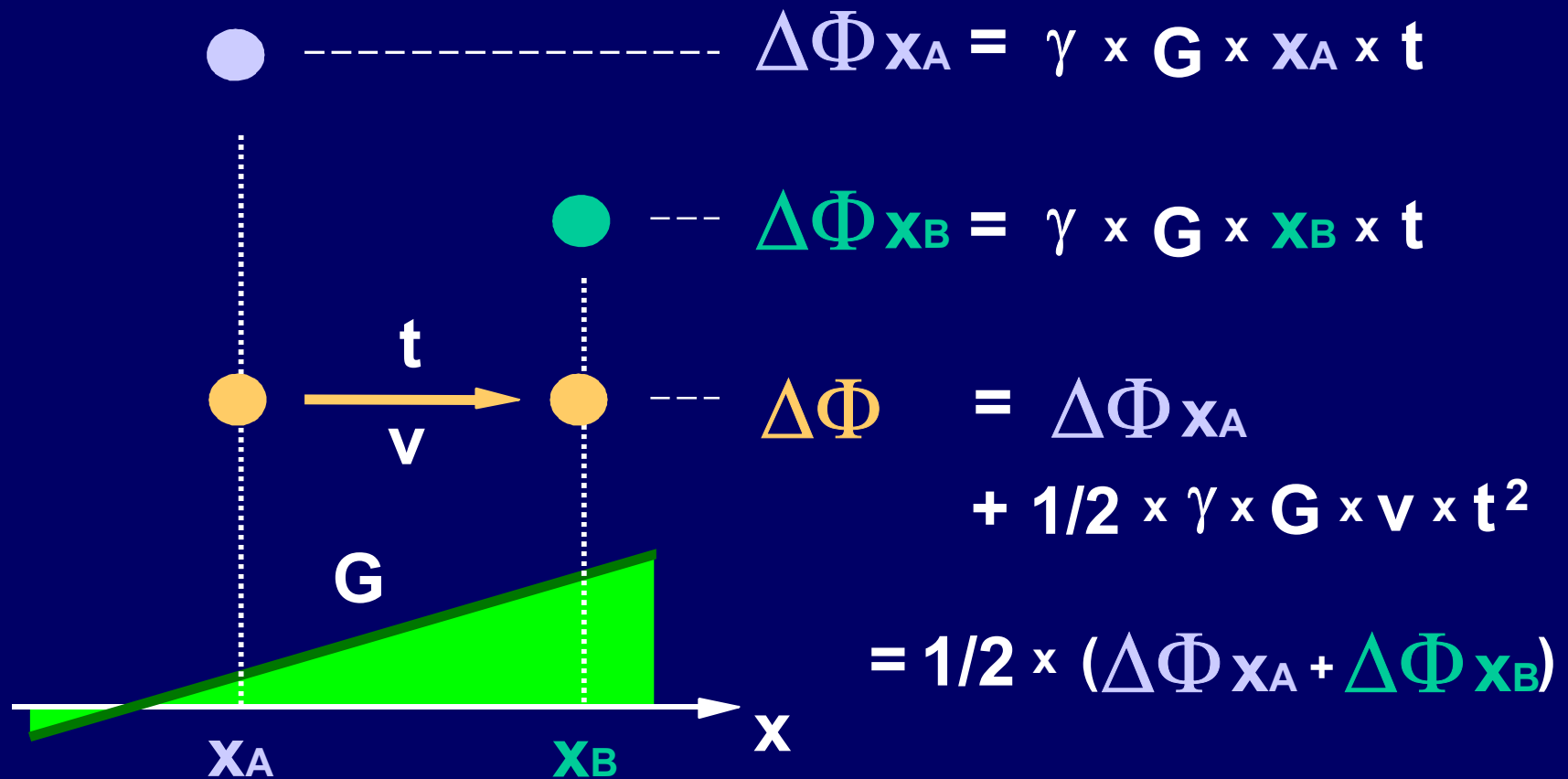
心臓弁膜症
僧帽弁逆流



磁場の不均一性

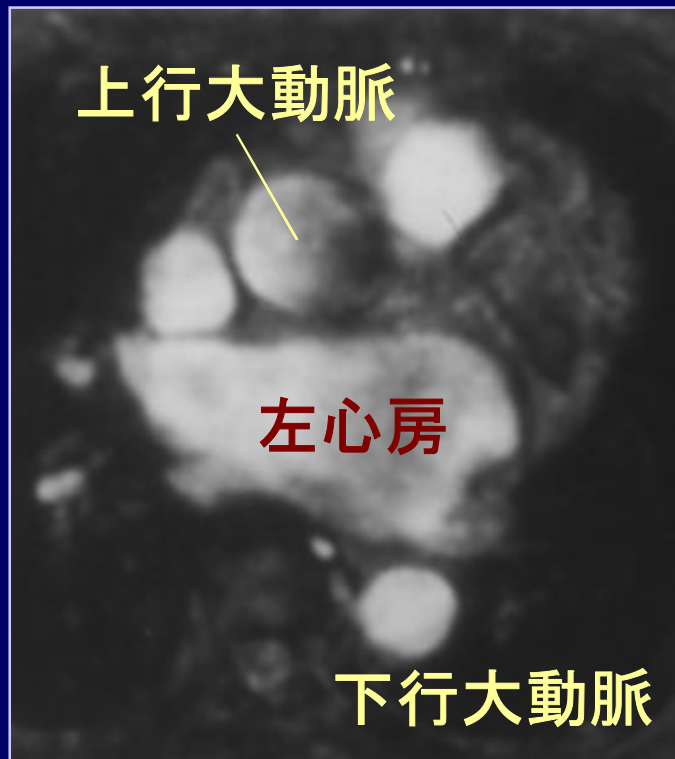
原因	磁場種類	強さ	時間	対応
* 装置側:				
・ 静磁場不均一性	外部	1ppm/視野	恒常的	SE
・ 傾斜磁場の印加	外部	10mT/m~	一時的	修正 傾斜磁場
* 生体側:				
・ 対象の磁化率	内/外部	様々	恒常的	SE
・ 化学シフト	内部	3.5ppm/B ₀ (水-脂肪)	恒常的	(SE)

プロトンの回転位相シフト: 傾斜磁場の影響



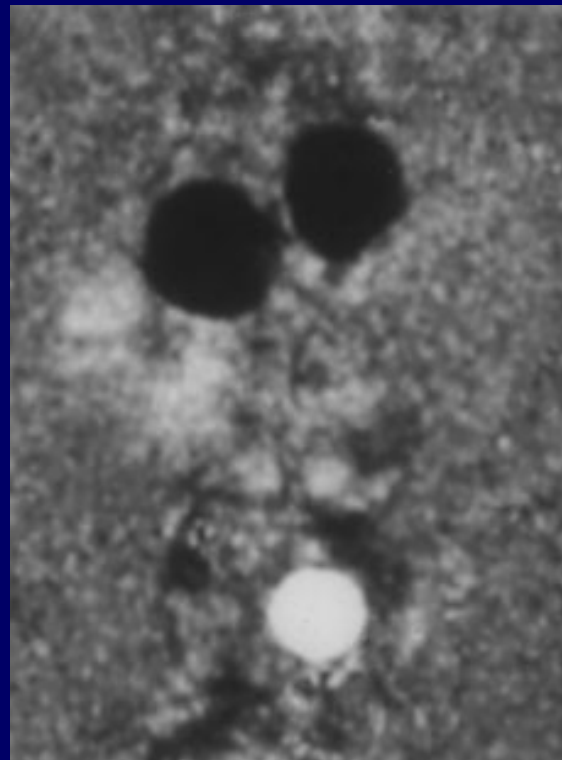
シネ位相コントラスト(PC)法

強度画像



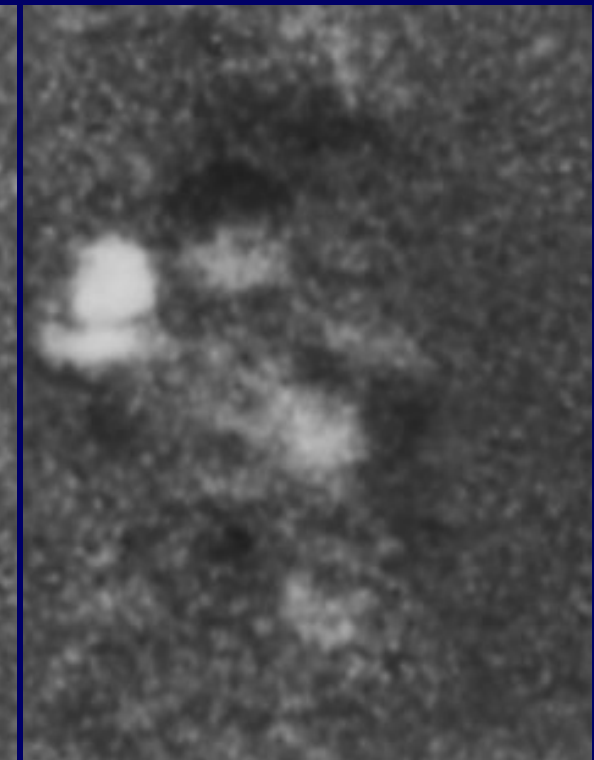
収縮早期

位相画像



収縮早期

水平横断像

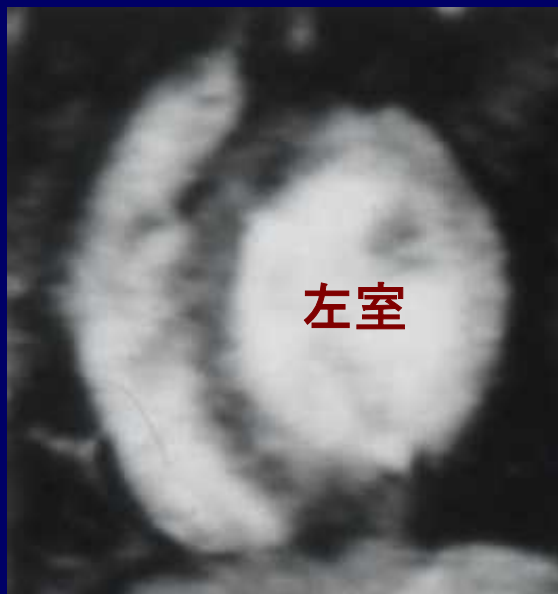


拡張早期

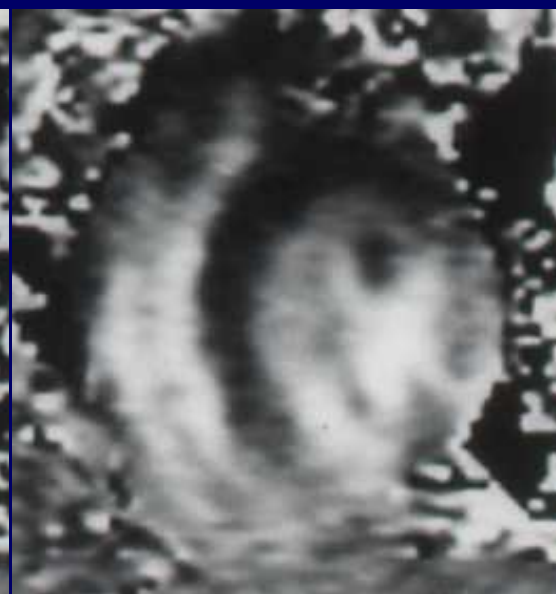
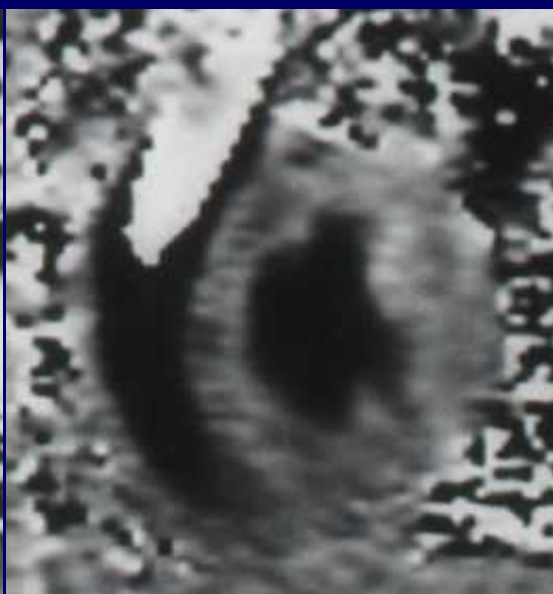
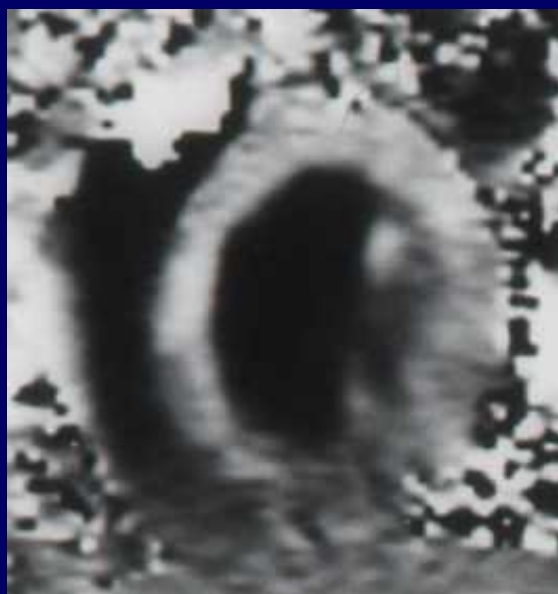
心筋位相コントラストMR法

正常ボランティア

強度画像



位相画像



収縮早期

収縮末期

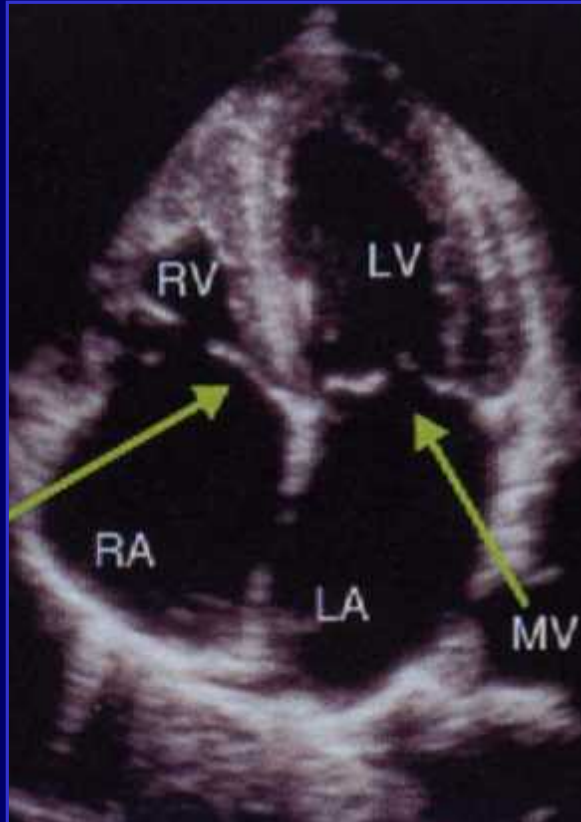
拡張早期

黒
↑
白

心エコー図法: Echocardiography

正常例

心尖四腔断面像

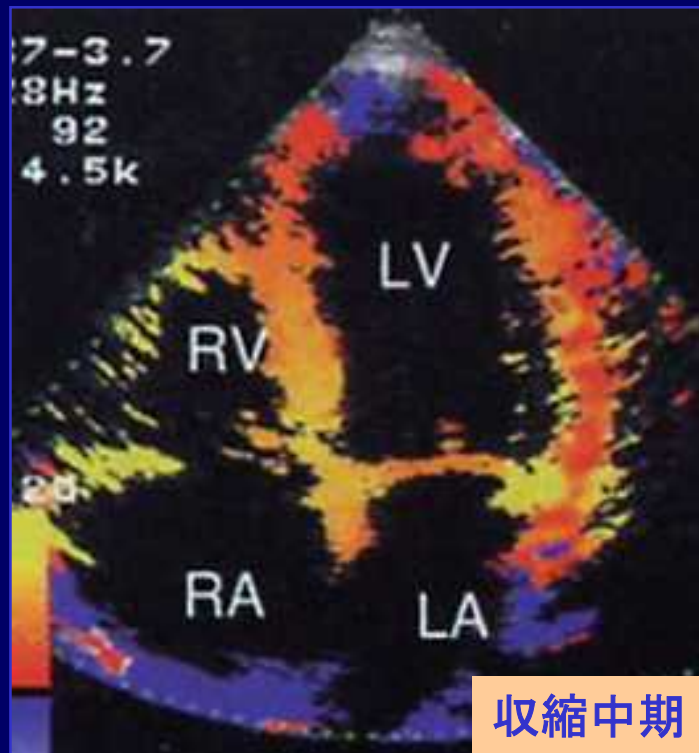


B-モード

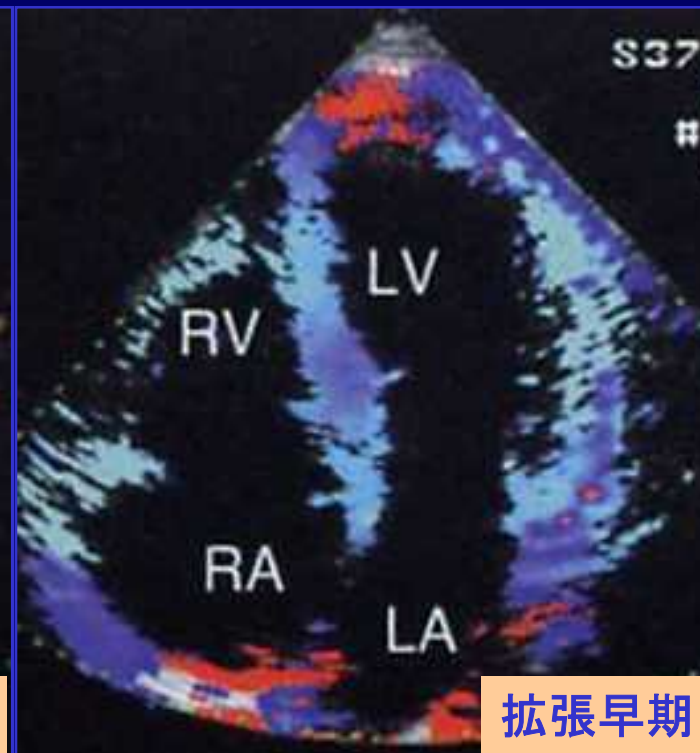


カラードプラ

(東芝メディカル: 医用画像辞典より)



収縮中期



拡張早期

心エコー図

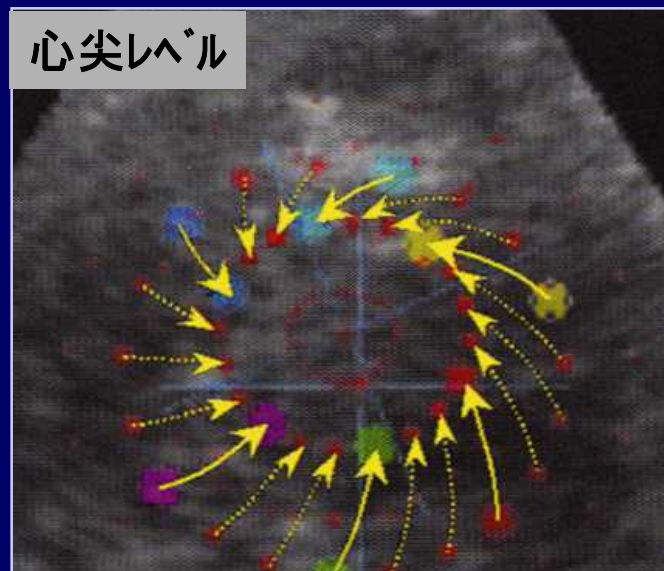
組織
ドップラ法
四腔断面

(東芝メディカル;
医用画像辞典より)

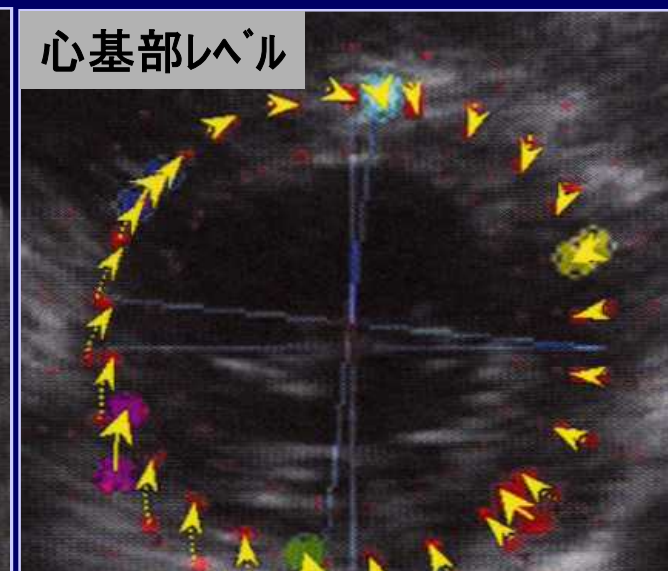
スペックル
トラッキング法
短軸断面

(木村伸昭:
心エコー2006,10月号)

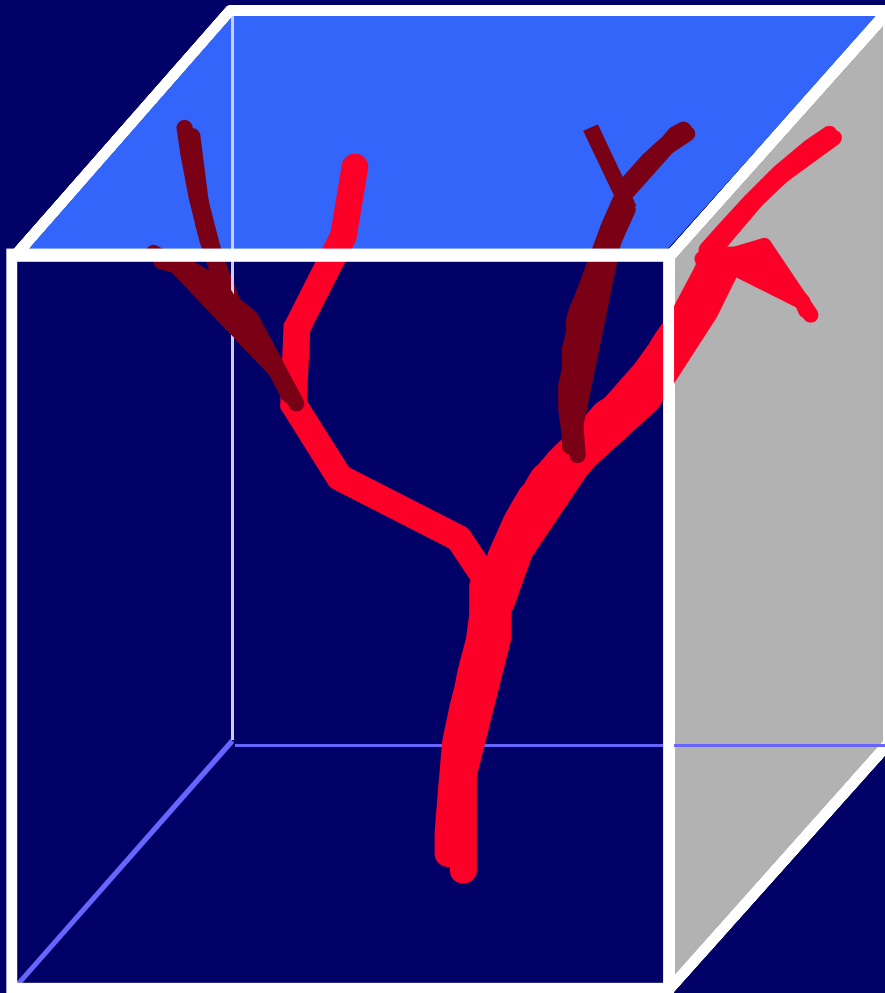
心尖レベル



心基部レベル



三次元血管撮影法: CTA / MRA



従来のカテーテル
血管造影法に対して:

優位点

- * 低侵襲性
- * 視点の自在性
- * 血管壁の診断
- * 周囲構造との関係



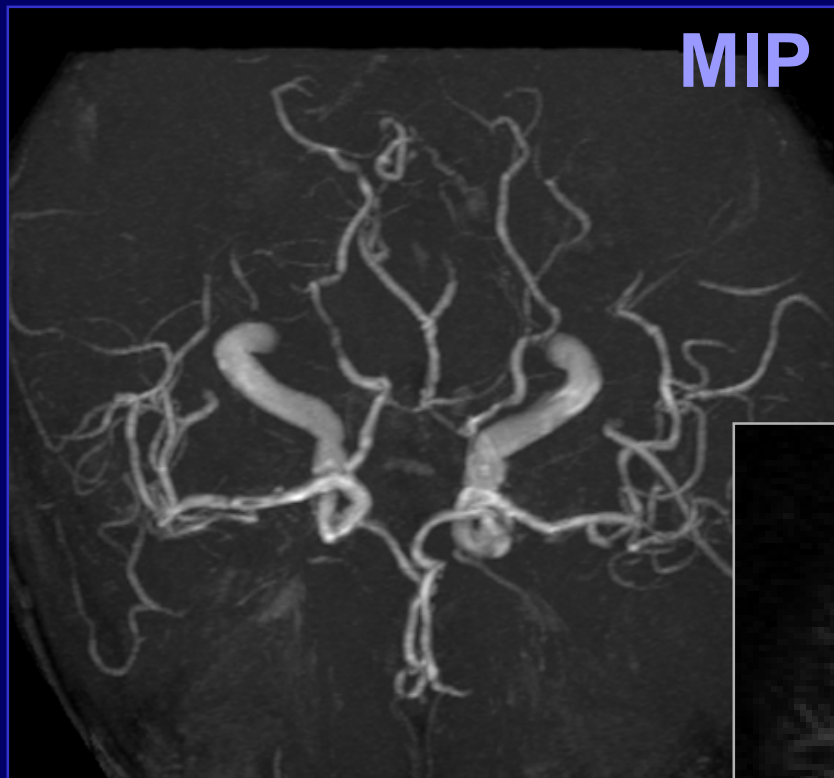
MR
アンジオグラフィ

非造影TOF-
MR血管撮像

カテーテル
X線血管造影法
内頸動脈造影

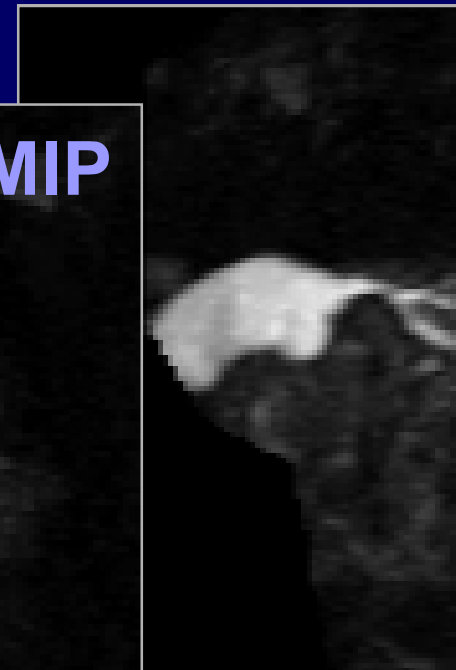


MRアンジオグラフィ: 強度情報利用



非造影TOF-MRA
頭部血管

造影ダイナミックMRA
肺動脈

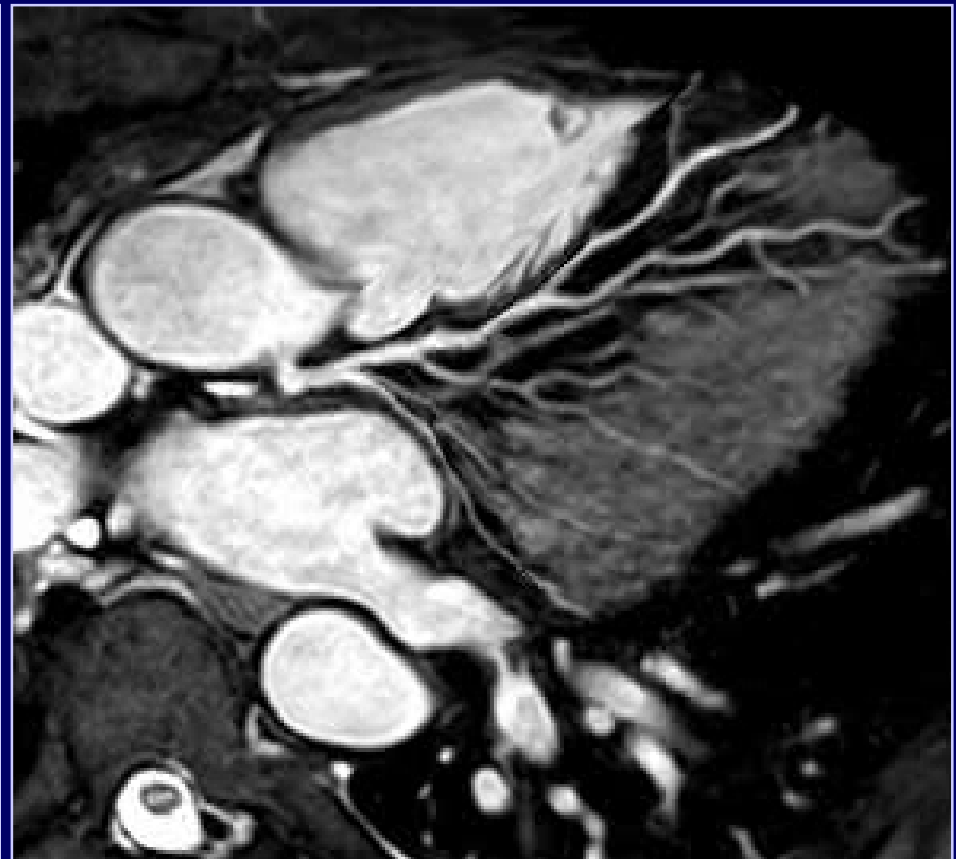


MRアンジオグラフィ:MRA

- * 血管内腔の高信号化:GRE法撮像がベース
 - ・強度情報の利用:TOF・定常状態GRE / 造影剤
 - ▶ 血流速度・方向・造影タイミングなどの問題
 - ・位相情報の利用:フェーズコントラスト(PC)法
 - ▶ 血流状態に対応～定量化可能 / 撮像時間長い
 - * 血管外の信号抑制:脂肪抑制・MTC...
 - * 体積データ収集:2D法 / 3D法
 - * 画像表示法:MPR・MIP・表面/体積レンダリング法
-

冠動脈MRアンジオグラフィ

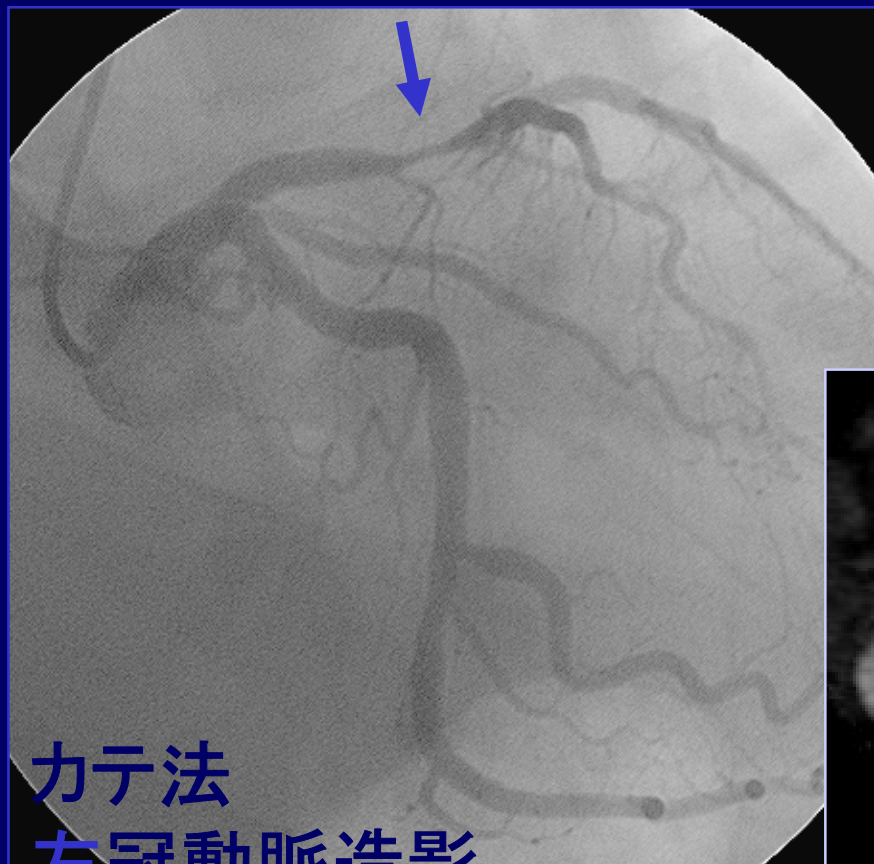
Soap-Bubble MIP表示



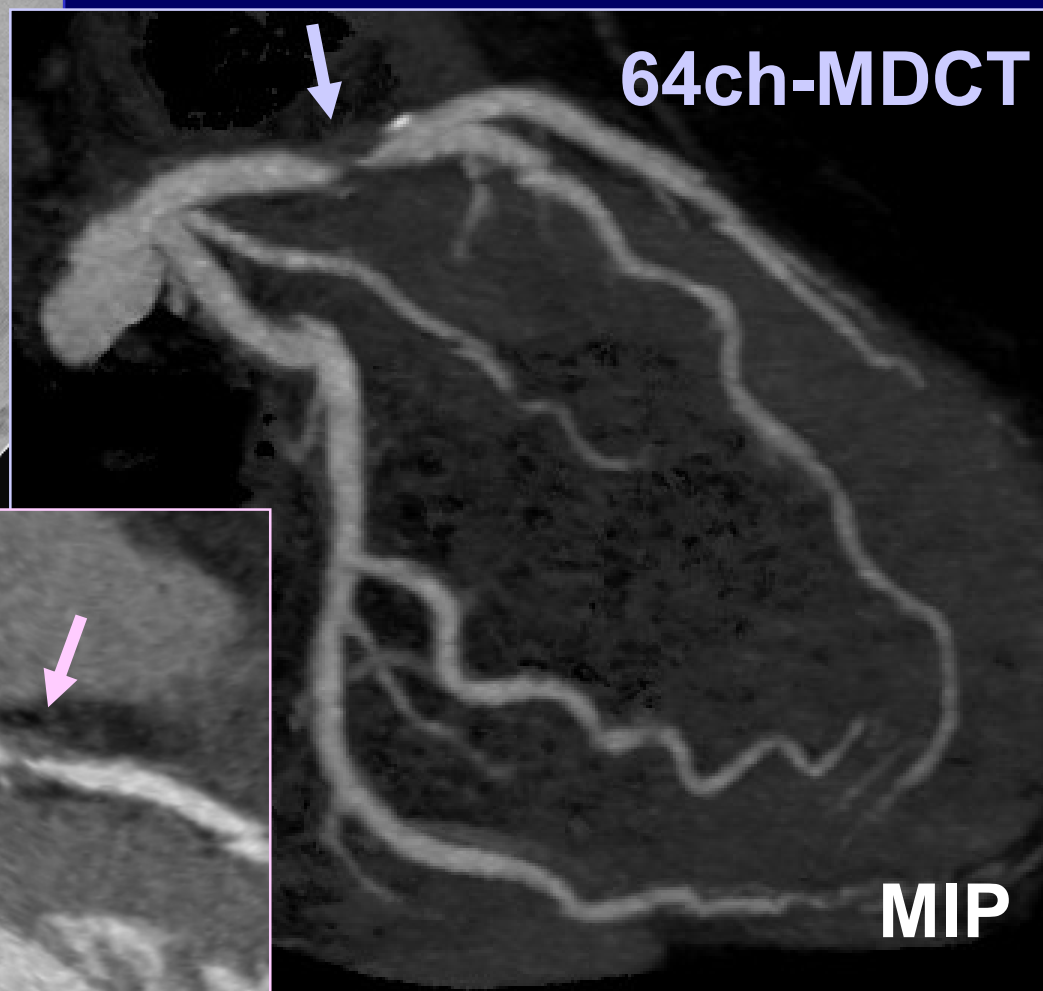
提供: フィリップスメディカルシステムズ

冠動脈撮影法

カテーテル法 vs CTA



カテ法
左冠動脈造影



64ch-MDCT

MIP



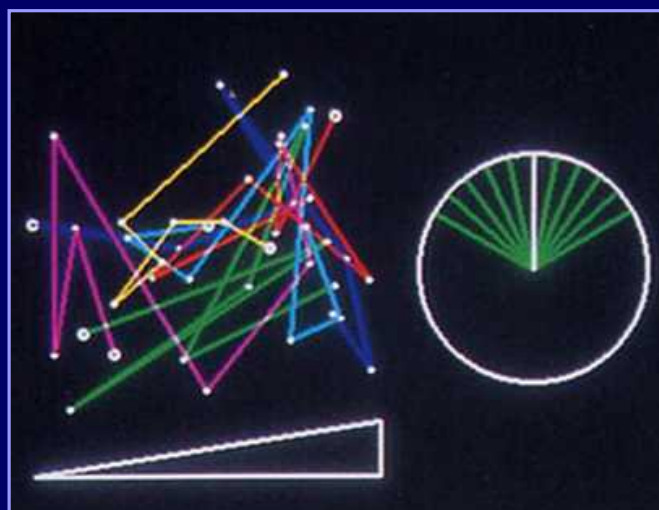
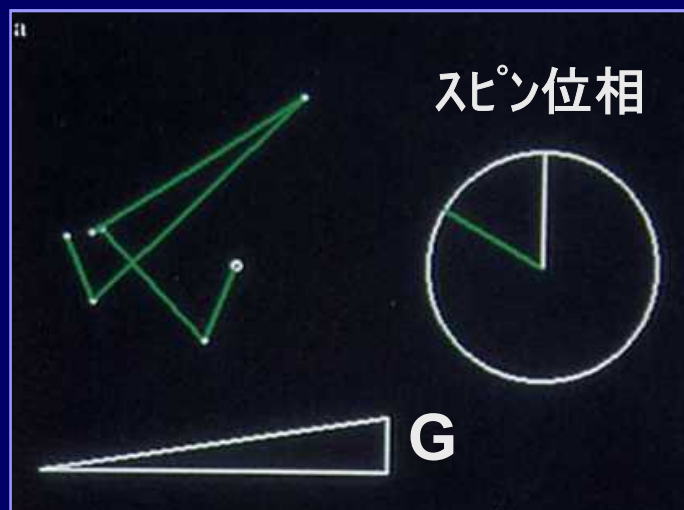
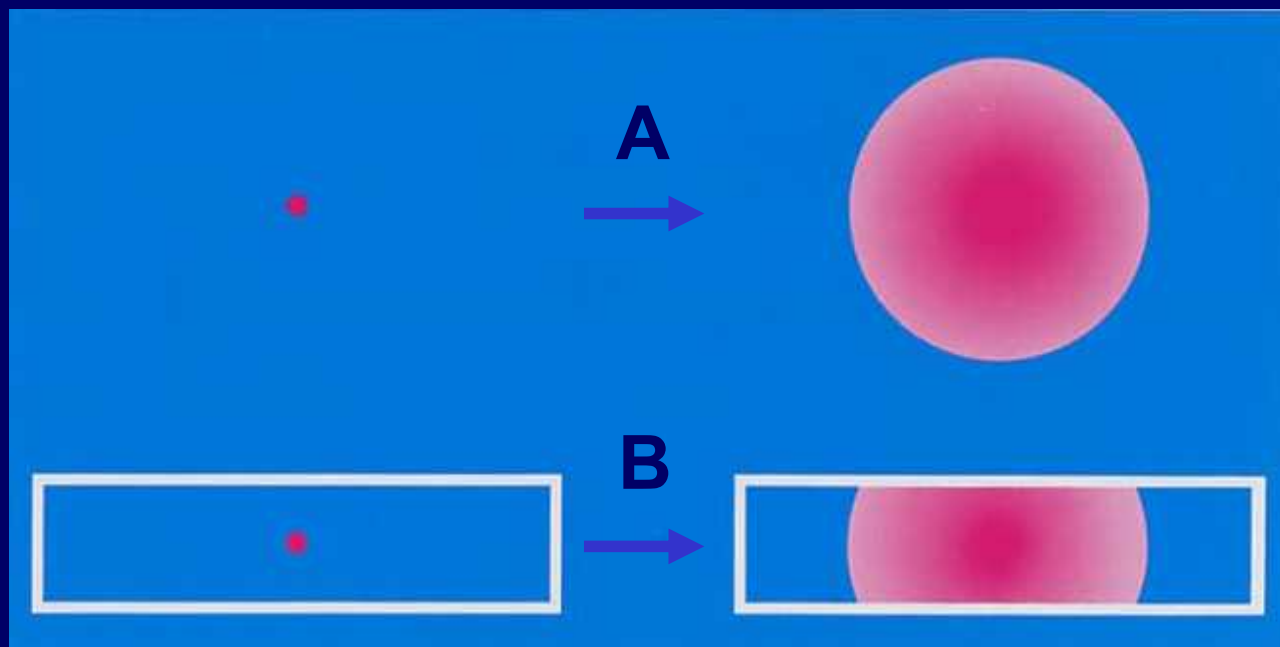
MPR

左冠動脈
狭窄の症例

分子拡散イメージング

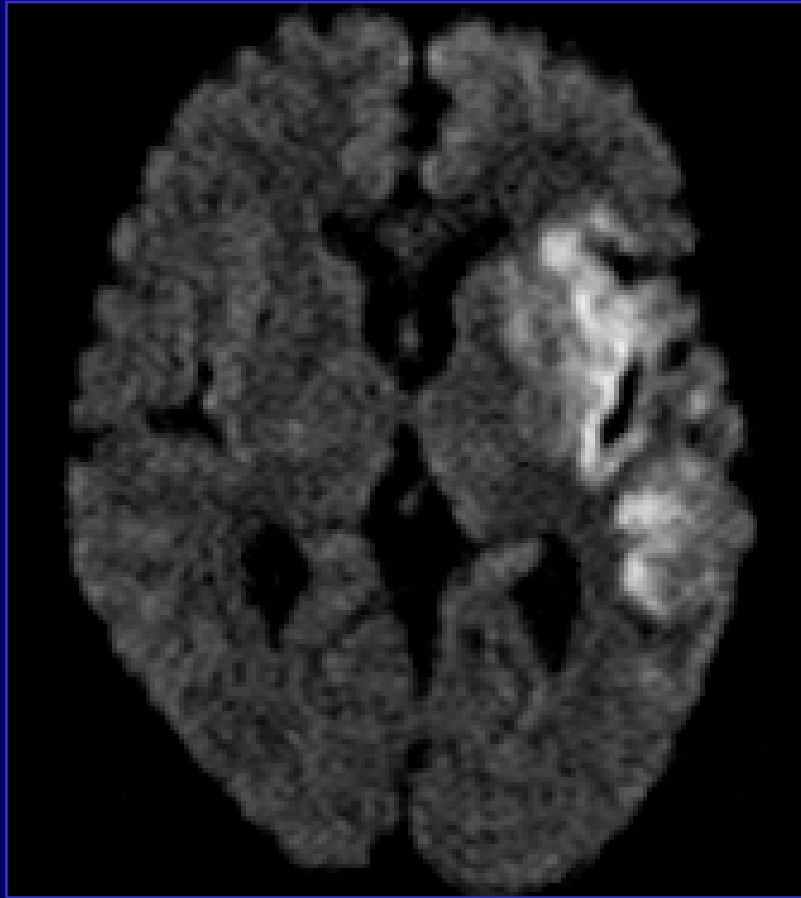
A:
等方性拡散

B:
異方性拡散



(原田貢士:
MRIの臨床より)

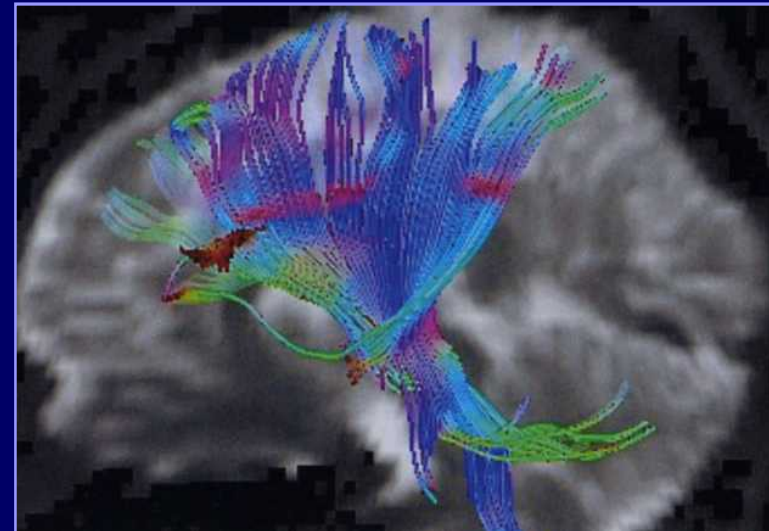
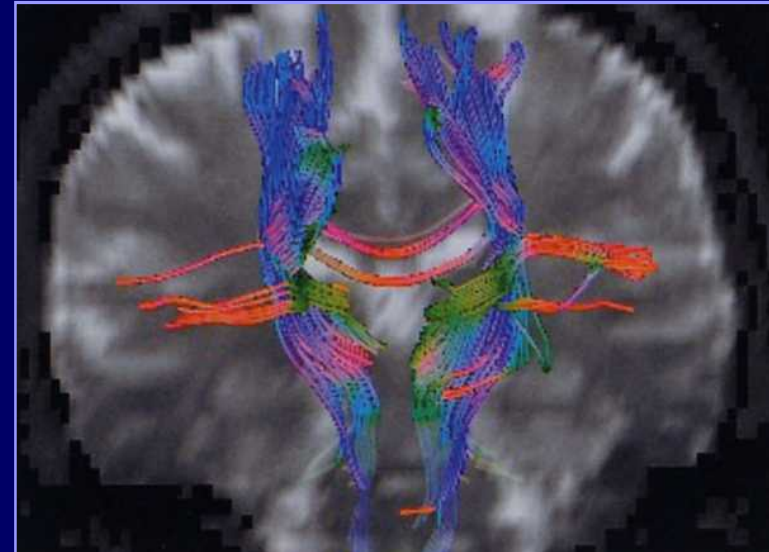
拡散強調撮像



急性期脳梗塞例

動物実験では発症1時間の
梗塞から検出可能

MRトラクトグラフィ



NMR現象を臨床医学へ

1. NMR現象とは
2. NMR信号のイメージング
3. 画像の信号強度と組織性状
4. スピンエコー法 / グラジエントエコー法
5. 常磁性体の影響・MR造影剤
6. 心拍動 / 血流 / 分子運動イメージング
7. 高速撮像法・高磁場イメージング



MRI: 患者の訴え

- * 狭い
- * 長い
- * やかましい

最新装置: 1.5T

シーメンス製
1.5テスラ超伝導MRI

“短い”装置も出現 →



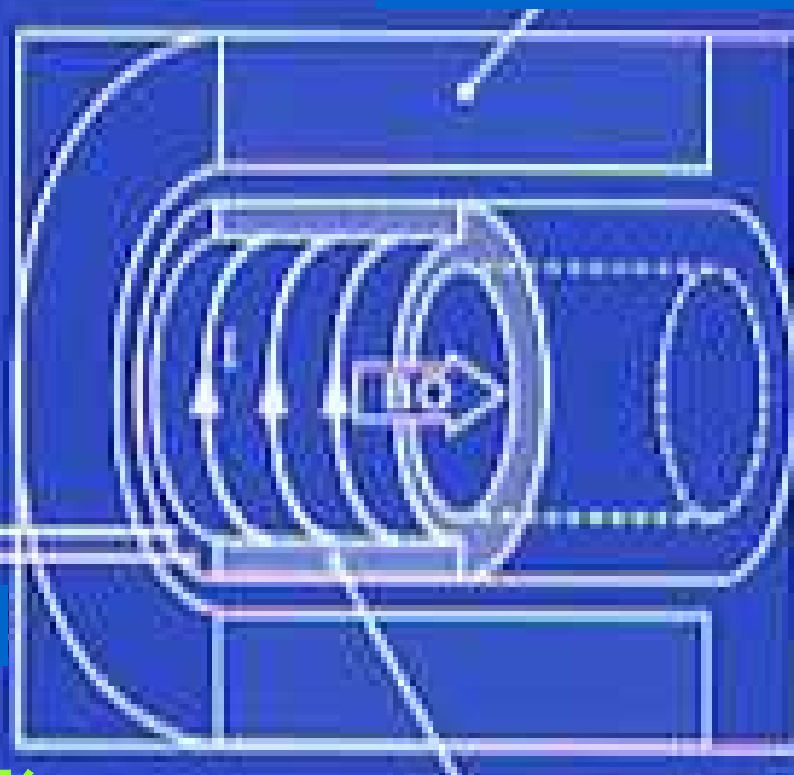
コントローラ

傾斜磁場電源

入力波形

静磁場磁石

傾斜磁場コイル



コイルが受ける
ローレンツ力

力

磁界



電流

コイル内を流れる電流

傾斜磁場の磁力線

傾斜磁場コイル

高速撮像法

- * TRの短縮
GRE系の撮像

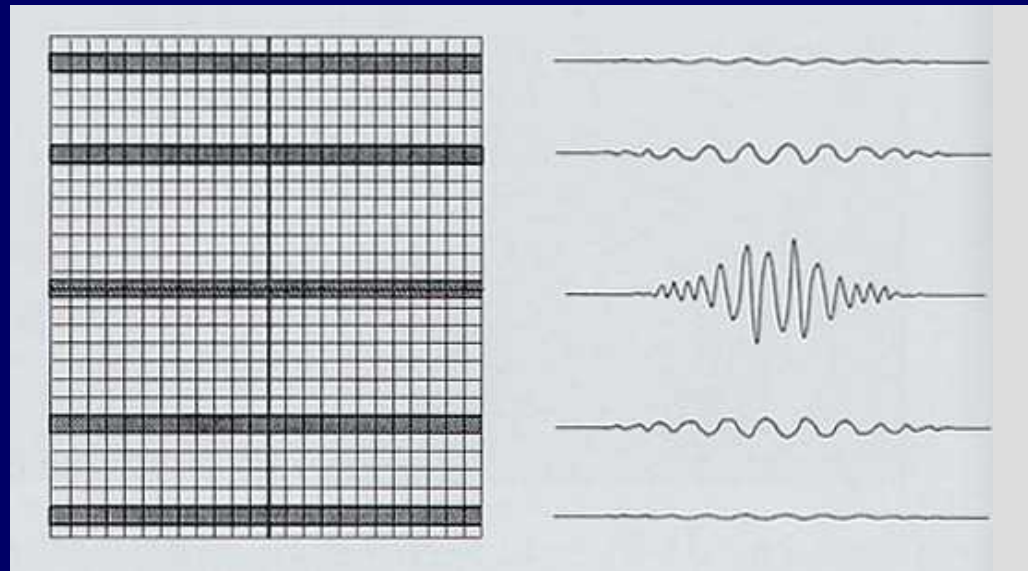
- * RFショット数減少
エコープラナ法

- * k-空間充填の工夫
不均等・簡易充填

- * マルチコイル/チャンネル
並列撮像法

k-空間

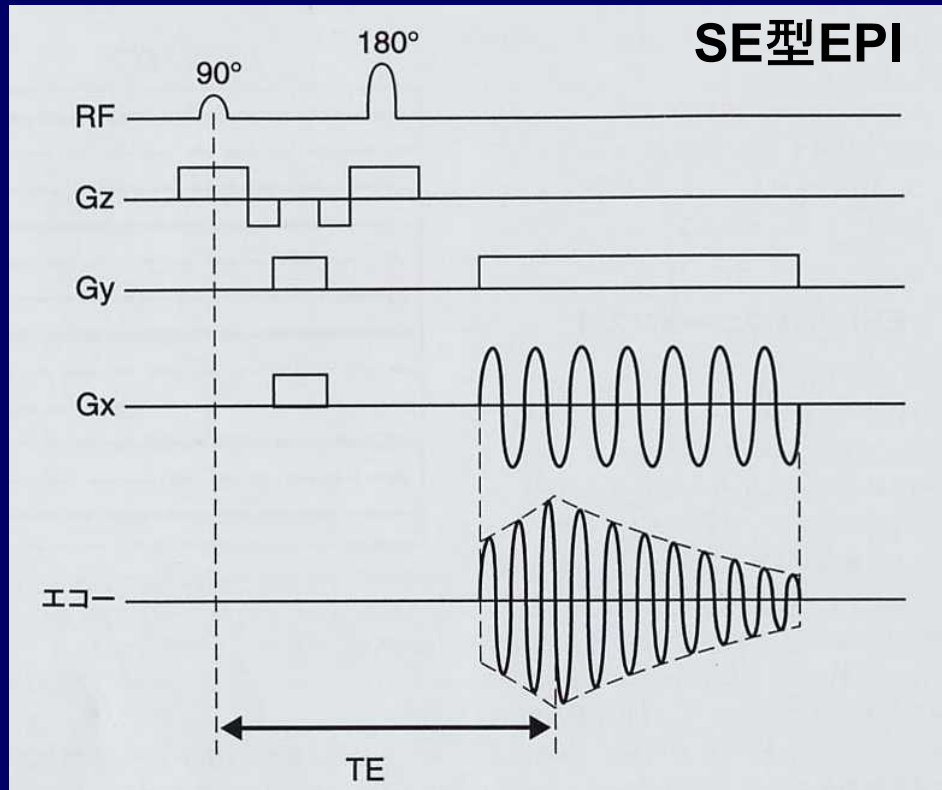
エコー信号



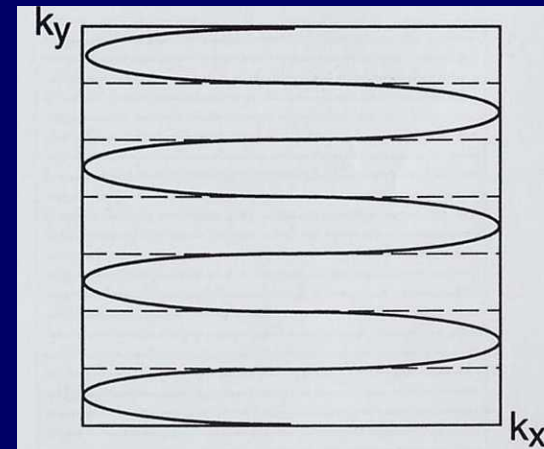
撮像時間:

$$\text{TR} \times \text{RFショット数} \times \text{加算回数}$$

EPI: エコープラナー・イメージング



k-空間充填の軌跡
ジグザグ～スパイラル...



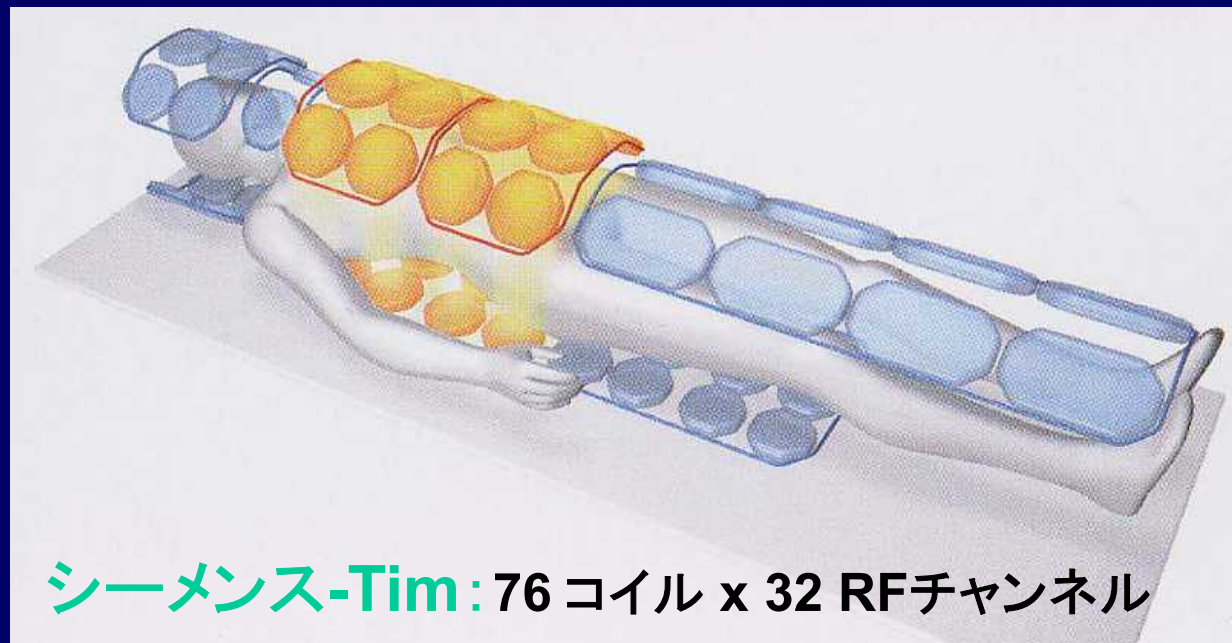
- * 1回のRFで超多数信号獲得: 100ミリ秒以下の撮像可能
- * GRE型 / SE型データ収集・シングルショット / マルチショット

(ハシエミ ほか: MRIの基本 パワーテキスト より)

高速MR撮像法

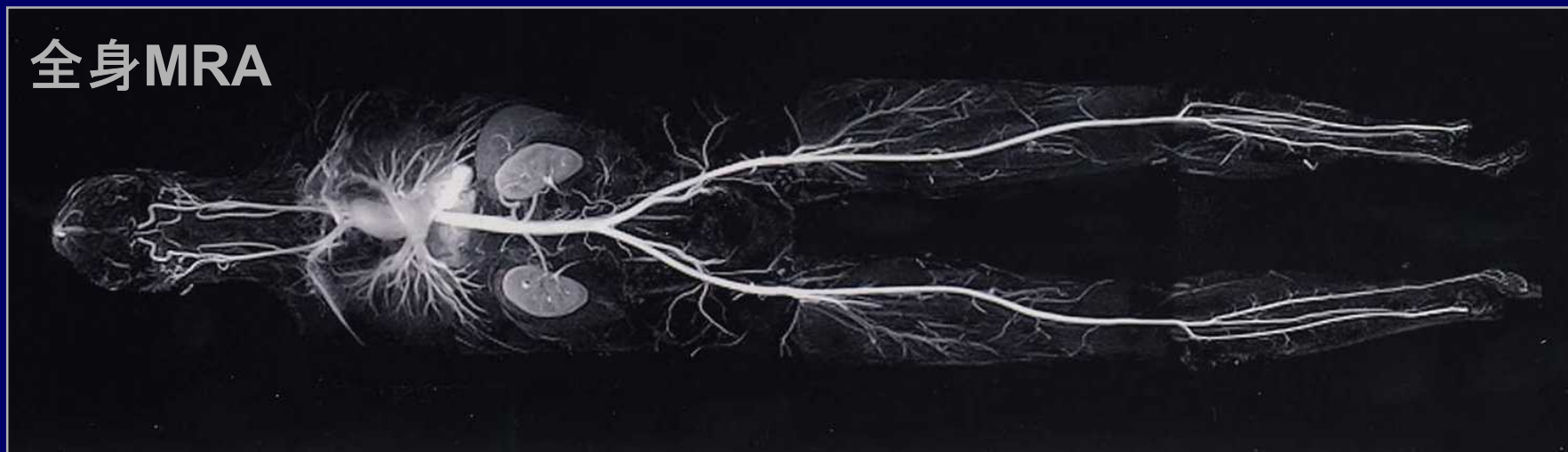
パラレルイメージング：
並列撮像法

マルチコイル /
マルチチャンネル
システム



シーメンス-Tim: 76 コイル x 32 RFチャンネル

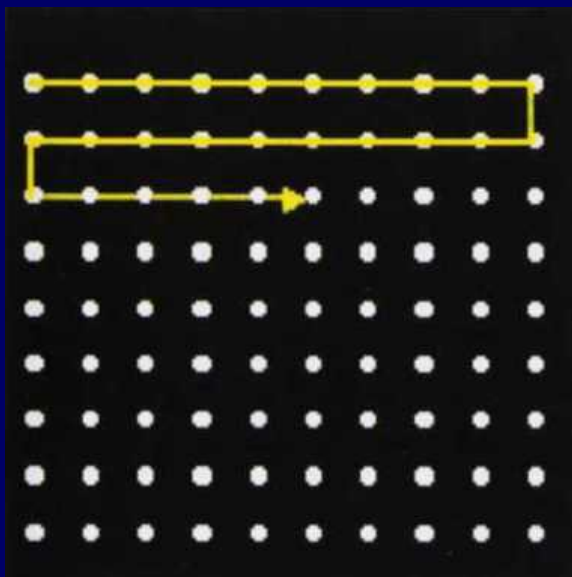
全身MRA



(シーメンス社パンフレットより)

k-空間 信号読み取り時間軸

位相エンコード時間軸



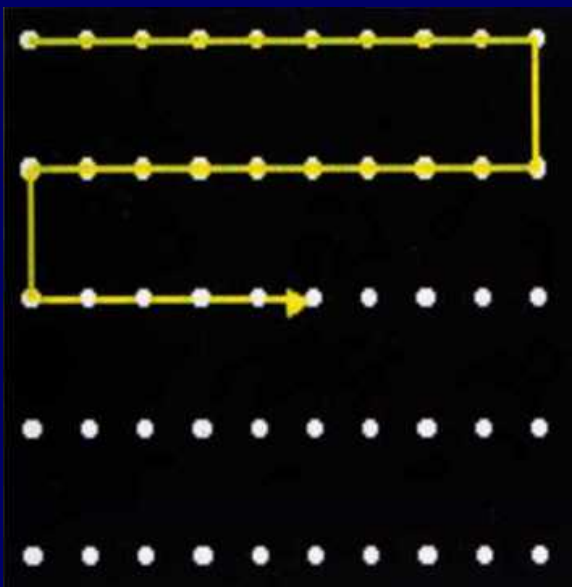
フーリエ変換



信号読み取り



位相エンコード時間軸



フーリエ変換



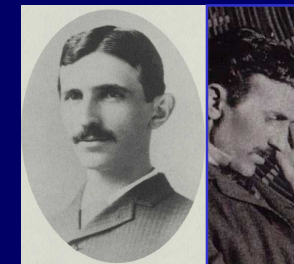
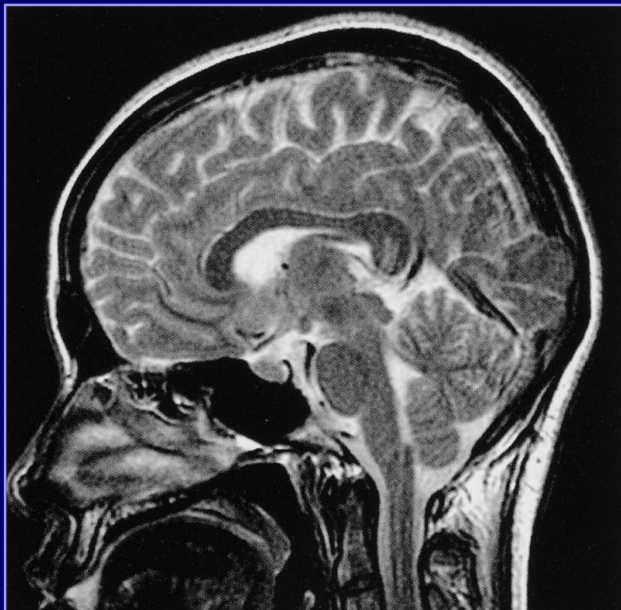
信号読み取り



“折れ返り”
アーチファクト

位相エンコード

(カウレン: Parallel Imagingの原理. 日獨医報 2002)



1.5テスラ

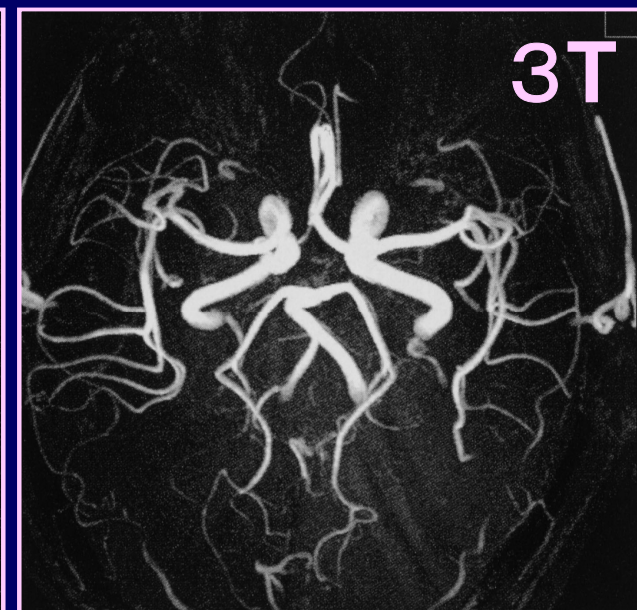


3テスラ



高磁場装置 の有用性:

(シーメンス:
MAGNETOM
FLASH, 2005 より)



主磁場強度

低磁場

～0.1T～

高磁場

1T～1.5T～3T～？

・装置価格

数千万円

数億円

・維持費(年間)

安価

一千万円

・磁場の遮蔽

容易

難

・傾斜磁場の性能

高性能でなくてもよい

高性能が必要

■ SN比

低い

高い！

・緩和時間(T1)

短い

長い

・化学シフト

小さい

大きい

・磁化率効果

小さい

大きい

・動きのアーチファクト

小さい

大きい

・金属異物に対する力

小さい

大きい

MRI: 画像の特徴

- * 断層像: 断面方向は自在

視野広い, 位置再現性・距離計測精度かなり高い

- * 面内分解能 $\leftrightarrow$ 画素サイズ: 約1mm x 1mm

体軸方向分解能 $\leftrightarrow$ 断面厚み $>$ 画素サイズ

- * 時間分解能 $\leftrightarrow$ 撮像時間: 数秒～数10分(→ 同期撮像法)

- * 組織のコントラスト: 多彩・定量性には乏しい

軟部組織のコントラスト高い(→ 造影剤の必要性?)

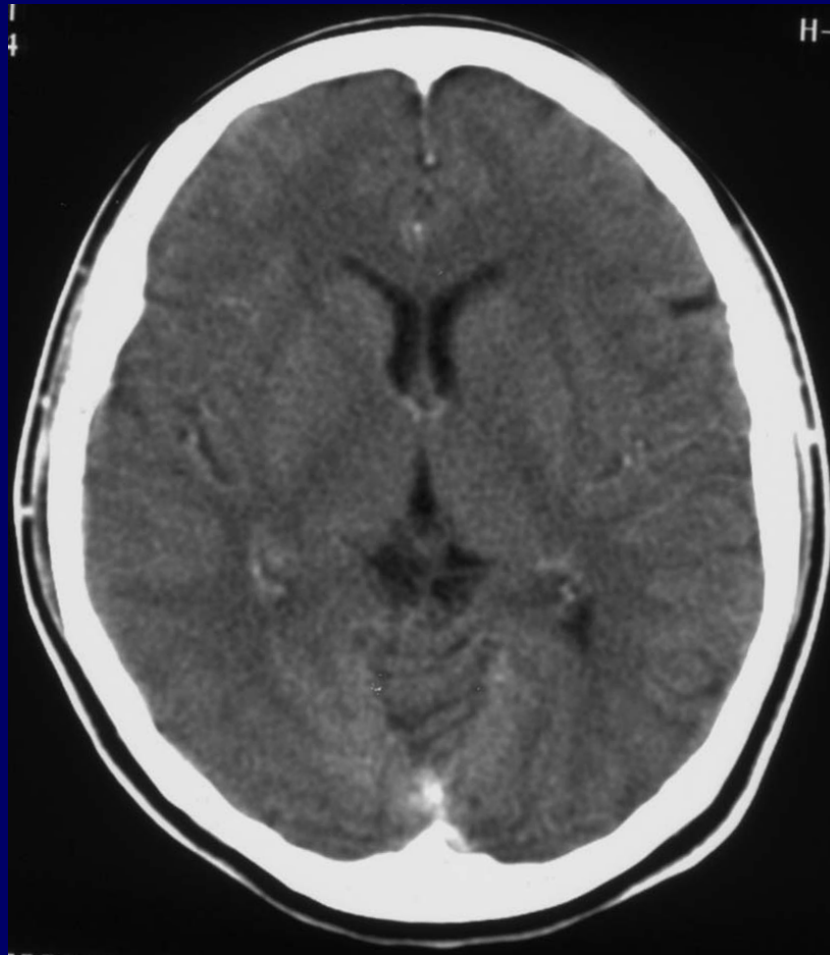
脂肪・水の描出は容易, 石灰化の特異的描出は困難

- * 動き・流れに敏感 → 動き解析の可能性, アーチファクト

- * アーチファクト多い, 画像の安定性やや不十分

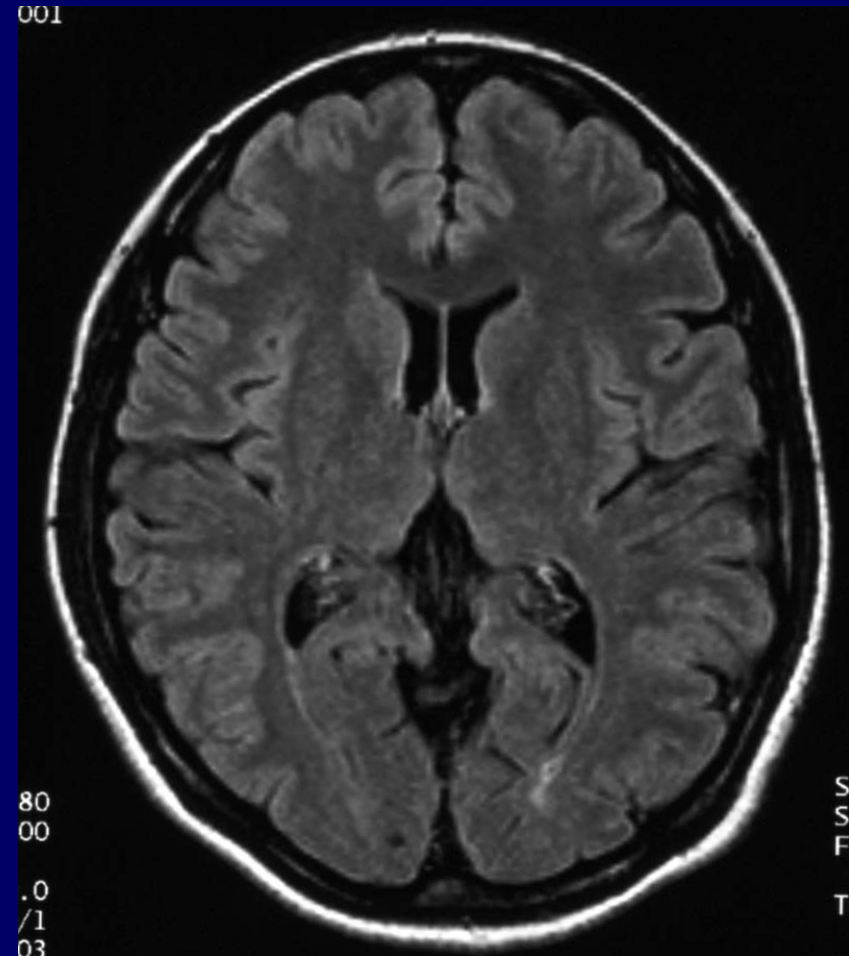
X線コンピュータ断層撮影法

X-Ray CT:
Computed Tomography



磁気共鳴画像診断法

MRI: Magnetic
Resonance Imaging



X線CTとMRI: 特徴のまとめ

	CT	MRI
* 画像の特徴:	高精細(0.5mm)	高コントラスト
・断面の自在性	3D再構成で可能	直接撮像で可能
* 検査法の特徴:		
・検査対象の制限	ほとんどなし	やや多い
・検査時間	短い	長い
・放射線被曝	あり	なし
・造影剤必要性	非常に高い	あまり高くない
# 侵襲性:	低い	(非常に?)低い