

2008.11.27 大阪大学医学部

臨床医工学融合研究教育センター・画像医学

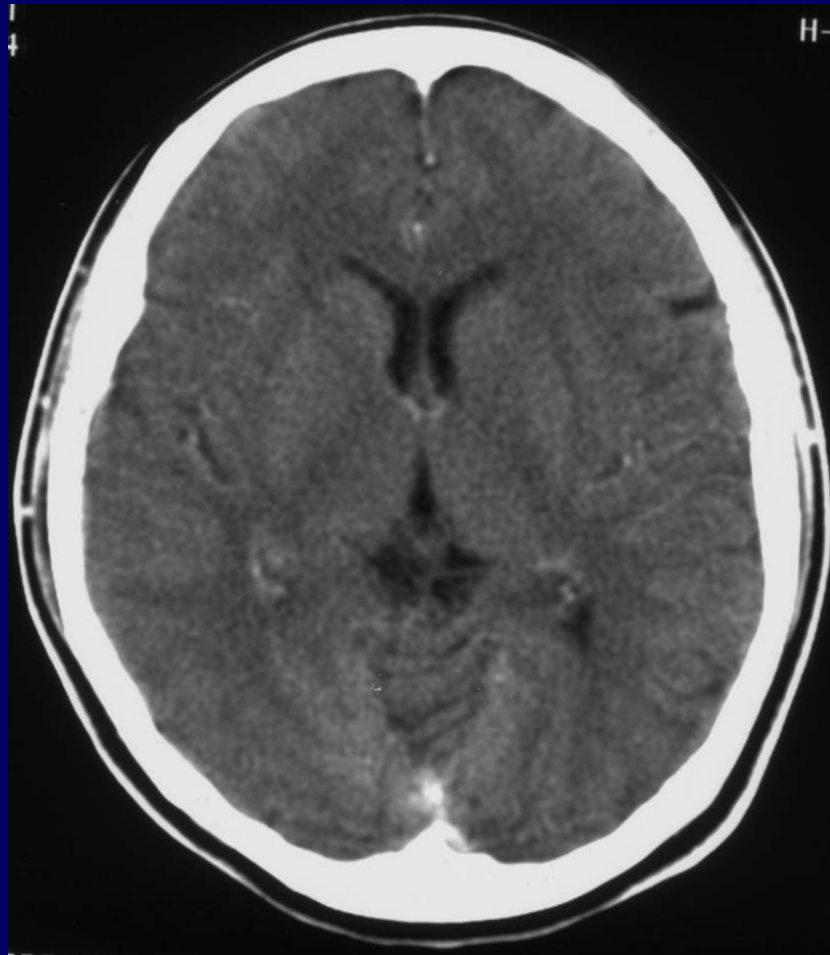
医用画像の基礎：MRIの原理と実際



国立循環器病センター・放射線診療部 内藤 博昭

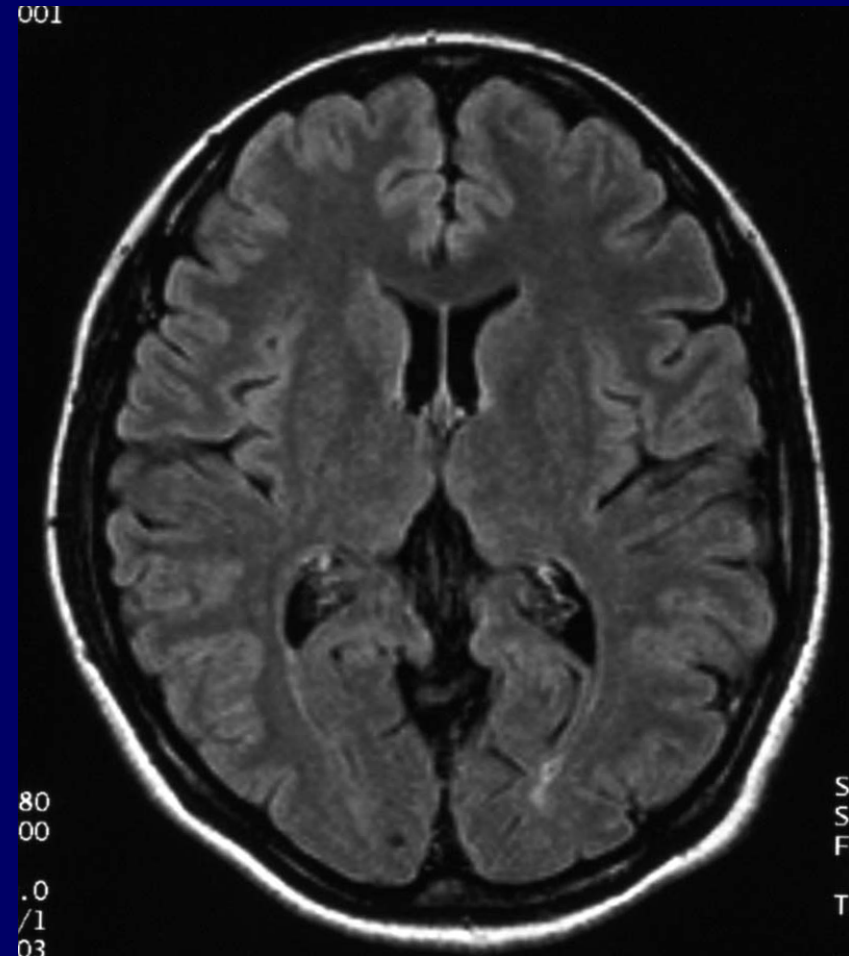
X線コンピュータ断層撮影法

X-Ray CT:
Computed Tomography



磁気共鳴画像診断法

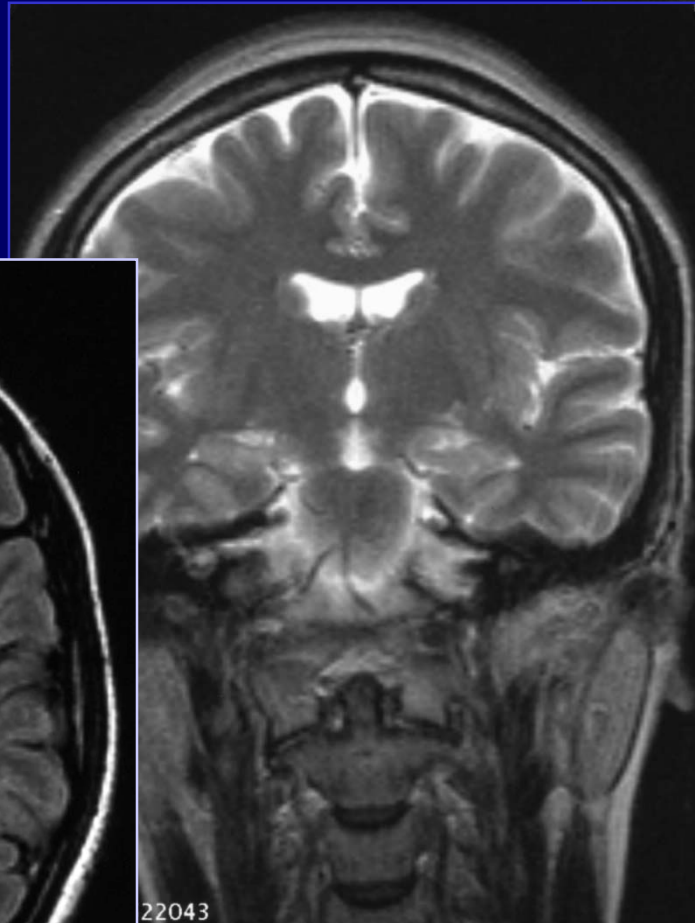
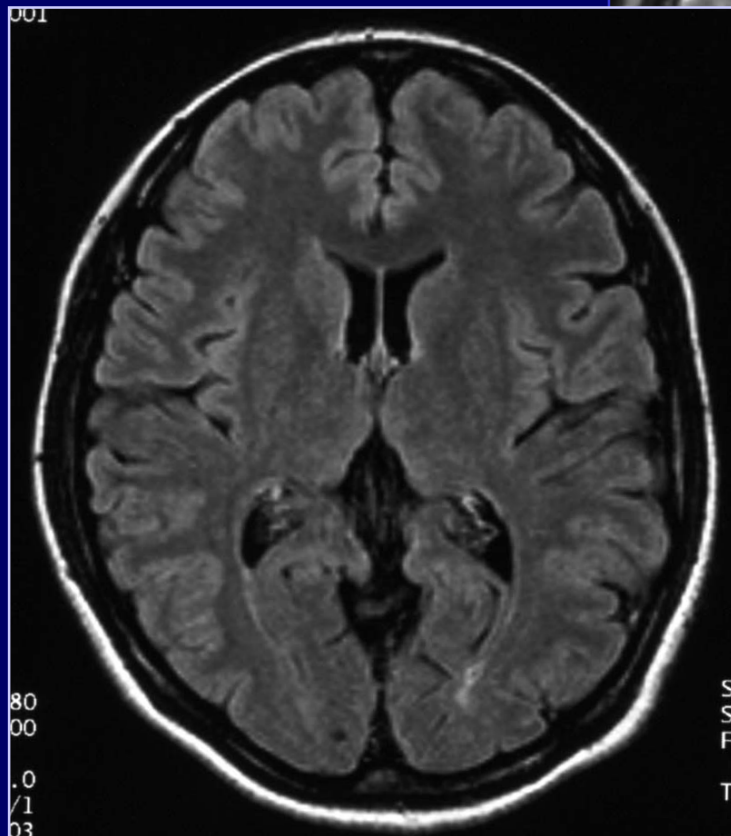
MRI: Magnetic
Resonance Imaging



MRI画像

頭部冠状断像

頭部水平横断像

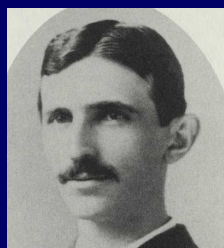


頭頸部
MR
アンジオグラフィ



超伝導電磁石 の内部構造

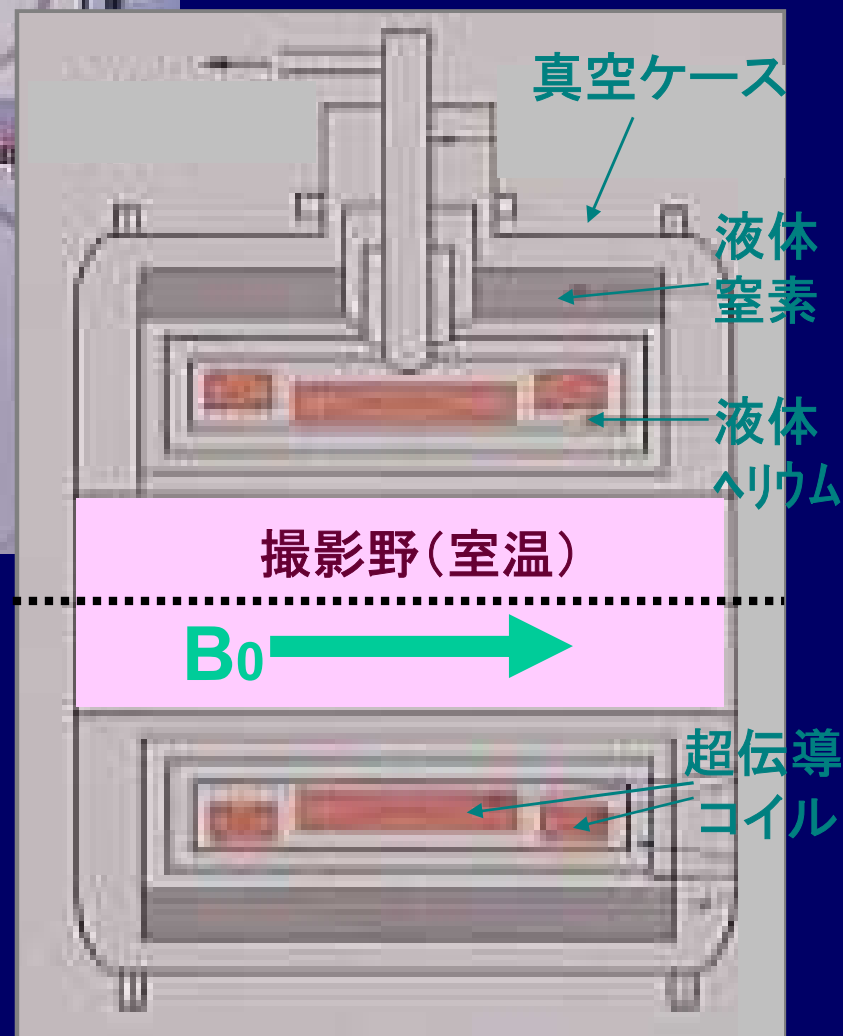
シーメンス マグネトム H15
(1984; NCVC導入, 1.5T装置)



1テスラ = 10000ガウス

N.テスラ

K.F.ガウス





シーメンス
マグネトム H15

+ ストレッチャ...

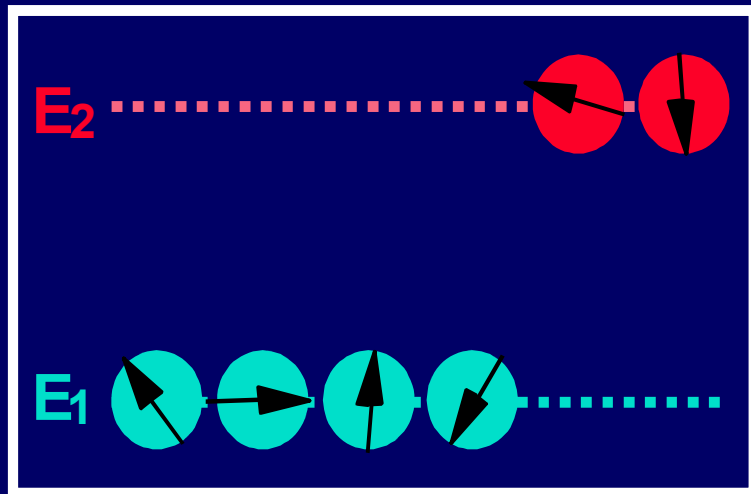
(1988;レジデントにより導入)



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

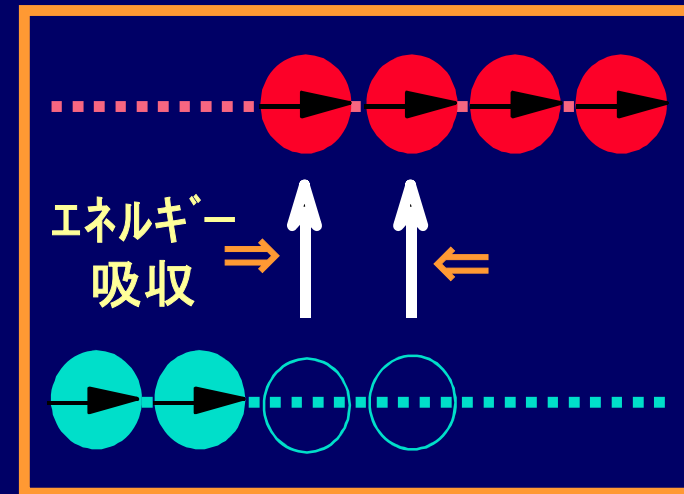
基準状態



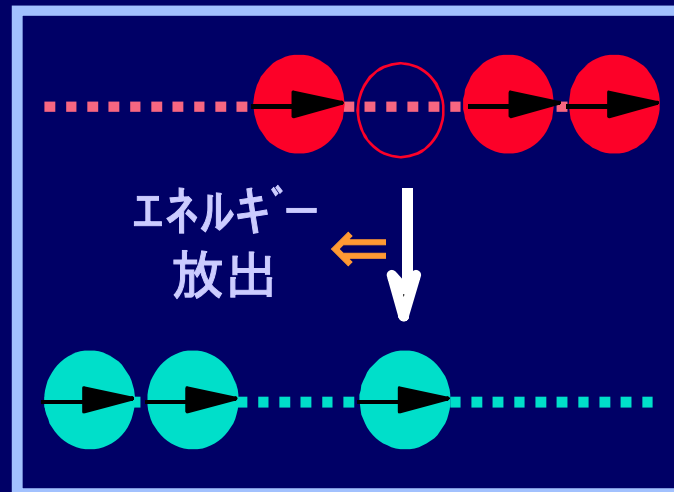
RF
照射



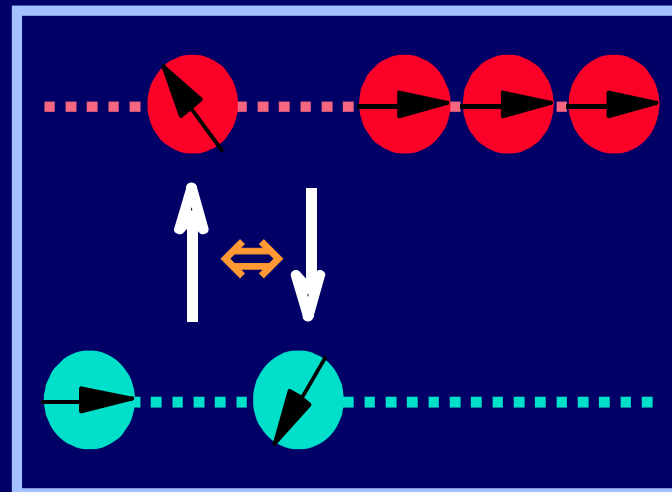
NMR現象



緩和



スピン・格子緩和



スピン・スピン緩和



F.ブロッホ



E.M.パーセル

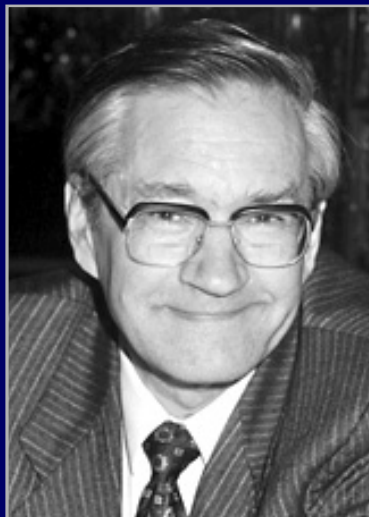
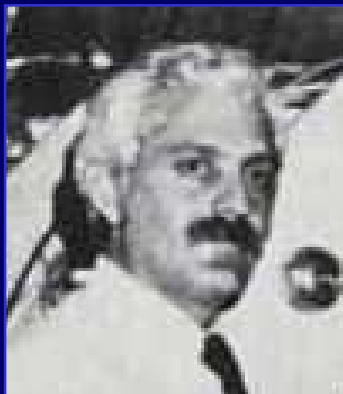
* ブロッホ / パーセル:
NMR発見(1946) (ノーベル賞1952)

* ダマディアン:
腫瘍の緩和時間延長(1971)

* エルンスト:
フーリエ変換NMR(ノーベル賞1991)

* ローターバー / マンスフィールド:
NMRイメージング(ノーベル賞2003)

R.ダマディアン



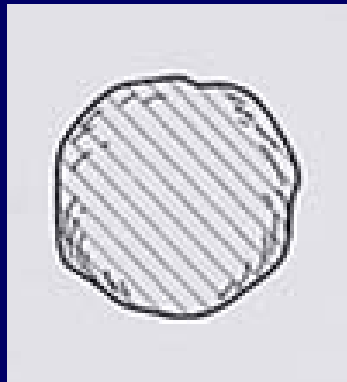
R.R.エルンスト



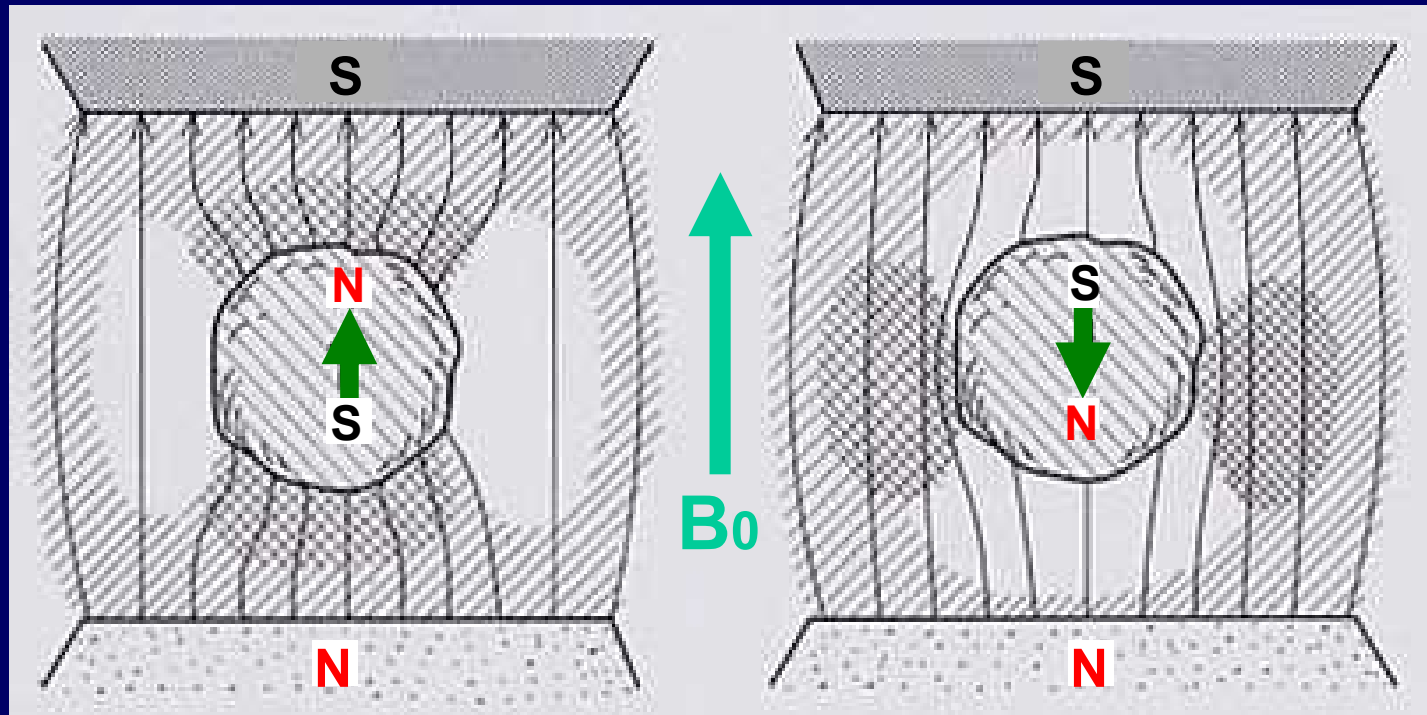
P.マンスフィールド

P.C.ローターバー

磁場と物質の磁性



磁性なし



常磁性:
paramagnetic

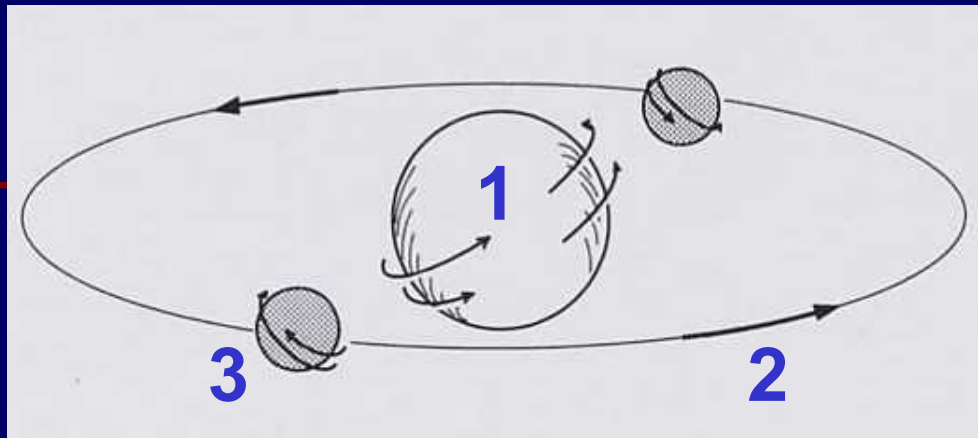
反磁性:
diamagnetic

磁化率 χ_m : 正

負

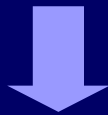
原子・分子磁石

種類	磁性／相対強度	物質の磁気特性
1. 原子核の自転	常磁性／1	寄与は小さい
2. 電子の(軌道)運動	反磁性／-100	反磁性：高磁場内
3. 電子の自転	常磁性／1000	不対電子 常磁性：高磁場内 超常磁性・強磁性



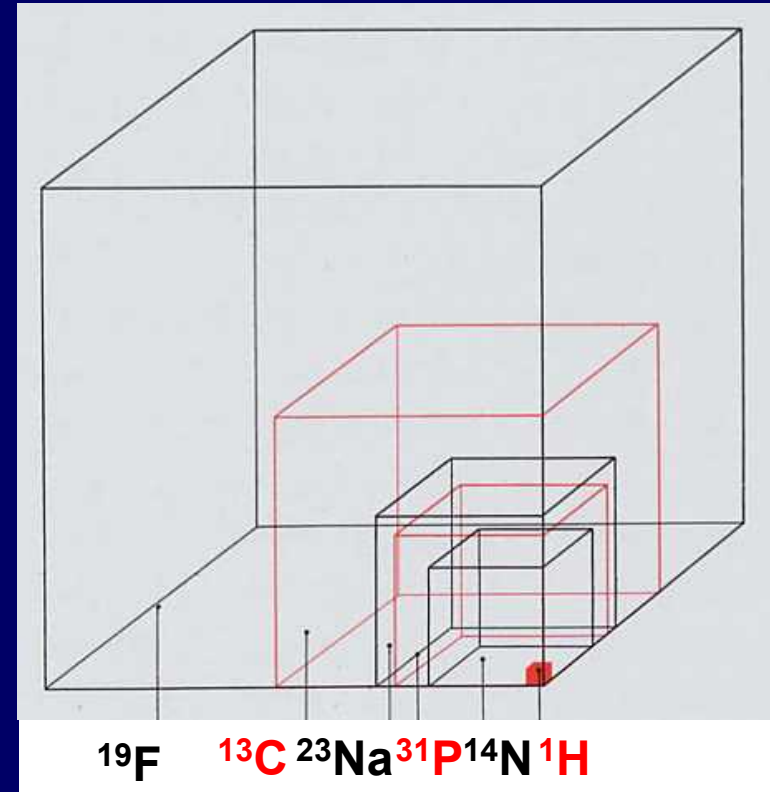
MRI: 対象核種の決定

- * 核常磁性の有無:
陽子または中性子が奇数
- * 生物学的感度
 - ・核種自身の物理的感度
 - ・同位体の自然存在比
 - ・体内存在量
- * 医学的意義



#イメージング対象核種: 水素原子核(プロトン)!

同じS/Nを得るための信号収集サイズ



(真野 勇: 図説MRI より)

原子核磁石と磁場

ラーモアの式

$$\omega = \gamma \times B$$

ω : ラーモア角周波数

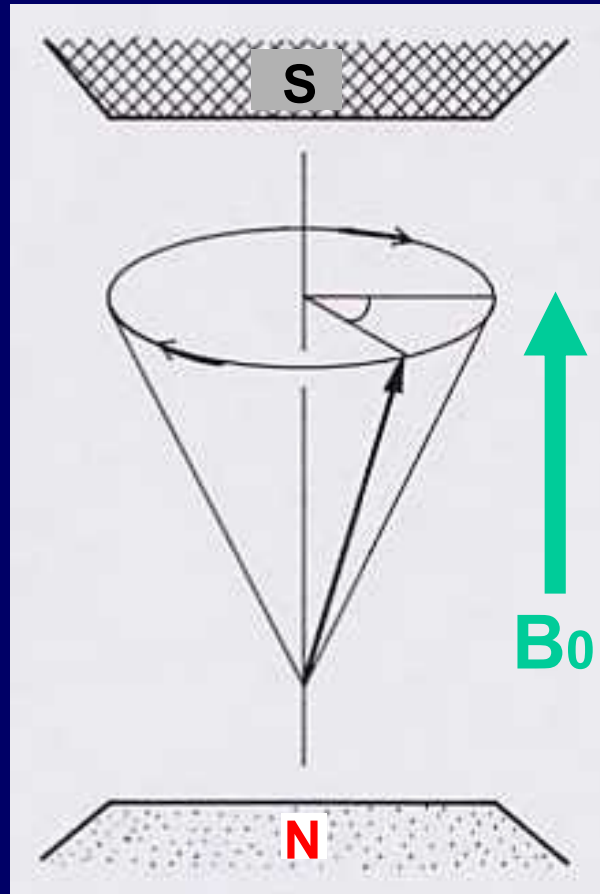
γ : 磁気回転比

B : 磁場強度

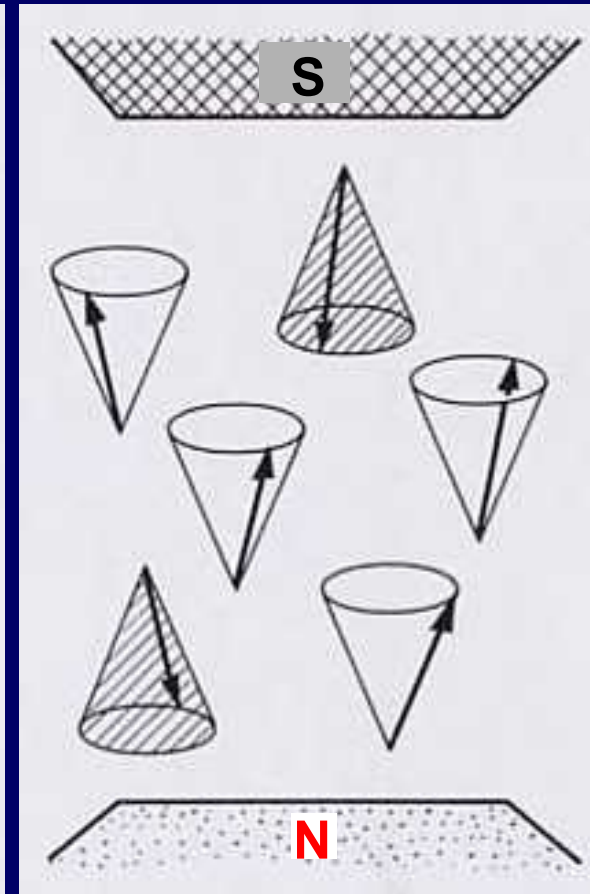
磁気回転比

42.6MHz/T (^1H)

17.2MHz/T (^{31}P)



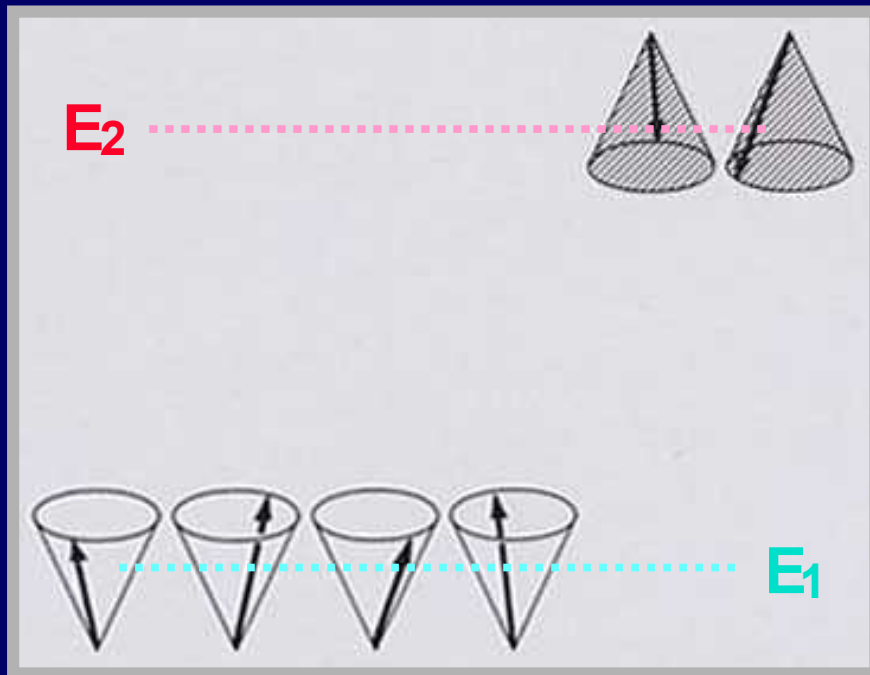
原子核磁石の
歳差運動



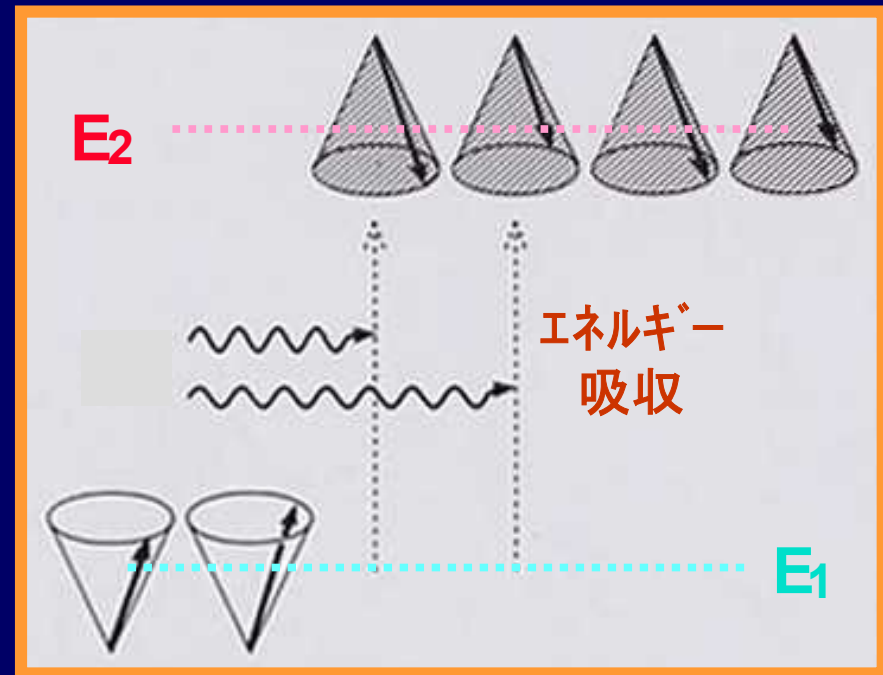
歳差運動の向き/傾き
とエネルギー準位

核磁気共鳴現象：量子論的説明

基準状態：熱平衡

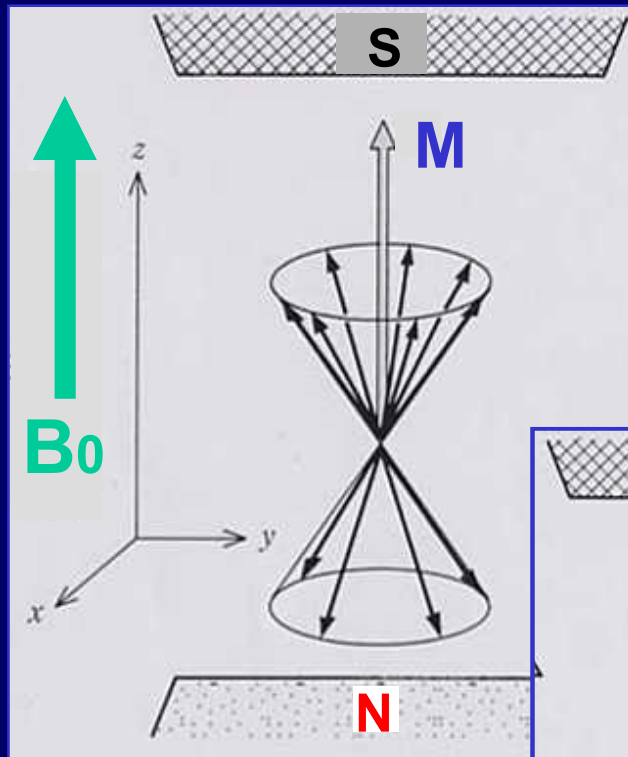


NMR現象

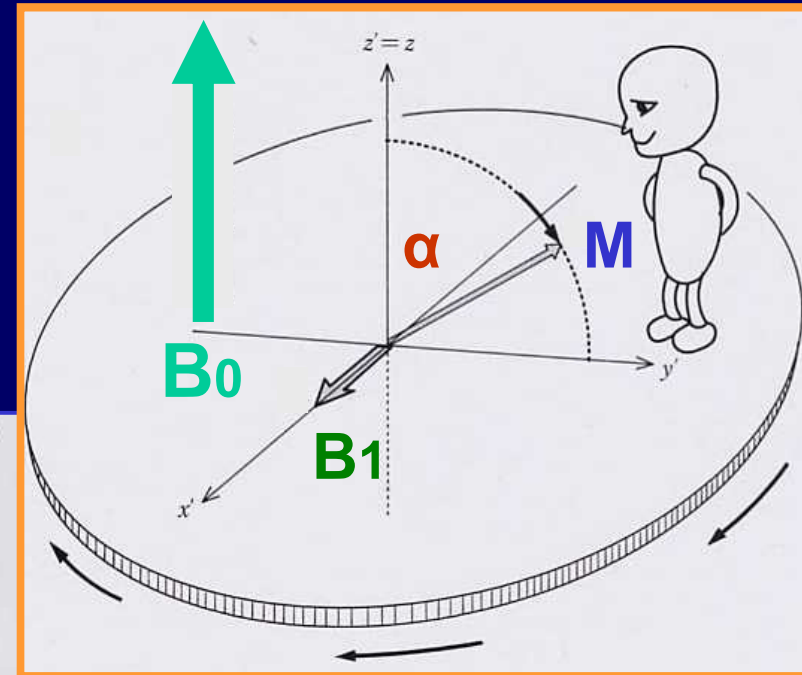
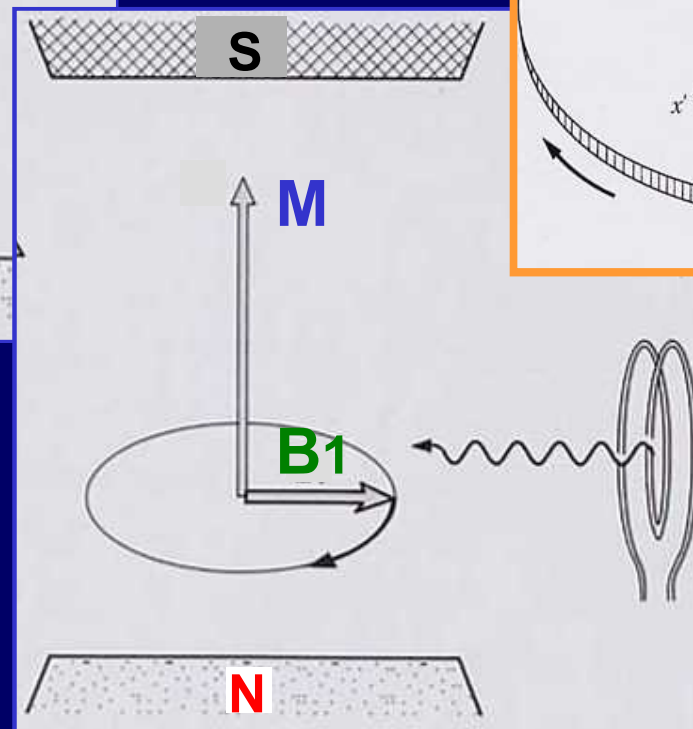


ラジオ周波数帯の電磁波 (RF) 照射

核磁気共鳴現象: 古典力学的説明



M :
巨視的磁化
ベクトル

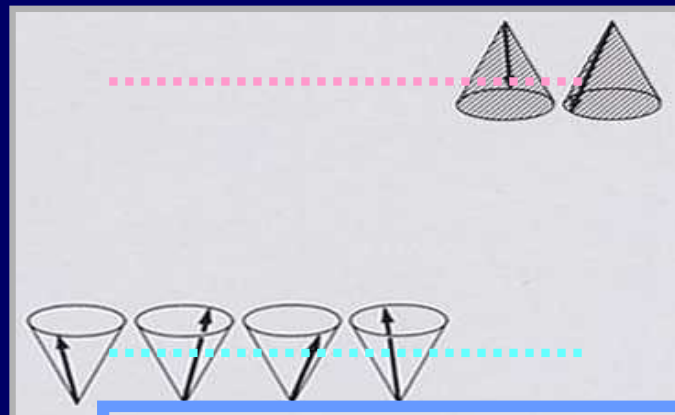


回転座標系での
巨視的磁化ベクトル
の動き

α : フリップ角

緩和現象: 量子論的説明

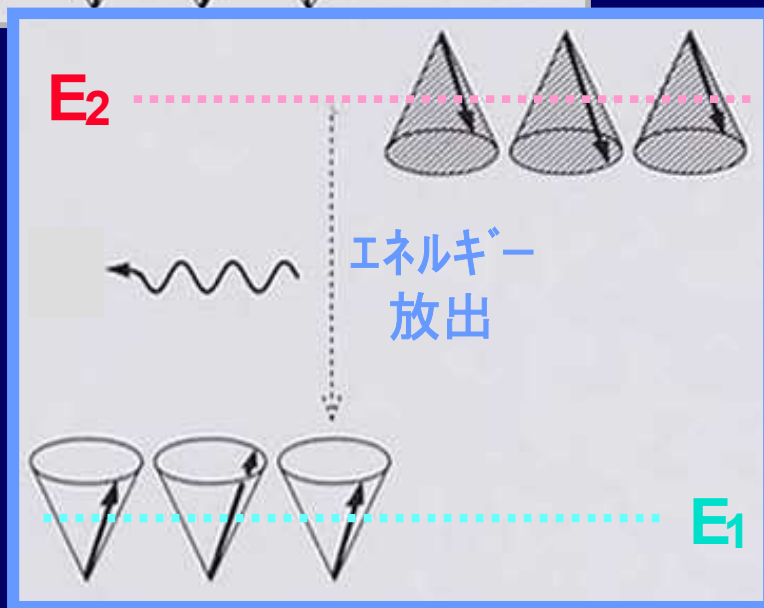
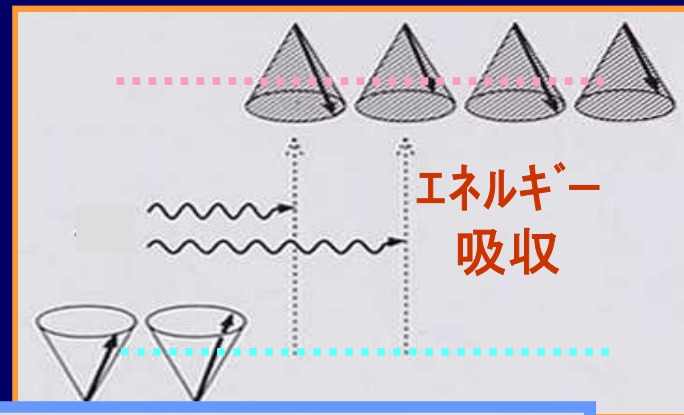
基準状態: 熱平衡



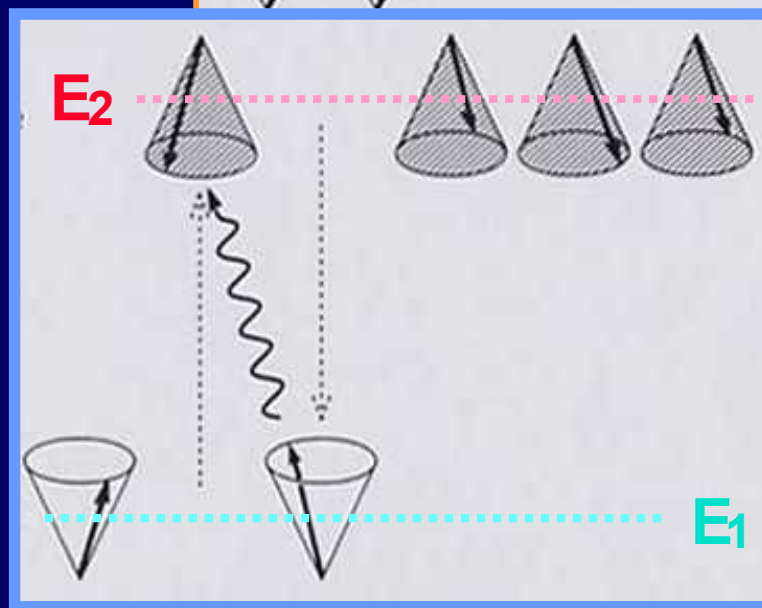
RF照射



NMR現象

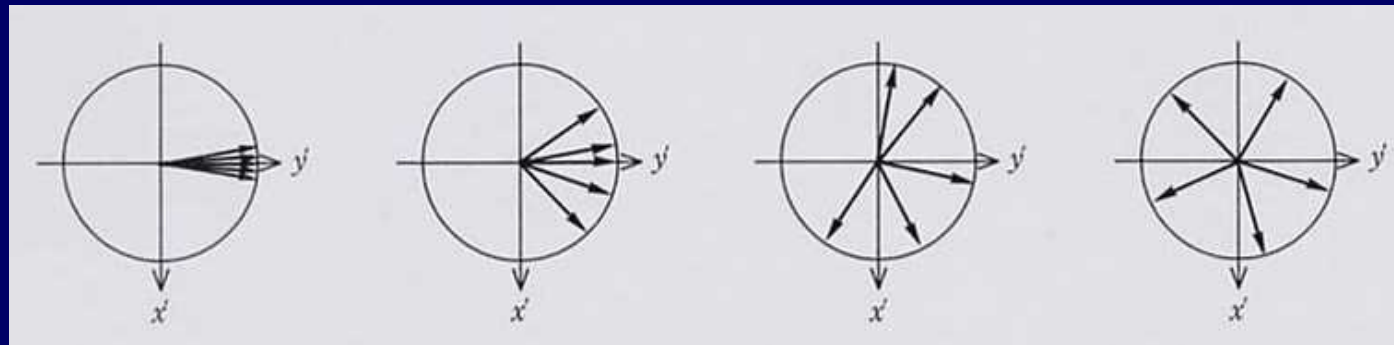
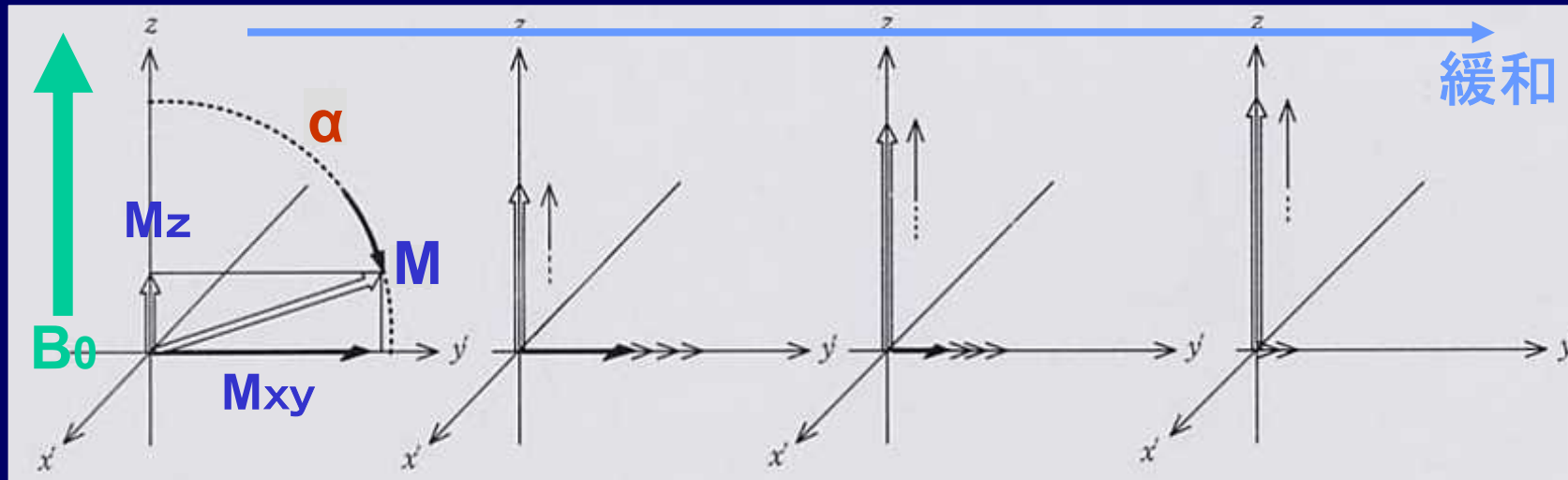


スピン・格子緩和



スピン・スピン緩和

緩和現象: 古典力学的説明



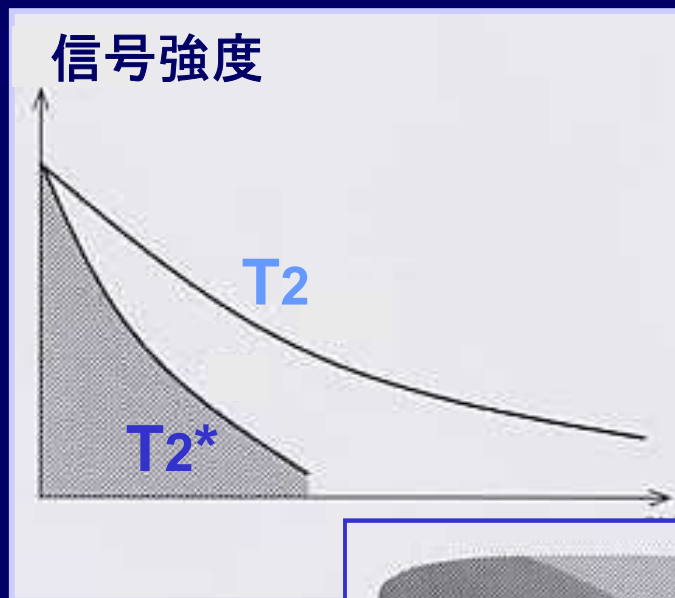
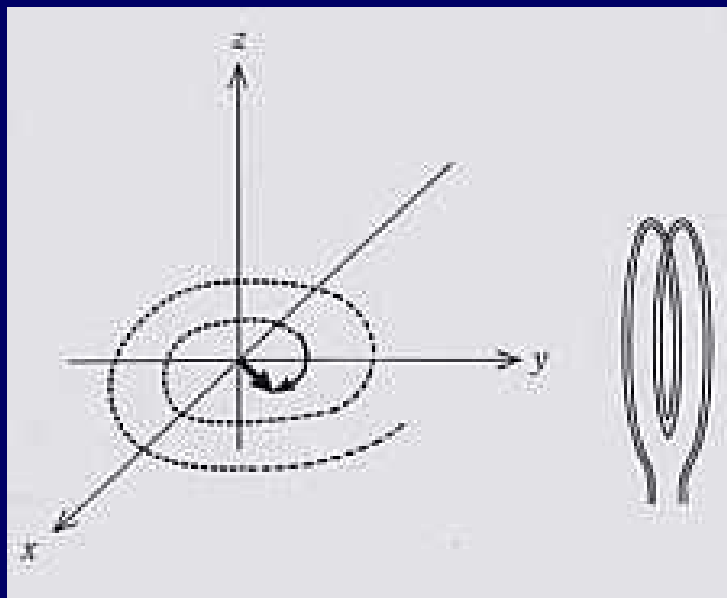
横緩和:
スピン回転位相
のばらつき

スピン格子緩和＝縦緩和 緩和時間 T_1 : 縦磁化回復の時定数

スピンスピン緩和＝横緩和 緩和時間 T_2 : 横磁化減衰の時定数

* 生体の T_1 : 数100ミリ秒～数秒 T_2 : 数10ミリ秒～数100ミリ秒 (-1テスラ前後-)

横磁化減衰がNMR信号を生む



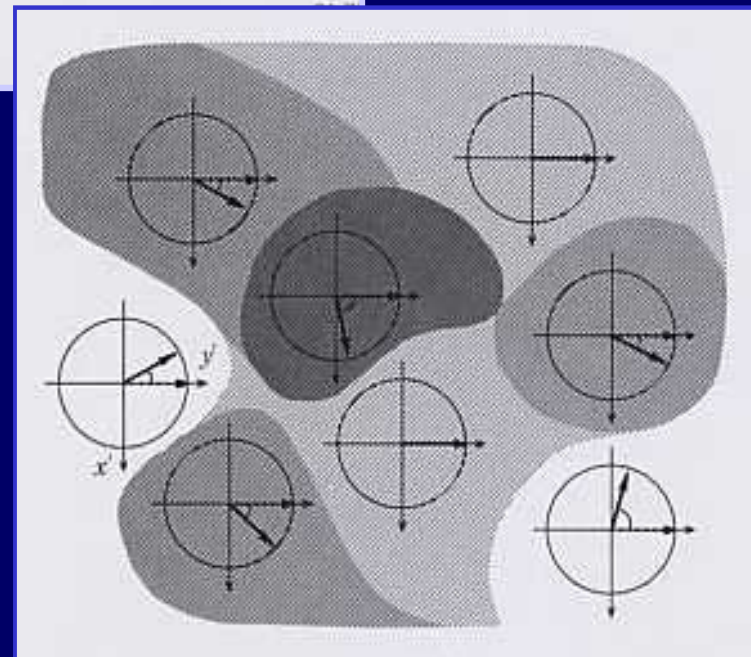
自由誘導減衰
(FID)信号

横磁化の減衰

FID: free induction decay

T₂*: T₂ star(～15ミリ秒以下)

磁場の不均一性による
回転位相のばらつき



磁場の不均一性

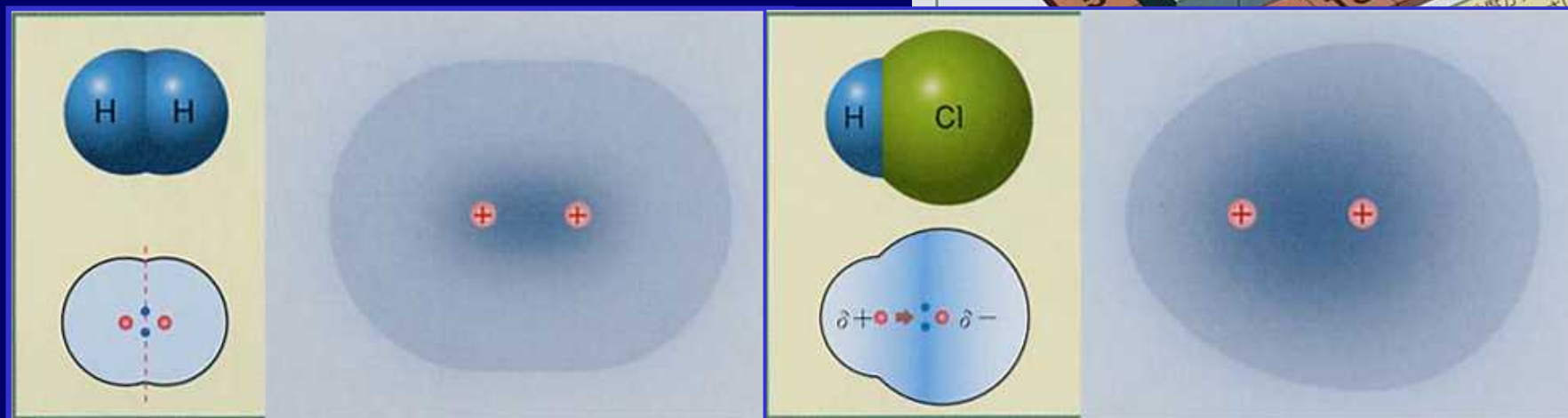
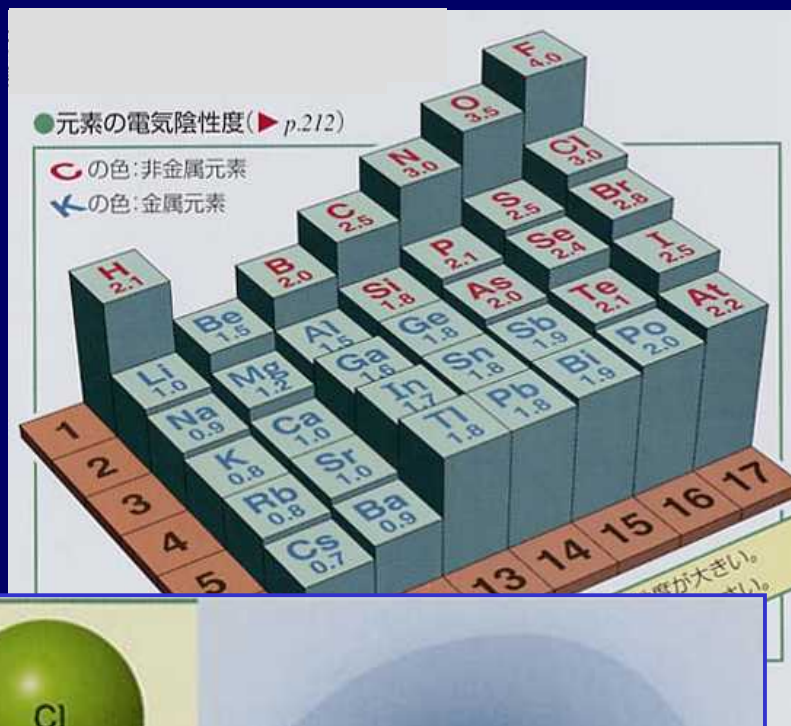
原因	磁場種類	強さ	時間	対応
* 装置側:				
・静磁場不均一性	外部	1ppm/視野	恒常的	SE
・傾斜磁場の印加	外部	10mT/m~	一時的	修正 傾斜磁場
* 生体側:				
・対象の磁化率	内/外部	様々	恒常的	SE
・化学シフト	内部	3.5ppm/B ₀ (水-脂肪)	恒常的	(SE)

電子の遮蔽効果と電気陰性度

① ボーアのモデル



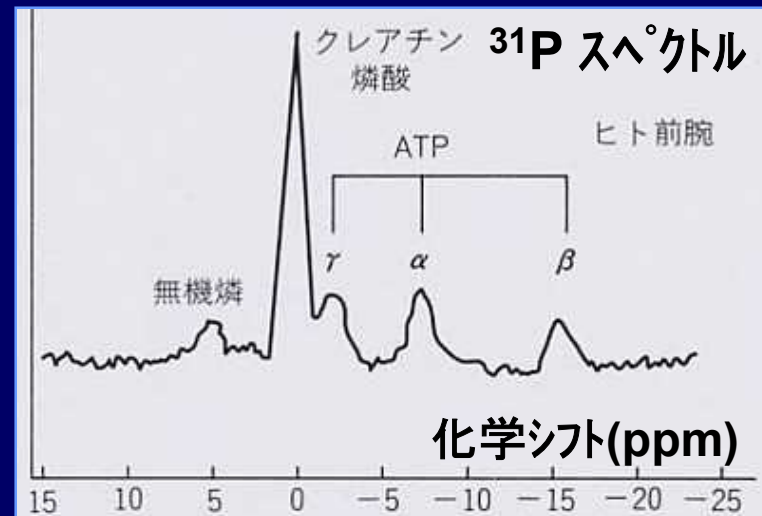
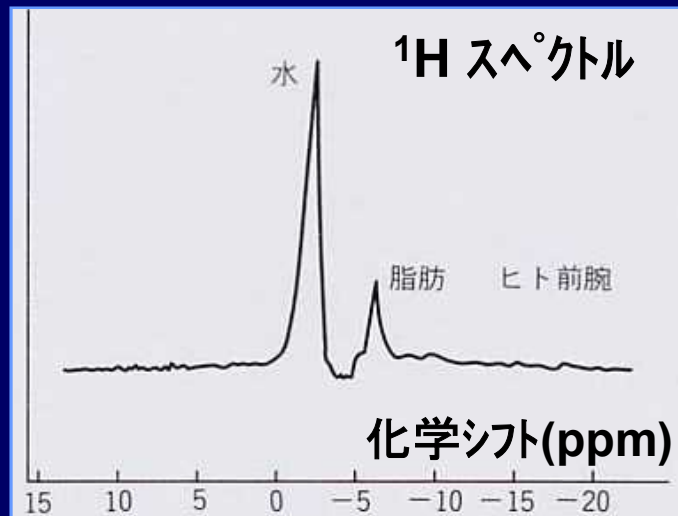
② 電子雲モデル



(数研出版: 化学図録 より)

化学シフト

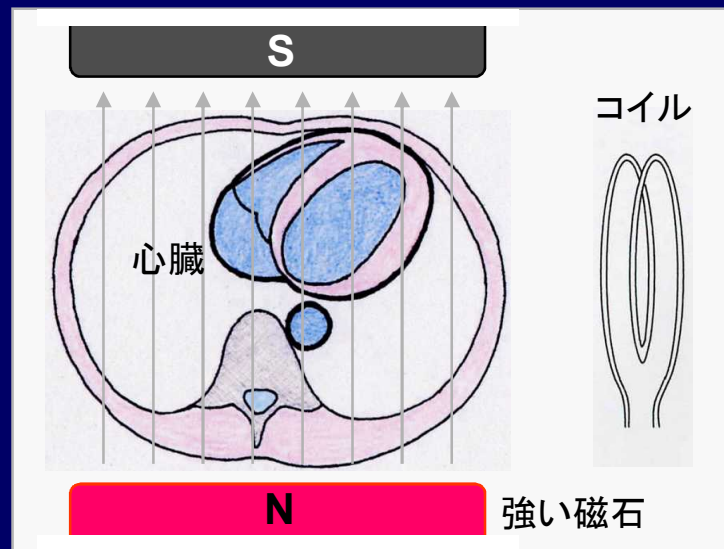
- * 電子の原子 / 分子軌道ループ運動による反(常)磁性
- * 電子雲の遮蔽効果: 結合元素の電気陰性度と関係
- * 化学シフト: 同じ原子核の共鳴周波数のずれ
 - ・分子構造・化学結合に基づく感じる磁場の違い
 - ・外部磁場の強さに比例(H: 水-脂肪; 3.5ppm)



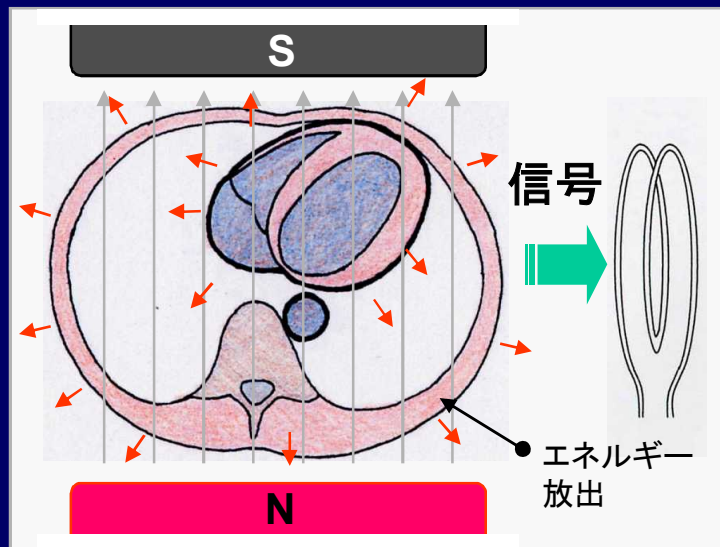
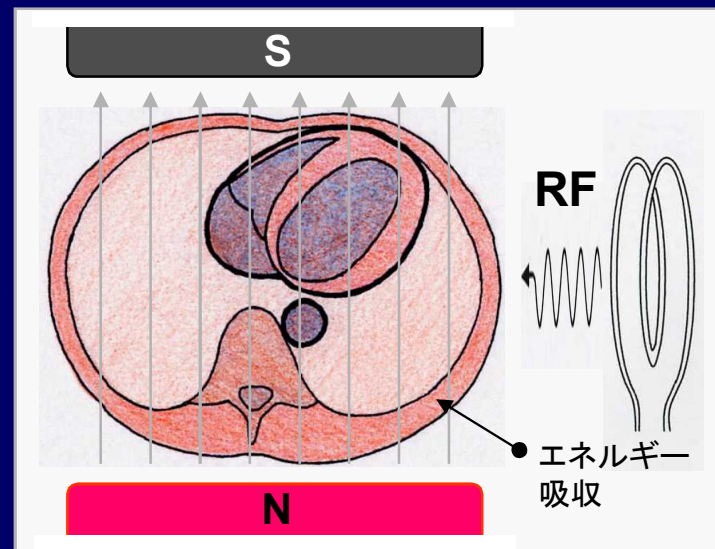
NMR現象を臨床医学へ

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

基準状態

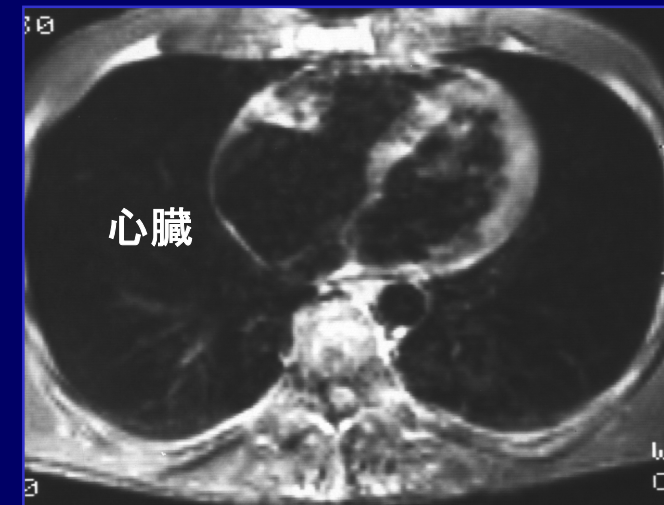


NMR現象



緩和

信号の 画像化



MR信号のタイプ

作り方

* 自由誘導減衰: **FID**

1つのRFパルス

* エコー信号

・グラジエントエコー: **GRE**

1つのRF+傾斜磁場反転
GRE法

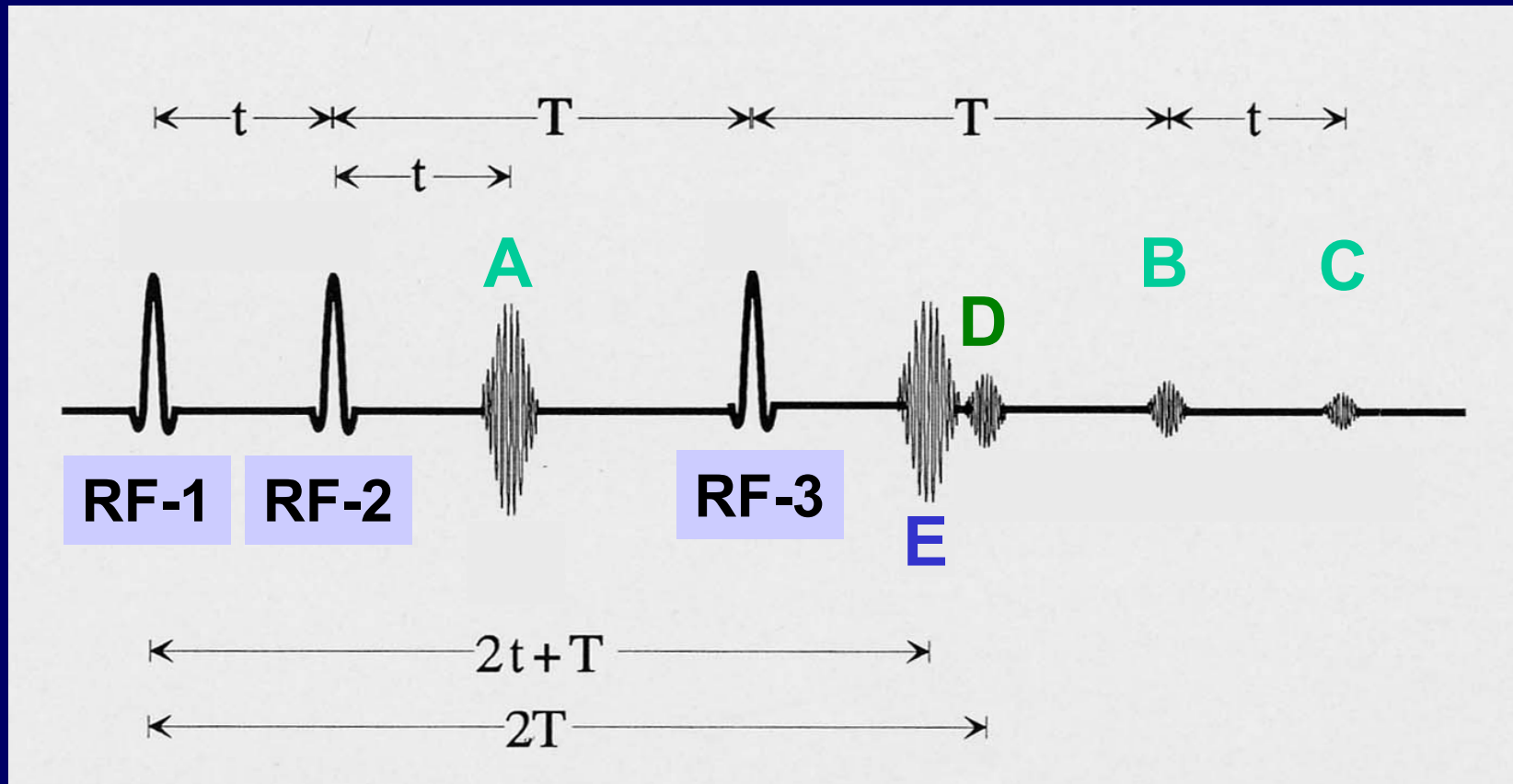
・スピンエコー: **SE**

2つのRFパルス
SE法

・ステイミュレイテッドエコー: **STE**

3つ以上のRFパルス

MRIの信号: エコー信号を作る



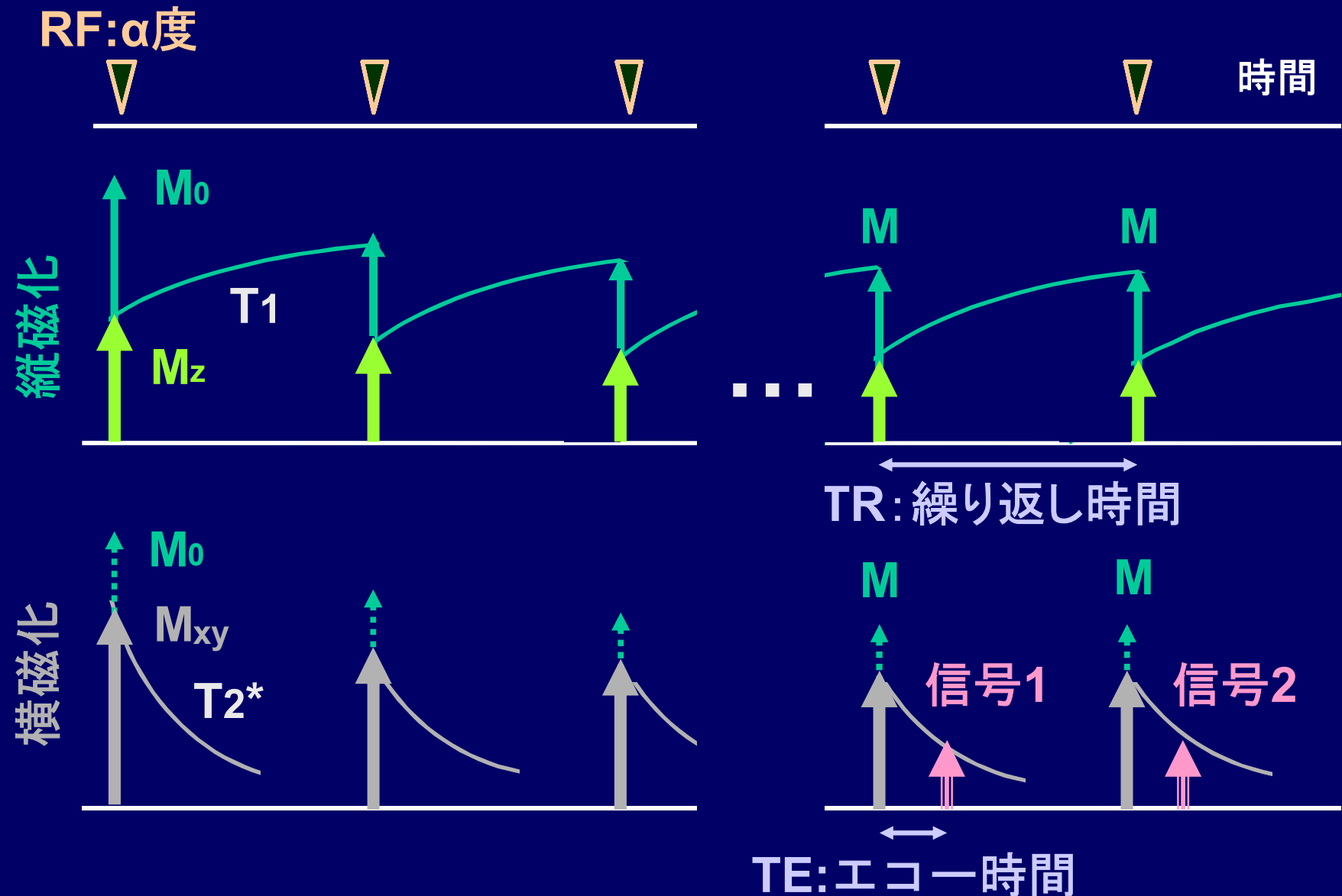
A・B・C: 一次スピンエコー

D: 二次スピンエコー

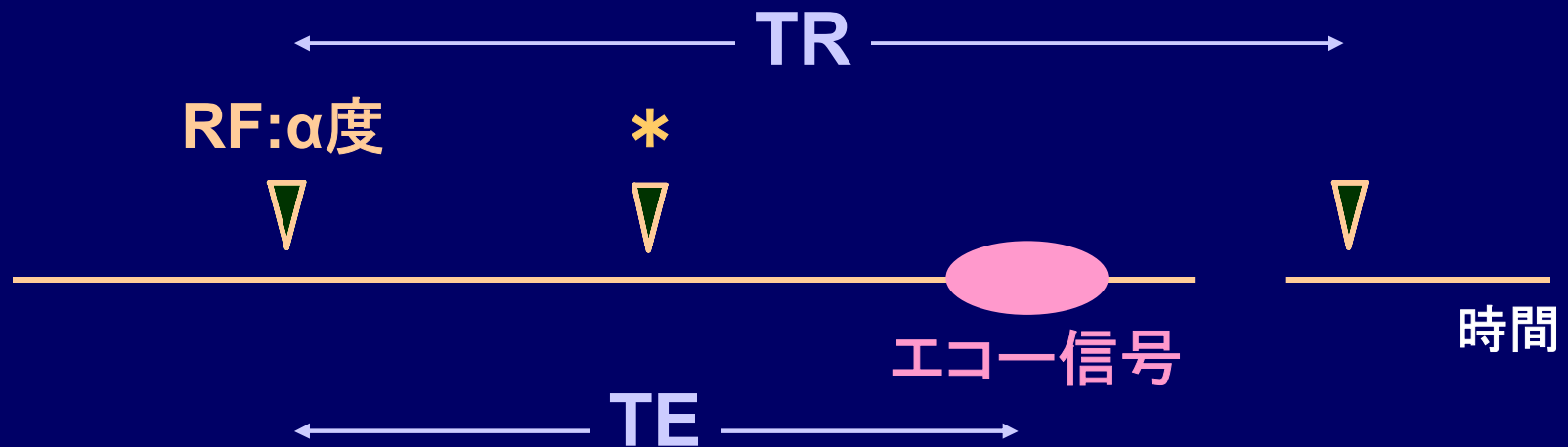
E: スティミュレイテッドエコー

(エルスター: MRI「超」講義 より)

スポイルド グラジエントエコー シーケンス

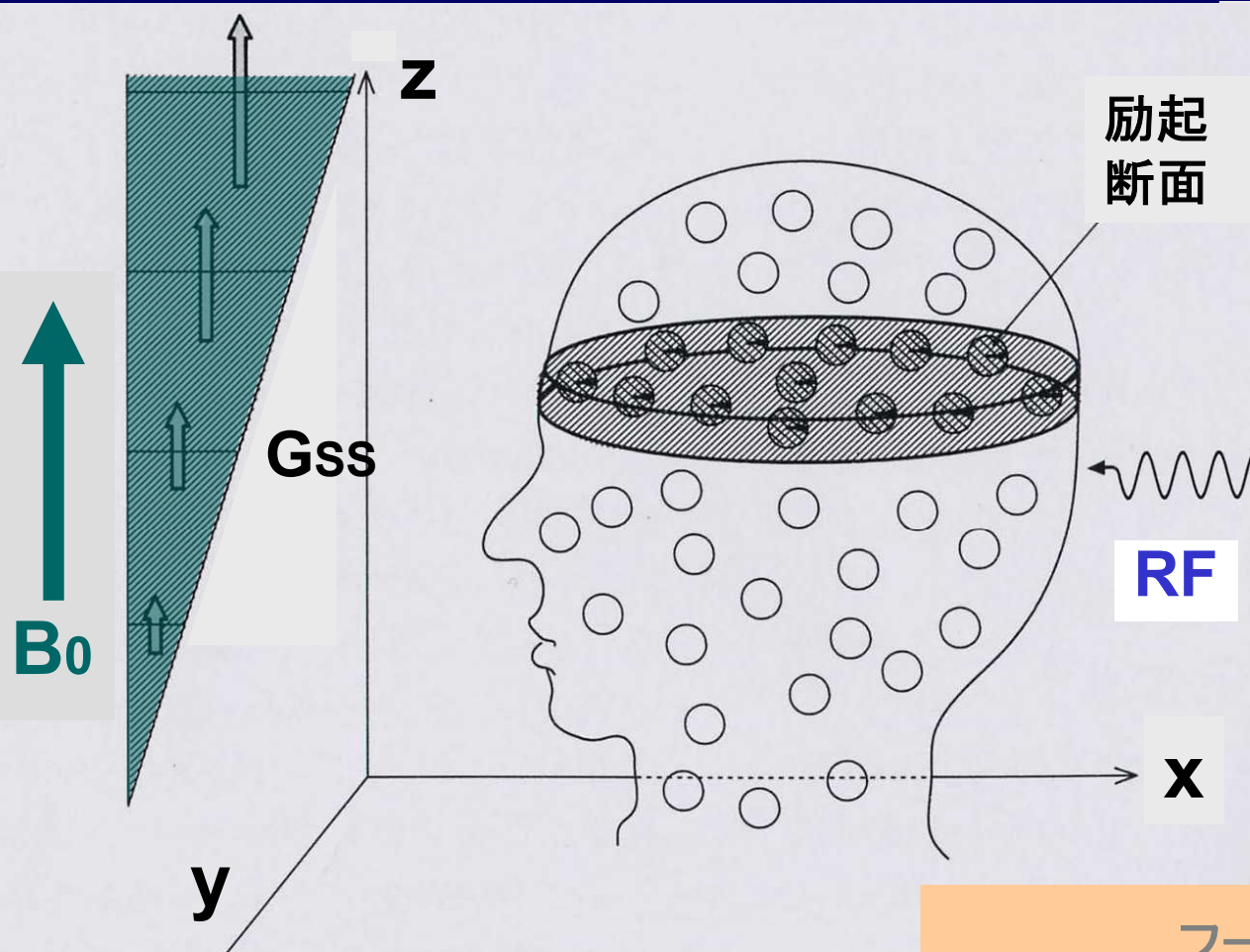


信号に位置情報を与える: 傾斜磁場の印加



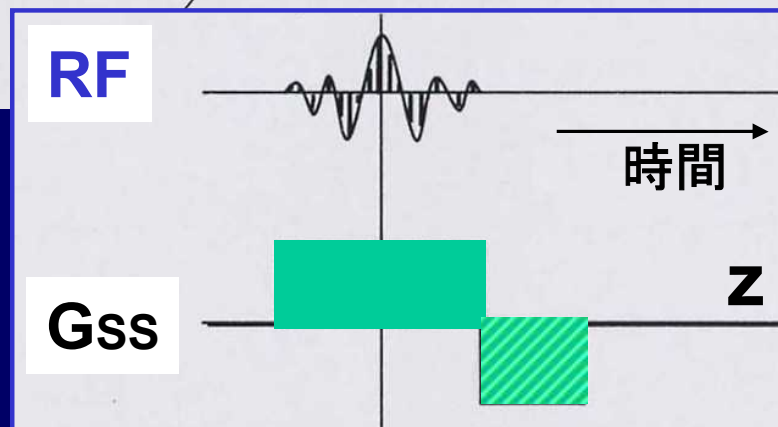
傾斜磁場の強さ: 10mT/m~

* : SE法の場合



信号に
位置情報を
与える:

イメージング
断面の選択

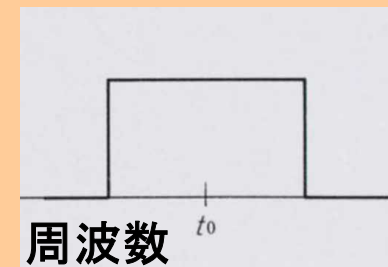
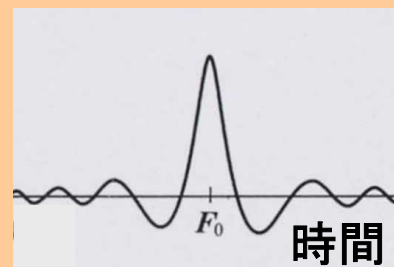


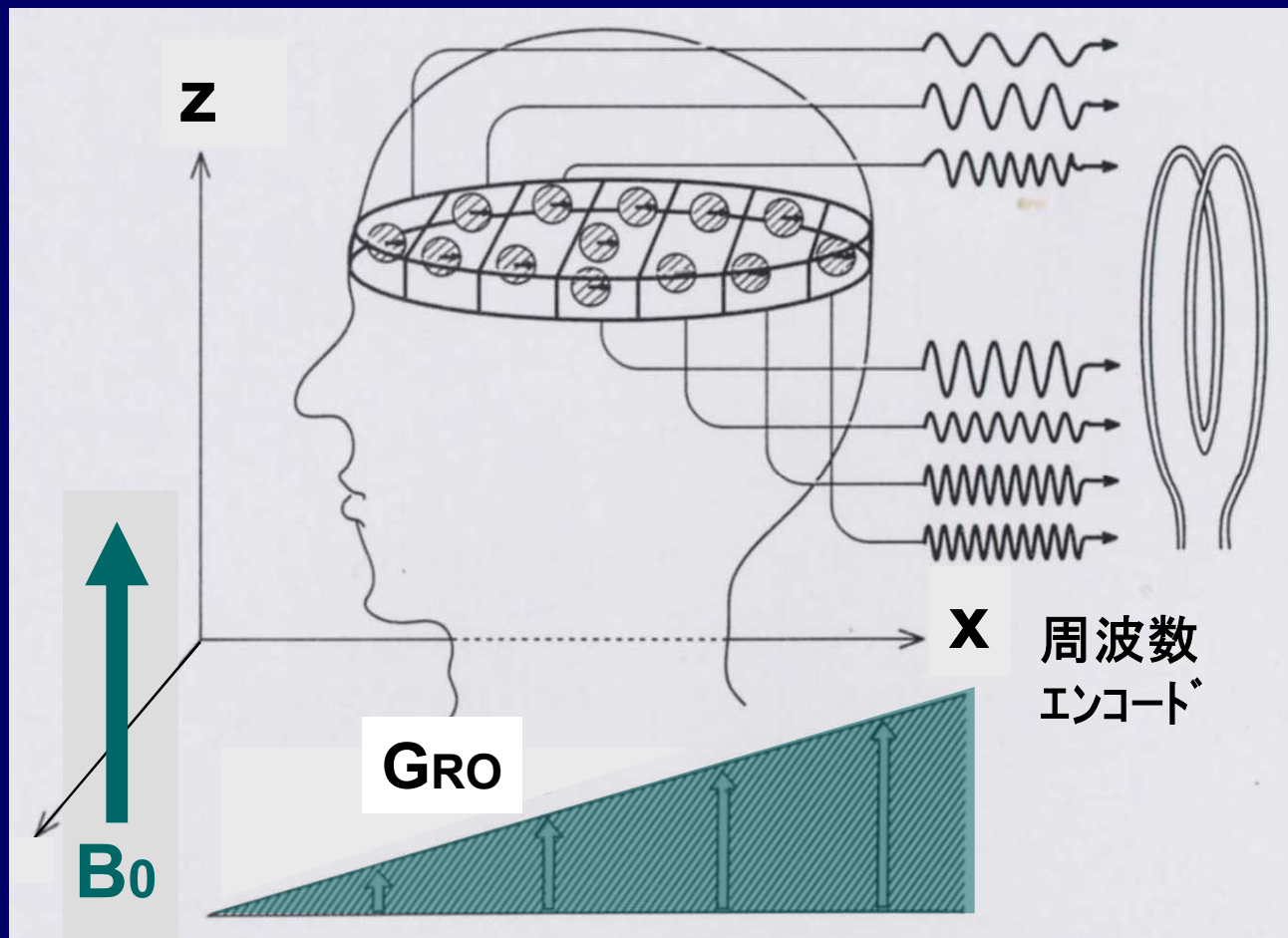
フーリエ変換ペア

sinc関数



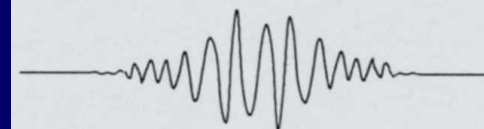
rect関数



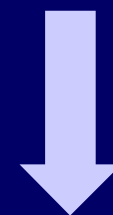


面内信号の
分離:
1軸方向

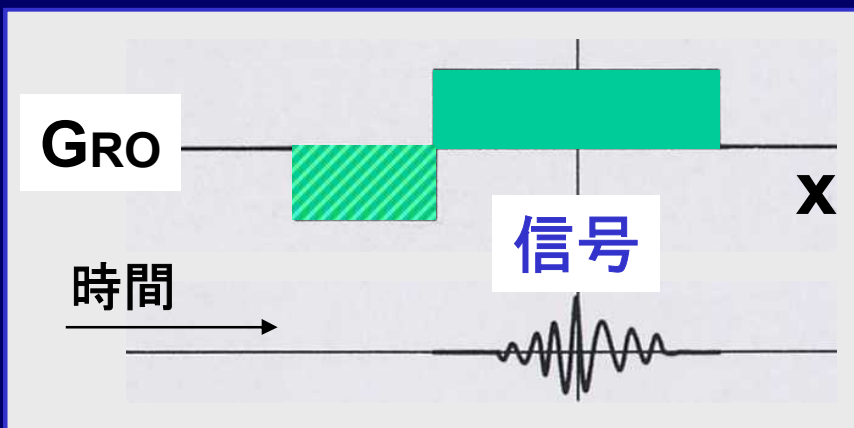
信号



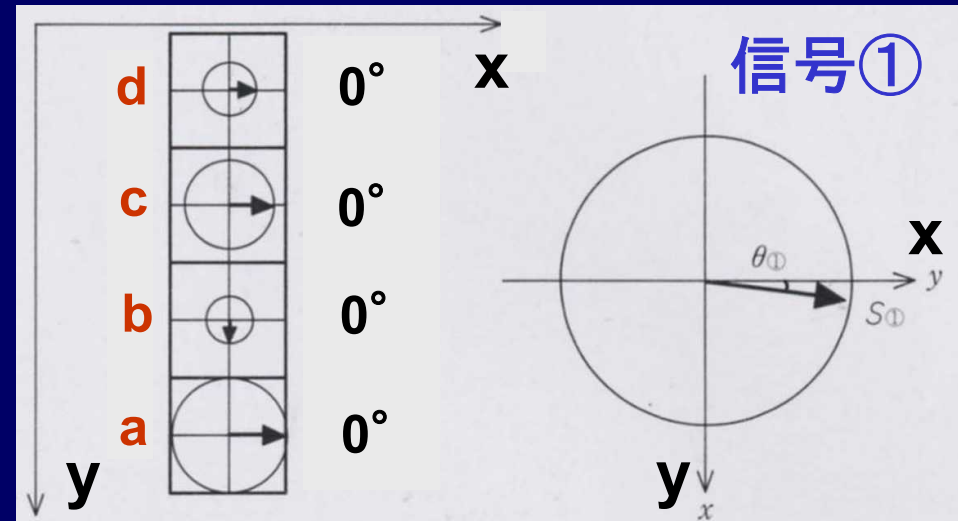
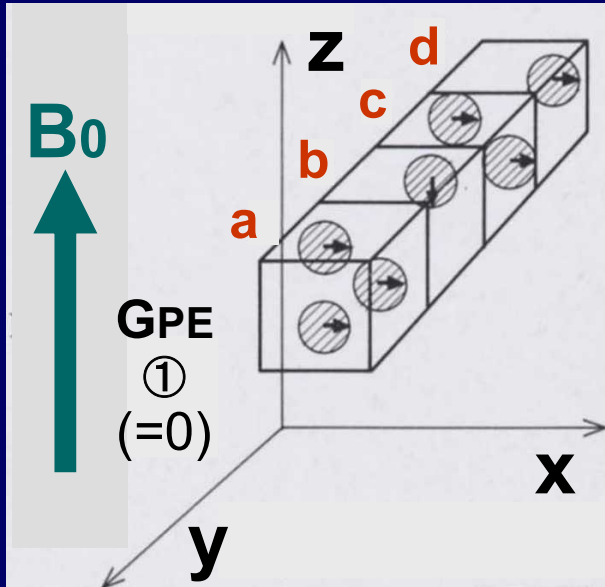
フーリエ
変換



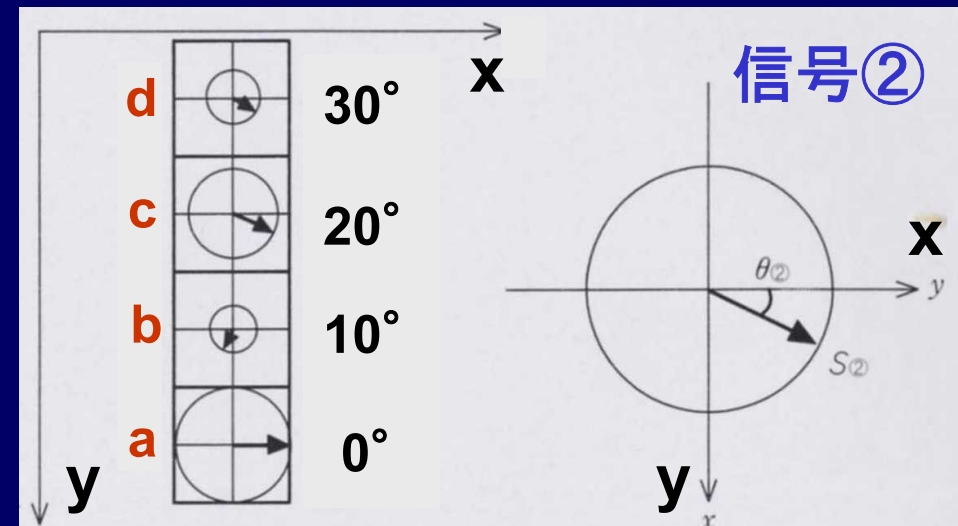
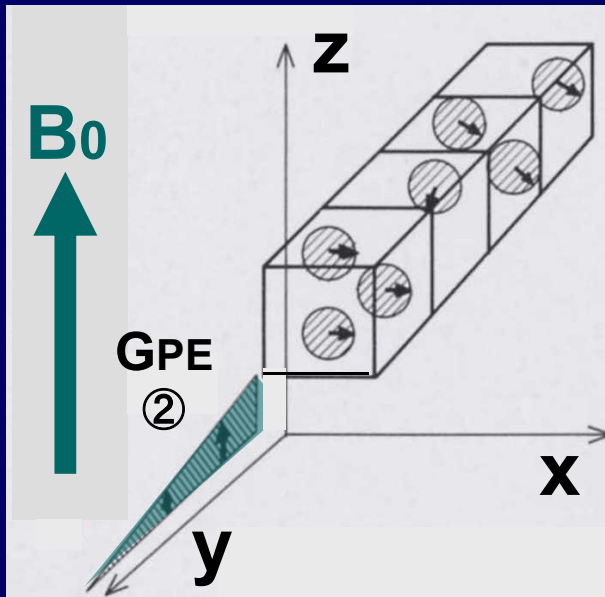
周波数 $\Leftrightarrow$ x 軸上の位置



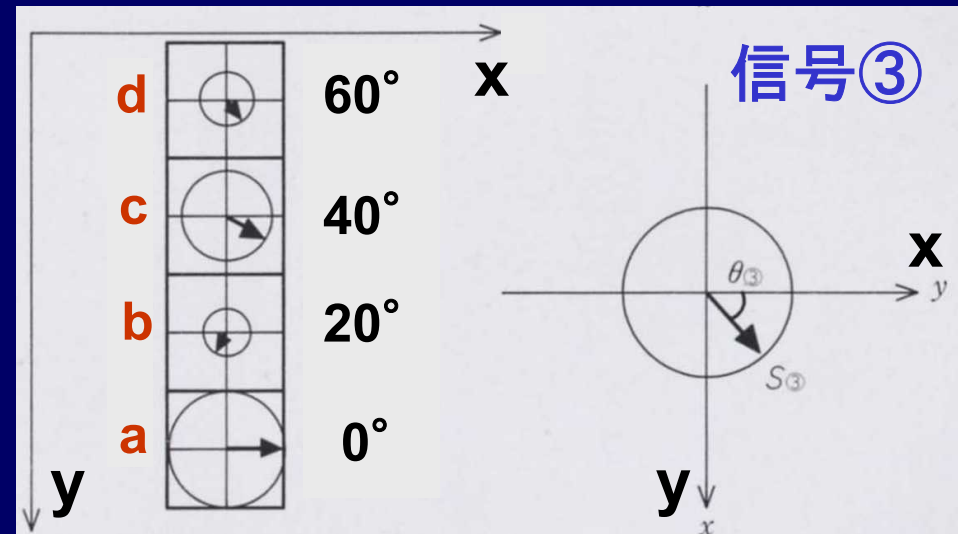
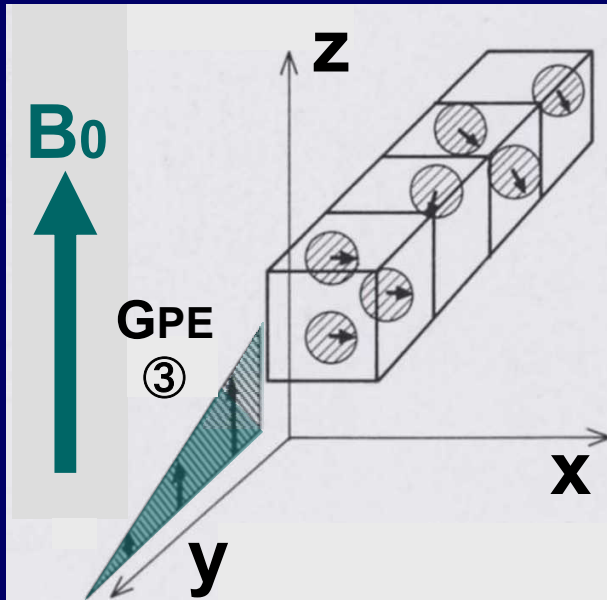
位相エンコードステップ①



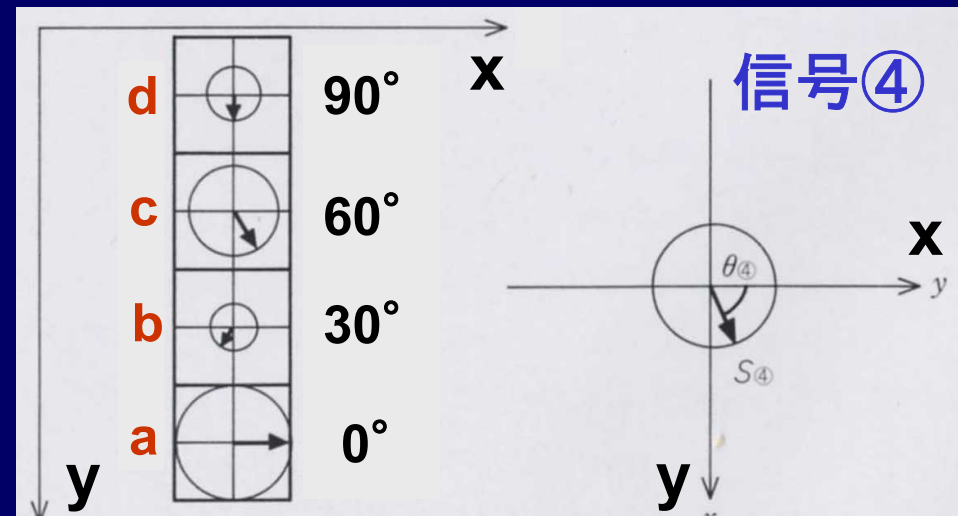
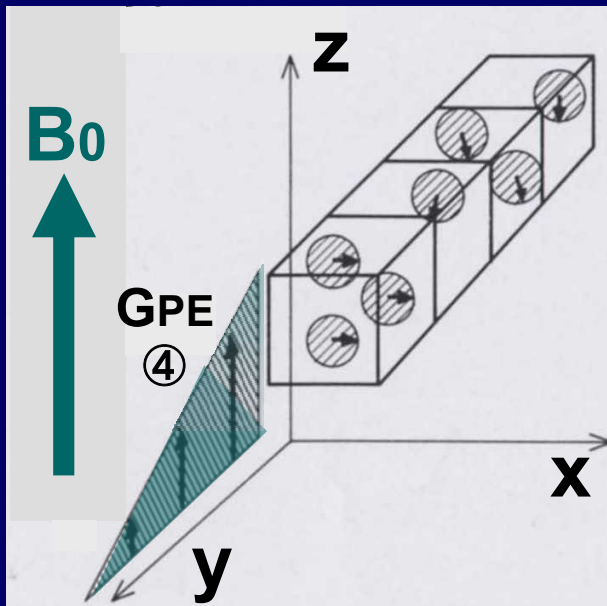
位相エンコードステップ②



位相エンコードステップ③



位相エンコードステップ④



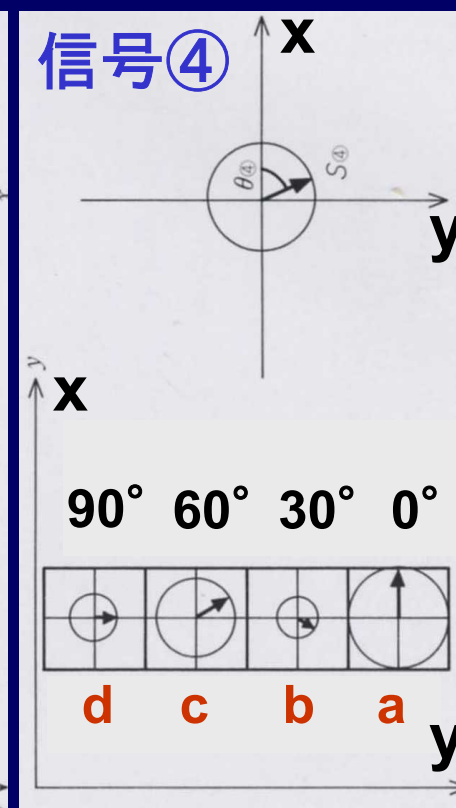
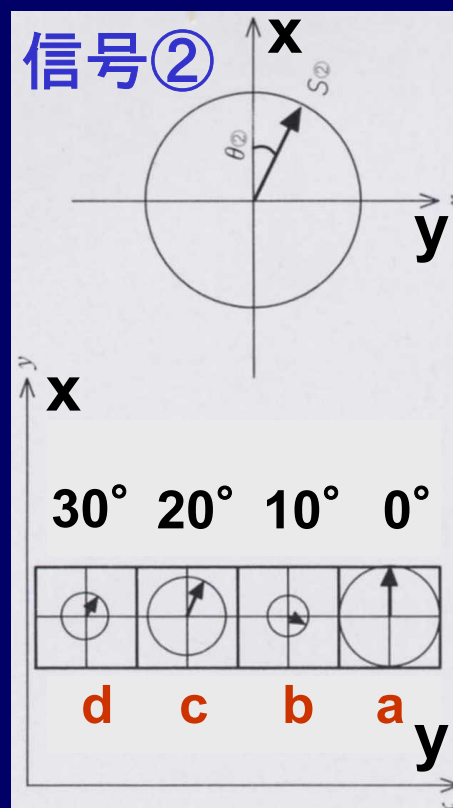
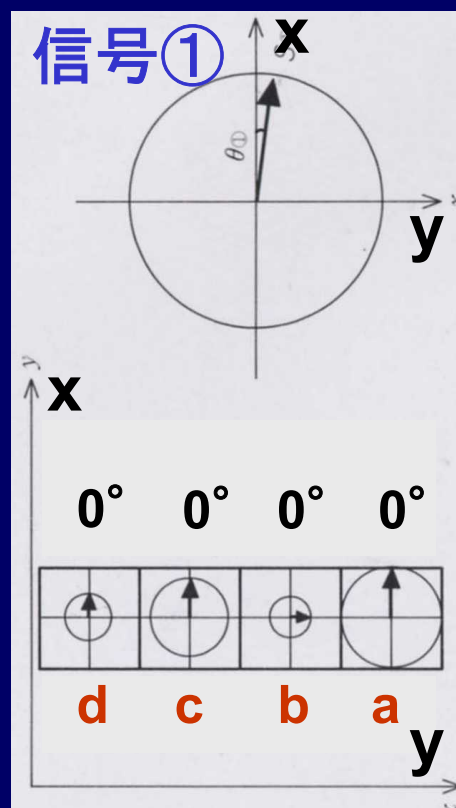
位相エンコードステップごとの信号収集

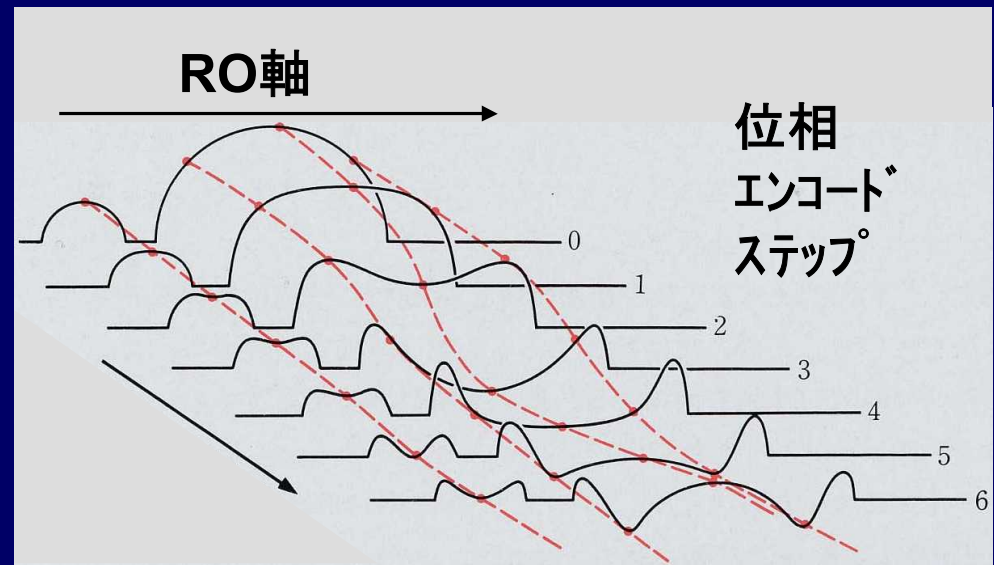
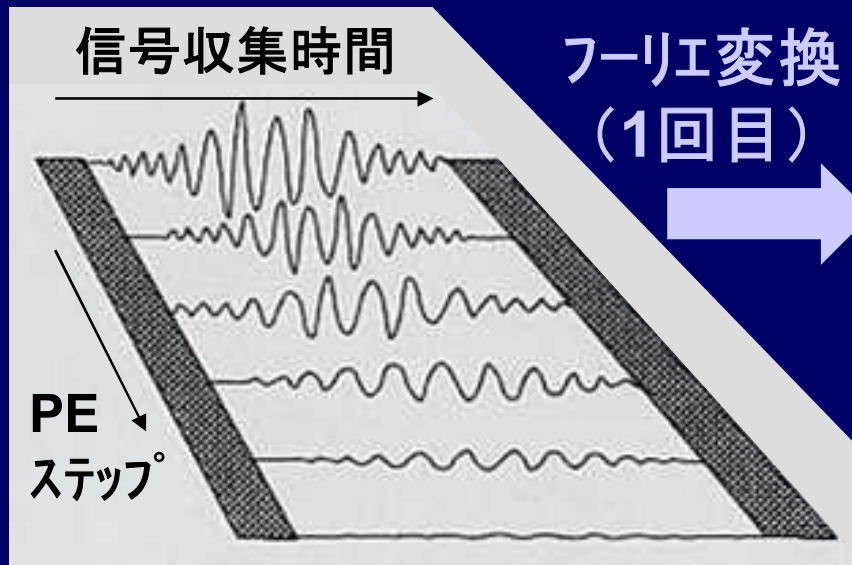
ステップ①

ステップ②

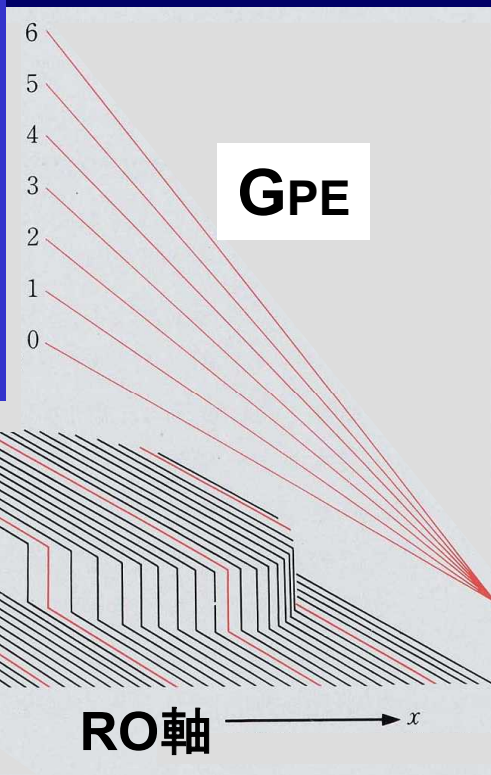
ステップ③

ステップ④

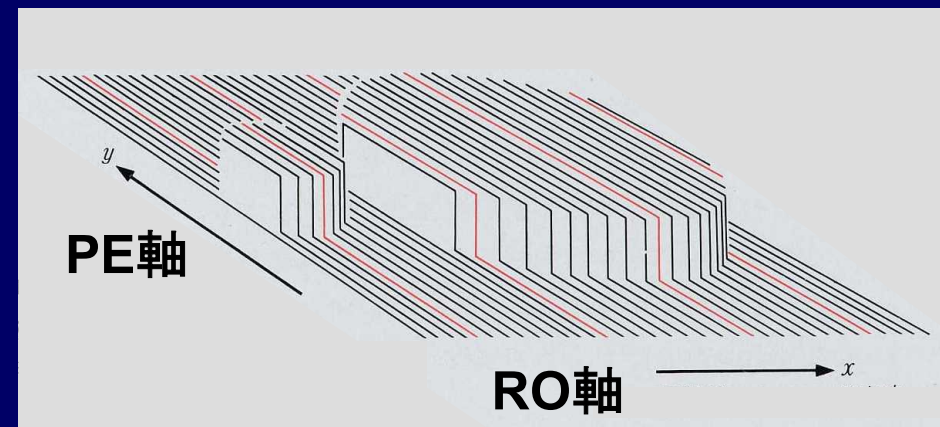




↑
位相エンコード
ステップごとに
データ収集

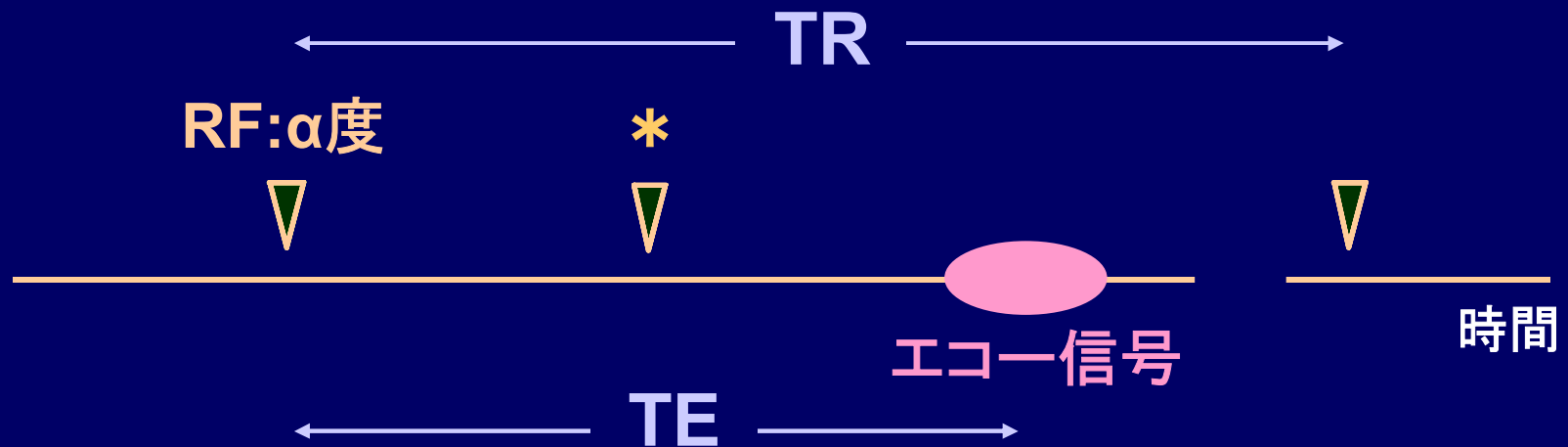


↓
フーリエ変換
(2回目)



再構成MR画像

信号に位置情報を与える: 傾斜磁場の印加



傾斜磁場の強さ: 10mT/m ~

***** : SE法の場合

位相エンコードステップ時間軸(秒)

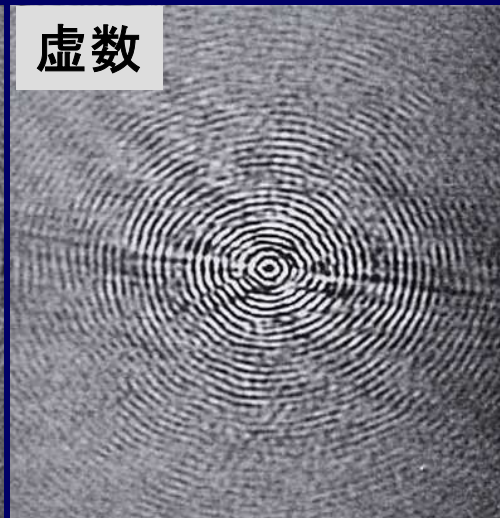
生データ

信号読み取り時間軸(ミリ秒)

実数

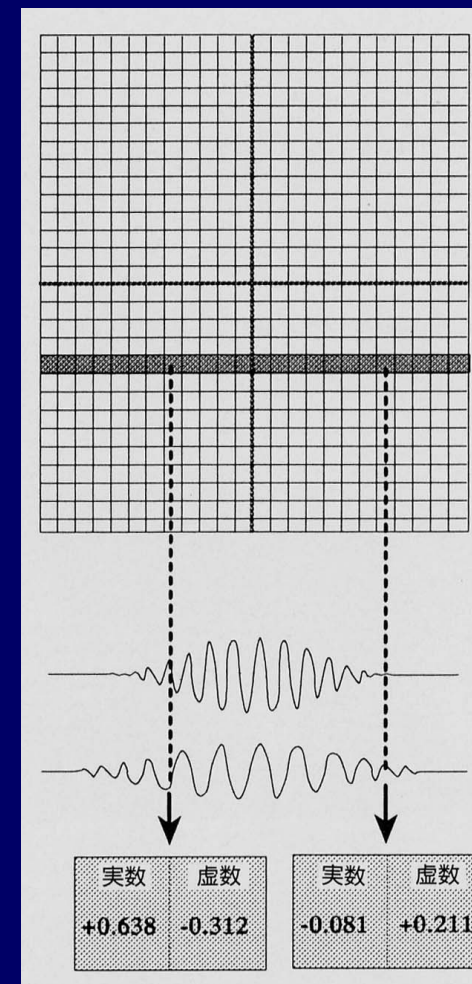


虚数

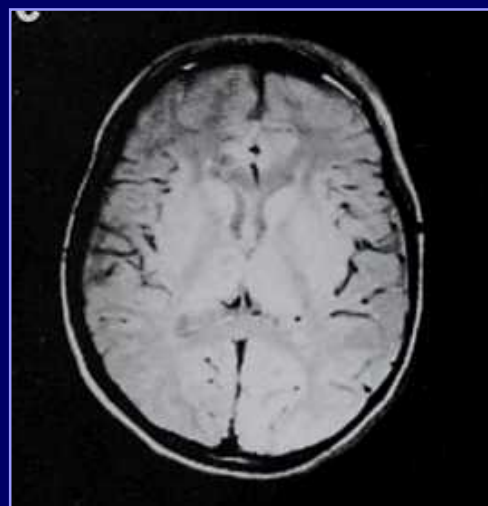


→
収納

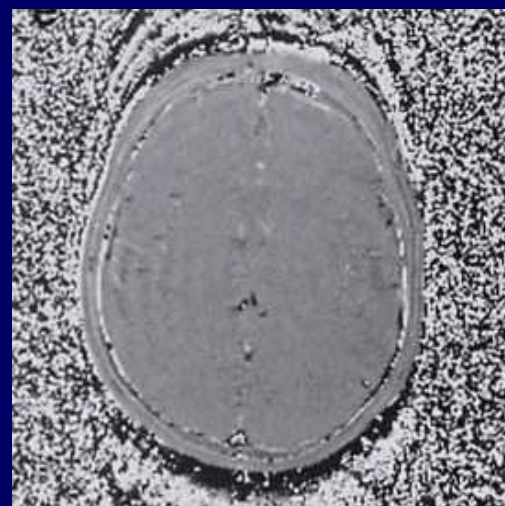
k-空間



←
2D-FT



強度画像



位相画像

(エルスター: MRI「超」講義 より)

傾斜磁場印加ステップ: 2D法 vs 3D法

2D-FT法

* 断面選択(z軸)



* 位相エンコード(y軸)



* 周波数エンコード(x軸)



信号収集

3D-FT法

* 断面選択(z軸)



* 位相エンコード(y軸)

* 位相エンコード(z軸)



* 周波数エンコード(x軸)

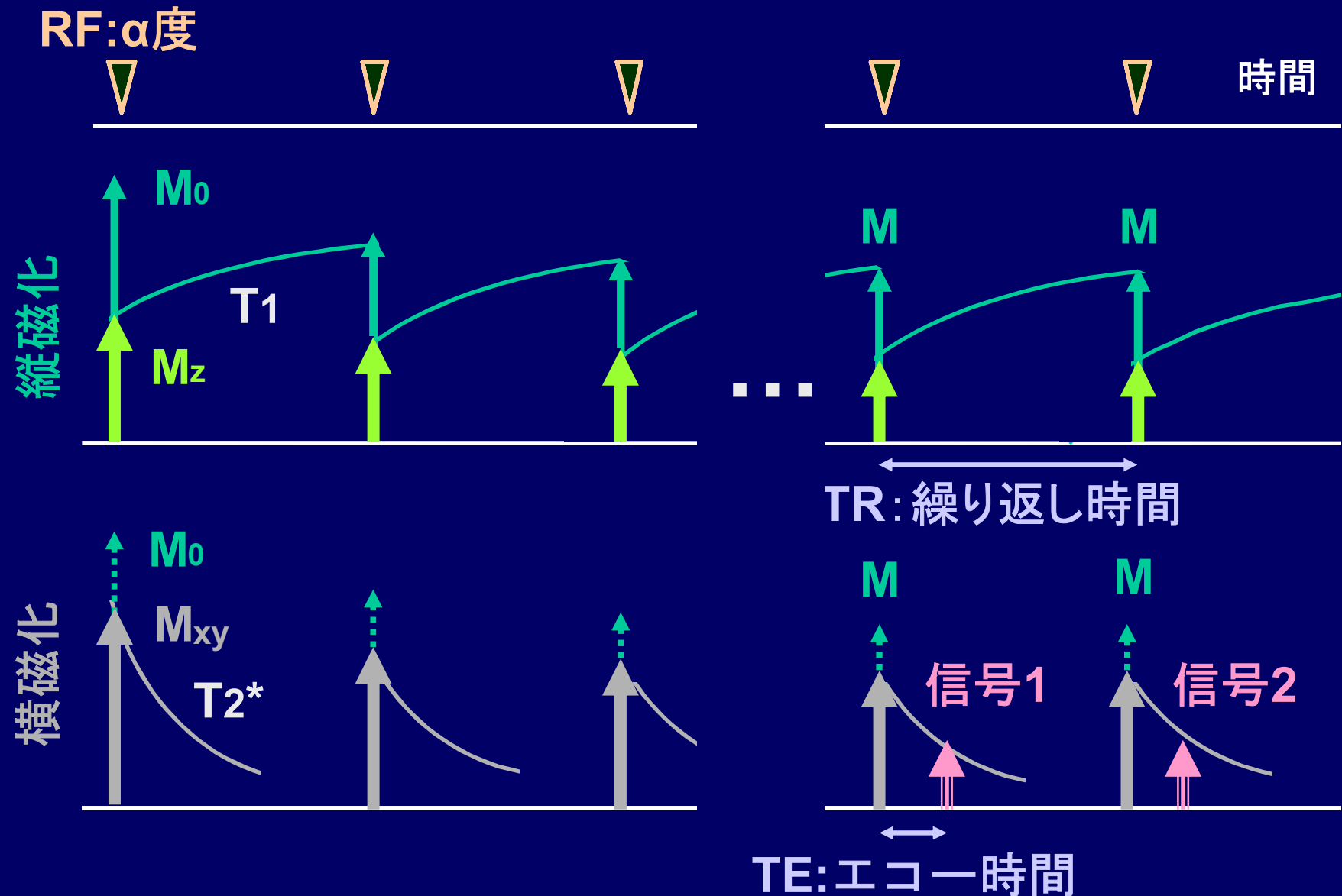


信号収集

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

スポイルド グラジエントエコー シーケンス



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

人体の構成要素

* 元素／原子

- ・ O : 65%, C : 18.5%, H : 9.5%, N : 3.2%...

* 分子／化合物

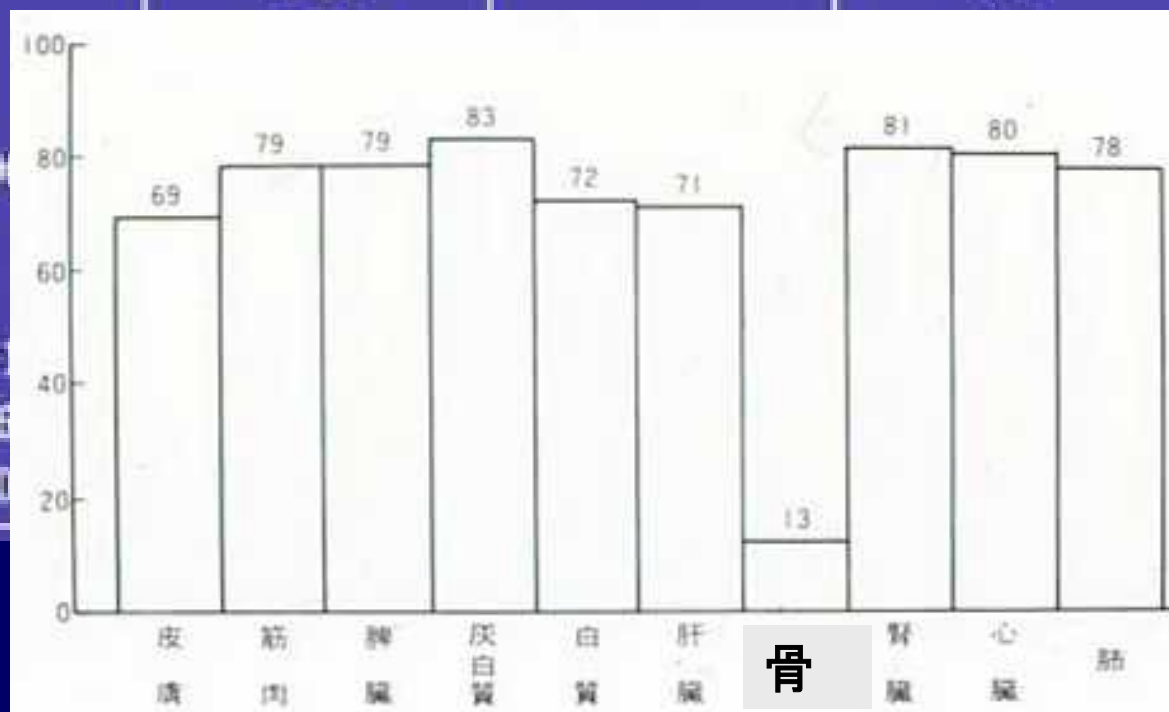
- ・ 水(自由水, 結合水／構造水) : 60～65%
- ・ 脂質(中性脂肪, リン脂質, ステロイド...) : 15～20%
- ・ 蛋白質 + 関連物質 : 18%, 塩類 : 7%...

* 液体／体液(水+溶質)

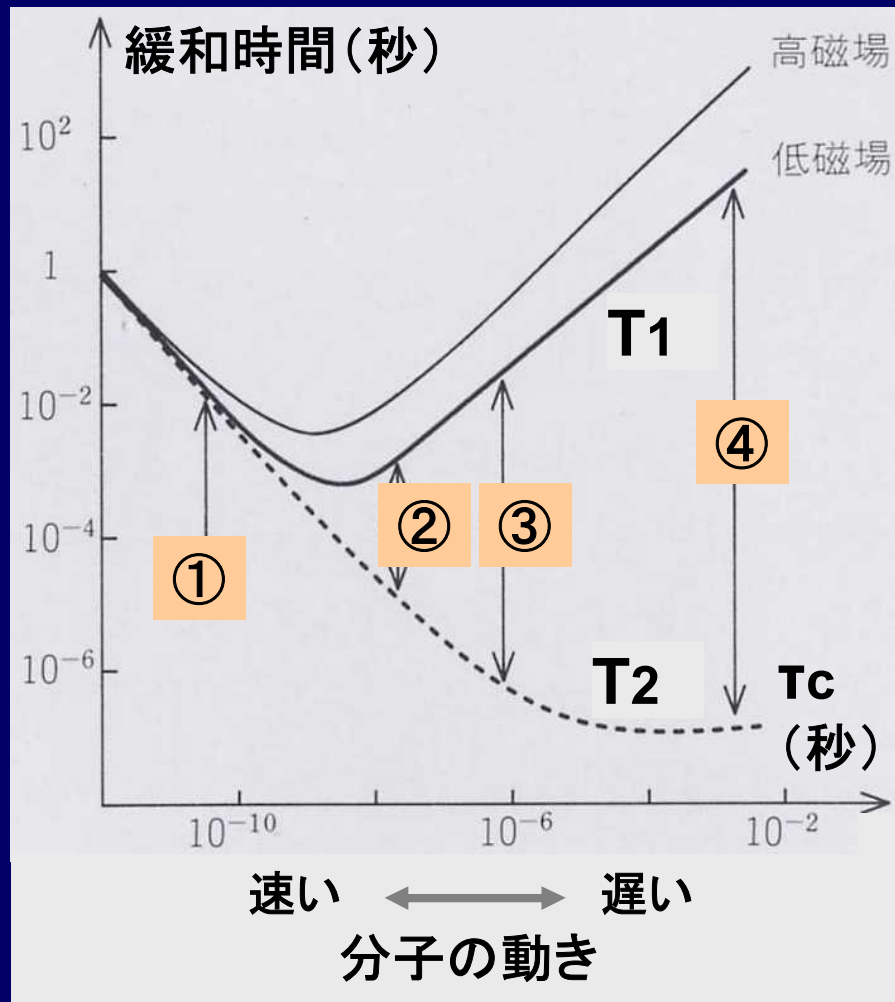
- ・ 細胞内液 + 細胞外液(血漿, 組織間液) : 60～70%
- ・ 細胞内液 : 40～45%, 細胞外液 : 20～25%
- ・ 血液(血漿 + 血球) : 8%(5 + 3%), 組織間液 : 15%

生体組織の原子組成

	脂 肪 (成人脂肪組織)	筋 肉 (横 紋 筋)	水	骨 髄 骨 (大 腿 骨)
組 成 重 量 %				
水	11.2	10.2	11.2	8.4
炭 素	57.3	12.3		27.6
窒 素	1.1	3.5		2.7
酸 素	30.3	72.9	88.8	41.0
ナ ト リ ウ ム		0.08		
マ グ ネ シ ウ ム				
リ ン				
イ オ ウ	0.0			
カ リ ウ ム				
カ ル シ ウ ム				
電子密度 (el / g)	3.34×10^{23}			
実効原子番号 (Z_{eff})	6.46			
密 度	0.91~0.94			



含水率 (%)



- ①: 低粘度の液体 ③: 柔らかい固体
②: 高粘度の液体 ④: 硬い固体

緩和時間:

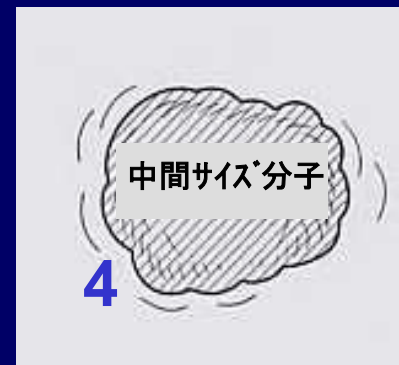
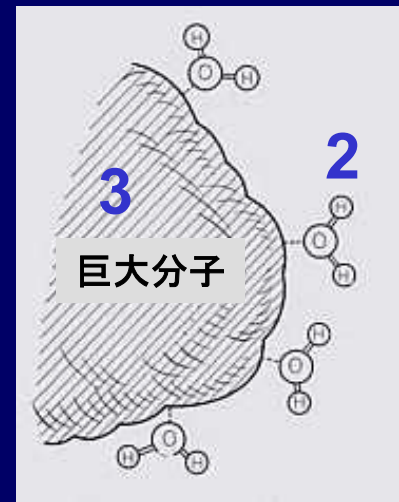
- * 必ず $T_1 \geq T_2$
- * T_1 は共鳴周波数相当の分子運動状態で最短
- * T_2 は分子運動が遅くなると著明に短縮

スピンと周囲環境(格子)とのエネルギーのやりとりは動きが一致したときに最も強く、スピンドウしのエネルギーのやりとりは動きがおそいときに容易となる

プロトンMRIの信号源

種類	分子運動	T1・T2
1. 自由水	非常に速い	極長・極長
2. 結合水／構造水	(速い～)遅い	(短)・短
3. 巨大分子:蛋白質	非常に遅い	(長)・極短
4. 中間サイズ分子: 中性脂肪	共鳴周波数相当	短・中間

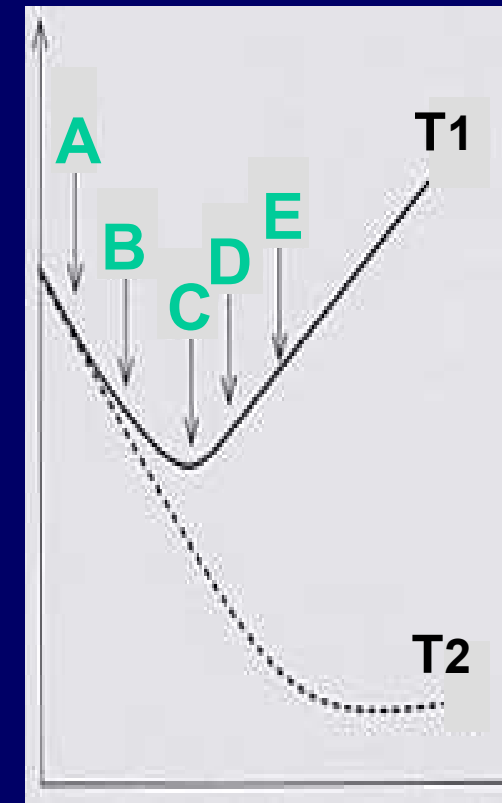
注) 体液:体重の約65% 脂質:約20%



生体組織の緩和時間

タイプ	成分	T1	T2
A.自由水	自由水	長い	長い
B.粘張液体	自由水, 結合水	(長い)	(長い)
C.脂肪組織	中性脂肪	短い	(中間)
D.細胞性組織	結合水, 蛋白質	(中間)	(中間～短い)
E.硬い組織	蛋白質, 塩類	(長い)	短い

緩和時間

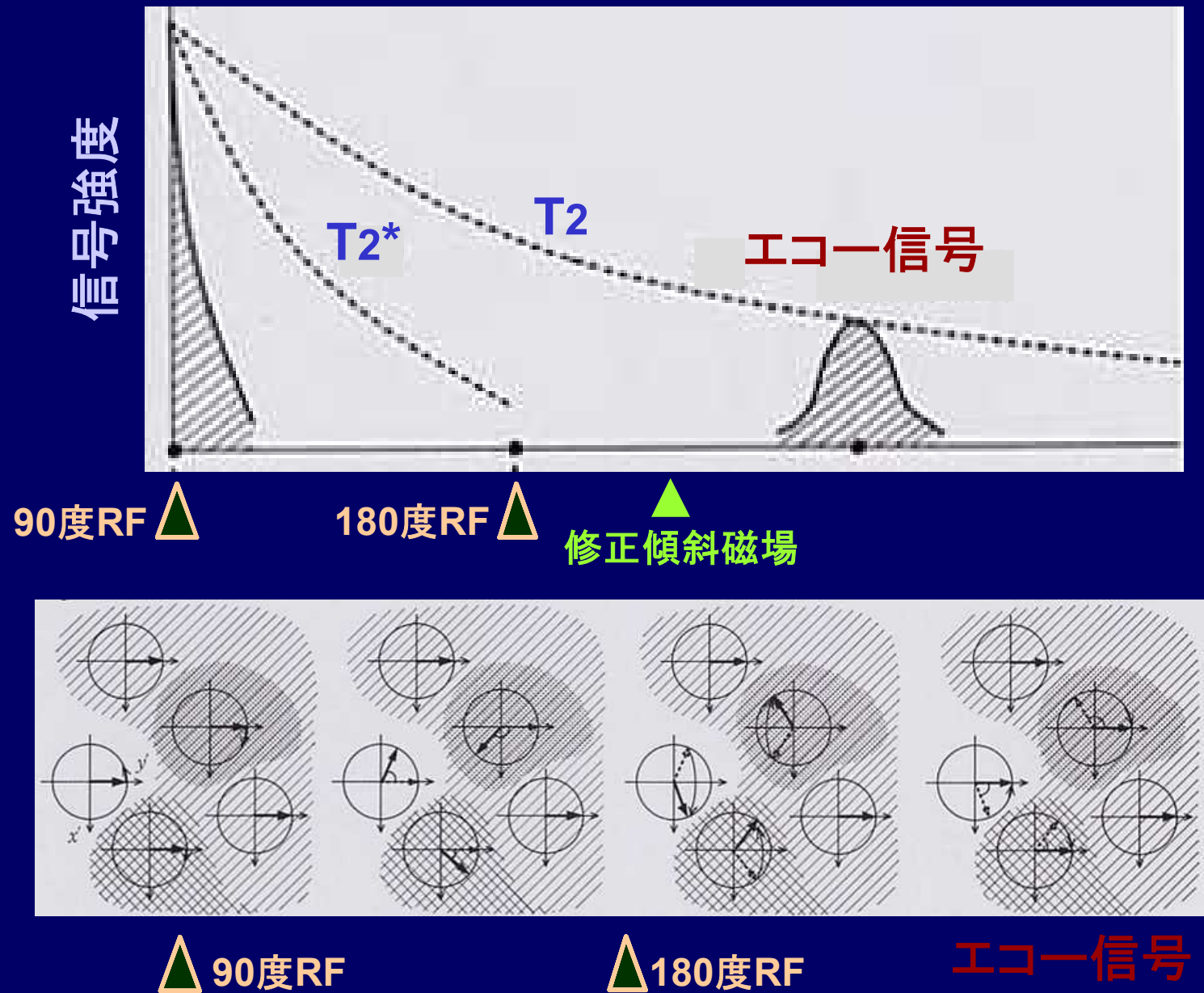


速い ← → 遅い
分子の動き

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

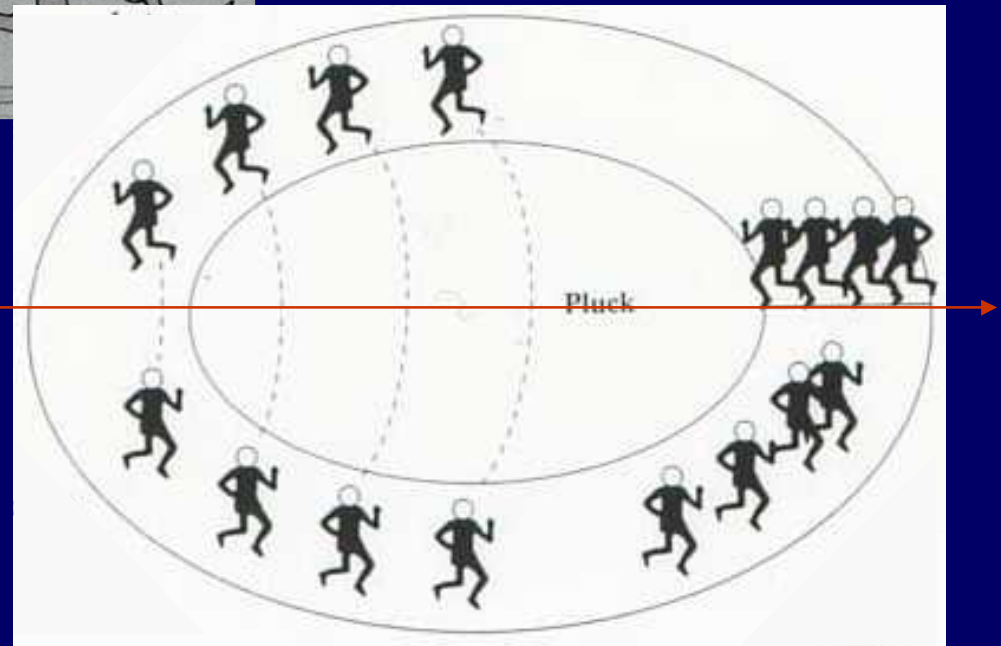
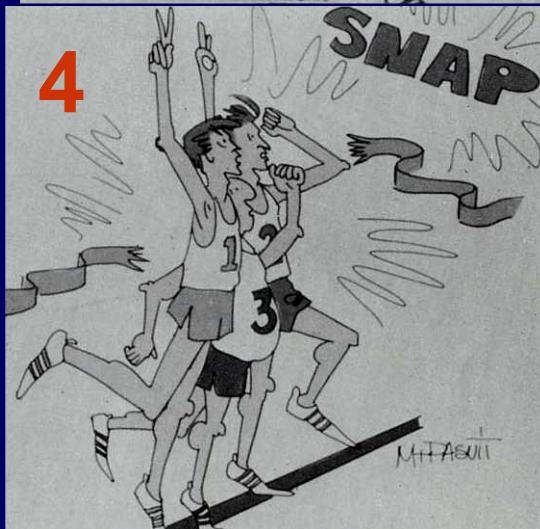
スピンエコー法



180° パルス の意味は？



(RadioGraphics
4: 1984 より)



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

スピンエコー法の信号強度

$$S \propto \rho \times (1 - e^{-TR/T_1}) \times e^{-TE/T_2}$$

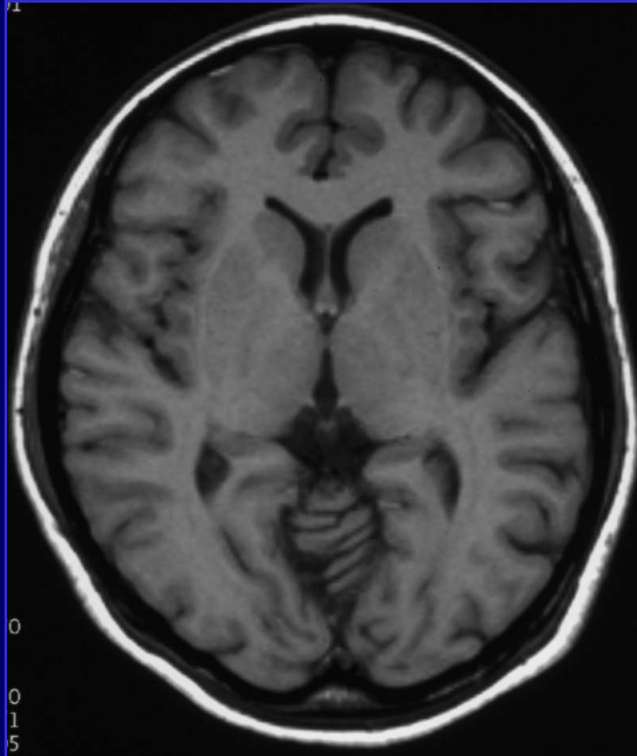
(ただし $TR \gg TE$ の場合)

* ρ : プロトン密度

* T_1, T_2 : 縦緩和時間, 横緩和時間

* TR, TE : 繰り返し時間, エコー時間

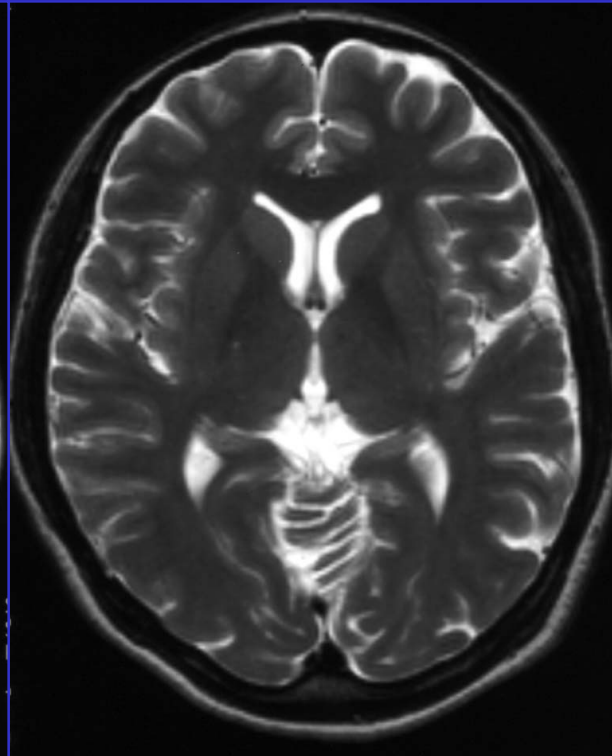
MRI: スピンエコー法の画像



T1強調画像

TRを短く(+T2非強調)

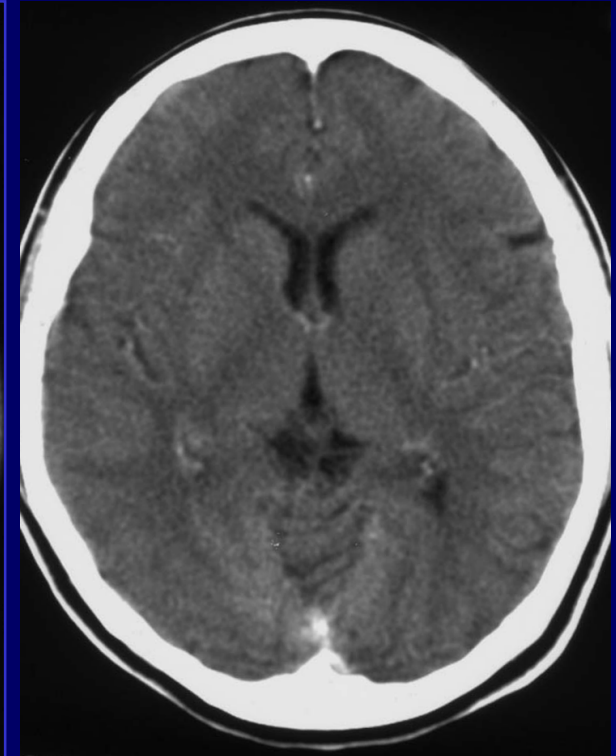
T1短いと高信号



T2強調画像

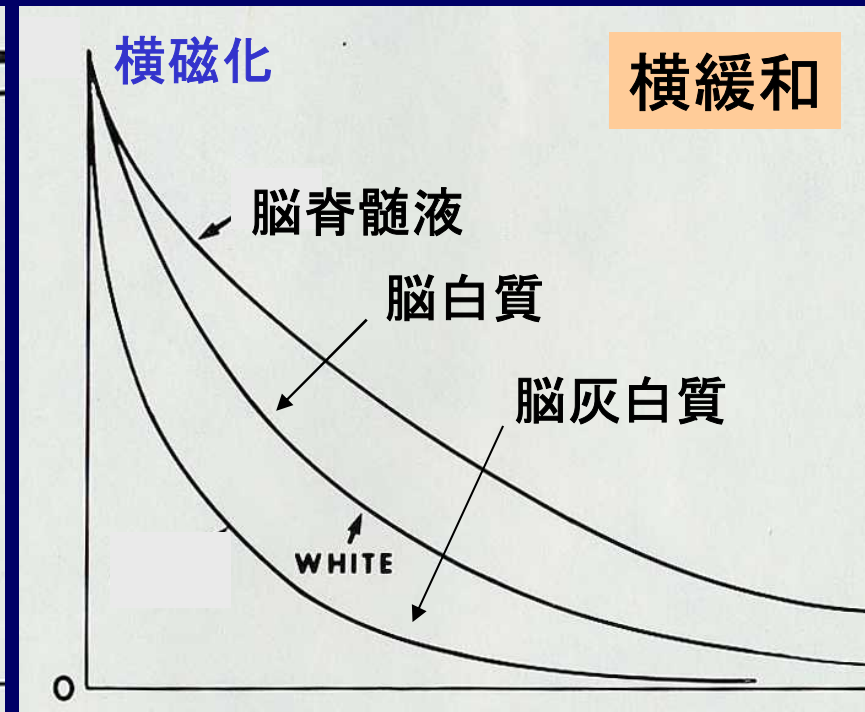
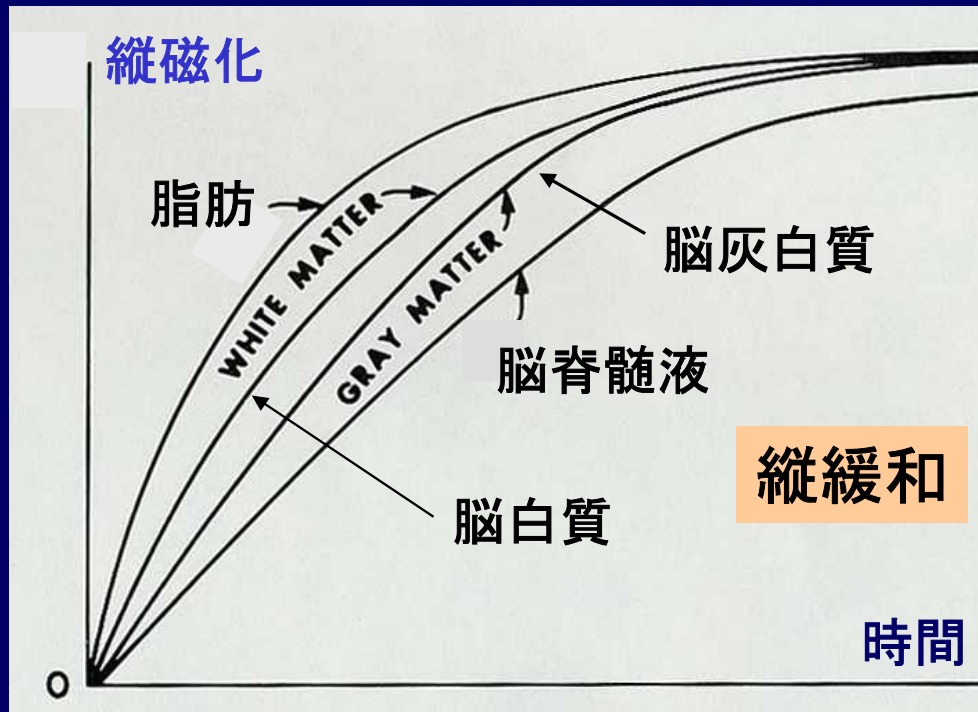
TEを長く(+T1非強調)

T2長いと高信号



X線CT

X線減弱係数
の表示



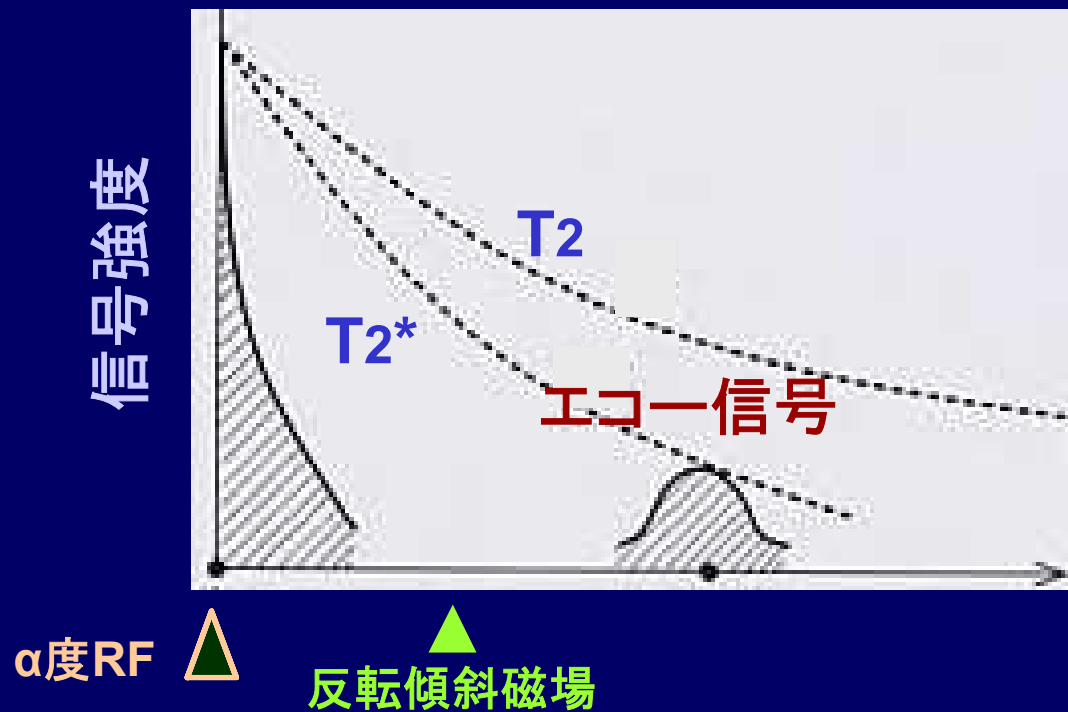
T1差の強調: TRを短く

T2差の強調: TEを長く

スピンエコー法での強調撮像:

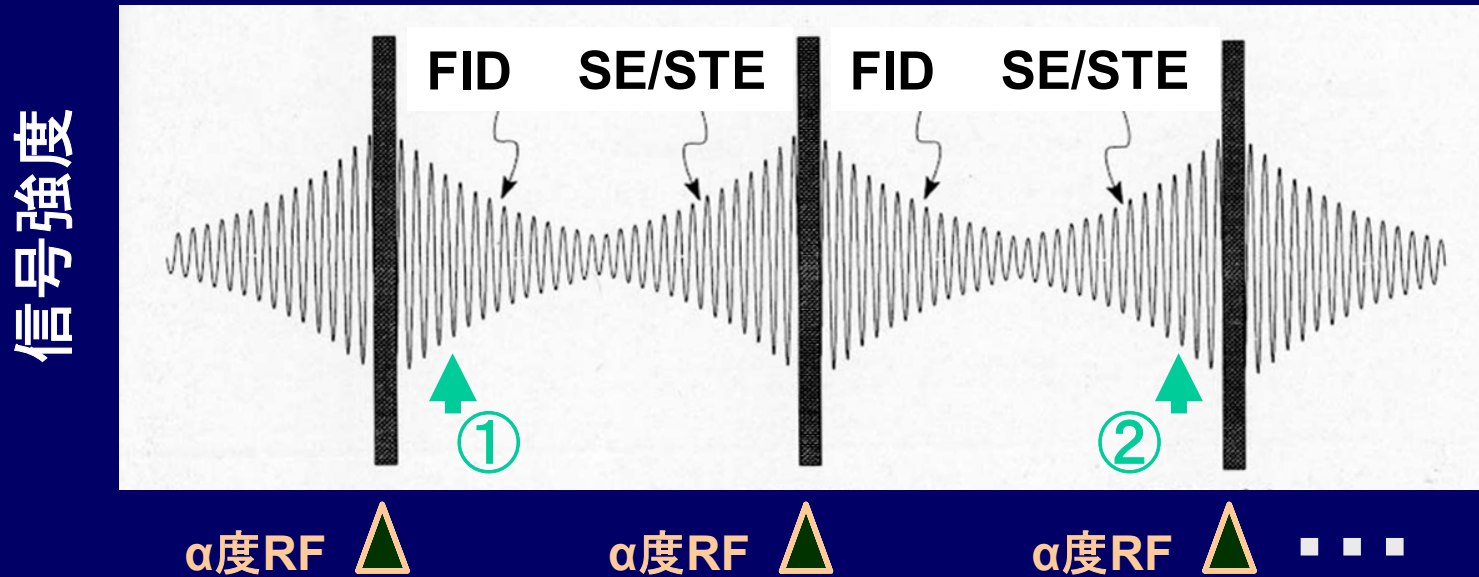
- * T1強調: TR短く(T1強調)+TE短く(T2非強調)
- * T2強調: TR長く(T1非強調)+TE長く(T2強調)
- * プロトン密度強調: TR長く(T1非強調)+TE短く(T2非強調)

グラジエントエコー法



-
- * スポイルドGRE法: 横磁化の消去 FLASH / SPGR...
 - * 定常状態GRE法: 横磁化定常状態 FISP / SSFP...
 - # ターボGRE法: 超短TR / 前処置パルス MPRAGE...

定常状態グラジエントエコー法



定常状態自由歳差運動 (SSFP: steady-state free precession)

① FID/SE/STEサンプル

T₂/T₁(液体)強調像

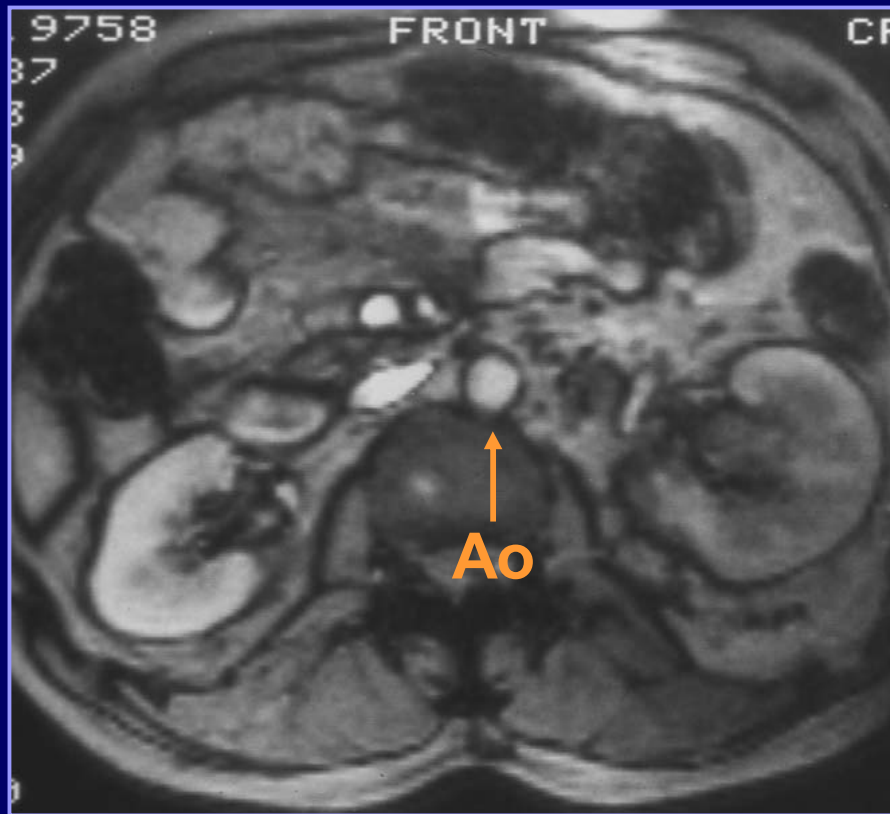
FISP / true FISP / balanced TFE

② SE/STEサンプル

強いT₂強調像

SSFP / PSIF...

スプォイルド・グラジエントエコー法

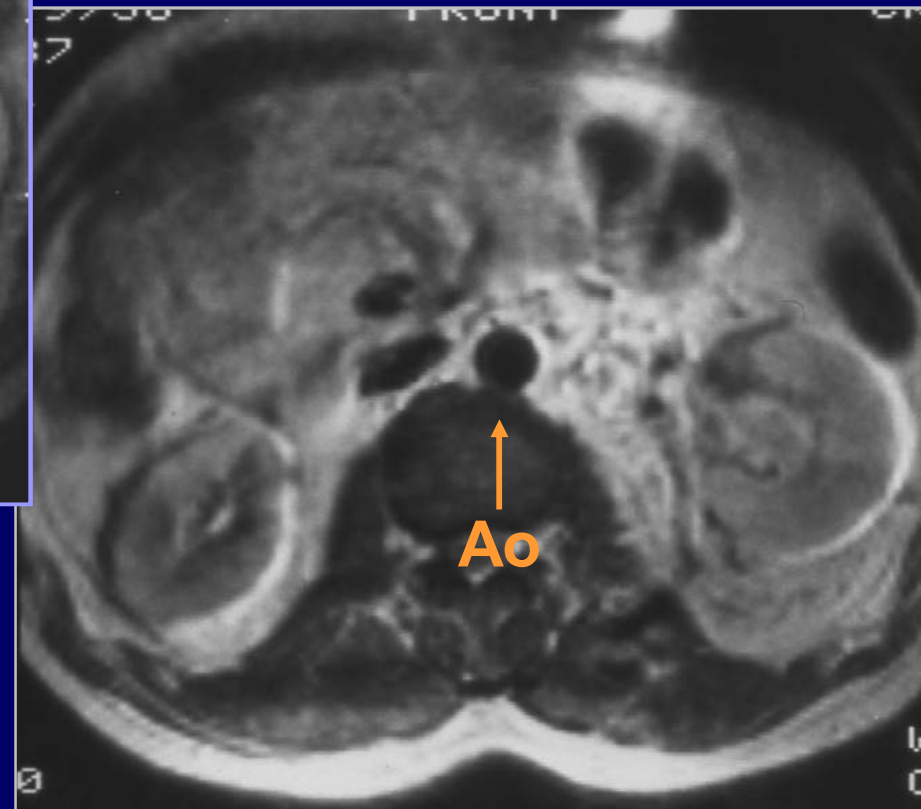


TR / TE / FA: 100ms / 27ms / 30°

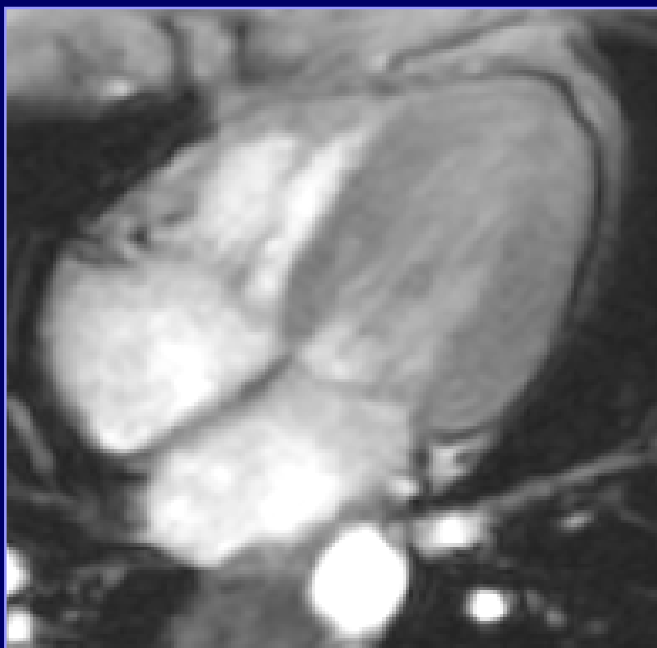
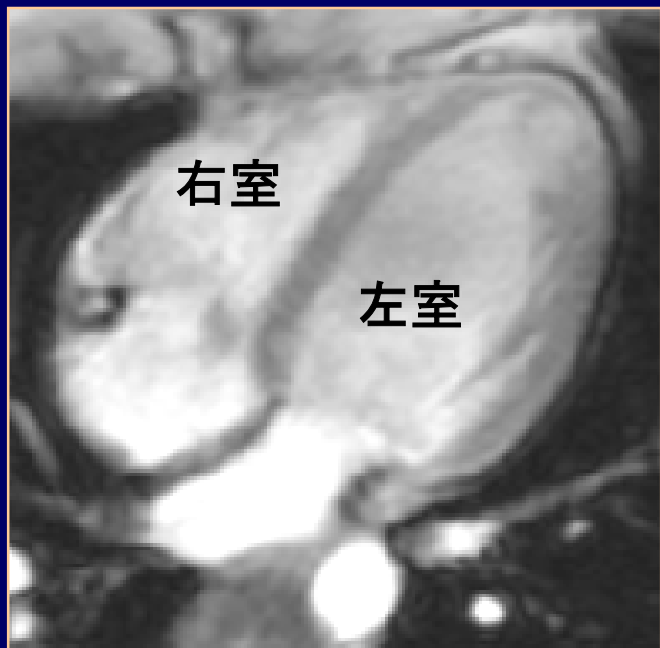
Ao: 腹部大動脈

腹部MRI: 水平横断像

スピンエコー法



TR / TE / FA: 1900ms / 30ms / 90°



シネMR法

スポイルド
GRE法

収縮末期

拡張末期

定常状態
GRE法



スピンエコー法

グラジエントエコー法

#180° RFパルスあり

- * 恒常的な磁場不均一性の影響を解消

- * 撮像時間長い:分単位

- * しっかりした信号
良好な画像コントラスト

- * 流出効果あり
⇒血流部分は低信号

- * 形態・組織性状診断

VS.

#180° RFパルス省略

- * 恒常的な磁場不均一性の影響は残存

- * 撮像時間の短縮可能

- * 異なる組織の境界部の縁取り状低信号

- * 流出効果なし
⇒血流部分は高信号

- * 血流・機能の診断