



15分で分かる(?)MRI

●○○ 古典力学的説明※ ○●○

MRI原理へのいざない Part 2



1個のプロトンから15分単位で理解できる(?)

基本的な信号強度

Part 2 信号の取り出し方について

※学部学生・研修医用の資料

※T2減衰については、Part 2でもPart. 1での簡略化したモデルで扱っています。とりあえずT1, T2とTR, TEとの関係を、ざっくりと理解することを目標にしています。
※T1とT2は組織のパラメータで、TRとTEは撮影装置のパラメータ(機械で調整する値)になります。エックス線検査がラジオならMRIはテレビに相当します。ラジオは選局(周波数相当)と音量(電流・時間相当)の調整のみですが、テレビの場合、それ以外に、少なくとも画面の縦(TR相当)と横(TE相当)の大きさに関する設定が必要です。

Part 1～4へのリンク

- Part 1: プロトン密度、T1、T2と信号強度（学部学生必須）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min.pdf>
 - 補遺・任意断面の撮影・その1 --- 位置情報なければ0次元(点)
 - 補遺・MRIの安全性に関連した項目
- Part 2: 信号の取り出し方について（学部学生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p2.pdf>
 - 補遺・任意断面の撮影・その2 --- 平面内での位置情報
- Part 3-1: 巨視的磁化ベクトルでの説明（学部学生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3.pdf>
 - 補遺: TE時間後の信号の取得方法(SE、GRE、UTE etc.)
 - 補遺: 各種撮影法について
- Part 3-2: 補遺特集（大学院生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3-2.pdf>
 - 補遺: T1緩和とT2緩和の背景、NMR/MRIの核種について
 - 補遺・MRIの信号シミュレーションソフト
- Part 4: 「流れ」を見る。（大学院生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p4.pdf>

Part 2. 次の15分

信号の取り出し方とTR,TEについて

TR,TEとは？

TR:繰り返し時間 (Repetition Time)

90度パルスの繰り返し間隔

TE:エコー時間 (Echo Time)

直前の90度パルスから信号を取り出すまでの時間

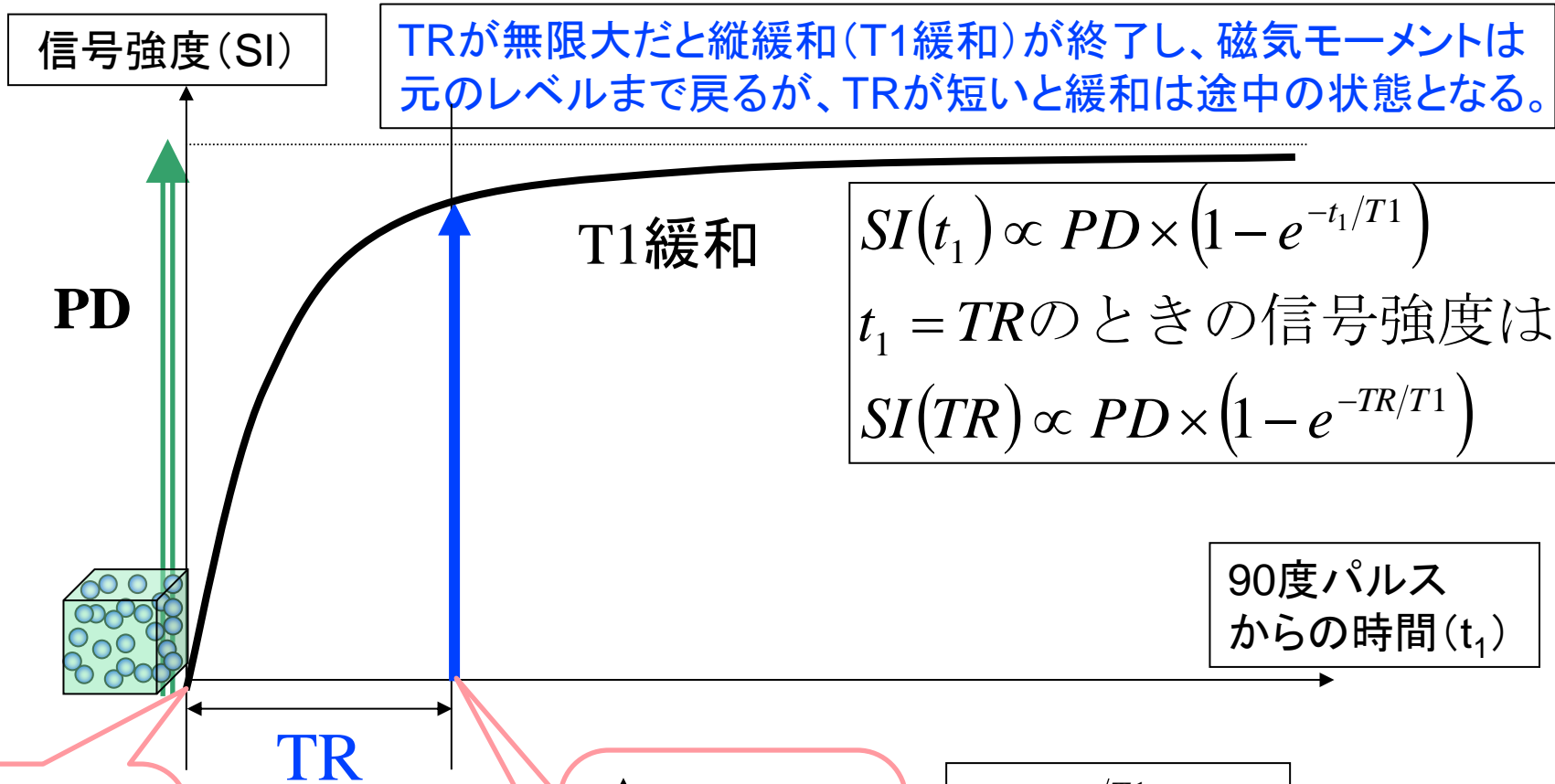
※ここでは、スピンエコー法 (SE法) を基本に記述していますが、各種撮影法に共通の項目となり、グラジエントエコー (フィールドエコー) 法 (GRE、FE法) や、UTE (超短TE) という手法を理解する上でも重要な項目となっています。

※エコー信号という概念以外での信号取得までの時間に、TE (エコー時間) という用語が多用されているので、注意が必要です。

準備体操は入念に繰り返すこと・・・

- 「90度パルスを1回のみ」では十分な信号を得ることはできない。
- 「90度パルスを複数回繰り返す」ことが必要。
- 「90度パルスを繰り返す間隔」を繰り返し時間 (TR = Repetition Time) という。
- TRが無限大だとT1 緩和(縦緩和)が終了し、磁気モーメントは元のレベルまで戻るが、TRが短いと緩和は途中の状態となる。

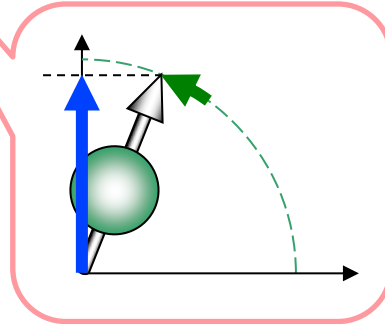
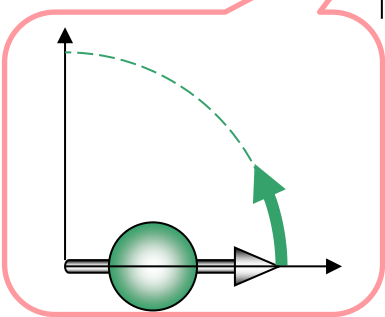
90度パルス後の縦緩和 (T1緩和) とTR



$$SI(t_1) \propto PD \times (1 - e^{-t_1/T1})$$

$t_1 = TR$ のときの信号強度は

$$SI(TR) \propto PD \times (1 - e^{-TR/T1})$$



$$1 - e^{-t_1/T1}$$

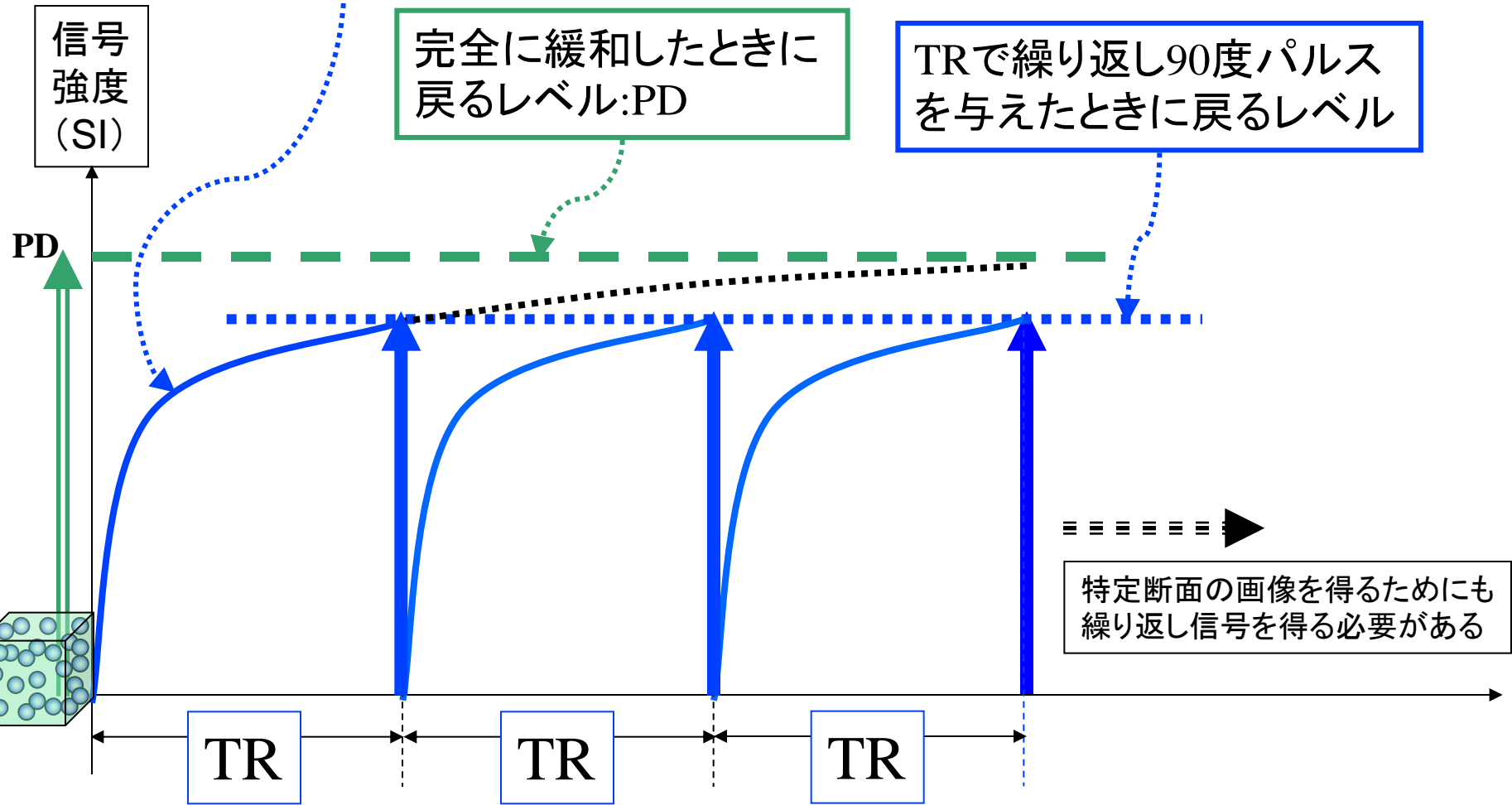
$t_1 = TR$ のとき

$$1 - e^{-TR/T1}$$

90度パルスを繰り返し与えると・・・

$$SI(t_1) \propto PD \times (1 - e^{-t_1/T1})$$

$$SI(TR) \propto PD \times (1 - e^{-TR/T1})$$

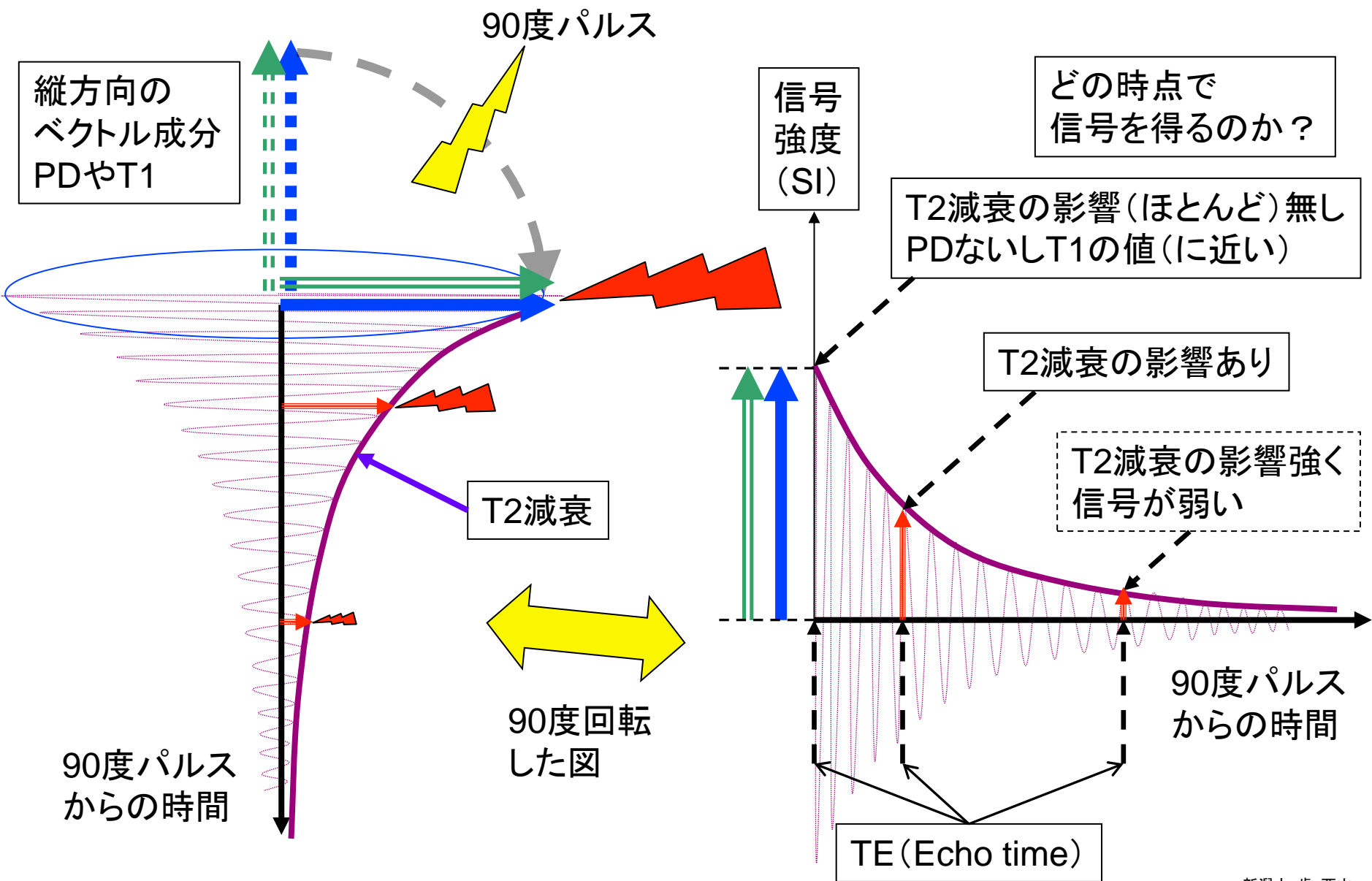


※簡略化したモデルで考えている限りでは、このように一定レベルに戻ることは説明できない。横緩和の成分を考えに入ると、夜も眠れなくなってしまうかねない。Part. 3で補遺を追加予定。

信号は水平面からしか取れない

- 90度パルスを与えて、縦方向の成分 (PD や T1) を水平に倒すことで、FID信号 (電磁波) として信号を受信することができる。
- 90度パルスから時間が経てば、横緩和 (T2 緩和) にて信号が減衰する。
- 90度パルスから信号を受信するまでの時間をエコー時間 (TE = Echo Time) という。
- TE が短いと、ほぼ縦方向の成分 (PD や T1) の信号強度を得ることができる。

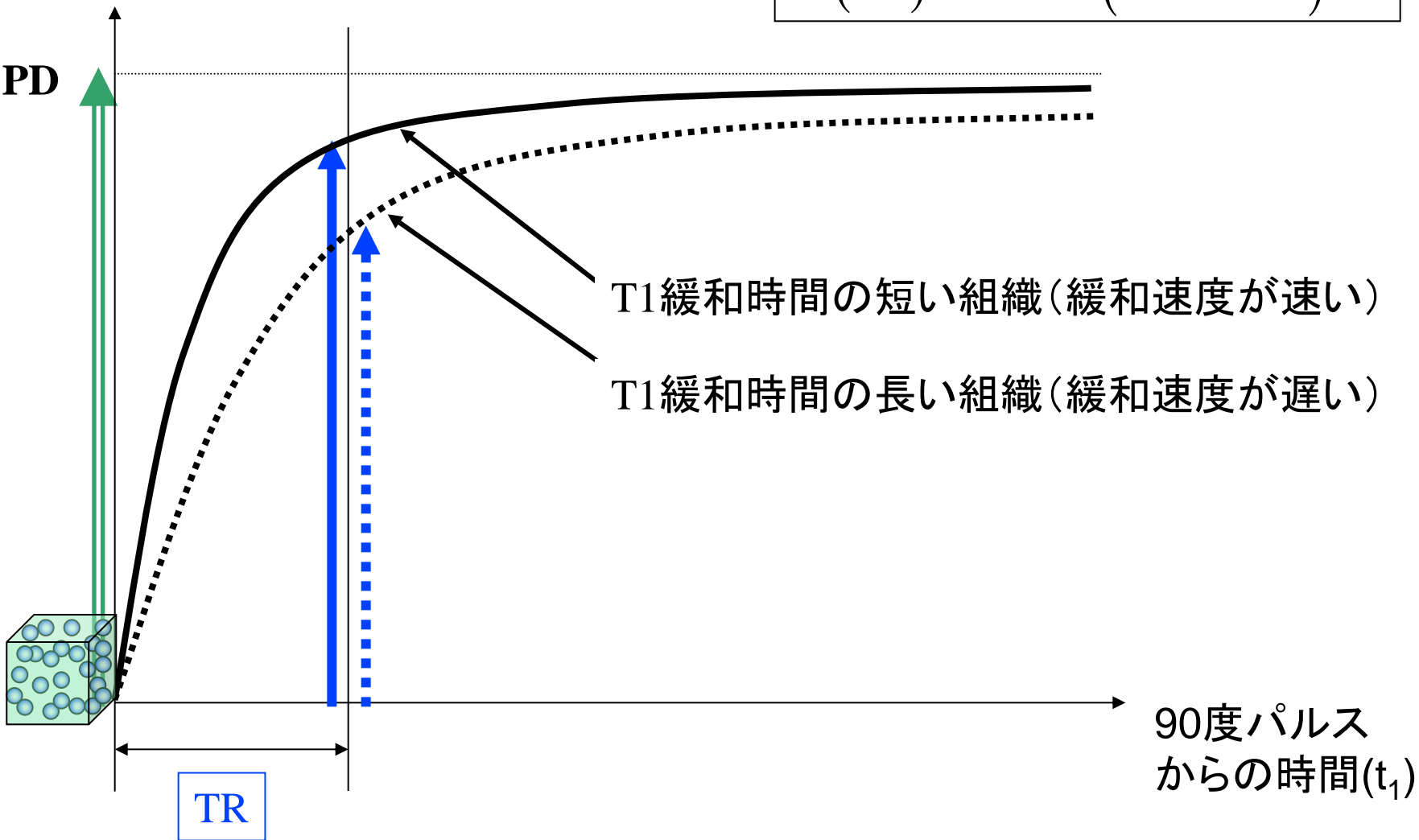
90度パルス後のT2緩和(横緩和)とTE



組織間コントラストを得る

- 組織によって、T1値とT2値が異なる。
- 90度パルス後、信号強度は指数関数的に変化する。
- これらの関係に対し、TRとTEを調整することで、適切な組織間コントラストを得る。

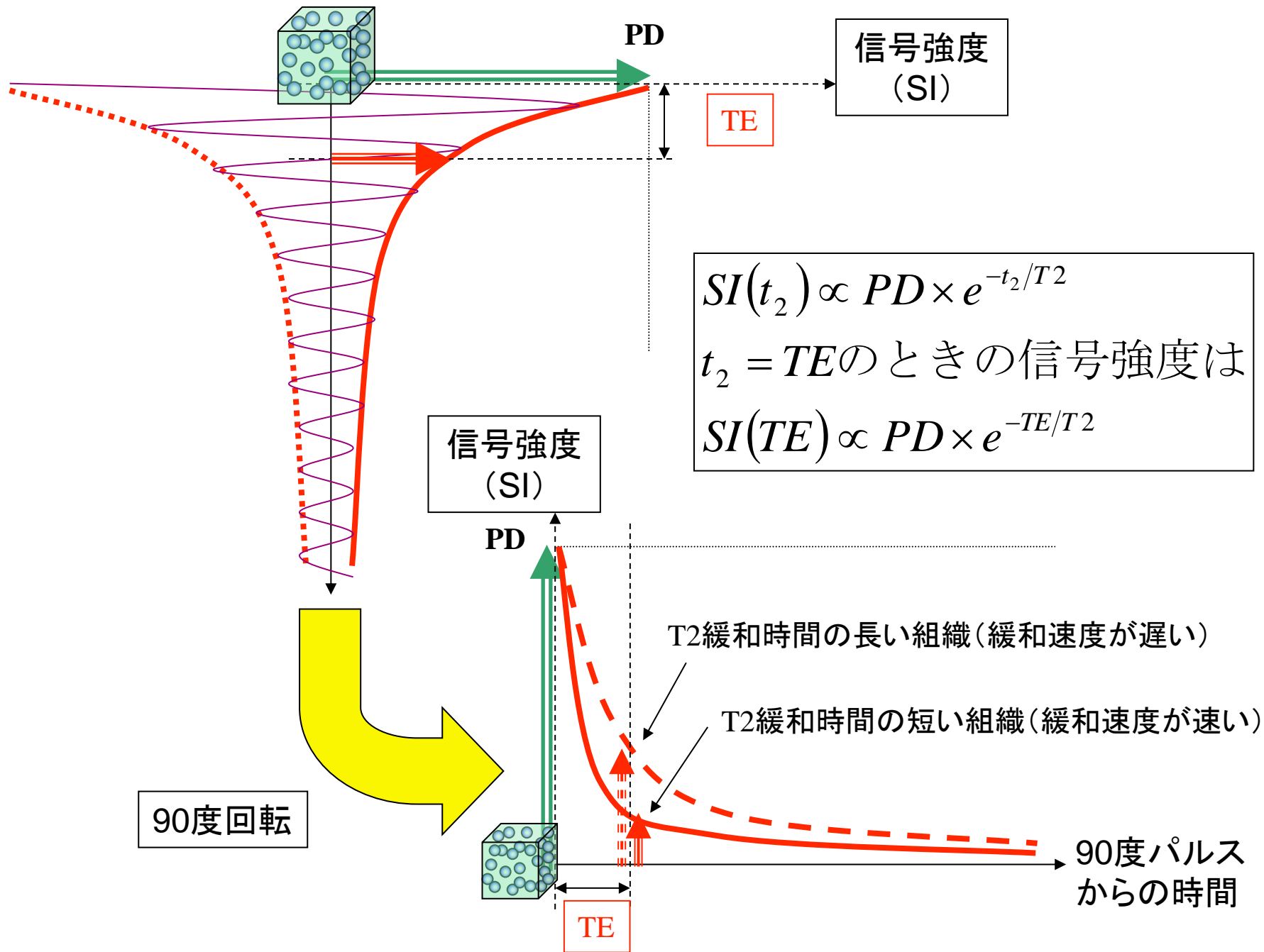
信号強度
(SI)



$$SI(t_1) \propto PD \times (1 - e^{-t_1/T1})$$

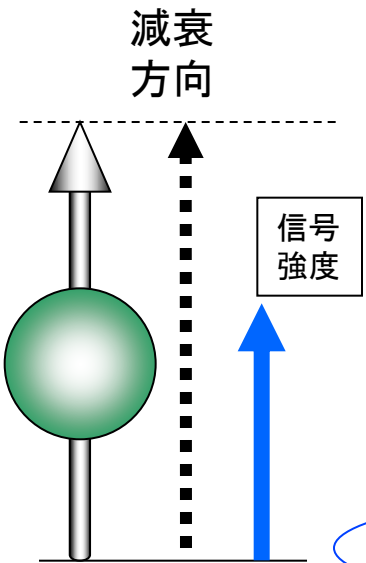
$t_1 = TR$ のときの信号強度は

$$SI(TR) \propto PD \times (1 - e^{-TR/T1})$$

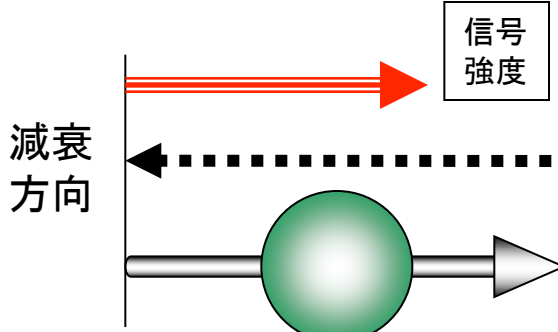
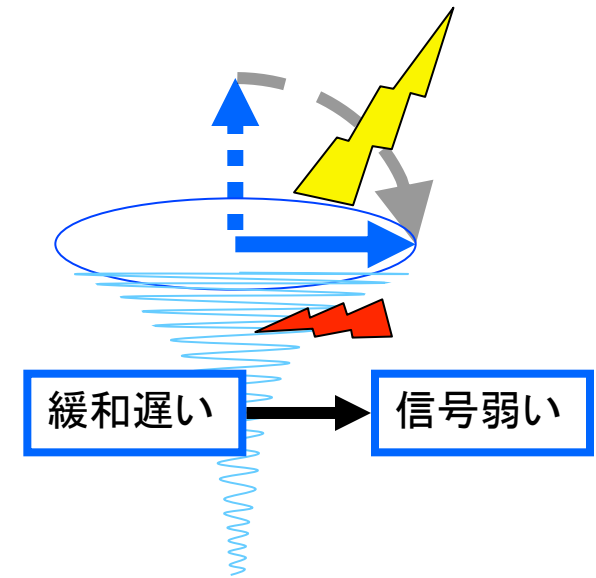
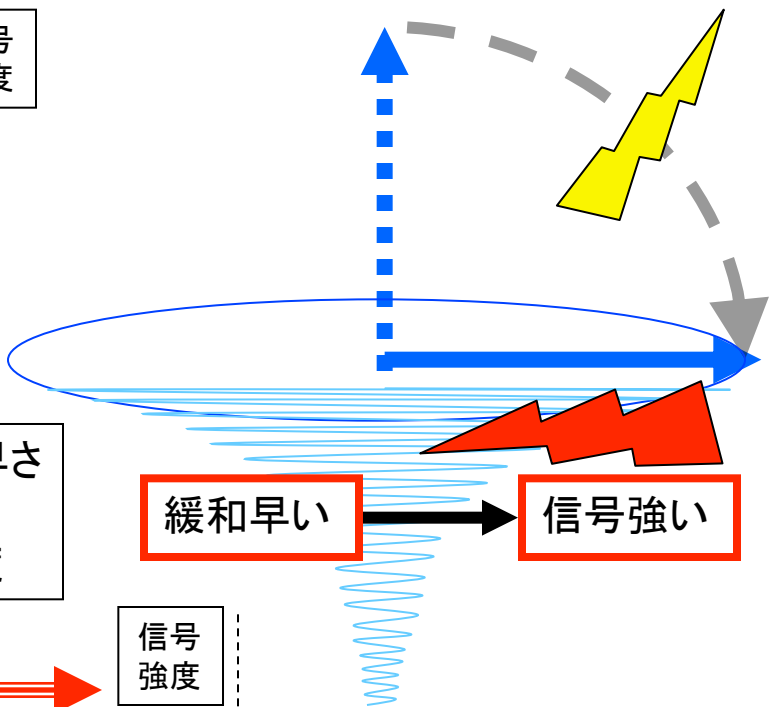


緩和速度と信号強度の関係

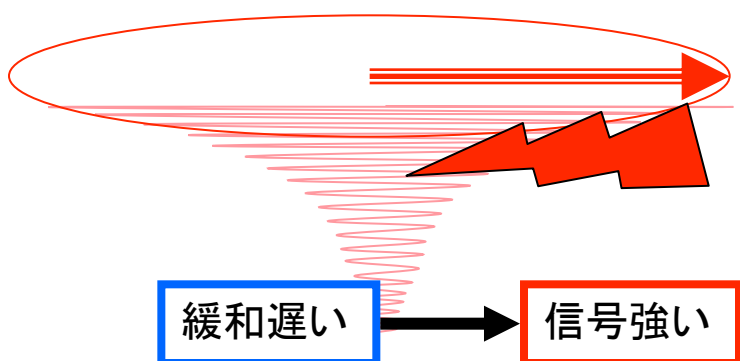
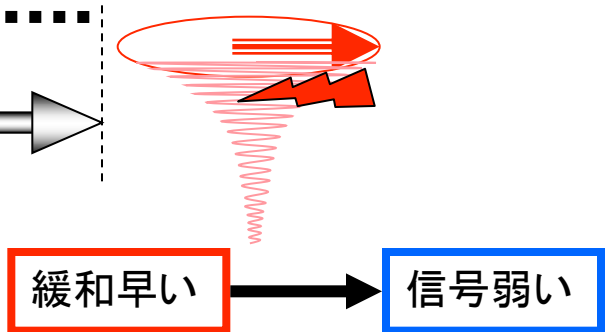
縦緩和(T1緩和)は再度90度倒して信号を得る



T1の回復の早さ
=
T1緩和速度

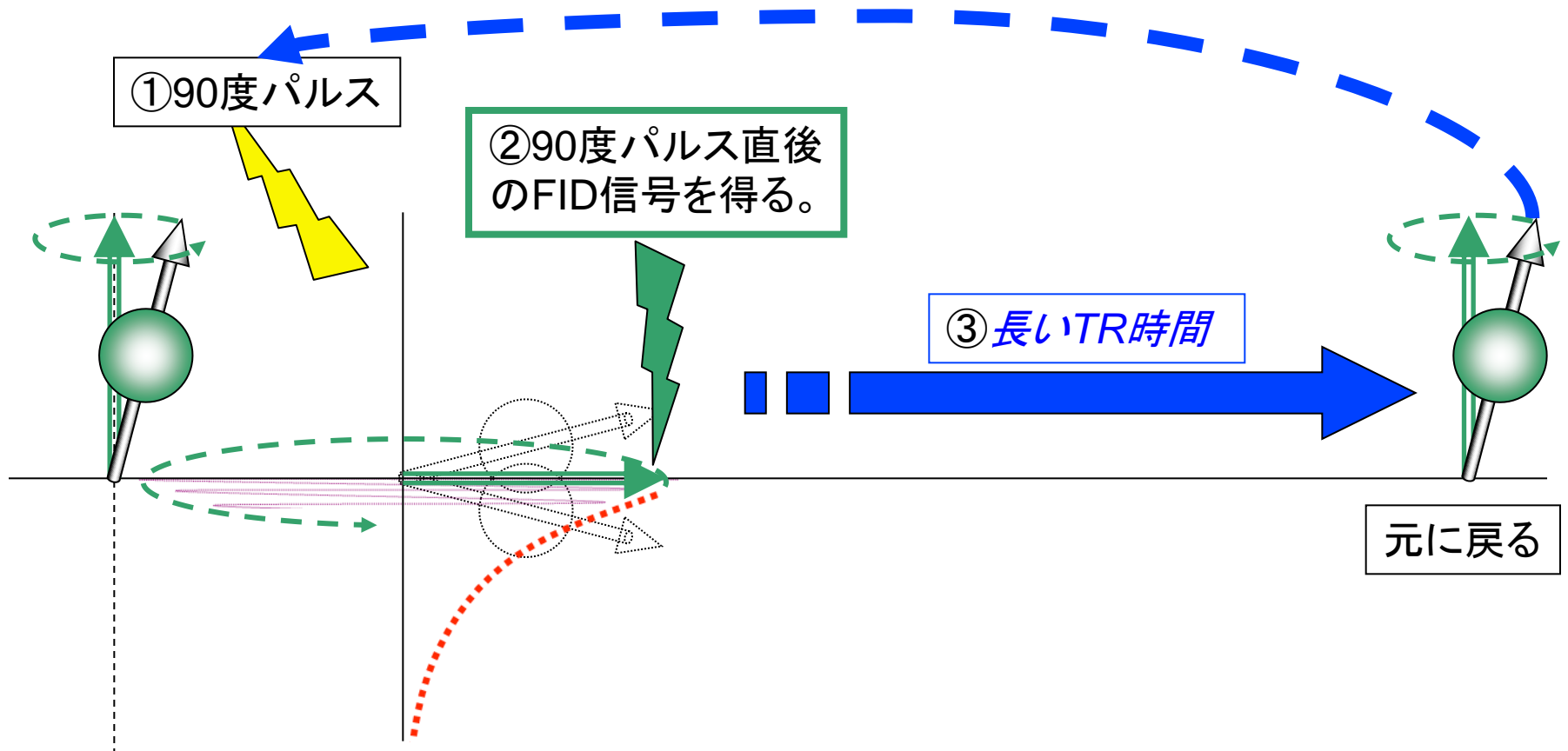


T2の回復の早さ
=
T2緩和速度



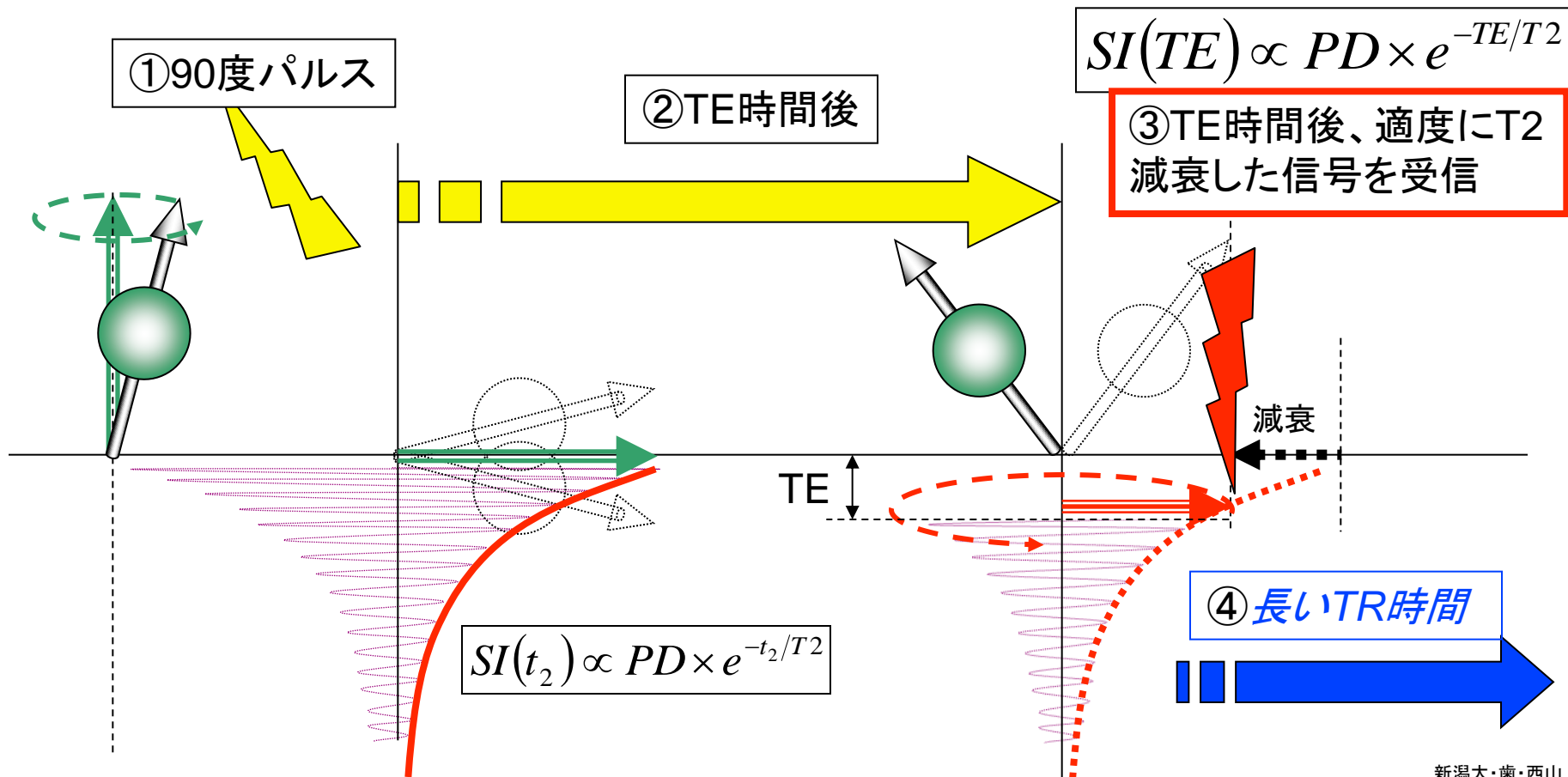
プロトン密度情報の取り出し方

①90度パルスを印加後、②直後の(非常に短いTE時間後)のFID信号を受信することで、単位体積当たりのプロトンの密度情報を知ることができる。③繰り返し信号を得るには、磁気モーメントが元に戻るまで十分に長い時間(非常に長いTR時間後)待って、①90度パルスを印加する。



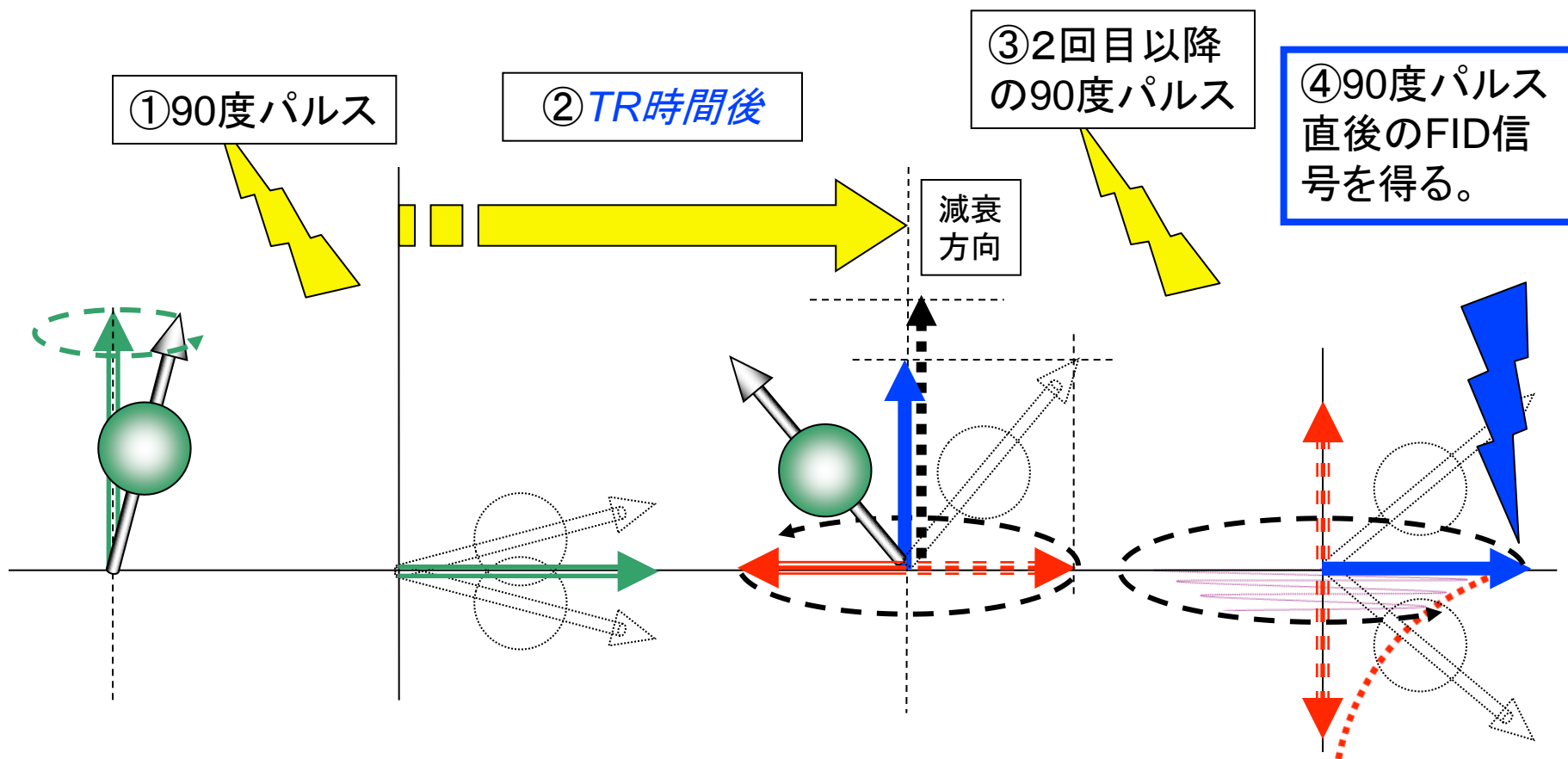
T2減衰状態の取り出し方

①90度パルスを印加後、② 適度な長さの **TE時間後**の③FID信号を受信することで、横方向の緩和状態 (T2緩和)を知ることができる。④繰り返し信号を得るには、磁気モーメントが元に戻るまで十分に長い時間 (**非常に長いTR時間後**) 待って、①90度パルスを印加する。



T1減衰状態の取り出し方

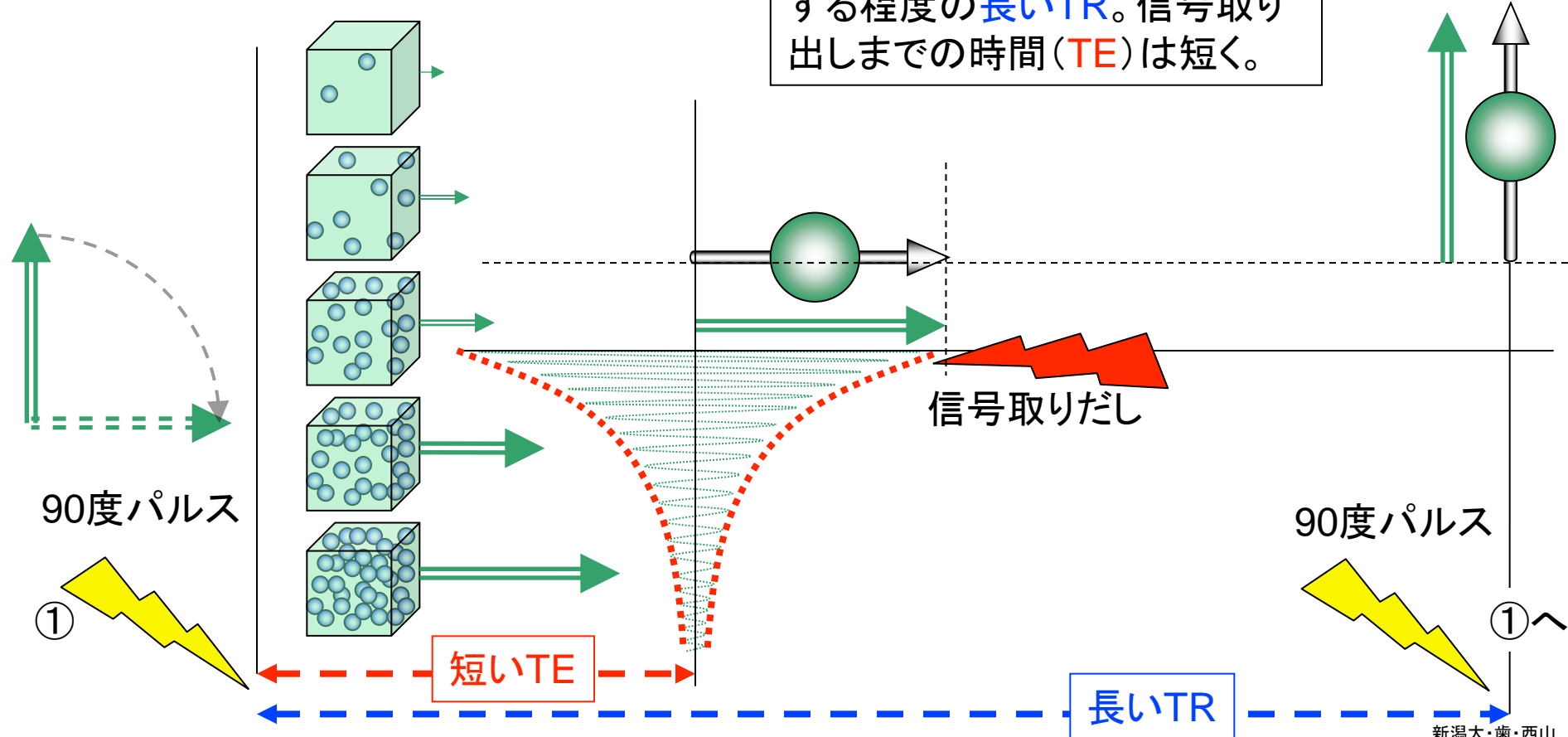
①90度パルスを印加後、②TR時間経過した段階で、③再度90度パルスを印加し、④直後の(非常に短いTE時間後)のFID信号を受信することで、縦方向の緩和状態(T1緩和)を知ることができる。



スピンエコー法での 信号強度の基本・まとめ

プロトン密度強調画像での信号強度(SI)
≡ **プロトン密度**

プロトンの状態が(ほぼ)回復する程度の**長いTR**。信号取り出しまでの時間(**TE**)は短く。

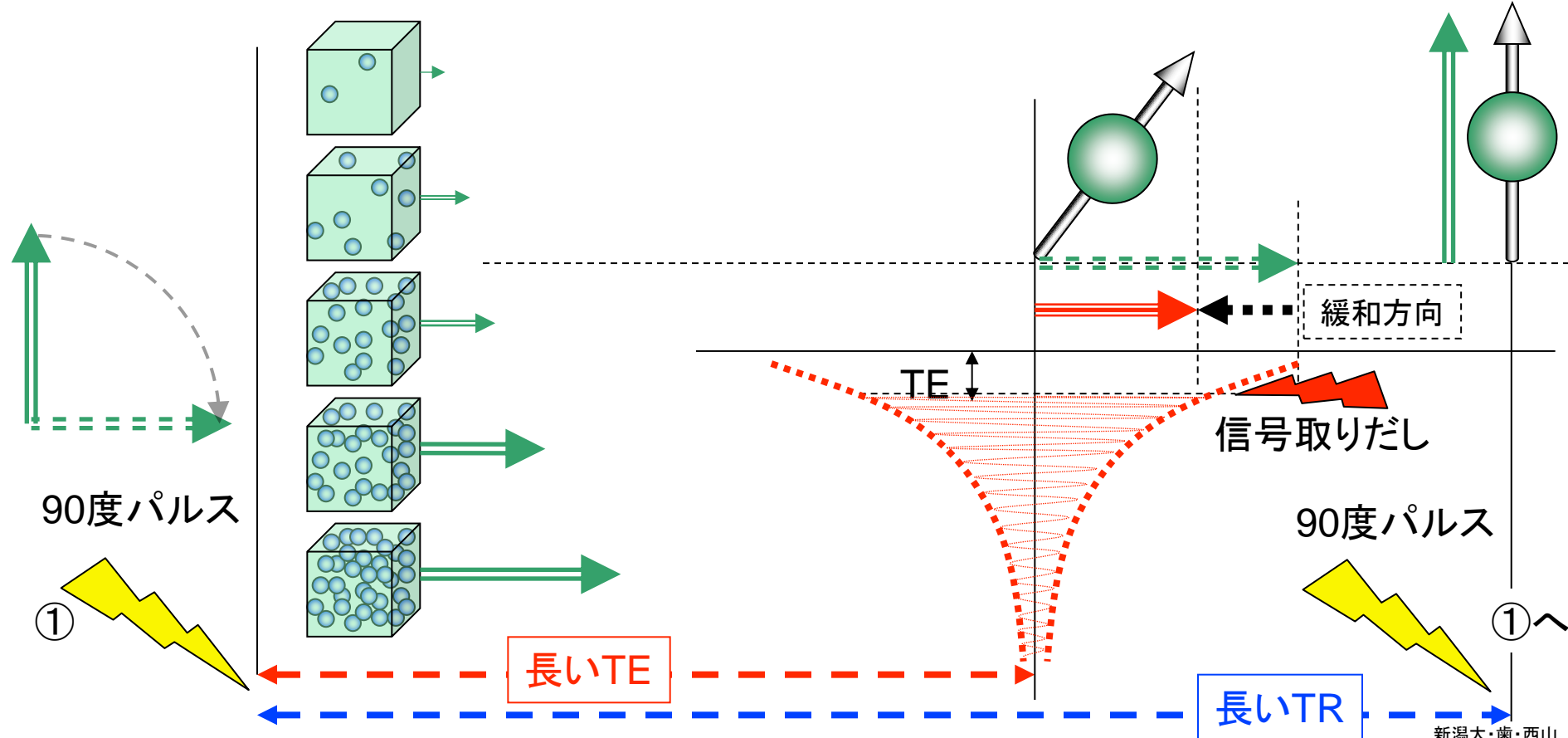


スピンエコー法での 信号強度の基本・まとめ

T2強調画像での信号強度(SI)

$$\text{SI} \propto \text{プロトン密度} \times \text{T2緩和状態}$$

T2緩和状態はTEで決定される。(TRは長く)
最小:0、最大:1

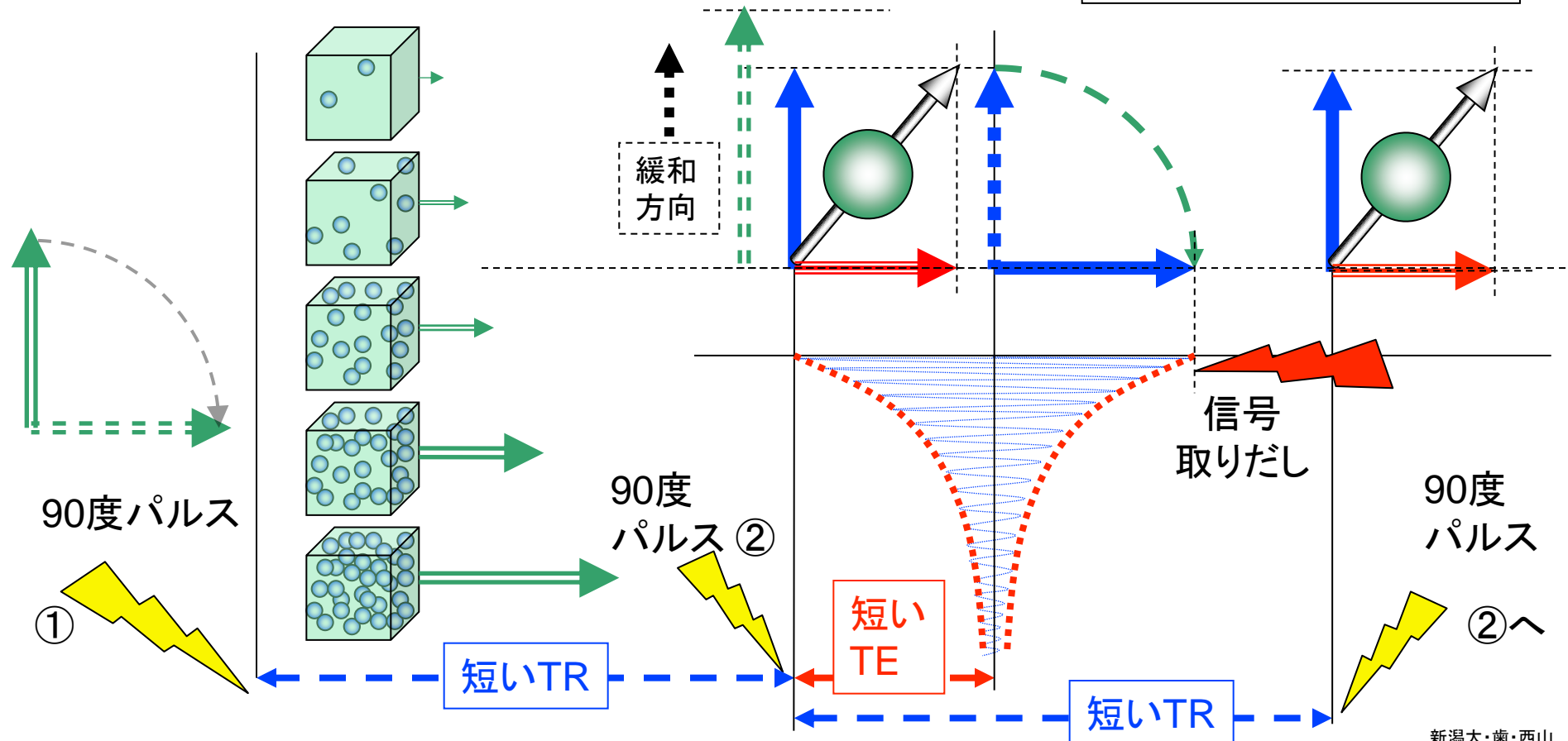


スピンエコー法での 信号強度の基本・まとめ

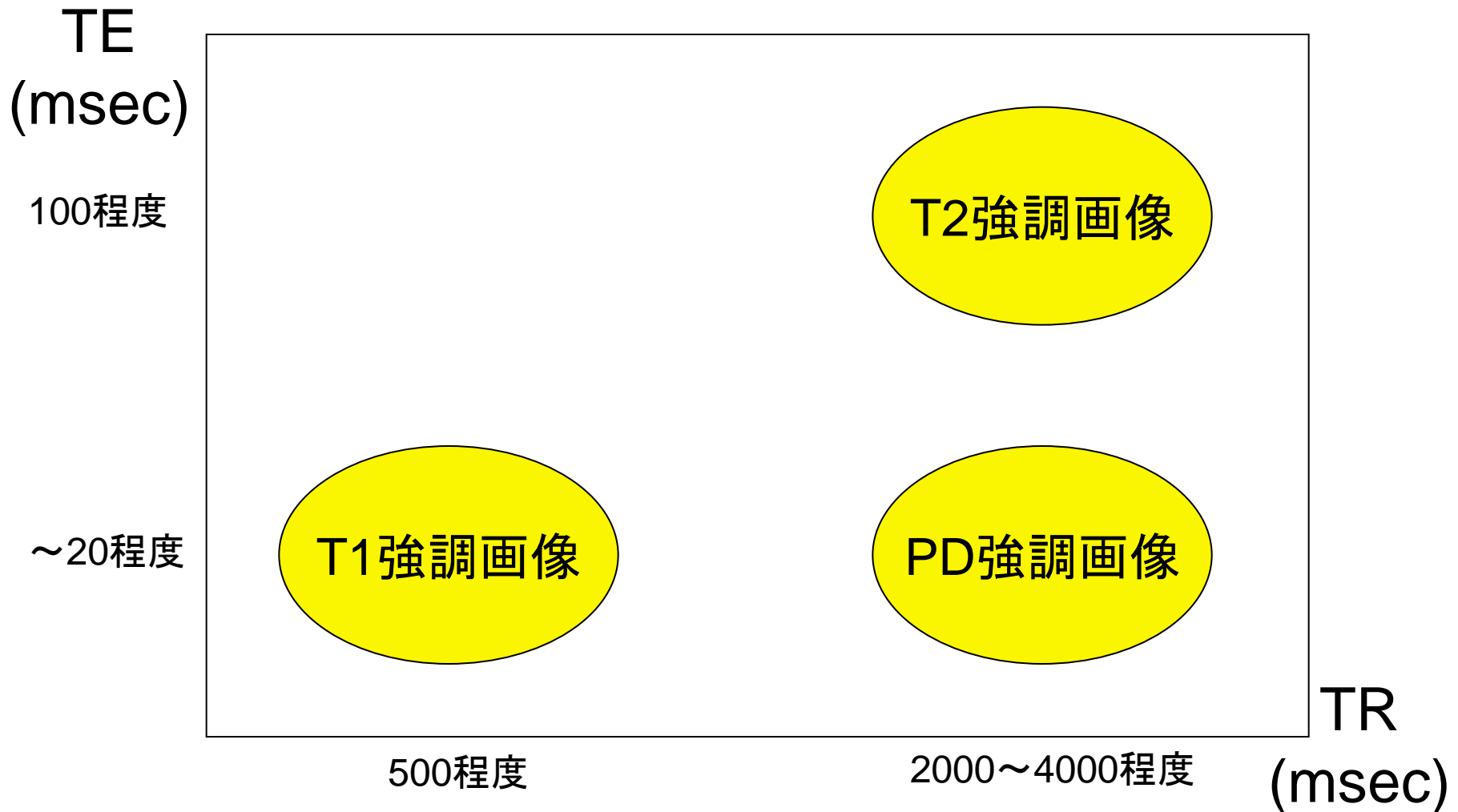
T1強調画像での信号強度(SI)

$$\text{SI} \propto \text{プロトン密度} \times \text{T1緩和状態}$$

T1緩和状態はTRで決定される。(TEは短く)
最小:0、最大:1



TR,TEと各種強調画像との関係 (SE系)



MRIのパラメータ

装置側	TR : 繰り返し時間	TE : エコー時間	Flip Angle	その他
生体側	T1 : 縦緩和時間	T2 : 横緩和時間	PD : プロトン密度	v : 流速

TR(repetition time): 縦磁化を一定角度倒すパルスの繰り返し間隔。←T1緩和の程度を調整

TE(echo time): 縦磁化を一定角度倒すパルスを与えてから信号を取り出すまでの時間←T2緩和の程度を調整

装置側: 「Flip Angle」については、Part 3 にて説明します。

装置側: 「その他」には、DWIでのb値等があります(詳しくはPart 4 にて)

MRI撮影禁忌

心臓ペースメーカー(ただし、ME管理の元で一定の条件を満たす場合に検査可能な機器が出てきている。)

体内に埋め込まれた金属(磁性体は禁忌、非磁性体でも長さや配置によっては誘導電流にて深部熱傷の危険)

MRIの信号強度(スピンエコー法の場合)

$PD \times f(v) \times g(TR, T1) \times h(TE, T2)$ で、決定される。即ち、

単位体積あたりのプロトン密度に比例

$g(TR, T1) = 1 - \exp(-TR/T1) < 1$ 、 $h(TE, T2) = \exp(-TE/T2) < 1$

TRとTEによって、PD(プロトン密度)を強調するか、T1を強調するか、T2を強調するかを調整する

	TR	TE
プロトン密度強調像	長い	短い
T1強調像	短い	短い
T2強調像	長い	長い

流速(v)の影響を受ける。→血流のあるところでは、信号強度が様々に変化する。

補遺・任意断面の撮影・その2

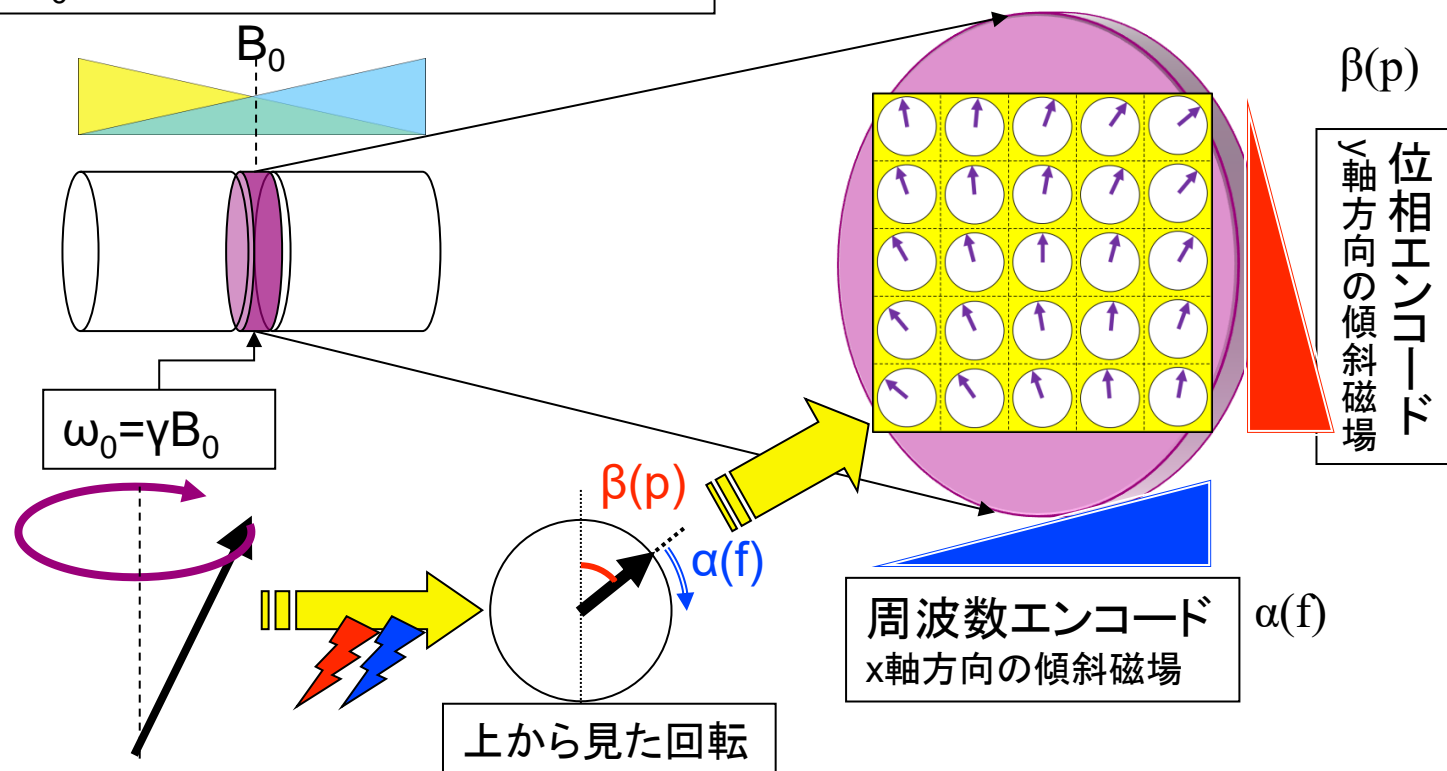
平面内での位置情報

2次元フーリエ変換の意味を理解する。
TRとTEのタイミングで与えられる傾斜磁場の役割。
スライス面選択(1次元) + 2次元平面内の位置
= 3次元位置情報

詳しいことはフーリエ変換・フーリエ逆変換という工学系の専門知識が必要
参考資料: https://www.jstage.jst.go.jp/article/mit/31/1/31_26/_pdf

スライス面内での 2次元位置情報の付与

1) z軸方向の傾斜磁場によるスライス選択
磁場強度 B_0 の断面(「その1」参照)



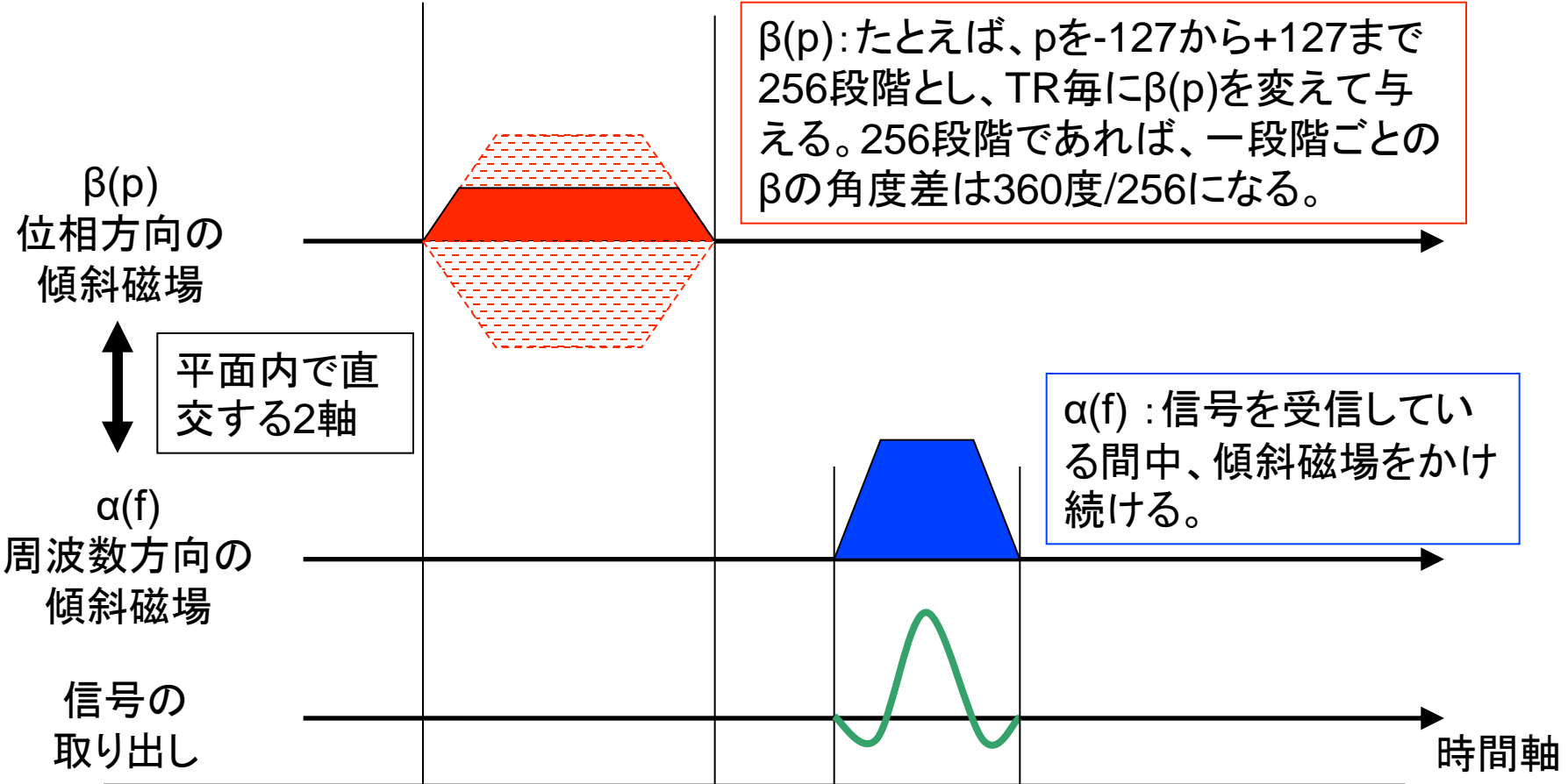
2) スライス選択後、磁化ベクトルの
歳差運動の位相と周波数を傾斜磁
場にて修飾して信号を受信する。

3) ある位相: $\beta(p)$ で、回転周波数: $\alpha(f)$
での(x,y)平面内の歳差運動の分布

傾斜磁場と信号受信(概略図)

TR毎に位相方向の傾斜磁場強度を変えながら繰り返す

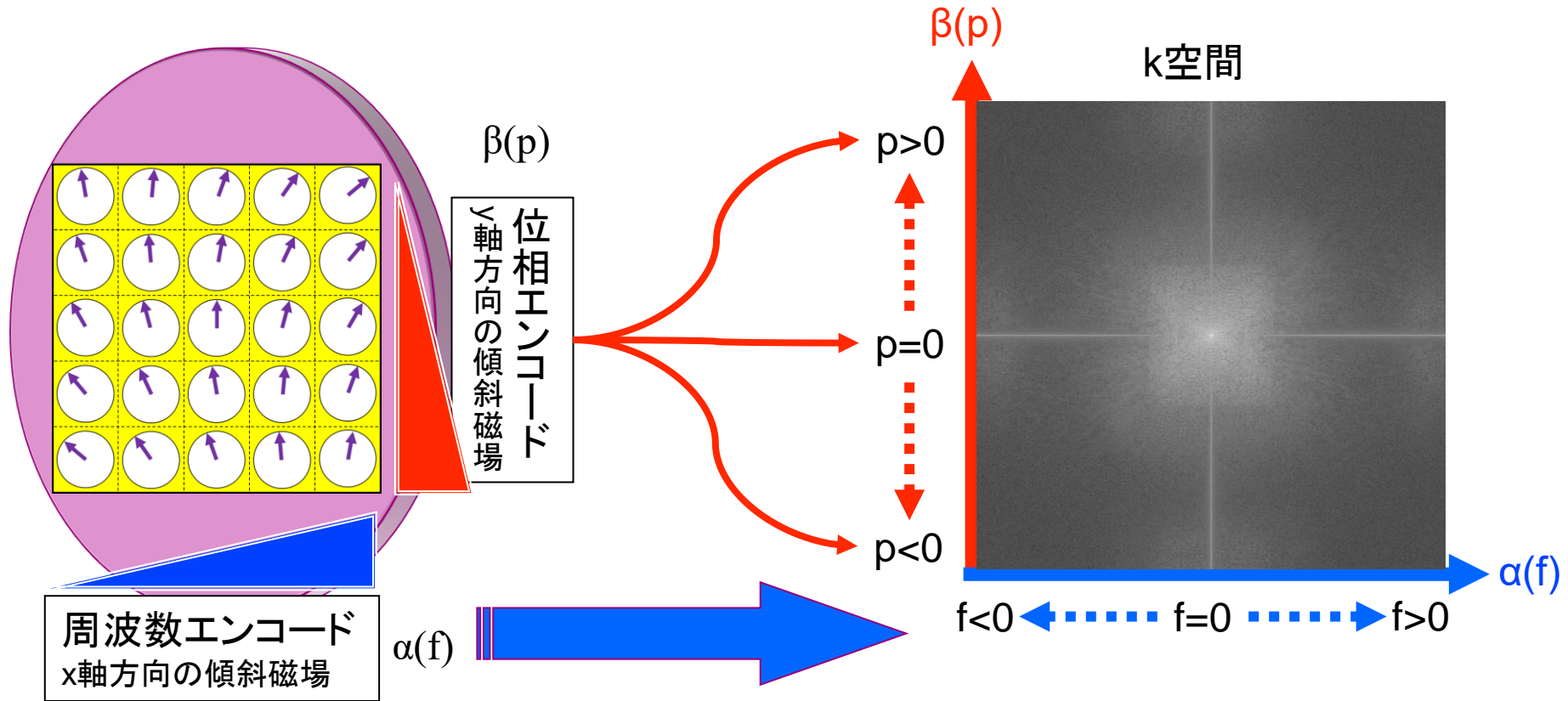
$\beta(p)$:たとえば、 p を-127から+127まで256段階とし、TR毎に $\beta(p)$ を変えて与える。256段階であれば、一段階ごとの β の角度差は360度/256になる。



$\alpha(f)$:信号を受信している間中、傾斜磁場をかけた続ける。

※周波数方向の傾斜磁場強度によって受信すべき中心周波数(B_0)に幅が生じる。このため、バンド幅と呼ばれる一定の周波数帯域の信号を受信することになる。
※実際にはスライス選択用の傾斜磁場と同時に用いられる。また、傾斜磁場の前後に、補正用の傾斜磁場を付与することになる。

スライス面内での2次元 位置情報の付与とk空間

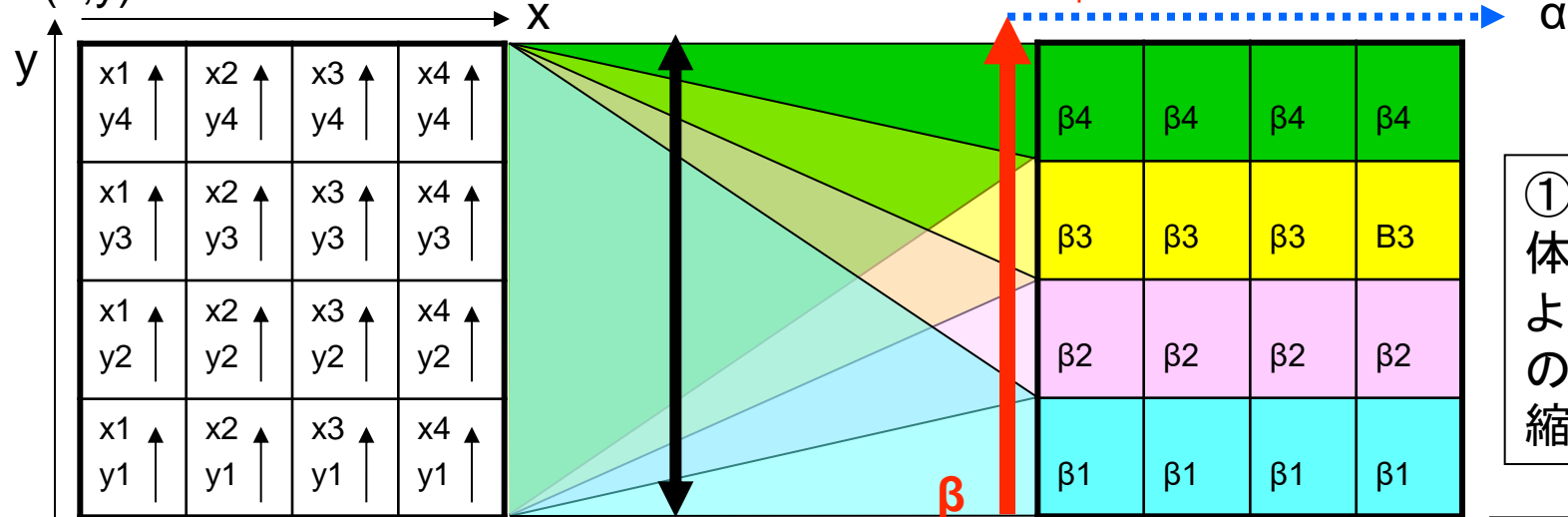


4) TR毎に変化する位相方向の $\beta(p)$ を縦軸とし、読み取り時の回転周波数: $\alpha(f)$ を横軸として信号強度分布を描いた2次元画像をk空間と呼ぶ。

$SI(x,y)$ 位置→信号強度

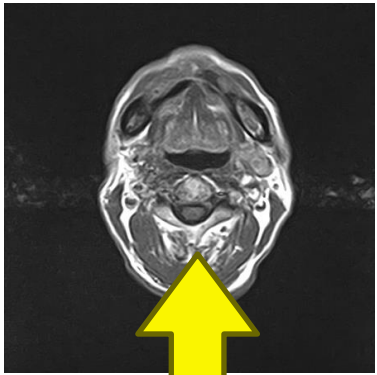
$SI_k(\alpha_f, \beta_p)$

k空間: 周波数・位相→信号強度

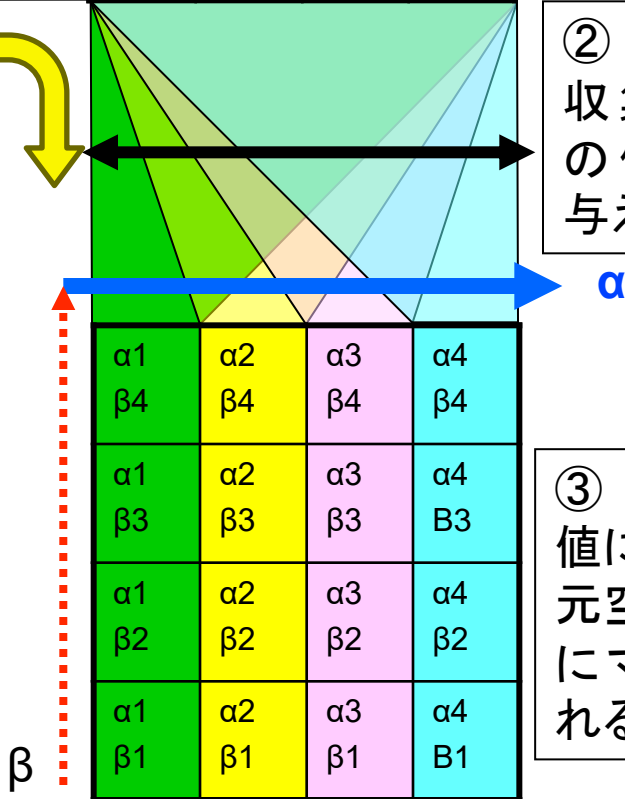


① xy 平面全体が β の値によって行単位のデータに圧縮される

② エコー信号収集中に一定の傾斜磁場を与え続ける

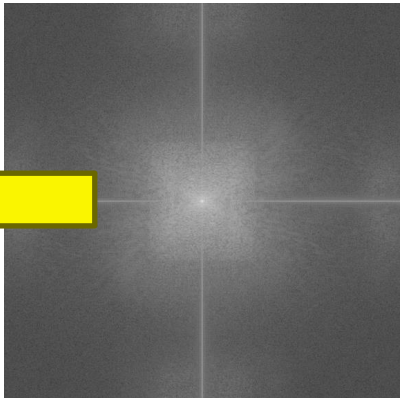


① 傾斜磁場を TR 間隔で変化



③ 各行が α の値によって、2次元空間 (k空間) にマッピングされる。

④ 2次元逆フーリエ変換

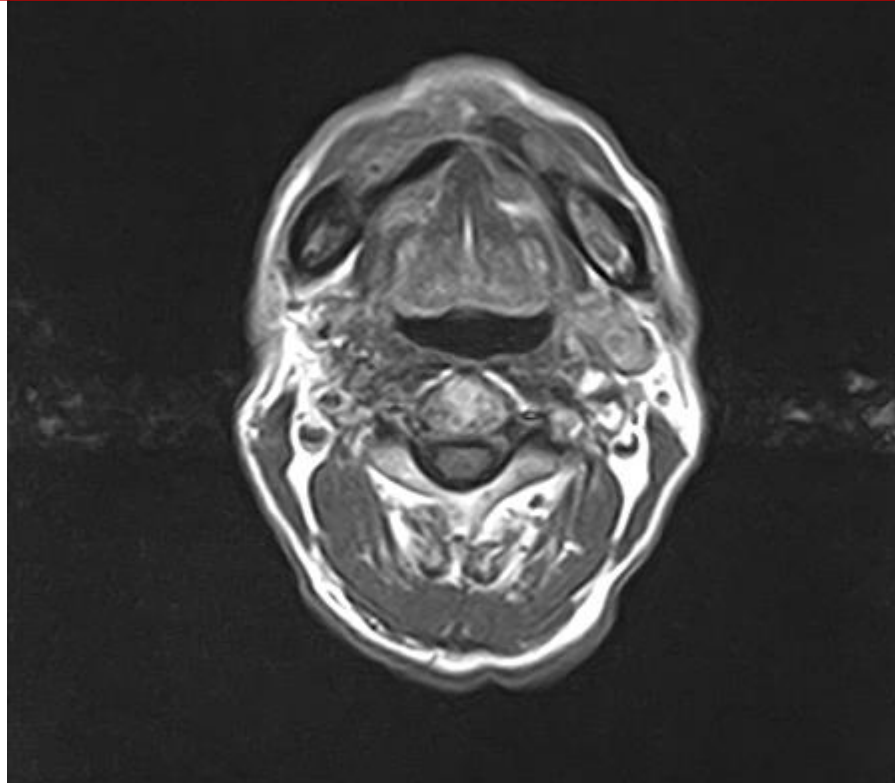


位相エンコード方向の モーションアーチファクトの例

頸動脈(および椎骨動脈など)の拍動によるアーチファクト。
動脈の拍動部分から信号の強弱の斑紋様パターンが位相
エンコード方向に分布している。

周波数
エンコード
方向

位相
エンコード
方向



SE系列、T1強調・ダイナミック造影(15秒間隔、3フェーズ目)

参考資料

- MRIの基本 パワーテキスト第2版—基礎理論から最新撮像法まで、Ray H. Hashemi (原著), Christopher J. Lisanti (原著), William G., Jr. Bradley (原著), メディカル・サイエンス・インターナショナル、6,500円(税別)
- MRI「超」講義—Q&Aで学ぶ原理と臨床応用、Allen D. Elster (原著), Jonathan H. Burdette (原著)、メディカル・サイエンス・インターナショナル、5,800円(税別)
- MR撮像技術学、日本放射線技術学会(監修)、オーム社、4,900円(税別)
- MRIデータブック、MEDICAL VIEW、6,000円(税別)
- NMRハンドブック、Ray Freeman (著)、共立出版、8,400円
- パルスおよびフーリエ変換NMR—理論および方法への入門(現代科学)、Thomas C. Farrar (著), Edwin D. Becker (著)、吉岡書店
- 生体系の水、上平 恒、逢坂 昭(著)、講談社
- 細胞の中の水、パスカル マントレ(著)、辻 繁、落合 正宏、中西 節子、大岡 忠一(翻訳)、東京大学出版会、5,200円(税別)

Part 1～4へのリンク

- Part 1: プロトン密度、T1、T2と信号強度（学部学生必須）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min.pdf>
 - 補遺・任意断面の撮影・その1 --- 位置情報なければ0次元(点)
 - 補遺・MRIの安全性に関連した項目
- Part 2: 信号の取り出し方について（学部学生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p2.pdf>
 - 補遺・任意断面の撮影・その2 --- 平面内での位置情報
- Part 3-1: 巨視的磁化ベクトルでの説明（学部学生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3.pdf>
 - 補遺: TE時間後の信号の取得方法(SE、GRE、UTE etc.)
 - 補遺: 各種撮影法について
- Part 3-2: 補遺特集（大学院生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3-2.pdf>
 - 補遺: T1緩和とT2緩和の背景、NMR/MRIの核種について
 - 補遺・MRIの信号シミュレーションソフト
- Part 4: 「流れ」を見る。（大学院生用）
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p4.pdf>