

講義ノート https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-Lecture-Note.pdf



https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p4.pdf

15分で分かる(?)MRI ●○● 古典力学的説明 ○●○ MRI原理へのいざない Part 4



1個のプロトンから15分単位で理解できる(?^{※1}) 基本的な信号強度 Part 4「流れ」を見る

※1:「流れ」に関する項目は本質的には難しく15分単位では到底無理です。でも、感 覚的な方向性(流れ)をつかむことができれば、あと「もう少し」かも知れません。 基本的には、大学院生向けの内容になっていますが、適切な資料を読みこなすことが できれば、学部学生でも理解可能なはずです。

> 2009/10/30 初版 2024/11/19 第15.5版

> > 新潟大·歯·西山

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) <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min.pdf</u>
 - 補遺・任意断面の撮影・その1 --- 位置情報なければO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) <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3.pdf</u>
 - 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 <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3-2.pdf</u>
 - 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 <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p4.pdf</u>



MRIでの流れについて

- 血流(blood flow)
 - 比較的太い血管の流れ
 - 主としてMRA(MR Angiography)の対象
- 灌流(perfusion)
 - 抹消の循環(毛細血管流)
 - 動脈系、静脈系、毛細血管系などの複数のコンパートメントを想定して造影の状態を見る。
- 拡散(diffusion)
 - 物理学的な定義:エネルギーや物質が濃度の高い部分 から低い部分へ流れることで、均一な定常状態へと向か う現象。
 - 水分子の場合、ランダムな分子運動(熱運動)。ただし、 組織の構造によって、動きの程度や方向が抑制される。
 - ・ 拡散強調像ではボクセル内のperfusionの因子が含まれてしまう。→IVIM(intra voxel incoherent motion)

遅い

早い

「流れ」の画像化(血流)

• MRA

造影剤を用いないでも血管を描出可能な撮影法

- TOF (time of flight) MRA
 - T1強調像では、TR間隔での90度パルスの繰り返しにて、ボクセル内の巨視的磁化ベクトルが、完全には回復しない状態になっている。しかし、動脈性の血流にて90度パルスの繰り返しの影響を受けていない新鮮な血液が流入すると、周囲組織と比較し信号強度が強くなる現象(in flow効果)を利用し、動脈を描出する方法。スライス厚をdとしたとき、流速がd/TRよりも早く2d/TEよりも遅い範囲にて信号強度が強くなる。
- PC (phase contrast) MRA
 - 2次元フーリエ変換のために傾斜磁場にて位相方向の情報が付 与されるとき、主として静脈程度の流れの成分が動くことで、周囲 組織と異なる位相の情報を持つことを利用して強調する方法。

「流れ」の画像化(分散と潅流)

- Perfusion(潅流)
 - 毛細血管系などの微小循環と組織間液とのやり取りを含めた抹消循環の評価に用いる。
 - 流入系・組織系・流出系の3コンパートメントモデルや、さらに複雑な モデルなどがある。
- Diffusion(分散)
 - 組織内構造(たとえば線維側)に沿った水分子の運動。ブラウン運動 など。
 - 脳脊髄神経系などでは分散の方向をテンソル(方向性を持った3次元 ベクトルのセット)にて追跡することで、線維束の方向を3次元的に表 示し、病態との関連性を見ることがある。
 - DWIBSと呼ばれる撮像法では動きに強く躯幹部の病変があたかも FDG-PETのように3Dで描出されるが、信号強度はT2値の影響があり、ADC (見かけの拡散係数,apparent diffusion coefficient)マップと 呼ばれる参照画像にて確認する必要がある。





0.0 0.6 0 1 2 3 4 5 6 7 8 8 30 11 12 * 10 11 . . . 5 . . 0.1 0.7 2 2 4 5 4 7 8 4 10 11 . 10 11 11 5 0.2 0.8 10 .11 4 5 4 0.3 0.9 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 * 10 II II 0.4 1.0 * * 10 11 13 4 9 20 11 0 1 2 1 4 5 4 0.5 1.1 0 1 3 3 4 5 6 7 8 4 10 11 13 0 1 8 2 4 5 6 7 8 9 10 11 13 ONDE LAND THE sec





チューブに水を流した場合のTOF MRA実験系 SE 200/60の場合 内径6mmのプラスチックチューブ使用

壁面に近いと流速が遅く、中心部で流速が早い。 全体の流速を段階的に早くした場合の、流れに対する同一横断面での信号強度の変化



拡散の基本



●定常拡散:拡散による濃度が時間に関して変わらない場合	
$J = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}$ Fickの第一法則	
J: 拡散束、単位時間当たりに単位面積を通過する、ある性質の量。	
D: 拡散係数	
任意の位置xにおける拡散束は濃度勾配に比例する。	
●非定常状態拡散:拡散における濃度が時間に関して変わる場合	
$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} Fick \mathcal{O}$ 第二法則	
初期条件と境界条件によって、幾つかの解がある。	

※第9.7版まで式の一部に誤りがありました。

- 相互拡散係数
 - 流体中である分子が他 種分子と位置を交換し ながら拡散する場合の 拡散係数



- 同種分子と位置を交換 しながら拡散する場合 の拡散係数
- ・ MRIでの水分子に相当
 - 位置情報を持った水分 子が、周囲の水分子に 混ざり込んでいく。



新潟大·歯·西山

Stejskal Tanner法※ 静止しているスピンに対するMPGパルスの影響①



** Stejskal EO, Tanner JE: Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence if a time dependent field gradient. J Chem Phys 42: 228-292, 1965.













理解しやすいように、180パルス印加前までは動かないとする。



理解しやすいように、180パルス印加前までは動かないとする。











b valueとみかけの拡散係数: ADC および信号強度との関係



DWIおよびADCのシミュレーション

- エクセルシート(ダウンロードファイル)
 - <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/grad/DWI-ADC/DWI-ADC-simulation-pub.xlsx</u>
- 上記エクセルシート内の黄色部分を変化させると、内部のグ ラフが変化します。
- 変化させる因子と変化するものとの関係を理解してください。



Mono-exponential、TRが無限大とみなしうる場合

$$SI = k \times PD \times e^{-TE/T2} \times e^{-b \cdot D}$$

ーつ前のスライドの S(0)

SI(信号強度)	縦軸
k(定数)	1
PD(プロトン密度)	1000
TE[msec]	100
T2[msec]	25~100
b[sec/mm²]	500~3000
D[x10 ⁻³ mm ² /sec]	横軸(0.0~3.0)



プロトン密度、TEを一定の値に固定し、仮想 組織のT2値を25~100までの範囲で想定し て、D値の変化によるSI(信号強度)の変化を プロットしたもの。







ただし、TRが無限大とみなしうる場合







拡散強調像:DWI

- - ・用いる画像:等方性拡散画像。
 - ・灌流の影響や異方性拡散の影響を極力排除するため、 b=1000s/mm²程度の強いMPGパルスをx,y,z軸の3 軸方向に印加し、合成(掛け合わせ、三乗根を取得)し た画像:S(b)=①静止スピン+②動くスピン
 - ・
 拡散が低いと高信号になる。
 ②
 - ・プロトンの量、T2の影響を受ける。①

IVIM

- IVIM (intravoxel incoherent motion)
 - ボクセル内で等方向性拡散
 - 水分子のランダムな動き(incoherent motion)
 - 10µm程度の動きが画像化されている。
 - ボクセルサイズが10µmよりも大きい。
 - 一定方向の動き(coherent motion)
 - 一つの毛細血管はボクセル内で一定方向を向く(coherent motion)が、複数の毛細血管が含まれるため、平均化されて、
 等方向性拡散と同等になる。このため、灌流(perfusion)の
 要因が含まれる。
 - b値を大きく(例えばMPGパルスを大きく)することで、灌流(perfusion)の影響を軽減可能。

みかけの拡散係数 三真の拡散係数+灌流の割合/b

- ADC \doteq D + (f/b)
 - みかけの拡散係数:ADC
 - Apparent Diffusion Coefficient
 - 真の(自己)拡散係数:D
 - 灌流している水分子の割合:f
- b valueが小さい場合、ADCは灌流の影響を受けて 大きな値を呈する。
- 灌流を含めてボクセル内は本質的に不均一であり、
 理想的な拡散とは異なる平均値となるため、「みかけの」となる。



- 青木茂樹、阿部 修、増谷佳孝 編集:「新版これでわかる拡散MRI」、秀潤社、2005年10月1日、第2版
- 荒木 カ:「拡散MRI」ブラウン運動、拡散テンソルから q空間へ、秀潤社、2006年8月31日、第1版
- NMRによる拡散測定と電解質のイオン拡散現象観測
 - ・早水紀久子:「PGSE-NMR 法による拡散現象測定の手引書 (第5版)」 <u>https://diffusion-nmr.jp/wordpress/wp-</u>

content/uploads/2020/01/Solution-PFG-NMR.pdf

 NMRによる拡散測定と電解質のイオン拡散現象観測 <u>https://diffusion-nmr.jp/</u>

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)
- 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ェ変換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)
- MRI応用自在・第4版、高原太郎(監修)、堀 正明、本杉宇太郎、高橋光 幸(編集)、Medical View、7,900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) <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min.pdf</u>
 - 補遺・任意断面の撮影・その1 --- 位置情報なければO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) <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3.pdf</u>
 - 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 <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p3-2.pdf</u>
 - 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 <u>https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/MRI-15-min-p4.pdf</u>