

基礎から臨床へ

画像解析の最前線

—MR 拡散テンソル画像と神経束抽出—

みなと	こ	た	ろう	さ	とう	てつ	お	さだ	とう	のり	ひろ
湊	小	太	郎	佐	藤	哲	大	定	藤	規	弘
			*1				*1				*2
よね	くら	よし	はる	かば	さわ	ひろ	ゆき				
米	倉	義	晴	栂	沢	宏	之				
			*3				*4				

Key Words

MRI
 拡散強調画像
 拡散テンソル
 神経繊維束
 不等方性

*1 奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター

*2 岡崎国立共同研究機構生理学研究所

*3 福井医科大学高エネルギー医学研究センター

*4 GE 横河メディカルシステム株式会社

はじめに

MRI 装置の技術的進歩によって、拡散強調テンソル画像が撮影できるようになってきた。拡散強調画像は水分子プロトンのランダムな熱運動（ブラウン運動）を画像化したもので、従来はスピンエコーパルス系列に Stejskal-Tanner の拡散強調勾配パルスを加えて撮像されていたが、時間がかかりモーションアーティファクトなどの問題で質の良い画像を得ることは難しかった¹⁾²⁾。

近年、EPI 装置の実用化によって、pulsed gradient spin-echo sequence with echo-planar readout とよばれる高速撮影が可能になり拡散強調 MR テンソル画像の撮影が一般化した。

拡散強調画像では、拡散が大きいと低信号、小さいと高信号になる。信号強度は拡散の程度、拡散強調磁場勾配パルスの強さと印加時間およびその方向に関係する。拡散強調磁気勾配の強さ、いわゆる b 値を順次変化して、各ボクセルごとに信号強度をプロットすると直線的な傾きが得られる。これが拡散係数に相当する。拡散は対称であると仮定すれば、勾配パルスと読み出し方向の組み合わせで、6 個の独立な拡散係数が得られる。これを対称な行列の形式に表現すれば、各ボクセルに 6 次元のパラメータをもった拡散テンソル画像が計測でき

る。

このテンソル行列は幾何学的には 3 次元空間の楕円体と考えることができる。すべての方向に均等に拡がる等方の拡散係数は球で表現される。拡散係数が大きければ大きな球、拡散が無ければ点となる。また、ある特定の方向に拡散係数が大きい場合は、細長い楕円体で表現できる。テンソル行列から固有値と固有ベクトルを計算し、主軸変換によって楕円体の主軸や扁平率を計算することができる。

生体内組織の構造に制約を受けなければ、拡散係数は本来等方性、すなわち真球体である。もしも不等方性が観察されれば、それは水分子の拡散スペースにおける何らかの組織構造を反映していると考えられる。

一般に脳内白質領域はミエリンのため T1 強調画像で明るくなるとされている。ミエリンは巨大蛋白で神経の軸索に沿って配列し、水分子にとっては壁のような構造物であると考えられる。したがって、神経軸索に平行な方向の拡散は障害を受けないが、壁と直行する方向には拡散が阻害され、拡散テンソルは不等方性を呈する。

従来 MR 拡散強調画像は臨床的には拡散係数の絶対的な大きさに注目して、脳梗塞などの早期診断に利用されてきた。この場合にはテンソル行列からトレース（対角成分の和）をスカ

ラー量として取り出し、楕円体の向きによらない相対的な大きさを示す指標として利用する。

逆に拡散テンソルの不等方性を抽出すれば、神経繊維束の走行を推定できる³⁾⁻⁹⁾。神経繊維束の構造が明らかになれば、脳内領域相互の連結性が予測でき、PET や fMRI による脳機能賦活試験結果のより厳密な検定が可能になると期待できる。

拡散テンソル画像

各ボクセルごとに6個の独立成分をもったMR 拡散テンソル画像から、拡散の不等方性を算出して脳内白質神経束の走行を強調抽出する。

拡散テンソルは正の実数成分からなる対称行列であるので、

$$\begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix}$$

と表現できる。拡散係数の独立な成分は、 D_{xx} , D_{xy} , D_{xz} , D_{yy} , D_{yz} , D_{zz} (mm^2/s) の6つである。この行列の固有値を大きい順に、 e_1 , e_2 および e_3 とし、その単位固有ベクトルをそれぞれ E_1 , E_2 および E_3 とすると、直交座標系 (E_1 , E_2 , E_3) における拡散テンソルは対角化され、

$$\begin{pmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{pmatrix}$$

となる (図1(a) 参照)。

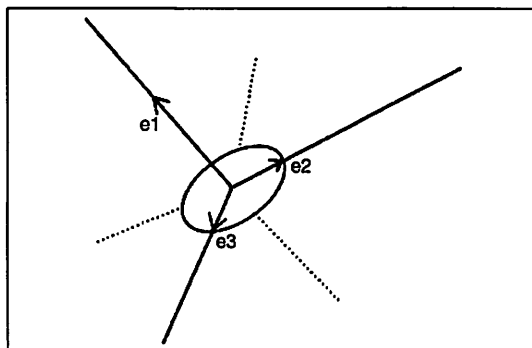


図1(a) 主軸変換

時刻 $t=0$ の瞬間に原点から拡散を始めた水分子の、 $t=T$ における状態を視覚的に表現すると図1(b)のような楕円体になる。拡散テンソル行列の固有値と固有ベクトルを決定すれば、拡散の不等方性を評価することができる。

しかし、6個の独立パラメータをもつボクセルを直接相互に比較することは困難で、何らかの意味で次元を低減して、1次元のスカラー指標で特徴量を表現することが必要となる。

神経繊維束を含むボクセルでは大きな不等方性があると期待できる。したがって、まず不等方性の指標を構成する。

FA (Fractional Anisotropy) とよばれるスカラー指標は、3つの固有値から下記の式で算出される³⁾。

$$FA = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{3} [(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2]}}{\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}}$$

すなわち FA は、固有値相互の差の大きさを規格化した無次元量で、拡散テンソル行列固有値分布の偏りを示す指標である。球状の拡散では $FA=0$ 、線状の拡散では $FA=1$ 、円盤状の拡散では $FA=0.7$ となる。

一般に FA は神経繊維束を強調できるとされるが、問題点として、ノイズが多いことといわゆるパーシャルボリューム効果による誤差の混入があげられている。

そもそも拡散テンソルの係数は高々十数回の

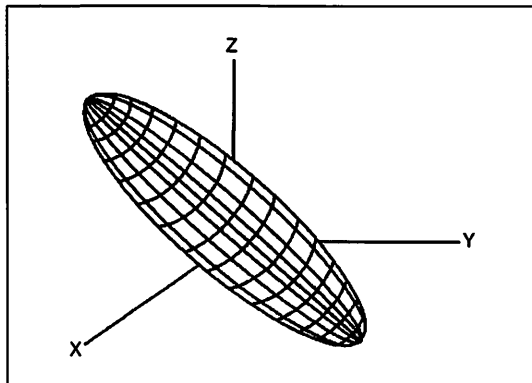


図1(b) テンソル楕円体

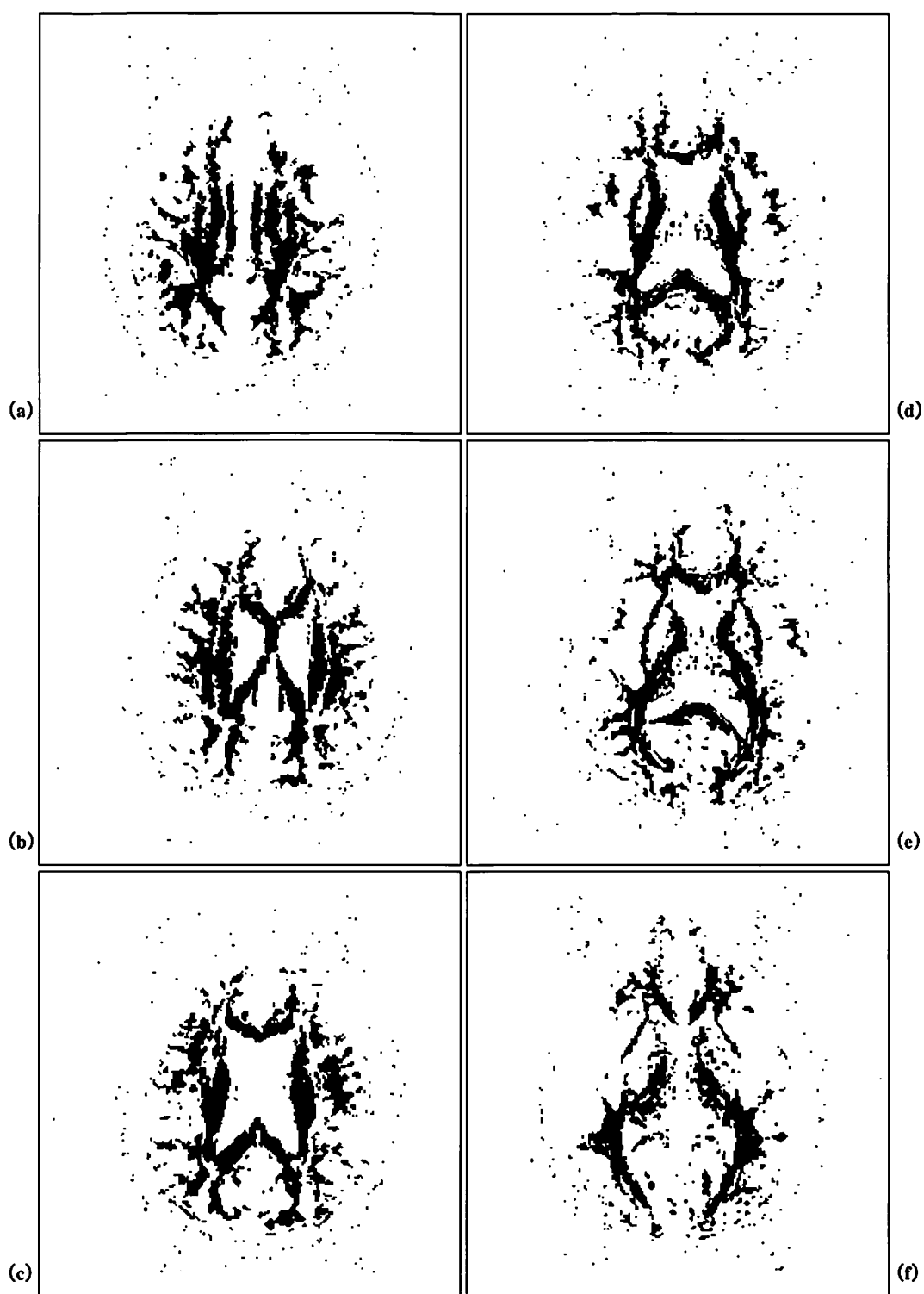


図 2

(a) (b) (c) (d) (e) (f) 神経繊維束強調抽出結果

測定によって得られた、「b 値」対「信号強度」グラフの点列から傾きを推定したもので、低信号領域ではノイズが混入する傾向がある。さらに、テンソル行列の対角化や、FA の計算では減算や除算が必要でノイズ成分が増幅されやすい。

一方、たとえば脳梁の境界部分のように脳脊髄液と白質領域の一部が同じ一つのボクセルに含まれると、擬似的に大きな不等方性が出現する。逆に、進行方向の異なる神経繊維束が交差する部分では、不等方性がうち消しあって見かけのうえでは等方拡散のボクセルが出現する場合もある。

画像解析処理手順と神経束抽出例

FA 画像におけるこのような曖昧さを軽減するために、固有値の絶対値と固有ベクトルの方向性を考慮して神経束を強調するための画像処理手法を以下に述べる。

まず、各ボクセルとその近傍のボクセル間で主軸（最大固有値の固有ベクトル）の内積を計算し、その総和が適当なしきい値を越えるボクセルの領域のみを取り出す。これは神経繊維束上にある隣り合うボクセルでは、拡散テンソル楕円体の主軸は同じ方向を向いているという仮定に基づいている。

つぎに、この領域内で FA が十分大きな部分

を取り出す。FA 値が大きく、かつ連続してつながっている領域は神経束である可能性が高い。

一方、最大固有値が平均値以上の領域を脳脊髄液と灰白質の部分と考え、この領域を 1 回膨張させてマスク画像を作成する。すなわち、白質の境界部分で灰白質や脳脊髄液が共存しているボクセルをマスクに取り込む。

最後に FA 画像とマスク画像の差をとって最終的な神経束画像とする。これによって、FA の孤立ノイズと領域境界で擬似的不等方性を示すボクセルを除去できる。

拡散テンソル画像データの取得には、GE SIGNA 1.5 T を用い、5 mm 厚の 18 スライス、1.875 mm、128×128 pixel の平面解像度で頭部を撮影した。画像は zero filling により 256×256 pixel に補間されている。反復時間 TR は 8,100 ms、エコー時間 TE は 106 ms である。エコープラナーリードアウトを伴ったこう配スピンエコーシーケンス（pulsed gradient spin-echo sequence with echo-planar readout）を利用し、最大 b 値は 860 (s/mm^2) とした。

図 2 は神経繊維束強調抽出結果の一例である。頭頂部から脳梁および視放射を含む断面まで 6 枚のスライスを示す。またこれらの画像を 3 次元表示した例を図 3 に示す。

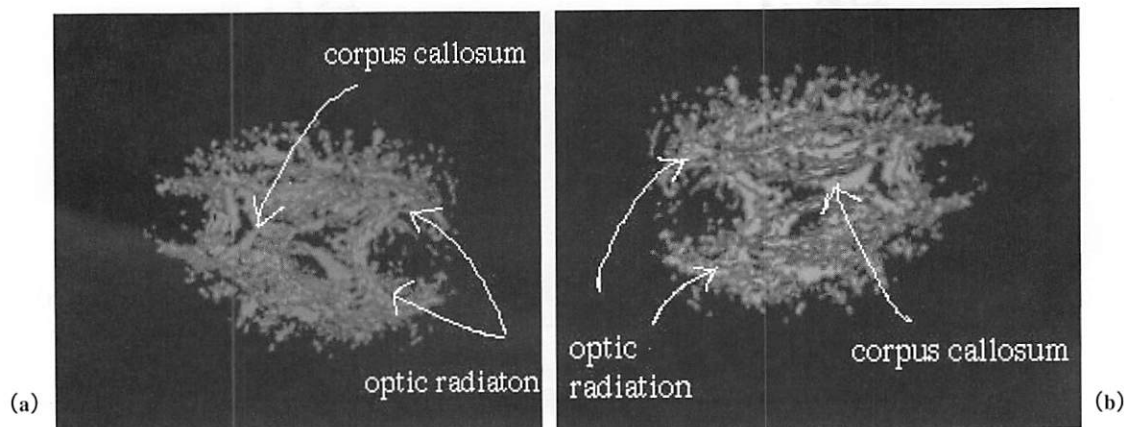


図 3

(a) (b) 3 次元表示

まとめ

拡散テンソル画像は水分子のランダム熱運動を反映している。ここではMR拡散テンソル画像から得られる複数の情報を組み合わせて脳内白質神経繊維束を強調抽出するための画像解析について述べた。拡散テンソル画像は多数のMR拡散強調画像を用いて算出した多次元画像であり、拡散テンソルの各成分は脳内白質における神経繊維束と拡散強調磁場勾配パルスの相対的な関係を反映する。従来から拡散強調画像は定性的に臨床応用されてきたが、このような画像解析によって、脳の構造と機能をin vivoで定量的に分析するための有力な手段になる可能性がある。

文献

- 1) Bihan D Le : Diffusion, perfusion and functional magnetic resonance imaging. Journal des Maladies Vasculaires 20 : 209-214, 1995
- 2) Stejskal EO, Tanner JE : Spin diffusion measurements- Spin echoes in the presence of a

time-dependent field gradient. J Chem Physiol 42 : 288-292, 1965

- 3) Basser PJ, Pierpaoli C : Microstructural and physiological features of tissues elucidated by quantitative- diffusion- tensor MRI, Journal of Magnetic Resonance, Series B 111, pp. 209-219, 1996
- 4) 中田 力 : 拡散テンソルと拡散強調画像—画像数学. 日磁医誌 15 (4) : 133-144, 1995
- 5) 紀ノ定保臣 : MR-Tractography—拡散強調画像および最大値投影法を用いた神経路抽出. 日本医学放射線学会雑誌 53 (2) : 171-179, 1993
- 6) Ito T et al. : Three-dimensional cerebral tractography. Jpn J Tomogr 24 (1, 2) : 11-17, 1998
- 7) Poupon C et al. : Regularization of MR diffusion tensor maps for tracking brain white matter bundles. Proc. of MICCAI '98, pp. 489-499, 1998
- 8) 佐藤哲大・他 : MR 拡散テンソル画像を用いた脳内白質神経束の描出. 電子情報通信学会論文誌 183-D-II (1) : 191-198, 2000

著者連絡先

(〒630-0101)
生駒市高山町
奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター
湊 小太郎
[E-mail : kotaro@itc.aist-nara.ac.jp]



重要度別ファイナルチェック 言語聴覚士試験 受験対策「実戦」講座

●梅田悦生 著 ●B 5 判・224頁・定価(本体3,800円+税)

特色

●国試出題基準準拠。膨大な内容をコンパクトにまとめ、各細目ごとに重要度別を区別。自己チェック欄、過去問全題、予想問題100題を付した類書にない特徴。



診断と治療社

〒100-0014 東京都千代田区永田町2-14-2 山王グランドビル4F
電話 03(3580)2770(営業) FAX 03(3580)2776
http://www.so-net.ne.jp/medipro/shindan/
E-mail : eigyobu1@coral.ocn.ne.jp

骨粗鬆症と食事

あんざい
安齋 ゆかり*

Key Words

骨粗鬆症
カルシウム
骨密度
ビタミンD
リン

* 東海大学医学部附属病院栄養科

はじめに

骨粗鬆症とは、骨量の減少および骨微細構造の恒常性の破綻により骨強度が低下し、骨折の危険性が高くなった状態をいう。高齢化社会を迎えた日本において高齢者の骨折は、寝たきりを余儀なくされ自立を妨げるばかりでなく、老人性痴呆を進行させるなど深刻な社会問題を引き起こしている。

骨粗鬆症を予防するには、若年期にできるだけ高い骨量を獲得し、閉経後および老年期における骨量減少を最小限に抑えることが重要である。そのため骨粗鬆症の食事指導は、ライフステージに沿って進めなければならない。

日本人とカルシウム摂取

日本人の食生活は飽食と呼ばれて久しい。平成10年国民栄養調査結果¹⁾でもほとんどの栄養素が所要量を上回っている。しかしその中で唯一カルシウム(Ca)だけが所要量を満たしていない。食事の欧米化とともに乳製品の摂取も増加し、昭和25年と比較すると、Ca摂取量も2倍に増加した。しかしそれでも所要量を充足できないということは、Caは日本人にとって食事からではかなり摂取困難な栄養素といえよう。

Caの摂取量を年代別にみると、図1に示すように男女とも10歳代後半から40歳代にかけて若い世代での不足が目立つが、50～60歳代では所要量を上回っており、骨粗鬆症予防を意識した積極的な摂取がうかがえる。一方70歳以上での減少は、食が細くなることに起因するものと推察される。このようにCaの摂取も年代により様々であり、ライフステージを考慮した食事管理が重要である。

ライフステージと食事管理

1. 思春期

この時期は第二次成長期であり、男女ともに身長が急速に伸び、骨密度も急上昇する。そのためCa所要量も700～900 mg/日と成人期と比べ強化されている。この時期の食生活の特徴としては、炭酸飲料や加工食品、インスタント食品への偏りがみられる。これらに含まれるリン(P)はCa代謝と関係が深く、過剰のPはCaの吸収障害を起こす。日本人が日常摂取するリン量は1,300 mg程度であり調理損失を考慮しても不足にはならず、リン酸塩として食品添加物に広く用いられている関係から摂取過多が問題視されている²⁾。

さらに女性においては体格の変化とともにやせ願望が出現しやすい時期でもあり、適正量を