

3T MR における脳拡散強調画像・拡散テンソル画像

青木 茂樹

順天堂大学医学部放射線医学講座

はじめに

拡散強調画像や拡散テンソル画像においては、そのコントラストは磁場強度に依存せず、定量可能なスカラー量も基本的には大きな変化はないとされている¹⁾。実際には、3T MRI では SNR 向上に伴う画質向上の恩恵を大きく受ける場所である。

拡散強調画像では 3T の高い SNR による梗塞の感度上昇²⁾や、high b value の有用性³⁾、薄いスライスによる 2D での volume data 取得と再構成の有用性⁴⁾、PROPELLER など EPI 以外の撮像法の有用性⁵⁾などが報告されている。

元から信号不足であった拡散テンソルも同様に、3T MRI により FA 値の皮髄コントラストが高くなるため、拡散テンソル tractography は描出能が向上するとされる^{6),7)}。SNR 向上による恩恵が大きい。拡散テンソルの最近の話題としては、臨床面では市販の術中ナビゲーションシステムへの拡散テンソル tractography の導入、研究面では特定の白質路を tractography で抽出しその定量的評価を行う手法 (tract-specific analysis)、交叉線維の問題を回避する probabilistic tractography、標準化を白質に適用した tract based special statistics⁸⁾ など種々の解析法の開発とその応用が挙げられる。

3T 拡散強調画像

拡散強調画像でも他の分野と同様に、3T の長

所は SNR 向上であり、短所は磁場強度上昇によるゆがみの増加となる。2005 年の急性期脳梗塞において 1.5T と比較した報告では視覚的な画質はゆがみのために 3T の方が低かったが、それでも SNR は 48.8%、CNR は 96.3% の上昇が見られたという²⁾。病変の検出能も 3T が高く、1.5T では 3T の 3/4 程度しか検出されなかった。

SNR 向上による余裕を high b value に用いた報告もある。3000 s/mm² 程度の high b value を用いると、悪性度の高い神経膠腫はより高信号となり、感度・特異度が上昇する³⁾。

SNR 向上を thin slice 取得にもちい、MPR を用いて冠状断や矢状断を作れば、ゆがみの少ない多方向拡散強調画像が得られるという報告もある⁴⁾ (Fig. 1)。

3T 拡散テンソル画像

拡散テンソル画像 (diffusion tensor imaging: DTI) に代表される拡散強調画像の詳細な解析は、水分子の拡散の方向と大きさを生体で定量的に評価することを初めて可能とした^{9),10)}。脳白質には白質線維の存在により拡散に方向性があり、白質線維の走行に沿った (平行な) 方向の拡散が速い。その方向を 3 次元的に追跡すれば、特定の白質路の可視化 (拡散 tractography) が可能となる^{11),12)}。

拡散テンソル tractography の臨床応用としては脳腫瘍¹³⁾ (Fig. 2) や脳梗塞¹⁴⁾、脳動静脈

キーワード MRI, diffusion, diffusion tensor, tractography, white matter

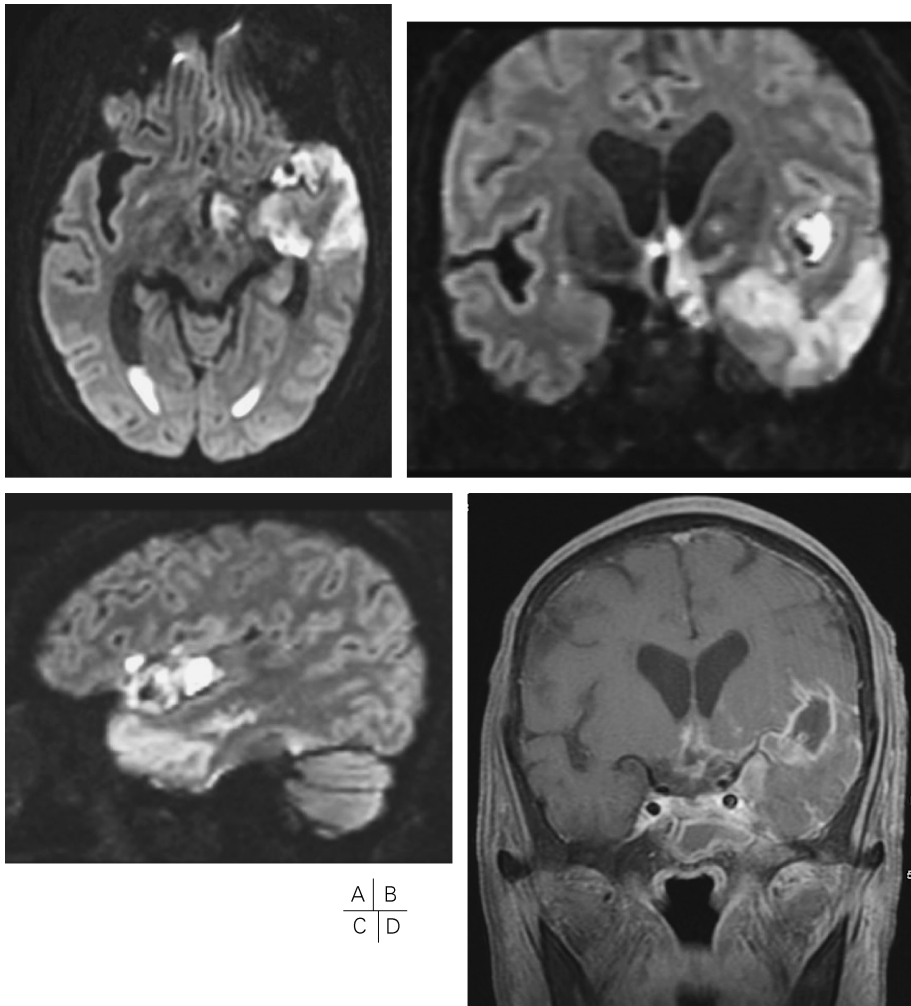


Fig. 1. MRP of diffusion weighted image : prulent meningitis, ventriculitis (66-year-old female)
MRP demonstration from 1.2 mm thin slice axial DWI (A-B) A : axial, B : coronal, C : sagittal
(TR/TE : 17000/62 ms, b = 1000 s/mm²), D : Coronal contrast enhanced T₁WI with fat saturation.

Debris in the suprasellar cistern, sylvian fissure and posterior horn of the lateral ventricle can be easily recognized. See minimal distortion on the coronal reconstruction.

奇形¹⁵⁾などの病巣と錐体路などの白質路との立体的関係を描出することからはじまり、現在では脳外科手術の術中ナビゲーションシステムに表示され電気刺激で白質路を確認しつつ手術

が行われるようになってきた。拡散テンソル画像はカラーマップや拡散テンソル tractography として白質路を3次元表示可能だけでなく、拡散異方性の定量的評価も可能で、tractog-

2008年8月11日受理

別刷請求先 〒113-8421 東京都文京区本郷 2-1-1 順天堂大学医学部放射線医学講座 青木茂樹

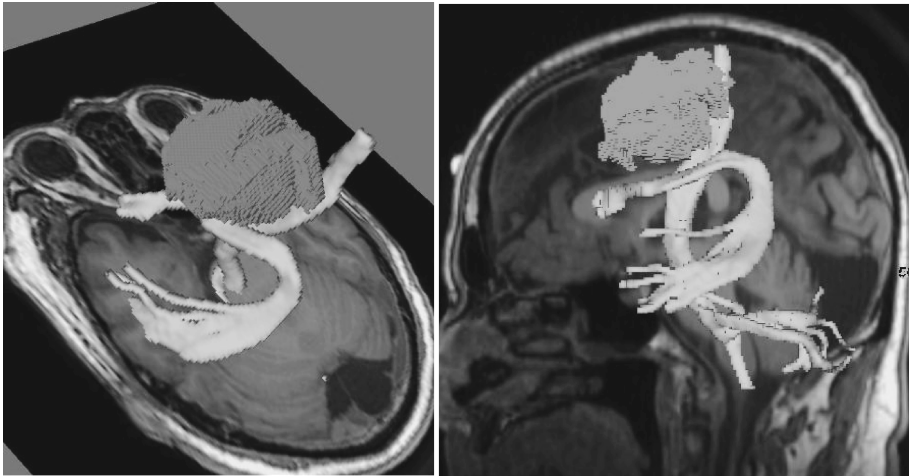


Fig. 2. Visualization of the diffusion tensor tractography (the pyramidal tract and arcuate fibers) and a brain tumor

FA_ Rt	Normal (60-69)	ADC Rt	Normal (60-69)	FA_ Lt	Normal (60-69)	ADC _Lt	Normal (60-69)
0.49	0.66 ± 0.06	0.94	0.72 ± 0.04	0.48	0.65 ± 0.08	0.85	0.74 ± 0.03
0.60	0.71 ± 0.05	0.83	0.71 ± 0.03	0.64	0.69 ± 0.07	0.83	0.73 ± 0.04
0.57	0.60 ± 0.06	0.79	0.72 ± 0.04	0.51	0.60 ± 0.09	0.79	0.73 ± 0.05

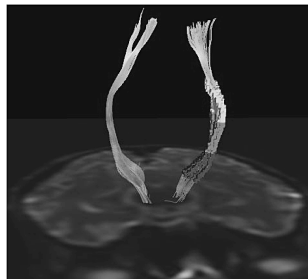


Fig. 3. Tract-specific analysis of the pyramidal tract
Quantitative diffusion tensor parameters (FA and ADC) of the normal database and a patient with ALS (age 60-69).

graphy で抽出された白質路を定量的に評価することも行われる。tract specific analysis, tract of interest などと呼ばれる。例えば、ALS の錐体路¹⁶⁾ (Fig. 3), Alzheimer 病の帯状束や鈎状束での異常¹⁷⁾が示されている。Neuroscience

分野では、FSL (FMRIB) の tract based spatial statistics を用いた解析の報告が最近増えている⁸⁾。

3T では拡散テンソルは 3 mm 厚、13 軸で、3 分ほどで全脳のスキャンが可能となり、ルー

チンに撮像可能となる。多少時間を掛ければ FA を元にした画像統計解析 (tract-based spatial statistics などと呼ばれる) が容易に可能となり、拡散テンソル tractography で特定の白質路を抽出して定量的に評価する解析法 (tract specific analysis, tract-of-interest などと呼ばれる), で正常値と比べた検証が可能となる。

PROPELLER (BLADE) はテンソルに限らず拡散強調像と組み合わせることによりゆがみのない画像が得られるため、後頭蓋窩や頭蓋底での臨床応用が期待されてきた。1.5T では、SNR が不足しており、撮像時間が長く、かつゆがみ以外のアーチファクトが目立つことなどにより、それほど用いられていなかった。3T では SNR が向上し、頭蓋底での磁化率アーチファクトが目立つことからその有用性は増す。脳神経などへの応用の報告もある⁵⁾。

ADC, FA などの定量値を用いた腫瘍自体や

腫瘍周囲の解析の報告も多い。腫瘍周囲の T₂ 強調像や FLAIR の高信号域、いわゆる“浮腫”への悪性腫瘍の浸潤については、Lu らは tumor infiltration index を用いると、髄膜腫による血管性浮腫と悪性グリオーマによる浸潤 (の加わった浮腫) とが区別できる可能性を示した¹⁸⁾。生検での腫瘍の病理学的示標と ADC や FA との相関を術中ナビゲーションシステムとの registration を用いて正確に行った報告では、FA でよりよい相関がみられたという¹⁹⁾。拡散テンソル解析で腫瘍周囲の白質の構造が残されているかどうかを判定したり、腫瘍の内部の不均一性 (とそれに関連すると思われる悪性度) を判定したりすることができると思われることから多くの報告がなされているが、難しい点も多いようである。腫瘍内や周囲の拡散テンソルでは ellipsoid の並びと変形などに関する興味深い動物実験もある²⁰⁾。

腫瘍や梗塞などの病巣と特定の白質路との立

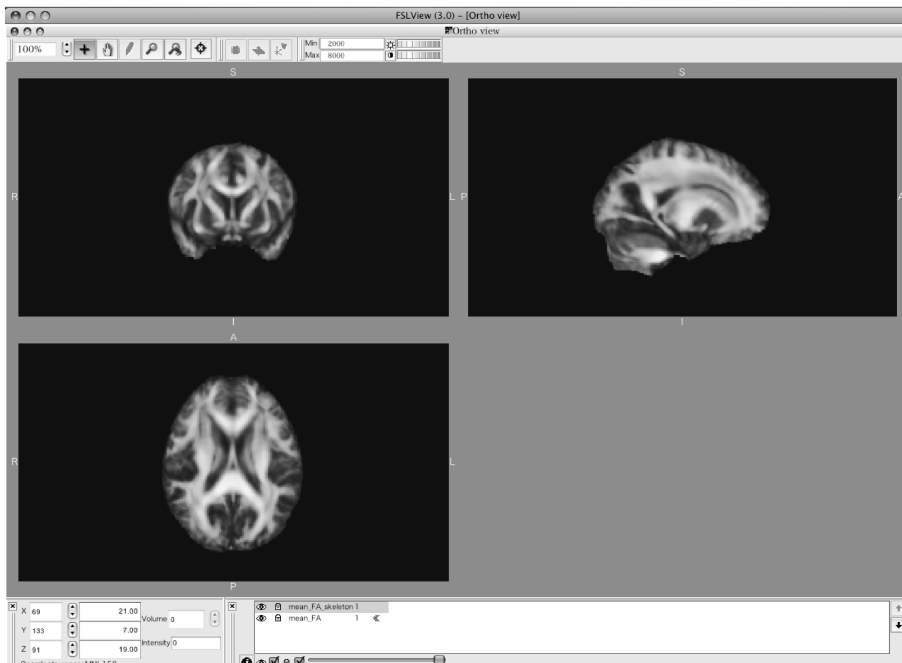


Fig. 4. Tract-based spatial statistics using FSL (skeleton display of FA)

体的関係といった臨床応用に加えて、脳科学の分野でも拡散テンソル解析の応用は進んでいる。その分野では Oxford 大学の FSL (FMRIB software library) を用いた報告が多くなっている (<http://www.fmrib.ox.ac.uk/fsl/fsl/list.html>)⁸⁾ (Fig. 4)。標準脳を用いた ROI とりと拡散 tractography の作成、定量評価など 2 年ほど前までなら熟練した者がいくつかのソフトを組み合わせてやっとな解析がかなり簡単に可能となる。ただし、広く臨床応用するには、30 軸（推奨は 60 軸以上）の多軸の撮像が必要なこと、解析に通常のパソコンでは数日掛かる部分があることなど、まだ克服すべき部分も多い。腫瘍や梗塞など通常の臨床では従来の DTI, neuroscience research には FSL という流れになるとと思われる。

ま と め

3T における拡散強調画像・拡散テンソル画像の有用性について解説した。コントラストの大きな変化はないが、SNR 向上は慢性の信号不足であったこの分野の画質向上に役立ち、応用分野が広がったと考えられる。

文 献

- 1) Alvarez-Linera J: 3T MRI: advances in brain imaging. *Eur J Radiol* 2008 May 1. [Epub ahead of print]
- 2) Kuhl CK, Textor J, Gieseke J, et al.: Acute and subacute ischemic stroke at high-field-strength (3.0T) diffusion-weighted MR imaging: intraindividual comparative study. *Radiology* 2005; 234: 509-516
- 3) Seo HS, Chang KH, Na DG, et al.: High b-value diffusion ($b = 3000 \text{ s/mm}^2$) MR imaging in cerebral gliomas at 3T: visual and quantitative comparisons with $b = 1000 \text{ s/mm}^2$. *AJNR Am J Neuroradiol* 2008; 29: 458-463
- 4) Fujiwara S, Sasaki M, Kanbara Y, et al.: Improved geometric distortion in coronal diffusion-weighted and diffusion tensor imaging using a whole-brain isotropic-voxel acquisition technique at 3 Tesla. *Magn Reson Med Sci* 2007; 6: 127-132
- 5) Nakada T, Matsuzawa H, Fujii Y, et al.: Three-dimensional anisotropy contrast periodically rotated overlapping parallel lines with enhanced reconstruction (3DAC PROPELLER) on a 3.0 T system: a new modality for routine clinical neuroimaging. *J Neuroimaging* 2006; 16: 206-211
- 6) Fushimi Y, Miki Y, Okada T, et al.: Fractional anisotropy and mean diffusivity: comparison between 3.0-T and 1.5-T diffusion tensor imaging with parallel imaging using histogram and region of interest analysis. *NMR Biomed* 2007; 20: 743-748
- 7) Okada T, Miki Y, Fushimi Y, et al.: Diffusion-tensor fiber tractography: intraindividual comparison of 3.0-T and 1.5-T MR imaging. *Radiology* 2006; 238: 668-678
- 8) Smith SM, Jenkinson M, Johansen-Berg H, et al.: Tract-based spatial statistics: voxelwise analysis of multi-subject diffusion data. *Neuroimage* 2006; 31: 1487-1505
- 9) Basser PJ, Mattiello J, LeBihan D: Estimation of the effective self-diffusion tensor from the NMR spin echo. *J Magn Reson B* 1994; 103: 247-254
- 10) Mori S, Zhang J: Principles of diffusion tensor imaging and its applications to basic neuroscience research. *Neuron* 2006; 51: 527-539
- 11) Mori S, Crain BJ, Chacko VP, et al.: Three dimensional tracking of axonal projections in the brain by magnetic resonance imaging. *Ann Neurol* 1999; 45: 265-269
- 12) Masutani Y, Aoki S, Abe O, Hayashi N, Ohtomo K: MR diffusion tensor imaging: recent advance and new techniques for diffusion tensor visualization. *Eur J Radiol* 2003; 46: 53-66
- 13) Yamada K, Kizu O, Mori S, et al.: Brain fiber tracking with clinically feasible diffusion-tensor MR imaging: initial experience. *Radiology* 2003; 227: 295-301
- 14) Kunimatsu A, Aoki S, Masutani Y, Abe O, Mori H, Ohtomo K: Three-dimensional white matter tractography by diffusion tensor imaging in ischaemic stroke involving the corticospinal

- tract. *Neuroradiology* 2003 ; 45 : 532-535
- 15) Yamada K, Kizu O, Ito H, et al. : Tractography for arteriovenous malformations near the sensorimotor cortices. *AJNR Am J Neuroradiol* 2005 ; 26 : 598-602
- 16) Aoki S, Iwata N, Masutani Y, et al. : Quantitative evaluation of the pyramidal tract segmented by diffusion tensor tractography : feasibility study of the patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Radiat Med* 2005 ; 23 : 195-199
- 17) Taoka T, Iwasaki S, Sakamoto M, et al. : Diffusion anisotropy and diffusivity of white matter tracts within the temporal stem in Alzheimer disease : evaluation of the "tract of interest" by diffusion tensor tractography. *AJNR Am J Neuroradiol* 2006 ; 27 : 1040-1045
- 18) Lu S, Ahn D, Johnson G, et al. : Diffusion-tensor MR imaging of intracranial neoplasia and associated peritumoral edema : introduction of the tumor infiltration index. *Radiology* 2004 ; 232 : 221-228
- 19) Stadlbauer A, Ganslandt O, Buslei R, et al. : Gliomas : histopathologic evaluation of changes in directionality and magnitude of water diffusion at diffusion-tensor MR imaging. *Radiology* 2006 ; 240 : 803-810
- 20) Zhang J, van Zijl PC, Laterra J, et al. : Unique patterns of diffusion directionality in rat brain tumors revealed by high-resolution diffusion tensor MRI. *Magn Reson Med* 2007 ; 58 : 454-462

Diffusion-weighted and Diffusion Tensor Imaging of the Brain at 3T

Shigeki AOKI

*Department of Radiology, Juntendo University
2-1-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8421*

At 3 tesla, increased signal-to-noise ratio (SNR) has improved imaging quality of diffusion-weighted and diffusion tensor imaging, though susceptibility effect increases. We can use higher b-value and thinner slice. At 3T, diffusion tensor images can be performed routinely.