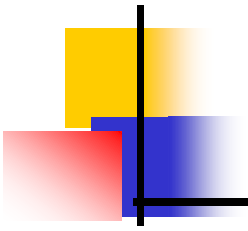

脳活動イメージング
~3Tで何が変わるか~

ATR脳活動イメージングセンタ
河内山隆紀

Contents

- 静磁場の3T化による

1. 画像S/N比（Signal to noise ratio）への影響
2. BOLD信号への影響
3. ノイズへの影響

- 高磁場MRIでの注意点
- 1.5Tと3.0Tでの脳活動イメージング比較研究

※口頭発表中参照しました図表は原論文をご参考ください

画像S/N比への影響

- 画像S/N比の向上
  - 物質中のスピンが作り出す磁化: $M_0 \propto N_\uparrow - N_\downarrow = N\frac{\hbar\gamma B_0}{kT}$
  - 横磁化の運動（ω_0）により誘導起電力: $LarmorFreq. = \omega_0 = \gamma B_0$
  - MR信号: $Signal \propto \omega_0 M_0 \propto B_0^{\ 2}$
  - ノイズ: $Noise = \sqrt{\sigma_{thamal+system} + \sigma_{physiological}} \propto \sqrt{aB_0^{\ 1/2} + bB_0^{\ 2}}$
  - SNR: $SNR = \propto \frac{B_0^{\ 2}}{\sqrt{aB_0^{\ 1/2} + bB_0^{\ 2}}} \propto B_0 \ at \ high \ field$
  - 1.5Tから3.0TでSNRは2倍に向上

⇒より頑健なデータ

BOLD信号への影響

- 高磁場では、よりcapillary bedの信号を反映
  （Ugurbil, 1993; Menon, 1993; Menon, 1995; Gati, 1997）
  - 静磁場強度と脳血管系からの信号の関係（Gati, 1997）
  - Small vesselとcapillaryに対して線形以上に変化
  - Large vesselに対しては、線形以下の変化
- BOLD-contrast to noise ratioは 3.0Tで大きい
  - BOLD-CNRは組織に依存する(Kruger, 2001)
  - 信号強度が高い（かつ活動サイズが小さい：比較的大きな静脈）領域に比べ、脳活動領域での$CNR_{3.0T}$ / $CNR_{1.5T}$が高い

⇒空間的特異度も向上

ノイズへの影響

- 生理学的ノイズの増加
  - 生理学的ノイズが全ノイズに占める割合は3.0T>1.5T
    （Kruger, 2001）
- 時系列自己相関への影響
  - 高磁場MRI装置での時系列自己相関は上昇(c.f. Friedman, 2006)
  - 単純なモデルでは対応できない複雑な構造(Bullmore, 2001)
  - ただし、装置メーカにも依存
- その他のノイズ（一般的に3.0T>1.5T）への影響
  - Head motionに伴う信号
  - 心拍・呼吸などの体動
  - Low frequency noise（1/F, vasomotion, etc）

高磁場MRIでの注意点

- 磁化率アーチファクト（Susceptibility artifacts）
  - 高磁場MRIで大きい
  - 関心領域によっては画像のゆがみ・信号低下の影響を受ける
    - 側頭極・扁桃体・前頭眼窩野
    - 3.0T 12%低下、1.5T　9%低下（扁桃体近傍）（Krasnow, 2003）
  - 撮像方法の工夫、技術開発が勢力的に行なわれている
    - Z-shimming（Glover, 1999）,Spiral sequence（Glover, 2001）, RF pulse の工夫（Chen, 1999; Stenger, 2002）, voxel size/slice orientaion（Chen, 2003）, Other correction methods （Jezzard, 1995; Reber, 1998; Chen, 1999; Zeng, 2004; Andersson, 2001）

- Acoustic noise
  - 高磁場装置では一般的に大きい（15dB 増加）（Ravicz, 2000; 2001）
  - ただし3.0T MRIが常に劣るとはいえない（撮像方法の工夫、技術進歩）

高磁場MRIでの脳活動イメージング

- 高磁場MRI（3.0-4.0T）での研究
  - 指の体部位再現（Maldjian, 1998）
  - 眼球優位性コラム（Cheng, 2001; Menon, 1997）
  - 外側膝状体のレチノトピ（Chen, 1999）
- 1.5Tと3.0-4.0T MRI装置での脳活動比較研究
  - Visual activation（Gati, 1997; Kruger, 2001; Turner, 1993; Lu, 2005）
  - Motor activation（Yang, 1999; Kruger, 2001; Fera, 2004）
  - Cognitive task （Krasnow, 2003；Hoening, 2005）

まとめ~1.5Tと3.0Tとの比較~

静磁場強度	1.5T	3.0T
SNR	−	+
CNR	−	+
White/Gray matter CNR	+	−
活動領域	−	+
活動強度	−	+
解像度	−	+
画像収集時間	−	+
磁化率アーチファクト	+	−
ケミカル・シフト	+	−
比吸収率(SAR)	+	−
騒音	+	−

※1Voss, 2006を参考に作成

※2一般的傾向・実際は、メーカ依存性あり・また、改善の努力がなされている

参考文献1

1. Andersson JL, Hutton C, Ashburner J, Turner R, Friston K (2001) Modeling geometric deformations in EPI time series. Neuroimage 13:903-919.
2. Bullmore E, Long C, Suckling J, Fadili J, Calvert G, Zelaya F, Carpenter TA, Brammer M (2001) Colored noise and computational inference in neurophysiological (fMRI) time series analysis: resampling methods in time and wavelet domains. Hum Brain Mapp 12:61-78.
3. Chen NK, Wyrwicz AM (1999) Correction for EPI distortions using multi-echo gradient-echo imaging. Magn Reson Med 41:1206-1213.
4. Chen N, Wyrwicz AM (1999) Removal of intravoxel dephasing artifact in gradient-echo images using a field-map based RF refocusing technique. Magn Reson Med 42:807-812.
5. Chen W, Zhu XH, Thulborn KR, Ugurbil K (1999) Retinotopic mapping of lateral geniculate nucleus in humans using functional magnetic resonance imaging. Proc Natl Acad Sci U S A 96:2430-2434.
6. Chen NK, Dickey CC, Yoo SS, Guttmann CR, Panych LP (2003) Selection of voxel size and slice orientation for fMRI in the presence of susceptibility field gradients: application to imaging of the amygdala. Neuroimage 19:817-825.
7. Cheng K, Waggoner RA, Tanaka K (2001) Human ocular dominance columns as revealed by high-field functional magnetic resonance imaging. Neuron 32:359-374.
8. Friedman L, Glover GH (2006) Reducing interscanner variability of activation in a multicenter fMRI study: controlling for signal-to-fluctuation-noise-ratio (SFNR) differences. Neuroimage 33:471-481.
9. Gati JS, Menon RS, Ugurbil K, Rutt BK (1997) Experimental determination of the BOLD field strength dependence in vessels and tissue. Magn Reson Med 38:296-302.
10. Glover GH (1999) 3D z-shim method for reduction of susceptibility effects in BOLD fMRI. Magn Reson Med 42:290-299.
11. Glover GH, Law CS (2001) Spiral-in/out BOLD fMRI for increased SNR and reduced susceptibility artifacts. Magn Reson Med 46:515-522.
12. Hoenig K, Kuhl CK, Scheef L (2005) Functional 3.0-T MR assessment of higher cognitive function: are there advantages over 1.5-T imaging? Radiology 234:860-868.
13. Jezzard P, Balaban RS (1995) Correction for geometric distortion in echo planar images from B0 field variations. Magn Reson Med 34:65-73.

参考文献2

14. Krasnow B, Tamm L, Greicius MD, Yang TT, Glover GH, Reiss AL, Menon V (2003) Comparison of fMRI activation at 3 and 1.5 T during perceptual, cognitive, and affective processing. Neuroimage 18:813-826.
15. Kruger G, Kastrup A, Glover GH (2001) Neuroimaging at 1.5 T and 3.0 T: comparison of oxygenation-sensitive magnetic resonance imaging. Magn Reson Med 45:595-604.
16. Maldjian JA, Gottschalk A, Patel RS, Detre JA, Alsop DC (1999) The sensory somatotopic map of the human hand demonstrated at 4 Tesla. Neuroimage 10:55-62.
17. Menon RS, Ogawa S, Tank DW, Ugurbil K (1993) Tesla gradient recalled echo characteristics of photic stimulation-induced signal changes in the human primary visual cortex. Magn Reson Med 30:380-386.
18. Menon RS, Ogawa S, Hu X, Strupp JP, Anderson P, Ugurbil K (1995) BOLD based functional MRI at 4 Tesla includes a capillary bed contribution: echo-planar imaging correlates with previous optical imaging using intrinsic signals. Magn Reson Med 33:453-459.
19. Menon RS, Ogawa S, Strupp JP, Ugurbil K (1997) Ocular dominance in human V1 demonstrated by functional magnetic resonance imaging. J Neurophysiol 77:2780-2787.
20. Ravicz ME, Melcher JR, Kiang NY (2000) Acoustic noise during functional magnetic resonance imaging. J Acoust Soc Am 108:1683-1696.
21. Ravicz ME, Melcher JR (2001) Isolating the auditory system from acoustic noise during functional magnetic resonance imaging: examination of noise conduction through the ear canal, head, and body. J Acoust Soc Am 109:216-231.
22. Reber PJ, Wong EC, Buxton RB, Frank LR (1998) Correction of off resonance-related distortion in echo-planar imaging using EPI-based field maps. Magn Reson Med 39:328-330.
23. Stenger VA, Boada FE, Noll DC (2002) Multishot 3D slice-select tailored RF pulses for MRI. Magn Reson Med 48:157-165.
24. Turner R, Jezzard P, Wen H, Kwong KK, Le Bihan D, Zeffiro T, Balaban RS (1993) Functional mapping of the human visual cortex at 4 and 1.5 tesla using deoxygenation contrast EPI. Magn Reson Med 29:277-279.
25. Ugurbil K, Garwood M, Ellermann J, Hendrich K, Hinke R, Hu X, Kim SG, Menon R, Merkle H, Ogawa S, et al. (1993) Imaging at high magnetic fields: initial experiences at 4 T. Magn Reson Q 9:259-277.
26. Voss HU, Zevin JD, McCandliss BD (2006) Functional MR imaging at 3.0 T versus 1.5 T: a practical review. Neuroimaging Clin N Am 16:285-297, x.
27. Yang Y, Wen H, Mattay VS, Balaban RS, Frank JA, Duyn JH (1999) Comparison of 3D BOLD functional MRI with spiral acquisition at 1.5 and 4.0 T. Neuroimage 9:446-451.
28. Zeng H, Gatenby JC, Zhao Y, Gore JC (2004) New approach for correcting distortions in echo planar imaging. Magn Reson Med 52:1373-1378.