

毛細血管内赤血球によるマイクロ磁場歪み —賦活領域における顕著な変化— [大会長賞記録]

土田 修¹, 山本 徹²

¹医療法人禎心会病院放射線部 ²北海道大学医学部保健学科医用理工学講座

はじめに

赤血球と血漿の磁化率の違いにより赤血球周囲の磁場がゆがむ。その影響は赤血球が離散的に流れる毛細血管において顕著となり、安静時緩和時間が 20 ms 程度の速い横緩和として現れる¹⁾。本研究では、脳神経の賦活によりこの速い横緩和がどのように変化するかを調べることを目的とした。

方 法

健康成人男性ボランティアを対象に、GE 社製 SIGNA-LX 1.5T ver. 8.3 で、安静時および光刺激 (8 Hz チェッカーフラッグ) 時にそれぞれ一次視覚野を含む axial 像を multiple spin echo 法 (TR=600 ms, TE=16, 32, 48, 64 ms, matrix size=256×128, FOV=480 mm, slice thickness=5 mm, NEX=1) を用い撮像した。光刺激は 1 分 25 秒の撮像時間中行った。それぞれの TE の画像について、刺激時と安静時の画像の差分画像を求め、刺激時に 5 ボクセル以上連結して信号強度が 2.5% 以上増加した領域を賦活領域として描出した。また、同一光刺激による BOLD コントラスト賦活領域と比較するため、刺激・安静時間各 16 秒のブロックデザインタスクパラダイムを用い gradient echo EPI 法 (TR=4000 ms, TE=60 ms, matrix size=64×64, FOV=260 mm, slice

thickness=5 mm) により撮像し、GE 社製画像処理ソフトウェア functool を用いて賦活領域 ($P<0.001$) を描出した。

結 果

TE=16 ms の画像での賦活部位 (Fig. 1a) は皮質部位に限局されていたが、TE=64 ms の画像での賦活部位 (Fig. 1b) は脳溝を含み、かつ白質部位にも広がっていた。BOLD コントラスト賦活領域 (Fig. 1c) は、TE=64 ms の画像での賦活部位との相関性が高かった。また、左一次視覚野の一部において TE=16, 64 ms の両画像に共通な賦活領域が描出され、そこでの信号強度変化率 ($\Delta S/S$) は、TE=16 ms の画像で 4.7%、TE=64 ms の画像で 2.5% であった。なお、Fig. 1 では位相方向に現れた静脈洞からのアーチファクトは除いた。

考 察

安静時の赤血球周囲の磁場による速い緩和時間は 20 ms 程度である¹⁾ので、賦活による速い緩和の変化は TE=16 ms の画像に表れ、TE=64 ms の画像ではそれ以外の遅い緩和の変化が表れる。 R_{2f} を速い横緩和率、 R_{2s} を遅い横緩和率とすると画像信号強度 (S) は次式で表される。

キーワード fMRI, transverse relaxation, capillary, red blood cell, neuronal activation

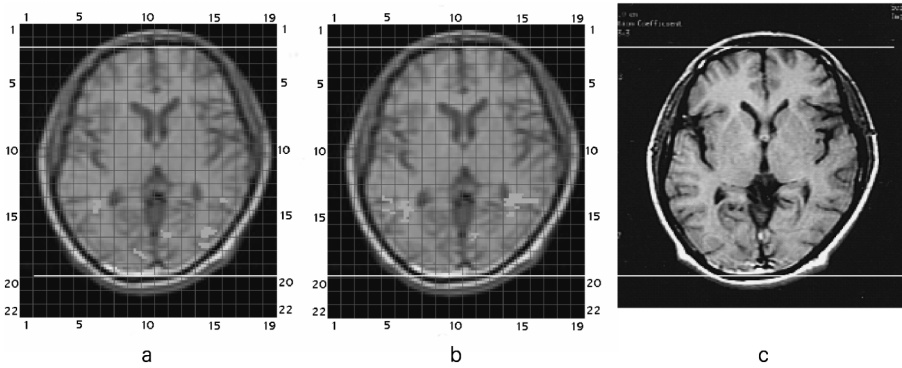


Fig. 1. Activation during checker-flag light stimulation
 (a) Fast-relaxation mapping obtained from spin echo images with a shorter echo time (16 ms).
 (b) Slow-relaxation mapping obtained from spin echo images with a longer echo time (64 ms).
 (c) BOLD mapping obtained from gradient-echo EPI.

$$S = S_0 \{ f e^{-R_{2f} \cdot TE} + (1-f) \} e^{-R_{2s} \cdot TE} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S_0 は定数で f は速い緩和を示すプロトンのボクセル内比率である。

$R_{2f} \gg R_{2s}$ なので、 $e^{-R_{2f} \cdot TE} \approx 0$ とみなせるような長い TE のとき

$$S \approx S_0 (1-f) e^{-R_{2s} \cdot TE} \dots\dots\dots (2)$$

となり、 $\Delta S/S$ が次式のように求まる。

$$\Delta S/S = -\Delta R_{2s} \cdot TE \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 ΔR_{2s} は遅い横緩和率変化である。したがって、長い TE (64 ms) の画像での信号強度変化率 $\Delta S/S$ は、賦活による遅い緩和の変化を反映している。TE=64 ms の画像の左一次視覚野賦活領域の $\Delta S/S=2.5\%$ を (3) に代入すると、 $\Delta R_{2s}=0.39$ が算出された。

一方、TE が短いときは、 $e^{-R_{2s} \cdot TE} \approx 1 - R_{2s} \cdot TE$ 、 $e^{-R_{2f} \cdot TE} \approx 1 - R_{2f} \cdot TE$ とみなせるので、(1)は

$$S \approx S_0 \{ 1 - (fR_{2f} + R_{2s}) \cdot TE \} \dots\dots\dots (4)$$

と書け、 $\Delta S/S$ が次式のように求まる。

$$\Delta S/S = -(f\Delta R_{2f} + \Delta R_{2s}) \cdot TE \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 ΔR_{2f} は速い横緩和率変化である。したがって、短い TE (16 ms) の画像での信号強度変化率 $\Delta S/S$ には、賦活による速い緩和の変化が表れる。左一次視覚野の TE=16 ms の画像の賦活領域の $\Delta S/S=4.7\%$ 、大脳皮質の f の値 (0.19)²⁾ および上で求めた $\Delta R_{2s}=0.39$ を (5) に代入すると、 $\Delta R_{2f}=13.4$ が算出された。

横緩和率は磁場ゆがみの影響を含み、次の式で表される³⁾。

$$R_{2f} = \frac{\gamma^2 \cdot D \cdot TE^2}{12} \cdot (\nabla B_f)^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$R_{2s} = \frac{1}{T_{2int}} + \frac{\gamma^2 \cdot D \cdot TE^2}{12} \cdot (\nabla B_s)^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 γ は磁気回転比、 D は水の拡散係数、 T_{2int} は水の拡散効果を含まない横緩和時間であり、単位長さあたりの磁場変化 ∇B_f は毛細血管近傍の磁場ゆがみを、 ∇B_s は主に排出静脈による磁場ゆがみを表す。(6)、(7) より R_{2f} 、 R_{2s} の変化量比を求めると

$$\frac{\Delta R_{2f}}{\Delta R_{2s}} = \frac{\Delta(\nabla B_f)^2}{\Delta(\nabla B_s)^2} \dots\dots\dots (9)$$

となり、上で求めた値より $\Delta R_{2f}/\Delta R_{2s} = 13.4/0.39$ であるので、 $\Delta(\nabla B_f)^2/\Delta(\nabla B_s)^2 = 34.4$ と求まる。このことから、毛細血管近傍の磁場ゆがみ ∇B_f は、排出静脈による磁場ゆがみ ∇B_s よりも賦活により大きく変化し均一化するものと解釈できる。

赤血球の酸素飽和度に応じ変化する毛細血管におけるマイクロ磁場ゆがみ ∇B_f は、神経細胞の酸素消費を反映する。したがって、この ∇B_f 変化に敏感な短い TE による画像には、神経細胞の酸素消費変化が表れ賦活焦点が正しく描出されるものと考えられる。

結 論

赤血球によるマイクロ磁場ゆがみが賦活により顕著に変化することが確認され、その変化を敏感に反映する短い TE の画像により賦活焦点が描出される可能性が示唆された。

文 献

- 1) 土田 修, 山本 徹, 黄田育宏: 皮質の速い緩和. 日磁医誌 2006; 26(suppl): 161
- 2) Papanikolaou N, Maniatis V, Pappas J, Roussakis A, Efthimiadou R, Andreou J: Biexponential T2 relaxation time analysis of the brain: correlation with magnetization transfer ratio. Invest Radiol 2002; 37: 363-367
- 3) Carr HY, Purcell EM: Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments. Phys Rev 1954; 94: 630-639

Field Distortion Caused by Intracapillary Red Blood Cells in the Activated Area [Presidential Award Proceedings]

Osamu TSUCHIDA¹, Toru YAMAMOTO²

¹*Department of Radiology, Teishinkai Hospital
1-6, North44, East8, Higashi-ku, Sapporo 007-0844*

²*Department of Health Sciences, School of Medicine, Hokkaido University*

Each red blood cell (RBC) that discretely flows through a capillary distorts the magnetic field of magnetic resonance (MR) imaging. This distortion spreads over a micrometer range around the RBC and moves along the capillary, causing fast transverse relaxation. To investigate the changes in this fast transverse relaxation that occur by brain activation, we performed spin-echo imaging of a male volunteer with multiple echo times using a 1.5T MR scanner during rest and during visual stimulation with a checker-flag pattern reversing at 8 Hz. We then identified the activated areas by subtracting an image obtained during rest from one obtained during stimulation for each echo time. Blood oxygenation level-dependent (BOLD) contrast functional MR imaging (fMRI) was also performed by using gradient-echo echo planar imaging for the same visual stimulation. The activated area obtained by imaging with a shorter echo time (16 ms), which reflects the fast transverse relaxation, was found to be localized in the cortex, whereas the activated area spread to include the white matter in the results obtained by imaging with both a longer echo time (64 ms) and using BOLD contrast fMRI. The signal changes in the activated area for the shorter echo time were larger than those for the longer echo time. Changes in the magnetic field distortion were theoretically estimated from the signal changes to show a large decrease in the distortion around an RBC in a capillary during activation. The magnetic field distortion around an RBC is sensitive to neuronal activation, and its change may reveal activation focus.