

MRIを用いた機能的結合計測に向けた 脳神経磁場イメージングに関する検討 Studies on neuromagnetic resonance imaging toward functional connectivity mapping using MRI

伊藤陽介, 上野雅仁, 小林哲生

京都大学大学院工学研究科

Yosuke Ito, Masahito Ueno, and Tetsuo Kobayashi
Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract We have developed the neuromagnetic resonance imaging for functional connectivity mapping by means of spin-lock imaging sequence. The method was examined with a phantom containing two dipole-electrodes. We could observe the MR signal change depending on the coherent and incoherent magnetic fields. The change was explained by theoretical calculation of the Bloch equation. This result demonstrates the feasibility of the functional connectivity mapping using the spin-lock imaging sequence.

1. はじめに

従来, BOLD 効果に基づく機能的 MRI により高次脳機能に関する検討が進められてきた. これは脳神経細胞の賦活に伴う血行動態の変化を検出するが, 血流量の増加は賦活部位に比べて広範に生じてしまう. そこで, 本研究では Witzel らが提案したスピンロック撮像法に基づく脳神経磁場計測法に着目し[1], その脳神経磁場および脳の機能的結合の計測への応用について検討した.

2. 原理

図 1 (a), (b)にスピンロック撮像法のパルスシーケンスと磁化の挙動を示す. フリップ角 α で, 回転座標系の y' 軸へ向かって倒された磁化は, スピンロックパルスによって y' 方向成分がロックされる. 計測対象磁場がないとき, ロックされた磁化は $-\alpha$ パルスにより z' 軸上へ戻され, スピンエコーシーケンスにより計測される.

これに対し, スピンロックパルスのラーモア周波数に対応する計測対象磁場がある場合, 磁化は z' 軸を中心に回転するため, 計測対象磁場の有無

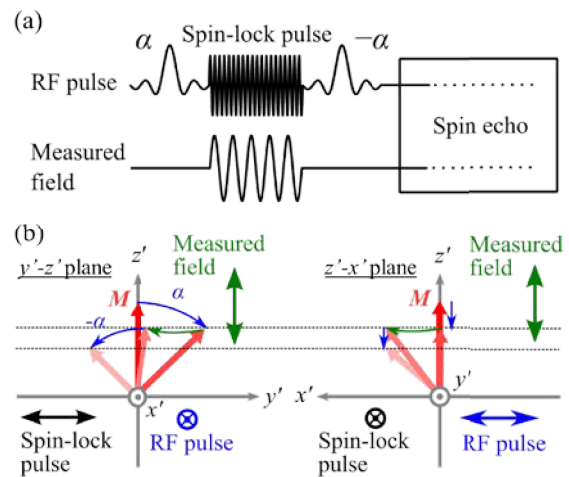


図1. スピンロックパルスシーケンス(a)と回転座標系での磁化の挙動(b)

によって MR 信号が変化する. このとき, 計測対象磁場の位相によって, y' 軸を中心とした二重回転座標系において計測対象磁場の印加方向が変化するため位相情報も取得できる. これによりコヒーレントな信号の検出が可能になる.

3. 実験方法

計測には動物用 7T-MRI 装置 (Bruker 社製 BioSpin) を用いた. 計測対象は生理食塩水内に全長 8 mm のダイポール電極を 2 つ配したファントムとし, 20 k Ω の抵抗を各々のダイポール電極に直列に接続して波高値 20 V, 周波数 100 Hz の正弦波電圧を印加し, その位相を変えて計測を行った.

4. 実験結果

図 2 にフリップ角を 100° とした時の MR 画像を示す. 図 2 (a) は, 正弦波を印加しない場合の画像

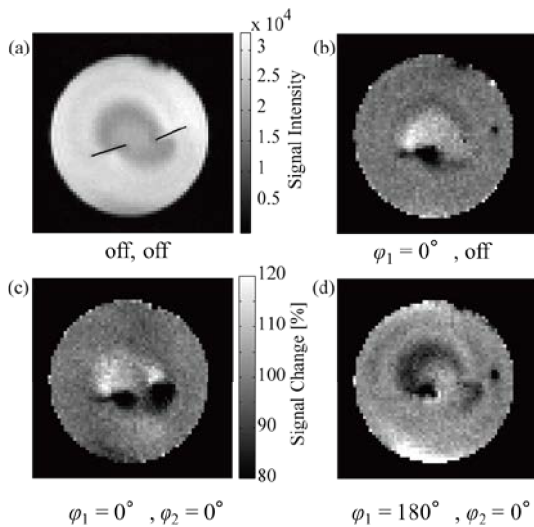


図2. スピンロック撮像法により撮像されたダイポールを2つ有するファントムの画像. 左のダイポール位相を ϕ_1 , 右側のダイポールの位相を ϕ_2 とする. (a) 計測磁場なし. (b) 左側のダイポールのみ磁場発生. (c) 両方のダイポールから同相の磁場発生. (d) 2つのダイポールで逆位相の磁場発生.

で、ダイポールの位置を黒線で示している. 図2 (b), (c)より、計測対象磁場の有無により信号強度が変化し、画像上のダイポールを挟んだ上下における信号が反転していることが分かる. 図2 (d)では、各々のダイポールに逆位相の磁場が生じており、お互いの磁場を打ち消すように働いているが、各々のダイポール近傍では反転した磁場が観測された. この結果はコヒーレントな磁場の計測が可能であることを示唆している.

4. 検討

図3に、フリップ角 $\alpha=100^\circ$, スピンロックパルスの印加時間を100 msとした時のMR信号の印加磁場位相依存性の計算結果を示す. 計算には位相による影響を組み込んだブロッホ方程式を用いた[2]. この時スピンロックパルスのラーモア周波数と計測対象磁場の周波数は一致させた. 周波数により得られるMR信号の大きさは変わるが、印加磁場の位相によって信号が正弦波的に変化し、実験結果をよく説明できることが分かる.

また、周波数によってMR信号が変化するのは、スピンロックパルスが終了した時の磁化の向きが最終的なMR信号の大きさに影響を与えるため

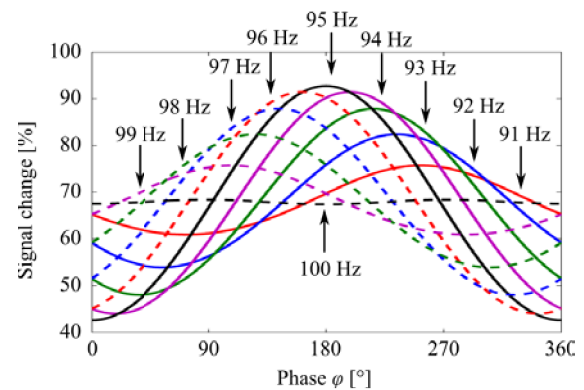


図3. MR信号の印加磁場位相依存性の数値計算結果. フリップ角 100° , スピンロックパルス印加時間100 msとしてラーモア周波数を91 - 100 Hzと変えて計算.

あり、スピンロックパルスの印加時間によっても変化する. このため実際の脳神経磁場および機能的結合計測では、位相によるMR信号の変化と周波数および磁場強度による変化を分離する必要があることが分かる.

5. まとめ

本研究では、ダイポール電極を2つ有するファントムを用い、スピンロック撮像法の脳神経磁場および機能的結合計測の実現可能性について検討した. その結果、コヒーレントな磁場の計測が可能であることを実験的に示した. しかし、MR信号変化の要因の分離等の課題も残っており、これらを解決して機能的結合計測の実現を目指す.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金挑戦的萌芽研究26560466および基盤研究(A)15H01813の助成により行われたことを付記し謝意を表す. 本研究を遂行するにあたり御協力いただいた今井宏彦博士に感謝致します.

参考文献

- [1] Witzel T et al., 2008. Stimulus-induced rotary saturation (SIRS): A potential method for the detection of neuronal currents with MRI. *NeuroImage*. 42(4): 1357-1365.
- [2] 上野 他, 2014. MRIを用いた脳神経磁場イメージング~機能的結合計測に向けたシミュレーションとファントム実験~. *信学技報*. 114(361): 27-32.