

令和 4 年 10 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K10317

研究課題名(和文) 7T-MRIのための超薄型シムコイル開発

研究課題名(英文) Ultra-thin shim coil for 7T-MRI

研究代表者

浦山 慎一 (Urayama, Shin-ichi)

京都大学・医学研究科・特定研究員

研究者番号：10270729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：一般的な臨床用MRI装置の数倍の磁場強度を持つ7テスラMRI装置は、その高い信号ノイズ比などから臨床へも利用され始めるなど、重要性はますます高くなっている。本研究では、本装置において大きな問題となっている静磁場の不均一問題に関して、我々が有する超薄型シムコイル開発技術を基に、既存のRFコイルに組み合わせて利用可能な安価かつ有用性の高いシムコイルの開発を目指した。まず球面調和関数型を設計し、次に、マルチコイル型の開発に取り組んだ。また、非常に高価なRFコイルに悪影響を及ぼさない様に、並列共振回路や高インピーダンスコイル技術などを用いた結果、ベンチテスト上で有用な結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な臨床装置の数倍という高い磁場強度を持つ7テスラMRI装置は、その高い信号ノイズ比から、科学的研究のみならず臨床上でも大いに期待されている。生体の複雑な構造が脳内の磁場を乱す不均一磁場問題は、7テスラMRI装置ではその高い磁場強度のために更に大きく、磁場補正に用いるシムコイルというデバイスの新規開発が重要となっている。本研究では、我々が有する超薄型シムコイル開発技術を基に、既存のRFコイルに組み合わせて利用可能な安価かつ有用性の高いシムコイルの開発を目指した。本研究により、7テスラMRIで有利とされているMRスペクトロスコピー法が機能的MRI法の精度が向上することが期待出来る。

研究成果の概要(英文)：7 Tesla MRI, which has a magnetic field strength several times as high as that of a general clinical MRI, is becoming more important as it starts to be used clinically due to its high signal-to-noise ratio. In this research, we tried to solve the problem of static magnetic field inhomogeneity, which is a big problem in this scanner, by developing a highly effective and low-cost shim coil based on our ultra-thin shim coil technology. First, we designed the spherical harmonic function type and then worked on the development of the multi-coil type. As a result of using parallel resonant circuits and high impedance coil technology so as not to affect a very expensive RF coil adversely, we obtained useful results on bench tests.

研究分野：MR物理・工学

キーワード：MRI 7テスラ 磁場均一性 シムコイル 高インピーダンスコイル技術

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

7テスラを越えるヒト用超高磁場MRI装置の台数も今や世界で80台(申請時は50台強)を越え[1]、近年では臨床研究も盛んに行われ始めている。特に、2015年には欧州で7T-MRI装置が臨床機となり得る認可基準の変更があり、米国では2017年に臨床機としてFDAの認可も受け、超高磁場MRI装置の重要性はますます高まってきている。

このような超高磁場MRI装置において、生体組織と空気との境界面で生じる不均一磁場は、B1不均一問題と並び、最大の問題と言って良い。不均一磁場は、画像歪みや信号減損など様々なアーティファクトの原因となる上に、超高磁場が最も真価を発揮するMRスペクトロスコピーでは致命症となる。そしてその不均一の程度が磁場強度に比例するため、超高磁場ではより深刻となる。

アクティブシムコイルを用いた磁場均一度補正は、この問題の唯一の解決法である。そのため、3T装置が高々2次のシムコイルしか有していないのに対し、近年の7T装置は3次のシムコイルも備えるようになった。しかしながら、まだ以下のような問題点がある。

副鼻腔や前頭洞などにより脳実質に生じる不均一磁場は、さらに高次の成分を含んでおり、3次のシムでは補正しきれない。

様々な分布を持つ不均一磁場に対応するため、シムコイルのチャンネル数は増加する一方であるが、磁場分布から各チャンネルに流す電流量を決定するアルゴリズムで、実用的なものが存在していない(米国Resonance Research社は最大6次までの30チャンネル程度のシムコイルを製造、供給しているが、制御プログラムはまだ開発途上と言われている)。

高次のシムコイルは、できうる限り頭部の近くに設置する必要があるためボア内に設置するインサート型が望ましいが、7T装置ではRFパワーの制限によりボディコイルが使えず、送信コイルもボア内にあるために十分なスペースが取りづらい。

このため、複数のループコイルを用いた多チャンネルシムコイルの開発[2]や、受信コイルに使用されているループコイルに直流電流を流すことができるように改造し、シムコイルの役割を持たず試みなどがされているが[3,4]、いずれもRFコイルの改造を必須とし、高価である。

一方で申請者等は、2008年より取り組んできた複数の高温超電導線材を用いたMRI装置開発プロジェクトを通して、幾つかのシムコイル開発を行ってきた。特に昨年度に我々が開発した超薄型アクティブシムコイル開発技術(図1)では、各チャンネルの厚みが0.15~0.2mmと一般的なシムコイルより一桁薄く、7T-MRI装置のボア内の限られた空間でも、様々な不均一磁場に対応できる超薄型シムコイルを開発可能である。加えて、各チャンネル毎のエレメントとして、一枚高々数万円程度のフレキシブルプリント基盤を使用するため、かかる費用はシムコイル単体で100万円以下、使い回し可能な電源や制御系を入れても200万円以下に抑えることが可能で、これはRRI社の多チャンネルシムコイルのほぼ1/10の価格である。



図1 申請者等が開発した超薄型アクティブシムコイル開発技術。設計したシムコイルパターン(左)をカッティングプロッタ(中)を用いて0.1mm厚のPCB基板の銅箔部分のみを切り取り(右)、傾斜磁場コイルに積層する。

2. 研究の目的

申請者等の超薄型シムコイル開発技術を用いて、7T-MRI装置のためのインサート型アクティブシムコイルシステムを開発する。汎用性を高くするため、既存のRF送受信コイル（Nova社製，送信1ch/受信32ch）に組み合わせるものとし、グラディエントエコー位相画像を用いた磁場補正プログラムも開発する。

本研究期間では、撮像開始から10分以内に脳部分の磁場均一性が、スペクトルの半値幅にして0.1ppm以下を達成できるシステムを目指す。

3. 研究の方法

まず図2に、シムコイルを設置するNova社製のRFコイルを示す。このRFコイルは、外側の円筒形(内/外径：291/373mm、奥行き:280mm)をした送信コイルと、内側のヘルメット型をした受信コイルからなる。本研究では、この送信コイルと受信コイルの間にある2cm程の隙間に設置するシムコイルの開発を目指した。

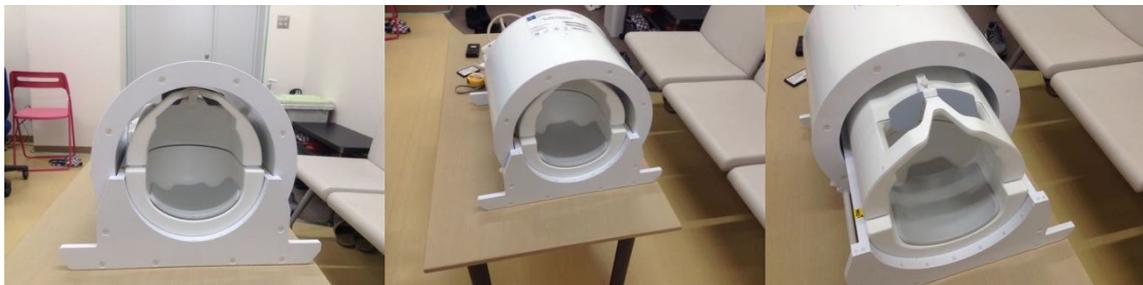


図2 Nova社製RFコイル

そして最初に設計したのが、図3に示す球面調和関数タイプ(Spherical Harmonics: SH型)の9chシムコイルである。球面調和関数の基底関数状の磁場分布を作るシムコイルを、3次のもの7chと4,5次のを1chずつ、計9ch設計した。厚みは9ch分で2.5~3mmとなり、十分にRFコイル内に設置出来る設計であった。

しかしながら、製作前にNova社と打ち合わせしたところ、このシムコイルは送信コイルに悪影響を及ぼす可能性が有るため保証の対象外となることが判明し、送信コイルに影響しないシムコイル開発に方向転換することになった。

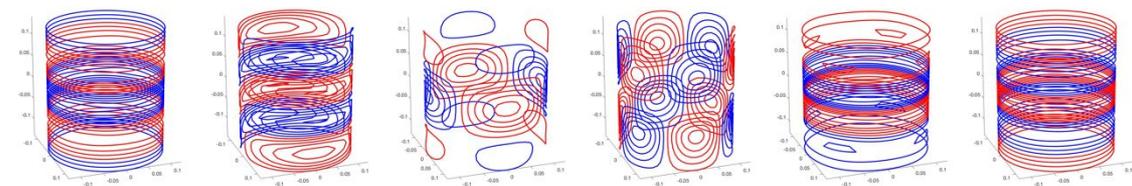


図3 設計したSH型9chシムコイル。タイプは左から順にZ3, Z2X, ZC2, C3, Z4, Z5。



図4 並列共振回路を1つ、もしくは2つ組み込んだループコイル

その送信コイルへの影響が少ないコイルとしてまず検討したのが、図4に示す並列共振回路を組み込んだループ状のシムコイルである。並列共振回路の共振周波数をMRI装置の

共鳴周波数に合わせることで、ループコイルに流れる送信波を抑制出来る。またこれをアレイ状に並べたシムコイルは、マルチコイルタイプ(MC型)として知られ、SH型と比較して高周波成分の磁場補正により効果的であるとされている[5]。

しかしながら、このループコイルを3T-MRI装置にて撮像実験してみたところ、磁場補正には有効であったものの、送信波の影響は若干受けており、更なる改良が必要であることが判明した。

そこで最後に開発したのが、高インピーダンスコイル技術を用いたループコイルである(図5)。高インピーダンスコイル技術は、phased-array型RF受信コイルにおいて、隣接するコイル間のカップリングを高効率で抑制する新しい技術で、これを応用することにより、理論上、更に送信波の影響を抑制出来ることが期待された。また、この動作を確認するために、Nova社製コイルの送信コイルと同サイズのバードケージコイルも開発した。ただ残念なことに、新型コロナウイルスによる渡航制限のため、高インピーダンスコイル技術の開発者であり、共同研究者である豪州クイーンズランド大学のDr.Cloosを招聘することが出来ず、実機を用いた動作確認を行うには至っていない。



図5 開発した高インピーダンスコイル技術を用いた受信コイルと7T用送信コイル

高インピーダンスコイル技術のポイントは、導線として同軸ケーブルを用いることにより、外部導体のシールド効果を期待できることにある。そのため、高インピーダンスコイルのデチューン状態を再現したコイルを作製、一般的なループ型シムコイルとの比較を、ネットワークアナライザとダブルピックアッププローブを用いて行った。その結果、プローブをシムコイルから十分に離れた状態では、共鳴周波数である297.2MHzで-70dbであったところ、ループ型シムコイルにチケ付けた場合-40~-60dbに、高インピーダンス型シムコイルでは-60~-80dbに変化した。これは、後者の方がこの共鳴周波数を通した外部からの影響を受けにくく、送信波の影響を抑制出来ることを示唆している。



図6 開発したループ型シムコイル(左)、高インピーダンス型シムコイル(中)とダブルピックアッププローブ(右)

以上の様に、7T-MRI装置における不均一静磁場補正のため、RF送信コイル内への設置を目指した高効率で安価、かつ薄型のシムコイル開発を試みた。残念ながら、新型コロナウイルスによる影響のため、最終の動作確認を取ることはできなかったが、新規性が高く、有効性が期待出来るシムコイルを開発するに至った。

ただ一方で、MC型シムコイルにおけるループコイル配置に関しては、更なる検討が必要であると考えられる。本研究期間中において、超高磁場MRI装置におけるシムコイルの世界的な潮流は、SH型からMC型への移行が明確になってきており、そのコイル配置の最適化への試みもされているが[6,7]、スライス毎の磁場補正は可能となっているものの、全脳での高い磁場補正は未だ困難であり、multi-band撮像など現在では必須の技術を考慮すると、まだ検討の余地は大きい。これは今後の課題である。

【参考文献】

1. L. Huber, Ultra-high field MRI scanners, <https://drive.google.com/open?id=1dXG840ZIAOxjsqh3x2tGzWL1bNU>, Accessed 28th Nov 2018
2. C. Juchem, et al., Multicoil Shimming of the Mouse Brain, *Magn Reson Med.* 2011 Sep;66(3):893-900.
3. JP Stockmann, et al., A 32-channel Combined RF and B0 Shim Array for 3T Brain Imaging, *Magn Reson Med.* 2016 Jan;75(1):441-51.
4. T. Truong, et al., Integrated RF/shim Coil Array for Parallel Reception and Localized B0 Shimming in the Human Brain, *Neuroimage.* 2014 Dec;103:235-240.
5. JP Stockmann, LL Wald, In Vivo B0 Field Shimming Methods for MRI at 7T, *Neuroimage.* 2018 Mar;168:71-87.
6. A. Aghaeifar, et al., A 32-channel Multi-Coil Setup Optimized for Human Brain Shimming at 9.4T, *Magn Reson Med.* 2020 Feb;83(2):749-764.
7. J. Zhou, et al., An Orthogonal Shim Coil for 3T Brain Imaging, *Magn Reson Med.* 2020 Apr;83(4):1499-1511.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鈴木 崇士 (Suzuki Takashi) (10572224)	京都大学・充実した健康長寿社会を築く総合医療開発リーダー育成リーディング大学院・特定助教 (14301)	
研究分担者	武田 和行 (Kazuyuki Takeda) (20379308)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	松橋 眞生 (Masao Matsuhashi) (40456885)	京都大学・充実した健康長寿社会を築く総合医療開発リーダー育成リーディング大学院・特定准教授 (14301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	クルース マルタン (Cloos Martijn)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関

オーストラリア	クィーンズランド大学			
米国	ニューヨーク大学			