

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01350

研究課題名（和文）高空間分解能MRIのための送信および受信専用マルチチャンネルRFコイルの開発

研究課題名（英文）Transmit and Receive only multi-channel RF coil development for high spatial resolution

研究代表者

松岡 雄一郎 (Matsuoka, Yuichiro)

国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳機能解析研究室・主任研究員

研究者番号：80372150

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：高空間分解能のMR画像取得には、画質向上が必要であり、その対策の一つがRFコイルの高性能化である。そのため、7T-MR装置を用いて局所領域を高空間分解能撮像するための複数コイルを配置するマルチチャンネルRFコイル開発を目的とした。RFコイルの製作において、RFシールドの形状や配置が個々のRFコイルの特性に影響することが分かり、単一RFコイルの性能向上に必要なRFシールドの条件について電磁界シミュレーションで調べた。その結果、RFコイルの共振特性や励起磁場の向上に有用なRFシールドの形状、サイズ、配置を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop an RF coil to obtain a high spatial resolution MR image of local brain region at 7 Tesla MR scanner. A performance of RF coil is a key factor in obtaining the high spatial resolution MR image. To develop a high-performance RF coil, I worked at building a multi-channel RF coil. At this step, it was found that a structure of RF shield around the RF coil influenced a resonant characteristic and the performance of individual RF coil. Therefore, I investigated a proper structure of RF shield to improve a single RF coil's performance with EM simulation. As a result, an effective structure of RF shield to increase the performance of single RF coil was found.

研究分野：複合領域、人間医工学、医用システム

キーワード：7T-MRI 医用システム 画像診断システム RFコイル

1. 研究開始当初の背景

磁気共鳴撮像法 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) は、人体を含めた物体の断面画像を得る手法の一つであり、X線CTや超音波などの他の手法と比較して人体への電離放射線の影響が無いことや、軟部組織のコントラストに優れるなどの利点がある。MR装置の静磁場強度は臨床使用では3Tesla(T)までであるが、研究目的としては4.7T、7T、9.4T、10.5Tなど高い静磁場強度のMR装置が用いられている。その利点は、MR画像の信号雑音比 (signal to noise ratio: SNR) の向上による画質向上である。例えば低磁場装置よりも短い撮像時間で同等のSNRが得られる、あるいは同等のSNRで高い空間分解能の画像が得られる。これにより、微細構造組織の画像化、磁気共鳴分光法 (Magnetic Resonance Spectroscopy: MRS) の計測感度向上や計測時間の短縮、脳機能計測の一手法として用いられるfMRI (functional MRI) の計測精度の向上などが可能となる。一方で、静磁場強度の高いMR装置では以下が問題となる。

- (1) 電磁波 (Radio-frequency: RF) に起因する比吸収率 (Specific Absorption Rate: SAR) の増加と発熱
- (2) MR撮像条件の制限
- (3) 金属材質の吸引危険性の増大
- (4) 変動磁場による神経刺激
- (5) 騒音
- (6) 励起磁場 (B_1^+) 不均一性の増大
- (7) 生体組織の緩和時間の延長

(1)~(5)は生体への安全に係る項目であり、安全基準が設定されている。(6)はMR装置で扱うRF信号の周波数が高くなることによる生体内での電氣的波長の短縮に起因する。それ故、超高磁場MR装置におけるこれらの問題に対処し、安全なMR撮像や画質向上を図るための研究が、ハードウェア、ソフトウェアの面で進められている。いずれの面でも7T以上の静磁場強度のMR装置に対する研究開発は、国内に比べて圧倒的に国外の研究が活発であり、進んでいる。例えば、感度分布の拡大、SNRの向上、 B_1 の均一化などのために、撮像対象物に電磁波 (RF) を照射するRFコイルと称されるアンテナを複数配置し、かつ各RFコイルに印加する電圧や位相を個別に調整する技術 (パラレル送信) の利用は、超高磁場MR装置での高空間分解能撮像には有用と考えられ、安全面への対応も含めて研究が進められている。この技術の適用は、一般的に撮像対象物全体を覆う形状 (ボリューム型) のRFコイルが対象である。それに対して、ヒト頭部の局所領域のMR撮像を目的とした局所RFコイルの研究開発の例は少ない。

2. 研究の目的

当初の研究目的は、ヒト脳の視覚野領域を

7T-MR装置で高空間分解能撮像するための、送信および送受信用マルチチャンネルRFコイルの開発することとした。パラレル送信技術の活用も視野にいれ、 B_1^+ 均一性の向上とSARの軽減を目指し、FDTDに基づく電磁界解析および撮像実験により、RFコイルのサイズ、形状、配置などを最適化するも目的とした。

3. 研究の方法

RFコイルは、観察する信号周波数と同じ周波数に同調 (チューニング) される必要がある。共振回路として構成される必要がある。共振周波数は、使用するMR装置の静磁場強度に依存して決定され、本研究で対象とする観察対象は水素原子核 (プロトン) であり、静磁場強度が7Tでは観察するプロトンの周波数 (歳差運動周波数またはラーモア周波数と呼ばれる) は約300MHzとなる。故に、7T-MR装置用のRFコイルはこの周波数にチューニングする。またRFコイルとMR装置との信号伝達を効率的に行うため、RFコイルのインピーダンスは通常50オームにインピーダンス整合 (マッチング) する必要もある。チューニングとマッチングはRFコイル製作で基本的、かつ必須の調整である。チューニング・マッチングは、撮像対象物の電気特性 (誘電率や導電率) RFコイルとの位置関係、RFコイルのサイズや形状などに応じて変化する特性があり、これらの条件を考慮して調整しなければならない。それ故、MR撮像時のRFコイルと撮像対象物との位置関係を模擬した環境を構築して調整を行う。この場合に、撮像対象の電気特性を有する均一構造のファントムを設計し、撮像対象物とするのが現実的であり、有用である。また、RFコイルのチューニングとマッチング調整には、コイルエレメント上に複数配置するコンデンサの値 (静電容量) を調整する必要がある。本研究では、電磁界シミュレーションでこの環境を構築して、撮像対象を模擬したファントムとRFコイルとの距離を固定した。マルチチャンネルコイルとする場合、隣接するコイル間の磁氣的干渉を抑える必要がある。その為に隣接するRFコイルとの位置関係の調整、最適化が欠かせず、RFコイルのチューニング・マッチングにも影響する。また、RFコイルの共振特性や励起磁場 B_1^+ の改善のために、RFシールドを設置した。ここで、RFコイルのチューニング・マッチングは、RFシールドの構造や配置により影響を受けることが、電磁界シミュレーションにより判明した。その為、RFコイルの共振特性、 B_1^+ の向上に効果的なRFシールドの形状、配置を電磁界シミュレーションで調べた。

電磁界シミュレーションのために、撮像対象物、RFコイル、RFシールドを以下の条件で設計した。
撮像対象物

ヒト頭部を単純な円筒型（半径 90mm、長さ 180mm（図 1））でモデル化し、電気特性は 297.2MHz でのヒト脳の白質と灰白質の誘電率と導電率の平均（それぞれ 55 と 0.52 S/m）とした。ここで 297.2MHz は、本研究で使用する 7T-MR 装置におけるプロトンの歳差運動周波数である。

RF コイル

半径 110mm の円筒側面に描いた 80mm × 100mm の 1 巻き矩形ループ形状とした。導体素材は銅（導電率 59×10^6 S/m）とし、コイルエレメントの幅を 5.0mm、厚さを 35 μ m とした（図 1）。RF コイルを含む円筒の断面で見た場合、円周上の RF コイルの領域となる円弧が持つ中心角（約 39.8 度）を α とする。

RF シールド

RF コイルと同じ銅素材とし、半径 r （135 mm および 160 mm）、長さ L （120 mm および 160 mm）の円筒側面の一部として設計した。また RF シールドを覆う領域は、長さ L に加えて、円周方向、つまり円弧長を複数設定するために RF コイルの中心角 α を基準にして中心角を 3 種類（ α 、 2α 、 3α ）で設計した（図 2）。

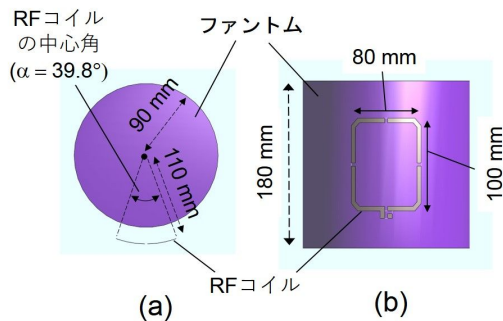


図 1. ファントムと RF コイルの概略
(a)：断面図、(b)：側面図

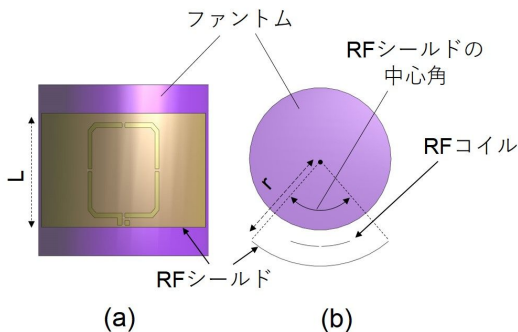


図 2. RF シールドの構造と配置
(a)：側面図、(b)：横断面図

それぞれの位置関係は、ファントム側面と RF コイルとの距離を 20 mm、RF コイルと RF シールドとの距離を 25 mm および 50 mm とし、RF コイルと RF シールドの円弧の中心線を揃えた。RF シールドを設置しない場合（RF シールド無し）と各 RF シールド

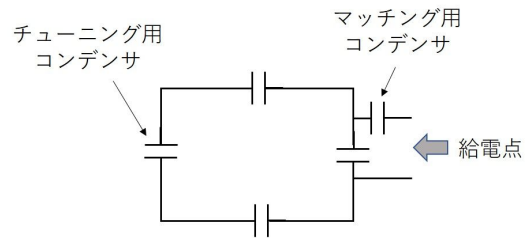


図 3. RF コイルの等価回路

ドを設置した場合で RF コイルのチューニング（297.2 MHz）とマッチング（50 オーム）を最適化するが、図 3 に示す RF コイルのループ上、および、給電箇所を設置するコンデンサの値を変えて調整した。

チューニング・マッチングした RF コイルの共振特性は、チューニング周波数におけるマッチングの度合いを示す反射係数、コイルの良さを表す指標の Q 値を調べ、さらに 297.2MHz で 1W を RF コイルに印加した場合の発生する励起磁場 B_{1+} の分布を解析して評価した。

さらに、安全への指標となる SAR は、ヒト頭部が撮像対象であるため、組織 10 g あたりの SAR を解析し、最大 SAR で評価した。

4. 研究成果

電磁界シミュレーションの結果、既に報告されている結果と同様に、RF シールドの設置により RF コイルのチューニング・マッチングが変化することが示され、各 RF シールドの設置毎にチューニングとマッチングを最適化することで、RF シールドが無い場合と比較して RF コイルの共振特性が改善されることが示された。Q 値に関しては、RF シールドが無い場合は約 43.5、RF コイルとの距離が 25 mm ($r=135$ mm)、長さ L が 160 mm で、かつ中心角が 2α 以上の RF シールドを設置した場合に約 50.5 に向上した。つまり、Q 値は約 16% 改善することが示された。

一方、励起磁場 B_{1+} に関しては、ファントム内での分布を解析すると、RF コイルに近いファントム表面付近での強度が強く、ファントム内部に向かって強度が減衰する分布となった（図 4）。図 4.a に示す緑線上のファントム表面から深部方向への B_{1+} の変化を、RF シールドが無い場合の B_{1+} の最大値に対する比率としてプロットすると図 5 となる。この図では、RF シールドの長さ L が 160 mm の場合のみを示すが、RF シールドの長さ L が 120 mm の場合は B_{1+} の向上が L が 160mm の場合よりも小さい結果であった。この結果より、RF コイルに対して RF シールドは近くに、そして広範囲を覆う構造とすることが、励起磁場 B_{1+} の向上に有用であり、今回設計した RF シールドにおいては最大で約 12% 向上しうることが示された。

また最大 SAR に関しては、RF シールドの設置により、RF シールドが無い場合に対し

て上昇する結果となり、RF コイルと RF シールドの距離が近く、RF コイルを覆う範囲が広い場合に、最大で約 23% 上昇することが示された。以上の結果より、RF シールドのサイズ、配置により、励起磁場 B_{1+} の向上は安全面に対してトレードオフの関係があることも示唆された。

本研究課題の実施期間において、当初予定していたマルチチャンネル構造の RF コイル構築は達成し得なかったが、マルチチャンネルコイルを構成する単一コイルの性能を向上させる手段と条件、および安全面への影響を解明できた。今後は、この成果を応用してマルチチャンネルコイルの構築を目指す。

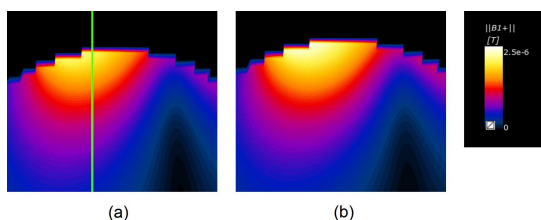


図 4. 励起磁場 B_{1+} の分布

- (a) : RF シールド無しの場合
 (b) : RF シールド ($r = 135$ mm, $L = 160$ mm, 中心角 2α) を設置した場合

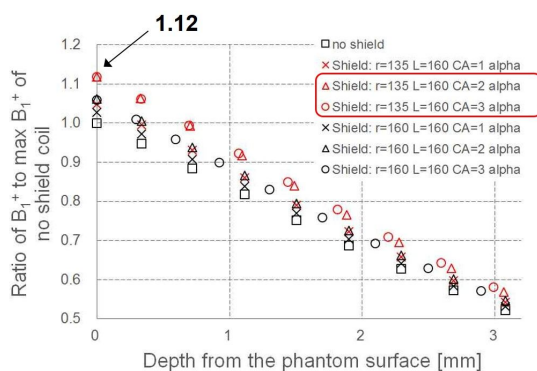


図 5. ファントム表面からの励起磁場 B_{1+} の減衰

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 2 件)

- 1) 松岡雄一郎、黄田育宏、7T-MRI 送受信コイルの共振特性に対するシールドの影響、第 45 回日本磁気共鳴医学会大会、2017 年
- 2) Yuichiro Matsuoka, Ikuhiro Kida, RF shield effect on B_{1+} of a surface type local RF coil at 7 Tesla, 第 2 回国際磁気共鳴医学会日本支部学術集会、2018 年

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

なし

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 雄一郎 (MATSUOKA YUICHIRO)

国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳機能解析研究室・主任研究員

研究者番号 : 80372150