

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K22579

研究課題名（和文）高インピーダンスコイル技術を用いた霊長類MR画像の信号ノイズ比向上

研究課題名（英文）Improving SNR in non-human primate MRI using high-impedance coil technology

研究代表者

浦山 慎一（Urayama, Shin-ichi）

京都大学・医学研究科・研究員

研究者番号：10270729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：ヒト脳機能研究においては、ヒトに近い非ヒト霊長類を用いた比較研究が重要であり、MR画像技術が非常に有用なツールとなっている。本研究では、ヒトに比べ小さいサル脳において同等のMRI画像を得るために、近年開発された高インピーダンスRFコイル技術を用い、より脳に近接させることが可能なphased arrayコイルを開発、霊長類MRI脳イメージングにおいて信号ノイズ比(SNR)の向上を目指した。ターゲットしたマーモセットの頭部サイズに合わせて全パーツを小型化、10ch phased arrayコイルを開発して評価実験を行い、脳表に於いて高い信号ノイズ比が得られるなど、想定通りの結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

神経科学に於いても動物を対象とするMRI撮像は非常に重要である。そのMRI装置も計測機器であるためSNRは重要であり、空間分解能や撮像時間、画像上のコントラストなど多くのファクタはSNRの向上により改善を見込むことが出来る。そのSNRの鍵を握る重要なハードウェアであるRFコイルは、出来るだけ撮像対象の近くに設置する事が基本であるが、様々な大きさ、形状を持つ動物の頭部に合うようコイル形状を変えることは今まで困難であった。本研究で開発したどのようなマーモセットでもその頭部にフィットする高インピーダンスコイルの意義は、MRI画像技術上、非常に高いと言える。

研究成果の概要（英文）：In studies of human neuroscience, comparative studies using non-human primates that are similar to humans are important, and MR imaging technology is a very useful tool. In this study, to achieve higher signal-to-noise ratio (SNR) in small primate brain, we adopted so-called “high-impedance coil technology”, which was developed in 2018, to build a flexible phased array coil that can be placed closer to the brain. We targeted marmoset brain imaging and a 10ch phased array coil was developed after miniaturization of all parts to fit its head size. Evaluation experiments showed a high signal-to-noise ratio on the brain surface.

研究分野：MRI物理・工学

キーワード：MRI 高インピーダンスコイル 神経科学 phased-array-coil

1. 研究開始当初の背景

ヒトの脳高次機能を明らかにするためには、ヒトに近い非ヒト霊長類であるサルを用いた比較研究が重要であり、MRI技術は非常に有用なツールである。しかし、ヒトに比べおよそ10分の1程度のサイズであるサルにおいて同等のMRI画像を得るためには、より高い空間分解能、信号ノイズ比、安定性をもった測定技術が必要である。

他の計測法と同じく、MRIにとっても信号ノイズ比の向上は終わりのない研究課題である。特にMRIの場合、拡散強調撮像法やパラレルイメージング法など多くの手法の適用限界を信号ノイズ比が決めている。そのため、信号ノイズ比の向上は、現在の手法の信頼度の向上と新たな手法の創造に繋がり、脳科学を更に進めるトリガーとなり得る。

2018年、我々が共同研究を行っていたニューヨーク大学(2020年に豪州クイーンズランド大学へ異動)のDr.Cloosのチームから、高インピーダンスRFコイル(HIC: High Impedance Coil)技術(B. Zhang et al., Nature. Biomedical. Eng., 2018)という非常にユニークな手法が提案された。それは、MRI用RFコイルとして現在最も一般的に使用されているphased arrayコイルにおいて、その性能の限界の一因となっているループコイル間の相互干渉(カップリング)を、ループコイルに通常の銅線ではなく同軸ケーブルを用いることで解消する、というものであった。これにより、各ループコイルの独立性を高め、その配列や数、形状などの自由度を大きく向上させる事ができ、形状を大きく変えてもコイル特性が低下しないという、現在までの常識を覆すコイルの開発に成功した。

そして次のステップとして、この技術を霊長類のin-vivo/ex-vivo MRI脳イメージングに用い、撮像対象に併せてコイル形状を変形・近接させることで、信号ノイズ比を大きく向上させると言う構想を得た。コイルの受信感度はコイルからの距離とともに急峻に低下するため、脳からの距離を狭めるだけでも信号ノイズ比の飛躍的な向上が期待出来るからである。

2. 研究の目的

本研究では、霊長類のMRI脳イメージングを対象に、HIC技術を用い、より脳に近接させることが可能なphased arrayコイルをそれぞれ順に開発、実験を通してその有用性を評価する。

3. 研究の方法

プロジェクト申請時は、撮像実験を主に3T-MRI装置を用いて行う事を想定していたが、プロジェクト開始後は、in-vivo/ex-vivo MRI脳イメージングを3T装置より高SNRが期待出来る7T-MRI装置を用いて行うようになったため、以下の開発は全て、7T-MRI装置向けに行った。

またMRI用RFコイルの開発は、場合によっては非常に高価なMRI装置や被検体に危害を及ぼすリスクがあるため、本研究では、コイル開発やその安全性に関して高い知見を有し、かつHIC技術の発案者でもある豪州クイーンズランド大学のCloos博士(研究開始当初はニューヨーク大学所属)との共同研究として開始した。

研究は、COVID-19による渡航制限のために研究期間の半分は博士を招へい出来ず、HICコイル開発は困難を極めたが、その中でまず、ex-vivo MRI脳イメージングの対称であるMRI標本撮像に関して開発を行った。

7T-MRI装置における標本撮像では、その強い静磁場のために標本内や表面の気泡が大き

なアーティファクト源となる。そのため、脳標本から気泡を除去するための脱泡処理システムを構築した。まず、使用する RF コイルに合わせて密閉容器を自作し、スポンジで容器内に固定した脳標本の周囲を、MR 信号を出さず脱泡が容易なフロリナートで満たした。その容器に、加振装置として音波歯ブラシを巻き付け、振動を加えながら真空装置を用いて脱泡処理を行った。また気泡を多く含むスポンジには、より脱泡が容易な完全オープンセル構造で、柔らかな標本を傷つけにくい柔軟性の高いものを用いた。本システムにより、従来は数日要していた脱泡処理が、半日程度にまで短縮出来るようになった。

次に、脱泡に必要な時間を更に短縮するため、フロリナート注入時の空気混入を抑えるべく、高真空状態でフロリナートを容器に注ぐためのシステムを開発した(図1)。システムは、ステンレス製真空釜とアクリル蓋、真空ポンプからなり、アクリル蓋には、3Dプリンタで作成した真空ホース及び真空計を繋ぐニップルと、フロリナートを外部から注入する極細ステンレス管を付けた。そして、真空釜内に標本の入った容器を設置、ステンレス管から延ばしたシリコンチューブを容器の底に入れて、十分に釜内の真空度を上げた後に、予備脱気したフロリナートをステンレス管を通して気圧差で注入した。その結果、脱泡処理に必要な時間を数時間まで大幅に短縮することが出来た。



図1 開発した高真空フロリナート注入システム

高インピーダンスRFコイルの開発にあたり、まず撮像ターゲットとして、扱いが容易で、かつ、専用のphased-arrayコイルを期待されていたマーモセットを想定した。ただマーモセットの頭部サイズが余りにも小さく、ループ径の縮小及び共振回路の小型化が必須であることが分かった。高インピーダンスコイル技術では、ループ径は静磁場強度、使用する同軸ケーブルのインピーダンス、共振回路設計などで決定されるため、適合する同軸ケーブルの探索と、共振回路設計変更を行った。

加えて、送受信系としてマーモセット撮像に使用していた高島製作所製送信コイルと10ch受信系を用いることとした。このシステムは、通常の動物実験に用いているものであるためにマーモセットのベッドや固定具なども付属しており、非常に高価で貴重なマーモセットの実験をより安全かつスムーズに行う事が可能なためである。これにより、開発するphased-arrayコイルのチャンネル数も10chとなった。

その結果、エレメントループに使用する同軸ケーブルとしては、外径0.8ミリで非磁性、かつ誘電体には半田付け作業など高温に強いFEPを使用している潤工社製DFS240を用いた。また共振回路としては、ループ径を小さくするためにインダクタを用いないタイプのもので採用した。その結果、ループ径17mm、共振回路サイズ10×15mmという極小高インピーダンスコイルの開発に成功した。またそれに合わせて、開発したコイルの電気特性を計測するための極小ダブルピックアッププローブや、送信コイルが発する送信波が伝送路

として使用した同軸ケーブルの外部導体に影響を与えないようにする極小ケーブルトラップなども開発した(図2)。

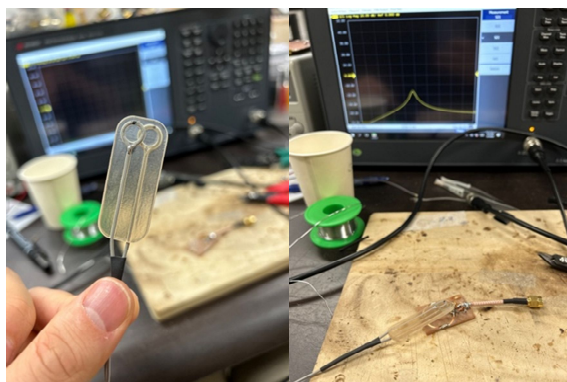


図2 開発した極小ダブルピックアッププローブ(左)および、それを用いて開発中の極小RFコイルの計測を行っている様子(右)

4. 研究成果

開発した10ch分の高インピーダンスコイルを、まずは球形ファントムに並べて貼り付け、評価実験を行った(図3)。ファントムのサイズは50mm径でマーモセットの頭部にほぼ合わせてあり、phased-arrayとしても非常に良くフィッティングしているのが分かる。また得られた画像も、想定通り、脳表にあたるファントム上面で非常に高い信号が得られていた。

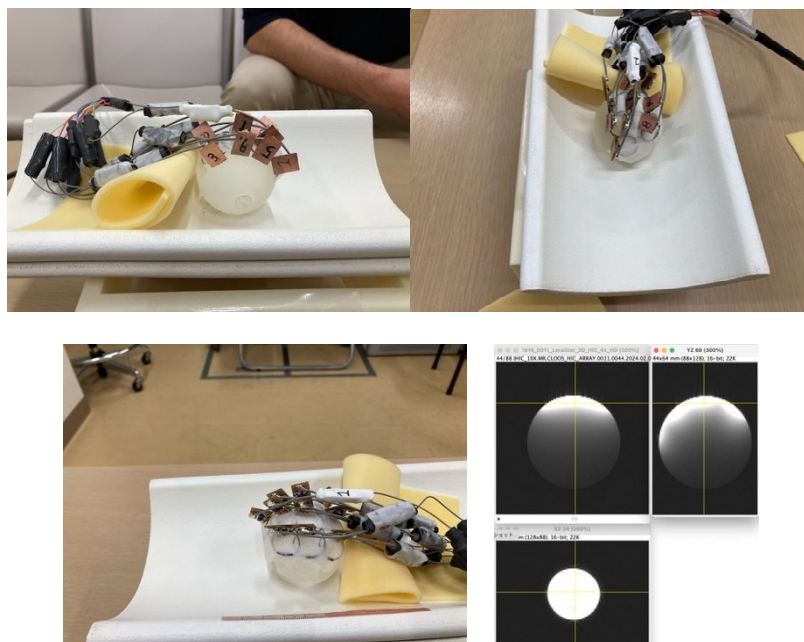


図3 球形ファントム表面に並べて貼り付けた10ch高インピーダンスphased-arrayコイルと、これにより撮像したファントム画像(右下)

次に、どのような頭部形状のマーモセットであっても頭部にフィットするよう伸縮性のある円筒形の布地(椅子脚用の靴下タイプのカバーを切ったもの)に縫い付け、マーモセットの頭部に装着、評価実験を行った結果を図4に示す。ファントム実験同様、開発したphased-arrayコイルがマーモセット頭部に良くフィッティングしているのが分かる。また得られた画像も、脳表部位では非常に高い信号が得られた。



図4 伸縮性のある円筒形の布地に10ch分の高インピーダンスコイルを縫い付けたもの(上段左、中)とそれをマーモセットに頭部装着した様子(上段右、中段)、及び、このコイルで撮像したマーモセット頭部画像(下段)

以上のように、サイズや形状が異なっても頭部にフィットするphased-arrayコイルをHIC技術を用いて開発し、その高い有用性を証明することが出来た。今後、チャンネル数の増加やコイルの電気特性の向上など、更なる改良を進めてSNR向上を図り、また他のサルへの応用へと広げていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shin-Ichi Urayama , Bei Zhang , Koji Fujimoto , Tomohisa Okada , and Martijn A Cloos
2. 発表標題 A modular 7T high-impedance array for ex-vivo imaging
3. 学会等名 第27回国際磁気共鳴医学会大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浦山慎一、Bei Zhang、藤本晃司、岡田知久、Martijn Cloos
2. 発表標題 自由なコイル配置が可能な7T ex-vivo撮像用
3. 学会等名 第47回日本磁気共鳴医学会大会
4. 発表年 2019年

〔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	藤本 晃司 (Fujimoto Koji) (10580110)	京都大学・医学研究科・特定准教授 (14301)	
研究分担者	尾上 浩隆 (Onoe Hirotaka) (80214196)	京都大学・医学研究科・特定教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	マーティン クルース (Cloos Martijn)	クイーンズランド大学・Centre for Advanced Imaging・Associate Professor	

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	クイーンズランド大学			