

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H03601

研究課題名（和文）パラレル送信を用いない7T-MRI用B1均一化頭部RFコイルシステムの開発

研究課題名（英文）Transmit-mode switching system for B1+ inhomogeneity mitigation at non-pTx 7T-MRI

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） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：磁場強度が臨床用MRIの数倍の超高磁場MRIが持つ送信波強度不均一問題の解決のため、非常に高価で技術的に困難なパラレル送信システムを用いず、「RFモードスイッチング」と呼ばれる新しいコンセプトに基づいた専用RFコイルシステムを設計・開発し、評価実験を行った。システムは、Txスイッチ、バターマトリックス、送信コイルにより構成され、MRI装置から出力されるTTL信号を元に、送信波モードをTR毎にCP(Circular Polarization)モードとgradientモードにスイッチした。本システムをfinger-printing撮像に応用し、送信波不均一が低減されていることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究でターゲットした7T-MRIを始めとする超高磁場MRIにおいては、その高い信号ノイズ比のため、基礎研究のみならず臨床に於いてもその重要性は増しており、2024年には遂に日本国内でも薬事承認を受けるに至った。しかしながら、B1不均一問題に関しては未だに大きな進歩は見られず、高価なpTxシステムを導入しても、現状、日常の使用は困難が伴う。本研究ではRFモードスイッチング技術を用いて、pTxよりもはるかに安価なシステムによりB1不均一の低減出来ることを示すことができた。まだ将来的には様々な改良や応用の余地もあり、本研究成果の学術的にも社会的にも意義は大きいと考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to solve the problem of non-uniformity of transmit wave intensity in ultra-high field MRI, where the magnetic field intensity is several times higher than that of clinical MRI, we designed and developed a dedicated RF coil system based on a new concept called "RF mode switching" instead of using a parallel transmit system, which is very expensive and technically difficult, and conducted evaluation experiments. The system consists of a Tx switch, a Butler matrix, and a transmitting coil. Based on the TTL signal output from the MRI system, the transmitting wave mode was switched between CP (Circular Polarization) mode and gradient mode for each TR. This system was applied to finger-printing imaging, and it was confirmed that the transmission wave non-uniformity was mitigated.

研究分野：MRI物理・工学

キーワード：超高磁場MRI B1不均一 送信コイル RF-mode-switching head coil

1. 研究開始当初の背景

2018年に臨床応用のためのFDA認可を受けた超高磁場(UHF: Ultra-High Field)7T-MRIは、基礎分野のみならず、臨床においてもその大きな可能性に期待が寄せられている。一般的な1.5または3T装置と比較してUHF-MRIの信号ノイズ比(SNR)およびコントラストノイズ比(CNR)比は、2倍以上高く、この高いSNR/CNRが空間分解能をサブミリレベルまでに高めることを可能にしている。そして、この高い空間分解能で得られる脳の解剖学的構造や機能、ネットワークに関する新しい知見は、神経内科、脳神経外科、精神医学領域等の臨床領域においても多大なる貢献となると期待されている。

しかしながら、このUHF-MRIには所謂B1(RF)不均一という大きな問題がある。これは、その高い静磁場強度のために共鳴周波数が高くなり(7Tでは約300MHz)、生体内のRF波長が約15cmと、人間の脳のサイズ(約20cm)と同等になる事に起因している。これにより頭部内にRF定在波が生じ、中心部でRFが強く、周辺で弱いというB1不均一が生じるのである。もちろん、このB1不均一が存在しても脳画像を撮像することは可能であるが、フリップ角は観測範囲内で均一にならず、信号強度の変化やコントラストの喪失につながる。

Katscher(2003)とZhu(2004)は、これらの不均一励起を避けるために、受信技術であるパラレルイメージングの手法をRFパルス設計に適用した「パラレル送信技術(pTx)」をそれぞれ独立に提案した。現在、多くのグループがpTxの実現可能性と潜在的利点を示しているが(Setsompop et al., 2008, Cloos et al., 2012, Boulant et al., 2015, Schmitter et al., 2013 and Padormo et al., 2016)、撮像前の較正用スキャンや最適化計算は数十分に及び、現状では、本法を臨床現場に応用するのは非常に困難である。さらに、7T-MRI用の多チャンネルpTxシステムは非常に高価であるため(約1~2億円)、その費用対効果の判断は難しい。

このような状況の下、より容易かつ安価にB1不均一を低減するシステム開発が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究では、pTxを有さないMRI装置でもB1不均一を低減出来るRFモードスイッチング技術を用い、非常に安価な送信コイルシステムを構築、その有用性を確認することを目的としている。

3. 研究の方法

図1にRFモードスイッチング技術の撮像原理を示す。RFモードスイッチング技術では、円筒型多チャンネル送信コイルの円周にあるそれぞれのチャンネル(エレメント)に、CP(Circular Polarization)モードもしくはgradientモードと呼ばれる異なるモードの送信波を入力する。この2つのモードの違いは各チャンネルの位相シフトで、CPモードでは円周1周で2シフトさせるが(8chコイルの場合は45度ずつ)、gradientモードではその倍の4シフトさせる。すると、円周に並ぶエレメントの反対側にある対が作る磁場は、CPモードでは同じ向きを向くが、gradientモードでは反対となる。これにより、全チャンネルが作るB1分布は、CPモードでは全領域で同じ向きを向き、中心で高く周辺で低くなるが、gradientモードでは逆に、中心部分で打ち消し合って中心が高く周辺で低い分布となる。結果、この2つのモードの作るB1分布は相補的となり、上手く組み合わせることによりB1分布の均一化を図ることが出来る。これが本技術の期待するところである。

このCPモードとgradientモードの切替機能を持った送信コイルシステムのシステム構成を図2に示す。このシステムは、RFモードスイッチング回路とButler matrix、多チャンネル送信コイルからなる。RFモードスイッチング回路は、送信アンブからの送信波をMRI装置から出力されたTTL信号に基づき2つ有る出力の内のどちらか片方に振り分ける回路である。Butler matrixは、 2^n 個の入力ポートと、同じく 2^n 個の出力ポートを持ち、その 2^n 個の入力ポートの内の1つのポートから入力された送信波は、内部のhybrid-couplerとphase-shifterを通してパワーが 2^n 個に均等に分割され、 2^n 個の出力ポートから出力さ

れる。この時、その 2nd 個の出力はポート毎に位相シフトが生じているが、そのシフトの程度が入力ポートによって異なるため、RF モードスイッチング回路からの出力を適切な入力ポートに接続することにより、送信コイルに与える送信波を CP モードか gradient モードかにコントロール出来る。

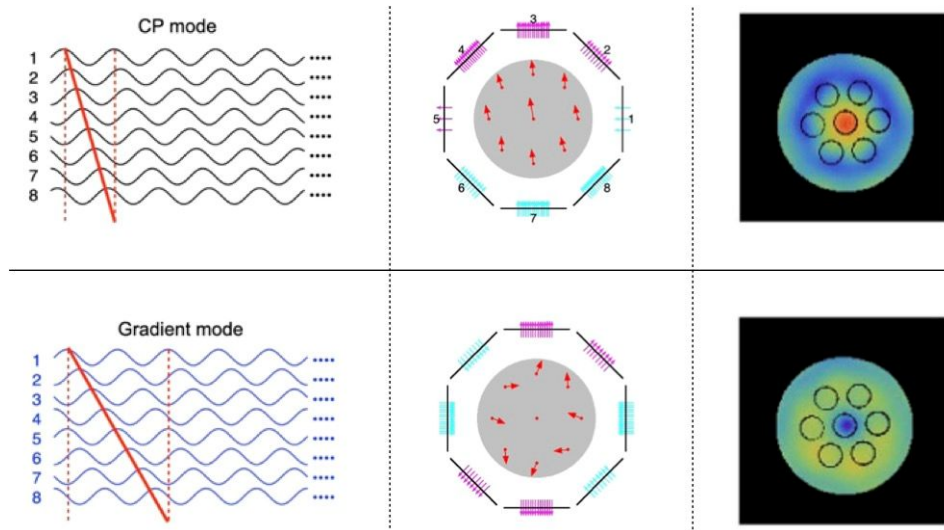


図1 CPモード(左上)と gradient モード(左下)の送信波を 8ch 送信コイルの各チャンネルにそれぞれ入力した時に生じる B1 分布(中)と、その結果得られる B1 マップ画像

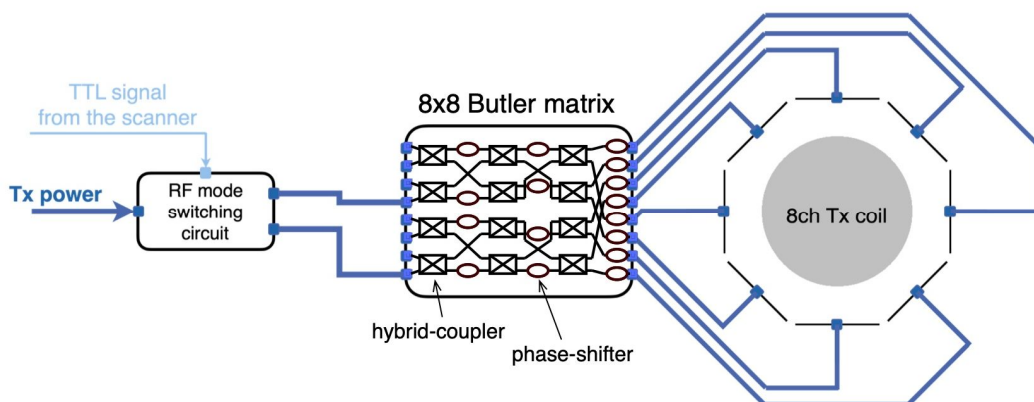


図2 RF モードスイッチング技術を用いた 8ch 送信コイルシステム

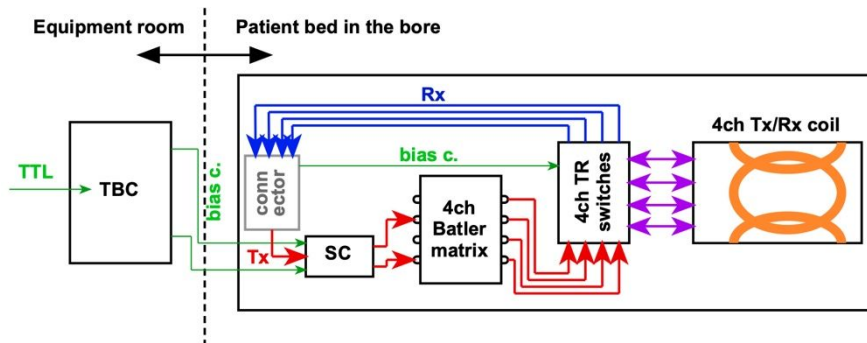


図3 開発した 4ch 送信コイルシステムの構成図

以上のような原理に基づき開発したシステムの構成図を図3に示す。RF モードスイッチング回路は TTL to bias current converter (TBC、図 4a)とスイッチング回路(SC、図 4c, 4d)

に別れ、前者は機械室に、後者はMRI装置のボア内に設置した。スイッチング回路における送信波の振り分け方法には幾つかあるが、本研究ではエネルギー損失が抑えられるよう1/4波長共振を用いた。

システム開発後、Gd造影剤水溶液や果物、野菜等を用いて評価実験を行った。撮像法には、TR毎にRFモードをCPモードとgradientモードを変更するよう開発したfingerprinting撮像を用い、得られたデータからプロトン密度、T1分布、CPモード/gradientモードそれぞれのB1分布の画像を計算した。

4. 研究成果

図4に、開発したシステムを示す。スイッチング回路に1/4波長共振を用いたため、エネルギー損失を20%程度に抑えることが出来た。またButler matrixの精度をネットワークアナライザのS21計測により評価したところ、エネルギー損失は10~33%、位相誤差-3.8~5.5度と十分に高かった。

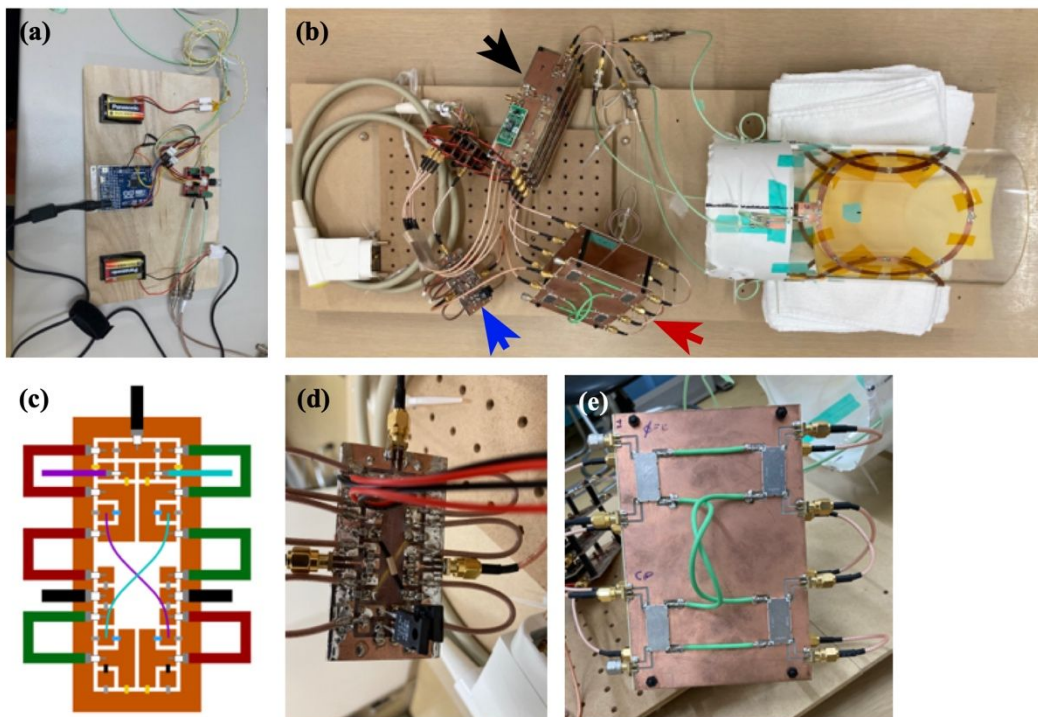


図4 開発した4ch送信コイルシステム。それぞれ(a) TTL to bias current converter, (b) システム全体の写真, (c) スwitchング回路の設計図面, (d)開発したスイッチング回路, (e) 4ch Butler matrix である。

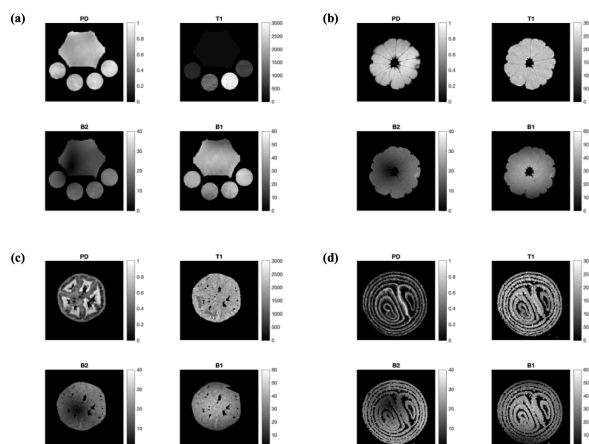


図5 評価用ファントム(a)、グレープフルーツ(b)、トマト(c)、玉葱(d)を用いた実証実験結果。

図 5 に評価実験の結果を示す。図 5a は Gd 造影剤を用いて T1 値を変えた水溶液を複数用意し撮像を行った結果であるが、下段の 2 つの B1 分布が図 1 で示したような 2 つのモードの B1 分布と同じ傾向を示す一方、上段右の T1 分布は不均一な B1 分布と異なり非常に均一な分布となっているのが示された。またこれは、他の果物や野菜で撮影した結果でも同様であった。

これらの結果から、今回開発した RF モードスイッチング技術を用いた送信コイルシステムにより、B1 不均一の影響を大きく低減出来ることを示すことができた。

最後に、送信コイル開発は高周波・高電圧を用いる高リスクな研究であるため、本研究ではコイル開発や安全性に関して高い知見を持つ豪州クイーンズランド大学の Cloos 博士との共同研究として開始したが、COVID-19 により長期に渡って招へいが出来なかったために実験が進まず、当初目的としていたヒトを対象とする実験を行うことが出来なかった。しかし、未だに超高磁場 MRI において大きな問題である B1 不均一に対し、pTx のような非常に高価な装置を用いずとも、均一化出来る可能性を示すことは出来た。

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 浦山 慎一
2. 発表標題 RF mode switching based Tx coil system for B1+ inhomogeneity mitigation at 7T: basic concept and preliminary study
3. 学会等名 国際磁気共鳴医学会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浦山 慎一
2. 発表標題 Non-pTx超高磁場システムにおけるB1不均一性緩和のためのRFモードスイッチング技術：原理及び初期検討
3. 学会等名 日本磁気共鳴医学会
4. 発表年 2023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	赤坂 太 (Akasaka Thai) (00883224)	京都大学・医学研究科・特定助教 (14301)	
研究分担者	福永 雅喜 (Fukunaga Masaki) (40330047)	生理学研究所・システム脳科学研究領域・准教授 (63905)	

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 分担者	松橋 眞生 (Matsuhashi Masao) (40456885)	京都大学・医学研究科・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	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	Queensland大学			