

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 3 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25461820

研究課題名(和文) 圧縮センシング画像再構成のためのリアルタイム磁場計測システムの開発

研究課題名(英文) Real-time field monitoring system for compressed sensing reconstruction on MRI

研究代表者

浦山 慎一 (Urayama, Shin-ichi)

京都大学・医学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10270729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：今や臨床上必須であるMRI装置において、未だに撮像高速化は非常に重要である。近年注目を浴びている圧縮センシング法に代表されるサブナイキスト法は、K空間上をKx,Ky軸に平行にサンプルしないことを前提としているため、そのサンプリング軌道の誤差が画像上のアーティファクトとなりうる。そのため、リアルタイム磁場変動計測システムとしてpick-upコイル型とNMR型の2種を提案し、双方を開発、有用性を評価した。結果、前者よりも後者の方が信頼度が高く、リアルタイム傾斜磁場計測には適していることが明らかにできた。一方で前者にはまだ改善の余地があり、今後の研究開発が必要と考えられた。

研究成果の概要(英文)：On an indispensable scanner MRI in clinic, ultra-fast imaging techniques are still very important. Non-Cartesian, sub-nyquist MR imaging and reconstruction, like compressed sensing, is a promising technique to shorten scan time dramatically without reduction of image quality. However, unlike general MR imaging techniques, the trajectory on the K-space is not parallel to the Kx, Ky direction in this technique so that error in trajectory can be a cause of image artifact. In this study, we developed two types of real-time gradient measurement systems, one is pick-up coil based and the other is NMR probe based as field change monitoring probes, and evaluated their feasibility. As a result, the latter is revealed to be more accurate and reliable comparing with the former. While, on the former, inexpensive and easy-to-develop system, more improvements can be expected so that further study is necessary.

研究分野：MRI物理・工学

キーワード：MRI 圧縮センシング 傾斜磁場コイル 磁場計測

### 1. 研究開始当初の背景

MRI技術の進歩に伴い医療現場からの撮像依頼件数は増加し、撮像の高速化は現在でも非常に大きな問題である。圧縮センシングMRI撮像・再構成法は、より少ないデータ収集量で通常と同等の画像を得ることが出来る手法として、近年、大きく注目されている。

圧縮センシング法では、スパイラル法等のようにK空間内をKx, Ky軸に平行にサンプリングしない上、サンプリング点数も少なく抑えられる。そのため、再構成時には正確な軌道が必須となる。しかしながら、未だ傾斜磁場の完全な制御は容易ではないため、実際の撮像時にはシーケンスプログラムで指定した通りの軌道にはならず、その誤差のために画像上にアーティファクトが生じてしまう。

これらの問題は90年代後半に指摘され、ファントム撮像による軌道の計測法が提案された(Mason GF. 他, MRM, 1997; Duyn JH. 他, JMR, 1998)。また近年では、3方向の傾斜磁場コイルがそれぞれマイクロ秒レベルの異なる遅延を持ち、それらを計測、モデル化することで軌道の推定精度が向上することが指摘された(Peters CD. 他, MRM., 2003; Tan H. 他, MRM., 2009)。しかし一方で、傾斜磁場コイルの温度上昇により撮像中に軌道が変化するため、実測が重要であることも指摘されている(Brodsky EK. 他, MRM., 2009)。

### 2. 研究の目的

撮像時間の大幅な短縮が可能と大きく期待されている圧縮センシング再構成法において、再構成アーティファクト軽減のため重要とされるK空間内での信号サンプリング軌道(以下、「軌道」と略す)を、画像撮像時に同時に計測する高精度磁場計測システムを開発し、有用性を評価する。その基盤技術として、pick-upコイルを用い磁場変動を計測するもの(pick-upコイル型)と、小型NMRプローブを用い磁場強度を計測するもの(NMR型)の2種を検討する。

### 3. 研究の方法

本研究期間中には、pick-upコイル型計測システム2種とNMR型計測システムを1種、開発、実験を行った。

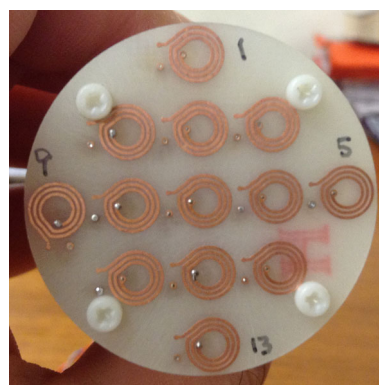


図1 開発した初代pick-upコイル

平成25年度は、pick-upコイル型計測システムを設計し、開発、実証実験を行った。開発したpick-upコイルは、プラスチック基板上にエッチングによりスパイラル状の銅箔回路が7.5mm間隔で15個、プリントされた構造をしている(図1)。スパイラル形状の内径/外径はそれぞれ3mm/5mmで、1mm間隔で0.3mm幅のパターンが切ってある。各コイルは、長さ10mの銅鍍り線によりデジタル電圧計(キーエンス社製NR-ST04)に接続され、ノートPCでUSB経由で信号を読み取る形式とした。その結果、本コイルでMRI装置のマグネット中心から約10cm離れた場所で最大10mV程度の電圧変化が測定でき、本研究が目指す計測系としては十分な信号強度であることが分かった。ただし一方で、コイルと電圧計を結ぶ銅線に鍍り線を選んだものの、MRI装置の振動によるノイズの影響を受けていると疑われること、コイル面とXY平面とのずれが精度を低下させていること、EPI撮像法においてread-out時にphase-encode方向にかけるblip傾斜

磁場を捉え切れていないこと、やはり20kHzの時間分解能では不足すること、等の問題も生じた。

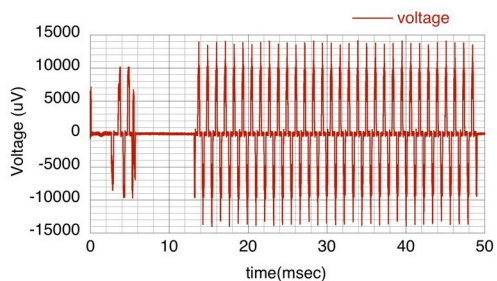
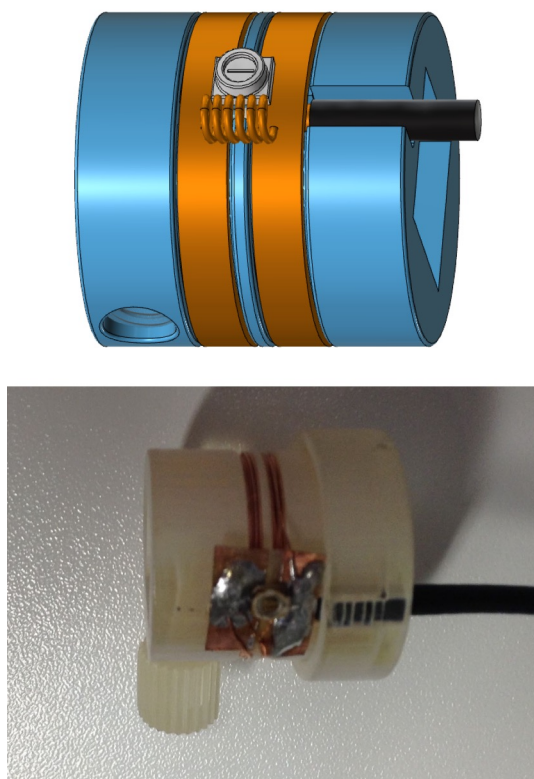


図2 開発したpick-up型コイルの3Dデザイン(上)と本体(中)、及び、計測されたBOLD-EPI撮像時の電圧データ(下)

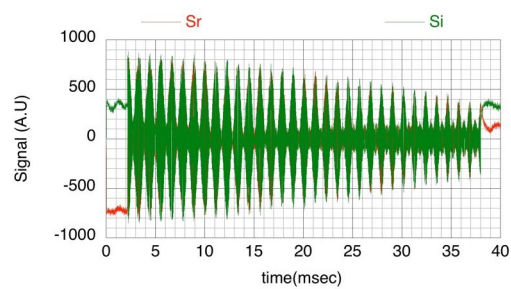
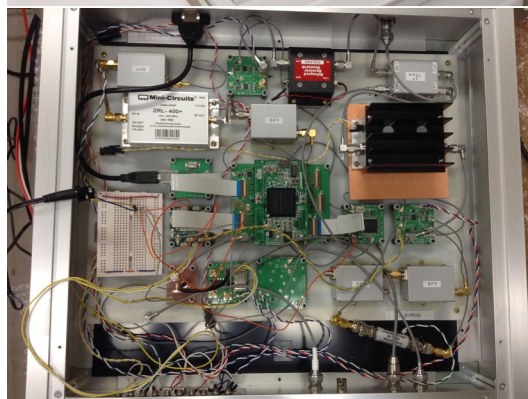
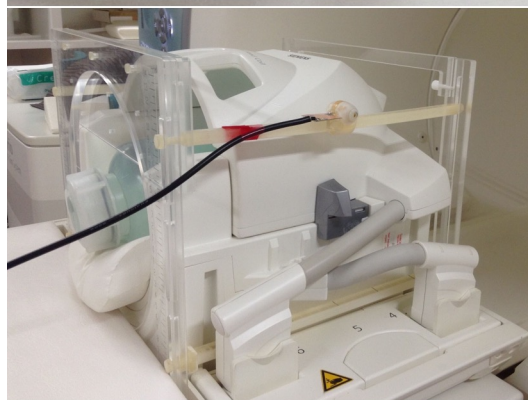
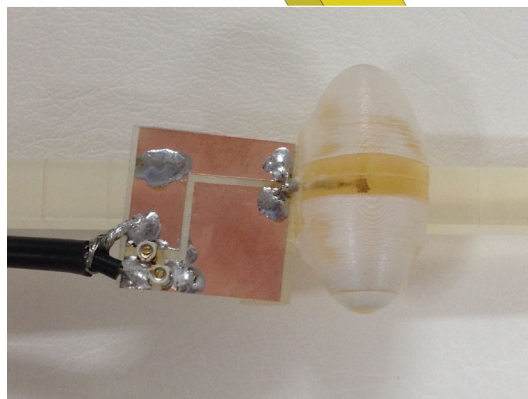
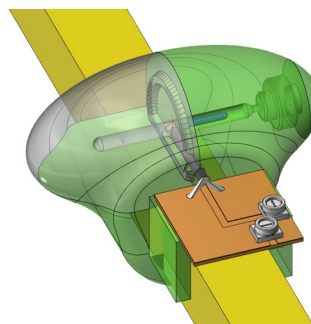


図3 開発したNMR型システムと計測された信号。上から、3Dデザイン、本体、設置状況、スペクトロメータ、及び計測されたBOLD-EPI撮像時のNMR信号。

そこで平成26, 27年度は、更なる信号強度増強のため、コイルの大型化を行った。図2に開発したpick-up型コイル及び得られた信号を示す。コイルは、MR撮像で多用する32ch-phased-arrayコイルを覆うようなアンテナをアクリルで組み、そこに最大8個、240mm以内の間隔で配置できるようにした。各コイルの構造には超電導マグネットにおけるダブルパンケーキ方式を採用し、内径18mm、外径20mm、幅1mmの巻枠に9ターンずつ計18ターン、0.3mm径の銅線を巻いた。またMRI装置からのRF送信波の信号を抑制するため、並列共振回路を設置した。デジタル電圧計としては、更なる高機能なシステム(ナショナルインスツルメンツ社製NI-PXI-6251)を使用した。計測は、最大サンプリングレート1MHz、最高電圧分解能 $1\mu\text{V}$ で行った。

NMR型計測システムに関しては、以下の通りである(図3)。まずは部材の磁気特性、高周波電気特性を十分に調査した上で、使用する部材を選択した。NMRプローブは、アルギン酸ナトリウム溶液の入った内/外径が0.8/1.09mmのキャピラリー管の周囲に無酸素銅線でコイルを巻き、3Dプリンターで造形した容器の中に、フロリナート溶液と共に封入する構造とした。コイルは非磁性同軸ケーブルにより、共振周波数132.2MHzに調整した共振回路と接続し、更にスペクトロメータに接続した。スペクトロメータは、研究分担者である武田が開発したOpenCORE NMR技術を基に作製した(図3)。開発したNMR型システムにより得られたNMR信号を図3下に示す。

開発した両システムを用いて、BOLD-EPI撮像時の傾斜磁場変動を推定した結果を図4に示す。Pick-up型では、得られた電圧信号に電源ノイズを抑制するため遮断周波数65Hzのlow pass filterを適用し、時間方向に積分した。NMR型では、SNR向上のため40回積算したNMR信号を、まず位相信号に変換し、phase-wrappingを施し、時間方向に微分した。また比較のため、シーケンスシミュレータにより得られた傾斜磁場変動も示す。

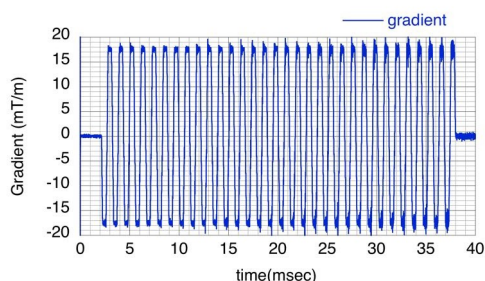
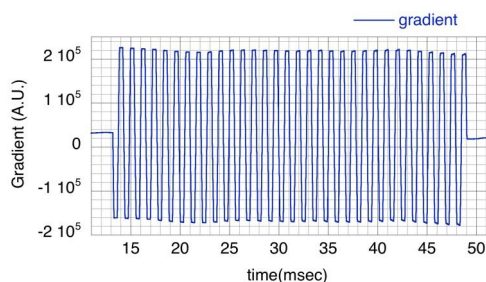
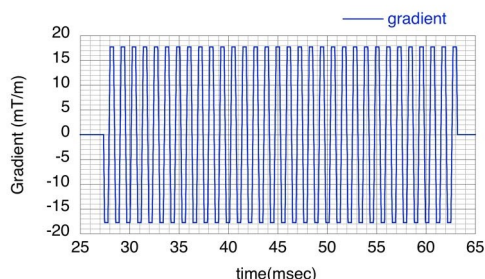
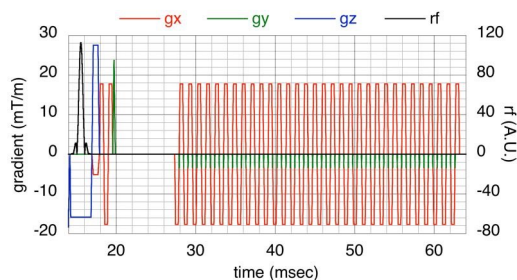


図4 シーケンスシミュレータ及び両計測系により推定されたEPI読み取り時の傾斜磁場変動。上から、シミュレータにより得られた1スライス撮像時のRF及び傾斜磁場変動、EPI読み取り時のみの傾斜磁場変動、Pick-up型により推定された傾斜磁場変動、NMR型により推定された傾斜磁場変動

これらの結果から、両システムに関して以下のような事が言える。

Pick-up型に関しては、得られたデータを積分するため、ホワイトノイズのような正負が釣り合ったノイズは十分に抑制され、スム

一ズな曲線が得られた。しかしその一方で、60Hz及びその高調波の電源ノイズなど、様々な電圧信号がアーティファクトとして混入し、それらを分離する信号処理が必要であることが分かった。また得られる信号は傾斜磁場の絶対値ではなく相対値であるため、信号をX, Y, Zの各成分に分離した上で絶対値を推定する手法を考案する必要があることも明確となった。

NMR型に関しては、傾斜磁場の絶対値も高精度で計測できた上に、Pick-up型のようなアーティファクトも見られなかった。しかしその一方で、40回加算したにもかかわらず、ノイズレベルは高く、更なるハードウェアの改良及び十分な積算回数が必須であることが分かった。

以上をまとめた結果を、表1に示す。

表1 Pick-up型とNMR型の比較

	pick-up型	NMR型
技術的難易度	低い	高い
開発費	低い	高い
傾斜磁場・絶対値or相対値	相対値	絶対値
信号ノイズ比	高い	低い
アーティファクトの影響	受けやすい	受けにくい
最大計測時間	秒単位	ミリ秒単位
RF送信波の影響	並列共振回路にて低減可能	極小コイルにて低減可能
その他の問題点	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測されるデータからX, Y, Zの各傾斜磁場成分を分離する必要がある。</li> <li>様々なアーティファクト成分を分離する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SNRが低く、ハードウェアの更なる改良及び十分な積算回数が必須。</li> <li>RF照射時に傾斜磁場がかかっていると共鳴周波数がずれる、など使用時の取扱が困難。</li> </ul>

#### 4. 研究成果

圧縮センシング MRI 画像再構成法などのサブナイキスト画像再構成のためのリアルタイム磁場計測系を、pick-up コイル型、NMR 型の2種構築し、その有用性を確認した。その結果、当初の予想通り、pick-up コイル型よりもNMR型の方が信頼性は高かったが、前者は安価で簡便なシステムである上に、まだ更なる改良の余地が有り、今後の研究開発が必要と考えられた。

双方のシステムは、いかなる撮像法にも撮像パラメタにも応用可能で有るため、今後も引き続き、両者に更なる改良を加えると共に応用可能性を追求する予定である。

#### 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 1件)

S. Urayama, T. Tosaka, H. Miyazaki, Y. Ootani, S. Noguchi, H. Ueda, A. Ishiyama, S. Nomura, T. Kurusu, and H. Fukuyam, Magnetic field stability and homogeneity of high-temperature superconducting magnet with REBCO tapes measured using dedicated field camera system, International Society for Magnetic Resonance in Medicine, 2016, Singapore

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願 (計 0件)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

浦山慎一 (URAYAMA Shin-ichi)  
 京都大学・学際融合教育研究推進センター・助教  
 研究者番号：10270729

(2) 研究分担者

武田和行 (TAKEDA Kazuyuki)  
 京都大学・理学研究科・講師  
 研究者番号：20379308

森口央基 (MORIGUCHI Hisamoto)  
 駒澤大学・医学健康科学部・教授  
 研究者番号：70296705

(平成 26 年まで研究分担者)

大石直也 (OISHI Naoya)  
 京都大学・医学研究科・助教  
 研究者番号：40526878

(平成 27 年から研究分担者)

(3) 連携研究者

鈴木崇士 (SUZUKI Takashi)  
京都大学・医学研究科・助教  
研究者番号： 10572224

(4) 研究協力者

Michael Poole  
独ユーリッヒ脳医科学研究所・研究員