

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24591802

研究課題名(和文)高磁場MRIにおけるヒト全脳3D画像の不均一補正法の開発

研究課題名(英文)Development for non-uniformity correction of whole human brain image at high field MRI

研究代表者

渡邊 英宏(WATANABE, HIDEHIRO)

国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測研究センター・室長

研究者番号：60370269

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：磁気共鳴診断装置は、臨床医学において必須の装置となっている。静磁場強度を高磁場化することによって、高感度、高解像度、高コントラストの画像が得られることが期待できる。しかし、高周波磁場の不均一分布により画像が不均一となるという問題があった。本研究では、この問題を克服するための方法を提案、改良し、3次元ヒト脳画像の不均一補正を行うための要素技術を開発した。具体的には、我々が提案してきた単一画像面での方法の改良を行い、複数面で適用できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：The magnetic resonance system (MR system) is a powerful tool in the clinical field. Images with higher sensitivity, higher resolution and higher contrast can be achieved at higher static magnetic field strength. However, non-uniformity of image is caused due to inhomogeneous radio frequency magnetic field distribution. In this research, we proposed a non-uniformity correction method to overcome this problem and developed the techniques that are required for correction of the whole human brain image. We previously developed the ratio map method for a single slice correction. In this work, we improved this method and applied it to multiple slice correction.

研究分野：磁気共鳴医学

キーワード：磁気共鳴 高磁場 高周波磁場 画像不均一性 磁気共鳴診断装置 ヒト 脳 高周波磁場コイル

1. 研究開始当初の背景

磁気共鳴診断装置 (MRI 装置) は、生体内に多く存在する水分子の  $^1\text{H}$  原子核のスピンを検出することで体内の形態画像を無侵襲に取得することができる撮像装置である。磁場強度が 1.5T の MRI 装置が臨床診断の主流を占めているが、近年高磁場化が進み、臨床用 3 T 装置も多く利用されるようになってきた。そして、現在では、高磁場化に一層拍車がかかり、まだ研究用ではあるものの 7T MRI 装置へと発展し続けている。この高磁場化にともない、測定法も従来の 2D イメージングから、形態情報の網羅的把握が可能な 3D イメージングへと進化し続けている。

この期待の反面、高磁場 MRI には画像不均一性という特有の問題が立ちはだかる。これは、被検体由来の高周波磁場 (RF 磁場) の不均一分布によって生じ、中央近傍では高信号、周囲では低信号という高磁場特有の不均一画像となって現れる (図 1 には、4.7T MRI 装置で取得したヒト頭部画像を示す。)。この不均一性の原因は、誘電体であるヒト体内での RF 磁場の波長短縮であることが知られている。波長がヒトと同程度の大きさ、あるいはそれ以下となり (例えば、4.7T では波長がヒト脳と同等の 16 cm 程度)、RF 磁場の強度と位相が位置によって変化し、RF 磁場の不均一分布が生ずる。

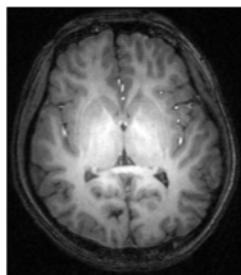


図 1. 4.7T MRI 装置で取得したヒト頭部画像

MRI では、RF コイルから被検体に送信される RF 磁場によって、静磁場中に設置された被検体内の  $^1\text{H}$  原子核のスピンが励起される。励起されたスピンの歳差運動によって RF コイルに誘導起電力が発生して受信 RF 磁場としてとらえられ、磁気共鳴 (NMR) 信号が測定される。つまり、MR 画像信号強度には、コントラスト要因である緩和時間などの  $^1\text{H}$  スピンに関する物理量だけでなく、送信 RF 磁場と受信 RF 磁場が密接に関与している。

この送受信 RF 磁場に関して近年理解が進み、送受信兼用の RF コイルであっても、送信と受信の RF 磁場が相違し、それぞれ回転方向

が反対の RF 磁場成分であるという興味深い現象がわかってきた (引用文献①)。この現象は、送信 RF 磁場をスピンと同じ回転方向を持つ回転座標系上の RF 磁場成分の  $B_1^+$  とおくと、受信 RF 磁場は反対方向成分の  $B_1^-$  と表現できると言い換えることができる。これまでの臨床機磁場強度の 1.5T では、上述の RF 強度、位相の位置依存性は小さく、 $B_1^+$  と  $B_1^-$ 、すなわち送受信 RF 磁場は同一と近似できる。しかし、3T、7T といった高磁場では、これらは相違し、上述の画像不均一の補正には両者の分布が共に必要となる。この RF 磁場  $B_1^+$ 、 $B_1^-$  の中で、送信 RF 磁場  $B_1^+$  はスピンを励起しフリップ角を生じさせる役割を持ち、MRI 装置で測定することができる。しかし、受信 RF 磁場  $B_1^-$  は、スピンの歳差運動とは反対方向の成分であるため、原理的に測定できないという問題があった。これを解決すべく最小コントラストによる受信感度推定が提案されている (引用文献②) が、組織間のコントラスト差を完全には解消できず、画像に補正誤差が生ずるという問題があった。

そこで、我々は、この問題を解決する 2D 比率マップ法を提案してヒト用 4.7T MRI 装置上に組み込み、単一スライス面に対してヒト脳画像の不均一性が補正できることを実証した (引用文献③)。図 2 は、この補正例を示し、ヒト用 4.7T MRI 装置で得られたヒト脳 2D 画像 (a、頭皮部分を除いた脳実質部を示す)、提案した方法を用いて補正した画像 (b)、測定で得られた  $B_1^+$  分布 (c) と、計算で得られた  $B_1^-$  分布 (d) を示している。この方法では、測定可能な  $B_1^+$  分布をヒト脳で実測し、比率マ

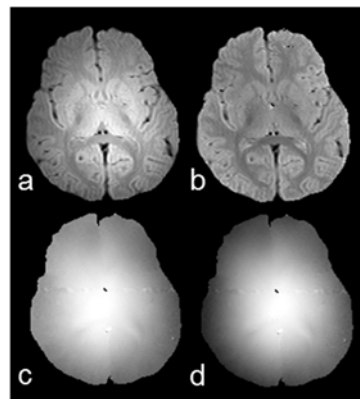


図 2 a: ヒト脳画像, b: 補正画像, c:  $B_1^+$  分布, d:  $B_1^-$  分布

ップを乗ずることで  $B_1^-$  分布を求める。しかし、 $B_1^+$  分布測定で、ノイズの影響のため分布算出が困難であるという問題があった。加えて、RF コイル内の頭部位置が中心よりずれた場合に比率マップ法が利用できないという問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の問題を克服すべく、 $B_1^+$  分布測定法と比率マップ法を改良した方法を提案、開発することを目的とする。加えて、単一スライス面からヒト全脳画像の不均一補正を目指して 3 次元画像不均一補正のための要素技術である上記単一スライス面からシフトしたスライス面に対応した比率マップ法を開発し、評価することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) $B_1^+$ 分布測定法の改良

$B_1^+$  分布測定には位相法（雑誌論文①）を用いている。この方法では、 $90^\circ$  パルス長を  $180^\circ$  パルス長の 2 倍とした Hyperbolic Secant (HS) パルスで構成されるスピネコー (SE) パルスシーケンスを利用する。この条件下では、互いに HS パルス周波数掃引方向を反転させた 1 組の SE シーケンスで得られる信号間の位相差が  $B_1^+$  強度の関数で表すことができる。この関係を利用して、位相差画像から  $B_1^+$  強度分布を求める。この関係では、理論上位相差は正となるが、実際にはノイズ影響のため位相差が負となる場合があった。本研究では、この対策として空間 2 次元多項式を用いたフィッティングから  $B_1^+$  分布を算出する方法を

提案、開発した。図 3 に提案法の概要を示す。

この提案法では、上述の 1 組の SE 画像から位相差画像を算出し、位相差と  $B_1^+$  強度の関数から  $B_1^+$  強度を算出する。次に、このステップで位相差が負のため  $B_1^+$  強度が算出できない領域を切り取る mask 処理を施す。続いて、mask 処理を施した  $B_1^+$  分布に対して、空間 2 次元の高次多項式を用いてフィッティングを行う。この結果、上述の位相差が負のため  $B_1^+$  強度が算出できなかった領域に対して外挿が可能となり、 $B_1^+$  分布が算出できる。

### (2) 比率マップ法の改良

比率マップ法では、測定した  $B_1^+$  分布に比率マップを乗じて  $B_1^-$  分布を推定する。これは、該当する単一スライス面に対して、ヒト脳内の  $B_1^-$  分布と組織水分量（水  $^1\text{H}$  スピン数）とで記述できる画像と、測定した  $B_1^+$  分布とを比較した結果、被検者間で同様な傾向があることを利用している。このため、被検者によらない比率マップ  $\alpha(\mathbf{x})$  を利用して、 $B_1^-(\mathbf{x})$  が、 $\alpha(\mathbf{x})B_1^+(\mathbf{x})$  で近似できことを用いている。

この比率マップは、頭部が RF コイルの中心近傍に設置されている場合に対応している。しかしながら、被検者によって頭部位置が異なる場合が生じるため対策が必要であった。

これに対して、本研究では、RF 磁場不均一分布が被検者由来であることに着目し、頭部の位置に応じて比率マップを平行移動する方法を提案し、開発した。

### (3) シフトスライス面に対する評価

単一スライス面での比率マップ法は、中心近傍のスライス面に対して開発している。そこで、これを 3 次元画像不均一補正に発展させるため、 $B_1^+$  分布測定用 SE シーケンスをマルチスライス対応とし、動作確認を行った。

次に、比率マップが中心近傍の固定スライス位置に対してだけではなく、複数スライス面に対しても適法できるかの評価を行った。このため、上記スライス面からシフトした位置での画像を取得し、均一化補正が可能であるかの評価を行った。

### (4) 実験方法

提案した (1)、(2) の方法と (3) の比率マップの評価のため、被検者測定を行った。測定には、ヒト全身用 4.7T MRI 装置 (Agilent

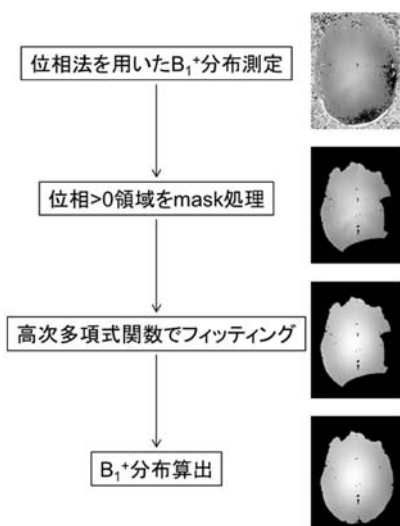


図 3.  $B_1^+$  分布推定アルゴリズム

製)を用いた。RF コイルには送受信兼用 QD TEM コイルを用いた。 $B_1^+$ 測定には、(1)に記載の SE シーケンスを用いた。不均一画像補正のためのシーケンスには、MASE (multiecho adiabatic spin-echo) シーケンスを用いた。この方法では、均一送信が可能な断熱パルスを用いてマルチエコー画像を取得するため、 $B_1^+$ 分布の影響を除くことができる。従って、このマルチエコー画像信号は、 $B_1 M_0 \exp(-TE/T_2)$  で記述できる。但し、 $M_0$  は熱平衡状態の磁化大きさ、 $T_2$  は横緩和時間、 $TE$  はエコー時間を示す。そこで、得られたマルチエコー画像信号を上述の式でフィッティングし、 $B_1 M_0$  画像を算出した。次に、提案法で測定、算出した  $B_1^+$  分布と比率マップ法から求めた  $B_1^-$  分布を用いて、 $B_1 M_0$  画像の補正を行い、 $M_0$  画像を算出した。

#### 4. 研究成果

##### (1) $B_1^+$ 測定法、比率マップ法の改良

図3で示した  $B_1^+$ 分布算出方法を用いた例を図4に示す。MASE シーケンスで得られたマルチエコー画像信号を  $T_2$  減衰モデルでフィッティングして得られたヒト頭部 MASE 画像 (図4 a) では、中心近傍の信号強度が強く、周囲が低信号の高磁場特有の画像不均一性が得られた。この不均一性は、 $M_0$  画像に  $B_1^-$  分布が乗じた結果得られている。図4cには、位相法で求められた  $B_1^+$  分布を示しているが、低信号によりノイズの影響を受け、 $B_1^+$  が算出できない領域が周囲に認められる。この領域を除いて、空間2次元の多項式関数でフィットした結果、6 時関数で充分であった。この結果算出された  $B_1^+$  分布を図4dに示す。提案法で算出された  $B_1^+$  分布の妥当性を示すため、比例マップ法で  $B_1^-$  分布を算出し、これを用いて図4aの MASE 画像の補正を行った結果を図4bに示す。中心近傍の信号強度が強い図4aの原画像に対して、均一な分布を持つ画像が得られた。図4には、均一度が改善したプロファイルも示している。この結果、均一な画像が得られることがわかり、提案法の妥当性が実証できた。一方、中心からシフトした頭部画像に対して、平行移動した比率マップを用いて  $B_1^-$  分布を算出した例でも、十分に均一化補正が可能であった。

##### (2) シフトスライス面に対する評価

次に、中心からシフトしたスライス位置で取得したヒト頭部 MASE 画像 (図5a) の補正を試みた。測定された  $B_1^+$  分布 (図5c) に対して、中心スライス位置での比率マップを用いて  $B_1^-$  分布 (図5d) を算出し、均一化補正を行った (図5b)。この結果、プロファイルの改善でも示される様に、比率マップ法によって均一画像を取得できることがわかった。

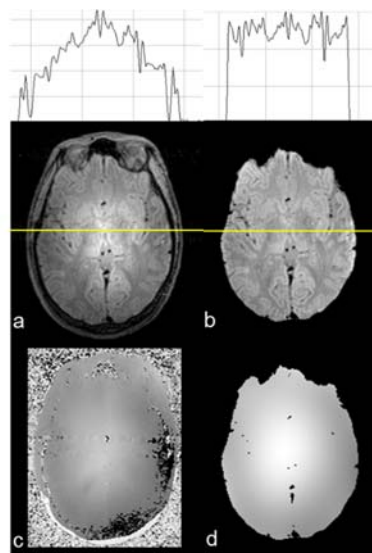


図4. a: ヒト頭部 MASE 画像, b: 不均一補正画像, c:  $B_1^+$  分布測定画像, d: 提案法による  $B_1^+$  分布算出画像

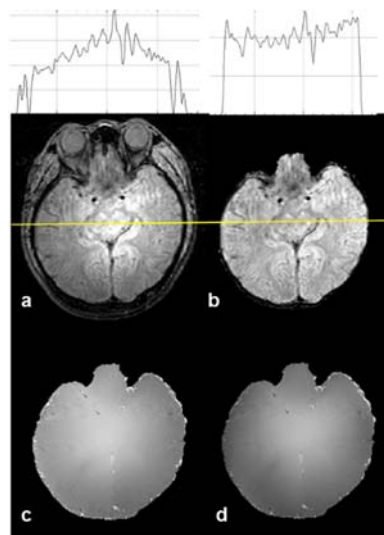


図5. a: ヒト頭部 MASE 画像, b: 不均一補正画像, c:  $B_1^+$  分布測定画像, d:  $B_1^+$  分布算出画像

##### (3) まとめ

$B_1^+$ 測定法の改良によって、高磁場での周囲低信号のため算出できなかった領域での  $B_1^+$  分布を求めることができるようになった。平行移動比率マップ法によって、頭部位置がシフ

トした場合にも対応できるようになった。中心スライス面での均一化補正と同様に、シフトしたスライス位置での比率マップ法適用が可能であった。この結果、提案する比率マップ法を複数スライス面で対応でき、3次元画像均一化補正が可能であることがわかった。

#### <引用文献>

- ① D. I. Hoult, The principle of reciprocity in signal strength calculations - a mathematical guide, Concepts Magn. Reson. 12 (2000) pp. 173-183.
- ② J. Wang, M. Qiu, Q. X. Yang, M. B. Smith, R. T. Constable, Measurement and correction of transmitter and receiver induced nonuniformities *in vivo*, Magn. Reson. Med. 53 (2005) pp. 408-417.
- ③ H. Watanabe, N. Takaya, F. Mitsumori, Non-uniformity correction of human brain at high field by RF field mapping of  $B_1^+$  and  $B_1^-$ , J. Magn. Reson. 212 (2011) pp. 426-430.

#### 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3件)

- ① Lee Y., Han Y., Park H. W., Watanabe H., Garwood M., Park J. Y. (2015) New phase-based  $B_1$  mapping using two-dimensional spin-echo imaging with hyperbolic secant pulses. Magn. Reson. Med., 査読有, 73(1), 170-181  
doi:10.1002/mrm.25110
- ② Watanabe H. (2012) Investigation of the asymmetric distributions of RF transmission and reception fields at high static field. Magn. Reson. Med. Sci., 査読有, 11(2), 129-135  
doi: 10.2463/mrms.11.129
- ③ Watanabe H. (2012) Experimental demonstration of the proportionality of the RF reception field to a complex conjugate of  $B_1^-$ . Magn. Reson. Med. Sci., 査読有, 11(3), 193-196  
doi: 10.2463/mrms.11.193

##### [学会発表] (計3件)

- ① 渡邊英宏, 高磁場 MRI での課題~高周波不均一分布とその対策~. 第19回 MRI 安全性講演会, 2015年3月20日, 全国町村会館(東京都千代田区)
- ② 渡邊英宏, 高屋展宏, 比率マップ法を用いた受信感度  $B_1$  推定による高磁場 4.7T でのヒト脳画像不均一性補正の高

度化. 第42回日本磁気共鳴医学会大会, 2014年9月19日, ホテルグランヴィア京都(京都府京都市)

- ③ 渡邊英宏, 生体など誘電体内の高周波磁場分布に関する実験的および解析的考察. 第40回日本磁気共鳴医学会大会, 2012年9月7日, 国立京都国際会館(京都府京都市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡邊英宏 (WATANABE, Hidehiro)

国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測研究センター・室長

研究者番号: 60370269