

# 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (医 学) 氏名 原田 太以佑

## 学位論文題名

### 7テスラ MRI の多チャンネル送信システムにおける息止め併用 キャリブレーションスキャンによる画像再現性向上の検討 (Improvement of the Reproducibility of Parallel Transmission at 7T by Breath-Holding During the Calibration Scan)

【背景と目的】近年、7Tesla(7T)MRI を主軸とした超高磁場 MRI の開発・普及が研究目的で進んでいる。超高磁場 MRI には様々な利点・欠点が存在し、その中でも静磁場(B0)やRF (ラジオ) 波送信磁場 (B1+) の不均一性は画像に与える影響が特に大きく、信号の不均一性やコントラストの低下の原因となる。通常の RF 波送信システムである直角位相送信(qTx)ではMRI の励起空間をコントロールできないが、多チャンネル送信システム (pTx) では複数の RF 励磁機と送信コイルが独立して RF 波の送信が可能であり、RF シミングでは RF 波の位相と振幅を、RF デザインでは RF 波の形状も最適化して B1+の均一化を望むことができる。RF シミングやRF デザインのRF 波最適化の際にチャンネル毎のB1+マップやB0 マップが必要であるが、安定した方法としてBloch-Siegert 法が用いられている研究が多い。このBloch-Siegert 法では異なるオフレゾナンスのRF 波を用いた2つの位相差分からB1+マップを求めるが、撮像中の呼吸による共鳴周波数の変動の影響を受けてpTx 画像の再現性が低下する可能性がある。

本研究の目的は、7T-MRI でヒトの頭部を撮像する際に、pTx でのキャリブレーションスキャンにおいて息止めと自由呼吸でB0 マップとB1+マップのデータを取得し、B0 マップおよびB1+マップの再現性を評価し、さらにこれらのマップから2つのpTx であるRF シミングとRF デザインによるRF の最適化を行い、グラディエントエコー (GRE) 画像を撮像し、呼吸変動による再現性を評価することである。

【方法と対象】2015年8月から2015年10月の期間中に健常ボランティア9名を、7T-MRI 装置 (Discovery MR 950、GE Healthcare、Waukesha、WI、USA)を用いて撮像した。RF 波の送受信には2チャンネルの直行型ヘッドコイル(Nova Medical、Wilmington、MA、USA)を用い、撮像位置は基底核レベルとした。pTx のキャリブレーションスキャンはGRE シーケンスを用い、TR 33ms、TE 8.3msと9.2ms、FA 20°、FOV 24cm、マトリクス 32×32、スライス厚 5mm、撮像時間は13秒であった。RF 励起の後に水の中心周波数±4 kHz の周波数オフセットのオフレゾナンスパルス 4.0msを印可し、その2つの位相画像の差分からBloch-Siegert 法でB1+マップを作成、B0 マップは異なる2つのTE (8.3msと9.2ms)の位相画像の差分から求めた。pTx による信号評価用のGRE 画像はTR 300ms、TE 10ms、FA 10°、FOV 24cm、マトリクス 256×128、スライス厚 5mm、撮像時間は42秒であった。pTx によるRF の最適化としてRF デザインとRF シミングを用いた。RF デザインではB0 マップとB1+マップから多スポーク法を用い、スポーク数は3に固定して最適化した。スポーク数1の多スポーク法をRF シミングとした。さらに比較のためにqTx でもGRE 画像の撮像を行った。撮像はRF シミング、RF デザインをそれぞれ別セッションとして、再現性評価のため5回繰り返して撮像を行った。関心領域(ROI)解析では自作ソフトウェア(perfusion mismatch analyzer, PMA)を用いて、B0 マップとB1+マップでは1つの楕円形ROI を脳全体が覆われるように配置した。ROI 内の信号平均値を測定し、再現性を5つのセッション間での標準偏差(SD)で評価し、Wilcoxon's sum rank test を用いて自由呼吸と息止めの比較を行った。GRE 画像では9.4mmの円形ROI を同心円状に自動的に配置し、再現性は変動係数(CV)で評価した。pTx ではqTx よりもGRE 画像の信号均一化が期待されるため、信号均一性を画像内の全ROI からCVを算出して評価した。GRE 画像の再現性と信号均一性は多重比較法 (Dwass-Steel-Critchlow-Fligner procedure)

を用いて自由呼吸と息止め、qTx の比較を行った。

**【結果】**B0 マップと各チャンネルの B1+マップにおける 5 セッション間の SD マップでは自由呼吸と息止めの差が視覚的に明らかであり、息止めの SD 値が自由呼吸よりも小さいことが確認された。GRE 画像の信号再現性は qTx が優れていたが、pTx における息止めと自由呼吸の比較では、自由呼吸ではセッション間の変動が強く見られたが、息止めでは qTx に類似した変動の小さな CV マップが得られた。また、RF デザインでは脳中心部分の高信号が qTx と比較して改善され、脳全体の信号分布が均一になったが、RF シミングでは信号の均一化は明らかではなかった。同様の傾向が全ボランティアで見られた。

ROI 解析では、B0 マップと B1+マップのセッション間 SD は息止めと比較して自由呼吸で有意に小さく (B0 マップ  $p < 0.05$ 、B1+マップ  $p < 0.01$ )、B0 マップと B1+マップは息止めにより再現性が有意に向上することが示された。GRE 画像では、pTx の RF シミングのセッション間 CV は自由呼吸が qTx と比較して有意に高く ( $p < 0.01$ )、息止めでは自由呼吸と比較して有意に低くなった ( $p < 0.01$ ) が、qTx より有意に高かった ( $p < 0.01$ )。同様に RF デザインのセッション間 CV では、自由呼吸は qTx と比較して有意に高く ( $p < 0.01$ )、息止めにするすることで有意に低くなったが ( $p < 0.01$ )、qTx よりも有意に高かった ( $p < 0.05$ )。信号均一性を示す画像内 CV は、RF シミングでは自由呼吸と息止めは qTx との間で有意な差が見られず(それぞれ  $p = 0.983$ ,  $p = 0.962$ )、信号不均一性は RF シミングでは改善できないことがわかった。一方 RF デザインでは、画像内 CV は自由呼吸と息止めは qTx より有意に低く (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ )、面内の信号均一性が向上することがわかった。ただし、息止めと自由呼吸の間に有意な差は見られなかった。 ( $p = 0.485$ )

**【考察】**B1+不均一性は 1.5T では深刻な問題にはなり得なかったが、3T や 7T など超高磁場では共鳴周波数が大きくなり、RF 波の波長が短くなることで不均一性が顕在化してきた。撮像後の画像処理によって信号不均一性を除去する方法も発達しており、簡便で使いやすいが、局所的な強い信号欠損がある場合など、画質が逆に下がってしまうことが問題である。そのため画像処理ではなく、撮像時に B1+分布の均一性を向上させる方法が望ましいと言われており、pTx を用いた種々の報告はあるが、呼吸性変動に関する報告は現在までない。

本研究において息止めにより B0 の変動が小さくなることが明らかとなったが、これは fMRI における過去の報告と合致するものであった。Bloch-Siebert 法による B1+マップ作成は正確で効率的な方法として多くの研究で用いられているが、B1+マップでも同様の現象が認められ、7T では呼吸による中心周波数変化が B1+に影響を与えるほど大きくなっているためと考えられた。B0 マップや B1+マップは RF シミングや RF デザインの RF 波の最適化に使われるため、これらのマップの再現性の向上が、pTx の GRE 画像の再現性の向上の重要な要素であると言える。また、pTx の RF シミングでは画像内の信号均一性の改善が見られなかったが、RF デザインでは改善が見られ、RF 波の位相と振幅に加えて多スポーク法によって RF 波の形状も最適化したことが信号均一性の改善に寄与したと考えられた。

**【結論】**7T-MRI でヒトの頭部を撮像する場合、pTx の RF 波最適化計算のためのキャリブレーションスキャン中に息止めをすることにより、呼吸による中心周波数変化が抑制され、B0 マップや B1+マップの再現性が自由呼吸よりも向上する。さらに、これらのマップを用いた pTx の RF シミングや RF デザインで GRE 画像を撮像した場合も、再現性が向上することが明らかとなった。RF シミングでは面内の信号均一性の改善は得られなかったが、RF デザインでは面内の信号均一性も有意に向上した。

現状の我々の 7T-MRI システムで pTx を用いる場合、キャリブレーションスキャン中に息止めをし、RF デザインを用いて RF 波の最適化を行うことが、信号の再現性と面内の信号均一性を改善させる最良の方法と考えられた。この結果が pTx のヒトの撮像への研究のさらなる発展に寄与することが期待される。