

特集 最新の画像診断法とその応用～機器メーカーによる最新情報～

2. 全身用3T MRI装置における開発状況について —小児における有用性を踏まえて—

吉村浩明

シーメンス旭メディテック株式会社 マーケティング本部 MR事業部

The development of whole-body 3T MRI —Its utility in pediatric examination—

Hiroaki Yoshimura

Marketing Division, MR group, Siemens-Asahi Medical Technologies Ltd

Abstract

Recently, there has been a great increase in the use of 3Tesla (3T) MRI in Japan as well as foreign countries, and the installation of 3T MRI exceed 200 in number. With that background there is much improvement of hardware and software in 3T MRI, and the Multi-Transmit RF system which may resolve 3T MRI's problems has been built and launched into the market. We can easily use 3T MRI for whole body examination and acquire high resolution images with high SNR, because there is much improvement of the B1 field non-uniformity and specific absorption rate (SAR) management. (In this article SAR means the electromagnetic radiation absorption rate.) Especially in Pediatric MRI examination, SAR management is the biggest problem.

In this article I describe the future of the new 3T MRI, as well as the new open-bore design magnet and "Multi-Transmit RF system" which have improved the B1 field non-uniformity and SAR management.

Keywords : Computed radiography, Dose control, Contrast noise ratio

はじめに

近年、日本国内においても海外同様にMRI装置の高磁場化が進み、3テスラ(3T)MRI装置の導入・設置台数が飛躍的に増加している。そして、現在日本国内における稼働台数が200台を超えている。その背景には、3T MRI装置におけるハードウェア及びソフトウェアの大きな改善が進み、高磁場MRI装置の特異性を大きく改善できるマルチトランスミット radio frequency (RF) システム搭載の3T MRI装置の市場投入が大きな要因と思われる。

全身領域で、3T MRI装置の高い signal to noise

ratio : 信号対雑音比 (SNR) を活かした高分解能撮像が可能になった理由として、その特異性である電磁波送信磁場 (B1) の不均一性や SAR (=specific absorption rate : ここでは電磁波被吸収比率の意味) 管理の問題が大きく改善されたと考えられる(小児におけるMRI撮影において、特に問題となっていたのがSARの管理であった)。

本稿では、全身用3T MRI装置の特徴を示しながら、課題とされていた電磁波送信磁場 (B1) の不均一性^{1~4)}とSAR管理の問題を克服した次世代型オープンデザインマグネットとマルチトランスミットRFシステムの機能特性について述べる。

3T MRIの特徴について^{4,5)}

3T MRI装置は、静磁場磁束密度(B0)が高くなることによって高いSNRが得られる為(1.5T MRI装置と比較すると2倍のSNRになる)、高空間分解能撮像や撮像時間の短縮が可能となる。一方で、高磁場及び高周波の環境におけるMRI信号の劣化といった問題が発生する。その原因となる高磁場MRIの特異性について下記に示す。

- ・強い磁化率効果の影響により、体幹部のような磁化率の異なる組織では静磁場磁束密度(B0)の不均一性を増強し画像の歪みがより顕著となり、脂肪抑制効果にも影響を及ぼす。
- ・T1緩和時間が軽度延長し(1.5T MRI装置と比較した場合1.1~1.4倍延長する)、T1コントラストがつきにくくなる。
- ・電磁波送信によるSARは静磁場束密度(B0)の二乗に比例増大することにより(1.5T MRI装置と比較した場合、4倍に増加する)、SARの基準値を超えてしまうことが多くなる。そして、SAR上昇に伴い発熱効果も大きくなり、併せて伝導率効果の増大により体内における局所的な熱傷を引き起こす原因ともなる。
- ・電磁波送信は、誘電率効果の増大によりその浸透力(RF penetration)が大きくなり低下し、体幹部における深部(中心部)の信号低下が発生する。また、体内において定常波が形成されることによりMRI信号の干渉が起こり、画像上において信号ムラが出現する。

以上にあげた高磁場MRIの特異性を改善できる技術として、以下に次世代型オープンデザインマグネットとマルチトランスミットRFシステムの機能特性について説明する。

次世代型オープンデザイン マグネットの特徴について

次世代型オープンデザインマグネットの大きな特徴は、直径70cmのオープンボアとボアの形状に沿って円筒形状に磁場生成の均一性を補償していることである。その機能詳細について以下に述べる。

70cmオープンボア設計について

従来装置は、直径60cmのボア径であったが、次世代型オープンデザインマグネットは直径70cmのボア径が採用されており、広い検査空間が確保できている。被検者に対して、閉塞感を大幅に軽減し、気管チューブなどの医療器材の挿入を容易にするだけでなく、被検者及び検査空間へのアプローチも容易にしている為、小児のMRI検査をより安全に行うことが可能となる。マグネットのワイドボア化は各社開発しており、今後の市場傾向と思われる。

円筒形状に磁場生成の均一性を補償する機能について

次世代型オープンデザインマグネットは、静磁場を発生させる超伝導コイルを複数に分け、それぞれの磁場コイルの巻き密度、直径、幅などを調整することで、マグネット内における静磁場の均一性を円筒形状に補償している(Fig.1)。この新しい技術は、静磁場の均一性をより人体の形態に近い円筒形状で最適化することにより、撮像視野(FoV)においてアイソセンターから隅までの全てのスライス面において、画像の歪みや信号欠損をなくすることが可能となる(Fig.2)。小児のような比較的小さな撮影対象の場合、磁化率の変動が大変大きく、画像上におけるMRI信号ムラも顕著となる為、本技術は大変有効な技術と思われる。

マルチトランスミットRFシステムの 機能特性について

高磁場MRI装置において、B1フィールド(電磁

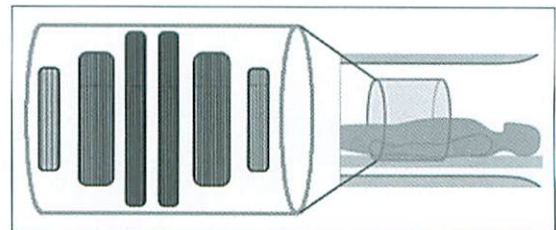


Fig.1 次世代型オープンデザインマグネット
3Tを発生させる超伝導コイルを複数に分割し、それぞれのコイル巻き密度、直径、幅を調整し、円筒型の磁場均一範囲を作り出している。

波送信状態の磁場)の不均一性が課題とされていた。マルチトランスミットRFシステムは、2チャンネルRF送信を可能とするRFシステムを採用しており、シーメンス社製新型3T MRI装置に搭載されている。マルチトランスミットRFシステムが搭載されたことにより、3T MRI装置の特性を十分に活かした、非常に有用な画像情報を得ることができる。高磁場MRI装置における課題等を説明しながら、マルチトランスミットRFシステムの機能詳細について以下に述べる。

高磁場MRI装置における課題について

全身用3T MRI装置では、被写体内でのRF分布が不均一になりやすい為、特に体幹部での信号ムラが課題とされてきた。この電磁波送信の分布ムラは、一つの原因ではなくいくつかの原因が組み合わせられて生じている。

定常波効果 (standing wave effect) について

電磁波送信の分布ムラの原因の一つとして、定常波効果 (standing wave effect) が挙げられる。MRI装置の静磁場強度が高くなるにつれ、電磁波送信における共鳴周波数帯域の波長が徐々に短くなる (Fig.3)。3T MRI装置における共鳴周波数帯域の入水波長は約26cmとなり (1.5T MRI装置では約52cmとなる)、それは定常波を形成し易く、結果的に画像上における信号ムラを発生させる一つの原因となる。

その要因として、体内での電磁波の入射波と反射波 (誘電効果により発生、詳細は後述する) が干渉して、同位相の時にはMRI信号が増強され、逆位相の時にはMRI信号が減弱され、その結果画像上にMRI信号のムラが出現すると考えられている。この現象は、マルチトランスミットRFシステムによる2チャンネルRF送信によって、

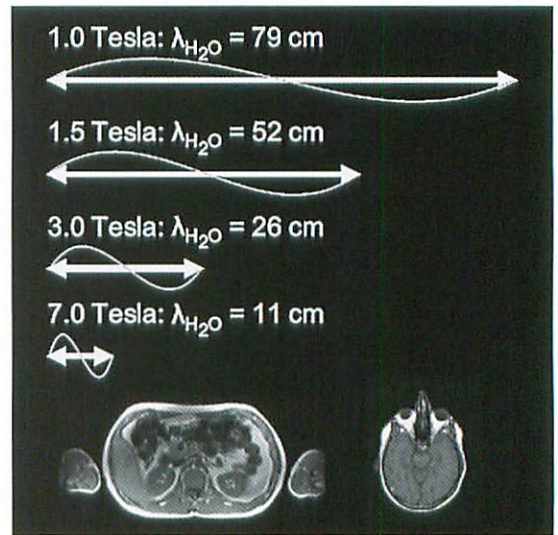


Fig.3 磁場毎の共鳴周波数帯域におけるRF送信波の入水波長の比較
高磁場になるにつれて、共鳴周波数帯域におけるRF送信波の入水波長が短くなることを示している。RF送信波長が被検体長と同じ場合、体内におけるRF送信波の入射波と反射波によって定常波が形成される。

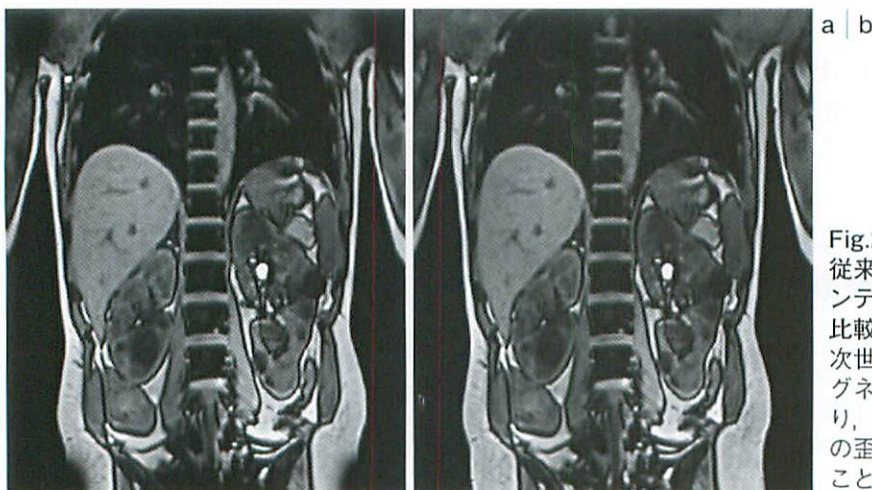


Fig.2 従来法 (a) と次世代型オープンデザインマグネット (b) の比較
次世代型オープンデザインマグネットを使用することにより、撮像野の隅にあった画像の歪みや信号欠損をなくすることができる。

定常波の形成を大幅に低減することにより大きな改善が可能となる。

本現象は、検査対象部位の形状により異なるが主に体幹部において顕著にみられ、小児のような撮影対象が比較的小さい場合はさほど問題となっていない。

誘電率効果 (dielectric effect) について

定常波を形成する要因として、誘電率効果 (dielectric effect) が挙げられる。共鳴周波数帯域の電磁波が高周波になるほど誘電率が高くなり、電磁波送信の体内への浸透力を低下させる大きな要因となる。これは、誘電率上昇によって体表近くに発生する渦電流 (eddy current) が、RFシールド化 (電磁波遮断性が高くなる) を引き起こす為であると考えられている。特に腹水などが溜まっている症例に対しては、顕著にMRI信号の低下として出現する。対処方法として、誘電率を変化させる誘電パッドを利用し、電磁波送信の浸透力を上げる方法などが有効であるとされている。

伝導率効果 (conductivity effect) について

高磁場になるほど、電界が強くなり伝導率効果が強くなる。よって、電気伝導率の高い組織 (脂肪、骨髄は低く、脳、血液、肝臓、脳脊髄液は高い) ほどSARが大きくなり、局所的な温度上昇が形成される。SARの上昇を抑えるには、デューティーサイクルを下げることやエコートレインを少なくするという方法がとられてきたが、いずれも撮影画像の分解能を下げる方法になり積極的な利用は避けたい。そこで、マルチトランスミットRFシステムにより、RFパルスのピークパワーを下げるRFパルス形成によって、SARを下げる事が可能となった。マルチトランスミットRFシステムにより従来機能に比べ約10%のSAR低減が可能となる (Fig.4)。SARは被検者の体重によって、その総量を管理される為小児では撮像シーケンスに対して大きな制限となる。マルチトランスミットRFシステムによってSARを低減することが可能であれば、小児における高磁場MRIにおいて撮像シーケンスの自由度が大きくなり、撮影画像の高画質化を図ることもできると思われる。

マルチトランスミットRFシステムについて

上述したとおり、高磁場MRI装置の特異性及び課題等はいくつかあるが、そのような課題を改善できる技術として、複数チャンネルRF送信システムがある。マルチトランスミットRFシステムは、2チャンネルRF送信を可能としており、RF送信波の位相と振幅をそれぞれ変化させながらB1 Fieldの均一化を図ることが出来る。

マルチトランスミットRFシステムは、2つの送信及び給電ポート (Fig.5では、最適な位相差が120度前後、電圧比が1:3であると示している) において、2チャンネルRF送信波の位相差と強度差についてあらゆる計算⁶⁾を行い、最適な設定がされている。その結果、従来のCP型送信 (RF送信の位相及び振幅が固定されている) に比べ、マルチトランスミットRFシステムはRF送信波の信号ムラが大きく改善されていることが分かる (Fig.6)。

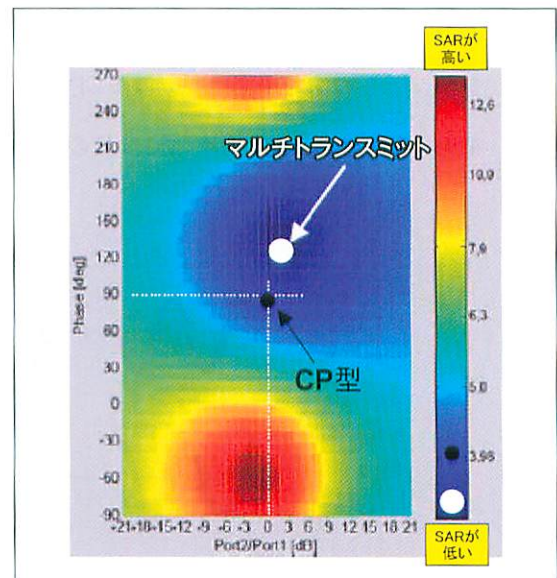


Fig.4 マルチトランスミットRFシステムの最適ポイントを見つけるシミュレーション (SAR) 従来のcircular polarization (CP)[※]送信 (●) に比べ、マルチトランスミットRFシステム (○) はSARが約10%低減している。

横軸: ch1/ch2の出力比。ゼロがCP型
ch1=ch2。

縦軸: ch1とch2の位相差。90度がCP型。
※直交する2つのコイルエレメントから形成されており、直交検波方式のコイル。

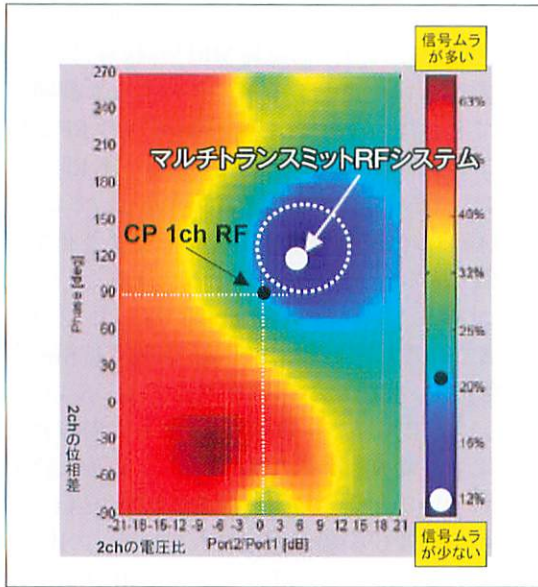


Fig.6 マルチトランスミットRFシステムにおける最適な位相差及び電圧比のシミュレーション(信号ムラ)
 従来のCP送信(●)に比べ、マルチトランスミットRFシステム(○)ムラが大幅に改善されている。
 横軸：ch1/ch2の出力比。ゼロがCP型
 $ch1 = ch2$ 。
 縦軸：ch1とch2の位相差。90度がCP型。

その他

主に3T MRI装置のハードウェアに関する改善等に述べてきたが、撮像シーケンスについても高磁場MRI装置向けに改良が進んでいる。1.5T MRI装置では高分解能撮影を目的とした3D撮影が一般的になっているが、3D撮影による高分解能撮影を目的とした場合、長いエコートレインの設定が不可欠となり、SAR上昇を引き起こし3T MRIにおける利用は大きな制限があった。すなわちそれは、3T MRI装置の最大の特徴となる高空間分解能撮影そのものに大きな制限があった。

リフォーカスアングル減衰型3D撮影アプリケーションの機能特性について⁷⁾

リフォーカスアングル減衰型3D撮影アプリケーションの機能特性は、SE法をベースとしており、T2減衰に従ってリフォーカスアングルを段階的に下げることによりSARを下げ、エコートレイン設定の自由度を上げ高分解能撮影を可能とすることである。そして、予め設定されたタイミングで再度リフォーカスアングルを上げることにより、シグナルを上げることが出来る。結果的にTE設定の自由度が高くなり、短いTEから長いTEまで

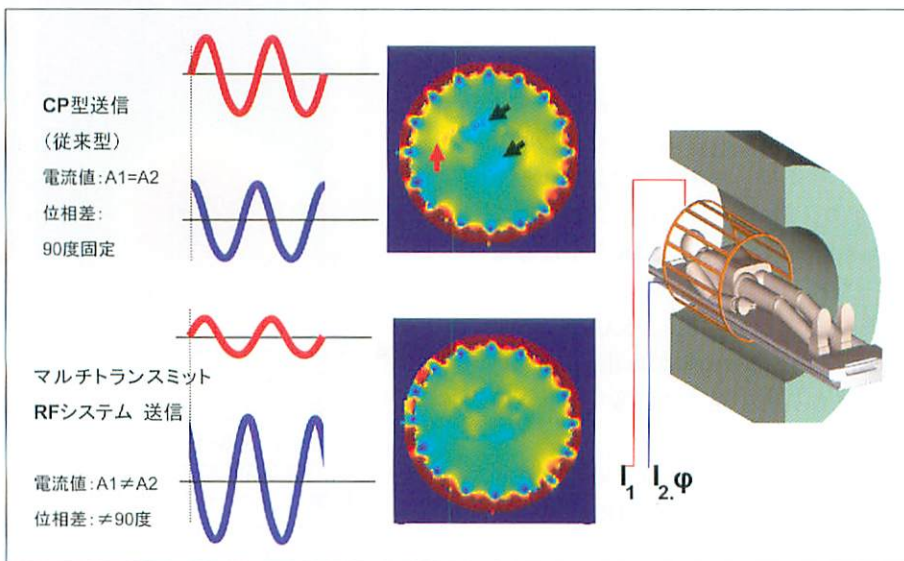


Fig.5 マルチトランスミットRFシステムにおける2チャンネル送信の構造
 I_1 と I_2 の2つのチャンネルにそれぞれ供給する電流の大きさを独立制御。

の設定が可能になり、様々なコントラスト画像が得られる。更に、RF送信不均一による信号ムラを改善できるアディアパティック型RFパルスを利用したリフォーカスアングル減衰型3D撮影アプリケーションといった改良型もリリースされている。小児のような比較的小さい撮影対象を、低いSARで高空間分解能撮影する際は非常に有効な手段と思われる。

結 語

本稿では、全身用3T MRI装置の特徴を示し、課題とされていたB0及びB1 Fieldの不均一を克服した次世代技術、次世代型オープンデザインマグネットとマルチトランスミットRFシステムの機能特性を紹介した。次世代型オープンデザインマグネットによる静磁場の均一範囲の拡大と、マルチトランスミットRFシステムによるMRI信号の均一化やSAR低減が可能となる次世代技術について述べた。

●文献

- 1) Caserta J, Beck BL, Fizzimmons JR : Reduction of wave phenomena in high field MRI experiments using absorbing layers. *J Magn Reson* 2004 ; 169 : 187-195.
- 2) Collins CM, Liu W, Schreiber W, et al : Central Brightening due to constructive interference with, without and despite dielectric resonance. *J Magn Reson Imaging* 2005 ; 21 : 192-196.
- 3) Dietrich O, Reiser MF, Schoenberg SO : Artifacts in 3T MRI : physical background and reduction strategies. *Eur J Radiol* 2008 ; 65 : 29-35.
- 4) Schick F : Whole-body MRI at high field : technical limits and clinical potential. *Eur Radiol* 2005 ; 15 : 946-959.
- 5) Kawahara M : Advantages and Disadvantages in 3T MRI Body Applications (Clinical Technology Course). *Japanese Society of Radiological Technology* 2006 ; 67 : 938-947.
- 6) Nistler J, Diehl D, Renz W, et al : Homogeneity Improvement Using A 2 Port Birdcage Coil. *ISMRM* 2007 (abst), 1063.
- 7) Lichy MP, Mugler JP III, Wietek BM, et al : Magnetic resonance imaging of the body trunk using a single - slab, 3-dimensional, T2-weighted turbo-spin echo sequence with high sampling efficiency (SPACE) for high spatial resolution imaging : initial clinical experiences. *Invest radiol* 2005 ; 40 : 754-760.

1) Caserta J, Beck BL, Fizzimmons JR : Reduction of wave phenomena in high field MRI experiments