

3 テスラ装置を用いた腹部イメージング

塚元 鉄二

GE 横河メディカルシステム株式会社技術開発センター

はじめに

近年の撮像技術の進歩により、腹部イメージングは画質や使い勝手が飛躍的に向上している。例えば、パラレルイメージング^{1),2)}を用いれば、従来よりも高速な撮像が可能で、心臓イメージングや多時相の腹部造影 MRA などに適用されている。また、FIESTA, True FISP といった撮像法は、水成分を強調したコントラストを得たい場合に有用な撮像法である。

一方、このようなトピック的な撮像法でなくとも、例えば TR や TE が短縮されることによりフローアーチファクトが減少する、1 回の息止めで得られるスライス数が若干増加する、といった改良が重要である場合も多い。

このような新しい撮像技術や従来法の改良は、MR 装置自体の改良を土台として成り立っている。ここでは、3 テスラの静磁場強度をもつ MR 装置を腹部イメージングに用いる場合に必要な技術、利点、および課題についてまとめる。

装置構成

ヒト用 3T 装置は、まず頭部用、その後全身用が開発された。当初は研究用途に限られていたが、国によっては既に医療用として用いられ

ている。頭部用と全身用併せて数十台が世界で稼動している。

これら 3T 装置と、これまで高磁場 MR 装置と呼ばれてきた 1.5T 装置との差異は、いうまでもなく静磁場強度と共鳴周波数である。したがって、機器構成上の違いはマグネットおよび RF 系である。RF 系とは送受信機、送受信アンプ、送受切替器、RF コイルなどを含む、B₁ 磁場に関連したハードウェアのことを指す。

このうちマグネットについては、世界に数台しかないもののヒト用ラジボアの 7T マグネットが実際に稼動していることからみても、3T マグネットは技術的に十分に証明されたテクノロジーであることがわかる。3T マグネットは、1.5T マグネットと同様に、設置性を考慮してアクティブシールド型である。

むしろ 3T 装置の腹部イメージングにおいては、広い領域を均一に励起するための RF コイルや、RF 出力制御の最適化の方が問題となる。これは、高周波になるほど表皮効果や浮遊容量による出力のロスなどが顕在化してくるためであり、その克服が技術的な課題となる。これらの課題については後述する。

頭部用と全身用装置の構成上の違いは、広い領域を均一に励起できる埋め込み型の送信又は送受信ボディコイルの有無である*。埋め込み

この総説は、第 29 回日本磁気共鳴医学会大会シンポジウム「これからの腹部 MRI」での講演を中心にまとめたものである。

型ボディコイルを送信コイルとして用いることにより、現在広く用いられているフェーズドアレイコイルによる受信が可能となる。今後の3T装置での腹部イメージングは1.5Tと同様にフェーズドアレイコイルが広く使われていくものと予想される。

一方、頭部用装置においても、RFパワー最小の観点から各対象領域に最適化されたコイルを用いれば、腹部イメージングは可能である^{3),4)}。このコイルは新潟大学との共同開発によるもので、送信効率を最適化し、少ない出力で駆幹部のイメージングができるように設計したものである。巻きつけ型のクワドラチャ送受信で、装着がしやすいよう上部に開閉機構を設けている。このコイルで取得した画像をFig. 1に示す。図に示すとおりSPGR法およびFast SE法(エコートレイン数24)での腹部イメージングが可能であった。

特 徴

3T装置とは、単純に言えば、静磁場強度お

よび共鳴周波数が1.5T装置の2倍の装置である。しかし、動物用実験機も含め、すべての(核)磁気共鳴装置において、静磁場強度は最も基本的かつ重要なパラメータである。そのため、これを改良し大きくすることが様々な面において効果を及ぼす。

まず、一次的な効果としてはS/N比の向上、スペクトル分解能の向上、局所的な磁化率変化への感受性向上、などが挙げられる。

さらに、二次的效果としては、S/N比の向上から派生する空間分解能の向上や、撮像時間短縮効果などがある。腹部イメージングへの応用を考えた場合、これらの二次的效果も有用性としてかかせない。

1) S/N比

3T装置の最大の特徴および利点は、S/N比が高いことである。S/N比は、静磁場強度にほぼ比例して向上する。つまり、3T装置は1.5T装置の2倍のS/N比を有する。

これを空間分解能に換算すれば、ボクセルサイズで1/2となり、また加算平均に要する時間で換算すれば1/4の撮像時間短縮と等価で

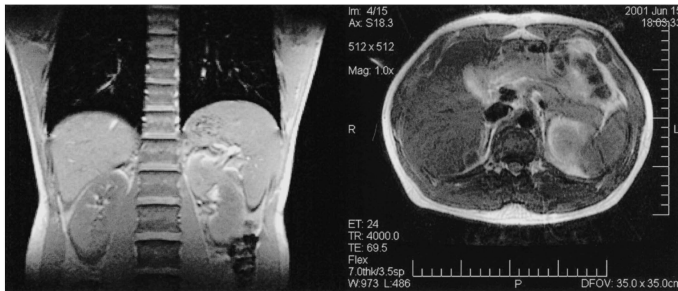


Fig. 1. Left : A coronal abdominal image acquired using a flexible transmit/receive coil. Gradient echo sequence was used. Right : An axial section using the same coil. Fast SE was used (TR 4000 ms, TE 70 ms, echo train 24). By courtesy of Dr. Nakada, Niigata University.

* 出力パワーが異なるため、ボディコイルを駆動するためのアンプや送受信切替器なども頭部用とは異なる。

2001年1月29日受理

別刷請求先 〒191-8503 東京都日野市旭が丘4-7-127 GE横河メディカルシステム技術開発センター 塚元鉄二

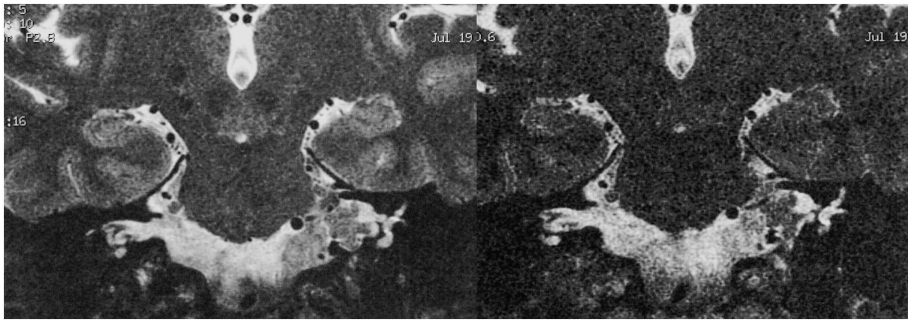


Fig. 2. Signal to noise ratio comparison between 3T (left) and 1.5T (right) using 2D thin slice images. Coronal sections of the brain of same volunteer are shown. *By courtesy of Dr. Lenkinski, Beth Israel Deaconess Medical Center.*

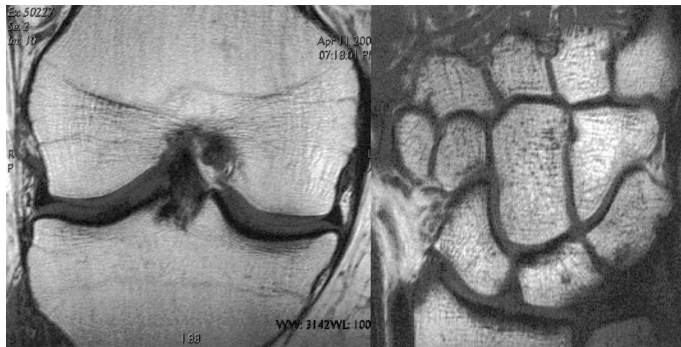


Fig. 3. 3T high resolution images of the knee joint (left) and the wrist (right). *By courtesy of Dr. Lenkinski, Beth Israel Deaconess Medical Center.*

ある。もしくは、空間分解能や時間分解能を一定にして、これまでS/N比が不足して撮像できなかった部位に適用できる。

1.5T装置と3T装置で、同一部位を撮像したイメージをFig. 2に示す。スライス厚1.5 mm, マトリックス512×384である。図に比較するように、1.5T装置では十分なS/N比が得られない場合でも、3T装置ではS/N比が改善されている。

2) 空間分解能

Fig. 2に示すように、3T装置では、薄いスライス厚や大きいマトリックスサイズを用いる

ことで、パーシャルボリューム効果の影響を受けにくく、より微細な構造を観察することができる。

その他の例として、膝関節、手根部のイメージをFig. 3に示す。Fig. 2と同様、非常に細かな構造を、実用的なS/N比の範囲内で撮像することが可能である。

3) 撮像時間

腹部イメージングにおいて、呼吸によるアーチファクトをなくし、安定した画質を確保するためには息止め下での撮像が必要である。このような時間制限のなかで、より多くのスライス

枚数を取得したり、三次元での撮像を行ったりするためには fast gradient echo 法や fast spin echo 法などの高速撮像法が用いられる。

高速撮像を実現するには、勾配磁場系の性能、特にスルーレートが高いことが重要であるが、これは静磁場強度とは直接関係はない。実際、3T 装置では EPI や 3D のグラディエントエコー法など、1.5T とまったく同じ高速撮像法を使用できる。

このような高速撮像法は、一般に S/N 比や空間分解能を犠牲にすることで高速化を図っている。例えば、受信時のサンプリングに要する時間を短縮するためには、サンプリング数を減らすか(空間分解能の低下)、サンプリングレートを上げる (S/N 比の低下) 必要がある。また、最近のトピックであるパラレルイメージングにおいても、その S/N 比は高速化のファクタの分だけ低下することが知られている⁴⁾。

したがって、S/N 比が高い 3T 装置は、高速撮像が必須である腹部イメージングにおいて非常に有利である。今後、パラレルイメージングの高速化ファクタが大きくなるにつれ、本質的に S/N が高いことの利点がより効いてくるものと思われる。

4) コントラスト

各組織の T_1 値、 T_2 値は静磁場強度に依存する。特に生体組織の T_1 値は静磁場を上げると長くなることが知られている⁵⁾。頭部ではより強い T_1 強調画像を得るために、MDEFT 法が適しているとの報告がある⁶⁾。

腹部に関しては、3T 装置による臨床応用が始まったばかりであり、今後病変検出能などの観点から研究が進むものと期待される。例えば、3T 装置は局所的な磁化率の変化に敏感であるが、これは鉄の沈着を伴うような疾患を、より鋭敏に画像としてとらえることができるということである。また、ケミカルシフトによる水と脂肪の周波数差が 1.5T の 2 倍になるため、選択飽和がおこりやすい。腹部の MR スペクトロスコーピーへの応用も期待されている分野であ

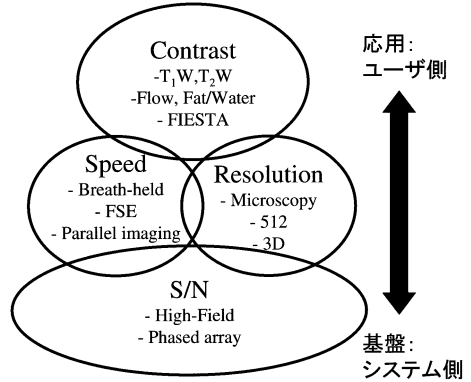


Fig. 4. A simplified conceptual chart of main factorial indices of MR system. By courtesy of Dr. Lenkinski, Beth Israel Deaconess Medical Center.

る。

さらに、In-flow 効果や、造影剤の T_1 , T_2 短縮の効果も従来の装置とは異なると予想される。したがって、様々な疾患の検出に適した、新しい撮像法や撮像プロトコルの最適化などが、臨床応用ますます重要になる。

これまで説明したように、3T 装置の腹部応用には様々な要素が含まれている。さらに、肺野、心臓、肝臓、骨盤領域などの各部位で最適な撮像法の選択、ゲーティングか息止めかの選択、各施設の好みなどを考え合わせると、非常に多くのバリエーションが存在する。

このような複雑な系を、整理し理解する一つのコンセプトを Fig. 4 に示す。

まず、MRI も広い意味で測定器なので、測定器として最も基本的な性能指標である S/N 比が基盤要素となる。次に、撮影装置としての基本性能と考えられる撮像スピード (時間分解能)、空間分解能が次の階層の要素となる。最後に、得られたイメージから、ユーザが病変部位と正常部位を識別するのに十分なコントラストが得られているかどうかという重要な指標がある。

これらの四つの要素は、互いに密接に関係

している。例えば、スピードを犠牲にすれば S/N 比やコントラストを改善できるし、空間分解能を求めればスピードや S/N 比を犠牲にすることになる。

このような概念図を用いることで、例えばパラレルイメージングや FIESTA, True FISP といった技術が、全体のどの部分に着目している技術トピックなのか、ということが理解しやすくなる。

また、このような概念で 3T 装置の腹部イメージングの利点を考えると、基本となる S/N から始まり、ここに示すすべての重要な要素へと波及することが容易に理解できる。

技術的課題

3T 装置で腹部イメージングを行う際、RF による加熱 (SAR) に留意する必要がある。特に、装置側では信頼性のあるモニタリングと、万が一安全基準を超えた場合に作動するインターロック機構が必要である。

送信周波数が高くなると、浮遊容量によるエネルギーの周囲への分散や、人体の表皮効果などにより、必然的に送信されるパワーは大きくなる。人体へ吸収されるエネルギーが規制値、例えば電子・電気機器の国際基準である IEC や、各国で定めている規制の範囲内であること、若しくは治験等により安全性を検証することが必須である。

次に、送信 RF の場所依存性、つまり B_1 分布が、できる限り均一であることが望まれる。Fast SE など複数の反転パルスを用いる場合には B_1 分布がより顕著になると予想される。

ただし、埋め込み型のボディコイルで送信を行ったイメージからは、診断の妨げになるほど大きな不均一はみられない。これは腹部には様々な組織が含まれており、なだらかな不均一が視覚的に目立ちにくいこと、および不均一な構造のために高周波特有の定在波がたちにくいこと、という二つの効果が考えられる。いずれ

にせよ、腹部では、より均一な組織を対象としている頭部よりも B_1 分布の影響は小さいようである。さらに、腹部ではフェーズドアレイコイルを用いた受信を行うことが多く、その場合は信号値補正を行うので、さらに不均一は目立たなくなる。

一方、静磁場に関する B_0 不均一については、組織境界での磁化率効果のために不均一は大きくなることが予想される。したがって、対象に応じてアダプティブな補正、高次のシミングが可能であることが必要となる。

勾配磁場コイルについては、電流を変化させたときにコイルに働く力は大きくなるため、機構的に頑丈でなければならない。また、振動による騒音も大きくなるため、その対策も必要である。

最後にソフトウェア、特にデータ収集の重要な要素であるパルスシーケンスの 3T 装置での最適化が挙げられる。高速撮像法は言うに及ばず、様々な部位や病変検出に適した撮像法の工

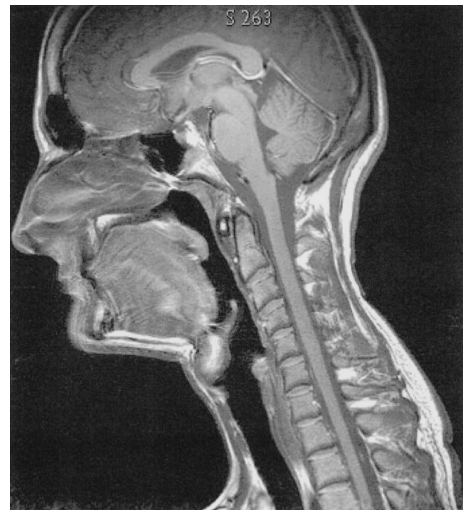


Fig. 5. Sagittal section of the human body acquired by whole body, transmit/receive coil. By courtesy of Dr. Lenkinski, Beth Israel Deaconess Medical Center.

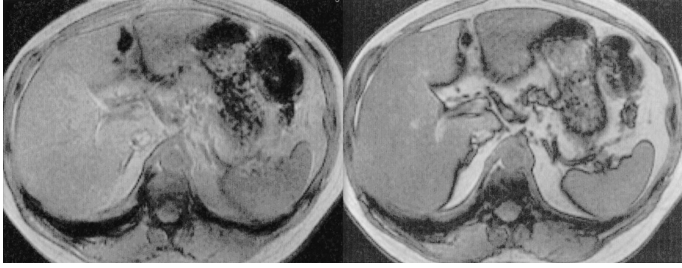


Fig. 6. Axial images of the human body acquired by whole body, transmit/receive coil. Left is fat/water in phase, and right is out of phase image. *By courtesy of Dr. Lenkinski, Beth Israel Deaconess Medical Center.*

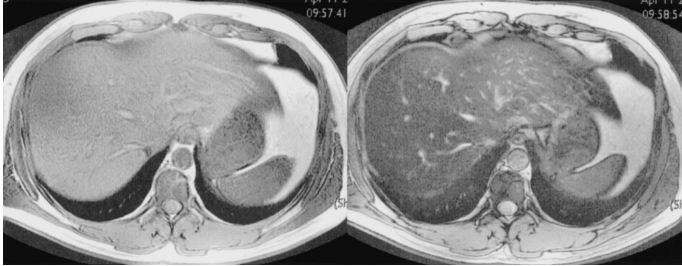


Fig. 7. Axial images of the human body acquired by torso phased array coil for receive and whole body coil for transmit. Left is fat/water in phase and right is out of phase. *By courtesy of Dr. Lenkinski, Beth Israel Deaconess Medical Center.*

夫がMRの発展を支えてきた。3T装置の腹部イメージングへの応用は始まったばかりであり、3T装置に適した撮像法が新たに開発され、また、それをベースに多くのクリニカルリサーチが今後なされるものと期待される。

イメージ例

埋め込み型ボディコイルを使用して得られたイメージを示す。Fig. 5, Fig. 6は、それぞれボディコイル送受信によるサジタル画像と dual echo の fast gradient echo によるアキシャル画像である。Fig. 7は、ボディコイル送信フェーズドアレイ受信による画像である。骨盤領域のイメージを Fig. 8 に示す。

これらの画像はすべて、Beth Israel Deaconess Medical Center から提供されたものである。

図に示すように、3T装置では十分なS/N比、高空間分解能の腹部イメージングが高速かつ十分なコントラストをもって撮像可能である。

まとめ

3T装置を用いた腹部イメージングの最大の利点は、S/N比が向上することにある。システムの基本性能の指標であるS/N比の向上は、その他の重要な指標である、撮像スピード、空間分解能、コントラスト（厳密にはC/N比）に波及する。S/N比の利点を、そのま

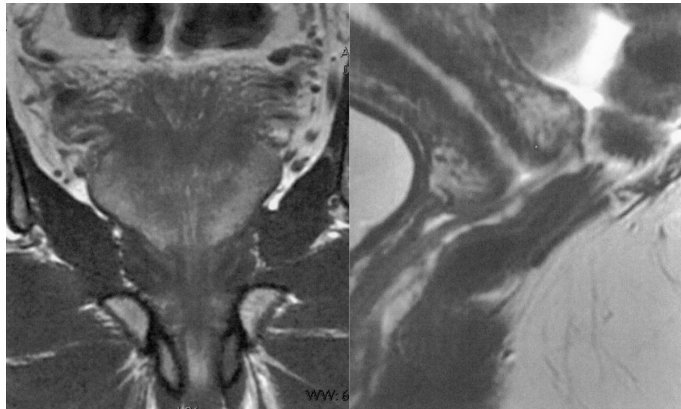


Fig. 8. 3T pelvic images, prostate (left) and uterus (right). *By courtesy of Dr. Lenkinski, Beth Israel Deaconess Medical Center.*

まイメージのS/N比を上げるために利用するか、撮像スピードの向上に利用するか、空間分解能の向上に利用するかは、撮像部位やアプリケーションに応じて、ユーザが任意に選択できる。

3T装置の腹部への応用は、海外では既に臨床適用が開始されているものの、まだ黎明期といえる段階である。よって、今後、撮像法の最適化やクリニカルリサーチが盛んに行われ、多くの研究報告がなされるものと予想される。

将来的には、従来の装置では困難であった分野への応用が期待される。例えば、分子レベルの情報をより反映した形で画像を提供する分子イメージング、生体でのマイクロイメージング、周波数分解能を生かした drug delivery のモニタリングなどがある。

生体を対象とする装置である以上、安全性に十分配慮することはもちろんであるが、このような新しい分野に挑戦するためには、高磁場化の試みは必要不可欠である。

文 献

- 1) Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MB, Boesiger P : SENSE : sensitivity encoding for fast MRI. *Magn Reson Med* 1999 ; 42 : 952-962
- 2) Sodickson DK, Manning WJ : Simultaneous acquisition of spatial harmonics (SMASH) : fast imaging with radiofrequency coil arrays. *Magn Reson Med* 1997 ; 38 : 591-603
- 3) 中田 力 : 3.0T装置の臨床. *日磁医誌* 2001 ; 21 : 161-169
- 4) 田村 充, 奈部谷章, 松田 豪, 塚元鉄二, 中田 力 : 3T MRI用広径QD送受信コイルの検討. *日磁医誌* 2000 ; 20 (Suppl) : 157
- 5) Bottomley PA, Foster TH, Argersinger RE, Pfeifer LM : A review of normal tissue hydrogen NMR relaxation times and relaxation mechanisms from 1-100 MHz : dependence on tissue type, NMR frequency, temperature, species, excision, and age. *Med Phys* 1984 ; 11(4) : 425-448
- 6) Ugurbil K, Garwood M, Ellermann J, et al. : Imaging at high magnetic fields: initial experiences at 4T. *Magn Reson Quart* 1993 ; 9 : 259-277

Abdominal MR Imaging on 3T

Tetsuji TSUKAMOTO

*MR Laboratory, Advanced Technology Center, GE Yokogawa Medical Systems
4-7-127 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-8503*

The main advantage of using 3T MR for abdominal imaging is the higher signal to noise ratio that can be achieved as compared to conventional clinical scanners. This advantage can be used for high spatial resolution imaging and fast imaging, such as high band width acquisitions and parallel imaging, while maintaining reasonable signal to noise ratio of the images.

Since abdominal imaging on 3T has only recently become available, its clinical applications are still in the early stages. Therefore, both the optimization of miscellaneous pulse sequences and imaging protocols will need to be focused on in clinical research and case studies. High field MR technology is the key to unveiling more functional and molecular level information *in vivo*. This is not attainable on 1.5T or lower field MRI systems.