

新型オープンMRI AIRIS Elite の開発

Development of a New Open MRI System AIRIS Elite

川崎 真司¹⁾ Shinji Kawasaki
伊藤 幸雄²⁾ Yukio Itou
善方 睦¹⁾ Mutsumi Yoshikata
宮脇 昇一¹⁾ Syouichi Miyawaki

鈴木 克法²⁾ Katsunori Suzuki
上遠野悦慈²⁾ Etsuji Katono
斎藤 安正¹⁾ Yasumasa Saitoh

¹⁾株式会社日立メディコ MRシステム本部

²⁾株式会社日立メディコ ソフト開発本部

新型0.3TオープンMRI AIRIS^{*1} Eliteを開発した。非対称2本柱のガントリ基本構造は従来装置であるAIRIS-II Comfortと同じだが、より強力な傾斜磁場発生系(最大傾斜磁場強度21mT/m、スリューレート55T/m/s)と高速なコンソール(Dual CPU)を有する。さらにこれまで0.3Tなどの中低磁場装置では実用化困難とされたCHESS型RF FatSat機能を実用化した。

We developed a new 0.3T MRI system, AIRIS^{*1} Elite. This system has the same basic gantry design, which is an asymmetric 2 pole magnet system as conventional AIRIS-II Comfort. But it has much stronger gradient field system, max. strength=21mT/m and max. SR=55T/m/s, and faster Console (Dual CPU). Besides we realized the CHESS type RF FatSat function, which has been assumed as impossible to be practical on lower field MRI system, on this 0.3T MRI system.

Key Words: Open MRI, Dual CPU, RF FatSat

1. はじめに

1987年に初めてMRP-20を発売して以来、当社では永久磁石を用いたオープンMRIを中心に開発、製品化を行ってきた。オープンという点についてはMRP-20の4本柱形状から始まり、真のオープン形状であるAIRIS^{*1}/AIRIS-IIの非対称2本柱、そして究極のオープン形状である1本柱のAPERTO^{*2}へと大幅な進歩を遂げてきた。

これらの製品は市場からも高く評価され、2004年度実績では国内オープンMRIの販売台数の実に84%が、また国内MRI販売台数全体でも28%が当社オープンMRIで占められている。

そして搭載機能やアプリケーションについては、ルーチン検査においては高磁場装置に見劣りしない機能を備えるべく開発し、実装を継続してきた。近年では高速に高SNRの画像が得られるBalanced SARGE、強制的に信号を回復させることにより短TRでも良好な画像が得られるDriven Equi-

librium FSE(DE FSE)などの新シーケンスやVolume Rendering、Curved MPRなどの画像処理機能、Image Quality Graphなどの使い勝手を追及した機能などを開発した。

その結果、MR SpectroscopyやFunctional MRIなどの特殊機能を除けば、従来機種であるAIRIS-II Comfortでも臨床では高磁場装置と比べても遜色ない機能が搭載されている。

しかし、次の点についてはまだ改善の余地があり、課題となっていた。

- (1) 高速/高機能撮像
- (2) 画質向上
- (3) CHESS型脂肪抑制機能

これらの課題において、(1)は短TR/短TEや心臓息止め撮像を実現するだけでなく、Balanced SARGEシーケンスの画質向上にも有効である。(2)は高速/高機能撮像や静磁場

均一度の大幅な向上などによる各種シーケンスの画質の改善である。(3)は高磁場装置では日常的に用いられているが、これまで0.4T以下の静磁場強度を持つオープンMRIでは実用化していないCHESS型の脂肪抑制機能である。

本稿では上記の高速／高機能化、画質向上とCHESS型脂肪抑制機能(以下、RF FatSatと表記する)を実現した0.3T永久磁石方式オープンMRI AIRIS Eliteについて概説する。

2. AIRIS Eliteの概要

AIRIS Eliteの外観写真を図1に示す。非対称2本柱の基本形状は従来のAIRIS-II Comfortと同様であるが、よりシャープなイメージのデザインにした。高速撮像、高機能撮像に対応するため、傾斜磁場系は従来装置と比べ大幅にパワーアップし、最大傾斜磁場強度21mT/m、スリューレート55T/m/sとした。

寝台はAPERTOと同様にガントリ内で横移動が可能なラテラルスライドテーブルタイプのものを採用した。

また、MRI装置の制御や後処理などを行うコンソールは従来よりも高速なDual CPUを搭載し、より効率的な検査を可能としている。

AIRIS Eliteの主要諸元を表1に示す。

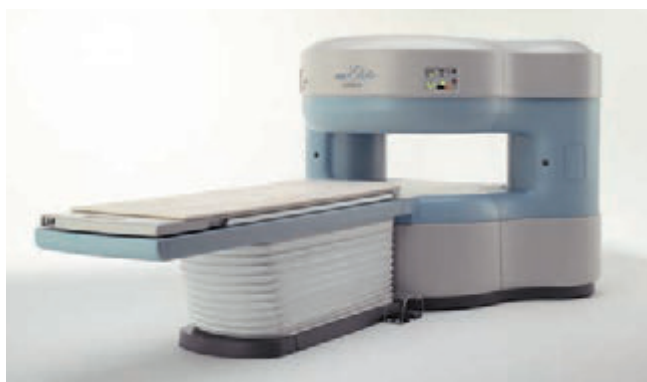


図1：AIRIS Elite外観

表1：主要諸元

項目	仕様
静磁場強度	0.3T
磁石方式	永久磁石垂直磁場
傾斜磁場強度	21mT/m
スリューレート	55T/m/s
操作卓	Dual CPU搭載
	メモリ：2GB
寝台	ラテラルスライドテーブル
	ガントリ内横移動可能

3. 開発の課題

前述の(1)高速／高機能撮像、(2)画質向上、(3)CHESS型脂肪抑制機能を実現するための技術的課題について概要を以下に記す。

(1) 高速／高機能撮像

高速撮像や短TR、短TEを実現するためには、強力な傾斜磁場パルスが発生するシステムが必須である。高速／高機能撮像を行うためには多数の傾斜磁場パルスを短時間に多数回印加する必要があり、傾斜磁場が所定の強度に達するまでの所要時間は信号計測の所要時間に直結する。

この課題を解決するため、AIRIS Eliteでは表1に示す強力な傾斜磁場パルス発生系を装備した。これにより最短TR = 4ms、最短TE = 2msを実現している。

(2) 画質向上

各種シーケンスで画質向上を実現するためには、いくつか改善するポイントがある。

(a) 信号読出しバンド幅の低減

前項で記した強力な傾斜磁場系は通常画像の画質向上にも有効である。傾斜磁場が所定の強度に達するまでの時間を短縮することで時間に余裕ができ、その余裕時間を信号リードアウトに振り向けることで信号読出しバンド幅を低減し、SNRを改善することが可能になっている。

(b) 静磁場均一度向上

MRIの画像は均一な静磁場が存在することが前提であり、磁場不均一は画像の歪みや信号の低下などにつながる。AIRIS-II Comfortなどの従来装置でも必要十分な均一度を備えているが、AIRIS Eliteではさらに画質向上を目指し高次シムコイル(Super Shim)を備え、撮像時の静磁場均一度の大幅な向上を実現した。

(c) 渦電流補正

MRIでは傾斜磁場パルスのON/OFFに伴って発生する渦電流を避けることができず、いろいろな画質劣化を引き起こす。また渦電流は強力な傾斜磁場パルスを使用するほど顕著に発生するため、特に高速／高機能撮像での画質向上に障害となる。従来装置に比べて強力な傾斜磁場系を備えたAIRIS Eliteでは、渦電流の発生を抑制／補正する機能が重要となる。

当社の永久磁石MRI装置は従来から渦電流の発生しにくい素材を用いてガントリを構成しているが、これに加えてAIRIS Eliteでは渦電流の発生を予め計測し、補正する機能を備えた。これにより渦電流の影響は大幅に抑制された。

(d) 周波数経時変化抑制

永久磁石の特性として、磁石温度の変化に影響されごくわずかだが静磁場強度が変化する。AIRIS Eliteは前述のように強力な傾斜磁場系を備えており、傾斜磁場コイルに流れる電流による発熱で生ずる磁場変動を補正して、静磁場強度の安定化を図る必要が出てきた。このためAIRIS Eliteでは共鳴周波数の変動をモニターし、撮像中の周波数を一定に保つ制御機能を備えた。

以上の技術開発により、AIRIS Eliteは各種画像の画質が従来装置と比べ、格段に向上している。またこれらの成果は後述のRF FatSatの実現にも必須のものである。

(3) CHESS型脂肪抑制機能(RF FatSat)

RF FatSatを実現するための課題はあるが、その説明の前にRF FatSatの概要とこれまで0.4T以下の磁場強度の装置

でRF FatSatの実現が困難であった理由を簡単に述べる。

表2にMRIで用いられる主な脂肪信号抑制法とそれぞれの特徴を記す。

表2：各種脂肪抑制法比較

脂肪抑制法	長所	短所	中低磁場
STIR法	磁場不均一の影響なし	SNR低下 造影検査不可	製品化済み
水脂肪分離法	高SNR	シーケンス/条件 制約あり 再構成時間要	製品化済み
RF FatSat法	コントラスト自由度高 造影検査可能	静磁場均一度要	困難

STIR(Short Tau Inversion Recovery)法はIR法のTau(=Inversion Time)を脂肪信号が消失するタイミングに合わせる手法であり、静磁場不均一に強い特長があるが、画像のSNRが低下したり、造影検査に使用できないなどの短所がある。DIXON法の改良法である水脂肪分離法(当社名称：FatSep[®]S、FatSepG、FatSepF)は脂肪信号の抑制能が高く、画像SNRも良好であるが、適用シーケンスおよび条件に制約がある。

これらの手法に対してRF FatSat法は任意のシーケンスに適用可能であるため、コントラストの自由度が高く、また造影検査への適用も問題ないが、高い磁場均一度を必要とする。

次にRF FatSat法の概要を図2に示す。

図2(a)に水信号(一般組織の信号)と脂肪信号(脂肪組織の信号)の周波数特性を示す。両者の周波数は3.5ppmの差があるため、両組織の信号は図のように分離した周波数分布となる。この時、磁場強度が1.5Tであれば3.5ppm = 225Hzであり両者の周波数差は十分に大きい。磁場強度が0.3Tの場合には3.5ppm = 45Hzと小さくなる。

これに対しRF FatSatを実施するには、図2(b)(c)に示すように所定の周波数分布を持つ抑制パルス(周波数選択的RFパルス)を照射することで脂肪信号のみを選択的に抑制する。

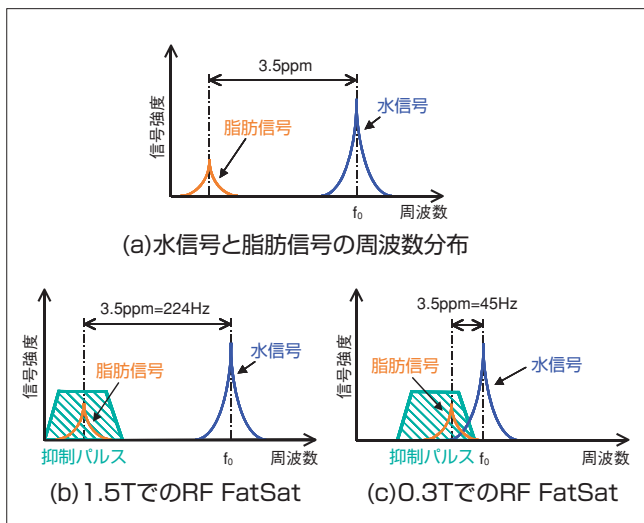


図2：RF FatSatの概要

この際、1.5Tでは同図(b)のように十分に余裕を持って脂肪信号だけを抑制することが可能だが、0.3Tでは水信号と脂肪信号の差が小さいためいくつかの課題を克服する必要がある。

従来、0.4T以下の磁場強度でRF FatSatの実現が困難であったのは、これらの技術課題を克服できなかったことが原因である。

以下、RF FatSatを実現するために克服する必要のある技術課題と対応方法について説明する。

(a) 静磁場均一度向上

RF FatSatを実現するためには、まず必要なことは高い静磁場均一度である。図2(c)において静磁場不均一により、ある位置での静磁場強度が若干高い場合には水/脂肪信号は高い側(右方)に移動し、脂肪信号が抑制パルスの周波数領域から外れるため脂肪信号は抑制されない。一方、別の位置で静磁場強度が若干低い場合には水/脂肪信号は低い側(左方)に移動し、水信号がRF FatSat領域に入ってくるため、水信号も同時に抑制されてSNRの低い画像となってしまふ。

前述のようにAIRIS Eliteでは静磁場均一度を向上するために高次シムコイル(Super Shim)を搭載し、磁場均一度を高く保つことを可能にして課題を解決した。

(b) 周波数経時変化抑制

AIRIS Eliteは強力な傾斜磁場系を備えたことにより発熱量が増大するため、周波数依存度の高いRF FatSatでは無視できない。撮像中に磁石温度が上昇すると、抑制パルスと水/脂肪信号の関係は水/脂肪信号の周波数が抑制パルスに近づいていく方向に変化するため、水信号まで抑制してしまうことになる。

この静磁場変動を補正するため、AIRIS Eliteでは周波数の経時変化をモニターし、磁場強度を一定に保つ制御を行うことでこの課題を克服している。

(c) 渦電流補正

渦電流が発生すると、本来想定したものとは異なる磁場の状態が生じる。この結果、RF FatSatの脂肪抑制効果が低減する。これに対し、AIRIS Eliteではこの渦電流の発生状況をあらかじめ計測し、傾斜磁場パルスに応じた制御をすることで渦電流の影響を抑制している。

(d) その他

(a)~(c)のほかにも強磁性体のヒステリシス特性などいくつかの技術課題があった。ここでは説明を省くが、技術的に解決を図りAIRIS EliteのRF FatSat機能が完成した。

4. 画像例

以下、AIRIS Eliteを用いて撮像した健常者の画像を示す。

(1) 頭部ルーチン画像

図3に左から頭部のT1強調像、T2強調像、FLAIR像を示す。SNR、コントラストともに良好な画像である。

(2) 頸椎画像

図4は左から頸椎矢状断のT2強調像、T1強調像である。図5は同じく頸椎短軸断のT2強調像であるが、左がRF Fat-

Satなし、右が有りの画像である。気道などにより磁場が乱されるために高磁場装置では良好な脂肪抑制が困難な場合もあるこの部位において、良好な脂肪抑制効果が得られている。これは磁場が高磁場装置と比較して低いためにSusceptibilityの影響が小さいことが幸いしている。

(3) 腰椎画像

図6は腰椎短軸断T2強調像でRF FatSatを併用した画像である。皮下および腹腔内の脂肪が良好に抑制されていることがわかる。

(4) 膝画像

図7は膝矢状断のT2強調像でRF FatSatを併用した画像である。脂肪が抑制され、関節軟骨が明瞭に区別されている。

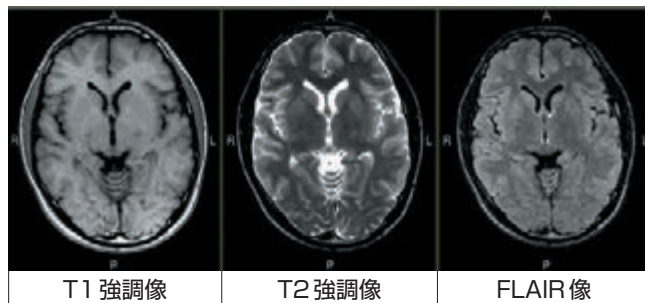


図3：頭部ルーチン画像

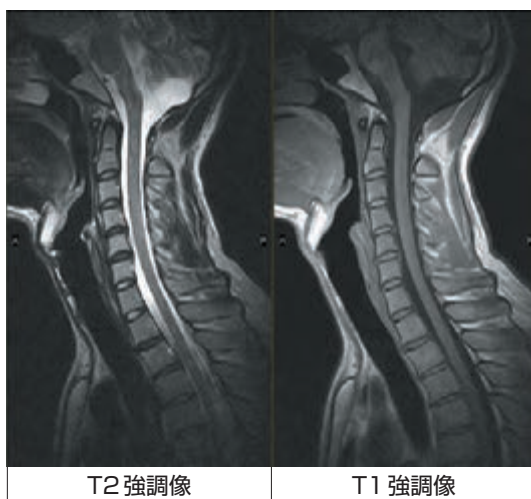


図4：頸椎矢状断像

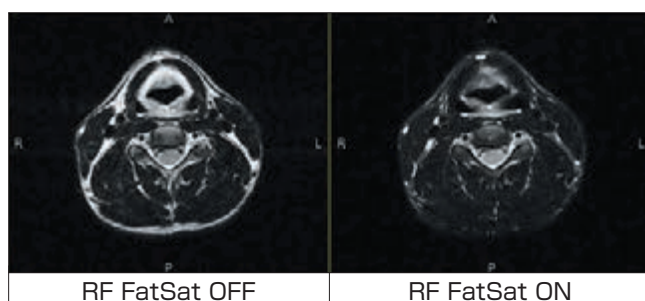


図5：頸椎短軸断 T2 強調像

5. まとめ

以上、AIRIS Eliteについて概要を説明した。

強力な傾斜磁場系や高速なコンソールなど、これだけでも従来装置と一線を画す装置と言えるが、さらにこれまで中低磁場では実用化が困難とされてきたRF FatSatを実現したAIRIS Eliteは従来の範疇を越えた真のプレミアム中磁場MRIであると自負している。

今後、臨床の場で各種機能の有用性が実証されることにより、多くの医療機関でAIRIS Eliteの特長を活かして広く使われることを希望する。

※1 AIRIS、※2 APERTO、※3 FatSepは株式会社日立メディコの登録商標です。

参考文献

- 1) 吉岡大：骨軟部領域における低～中磁場MRIの最近の動向. 画像診断Vol.24 No.10 : 1268-1277, 2004.
- 2) 荒木力監訳：MRI「超」講義第2版, メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2003.
- 3) 早川克彦, ほか：上肢におけるAPERTO Inspireの短期使用経験. MEDIX, 43 : 30-35, 2005.

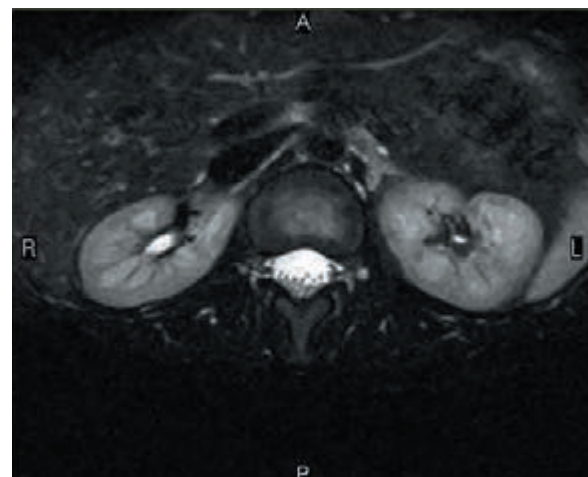


図6：腰椎短軸断T2強調像 RF FatSat 併用

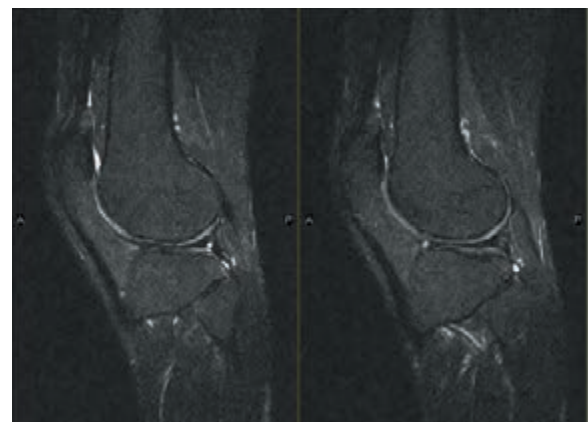


図7：膝部T2強調像 RF FatSat 併用