

革新的な静音化を実現したMRIシステム EXCELART™

EXCELART™ MRI System with Revolutionary Level of Noise Reduction

吉田 智幸
YOSHIDA Tomoyuki

高森 博光
TAKAMORI Hiromitsu

勝沼 歩
KATSUNUMA Ayumi

MRI (Magnetic Resonance Imaging) システムは、高い診断能と、放射線による被爆がなく無侵襲という大きなメリットを持った医用画像診断装置であるが、一方では撮像中に発生する騒音により、患者に不快感を与えるという欠点があった。また最近では、撮像時間短縮などの理由で、多くの高速撮像法が開発されており、これらが騒音をますます大きくしている傾向にある。そこで当社では、この騒音レベルを画期的に低減させる静音化技術 “Pianissimo™ (ピアニシモ)” を開発した。この技術を用い、騒音低減と高速撮像という相反するテーマを同時に実現できたのが1.5テスラMRIシステム、EXCELART™である。

A magnetic resonance imaging (MRI) system is a medical imaging diagnostic device that noninvasively provides high diagnostic capability without subjecting the patient to the damaging effects of radiation. A disadvantage of such systems has been that the noise during scanning is uncomfortable and possibly distressing to the patient. Furthermore, many fast imaging techniques have been developed recently in order to shorten the acquisition time, but this increase in speed tends to be accompanied by an even greater amount of noise.

This was the motivation for Toshiba to develop Pianissimo™ noise-elimination technology to drastically reduce the noise level during scanning. The application of this technology has made possible the development of a 1.5 T MRI system called EXCELART™, which simultaneously achieves the previously incompatible goals of fast imaging and noise reduction.

1 まえがき

MRIシステムにおける医用画像診断装置としてのニーズは多様化し、脳外科、整形外科にとどまらず、動きによる影響を受けやすい消化器、循環器にも応用され始めている。更に、高齢化社会の到来による医療費の増大が大きな社会問題となっており、いかに短時間で効率的に検査を行い、検査コストを抑制するかも課題となってきている。これらの背景から、画像診断の質の向上と検査時間の短縮を実現させる数々の高速撮像法が開発され製品化されてきた。

しかし、撮像が高速になればなるほど、撮像中に発生する騒音は大きく耳障りなものとなり、患者に与える負担が無視できないレベルになってきている。そこで当社では、静音化の実現にいち早く取り組み、騒音の発生源である傾斜磁場コイルを真空容器に封じ込めるというまったく新しい画期的な方法Pianissimo™により、静音化を実現することに成功した。更に、この技術の特長は、高速撮像法に必要な条件をまったく犠牲にすることなく静音化を実現することにある。このことにより、MRIシステムの臨床応用への期待が大きく広がったと言える。

ここでは、この静音化技術を中心に、Pianissimo™を搭載した初めての1.5テスラMRIシステム、EXCELART™ (図1)の開発について述べる。

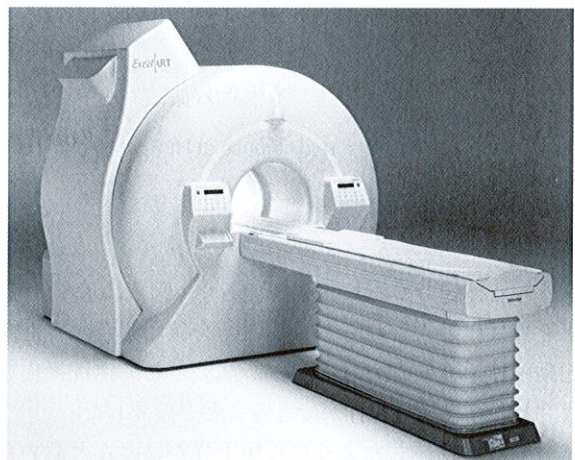


図1. EXCELART™システム 世界で初めて静音化機構Pianissimo™を搭載した。

EXCELART™ MRI system

2 システム開発のコンセプト

上記の背景に基づき、システム開発の基本コンセプトを“人にやさしい静かなMRI”と定めた。従来の画像診断装置としての画像診断能は損なわず、更にプラスアルファとしてMRI検査で患者に与える負担をいかに軽減できるかを考えた。撮像中に患者が感じる負担は次の3点に集約することができる。

- (1) 検査時間が長い
- (2) 検査空間が狭い
- (3) 音がうるさい

これらの負担をEXCELART™では次のように解決している。検査時間が長いことに対しては、既に多くの実績がある高速撮像法の採用により改善することができる。例えば、超高速撮像法であるEPI(Echo Planar Imaging)法の場合、一枚の画像を撮像するのに要する時間は、数十msにまで短縮されるに至っている。このような超高速撮像法の実用化は撮像時間の短縮化ばかりでなく、形態診断や機能診断など画像診断の質の飛躍的向上を医療にもたらしている。

次に検査空間については、短軸静磁場磁石の特長を十分に生かした架台設計により、患者が入る筒状部分の内径を開口部付近で65.5cm、中心部の一番狭い所でも60cmを実現した。更に、ボア長も2mを切り、例えば成人であれば膝関節の撮像の場合、首より上は完全に架台の外に出すことができる。

最後に残るのが騒音についてであるが、この問題を画期的な方法で、根本から解決したのが当社独自の静音化技術Pianissimo™である。

3 静音化技術 Pianissimo™

3.1 騒音レベルの現状

実際にMRI検査のとき発生する騒音レベルは、もっともうるさいと言われているEPI法による撮像の場合、撮像条件によっては115dB(A)前後にも達する⁽¹⁾。この騒音レベルは、飛行機離着陸直下での騒音に匹敵するような大音響である(図2)。聴覚への影響も予想されていることから、IEC^(註1)では、時間平均で99dB(A)を越える音圧レベルの場合は、耳栓などの聴覚保護手段が必要であるとの安全基準を設定した(1995年)。

3.2 騒音発生メカニズム

通常の超電導MRIシステムの架台は外側に静磁場磁石があり、その内部に筒状の傾斜磁場コイルがあるという構造になっている(図3)。傾斜磁場コイルは、三次元空間上の位置情報を得るために不可欠な傾斜磁場を発生するためのコイルで、樹脂で含浸されたX、Y、Zの3系統の巻線によって構成されている。静磁場内にある傾斜磁場コイルに、傾斜磁場電源から電流が流れると、フレミングの左手の法則により、コイル内の線材がローレンツ力を受ける(図4)。

その電流が断続的にON/OFFすることにより、振動となって傾斜磁場コイル全体が大きな音を出すことになる。この音が傾斜磁場コイル内に入った患者を煩わせることになる。

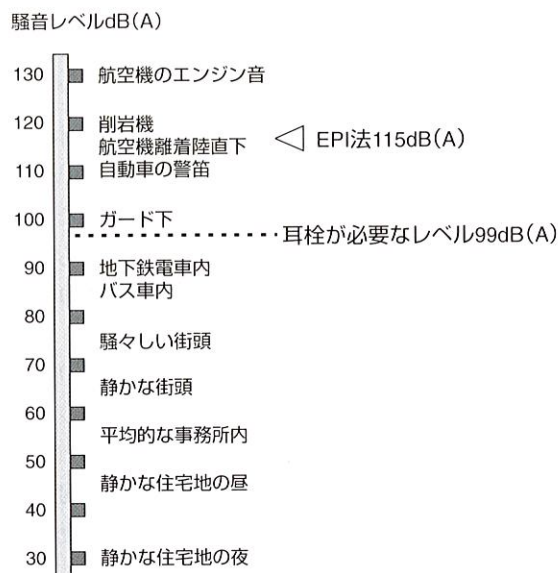


図2. 騒音レベルの比較 EPI法による撮像では航空機離着陸直下の音にも相当する。
Noise level comparison

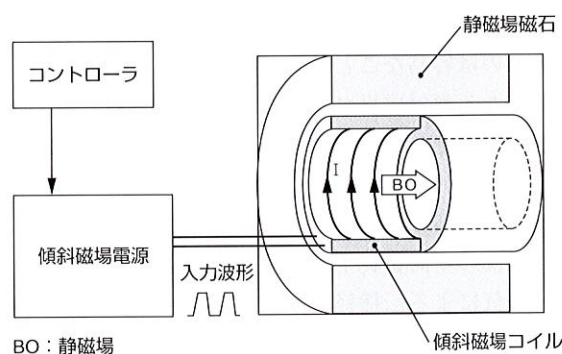


図3. MRI傾斜磁場系の概略 静磁場磁石の内部に筒状の傾斜磁場コイルがある構造となっている。
Outline of MRI gradient system

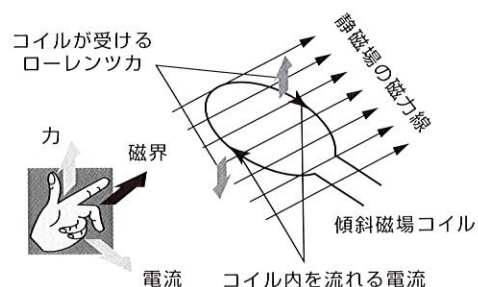


図4. 傾斜磁場コイルの振動の原理 傾斜磁場コイル内の電流が変化すると、ローレンツ力により振動が発生する。
Cause of gradient coil vibration

(注1) IEC(International Electrotechnical Commission):国際電気標準会議。MRIの騒音に関する安全規定はIEC60601-2-33(1995)に規定されている。

3.3 振動の伝播経路

傾斜磁場コイルで発生した振動の伝播(でんぱ)経路については、大きく空気振動伝播と固体振動伝播の二つに分けられる。空気振動伝播は文字どおり、空気を媒体に振動が伝わるもので、傾斜磁場コイルに接している空気が振動し、架台カバーをはじめ近接する様々な部品に振動を伝え音を発生させる。もちろん人間の耳に達している音も、空気振動伝播により鼓膜が振動して、音として認識されるものである。

次に固体振動伝播であるが、これは傾斜磁場コイルに直接接している物質が振動を伝えるもので、MRIシステムの場合、傾斜磁場コイルを支持している部品がそれに当たる。今までのMRIシステムでは、静磁場磁石に取り付けられた部品で傾斜磁場コイルを支持していたので、振動はまず支持部品を介して静磁場磁石に伝播し、静磁場磁石そのものが大きく振動して二次的な騒音発生要因になっていた。

3.4 Pianissimo™の原理

振動はいったん発生源から伝わると、その伝播経路は複雑に絡み合い、特定するのは極めて困難になる。例えば、ある部品が振動して音を出していることがわかっていても、その振動伝播経路は決して一つとは限らず、すべての振動経路を絶つのは容易なことではない。このことから、振動の発生源である傾斜磁場コイルに、できるだけ近い場所でその伝播経路を絶つことにより、もっとも静音効果が期待できることがわかる。

空気振動伝播は、傾斜磁場コイルそのものを密閉容器で覆い、内部の空間を真空ポンプにより低圧力状態に保つ方法で、空気による伝播経路を絶った。更に、固体振動伝播については、静磁場磁石への伝播を防ぐため、傾斜磁場コイルを直接床から支持し、静磁場磁石からは完全に独立させるという方法で、傾斜磁場コイルの伝播経路を絶つことに成功した。また、支持系のベース部分に質量を持たせ、振動によるエネルギーを吸収させることで、床に伝わる振動を低減させた。この振動発生源である傾斜磁場コイルからの二つの伝播経路をシャットアウトしたのが、当社独自(東芝特許)の静音化技術Pianissimo™である(図5)。

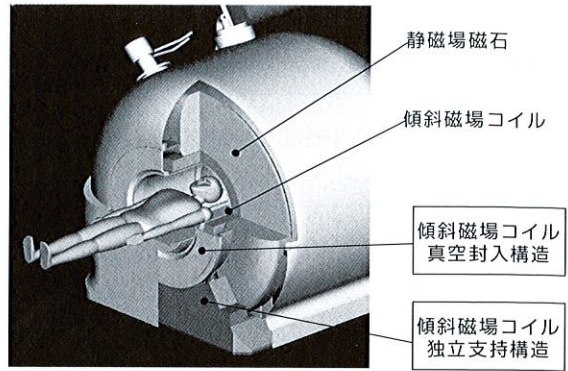


図5. Pianissimo™の構造 傾斜磁場コイルの独立支持と真空封入により、振動の伝播経路を絶った。

Structure of Pianissimo™

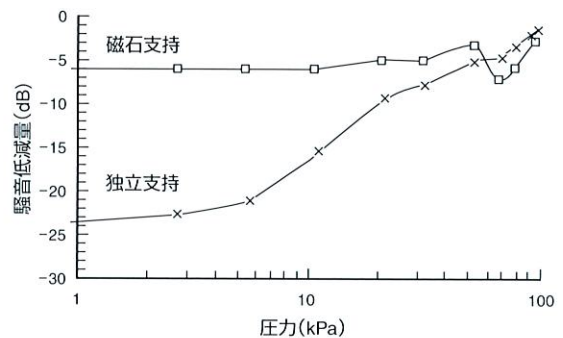


図6. 支持系の変更による真空度と騒音低減量の関係 独立支持にして初めて真空封入の効果が現れる。

Relationship between degree of vacuum and amount of noise reduction resulting from support system modifications

の一つで行われたと言える。

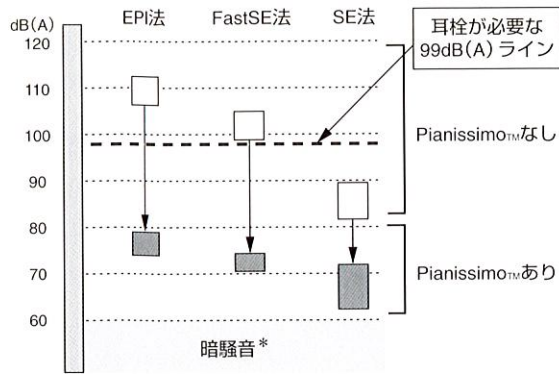
測定結果が示すとおり、従来の静磁場磁石から支持した場合では、真空度が増しても約6 dB程度の低減しか得られなかった。これは、空気振動伝播以外に支持系を伝わる固体振動伝播がまだ支配的であることを示している。また、70 kPa付近までは騒音レベルが下がったのは、静磁場磁石と容器が密に結合している構造から、容器内の圧力が低減することで容器と静磁場磁石の結合状態が変わり、磁石から容器へと伝播する振動のモードが変化したためと推測できる。

次に独立支持の場合、真空度にほぼ比例するかたちで騒音レベルも低減し、約24 dBの低減量を示した。従来の静音技術と独立支持構造を組み合わせ、真空に引かない大気の状態でも9 dB程度の静音効果があるので、Pianissimo™では、トータルで約33 dBの騒音低減効果が得られる。これは聴感で約1/10に相当する。

次に、実際に臨床で用いられているいくつかの代表的な撮像法で、従来機種とPianissimo™搭載のEXCELART™を比較した結果を図7に示す。同じ撮像法においても、撮像

4 Pianissimo™の効果

傾斜磁場コイルを密閉容器に封入し、内部を減圧していったときの騒音レベルの変化を傾斜磁場コイルの支持方法を変えた状態で測定した。真空度と騒音低減量の関係を図6に示す。測定に使用した傾斜磁場電源への入力波形は、三角波の繰り返しで、システムが出しうる最大能力での値である。撮像で使用する波形は通常台形波であり、振動は電流が変化するタイミング、つまり立ち上がり、立ち下がり発生するので、測定はもっとも騒音が大きくなる条件



*同一測定法で得られた、撮影をしていない時の騒音

図7. Pianissimo_{TM}の静音効果 通常撮像では聴感で約1/10の騒音低減効果が得られる(当社比)。
Noise-reduction effect of Pianissimo_{TM}

条件によって振動モードが異なるため、騒音レベルは幅を持つが、いずれの条件でも耳栓が必要とされている99 dB(A)をはるかに下回っている。また、SE(Spin Echo)法のように、もともと騒音レベルの低い撮像においては、60 dB(A)前後ある撮像室内の暗騒音に紛れることになる。

このように騒音が低減したことで、画像診断の質の向上も期待されている。耳栓がない状態でも大きな騒音にさらされることがないので、患者はリラックスした状態で検査を受けることができ、心拍も安定することが予想できる。また、いきなり大きな音がして反射的に動いてしまうなどということも少なくなれば、動きによる画質の劣化が生ずる可能性も減らすことができる。また、乳幼児などの撮像の時には、通常眠剤を使用し眠らせて撮像を行うため、騒音レベルが低ければその量も最小限にすることができる。動きによる画質劣化防止ばかりでなく、眠剤投与による副作用(リスク)の低減も期待できる。更に、MR脳機能イメージングと呼ばれる、患者の運動刺激などによる脳内の活性状態を画像化する診断法においても、騒音が解析結果に与える影響を低減できるため、診断能の向上が期待できる⁽²⁾。

5 あとがき

Pianissimo_{TM}による静音化は、単に現状の撮像法による騒音低減だけにとどまらず、将来にわたって、高速撮像法の適用における騒音に関する制約を排除できる技術と言える。

このPianissimo_{TM}を搭載したEXCELART_{TM}では、MRIが持つ、患者に無侵襲というメリットをトレードオフなく実現することができた。また、これからのMRIによる画像診断の可能性を大きく広げたEXCELART_{TM}が、臨床の間でも静音化の効果をいかに発揮し、“人にやさしい静かなMRI”として1.5テスラMRIシステムの世界標準機となることを期待する。

文献

- (1) F. G. Shellock, et al. Assessment of Acoustic Noise During MRI Using EPI and 3D-Fast Spin Echo Techniques. Proc. of the 5th Scientific Meetings of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine. 1997, p.1975.
- (2) M. R. Elliott, et al. The Effect of Scanner Sound in Visual, Motor and Auditory fMRI. Proc. of the 7th Scientific Meetings of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine. 1999, p.1664.



吉田 智幸 YOSHIDA Tomoyuki

医用システム社 那須工場 医用機器第四技術部。
MRIシステムのシステム開発・設計に従事。
Nasu Operations



高森 博光 TAKAMORI Hiromitsu

医用システム社 那須工場 医用機器第四技術部主務。
MRIシステムの機構開発・設計に従事。
Nasu Operations



勝沼 歩 KATSUNUMA Ayumi

医用システム社 那須工場 医用機器第四技術部。
MRIシステムの機構開発・設計に従事。
Nasu Operations