〔第45回総会シンポジウム ―MRI 技術の最近における展開―〕

6. 最近の MRI 技術動向

川 口 博 巳

富士電機(株)医療装置部

Key words: Magnetic resonance image

RECENT PROSEEDING OF MRI

HIROMI KAWAGUCHI

Medical Engineering Department Fuji Electric Co., Ltd

Summary

Recently the technologies of MRI and MRS had been advanced so brilliantly.

On the view point of the method of imaging reconstruction almost every systems use Fourier Zeugmatography method. But they still have independent characteristics.

This thesis gives some interpretation to these characteristics.

1. はじめに

MR 技術は実用期へと発展した。多くの知識や技術が集大成され病院施設にて臨床応用されるにいたった。装置は撮像技術、要素技術、要素部品などが専用的に集約されるようになった。商用機にあってはフーリエ変換ズームマトグラフィ法とその変法が主流となった。安定度の高い安価な超電導磁石や永久磁石が多数供給されるようになっていく。ところでX線 CT との対比で考えると同じ技術によっているにもかかわらず画質や測定値に差異があり、場合によっては同一企業の同一機種であっても差異が明瞭に判明する場合もみうけられる。本論では装置技術の立場からこれらの乖離原因を考察するとともに最近の商品動向の整理をこころみた。

2. 理想撮像原理からの乖離原因

装置から得られる画像は原理にもとづく画質と被検体自体に由来する乖離原因と装置固有の特性による乖離原因が重ね合わされたものである。被検体原因には装置利用技術にて取り除くことができるものと不可能なものが

Table 1 被検体に由来する乖離原因

マクロ物理系原因 (物体移動, 流れ, 拡散, うず流等)
分子サイズの諸原因 (分子ロングレンジオーダーの磁氣的ゆらぎ, 分子のローカルな磁氣的ゆらぎ, ケミカルシフト, 交換効果)
量子力学的原因 (量子力学的ゆらぎ, 不確定性)

ある。不可能なものには計測可能なマクロ物理的要因(物体移動, 流れ, 拡散, うず流等)と計測可能な分子サイズの諸原因(共鳴原子核からみて分子の長尺の磁氣ゆらぎ, 分子の短尺の磁氣ゆらぎ, ケミカルシフト, 交換効果など)と量子効果に支配される不可避なものである。装置固有原因には経済面から実用装置とするために生ずる問題である。

前者はパルスシーケンスの発達によって問題解決がなされてきている。ここでは装置を管理運営する立場で後者の諸問題を考察する。医用画像技術の多くがそうであるように MRI も画像処理技術, 各種信号処理技術がそ

Table 2 装置に由来する乖離原因

の基盤にある。これらの技術を駆使して生データの中に埋もれた情報を明瞭に表現することができる。ところが生データにない情報については疑似的強調はおこなってもそれ以上にはならない。このため高品位の生データを得ることが最重要である。NMR においては「有効桁 6 桁」以上の測定をおこなっている。この 6 桁がどのような意味を持つかを考えてみる。人間の大きさを“1”として DNA がこの 6 桁分の 1 に相当する。DNA サイズをとらえて (静磁界) これを見る (高周波磁界) 技術にたとえられよう。

2.1 装置に由来する乖離原因と対策 (時間的に静的な要因)

静的要因には被検体の測定環境を作る静磁界磁石が上げられる。近年超電導磁石が多用され高い安定度のため、より精密な磁場測定が可能となった。この結果均一度も向上した。個々にばらばらな原子核は均一度に左右され静磁界方向に配向し観測される。このため均一度は強度とともに検出信号強度を高めるための重要な要素である。磁石システムは外部に不必要な磁界を分布させるため装置周辺の磁性材料の配置とその移動によって測定域の均一性が変化する。これに対処するためには定期的な均一性の測定管理が必要であり状況に応じては均一性の再調整 (シミング) が有効となる。NMR 磁束計と電流シムあるいは小鉄材を用いて良好な均一空間を得ることができる。磁石型式によって種々のシム方式があり、再調整には高度の熟練を要する。

2.2 時間的に動的な要因

時間的に変化する要因に信号源の位置を決定するための勾配磁界 (傾斜磁界とも言う) と共鳴周期を中心を持つ高周波磁界がある。

2.2.1 勾配磁界

MRI 画像の「質」を決定する重要な要素に勾配磁界があげられる。時間的、空間的に理論に忠実な勾配磁界が

得られればどの装置も同質の良好な画像を作り出すことができる。ところで実際には渦電流による悪影響が重畳される。空間内の磁束が時間的に増減すると増減をおさえるような逆の効果が生ずる。この空間に金属など電気伝導性の良導体を置くと磁束の変化に対して逆の磁束変化をともしようとする電流が金属内に流れる。これが渦電流 (エディークレント) である。勾配磁界コイルは静磁界磁石の内側にもうけられる。勾配コイル周辺にはコイル固定用金具や静磁界磁石の金属部品あるいは静磁界コイルそのものが取り囲むように配置される。このため被検体測定空間には勾配コイルによるパルス磁界とそれを打ち消そうとする各種の渦電流による逆の磁界とが生ずる。超電導磁石にあつてはクライオ容器や内部の熱シールド板安定化銅、超電導線などが該当する。渦電流は材料の電気抵抗による時定数で減衰しジュール熱となって系外に放出される。ところでクライオ内部の金属は絶対零度近くに冷却され電気抵抗値は極めて低く渦電流の時定数が長くなる傾向にある。さらに異なった金属による異なった渦電流は対応を複雑なものにしている。パルスシーケンスが孤立の 1 パルスから構成されているのであれば渦電流は毎回同じ時間波形となろうが反復時間の異なる多くのパルスシーケンスに対応するには注意深い電流補正が要求される。特に近年では多くのマルチスライス像や 3D 撮像、短い反復法による各種撮像法が多用される。短い反復パルスではパルス間隔が渦電流の時定数より短いためパルスごとの渦電流初期値が異なる。この場合、渦電流の悪影響はより大きなものとなる。据付時勾配磁界系の調整が行われるがその後もおりにふれ管理再調整することで良好な画質を維持することができる。実際の調整はつぎのようになされる。

勾配磁界系とはパルスシーケンス発生部、勾配コイル、勾配電源 (電力増幅器)、電流フィードバック回路、前置応答特性調整器を言う。勾配コイルと勾配電源は電氣的

〔第45回総会シンポジウム〕 6. 最近の MRI 技術動向 (川口)

な周波数特性を持つ。このため勾配コイルに流れる電流を電源入力にフィードバックし周波数帯域の広い一定の周波数特性をそなえた系とする。据付後勾配系の電流フィードバック回路を調整する。次に静磁界の中心位置と勾配コイルの中心位置を機械的に重ね合わせる。よく作られた磁石システムにあっては機械調整によって渦電流が対称となる。最後に前置応答特性調整器を調整しハードウェアを仕上げる (Fig. 1)。(この部分はオーディオ装置のプリアンプにあたる。ホールの音響特性を逆補正しホール特性に支配されない高忠実度の音楽再生が得られるのに似た働きをする。)測定空間にさぐりコイルをおき磁束の時間変化を電流値として観測する。この電流値は時間微分値であるため真の磁束変化を知るために積分しなければならない。積分値はオシロスコープなどにて視覚化でき調整に使える。実際のパルスシーケンスに似たパルスをこの系に導入し周波数特性を調整する。一定の矩形波を複数個連続させ勾配パルスとする。先の観察系より勾配磁界の矩形波を見、前置応答特性調整器の周波数ごとの増幅率を変化させる。観察された勾配パルスは波形の立上り立下り部分で高い周波数の、またパルス末尾の部分で低い周波数の応答を示す。このパルスが入力源波形にきわめて似たものとなるように渦電流調整をおこなう。ハードウェア的に補正しきれないパルスシーケンスごとの差異に対応するにはパルスシーケンスそのものをソフトウェア面にて補正して作業を完了する。この結果得られた画像は空間分解能の良いものとなる。渦電流補正同様、永久磁石装置にあってはヨーク材料のヒステリシス特性を補正せねばならない。良質の NMR 信号を得るために直線性、安定性、過度応答特性の良い勾配磁界システムとする。設計的には NMR 信号読み出し期間の勾配磁界を極少とする。他の期間は高周波励起や勾配磁界による変調期の磁化のばらつきを最少にとどめるため変化特性を早めた装置とする。このためなるべく強い勾配磁界を短期間にあたえる。位相変調のための勾配磁界は零クロス領域にて最大信号値を得ることから、この領域の直線性を重要視した設計がほどこされる。以上の基本を考慮して装置を依持管理する必要がある。

2.2.2 高周波磁界

被検体測定空間上において静磁界と直交する高周波磁界を発生させ、被検体内の測定原子核を共鳴させその信号を生データとする。

高周波磁界を発生させる装置は 1 kW~15 kW 程度の電力増幅器である。コイルは高い Q 値 (共振器の質を示す値で高い値は共振しやすさを示す。)を持つ共鳴回路で

エディーカレント補正
不十分のときの勾配磁
界パルス

エディーカレント補正
過多のときの勾配磁界
パルス

エディーカレント最適
補正時の勾配磁界パ
ルス

左図中の 1 コのパルス
拡大図

Fig. 1 勾配コイル系の調整

ある。このため高周波電力から高周波磁界に効率良く変換するために共鳴回路と装置出力信号周波数を一致させ、さらに伝送経路の損失を最小にする。このとき磁化を効率よく操作するため波高値は高くパルスの時間幅は短く設計される。このため管理状態の如何によっては内部放電をおこし装置特性の低下をまねく。

核からの NMR 信号は先の高周波コイルに誘導されるが pW~μW 程度の極微弱な信号電力である。電力増幅器が停止時に発する暗雑音ですら NMR 信号に大きな妨害となる (Fig. 2)。この妨害を PiN ダイオードや $\lambda/2$, $\lambda/4$ などの回路を組み合わせて阻止するが故障によって S/N の低下をまねく。高周波コイルに誘導され

Fig. 2 高周波磁界システム

た NMR 信号電力は周囲の金属導体による渦電流損失、勾配コイルとの電磁結合による損失、被検体と高周波コイル間の浮遊容量損失、外部電子回路(プリアンプなど)への伝送損失によりさらに微弱な高周波信号となり取り出される。

以上の高周波損失は被検体ごとに変化するため NMR 信号強度の絶対値評価を意味のないものになっている。これらの損失をさけるために以下のような工夫がなされる。勾配コイルと高周波コイルの電磁結合を金属導体によって分離遮断し電磁結合より損失の少ない渦電流損失に置換する。被検体と高周波コイル間の浮遊容量は高周波の不感線路に集中させ有感線路には高周波信号の定在波が乗るような設計をとる。外部回路への伝送損失はインピーダンス整合にて反射損失を極小化する。以上のように高周波回路の充分な管理によって高い信号強度と S/N を得る。

2.3 (総合原因)

2.3.1 勾配磁界系の総合原因

勾配コイルは空間の三軸とも数回巻コイルの組み合わせによる。このため電気抵抗の低いコイルである。標準的な装置では高周波シールド壁によってコイルと電力増幅器を分離し電力ケーブルと高周波ノイズフィルタによって相互に接続される。この処理次第によっては系の電気特性が変化し勾配コイルの周波数特性をも変えることがあり、画質にも変化が生ずる。

2.3.2. 高周波磁界系の総合原因

MRI 装置は静磁界の外部へのもれ磁界のため装置全体を広い室内に分散配置する傾向にある。高周波電子回路と高周波磁界コイルは高周波シールド壁を介して同軸ケーブルにて結合される。高周波磁界コイルはたかだか

1, 2 回巻の導体であり、送信、受信ケーブルは大きな面積を持つ 1 回巻のコイルと考えることができる。回路的には接地線の閉ループであっても 1 回巻の高周波コイルとしての特性を発揮してしまう。磁石システムの外部空間に存在するノイズが同軸ケーブル外部導体に誘導され検出系である高周波磁界コイルに入力されるため S/N の悪化をみる。特に高周波シールドルーム内に敷設された同軸ケーブルのそれを無視することはできない。

これによる S/N 低下をさけるため静磁界磁石端部開口面における集中接地を確保する必要がある。装置依持作業のための分解時には接地性を確保し、S/N を依持するように努めなければならない。

これらの問題以外に各要素装置をシステム化する過程でつぎのような種々の問題が生ずる。位相誤差要因として装置内基準周波数発振器出力と静磁界歳差周期の誤差、エコー信号の直流成分誤差要因として送受信切換器や前置増幅器、高周波回路内の過渡特性などがそれにあたる。以上のように各種の乖理原因を取りのぞくと良質の実用画像を得ることができる。装置の具体的な問題については装置メーカーが対応するであろうが、ユーザ側として何が問題となっているかを把握する必要がある。X線管球のように経時劣化による部品交換などのメンテナンス作業は不要であるが前記のような項目の依持が要求される。

3. 最近の傾向

前項であつかった諸問題は新製品として改善されつつある。初期の製品群はオーディオ分野、無線通信分野の要素部品を寄せ集めて作られた。このため別企業の異なる製品間でコイル類とアプリケーションソフトウェア以

Table 3 ハイテク利用, MRI 磁石システム (S/N)

S	静磁界磁石	フリンジフィールド無対策磁石 フリンジフィールドパッシブシールド磁石 フリンジフィールドハイブリッド磁石 フリンジフィールドアクティブシールド磁石
	勾配磁界コイル	エディーカレント無対策コイル エディーカレントパッシブシールド形コイル エディーカレントアクティブシールド形コイル エディーカレント利用形変形コイル
	高周波磁界コイル	ファラデーシールド 無 独立コイル { リニア クワドラチャ ファラデーシールド 有 コイル { リニア クワドラチャ
N	ノイズ対策	RF パッシブシールド { RF シールドルーム RF シールド筒
		RF アクティブシールド { RF シールド床等

〔第45回総会シンポジウム〕 6. 最近の MRI 技術動向 (川口)

外のほとんど全てを同じ部品ベンダにたよる実状にあった。輸入機の大部分が同じ高周波電力増幅器、勾配電源、静磁界磁石、シンセサイザを用いてシステム化されていることに気付く。これに対して国内の電子装置企業では超電導磁石や高周波増幅器など特殊なものを取りあつかっていないためその分野の弱点が見うけられたが近年これらも克服され日本的な製品作りに力がそそがれている。日本の実状によくマッチした多数の小型商品があらわれつつある。

初期には解析学的手法を用いて静磁界を設計した。このため解析解の得られないような複雑な磁性材料の分布に対応することができず解析解を乱すことのないように充分広い自由空間を作りここへ装置を設置した。このため2テスラ装置を体育館の中心に設置したり、磁気的変動をさけるため地下室に設置する例が多かった。このような方法では経済性の面から実用化が困難となる。このため装置近房に磁性体が置かれても所望の磁界環境が得られるように有限要素法を用いた逐次近似による設計へと進んだ。この手法では有効6桁以上の膨大な算術演算によるため、コンピュータを用いても長時間を要するが、設計手法の成果として永久磁石やパッシブシールド、アクティブシールド磁石が可能となった。最近の磁石システムは以上のように目的に最適化された設計であるため磁石外部への不必要な漏れ磁界は極少化され、必要な測定空間内のみ均一で安定な磁界が得られるようになった。技術を高度化し、使用材料を減少させると小型化によって床強度など周辺設備にまで経済効果がおよぶ。同時に必要最少限の空間に勾配磁界の変調をかけるためこの電力量が低下しランニングコストを軽減させることが可能となる。勾配磁界は一方では安定に他方では短く正確な時定数を持つ強いパルスを生じさせる。良い画質を得るためには強いパルスが必要となり勾配電源が大型化する傾向にある。この対策のため勾配電源回路自体の電力効率を上げるインバータ方式と先の小型化とがランニングコストに寄与する。次世代の撮像原理であるエコープレナー系のパルスシーケンスを実現するためには勾配系のさらなる高速化が今後の目標となる。

高周波コイル分野ではNMR信号を高い効率で電流変化に変換する方式が求められる。

ところで最近の高磁界化にともない、波長が短くなるとともに、電気回路上の「コイル」の概念をこえるよう

になった。NMR信号に対して、静磁界に平行する金属導体上に共鳴信号の定在波を乗せて共鳴させ、これらを被検体全周にわたって位相差を補正して合成する方法が取られている。高周波コイル上で結合させる方式にバードケージ型があり給電点の方式でリニア型、クリドラチャ型がある。一方従来のサドルコイルやスロットドチューブ型を直交的に組み合わせそれぞれのコイルを電子回路上で位相補正後結合するクワドラチャ方式も多用される。商用機にあっては変換効率を考慮しクワドラチャ化の傾向にある。コイル類が高度に合理化され磁石システムとして進歩しているのと同時に配線類のシールド技術も向上しつつある。特にRFシールドルーム内での配線はノイズに強くなるような配慮がほどこされ、測定領域における対ノイズ性を増している。この結果RFシールドルームの特性がそれほど高度なものでなくともよいようになっており設備に要する費用が軽減される傾向にある。

画像処理に要する高速演算装置では初期には般的なアラプロセッサを用いた装置が標準的であったがMRIの画像計算中に多くしめるフーリエ変換を単能的かつ高速度に処理することをねらって高速演算専用LSI類が多用され、処理時間の短縮と原価低減を同時にはたしている。

以上のようなハード面での専用機化に加えてソフトウェア面の改善も積み上げられつつある。特にパルス系列は初期にあっては単位時間内により多く強いNMR信号を採取することが競われてきたが近年では取り込まれたNMR信号から画像の劣化につながる信号（うず流、血流、拡散等の高次微分信号）をいかにすてきるかに多くのくふうがはらわれるようになっている。

4. 結 語

MRI装置が他の技術分野で標準化された多くの要素部品を寄せ集めて組み立てた時代から、MRI専用部品として最適化しつつ設計されたシステム製品へと移りつつある。この分野は日本が得意とする分野でありMRIもX線CTと同じ道を歩むこととなろう。ただしユーザから見て同じ技術であってもメーカーの特許戦略上差別化が計られることが多く、いまだに新造語が氾濫しふりまわされる結果となっている。