

人体頭部用 NMR 断層

映像装置

NMR image device for human head

亀井裕孟
片山義朗

電子技術総合研究所

1. はじめに

NMR 断層映像法¹⁾の進歩は目覚しく、最初の試みがなされてから10年足らずで、欧米諸国では既に臨床評価の段階に入っている。NMR 断層映像法は、比較的低い静磁場 H_0 と小さな回転磁場 (高周波磁場) H_1 とを用いるだけなので、生体機能に対する影響は小さいと考えられ、安全な無侵襲的断層映像法として注目されている。NMR では、物質の物理構造や運動性などの物理的情報とともに、分子の化学構造・反応過程などの化学的情報が得られる。したがって、NMR 断層映像法は、単に形態診断だけでなく、機能診断をも可能にする新しい断層映像法といえる。

静磁場の安全性については、まだ十分な研究がされているとはいえない。このため 1 kG 以下であればよいとの判断もあれば、200 G 以下を安全基準としている場合もあるようで、その判断はまちまちである²⁾ したがって、安全性という観点からは、できるだけ低い磁場を用いるのが望ましいことになる。しかし NMR 信号の検出感度は、原理的には、 H_0^2 に比例するので、NMR 信号の検出という点ではより高い磁場を用いる方が有利であり、どの程度の強さの磁場を用いるかは、今後の課題の 1 つであろう。

われわれは、安全性の目安として 200 G 前後を考え、この程度の H_0 で人体頭部程度の大きさの被検体について、断層像が得られる NMR 断層映像装置を試作した。これを用いて、人体頭部についてプロトンスピンの密度のトモグラムを得ることができた。

2. 装置

2.1 電磁石

試作した電磁石の写真および断面図をそれぞれ図 1 および図 2 に示す。電磁石は、3 対の円形コイルで構成される疑似ヘルムホルツ型であ

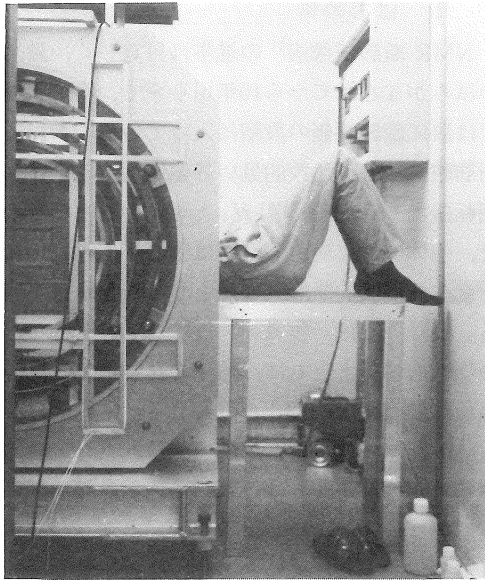


図1 電磁石部の写真 頭部の測定中

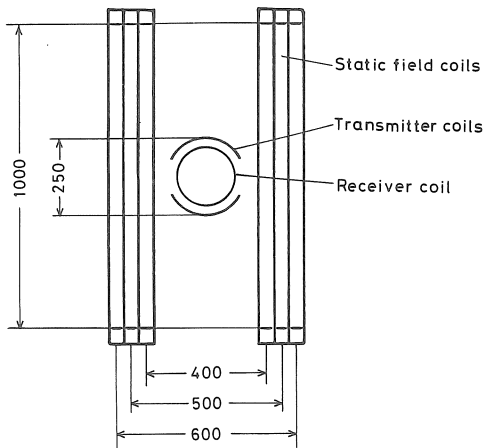


図2 電磁石断面図 寸法の単位は mm

る。3対のコイルのうち、中間の1対がヘルムホルツコイルの条件にあり、その両側にそれぞれ1対ずつのコイルがある。6個のコイルは全て、独立の電源で励磁されている。したがって、各コイルの電流は独立に設定することができ、これによって静磁場の均一度を調整することが

可能となる。ここで得られる均一度は、NMR断層映像法の目的からすると必ずしも満足すべきものではない。そこで、電流シム³⁾を用いて、静磁場の均一度の向上を試みた。

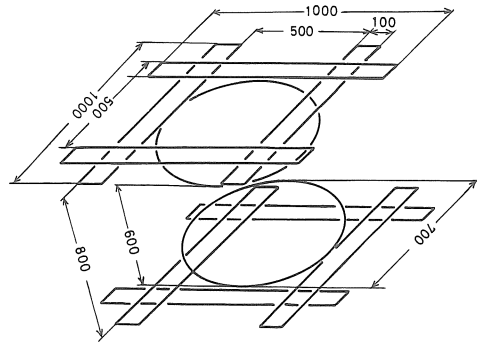


図3 電流シムの形状と寸法 単位は mm

電流シムの形状および寸法を図3に示す。電流シムの電源は、パイポーラ型電源を使用した。得られた均一度は、例えば $20 \times 20 \times 4$ cmの領域で 2×10^{-5} であり、十分満足すべきものである。

線形勾配磁場 G_i は、円形および矩形コイル対によって発生させる。 H_0 の方向に z 軸をとる。 z 方向の勾配磁場は、4個の矩形コイルによって発生させ、勾配の方向は、コイルを z 軸のまわりに回転させることによって、 xy 面内の任意の方向の勾配磁場が発生できるようになっている。 $G_{x,y}$ 発生コイルの形状寸法を図4に示す。

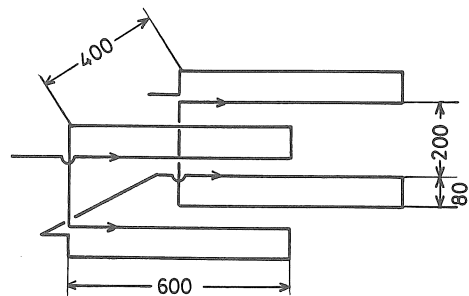


図4 xy 方向勾配磁場発生コイル。単位は mm

2.2 観測系

観測系のブロック図を図5に示す。周波数シンセサイザ(MB-440B)からの連続波は、変調器(HP-10534A, 2段)で、直流パルス発生器(SPG-1M)からの直流パルスによって変調され、電力増幅器(自家製, 2B46P使用)で増幅された後、トランスミッタコイルに印加される。トランスミッタコイルの形状および寸法を図6に示す。共鳴信号は、レーザバコ

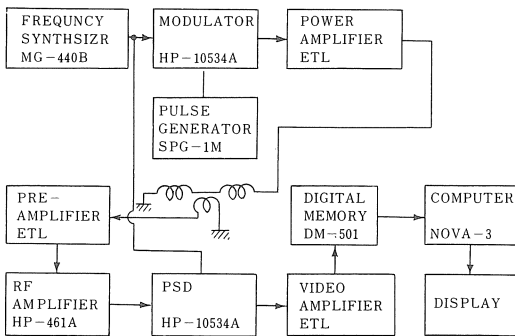


図5 観測系のブロック図

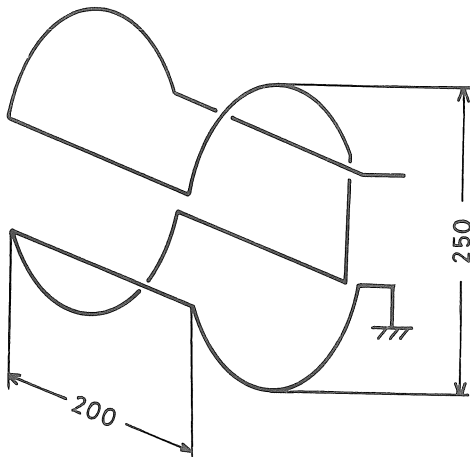


図6 トランスミッタコイルの形状と寸法。
単位は mm

イルによって検出される。レーザバコイルは、測定対象によってそれに適した形状のものを用いる。検出された信号は、前置増幅器(自家製)

および増幅器(HP-461A)で増幅された後、位相検波される。検波には平衡変調器(HP-10534A)を使用した。位相検波された信号はビデオ増幅器(自家製)によって必要な振幅まで増幅され、デジタルメモリでAD変換された後、ミニコンピュータ(NOVA-3)に格納される。信号は必要に応じて演算処理され、断層像が出力される。

3. 結果と考察

3.1 静磁場の均一度

NMR断層映像法では、静磁場の均一性は重要な因子となる。静磁場の均一度が高いほど、高い分解能が期待できる。例えば、 $H_0 = 200\text{ G}$ のとき、直径20 cmの被検体について、分解能2 mmの断層像を得ようとする、18 mG/cmの線形勾配を用いた場合、 2×10^{-5} 以上の均一度が要求される。試作装置で、 $18 \times 13 \times 2\text{ cm}$ の試料(常磁性イオンを含む水)で得られるスペクトルの例を図7に示す。線幅は15 Hz (1.875×10^{-5})で十分満足すべき値である。

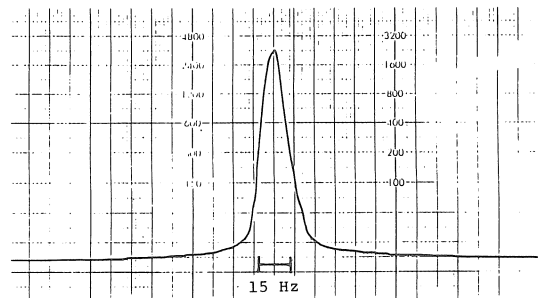


図7 静磁場の均一度評価用スペクトル
試料の大きさは $18 \times 13 \times 2\text{ cm}$

3.2 勾配磁場の直線性

勾配磁場の直線性は、得られる断層像の質に影響を及ぼす重要な因子の1つである。勾配磁場の直線性の検証には、外径22 mmの試験管に

常磁性イオンをドーピングした水を流したものを、6本平行に束ねたもの、および内寸19×19×90 mmの角柱を5 mm間隔で4本平行に束ねたものを使用した。勾配磁場 $G \sim 29.4 \text{ mG/cm}$ のときの投影スペクトルの例を図8 aに示す。全ての方向に対し同様のスペクトルが得られ、勾配磁場の直線性は何れの方でも満足すべきものである。

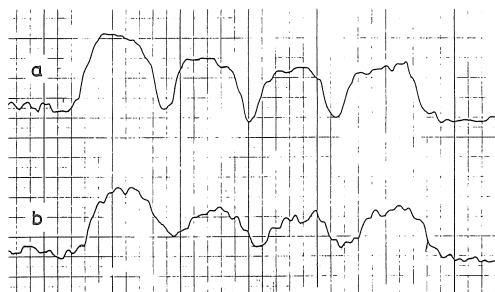


図8 a : 勾配磁場の直線性評価スペクトル
19×19×90 mmの角水柱を5 mm間隔で4本並べた試料に29.4 mG/cmの勾配磁場を加えたときのもの、
b : 同上にスライス用交流勾配磁場(1 Hz)を印加したときの投影スペクトル

3.3 スライス

スライスには選択照射法⁴⁾、交流勾配磁場法⁵⁾などがあるが、ここでは後者を使用した。周波数・波形・振幅等種々検討した結果、1 Hzの三角波を用いると良好な結果が得られることが判明したので、それを用いた。交流勾配磁場を印加することによって、観測される信号の線幅が増大する。この様子を図8 bに示す。図8 bは交流勾配磁場が加わっている以外は、図8 aと同一条件で測定したものである。このとき、スライスの厚さは約10 mmである。

3.4 ファントムでの試み

試作した装置の性能評価のため、ファントムを用いてのイメージングを試みた。ファントム

トムでの結果を図9 bに示す。像がだ円形をしているのは、ダッシュャーの打出した結果をそのまま用いたため、横方向を1とすると縦方向は、0.839に圧縮されている。再構成には 11.25° としては、常磁性イオンを少量ドーピングし、緩和時間を約0.1 secにした水を含むものを用いた。ファントムの断面図を図9 aに示す。イメージングには、投影-再構成法⁶⁾を用いた。ファン間隔で得た16個の投影スペクトルを用いた。各投影スペクトルは、64回積算によって得た。パルス繰返し時間は0.6 secである。再構成時の画素数は 64×64 である。像の強度は8階調である。

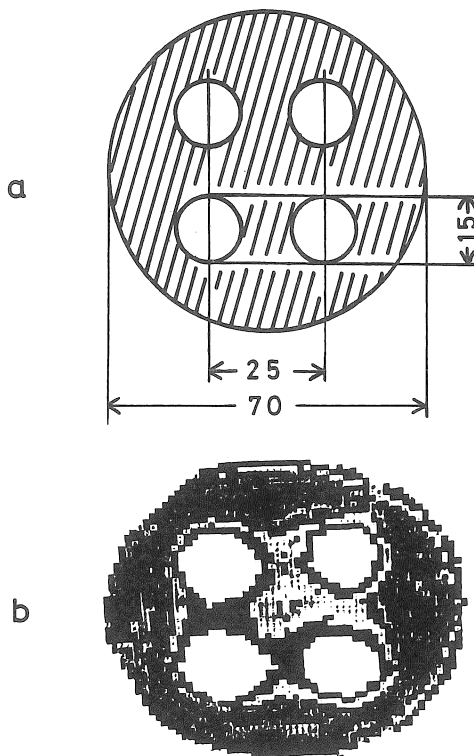


図9 ファントムの断面図とトモグラム

直径70 mmのファントムで、16個の投影スペクトルを得るための観測時間として約11 minを要した。この値は、ここで用いた H_0 の値を考慮すると、満足すべきものといえよう。

NMRの信号強度は、磁化 M_0 に比例する。

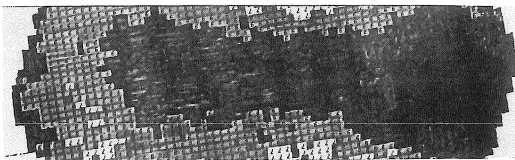
$$M_0 = Nr^2 \hbar^2 I(I+1)H_0/3kT \quad (1)$$

ここで、 N はトランスミッタコイルおよびレシーバコイル何れもの中に存在するスピンの数、

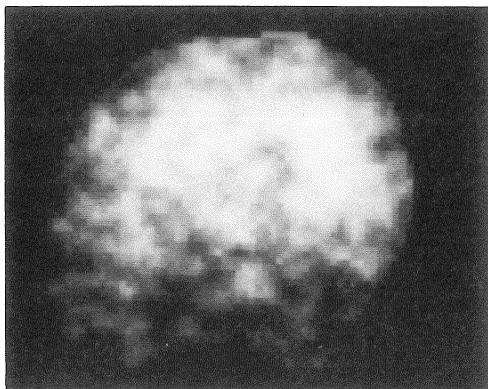
したがって、レシーバコイルに透起される電圧は H_0^2 に比例する。しかし、 ν_0 が高い場合には、検出系の損失も大きくなるので、実効的には、検出される信号強度はほぼ $H_0^{3/2}$ に比例する。ここで使用した周波数帯では、 $H_0^{3/2} \sim H_0^2$ 、 r は磁気回転比、 I はスピン量子数である。また、共鳴周波数 ν_0 は H_0 に比例する。

$$\nu_0 = (\gamma/2\pi)H_0$$

に比例するとみてよからう。信号のS/N改善のため、通常、積算が行われる。これを考慮すると、単位時間当りの検出感度は $H_0^3 \sim H_0^4$ に比例することになる。もし、静磁場の人体に対する安全性が確認でき、より高い磁場を用いることが可能となれば、観測時間を短縮することは容易である。例えば、 H_0 を2倍にすれば、観測時間は約1/10に短縮される。



a



b

図10 成人男子の頭部のプロトン密度矢状像

3.5 人体頭部での試み

成人男子の頭部のプロトン密度矢状像を図10に示す。256回積算によって得られた32個の投影スペクトルから再構成したものである。スライスの厚さは約2cmである。画素数は 64×64 で、強度は16階調である。頭部中心線より約2cm左方の矢状像であるが、大脳、小脳、脳室、下顎軟部組織などが明瞭に映像化されており、ほぼ、満足すべき結果である。

4. おわりに

人体頭部程度の大きさの被検体に適用できるNMR断層映像装置を試作し、ファントムおよび人体に適用し、ほぼ満足できるトモグラムを得ることができた。試作した電磁石は疑似ヘルムホルツ型である。この電磁石は構造は簡単、製作が容易、さらに製作コストが低いなどの利点をもっている。

トモグラムの質に影響を与える静磁場の均一度は、人体頭部程度の領域で、 2×10^{-5} であり、十分実用になるものであることが確認された。

安全性の面から、低い強度の磁場を用いたが、NMR信号の検出感度の改善については、現在新しい手法の開発を検討している。

参考文献

- 1) 例えば、亀井裕孟：映像情報(I) 12, 39 (1980).
- 2) T. F. Budinger : IEEE Trans. NS 26, 2821 (1979). および、中川正祥：科学 50, 196 (1980).
- 3) W. A. Anderson : Rev. Sci. Instr. 32, 241 (1961).
- 4) A. N. Garroway et al. : J. Phys. C 7, L457 (1974).
- 5) W. S. Hinshaw : Phys. Letters 48 A, 87 (1974).
- 6) P. C. Lauterbur : Nature 242, 190 (1973).