

外部磁場変動の共鳴磁場への影響

巨瀬勝美

筑波大学理工学系

はじめに

近年、MR 装置が広く普及するにしたがって、さまざまな環境の施設へと MR が導入されつつある。この MR 装置導入の際に、周囲の環境に対し最も注意の払われていることは、磁石からの磁場の漏洩であろう。これに対して、最近では、強磁性体やキャンセルコイルなどを用いた磁気シールドが行われており、その結果、2.0T の超伝導磁石においても、0.5mT の領域が、軸方向では 5 m 以下、半径方向では 3 m 以下と、大幅に縮小されるに至っている¹⁾。

いっぽうで、MR 画像は、外部で発生する電磁場に対して非常に敏感である。とくに、共鳴周波数に近い周波数をもつ外部電磁波は、画像上で顕著な偽像を発生するため、臨床用 MR 装置の設置される部屋には、電波シールドが施されるのが、ほぼ常識となっている。

このような電磁波ばかりでなく、電力配線、各種電動機器、車両などから発生すると思われる低周波の磁場変動も、画像に極めて大きな影響を与えることが考えられる。すなわち、これらによって共鳴磁場が変動すれば、核磁化の歳差運動の位相が変動し、その結果、フーリエ映像法では、主に、位相エンコード方向にゴースト状の偽像が発生する²⁾。しかしながら、現在、

大多数の MR 装置で使用されている超伝導磁石においては、電磁気学の基本法則により、磁石内の磁束はつねに一定に保たれるため、外部の変動磁場が、そのまま共鳴磁場の変動とはならないものと考えられる。それでは、外部で発生した磁場の変動は、超伝導磁石内の磁場（共鳴磁場）にはどのような変化を与えるのであろうか？

本研究は、以上のような疑問に基づき、実験と数値計算によって、外部で発生する磁場変動が、超伝導磁石内の共鳴磁場へ及ぼす影響を評価したものである。

実験方法

実験に用いた MR 装置は、静磁場強度 4.74 T、室温部口径 89 mm の鉛直な開口をもつ超伝導磁石 (Oxford 社製) と、外径 70 mm、内径 40 mm のアクティブシールド型勾配コイル (Doty 社製) を使用した自作のシステムである。プロトンの共鳴周波数はほぼ 202MHz であるが、この周波数の励起パルスの生成と共鳴信号の検波には、159.40MHz で発振するシンセサイザー (MG2502B, アンリツ社製) と、42.60MHz で発振する信号発生器 (8640 B, HP 社製) をヘテロダイン方式で使用した。外部の変動磁場を生成するためには、ベーク板上に巻いたループコイル (直径 20 cm, 巻数 50 回) を作成し、

キーワード superconducting magnet, magnetic shield, magnetic disturbance

Fig.1 に示すように、磁石の軸とその軸が一致するように配置した。磁石の中心とループコイルの中心との距離は 89 cm であり、磁石の中心には、NMR 信号検出のための直径 8 mm の球形の水ファントムをおいた。

共鳴磁場の変化の測定には、Fig.2 に示すように、90°パルスによる FID 信号を用いたが、比較のために、90°-180°パルスによるスピン・エコー信号も用いた。実験結果に対する勾配磁場の影

響を排除するため、勾配磁場は一切使用しなかった。信号の計測は、FID においては、90°パルスから一定時間 (td) 経過した時刻において、スピン・エコーでは、エコーのピーク時刻において行った。そして、計測データより信号の振幅と位相を計算し、振幅の変化からファントムの位置における勾配磁場の変化を、位相の変化から共鳴磁場の変化を評価した。なお、いずれのパルス系列でも繰り返し時間は 1 秒とし、td とエコー時間は 50, 100, 150, 200 ms と変化させた。

Superconducting magnet

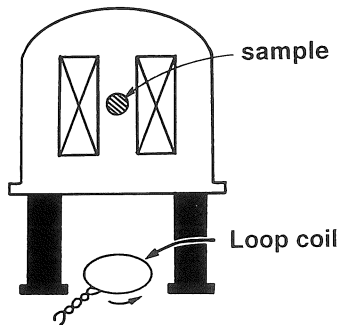


Fig.1. Configuration of the experiment. The distance between the 8mm sphere water-phantom and the loop coil (20 cm in diameter) was 89 cm.

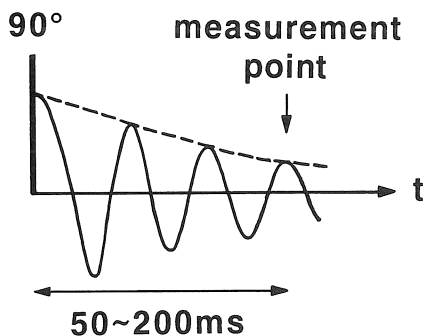


Fig.2. The pulse sequence used for measuring the change of magnetic field at the phantom. Amplitude and phase of the signal was measured 50, 100, 150, and 200 ms after the 90 degree pulse.

結果

1) 環境磁場による共鳴磁場変動の計測

まず最初に、人工的な磁場変動を加えないときの共鳴磁場の変動を計測した。Fig.3 は、FID を用いて、90°パルスから 200 ms 後において計測した信号の振幅と位相の時間変化の一例である。この例では、外部の磁場変動によるものと思われる振幅の変動が明瞭に観測された。この振幅の変化は、ファントム位置における勾配磁場の変化によるものであるが、Fig.3 における最大の振幅変動の際の勾配磁場の大きさは、試料の大きさから、約 0.5mG/cm と評価された。

いっぽう、位相の変化には、振幅の変動に対応した明瞭な変化は見られなかったが、ランダムな変動成分と、時間的にほぼ一定の変化を示す成分が観測された。このランダムな変動は、環境磁場の変動による共鳴磁場の変動と、参照信号の位相ゆらぎによるものであるが、この変動は、すべてが磁場変動によるものと仮定すると、最大 0.05mG 程度であった。また、一定の変化は、参照信号の周波数の温度ドリフトによるものと判断された。なお、観測された共鳴磁場変動と勾配磁場変動を直接比較することはできないが、ファントムの大きさで考えると、勾配磁場の変動は極めて大きいものと考えられる。

なお、Fig.3 に示したような FID 信号の大き

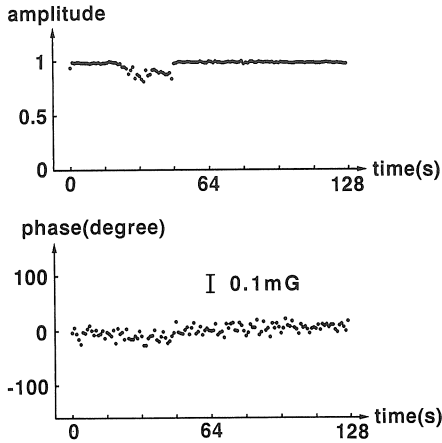


Fig.3. Time dependence of amplitude and phase of NMR signal observed 200 ms after the 90 degree pulse. The repetition time was 1 s. Though a large amplitude change was observed, no evident phase change was observed.

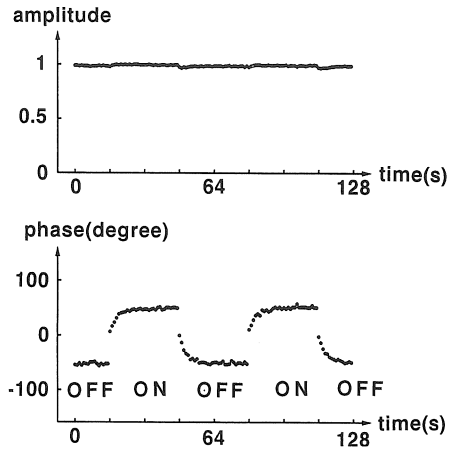


Fig.5. Time dependence of amplitude and phase of NMR signal observed 50 ms after the 90 degree pulse when 2A coil current was switched repeatedly on and off in 32 s intervals. Though a large phase change was observed, the amplitude variation was very small.

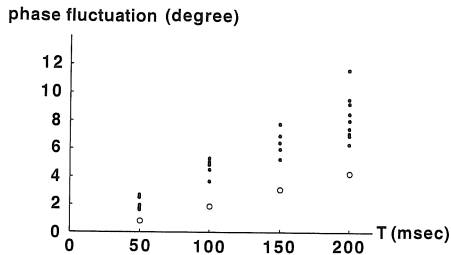


Fig.4. Variation of phase fluctuation against time. Black and white circles are results for FID and spin-echo signals.

な振幅変動は、ごく稀に見られるものであり、多くの場合では、振幅にはほとんど変化は見られなかった。また、位相の変化は、振幅に大きな変動が見られた場合でも、Fig.3と同様のランダムな変動と時間的にはほぼ一定の変化のみであった。

Fig.4には、FIDとスピン・エコーを用い、tdとエコー時間を变化させて計測した結果を示す。各点は、連続的な128回の計測を一連の計測データとして、その一連のデータにおける位相変動の標準偏差を示し、黒丸はFIDによる結果、白丸は、スピン・エコーによる結果である。

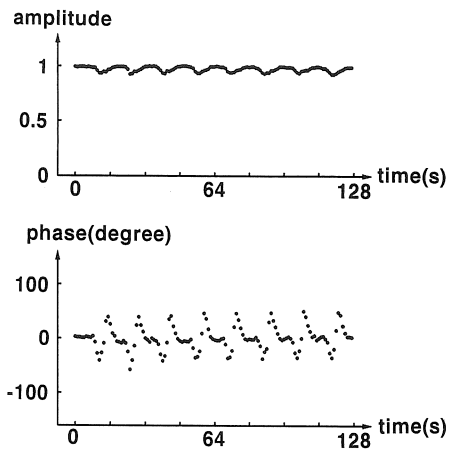


Fig.6. Time dependence of amplitude and phase of NMR signal observed 50 ms after the 90 degree pulse when a large iron liquid-nitrogen vessel was repeatedly put close to the 1mT line of the superconducting magnet. Large changes were observed in both amplitude and phase.

なお、Fig.3 に示されるような、時間とともにほぼ一定の変化を示す位相のドリフトは、128 回の一連の測定において一定の変化として直線で最小二乗近似し、その一定の変動を差し引いて位相のゆらぎを計算した。FID においては、各 td における数回の計測結果をすべてプロットしたが、スピン・エコーにおいては、測定点のばらつきが比較的小さかったため、各エコー時間における 5 回の測定の平均値のみを示した。

スピン・エコーにおける位相変動は、参照信号の位相変動と、 90° パルスとスピン・エコーの間でキャンセルできない磁場変動によるものと思われるため、黒丸と白丸のデータの差は、低い周波数 (10Hz 程度以下) の磁場変動によるものであると考えられる。この磁場変動の大きさは、Fig.4 の測定結果を直線に近似して評価すると、約 0.013mGrms (1.3×10^{-9} Trms) であった。この値は、環境磁場の変動として報告されている値³⁾ (都市部で 10^{-7} T, 郊外で 10^{-9} T) としてはかなり小さく、超伝導磁石による外部の環境磁場のシールドは、効果的であることが推測された。

2) 人工的外部磁場変動による共鳴磁場の变化

Fig.5 に、ループコイルの電流 (2A) を ON-OFF させたときに、FID の、 90° パルスから 50ms の時点において測定した信号の振幅と位相の時間変化を示す。このように、電流の変化とともに、振幅には大きな変化は見られなかったが、位相には大きな変化が見られた。この位相変化は、共鳴磁場の变化によるものであるが、この磁場変化は、ループコイルで加えた磁場の向きとは逆で、大きさは約 15% であった。

Fig.6 に、鉄製の液体窒素素容器を、磁石から離れた場所から磁石の中心から半径方向に約 1.6 m 離れた位置 (1mT ライン) まで、約 15 秒間隔で、繰り返し近づけたときの信号の振幅と位相の時間変化を示す。Fig.5 と同様の条件で計測したが、振幅、位相ともに大きな変化がみられた。振幅から評価される勾配磁場の变化は最大で 1 mG/cm, 位相変化から評価される共

鳴磁場の变化は最大 0.8mG であった。これは、ファントムの大きさ (8 mm) に対する液体窒素素容器とファントムの距離を考慮すると、共鳴磁場の变化に比べ、勾配磁場の变化は非常に大きいものと判断された。

考 察

1) 磁気シールドとしての超伝導磁石

MR で用いられている超伝導磁石は、共鳴磁場の減衰を抑えるため、きわめて低い抵抗値 ($10^{-10}\Omega$ 以下) しか持たないように製作され、永久電流モードで使用されている。よって MR で用いられている超伝導磁石は、電磁気学的には、巻始めと巻終わりが接続された抵抗ゼロのコイルとして扱って差し支えないものと思われる。このようなコイルには、電磁気学の基本法則により、外部から加えられた磁場に対して、コイルを貫く磁束が常に一定となるような電流が誘起される。すなわち、レンツの法則による磁束の変化を妨げるような誘導電流は、電気抵抗がゼロであるため全く減衰することなく流れ、その結果、コイルを貫く磁束はつねに一定に保たれる。

問題は、このような超伝導コイルに、外部から磁場がかけられたときに、磁石内に、どのような磁場分布が実現するかということである。いま、超伝導コイルに、外部から変動磁場 b がかけられるものとする。このとき、問題を単純化するために、 n 回の巻数をもつ超伝導コイルを、 z 軸に平行な軸をもつ一巻のループコイルを n 個直列にしたものとする。このとき、 i 番目のループ内における外部磁場の z 成分の分布を $b_i(x, y)$ とし、その面内での面積積分値を Φ_i とすると、外部磁場による磁石全体を貫く磁束 Φ_{ex} は、

$$\Phi_{ex} = \sum_{i=1}^n \Phi_i$$

と表される。よって、超伝導コイルには、

$$\Phi = -\Phi_{ex} = L\Delta I$$

をみたく誘導電流 ΔI が誘起される。ただし、 L は超伝導コイルの自己誘導係数である。このとき、電流 ΔI により、 i 番目のループ内に作られる磁場の z 成分を $B_i(x,y)$ とすると、 i 番目にループ内の位置 (x,y) での磁場変化 $\Delta B_i(x,y)$ は、

$$\Delta B_i(x,y) = b_i(x,y) + B_i(x,y)$$

と表される。

この磁場変化の大きさを一般的に議論することはできないので、特別な場合について議論する。まず、外部から加えられる磁場と、磁石の電流によって作られる磁場がともに、磁石内では空間的に均一であると仮定する。このとき、外部磁場 b による磁石を貫く磁束は、

$$\Phi_{ex} = b \sum_{i=1}^n S_i$$

と表される。ここに、 S_i は i 番目のループ内の面積である。いっぽう、誘導電流により作られる磁場 B とコイルを貫く磁束 Φ は、

$$\Phi = B \sum_{i=1}^n S_i$$

と表される。 $\Phi = -\Phi_{ex}$ であるので、 $B = -b$ となり、超伝導コイル内での磁場の変化 ΔB はゼ

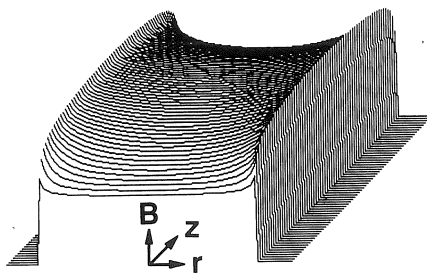


Fig.7. Distribution of the magnetic field along z -axis calculated in the finite solenoid (18.2 cm in diameter and 45.6 cm in length).

ロとなる。

以上のように、外部から加えられる磁場と、磁石内の電流によって作られる磁場が、ともに磁石内では空間的に均一である場合には、磁場の変動はゼロとなるが、それ以外の場合には、一般的にはゼロにはならないことが予想される。しかしながら、MR用磁石は、磁石内のかなり広い領域の磁場を非常に均一にするように製作されているため、誘導電流による磁場は、磁石内ではかなり均一であると期待される。

以上の予想を確認するために、実験で用いた超伝導磁石の設計図面から⁴⁾超伝導コイルの大きさを算出し、このコイルを、厚みをゼロとした有限長ソレノイド (直径 18.2 cm, 長さ 45.6 cm) で近似し、磁石内における磁場分布の計算を行った。Fig.7にその結果を示す。この結果を用いると、外部磁場変動に対する磁石内の磁場の変動を計算することができる。すなわち、 z 方向の均一な変動磁場に対して、コイルの中心において期待される磁場の変動は、かけられた変動磁場とは逆方向で、大きさは約 3.6% である。これは、磁石の中心における磁場が、磁石内の磁場の平均値よりも約 3.6% 高いことによるものである。

実際の超伝導磁石の場合には、有限長ソレノイドの場合よりも中心付近の磁場を均一にする設計がなされているので、シールドの効率ももっと高いことも考えられる。しかしながら、中心付近の磁場は均一であるものの、周辺部は、有限長ソレノイドよりも均一性が低い場合も考えられるため、一般的な予測は不可能である。しかしながら、MRで用いられる超伝導磁石においては、その均一領域の大きさなどから判断して、かなり高いシールドの効率が期待できるものと考えられる。

ところで、上の議論からもわかるように、磁束の変化を伴わない磁場変化、すなわち、奇数次の空間的勾配をもった磁場変化に対しては、超伝導コイルは有効なシールドの効果はないことが考えられる。たとえば、軸方向および動径

方向に関して対称な超伝導コイルに、一次の勾配磁場がかけられたときには、超伝導コイルは、全くシールドの効果を持たないことは明らかである。このように、空間的に不均一な外部変動磁場は、超伝導磁石内の共鳴磁場の分布に大きな影響を与えること考えられる。

2) 実験結果の解釈

前節の考察により、空間的に均一な磁場変動は、かなりシールドされることが期待される。よって、Fig.4で観測された、0.013mGrmsのという微小な共鳴磁場変動は、外部の磁場変動がシールドされた結果によるものと推測される。いっぽう、Fig.3とFig.6で示された、磁場変動に比較して磁場勾配の変動が大きいという現象は、空間的に一様な磁場変動はシールドされるが、勾配磁場成分はシールドされないという効果により解釈できる。

ところで、Fig.5に示されたループコイルの磁場に対する応答は、ループコイルの磁場強度が、軸方向に距離の -3 乗で変化することを考慮することにより説明できる。すなわち、磁石内のループコイルに近い領域では、磁場は強いので磁石を貫く磁束は多く、この領域の磁束により誘導電流はほぼ決定され、磁石中心のファントム位置では、かけられた外部の変動磁場よりも誘導電流による磁場のほうが強くなって、かけられた磁場とは逆方向の磁場が発生する、ということである。この共鳴磁場の変動は、前節と同様に、超伝導磁石を有限長ソレノイドと近似して計算すると、かけられた磁場と逆方向で大きさは約16.1%となり、実験とよく一致した値が得られた。実際の超伝導コイルは有限長ソレノイドとは異なるため、この一致には偶然的要素も含まれているが、この結果は、実験結果の解釈が概ね正しいことを示している。

3) 臨床用MRにおける磁気シールド効果

本研究で行った実験と以上の考察は、磁気シールドのない超伝導磁石に関するものであった。よって臨床用MRにおいても、磁気シールドのないものに関しては同様の議論が成り立つ

ものと思われる。しかしながら、現在、販売されている臨床用の超伝導磁石の多くには、鉄ヨークないしキャンセルコイルによる磁気シールドが行われているため、それらの磁石における考察が必要であろう。

まず、鉄ヨークを用いた超伝導磁石においては、シールドに用いられている鉄は、磁化曲線のかなり高磁場側で使用されているため、微分透磁率は比較的小さく、外部からの磁場変動に対するシールドは、あまり効果的ではない可能性がある。しかしながら、それでも微分比透磁率は1よりかなり大きいと思われるので、外部の変動磁場をある程度吸収し、超伝導コイルへの変動磁場の侵入を減らす働きを持つものと思われる。そして、ヨークによって吸収されずに超伝導磁石に侵入した磁束が、超伝導コイルの誘導電流によりキャンセルされるものと思われる。よって、鉄ヨークを持った超伝導磁石は、ヨークを持たないものに比べて、外部の磁場変動に対してはかなり効率よく変動を遮蔽できるものと思われる。

いっぽう、キャンセルコイルを用いた磁気シールドにおいては、次のような複雑な事情が存在する。すなわち、外部からの変動磁場が、メインコイルの磁場を増やす向きにかけられたとき、メインコイルでは誘導電流は磁石の電流を減らすように流れるが、キャンセルコイルの磁場は減らす方向に変動磁場がかけられるため、キャンセルコイルにおいては磁石の電流をふやすように誘導電流は流れる。ところが、メインコイルとキャンセルコイルは直列に接続されているため¹⁾、誘導電流は流れることができなくなる。実際は、二つのコイル間の結合や磁場分布などによってあるていど誘導電流は流れるものと思われるので、一般的な結論を得ることは難しいが、シールドを持たない超伝導磁石や、鉄ヨークを使用した超伝導磁石に比べて、外部磁場変動に対するシールドの効率は劣る可能性が考えられる。

以上のように、これまでMRにおける超伝導

磁石の磁気シールドは、外部への磁場の漏洩という観点のみから議論されてきたが、外部の磁場変動からの影響という観点からも考慮する必要があるものと思われる。とくに、最近盛んになりつつあるエコー時間の長い勾配エコー法による脳機能イメージングなどにおいては、共鳴磁場の安定性は特に不可欠である。また、最近いくつかの文献で指摘されているように、送電線や変電所近傍には比較的強い商用周波数の漏洩磁場が観測され⁵⁾、都市の磁気雑音も、MRでは無視できない程度に存在することが知られている³⁾。よって、MRの普及に伴い、このような磁場環境の比較的劣悪な地域へMRを設置する場合も増加していくと思われるため、このような検討は今後ますます重要となるものと思われる。

む す び

実験と数値計算によって、外部からの磁場変動が、超伝導磁石の共鳴磁場へ与える影響を検討した。その結果、MRで用いられている超伝導磁石は、外部の磁場変動をかなりシールドす

ることが示唆された。しかしながら、変動の勾配成分に対しては全くシールドの効果はないことが実験でも確認された。また、鉄ヨークやキャンセルコイルを用いたセルフシールド型の超伝導磁石に関して考察し、アクティブシールド型磁石においては、外部変動磁場があまり打ち消されない可能性が考えられた。

文 献

- 1) Davies FJ, Elliot RT, and Hawksworth DG : A 2-Tesla active shield magnet for whole body imaging and spectroscopy. IEEE Trans Mag, 27 : 1677-1680, 1991.
- 2) 巨瀬勝美, 安藤裕一, 唐沢 茂, 森 敏晃, 谷口俊一, 西村好司, 井上多門 : 静磁場変動による偽像の解析. 日磁医誌, 8 (S-1) : 81, 1988.
- 3) 小谷 誠 : 生体磁気とその計測法. BME, 2 : 651-659, 1988.
- 4) 200/89 superconducting magnet system assembly and commissioning manual. Oxford Instruments, 1989.
- 5) 竹下和磨, 重光 司 : 携帯型磁界暴露量計の開発と暴露実測. 信学技法, EMCJ91-29 : 43-49. 1991.

Effects of External Magnetic Disturbances on Resonance Field

Katsumi KOSE

*Institute of Applied Physics, University of Tsukuba
Tsukuba City, 305*

Effects of external magnetic disturbances on resonance field in a superconducting magnet were studied by an experiment and a numerical calculation. Magnetic shielding against external spatially-homogeneous magnetic field change due to induced superconducting current was observed to be effective. Magnetic shielding against spatially-inhomogeneous field change was not effective. Magnetic shielding against external magnetic disturbances in self-shielded superconducting magnets was speculated to be more effective in iron-yoke type magnets than in actively shielded magnets.