

核磁気共鳴システムのポータブル化に関する基礎的研究

日大生産工（院） ○大塚 和明
産総研 本間 一弘
日大生産工 山崎 憲

1. はじめに

NMR システムは空間的に均一な磁場の領域で測定を行う。したがって、信号を検出する領域に対し、非常に大規模なシステムを必要とし、システムを設置する場所や周囲に及ぼす漏洩磁場が問題となる。近年、このような一般的な NMR システムに対し、小型の NMR システムが開発¹⁻³⁾されており、これらのシステムは、小型の永久磁石を用いているため、材料コストやランニングコストが低く、漏洩磁場も少ない。また、測定領域が磁石に挟まれていないため、プローブに対して大きな対象を測定することが可能である。さらに、システムを移動することも可能であり、システムの小型化は多くの利点を有する。しかしながら、これらの NMR システムは、システム全体が小型化されるとともに、信号を検出する領域も狭くなることが問題点として挙げられる。このような背景から、システムの小型化を目的として、不均一な磁場を利用することにより、広範囲な領域において信号を検出することが可能なポータブル NMR システムについて検討している⁴⁾。今回は、静磁場と RF 磁場が直交しない不均一な磁場における核磁気共鳴について計算機シミュレーションで解析したので報告する。

2. 方法

永久磁石により生じる磁場 $B_0(\mathbf{r})$ と RF により生じる磁場 $B_1(\mathbf{r}, t)$ の空間分布を算出して、空間位置ごとに、磁化ベクトル $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ の挙動を計算機シミュレーションで解析する。

図 1 に装置の概観を示す。円筒型磁石の形状は直径 30[mm]、高さ 15[mm]である。ここで磁石とコイルが存在する座標系 (l, w, h) を定義し、座標系の原点は N 極の中心と合致させ、 l - w 平面は磁極面と平行にした。

図 2 に永久磁石の特性を示す。残留磁束密度 B は 1.42[T]、保磁力 H は 930[kA/m]とした。また、カップリングを避けるため、磁石とコイルの間に 1[mm]の空隙を設け、スペーサを配置した。RF コイルの形状は D 型とし、コイルは l - w 平面に平行にして N 極側に 2 つ配置した。2 つの D 型コイルの

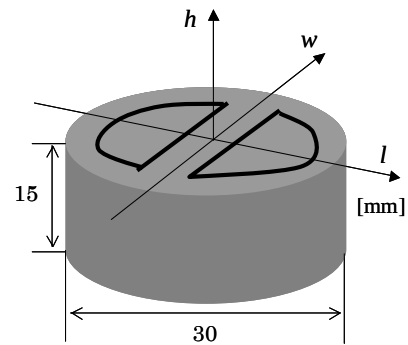


図 1 装置の概観

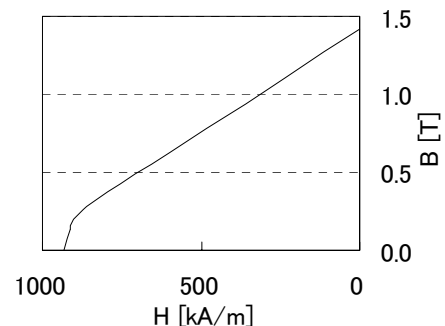


図 2 永久磁石の特性

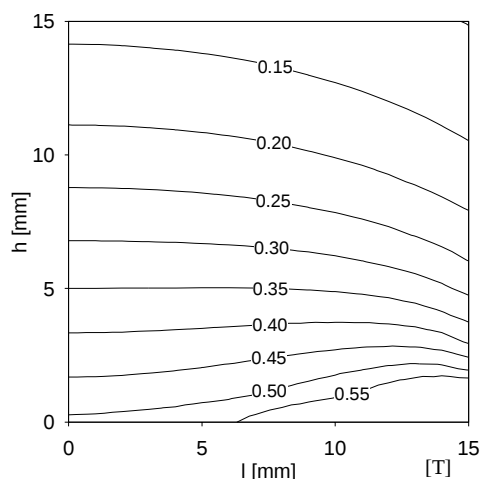


図 3 $B_0(\mathbf{r})$ の空間分布

間隔は 2[mm]とした．コイルは 2[mm]厚の FRP 上に固定する．コイルの素材は銅で導電率は 5.77×10^7 [S/m]とした．電流の向きは近接するコイルの一边において，同方向となるように設定した．

サンプルの形状は 10[mm] × 10[mm] × 10[mm]の立方体とした．サンプルとコイルの間に 1[mm]のスペーサを配置した．したがって，スペーサや FRP の厚みを考慮すると，サンプルは l 軸方向が $-5 \leq l \leq 5$ ， w 軸方向が $-5 \leq w \leq 5$ ， h 軸方向が $4 \leq h \leq 14$ に存在することになる．

図 3 に $B_0(\mathbf{r})$ の空間分布を示す．磁場は 1 [mm]間隔で測定を行った．RF の周波数を可変することにより， $B_0(\mathbf{r})$ の空間分布を利用して，選択的に励起することが可能である．

図 4 に $B_0(\mathbf{r})$ 及び $B_1(\mathbf{r},t)$ のベクトル分布を示す．図では，9 つの空間位置における $B_0(\mathbf{r})$ 及び $B_1(\mathbf{r},t)$ のベクトル分布を表示している．図の中央に存在するベクトルの空間位置は $(l, w, h) = (0, 0, 5)$ である．各々のベクトルは磁極面からの高さ h が 5[mm]で，各々の間隔は 3[mm]である．図より $B_0(\mathbf{r})$ と $B_1(\mathbf{r},t)$ は空間位置において大きさと方向が異なる．したがって，不均一な磁場における核磁気共鳴の検討が必要不可欠である．

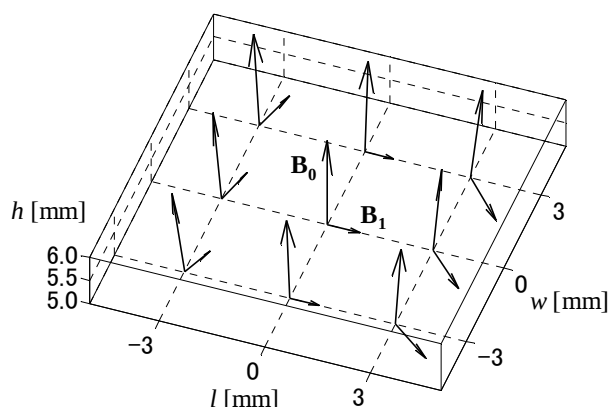


図 4 $B_0(\mathbf{r})$ 及び $B_1(\mathbf{r},t)$ のベクトル分布

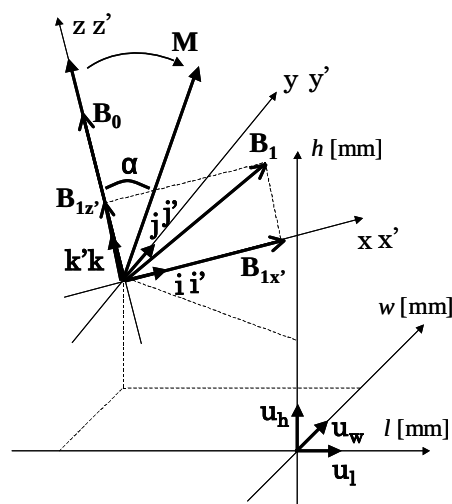


図 5 解析方法

図 5 に解析方法を示す．座標系 (l, w, h) の基本ベクトルを (u_l, u_w, u_h) とする． $B_0(\mathbf{r})$ の方向を $+z$ 方向として， $B_1(\mathbf{r},t)$ を $B_0(\mathbf{r})$ と合致する成分及び $B_0(\mathbf{r})$ と直交する成分に分解し， $B_0(\mathbf{r})$ と直交する方向を $+x$ 方向とする座標系 (x, y, z) を空間位置において定義する．ここで，座標系 (x, y, z) の基本ベクトルを (i, j, k) とする．また， z 軸を回転軸とする座標系 (x', y', z') を空間位置において定義し，座標系 (x', y', z') の基本ベクトルを (i', j', k') とする． $B_0(\mathbf{r})$ と $B_1(\mathbf{r},t)$ をもとに，RF を照射した際の座標系 (x', y', z') におけるフリップ角を算出する．さらに座標系 (l, w, h) から観測される $\mathbf{M}(\mathbf{r},t)$ の緩和現象⁵⁾を算出する．

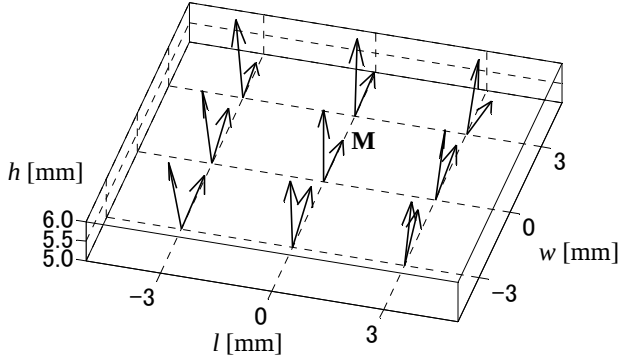


図 6 RF を照射した直後の $M(\mathbf{r},t)$

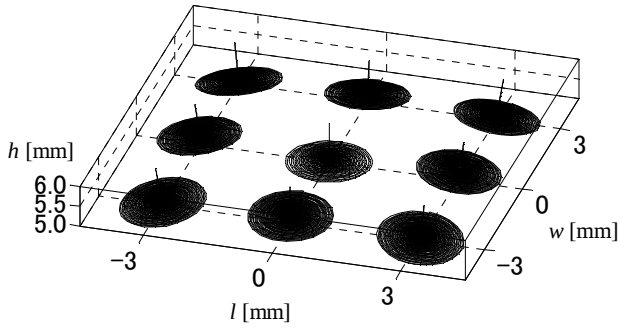


図 7 座標系 (l, w, h) から観測した $M(\mathbf{r},t)$ の緩和現象

3. 結果及び考察

図 6 に RF を照射した直後の $M(\mathbf{r},t)$ を示す．観測した $M(\mathbf{r},t)$ の空間位置は図 4 と対応している． $B_0(\mathbf{r})$ の方向が空間位置で異なるため，スピンは空間位置において異なる軸を中心にラーモア周波数で歳差運動をする．ここで RF の中心周波数は 15[MHz]，周波数の幅は 500[kHz]，印加時間は 660[μ s] とした． $B_1(\mathbf{r},t)$ の方向と大きさが異なるため，空間位置において $M(\mathbf{r},t)$ の倒れる方向が異なり，大きさの異なるフリップ角が算出された．さらに，座標系の関係式を用いて，座標系 (l, w, h) における RF を照射した直後の $M(\mathbf{r},t)$ を示した．

図 7 に座標系 (l, w, h) から観測された $M(\mathbf{r},t)$ の緩和現象を示す．図 7 は， $M(\mathbf{r},t)$ の大きさが 1，縦緩和時間 T_1 は 560[ms]，横緩和時間 T_2 は 34[ms] として算出した．時刻 t は RF を切った時刻を 0 [s] として，0 [s] から 3000 [ms] まで緩和現象を算出した．

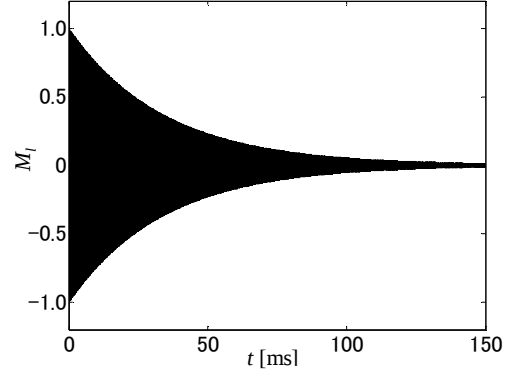


図 8(a) $M_l(\mathbf{r},t)$ ($(l, w, h)=(0,0,5)$)

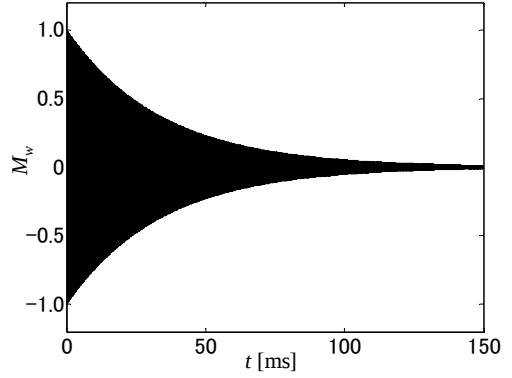


図 8(b) $M_w(\mathbf{r},t)$ ($(l, w, h)=(0,0,5)$)

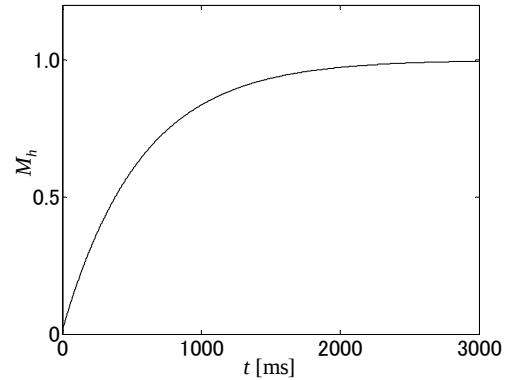


図 8(c) $M_h(\mathbf{r},t)$ ($(l, w, h)=(0,0,5)$)

図 8(a)(b)(c) に $(l, w, h)=(0,0,5)$ における $M(\mathbf{r},t)$ の各成分 ($M_l(\mathbf{r},t), M_w(\mathbf{r},t), M_h(\mathbf{r},t)$) を示す． $(l, w, h)=(0,0,5)$ において， $B_0(\mathbf{r})$ の方向が $+h$ 方向，かつ $B_1(\mathbf{r},t)$ が $+l$ 方向であるため，座標系 (l, w, h) は座標系 (x, y, z) と合致する．図 8(a)(b) は，ラーモア周波数で振動しながら，横磁化が時定数 T_2 で減衰している．一方，図 8(c) は縦磁化が時定数 T_1 で熱平衡状態に戻っている．

図 9(a)(b)(c) に RF により励起された $M(\mathbf{r},t)$ の各成分 ($M_l(\mathbf{r},t), M_w(\mathbf{r},t), M_h(\mathbf{r},t)$) を示す．励起された空間位置は $h=5$ [mm] である．図 9 は，サンプルの形状と

磁場を測定した点の関係から，121 点の空間位置について計算している．図の波形は，空間位置の磁場に比例した角速度で回転している 121 種類の $\mathbf{M}(\mathbf{r},t)$ を含んでいる．図 9 における計算の条件は図 7 と同様である．

図 9(a)(b)は，磁場の不均一性により，空間位置ごとに $\mathbf{M}(\mathbf{r},t)$ のラーモア周波数が異なるため，位相が分散する．したがって，信号の減衰を引き起こす．また， $\mathbf{M}(\mathbf{r},t)$ の倒れる方向が空間位置で異なるため，RF を照射した直後の信号は，均一な磁場と比較して微弱になると考えられる．

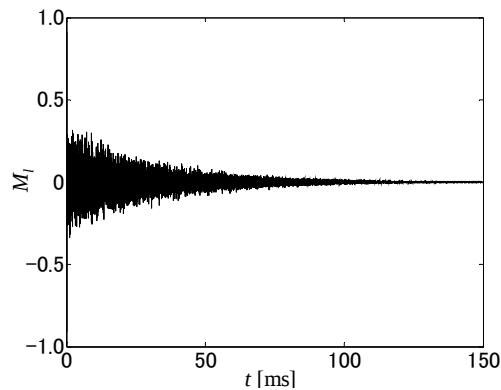


図 9(a) $M_I(\mathbf{r},t)$

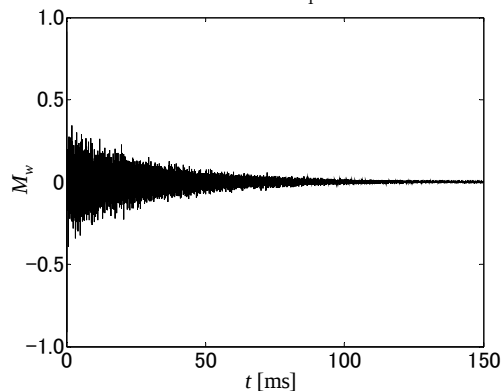


図 9(b) $M_w(\mathbf{r},t)$

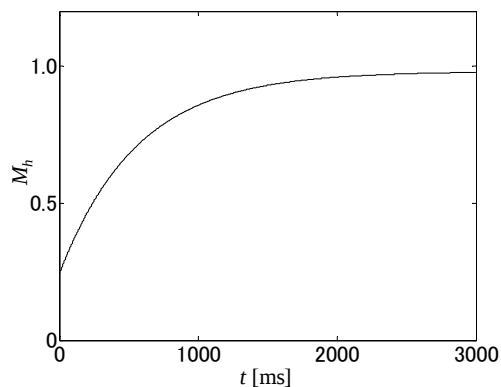


図 9(c) $M_h(\mathbf{r},t)$

RF 送受信系を $I-w$ 平面に配置した場合，信号を検出することは可能であるが，検出される信号は微弱であると考えられる．今回は，円筒型磁石を用いた小型 NMR システムの結果を示したが，U 字型磁石を用いた NMR システムにおける磁化ベクトルの挙動を解析することも可能であることを確認した．したがって，任意形状のシステムに対して解析が可能である．今後は，T2 計測を行うため，CPMG シーケンス⁶⁾における磁化ベクトルの挙動を解析する．

4. 結論

静磁場及び RF 磁場が互いに直交しない不均一な磁場における磁化ベクトルの挙動について計算機シミュレーションで解析した．本解析は任意形状の NMR システムに適用することが可能であるため，小型の NMR プローブを設計する際に有用である．

参考文献

- 1) Casanova, F., Blumich, B.: Two-dimensional imaging with a single-sided NMR probe. J. Magn. Reson., 163 (2003) p.38-45
- 2) J. Perlo, F. Casanova and B. Blumich: 3D imaging with a single-sided sensor: an open tomograph, Journal of Magnetic Resonance, 166 (2004) p.228-235
- 3) 宇津澤慎, 中島善人, 拝師智之: Unilateral(片側開放型)NMR の開発, 第 9 回 NMR イメージング研究会講演要旨集 (2004) p.78-82
- 4) 大塚和明, 本間一弘, 山崎憲: 不均一磁場における核磁気共鳴の検討, 第 32 回日本磁気共鳴医学会大会, vol.24 (2004) p.305
- 5) F. Bloch: Generalized Theory of Relaxation. Phys. Rev., 105 (1946) p.1206-1222
- 6) Meiboom S. and Gill D.: Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation time. Review of Scientific Instruments, 29(1958) p.688-691