

NMR 映像法とは

1-1 特 徴

CT には透過型と放出型の二つのタイプが知られており，X線CTは前者に，PETは後者に属する．透過型CTにおいては，外部から放射線を被写体に照射し，被写体内部の電子密度分布によって吸収された後の放射線を検出して投影データとする．一方，放出型CTにおいては，放射性同位元素を含む化合物を被写体に投与し，これから放出される放射線を検出して投影データとする．NMR 映像法においては，被写体に一様静磁場を

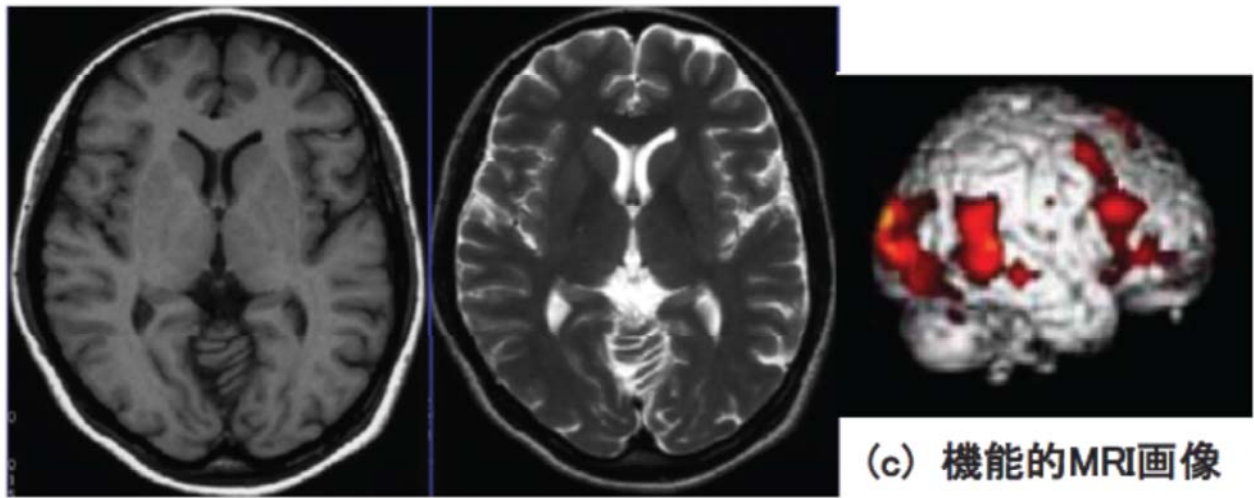
かけ，被写体内の特定核のゼーマン・エネルギーに一致する電磁波を照射することにより，基底状態から励起状態への共鳴的遷移を誘起し，この後に放出される電磁波をプローブ・アンテナによって検出する．この際，静磁場に勾配をつけることにより，どの位置からの信号かを区別する．以上のことからわかるように，NMR 映像法は信号のオリジンにより放出型に分類されるが，他のCT諸法とは異なり，電磁波の波長が長い($10 \sim 10^3 \text{m}$)のために，位置情報を与えるのに特別の工夫を必要とする．

ここで，NMR 映像法の特徴をまとめると，次

- (1) 被写体に対して、一様静磁場，時間的に変化する勾配磁場およびラジオ波を用いるのみで，電離放射線を用いないために放射線障害のような危険性が無い。
- (2) スピンが零でない任意の核種の空間分布が映像化される。しかし人体に含まれる ^1H 以外の重要な構成要素である ^{17}O , ^{19}F , ^{23}Na , ^{31}P , ^{39}K の一定周波数での相対感度は ^1H を1として，それぞれ 3×10^{-4} , 4×10^{-8} , 1×10^{-8} , 3×10^{-4} および 9×10^{-5} と極めて小さく，映像化は非常に難しい。しかし安定同位元素のうちでは最も相対感度の高い ^1H が H_2O という形で大量に含まれているのは幸いという他はない。
- (3) 緩和時間 (T_1 , T_2) の空間分布を描出できる。特にプロトンの緩和時間は，水分子の運動状態および磁氣的環境といった微視的状況によって決まっており，細胞レベルでの生化学的情報を与えると思われる。これはX線 CT が形態的変化のみを捉えるのとは対照的であり，NMR-CT の情報がX線 CT のそれと相補的であると言われるゆえんである。
- (4) 血液やリンパ液などの体内液の流れの空間的分布が求まる。

機能的MRIにより、リアルタイムでの脳の活性状態の映像化が可能になっている。また空間分機能、撮影時間の大幅な改善がなされている。

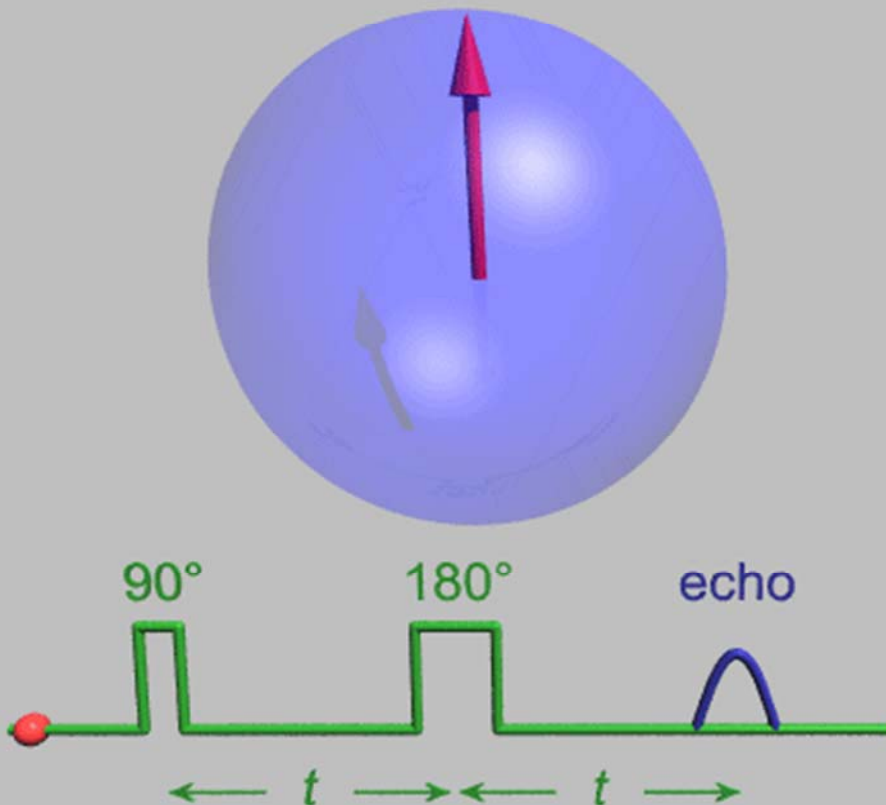
以上のように、スピンエコー法を用いると、NMRパラメータの空間分布が得られ、それぞれのNMRパラメータを強調した画像となる。短い τ と T_R の場合には、 T_1 強調画像となり、長い τ と T_R の場合には、 T_2 強調画像となる。一例として、 T_1 と T_2 強調頭部MIR画像をそれぞれ図7.14(a)と(b)に示す。



(a) T_1 強調画像

(b) T_2 強調画像

(c) 機能的MRI画像

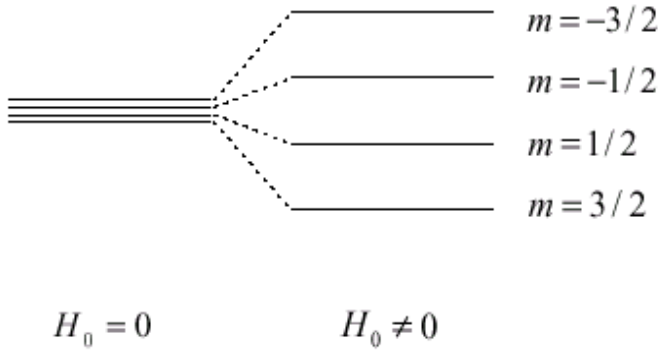


核磁性と磁気共鳴吸収

$$\begin{aligned}\vec{\mu} &= g_N \mu_N \vec{I} \\ &= \gamma \hbar \vec{I}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{H}_0 &= -\vec{\mu} \cdot \vec{H}_0 \\ &= -\gamma \hbar \vec{I} \cdot \vec{H}_0\end{aligned}$$

$$E_m = -\gamma \hbar H_0 m$$



$$\begin{aligned}M(T, H) &= \frac{N_0 \gamma \hbar \sum_{m=-I}^I m \exp\left(\frac{\gamma \hbar H_0 m}{k_B T}\right)}{\sum_{m=-I}^I \exp\left(\frac{\gamma \hbar H_0 m}{k_B T}\right)} \\ &= N_0 \gamma \hbar I B_I(Ix)\end{aligned}$$

$$B_I(y) = \frac{2I+1}{2I} \coth\left(\frac{2I+1}{2I} y\right) - \frac{1}{2I} \coth\left(\frac{y}{2I}\right)$$

$$\chi_0(T) = \frac{M}{H} = \frac{N_0 \gamma^2 \hbar^2}{3k_B T} I(I+1)$$

$M(\text{核磁化}) \propto N_0(\text{水素原子濃度})$
 $\propto N_0(x, y, z) \text{ (MRI)}$

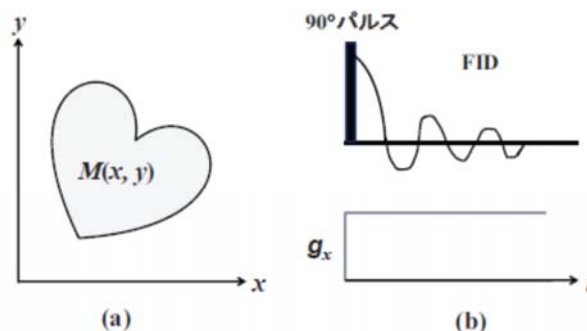
図 1: $I = 3/2, \gamma > 0$ の場合の磁場によるエネルギー分離

MRI の概説

(a) に示すような 2 次元の物体を対象として、均一な静磁場 H_0 が印加された場合の核磁化分布を $M(x, y)$ とする. この系に 90° パルスを印加して横磁化を発生させた直後, 図 7.5(b) に示すように, x 方向に線形磁場勾配 g_x を印加する. この時, 位置 (x, y) における静磁場強度は, $H(x) = H_0 + g_x x$ となるので, 核磁化のラーマ—歳差運動の角周波数 $\omega(x)$ は,

$$\omega(x) = \gamma_n H(x) = \gamma_n (H_0 + g_x x) = \omega_0 + \gamma_n g_x x \quad (7.2)$$

となる. ここで, $\omega_0 = \gamma_n H_0$. 観測される NMR 信号 $S(t)$ は, この角周波



2 次元核磁化分布の FID 信号. $M(x, y)$ は面内の核磁化分布.
 g_x は x 方向の線形磁場勾配.

$$\begin{aligned}
S(t) &= -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -c \frac{d}{dt} \int \int M(x, y) \exp \{i\omega(x)t\} dx dy \\
&= -c \frac{d}{dt} \int \int M(x, y) \exp \{i\omega_0 t + i\gamma_n g_x x t\} dx dy \\
&= -c \int \int M(x, y) (i\omega_0 + i\gamma_n g_x x) \exp \{i\omega_0 t + i\gamma_n g_x x t\} dx dy
\end{aligned} \tag{7.3}$$

と表される。積分範囲は物体の存在する範囲をとる。ここで、勾配磁場による角周波数 $\gamma_n g_x x$ を ω_0 に比べて無視すると、

$$S(t) = -i c \omega_0 \exp(i\omega_0 t) \int \int M(x, y) \exp(i\gamma_n g_x x t) dx dy \tag{7.4}$$

となる。この式は NMR 信号が静磁場による速い歳差運動 $\exp(i\omega_0 t)$ と勾配磁場による遅い歳差運動の積で表せることを示している。この速い歳差運動は実験系から回

転系に移って考えることによって消える。実際には、NMR コイルで受信された信号を、参照角周波数 ω_0 と混合する位相敏感検波

することにより、回転系における NMR 信号を観測することができる。この信号を定数などを省略して改めて、 $S(t)$ とすると、

$$S(t) = \int \int M(x, y) \exp(i\gamma_n g_x x t) dx dy \tag{7.5}$$

と表される。ここで、式 (7.5) を複素数で記述したのは、実部 $S_r(t)$ と虚部 $S_i(t)$ は計測できるためである。すなわち、

$$\begin{aligned}
S(t) &= S_r(t) + iS_i(t) \\
&= \int \int M(x, y) \{ \cos(\gamma_n g_x x t) + i \sin(\gamma_n g_x x t) \} dx dy
\end{aligned} \tag{7.6}$$

$$\begin{aligned}
F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-i\omega t) dt \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int \int M(x, y) \exp(i\gamma_n g_x x t) dx dy \right\} \exp(-i\omega t) dt
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int \int M(x, y) \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega t + i\gamma_n g_x x t) dt \right\} dx dy \\
&= 2\pi \int \int M(x, y) \delta(-\omega + \gamma_n g_x x) dx dy \\
&= \frac{2\pi}{\gamma_n g_x} \int M\left(\frac{\omega}{\gamma_n g_x}, y\right) dy
\end{aligned} \tag{7.7}$$

となる。ここで、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\alpha t) dt = 2\pi \delta(\alpha), \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx = f(x_0)$$

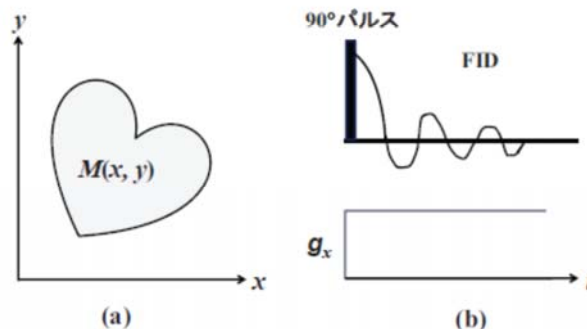
を使った。式 (7.7) は、スペクトル強度 $F(\omega)$ が核磁化分布 $M(x, y)$ を y 軸方向に積分したもので (図 7.6 参照), $F(\omega)$ は $x = \omega/\gamma_n g_x$ における $M(x, y)$ の y 軸方向への投影像 (y 軸に沿った積分) に対応する。

MRI の概説

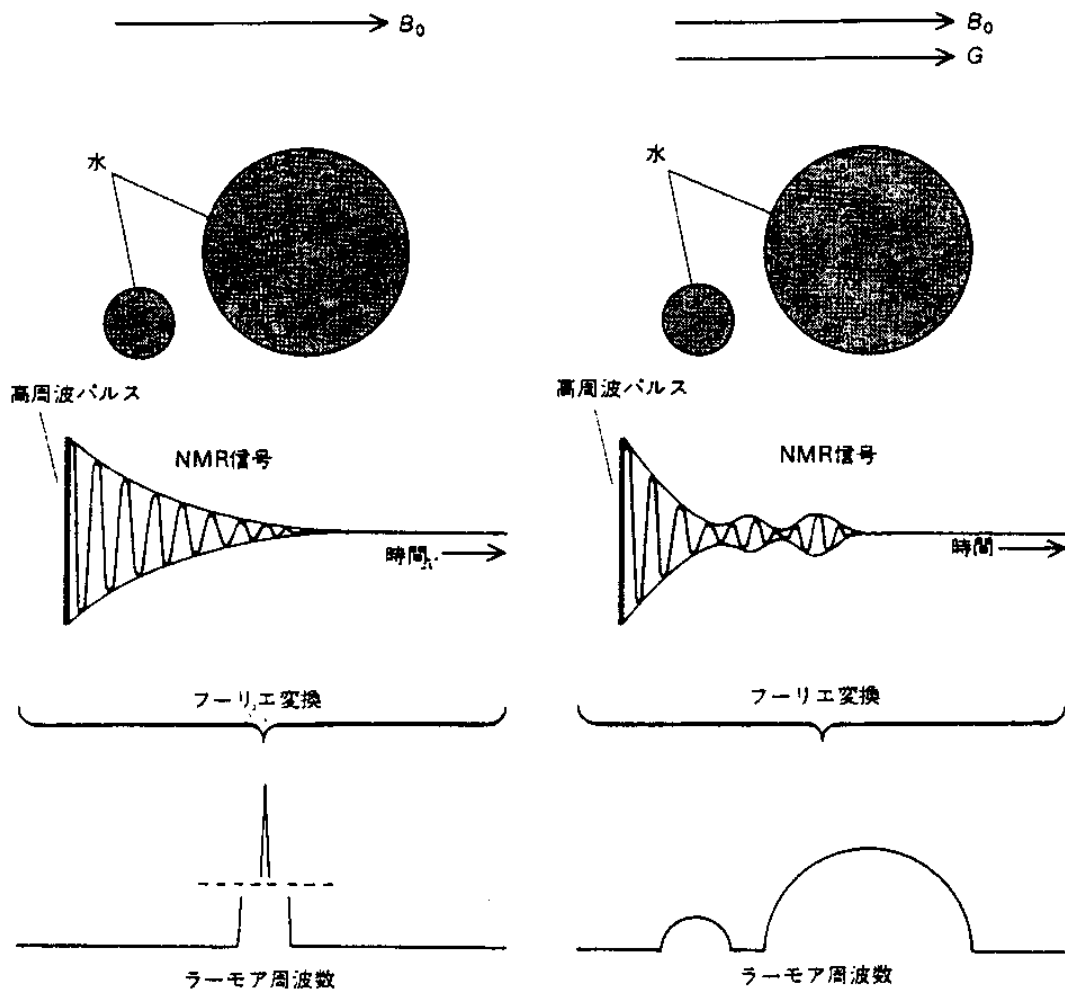
(a) に示すような 2 次元の物体を対象として、均一な静磁場 H_0 が印加された場合の核磁化分布を $M(x, y)$ とする。この系に 90° パルスを印加して横磁化を発生させた直後、図 7.5(b) に示すように、 x 方向に線形磁場勾配 g_x を印加する。この時、位置 (x, y) における静磁場強度は、 $H(x) = H_0 + g_x x$ となるので、核磁化のラーマ—歳差運動の角周波数 $\omega(x)$ は、

$$\omega(x) = \gamma_n H(x) = \gamma_n (H_0 + g_x x) = \omega_0 + \gamma_n g_x x \tag{7.2}$$

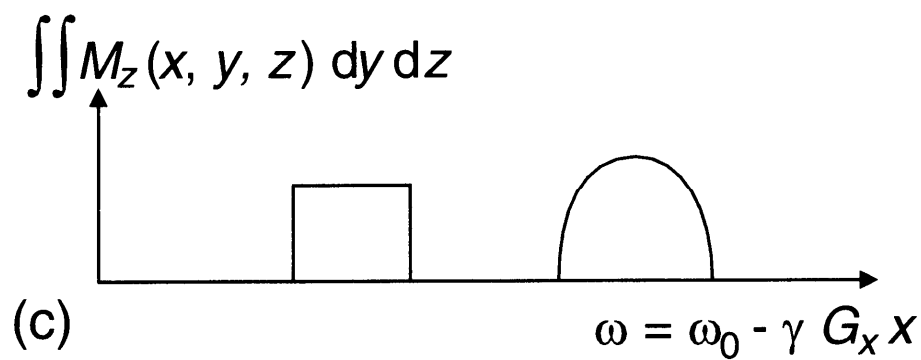
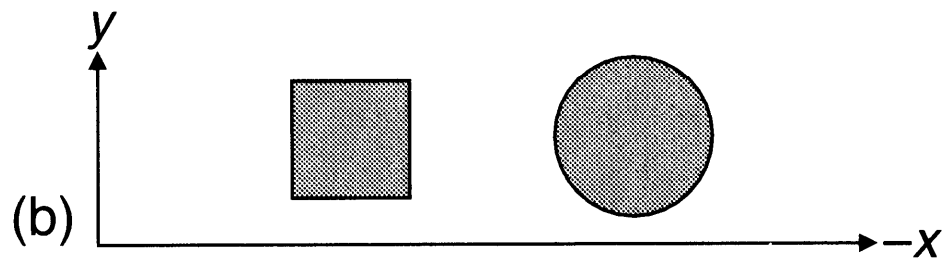
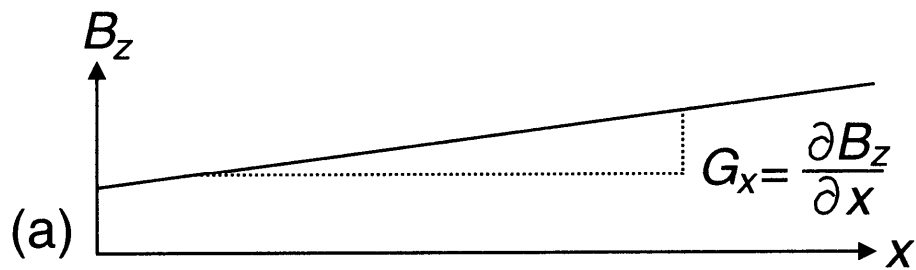
となる。ここで、 $\omega_0 = \gamma_n H_0$ 。観測される NMR 信号 $S(t)$ は、この角周波



2 次元核磁化分布の FID 信号. $M(x, y)$ は面内の核磁化分布.
 g_x は x 方向の線形磁場勾配.



NMR画像の作成法 NMR画像の作成には、NMR信号に空間情報をもたせることが必要である。

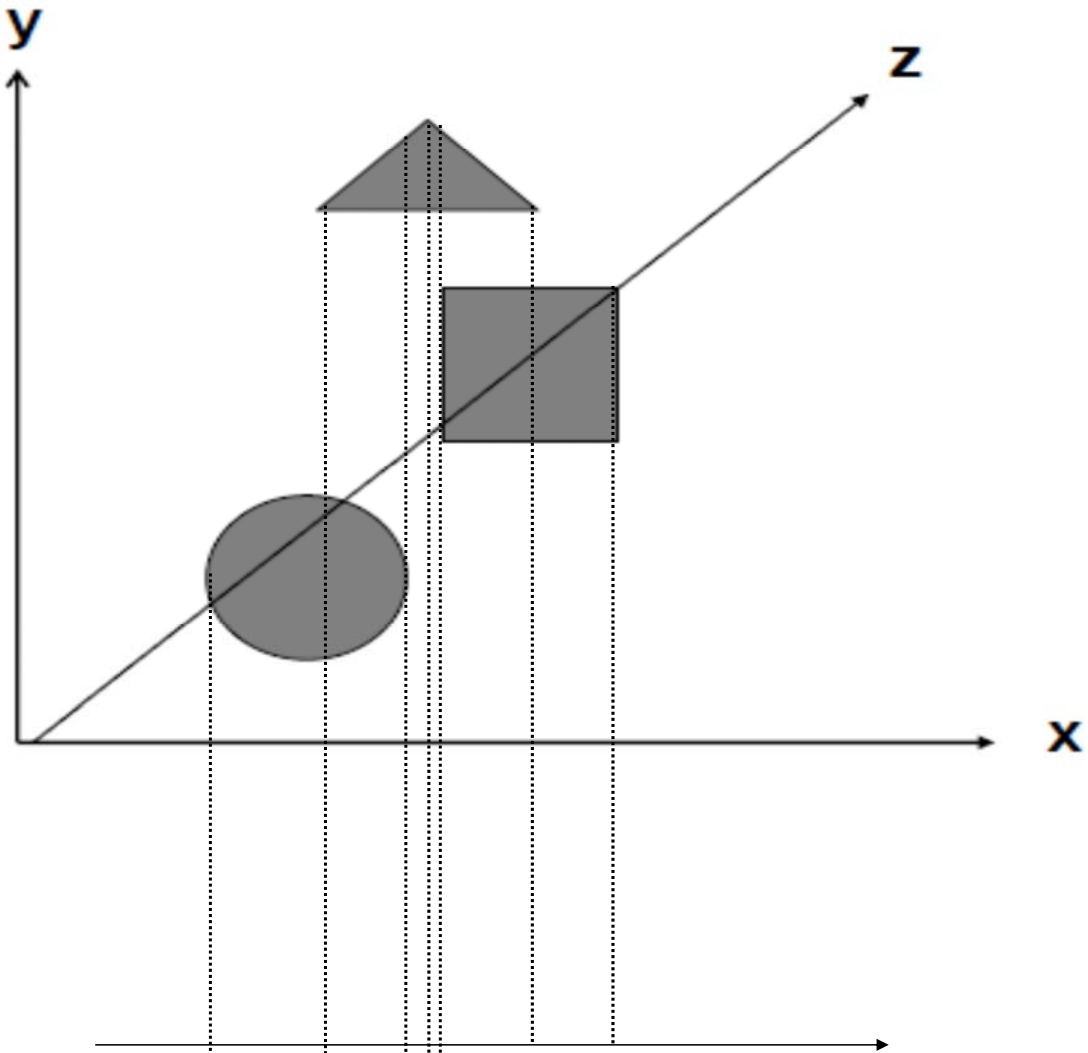
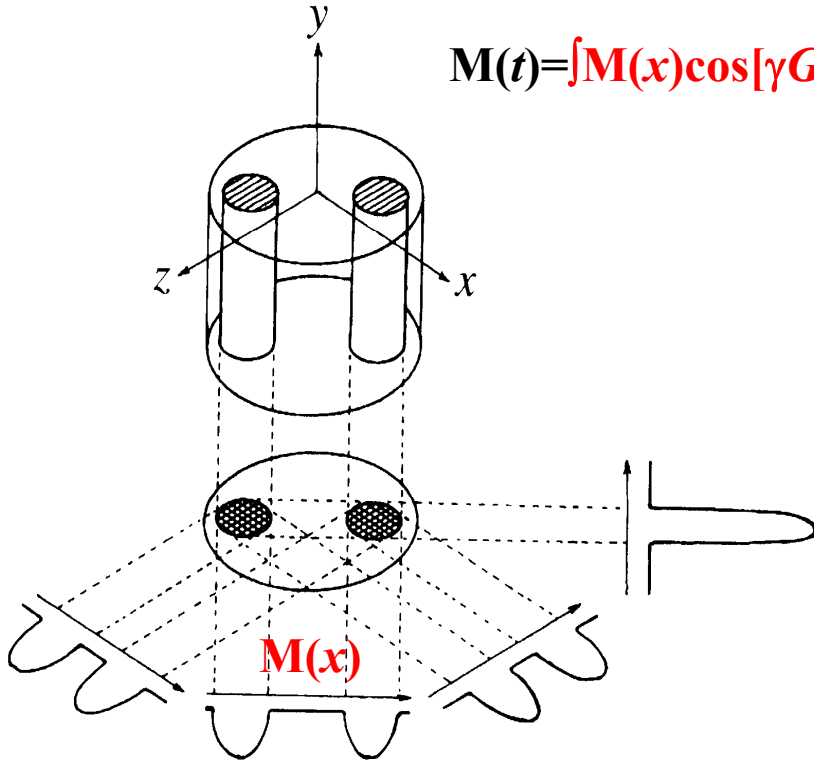


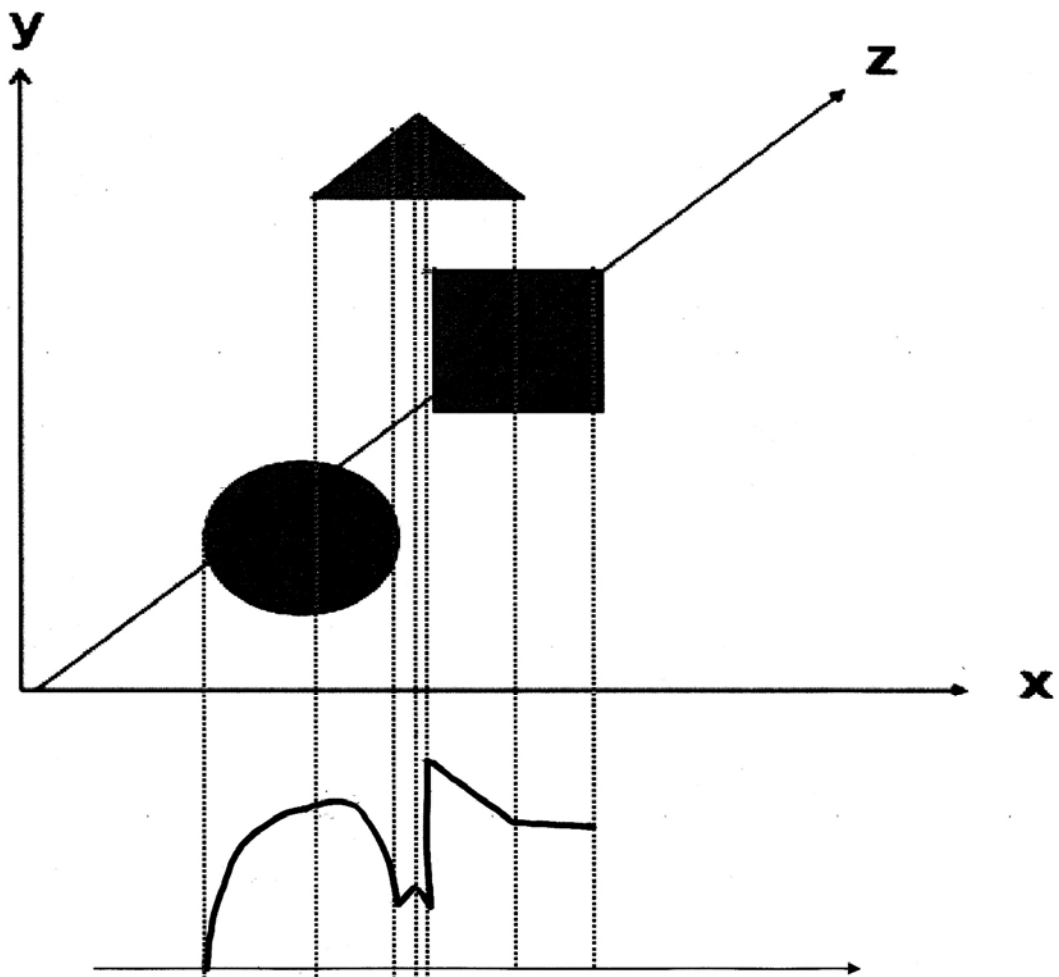
$$|\psi'(t, x)\rangle = \exp[iI_z[\gamma G_x x(t-2\tau)]] \exp[(iI_z \Delta\omega_0(t-\tau))] \exp(iI_x \pi) \exp[iI_z(\Delta\omega_0 \tau)] |I_y = M(x)\rangle$$

$$\langle \psi'(t, x) | I_y | \psi'(t, x) \rangle = M(x) \cos[\Delta\omega_0(t-2\tau)] \cos[\gamma G_x x(t-2\tau)]$$

観測されるスピンエコー: ($t > 2\tau$)

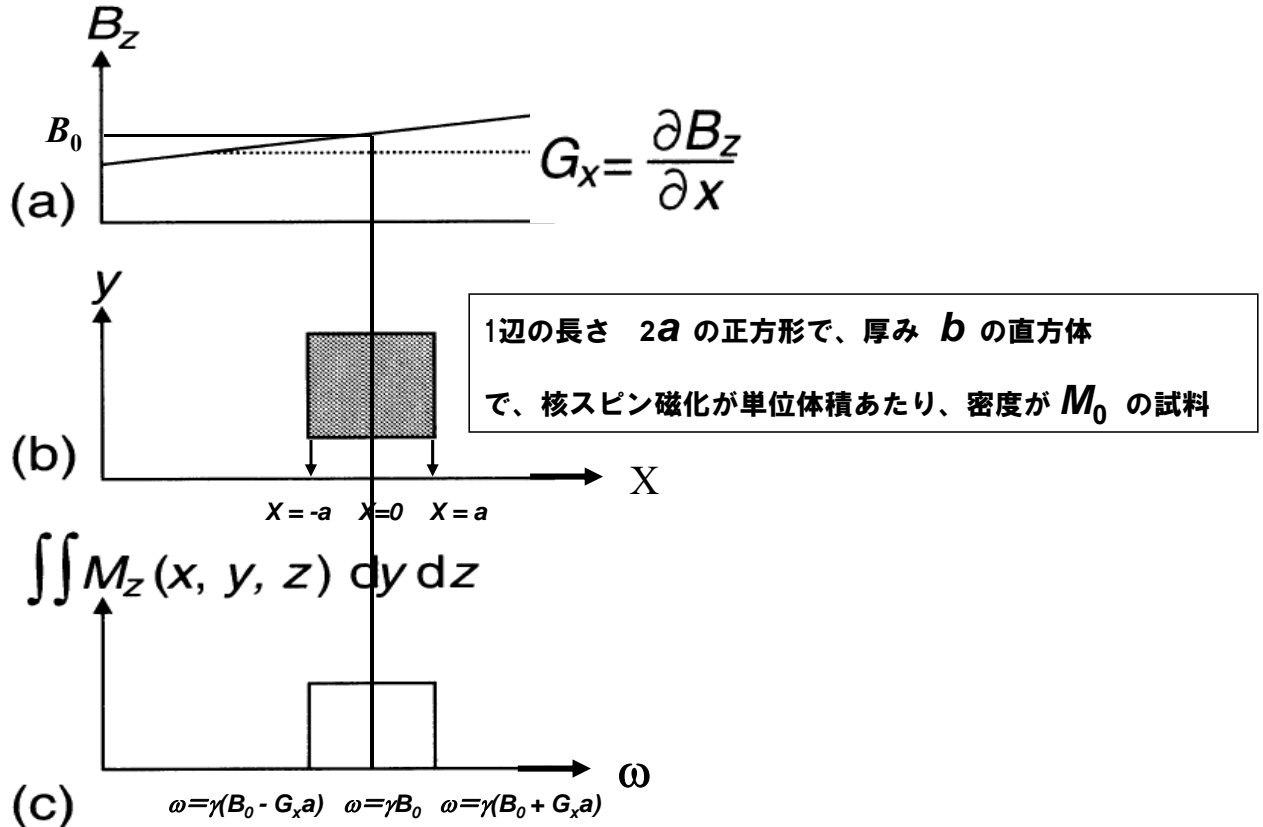
$$M(t) = \int M(x) \cos[\gamma G_x x(t-2\tau)] dx \cdot \exp\{-[t - 2\tau]/T_2^*\}$$





MRIレポート 2

下記のように、 x 軸方向の磁場勾配下にあるテスト試料の $\pi/2$ パルス後の核磁化の時間変化を求めよ。



転系に移って考えることによって消える. 実際には, NMR コイルで受信された信号を, 参照角周波数 ω_0 と混合する位相敏感検波 (第4章, 4.2節を参照) することにより, 回転系における NMR 信号を観測することができる. この信号を定数などを省略して改めて, $S(t)$ とすると,

$$S(t) = \int \int M(x, y) \exp(i\gamma_n g_x x t) dx dy \quad (7.5)$$

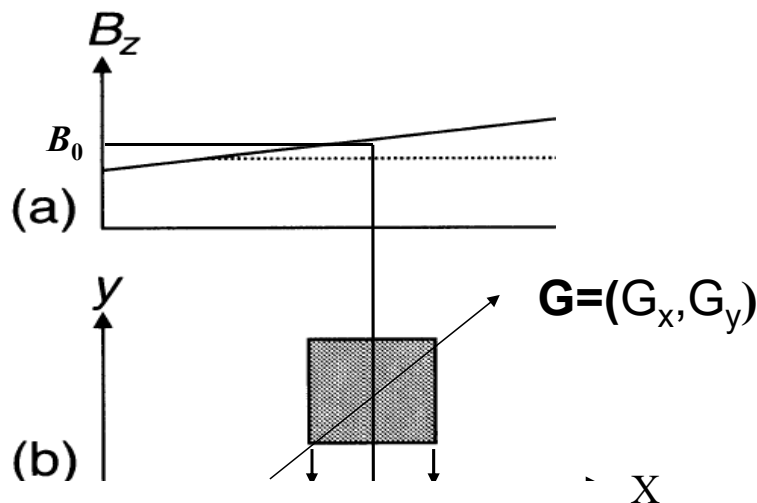
と表される. ここで, 式 (7.5) を複素数で記述したのは, 実部 $S_r(t)$ と虚部 $S_i(t)$ は計測できるためである. すなわち,

$$\begin{aligned} S(t) &= S_r(t) + iS_i(t) \\ &= \int \int M(x, y) \{ \cos(\gamma_n g_x x t) + i \sin(\gamma_n g_x x t) \} dx dy \quad (7.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-i\omega t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int \int M(x, y) \exp(i\gamma_n g_x x t) dx dy \right\} \exp(-i\omega t) dt \end{aligned}$$

MRIレポート 3

下記のように, X-Y面内の磁場勾配 $G=(G_x, G_y)$ 下にあるテスト試料の $\pi/2$ パルス後の核磁化の時間変化を求めよ. また, 得られる周波数分布スペクトルを模式的に描け.



1辺の長さ $2a$ の正方形で、厚み b の直方体で、核スピン磁化が単位体積あたり、密度が M_0 の試料

(c) $\omega = \gamma(B_0 - G_x a) \quad \omega = \gamma B_0 \quad \omega = \gamma(B_0 + G_x a) \quad \omega$