

## 〈 第 1 章 〉

# MRI と生体内水分子の拡散

1

### 〔第 1 節〕 はじめに

磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging : MRI) は、強磁場下における原子核の核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance : NMR) 信号をもとに画像を得る方法であり、1973年に Lauterbur によって発表された<sup>1)</sup>。その後、強磁場を安定して発生する磁石の開発や、撮像法の多様化および高速化、さまざまな疾患における利用などが進み、今日では画像診断に欠かせない技術となっている。他の画像診断技術に対する MRI の特徴として、①形態的情報とともに、代謝過程や脳活動などの機能的情報も得られる、②非侵襲であり、放射線被ばくがない、③任意の方向の断層像を得ることができる、④組織間のコントラストが高い、⑤骨によるアーチファクトが少ないなどがあげられる。

MRI によって測定できる現象の 1 つに、拡散がある。MRI を用いた拡散現象の画像化は、生体組織に含まれる水分子の自己拡散を主な対象として、80 年代から行われてきたが<sup>2)</sup>、臨床応用が急速に進んだのは、EPI (echo planar imaging) による高速撮像が可能になるとともに急性期脳梗塞の診断における有用性が見出された 90 年代からである<sup>3)</sup>。90 年代は脳梗塞の積極的な治療が行われるようになった時期でもあり、発症直後から病変部を描出可能な拡散強調画像は急速に普及した。また、拡散強調画像は急性期脳梗塞以外にも脳腫瘍、脳炎などで T1 強調画像や T2 強調画像とは異なるコントラストを示すことが知られており、その有用性が確立されている。さらに、脳の白質のように線維状の細胞からなる組織では、拡散の速さが方向によって異なる性質を利用して、神経走行路の構造を立体的に描出することもできるようになった<sup>4)</sup>。本章では、MRI の基本原理、拡散現象と拡散 MRI について述べる。

### 〔第 2 節〕 MRI の基本原理

#### (1) MRI 装置の構成

MRI は原理上、人体などの測定対象に磁場を加えるための磁石を必要とする。現在は、超伝導磁石と永久磁石の 2 種類が主に使われている。超伝導磁石は、最大で 10 T に迫る強力な磁場を発生できることと、発生磁場の時間的な安定性がきわめて高いのが利点である。永久磁石は冷却の必要が無いために保守が簡便であり、比較的低磁場の装置に利用されている。

図 1-1 に示すのは、最も一般的な横磁場型の超伝導磁石を用いた MRI 装置の模式図である。超伝導磁石の内側には、シムコイル、傾斜磁場コイル、RF (radio frequency : ラジオ周波数) コイルが備わっている。超伝導磁石は装置の最外周部に配置され、低温容器に収められた超伝導コイルには大電流が流れ、非常に強い磁場 (主磁場) が発生している。主磁場が強いほど MRI 信号は大きくなり、信号対雑音比の高い高品位の画像が得られる。その内部には主磁場の均一性の乱れを補正するシムコイルが巻か

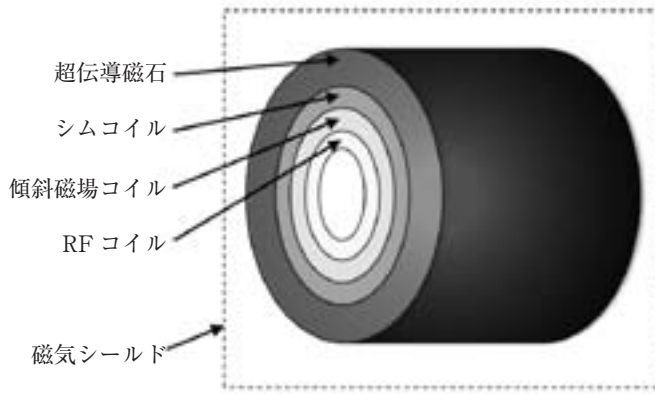


図 1-1 MRI 装置

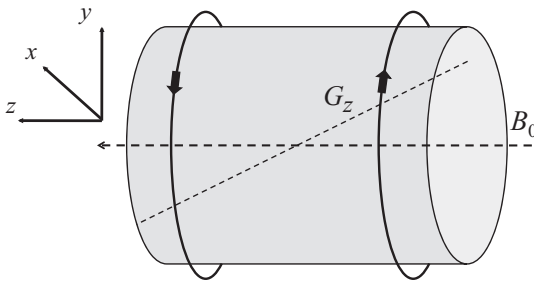


図 1-2 z 軸方向の傾斜磁場コイル

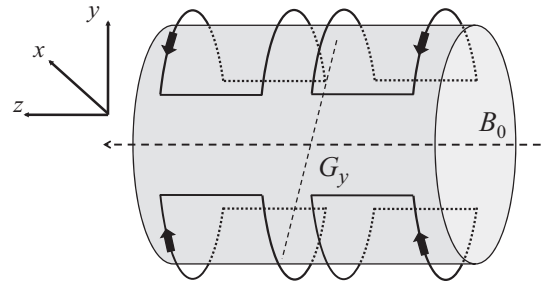


図 1-3 y 軸方向の傾斜磁場コイル

x 軸方向の傾斜磁場コイルは、y 軸方向の傾斜磁場コイルを z 軸回りに 90° 回転させて配置する。

れている。また、シムコイルと組み合わせる形で、多数の鉄片を磁石内部に貼り付ける方法による磁場補正が行われることもある。その内側には z 軸、x 軸、y 軸用の傾斜磁場コイルが配置されており（図 1-2、図 1-3）、z コイルの場合は 2 個、x コイルと y コイルの場合は 4 個の要素コイル（対となる 2 個のコイルに互いに逆方向）に電流を流すことによって、z、x、y それぞれの位置に比例して強度が変化するような磁場、つまり傾斜磁場を生成する。複数の傾斜磁場コイルを同時に動作させれば、任意の方向に傾斜した磁場を得ることもできる。傾斜磁場コイルの内側には RF コイルが配置され、後述のラーモア周波数（典型的にはラジオと同程度の周波数）の電磁波を測定対象に照射（送信）し、それに続いて測定対象から発生する同周波数の電磁波を受信する役割を持っている。送信と受信を別の RF コイルで行う場合もある。なお、MRI は強磁場を利用する装置であることから、安全性の確保のために、検査室外への漏洩磁場を遮蔽する必要がある。超伝導磁石の最外周に遮蔽コイルを付加する方法や、検査室の壁に鉄の層を設ける方法が有効である。

## (2) 原子核の磁気モーメントと巨視的磁化

荷電粒子である原子核はスピンを持っており、これによって磁気モーメントが生じる。イメージとしては、スピンは原子核の自転運動に相当し、磁気モーメントとは原子核が N 極と S 極を持った微小な磁石として振る舞うことを意味する。原子核の磁気モーメントと外部磁場との相互作用によって生じる

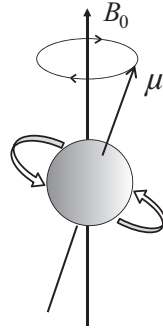


図 1-4 静磁場中に置かれた原子核

のが NMR 現象である。

図 1-4 に、静磁場中に置かれた原子核を示す。原子核の持つスピン角運動量ベクトル  $\mathbf{J}$  と磁気モーメントベクトル  $\boldsymbol{\mu}$  との間には次の関係が成り立つ。

$$\boldsymbol{\mu} = \gamma \mathbf{J} \quad (1-1)$$

ここで、 $\gamma$  は磁気回転比 (gyromagnetic ratio) と呼ばれ、核種に固有の値である。また、それぞれの核種は、スピン量子数  $I$  と呼ばれる値を持ち、 $I$  は一般に整数または半整数の値をとる。スピン角運動量ベクトル  $\mathbf{J}$  の大きさは、プランク定数  $\hbar = h/2\pi$  を用いて  $[I(I+1)]^{1/2}\hbar$  で与えられる。陽子もしくは中性子の少なくとも一方が奇数であるときに  $I$  はゼロでない値となり、そのような核種ではスピン角運動量や磁気モーメントもゼロにならないため、NMR 現象を生じる。NMR 信号をもとに画像化を行う MRI では、ほとんどの場合に水素 (プロトン)  $^1\text{H}$  が測定対象核種となる。この理由として、高い感度が得られること、水などの形で人体に多量に存在すること、後述の横緩和による信号減衰が比較的緩やかであること、などがあげられる。水素では  $\gamma = 2\pi \times 42.58 \times 10^6 \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{T})$  (T: テスラ)、 $I = 1/2$  である。また、量子論的な効果からスピン角運動量の方向を特定することはできないが、ある方向、例えば  $z$  方向に着目すると、その成分は

$$J_z = m_I \hbar \quad (1-2)$$

となる。ここで  $m_I$  は

$$m_I = I, I-1, \dots, -I \quad (1-3)$$

のように、不連続な値をとる。

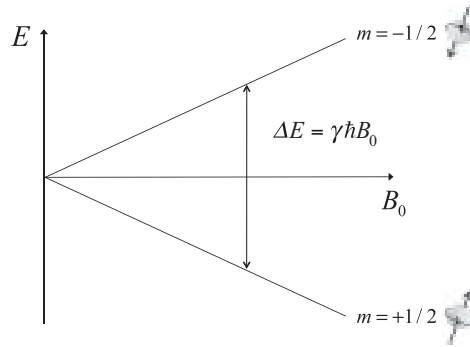
このような原子核に対して、 $z$  方向を向いた主磁場

$$\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{e}_z \quad (1-4)$$

が加わると、静磁場と磁気モーメントの相互作用エネルギー  $E$  が生じる。

$$\begin{aligned} E &= -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}_0 = -\gamma J_z B_0 \\ &= -\gamma m_I \hbar B_0 \end{aligned} \quad (1-5)$$

水素の場合、磁場と同じ向きの磁気モーメントのエネルギー  $E_1$  ( $m_I = 1/2$ ) は、

図 1-5  $^1\text{H}$  におけるエネルギー準位の分裂

$$E_1 = -\frac{1}{2}\gamma\hbar B_0 \quad (1-6)$$

となり，磁場と反対向きの磁気モーメントのエネルギー  $E_2$  ( $m_l = -1/2$ ) は，

$$E_2 = \frac{1}{2}\gamma\hbar B_0 \quad (1-7)$$

となる．磁場と反対向き，つまり  $z$  軸の下向きの磁気モーメントを持つ水素の方が，高いエネルギーを持つ．そのエネルギー差  $\Delta E$  は，

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_2 - E_1 \\ &= \gamma\hbar B_0 \end{aligned} \quad (1-8)$$

である (図 1-5)．この分裂をゼーマン分裂といい，エネルギー準位をゼーマン準位という．このエネルギー間隔は静磁場強度  $B_0$  に比例する．

このような状態にある原子核に対して， $\Delta E$  に等しい光子エネルギーを持つ電磁波を，RF コイルから照射すると，下位のゼーマン準位にあったスピンはそのエネルギーを吸収して上位の準位に移る．その後，原子核は，同じ光子エネルギーを持った電磁波を放出し，下位のゼーマン準位に戻る．この電磁波が RF コイルによって検出され，NMR 信号として記録される．光子エネルギーは電磁波の周波数  $\omega_0$  に比例し，エネルギー  $\Delta E$  に対応する周波数は

$$\omega_0 = \frac{\Delta E}{\hbar} = \gamma B_0 \quad (1-9)$$

で示され，ラーモア周波数あるいは磁気共鳴周波数と呼ばれる (周波数に  $2\pi$  を乗じた角周波数も，ここでは周波数と呼ぶことにする)．水素では，上記の磁気回転比のため，1 T の静磁場が外部から加わったとき，周波数 42.58 MHz の電磁波の照射によって共鳴を起こす．

熱平衡状態では，2つのゼーマン準位にあるスピンの数の比はボルツマン分布となっている．ここで，エネルギー  $E$  を持つスピンの数を  $N(E)$  とすると，ボルツマン分布は，

$$N(E) \propto \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1-10)$$