

## 第 4 章

### 水分子 4 ～磁性～

## 4.1 電子の運動と磁性

### 4.1.1 磁場と電流

電気の + と - は引き合い、+ 同士、- 同士はそれぞれ反発する。同様のことが磁石の N 極と S 極にもいえる。このことは電気の力と磁気の力の類似を示している。電磁気学は電気と磁気について体系づけた学問であり、その名が示す通り電気と磁気は表裏一体のものである。金属のコイルに電流を流すと誘導磁場が発生する。このときコイルの両端はそれぞれ N 極と S 極になり、棒磁石と同じ働きをするようになる (図 4.1(a))。逆にコイルの周りで磁石を動かすと、コイルに誘導電流が生じる (図 4.1(b))。この現象は、自転車の発電機から原子力発電所まで広く利用されている。電流とは金属や真空中を伝わる電子の流れである。H<sub>2</sub>O 分子も電子を含み、その分子内の運動を介して磁場と相互作用する。

### 4.1.2 レンツの法則

磁場に対する H<sub>2</sub>O 分子の反応の仕方を考察する前に、大きな導電性の物体 (例えば金属) が磁場にどのように反応するかを思い出す必要がある。アルミニウムなど磁石にならない金属でも、そのブロックのそばで強い永久磁石をすばやく動かすと、触れてもいないのに手の動きに逆らう力を感じることができる。これは金属ブロック中に生じた誘導電流が、磁場の変化を打ち消すように、別の言い方では、手の動きを妨げるような誘導磁場を発生するように流れるからである。これはレンツの法則として知られている (図 4.2)。H<sub>2</sub>O 分子は非常に小さく、金属でもないが、分子全体に渡って動くことのできる電子がレンツの法則に従って磁石に反発するような誘導電流を与えると考えられる。

### 4.1.3 水の反磁性

H<sub>2</sub>O 分子中に生じる誘導磁場によって、H<sub>2</sub>O 分子は磁石に反発する。このような物質の性質を反磁性と呼ぶ。これと対比されるのが常磁性という言葉で、磁石に弱い力で引き寄せられる性質である。常磁性も反磁性も磁石が近くにあるときだけ観測される性質である。一方、永久磁石のように自分自身が磁気を帯びている物質もある。この性質を強磁性と呼び、それを示す物質を強磁性体という。強磁性体の代表である鉄が磁石に引き寄せられる力と比べると、H<sub>2</sub>O の反磁性の力は約 3 億分の 1 倍と非常に小さい。しかし、非常に強力な電磁石を用いると H<sub>2</sub>O の反磁性を目で見ることができる。図 4.3 はハイブリッド磁石という巨大な電磁石で発生した 20 T (テスラ) の磁場中で、水が重力に逆らって浮いている様子である。

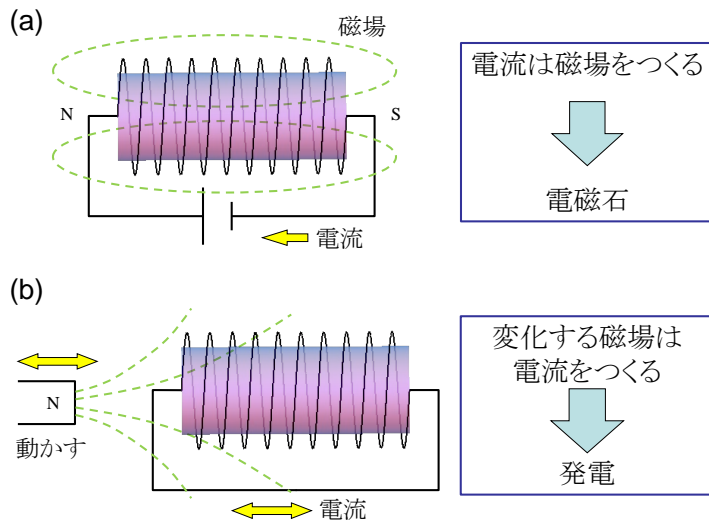


図 4.1 (a) コイルに電流を流すと、棒磁石のような磁場が生じる。この現象を利用したのが電磁石。(b) コイルに向かって棒磁石を動かすと、電池をつないでいなくてもコイルに電流が流れる。これが電磁誘導による発電の原理。

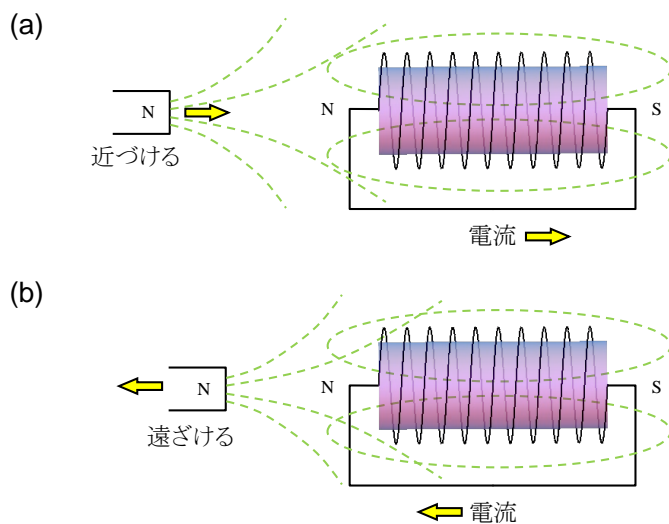


図 4.2 レンズの法則。電磁誘導における電流の向きは、変化を打ち消す方向に生じる。(a) コイルに N 極を近づけると、これを打ち消すように磁石に近い側が N 極になる向きに誘導電流が流れる。(b) N 極をコイルから遠ざけると、N 極を引きつける S 極が生じるような向きに誘導電流が流れる。

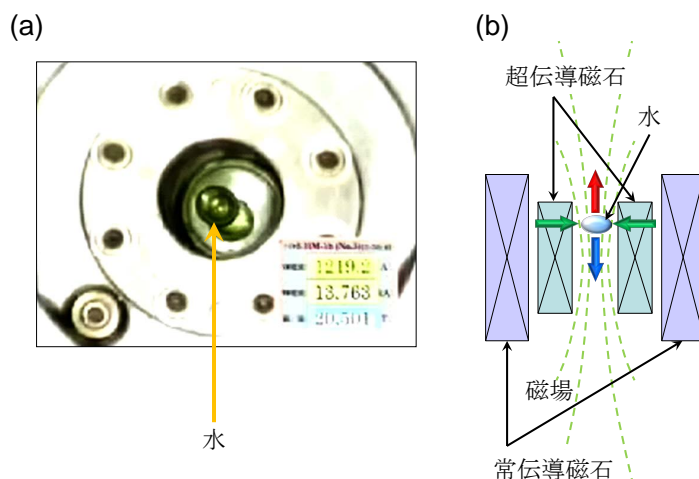


図 4.3 (a) ハイブリッド磁石の中心で浮いている水 [5]。(b) 強磁場で水が浮く仕組み。超伝導磁石と常伝導磁石を組み合わせて発生した強磁場の強さが場所によって異なるため、水滴は横方向からの内向きの力(緑矢印)と、上向きの反発力(赤矢印)を受け、これが重力(青矢印)と釣り合うところまで上昇する。

## 4.2 スピン

### 4.2.1 電子スピン

電子は  $-1$  の電荷を持っているが、これは電気素量  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  C(クーロン) を単位として測った電荷量である。原子・分子が持つ電荷は  $e$  の整数倍に限られる。ところで電子は電荷の他にスピンと呼ばれる量も持っている。これは棒磁石のような磁気的な性質に関連し、電子のスピンは  $1/2$  である。電子はミクロな棒磁石なので、その向きも量子化されて上か下しかない(図 4.4)。1 個の原子軌道や分子軌道は電子を 2 個まで収容できることを述べたが、このとき電子スピンは互いに逆向きで、磁場を打ち消し合っている。しかし、1 個しか電子を収容していない軌道があると、原子や分子は磁石の性質を持つ。

### 4.2.2 酸素の常磁性

図 4.5(a) は  $\text{H}_2\text{O}$  分子と  $\text{O}_2$  分子の電子配置である。電子はエネルギーの低い軌道を 2 個ずつ占めていく。 $\text{H}_2\text{O}$  分子では全ての電子がペアを作るが、 $\text{O}_2$  分子では電子が入る一番上の軌道が 2 つあり、同じ向きのスピンの電子が別々に収容される。このため  $\text{O}_2$  分子は小さい磁石として振る舞う。このことは液体酸素に強力な永久磁石を近づけてみると観察することができる。磁石がなければ、無数の  $\text{O}_2$  分子はランダムな方向を向いて回転している(図 4.5(b))。しかし、例えば磁石の N 極が近づくと、 $\text{O}_2$  分子の向きの分布に偏りが生じ、わずかに S 極が磁石の方に向いた分子の数が増える。その結果液体全体が磁石に引き寄せられるのである(図 4.5(c))。

### 4.2.3 核スピン

スピンを持つ粒子は電子だけではない。核子(陽子と中性子)もスピンをそれぞれ  $1/2$  ずつ持っている。ただし、磁石としては電子より 1000 倍程度弱い。陽子も中性子も偶数個だけ含まれる原子核のスピンはゼロだが、それ以外の原子核はスピンを持つ。例えば H 原子は陽子 1 個からなるのでスピン  $1/2$  を持ち、電子同様に核も量子化した棒磁石と見なすことができる。一方、 $\text{H}_2\text{O}$  分子を作る O 原子のほとんどは、陽子 8 個と中性子 8 個の原子核を持つので、核スピンはゼロであり、磁石としての性質は持たない(図 4.6)。原子核の磁石としての性質は非常に弱く、電子雲にも包まれているので、物質が磁石に引き寄せられたり反発したりという性質を示すとき、これを支配するのは電子スピンである。

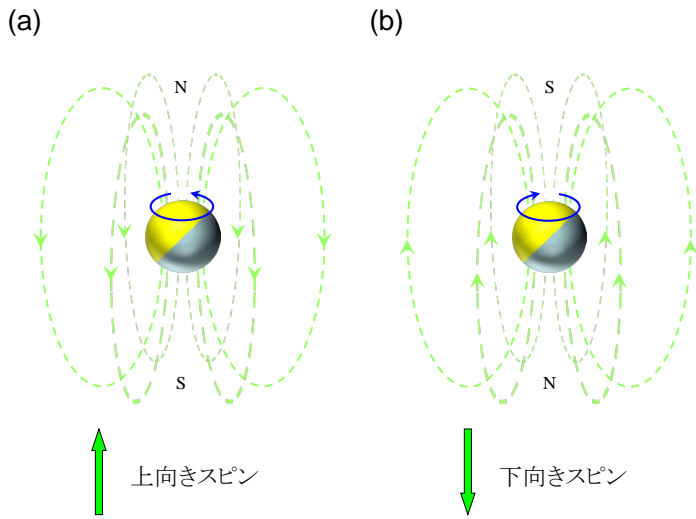


図 4.4 電子スピンの古典論による説明。有限の大きさを持つ粒子が自転することで誘導磁場を生じる。回転の向きに応じて (a) 上向きと (b) 下向きの磁場が生じる。実際には電子は大きさを持たないが、相対論的量子論によってスピンの生じることが理論的に説明されている。

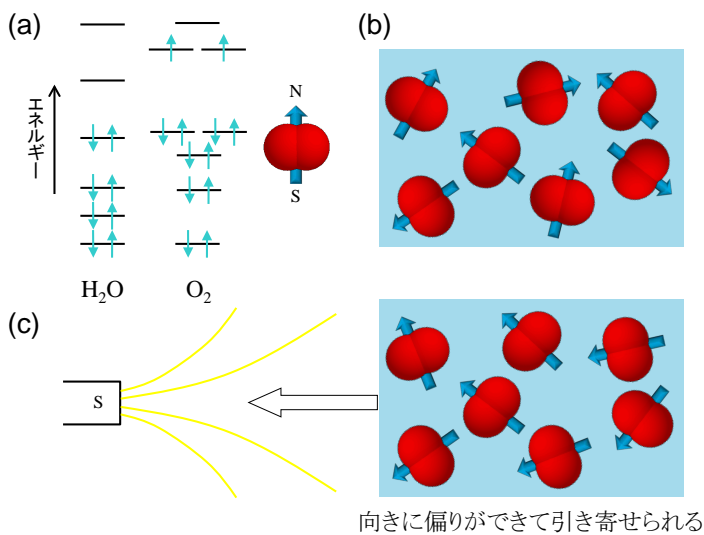


図 4.5 (a)H<sub>2</sub>O 分子と O<sub>2</sub> 分子の電子配置。H<sub>2</sub>O 分子と異なり O<sub>2</sub> 分子には対を作らない電子があるためスピンの打ち消されず、各分子が磁石の性質を持つ。(b) 液体酸素中では、O<sub>2</sub> 分子は熱運動によって向きが揃っていない。(c) 磁石を近づけると O<sub>2</sub> 分子の向きの分布に偏りが生じ、液体酸素が磁石に引き寄せられる。

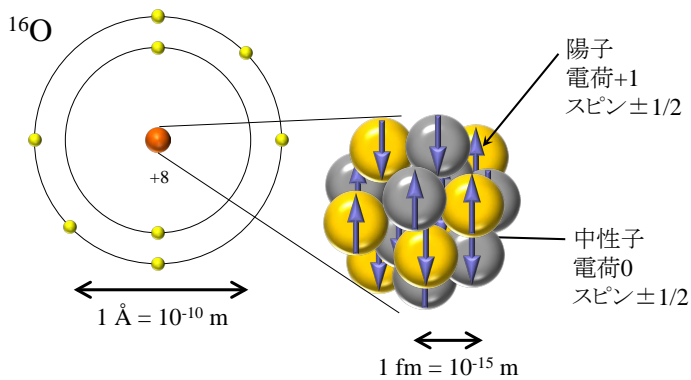


図 4.6 核子も核スピン  $\pm 1/2$  を持つ。<sup>16</sup>O の原子核には 8 個の陽子と 8 個の中性子が含まれる。偶数個のスピンが互いに打ち消し合うので、磁石の性質は持たない。

## 4.3 磁気共鳴

### 4.3.1 ゼーマン効果 (分裂)

磁石が存在すると、他の磁石や運動する電荷に影響を与える。これは磁石の周囲に磁場(磁界)が存在するためである。磁場中では、磁石が安定する向きがある。逆に言うと他の向きでは、磁石の位置は不安定であり、磁場中では棒磁石は向きに依存して異なる位置エネルギーを持つ。同じことが、電子スピンや核スピンについても成り立つ。ただし、これらのミクロな磁石は量子力学の法則に従い、磁場中のエネルギー状態も量子化されている。スピン  $+1/2$  を持つ電子や陽子についてその様子を図 4.7 に示した。磁場中でスピンの向きによってエネルギーが分裂することを、ゼーマン効果 (分裂) という。

### 4.3.2 磁気共鳴

ゼーマン分裂した状態のうち、電子や陽子はエネルギーの低い状態をとる。これらの粒子が、高い状態とのエネルギー差に等しい電磁波を吸収すると、電子や陽子はスピンを反転させて高いエネルギーに遷移する。二種類の異なる振動、例えばブランコとそれを押す周期的な力、の周期が一致するとエネルギーの吸収が起きる。これを共鳴という。電子や核の場合は、ゼーマン分裂したエネルギーの差に相当する周波数の電磁波が吸収され、それぞれ電子スピン共鳴 (ESR) および核磁気共鳴 (NMR) という (図 4.8)。これらの磁気共鳴で吸収される電磁波の周波数は、電子や核が置かれている環境や磁場の強度に依存する。初めて測定する分子の場合は、例えばある磁場を印加しながら電磁波の周波数を連続的に変化させて、どこで吸収が起きるかを調べる。

### 4.3.3 MRI(磁気共鳴断層撮影)

原子や分子中では、各々の原子核は電子によって覆われている。電子の分布の様子は、例えば同じ H 原子であっても、 $H_2O$  分子を作っているとき、 $H_2$  分子を作っているとき、もっと複雑な分子のいろいろな場所に結合しているときでそれぞれ異なる。H 原子が磁場中にあると、電子はレンツの法則に従って反磁性を示すが、電子の分布が異なると反磁性の強さも異なる。このため、H 原子の原子核すなわち陽子が感じる磁場も環境によって異なるので、NMR の共鳴周波数を測定することで、逆に H 原子の環境を知ることができる。NMR は複雑な分子の構造決定に使われている。また、NMR を人体の各部分について細かく測定して、医療的に利用するのが磁気共鳴断層撮影 (MRI) である (図 4.9)。

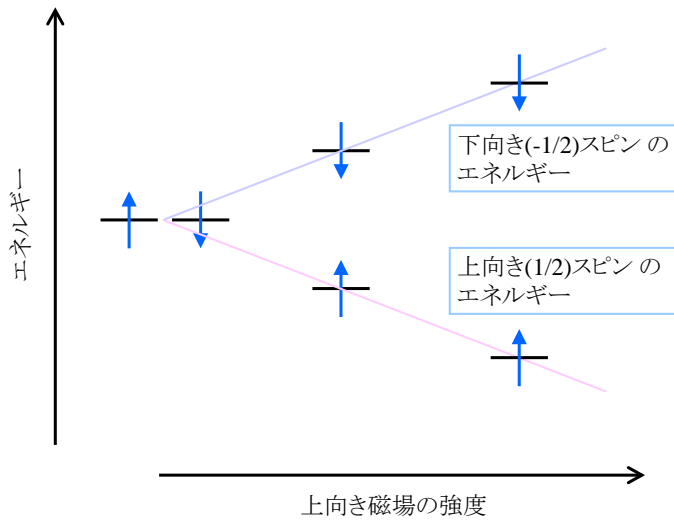


図 4.7 上向きスピンの電子と下向きスピンの電子は磁場がないときには同じエネルギーを持つが、磁場中では異なるエネルギーを持つようになる。これをゼーマン分裂という。ゼーマン分裂のエネルギー差は磁場強度に比例する。

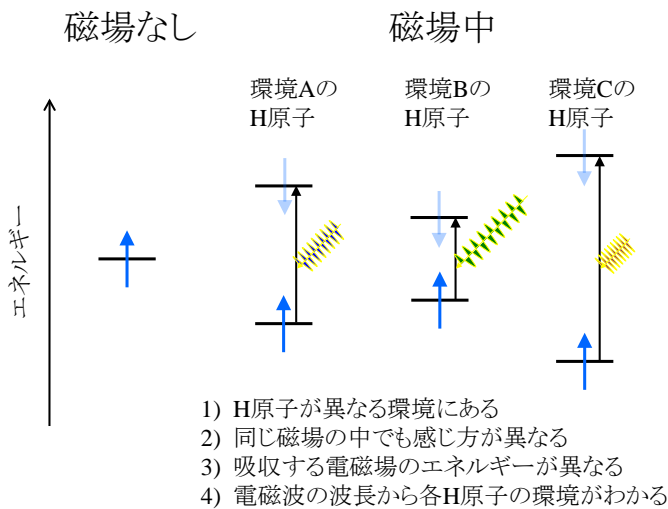


図 4.8 同じ H 原子の原子核でも、分子の異なる場所や異なる分子中にあると周囲の電子密度が異なる。このとき各原子核は感じる磁場が異なるので、ゼーマン分裂のエネルギーが互いに異なる。したがって、周波数や波長の異なる電磁波を吸収してスピンの向きを反転させる。

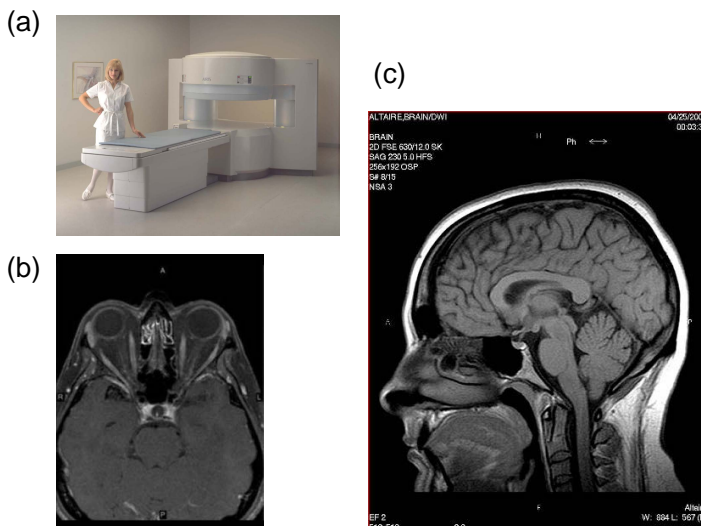


図 4.9 (a) 磁気共鳴断層撮影 (MRI) 装置. (b) ヒト頭部水平断面 MRI 画像. (c) ヒト頭部垂直断面 MRI 画像 [6].



ボストンハーバー  
マサチューセッツ州  
(アメリカ)  
2004年9月