

# 磁場

## 1. 磁気について

### (1) 磁極について

磁石にはN極（north）とS極（south）があり、互いに反対の磁極である。計算上N極を正極、S極を負極として扱う。棒磁石を自由に回転できるようにして、空中に静止させたものを方位磁石というが、この方位磁石の北を向くほうの磁極をN極と決めている。これは、地球の北極がS極だから方位磁石のN極が北を向くのである。この点を間違えないようにしたい。

「方位磁石の北を向くほうをN極と決めている。」

磁気に関しては電気と同じように考えてさまざまな物理量が決められているが、最も異なる点は、電荷は+極だけ-極だけの物体が存在するが、N極とS極は分離できないという点である。つまり、N極だけの磁石、S極だけの磁石は存在しない。しかし、考察上N極だけS極だけの磁石を考えることがある。これは、反対の磁極がはるか遠くに離れているということを意味している。

磁極の強さを表わす量を**磁気量**という。電気における電気量に相当するものである。その大きさの定義は後ほど行なうが、Wb（ウエーバー）が磁気量の単位である。磁気に関するさまざまな量の正式の定義は、電流を元に決められている。しかし、高校物理では後で電流との関係に入るために定義が後になり、論が進めにくい。そこで、仮の定義を使って論を進め、後で正式な定義をするという手法を使うことにする。

磁場とは磁気を帯びた物体の周りの空間をさすが、磁場を目で見ることができないために頭にイメージをつかむことができにくい。そのため、磁場を考えるときは良く知っている何かとイメージを重ねて考えることにすると良い。電場とまったく同じようにして磁場を決めていくことにする。

まず、第一のイメージとして重力場のイメージと重ねて考えることにする。

### (2) 重力場とは

重力場も目に見えないが我々の生活と密着しているので、イメージをつかみやすい。

地球の周辺の空間に物体を静止させると、その物体は地球に向けて落下する。物体の速度が変化したわけであるから、その物体に力が作用したことになる。この力を重力と呼んでいる。地球周辺のどの空間に物体を静止させても同じことである。これは地球周辺の空間が物体に重力を作用させる特殊な空間になっているためであると考えることができる。この空間のことを重力場と呼ぶ。

それでは重力場の大きさはどのようにして決めればよいであろうか？

- ① 重力場ではないところに物体を静止させると、物体には重力がはたらかないためにずっと静止したままである。
- ② 弱い重力場で物体を静止させると、その物体はゆっくりと動き始める。
- ③ 強い重力場で物体を静止させると、物体は急激に動き始める。



## 磁場

これらを何が異なるかを調べてみると、物体の加速度が異なることに気づく。すなわち重力加速度である。弱い重力場では重力加速度が小さく、強い重力場では重力加速度が大きいといえる。そこで、

**「重力場の強さは重力加速度の大ききで表わすことができる。」**

ことが分かる。

### (3) 磁場の定義

これをそのまま磁極周辺の空間に置き換えて考えてみる。重力場に相当するものをマイナスの中心磁極とする。この磁極は動かないように固定されているものとする。

その周辺に+磁極 (N極) を置くと、+磁極は-磁極の影響を受けて-磁極の方向に動き始める。



これは-磁極の周辺の空間が、その磁気の影響を

受けて特殊な空間になっているためと考えられる。この空間を**磁場 (磁界)** という。

それでは磁場の強さ (大きさ) はどのようにして決めれば良いであろうか? 重力場と同じく加速度が使えるであろうか? 結論から言うと「否」である。というのは、重力場の場合、同じ位置にどのような物体を置いても物体の質量に関係なく重力加速度は同じである。しかし、磁場の場合は同じ位置に異なる磁気量の磁極どころか同じ磁気量の磁極を置いても加速度が違うのである。それは、質量が違うとか速度が違うからである。

そこで、発想を少し変えて、重力場において1kgの物体に作用する力を考えてみよう。重力の大ききは $mg$ であるから、1kgの物体に作用する力は $g$ 、すなわち、重力加速度と同じ大きさとなる。言い換えれば、重力場の大ききを重力加速度の大ききとしたが、1kgの物体に作用する力と置き換えても良いのである。重力場の方向を力の作用する方向と考えて、

**「重力場は1kgの物体に作用する力」**

といえる。

これをそのまま磁場に適用してみると、重力場の「1kg」は磁場の「+1Wb」に相当し、「物体」は「磁気量」と置き換えられる。

置き換えてみると、

**「磁場は+1Wbの磁気量にはたらく力」**

といえる。これが磁場の定義である。

これは、電場の定義

**「電場は+1Cの電気量にはたらく力」**

とまったく同じである。

### (4) 磁場中の磁極に作用する力

「磁場は+1Wbの磁極に作用する力」、これより、磁場の大ききは1Wbあたりの力[N]であるから、単位は[N/Wb]となる。磁場の定義より、

**「 $H$ [N/Wb]の磁場とは+1Wbの磁気量をおいたとき、 $H$ [N]の磁気力が作用する空**

# 磁場

## 間」

ということになる。

それでは、 $+m[\text{Wb}]$ の磁気量を $H[\text{N/Wb}]$ の磁場に置いたときに作用する力はいくらになるであろうか？磁気量が2倍になると、作用する力も2倍になると考えられるので、磁気量が $m$ 倍になったとき、作用する力も $m$ 倍になるといえる。1Wbの磁気量に作用する力が $H[\text{N}]$ であるから、 $m[\text{Wb}]$ に作用する力は、 $mH[\text{N}]$ といえる。

よって、

**「磁場 $H$ の空間に $m$ の磁気量の磁極をおいたときに $mH$ の力が作用する」**

公式としては

$$F = mH$$

である。

これも電場の  $F = qE$ とまったく同じである。

### (5) 磁場を測定するには

ある場所の磁場が知りたいときは、その場所に $+1\text{Wb}$ の磁気を置き、その磁気に作用する力を求めればよい。複数の磁極から力を受けている場合も磁場は力であるから力の合成で求めればよい。磁場が0であるということは、 $+1\text{Wb}$ の磁気を置いたときに力が作用していないことを意味し、これは同時に力がつりあっていることになる。

**「 $+1\text{Wb}$ に作用する磁気力がつりあっていれば、磁場は0である。」**

といえる。

### 2. 磁力線の向きについて

次に第二のイメージとして、二つの磁極が目に見えない線でつながっているとして、磁場をイメージすることを考えてみる。この線を磁力線という。磁力線は電気における電気力線と同じように考えると良い。ここでも、電気力線とまったく同じようにして論を進める。この磁力線は、磁場の定義の中で唯一、磁場を見えるようにする方法である。磁場がらみの問題が出たときは、まず、磁力線を描いてから解き方を考えるようにすると良い。

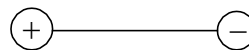
#### (1) 磁力線とは

+磁極と-磁極の間には磁気力が作用している。しかし、その間の空間には何もないので力が作用しているといったイメージができていく。

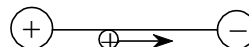


そこで、目に見えない線がつながっていると考えことにする。

そうすると、互いに引き合っているというイメージができてあがる。

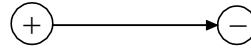


次に磁力線の向きを定義しよう。磁場は $+1\text{Wb}$ に作用する力で定義してあるので、この向きに定義しておくで混乱がなくてよい。磁力線上に $+1\text{Wb}$ の磁気を置くと、マイナスの磁極がある方に力を



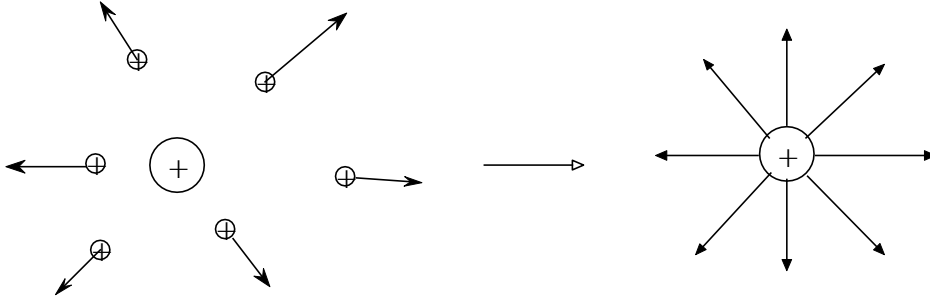
## 磁場

受ける。よって、磁力線の向きを $+\rightarrow-$  ( $N\rightarrow S$ ) と定義する。



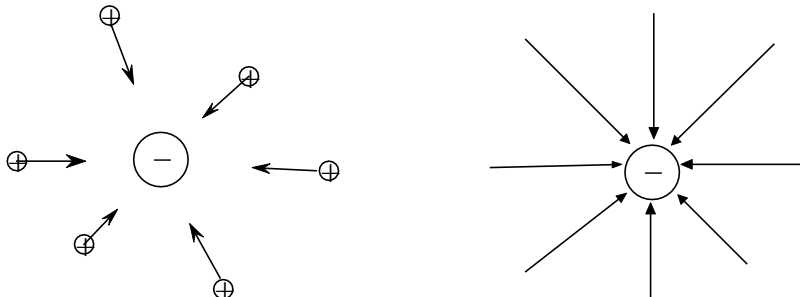
### (2) N極の周りの磁力線

磁場の定義は $+1\text{Wb}$ に作用する力であるから、 $+$ 磁極の周りに $+1\text{Wb}$ の磁気を置いてみると、図のように $+$ 磁極から反発を受け、放射状に力を受けることが分かる。よって、 $+$ 磁極の周りの磁力線は $+$ 磁極から放射状に出ると定義できる。



### (3) S極の周りの磁力線

$+$ 磁極の場合と同じように負磁極の周りに $+1\text{Wb}$ の磁極を置いてみると、負磁極のほうに引っ張られる。よって、磁力線は負磁極に引き込まれるように定義すると良い。



### (4) 正負2磁極 (棒磁石) の周りの磁力線

正負2磁極の周りの磁力線も今までと同じように $+1\text{Wb}$ の磁極をおいたときの力で判断すると良い。今までと違って $+1\text{Wb}$ に力が複数作用するので、その合力で考える。その合力は図1のようになっている。磁極の数が少ないと全体の形が見えないので数多くの矢印を記入すると、図2のようになる。

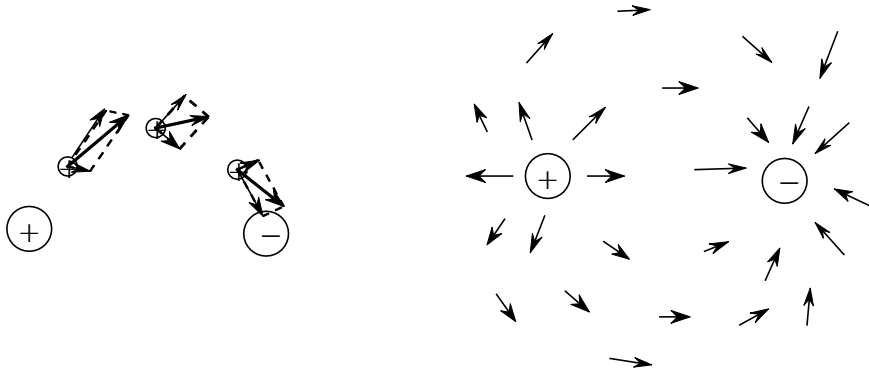


図1

図2

その矢印を滑らかにつないだのが図3である。  
これが正負2磁極の周りの磁力線である。

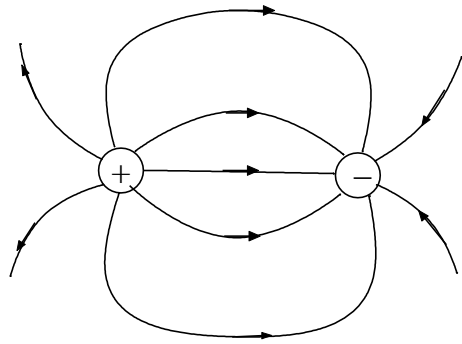


図3

磁力線は電気力線とまったく同じであることが分かる。

### 3. 磁力線の性質について

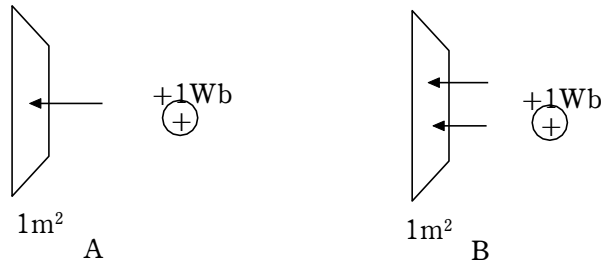
次に磁力線はどのような性質をしているのであろうか。磁力線の性質も電気力線とほとんど同じと考えられるので、電気力線と同じように考えてみることにする。磁力線は電気力線同様に、人が磁場のイメージがわかりやすいように勝手に決めたものであり、実在はしない。よって、その性質は多くの人々が持つイメージの通りに定義すればよい。ただし、実際の現象が正しく説明できるのが大前提である。

#### (1) 磁場の強さとの関係

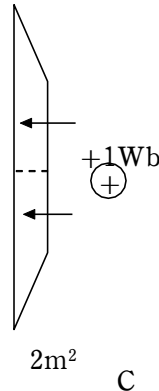
今、下の図のように $1\text{m}^2$ の断面がA、B二つある。断面Aは磁力線が1本通っていて、断面Bは磁力線が2本通っている。そこに $+1\text{Wb}$ の磁気を置いたとき、A、Bどちらの磁気により強い力が作用するであろうか？

これは、人それぞれが持つイメージの通り考えてよいのである。多くの人々が「Bの磁気には作用する力がAの磁気には作用する力の2倍である。」とイメージするはずである。よって、その通りに定義する。

# 磁場



次に、 $2\text{m}^2$ の断面に磁力線が2本ある場合を考えてみよう  
 この場合、 $+1\text{Wb}$ に作用する力は上の図のAと等しいとイメージするか、あるいはBと等しいとイメージするか？  
 9割の人はAと等しいとイメージし、1割がBと等しいとイメージする。Aと等しいとイメージすれば、 $1\text{m}^2$ あたりの磁力線数、すなわち、磁力線密度が等しければ磁場の強さは同じであるということになる。また、Bと等しいとイメージすると、磁力線本数が等しいと、磁場の強さが等しいということになる。Bと等しい場合は、2本の磁力線がどれだけ離れていても同じ力が作用することになる。より多くの方がイメージするとおりに定義する。



**「磁力線密度は磁場の強さに比例する。」**

次に磁場の強さであるが、磁力線密度の基準は1本/ $\text{m}^2$ であるが、これを磁場の強さで何  $\text{N/Wb}$ と定義すればよいか？

これも、最もイメージしやすいように定義すると良い。それは、

$$1\text{本}/\text{m}^2 = 1\text{N}/\text{Wb}$$

である。よって、

**「 $H[\text{N/Wb}]$ の磁場があれば、そこに $H[\text{本}/\text{m}^2]$ 、すなわち、 $1\text{m}^2$ あたり $H$ 本の磁力線があることになる。」**

## (2) 磁気量と磁力線数の関係

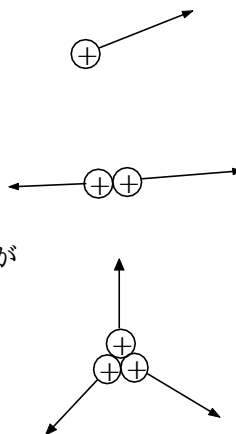
ある磁気量から、磁力線が1本出ているとしよう。  
 その場合、磁気量が2倍になったら、その磁気から出ている磁力線数は何本と考えられるか？

これもイメージの通り定義することにする。

多くの方は、磁気量が2倍になると、磁力線数も2倍、3倍になると磁力線数も3倍になるとイメージするのではないだろうか？ これは、磁気量と磁力線数が比例することを意味している。そこで、

**「磁気量とそこから出ている磁力線は比例する。」**  
 と定義することにする。

次に何  $\text{Wb}$ より1本出るか決めればよい。今までの



## 磁場

考え方に沿って1Wb=1本と決めたいところであるが、

以前に $1\text{本}/\text{m}^2=1\text{N}/\text{Wb}$ と定義している。この定義との間に矛盾があってはならない。

(1Wb=1本と定義したものを磁束線というが、これは、後ほど扱う)

それでは、何Wbより磁力線が1本出るといえるのか？次にこれを考えてみよう。

(3) 磁力線1本あたりの磁気量

磁力線1本あたりの磁気量は不明なので、 $\mu_0[\text{Wb}]$ より1本出ると決める。

$1\text{本}/\text{m}^2=1\text{N}/\text{Wb}$ の定義と矛盾しないように $\mu_0$ の値を求めてみよう。

$M[\text{Wb}]$ より $n$ 本出るとすると、次の式が成り立つ。

$$\mu_0:1=M:n$$

これより、
$$n=\frac{M}{\mu_0}$$

となる。これが磁力線総数を表わしている。

「磁気量 $M$ の磁気から出る磁力線総数は $\frac{M}{\mu_0}$ 本である。」

といえる。

$1\text{本}/\text{m}^2=1\text{N}/\text{Wb}$ との照合を図るには、磁力線密度を計算しなければならない。

磁力線密度は $1\text{m}^2$ あたりの磁力線数であるから、

磁力線総数 $\frac{M}{\mu_0}$ をどこかの面積で割ればよいこと

になる。

どの部分の面積で割ればよいのであろうか？

小学校に戻って割り算の復習をしてみよう。

例題

「おにぎりが50個あります。10人で分けます。あなたは何個取りますか。」

という問題である。即座に頭の中で $50 \div 10 = 5$ と計算し、5個と答えるであろう。しかし、よく問題を見てほしい。「全員同じ数を取る」と言っていないのである。いくらとっても良い。すなわち、早い者勝ちである。

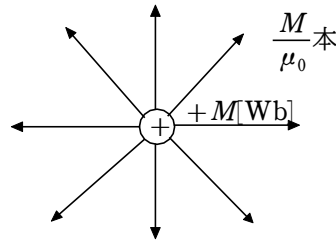
この場合、割り算は意味がなく、単に平均値を出しているわけである。つまり、割り算をするという事は、全員同じ数を取るという大前提があって初めて可能なことである。この磁力線の場合もそうである。 $1\text{m}^2$ あたりの磁力線本数がすべて同じところの面積でないと割り算ができないのである。 $1\text{m}^2$ あたりの磁力線本数が同じということは、

$1\text{本}/\text{m}^2=1\text{N}/\text{Wb}$ より、磁場の強さが同じということである。つまり、磁力線総本数

$\frac{M}{\mu_0}$ を、磁場の強さが同じところの面積で割れば、磁力線密度、すなわち、磁場の強さを求めることができる。

磁場の強さが同じところといえば、磁気からの距離が同じところである。すなわち、磁極を中心とする球の表面である。そこで、半径 $r$ の球の表面積で磁力線総本数を割れば、磁極から $r$ 離れた点の磁場の強さが求められることになる。

半径 $r$ の球の表面積を $S$ とすると、



## 磁場

$$S = 4\pi r^2$$

であるから、

磁場の強さ  $H$  は

$$H = \frac{\text{磁力線総本数}}{\text{断面積}} = \frac{M}{\mu_0 S} = \frac{M}{4\pi r^2 \mu_0} = \frac{1}{4\pi \mu_0} \frac{M}{r^2}$$

となる。

これは、点磁気から  $r$  離れた点の磁場の強さ  $H$  が  $H = \frac{1}{4\pi \mu_0} \frac{M}{r^2}$  であることを意味している。

それでは、点磁気から  $r$  離れた点に点磁気  $m$  [Wb] を置いてみる。磁場の定義により  $H$  [N/Wb] の磁場に  $m$  [C] の電荷をおいたときに作用するクーロン力の大きさ  $F$  は  $F = mH$  であつた。

この式を用いると、

$$F = mH = m \cdot \frac{1}{4\pi \mu_0} \frac{M}{r^2} = \frac{1}{4\pi \mu_0} \frac{Mm}{r^2}$$

ここで、 $\frac{1}{4\pi \mu_0} = k_m$  とおく、この  $k_m$  を磁気クーロン定数という。

磁気クーロン定数を用いると、

$$F = k_m \frac{Mm}{r^2}$$

が成立する。これを**磁気クーロンの法則**という。

$k_m$  の値は、磁気量の判明した2磁極をある距離において、作用する力の大きさを測定すれば求められる。このようにして測定した値は

$$k_m = 6.33 \times 10^4 [\text{Nm}^2/\text{Wb}^2]$$

となる。しかし、この値は後で述べる電流の定義により  $k_m = \frac{10^7}{(4\pi)^2}$  である。(後述)

これより、 $\mu_0 = \frac{1}{4\pi k_m} = 1.26 \times 10^{-6} [\text{Wb/本}]$

つまり、 $1.26 \times 10^{-6}$  Wb の磁気量から1本の磁力線が出ていることになる。

その半分の磁気量では磁力線数が  $\frac{1}{2}$  本となるが、磁力線はイメージを作るうえで便利であるということから考え出されたものであることに注意して考えるべきである。

このように磁力線の性質、磁場の定義ともに電気と同じように理解しておくが良い。

### 4. 透磁率について

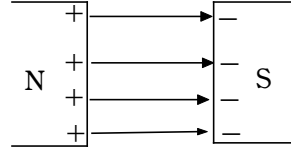
磁力線1本あたりの磁気量は  $\mu_0 = 6.33 \times 10^{-6}$  Wb/本 (Wb/本は正しい単位ではない。正式な単位は後で紹介) であることが分かった。次に、この数値の意味するところを考えてみよう。磁力線1本通す磁気量を**透磁率**という。とくに、真空中での透磁率を**真空透磁率**



# 磁場

という。 $\mu_0$ は真空透磁率である。

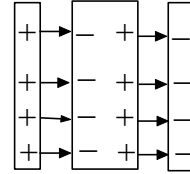
図のように、2つの棒磁石を平行にならべて、それぞれ、 $+4\mu_0[\text{Wb}]$ 、 $-4\mu_0[\text{Wb}]$ の磁極を持っていた。磁力線1本あたり $\mu_0[\text{Wb}]$ であるから、この磁石間には4本の磁力線が通っていることになる。



## (1) 静電誘導に相当する磁気の性質

帯電した金属板間に同じ断面積を持つ金属板を挿入すると、

挿入した金属板は静電誘導を起こす。静電誘導の場合は、金属表面に元と同じ電気量の電荷ができる。この現象は自由電子が存在するために生じる。磁気の場合はN極だけの磁石または、S極だけの磁石は存在しない。そのため、電気における



自由電子のようなものは存在しないのである。そのため、静電誘導に相当する現象はない。

(超伝導状態ではありうる＝マイスナー効果という)

そのため、電気における電流に相当する磁流などはない。

## (2) 磁性体

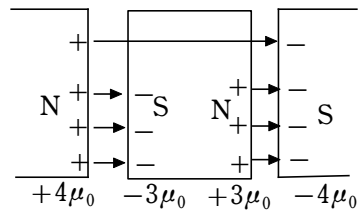
不導体を電場内に挿入すると誘電分極を起こす。誘電分極は静電誘導ほどは強くないが、不導体に電極ができる現象である。同じように磁場内に物体を置くとその物体の材質により、その物体にいろいろな強さの磁極が発生する。このような物質を**磁性体**という。磁場は基本的に電流によって発生する。原子内を回っている電子は一種の電流であり、それによって、原子自体が磁石になっている。磁場を作る電子にもいろいろあり、原子核を回っている軌道電子、原子核間を移動する自由電子、さらには電子自体の自転(スピン)それらが、互いに磁場を発生している。外部磁場がかかると、それらの電子の動きに統一されたものが生じて物質自体に磁極ができるのである。しかし、電子の動きには複雑なものがあり、また、原子おおしのクーロン力の影響もあるので、その磁極の強さは単純には説明できない。すべての物質は、大きく分けて、強い磁極が発生する**強磁性体**、弱い磁極が発生する**常磁性体**、逆向きに磁極が発生する**反磁性体**が存在する。磁場の中に磁性体を置いたときに磁極が発生することを**磁化**という。

## (3) 磁化と透磁率の関係

例として、外部磁場に対して75%の磁極が発生した場合を考えてみよう。

この場合、元の磁気量が $4\mu_0[\text{Wb}]$ あったとすると、

その75%の磁気が生じているのであるから、N極側に $-3\mu_0[\text{Wb}]$ の磁気量が、S極側に $+3\mu_0[\text{Wb}]$ の磁気量が生じている。その結果この磁性体の外では磁力線が4本あるが、磁性体内では磁力線は図のように3本が発生した磁気により打ち消されて、1本のみとなっている。



このときの磁力線を1本通す磁気量を透磁率という。真空中で磁力線1本通す磁気量 $\mu_0$ を真空透磁率という。この磁性体の場合は $4\mu_0[\text{Wb}]$ で磁力線が1本通っているの、透磁率は $4\mu_0$ といえる。

# 磁場

同じようにして、いろいろな割合のときの透磁率が求められる。

磁化される割合	0%	50%	75%	80%	90%	99%	100%
透磁率	$\mu_0$	$2\mu_0$	$4\mu_0$	$5\mu_0$	$10\mu_0$	$100\mu_0$	$\infty$
比透磁率	1	2	4	5	10	100	$\infty$

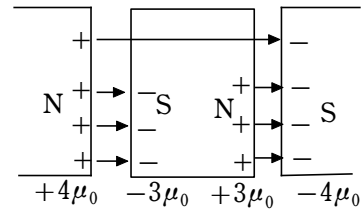
このように磁化される割合と透磁率は1:1の対応をしている。透磁率が分かれば磁化される割合が分かり、磁化される割合が分かれば透磁率が分かるのである。

「透磁率とは磁化される能力をあらわしている。」

## (4) 比透磁率とは

上の表の透磁率はいずれも真空透磁率の何倍になるかで表わしている。真空透磁率に対する比で表わせば、より簡単に磁化される能力を表わすことができる。これを**比透磁率**という。

右図は比透磁率4の磁性体を2本の棒磁石間に挿入した場合であるが、磁性体内部の磁力線数は磁性体外部の磁力線数（同じ面積であるから磁力線密度と考えるのも良い）の $\frac{1}{4}$ となっている。磁力線密度は磁場の強さを表わしているの、磁性体内の磁場の強さは外部の $\frac{1}{4}$



になるといことになる。比透磁率4の場合は磁場の強さが $\frac{1}{4}$ 、同様にして、比透磁率5の磁性体内の磁場の強さは $\frac{1}{5}$ となる。

「比透磁率 $\mu_r$ の磁性体内の磁場の強さは $\frac{1}{\mu_r}$ である。」

ここまでの論により、磁気における透磁率は電気における誘電率をほとんど同じであることが分かる。

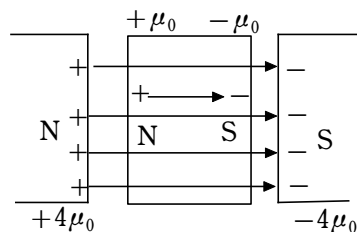
ここで、比透磁率が大きい（大体100以上）磁性体を強磁性体といい、Fe、Co、Niなどが知られている。それに対し、ほとんど1と変わらない磁性体を常磁性体という。

## (5) 反磁性体について

磁性体の中には誘電体と違って逆向きに磁化される物質（誘電体には存在しない）がある。このような物質を反磁性体という。反磁性体はN極の磁石を近づけると、N極に近い側がN極になる性質を持つ。同極が発生するので、磁石を近づけるとその磁性体は逃げる性質を持つのであるが、知られているCu、H<sub>2</sub>O、Biなどは、いずれも非常に弱い反磁性を示すのに過ぎない。

では、反磁性体の透磁率はどのようになるのであろうか？右図を例にして考えてみよう。

仮に外部磁場の25%の強さの反磁性を示すとした場合外部の磁気量 $4\mu_0[\text{Wb}]$ に対して、磁性体内では磁力線が1本増えて5本になっている。透磁率は



## 磁場

---

磁力線1本あたりの磁気量であるから、透磁率 $\mu$ は

$\mu = \frac{4}{5}\mu_0$ となる。この場合、比透磁率は0.8である。強磁性体・常磁性体では比透磁率は1より大きいのであるが、反磁性体では比透磁率が1より小さくなる。

「反磁性体は透磁率が1より小さい」