

磁束密度

1. 磁束線とは何か

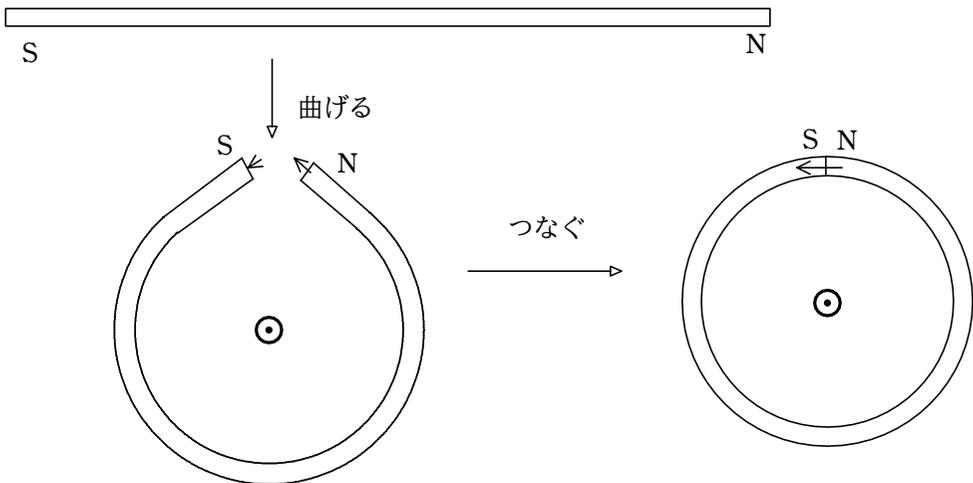
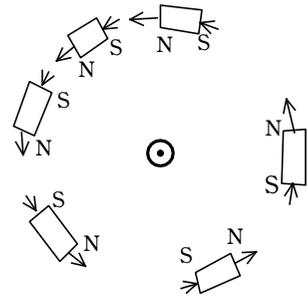
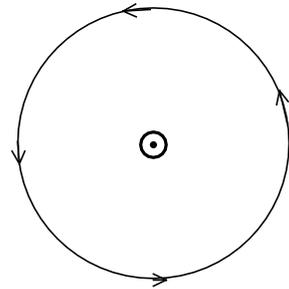
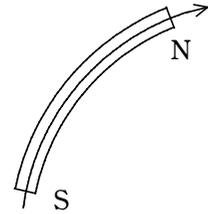
磁気には磁力線以外に磁束線という概念が存在する。
ある空間に磁力線が走っていると。この磁力線に沿って棒磁石が存在していると考えても差し支えない。

棒磁石から磁力線が出ているわけであり、磁力線が走っているということ、棒磁石が存在しているということは同じことである。空中に磁力線に沿って存在していると仮定した空想上の棒磁石を磁束線と呼んでいる。

右図のように電流が手前に流れているとき、その周りには右ねじの法則により左回りの磁場が発生していることになる。前項でその大きさを中心にある磁極に置き換えて考えたが、これは大きさのみで方向が90°違うという欠点を持っていた。そのために、方向は別に考える必要があった。そこで、この欠点を補うために、磁力線に沿って磁石があると考えるのである。

そうすると、右図のように磁力線が電流の周りを回るように存在するのと同じ状況が生まれる。しかし、磁石が少ないと完全な円には程遠く、棒磁石を多く並べることにより次第に実際の磁力線の状況に近くなる。

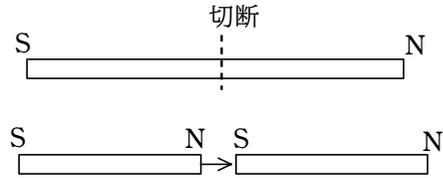
それならばいっそのこと円周と等しい長さの棒磁石を円状にまげて、電流の周りに配置したらどうだろうか？



磁束密度

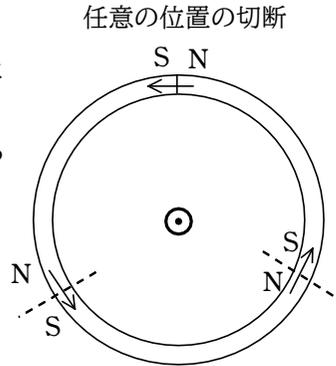
このようにすると、完全に磁力線と重なった棒磁石になる。ところがこのようにすると、磁力線の向きが分からなくなってしまう。

そこで、この棒磁石を切断し、その切れ目で生じる磁力線で磁束線の向きを考えればよい。



棒磁石は任意の位置を切断すると、そこに下の棒磁石と同じ方向に新しく磁極が発生し、小さな棒磁石二つになる。この性質を利用し、電流の周りに配置した円形の棒磁石も任意の位置を切断すると、左回りの磁場が発生する。この磁場が電流により発生する磁場と同じと考えるのである。

このように考えれば、電流の周りに発生する磁場と磁石の周りに発生する磁場を同列に考えることができる。このとき、磁力線に沿って存在すると考える仮想上棒磁石を**磁束線**という。



磁束線は棒磁石と考えているわけであるから、その単位はWb基準で考えると都合が良い。そこで、1 Wbの磁石と同じ磁力線が存在していれば、そこには磁束線1本あると考えるのである。つまり、磁束線1本は1Wbである。

「磁束線1本は1Wbの磁石がそこにあると考える。」

2. 磁力線と磁束線との関係

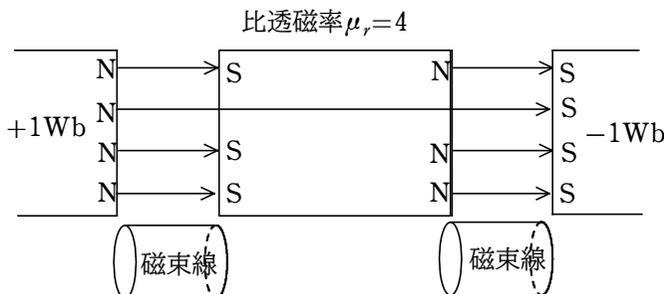
(1) 磁力線と磁束線

磁束線1本は1Wbの磁石がそこにあると考える。また、磁力線1本は μ_0 [Wb]より出るものとしている。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{N/A}^2] = 1.26 \times 10^{-6} [\text{Wb/本}] \approx \frac{1}{80万} [\text{Wb/本}]$$

これをもとに、磁力線と磁束線の違いを検討してみよう。

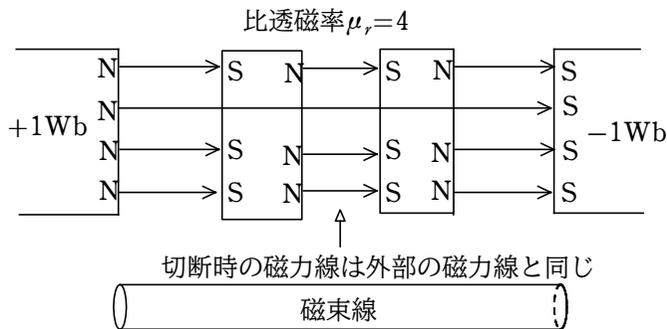
下の図は1Wbの磁気から出ている磁力線が比透磁率4の磁性体によってどのように変化するかを表わしたものである。



磁束密度

ここでは1Wbの棒磁石を使っているので、磁束線は1本出ている。N極から磁束線1本、S極に磁束線1本入っていることになる。また、 $\frac{1}{80万}$ Wbより磁力線は1本出るので、1Wbのこの磁石から磁力線が約80万本出ていることになる。そして、磁性体の部分は比透磁率4の磁性体によって、磁場の強さが磁性体内で $\frac{1}{4}$ になっているので、20万本の磁力線が通っていることになる。磁力線の本数は磁性体によって変化しているのである。

それでは、磁性体が入っている部分の磁束線は何本であろうか。磁束線は空中にあると想定した棒磁石である。この磁性体の部分は磁化されて磁石になっている部分である。この磁性体の磁気量は、磁力線の本数が $\frac{1}{4}$ になっているので磁気量は $\frac{3}{4}$ Wbの磁石と考えられる。残り $\frac{1}{4}$ が磁力線となっているのである。これは $\frac{1}{4}$ Wbに該当している。磁束線はこの磁力線部分も磁石と考えるので、磁性体の $\frac{3}{4}$ Wbと磁力線部分の $\frac{1}{4}$ Wbを合わせて、1Wbとなる。このように考えると複雑なので、磁性体を切断してすべて磁力線と考えて、磁束線を判断するとよい。

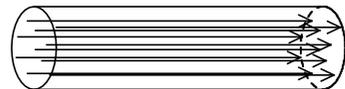


切断したときの磁力線数は磁性体外の磁力線数と同じになるために磁束線数は磁性体を入れた場合と入れない場合とまったく同じであることが分かる。

「磁場内に磁性体を入れても磁束線数はまったく変わらない。」

といえる。

磁性体があるところでも切断すると磁性体がないところの磁力線数と同じである。1Wbは磁束線1本であるから、磁束線1本は80万本の磁力線に相当することになる。言い換えると、磁力線80万本の束が磁束線1本といえるのである。



「磁束線1本は磁力線80万本の束である」

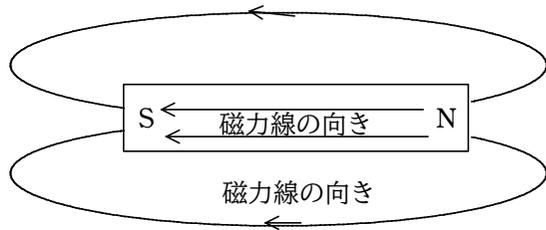
空中に磁力線があると、その磁力線を80万本束ねてチューブにしたものが磁束線とイメージするとよいであろう。

磁束密度

(2) 磁束線の向きと磁力線の向き

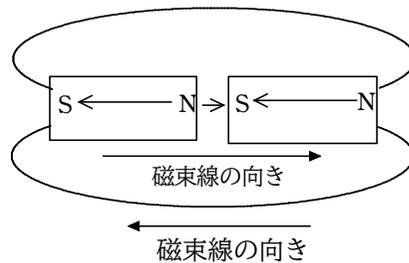
磁力線に沿って棒磁石を置いたと考えるのであるから、磁力線の向きと磁束線の向きは基本的には同じである。しかし、向きが異なる場合もあるのである。

その一例が棒磁石の内部の磁力線の向きである。磁力線はN極からS極に向いているので、磁石の外側はN→Sとなっているが、磁石の内部もN→Sの向きに磁力線は通っている。



しかし、**磁束線は磁石を切断したときの磁力線の向き**である。

この棒磁石を真ん中で切断すると、切断したところには新しくN極とS極が発生し、切断前と逆向きに磁力線ができる。この磁力線の向きが磁束線の向きとなる。磁束線の向きは磁石内部でも右向きであり、磁力線が左向きであるのとは逆になっている。



「**磁束線の向きは磁石の外では磁力線の向きと同じで、磁石内部では磁力線と逆向きである。**」

N極とS極の磁極の強さは同一の磁石においては必ず同じである。よって、磁石の外に出ている磁力線の数と、切断したときに生じる磁力線の数は同じであるといえる。そのため、磁石のどこを切っても磁力線の数は同じことになり、磁束線の数はどこでも同じことになる。そして、磁束線は必ず1周していることになる。

「**磁束線は必ず閉曲線になる。**」

といえる。つまり、磁束線には出発点もなければ終点もなく枝分かれもないのである。

3. 磁場の強さと磁束密度の関係

(1) 磁場の強さと磁束密度の関係

1m²あたりの磁力線数（磁力線密度）は磁場を表わしている。それと同じように磁束線数も1m²あたりの磁束線数を考える。これを**磁束密度**という。磁場を H 、磁束密度を B と表わすとき、 B と H の関係を求めてみよう。

磁束密度 B とは1m²あたり B 本の磁束線があることであり、これは1m²あたり B [Wb]の磁気があることに相当し、 B [Wb/m²]である。それに対して、磁場 H とは1m²あたり H 本の磁力線があるという意味になり、磁力線1本は μ_0 [Wb]であるので、 H 本で $\mu_0 H$ [Wb]になり、1m²あたり $\mu_0 H$ [Wb]の磁気で、 $\mu_0 H$ [Wb/m²]となる。このことより、 B と $\mu_0 H$ が同等なものになることが分かる。よって、

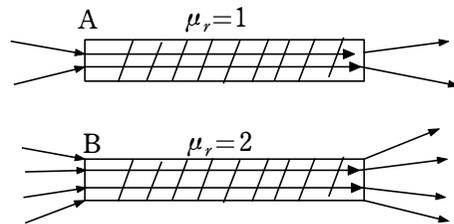
$$B = \mu_0 H$$

といえる。

磁束密度

(2) 磁性体内の磁場と磁束密度との関係

右図のA,B二つのコイルは巻き密度、巻き数、断面積、形、すべてが同じであり、中の材質がAでは比透磁率1の磁性体でBは比透磁率2の磁性体であることのみが違うとする。



この時、コイル内の磁場の強さは、

$$H = nI$$

であらわされるとおり、透磁率は磁場の強さに一切関係がない。そのためA,Bは磁場の強さが同じになるのである。

コイルの外部の磁場はどうであろうか。比透磁率2の意味は外部に対して内部の磁場の強さが半分になるという意味である。この場合はその逆なので、内部磁場に対して外の磁場が2倍になることを意味している。そのため、Aに対してBは外部磁場が2倍になっている。

コイルに鉄心を入れると、コイル内部の磁場は変わらないが外部の磁場が比透磁率の分だけ強くなるのである。鉄は比透磁率が200程度なので、鉄心入りのコイルは外部磁場が200倍強くなる。

磁束密度は磁石を切断した時の磁場で考えるので、Bのコイル内部の磁場はAと同じであっても、切断すると外部磁場と同じになるのでBはAの2倍の強さとなる。よって、磁束密度は外部も内部もBはAの2倍となる。

表にまとめると

	A:B
内部磁場	1:1
外部磁場	1:2
内部磁束密度	1:2
外部磁束密度	1:2

磁束密度と磁場の強さの間には $B = \mu_0 H$ の関係があるが、このAとBの内部磁場が1:1と同じなのに、磁束密度は1:2となっている。比透磁率の分だけBの磁束密度が強くなっているため、 $B = \mu_0 H$ の式に比透磁率を付け加えなければならないことが分かる。よって、

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

比透磁率 μ_r とは、透磁率 μ が真空透磁率 μ_0 の μ_r 倍であることを意味しているため、

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

となるので、

$$B = \mu H$$

という関係が成り立つことになる。

磁束密度

4. 磁束と磁気量

(1) 磁束とは

磁束線1本は1Wbの棒磁石に相当する。磁束線数はその本数に相当する磁気量の磁石に相当することになる。この磁束線数を磁束という。磁束を Φ とし、断面積を S とすると、磁束密度 B が 1m^2 あたりの磁力線数を意味しているのので、

$$\Phi = BS$$

という関係になる。単位はWbである。

(2) 磁束と磁気量

磁束と磁気量はともに単位Wbである。この二つを同じと考えてよいのであろうか？実は似てはいるのであるが、若干の違いがある。磁気量はスカラーで方向性を持たない。それに対して磁束は磁力線と同じ方向を持つベクトルである。

5. 電流が磁場から受ける力（磁束密度の正式定義）

(1) 電流が磁場から受ける力

電流は磁場から力を受ける。その力の大きさ F は

$$F = \mu_0 I l H$$

で表わされることを以前に導いた。ここで、磁束密度 B は $B = \mu_0 H$ で表わされるので、電流が磁場から受ける力は

$$F = IBl$$

と表わすことができる。以後、電流が磁場から受ける力はこの式を使うようにする。

(2) 磁束密度の正式な定義

実を言うと、磁束密度はこの式で定義されているのである。 $B = \frac{F}{Il}$ となるので、

「1mの導線に1Aの電流を流したときに受ける力の大きさが1Nであるときの磁束密度の大きさを1Tとする」

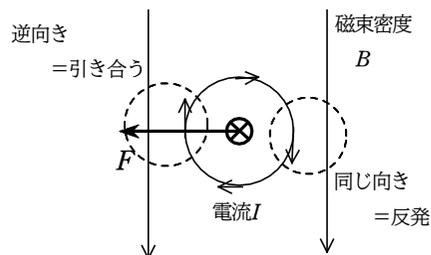
これが**磁束密度の大きさ**の正式な定義である。ここでT（テスラ）は磁束密度の単位でWb/m²あるいは、N/Amと同じである。ここまでの論を逆にたどれば、磁束線の性質が今までのものとまったく変わらないことが分かる。

物理学発展の歴史の中で磁場は磁気量の研究から発展してきた概念で、磁束密度は電流が発生する磁気の研究から発展してきた概念である。最終的に $B = \mu_0 H$ で両者はひとつになったという歴史がある。そのために、磁場と磁束密度はよく似た概念なのである。

(3) 電流が磁場から受ける力の例

① 磁場内の電流1

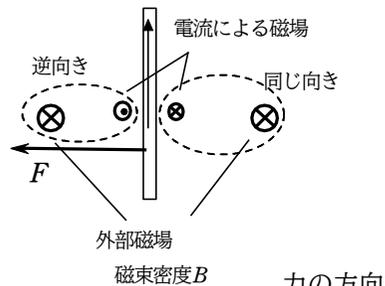
磁束密度 B 内の長さ l の導線に電流 I を流したとき、この導線に作用する力は、磁力線（磁束線）の向きから、左向きの力でその大きさは IBl となる。



磁束密度

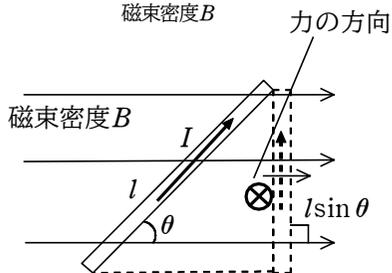
② 磁場内の電流2

図のように上向きに電流が流れている場合も同じように導線の右側の磁力線が同じ向きで左側が逆向きになっているので、左向きに力を受けていることになる。この場合も力の大きさは IBl となる。



③ 磁場内の電流3

右図のように磁束密度に対して導線が角度 θ 傾いている場合に磁場から受ける力は磁場と直角になる方向に換算して計算すると良い。図の場合は破線の導線で考えると良い。



そこで、長さを $l \sin \theta$ と考えると、電流が磁場から受ける力の大きさは $IBl \sin \theta$ となる。ここでは導線の長さを変えたが、磁束密度を導線と直角になるようにベクトル分解しても、もちろんかまわない。また、電流を分解しても良い。