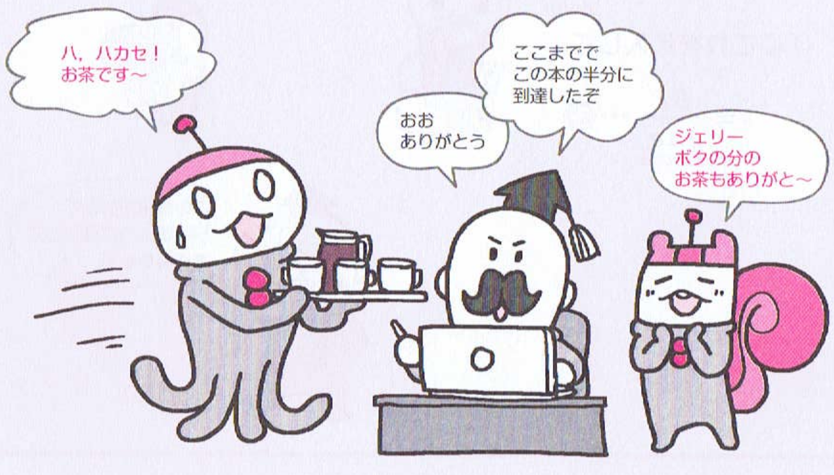
ハカセの宇宙一キビしいチェック!!

理解できたものに，☑チェックをつけよう。

- □ 磁力線はN極から出てS極へと向かう。
- □ 直線電流，円形電流（中心），ソレノイド（内部）が作る磁場の式をそれぞれ覚えた。
- □ 電流が磁場を横切っているときに，フレミングの左手の法則から，力がどの方向にはたらいているかがわかる。
- □ 磁場を横切る電流にはたらく力の大きさは $F=\mu HI\ell=BI\ell$ である。
- □ 2本の平行電流が受ける力を導ける。
- □ ローレンツ力の大きさと向きを求めることができ，円運動の運動方程式を立てられる。
- □ ローレンツ力と金属板内に発生した電場による力のつり合いからホール電圧を求めることができる。



Chapter

6

磁場

Chapter

6 磁場

はじめに

ここからは磁気について学んでいきます。

小学生のころに磁石で遊んだことはありませんでしたか？
磁石どうしをくっつけたり，磁石を鉄にくっつけたり，砂場で砂鉄を探してみたり。
また，私たちの生活の中でも，冷蔵庫（の表面）に何かを貼りつけたりして，磁石は役に立っていますね。
この磁石の力を磁気力といいます。

さて，今まで"電荷"や"電流"という"電気"の話をしてきたのに，なぜここで"磁気（磁石）"の話をしたかというと，電気と磁気には切っても切れない関係があるためです。
電流は磁場に対して，また，磁場は電流に対して影響を及ぼすのです。
電流と磁場の関係がどのようなものなのかを含めて，磁気の勉強をしていきましょう。

この章で勉強すること

まず，磁気の基本性質を，電気の性質と関連づけながら紹介します。
そして，電流と磁場の相互作用を，たとえ話を交えながら説明していきます。
後半では，ローレンツ力や，磁場中の荷電粒子のふるまいといったミクロな項目も扱います。

6-1 磁気力と磁場

ココをおさえよう！

電荷がその周りに電場を作るのと同様に，
磁極はその周りに磁場を作る。
磁気と電気には非常に似通った性質が現れている。

小学校の理科でも学んだと思いますが，磁石のN極とS極(**磁極**)を近づけると2つの磁石は引き合い，N極どうし，もしくはS極どうしを近づけると磁石は反発し合いますね。
このとき，各磁極にはたらく力を**磁気力**と呼びます。

また，磁極の強さのことを**磁気量**と呼び，単位には**Wb（ウェーバ）**を使います。
弱い磁石は磁気量が小さく，強力な磁石は磁気量が大きいということです。

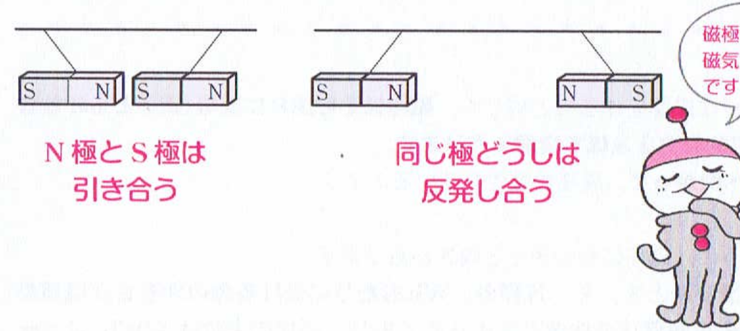
距離r〔m〕離れた，磁気量がm_1〔Wb〕，m_2〔Wb〕の磁極にはたらく磁気力には，次のような関係が成り立ちます。

$$F = k_m \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

これは磁気力に関するクーロンの法則と呼ばれます。

この式はp.38で学んだクーロンの法則$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$と同じ形をしていますね。
この他にも，磁気と電気では同じような法則がたくさんあります。

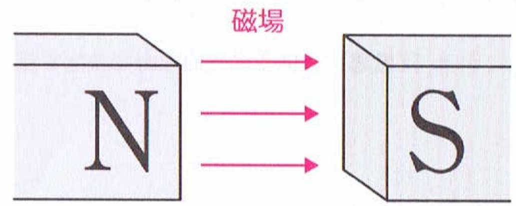
電気の章では，静電気力を電場という観点から考えることができましたね。
それと同様に，磁気力も**磁場**という観点から考えることができるのです。
p.206からは，この磁場について話をしていきますよ。



磁気力に関するクーロンの法則

r〔m〕離れた2つの磁極m_1〔Wb〕，m_2〔Wb〕にはたらく磁気力の大きさは

$$\boxed{F = k_m \frac{m_1 m_2}{r^2}}$$



電荷がその周りに電場を作るのと同じく，**磁極はその周りに磁場（磁界とも呼びます）という磁気的な力を及ぼす空間を作ります。**
N極からS極へ向かって，磁場が発生しているのです。

電場と同じように，磁場にも大きさと向きがあります。
磁石のN極を置いたとき，そのN**極が1 Wbあたりに受ける力の大きさが磁場の大きさ，力の向きが磁場の向き**と定められており，磁場の単位はN/Wb（**ニュートン毎ウェーバ**）となります。

磁気量m〔Wb〕の磁極を，大きさH〔N/Wb〕の磁場の中に置いたときの，その磁極が受ける力F〔N〕は，次のように表されます。

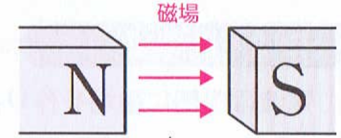
$$F = mH$$

また，磁場の向き（流れ）を視覚的に表したものを**磁力線**と呼びます。
方位磁針のN極は磁場と同じ向きに磁気力を受けるので，方位磁針のN極が向いた向きが磁場の向きになります。
すなわち，磁力線は，N極から出てS極に入ると考えればよいのです。電気力線に似ていますね。
右ページでは棒磁石の周りにできる磁場を磁力線で表しています。

6-1では磁気について説明してきましたが，電気の世界に似ているものが多かったですね。
いろいろと説明しましたが，大事なことは**「『磁場』という磁気的な力を及ぼす空間があるぞ」**ということです。

磁場

- N極からS極へ向かう。
- 向きと大きさがある。
- +1 Wbの磁極（小さなN極）が受ける力の大きさと向きが磁場の大きさと向き。
- 単位は **N/Wb**（ニュートン毎ウェーバ）

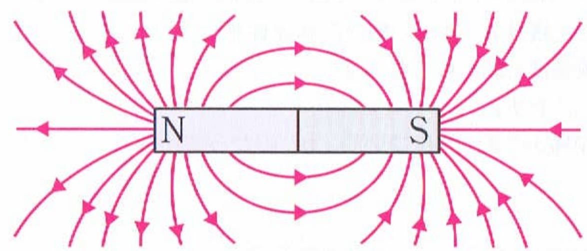


6

磁気量m〔Wb〕の磁極が，H〔N/Wb〕の磁場中で受ける力は

$$\boxed{F = mH}$$

［棒磁石の周りにできる磁場］



6-2 電流の作る磁場

ココをおさえよう！

電流は周囲に磁場を作り，その大きさは次のようになる。

直線電流：$\dfrac{I}{2\pi r}$

円形電流：$\dfrac{I}{2r}$

ソレノイド：nI

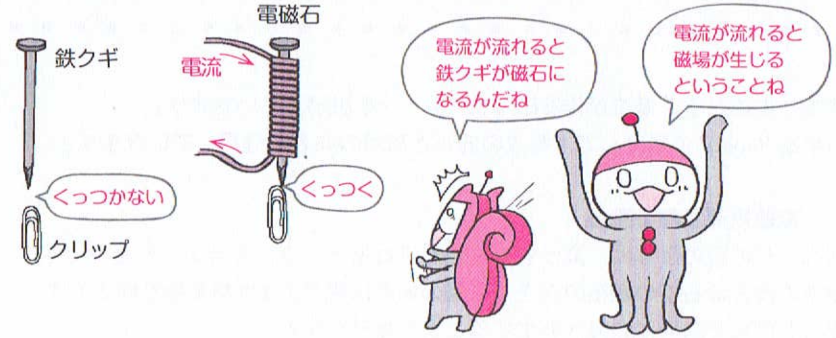
小学校の理科で習った電磁石を覚えていますか？
導線を巻きつけたコイルの中心に鉄クギを入れて，導線に電流を流すと中心にある鉄クギが磁石に変わるというものでした。
電流が流れることによって，磁気力が生じるようになったということですね。
この電磁石の周りには，棒磁石と同様の磁場が形成されます。
電流が流れるとその周りに磁場が生じるのです。

電流の向きと，電流によって発生した磁場の向きの関係は，右手を使うとわかります。
右手の親指を立て，残りの4本指を握りましょう。右手で"Good"とする感じです。
そうしたときの，親指の向きと残りの4本指の向きの関係性が，
電流の向きと磁場の向きの関係性と同じになります。
この法則を**右ねじの法則**といいます。
これを使って，電流が作る磁場3パターンについて，p.210から説明していきますね。

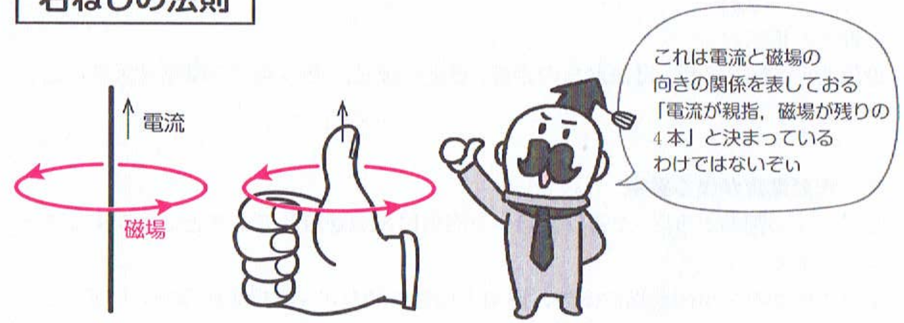
また，ここからは3次元で立体的に考えていく必要があるので，
紙面上で磁場の向きや電流の流れる向きを表現する際，次のような記号を用います。記号の示す向きを覚えておきましょう。

⊙：紙面の裏側から表側へ垂直に向かってくるような向き
⊗：紙面の表側から裏側へ垂直に出て行くような向き

これらは矢を進行方向の前後から見たときの様子をモチーフにしています。
紙面の表側から見ると，矢が裏から表へ出るときは，先端部分が見えますから，⊙になり，矢が表から裏へ出るときは，羽の部分が見えますから，⊗になるのです。

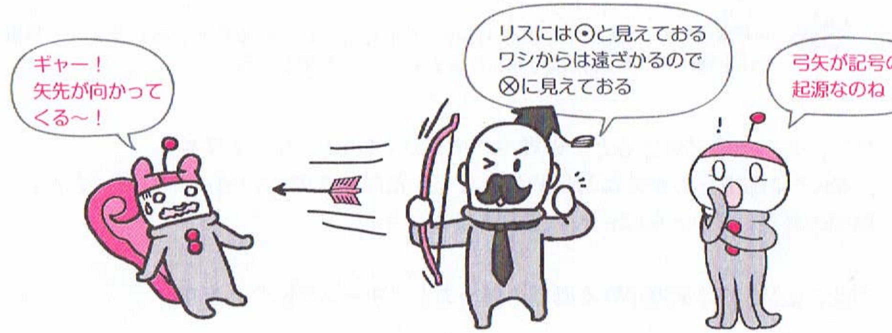


右ねじの法則



[向きを表す記号]

⊙：紙面の裏から表へ向かってくる向き
⊗：紙面の表から裏へ出ていく向き



さて，ここからは電流が作る磁場3パターンを説明していきます。
右手を“Good”の形にして，電流の向きと磁場の向きを確認していきますよ。

① 直線電流が作る磁場

右ページの図のように，真っすぐ電流が流れるというシチュエーションです。
電流の向きは右手の親指の向き，磁場の向きは残りの4本指を握る向きです。
電流を囲んで円形に磁場が発生することになりますね。
このとき，**電流I〔A〕からr〔m〕だけ離れた位置**にできる磁場の大きさH〔A/m〕は

$$H=\frac{I}{2\pi r}$$

と表されます。
電流Iが大きいほど，電流からの距離rが近いほど，その点での磁場は大きいということですね。

② 円形電流が作る磁場

右ページの図のように，ぐるりと回った円形に電流が流れているというシチュエーションです。
電流の向きを右手の親指の向き，磁場の向きを残りの4本指を握る向きにすると，円の中心を貫くように磁場が発生することになりますね。
円の半径をr〔m〕とするとき，円の中心部分における磁場の大きさH〔A/m〕は

$$H=\frac{I}{2r}$$

と表されます。
電流Iが大きいほど，円形電流の半径rが小さいほど，円の中心部分の磁場は大きいということですね。

補足 円形電流では，「3 Aの導線を5周巻いた」などといわれることがあります。その場合は全電流の和をIとして$I=3\text{ A}\times5=15\text{ A}$としましょう。

さて，①，②の式を見ると，磁場Hの単位は〔A/m〕となりますね。
p.206では磁場Hの単位は〔N/Wb〕としましたが，この〔A/m〕もよく使います。
磁場の単位は2つとも頭に入れておきましょう。

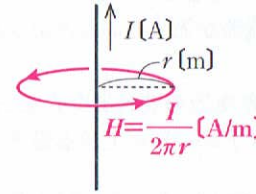
では，p.212では電流が作る磁場の最後の1パターンを紹介します。

電流が作る磁場 3 パターン

① 直線電流が作る磁場

電流からr〔m〕離れた点での
磁場は

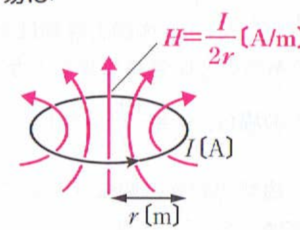
$$H=\frac{I}{2\pi r}$$

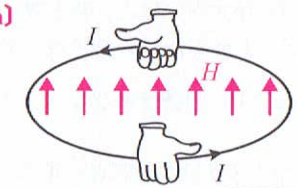


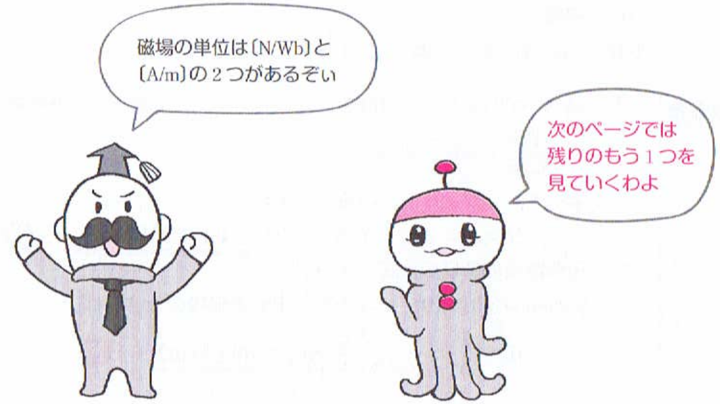
② 円形電流が作る磁場

半径r〔m〕の円形電流の
中心にできる磁場は

$$H=\frac{I}{2r}$$







6

③ ソレノイドが作る磁場

ソレノイドとは，導線をぐるぐると密に巻いたもののことです。
(電磁石の中心の鉄クギを抜いたもののことですね)
このぐるぐる巻いた導線に電流が流れているという状態です。

このとき，ぐるぐる巻かれた電流の流れる向きを右手の4本指を握る向きとすると，親指の向きが，ソレノイドの内部にできる磁場の向きになります。

補足 p.210の①，②は親指の向きを電流の向きとしましたが，今回は4本指の向きを電流の向きに合わせています。

ソレノイドが，**1 mあたり，n回ぐるぐる巻きになっている**とすると
ソレノイドの内部にできる磁場の大きさH〔A/m〕は次の式で表されます。

$$H = nI$$

電流Iが大きいほど，巻き数nが多いほど，内部の磁場は大きいということですね。
nが「1 mあたりの巻き数」であることに注意しましょう。

5 mで100回巻きのソレノイドの場合，$n=\dfrac{100}{5}=20$です。

①～③の3つの公式と，電流・磁場の向きの関係は覚えてしまいましょう。
右手の指の形で覚えてしまうのがいいでしょう。
各公式のrやnが何を指しているのかを間違えないように注意が必要です。

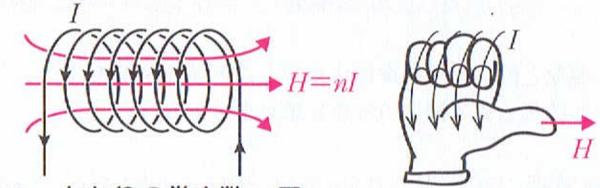
問6-1 次の(1)，(2)について，磁場の大きさを求めよ。
(1) 100回巻きの25 cmのソレノイドに0.75 Aの電流を流したときの，ソレノイド内の磁場。
(2) 半径3.0 cmの円形の導線に，5.4 Aの電流を流したときの，中心の磁場。

解きかた
(1) 25 cm = 0.25 mで100回巻いているので，1 mあたりの巻き数は
$n=\dfrac{100}{0.25}=400$ですね。
よって，ソレノイド内の磁場の大きさは
$H=nI=400\times 0.75=300=\mathbf{3.0\times 10^2}$ **〔A/m〕** …答
(2) 円形電流の磁場の公式ですね。
$3.0\ \mathrm{cm}=3.0\times 10^{-2}$ mなので，中心の磁場の大きさは
$H=\dfrac{I}{2r}=\dfrac{5.4}{2\times 3.0\times 10^{-2}}=\mathbf{90}$ **〔A/m〕** …答

③ ソレノイドが作る磁場

1 mあたりの巻き数がn回の
ソレノイドの内部にできる磁場

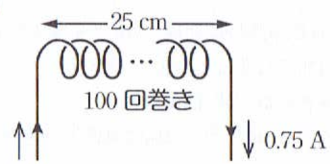
$$H=nI$$



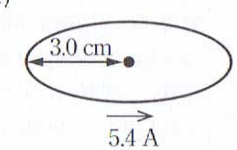
1 mあたりの巻き数 n 回

問6-1

(1)



(2)



(1) 25 cm＝0.25 m より

$$n=\frac{100}{0.25}=400$$

$$H=nI=400\times 0.75=\underline{3.0\times 10^2\text{〔A/m〕}}\ \cdots 答$$

(2) $3.0\ \mathrm{cm}=3.0\times 10^{-2}\ \mathrm{m}$

$$H=\frac{I}{2r}=\frac{5.4}{2\times 3.0\times 10^{-2}}=\underline{90\text{〔A/m〕}}\ \cdots 答$$

問6-2 右ページの図のように，紙面の奥から手前に流れる電流A$(a,\ 0)$と，紙面の手前から奥に流れる電流B$(-a,\ 0)$がある。どちらの電流も大きさIで流れている。このとき，点C$(0,\ a)$での磁場の大きさと向きを求めよ。ただし，円周率はπとする。

磁場も電場と同じように重ね合わせることができます。
ベクトルの足し算で磁場の向きを求めましょう。

解きかた

三角形OACはOを直角とする直角三角形なので，三平方の定理より
$AC=\sqrt{a^2+a^2}=\sqrt{2}\,a$となりますね。

よって，電流Aが点Cに作る磁場の大きさは，$H_A=\dfrac{I}{2\sqrt{2}\,\pi a}$になります。
その向きは右ねじの法則より，左下向きになります。

同様に，$BC=\sqrt{2}\,a$なので，電流Bが点Cに作る磁場の大きさは，
$H_B=\dfrac{I}{2\sqrt{2}\,\pi a}$になりますね。
その向きは右ねじの法則より，右下向きになります。

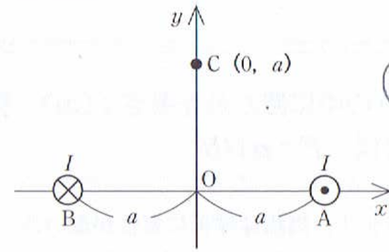
△ABCは$AB=2a$，$BC=AC=\sqrt{2}\,a$なので，Cを直角とする直角二等辺三角形です。
電流が作る磁場は円形になっているので，磁場H_Aと線分ACは垂直になります。
つまり，磁場H_Aの向きはC→Bの向きになることがわかります。
同様に，磁場H_Bの向きはC→Aの向きになりますね。
これらから，電流によって作られた2つの磁場H_A，H_Bは垂直で，大きさは同じということです。
重ね合わせた磁場の大きさは，右ページの図より三平方の定理が使えます。
よって，点Cの磁場の大きさは

$$H=\sqrt{H_A{}^2+H_B{}^2}=\sqrt{2}\,H_A=\underline{\underline{\dfrac{I}{2\pi a}}}\ \cdots 答$$

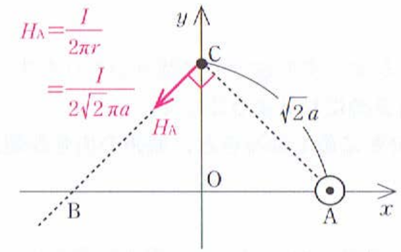
向きは **y軸負の向き** …答

6

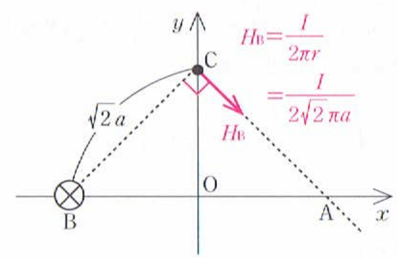
問6-2



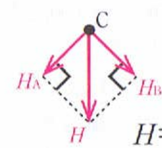
[点Aの電流の作る磁場]



[点Bの電流の作る磁場]



[合成磁場]



$$H=\sqrt{2}\,H_A=\underline{\underline{\dfrac{I}{2\pi a}}}\ \cdots 答$$

ここまでやったら
別冊 P. 48へ

6-3 電流が磁場から受ける力

ココをおさえよう！

透磁率 μ〔N/A^2〕，磁場 H〔A/m〕の中に置かれた長さ ℓ〔m〕，強さ I〔A〕の電流が受ける力 F〔N〕は　$F=\mu HI\ell$

磁場にはちょっとやっかいな性質があります。**磁場は非常に気性が荒いので，磁場の中を電流が横切ると「じゃまだ！」といって，電流に力を与えてしまうのです。**
右ページの図のように，磁場の中に導線を通し，電流を流すと，磁場は横切られることに腹を立てて，電流に力を加えます。

このとき，電流の受ける力の向きは，**フレミングの左手の法則**で決まります。
左手の中指，人差し指，親指をそれぞれ直角になるようにして，
中指を電流の向き，人差し指を磁場の向きにあてはめると，親指の向きが電流が受ける力の向きになるのです。

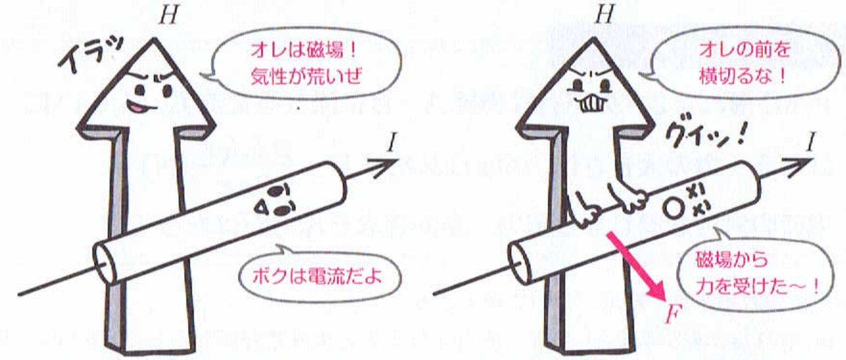
大きさが H〔A/m〕の磁場を垂直に横切る導線 ℓ〔m〕に I〔A〕の電流が流れていたとすると，導線が受ける力の大きさ F〔N〕は H，I，ℓ に比例します。
つまり，比例定数 μ を用いて $F=\mu HI\ell$ と表されます。
この比例定数 μ を**透磁率**と呼び（単位はN/A^2），磁場の生じている空間の物質によって決まります。特に，真空中の透磁率を μ_0 で表します。
また透磁率 μ と磁場 H の積をまとめて $\mu H=B$〔T〕と表します。
B は磁束密度といい，単位はT（テスラ）です。(p.222で説明します)。
これを使うと $F=BI\ell$ と表されます。

磁場は電流に目の前を横切られるのが嫌なわけです。
ですから，**磁場と同じ向きに（平行に）電流が流れていたら，力を加えません。**
磁場に対して，斜めの方向に電流が流れていたら，磁場の目の前を横切った成分（磁場に対して垂直な成分）が大きいほど力が大きくなります。
横切り度合いが強いと，磁場の怒りが強いと思っておきましょう。
右ページの図のように，磁場の中を電流が流れており，電流が作る角度を θ とすると，電流の垂直成分は $I\sin\theta$ となるので次のように表されます。

$$F=\mu HI\ell\sin\theta=BI\ell\sin\theta$$

θ のとりかたによっては $\mu HI\ell\cos\theta$ になることもありますので，注意しましょう。

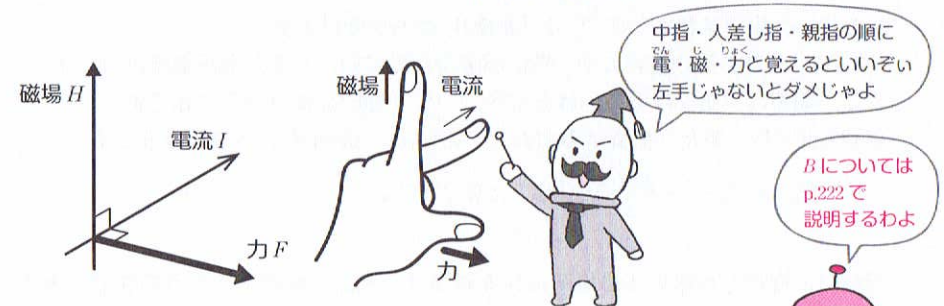
磁場が電流に与える力



磁場を電流が横切ると…　　電流は磁場から力を受ける！

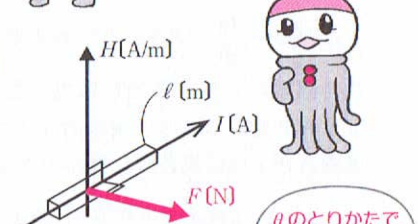
フレミングの左手の法則

…電流 I，磁場 H，電流の受ける力 F の向きを表したもの。



H〔A/m〕の磁場を垂直に横切る導線 ℓ〔m〕に I〔A〕の電流が流れていたとすると

$$F=\mu HI\ell$$
$$=BI\ell$$



［H と I が直交しない場合］

直交する成分の分だけ，力がはたらくので，右図では

$$F=\mu HI\ell\sin\theta$$
$$=BI\ell\sin\theta$$

6-4 平行電流が受ける力

ココをおさえよう！

r〔m〕離れた2本の平行な導線A，Bに流れる電流I_A，I_B〔A〕にはたらく力の大きさは，ℓ〔m〕あたり$F=\dfrac{\mu I_A I_B \ell}{2\pi r}$〔N〕
電流の向きが同じなら引力，逆向きなら斥力がはたらく。

平行に流れる2本の電流について考えてみましょう。
r〔m〕離れた2本の導線A，Bに，それぞれ向きと大きさが同じI_A〔A〕，I_B〔A〕の電流が流れています。この導線ℓ〔m〕にはたらく力を考えましょう。

右ページの図で導線Aを流れる電流I_Aが導線Bの場所に作る磁場は，右ねじの法則より，紙面の奥に向かう向きですね。磁場の大きさは，$H_A=\dfrac{I_A}{2\pi r}$〔A/m〕です。

I_Aの作った磁場を横切るので，I_B（導線B）は力を受けます。
フレミングの左手の法則より，中指が電流I_Bの方向，人差し指が磁場H_Aの方向なので，親指の力を受ける方向は左向き，つまり導線Aに近づく向きです。
導線Bがℓ〔m〕あたりに受ける力の大きさF_Bは，透磁率μ〔N/A^2〕を使って

$$F_B=\mu H_A I_B \ell=\frac{\mu I_A I_B \ell}{2\pi r}\text{〔N〕}$$ となります。

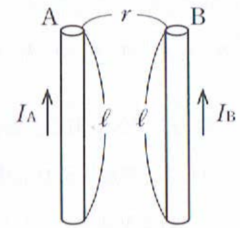
同様に，電流I_Bが導線Aの場所に作る磁場は，紙面の手前に向かう向きで，大きさは$H_B=\dfrac{I_B}{2\pi r}$〔A/m〕となりますね。
この磁場により，電流I_Aは力を受けます。その向きは，フレミングの左手の法則より右向き，つまり，導線Bに近づく向きです。
導線Aがℓ〔m〕あたりに受ける力の大きさF_Aは

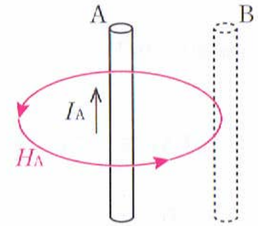
$$F_A=\mu H_B I_A \ell=\frac{\mu I_A I_B \ell}{2\pi r}\text{〔N〕}$$ となります。

これらから，**導線A，Bには引力がはたらき**，その力の大きさはℓ〔m〕あたり

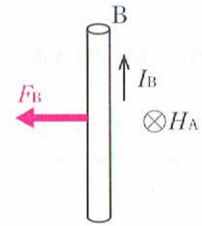
$$f=\frac{\mu I_A I_B \ell}{2\pi r}\text{〔N〕}$$

電流I_AとI_Bの向きが互いに逆向きの場合は，フレミングの左手の法則から，導線が受ける力の向きが逆向き，つまり**導線A，Bには斥力がはたらきます。**



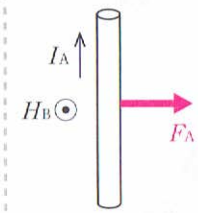


右ねじの法則より
導線Bのところの磁場H_Aの向き $\otimes$
大きさ $H_A=\dfrac{I_A}{2\pi r}$〔A/m〕



フレミングの左手の法則より
導線Bの受ける力の向き **左向き**
大きさはℓ〔m〕あたり

$$F_B=\mu H_A I_B \ell=\frac{\mu I_A I_B \ell}{2\pi r}\text{〔N〕}$$



Aの受ける力F_Aも同様に求めると
導線Aのところの磁場H_Bの向き $\odot$
大きさ $H_B=\dfrac{I_B}{2\pi r}$〔A/m〕
導線Aの受ける力の向き **右向き**
ℓ〔m〕あたりに受ける力の大きさ $F_A=\dfrac{\mu I_A I_B \ell}{2\pi r}$〔N〕

問6-3 右ページの図のように，長い直線の導線の横に，長方形のコイルがある。導線にはI〔A〕，コイルには$\dfrac{I}{2}$〔A〕の電流が流れている。このとき，導線を流れる電流Iからコイルが受ける力の向きと大きさを答えよ。ただし，透磁率はμ〔N/A^2〕，円周率はπとする。

解きかた 直線電流から$x+r$〔m〕$(0<r<b)$離れた場所に作る磁場は大きさ

$\dfrac{I}{2\pi(x+r)}$〔A/m〕で紙面の奥向きですね。

まずは，直線電流と垂直な向きに電流が流れているBCとDAについて考えてみましょう。

BCでは右向きに電流が流れているので，上向きに力を受けます。

一方，DAでは左向きに電流が流れているので，下向きに力を受けますね。

この2つの力は上下方向で相殺されてしまいます。

よって，コイルが受ける力はABが受ける力と，CDが受ける力を合わせたものになります。

ABでは下向き，つまり直線電流とは反対向きに電流が流れていますね。

フレミングの左手の法則より，ABが受ける力は右向きです。

ABの長さはa〔m〕なので，ABの受ける力の大きさF_1は

$$F_1=\mu H\cdot\frac{I}{2}\cdot a=\mu\cdot\frac{I}{2\pi x}\cdot\frac{I}{2}\cdot a=\frac{\mu I^2 a}{4\pi x}\text{〔N〕}$$

CDでは，上向きに電流が流れているのでフレミングの左手の法則より，受ける力は引力，つまり左向きになりますね。

CDの長さはa〔m〕なので，CDの受ける力の大きさF_2は

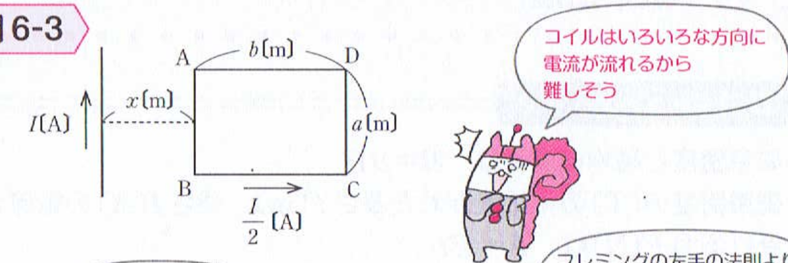
$$F_2=\mu H\cdot\frac{I}{2}\cdot a=\mu\cdot\frac{I}{2\pi(x+b)}\cdot\frac{I}{2}\cdot a=\frac{\mu I^2 a}{4\pi(x+b)}\text{〔N〕}$$

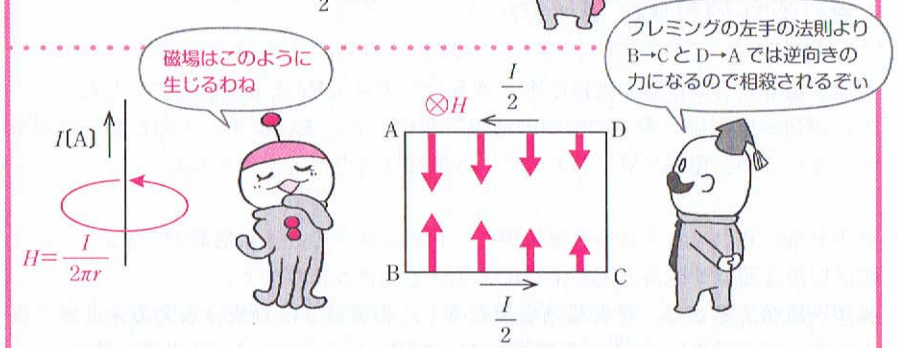
$F_1>F_2$なので　コイルが受ける力の向き：**右向き** …答

大きさ：$F_1-F_2=\dfrac{\boldsymbol{\mu I^2 ab}}{\boldsymbol{4\pi x(x+b)}}$〔N〕…答

6

問6-3



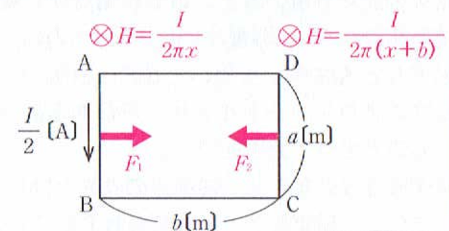


BCを流れる電流にはたらく力と，DAを流れる電流にはたらく力は相殺されるので，AB，CDに流れる電流にはたらく力を考える。

［ABについて］

$H=\dfrac{I}{2\pi x}$〔A/m〕

フレミングの左手の法則より右向きに力F_1がはたらく。



$\dfrac{I}{2}$〔A〕がa〔m〕なので

$$F_1=\mu H\cdot\frac{I}{2}\cdot a=\frac{\mu I^2 a}{4\pi x}\text{〔N〕}$$

［CDについて］

$H=\dfrac{I}{2\pi(x+b)}$〔A/m〕

フレミングの左手の法則より左向きに力F_2がはたらく。

$\dfrac{I}{2}$〔A〕がa〔m〕なので

$$F_2=\mu H\cdot\frac{I}{2}\cdot a=\frac{\mu I^2 a}{4\pi(x+b)}\text{〔N〕}$$

$$F_1-F_2=\frac{\mu I^2 a}{4\pi}\left(\frac{1}{x}-\frac{1}{x+b}\right)=\frac{\boldsymbol{\mu I^2 ab}}{\boldsymbol{4\pi x(x+b)}}\text{〔N〕}$$ …答

ここまでやったら
別冊 P. 49へ

6-5 磁束密度

ココをおさえよう！

磁束密度と磁場の関係は　$B=\mu H$
磁束密度B〔T〕の中に置かれた長さℓ〔m〕，強さI〔A〕の電流が受ける力F〔N〕は　$F=BI\ell$

電流が磁場から受ける力は透磁率μを用いて$F=\mu HI\ell$と表されるのでした。この透磁率は磁場の周りの物質の種類で変化してしまいます。そのため，透磁率がわからないと電流が受ける力の大きさを知ることができませんね。

電流が受ける力の大きさを簡単に調べるために使うのが**磁束密度B**です。
磁束密度は電場や磁場と同じように大きさと向きがあります。
磁束密度の大きさは，その場所を流れる1 Aの電流1 mが受ける力の大きさで表されていて，単位には〔T〕(**テスラ**) または〔Wb/m^2〕や〔N/A・m〕を使います。

磁束密度Bを用いると，電流が磁場から受ける力は$\boldsymbol{F=BI\ell}$と表されます。その場所を流れる1 Aの電流1 mが受ける力の大きさがBなので，$F=BI\ell$になるのです。
磁場Hと透磁率μを用いた式$F=\mu HI\ell$と比べると，$\boldsymbol{B=\mu H}$の関係があります。
長さの単位にメートルやインチがあるように，磁束密度は磁場を別の単位で表したものと思って大丈夫です。
磁束密度Bの向きは，磁場Hの向きと同じです。
ですので，磁束密度Bを与えられてもフレミングの左手の法則が使えます。

磁束密度の様子を線で表したものが**磁束線**です。
(磁束線と磁力線 (p.206) はほぼ同じものと思ってOKです)
電気の分野の電気力線と同じように，磁束密度の大きさがB〔T〕のところでは，1 m^2あたりB〔本〕の磁束線をかくことになっています。B〔T〕$=B$〔本/m^2〕ということですね。

磁束密度の話は抽象的でわかりにくいかもしれませんが，高校物理の範囲では，
・$B=\mu H$
・磁束密度Bの向きは磁場Hの向きと同じで，BとHは似たようなもの。
・磁束密度Bのところは，磁束線を1 m^2あたりにB〔本〕かく。
ということだけを，頭に入れておきましょう。

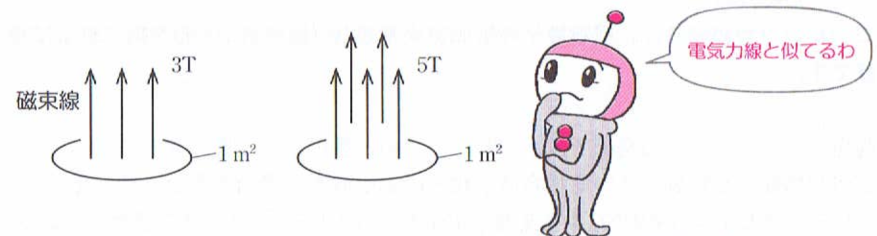
磁束密度 B …磁場Hに透磁率μを掛けたもの。

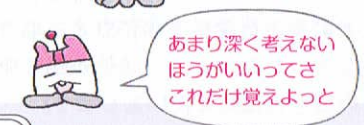
$$B=\mu H$$

その場所を流れる1 Aの電流1 mにB〔N〕の力がはたらいた → その場所の磁束密度はB〔T〕

$F=BI\ell$ ← 1 A，1 mならB〔N〕，I〔A〕，ℓ〔m〕なので$BI\ell$〔N〕

磁束線 …磁束密度の様子を線で表したもの。
〔B〔T〕のところは1 m^2あたりB〔本〕の磁束線をかく〕





Bについて覚えておくこと

・$B=\mu H$
・Bの向きはHの向きと同じ。BとHは似たようなもの。
・磁束密度Bのところでは，1 m^2あたりB〔本〕の磁束線をかく。

6-6 ローレンツ力

ココをおさえよう！

磁束密度Bの中を，速さvで移動する電気量qの粒子が受けるローレンツ力fは　$f=qvB$

磁場（磁束密度）は電流に力を与えるということでした。
これまでは導線を流れる電流について，磁場が加える力を考えてきましたが，もっとミクロな目線，粒子のレベルで見ていきたいと思います。

Chapter 4と同様，電流を正電荷，つまり，正の電気を帯びた粒子（荷電粒子）の流れと考えます。
今までは「電流が力を受ける」といっていましたが，厳密にいえば，「導体中の荷電粒子たちが力を受ける」のです。
磁場（磁束密度）は目の前を横切る荷電粒子たちに「じゃまだ！」といって，力を与えるのですね。この，**荷電粒子が磁場から受ける力**を**ローレンツ力**といいます。

磁束密度B〔T〕の中を，磁束密度に対して垂直に速さv〔m/s〕で移動している電気量q〔C〕の荷電粒子が受けるローレンツ力f〔N〕は，次のように表されます。

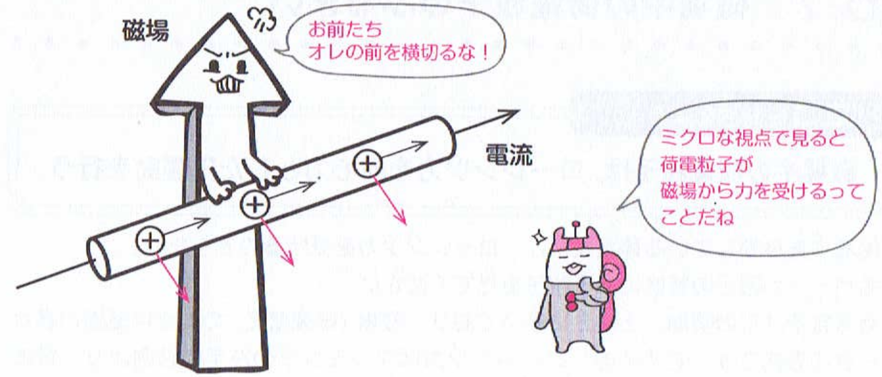
$$f=qvB$$

ローレンツ力の向きは，荷電粒子の移動方向や磁場（磁束密度）の方向に対して垂直です。

荷電粒子の受ける力の向きでは，フレミングの左手の法則を使います。
正の荷電粒子が移動している場合は，粒子の進む向きが電流の向きと同じです。
フレミングの左手の法則の，中指を粒子の進む向きとして，力の向きを求めましょう。
電子などの負の荷電粒子が移動する場合，粒子の進む向きは電流の向きとは反対と考えます。したがって，**粒子が進む向きとは逆向きを電流の向きとして，フレミングの左手の法則を使いましょう**。

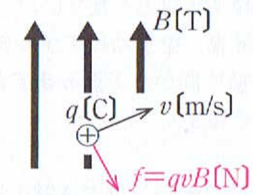
磁束密度Bと速さvがθの角度になっているときは，ローレンツ力は垂直な成分にしかはたらきません（電流のとき（p.216）と同じですね）。
よって，右ページの図のようなとき，荷電粒子が受けるローレンツ力は，
$f=qvB\sin\theta$ になります。

6

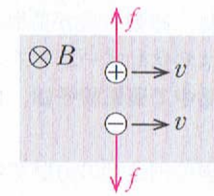


ローレンツ力 …荷電粒子が磁場から受ける力。

$f=qvB$

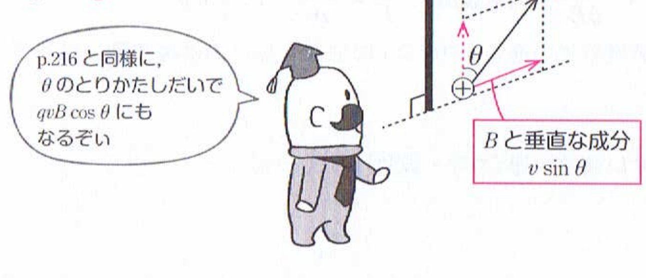


fの向きはフレミングの左手の法則で決まる。
- 正電荷→動く方向を電流の向きとして中指を合わせる。
- 負電荷→動く方向の逆向きを電流の向きとして中指を合わせる。



［磁束密度Bと，荷電粒子のvが直交しない場合］
直交する成分の分だけ，力がはたらくので，右図では

$f=qvB\sin\theta$



ここまでやったら 別冊 P.50へ

6-7 磁場中の荷電粒子のふるまい

ココをおさえよう！

磁場中の荷電粒子は，ローレンツ力を向心力とした円運動を行う。

磁場中を移動している荷電粒子は，ローレンツ力を受けるのでしたね。
右ページの図①の状態にある粒子を見てください。
荷電粒子はこの瞬間，上向きに動いており，磁場（磁束密度）の向きは紙面の裏から表の方向です。このとき，ローレンツ力はフレミングの左手の法則より，紙面の右向きにはたらきますね。

次は図②の状態にある粒子を見てください。
ローレンツ力を受けた結果，粒子はわずかに右にそれてしまいます。
すると，粒子は右斜め前に向かって進みますから，ローレンツ力の向きも紙面の右下に向かってはたらきます。

このように，磁場中ではローレンツ力は常に粒子の移動方向と垂直にはたらきますね。移動方向が変わっても，常にその移動方向と垂直に力がはたらくので，速さは変化せず一定です。
磁場中で荷電粒子は，ローレンツ力を向心力とする等速円運動を行うのです。

力学の円運動の分野で学んだことを思い出しましょう。※
向心力はローレンツ力 $f=qvB$ ですから，粒子の質量を m，円運動の半径を r とすれば次の式が成り立ちます。

運動方程式： $qvB=m\dfrac{v^2}{r}$

ここから，円運動の半径は $r=\dfrac{mv}{qB}$ となりますね。

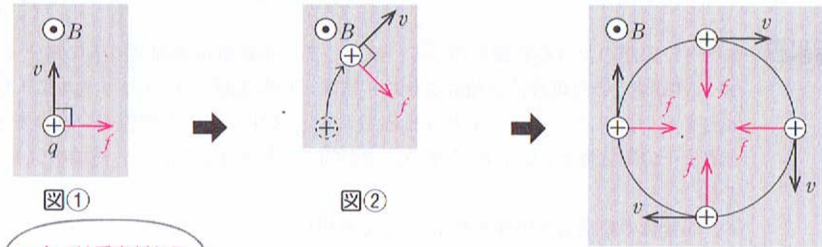
また，**周期** $T=\dfrac{2\pi r}{v}=\dfrac{2\pi m}{qB}$，**角速度** $\omega=\dfrac{2\pi}{T}=\dfrac{qB}{m}$ となります。

周期 T や角速度 ω が荷電粒子の速さ v や半径 r に依存しないのは興味深い結果ですね。

（※『宇宙一わかりやすい高校物理（力学・波動）p.190～』）

6

磁場中の荷電粒子の運動



図①　図②

ローレンツ力 f を向心力とする
等速円運動をする

粒子の質量を m とすると

円運動の方程式　$F=m\underbrace{\dfrac{v^2}{r}}_{a}$　より

$$\boxed{\underbrace{qvB}_{\text{ローレンツ力}}=m\dfrac{v^2}{r}}$$

よって，半径 r は $\boxed{r=\dfrac{mv}{qB}}$

円運動の周期を T，角速度を ω とすると

$$\boxed{\begin{aligned}T&=\dfrac{2\pi r}{v}=\dfrac{2\pi m}{qB}\\ \omega&=\dfrac{2\pi}{T}=\dfrac{qB}{m}\end{aligned}}$$

問6-4 右ページの図のような装置を使って，静止している質量mの荷電粒子に電圧Vをかけ，初速度0の荷電粒子を加速させた。加速した荷電粒子は，スリットAに入り，半円を描いたあと，スリットBから出てきた。スリットの内側の磁束密度をB，荷電粒子の電気量をq ($q>0$) とする。次の問いに答えよ。ただし，円周率はπとする。

(1) 加速後の荷電粒子の速さをm，V，qを用いて表せ。

(2) スリットA，Bの距離Lをm，V，q，Bのうち，必要なものを用いて表せ。

(3) スリットAからスリットBまで移動するのにかかった時間をm，V，q，Bのうち，必要なものを用いて表せ。

円運動の知識がアヤシイ人は，復習してから取り組むようにしましょう。

解きかた (1) まず，荷電粒子にVをかけ，加速させたということは，荷電粒子のもつ静電気力による位置エネルギーが，運動エネルギーに変化するということです。

したがって，荷電粒子に関する力学的エネルギー保存則を考えます。

加速前の静電気力による位置エネルギーはqV，

加速後の荷電粒子の速さをvとすると，運動エネルギーは$\frac{1}{2}mv^2$なので

$$qV+0=0+\frac{1}{2}mv^2 \quad \text{よって} \quad v=\sqrt{\frac{2qV}{m}} \cdots \text{答}$$

(2) スリット内では，荷電粒子はローレンツ力qvBを向心力とした円運動を行います。その運動方程式は，円運動の半径をrとして

$$qvB=m\frac{v^2}{r}$$

これより，$r=\frac{mv}{qB}$となりますね。

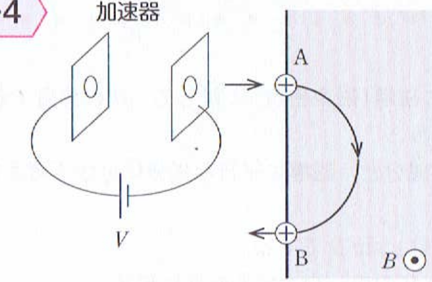
ABは円運動の直径ですので

$$L=2r=\frac{2mv}{qB}=\frac{2m}{qB}\sqrt{\frac{2qV}{m}}=\frac{2}{B}\sqrt{\frac{2mV}{q}} \cdots \text{答}$$

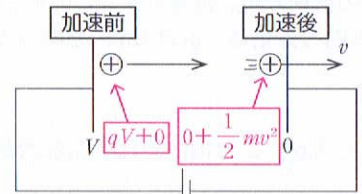
(3) 円運動の周期Tは，$vT=2\pi r$より，$T=\frac{2\pi r}{v}$と表されましたね。

求める時間は，円軌道の半分を移動する時間，すなわち周期の半分の時間ですから $\frac{T}{2}=\frac{\pi r}{v}=\frac{\pi m}{qB} \cdots$ 答

問 6-4



(1)



$$qV+0=0+\frac{1}{2}mv^2 \text{ より}$$

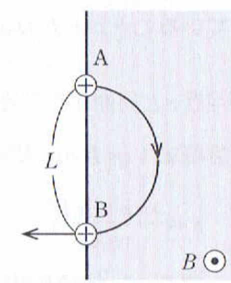
$$v=\sqrt{\frac{2qV}{m}} \cdots \text{答}$$

(2) $qvB=m\frac{v^2}{r}$

$$r=\frac{mv}{qB}$$

$$L=2r=\frac{2mv}{qB}=\frac{2m}{qB}\sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

$$=\frac{2}{B}\sqrt{\frac{2mV}{q}} \cdots \text{答}$$



(3) 円運動の周期をTとすると $vT=2\pi r$

よって $T=\frac{2\pi r}{v}$

求める時間は円運動の半周期分なので

$$\frac{T}{2}=\frac{\pi r}{v}=\pi\cdot\frac{mv}{qB}\cdot\frac{1}{v}=\frac{\pi m}{qB} \cdots \text{答}$$

6

今度は，右ページの図のように磁場（磁束密度）に対して，θ の角度で速さ v の荷電粒子が入ってきたとしましょう。
こういう場合は，磁場に垂直な成分と，磁場に平行な成分に分けて考えます。

磁場に対して垂直な速さの成分は $v\sin\theta$ ですね。
よって，荷電粒子は $f=qvB\sin\theta$ のローレンツ力を受けます。
このローレンツ力の向きは荷電粒子の運動方向と垂直になっていますね。
つまり，荷電粒子の磁場に垂直な方向の運動は，$qvB\sin\theta$ を向心力とする等速円運動になっています。

磁場と平行な向きの成分は $v\cos\theta$ ですが，この成分にはどんな力が加わるのでしょうか？
磁場は横切られるのは嫌ですが，平行な向きなら力を加えないのでしたね（p.216）。
そのため，磁場と同じ向きには力がはたらきません。
よって，荷電粒子は速さ $v\cos\theta$ の等速直線運動（等速度運動）をします。

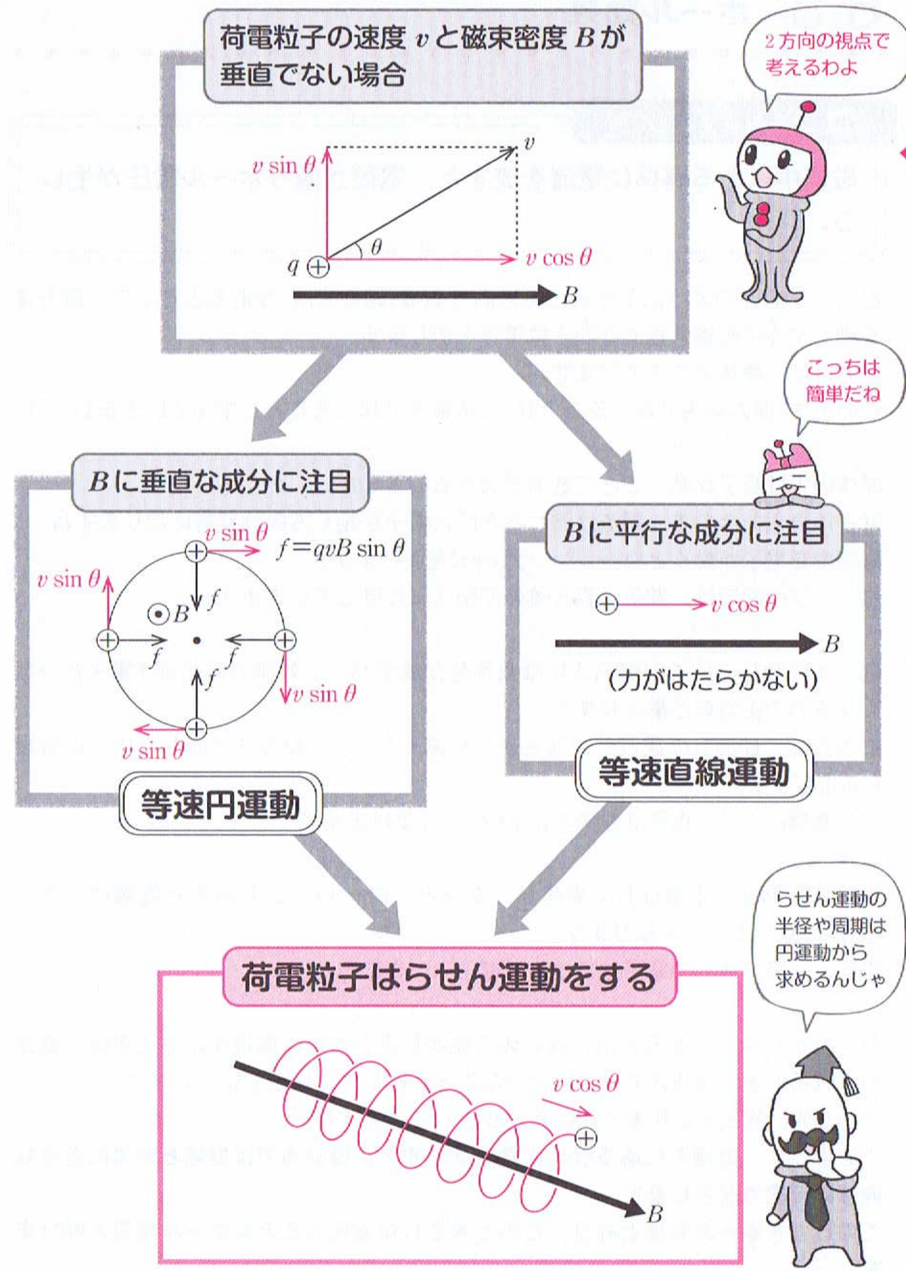
これらをまとめると，**荷電粒子は円運動をしながら一定の速さで進んでいく，らせん運動をしている**ことがわかります。

らせん運動の半径 r と周期 T を円運動の運動方程式より求めましょう。

運動方程式：$qvB\sin\theta = m\dfrac{(v\sin\theta)^2}{r}$

より，半径は　$r=\dfrac{mv\sin\theta}{qB}$

周期は　$T=\dfrac{2\pi r}{v\sin\theta}=\dfrac{2\pi mv\sin\theta}{qBv\sin\theta}=\dfrac{2\pi m}{qB}$ ですね。
周期 T は荷電粒子の角度 θ に無関係なことがわかりますね。



ここまでやったら 別冊 P.51へ

6-8 ホール効果

ココをおさえよう！

磁場中にある導体に電流を流すと，電荷が偏りホール電圧が生じる。

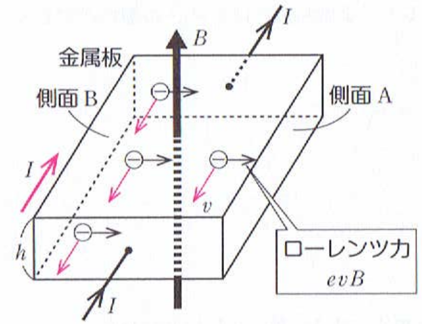
右ページの図のように下から上の方向へ磁場（磁束密度）があるところで，直方体を通るように磁場と垂直な向きに電流を流します。
直方体は，導体でできています。
このとき，直方体内で起こることから，導体内で起こることを学んでいきましょう。

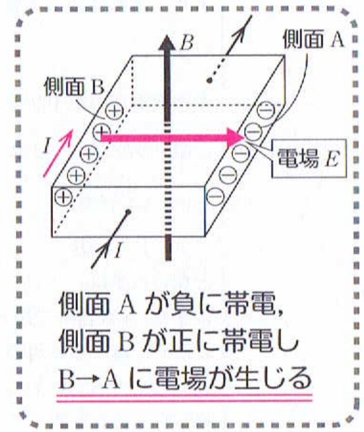
導体内では電子が動くことで電流が流れるのでした。
電子は負電荷なので，電流が流れる方向と電子が動く方向は反対になりますね。
磁場中を電子が動くとローレンツ力 evB を受けます。
右ページの図では，電子は直方体の側面Aに移動していきます。

電子が移動していくと側面Aには負電荷が集まり，反対側の側面Bは電子がいなくなるので正電荷が集まります。
このため，側面Bの電位が側面Aよりも高くなり，BからAに向かう向きに電場 E が生じます。
この電場により，電子は左向きに eE の力を受けます。

やがて，側面Aと側面Bに電荷がたまると，ローレンツ力 evB と電場による力 eE がつり合うようになります。
すると，直方体内の電子は真っすぐ進んでいきます。

今，わかりやすくするために直方体で説明しましたが，磁場中にある導体に電流が流れるとき，導体内ではこのようなことが起こっているということです。
このとき，側面Bと側面Aには電圧が生じていますね。
このように，**磁場中にある導体に電流を流すと，導体内では磁場と電流に垂直な向きに起電力が生じます。**
このことを**ホール効果**と呼び，このとき生じた電圧のことを**ホール電圧**と呼びます。

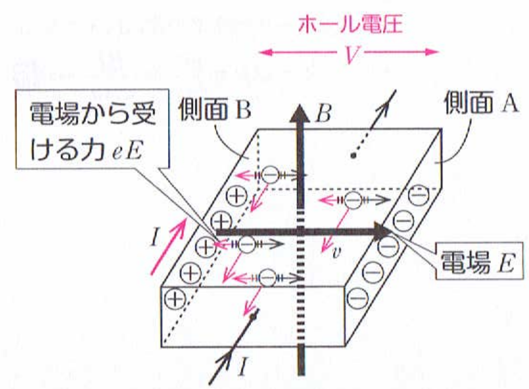


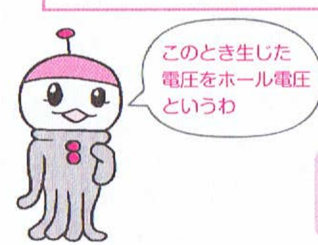


電子にローレンツ力がはたらく

ホール効果

磁場中にある導体に電流を流すと導体内で磁場・電流に垂直に起電力が生じる





ローレンツ力と電場から受ける力がつり合い電子は真っすぐ進む

問6-5 右ページの図のように縦が a〔m〕，横が b〔m〕の長方形を断面とする直方体の金属板がある。金属板には上向きの磁束密度 B〔T〕が加えられている。この金属板の側面から電流 I〔A〕を流した。電子の電気量を $-e$〔C〕，金属板にある電子の数は 1 m³あたり n 個として，このとき生じるホール電圧を求めよ。

解きかた 電子の移動速度を v としましょう。

このとき，電子が受けるローレンツ力は evB になりますね。

また，求めるホール電圧を V とすると，金属板内には $E=\dfrac{V}{b}$ の電場ができています。

この電場から電子が受ける力は $eE=e\dfrac{V}{b}$ ですね。

この2つの力がつり合っているので

$$e\frac{V}{b}=evB$$

$$V=vbB$$

となりますね。

しかし，v は自分で設定した文字なので，答えに使ってはいけません。

ここで，流れる電流の大きさについて考えてみましょう。

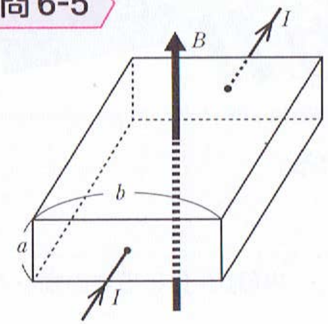
p.102でやったように，電流の大きさ I は断面積 S を用いて $I=envS$ となるのでした。これを使って，v を他の文字で表しましょう。

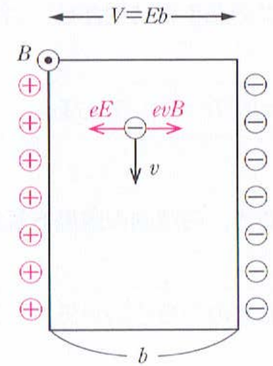
ここでは，断面積 $S=ab$ なので，$I=envab$，つまり，$v=\dfrac{I}{enab}$ となりますね。

これをホール電圧 V の式に代入すると

$$V=vbB=\frac{bBI}{enab}=\boldsymbol{\frac{BI}{ena}}\ \cdots 答$$

問 6-5





ホール電圧を V, 電子の速さを v とすると

$$V=Eb$$

よって $E=\dfrac{V}{b}$

ゆえに $\underbrace{e\dfrac{V}{b}}_{eE}=evB$

$$V=vbB \quad \cdots\cdots ①$$

$I=envS$ より　$I=envab$

$$v=\frac{I}{enab}$$

①にこれを代入して

$$V=\boldsymbol{\frac{BI}{ena}}\ \cdots 答$$