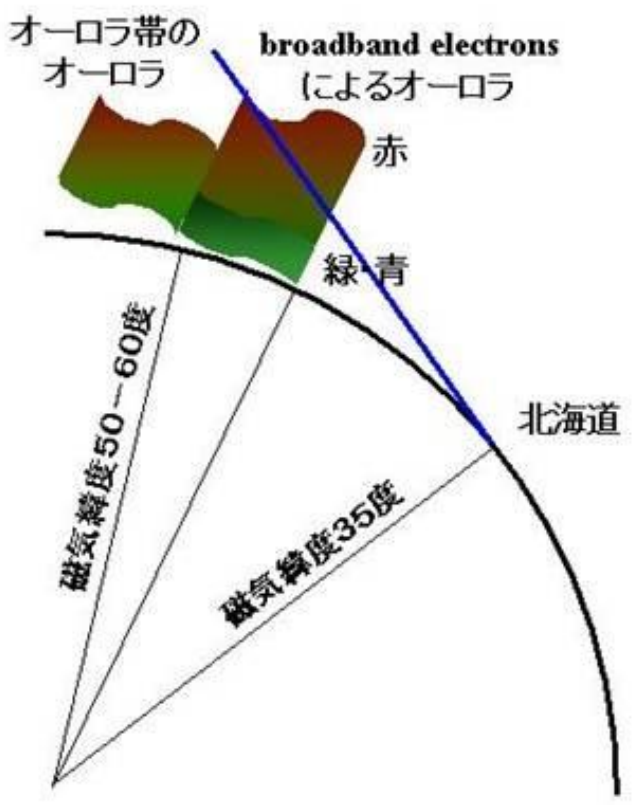
Q & A

Q: レポートの期限はいつですか？
A: 1月16日（木）にします。冬休み明けの最初の授業1月9日（木）等、早めに出してももちろん良いです。

Q: 日本でオーロラを見れますか？
A: 日本でも低緯度オーロラというを見ることができます。写真は 2003 年10月29日23時40-42分の北海道（網走）の北の空です。
これは、高緯度のオーロラの上部を見たものです。
前回見せたオーロラも上部が赤っぽくなっています。

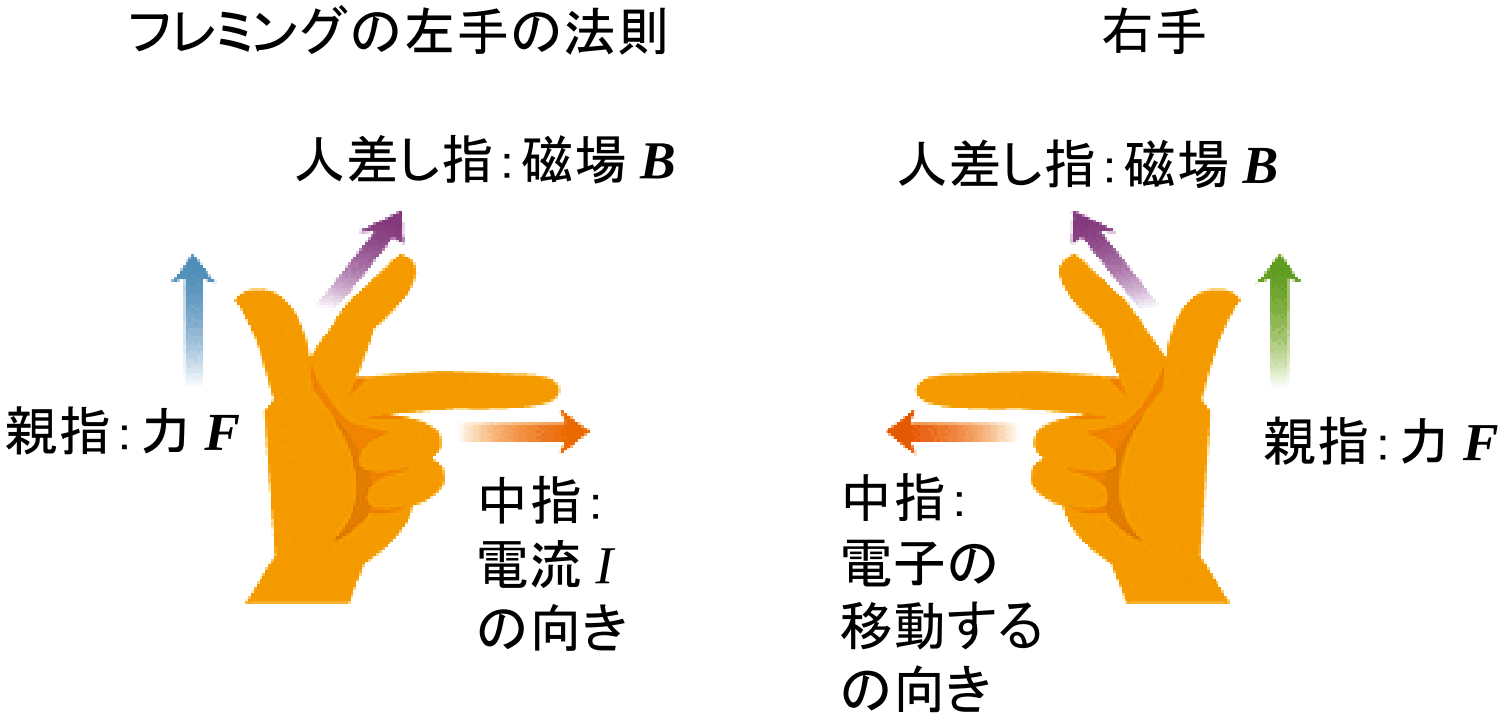


Q: リニアモーターカーが動く原理は今日の授業の実験と関係ありますか。
A: レールに金属棒を置いた実験かな。あの実験もリニア（直線）モーターの一種です。どちらも磁気力で動作するのは同じですが、細部はかなり違います。

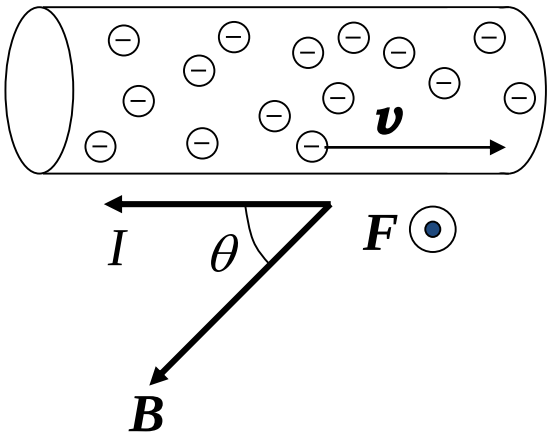
一般的な色は緑、上部は赤っぽい。

Q: ローレンツ力の向きを決めるのはフレミングの右手の法則ですか？

A: 前回、磁場中の電流に作用する磁気力の向きを、フレミングの左手の法則で説明しましたね。質問のローレンカは、電子に作用するローレンツ力のことかな？電子の移動する向きは、電流の向きと逆なので、右手の中指を電流の代わりに、電子の移動する向きにすると右下の図のようになります。これは私も使うことがあります。「フレミングの右手の法則」という名称は、別の内容ですので使わない方がよいです。



磁場 $\boldsymbol{B}$ と電流 I が垂直でない場合



左の図のような場合、電子に働く磁気力 $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$ の向きは、紙面上にある $\boldsymbol{v}$, $\boldsymbol{B}$ のいずれに対しても垂直なので、磁気力は紙面に垂直である。

θ を電流と磁場の為す角とすると、

$$F = qvB\sin\theta$$

磁場中の電流（長さ L）に働く磁気力は⑯と同様に

$$\boldsymbol{F} = (nL\mathrm{A})(q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})$$

$$= (\,qnA\boldsymbol{v}\,)\times\boldsymbol{B}L$$

$$= \boldsymbol{I}\times\boldsymbol{B}L \quad (\text{教科書 } \boldsymbol{I}\boldsymbol{L}\times\boldsymbol{B}\,)$$

↑ 大きさ I で電流の向きのベクトル

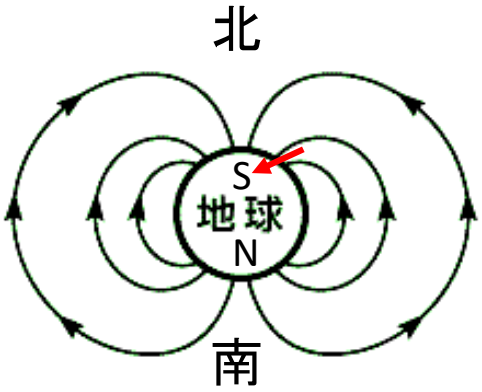
電流の向きで大きさ L のベクトル

電流を担っているものが正でも負でも $q\boldsymbol{v}$ と電流 I の方向は同じである。

$|\boldsymbol{F}| = IBL\sin\theta$
（垂直の時 IBL）

問題：地磁気の強さは 5×10^{-5} T，伏角（ふっかく：水平となす角）は50度とし、偏角はないものとする。（磁針は正確に北を向くとする。実際は約7度西にずれる。）
南北に水平に導線が張られており 4 A の電流が南から北に流れているとする。
①導線に作用する磁気力の向きは？（この教室の黒板は北を向いているとする。）

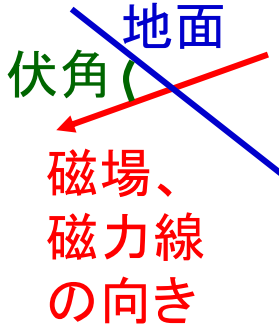
西向き



電流と磁場を含む面に垂直→東西方向（水平）

フレミングの左手の法則→西向き
（電流と磁場が垂直でなくても垂直として使う）

②5 m の導線に作用する磁気力はいくらか？sin 50度≒0.76 とせよ。

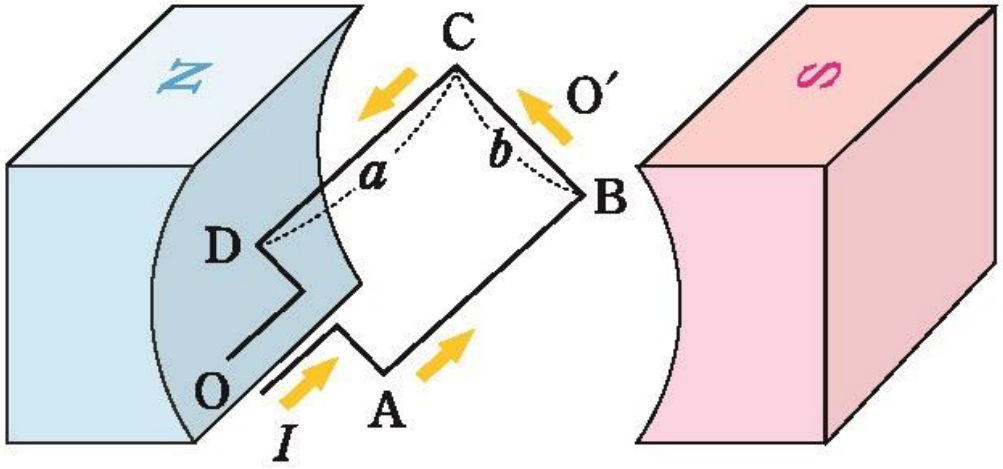


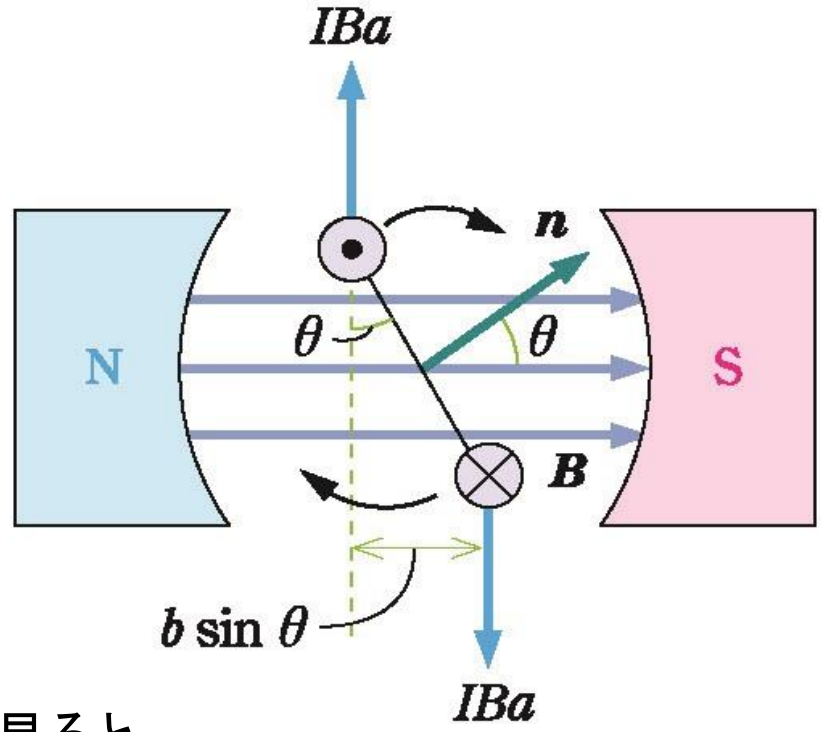
$$F = IBL\sin\theta = 4\times5\times10^{-5}\times5\times0.76 = 7.6\times10^{-4}\ [\mathrm{N}]$$

電流が流れているコイルが磁場中で受ける磁気力 （p254）

磁場中の電流に働く力

$|\boldsymbol{F}| = IBL\sin\theta$





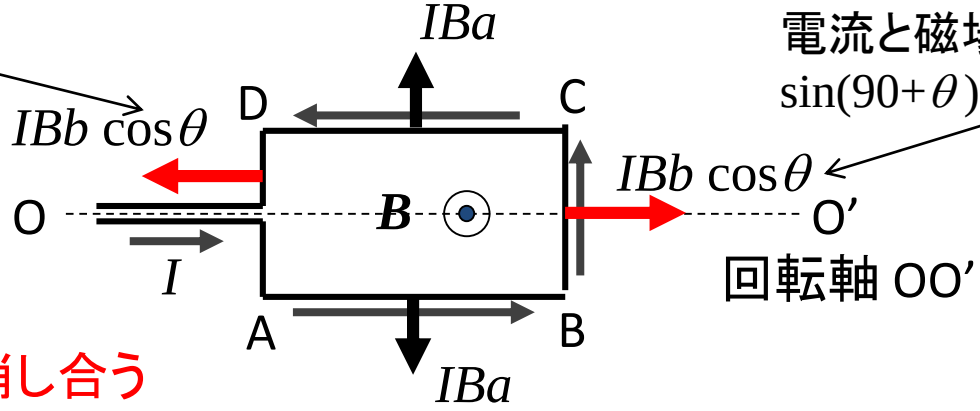
S 極側（右側）から見ると

電流と磁場のなす角：90度$-\theta$

$\sin(90-\theta) = \cos\theta$

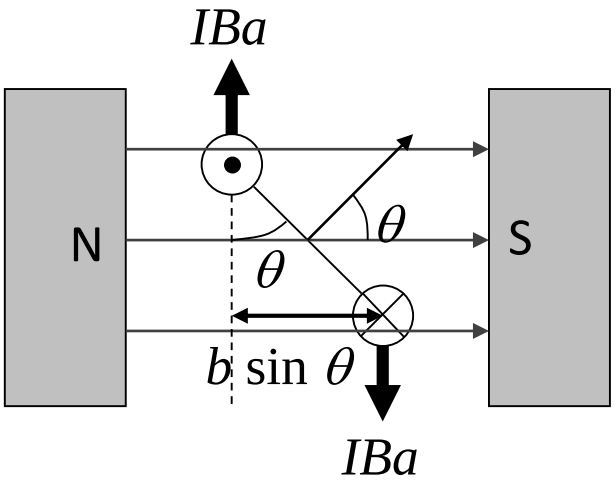
電流と磁場のなす角：90度$+\theta$

$\sin(90+\theta) = \cos\theta$



BC、ADに働く力：打ち消し合う

AB、DCに働く力も、大きさが同じで向きが逆であるが、
作用線が $b \sin\theta$ だけずれている。（偶力）



偶力のモーメントは、どこを支点にしても同じ
線分ABを支点とすると

$$N = Fl = (IBa)(b\sin\theta)$$

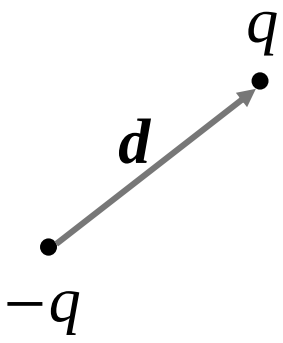
（注）力のモーメントはここでは
時計まわりを正としている。

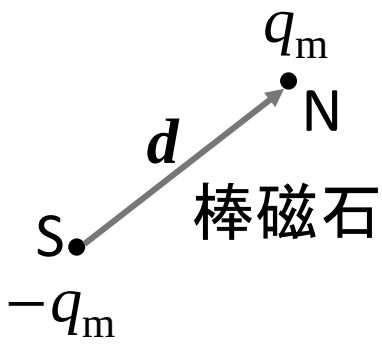
コイルの面積 $A = ab$ なので

$$\boxed{N = IAB\sin\theta}$$

θ はコイル面の法線ベクトル $\boldsymbol{n}$ と、磁場 B のなす角

磁石の磁気モーメント（復習）





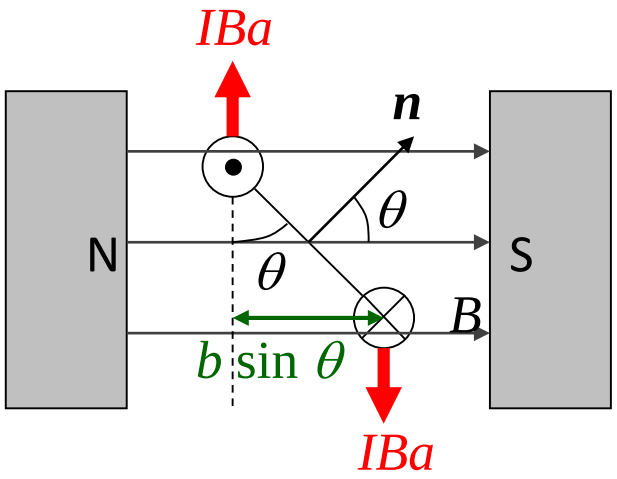
$\boldsymbol{p} = q\boldsymbol{d}$

電気双極子モーメント

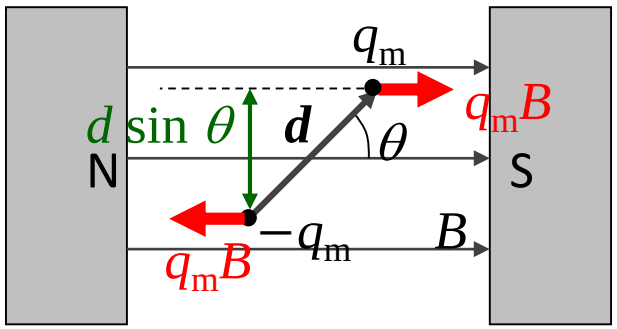
$\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{m}} = q_{\mathrm{m}}\boldsymbol{d}$

磁気モーメント

コイルに働く磁気力　と　磁気双極子に働く磁気力　を比較



左の法線ベクトルと
同じ向きの磁気双極子



$N = q_m B d \sin\theta$

$N = IAB \sin\theta$

$N = \mu_m B \sin\theta$

$\boldsymbol{\mu}_m = q_m \boldsymbol{d}$

（注）力のモーメントは
ここでは時計まわりが
正としている。

IA が μ_m に対応

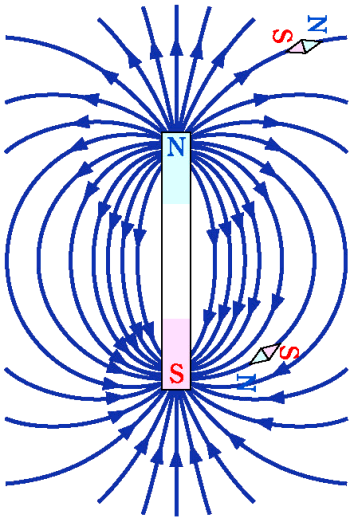
向きも考えると $IA\boldsymbol{n}$ が $\boldsymbol{\mu}_m$ に対応

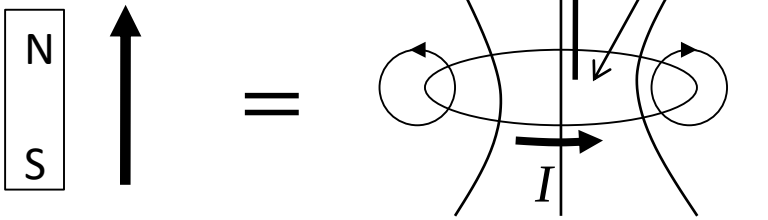
$\boldsymbol{\mu}_m = IA\boldsymbol{n}$ なら全く同じ

ここで法線ベクトル $\boldsymbol{n}$ の向きは、
コイルの電流の向きに右ネジを回したときに、右ネジの進む向き

まとめ

面積 A の平面（単位法線ベクトルは $\boldsymbol{n}$ ）のまわりを
電流 I が流れている1巻きのコイルは、磁気モーメント
$\boldsymbol{\mu}_m = IA\boldsymbol{n}$ を持つ棒磁石と同等





$\boldsymbol{\mu}_m = q_m\boldsymbol{d}$

コイルの作る磁場は
磁石の磁場に似ている。
棒磁石やコイルの大きさが
無視できる距離（遠く）では同じ。

単位の確認： IA の単位：$\mathrm{Am^2}$

$\mu_m = q_m d$ の単位： $\mathrm{N/T \cdot m = N \cdot (Am/N) \cdot m = Am^2}$

↑ $F = q_m B$

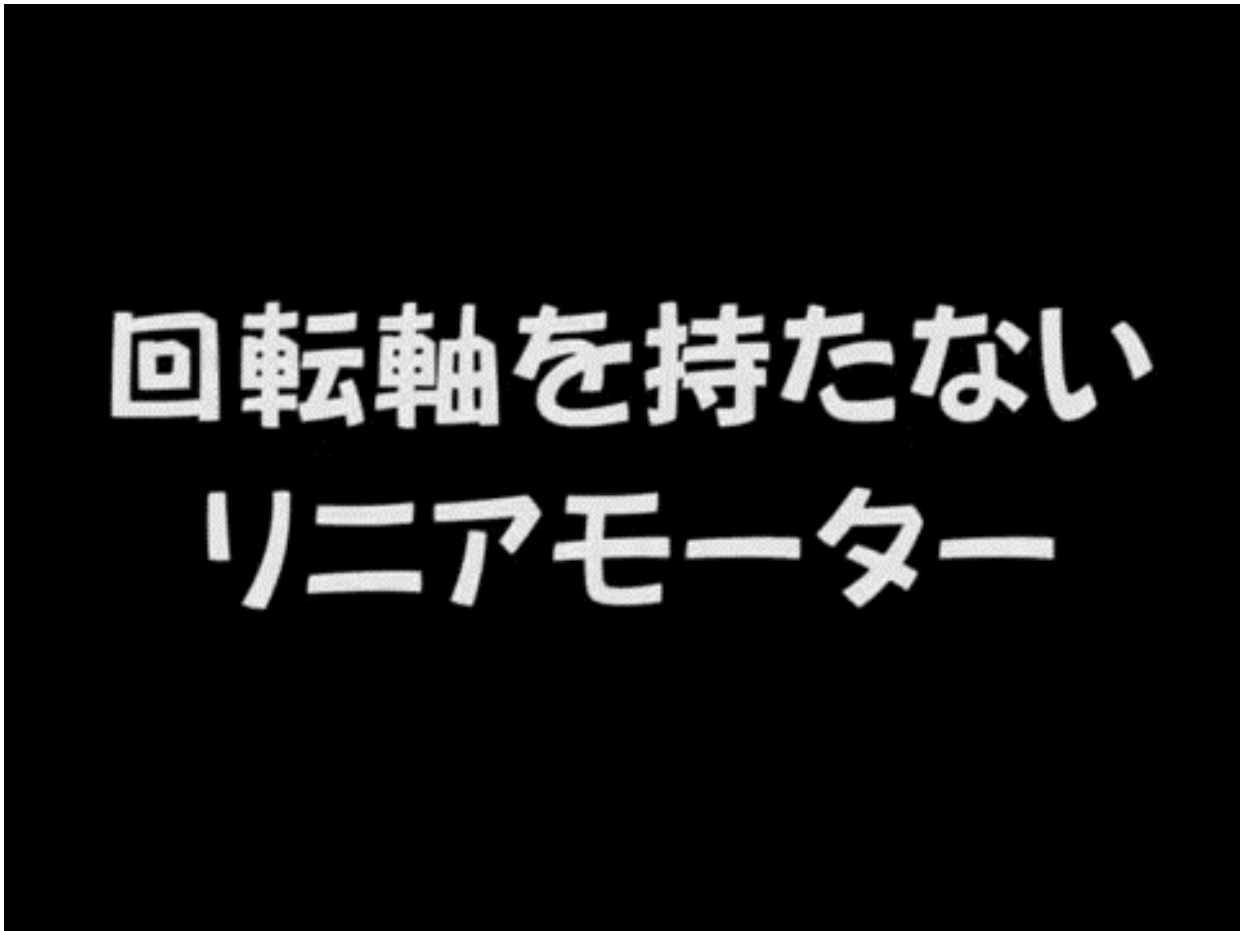
↑ $\mathrm{T = N/Am}$

リニアモーター（linear motor）

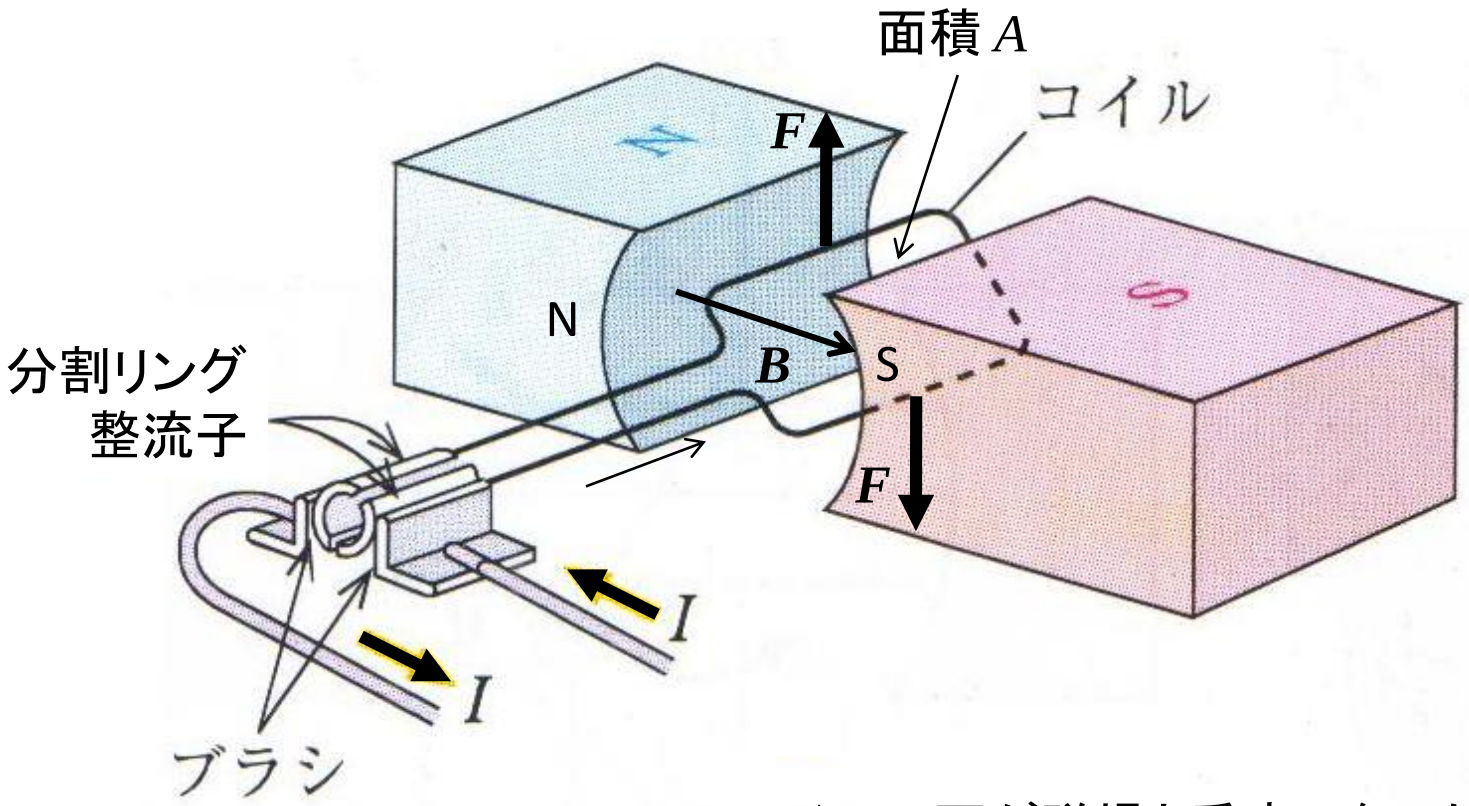
（直線）

モーターというと、回転式のモーターを思い浮かべるが
直線的な運動をするモーターもある。

問題：この授業でも、すでにリニアモーターを見せたが、どれかわかりますか？
（リニアモーターといっても、様々なものがあります）

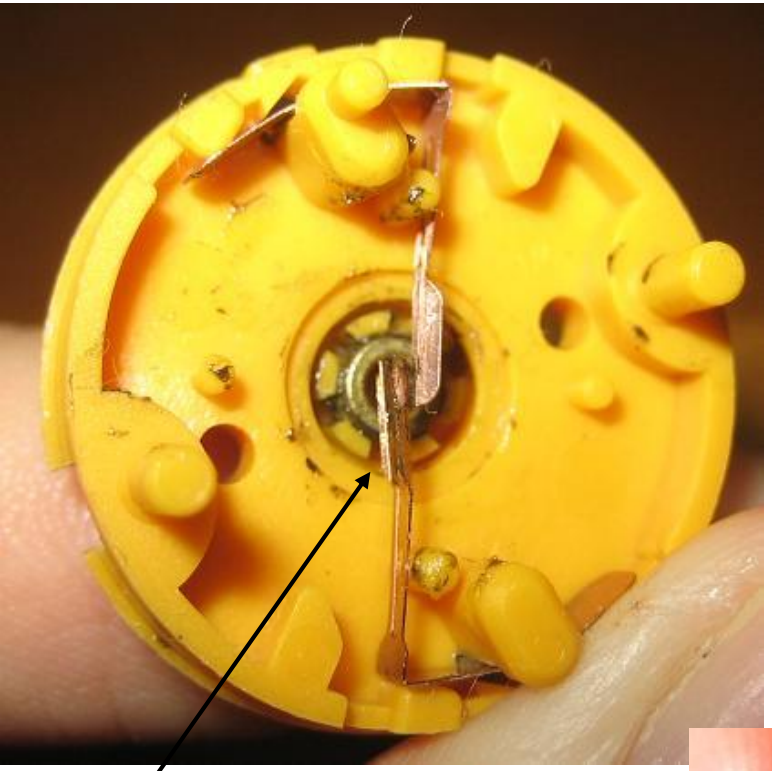


直流モーター



コイルの面が磁場と垂直になった時点で
コイルを流れる電流を逆向きにすることで
常に一定の向きに回転させるような
磁気力が働くようになっている。
コイルに、はたらく力のモーメントは、
コイルが磁場に平行のときに最大で IAB

マブチモーター（参考）



ブラシ

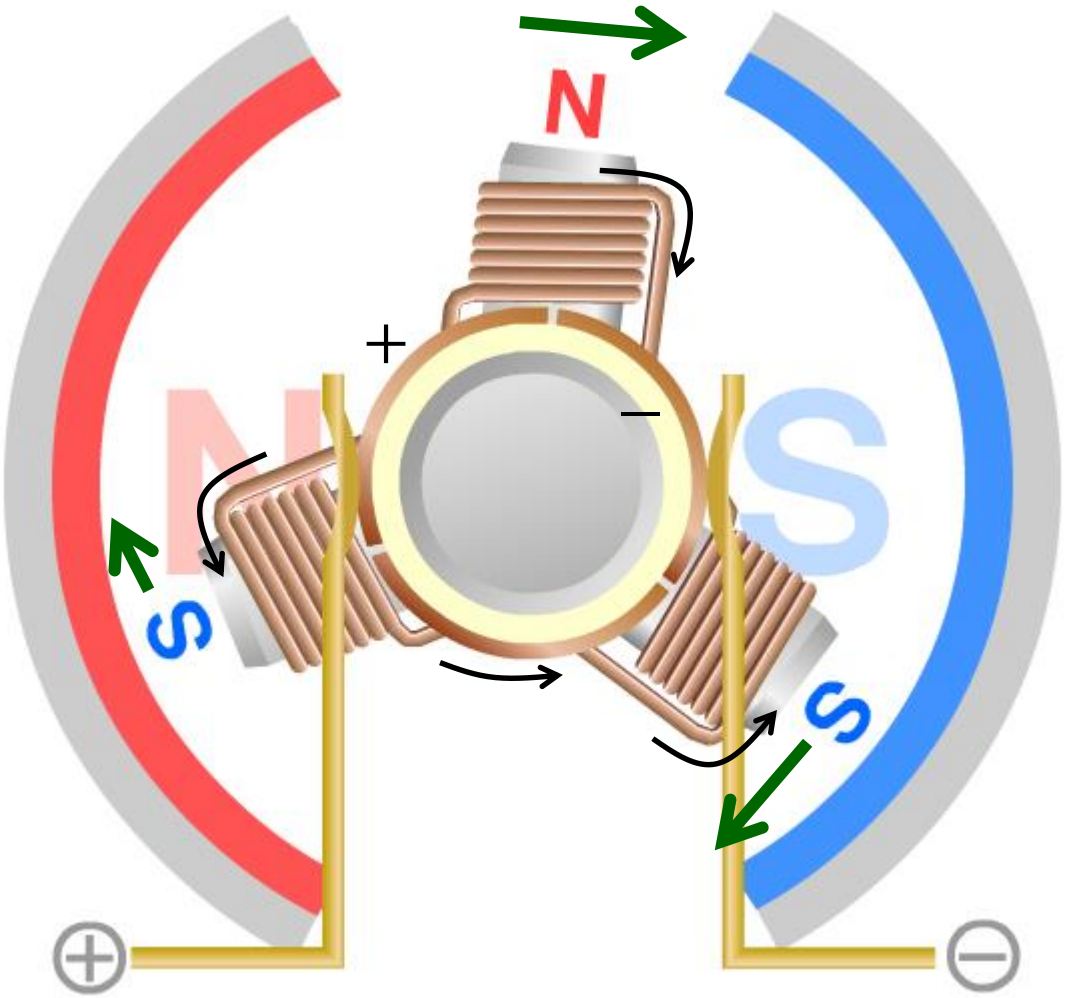
市販のモーターは、写真のように3極モーターです。

多重巻きの
鉄心入りの
コイルが3個

整流子（電極3個）

3極モーターのしくみ（参考）

③の１重空芯では、ほとんどパワーがないので、実際は鉄心入りの多重巻です。
③だと整流子の境目で電源を入れると回りませんが、3極だとスムーズに回転します

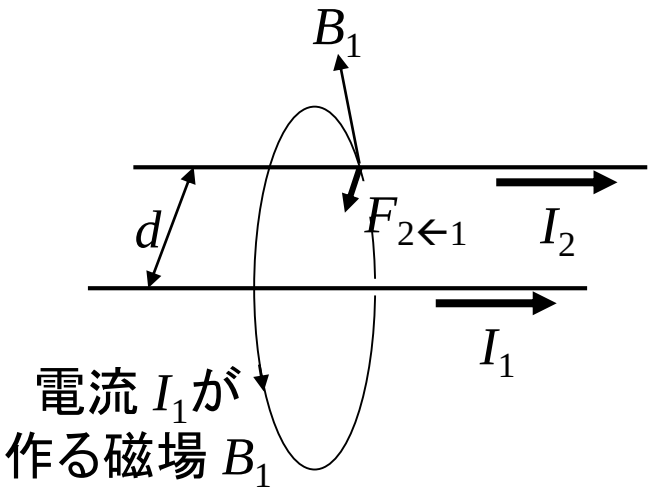


動画

PCでは動きます
スマホでは動かないかも
要Adobe flash player

https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~masako/exp/faraday/e2m-3.html

20.5 電流の間に働く力（p255）



電流 I_1 が作る磁場： $B_1 = \dfrac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$

磁場中の長さ L 電流に働く力
$F = IBL$（I と B が垂直な場合）

電流 I_2 の長さ L の部分が受ける磁気力 $F_{2\leftarrow1}$ は

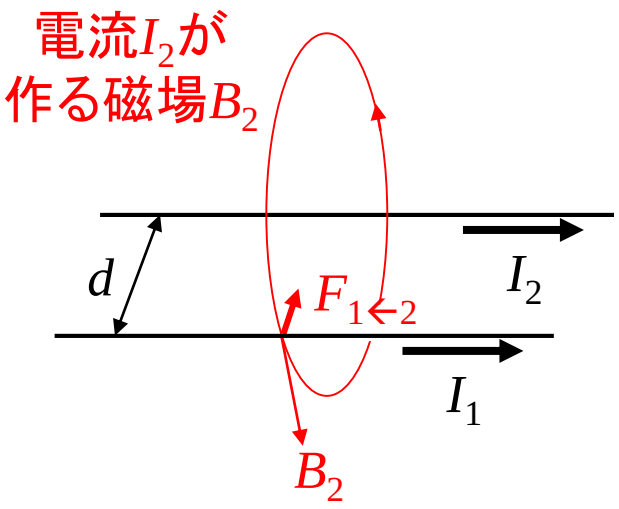
$$F_{2\leftarrow1} = I_2 L B_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d}$$

長さ L の平行な直線電流の間に働く磁気力

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d}$$

電流の方向が同じ：引力
電流の方向が逆　：反発力

問題：⑥ にならって電流 I_2 のつくる磁場 B_2 を図に書き込み、電流 I_1 が受ける磁気力 $F_{1\leftarrow 2}$ も図に書け。 ⑦



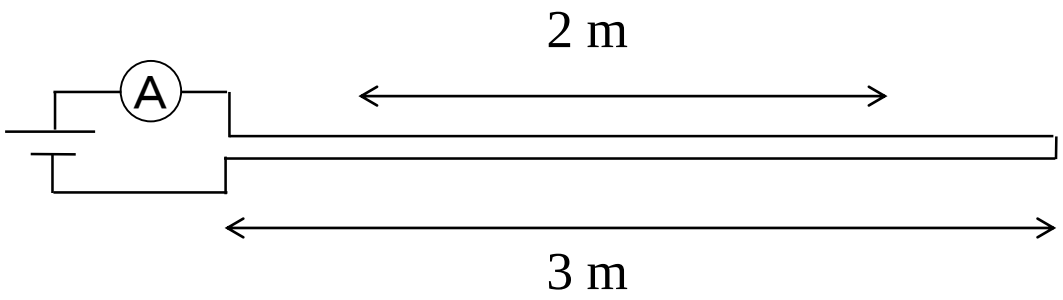
電流 I_2 が作る磁場： $B_2 = \dfrac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$

電流 I_1 の長さ L の部分が受ける磁気力 $F_{1\leftarrow 2}$ は

$$F_{1\leftarrow 2} = I_1 L B_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d}$$

問題：電流 I_1 と I_2 が逆向きの場合反発力となることを確かめよ。

問題：下の図のように、導線の間隔が 1 cm 、長さが 3 mで流れる電流が互いに逆で 5 A の場合、その中央付近の片方の導線 2 m 分に働く力の大きさを求めよ。引力か反発力かも答えよ。導線の間隔は狭いので、導線は十分に長いとしてよい。 ⑧



$$\frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d} \qquad \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 5 \times 5 \times 2}{2\pi \times 0.01} = 1 \times 10^{-3}\ \mathrm{N} = 0.1\ \text{グラム重}$$

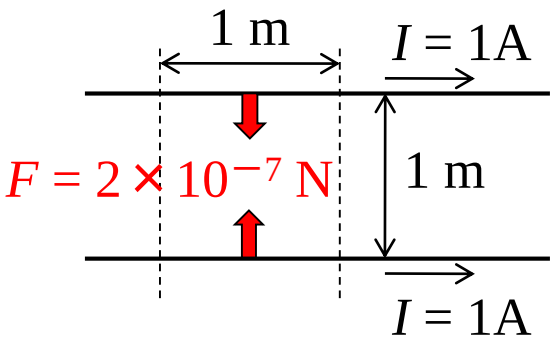
反発力

乾電池をショートさせると、問題と同程度の電流が流れる。

電流の単位アンペア[A]の定義

真空中で1 m 離して置いた，強さの等しい電流の流れている
無限に長い平行な導線の間に働く力の強さが
1 m あたり 2×10^{-7} N であるような電流が 1 A

N, m といったMKS単位系を用いた力学的な内容で A を定義



$F = \dfrac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d}$ に上の条件を代入

$$2\times10^{-7} = \frac{\mu_0 \times 1 \times 1 \times 1}{2\pi \times 1}$$

$$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$$

（磁気定数 μ_0 の値は、電流の定義式より正確に$4\pi\times10^{-7}$）

2019年5月20日より、新しい定義
電気素量 e を定義値、$1.602176634\times10^{-19}$ C
1 A = 1 C/s であるが、1 C を電気素量で定義

国際単位系（SI単位系、MKSA単位系）

長さ m , 質量 kg , 時間 s , 電流 A の4つを基本単位とする単位系

電磁気学で使う物理量は、この4つの組み合わせで、組立単位として決まる

テスラ

例：磁場 B の単位：　$\mathrm{T} = \mathrm{N}/(\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}) = \mathrm{kg}/(\mathrm{s}^2\cdot\mathrm{A})$

$F = IBL$,　$B = \dfrac{F}{IL}$　　$\mathrm{N} = \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}/\mathrm{s}^2$

問題：電気量、電荷の単位　クーロン C を組立単位で表せ

$$\Delta Q = I\Delta t$$

$$\mathrm{C} = \mathrm{A}\cdot\mathrm{s}$$

20.6 磁性体がある場合の磁場 p257

電子はスピンと呼ばれる自転(的)運動をしている。(円電流)

電子の磁気モーメント≒ $\mu_B = \dfrac{eh}{4\pi m} = 9.27\times10^{-24}\ [\mathrm{A\cdot m^2}]$ $\mu_m = IA$

実際の値 : 9.28×10^{-24}

(ボーア磁子)

e : 素電荷, h : プランク定数 $= 6.626\times10^{-34}\ [\mathrm{J\cdot s}]$, m : 電子の質量

電子のスピン(自転的運動)や、公転的運動によって原子も磁気モーメントを持つ。

微視的な電流

すべての物質は、磁場の中に置くと、強弱に差はあるが、
個々の原子の磁気モーメントが磁場の向きに、
あるいは、その逆向きに揃って磁化する。(磁石になる)

このように磁気的性質に着目するとき、物質を [磁性体] という。

対応 : 電気的性質に着目するとき、絶縁体を [誘電体] という。

磁化 $\boldsymbol{M}$

分極 $\boldsymbol{P}$

単位体積中の原子・分子の
電気双極子モーメントの和

$$\boldsymbol{P} = \Sigma\, \boldsymbol{p}_j$$

$\boldsymbol{p}_j$: j番目の原子・分子の
電気双極子モーメント

分極 $\boldsymbol{P}$ の誘電体の
分極に垂直な表面には面密度

$$\sigma_{\mathrm{p}} = \pm P$$

の分極電荷が現れる

磁化 $\boldsymbol{M}$

単位体積中の原子・分子の
磁気モーメントの和

$$\boldsymbol{M} = \Sigma\, \boldsymbol{\mu}_j$$

$\boldsymbol{\mu}_j$: j番目の原子・分子の
磁気モーメント

磁化 $\boldsymbol{M}$ の磁性体の
磁化に垂直な表面には面密度

$$\sigma_{\mathrm{m}} = \pm M$$

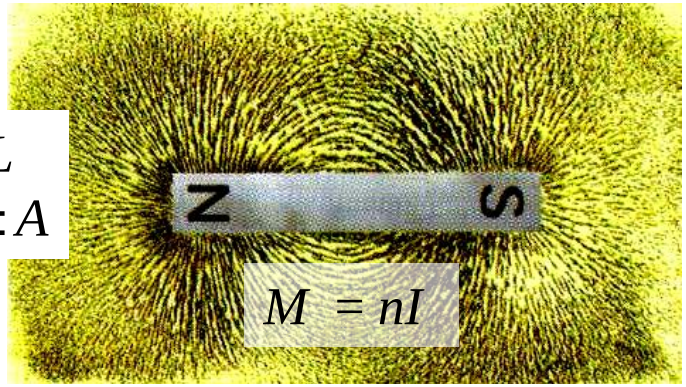
の磁荷が現れる

実際には磁荷は存在しないが、
そう考えてもよいということ。
円電流を磁気双極子と考えたことによる。

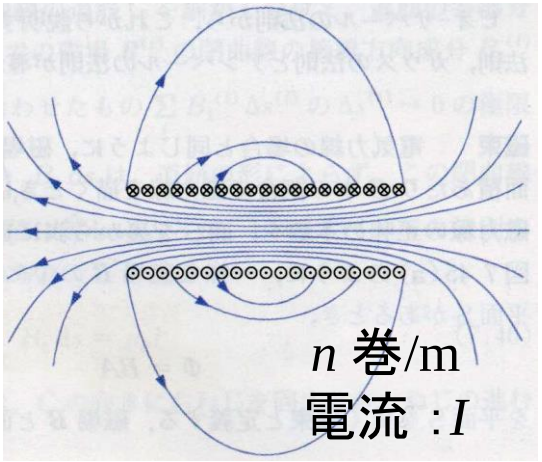
等価磁石

円柱状磁石

長さ：L
断面積：A



ソレノイド



長さ：L
断面積：A

磁気モーメントの総量

単位体積あたり M で、体積 AL だからMAL

1巻き AI でnL 巻きだから $nIAL$

$M = nI$ なら、同じ（等価）、内外の磁場 $\boldsymbol{B}$ も同じ

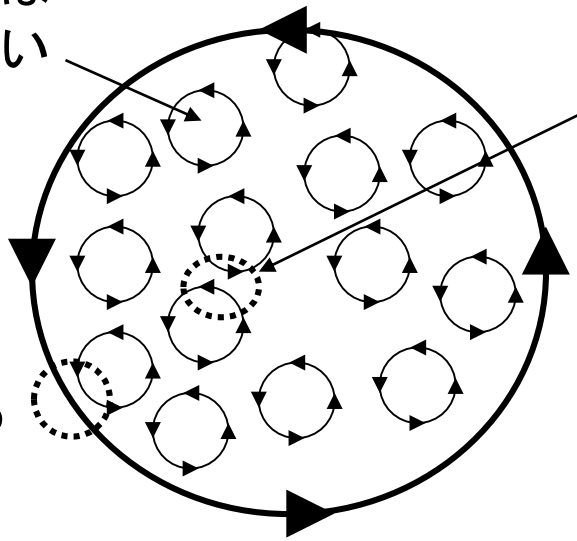
このとき、磁化 M の円柱状磁石と、単位長さあたりの電流が nI のソレノイドは等価

理由（詳細）は以下のスライド

磁化電流

磁化電流のイメージ

電子のスピン（自転的運動）や
公転的運動による微視的電流は
図のような円電流と考えてもよい



微視的電流の向きが
そろっている場合

内部の電流は打ち消しあう

表面の電流は残る

↓

磁化電流

電場中の誘電体も
表面以外の部分は
電荷が打ち消しあって
中性であるのと似ている。

磁化 M の磁性体中の微視的な電流の作る磁場
＝ 磁性体の側面を流れる巨視的な表面電流の作る磁場

この微視的電流と等価な巨視的な表面電流を **磁化電流** という。

円電流
の集まり
と考えると

小さな磁石
磁気双極子
の集まり
と考えると

①

磁
性
体

M

磁化 M の
円柱状磁石
小さな磁石の
集まり

②

表面電流密度
$J_m = M$ [A/m]

1 m

M [A]

円柱の表面の
単位長さあたりに
M [A]の電流
（磁化電流）が
流れている円柱

③

$\sigma_m = M$

$\sigma_m = -M$

上面と下面の
磁荷密度が
それぞれ M と
$-M$である円柱

面積 A

④

I

L

nL 巻き
全電流
nLI

I

$nI = M$ の
ソレノイド

$n \to \infty$（$I \to 0$）で、④→②

①～④の4つの円柱（底面積A、高さL）の外部のできる磁場はすべて等しい。

問題:①～④について、磁気モーメントの総量を計算せよ。ただし、$nI = M$ とする。 ⑯

①: 単位体積あたりM, 体積はALなので、MAL

②: 単位長さあたり電流 M [A/m], L [m]で総電流は ML [A]
磁気モーメントは AI なので AML
（単位長さあたりの磁荷電流 $J_{\mathrm{m}} = M$ ）

③: 磁荷は単位面積あたり M で面積A なので MA ,
間隔が L なので MAL
（ 単位面積あたりの磁荷（磁荷の面密度）$\sigma_{\mathrm{m}} = \pm M$ ）

④: 1巻きの磁気モーメントがAIで、
nL巻きなので$AInL$。$nI = M$ なら MAL

磁場 $\boldsymbol{H}$（磁場の強さ $\boldsymbol{H}$）（教科書 p257）

磁場$\boldsymbol{B}$（磁束密度$\boldsymbol{B}$）：すべての電流 I が作る磁場

電流 I = 伝導電流 I_0 + 磁化電流 I'

磁場$\boldsymbol{B}$ = 伝導電流 I_0 が作る磁場 $\boldsymbol{B}^{(c)}$ + 磁化電流I'が作る磁場 $\boldsymbol{B}^{(m)}$

（ビオ-サバールの法則にしたがって）

c: conduction
m: magnetization

磁場$\boldsymbol{B}$のアンペールの法則： $\oint_C B_t ds = \mu_0 I$ ← すべての電流が関与

↓

$I = I_0 + I'$

磁化電流は測定が難しく扱いにくいので、磁化電流が関与しない
磁場$\boldsymbol{H}$（磁場の強さ$\boldsymbol{H}$）を導入する。

磁場$\boldsymbol{H}$のアンペールの法則： $\oint_C H_t ds = I_0$ ← 伝導電流だけが関与

磁場 $\boldsymbol{H}$ と磁場 $\boldsymbol{B}$ の関係：$\boldsymbol{B} = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M})$

$\boldsymbol{H}$ と $\boldsymbol{M}$ は同じ次元，単位 [A/m]

磁性体の外（真空中）では：$\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H}$　　（$\boldsymbol{M} = 0$）

（定数倍の違いだけ）

電束密度 $\boldsymbol{D}$ との対応（復習も兼ねて）

電場$\boldsymbol{E}$：すべての電荷 Q が作る電場

電荷 Q = 自由電荷 Q_0 + 分極電荷 Q_{P}

電場のガウスの法則：$\iint_{\mathrm{S}} E_{\mathrm{n}}\,\mathrm{d}A = \dfrac{Q}{\varepsilon_0}$

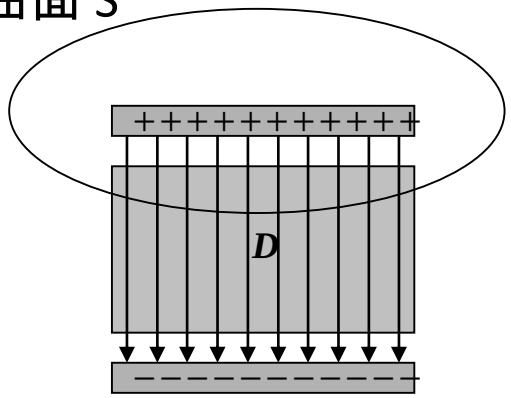
Q：閉曲面 S の内部の総電荷
（自由電荷 Q_0+分極電荷 Q_{p}）

自由電荷 Q_0 だけに関係した量、電束密度 $\boldsymbol{D}$ があると便利な場合がある。

このような量は電場 $\boldsymbol{E}$ と 分極 $\boldsymbol{P}$ を使って実現できる。 $\boldsymbol{D} = \varepsilon_0\boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$

真空中：$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0\boldsymbol{E}$

閉曲面 S



電束密度の法線方向成分

プサイ

$$\psi_{\mathrm{E}} = \iint_{\mathrm{S}} D_{\mathrm{n}}\,\mathrm{d}A = Q_0$$

閉曲面 S から出てくる電束
（電束線の数）

閉曲面 S の内部の
全自由電荷 Q_0