

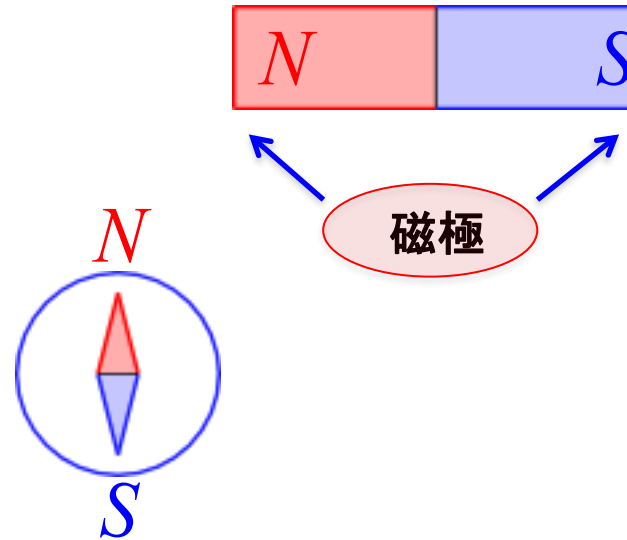
磁石と磁場

磁石：鉄を引きつける

最も強い部分を磁極

磁針

北を指す磁極を N 極(正極)
南を指す磁極を S 極(負極)

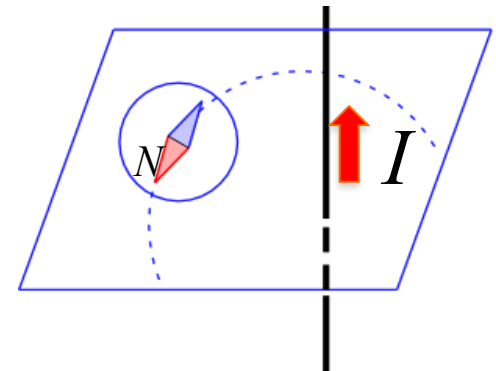


磁場

磁石や電流によって空間の状態が変化している場

例

電流が流れている導線の近くに方位磁針を置くと針が振れる



地球の磁場

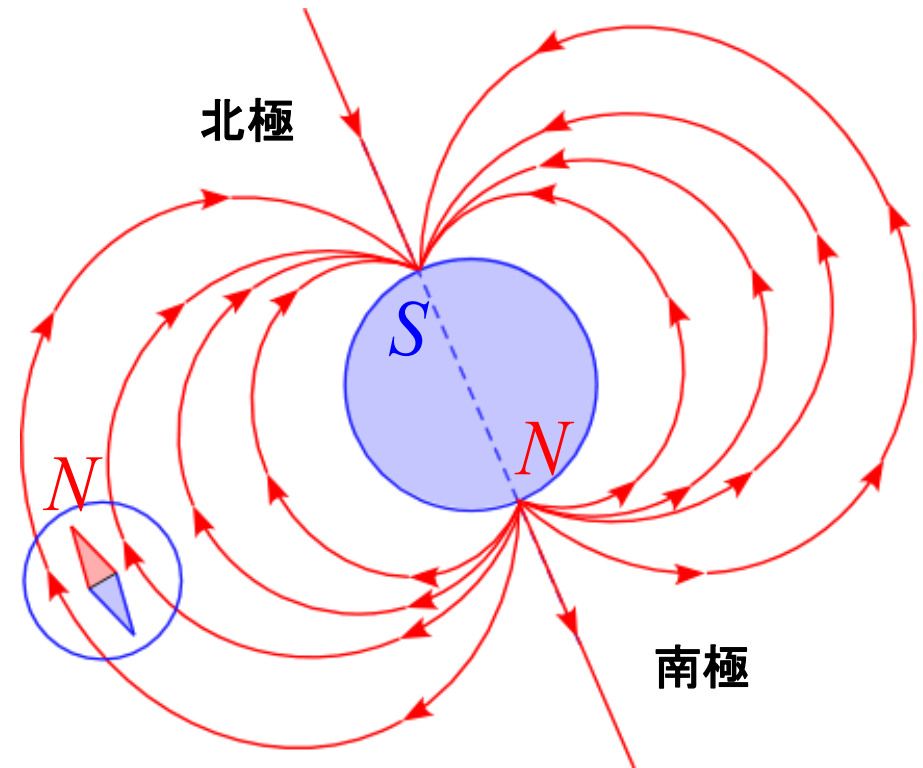
磁針が南北を向く



地球は大きな磁石

北を指す磁極を *N* 極
南を指す磁極を *S* 極

東京付近の地球の磁場
約 4.6×10^{-5} [T]



東京付近の地球の磁場

磁力線
N 極から出て *S* 極に向かう

磁石の正体

電荷の場合と異なり
これまでに単磁極は発見されていない

磁場を発生する「磁荷」は存在しない

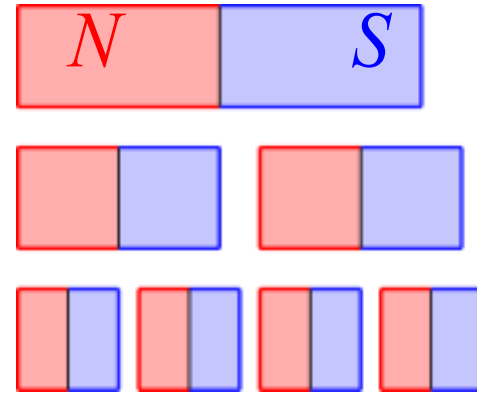
2つに分けると必ず
N極とS極に分かれる

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

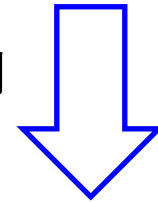
Maxwellの方程式
(磁場に関するガウスの法則)
閉曲面 S を通る磁束の総量は 0 である

原子核に束縛された
1個の電子が作るループ電流

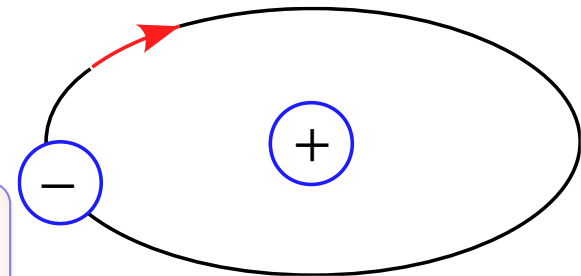
もっとも小さな磁石



原子単位に分割



原子レベルの円電流



古典電磁気学的近似

ローレンツ力

電場は静止電荷に力を及ぼす空間

静止した電荷 q に働く力 \vec{F}_E は

$$\vec{F}_E = q\vec{E}$$

と表せる

磁場(磁束密度)は動いている電荷に力を及ぼす空間

電荷を帯びている粒子が、電場 \vec{E} 、磁束密度 \vec{B} の中を速度 \vec{v} で運動するときに受ける力 \vec{F} は

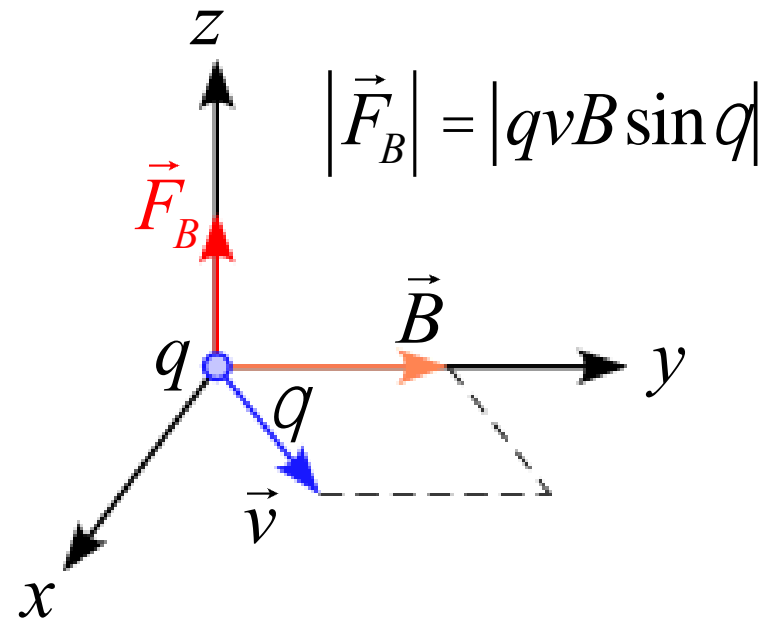
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$= q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B})$$

クーロン力

ローレンツ力

と表される

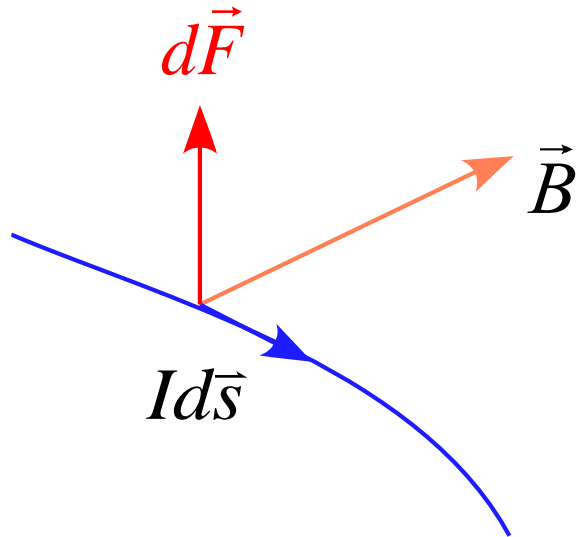


電流素片と磁場

磁石も含めて、全ての磁場は電流起源である

「電流素片が磁場から受ける力」

$$d\vec{F} = Id\vec{s} \times \vec{B}$$



導線全体が受ける力 = 導線に沿って線積分を行う

ローレンツ力

$$F_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

電流の最小単位

$$Id\vec{s}$$

磁場と磁力線

「磁場の強さ」を表す量 \vec{H} を導入する

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

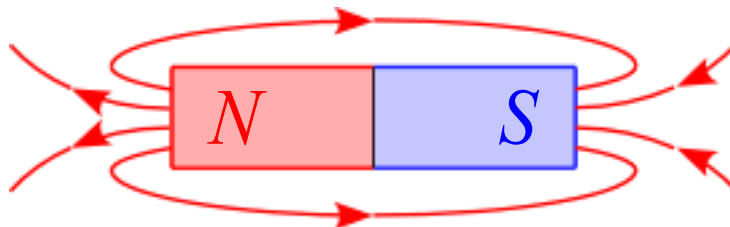
[T] = [N / A · m]
(テスラ)

真空透磁率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{T} \cdot \text{m/A}]$$

磁力線

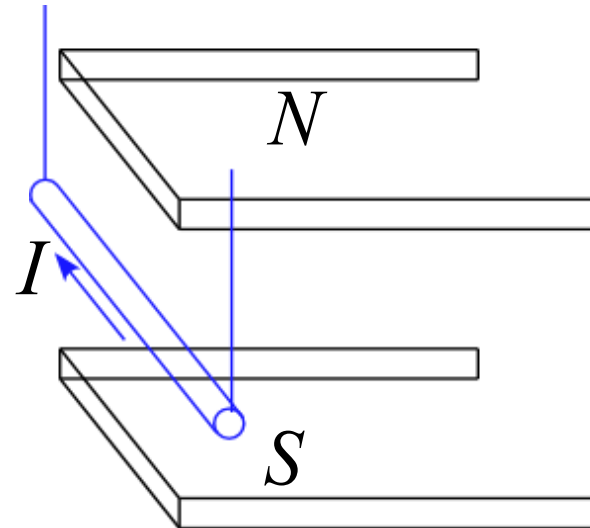
- ・ 磁力線の向きは磁場の向き
- ・ 磁石のまわりの磁力線は、N 極から出て S 極に向かう
- ・ 極から出入りする磁力線の本数は磁極の強さに比例する
- ・ 単位面積当たりの磁力線の本数は、その点で磁場の強さに比例する



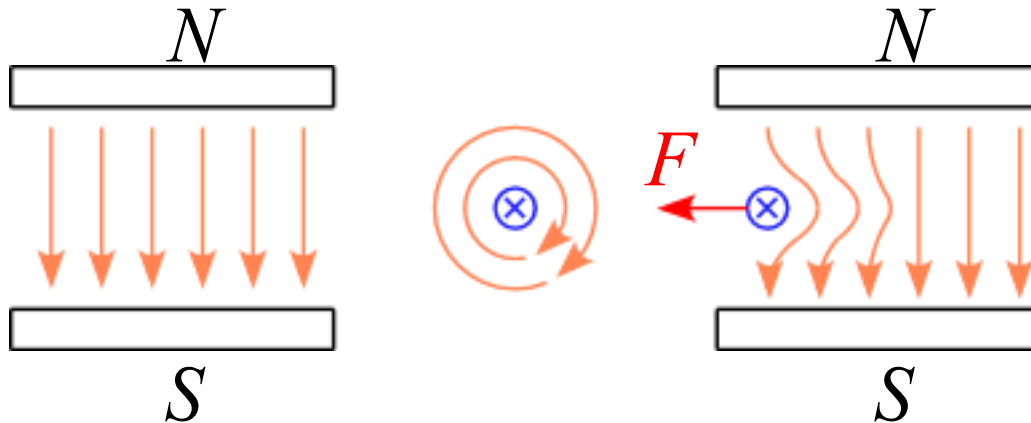
電流が磁場から受ける力

U字型磁石

磁石の間に導線をはさみ、
電流を流すと導線は力を受ける

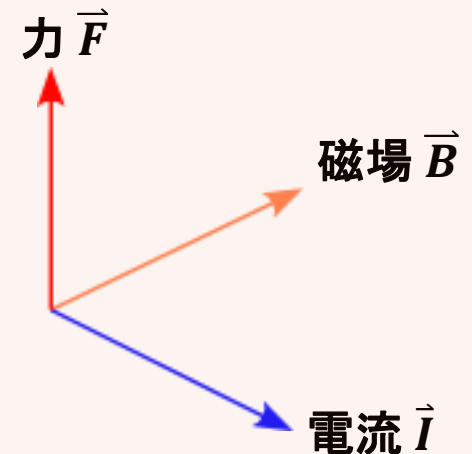


磁力線のひずみによるもの



この場合、導線は左向き
の力を受ける

フレミング左手の法則



ビオ-サバールの法則

電流素片が作る磁場

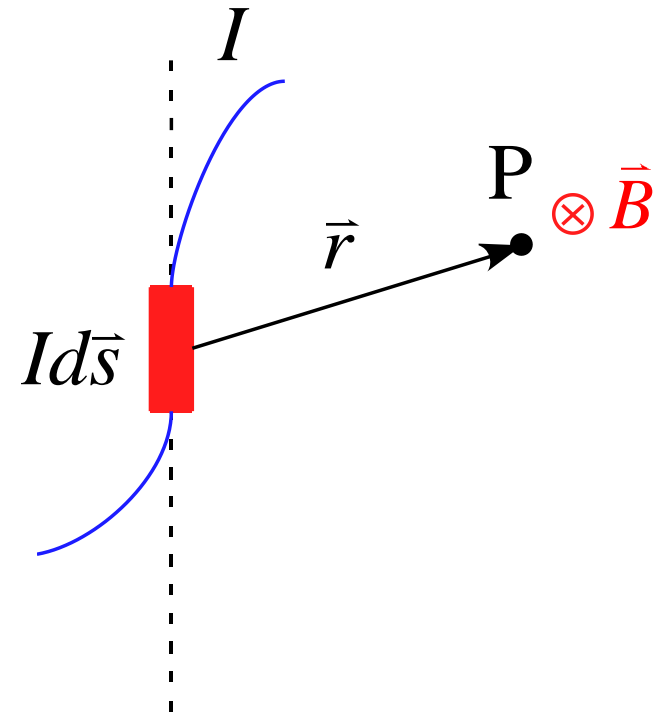
定常電流が流れる系において

電流素片 $I d\vec{s}$ が点Pに作る磁場 $d\vec{B}$ は

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \vec{r}}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

で表される。

単位ベクトル



アンペールの法則 (積分形)

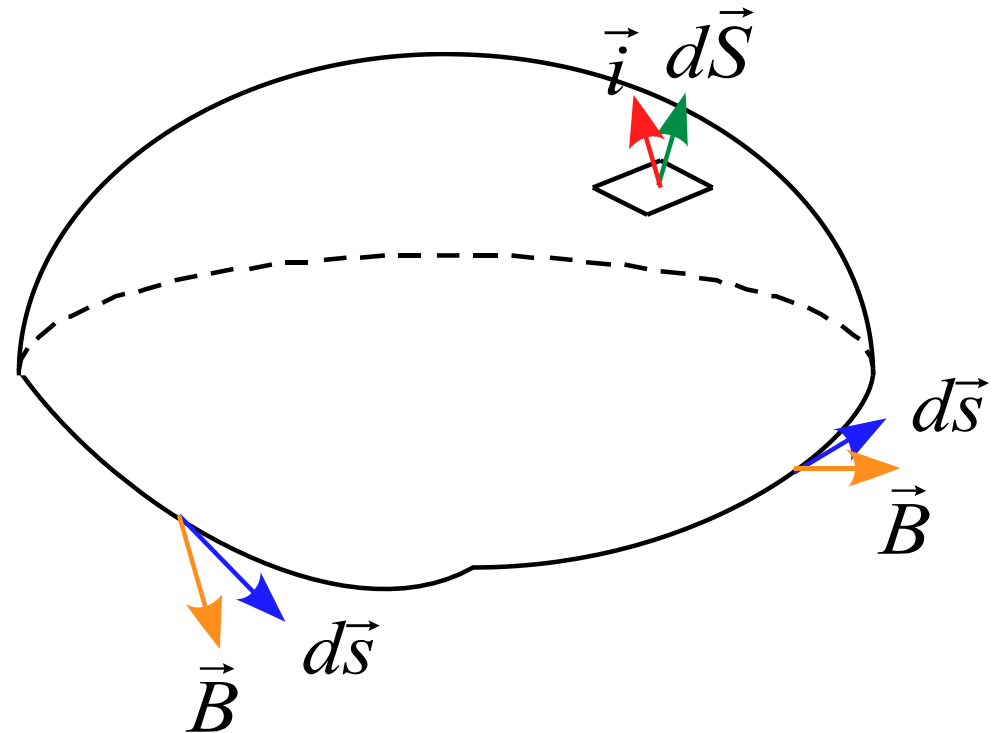
電荷が空間中を移動したとき磁場が発生する

電流が流れた

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_S \vec{i} \cdot d\vec{S} = \mu_0 I$$

線上を1周
線積分する

面を横切る
電流の合計



電流がつくる磁場

直線電流がつくる磁場

磁力線は電流を中心とする同心円

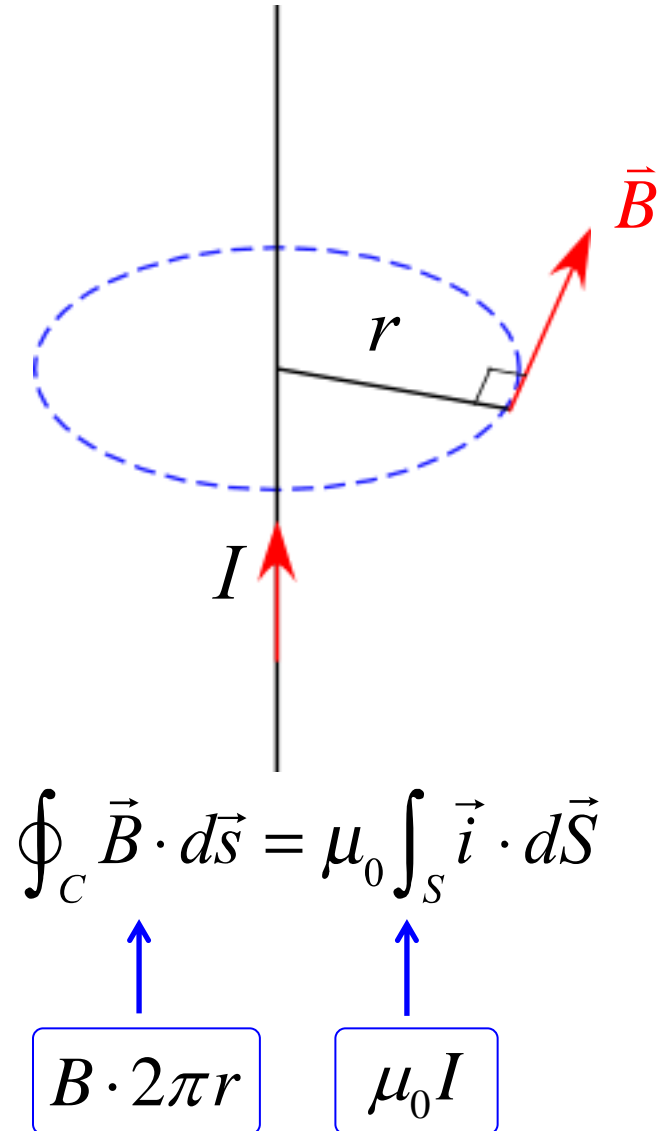
十分に長い直線導線が流れる電流 I が
つくる磁場 B は

電流の大きさ I に比例

導線からの距離 r に反比例

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [\text{T}]$$

磁場の向きは「右ねじの法則」に従う



電流がつくる磁場

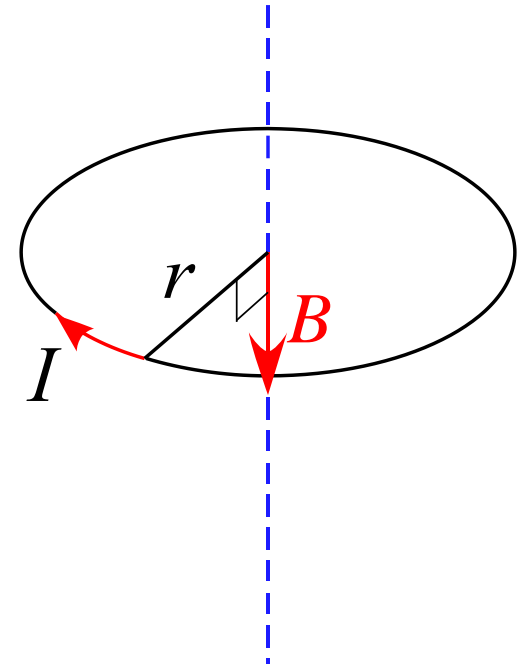
円形電流がつくる磁場

円形電流 I が
中心部につくる磁場 B は

電流の大きさ I に比例
半径 r に反比例

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \quad [\text{T}]$$

磁場の向きは「右ねじの法則」に従う



ビオ-サバルの法則

$$B = \int_C \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}$$

電流がつくる磁場

ソレノイドコイルがつくる磁場

内部の中心付近に一様な磁場ができる

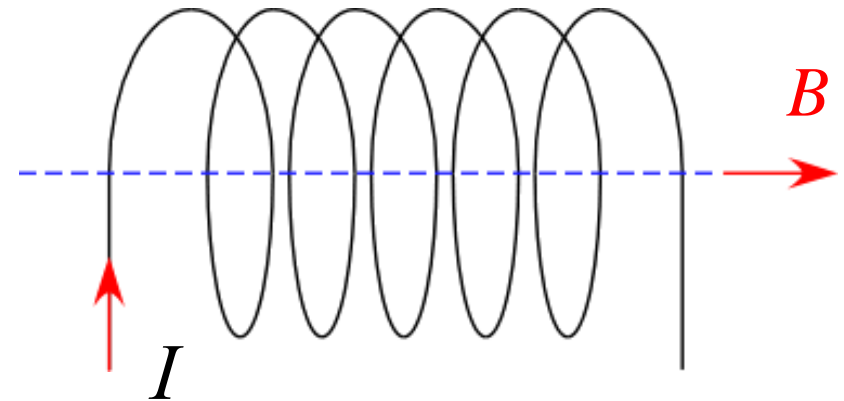
ソレノイドコイルに流れる電流 I が
つくる磁場 B は

電流の大きさ I に比例

$$B = \mu_0 n I \quad [\text{T}]$$

単位長さ当たりの巻き数 : n

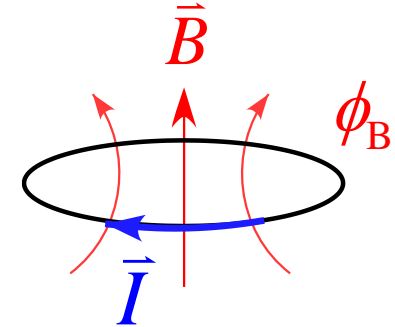
磁場の向きは「右ねじの法則」に従う



ファラデーの電磁誘導の法則

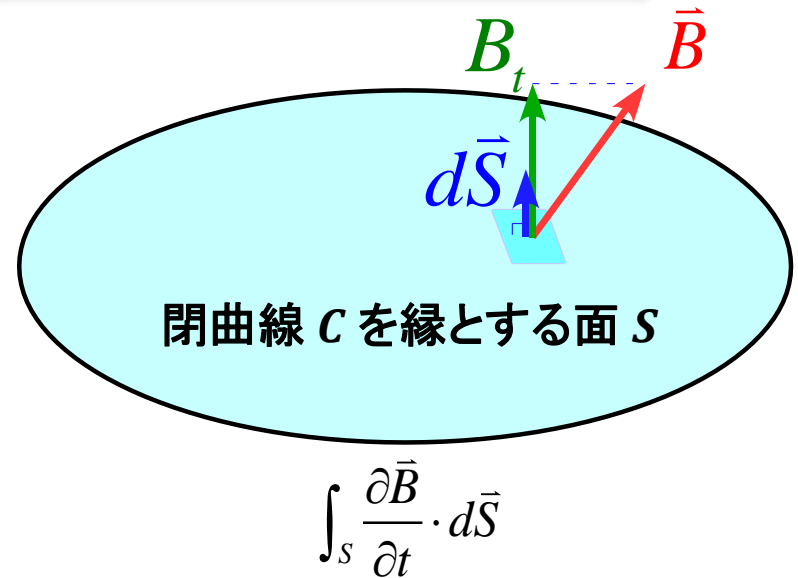
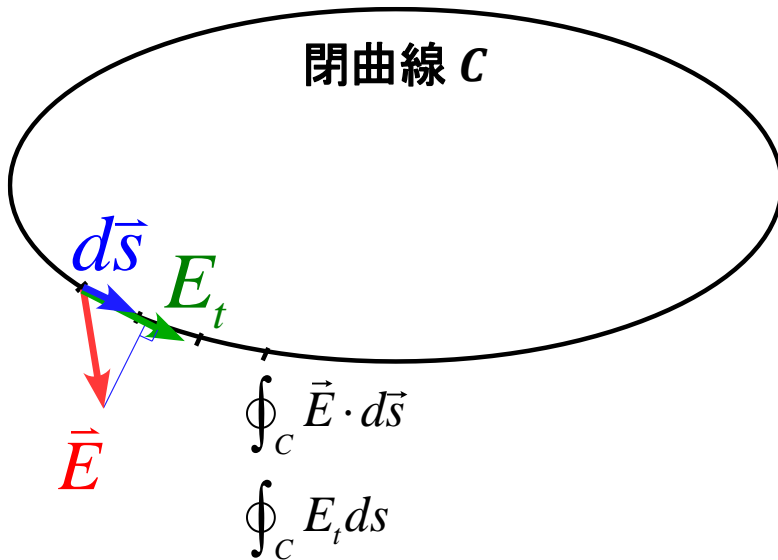
「磁場 \vec{B} が時間的に変化すると電場 \vec{E} が生じる」

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$



閉曲線 C に沿って電場 \vec{E} の
接線方向成分 E_t の線積分

閉曲線 C を縁とする面 S を貫く
磁束 ϕ_B の時間変化率 $\frac{d\phi_B}{dt}$



電磁気学の講義を終えて

取り扱った内容

- ・電荷とクーロンの法則
- ・電場 / 電位
- ・電気力線
- ・静電エネルギー
- ・ガウスの法則
- ・コンデンサー
- ・オームの法則
- ・キルヒホッフの法則
- ・回路方程式
- ・磁場
- ・ローレンツ力
- ・ビオ・サバールの法則
- ・アンペールの法則
- ・電磁誘導

取り扱っていない内容

- ・導体 / 絶縁体
- ・電気双極子
- ・電磁波

Maxwellの方程式 (積分形)

$$\int_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

$$\int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_s \left(\vec{i} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

$$\int_s \vec{i} \cdot d\vec{S} = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV$$

電荷の保存則