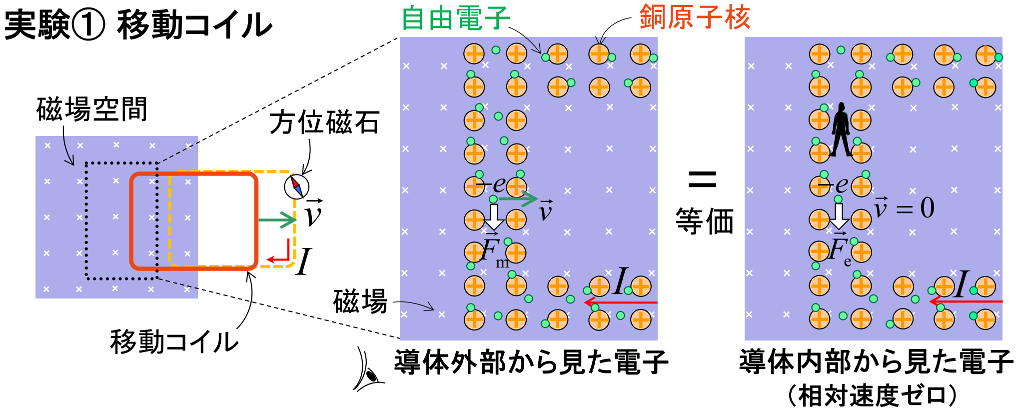
フレミング右手則

1st. 2011/04/01
Lst. 2021/11/01

フレミングの右手則

実験① 移動コイル



<u>原子核の立場から電子に働く力を見ると</u>、電界が上向きに生じているように見える。

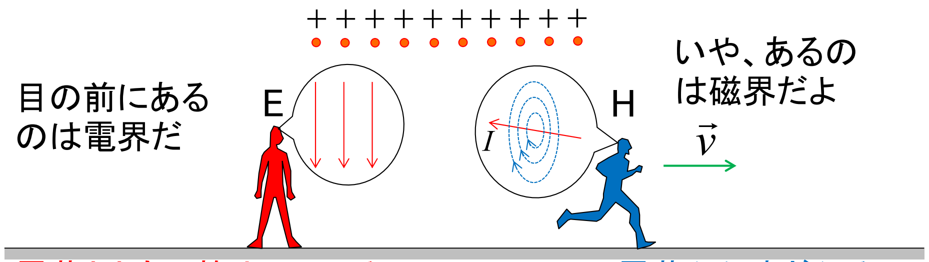
$$\begin{cases} \vec{F}_{\mathrm{m}} = -e\vec{v}\times\vec{B} \\ \vec{f}_{\mathrm{m}} = \dfrac{\vec{F}_{\mathrm{m}}}{-e} = \boxed{\vec{v}\times\vec{B}} \end{cases} \qquad \begin{cases} \vec{F}_{\mathrm{e}} = -e\vec{E} \\ \vec{f}_{\mathrm{e}} = \dfrac{\vec{F}_{e}}{-e} = \boxed{\vec{E}} \end{cases}$$

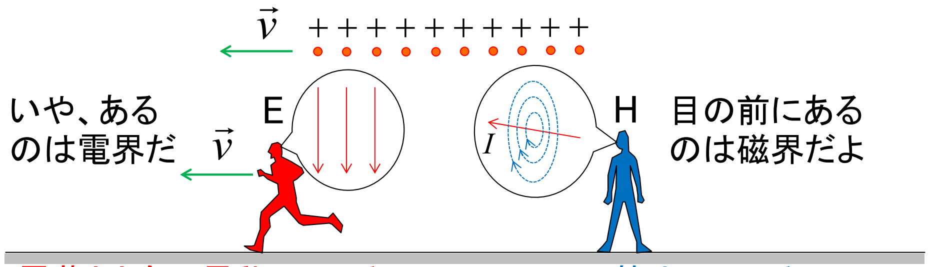
$$\mathrm{emf} = \oint_C \vec{f}_{\mathrm{m}} \bullet d\vec{l} = \oint_C (\vec{v}\times\vec{B}) \bullet d\vec{l} = \oint_C \vec{E} \bullet d\vec{l}$$

（electromotive force：起電力）

竹内，ゼロから学ぶ物理の1、2、3, p.170, 講談社　　狩野，市村，物理学入門 Ⅱ．電磁気学, p.184, 東京化学同人

どちらの意見が正しいか？





竹内，ゼロから学ぶ物理の1、2、3, p.171, 講談社 より引用

静止した＋同士の電荷は互いに反発しあう。しかし、同方向に運動している＋同士の電荷を静止している観察者が見ると、吸引力が働くように見える。

フレミングの右手則

電界ベクトル　　導体の速度ベクトル

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$$

外積記号　　外部磁場

単位系　[V/m] ＝ [m/s] × [Wb/m^2]

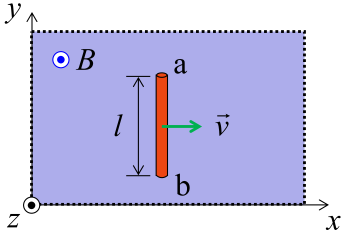
ローレンツ力の式を単位電荷にした場合と同じ。
フレミングの左手則を<u>電動機（モータ）の原理</u>と呼ぶのに対して、右手則を<u>発電機の原理</u>と呼ぶ。

速度起電力1（開いたループ）

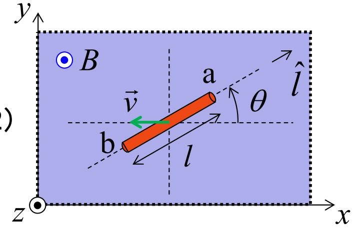
【演習】有限長さの直線導体棒が速度v [m/s]で動いているとき、起電力の大きさと方向を求めよ。ただし、ℓ=1 m, v=20 m/s, B=0.5 T, θ=30° である。

【解答】

（1）



（2）



（1） $\vec{E}=\vec{v}\times\vec{B}=v\hat{x}\times B\hat{z}=vB(-\hat{y})=20(0.5)(-\hat{y})=10(-\hat{y})\ \ [\mathrm{V/m}]$

$e=\int_C \vec{E}\bullet d\vec{l}=El=10\ \mathrm{V}$　　ただし、電圧はaからbに電流を流す向き

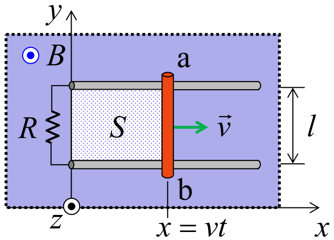
（2） $\vec{E}=\vec{v}\times\vec{B}=v(-\hat{x})\times B\hat{z}=vB\hat{y}=20(0.5)\hat{y}=10\hat{y}\ \ [\mathrm{V/m}]$

$e=\int_C \vec{E}\bullet d\vec{l}=\int_C E\hat{y}\bullet dl\hat{l}=\int_C Edl\cos(90^\circ-\theta)=\int_C Edl\sin\theta$

$=\int_0^l Edl\sin 30^\circ=\frac{1}{2}El=5\ \mathrm{V}$　ただし、電圧はbからaに電流を流す向き

速度起電力2（閉じたループ）

【演習】一様な磁束密度 B [T] の中で、間隔 ℓ [m]の平行導体棒上を直線導体片abが速度v [m/s] で運動している。ただし、ℓ=15 cm, B=0.4 T, v=2 m/s である。
(1) 平行導体の左端が R = 2Ω で終端されているとき、この回路に流れる電流の大きさと方向を求めよ。(2) この直線導体片abを一定速度 v=2 m/s で動かすために加えられる外部からの力を求めよ。(3) エネルギー変換関係について論ぜよ。（教科書、章末問題, p.122）



【解答】閉ループ内の磁束鎖交数は巻数N=1として

$\varphi=1\cdot\Phi=\int_S \vec{B}\bullet d\vec{s}=\int_S Bds=BS=Bvtl\ [\mathrm{Wb}]$

ファラデーの法則より　　　　閉ループの抵抗Rより

$e=-\frac{d\varphi}{dt}=-\frac{d(Bvtl)}{dt}=-Bvl,\qquad I=\frac{Bvl}{R}\,[\mathrm{A}]$

増える磁場を打ち消す方向なので、時計回りに電流を流す方向に起電力が発生する。
一方、導体片abに下向きの電流が流れているときの力は、フレミング左手則より

$\vec{F}=\vec{I}\times\vec{B}l=I(-\hat{y})\times B\hat{z}l=IBl(-\hat{y})\times\hat{z}=IBl(-\hat{x})$

$\vec{F}_{\mathrm{ext}}=\frac{B^2vl^2}{R}\hat{x}\ [\mathrm{N}],\quad W=\vec{F}\bullet\vec{v},$

この力を加え続けたとき、外部からする仕事と閉ループのジュール損失を比較すれば、エネルギー保存則が成り立っていることが分かる。

$P=\frac{e^2}{R}=\frac{B^2v^2l^2}{R}\ [\mathrm{W}]$

単極発電機

【演習】半径a [m] の導体円盤を一様な磁束密度B [T]が貫いている。円板が角速度ω[rad/s]で回転しているとき、回転軸と円周の間の電位差V [V]を求めよ。（教科書, p. 120, 例題8.2）

【解答】

フレミング右手則より

$\vec{E}=\vec{v}\times\vec{B}$　　(1)

半径rの位置の導体速度は

$\vec{v}=r\omega\hat{\varphi}$　　(2)

半径rの位置の速度起電力は

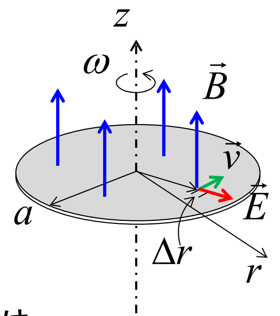
$\vec{E}=r\omega\hat{\varphi}\times B\hat{z}=r\omega B\hat{r}$　(3)

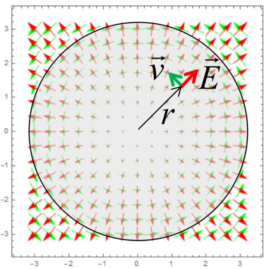
微小長さΔrの間に発生する電位差は

$\Delta V=-\vec{E}\bullet d\vec{l}=E\Delta r=r\omega B\Delta r$　　(4)

従って，回転軸の中心と外周の間に発生する電位差は

$V=\lim_{\Delta r\to 0}\sum r\omega B\Delta r=\int_0^a r\omega B\,dr=\frac{1}{2}\omega Ba^2\,[\mathrm{V}]$　　(5)



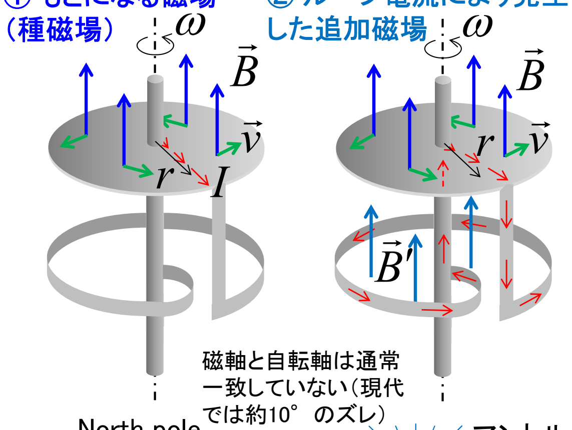


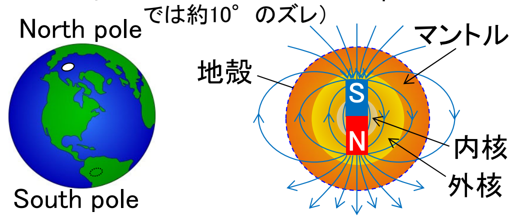
$\vec{E}=r\omega B\hat{r}$
$\vec{v}=r\omega\hat{\varphi}$　　(6)

前田, 電磁気学, p.125, 森北出版, 2009

地磁気とダイナモ（発電機）モデル

① もとになる磁場（種磁場）　② ループ電流により発生した追加磁場





Newton ``磁石の可能性,'' 2007年-11月号, p.42, ニュートンプレス, 2007　より引用

ダイナモ（発電機）モデル

「ダイナモ」という発電機の原理から、地球の地磁気を説明するモデル。鉄板が回転していて磁場を加えると、鉄板の内側から外側に電位差が生まれ、内から外に向かって電流が流れる。これを単極誘導と呼ぶ。この電流によって新たに磁場が発生し、電流はもとの磁場を強める方向に働くので、磁場を生み出し続けることができる。地球の内部では、外核に存在する液体の鉄がこのダイナモの部品を担っている。このモデルでは初期磁場が必要であるが、鉄などの流動性導体が動くと磁場が発生するという現象が実験的に知られており、それによって地磁気のもとの磁場が生み出されたと考えられている。

玄武洞やチバニアンのように、地球の磁極は過去に何回も反転した記録がある。将来、今の南極が北極になるときが確実にくることは分かっている。（松山基範が地磁気の反転説を1929年に世界で初めて提唱）

Newton ``宇宙を支配する数式,'' 2018年-7月号, pp.64-76, ニュートンプレス, 2018