時間的に変化する場

情報物理学A

No. 5

時間的に変動する場

時間的に変化する場

→　電磁場の<u>力学</u>

磁場の時間変化　→　電場

・・・電磁誘導

電場の時間変化　→　磁場

・・・変位電流

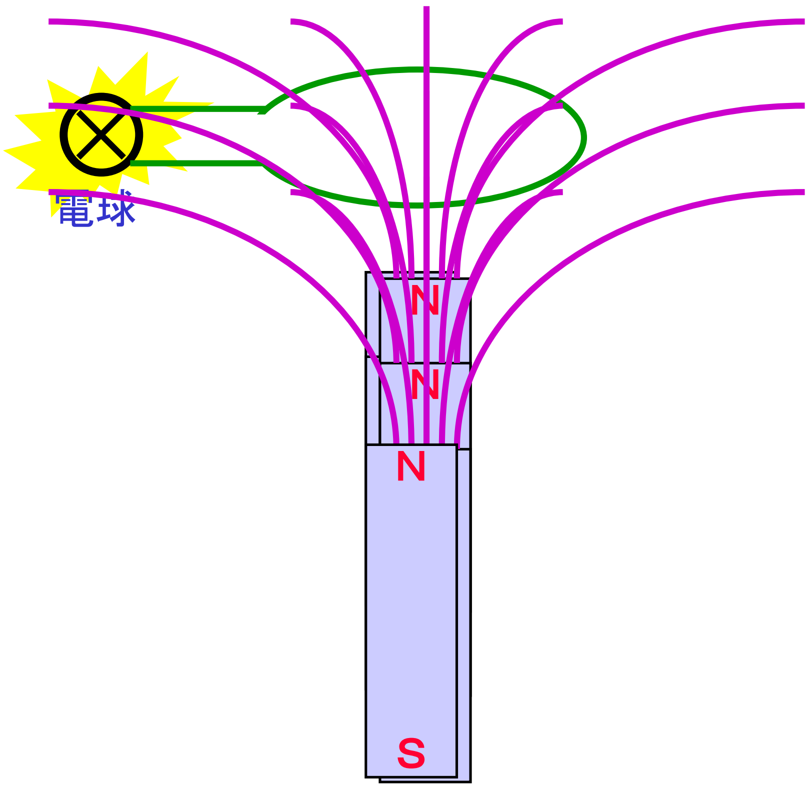
電磁場
という
統一概念

電磁誘導

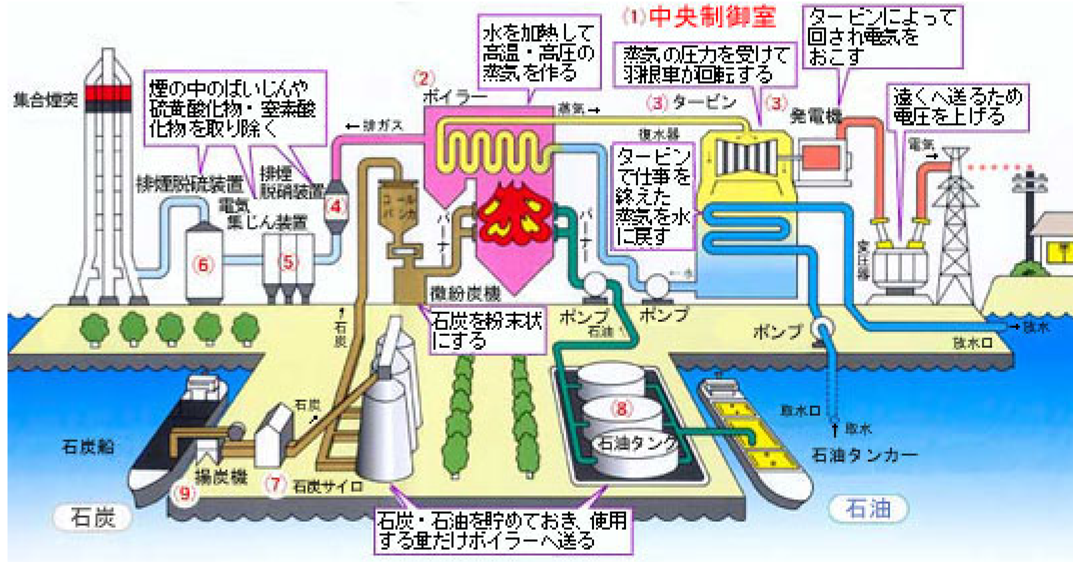
導線の輪の近くで磁石を動かすと

導線に起電力が生じる。

導線の輪を通る磁力線の数が変化するから

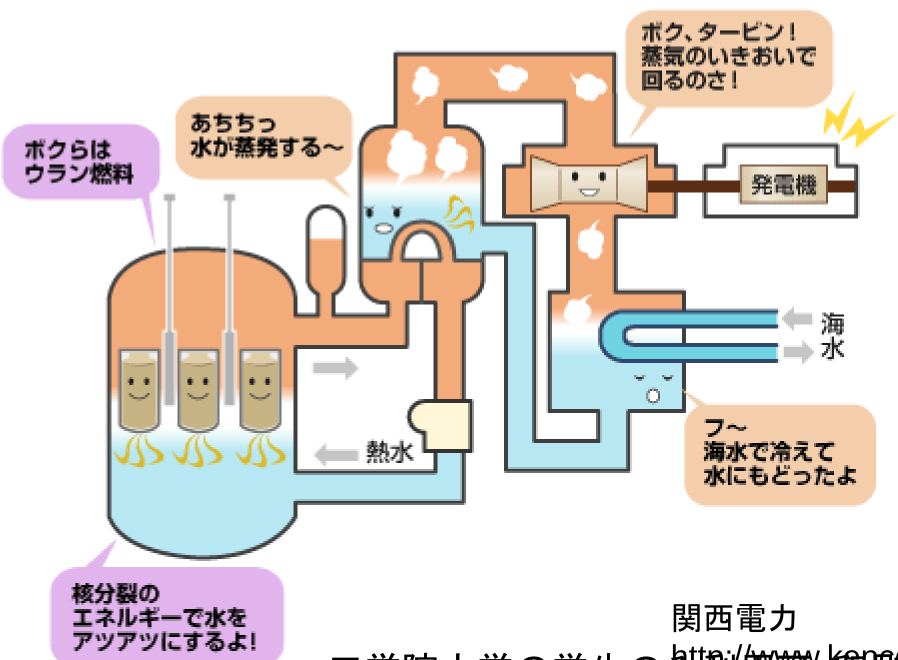


火力



四国電力
http://www.yonden.co.jp/energy/p_station/thermal/page_02.html

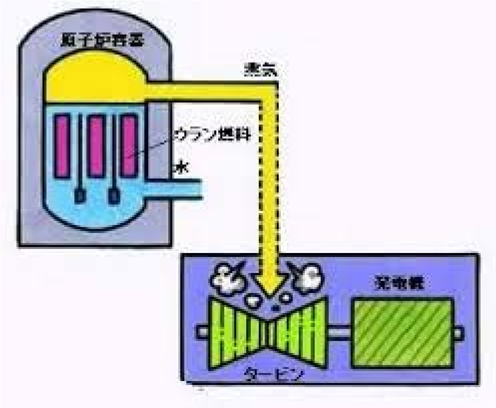
原子力



関西電力
http://www.kepco.co.jp/bestmix/contents/15.html

タービン

写真



発電機

写真

写真

電磁誘導

磁場の時間的変化→電場

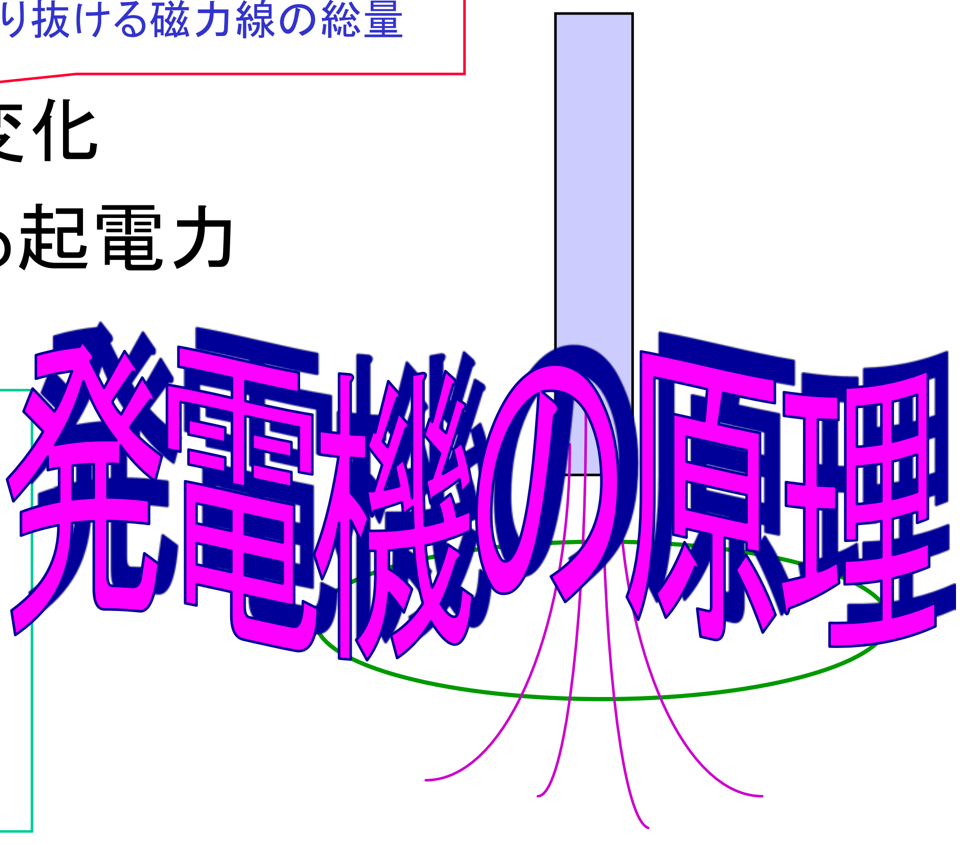
$$\Phi = B \cdot S$$

回路を通り抜ける磁力線の総量

回路を通る磁束の時間変化

＝　回路に生じる起電力

$$\boxed{\frac{d\Phi}{dt} = -V}$$



ファラデーの法則

磁束 $=\Phi = B \cdot S$

精密化　　回路 $\rightarrow$ 閉曲線 C

$$\sum \frac{dB_n}{dt} \Delta S = -\sum E_t \Delta s$$

Maxwellの方程式の1つ

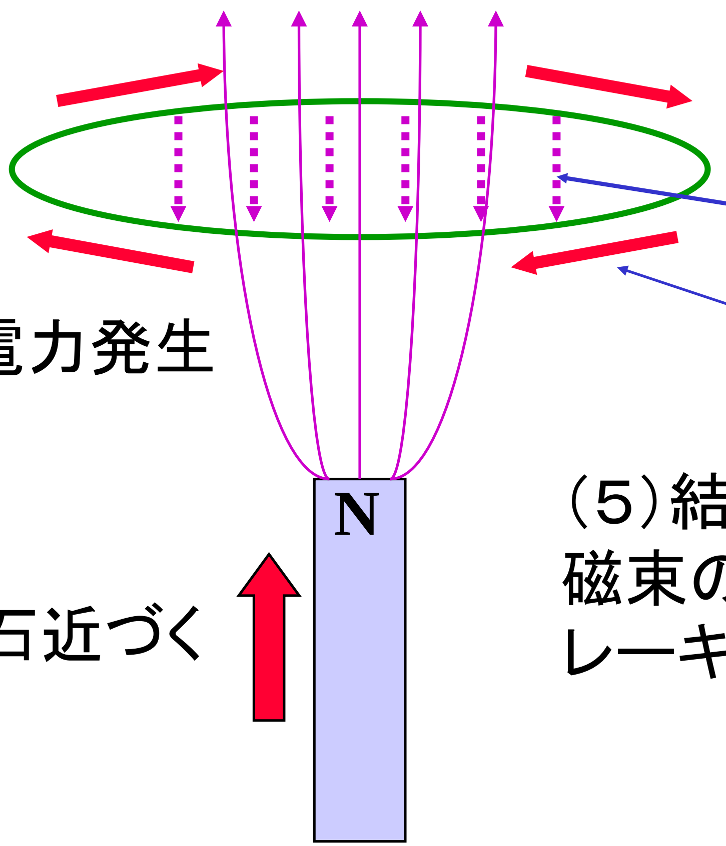
レンツの法則

マイナス符号の意味

- 外部磁場の変動
- 誘導電流の発生
- 誘導電流⇒磁場
- この二次磁場は元の磁場の変化を妨げる向きに生じる

$$\frac{d\Phi}{dt} = -V$$

レンツの法則



(1)磁石近づく

(2)磁束増える

(3)起電力発生

(4)起電力が作る
電流が磁場を作る

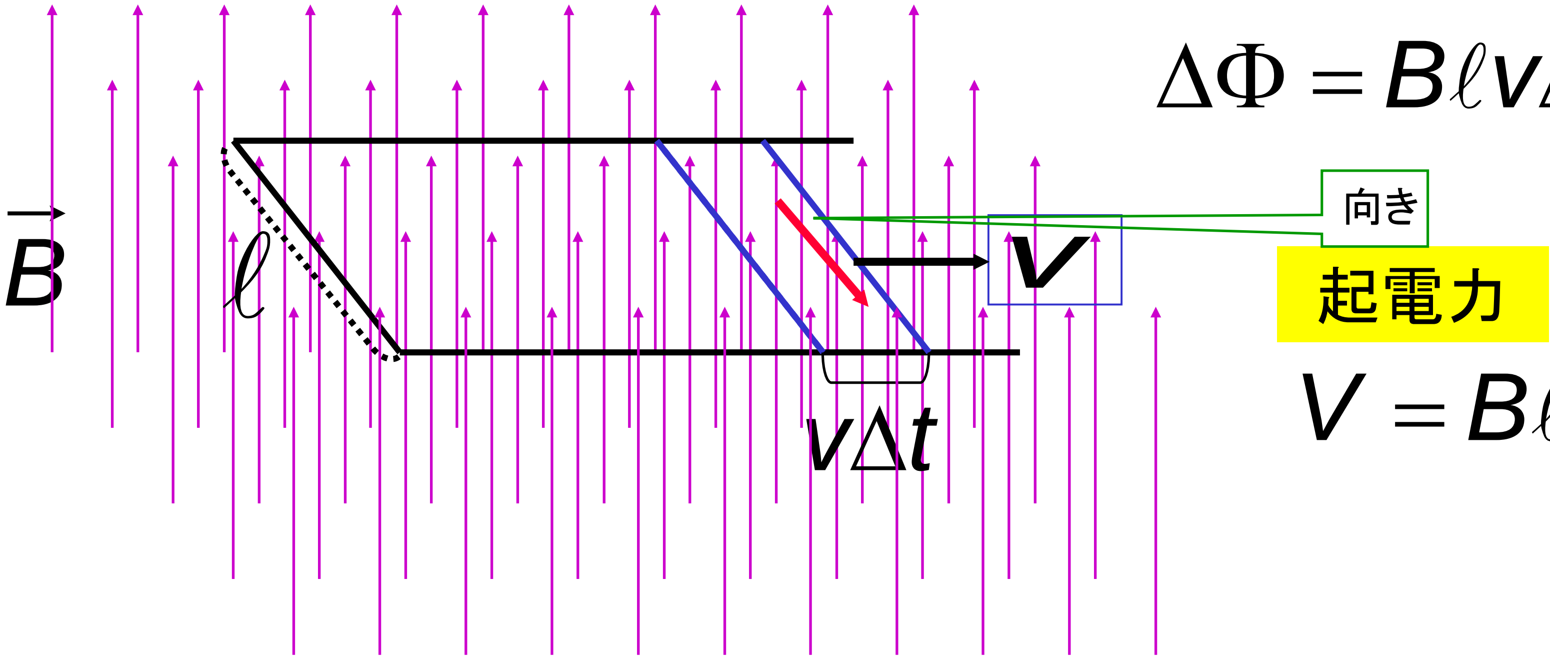
反時計周りが正
時計回りの起電力

(5)結果として
磁束の増加にブレーキがかかる

$$\frac{d\Phi}{dt} = -V$$

電磁誘導:別の視点から

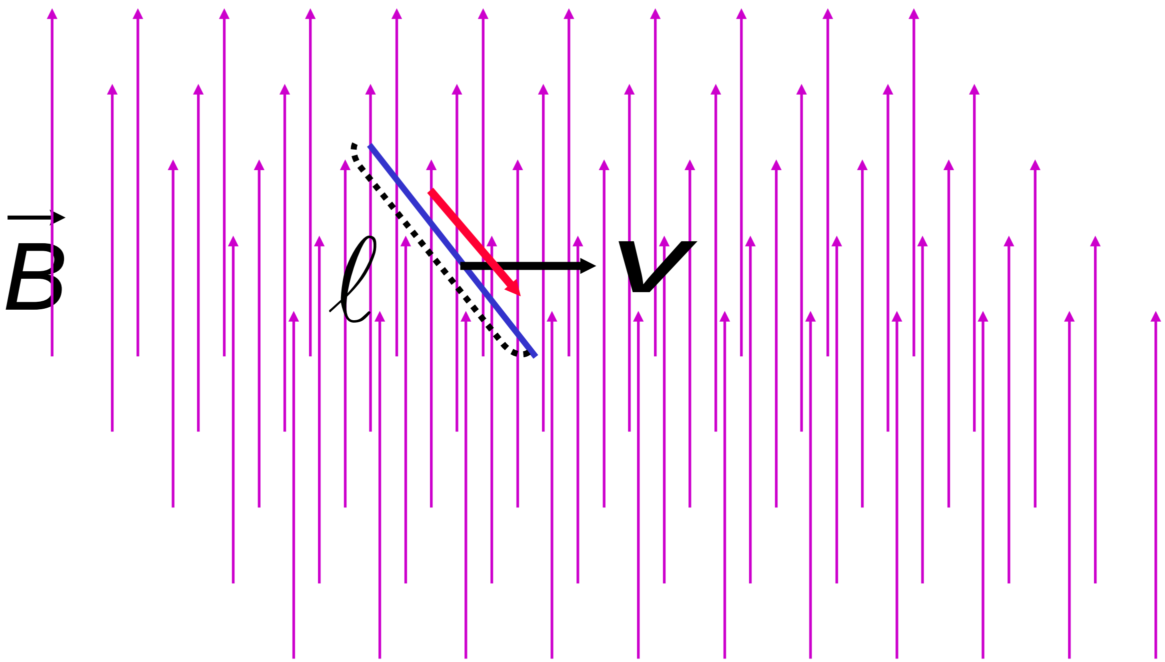
コの字の形の導体とそれに沿って早さvで動く導体棒



$$\Delta\Phi = B\ell v\Delta t$$

$$V = B\ell v$$

動く棒が磁力線を「切った」分だけΦが増える



起電力

$$V = B\ell v$$

棒のなかに
生じる「電場」

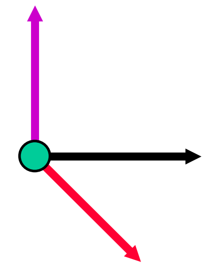
$$E = \frac{V}{\ell} = Bv$$

導体の棒だけが運動していても，棒の両端に起電力が生じる

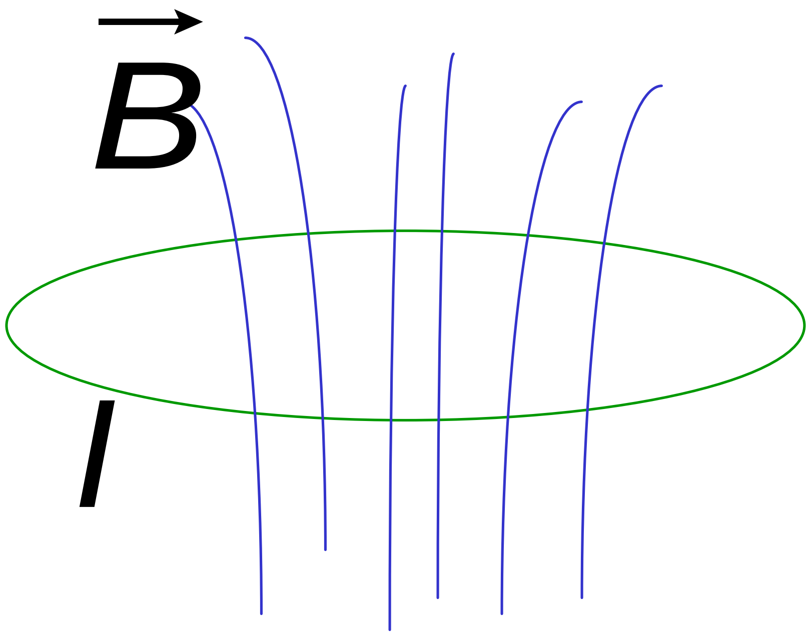
棒の中の電荷が感じる力

$$\boxed{F = qE}$$

$$F = qvB$$



自己インダクタンス



$$\Phi = B \cdot S$$

電流⇒磁場⇒磁束

磁束は電流に比例

$$\Phi = L \cdot I$$

自己インダクタンス
[H]（ヘンリー）

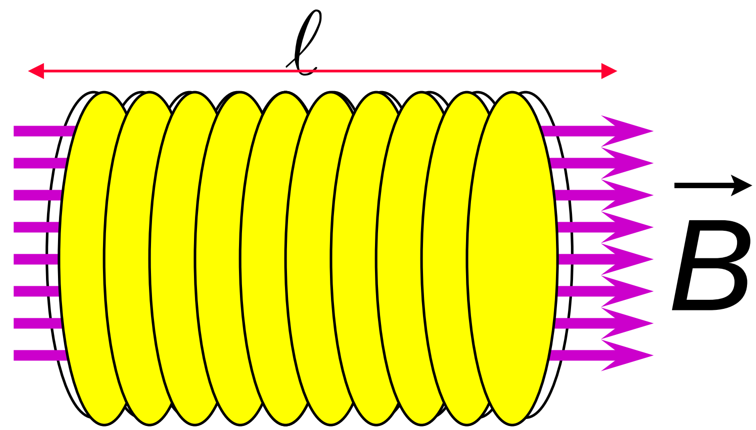
例）ソレノイドの場合

アンペールの法則から
（n＝巻数／長さ）

$$H = nI$$

$$B = \mu_0 H$$

$$\Phi = BS$$



コイルを磁場が通り抜ける回数

$$\Phi = \mu_0 nI \cdot S \cdot n\ell$$

$$\Rightarrow \quad L = \mu_0 n^2 S\ell$$

コイルに電流を流すのに要する仕事

$\Phi = L \cdot I$ ・・・これを時間で微分

$$\frac{d\Phi}{dt} = -V = L\frac{dI}{dt}$$

ファラデーの法則

電磁誘導の起電力を打ち消す電位差を与えて電流を流す

電流の仕事率

$$P = \frac{dW}{dt} = VI$$

$$W = \int VI dt = \int L\frac{dI}{dt} I\, dt$$

$$= \int_0^I LI\, dI$$

$$\boxed{W = \frac{1}{2}LI^2}$$

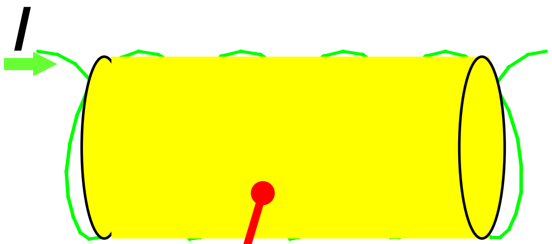
このエネルギーは
どこに貯えられるか？

磁場のエネルギー

ソレノイドの式を使う

$$H = nI,\ L = \mu_0 n^2 S\ell$$

$$W = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 S\ell\left(\frac{H}{n}\right)^2$$



$$W = \frac{1}{2}\mu_0 H^2 \cdot S\ell$$

磁場の存在する
空間の体積

磁場のエネルギー

磁場のある空間には「もの」はないが、エネルギーが貯えられている。
→　場の実在性の１つの例

磁場のエネルギー密度

$$\text{エネルギー密度} = \frac{\text{エネルギー量}}{\text{体積}} \quad \frac{\text{エネルギー}}{\text{体積}}$$

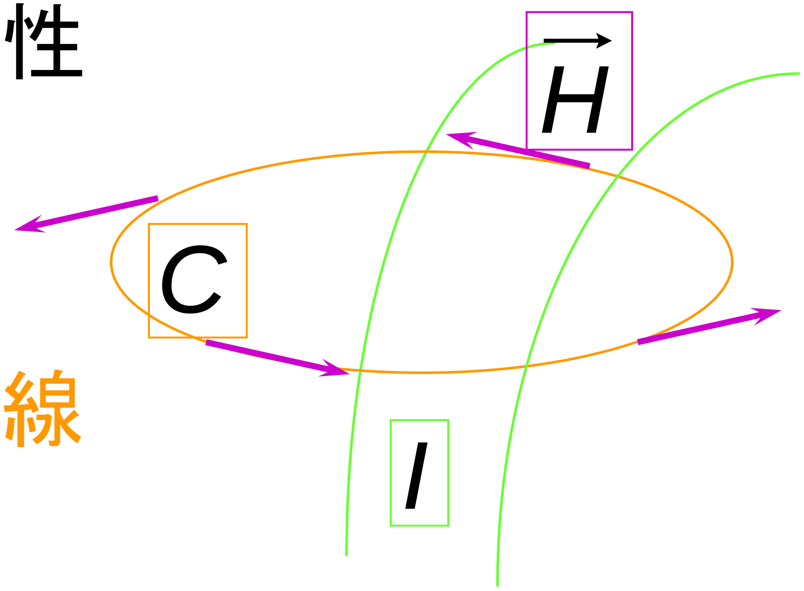
$$\frac{1}{2}\mu_0 H^2$$

変位電流

電場の時間的変化→磁場

アンペールの法則は「法則」か？

法則・・・客観性・一意性



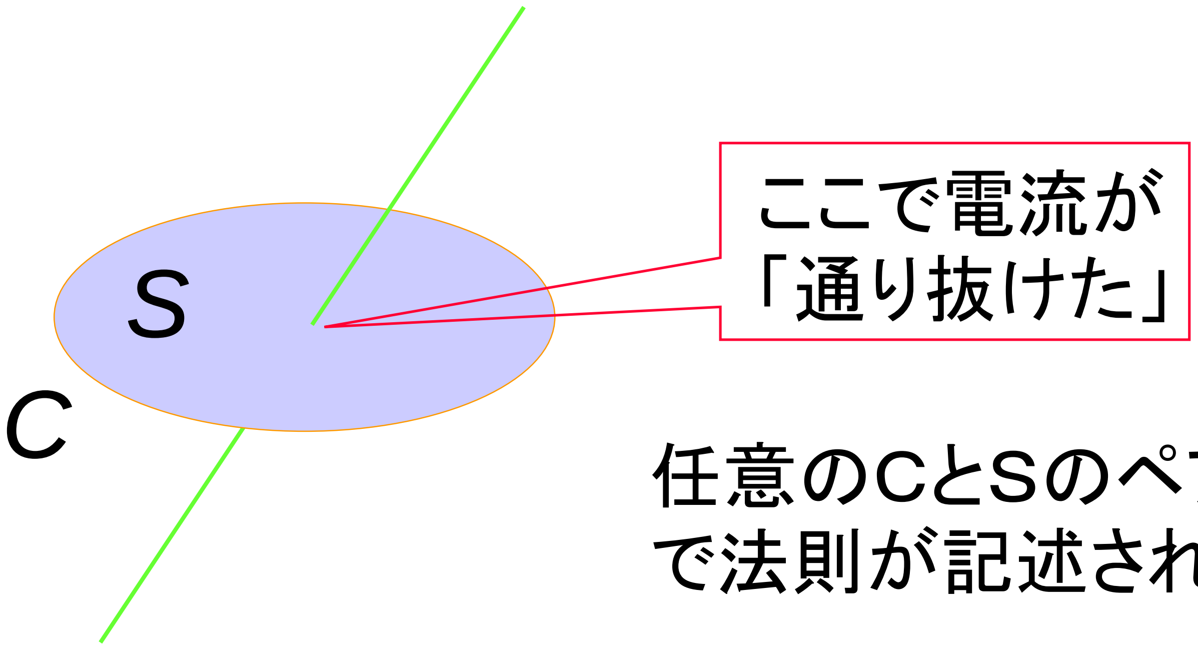
内容：　空間内の閉曲線

曲線に沿った磁場と

曲線を通りぬける電流の関係

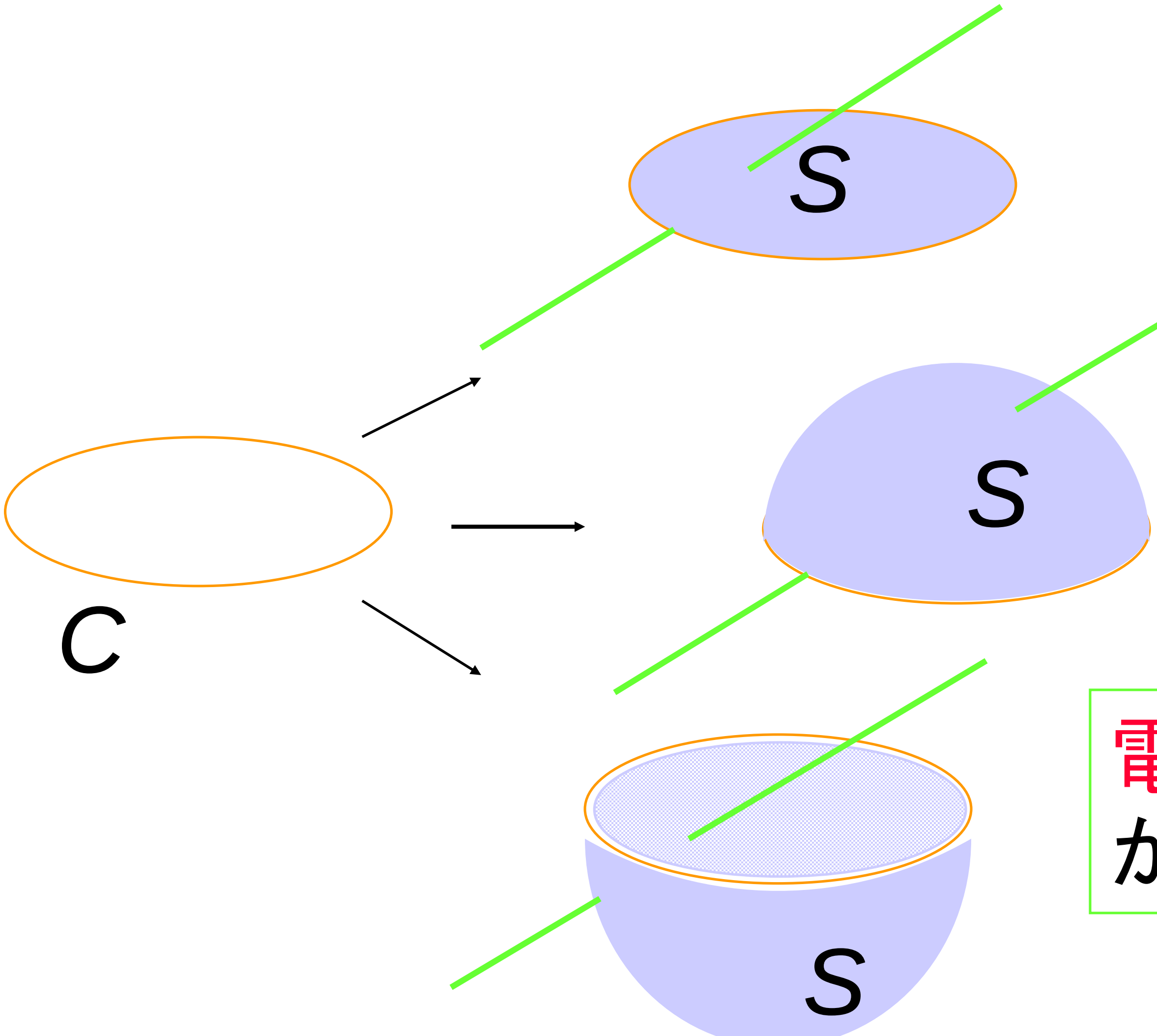
「閉曲線Cを通り抜ける電流」の意味？

⇒「閉曲線Cが作る曲面Sを通り抜ける電流」と考える



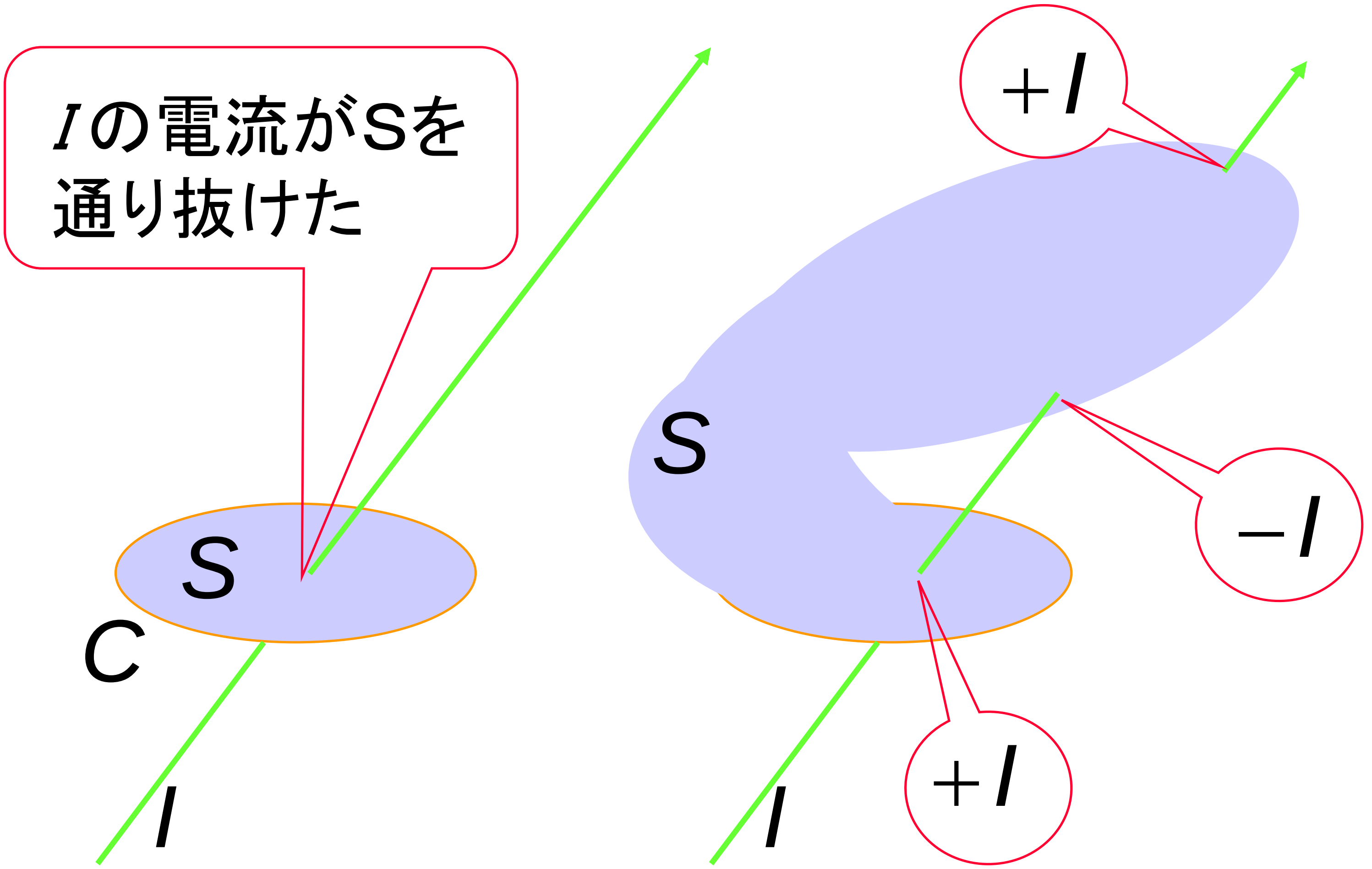
任意のCとSのペアで法則が記述される

閉曲線Cが作る曲面Sは一意には決まらない



「面を通り抜ける電流」は一意的に決まる

電流の連続性があるため

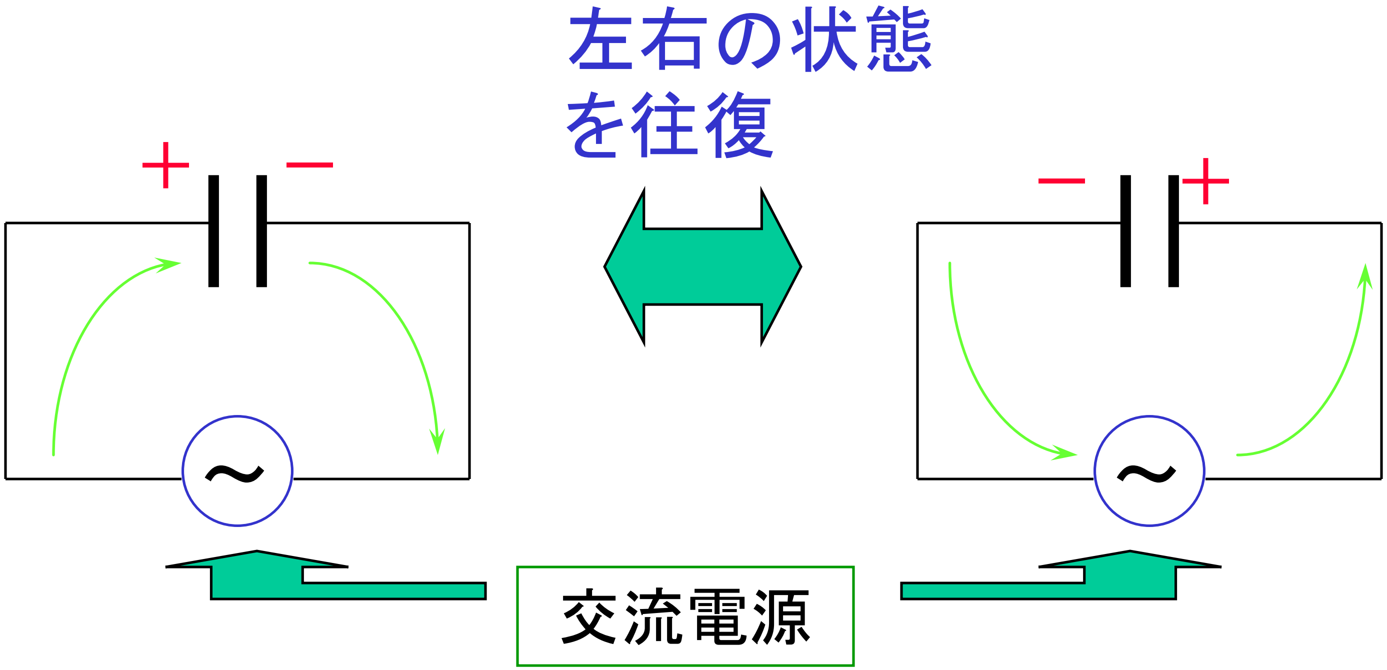


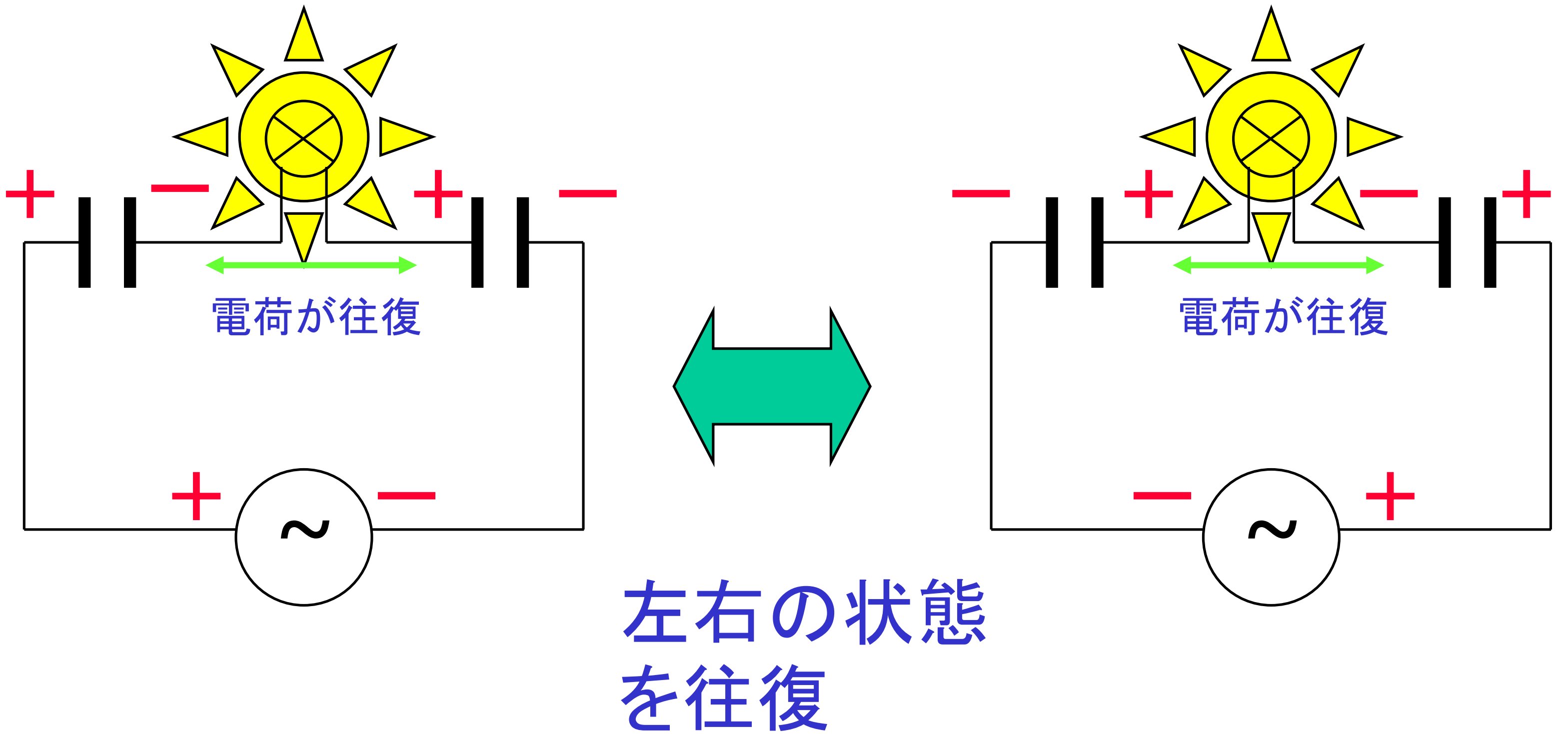
電流の連続性が一意性を保障

全体では合計I の電流がSを通り抜けた

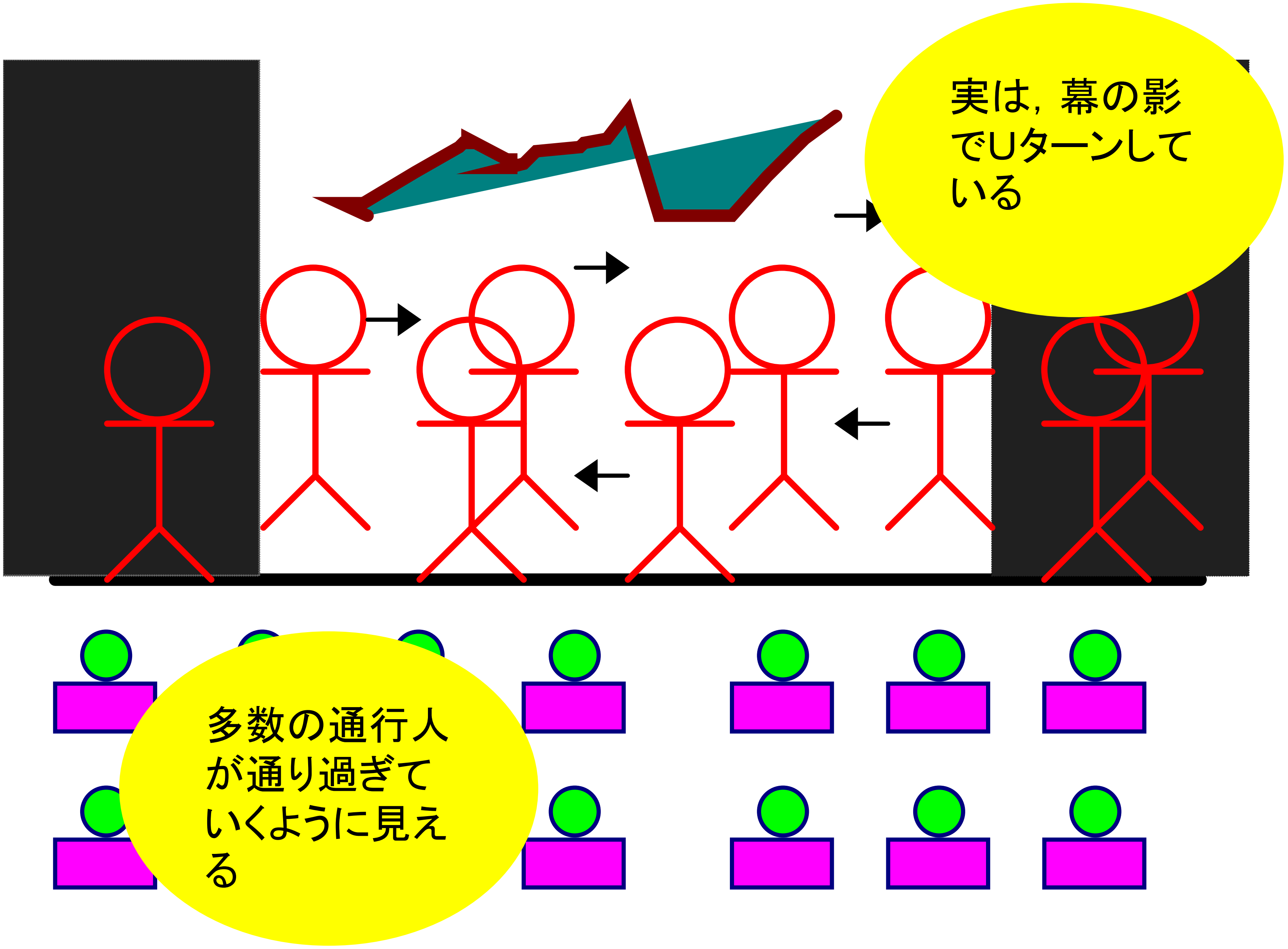
しかし. . .

時間的に変化する電流は「連続」でなくても「流れる」ことができる





中央の部分は導線からみると
「切れている」が電球は光る


実は，幕の影でUターンしている
多数の通行人が通り過ぎていくように見える

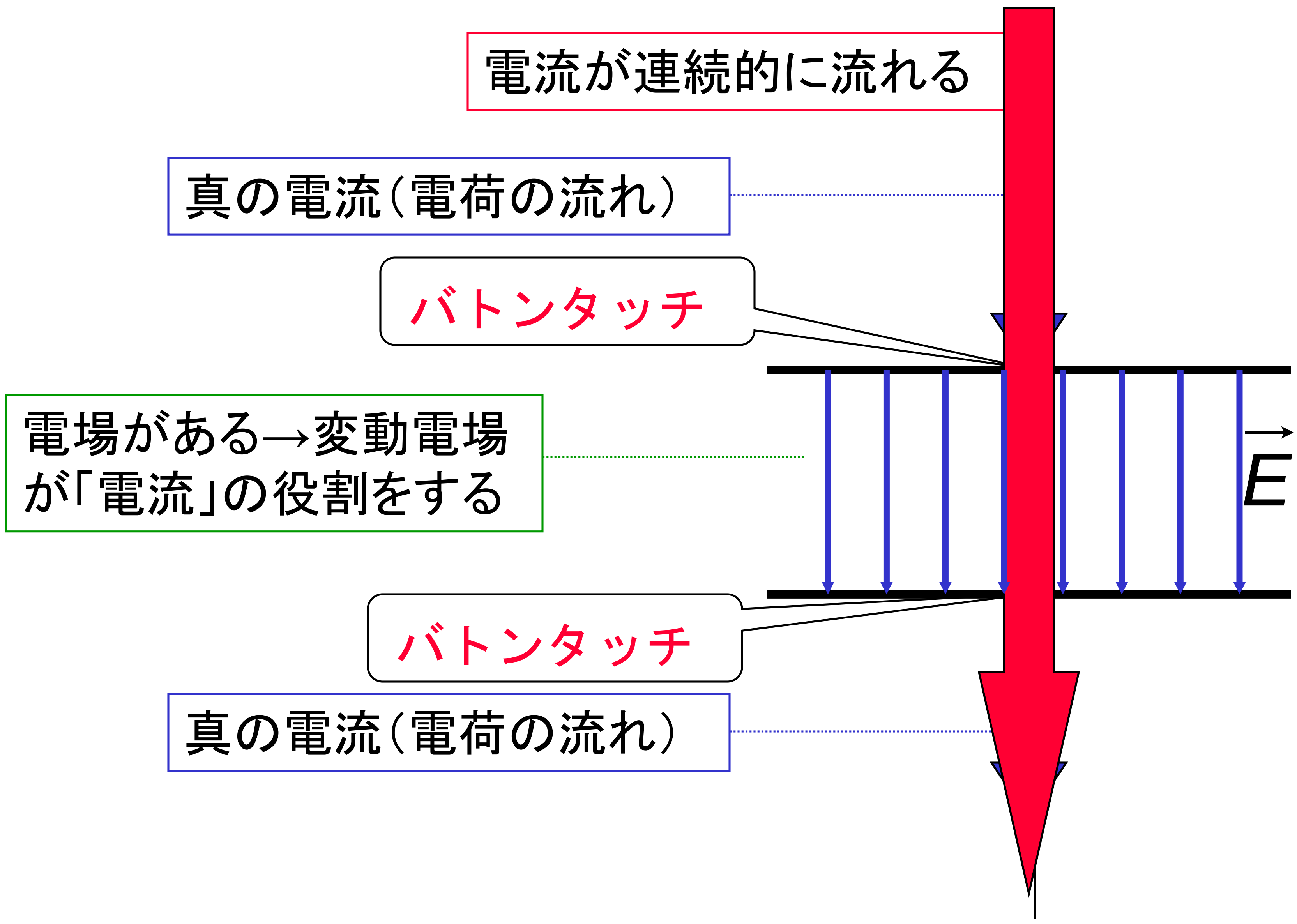
変位電流の導入

アンペールの法則が崩壊？

⇒コンデンサーの極板の間にある変動電場も、電流と同じ役割を持つ

電流の連続性の復活

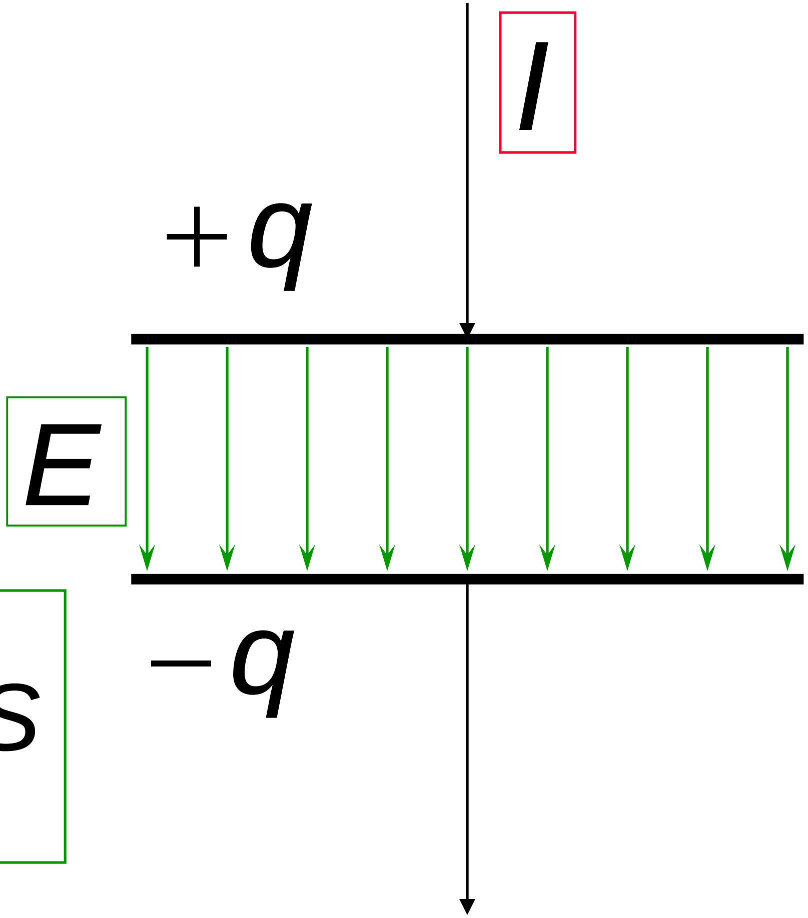
電流＝真の電流＋変位電流


電流が連続的に流れる
真の電流(電荷の流れ)
バトンタッチ
電場がある→変動電場
が「電流」の役割をする
$\vec{E}$
バトンタッチ
真の電流(電荷の流れ)

平行平板コンデンサーの式を使う

$$q = CV = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \times Ed$$

$$= \varepsilon_0 SE$$



$$\boxed{I = \frac{dq}{dt}} \quad \boxed{\Rightarrow \left(\varepsilon_0 \frac{dE}{dt}\right) \cdot S}$$

真の電流　　変位電流

アンペールの法則（修正版）

電流＝真の電流　＋　変位電流

どちらも同様に磁場の源となる

$$\sum H_t \Delta s = \sum I + \sum \frac{dD_n}{dt} \Delta S$$

$$(\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E})$$