

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

→ 電磁場の力学

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

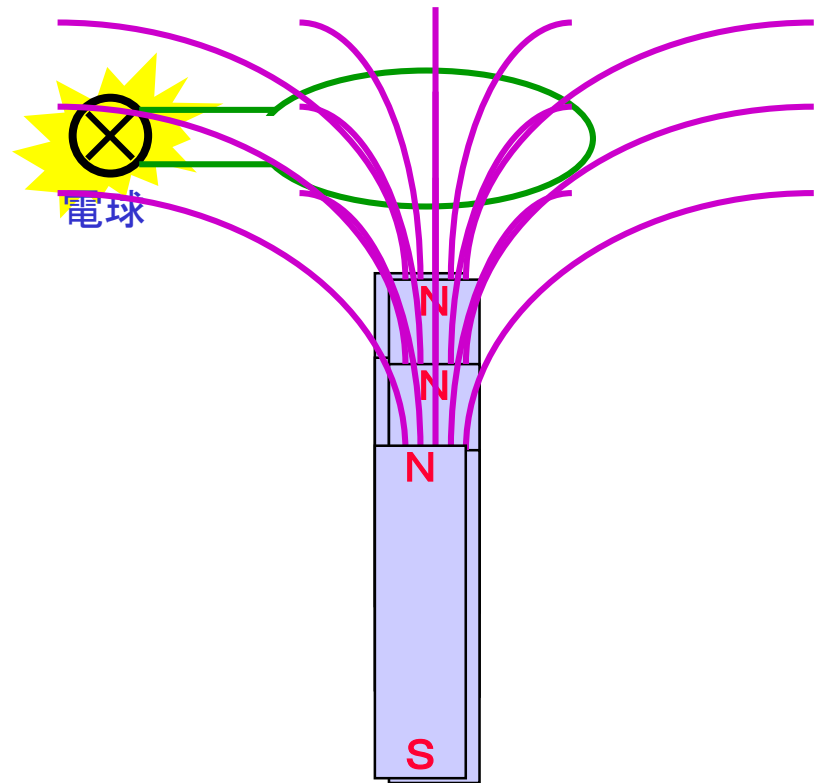
統一概念

電磁誘導

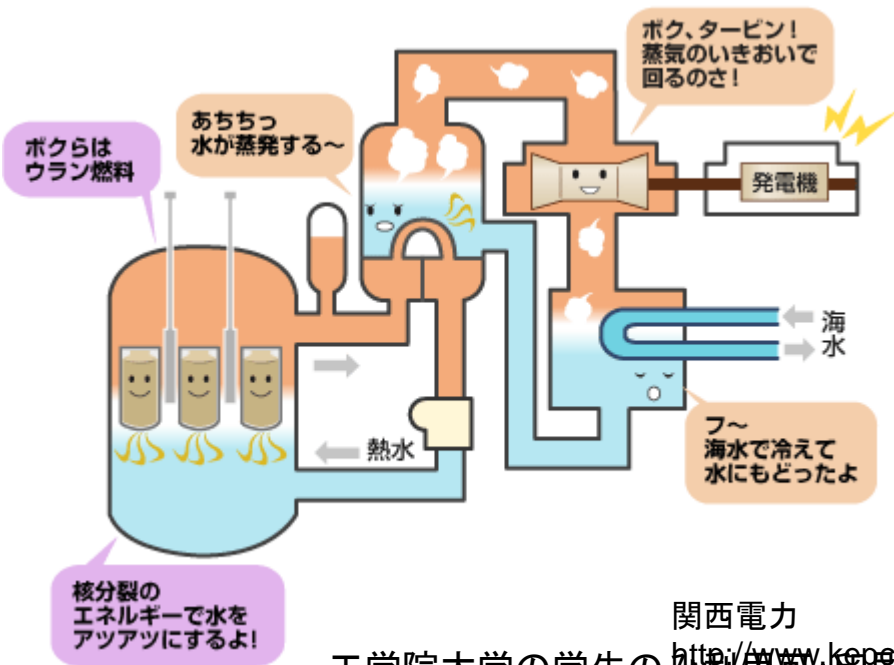
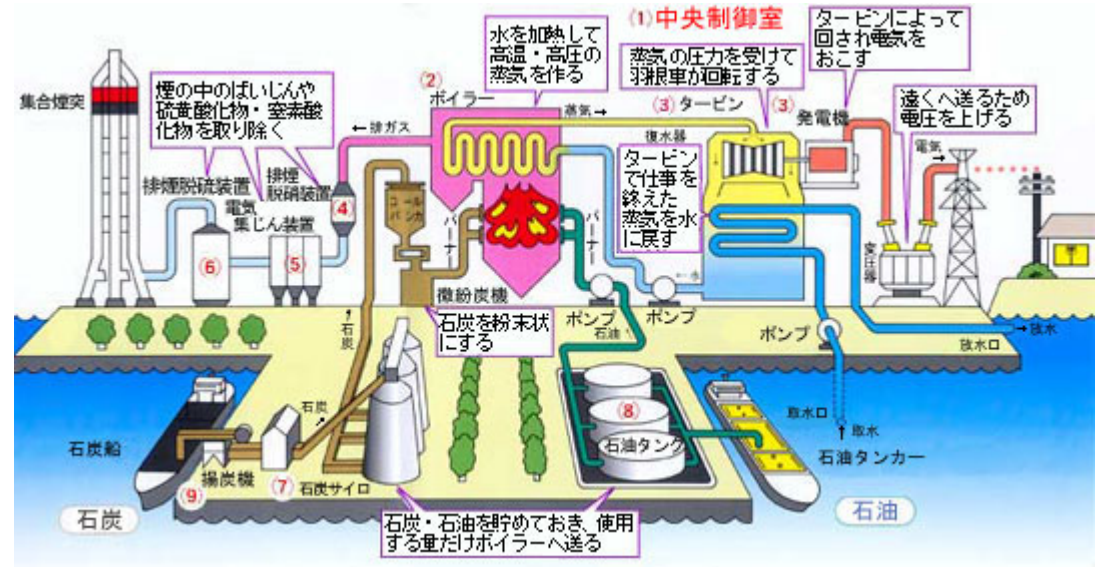
導線の輪の近くで磁石
を動かすと

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

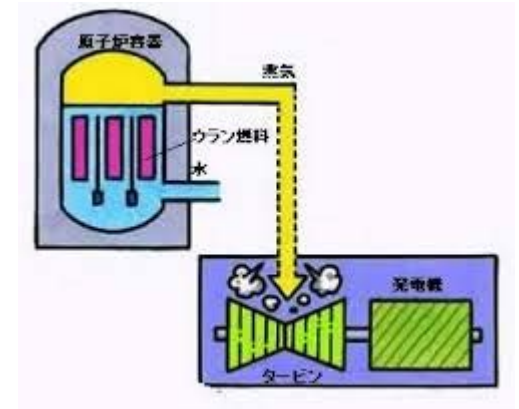
関西電力

<http://www.keppco.co.jp/keppco/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

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

発電機の原理

A diagram illustrating the principle of a generator. It features a vertical blue bar magnet with its north pole at the top. Below the magnet is a green circular coil. Purple magnetic field lines are shown emerging from the north pole of the magnet and passing through the coil. The text '発電機の原理' (Principle of a generator) is written in large, stylized purple characters across the diagram.

ファラデーの法則

$$\text{磁束} = \Phi = B \cdot S$$

精密化 回路 → 閉曲線 C

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

Maxwellの方程式の1つ

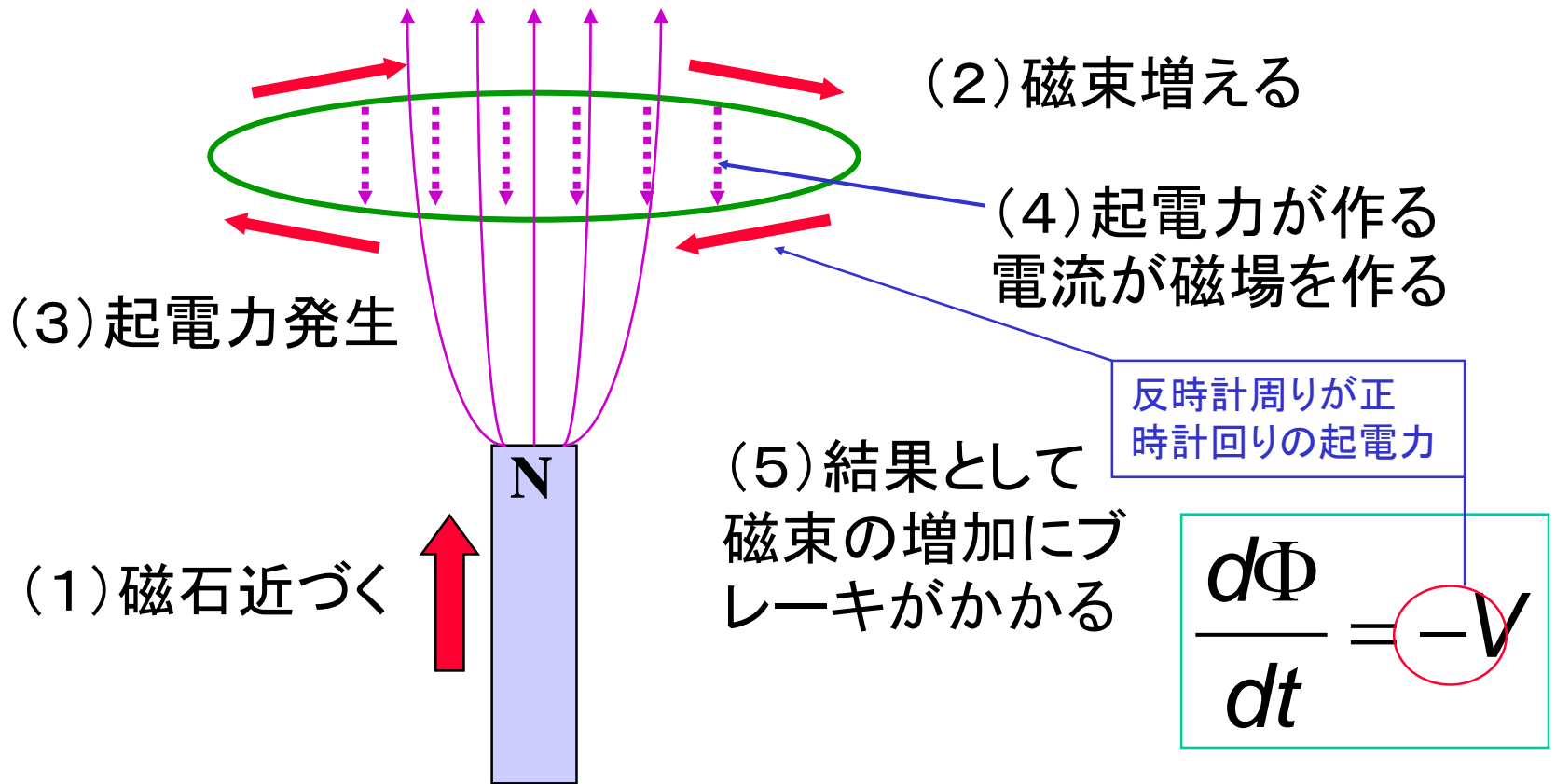
レンツの法則

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

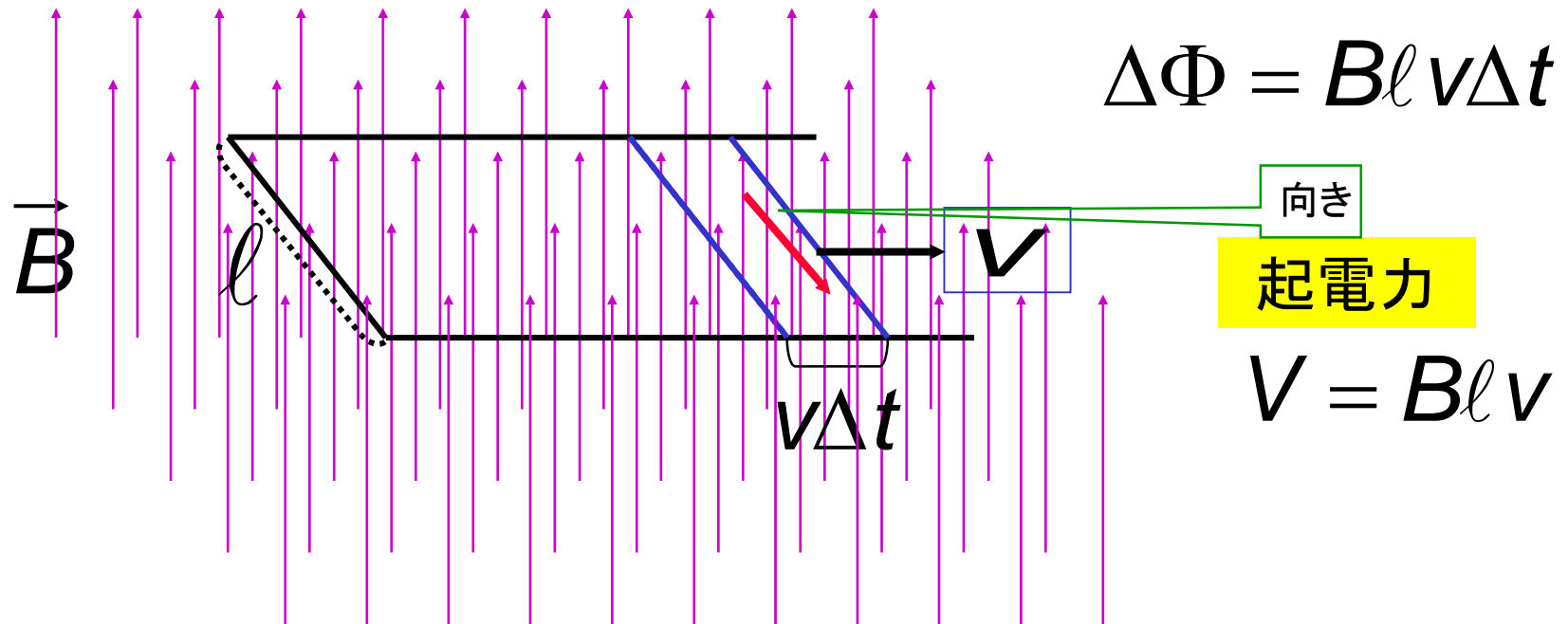
$$\frac{d\Phi}{dt} = -V$$

レンツの法則

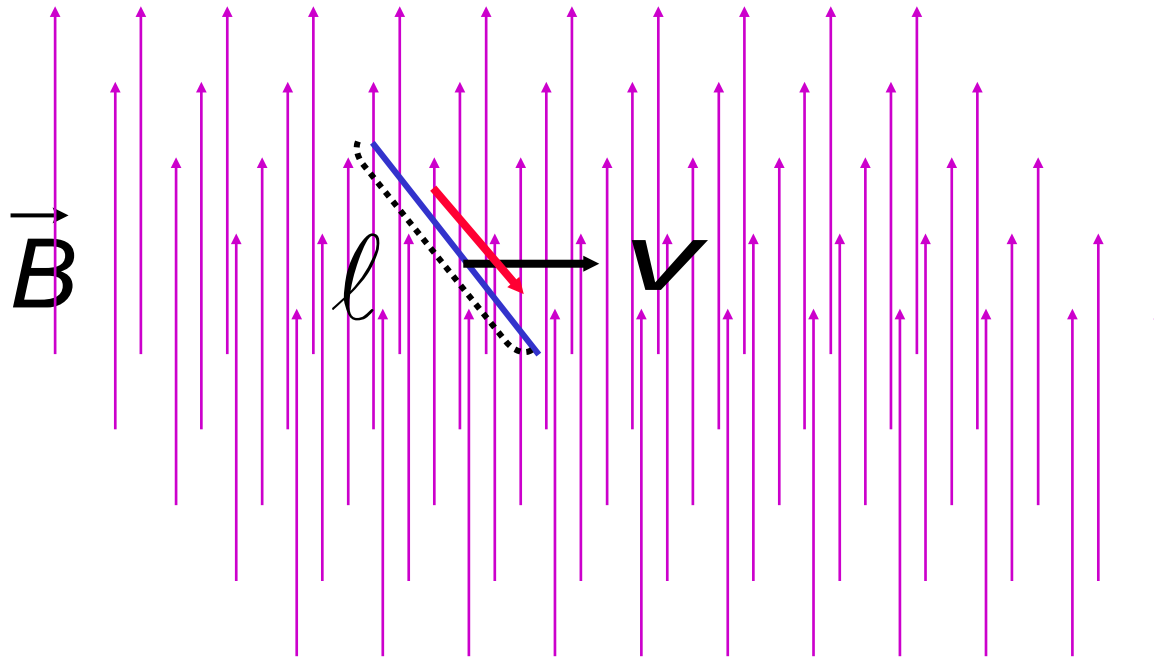


電磁誘導：別の視点から

コの字の形の導体とそれに沿って早さ v で動く導体棒



動く棒が磁力線を「切った」分だけ Φ が増える



起電力

$$V = Blv$$

棒のなかに
生じる「電場」

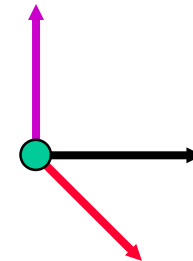
$$E = \frac{V}{l} = Bv$$

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

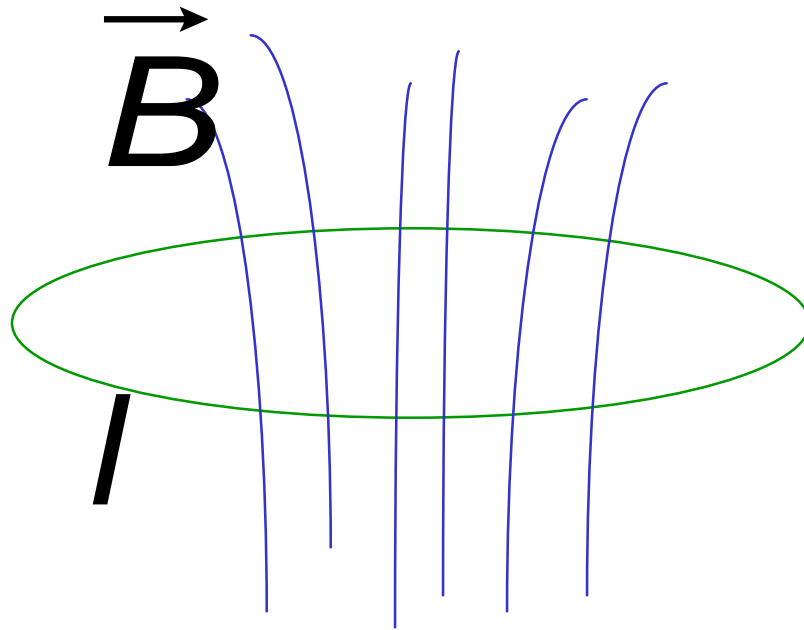
棒の中の電荷が感じる力

$$F = qvB$$

$$F = qE$$



自己インダクタンス



$$\Phi = B \cdot S$$

電流 \Rightarrow 磁場 \Rightarrow 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)

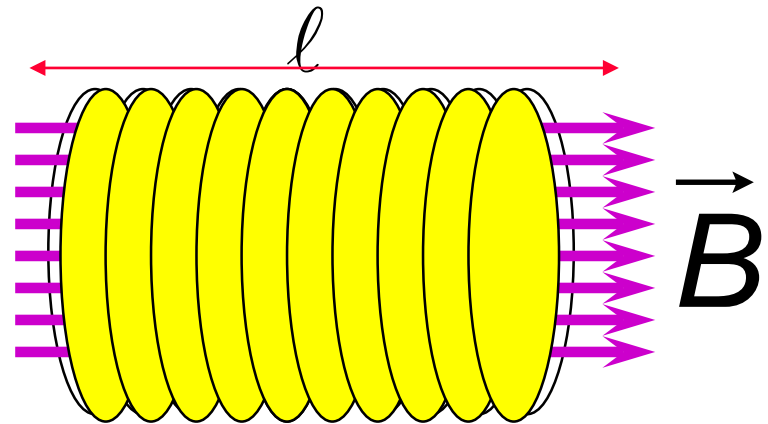
例)ソレノイドの場合

アンペールの法則から
(n = 巻数 / 長さ)

$$H = nl$$

$$B = \mu_0 H$$

$$\Phi = BS$$



コイルを磁場が通り抜ける回数

$$\Phi = \mu_0 nl \cdot S \cdot nl$$

$$\Rightarrow L = \mu_0 n^2 S l$$

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

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

$$\begin{aligned} W &= \int VI dt = \int L \frac{dI}{dt} I dt \\ &= \int_0^I LI dI \end{aligned}$$

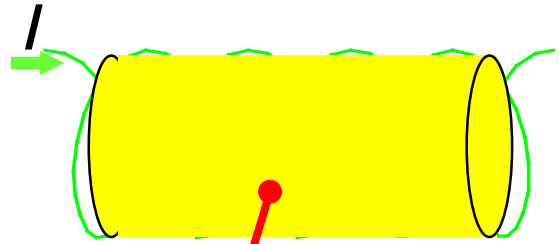
$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

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

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

ソレノイドの式を使う

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


The diagram shows a yellow cylindrical solenoid with a green wire wrapped around it. A green arrow labeled 'I' points to the right, indicating the direction of current flow. A red dot is located on the surface of the solenoid, with a red line extending downwards to the text '磁場の存在する空間の体積'.

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

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

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

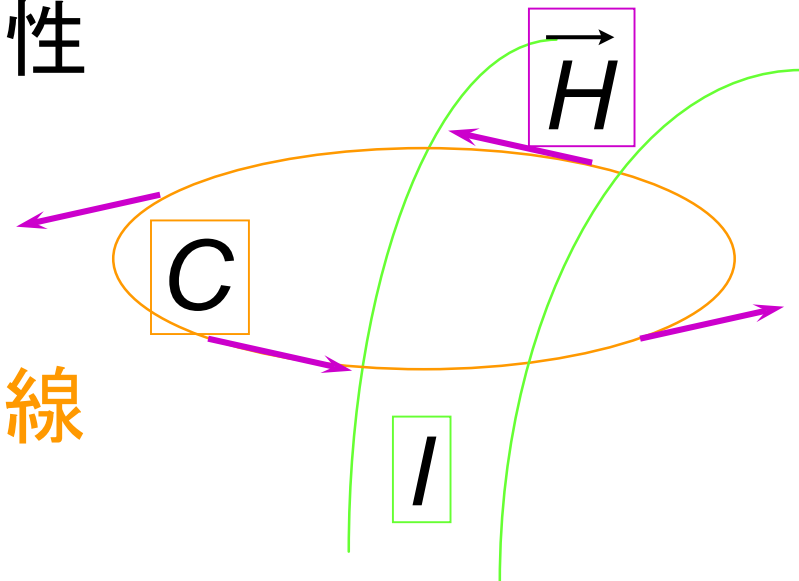
$$\frac{1}{2} \mu_0 H^2$$

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



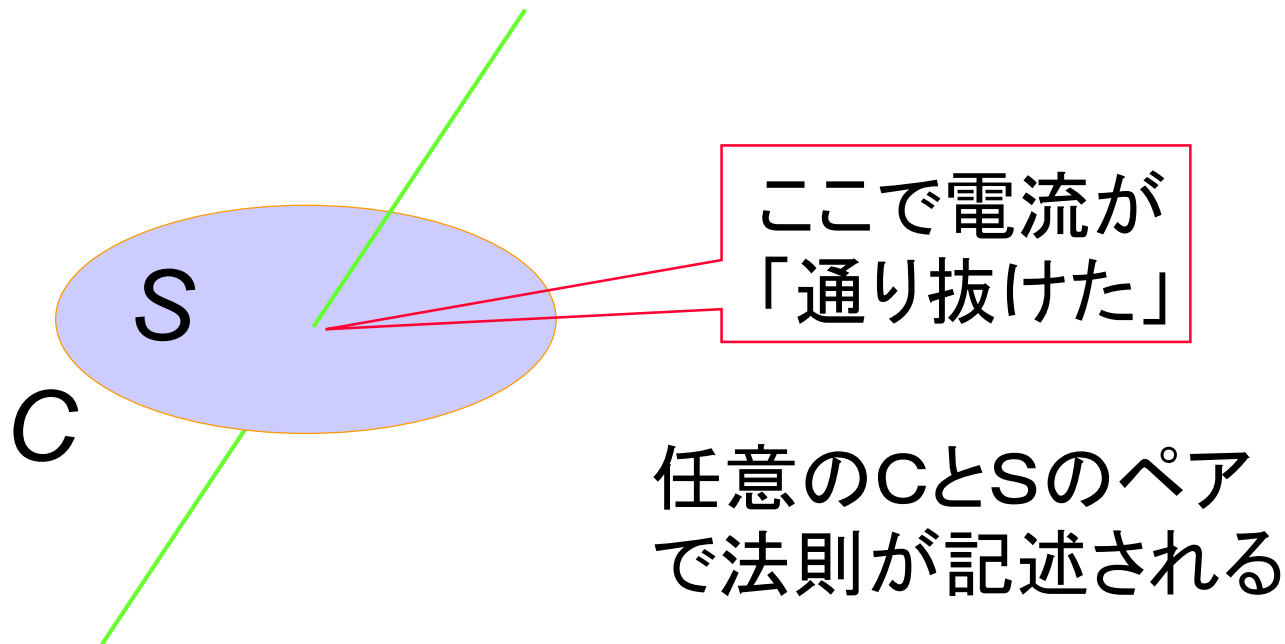
内容： 空間内の**閉曲線**

曲線に沿った**磁場**と

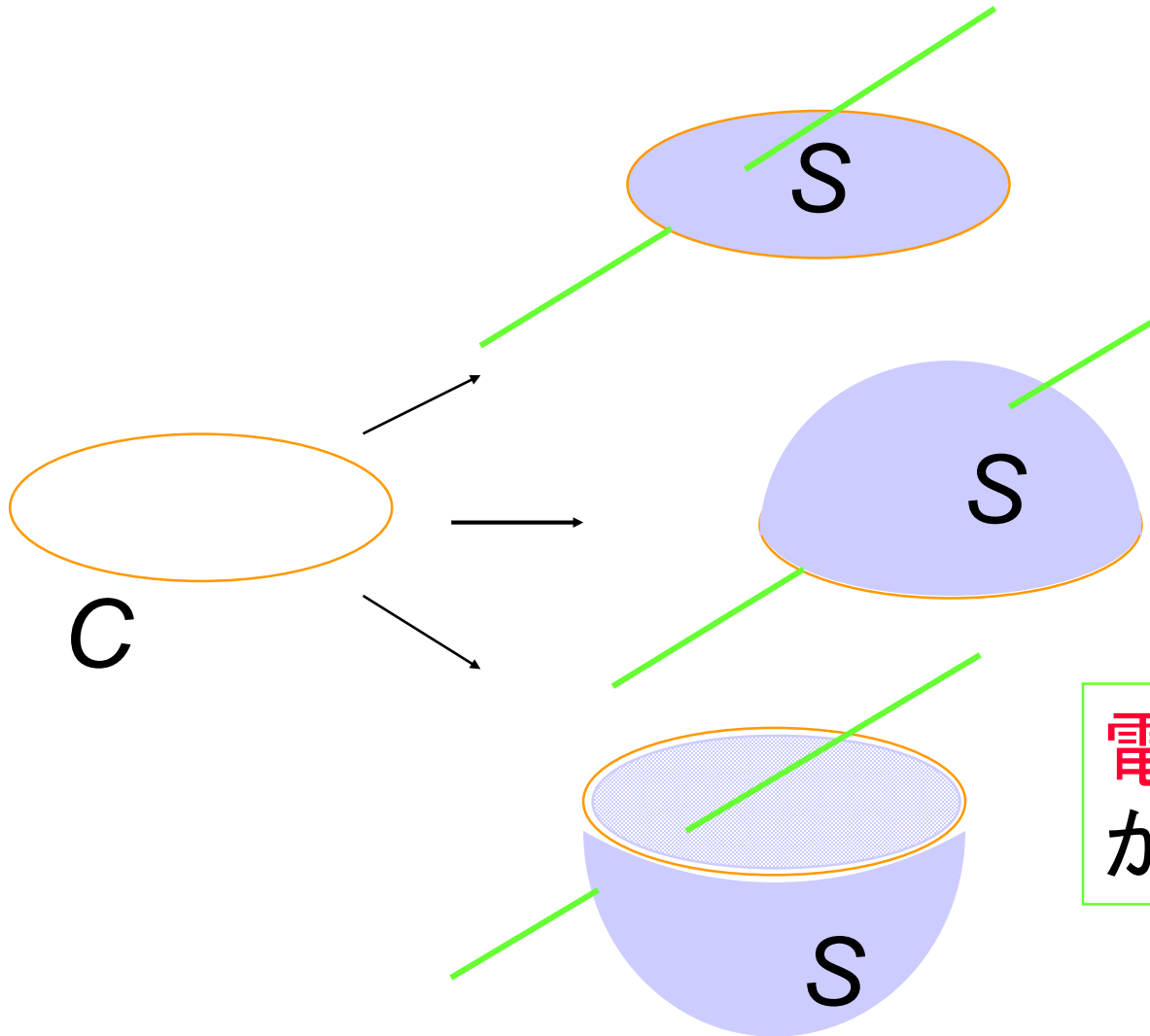
曲線を通りぬける**電流**の関係

「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



閉曲線Cが作る曲面Sは一意には決まらない

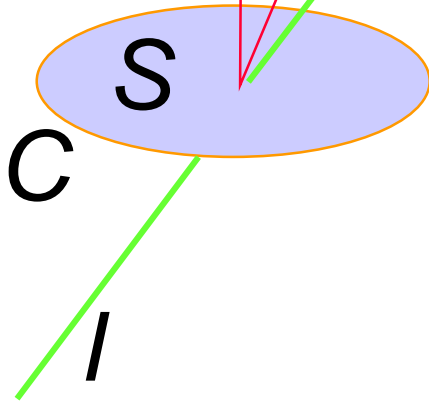


「面を通り抜ける電流」は一意的に決まる

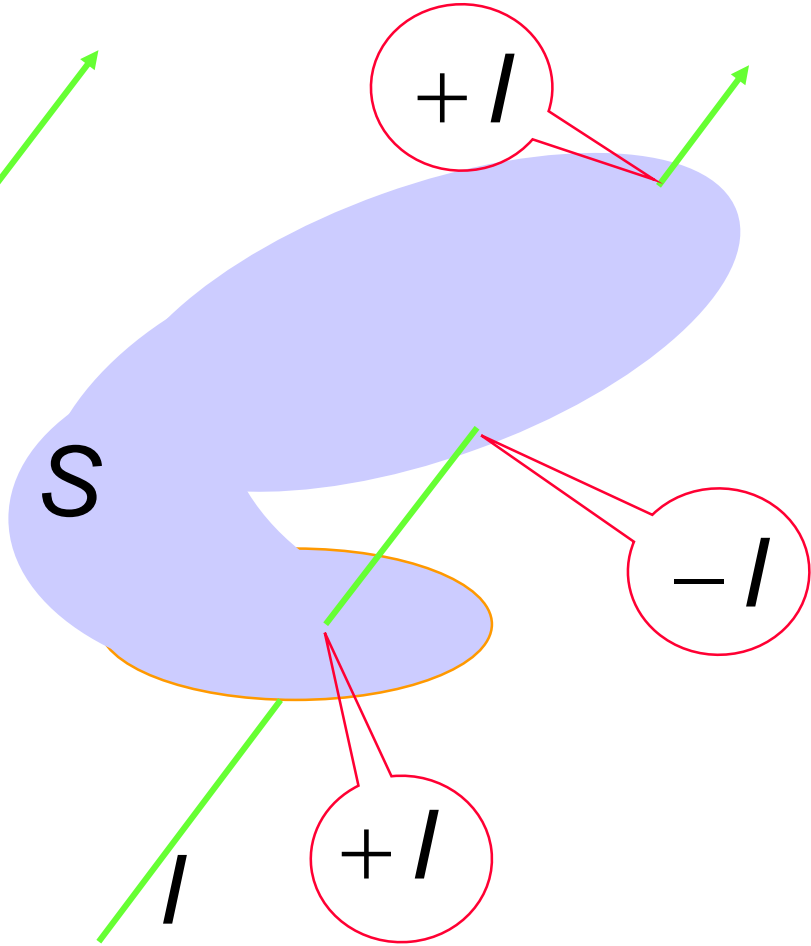


電流の連続性があるため

I の電流が S を
通り抜けた



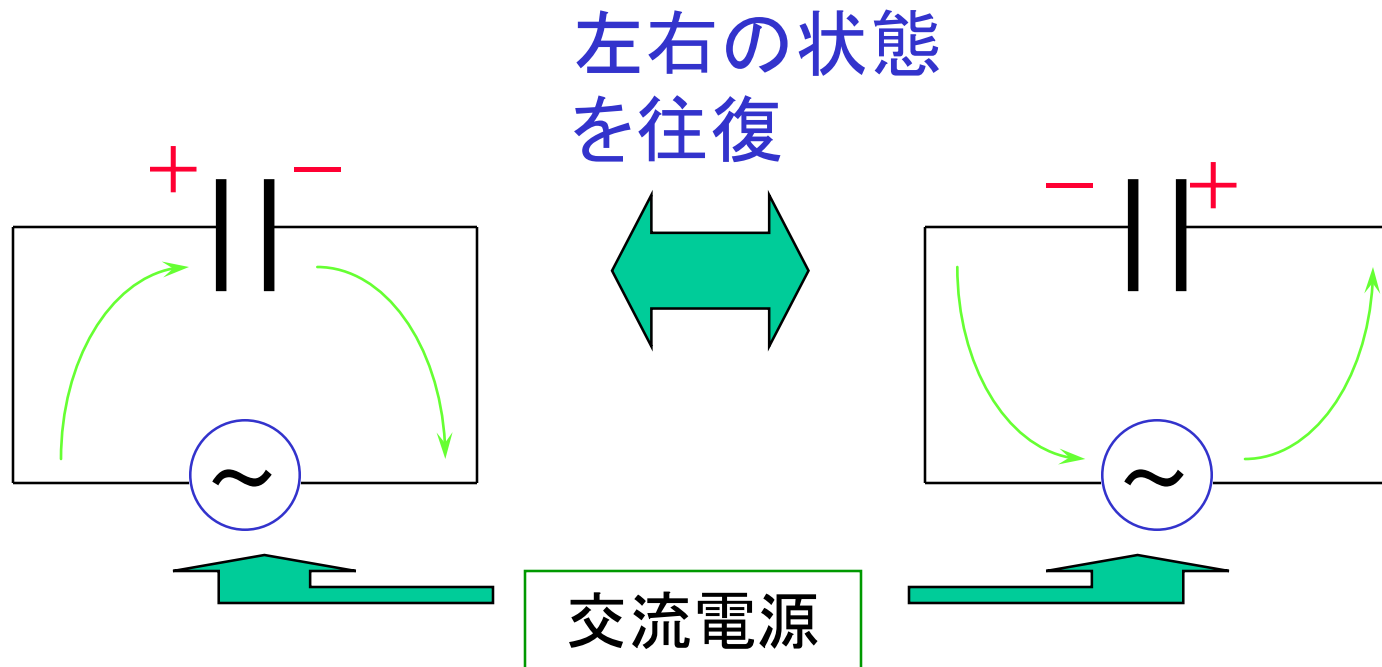
電流の連続性が
一意性を保障

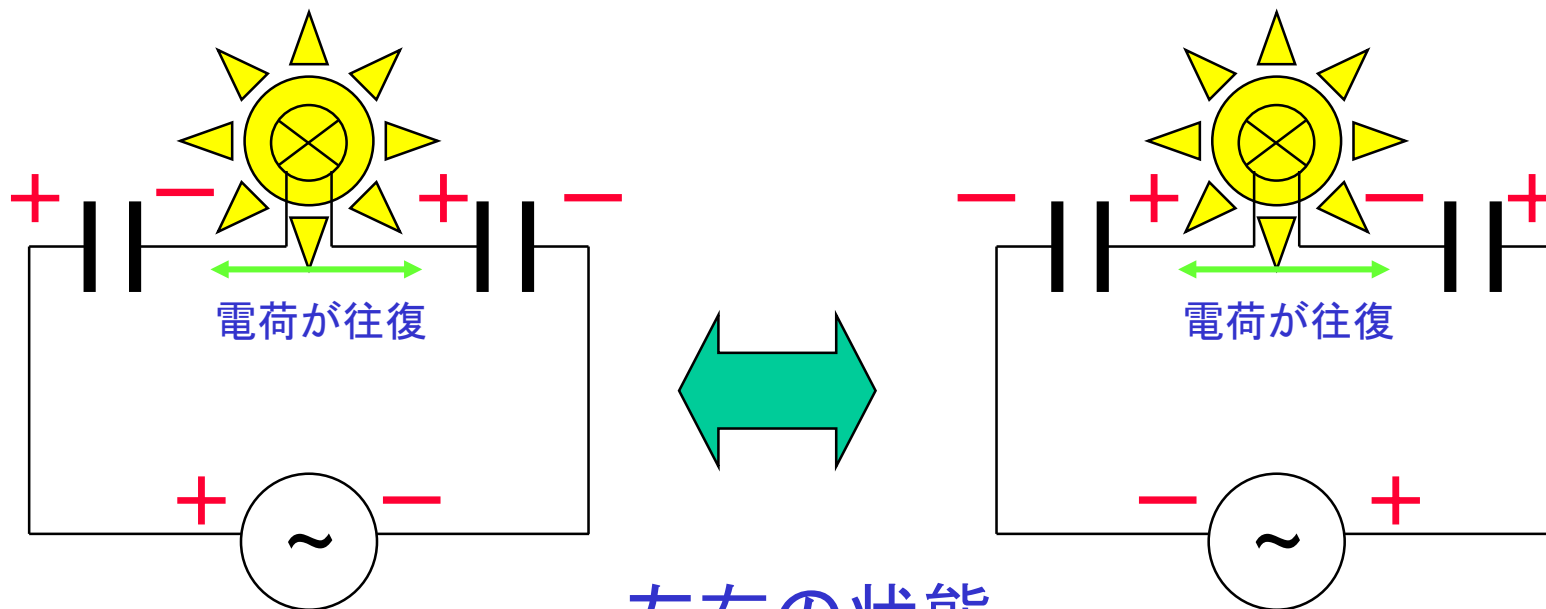


全体では合計 I の電流が S
を通り抜けた

しかし...

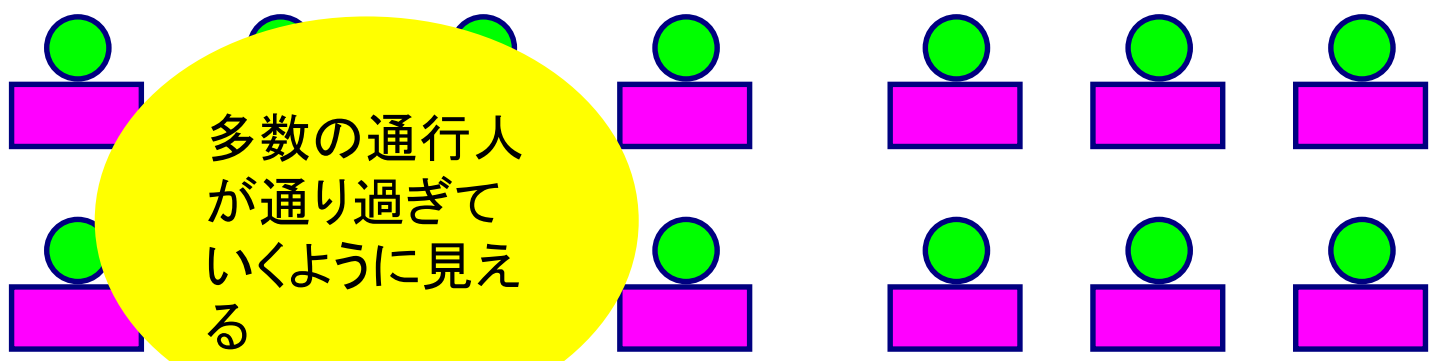
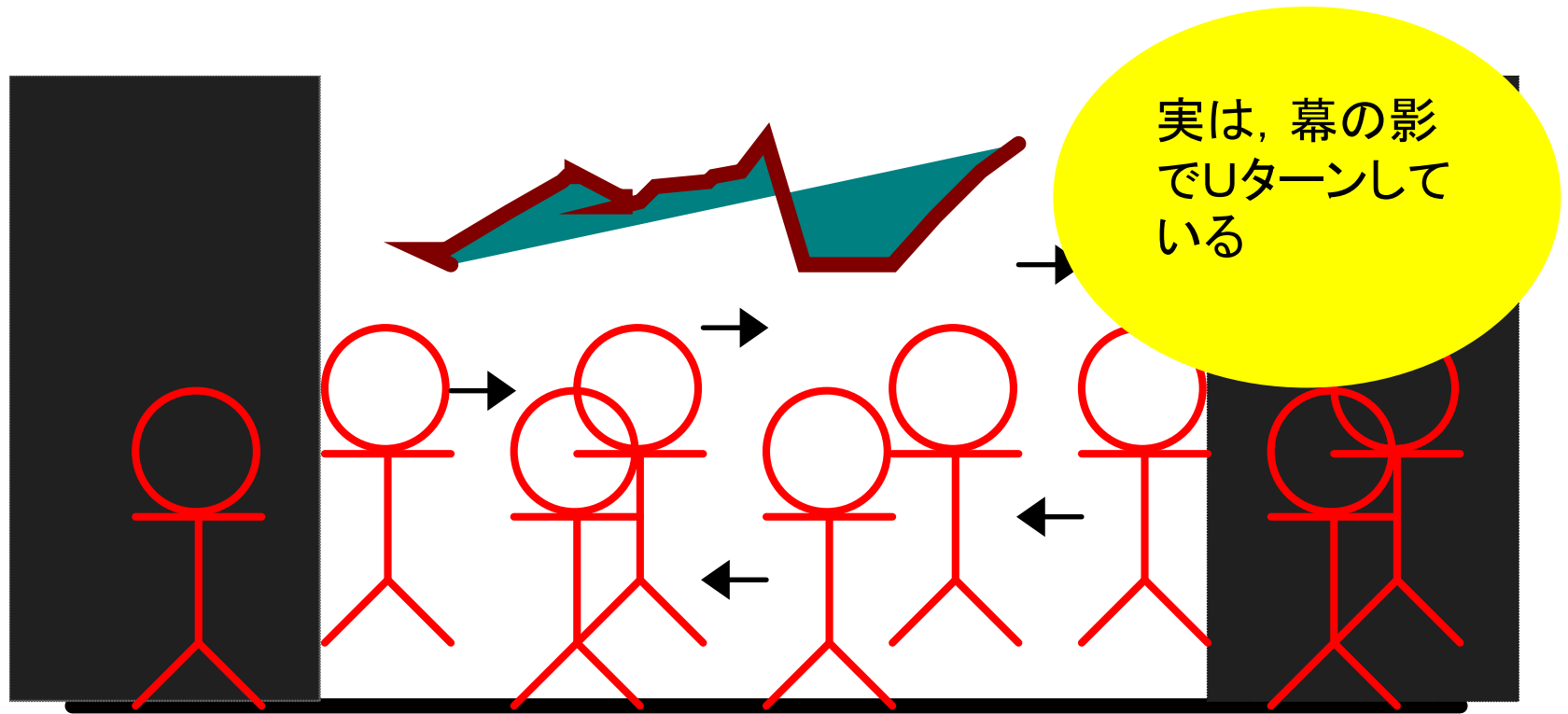
時間的に変化する電流は「連続」でなくても
「流れる」ことができる





左右の状態
を往復

中央の部分は導線からみると
「切れている」が電球は光る



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

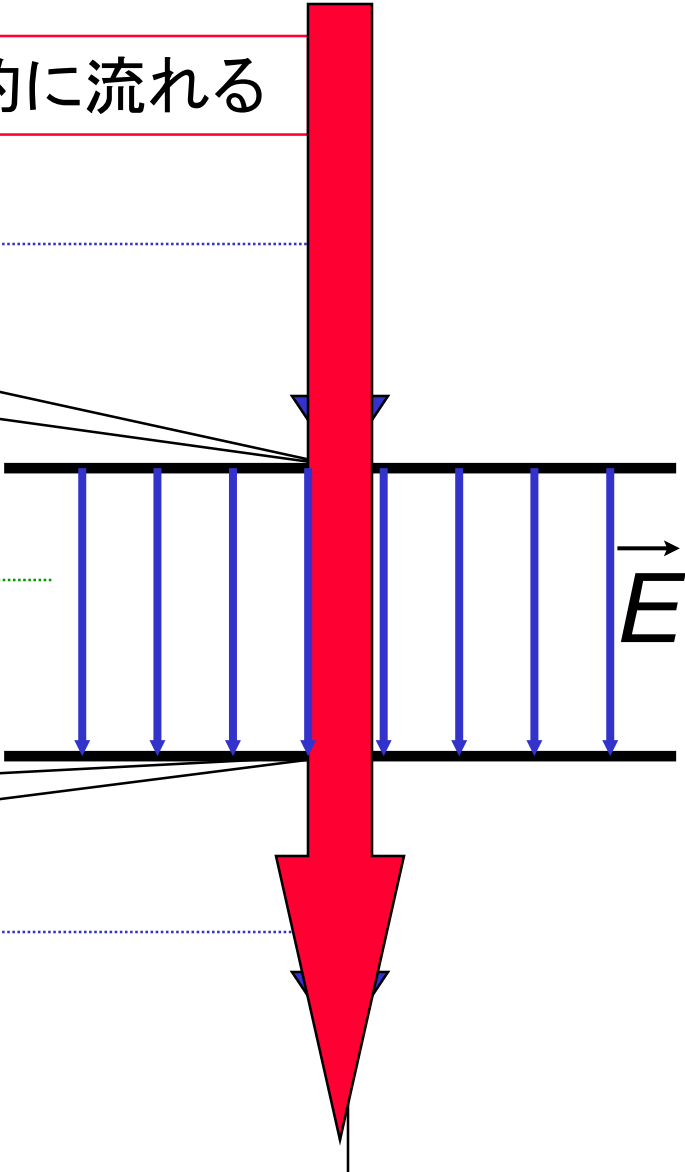
真の電流(電荷の流れ)

バトンタッチ

電場がある→変動電場
が「電流」の役割をする

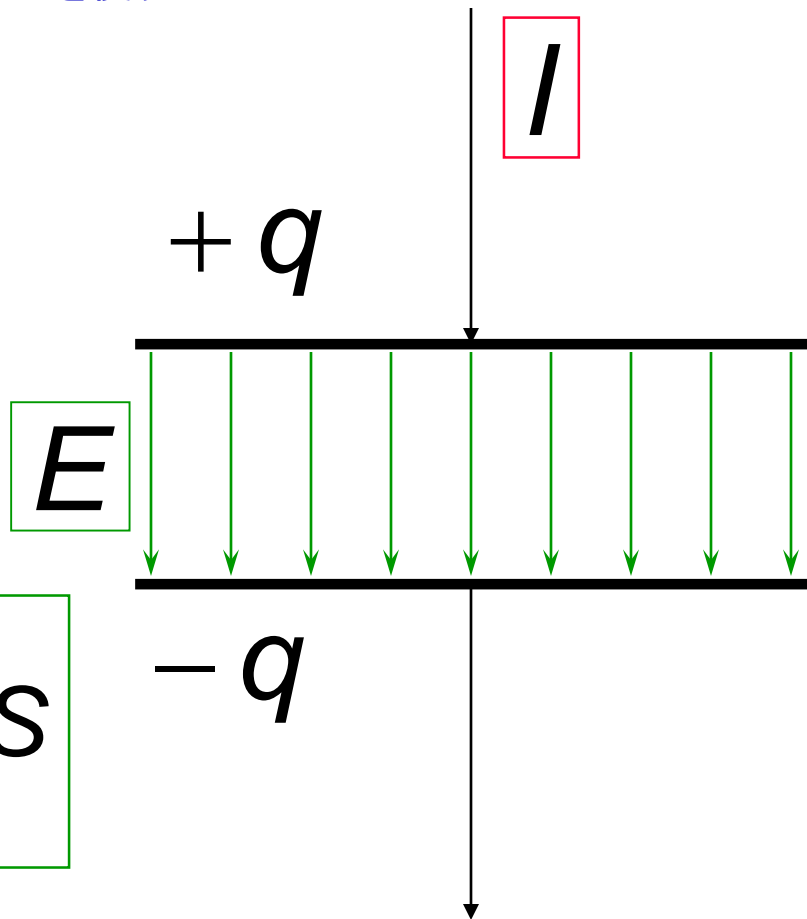
バトンタッチ

真の電流(電荷の流れ)



平行平板コンデンサーの式を使う

$$q = CV = \frac{\epsilon_0 S}{d} \times Ed$$
$$= \epsilon_0 SE$$



$$I = \frac{dq}{dt}$$

真の電流

$$\Rightarrow \left(\epsilon_0 \frac{dE}{dt} \right) \cdot S$$

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

$$\sum H_t \Delta s = \sum I + \sum \frac{dD_n}{dt} \Delta S$$
$$(\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E})$$