

自然科学 II（物理学）

第3回

白倉 尚貴

おさらい(キルヒホッフの法則)

キルヒホッフの第1法則

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 + I_6$$

キルヒホッフの第2法則

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4$$

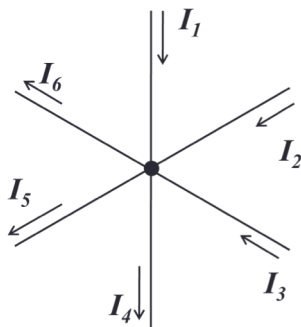


図 電流分岐

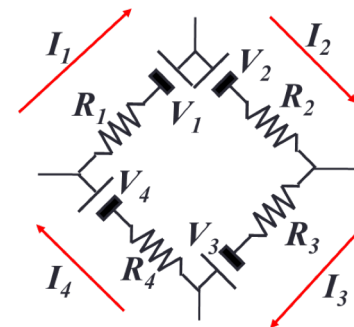


図 キルヒホッフの第2法則

おさらい(ブリッジ回路)

回路ABCおよびBCDでは

$$R_1 I_1 = R_2 I_2, R_3 I_3 = R_4 I_4 \text{ より}$$

$$R_1/R_2 = I_2/I_1, R_3/R_4 = I_4/I_3$$

$$I_1 = I_3, I_2 = I_4 \text{ より}$$

$$R_1/R_2 = R_3/R_4$$

すなわち $I_G = 0$, つまり検流計のメータが0になる条件は

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

これをブリッジの平衡条件という

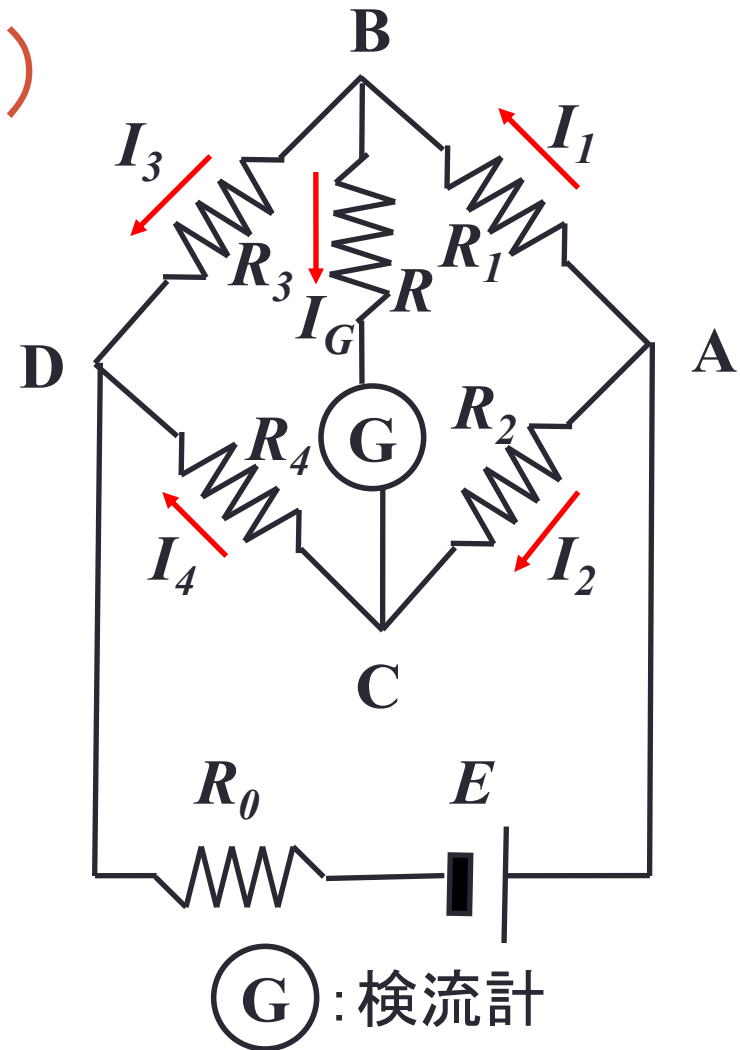
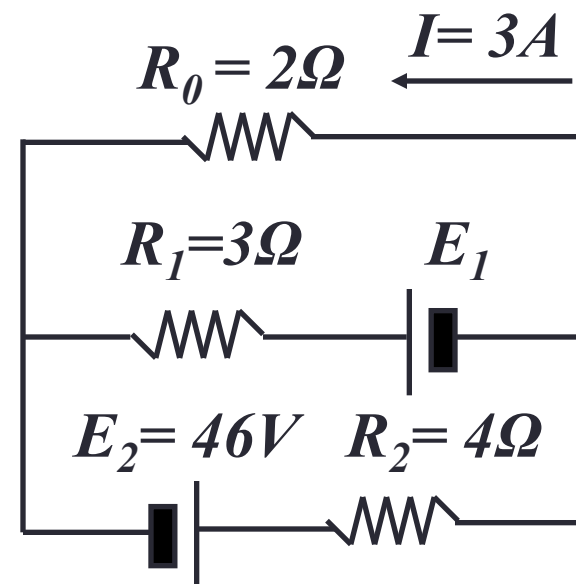


図 ブリッジ回路

復習1 (第2回の演習2)

- 右図に示す回路において抵抗 R_0 に矢印のような電流が流れているとき、電池の起電力 E_1 は何(V)か？
ただし、電池の内部抵抗は無視するものとする。



復習1 (第2回の演習2)

- 解答

キルヒホッフの法則から、方程式を3つたてる

$$I_2 = I + I_1 \quad (1)$$

$$E_2 + E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2 \rightarrow 46 + E_1 = 3 I_1 + 4 I_2 \quad (2)$$

$$E_2 = I R_0 + I_2 R_2 \rightarrow 46 = 3 \times 2 + 4 I_2 \quad (3)$$

$$(3 \text{より}) I_2 = 10 \text{ [A]}$$

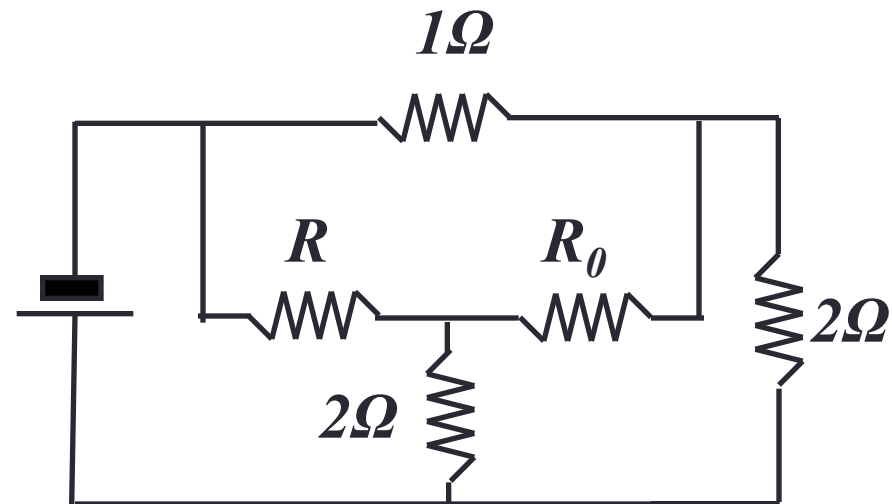
$$(1) \text{に} I_2 \text{を代入} \rightarrow 10 = 3 + I_1 \rightarrow I_1 = 7 \text{ [A]}$$

$$I_1、I_2 \text{を}(2) \text{に代入} \rightarrow 46 + E_1 = 3 \times 7 + 4 \times 10$$

$$E_1 = 15 \text{ [V]}$$

復習2

図の回路において抵抗 R_0 に流れる電流が0[A]になるとき、抵抗 R の値を求めよう



復習2

- 解答

この回路もブリッジ回路であるため、
ブリッジの平衡条件 ($R_1 R_4 = R_2 R_3$) が適用できる

したがって、
$$R = 1 \times 2 \div 2 = 1 \text{ } [\Omega]$$

今回の授業

4/23 電磁誘導 (教科書 p.108-111)

- 磁界と磁性体
- ファラデーの法則とレンツの法則
- 自己誘導と相互誘導

今回の授業

4/23 電磁誘導

- 磁界と磁性体
- ファラデーの法則とレンツの法則
- 自己誘導と相互誘導

磁界と磁性体

磁石のN極を鉄の棒に近づけると

N極に近い方の端 ⇒ S極

遠い方の端 ⇒ N極

ができる。そして鉄の棒のS極は磁石のN極に引き付けられる。

このように磁石によって鉄の棒も磁石の性質(磁性)を持つことを **磁化** という。

磁性を持つことが可能な物質を磁性体という。

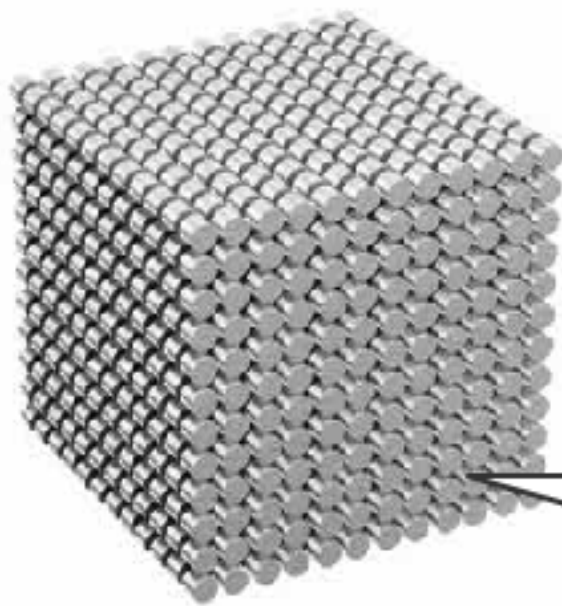
全ての物質は磁性体であるが磁化の強度が異なる。

鉄の棒は磁化の程度が強いために強い力で引きつけられる。

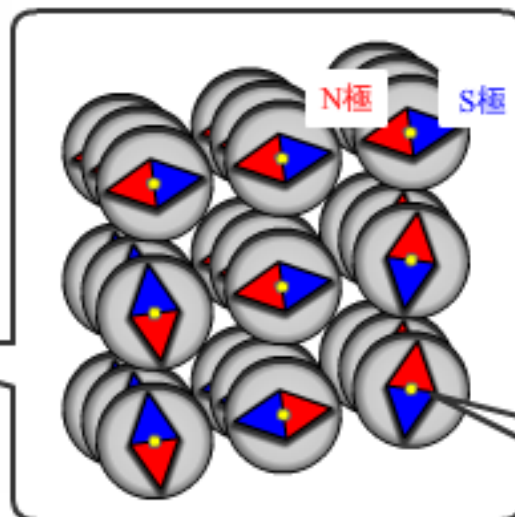
磁界と磁性体

磁性体(磁石や鉄など)を拡大していくと、**原子**やそれを構成する**電子**ひとつでも磁力を持っている

原子の周りに回っている電子が円形電流となり、磁力が発生している(教科書 p108 図11-23)

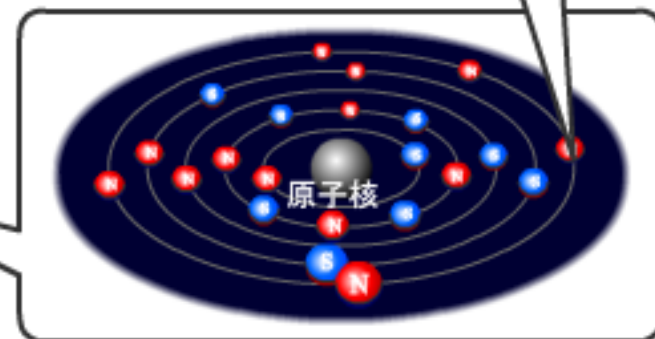


磁性材を拡大していくと原子が並んでいます。
原子にもN、S極があります。



さらに原子を構成する電子1個にも極性があり、磁力を持っています。

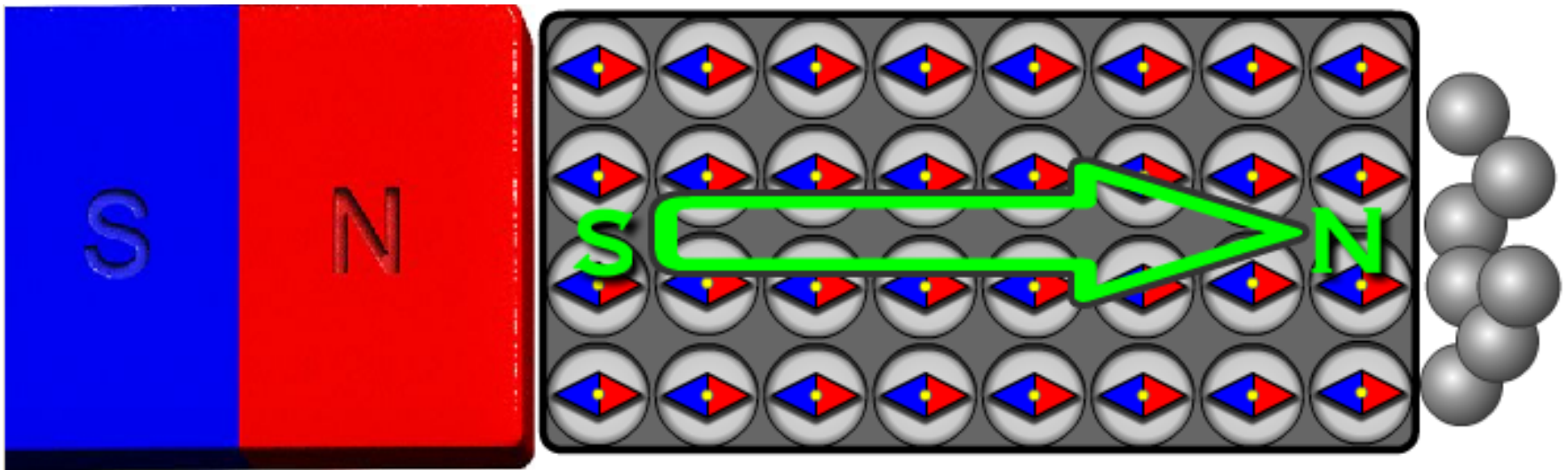
原子を拡大すると原子は原子核と電子で出来ています。



強磁性体

磁石に吸着する物質を **強磁性体** という。

強磁性体に磁石を近づけると内部で打ち消しあっていた磁力が **一方向にそろい**、物体が磁力を持つ(磁化する)



磁性体の種類

- 外部磁界による磁化の程度が
強いもの ⇒ 強磁性体
弱いもの ⇒ 常磁性体
- 外部磁界と逆方向に磁化される物質 ⇒ 反磁性体
- 常磁性体と反磁性体を非磁性体、強磁性体を単に磁性体とよぶことがある

常磁性体： 白銀やアルミニウムなど

強磁性体： 鉄、コバルト、ニッケル、ガドリニウム

今回の授業

4/23 電磁誘導

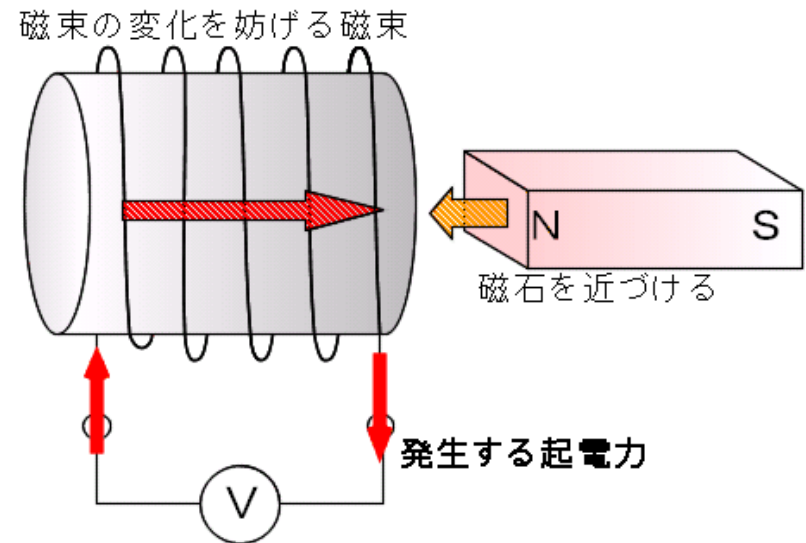
- 磁界と磁性体
- ファラデーの法則とレンツの法則
- 自己誘導と相互誘導

電磁誘導

右図の様に円形コイルの面と垂直に磁束密度 B を持つ磁石を出し入れする。

円形コイルにはその動きによって電流が流れる。これを **電磁誘導** という。

このときの電流を **誘導電流**、
これによって生ずる起電力(電圧)
を **誘導起電力** という。



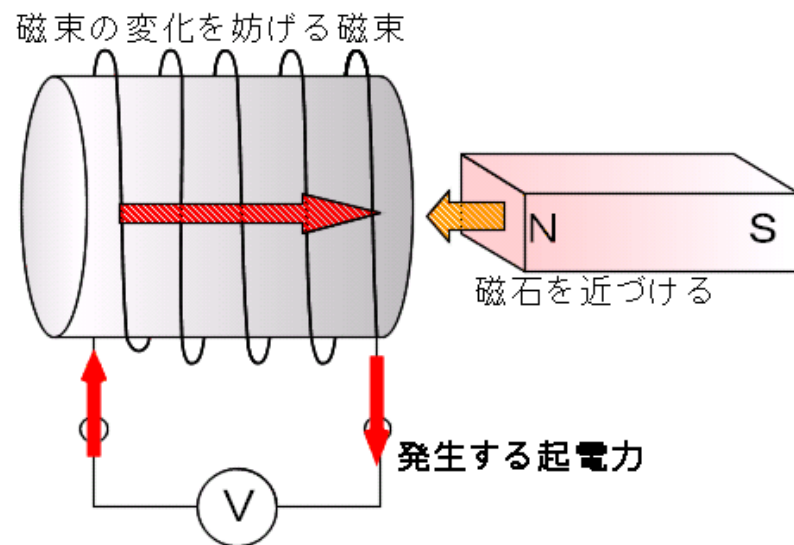
ファラデーの法則とレンツの法則

磁石が持つ磁束密度の強さ
磁石を動かす速さ

コイルを通る磁束密度の
変化の強さ

磁束密度の変化が大きいほど **誘導起電力** は大きくなる。
この電磁誘導に関する法則を **ファラデーの法則** という。

コイルに流れる電流は磁石を動かす
ことによって生ずる磁束密度の変化
を **妨げる方向** に流れる
これを **レンツの法則** という

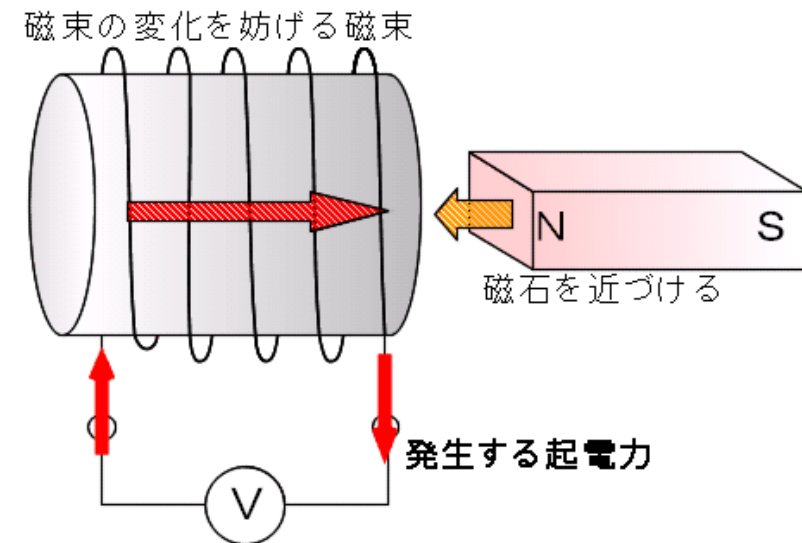


ファラデーの法則とレンツの法則

コイルに流れる電流と、電流が作る磁束にも

右ねじの法則があてはめられる

この場合電流が **ねじを回す** 方向、磁束が **ねじが進む** 方向である



ファラデーの法則とレンツの法則

磁石のつくる磁束密度 B [Wb/m²]が円形コイルでつくる面積 S を横切るとき、その総和の磁束 Φ は

$$\Phi = BS$$

したがって、電磁誘導によってコイルに発生する起電力 V は横切る磁力線の数が増える時間変化 Δt 間で大きいほど大きくなるので

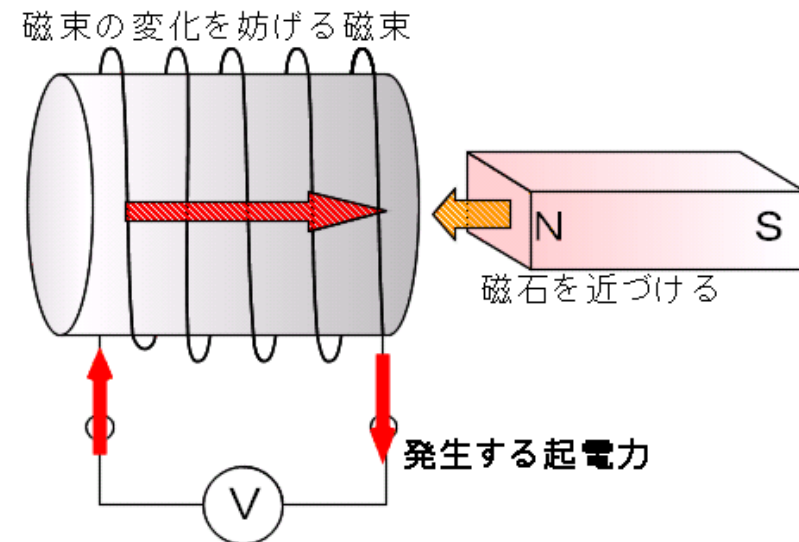
$$V = \frac{\text{磁束の変化量}}{\text{経過時間}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{S\Delta B}{\Delta t}$$

n 回の巻数をもつコイルであれば全コイルを横切る磁束も n 倍になるから

$$V = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \times n = \frac{S\Delta B}{\Delta t} \times n$$

例題1

右下図のコイルの円の面積を $10 \text{ [m}^2\text{]}$ 、巻き数を5とする。
また磁石を動かすことによってコイルを貫く磁束密度が10秒間に
 $2 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$ から $10 \text{ [Wb/m}^2\text{]}$ に増えるとする。このとき発生する
誘導起電力[V]を求めよ。

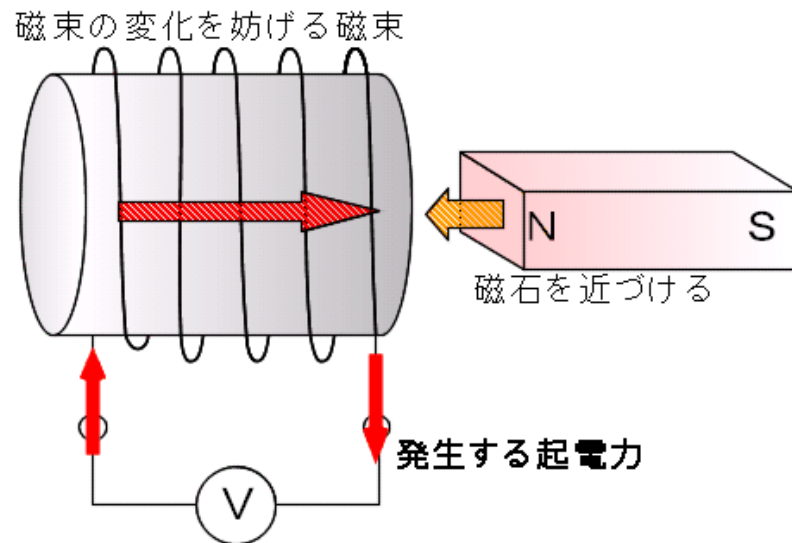


例題1 解答

右下図のコイルの円の面積を $10 [\text{m}^2]$ 、巻き数を5とする。
また磁石を動かすことによってコイルを貫く磁束密度が10秒間に
 $2 [\text{Wb}/\text{m}^2]$ から $10 [\text{Wb}/\text{m}^2]$ に増えるとする。このとき発生する
誘導起電力 $[\text{V}]$ を求めよ。

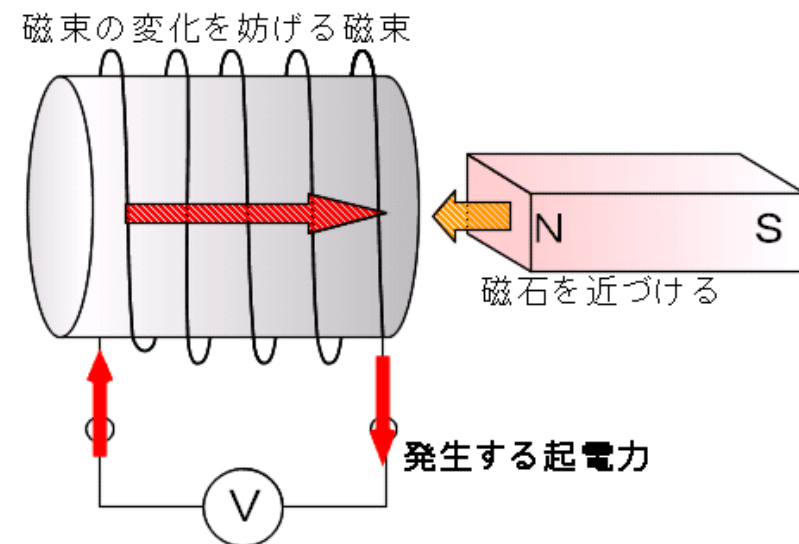
解答

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{nS\Delta B}{\Delta t} = \frac{nS \times \text{磁束密度の変化量}}{\text{経過時間}} \\
 &= \frac{5 \times 10 [\text{m}^2] \times (10 - 2)}{10 [\text{s}]} \\
 &= 40 [\text{V}]
 \end{aligned}$$



演習1

右下図のコイルの円の面積を5 [cm²]、巻き数を5とする。
また磁石を動かすことによってコイルを貫く磁束密度が5秒間に
10 [Wb/cm²]から50 [Wb/cm²]に増えるとする。このとき発生する
誘導起電力[V]を求めよ。



演習1の解答

解答

$$\begin{aligned} V &= nS\Delta B / \Delta t \\ &= 5 \times 5 [\text{cm}^2] \times (50-10) [\text{Wb/cm}^2] \\ &\quad / 5 [\text{s}] \\ &= 200 [\text{V}] \end{aligned}$$

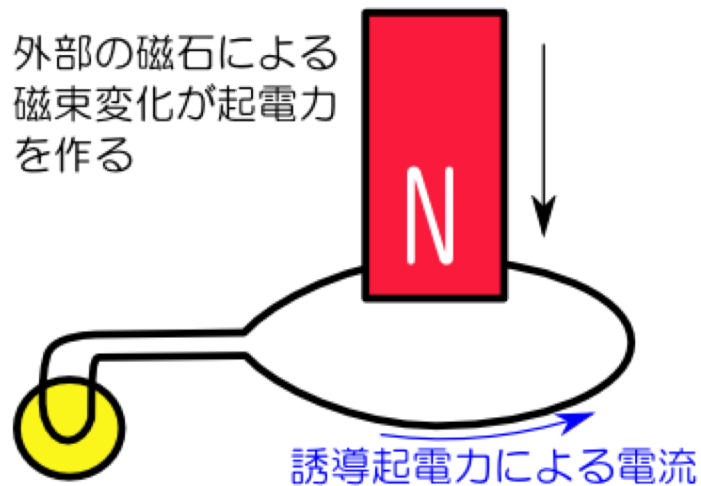
今回の授業

4/23 電磁誘導

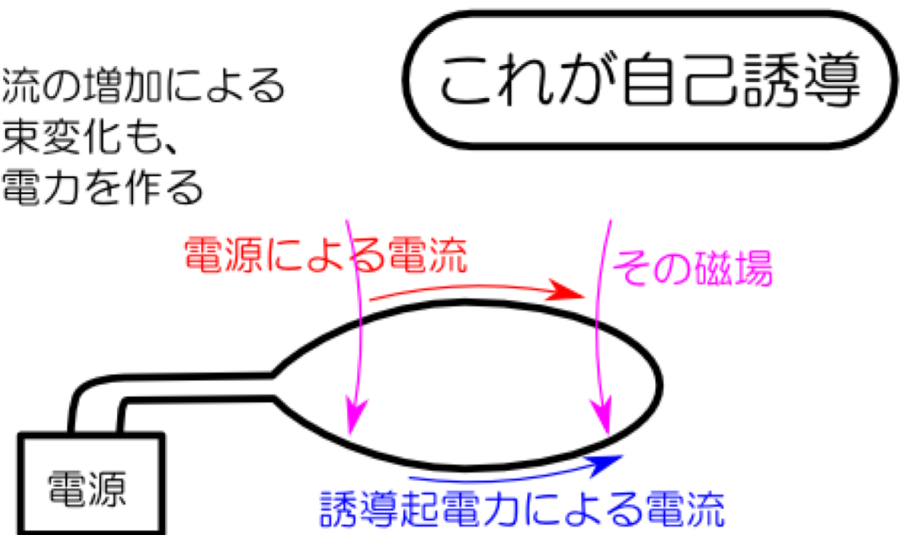
- 磁界と磁性体
- ファラデーの法則とレンツの法則
- 自己誘導と相互誘導

自己誘導

コイルに流れる電流 I によって磁束 Φ が生じるが、電流が時間的に変化すると、**コイルを貫く磁束 Φ も** 変化し、この結果レンツの法則によって磁束を打ち消すような起電力がコイルに生じる
これを **自己誘導** という



電流の増加による
磁束変化も、
起電力を作る



自己誘導

磁束 Φ は電流 I に比例し

$$\Phi = LI$$

この磁束の変化を妨げる方向に起電力が生じるから

$$V = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t}$$

となり、この比例定数 L を **自己インダクタンス** という

単位は **ヘンリー[H]** であらわす (コイルのことを **インダクタ** と呼ぶ)

コイルに流れる電流 I が、1秒間に1Aの割合で変化したときに誘導起電力1Vを生じる自己インダクタンスを1ヘンリーという

相互誘導

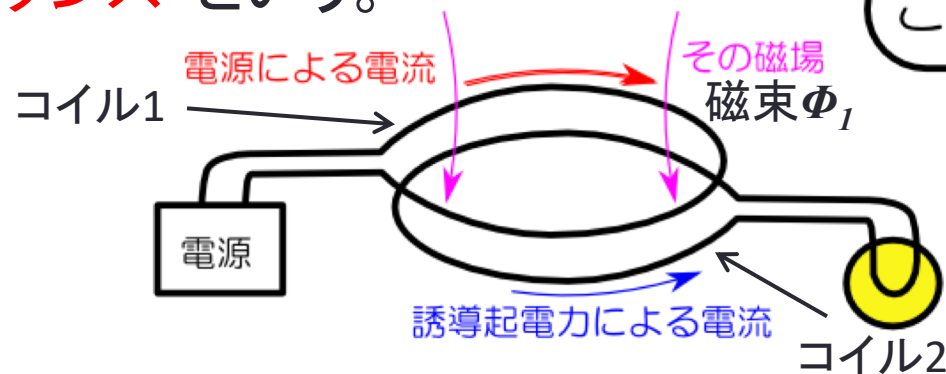
下図のようにコイル1に電流を流すと磁束 Φ_1 が生じる
この磁束はコイル2を貫き、その磁束 Φ_{12} は I_1 に比例して

$$\Phi_{12} = L_{12}I_1$$

コイル1の電流をスイッチでON,OFFするごとにコイル2は

$$V = -\frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t}$$

の誘導起電力が生じる。これを **相互誘導** といい、
 L_{12} を**相互インダクタンス** という。



これが相互誘導

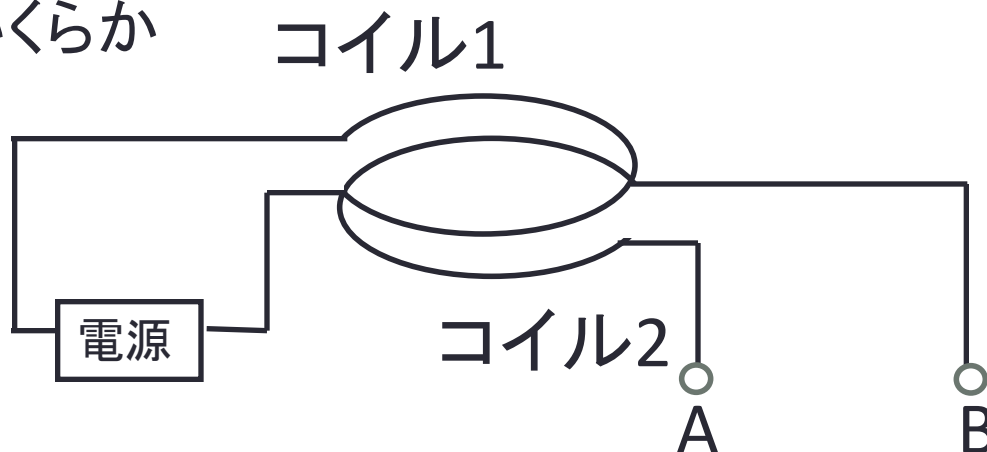
例題2

図の様にコイルを配置して、コイル1では2秒間で0 [A]から10 [A]に電流が増える。コイル1の自己インダクタンスを10 [H]とすると、

- (1) 10 [A]の電流によりコイル1で発生する磁束はいくらか。
- (2) また自己誘導の起電力はいくらか。

コイル1と2の相互インダクタンスを20 [H]とすると、

- (3) コイル1に電流10[A]が流れた瞬間コイル2を貫く磁束はいくらか。
- (4) 相互誘導の起電力はいくらか



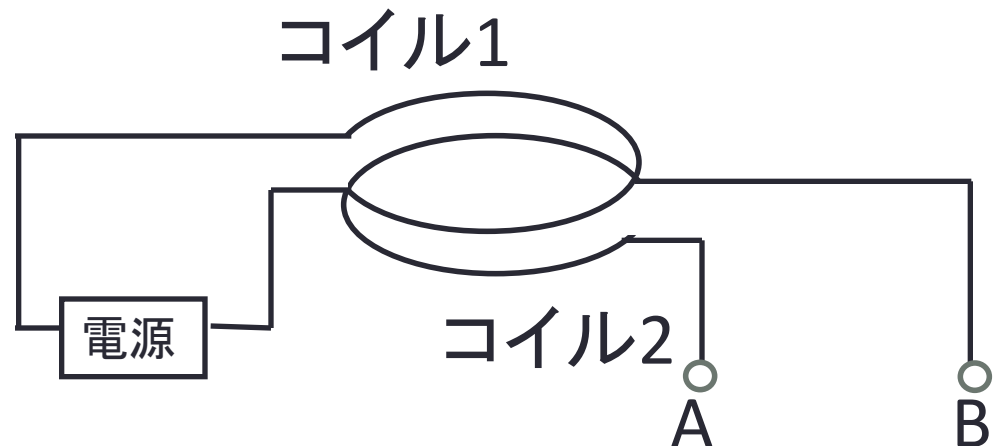
例題2の解答

(1) $\Phi = LI = 10 \text{ [H]} \times 10 \text{ [A]} = 100 \text{ [Wb]}$

(2) $V = -\Delta\Phi / \Delta t = 100 - 0 \text{ [Wb]} / 2 \text{ [s]} = 50 \text{ [V]}$

(3) $\Phi_{12} = L_{12}I_1 = 20 \text{ [H]} \times 10 \text{ [A]} = 200 \text{ [Wb]}$

(4) $V = -\Delta\Phi_{12} / \Delta t = 200 - 0 \text{ [Wb]} / 2 \text{ [s]} = 100 \text{ [V]}$



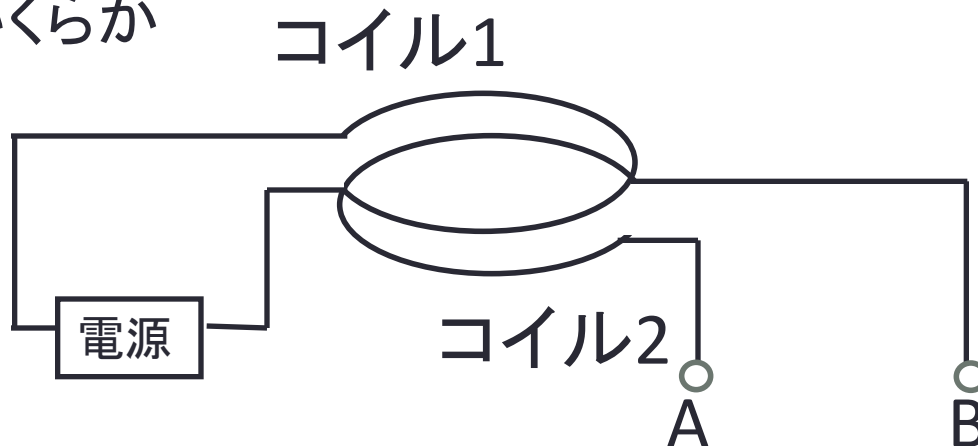
演習2

図の様にコイルを配置して、コイル1では2秒間で10[A] から25[A]に電流が増える。コイル1の自己インダクタンスを4 [H]とすると、

- (1) 25[A]の電流によりコイル1で発生する磁束[Wb]はいくらか。
- (2) また自己誘導の起電力[V]はいくらか。

コイル1と2の相互インダクタンスを10 [H]とすると、

- (3) コイル1に電流25[A]が流れた瞬間コイル2を貫く磁束はいくらか。
- (4) 相互誘導の起電力はいくらか



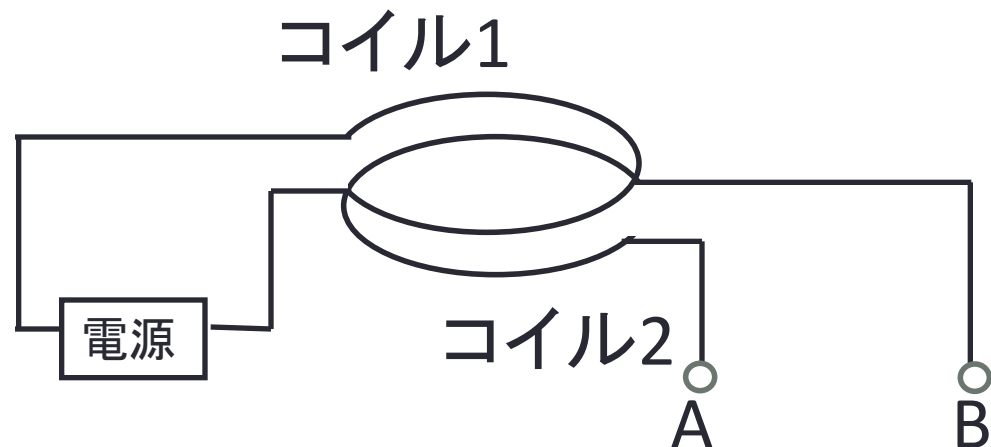
演習2の解答

(1) $\Phi = LI = 4 \text{ [H]} \times 25 \text{ [A]} = 100 \text{ [Wb]}$

(2) $V = -\Delta\Phi / \Delta t = (100-40) \text{ [Wb]} / 2 \text{ [s]} = 30 \text{ [V]}$

(3) $\Phi_{12} = L_{12}I_1 = 10 \text{ [H]} \times 25 \text{ [A]} = 250 \text{ [Wb]}$

(4) $V = -\Delta\Phi_{12} / \Delta t = (250-100) \text{ [Wb]} / 2 \text{ [s]} = 75 \text{ [V]}$



まとめ

電磁誘導

$$\text{起電力 } V = \frac{\text{磁束の変化量}}{\text{経過時間}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{S\Delta B}{\Delta t}$$

・巻き数 n の場合

$$V = \frac{S\Delta B}{\Delta t} \times n$$

自己誘導

磁束:

$$\Phi = LI$$

起電力:

$$V = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t}$$

相互誘導

$$\Phi_{12} = L_{12}I_1, \quad V = -\frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t}$$

練習問題3-1

以下の①~④の場合について、このとき発生する誘導起電力[V]を求めよ。

- ① コイルの円の面積 $5 \text{ [cm}^2\text{]}$ 、巻き数7、磁石を動かすことによってコイルを貫く磁束密度が10秒間に $1 \text{ [Wb/cm}^2\text{]}$ から $9 \text{ [Wb/cm}^2\text{]}$ に増えた場合
- ② コイルの円の面積 $2 \text{ [cm}^2\text{]}$ 、巻き数4、磁石を動かすことによってコイルを貫く磁束密度が1秒間に $2 \text{ [Wb/cm}^2\text{]}$ から $8 \text{ [Wb/cm}^2\text{]}$ に増えた場合

練習問題3-1 解答

以下の①～④の場合について、このとき発生する誘導起電力[V]を求めよ。

- ① コイルの円の面積5 [cm²]、巻き数7、磁石を動かすことによってコイルを貫く磁束密度が10秒間に1 [Wb/cm²]から9[Wb/cm²]に増えた場合

$$V = \frac{7 \times 5 \times (9 - 1)}{10} = \frac{35 \times 8}{10} = \frac{7 \times 8}{2} = 28 [V]$$

- ② コイルの円の面積2 [cm²]、巻き数4、磁石を動かすことによってコイルを貫く磁束密度が1秒間に2 [Wb/cm²]から8 [Wb/cm²]に増えた場合

$$V = \frac{4 \times 2 \times (8 - 2)}{1} = 8 \times 6 = 48 [V]$$

練習問題3-2

①図の様にコイルを配置して、コイル1では10秒間で0 [A]から5 [A]に電流が増える。コイル1の自己インダクタンスを5 [H]とすると、

、

(1)5 [A]の電流によりコイル1で発生する磁束はいくらか。

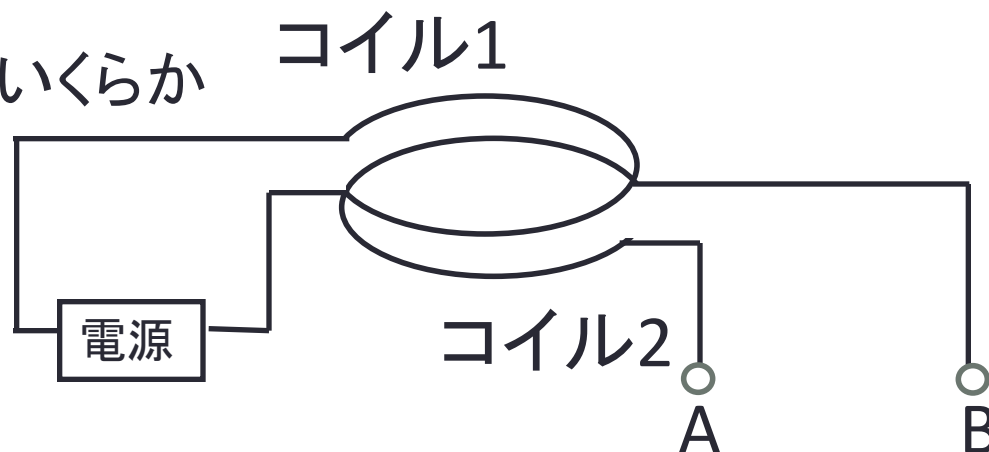
(2)また自己誘導の起電力はいくらか。

コイル1と2の相互インダクタンスを30 [H]とすると、

(3) コイル1に電流5[A]が流れた瞬間コイル2を貫く磁束はいくらか。

。

(4)相互誘導の起電力はいくらか



練習問題3-2 解答

①図の様にコイルを配置して、コイル1では10秒間で0 [A]から5 [A]に電流が増える。コイル1の自己インダクタンスを5 [H]とすると、

(1)5 [A]の電流によりコイル1で発生する磁束はいくらか。

$$\phi_1 = L_1 I = 5 \times 5 = 25 \text{ [Wb]}$$

(2)また自己誘導の起電力はいくらか。

$$V = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{25 - 0}{10} = \frac{25}{10} = 2.5 \text{ [V]}$$

コイル1と2の相互インダクタンスを30 [H]とすると、

(3) コイル1に電流5[A]が流れた瞬間コイル2を貫く磁束はいくらか

$$\phi_{12} = L_{12} I = 30 \times 5 = 150 \text{ [Wb]}$$

(4)相互誘導の起電力はいくらか

$$V = \frac{\Delta \phi_{12}}{\Delta t} = \frac{150 - 0}{10} = \frac{150}{10} = 15 \text{ [V]}$$