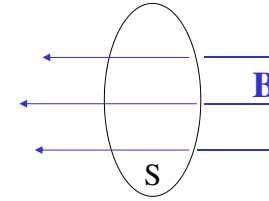
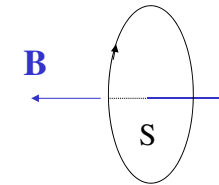


1. 電磁気学Iのおさらい
2. 電流と電流密度
3. オームの法則
4. 金属電子論
5. 準定常電流
6. 電流間に生じる力と磁場
7. ローレンツ力
8. 電流が作る磁場
9. アンペールの法則
10. 前半のまとめと確認
11. 磁束と電磁誘導
12. 自己インダクタンスと相互インダクタンス
13. 磁場のエネルギー
14. 交流回路と複素インピーダンス
15. **まとめ**

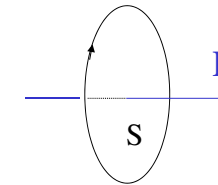
磁束 (magnetic flux):  $\Phi$



一様な磁場中  
 $\Phi = BS$



$\Phi > 0$



$\Phi < 0$

右ネジの関係

回路を貫く磁束が変化すると「電流が流れる」。



回路を貫く磁束が変化すると「起電力が発生する」。



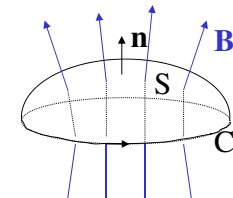
電磁誘導により生じる起電力(ポテンシャル)  $V_e$

$$V_e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \text{ファラデーの誘導法則}$$

- 磁束の時間変化に比例
- 磁束の時間変化を打ち消す向きに生じる

• 回路を貫く磁束:  $\Phi$

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$$



• 回路に生じた起電力:  $V_e =$  曲線Cにそって電場を線積分

$$V_e = \oint_C \mathbf{E} \cdot \mathbf{t} dl$$

ファラデーの誘導法則

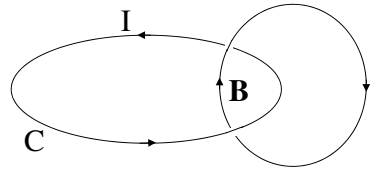
$$\oint_C \mathbf{E} \cdot \mathbf{t} dl = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

微分形

### 4.2 自己インダクタンス

閉じた回路に電流を流すと、自分自身の回路も貫く。



- BはIに比例
  - ΦはBに比例
- $$\Phi = LI$$

準定常電流: 電流の変化があまり速くないとき

$$\Phi(t) = LI(t)$$

変化する磁束は回路に誘導起電力 $V_e$ を生じさせる。

$$V_e = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$$

$$V_e = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$$

$$= -L \frac{dI}{dt}$$

起電力は電流が増えると減らす向きに、減ると増える向きに。



自己誘導

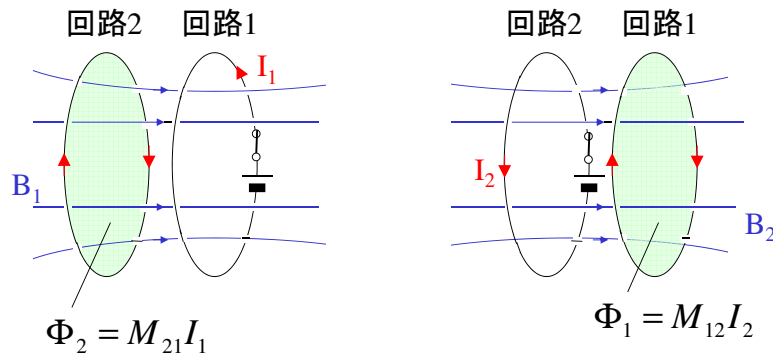
L: 自己インダクタンス(自己誘導係数)

インダクタンスの単位: H (ヘンリー)

$$1\text{H} = 1\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1}$$

### 4.3 相互インダクタンス

相互誘導



回路1に流れる電流 $I_1$ に比例した磁場 $B_1$ が生じ、回路2を貫く磁束 $\Phi_2$ も、 $I_1$ に比例する。  
比例係数: $M_{21}$

回路2に流れる電流 $I_2$ に比例した磁場 $B_2$ が生じ、回路1を貫く磁束 $\Phi_1$ も、 $I_2$ に比例する。  
比例係数: $M_{12}$

$I_1$ が時間変化するとき、回路2に生じる誘導起電力 $V_2$ は

同様に $V_1$ は

$$V_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt}$$

$$= -M_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

$$V_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt}$$

$$= -M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

$M_{21}, M_{12}$ : 相互インダクタンス (相互誘導係数)

$$M_{21} = M_{12} \equiv M$$

電磁場のエネルギー

単位体積あたりの電場のエネルギー

$$u_e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2\epsilon_0} D^2 = \frac{1}{2} ED \quad (2.13)$$

単位体積あたりの磁場のエネルギー  $u_m$  は

$$u_m = \frac{1}{2\mu_0} B^2 = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} BH \quad (4.5)$$

4.5 LC振動回路

$$V_C(t) = -\frac{Q(t)}{C}$$

$$V_L(t) = -L \frac{dI(t)}{dt}$$

$$V_C(t) + V_L(t) = 0$$

$$L \frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \frac{Q(t)}{C} = 0$$

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + kx(t) = 0$$

単振動

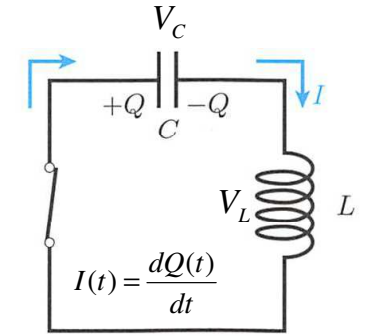
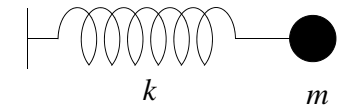


図 4.6 LC 振動回路



4.6 交流回路と複素インピーダンス

• 直流回路  $V = RI$

• 交流回路

$$\begin{cases} L \frac{dI(t)}{dt} + RI(t) + \frac{Q(t)}{C} = V(t) \\ \frac{dQ(t)}{dt} = I(t) \end{cases}$$

$V(t) = V_0 \cos(\omega t)$  として解く

$$\begin{cases} \hat{V}(t) = V_0 e^{i(\omega t)} \\ \hat{I}(t) = I_0 e^{i(\omega t + \alpha)} = I_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t} \\ \hat{Q}(t) = Q_0 e^{i(\omega t + \beta)} = Q_0 e^{i\beta} e^{i\omega t} \end{cases}$$

複素化!

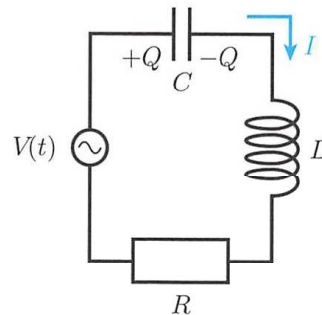


図 4.8 LCR 回路

交流回路



直流回路

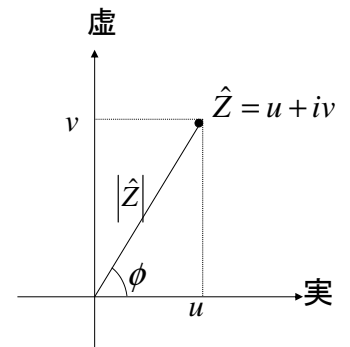
$$\begin{aligned} V_0 &= \hat{Z} \hat{I} \\ \hat{Z} &= R + i \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \end{aligned}$$

インピーダンス

複素平面

$$|\hat{Z}| = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

$$\tan \phi = \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}$$



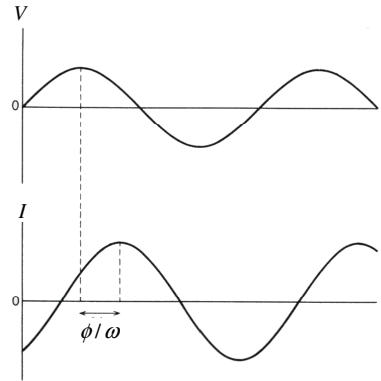
$$I(t) = \text{Re}[\hat{I}(t)] = \text{Re}[I_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t}] = \text{Re}[I_0 e^{-i\phi} e^{i\omega t}]$$

$$= \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}} \cos(\omega t - \phi) \quad \tan \phi = \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}$$

- $I(t)$ は、起電力  $V(t)$  に比例せず位相  $\phi$  だけずれる。
- 振幅は  $\omega$  に依存する。

$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$  のとき、振幅最大。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} : \text{共鳴振動数}$$



$$\hat{Q}(t) = Q_0 e^{i\beta} e^{i\omega t} = \frac{\hat{I}(t)}{i\omega} = \frac{-i}{\omega} I_0 e^{-i\phi} e^{i\omega t} = \frac{I_0}{\omega} e^{-\frac{\pi}{2}i} e^{-i\phi} e^{i\omega t}$$

$$Q(t) = \text{Re}[\hat{Q}(t)] = \frac{V_0}{\omega \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}} \cos(\omega t - \phi - \frac{\pi}{2})$$

- $Q(t)$ は、電流  $I(t)$  に対して位相が  $\pi/2$  ずれる。
- 振幅は  $\omega$  に依存する。

## 電磁気学II 最終レポート

- MyKONANの課題から提出してください。  
締め切りは7/25(土)23:59です。期限厳守！
- レポートをスキャンするかスマホで撮って送ってください。  
(MyKONANの容量制限に注意のこと)
- 何を見ても良いし、友達と相談してもいいけど、  
他人のレポートをそのまま写したりしないこと。

半年間、お疲れさまでした！