

電磁気学 1 B 2 情報 2 年 担当：山口芳雄

なぜ電磁気学を学ぶか？ 130余年の歴史

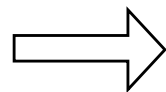
科学・技術の基礎： 科学技術の発展のため

自然現象の理解： 電気・磁気・光現象の学問

自然科学では最も整った体系の学問（物理系）

電気・電子・情報通信の最も基礎科目

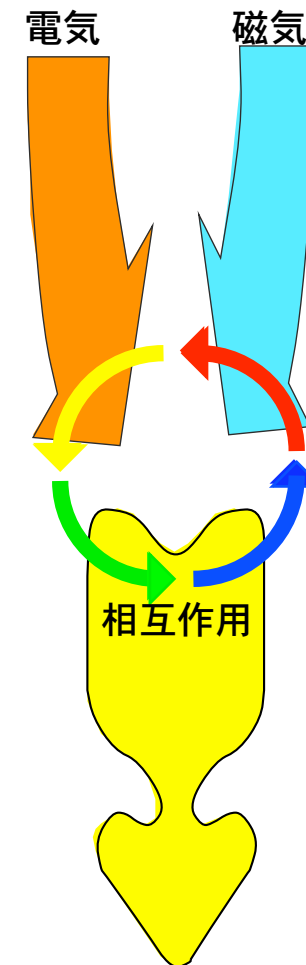
他の分野はその発展形



基本・基礎学問

電磁気学関係年表

1600	磁石の諸性質	ギルバート（イギリス）
1666	（万有引力の法則）	ニュートン（イギリス）
1765	（蒸気機関，産業革命）	ワット（イギリス）
1785	電気・クーロンの法則	クーロン（フランス）
1800	ボルタの電池	ボルタ（イタリア）
1820	電流の磁気作用	エルステッド（デンマーク）
	ビオ・サバールの法則	ビオ・サバール（フランス）
	アンペアの法則	アンペール（フランス）
1826	オームの法則	オーム（ドイツ）
1831	電磁誘導の法則	ファラデー（イギリス）
1834	レンツの法則	レンツ（ロシア）
1840	ガウスの法則	ガウス（ドイツ）
1859	（生物の進化論）	ダーウイン（イギリス）
1861	電磁界の方程式	マックスウエル（イギリス）
1864	光の電磁波説	マックスウエル（イギリス）
1888	電磁波の実証	ヘルツ（ドイツ）
1895	運動流体の電磁気学	ローレンツ（オランダ）
1897	電子の存在確認	トムソン（イギリス）



目標：場（スカラー場，ベクトル場）という 考え方を学ぶ。

電磁気 1 では空間にできる（分布する）静電界を求める問題を扱う

静電界：時間的に変化しない電界

ベクトル場の例：？

スカラー場の例：？

数学（ベクトル解析，微分，積分）を多用する

[http://www.wave.ie.niigata-u.ac.jp/
~yamaguch/ex/index.html](http://www.wave.ie.niigata-u.ac.jp/~yamaguch/ex/index.html) 参照

ベクトル解析，電磁気学に関する資料が載っている。

ベクトルの表記について（約束ごと）

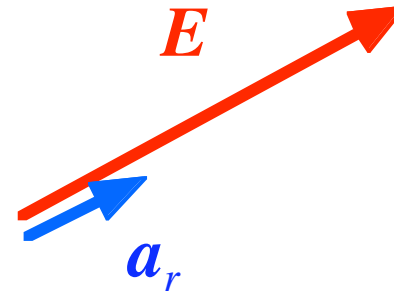
$$\mathbf{E} = E \mathbf{a}_r$$

$\mathbf{E}$ ベクトルとして太字表記

$\vec{E}$ の表記は使わない

$$E = |\mathbf{E}| \quad \text{スカラー}$$

ベクトルの大きさを表す（細字表記）



$\mathbf{a}_r$ 単位ベクトルで方向を表す

$$\mathbf{a}_r = \frac{\mathbf{E}}{|\mathbf{E}|} = \frac{\mathbf{E}}{E}$$

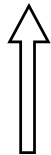
$$|\mathbf{a}_r| = 1$$

ベクトル $\mathbf{E}$ と 大きさ（スカラー量） E を混同してはいけない

電磁気学の体系

波動方程式 $\nabla^2 E - \epsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} = 0$ Poynting Vector $P = E \times H$

$\nabla \cdot D = \rho$ $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ Maxwellの方程式 $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$ $\nabla \cdot B = 0$



$\oint_c E \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$ ファラデーの法則
レンツの法則 $emf = -\frac{d\Phi}{dt}$ 変位電流 $\frac{\partial D}{\partial t}$

静電容量 $C = \frac{Q}{V} = \frac{\int_s \epsilon E \cdot dS}{-\int_a^b E \cdot dr}$

電荷保存則 $\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

オームの法則 $J = \sigma E$

電流 $I = \int_s J \cdot dS$

インダクタンス $L = \frac{\Psi}{I}$
 Ψ 鎖交磁束

エネルギー密度 $W_e = \frac{E \cdot D}{2}$

抵抗 $R = \frac{V}{I} = \frac{-\int_a^b E \cdot dr}{\oint_s \sigma E \cdot dS}$

エネルギー密度 $W_m = \frac{H \cdot B}{2}$

$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon}$ $\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{v'} \frac{\rho(r')}{r} dv'$
 $E = -\nabla \phi$

$\nabla^2 A = -\mu J$ $A(r) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{v'} \frac{J(r')}{r} dv'$
 $B = \nabla \times A$

ローレンツ力 $F = q(E + v \times B)$

電位 $\phi(r) = -\int_{\infty}^r E \cdot dr$ $\nabla \times E = 0$

電流に働く力 $F = I \times B = q v \times B$

電界 $E = \frac{F}{q}$ ガウスの法則 $\nabla \cdot D = \rho$

磁束密度 $B = \mu H$ $\nabla \cdot B = 0$

クーロンの法則 電束密度 $D = \epsilon E$

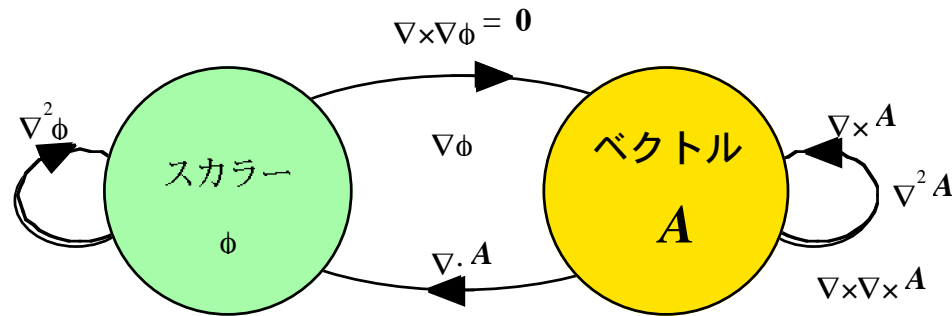
磁界 $\nabla \times H = J$

電荷に働く力 $F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r^2} a_r$

ビオサバールの法則 アンペアの法則
 $dH = \frac{I}{4\pi r^2} dl \times a_r$ $\oint_c H \cdot dl = I$

電磁気学1の範囲

ベクトル公式一覧



$$A \cdot B = B \cdot A$$

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$

$$A \cdot B \times C = A \times B \cdot C$$

$$\nabla \cdot \nabla = \nabla^2$$

$$\nabla \cdot (\phi A) = (\nabla \phi) \cdot A + \phi \nabla \cdot A$$

$$\nabla \cdot (A + B) = \nabla \cdot A + \nabla \cdot B$$

$$\nabla \cdot (A \times B) = B \cdot (\nabla \times A) - A \cdot (\nabla \times B)$$

$$\nabla (A \cdot B) = (A \cdot \nabla) B + (B \cdot \nabla) A + A \times (\nabla \times B) + B \times (\nabla \times A)$$

$$\nabla \times (A \times B) = A(\nabla \cdot B) - B(\nabla \cdot A) + (B \cdot \nabla) A - (A \cdot \nabla) B$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times A) = 0$$

$$\nabla (\phi + \psi) = \nabla \phi + \nabla \psi$$

$$\nabla (\phi \psi) = (\nabla \phi) \psi + \phi (\nabla \psi)$$

$$\nabla \left(\frac{\phi}{\psi} \right) = \frac{(\nabla \phi) \psi - \phi (\nabla \psi)}{\psi^2}$$

$$\nabla \times (\phi A) = \phi \nabla \times A + (\nabla \phi) \times A$$

$$\nabla \times (A + B) = \nabla \times A + \nabla \times B$$

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$$

$$A \times B = -B \times A \quad A \times A = 0$$

$$A \times (B + C) = A \times B + A \times C$$

$$A \times (B \times C) = (A \cdot C) B - (A \cdot B) C$$

$$\nabla \times \nabla \phi = 0$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times A) = 0$$

ガウスの定理

$$\oint_S A \cdot dS = \int_V \nabla \cdot A dv$$

ストークスの定理

$$\oint_C A \cdot dl = \int_S \nabla \times A \cdot dS$$

グリーンの定理 1

$$\oint_S (\phi \nabla \psi) \cdot dS = \int_V (\nabla \phi \cdot \nabla \psi + \phi \nabla^2 \psi) dv$$

グリーンの定理 2

$$\oint_S (\phi \nabla \psi - \psi \nabla \phi) \cdot dS = \int_V (\phi \nabla^2 \psi - \psi \nabla^2 \phi) dv$$

座標系とベクトル成分, 演算子

直角座標

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z$$

$$\nabla \phi = \mathbf{a}_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + \mathbf{a}_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + \mathbf{a}_z \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{a}_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \mathbf{a}_y \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \mathbf{a}_z \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right)$$

直角

$$\nabla \times \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{a}_y & \mathbf{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

直角

$$\nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{\rho} \begin{vmatrix} \mathbf{a}_\rho & \rho \mathbf{a}_\varphi & \mathbf{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial \rho} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_\rho & \rho A_\varphi & A_z \end{vmatrix}$$

円筒, 円柱

円筒, 円柱座標

$$\mathbf{A} = A_\rho \mathbf{a}_\rho + A_\varphi \mathbf{a}_\varphi + A_z \mathbf{a}_z$$

$$\nabla \phi = \mathbf{a}_\rho \frac{\partial \phi}{\partial \rho} + \mathbf{a}_\varphi \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi} + \mathbf{a}_z \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{a}_\rho \left(\frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \mathbf{a}_\varphi \left(\frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right) + \mathbf{a}_z \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\varphi) - \frac{\partial A_\rho}{\partial \varphi} \right]$$

円筒, 円柱

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{a}_r \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta A_\varphi) - \frac{\partial A_\theta}{\partial \varphi} \right] + \mathbf{a}_\theta \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial A_r}{\partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial r} (r \sin \theta A_\varphi) \right]$$

球

$$+ \mathbf{a}_\varphi \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right]$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \begin{vmatrix} \mathbf{a}_r & r \mathbf{a}_\theta & r \sin \theta \mathbf{a}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ A_r & r A_\theta & r \sin \theta A_\varphi \end{vmatrix}$$

球

球座標

$$\mathbf{A} = A_r \mathbf{a}_r + A_\theta \mathbf{a}_\theta + A_\varphi \mathbf{a}_\varphi$$

$$\nabla \phi = \mathbf{a}_r \frac{\partial \phi}{\partial r} + \mathbf{a}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \mathbf{a}_\varphi \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (A_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi}$$

$$\mathbf{a}_r \quad r \mathbf{a}_\theta \quad r \sin \theta \mathbf{a}_\varphi$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \quad \frac{\partial}{\partial \theta} \quad \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

$$A_r \quad r A_\theta \quad r \sin \theta A_\varphi$$

ISBN978-4-254-22043-8

基礎がわかる**電気磁気学**

佐藤和紀 [編著]
大山龍一郎
上瀧 實
春名 勝次
金井 徳兼
高畠 信也 [著]

朝倉書店

3200円+税

電磁気I

山口芳雄

電磁気2

山田寛喜

教科書の比較

日本
多種類

アメリカ
初心者に分かり易い
経験上 better

この講義での教科書

基礎電磁気学
がわかる

プリント配布

ホームページ掲載

<http://www.wave.ie.niigata-u.ac.jp/~yamaguch/ex/index.html> 参照

評価法

中間テスト+期末テスト

2

+ レポート

>
=
<

60点

JABEE

CAP制

GPA

累積GPA

国際認定へ（文部科学省基準）

1 単位

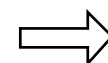
4 5 時間

の学習をもって当てる

2 単位

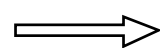
9 0 時間

2 単位科目 9 0 時間 / 1 5 週間

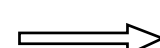


6 時間/週

ところが120 分を



90 分で置換



4.5 時間/週

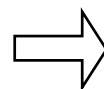
最低限必要

4.5 時間/週
の内訳

授業 9 0 分

復習 9 0 分

予習 9 0 分



授業 9 0 分

復習 1 6 0 分

予習 2 0 分

reportを含む

復習を十分に！

手を動かす

式を書く

図を描く

イメージする

眺めていると理解できなくなる

目次

第1章	はじめに	第6章	静電エネルギー
第2章	クーロン力と電界	第7章	導体
第3章	ガウスの法則	第8章	オームの法則
第4章	電位	第9章	誘電体
第5章	ラプラスの方程式	第10章	静電容量

H20年度 電磁気学Ⅰ 講義予定

4/14(月1限)	6/16
4/21	6/23
4/28	6/30
5/12	7/7 (特別講義)
5/19	7/14
5/26	7/23
6/2 (中間テスト)	7/28 (定期試験)
6/9	8/4 (補講)