

物理学総論：補足

成清，修
九州大学大学院理学研究院物理学部門：准教授

<https://hdl.handle.net/2324/7159638>

出版情報：2023-12-06
バージョン：
権利関係：



物理学総論

補足

九州大学・理学部・物理学科

成清 修

物理学総論の講義ノート (<https://hdl.handle.net/2324/4354916>) の補足として電磁気に関するまとめを A-1 と A-2 で行います。

A-1

電磁場が時間に依存しない場合のまとめを積分形で書く。「湧き出し」*と「渦」で整理できる。

- 最初の式はガウスの法則。左辺の曲面 S 上の面積分は S を貫いて外に出ていく電気力線の総数（電束の総量）。右辺は点電荷の電荷量 Q 。 $Q>0$ の場合は左下の図のように湧き出し。 $Q<0$ の場合は左下の図で矢印を逆向きにして吸い込み。電場ベクトルの向きは電気力線に接する向き、電場ベクトルの大きさは電気力線の密度で表現。 S 内にたくさんの電荷がある場合は、それぞれの電荷の寄与を重ね合わせて、24 頁の①式となる。
- 磁場については、湧き出しまたは吸い込みはない。これは、単独の磁荷が存在しない（N 極または S 極は単独で存在できない）ことに対応。結果として磁力線は右下の図のように閉じた曲線となる。
- 4 つ目の式はアンペールの法則。左辺の閉曲線 C 上の線積分は磁場が渦状のベクトル場であればゼロでない値をもつ。右辺は 1 本の電流の大きさ I 。磁場ベクトルの向きは磁力線に接する向き、磁場ベクトルの大きさは磁力線の密度で表現。 C 内をたくさんの電流が流れる場合は、それぞれの電流の寄与を重ね合わせて、25 頁の最初の式となる。
- 電場については、渦はない。これは、電気力線が正の電荷から湧き出て負の電荷に吸い込まれることに対応。

* 注目している電荷が正の場合は湧き出し、負の場合は吸い込み。

・ 静電場と静磁場のまとめ

(電場)

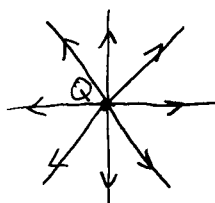
$$\int_S (\vec{D} \cdot \vec{n}) dS = Q$$

電荷から電気力線が湧き出す
(電荷が電場をつくる)

$$\oint (\vec{E} \cdot d\vec{l}) = 0$$

渦なし

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases}$$



電気力線

$$u_e = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E}$$

エネルギー密度

(磁場)

$$\int_S (\vec{B} \cdot \vec{n}) dS = 0$$

湧き出しなし

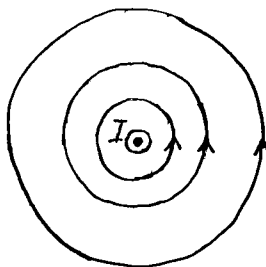
$$\oint (\vec{H} \cdot d\vec{l}) = I$$

電流のまわりに磁力線の渦ができる

(電流が磁場をつくる)

※ 磁石は環状電流

※ 物質中の磁気分極 ← 磁化電流



磁力線

$$u_m = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H}$$

A-2

積分形のガウスの法則およびアンペールの法則を微小領域に適用すると、湧き出しが発散、渦が回転として表現された微分形の法則が得られる。

- ガウスの法則：（原因）電荷密度 → （結果）電束密度の発散
- アンペールの法則：（原因）電流密度 → （結果）磁場の回転

磁場が時間変化する場合は、積分形のアンペールの法則（25 頁の最初の式）と同じ形の積分形のファラデーの電磁誘導の法則（25 頁の④式）が成り立つ。左辺の閉曲線 C 上の線積分は電場が渦状のベクトル場であればゼロでない値（回路に生じる誘導起電力）をもつ。右辺は回路を貫く磁束の時間変化。微分形に移ると（A-2 のいちばん下）

- ファラデーの電磁誘導の法則：（原因）磁束密度の時間変化 → （結果）電場の回転

ファラデーの電磁誘導の法則において電場と磁場の役割を交換した法則も成り立ち、アンペールの法則の電流密度の役割を電場の時間変化が行う（A-2 の下から 2 番目）

- マクスウェルの変位電流の法則：（原因）電場の時間変化 → （結果）磁場の回転

全部まとめて書いたのが 26 頁の微分形のマクスウェル方程式**である。

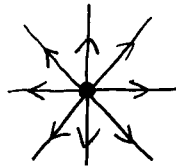
積分形の法則も微分形の法則もすべて**経験則**である。

** 磁場の発散がゼロなのは対称性がよくないと昔から言われている・・・

湧き出し

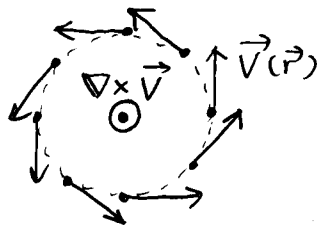
$\nabla \cdot \vec{w}$: 単位体積からの単位時間あたりの湧き出し

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$



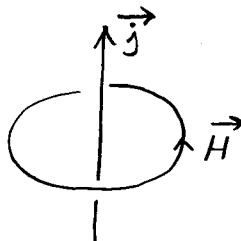
渦

$\nabla \times \vec{V}$: ベクトル場 $\vec{V}(\vec{r})$ の配置が作る渦度ベクトル



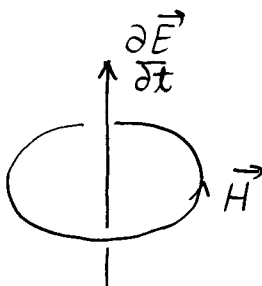
電流があると
その回りに
磁場ができる

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}$$



電場が
時間変化すると
磁場には
渦ができる

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



磁場が
時間変化すると
電場には
渦ができる

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

