

# [PEM09-P11]ベクトルポテンシャルによるプラズマ中の荷電粒子の挙動の理解

唐澤信司 (宮城工業高等専門学校・名誉教授)

E-poster  
 日本語訳

E-mail: [shinji-karasawa@biglobe.jp](mailto:shinji-karasawa@biglobe.jp) URL: <http://www7b.biglobe.ne.jp/~shinji-k/index.htm>

キーワード: プラズマ、磁気結合、地磁気、コロナ加熱、ベクトルポテンシャル、コロナ加熱、超伝導、アハロノフ-ボーム効果

## はじめに

プラズマの中で運動している荷電粒子の間で作用している磁気的な作用はベクトルポテンシャルによって記述することができます。

適応例として、地磁気の日変化が電離層の運動している一部の電子が陽子(H<sup>+</sup>)の運動によるベクトルポテンシャルの作用を受けて平行電流を若干増加する現象を説明できます。

## 2. 電離層において運動している電子と運動している陽子(H<sup>+</sup>)の間の磁気結合の存在

図1.に示すように、磁気的平穏日に穏やかな日の地磁気は正午頃に規則的に地磁気の強度の0.1%程度の増加が観測されます。この地磁気の日変化は、電離層で発生する電子が増加することが関与しています。

図2.に示すように、地球の自転で周回する熱圏のH<sup>+</sup>による電流は、南から北へ向かう地磁気を増加することに寄与します。ところが地磁気の日変化は電子による少しの増加です。これは、電子の質量がH<sup>+</sup>の1836分の1であるため、電離層において電子群の一部が磁気結合によってH<sup>+</sup>の運動方向の反対方向に変化すると説明できます。この現象は平行電流が磁気的エネルギーの状態を低いとするベクトルポテンシャルの性質で説明されます。

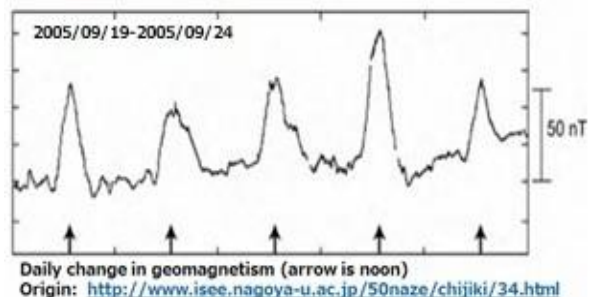


図1. 地磁気の日々の変化(矢印は正午です)

## 3.ベクトルポテンシャルにより記述する運動している荷電粒子間の磁气的相互作用

電界Eは、静電ポテンシャル(V)の勾配により与えられ、 $E = -\text{grad } V$  (1). 電荷(q)の静電エネルギー(U<sub>m</sub>)は(3)式です。

$$U_m = qV \quad (2).$$

磁場HはAのrotationによって定義されます。即ち、 $\mu_0 H = \text{rot } A$  (3).

Aは電流(i<sub>2</sub>)にエネルギー(U<sub>m</sub>)を与えます。 $U_m = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{A}$  (4).

負の符号は平行電流のエネルギーが下がるようにしています。 $\mathbf{j}_2$ の磁気エネルギーによる回転力は(6)式に示すローレンツ力(F<sub>L</sub>)です。

$$\mathbf{F}_L = -\mathbf{j}_2 \cdot \text{rot } \mathbf{A} = -\mathbf{j}_2 \times \mathbf{B} \quad (5)$$

荷電粒子の移動によって時間変化するEとHおよび磁束密度Bの関係はマックスウエルの方程式(6)および式(7)で表されています。

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t \quad (6).$$

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = -\text{rot } \mathbf{E} \quad (7).$$

式(3)と式(7)より  $\partial \mathbf{A} / \partial t = -\mathbf{E}$  (8) (6)式と

$$(4)式から \text{rot}(\text{rot } \mathbf{A}) = \mu_0 (\mathbf{j} - \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t) \quad (9).$$

$$(7)式より \text{rot}(\text{rot } \mathbf{A}) = \mu_0 (\mathbf{j} - \epsilon_0 \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2) \quad (10).$$

および(3)式から公式  $\text{rot}(\text{rot } \mathbf{A}) = \text{grad}(\text{div } \mathbf{A}) - \Delta \mathbf{A}$ 、およびゲージ変換  $\text{div } \mathbf{A} + \text{grad } \Lambda = 0$  [1]を用い、

$$\Delta \mathbf{A} = (\mu_0 \epsilon_0) \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2 - \mu_0 \mathbf{j} \quad (11).$$

ここで、 $\Delta \mathbf{A} = \partial^2 \mathbf{A} / \partial x^2 + \partial^2 \mathbf{A} / \partial y^2 + \partial^2 \mathbf{A} / \partial z^2$ .

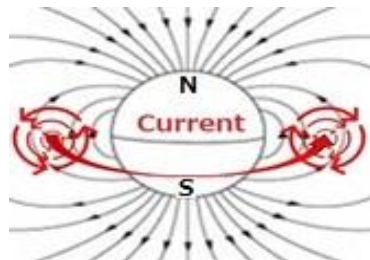


図2. 熱圏におけるH+の流れによる磁性

## 4. ベクトルポテンシャルの特性

(11)式は電流密度がj≠0の場合、波動方程式になります。 $\Delta \mathbf{A} = (\mu_0 \epsilon_0) \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2$  (12).

(11)式は  $\partial \mathbf{A} / \partial t = 0$  の場合には(12)式となります。

$$\Delta \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j} \quad (13).$$

(13)式はポアソンの方程式(14)式に対応します。

$$\Delta V = -\rho / \epsilon_0 \quad (14).$$

ここで、Aは距離の二乗に反比例します。また、Aは電流に比例するため、荷電粒子の速度に比例し、荷電粒子の密度に比例します。

図3に電流(i)によるAおよびB方向を示します。

## 5. ベクトルポテンシャルによる現象の理解

### 5.1 太陽の陽子を加速するメカニズム

極性が同じ粒子である場合、並列に高速で運動する荷電粒子間では平行電流として互いに引き合い、極性が異なる場合は反平行電流として反発し合います。

そこで、太陽のプラズマでは、高速運動の荷電粒子が磁気結合によって束ねられた構造を作り出します。磁気エネルギーによる正のフィードバック再生反応は、荷電粒子の速度を加速します。太陽のコロナ加熱はこのメカニズムによって説明できます。

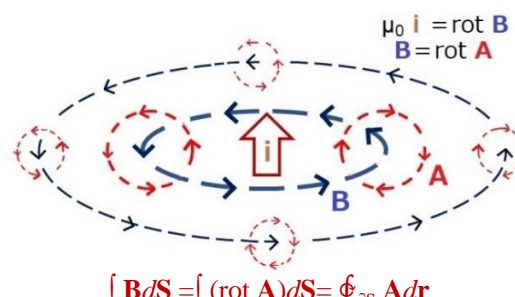


図3. 電流(i)の方向に対するAとBのベクトルの方向

## 5.2 超伝導体の反磁性機構

超伝導状態では、正電荷の格子振動が負の電子を覆うように運動しています。超伝導状態に磁場が加えられると磁気エネルギーを下げるために超伝導体内部の荷電粒子が外部磁性を相殺するが、外部には電荷粒子の運動による磁性が現れます。超伝体内の荷電粒子は磁気エネルギーを低くするためにその運動方向を変化します。

## 5.3 アハロノフ・ボーム効果

図4に示すように、この効果は、ソレノイドの外側を上下に通過する電子が受け取るベクトルポテンシャルの方向が異なるので、通過する電子の物質波の位相が異なり、干渉縞はソレノイドの電流によって変化します。1986年、外村彰氏がこの効果の実証実験に成功しました。

## 6. 結論

ベクトルポテンシャルは、荷電粒子の運動による局所的で動的な磁気を扱うことができます。

[参考資料]

<https://youtu.be/OlIsghDbujA> 2021/4/15 up load

[1] 前野昌弘、よくわかる電磁気学、東京図書、2010

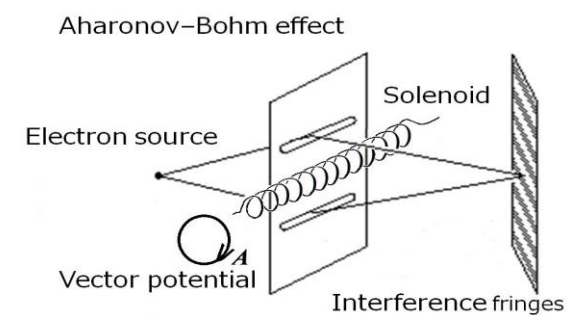


図4. アハロノフ=ボーム効果