

電離層および磁気圏の形成に及ぼす太陽の活動の影響 — 走行する荷電粒子の磁気による磁気圏の形成 —

唐澤 信司[†]

[†] 宮城工業高等専門学校 名誉教授 〒981-1233 宮城県名取市小山 1-3-6

E-mail: †shinji-karasawa@kbh.biglobe.ne.jp

あらまし 荷電粒子の運動による磁氣的反応はベクトルポテンシャルにより記述できます。ベクトルポテンシャルは空間の属性として多くの様々な荷電粒子の運動による磁気的作用を取り扱うことができます。地球の昼半球の上空では電離されて生成された電子群が電離層を形成し、地球の自転で周回します。その運動する荷電粒子群によって地磁気が形成されます。地球の東側を通過する太陽風の効果が西側を通過する効果を陵駕し、自転で東に移動する電子群が磁気を伴うので地球の外側で南から北へ向かう地磁気が発生します。木星および土星では自転で水素の大気が反時計回転方向に周回し、東側で太陽風の陽子が磁氣的に結合するので陽子の正電荷群が周回して地球の地磁気と反対方向の地磁気が形成されます。

キーワード アハラノフ=ボーム効果, ベクトルポテンシャル, 太陽風, 電離層, 磁気圏, オーロラベルト

Effects of solar activity on the formation of the ionosphere and magnetosphere — The effect of high-speed charged particle acting magnetically as a current —

Shinji KARASAWA[†]

[†]Miyagi National College of Technology, Professor emeritus 1-3-6 Oyama, Natori, Miyagi, 981-1233 Japan

E-mail: †shinji-karasawa@kbh.biglobe.ne.jp

Abstract Magnetic reactions due to the motion of charged particles are described by vector potential. Vector potential is an attribute of the space, it is possible to deal with the action of magnetism due to many motions of charged particles. Sun's electromagnetic waves generate free electrons in upper atmosphere on daytime-hemisphere, and form ionospheres. The ionosphere orbits the Earth by Earth's rotation of counterclockwise rotation, forming geomagnetism from south to north outside of the Earth, because the charged particles that exercise have magnetism. In Jupiter and Saturn, the polarity of the magnetosphere is opposite of the Earth's magnetosphere, because positive charges of proton sent from Sun are added to upper atmosphere of hydrogen, and orbits in counterclockwise direction by rotation of the giant gas planet.

Keywords Aharonov-Bohm effect, Vector potential, Solar wind, Ionosphere, Magnetosphere, Aurora belt

1. 緒言

磁気圏—電離圏の太陽風変動については多くの研究があります[1]。著者は2019年に運動する荷電粒子は磁気を持ち、平行して高速で運動する同じ粒子は磁氣的に結合し、並走する極性の異なる荷電粒子間では反発するとして太陽風の影響を報告しました[2][3]。

従来は磁場を先に仮定して磁場に運動する電子が先に取り込まれ、それが陽子には斥力となるので、陽子の影響は無視されてきました。ところが、移動する荷電粒子は移動する磁気を伴います。運動する陽子が電子の運動を左右して、磁気を誘導します。

荷電粒子の運動による磁気に関して、荷電粒子の運動が、磁界がない空間においてベクトルポテンシャルの影響を受けるというアハラノフ=ボーム効果[AB効果]があります[4]。AB効果の実証実験によれば磁力線が出ないようにソレノイドコイルを超電導体

で囲み、電子をコイルの左右の外側を通過させると物質波の位相差による干渉縞がソレノイドの電流により変化します。

磁界という閉曲線を先に考えると運動する荷電粒子間の作用を媒介する移動する局所的な空間の属性の作用の影響が見落とされてしまいます。

電磁気学において静電気のポテンシャルエネルギーが電荷と電位の積で示されますが、電流とベクトルポテンシャルの関係も同様な式が示されます。

電磁流体理論を基礎に置いた磁気リコネクション理論では磁力線が繋ぎ変えられるときに磁力線に取り込まれたエネルギーが放出される理論があります[5]。

ところが、太陽の脱出速度は617.5km/secであり、太陽表面では運動する荷電粒子が重力で引き戻されて弧を描きます。その表層の状態は運動する荷電粒子同士がベクトルポテンシャルを介した結合で連なるということと説明できます。

S. Karasawa, "Effects of solar activity on the formation of the ionosphere and magnetosphere"
 -The effect of high-speed charged particle acting magnetically as a current-

太陽風の陽子は地上には届きません。従来は地球には地磁気によって太陽風の陽子は遮断されるので、太陽風の陽子の影響はないとされてきました。確かに、太陽風の高速の陽子は地球の大気分子と衝突を繰り返して、地球の地上には届きません。しかし、地球の重力では水素を保持できないにも拘わらず、上空 80 km 付近に水素原子の密度のピークが存在し続けています [6]p872。太陽風の陽子は脱出に際して秒速で数百 km の速度を持っており、その陽子が反時計回転方向に自転する惑星の東側をすり抜ける際に同じ方向に運動する大気と衝突して混ざり流体力学的に加速します。その東側の効果は西側の側面をすり抜ける減速の効果を陵駕します。地球の自転より速く大気を西から東に移動させているのは太陽風の陽子の運動エネルギーです。

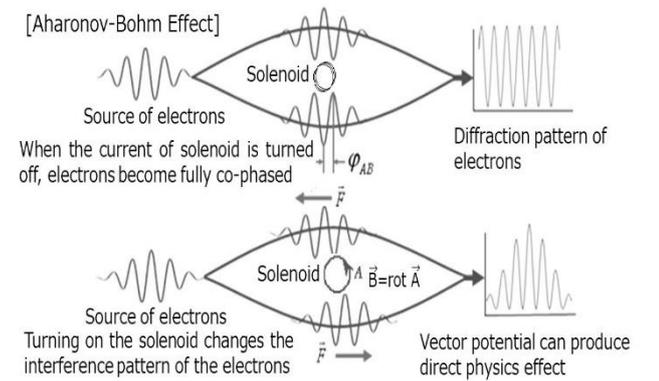
太陽の電磁波が地球の昼半球上空で大気を分子を電離して電子密度の高い電離層を形成し、そのマイナス電荷の移動による時計回転方向の電流が南極から北極に向かう地磁気を形成します。

他方、木星と土星は水素の大気に太陽風が衝突してプラスイオンが多くなり、反時計回転方向に速い速度で周回しています。その地磁気は地球の磁場と逆方向で北極から南極に向かうということで説明ができます。

2. 高速で動く荷電粒子間の相互作用

2.1 動く荷電粒子のベクトルポテンシャル

AB 効果は理論的に動く電子の物質波は経路上に磁場の無い空間でもベクトルポテンシャルの相違によりハミルトニアンが相違して位相差を生じて、物質波が重なり合う場所で物質波の干渉縞が現れると導かれた効果です。図.1 に AB 効果の実証の様子を示します。



Reproduced by S. Karasawa from <https://unlcms.unl.edu/cas/physics/batelaan/images/ABTest.jpg>

Fig.1 Method for verifying the AB effect (observing interference fringes due to the phase difference generated by electron waves passing outside the solenoid interacting with the motion of the charged particles those are responsible for the excitation current of the coil)

図.1 AB 効果を検証する方法(ソレノイドの外を通過する電子波がコイルの励磁電流を担う荷電粒子の運動と相互作用して発生する位相差を干渉縞で観測する)

A-B 効果の実験による実証は 1986 年に外村彰(A. Tonomura)が非常に微細なドーナツ状の磁石を超伝導体で取り囲み、その磁石の外部に磁場が漏れ出すことを防ぎドーナツ型磁石内部に磁場を存在させて、電子線をドーナツ状磁石の孔の中と、磁石の外側に通して、電子線ホログラフィーの干渉縞で実証しました[7]。

コイルに電流を流して磁界を発生する現象は、円形に並んで移動する荷電粒子群による一様に移動するベクトルポテンシャル(A)群により磁界(B)ができます。そのベクトルポテンシャルを(2.1)式で定義します。

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (2.1)$$

この定義は閉回路の性質である $\text{div } \mathbf{B} = 0$ を満足します。マクスウェルの方程式は微分方程式であり、ポテンシャルの関係式ではゲージ変換を使い積分定数項を取り込みます。

磁場内で電荷の周回運動に対する磁場が持つ位置のエネルギーとして(2.2)式が考えられます。

$$U = -q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A} = -q(v_x A_x + v_y A_y + v_z A_z) \quad (2.2)$$

磁束密度(B)の場所に荷電粒子の電流(qv)が存在すれば、(2.2)式に示すポテンシャルエネルギー(U)により、Aと同じ方向の[qv]は磁気的なエネルギーを小さくするように並ぶ力を受けます。

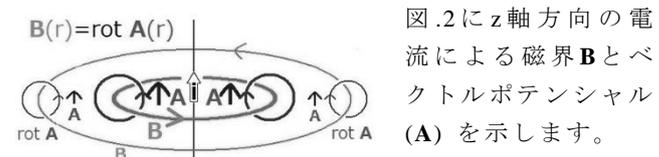


Fig.2 Relationship between magnetic field (B) and vectorpotential (A) associated with current (i)
 図2 電流(i)に伴う磁場(B)およびベクトルポテンシャル(A)の関係

荷電粒子(q)が速度(v)で次々と移動する直線電流(qv)から距離(R)離れた点の磁場の強さはアンペールの法則[$\mathbf{H} = \mathbf{qv} / (2\pi R)$]で表されます。

動いている荷電粒子間の瞬間的な磁気的結合は垂直の方向に $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{B}$ 、その垂直方向に $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ となり、距離に反比例するので、最大の磁気的結合は粒子間の距離に反比例して作用します。クーロン力は距離の2乗に反比例して減少するので、間隔がある値以上離れると磁気的結合の方が強く作用します[2]。

(2.3.a)式に示すマクスウェル方程式は、電流密度(j)に微視的な電荷の移動の変化($\partial \mathbf{D} / \partial t$)を加えて磁場の変化に対応しています。ここで、電荷密度(n)の移動

S. Karasawa, "Effects of solar activity on the formation of the ionosphere and magnetosphere"
 -The effect of high-speed charged particle acting magnetically as a current-

で全ての電流を(2.3.b)式で表すことができます。

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (2.3.a)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = (\mathbf{n}) (\mathbf{q} \mathbf{v}) \quad (2.3.b)$$

点電荷電流も、場の物理量である磁束密 \mathbf{B} が時間変化する場合では回転形の電界 \mathbf{E} (2.4)式が存在します。

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (2.4)$$

ところで、静電気学において電荷と電位の関係式としてポアソンの式は $\Delta V = -\rho / \epsilon_0$ で与えられます。

微視的表現にするために点電荷電流を一様な球の体積($4\pi R^3$)/3の平均値として微視的方程式を考えます。動く電荷とベクトルポテンシャルの関係を(2.3)式および(2.1)式とより、(2.5)式が得られます[8]pp.305。

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{B} &= \text{rot rot } \mathbf{A} = \text{grad}(\text{div } \mathbf{A}) - \Delta \mathbf{A} \\ &= (\mathbf{q} \mathbf{v}) \mu_0 \{3 / (4\pi R^3)\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

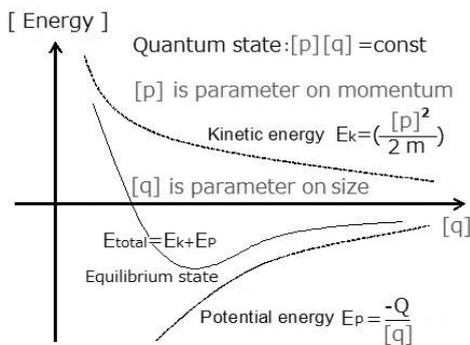
ここで、 $\text{grad}(\text{div } \mathbf{A})=0$ になるとは限りません。ベクトル解析により $\text{div}(\text{grad } \mathbf{A})=0$ であるから、適当なベクトル $\mathbf{\Lambda}$ の $\text{grad } \mathbf{\Lambda}$ を \mathbf{A} に加えてゼロにできます{i.e. $\text{div}(\mathbf{A} + \text{grad } \mathbf{\Lambda})=0$ }。その時に、(2.5)式はポアソンの式と同様な式 $\{\Delta \mathbf{A} = -(\mathbf{q} \mathbf{v}) \mu_0 (4\pi R^3)^{-1}\}$ となります。

$\Delta \mathbf{A} = -(\mathbf{q} \mathbf{v}) \mu_0 (4\pi R^3)^{-1}$ を2回積分して \mathbf{A} を求めると右辺が (R^{-1}) となり、ベクトルポテンシャル \mathbf{A} は R に反比例します。つまり、運動する荷電粒子間のベクトルポテンシャルの作用は接近する程、強いです。

3 太陽のプラズマにおける荷電粒子の運動

3.1 中心力場における平衡状態

原子や箱の中のように閉じ込められた空間の状態は量子力学では量子化されています。



平衡状態ではエネルギーの保存則により、運動エネルギーと位置のエネルギーの和が保たれます。

Fig.3 Changes in energy to equilibrium in a quantum state
 図.3 固定された量子状態において平衡に至るエネルギーの変化

図.3 に示すように、量子数を定めて中心力場でサ

イズを小さくするとポテンシャルエネルギーが低下し、運動エネルギーは増加しますが全体のエネルギーが低くなることを示しています。そして平衡状態ではポテンシャルエネルギーの低下の半分は運動エネルギーになり、残りの半分のエネルギーが外部に放出されるというビリアル定理(Virial theorem)です。

そこで、天体が大きくなるに従い中心部が圧縮されて中心の温度が高くなります。

平衡状態では余分のエネルギーがあると振り子のように平衡点を中心に揺らいでいます。その余分のエネルギーが基底状態から励起状態のエネルギーの差より大きくなると、振動のエネルギーを吸収して基底状態から平衡状態に遷移します。量子の状態の遷移では、ポテンシャルエネルギーを担う電界と運動エネルギーを担う磁界が共存する電磁波を空間に伝搬させます。

太陽の中心部では荷電粒子の運動エネルギーが非常に大きくなり、高速の陽子と高速の陽子とは磁氣的結合が強くなり、核融合が発生します。その結果、太陽から地球上に到達する1㎡あたりのエネルギーは1.37kWもあります。

3.2 太陽の彩層におけるプラズマの運動

M を太陽の質量、 R を太陽の半径とすると、太陽から脱出速度は $v_{\text{escape}} = (2GM/R)^{1/2} = 617.5$ (km/sec)です。

太陽の光球においては荷電粒子の密度が高いのでイオンの状態の水素は少ない。しかし、彩層の遷移領域で電子の密度(N_e)が $10^{-14} \rightarrow 10^{-15}$ (\AA^{-3})に下がり、温度が急上昇します[9]。ここで、陽子と電子が分離して高速運動する領域になると高速の荷電粒子のベクトルポテンシャルが大きくなり、同じ荷電粒子が並走する移動する荷電粒子の束ができます。

太陽の表層に「スピキュール」という光球から3,000~1万kmの高さに達す細長い突起構造が観測されています。スピキュールは太陽上に約6万から7万個が常に発生していて、それぞれのスピキュールは絶えず動いており、彩層上部から上昇して下降に転じるものと、上昇して放出されるものになります。

従来は、電場や磁場の作用は電子が応じて陽子は作用が及ばないとしましたが、実際はその逆であり、陽子の動きに質量が陽子の1,836分の1の軽い電子が応じて、その荷電粒子が電場や磁場を決めます。

放射された陽子の集団運動は頂点の付近で水平方向の運動の影響を受けやすくなり、「円弧」を描きます。

太陽表面に重力で落下する陽子が集まる太陽表面の領域が「黒点」となります。同じ方向を持つ高速陽子が磁氣的に相互に引き合い自己増殖して水平に拡大した巨大な集団となると後続が途切れて「フレア」が発生します。

S. Karasawa, "Effects of solar activity on the formation of the ionosphere and magnetosphere"
—The effect of high-speed charged particle acting magnetically as a current—

プラズマの集団が衝突すると、電子の集団と陽子の集団をまとめていた磁気的な結合の再構築が起こり発光領域を形成します。

3.3 コロナ領域における荷電粒子の状態

太陽のコロナは100万K以上の温度になるといわれています。その温度のエネルギーは $kT = (1/2)mv^2$ という関係でボルツマン定数 $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ を用いると、100万Kは $kT=1.38 \times 10^{-16} \text{ J}$ となり、陽子の質量 (m_p)= $1.673 \times 10^{-27} \text{ Kg}$ を用いて、 $(v_p)^2=2 \times (1.38/1.673) \times 10^{11}$ を得て、 $v_p=\{2 \times (1.38/1.673) \times 10^{11}\}^{1/2} = 410 \text{ km/sec}$ となります。

電子は質量が陽子の1836分の1であるので陽子の42.8倍の速度になり、その高速の電子が陽子と並走すると電子が陽子を加速します。こうして、太陽のプラズマは高速の荷電粒子が持つ磁気によって組織され、太陽が自転しているために太陽を渦巻くようにして宇宙空間に放出されます。



太陽の活動が極小期で、コロナは太陽の自転により東西方向では延びていて、南北方向には放射状に放出されている。

Fig.4 Corona photographed during a total solar eclipse (Photo by Harutaka Kamiyama (Astro Arts) in Argentina on July 2, 2019
図.4 皆既日食で撮影されたコロナ (2019年7月2日にアルゼンチンにて写真撮影/上山治貴(アストロアーツ) (<https://www.astroarts.co.jp/photo-gallery/data/haru-k/56195.jpg>))

4 太陽が惑星の気象に及ぼす影響

4.1 太陽風による木星を周回する気流の形成

木星および土星では最上部の大気が水素で覆われているので陽子による周回電流が電子による周回電流を凌駕して、磁力線は惑星の外側で北極から南極に向かい、地球の地磁気の方の逆になります。

木星を周回する気流を図5に示します。木星の南緯7°から北緯7°までの赤道領域に西から東に流れる高速の気流があります。この気流は昼半球の東側を吹き抜ける太陽風が駆動しています。赤道の真上では太陽風が正面から衝突し、太陽の自転に伴う回転成分を含むので時計回転方向の運動を気流に加えて赤道ゾーンの気流の中央部に極小の領域を発生します。

交叉する気流の境界に発生する渦はそれぞれの気流を維持させています。南半球の最初の東から西に流れる気流と南隣の西から東に流れる気流の境界に大赤斑という反時計方向回転の大きな渦があります。

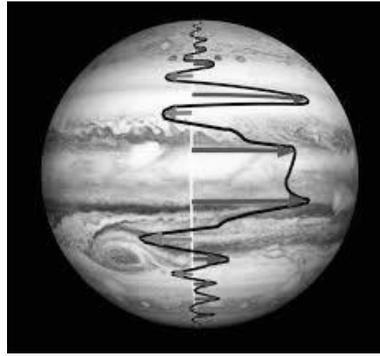


Fig.5 Latitude distribution of Jupiter's east-west wind by cloud tracking
図.5 雲追跡による木星の東西風の緯度分布 出典 http://www.r2.div.jps.or.jp/symposium/AngularMomentum/4_Imamura.pdf

木星の赤道付近の西側を通過する太陽風は時計回転方向に通過して西から東に周回する気流を減速します。そこで東西方向の気流が縞状に分布し、交叉する境界領域に渦ができます。

低緯度から極域になると周回する気流を駆動する太陽風の効果が弱くなり消失します。他方、木星や土星では自転軸から離れた場所では大気が地面の自転の移動に遅れ、自転とは逆の時計回転方向の気流が発生します。緯度が低くなると反時計方向の気流が流れるので、2種類の広報の複数の渦が発生します。

他方、円形電流は磁場に巻き付いたように連なると磁気エネルギーが低くなるので、同じ方向の回転する荷電粒子が伸長して極域の渦に吸い込まれます。

地磁気に巻き付いたように運動する高速陽子が磁気圏内の衛星をスパッタしてイオンを発生し、そのイオンの連なりが一方方向に伸長してオーロラが北極だけに現れることが木星では観測されます。

4.2 太陽風による地球を周回する気流の駆動

地球を直撃する太陽風は太陽に自転による反時計方向で1.89km/secの運動成分を持ちます。それが、昼半球の赤道付近上空の大気を時計回転方向に駆動して貿易風となります。中緯度では、自転に伴う大気の移動を地球の側面を接して通過する太陽風が西側で減速するが、東側でより強く加速するので偏西風が吹きます。

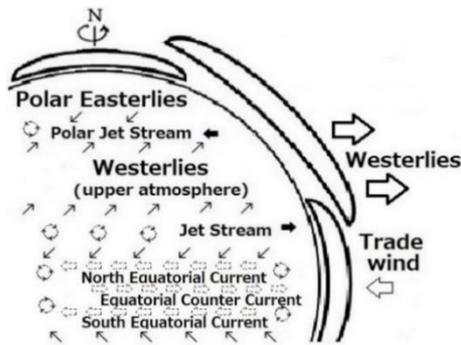
地球の反時計回転方向の自転による地表の移動は赤道付近で463m/secの速度があります。地球の赤道付近で463m/secの自転により西から東に赤道反流が流れています。この海流は緯度θが増すとcosθで減少します。その変化率はsinθで変化するので、赤道反流を挟み反対方向に流れる北および南の赤道海流があります。

そこで湿った上昇気流が積乱雲を作ると、北半球側の積乱雲の底では反時計方向に回転する上昇気流、その上空では偏西風による冷たい時計回転方向の下降気流があり、降雨による気圧の低下により、熱帯性低気圧(台風など)が発生して発達します[10]。

北極や南極では偏西風を駆動した太陽風の周回駆動効果が減少し、冷たい空気が極域高圧帯を作って低緯度側に向かって風が吹き出します。自転軸から離れ

S. Karasawa, "Effects of solar activity on the formation of the ionosphere and magnetosphere"
 -The effect of high-speed charged particle acting magnetically as a current-

ると周回速度が不足するので極偏東風になります。極偏東風と偏西風が接する境界では渦が発生し、その渦の列は交互に連なると気流が蛇行し、蛇行する気流に加速された気流がジェット気流になります。



自転で地球を周回する大気は太陽風を受けて中緯度地域では天候が3~5日の周期で西から東に向かって巡回します。

Fig.6 Distribution of east-west wind different by Earth's latitude
 図.6 地球の緯度により相違する東西風の分布

4.3 極点近傍の偏東風およびオーロラベルト

地球の極点の上空では荷電粒子の流れが反対に流れるので、地磁気の磁力線が地面に垂直に侵入する場所が地磁気の極点から離れた環状地域になります。

太陽風によりベクトルポテンシャルが揺らぐのでオーロラが揺らぎます。地球ではオーロラが地球の昼側では中心緯度が75度で、夜側では65度を中心がとして環状領域に発生します。太陽からX線や紫外線により発生した電子が多くなる昼半球側ではオーロラが発生する地域が高緯度側に移動します。

ところが、木星や土星は極域に荷電粒子を含む気流の渦が幾つも存在しており、その地磁気が衛星からスパッタされて放出されたイオンを取り込むので、極点でもオーロラが発生します。

5 地球の地磁気と電離層の形成

5.1 ヴァン アレン帯の形成

図.7 にヴァン・アレン帯を示します。

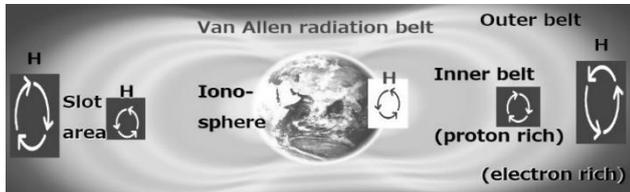


Fig.7 Structure of the Van Allen belt
 図.7 ヴァン・アレン帯の構造(Reproduced by S. Karasawa from <https://swc.nict.go.jp/assets/img/knowledge/magnetosphere/mag6.png>.)

地球の空気分子が惑星間空間へ逸散する逸散限界は高度 500~1000kmです。ところが、ように高度 2,000~5,000kmの内帯、高度 10,000~20,000kmに外帯がドーナツ状に円環が地球を取り巻いています。

地球から遠く離れた図7の矢印の(H)に示す磁気を発生する荷電粒子帯は外から地球に飛来した荷電粒子

により形成されるものです。外帯は電子が多く、内帯では陽子が多いです。電子は弱い地磁気の領域で取り込みまれ、ヴァン・アレン帯の外帯を形成します。

陽子は磁気圏の内部に侵入して内帯を形成します。外帯と内帯の間に逆方向の電流の磁氣的斥力により荷電粒子のないスロット領域になります。さらに、内帯と電離層の間にも荷電粒子のない領域があります。

ヴァン・アレン帯の内帯の陽子群が最も地表に接近する緯度の地域に地磁気が最も弱くなる南大西洋異常帯(South Atlantic Anomaly, SAA)があります。

5.2 地球の自転軸と地磁気

太陽のX線や紫外線により地球の上空の酸素や窒素の原子が電離されます。全電子密度が季節を通して高い領域は太平洋赤道上空で、電離層の電子群は大気の厚さも関係している可能性があります [6]pp887-890。

太陽風の450km/secの陽子の運動エネルギーは1.06 KeVです。太陽風の陽子が大気の原子や分子と衝突電離することが電離層の形成にも寄与します。

太陽風の荷電粒子が持つ運動量により上空の大気が電離層を含めて地球の自転より速く反時計回転方向に周回し、電子密度の高い電離層の周回による電流が地球の外側で南から北へ向かう地磁気を形成します。

低緯度を中心に上空を周回する荷電粒子による電流は公転面に平行です。その電流に平行に流れる電流が平行電流の磁氣的結合により地球の表層や内部でも発生します。また、地球の内部の金属の電子や海水の電流も上空の荷電粒子と同じ方向に駆動されます[11]。

現在の地球の地磁気が地球の外側で南極から北極に向かう磁力線を発生していることは、電離層の電子の周回が主に地磁気を形成していることを示します。

地磁気の磁極の逆転現象が過去に何回も発生していたと報告されています。その地磁気の逆転は地磁気に寄与する拮抗した要素の相対関係の変化が蓄積されて発生します。

5.3 電離層の構造

昼半球の800km~200kmの高度にF2層があり、220km~150kmの高度にF1層があります。それが夜半球では一つのF層(800km- 150km)になります。電離層の電子密度は昼半球の方が夜半球より多く、夜半球にF層が存在するのは磁気圏に捉えられた荷電粒子によります。

電離層のE層は上空150km~100km にあって、その電子密度は昼半球で高く、夜半球で低いです。E層では気体分子が多くなり電離して発生する電子が多いから、E層の電子密度の昼夜の差はF層より大きいです[6]。

Eスポ(Sporadic E layer)は上空約100kmで移動する電波を反射する領域が発生する現象で、深く侵入した

S. Karasawa, "Effects of solar activity on the formation of the ionosphere and magnetosphere"
—The effect of high-speed charged particle acting magnetically as a current—

陽子群によるプラズマによると理解されます[12]。

D層は昼半球で太陽の電磁波によって形成されず。中波のラジオ放送の伝播距離はD層で減衰されるため昼間は地表波が届く範囲ですが、夜間はE層で反射されるので数百から1000km以上まで届きます。

短波は電子密度の低いD層を通り抜けて電子密度が高いF層で反射されます。VHF やUHF以上の高い周波数の電波は、電離層を通り抜けてしまいます。

5.4 電波伝搬に太陽の活動が関わる現象

デリンジャー効果として知られている突発性電離層擾乱 (SID: Sudden Ionospheric Disturbance) [13] は昼間の低緯度地域で発生し、夜間に発生しません。

太陽の表面でフレアが放出された時に発生した電磁波は爆発の8分後に地球に到達し、最も高度の低い電離層のD領域(60km~90 km)の大気分子がハードX-線(波長; 1 nm)によってイオン化されて、異常に電子密度が高くなります。そこで、高周波帯の電波も反射されるので、長距離通信に使用される周波数3 MHzから30 MHzの短波帯の伝播に突然の障害が発生します。

電離層負相嵐は磁気嵐の荷電粒子の主成分が陽子であるので上層の電離層の電子密度を陽子⁺が減少させることが発生します[14]。

太陽から放出される大きな陽子の塊は放出される速度が速いので、遅い小さなフレアの陽子を吸収します。発生頻度が少ない高速の陽子群による集積作用により太陽風は波状になります。そこで、赤道地域で日没頃に電離層の電子密度が低くなる南北に伸びた領域が次々と西から東に移動する**プラズマバブル**が発生し**GPS衛星電波の遅延**等の影響を及ぼします[15]。

6. あとがき

本報告では、運動する荷電粒子が関与する現象として地磁気および電離層の形成を説明しました。

アハラノフ=ボーム効果によれば磁界のない空間でもベクトルポテンシャルは存在し、荷電粒子の運動に影響を及ぼします。荷電粒子の運動が関与する磁気現象は閉曲線的な磁界ではなく、ベクトルポテンシャルという局所的な空間の属性の歪みとして考え、多数の電荷粒子が運動する場合にはそれぞれの効果を重ね合わせて考えます。

このようにして、太陽のプラズマの状態は局所的な空間の属性であるベクトルポテンシャルを媒介して理解できます。太陽風は惑星に衝突して大気を周回する気流を駆動します。地球では太陽の電磁波で電離した電子群による電離層がありますが、その荷電粒子を含む流れが周回電流となり、地磁気を形成します。

本報告が磁気圏や電離層のシミュレーションを行う際に前提条件の検討において参考になれば幸いです。

文 献

- [1] 田中高史, “シミュレーションはどこまで磁気圏変動を再現するか,” 第9回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, 2012.
- [2] 唐澤信司, “地球の電離層に及ぼす太陽風の高速の陽子群の影響:”, 電子情報通信学会 信学技報 Vol.119, no.203, A-P 2019-70, pp.1-6, JAXA 相模原キャンパス, 2019.
- [3] 唐澤信司, “太陽風が磁気嵐, オゾンホール, 偏西風, 貿易風, 台風, 雷およびスーパーローテーションに及ぼす影響,” 電子情報通信学会 信学技報 SANE 2018-110, pp.1-6, JAXA 種子島宇宙センター, 2019.
- [4] Y. Aharonov, D. Bohm, Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory”. *Phys. Rev.* **115**: 485-491, 1959.
- [5] T. Hirayama, “Theoretical model of flares and prominences. I: Evaporating flare model,” *Solar Phys.* **34**, 323, 1974.
- [6] 常田佐久, 国立天文台編, 理科年表 2020(National Astronomical Observatory of Japan, Chronological scientific Tables 2020, “電離層,” p.872,-892, 丸善出版, 2019.
- [7] A. Tonomura, N. Osakabe, T. Matsuda, T. Kawasaki, and J. Endo, "Evidence for Aharonov-Bohm Effect with Magnetic Field Completely Shielded from Electron wave", *Phys. Rev. Lett.* vol. 56, pp. 792–795 (1986).
- [8] 前野昌弘, “よくわかる電磁気学” pp.305, pp.232, 東京図書, 2010.
- [9] 黒河宏企”光球からコロナまでの電子温度と電子密度の分布”, シリーズ現代の天文学第10巻, 太陽5.1節、図5.1 (日本評論社).
- [10] S. Karasawa, “Mechanism of typhoon”, 2021, 27/Jan, <https://youtu.be/HCY9m0npYyw>
唐澤信司, “台風のメカニズム”, 2021, 27/Jan, <https://youtu.be/SHZtHfTGfwo>
- [11] H. Jin, “Ionospheric Dynamo Process” *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, Vol.56 Nos.1-4, 2009
- [12] Y. Sakamoto, T. Abe, W. Miyake, “Detailed structure of electron temperature and density inside the sporadic E layer,” *JAXA Research and Development Report*, October 2018.
- [13] 仲上稔、宮憲一、志水健次, “デリンジャー現象出現時に於ける短波異常減衰の周波数特性,” 電気学会雑誌 Vol.57 No.585 P333, 1937.
- [14] Y. Zhang, L. J. Paxton, D. Morrison, B. Wolven, H. Kil, C. I. Meng, S. B. Mende, T.J. Immel, “O/N₂ changes during 14 October 2002 storms: IMAGE SI-13 and TIMED/GUVI observations” *J. Geophys. Res.*, Vol.109, A10308. DOI:10.1029/2004JA010441.2004.
- [15] 松永圭左、坂井丈泰、星野尾一明、賓藤昭則、大塚雄一, “GPSを用いた電離層プラズマバブルの観測”, 電子航法研究所研究発表会(第5回), 2005.