SPACE SCIENCE SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONSHIP

太陽-地球系科学

Tohru SAKURAI

Department of Engineering, Aeronautics and Astronautics, Tokai University,
Kitakaname, Hiratsuka, 259-12, Japan. TEL.0463-58-1211, Ext.4467

(Received 9, August 1989)

(Accepted 14, September 1989)

The sun emits continuously not only electromagnetic radiations such as X-ray, ultra-violet, visible light, infrared, microwave, radio wave, and magnetic wave, but also a plasma flow consisting of electron and proton plasma, which is called a solar wind. It has recently been recognized that the solar wind is a supersonic flow with a speed of several hundred km per sec emitted from the hot coronal gas surrounding the outermost atmosphere of the sun. The planets of the solar system are immersed in such high speed solar wind plasma, and have a planetary magnetosphere depending on their magnetic moment. The planetary magnetosphere is the outermost magnetic barrier for prevention from the solar wind plasma penetrating into the planetary atmosphere, and is yielded under the electro-magnetic interaction of the planetary magnetic field with the solar wind plasma. The recent studies on the magnetosphere have been devoted to understand our terrestrial magnetosphere and revealed that the magnetosphere constitutes a system of electrical circuit. Aurora, one of the most beautiful phenomena in our terrestrial magnetosphere, is an electrical discharge of the power generated in the electrical circuit through the solar wind-magnetosphere interaction.

Key words: Solar Wind, Magnetosphere, Aurora

1. 太陽風

太陽が光以外の微粒子流を放出しているという考えは古くからあり、地球で起こる磁気嵐やオーロラがそれによると言う仮説は既に20世紀の初頭にBirkelandやStörmerによって提唱されていた。1932年に発表されたChapman-Ferraroの磁気嵐論は太陽からプラズマ雲がフレアー(太陽爆発)と共に放出され、秒速1000km程度の速度で地球に到達し、地球磁場を乱すと言う考えであった。ところが、1950年代に入って黄道光の偏光、彗星の尾の振舞い等から惑星空間は常にプラズマで満たされているという証拠が次つぎにあげられ、1958年にはParkerによって、現在我々が太陽風と呼んでいるプラズマ流が理論的に予言された1)。この太陽風はその後人工衛星により、1960年代に観測的に実証された2)。

Parkerの理論3)によれば、太陽風は太陽を取り巻く百万度Kのコロナの必然的結果であると説いている。すなわち、太陽のコロナ大気は重力場によりひきつけられているが、重力ポテンシャルは R^{-1} に比例するのに対し、コロナの温度は熱伝導がよいため遠方でもあまり

低下しない。したがって、太陽の近くでは重力によってしっかりと捕らえられていても、遠方に行くにつれて熱エネルギーが重力エネルギーにうちかって自由に脱出する事が出来る様になる。音速 $V_s = (2kT/m)^{1/2}$ と脱出速度 $V_g = (2g_0R_0)^{1/2}$ (ここで k :ボルツマン定数, T :温度, m :質量, g_0 :太陽表面, R_0 での重力定数)を比較すると、太陽近くでは $V_g \gg V_s$, 遠くでは $V_s \gg V_g$ となる。しかも、このとき重力場はロケットのノズルのような働きをして超音速ガスが放出される。

Parkerは運動方程式, 連続方程式, 状態方程式を組み合わせ定常状態での太陽風速度 V についての解を求めた。即ち,

運動方程式

$$\rho V dV / dR = - (dP / dR + g)$$

連続方程式

$$\rho V R^2 = \text{const}$$

状態方程式

$$P = 2NkT$$

(ρ :質量密度, g :重力定数, N :数密度)

これらを組み合わせ V を求め、これを $(V_g / V_s)^{1/2}$ をパラメータとして図示すると第1図

のようになる。この解のうち、境界状態を満たし、物理的にも意味のあるものは、

$$\xi_c = R_c / R_0 = V_0^2 / 4 V_s^2, \quad V_c = V_s$$

を通る”超音速流”と、 $\xi = \infty$ で $V = 0$ となる”そよ風流”である。いずれの解が正しいかは実測から判断される。

Fig.1 Topology of solutions of the solar wind velocity.

太陽コロナ流はこのようにして 距離 $R \sim 10 R_0$ (R_0 : 太陽半径) の所で超音速流となり、地球近傍では

$$V = 0.5 \cdot (T_0)^{1/2} \text{ (km/sec)}$$

となる。この式によれば地球近傍での太陽風速度はほぼ 500 km/sec であることが期待される。

この太陽風理論で注目されるもう一つの興味のある点はコロナの温度 (T_0) と ξ_c の関係である。 $T_0 > 5 \cdot 10^6$ になると $\xi_c < 1$ となり、太陽重力が大気をひきつけておくことができない状態になり、従ってコロナガスは自由に膨張して空間に散逸してしまう。一方、 $T_0 < 0.5 \cdot 10^6$ では、 $\xi_c > 10$ となり、亜音速流の領域が増大し、重力による束縛が強くなって容易に超音速流が出来なくなる。太陽が超音速流を放出している事は、コロナの温度が丁度 10^6 K という適当な値であったために現れた現象である。

太陽風の実測はその後人工衛星により確かめられ、地球近傍では、速度 $V = 300 \sim 800 \text{ km/sec}$ 、密度 $N = 1 \sim 10 / \text{cm}^3$ である事がわかった。これは Parker の太陽風理論との見事な一致であった。

2. Parker 理論とコロナ・ホール

1973年から1978年にかけて、米国の太陽観測衛星スカイラブは太陽大気に対する多くの輝かしい観測成果を得た(4)。特に地球上では観測出来ない紫外線、X線領域での観測では我々の太陽に対するこれまでの知識があまりに

も不十分である事を明かにした。その一つはコロナのX線での観測である。この結果によると、コロナは一様に輝いているのではなく、明暗部が色々に存在し、これらは太陽表面磁場分布と密接に関わっている事が明かにされた。その中でもコロナ・ホールと呼ばれるX線で見ると暗い低温の部分が顕著に現れる事であった。しかもこのコロナ・ホールから高速の太陽風が出ている事であった。Parkerの理論では、太陽風の速度はコロナの温度に比例した。従って、低温のコロナ・ホールからは低速の太陽風が吹き出すはずである。太陽風とコロナ・ホールとの対応はParker理論に大きな矛盾を来した。また、最近の研究ではコロナホールの中でも温度は一様でなく、中央の低い温度の所からより高速の太陽風が出ている事がわかった(5)。

Fig.2 Coronal hole-a dark place, center of the solar disk.

この説明は現在まだ十分についていないが、コロナ・ホール領域の弱い磁場と外に開いた磁力線構造が高速の太陽風を導いているのではないかと考えられている。

3. 太陽風中の磁場構造

太陽風速度が太陽磁場構造と密接に関わっている事は、すでに述べたコロナ・ホールとの関係でも明かである。太陽風はその高い電気伝導度のために太陽磁場も一緒に惑星空間に引きずり出される。この磁場は惑星空間でどのような構造となっているのであろうか。太陽表面は赤道域では26日で1回転する速度で自転しているため、引きずり出された磁場は根元が太陽表面に固着された形で自転運動に伴ってねじれる事になる。

太陽の自転運動に対して静止した座標系から眺めることを考えると、この座標系では自転運動の速度に相当した逆方向の速度 V_ϕ を持つ事になる。太陽から動径方向に V_r の速度で太陽風と一緒に飛び出した磁場は V_r と V_ϕ とのなす角 θ が、

$$\theta = \tan^{-1}(V_\phi / V_r)$$

だけよじれる事になる。地球軌道では $V_\phi = 400 \text{ km/sec}$ であり、 $V_r = 300 \sim 500 \text{ km/sec}$ であるので、 $\theta = 45^\circ$ となる。

この太陽から引きのばされた磁場の形状は、ガーデンホースの形に似ているのでガーデンホース状の磁場構造であるという。従って、惑星間空間を太陽風と共に放射された太陽磁場は黄道面近くではあたかもドーナツ状の層構造をなす。

4. 太陽風と惑星との相互作用

太陽風プラズマ流と惑星との相互作用はとりもなおさず太陽風プラズマ流と惑星磁場との相互作用の事になる。惑星が太陽風プラズマ流を最初に感知するのは、その磁場と太陽風プラズマ流との電磁相互作用をとおしてである。太陽風プラズマは完全電離プラズマであり、極めて高い電気伝導度を有する。従って惑星磁場にとっては高電気伝導度を有する金属が太陽風速度で惑星磁場に押し寄せて来ると同じと見てよい。このような状況では金属板中に磁場は殆ど侵入することが出来ず、その境界に磁場を遮断する強い電流が流れる。いいかえれば、この境界に流れる電流により太陽風は惑星磁場の中に、また惑星磁場は太陽風中に直接に侵入する事が出来ず、惑星はその固有の磁場で覆われた空洞(cavity)を形成する。この空洞を惑星磁気圏(planetary magnetosphere)と呼ぶ。

この空洞は境界面での電磁力で太陽風の圧力と平衡している。すなわち、太陽風の圧力 P_k は、

$$P_k = N m U_s^2 + 2 N k T$$

となり、それと平衡する磁気圧 P_m は、

$$P_m = B^2 / 8 \pi$$

であり、従って釣合いの式は、

$$N m U_s^2 + 2 N k T = B^2 / 8 \pi$$

となる。左辺の太陽風の圧力のうち、第1項は太陽風の動圧であり、第2項は太陽風が温度 T を有していることによる静圧である。地球軌道近傍の値を代入すると、

$$\begin{aligned} N m U_s^2 &\sim 10^{-8} \text{ dyne/cm}^2, \\ 2 N k T &\sim 10^{-10} \text{ dyne/cm}^2, \end{aligned}$$

となり、 $N m U_s^2 \gg 2 N k T$ で上式は近似的に、

$$N m U_s^2 \sim B^2 / 8 \pi$$

となる。右辺の磁束密度 B は地球磁場の磁気圏境界での値であり、地球表面の赤道上での磁場 B_0 で書き換えると、 $B = B_0 (R_0/R)^3$ となる。これを上式に代入すると太陽風と接する磁気圏境界までの距離 R_B は、

$$R_B = R_0 (B_0^2 / 4 \pi N m U_s^2)$$

となる。この式より B_0 大なら R_B 大、 U_s 大なら R_B 小となる。太陽風中の磁気圏前面は距離 R_B までしか太陽風中に侵出できず、 R_B の距離で囲まれた境界の中に閉じ込められる事になる。次の図に示すように境界までの距離は平均的には地球半径の10倍となる。これに対して、反対側は長く尾を引いた磁気圏尾部が形成され、あたかも彗星が太陽風中をつき進む姿に似る事になる 6)。

Fig.3 Terrestrial magnetosphere.

太陽風は超音速流であるから、磁気圏前面には明瞭な衝撃波面(shock front)が形成され、その後面は乱れた磁場やプラズマがそう曲線状に広がる事に成る。この衝撃波面の形成は流体力学的考察で容易に推定され得たが、太陽風内の衝撃波は流体力学と本質的な差異を有していた。一般に流体力学での衝撃波の厚さは粒子の自由行程

$$l = 1 / N \sigma$$

(N : 数密度, σ : 衝突断面積)

と同程度のものになるはずである。ところが太陽風のパラメータから推定すると、太陽風中の自由行程は粒子密度が極めて小さいために

$$l \sim 10^8 \text{ km}$$

と言う大きな値となり、殆ど無衝突と言って良い流体に相当する。すなわち、粒子間の衝突という観点だけからは観測される様な衝撃波が生じる条件になっていない。人工衛星の観測によると地球磁気圏前面に形成される衝撃波の厚さはほぼ $10 \sim 100 \text{ km}$ と極めて薄いものである 7)。

このような意味から磁気圏前面での衝撃波性のフロントの発見は全く新しいものであって、無衝突性衝撃波(collision free shock)という概念が生まれた 8)。それでは太陽風プラズマ中では、何が流体中の衝突に代わる働きをするのであろうか。それは荷電粒子間のクーロン力に基礎を置いた電磁波動が粒子の衝突に代わる働

きをするのである。太陽風中の磁場や波動一粒子相互作用に基くプラズマ波動が連続流体としての太陽風の本質的な役割を果たす事に成るのである。その証拠には磁気圏の衝撃波面では種類のプラズマ波動が観測されている。そして衝撃波の厚さはまさにそこに生起している電磁流体波（アルーベン波）の波長に相当する事が判った。

さらに近年では、この衝撃波の上流側に電磁波動や高エネルギー粒子群が惑星間空間磁場方向（太陽-地球方向と 45° の角度）に伝搬している事が明かにされた。これは衝撃波面で反射加速された高エネルギー粒子がビーム状に磁場に沿って運動し、同時に電磁波動を発生させている結果である事も判った（9）。

太陽風と惑星磁気圏との相互作用は地球に代表される内惑星と木星に代表される外惑星とでは大変に異なる。内惑星では固有の磁場が弱く、自転速度も小さいので太陽風中に形成される磁気圏は小さく、きわめておとなしいものとなる。一方、外惑星の磁気圏は、その固有の磁場が強い事、さらに自転速度が速いため惑星磁気圏自体が太陽風と激しく相互作用をする（10）。しかし、地球磁気圏でも極域で、オーロラに伴う磁気圏嵐がダイナミックに繰り広げられ、太陽でのフレアに匹敵する磁気圏プラズマの爆発現象が起きている。

5. 磁気圏嵐とオーロラ

オーロラは磁気緯度 $65^\circ - 70^\circ$ の真夜中を中心として現れる発光現象で、東西に伸びた薄いシート状のアークや揺れ動くカーテン、数秒で点滅する脈動性のまたたき等いろいろな様相を呈する。このようなオーロラはたんに極域で起こる発光現象にとどまらず地球磁気圏内で起こるプラズマ爆発現象により起こる嵐で真夜中の低緯度側でのアークの突然の輝きの増加に始まり、継続時間は典型的には1~2時間で極域全体を覆う磁気圏嵐に成長する。アーク群の発達とオーロラの関係を見ると、まず真夜中側の緯度 70° 近傍に薄いアーク状輝きが出現する。これが次第に低緯度側に移行し、磁気緯度 65° 近傍に来ると急激に輝きを増し、全体的に極方向へかつ西向きにサージの様な構造をもって発達する。従って夕方側のオーロラはこのサージ状のフロントが西側に移動する事になる。また朝側では逆に東向きの動きが観測され、脈動性の輝きが多く見られ、夜側の極域全体を覆いつくすようになる。

オーロラの発光高度は地上 $100 \sim 200$ kmの電離層で起こる。これは磁気圏から電離層へ降下する $1 \sim 10$ keVの高エネルギー電子流が大気中に流入し、大気中の酸素、窒素分子や原子と衝突し発光する現象である。またオーロラの発光にともなって強いジェット電流がオーロラ帯の電離層に東西方向にながれる。その

結果地上では強い磁場変動が観測される。このような真夜中のオーロラの爆発的輝きに始まる一連の電離層、磁気圏での嵐（磁気圏嵐）となる（11）。

Fig.4 Auroral displays above the north pole.

6. 磁気圏嵐とオーロラエネルギーの流入

オーロラに伴う磁気圏、電離圏での擾乱は地球磁気圏内に起こっているエネルギーの流入、蓄積、放電と言う一連の過程の現れであると解釈される。個々の磁気圏嵐に伴うエネルギー消費量は、その磁場変動、発光強度等から推定しておおよそ $10^{18} \sim 10^{19}$ erg/secであると見積られる。これが1時間継続するとして1回の磁気圏嵐でのエネルギー総消費量は $10^{21} \sim 10^{22}$ ergとなる。これらのエネルギー源は究極的には太陽風によってまかなわれる訳であるが、太陽風によって運ばれるエネルギーフラックスを見積ると $1 \sim 10$ erg/cm²・secである。これが磁気圏に流入するとするとそのエネルギーフラックスは $5 \times 10^{20} \sim 5 \times 10^{21}$ erg/secとなる（磁気圏の断面を地球半径の2.0倍の円とすると、その断面積は 5×10^{20} cm²となる）。これは個々の磁気圏嵐で消費されるエネルギーに十分見合っている事になる。

ではオーロラに伴う磁気圏嵐を引き起こすトリガーは一体何であろうか。近年の人工衛星の観測によれば、太陽風とともに運ばれて来る惑星間磁場の黄道面に垂直な成分（B_z）の向き（南向きに変わる）が磁気圏への急激なエネルギー流入機構にとって極めて重要である事が明かとなった。即ち、B_z成分が南向きになり、それから30~60分経過すると必ずオーロラに伴う磁気圏嵐が起こり、逆にB_zが北向きになると磁気圏嵐は殆ど起こらないと言うことが判った（13）。

第5図は惑星間空間磁場のB_z成分が南を向いている時、惑星間磁場が地球磁気圏磁場に接すると極冠域を通る磁場と同じ方向であるため結合し、太陽風中の大規模電場（ $E = -U_{\infty} \times B$ ）が極冠帯を通じて地球磁気圏へ流入すること示す（これを磁気圏発電作用 - magnetospheric

dynamoと呼ぶ)。

Fig. 5 Magnetic field reconnection between the southward interplanetary magnetic field and the terrestrial magnetic field.

この大規模電場は磁気圏内のプラズマを磁気圏尾部から前面へと対流運動により運ぶ。この対流運動で尾部プラズマが地球に近づくとき地球まわりのドリフト運動が起こる。これがオーロラ帯の電離層に連結している磁力線に沿って電離層にも流入し、磁力線に沿う電流を形成する。これを沿磁力線電流— field-aligned current と呼ぶ。この沿磁力線電流は電離層の高度100 kmで電離層を横切るペダーセン電流と結合し、磁気圏内対流プラズマとの間で閉じた電流回路を形成する。この様に地球まわりの対流プラズマは電離層電流との結合により、その対流エネルギーを電離層プラズマに輸送し、電離層電流を駆動する。

Fig. 6 A current system connecting between the magnetosphere and the ionosphere.

通常、沿磁力線電流は 10^{-6} Amp/m²程度の電流密度を有しているが、太陽風—地球磁気圏相互作用が強められると、沿磁力線電流も強められ、同時に電離層上空1万 kmの高度に上向き電位構造が磁力線沿いに形成される。この結果磁力線沿いに運動している電子、陽子はそれぞれ電子は下向きに陽子は上向きに加速される。この電位は数 kV にも達するので、加速された電子は数キロ電子ボルト (keV) のエネルギーを得る事となる。これらの電子は電離層高度に侵入し、オーロラ発光を引き起こす。極回りの人工衛星の観測では磁気緯度 $65^{\circ} \sim 70^{\circ}$ を通過する時は、いつでもエネルギーの高い電子群を観測する。この高エネルギー電子群はこの緯度帯で最大となり、両側で次第に少なくなるので、緯度に対する降下電子フラックス強度を図示すると丁度ローマ字のVを逆にした字型を呈するため逆V字型 (inverted V) と呼ぶ特徴的スペクトル構造を呈する (14)。この降下

電子に伴っていろいろな電磁波動が観測される。中でもオーロラキロメトリック電磁放射は電離層で反射され磁気圏上層に伝搬し、地上では観測されないが宇宙空間で観測される。従って、地球もオーロラに伴って電磁界放射を宇宙空間に放射している惑星と言うことになる (15)。

オーロラは地球の自然現象の中で最も神秘的で美しい現象であるが、これは地球磁気圏での大規模なプラズマの爆発現象であり、現れる現象は多様で複雑極まりない。しかし、今その中にある基本的物理過程が一つ一つ解き明かされて来ているのである。

References

Standard works:

- a) T. Obayashi. Uchukukan Butsurigaku, Syokabo Shuppan. Tokyo. 1970.
- b) S.-I. Akasofu and S. Chapman. Solar-Terrestrial Physics. Oxford University Press. 1972.

Articles:

- 1) E. N. Parker. Astrophys. J. 128(1958) 664.
- 2) A. J. Hundhausen. Space Sci. Rev. 8(1968) 690
- 3) E. N. Parker. Interplanetary dynamical processes. Interscience, New York. (1963).
- 4) K. Sakurai. Atarashii Taiyo. Asakura Shoten (1983).
- 5) G. L. Withbroe. Astrophys. J. 325(1988) 442
- 6) N. F. Ness, C. S. Scearce and J. B. Seek. J. Geophys. Res. 69(1964) 3531
- 7) D. H. Fairfield. J. Geophys. Res. 72(1967) 5865
- 8) D. A. Tidman. J. Geophys. Res. 72 (1967) 1799
- 9) B. T. Tsurutani and P. Rodriguez. J. Geophys. Res. 86(1981) 4319
- 10) V. Formisano. The magnetospheres of the Earth and Jupiter, Astro. Space Sci. Lib. 52(1975) PP. 451-477
- 11) S.-I. Akasofu. Physics of magnetospheric substorms. Astro. Space Sci. Lib. 47(1977) 14
- 12) S.-I. Akasofu and J. R. Kan. Physics of auroral arc formation. Geophysical Monograph 25(1981) pp. 1-14
- 13) Y. Kamide and J. A. Slavin. Solar wind-magnetosphere coupling. Astro. Space Sci. Lib. 126(1986)
- 14) S.-I. Akasofu and J. R. Kan. Physics of auroral arc formation. Geophysical Monograph 25(1981) pp. 80-90
- 15) S.-I. Akasofu and J. R. Kan. Physics of auroral arc formation. Geophysical Monograph 25(1981) pp. 340-350