

地磁気による太陽風のブロック

2015年1月13日

西村 二郎

概 要

地磁気は、地球型惑星の中では、金星にはなく、水星、地球にはある。火星および地球の衛星である月には過去にはあった。地磁気が発生するメカニズムについては、未だ完全に解明されたとは言えないようだが、内部にマグマがあること、自転速度がある程度の大きさであることが必要条件のようだ。因みに地磁気がないとされている金星の自転周期は243日である。

ここでは、一様磁界と仮定したときの地磁気が荷電粒子の運動にどのように影響するかを調べ、前報で述べたローレンツ力に関する補足説明としたい。

また太陽風中のプラズマ(プロトン、電子)の地球へのブロック効果について理解し、さらに現在(地磁気が測定されるようになってから200年間)単調減少しているかにみえる地磁気(外挿すれば、1200年後にゼロとなる)と、弱まっていく太陽風のブロック効果の関係と、地磁気がなくなったときに浴びるであろう放射線(陽子線)量についても推算してみた。

目 次

1. まえがき
 2. 磁界中における荷電粒子の運動
 3. 地磁気による太陽風のブロック
 4. 地磁気の減衰と太陽風の到達高度の低下
 5. 太陽風中の陽子線、 β 線の線量
 6. あとがき
- ### 1. まえがき

磁界中における荷電粒子の運動に関しては、参考書に載っていることの紹介である。地磁気による太陽風中のプラズマのブロックに関しては、図1を含めて図による説明が困難なところがあるので、一様磁界の場合について解析した。

データが存在するここ200年の傾向をみれば、地磁気は単調に減少している。地磁気は変動が激しいにしても、火星や月ではなくなった。1200年後であるかどうかは別にしても地球でもやがてなくなるだろう。確かでないとしても、1200年という時間的猶予は短すぎる。そこで敢えて問題提起をした。

2. 磁界中における荷電粒子の運動

$$\text{運動方程式： } m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad \cdots(1).$$

$$\text{ここで、 } m\mathbf{v} \cdot \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m q \mathbf{v} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{0} \quad \cdots(2). \text{ ローレンツ力は仕事をしない。}$$

ここで、 m 、 q は、速度 \mathbf{v} で運動している荷電粒子の質量、電荷である。

いま、 $t=0$ において大気粒子がイオン化した場合を考える。その位置を原点とし、磁力線の接線方向(t)、法線方向(n)、陪法線方向(b)を3軸とする座標系を考え、 $\mathbf{v} = (v_t, v_n, v_b)$ とすると、ローレンツ力が仕事をしないことより、

$$\sqrt{v_t^2 + v_n^2 + v_b^2} = v_0 \text{ (一定)} \quad \cdots(3) \text{ である。}$$

一定の磁場の場合、磁界の方向を x 軸、磁界と荷電粒子の速度がつくる平面において磁界に垂直な方向に y 軸、 $x-y$ 平面に垂直な方向に z 軸を取ると、

$$\mathbf{B} = (B, 0, 0) \quad (B = \text{一定}) \quad \cdots(4),$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad \cdots(5); \quad \boldsymbol{\omega} = \frac{q\mathbf{B}}{m} \quad \cdots(6).$$

(5)式の解は次式のとおりである：

$$\mathbf{v} = \mathbf{a} \cos \omega t + \mathbf{b} \sin \omega t + \mathbf{c} \quad (\mathbf{b} = \mathbf{a} \times \frac{\boldsymbol{\omega}}{\omega}; \mathbf{a} \perp \boldsymbol{\omega}; \mathbf{c} \parallel \boldsymbol{\omega}) \quad \cdots(7),$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{a} \frac{\sin \omega t}{\omega} - \mathbf{b} \frac{\cos \omega t}{\omega} + \mathbf{c}t + \mathbf{d} \quad \cdots(8).$$

いま、荷電粒子が磁力線に対して角度 θ で運動していたとすると、(7)式は次のように表される：

$$\mathbf{v} = (v_0 \cos \theta, v_0 \sin \theta \sin \omega t, v_0 \sin \theta \cos \omega t) \quad \cdots(9). \text{ したがって、} t=0 \text{ における大気粒子の位置を } \mathbf{r}_0 \text{ とすると、}$$

$$\mathbf{r} - \mathbf{r}_0 = (v_0 t \cos \theta, -v_0 \sin \theta \frac{\cos \omega t}{\omega}, v_0 \sin \theta \frac{\sin \omega t}{\omega}) \quad \cdots(10)、\text{ となる。}$$

これは、荷電粒子が磁力線に沿って螺旋を描きながら $v_0 \cos \theta$ なる速さで移動していることを意味する。磁界が一様でなくても、物理的意味は同じである。

電離は地上数十 km 辺りから起き、高度が高くなるにつれその度合いを増す。荷電粒子がプラス・マイナスどちらの磁極を目指すかは、イオン化したときの運動の向きによる。そして磁極付近に到達した荷電粒子(プラスイオン)は太陽風中

の高速の電子と衝突して電荷を失う可能性がある。そのとき発光する。荷電していない大気粒子も高速の電子と衝突することにより励起され、元に戻るときに発光する。太陽風中のプロトンは励起作用もさることながら、大気粒子の運動を乱す方(→極端な場合は逸散)に寄与するのではなかろうか。

磁極から反転する荷電粒子は、昼側では反対の磁極を目指し、夜側では、太陽から遠い方に長く尾を曳いている磁力線に沿って地球から逸散していく(図1)。

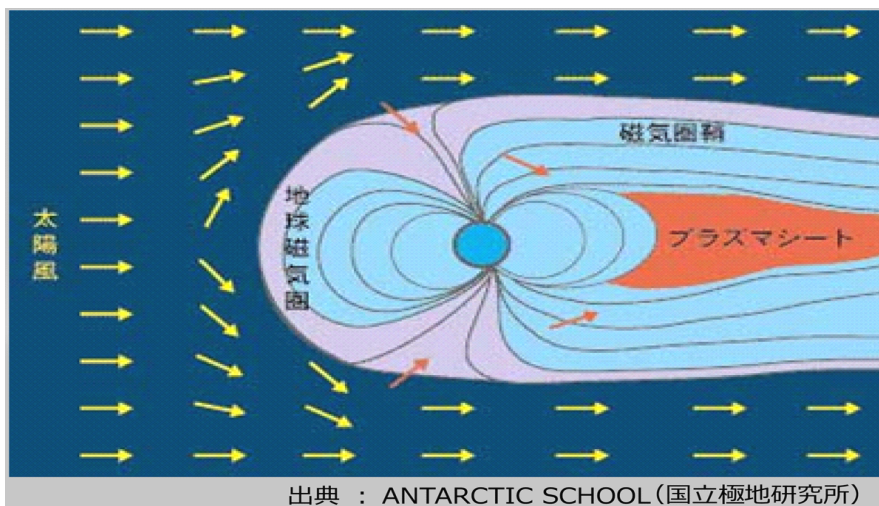


図1 太陽風と地磁気

3. 地磁気による太陽風のブロック

太陽風中のプロトンと電子は地球に近付くにつれ、強まってくる地磁気の影響を受けて軌道を曲げられる。少し乱暴だが、太陽風が吹いている高度を6万kmとし、そこから地球に向けて一様磁界を仮定してみよう。さらに太陽風が地球に最も深く侵入する、磁界に直角に吹いている場合を考える。

このときの螺旋(円弧というべきか)の半径(R)および周期は、(6)式を参考にし、

$$R = \frac{v_0 \sin \theta}{\omega} \quad (\theta = \frac{\pi}{2}) \rightarrow R_s = \frac{v_0}{\omega} = \frac{mv_0}{qB} \quad \dots(10),$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad \dots(11).$$

太陽風の速さを $v_0 = 450 \times 10^3 \text{ m/s}$ として、プロトンに関して、具体的に数値を求める。

$B = 4.6 \times 10^{-5} \text{ (Tesla)}$; $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ (goulomb)}$; $m = 1.675 \times 10^{-27} \text{ (kg)}$ とすれば、 $R_s = 1.023 \times 10^5 \text{ m}$ 。太陽風が吹いている高度を 6 万 km とすれば、この値は 0.17% にしか過ぎない(周期は 1.4 秒)。地磁気による太陽風のブロックが効果的に作用している様子が伺える。

4. 地磁気の減衰と太陽風の到達高度の低下

地磁気は、ここ 200 年来、図 2 のように単調に減衰しているという¹⁾。

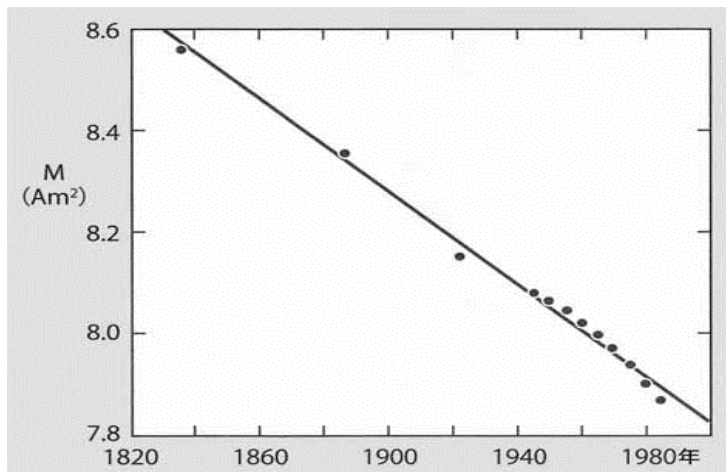


図 2 地磁気の減衰

このペースで減衰していけば、1200 年後にはなくなるという計算になる。地磁気は変動が激しいので、この先も同じようなペースで減衰するかどうかは分からない。ただはっきりしていることは、月や火星にもかつては地磁気が存在していたが、現在は無いということだ。地磁気がなくなれば、ブロック効果が失われ、地球は太陽風からの放射線(陽子線、β線)に曝されることになる。地磁気の減衰と太陽風の到達深度の関係を推算してみれば、図 3 が得られる。

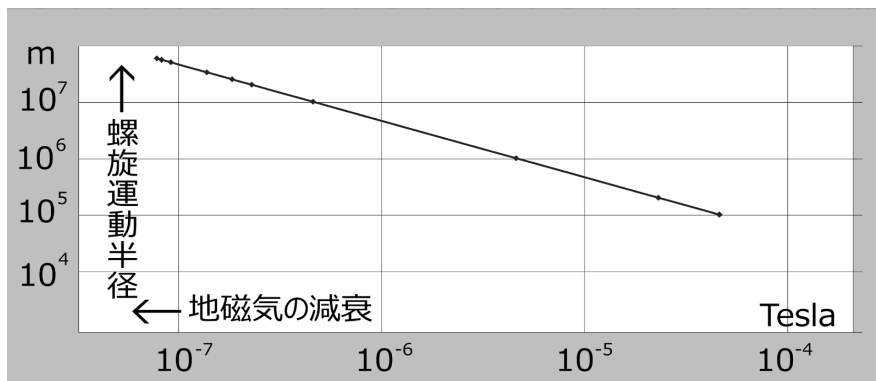


図 3 地磁気の減衰に伴う太陽風(陽子線)の到達深度

5. 太陽風中の陽子線、β線の線量

太陽風中のプロトンないし電子の密度は 1CC 中に 5 個程度と言われている。しかし平均速度が 450 km/s とすれば、地磁気がなくなった状態では、単位面積当り 2.25×10^8 個/s の陽子線およびβ線が地表に到達する計算になる。

ここで体重 60 kg、投影面積 0.6 m^2 の人がこの陽子線を浴びると、13.74mSV(ミリシーベルト)/hr となる。致死量を 10 SV とすると、30.3 日で死に至ることになる。β線の場合はこの 5 倍の日数が必要である。

また、太陽風が吹いている高度自体、現在は 6 万 km 上空と言われているが、地磁気の減衰とともに下がってくるであろうから、地磁気がゼロにならなくても太陽風は地表に到達するようになるだろう。

6. あとがき

もともと、地磁気をつくる磁界中で、突然イオン化した大気粒子がどのように挙動し、地球からの逸散に寄与するかを知ることが主目的であった。しかし、たまたま地磁気が減衰傾向—しかも単調減少であり、外挿すれば 1200 年後にはなくなるという推測があることを知った。その場合、地球上の大概の生物は陽子線やβ線を浴びて死に絶えることになるだろう。人類も絶滅の危機に瀕する。これは、我々現代を生きる人類にとっても余りにも寂しい未来予想である。しかし、人類には叡智がある。地下に潜るなり、耐陽子線ドームなりを作って生き長らえるに違いない。

7. 参考資料

1) 上出洋介：「オーロラの科学」誠文堂新光社(2010年12月)