

地球の電離層に及ぼす太陽風の高速の陽子群の影響

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 動いている荷電粒子は磁気を伴い、その磁気は動きを止めると消失します。並行して高速で移動する複数の陽子(H⁺)は磁氣的に結合するので太陽の表層から揃って放出されます。その陽子群が地球の磁気圏に捉えられて150km以上の大気の成分に衝突することでF層の電離層を作ります。大気の子が多いE層及びD層では紫外線等により酸素原子などが電離して電離層を形成します。E層とD層との中間に原子状態の水素の濃度がピークになる領域があり、E層の低部に太陽風の陽子群が侵入してEスポが発生するという説を報告します。

キーワード 太陽風, 陽子, ラーモア半径, 磁気嵐, 電離層, Eスポ, プラズマバブル

Effects of high-speed protons of solar wind on the ionosphere of the Earth

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 When a charged particle is exercising, it accompanies with magnetism. When the velocity of the particle become zero, the magnetism is lost. The proton (H⁺) of the solar wind gathers by a magnetic field made by exercising at ultra-high speed, and the magnetic field separates H⁺ and the free electron. At more than 150km above the Earth, H⁺ of the solar wind create ionospheres of F layers. E and D layers are formed by ionization of atoms such as oxygen by X-ray or ultraviolet rays. There is the peak of hydrogen atomic density at the intermediate altitude between the E-layer and the D-layer. The sporadic E that is generated in the bottom of E layer is thought to be due to the H⁺ group of solar wind.

Keywords Solar wind, Proton, Larmor radius, Magnetic storm, Ionosphere, Sporadic E-layer, Plasma bubble

1. 緒言

電離層が太陽から放射される陽子(H⁺)や紫外線あるいは高エネルギーの電子(KeV)等の照射により形成されると言われていますが、太陽風の陽子が及ぼす影響については詳しい論議がなされておられません [1], [2]。

太陽風の陽子はおよそ450km/secの高速で地球に到達しており、その運動エネルギーは1.06 KeVです。その太陽風の陽子は地球の磁気圏に捉えられた磁力線に沿って移動し、大気の子や分子と衝突電離して放出された自由電子が電離層を形成に寄与します。

F層およびE層は夜間も存在しますが、下層のD層は昼間のみ存在して夜間は存在しません。そこで、下層のD層の電離層は紫外線等により大気の子が電離されて電離層が形成され、上層の電離層は大気の子に太陽風の陽子が衝突して形成されるとしました。

太陽の表層でプラズマが加熱される理論として磁気リコネクション説があります[3], [4]。その説は荷電粒子の運動による電流が磁気を持ち、水平方向に飛び回る磁力線が繋ぎ変えられる際に磁力線に取り込まれたプラズマが加速されて放出されるという理論です。

著者は太陽風の高速運動する陽子が伴う磁気に注目して、高速で並行運動する陽子と陽子は磁氣的に結合して、高速で並行して運動する陽子と自由電子は磁氣的に反発し、陽子は磁氣的に結合して太陽から放出されるとしました。

太陽から超高速で放出された太陽風の陽子は地球の磁気圏の内に取り込まれて、バンアレン帯を形成します。その外帯は高度10,000 - 20,000kmに位置し電子が多く、内帯は2,000 - 5,000kmに位置し陽子が多い。バンアレン帯より低い陽子が地球の大気の子と衝突する空域に電離層が存在します。

電離層の日々の変動や擾乱を地球の下層から上層へ伝播する大気が起こすという理論が論議されています[5]。しかし、最下層の電離層のD層は夜半球では消失することから、太陽から放射される紫外線等により酸素原子等が電離されて形成されていると考えられます。他の電離層はD層より上層にあり、太陽風の変動が電離層に影響を及ぼしているに違いありません。

なお、電離層には上層にF層(150km~800km)が形成され、150km以下の高度に電離層のE層(100~120km)及びD層(60km~90km)が形成されます[6]。

E スポ(Sporadic E layer)はE層の底で発生します[7]。E スポの電子密度は98kmの高度で最大 $9.5 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ であるという報告があります。E スポが多く発生するのは昼頃と夕方の時間帯であり、E スポは太陽風の陽子群が深く侵入して発生するとしました。

磁気嵐で陽子が地球に到達することは(N₂/O)の比率の高い領域が極域から中緯度そして低緯度に広がることから確認できます[8]。また、プラズマバブルでは、電離圏で電子密度が低い南北に伸びた領域が、日没頃の赤道域で飛び飛びに発生してその構造が東に移動する現象です[9]。このプラズマバブルは熱帯の大気の対流活動による重力波が関与しているという理論があります[10]。しかし、太陽風は地球まで伝搬する間に速度の速い太陽風のマイクロフレアが速度の遅いマイクロフレアを集群(バンチング)して粗密の状態を発生します。水素原子の密度はピークがE層とD層の中間の高度80km付近にあります。プラズマバブルは太陽風の影響によると説明しました。

高度150kmの大気の原子密度を分子の個数に換算すると 2.4×10^{10} [個/(cm³)]です。地球の半径の3倍で9倍の断面積に到達する太陽風の陽子を概算すると毎秒 1.9×10^9 [個/(cm²)]です。大気と同数の陽子が高度150kmに到達すると、陽子の寿命は13秒になります。

本報告では高度では上層大気の主成分が陽子から地球の大気分子に替わる境界を150kmと考え、150km以上の上空では太陽風の陽子が多く、夜半球でも電離層のF層を形成するとしています。

地球の大気圧(760Torr)における空気分子の平均自由行程は0.1μm以下であり、太陽風の陽子は大気分子と衝突して地上には殆ど到達しません。しかし、太陽風が偏西風や貿易風等に影響を与えています[11]。

2. 太陽の表層で陽子を加速するメカニズム

2.1. 太陽表層における高速陽子の磁氣的結合

太陽の中心部では超高圧になり、水素原子の核融合により高いエネルギー状態になります。高速運動する陽子は電流として機能して磁気を持ち、同じ運動方向の高速陽子が持つ磁力線は相互に引き寄せる力があります。負電荷で質量が小さい自由電子は陽子が放出される運動には影響を及ぼしません。

そこで、図1.に示すように太陽の表層では高速の陽子が磁氣的に結合して揃って放出されます。陽子群が太陽の表面から放出されると放出運動に伴う磁界の磁力線は表面に平行な方向になります。その表面の磁力線に沿って水平に移動する高速陽子群も発生します。その陽子群を太陽の内部から外部に放出される別の陽子群が押し上げて、弓状になり、やがて引き千切られて表面から放出されます。同方向に走る陽子と自由電子等

は磁氣的に反発するので接近せずに結合しません。コロナ領域では外に向かって陽子群の運動が揃う過程で高速に加速されると考えられます。

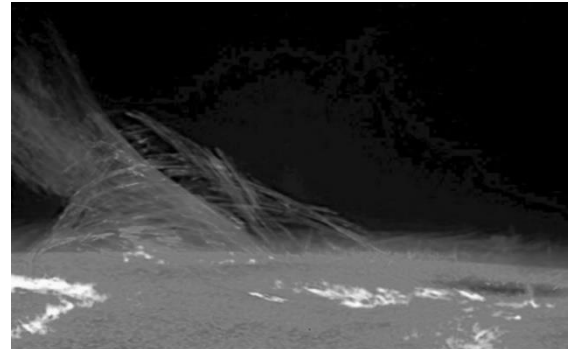


図1. 探査機 Hinode で撮影された太陽の陽子群の放出
Fig.1. Hinode's Solar Optical Telescope on Jan. 12, 2007.

https://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/solar_017.html

2.2. 地球の磁気圏に捉えられる太陽風の陽子の量

バンアレン帯は地磁気に捉えられた荷電粒子の密度の高い領域で1000kmから地球半径の3倍程度の範囲まで存在します。地磁気に捉えられた陽子は後続の陽子群と衝突して昼半球では磁気圏を圧縮します。他方、夜半球側では、太陽風の衝突により地球の磁気圏が遠くまで吹き流したような形になります。

なお、太陽の自転および地球の自転は反時計方向に回転しており、両者が持つ磁気は同じ方向になる傾向があるので、磁気を持った太陽風の陽子群は地球の磁気を避ける傾向があります。

現在の太陽から放出される陽子の典型的な量は $M_{\text{Sun}}=10^9 \text{kg/sec}$ です。この値を用いて地球の地磁気が捉える太陽風の陽子の総量を概算します。太陽風の価電粒子群が赤道付近で厚いバンアレン帯を形成し、磁束密度の高い北極や南極の領域を経由して電離圏の内部に取り込まれます。その際に、地球の公転軌道の領域で地磁気が捉える陽子の最大総量 $M_{\text{Earth Max}}$ を地球の磁気圏の断面を地球の断面積の100倍と仮定して、太陽を中心とした地球までの距離($1.5 \times 10^8 \text{km}$)を半径にした表面(S_{sphere})との比率により求めてみます。

$$M_{\text{Earth Max}} = M_{\text{Sun}} \cdot (100 \cdot S_{\text{Earth}} / S_{\text{sphere}}) = 4.07 \text{kg/sec} \quad (1)$$

1m²あたりの地表に換算すれば(2)式の値になります。

$$M_{\text{Earth Max (m)}} = 4.07 / \{\pi(6.378 \times 10^6)^2\} = 0.32 \times 10^{-13} [\text{kg}/(\text{sec} \cdot \text{m}^2)] \quad (2)$$

この質量を陽子1個の質量で割って1cm²あたりの陽子の個数($N_{\text{Earth Max (cm)}}$)に換算すれば(3)式になります。

$$N_{\text{EarthMax}(c\text{ m}^3)}=1.9 \times 10^9 \text{ [個}/((c\text{ m}^2 \cdot \text{sec})] \quad (3)$$

他方、陽子から大気分子の密度が多くなる境界の高度は図2のデータに示すように150km程度であり、その分子密度は $M_{(150\text{km})}=10^{-9}\text{kg/m}^3=10^{-15}\text{kg/cm}^3$ です。この値から大気分子の分子量 25 と仮定して個数に換算すると(4)式となります。

$$M_{(150\text{km})}/m_{\text{molecule}}=2.4 \times 10^{10} \text{ [個}/(\text{cm}^3)] \quad (4)$$

この地球の上空150kmの大気分子の密度と寿命を1秒とした陽子の密度の最大値が同じ程度になります。仮に、途中で散逸して上空150kmまで到達するのは10%であるとすれば陽子の寿命は13秒あると見積もられます。なお、図3に示すように上層に存在する陽子や分子の数の個数は電子密度より桁違いに多いです。また、毎秒あたりの値(1)式を用いて1日に地球に到達する陽子の量は3,900 ton/dayです。その陽子が持つ運動量は大気分子に衝突してその運動量を大気と与えて、太陽風の陽子は電子を得て水素原子になります。

2.3. 磁気圏内で高速運動する陽子の振る舞い

同じ方向に電流が流れる並行な2本の線の間に発生する磁気的な引力を求めてみます。

距離 $d[\text{m}]$ だけ離れた2本の平行な長い導線 A、B にそれぞれ $I_A [\text{A}]$ 、 $I_B [\text{A}]$ の電流が同じ方向に流れているとして、導線 A が作る磁場は、 $H_A = I_A / 2\pi d$ であり、平行導線 B が磁場 H_A から受ける力は、 $F = \mu_0 I_B H_A$ です。そこで平行に運動する荷電粒子間に働く力は $F_m = \mu_0 I_B (I_A / 2\pi d)$ となります。速度 (V) で運動していると電流 (I) は $I = qv$ となるので、距離 $d[\text{m}]$ だけ離れた陽子が連続的に並行運動する際に $F_m = \mu_0 (qv)^2 / 2\pi d$ という引力を受けます。

他方、距離が d 離れて並行運動する陽子間のクーロン反発力 (F_c) は $F_c = (q)^2 / d^2$ であるので、陽子のクーロン反発力と速度が $v = 900 \text{ [km/sec]}$ の H^+ 間の磁気的引力が等しくなる関係 $\mu_0 (qv)^2 / (2\pi d) = (q)^2 / d^2$ の距離 (d) は $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$ を代入して求められます。

$$d = 2\pi / (\mu_0 v^2) = 0.5 / \{10^{-7} \times (81 \times 10^{10})\} = 6.2 \times 10^{-6} [\text{m}] \quad (5)$$

$6.2 \mu\text{m}$ 以上離れているとプラズマ状態の電子と陽子間のクーロンの引力より陽子と陽子の磁気的引力の方が強くなります。太陽の表層で 900 [km/sec] の速度で連続的に並行運動する陽子間では $6.2 \mu\text{m}$ より離れると磁気的に引き合い陽子が集まっています。

磁場に捉えられた陽子円運動の半径(ラーモア半径)は(6)式で与えられます。陽子のラーモア半径は陽子の

速度に比例し磁束密度に反比例します。

$$\text{Larmor radius; } r_{la} = mv / qB \quad (6)$$

地磁気の磁束密度 (B) を $B = 4.6 \times 10^{-5} \text{ [T]}$ 、その場で円運動する陽子の速度を $v = 450 \text{ km/sec}$ とし、陽子の電荷量 (q) を $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}$ 、質量 (m_p) を $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ [kg]}$ とし、ラーモア半径の値が(7)式で与えられます。

$$r_{la} = (1.67 \times 10^{-27} \times 4.5 \times 10^5) / (1.6 \times 10^{-19} \times 4.6 \times 10^{-5}) \approx 100 [\text{m}] \quad (7)$$

他方、空気の平均自由行程 (λ) は常温 $(T = 300\text{K})$ において $\lambda = 0.68 / p_{(Pa)} \text{ cm}$ で与えられ、気圧に反比例します。地上では 1013 hPa で分子数は $2.7 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ で、 $\lambda_{0m} = 6.8 \times 10^{-5} \text{ mm} = 6.8 \times 10^{-2} \mu\text{m} < 0.1 \mu\text{m}$ ですが、200km 上空では 10^{-6} hPa で $\lambda_{200km} = 68 [\text{m}]$ になります。

3. 電離層の形成に及ぼす太陽風の影響

3.1. F層およびE層の形成のメカニズム

太陽から陽子群が放出されて、地球の磁気圏に侵入すると磁界によって進行方向が曲げられ続けて磁力線に沿って旋回し移動を続けて大気酸素原子と衝突して、電子密度の高い層を形成して電波を反射します。

電離層の電子密度のピークは300km付近の上空にあります。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。夜半球では一つのF層(800km-150km)になります。2つの電離層を発生する原因を次のように考えられます。昼半球では地表に垂直に太陽風が進入するので、地磁気に反発する陽子群と地磁気に引き込まれて陽子群に分かれます。なお、太陽も地球も反時計回転で自転しており、電荷の回転軸の方向に磁力線が発生します。

磁気圏に取り込まれた高速の陽子の寿命が長く、地球の磁気圏を迂回した陽子によって夜半球でもF層が存在すると説明できます。

電離層の電子密度はいずれも昼半球の方が夜半球より多く、夏季の方が冬季より多いです。

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層の電子密度の昼夜の差はF層より大きいです。これよりE層では昼夜の差が紫外線やX線などが分子を電離して発生する電子が寄与していることが示されます。なお、高度が低くなるにつれて大気の密度が濃くなり、発生した自由電子の寿命は短くなります。

中波のラジオは昼半球では地上波が届く範囲までしか伝搬しませんが、夜半球ではD層が消滅するのでE層で反射されて数百から1000km以上まで届くようになります。

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。

地球の大気電子密度、水素原子密度、分子量、オゾン密度、および温度の特性を図2. に示します。

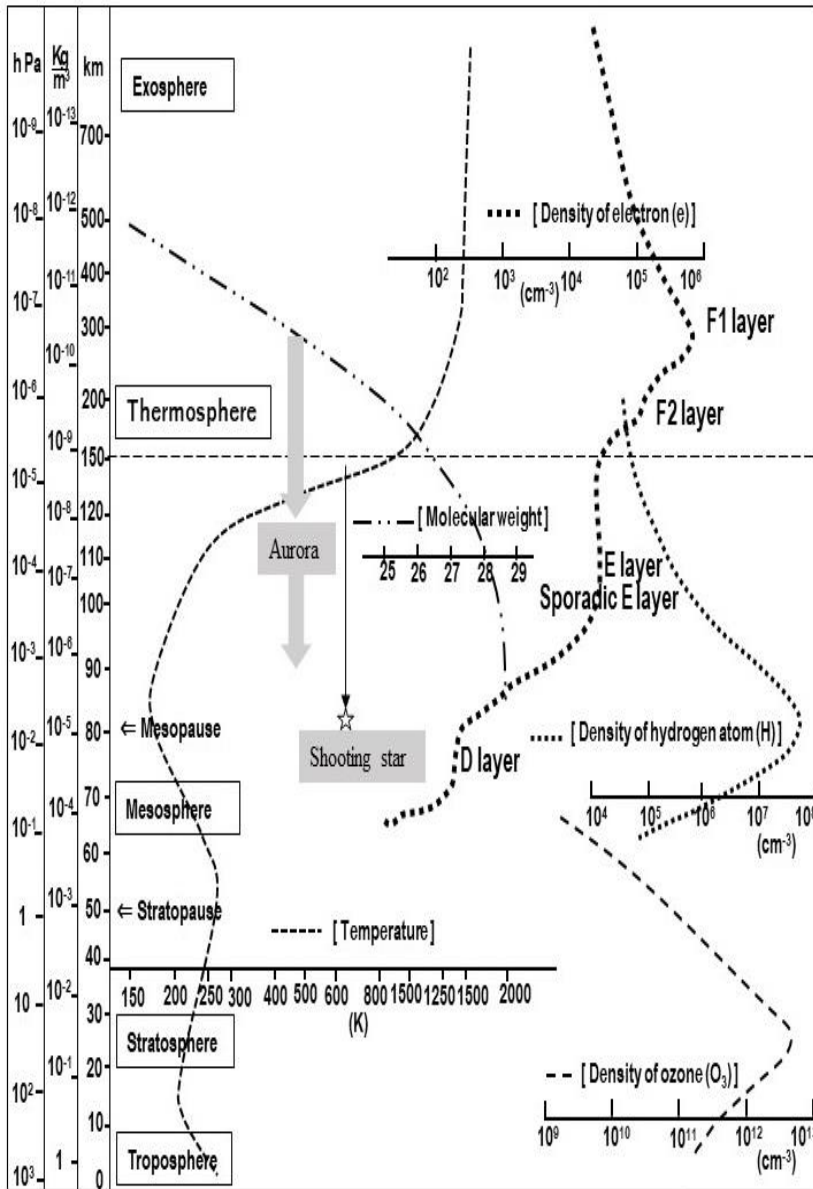


図2. 地球の大気電子密度、水素原子密度、分子量、オゾン密度、および温度の高度依存性
 Fig.1. Altitude dependence of electron density, hydrogen atom density, molecular weight, ozone density, and temperature of Earth's atmosphere. Reproduced from [6] <https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/img/kisyo006.jpg>

3.2. 太陽の活動が電離層に及ぼす影響

太陽の表面でフレアが放出された時に増加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(60 km~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、自由

電子が発生して異常に高い電子密度になります。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。この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) は昼間の低緯度地域で発生します[12]。デリンジャー効果は夜間に発生しないことがX線等により発生する証拠です。

地球の昼半球では送信された中波の伝播距離はD層で減衰されるため地表波が届く数十キロ程度以内ですが、D層が消滅する夜半球での送受信ではE層(上空100km)で反射され、数百から1000キロ遠方まで届くようになります。

E層(100km~120km)は夜間にも存在します。プラズマ内の電子の寿命は短いですが、太陽風の陽子が地球の夜側に回り込んで大気分子と衝突してE層の形成に寄与しています。

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です[6]。日本ではEスポは夏至の前後に多く発生します。Eスポは太陽風の陽子が高速で運動して磁気的結びついて塊となって深く侵入した陽子群により電離されたプラズマ領域によると理解されます。

図3に示すようにE層とD層の間の中層界面に水素原子の密度のピークがあります。酸素や窒素原子が存在する高度より下層で水素原子の密度がピークになるのは太陽風の陽子が侵入して水素原子になったものと考えられます。

電離圏層負相嵐は磁気嵐のエネルギーによって上層大気の組成変化によって生ずるという説明があります[13]。しかし、磁気嵐の荷電粒子の主成分はH⁺であるので上層の電離層の電子密度をH⁺が減少させることが発生します。

太陽から小さい程発生頻度が高いマイクロフレアが放出されます。大きなフレアの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。発生頻度が少ない大きな

フレアの陽子群による集群作用により太陽風が波状になります。そこで、赤道域で日没頃に電離圏の電子密度が低くなる南北に伸びた領域が次々と東に移動するプラズマバブルが発生します[8]。

オーロラは太陽風の荷電粒子の衝突により発光する現象で、60~70度の緯度の北極および南極地域で発生します。200 km以上の高度では密度が低く平均自由行程が長いので酸素原子が衝突電離して557.7 nmの波長の光を出し緑色や緑白色に見えます。オーロラの下端である地上約100 kmの低い高度では酸素より

も窒素のほうが多いため、窒素原子の 585.4 nm 以下の赤や青の光を出します。

4. 超高層大気 of 構造

4.1. 酸素原子、酸素分子およびオゾンの高度分布

宇宙空間研究委員会(COSPAR)が決定した 1972 年の国際標準大気(CIRA)の高さの分布を図 3 に示します。

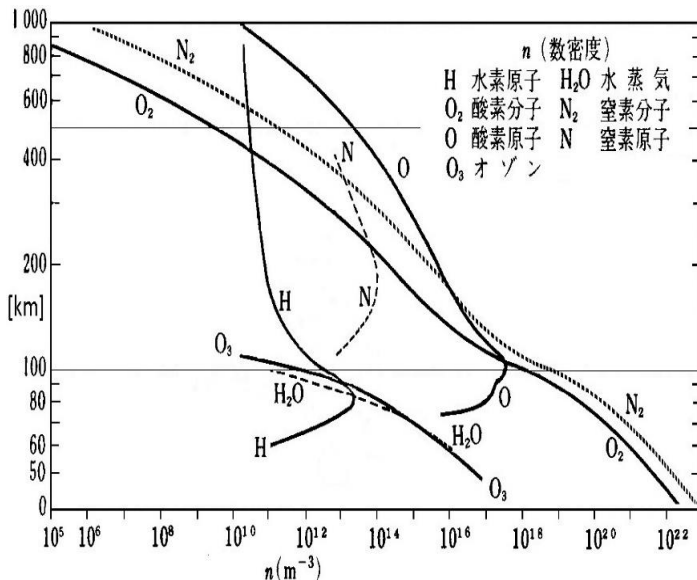


図 3. 地球の上空の酸素原子、酸素分子、オゾン、水の分子および窒素原子、窒素分子の密度の高度依存性
Fig.3. High dependence of density of oxygen atom, oxygen molecule, ozone, water molecules and nitrogen atom and nitrogen molecules over the Earth, Reproduced from [6]

大気層を侵入した X 線や紫外線などの電磁波が大気分子に衝突して分子や原子を励起状態にします。

現在の地球の大気は乾燥大気で窒素(N_2)が約 78%、酸素(O_2)が 21%、アルゴン(Ar)が 1%です。大気の水蒸気(H_2O)は最大 4%程度で 1%を下回ることもあります。

分子より原子はエネルギーの高い状態です。地球の 150km 以上の上空では酸素原子(O) は原子の状態として存在し、窒素より多いです。窒素(N)も分子の状態(N_2)が安定ですが上層では原子の状態で存在します。

地球の重力が弱いので最上層に水素はありません。地球の大気の水素原子濃度のピークが高度 100km から 70 km にあるのは前節で述べたように侵入した陽子が電子と結びついて水素原子になったと説明します。

100km より高度が下がると酸素原子はエネルギーの低い分子の状態(O_2)になります。さらに、低い温度では酸素原子と酸素分子が結合したオゾンの状態(O_3)ができます。オゾン濃度がピークになる高度は 25km です。対流圏では高度が低くなると気圧が高くなり、温度が上昇するので、オゾンは酸素分子になります。また、オゾン層は太陽光の紫外線を吸収することにより

温度上昇に寄与します。

オゾン(O_3)の分布が Earth probe 衛星や Aurora 衛星により測定され結果、オゾンの濃度は北半球の高緯度で高く、オゾン濃度が低いのは赤道付近と南極地域です。オゾンの量の季節変化では春先に北極付近で、南極地域では春先にオゾンホールができます(出典: 気象庁) [14]。南極上空の温度が非常に低くなって氷晶が多くなりオゾンが消失することも考えられます。まだ、オゾンの特性の詳細はよく解明されていません。

4.2. 上層の大気の温度変化

水が液体として存在した温度環境にあった地球では地表に水が蓄積されて海が誕生しました。その海の水に CO_2 が溶け、その CO_2 が石灰岩などになり沈殿して岩石圏に移りました。

地球の大気の温度の高度依存性は図 2 に示すように複雑な変化をします。地球では約 12 km 以下の上空に対流圏があり、対流圏では高度を高くすると気温減率は平均で $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ で温度が下がります。

12 km 以上成層圏になり高度が高くなると温度が上昇しピークの温度は 55km 付近で 0°C 程度です。さらに高度を上げると温度が低下し低い温度の底は高度 85km 付近で約 -80°C です。

金星では地球のような複雑な大気温度の高度依存性はありません。初期の地球も金星もカタストロフィックな脱ガスがあって H_2O と CO_2 が大気に放出されたと考えられています。しかし、金星の地表の温度が高く液体状態の水を保持できません。金星の大気の上層は H_2O 、下層が CO_2 となりました。また、金星には地磁気はありません。金星の厚い大気に太陽風の陽子が金星の大気に衝突して高速で周回するスーパーローテーションを駆動していると説明できます [11]。

5. 地球の気象に及ぼす太陽風の影響

5.1. 成層圏の気象に及ぼす太陽風の影響

対流圏の上層の成層圏で突然の昇温があり、それは太陽風によると考えられます。気象観測により成層圏の上部から中部では夏季は成層圏偏東風が吹き、冬季に成層圏偏西風が吹いています。その風速は最大では約 50m/sec という報告があります。

対流圏と成層圏との境目の対流圏界面の高度は極地で約 8km、緯度が低くなるに従って高くなり赤道付近で約 17km です。赤道付近の対流圏では蒸発した H_2O が上昇気流となり対流圏界面の高度を上げており、冬季には対流圏の上層界面の高度が低くなります。

太陽風には 25.4 日周期の太陽の自転に伴い赤道付近で最大の反時計方向の回転速度の 2km/sec があります。その太陽風が地球の昼半球に直撃すると大気分

子を歯車が噛み合うように時計方向に回転させます。太陽風の反時計方向の回転成分を正面に受ける赤道付近の地域では貿易風が東から西に流れます。

他方、地球の自転により赤道の地表速度が 463m/sec で反時計方向に回転しています。東側を吹きつける太陽風が自転する方向の大気を加速し、西側を吹き抜ける太陽風は自転の伴う大気の流れを反対方向に減速します。そこで太陽風は冬季には西風が強く駆動されて成層圏偏西風が吹きます。地球の自転軸が傾いているため、冬季には地球の側面を吹き抜ける太陽風の影響が強くなります。

5.2. 地球を周回する対流圏の気流と海流

地上に至る対流圏においては中緯度付近に偏西風、赤道付近には貿易風という地球を周回する大気の流れがあります。前節で述べた成層圏偏西風および成層圏偏東風があり、それらの大気の運動は太陽風が地球の外部から対流圏の気流を駆動しています[11]。

なお、北半球にアジア大陸と北アメリカ大陸によって分断された北太平洋海流とメキシコ湾流があり、偏西風によって流れています。海洋が多い南半球では南極大陸を囲んだ海域に偏西風により駆動された西風海流が地球を周回しています。

6. あとがき

電離層の様々な電波の伝搬特性が観測されており、それ等は地球の上層大気と太陽風の陽子との関わりを示しています。本報告では、太陽から放出された高速で陽子が地球の上層の大気の原子や分子と衝突して電離層が形成されるというモデルにより電離層の特性の解明を試みました。それは電離層の形成に関する理論を構築する際に役に立つと考えました。

本報告のポイントは高速陽子が平行運動する近傍の陽子と磁気的に結合し、自由電子と磁気的には反発することです。太陽風の高速の陽子は地球の地磁気の磁力線に巻き付いて磁気圏の内部に侵入します。その高速の陽子は自由電子より寿命が長く、太陽風の陽子が大気中の原子や分子と衝突することにより電離層の自由電子を発生します。高速で運動している太陽風の質量を持つ陽子は電離層の形成に関与しています。

今後の課題としては、地球の超上層のイオンや分子のデータを系統的に採取し、この広い領域における荷電粒子の振る舞いを解明すること等があります。また、太陽風地球に及ぼす影響から生命の起源の分野でも新たな展開が見込まれます。初期の地球で太陽風の高速の陽子が CO₂ の厚い大気に取り込まれると、陽子と CO₂ の化学反応で液体の炭化水素が生成されて浮遊物となり生物が誕生したという説を提案しました[15]。

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] 情報通信研究機構, “電離圏嵐のメカニズム,” <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Istorm.html>, 2011.
- [3] T. Hirayama, “Theoretical model of flares and prominences. I: Evaporating flare model,” *Solar Phys.*, 34, 323, 1974.
- [4] 柴田一成, “太陽面爆発(フレア)の謎に挑む-「ようこう」は何処まで解明したか?-, ” *天文月報* 第89巻第2号 pp.6069, 1996.
- [5] 陣英克, “電離圏ダイナモについて,” *情報通信研究機構季報*, Vol.55 Nos.1-4, 2-3-7, pp.185-195, 2009.
- [6] 石井守, 国立天文台編, 理科年表 2019(National Astronomical Observatory of Japan, Chronological scientific Tables 2018, “電離圏,” p.834-843, 丸善出版, 2019
- [7] 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.
- [8] 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.*, 109, Oct. 2004
- [9] 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.
- [10] H. Liu, N. Pedatella, K. Hocke, “Medium-scale gravity wave activity in the bottomside F region in tropical regions,” *Geophys. Res. Lett.*, 44, 2017.
- [11] 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.
- [12] 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 https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1888/57/585/57_585_333/_article
- [13] 国武学, “グローバル電離層嵐-負相嵐-, ” *MTI-Handbook*, 2018. http://mti.nict.go.jp/MTI_symposium/mti-handbook/top/h18/MTI_Handbook_Kunitake_Negative_Storm_Ver_1_4.pdf
- [14] 気象庁, “オゾンの世界分布と季節変化”, 図面は NASA 提供の衛星データから作製, http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-20ozone_avemap.html
- [15] 唐澤信司, “原始地球の大気の分子 (H₂O, CO₂, N₂) と太陽風(H⁺)の衝突,” *Viva Origino Vol.46, Supplement, pp.49*, 生命の起源および進化学会・第43回学術講演会, 埼玉大学, March 2018.