

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

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 太陽風の荷電粒子が関与している気象の現象について報告します。太陽風は太陽から放射状に放出される他に太陽の自転による反時計回転成分を持っており、赤道付近上空の大気に正面から衝突すると歯車が噛み合うように移動させるので時計回転方向の貿易風を駆動します。太陽風の荷電粒子群を取り込んだ磁気圏と大気を伴って自転する地球に衝突して通過する太陽風は東側を加速して西側を減速するので偏西風を駆動します。積乱雲が成層圏まで発達して凝結するとその雲の上空の気圧が低くなり、そこに太陽風の主成分である H^+ を含む乾燥した冷たい空気が集まります。その空気が関与して雷が発生し、旋回する台風の風が発生します。

キーワード: 太陽風, 磁気嵐, オゾンホール, 偏西風, 貿易風, 積乱雲, 台風, 雷, スーパーローテーション

Effects of solar wind on Magnetic storm, Ozone hole, Westerlies, Trade winds, Typhoons, Lightning and Superrotation

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: Based on the data from space explorations, it became clear that the solar wind influences the upper atmosphere and various phenomena on weather. The solar wind has a rotating component due to the rotation of the Sun in addition to the components that radiate vertically from the Sun. The continuous collision of charged particles with the atmosphere causes westerlies and trade winds. The atmospheric pressure becomes low when cumulonimbus is rose up to the stratosphere, and the dry air which contains H^+ of the solar wind gathers. Those cold dry air is concerned with generating Typhoons and Lightning.

Keywords: Solar wind, Magnetic storm, Ozone hole, Westerlies, Trade winds, Cumulonimbus, Typhoon, Thunder, Superrotation

1. 緒言

宇宙探査機等による観測が蓄積されて、それらの知見を照合してみると太陽風は偏西風や貿易風や台風などの地球の気象現象に大きな影響を及ぼしていることが明らかになりましたのでここで報告します。

太陽の表面で爆発が起きたとき、磁気嵐とデリンジャー効果という2種類の電波伝搬の障害が起こることが知られています。デリンジャー効果は太陽で爆発が起こった時に発生した X-線が大気分子をイオン化

して、異常に高い電子密度の層を発生して高周波帯の電波を反射して、短時間の影響を及ぼすものです。

ところが、磁気嵐は太陽の爆発で発生した太陽風が衝撃波になり地球に到達すると磁気圏を変えて HF 帯の無線通信が数時間から数日も不可能にします。太陽風の荷電粒子(H^+)はプラスイオンであり、電離層の電子密度を減少させて HF の電波を反射しなくします。

事実、太陽の活発な活動により電離層のピークの電子密度の減少することが報告されています[1]。磁気

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

嵐の際に電離圏全電子数 (TEC) と F 領域最大電子密度 (NmF2) が中央値から大きく減少しており、電離圏負相嵐 (negative storm) が起こるとされています [2]。

さらに、衛星画像 IMAGE S I -13 による磁気嵐時の測定値(N₂/O)の割合の高比領域が極域から中・低緯度に広がるデータが測定されました[3]。これは太陽風の荷電粒子(H⁺)が、自由電子や酸素イオンと結合した証拠です。また、太陽風の荷電粒子は気体分子と衝突電離をするとイオンや自由電子を増やします。

高速度で放出された太陽風の荷電粒子(H⁺)は地球の地磁気に捉えられます。磁場に電子だけを捉えられることはできませんが、H⁺と電子が生成され続けて共存するプラズマ状態は地磁気に長く捉えられています。

地球の磁気圏に捉えられた H⁺群は同じ太陽風の H⁺との衝突により流されるので磁気圏が変形します。地球に接触して通過する太陽風は自転する方向に加速され反対方向に減速されるので衝突を重ねて偏西風を駆動します。この偏西風は極地では周回する円周の距離が短いので弱くなります。

他方、太陽に直面した地球の赤道付近で太陽風が正面から衝突します。太陽は反時計方向に自転しており、回転運動の成分を持つ太陽風が垂直に衝突すると、歯車がかみ合う仕組みで太陽風の回連成分が赤道付近の成層圏の大気を東から西へ移動させる貿易風を発生します。

海水や地上の温度が高くなって、水蒸気を含む空気が上昇すると、上空で水蒸気が凝結して気圧が低くなります。太陽風の荷電粒子の H⁺が含まれる大気が積乱雲の上空に集まると、正電位になり雲の中の水の分子の分極が配列して底部が負に帯電した雷雲となります。

赤道付近で積乱雲群が発生し上空では乾いた冷たい空気が右ネジ回転で集まり、遠心力が勝ると中心に台風の目ができます。対流圏の積乱雲群自体も台風の目に向かって移動します。台風の目では双方の気体分子が衝突して同じ方向に回転して積乱雲の水蒸気が凝結して雨が降ります。台風は上空の乾いた冷たい気流と水蒸気が対流する積乱雲群により発生します。

冬季の南極の成層圏ではオゾンホールが形成されます。太陽風の H⁺が H⁺に衝突しても反応しませんが高速の H⁺が氷晶に衝突すると、H⁺が氷晶と反応します。「オゾンホールが形成されるのは多量の H⁺がオゾンに衝突して H₂O ができて氷晶になり、それが虹色に輝く極地成層圏雲となる。」という仮説を考えました。

太陽風の荷電粒子が関与する気象現象について報告して、これまで地球に及ぼす太陽風の荷電粒子の影響については過少評価されてきたことを指摘します。

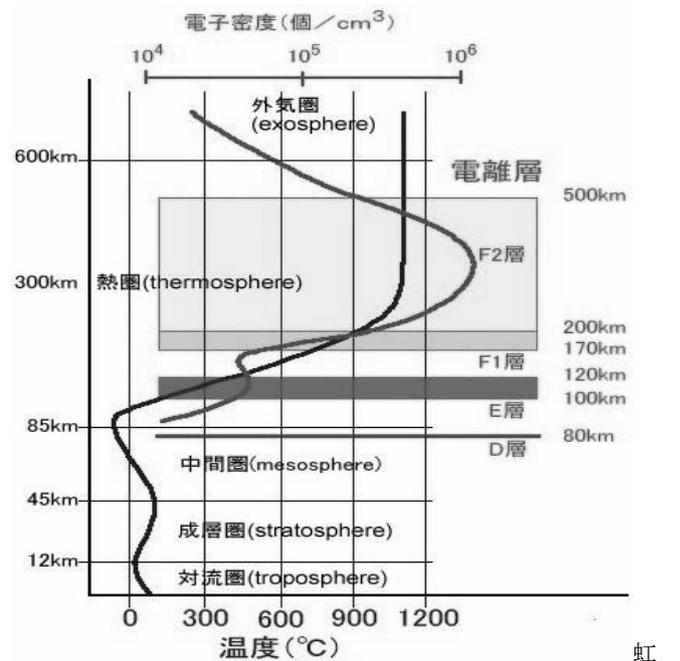
2. 電波伝搬の障害に見る太陽風の影響

2.1. 電離層の構造

地球の上空の大気分子は太陽から放出された X 線や紫外線により電離します。自由電子密度が濃い電離層で電波が吸収されたり、反射されたりします。

電離層で反射される電波は周波数帯によって相違します。ちなみに、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。短波は D 層を通り抜けて F 層で反射されます。

太陽から直線的に届く X 線や紫外線による電離層の形成は夜間では弱くなります。そこで電波の伝わり方も時間帯によって変化しています。電離層の構造の一例を図 1 に示します。



虹色に輝く

図 1 電離層の構造の 1 例(コピー元 website)

Fig. 1 A structure of ionosphere

<http://www.geocities.jp/hiroyuki0620785/intercomp/wireless/ionosphere.gif>

2.2. Dellinger Effect による電波伝搬の障害

太陽の表面で爆発が起きたとき、電磁波は爆発の 8 分後に地球に到達します。それは最も内側の電離層の D 領域(60 km~90 km)で N₂ と O₂ が、ハード X-線(波長 < 1 nm)によってイオン化されます。その異常に高い電子密度の D 層によって高周波帯の電波は反射され、その伝播に突然の障害を起こします。昼間の低緯度地域では大きな影響を及ぼすこの現象は D 領域で自由電子が増加することによるもので、デリンジャー効果として知られています。しかし、太陽風の高速の荷電粒子の H⁺は電離層の下層部まで侵入します。

2.3. 磁気嵐による無線の伝搬障害

太陽の爆発の後で、強い太陽風が地球に達します。通常の太陽風の速度は平均 450km/sec 程度ですが、太陽の表面でコロナ質量放出(CME)などの爆発が発生すると、高速(~1000km/sec)の太陽風が発生します。そして、先に行く低速の太陽風を圧縮して衝撃波になったものが磁気嵐です。磁気嵐になると HF 帯の無線通信が数時間から数日では不可能になります。

磁気嵐の際に電離圏全電子数 (TEC) と F 領域最大電子密度 (NmF2) の振舞について調べた報告によるといずれも中央値から大きく減少しており、電離圏負相嵐 (negative storm) が起こっています [2]。

また、衛星画像 IMAGE S I -13 におけるカメラによる磁気嵐時の測定値(N₂/O)の割合に関するデータにより、高比領域が極域から中・低緯度に広がることから明らかにされました[3]。磁気嵐では太陽風の H⁺と電離層のイオンの化学反応により自由電子が中和されて、HF の電波を反射しなくなると考えます。

3. 太陽風の H⁺による大気現象

3.1 地球の大気の内層構造

図 2 に示すように地球の大気の分子密度は上空に行くに従って単調に減少しますが、地球の大気の温度は成層圏と対流圏との界面(10km~20km)と中間圏(80km~90km)で温度が下がる 2 つの領域があります。

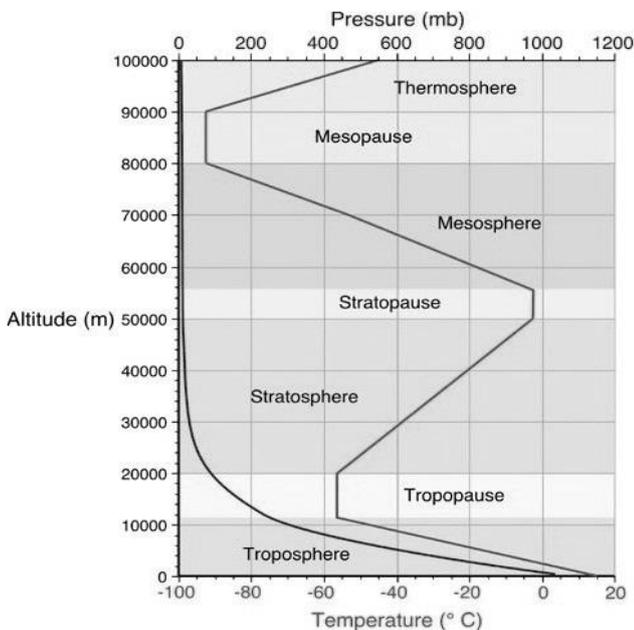


図 2 成層圏の構造の 1 例(コピー元 website)

Fig. 2 A stratospheric structure

<http://www.coolgeography.co.uk/A-level/AQA/Year%2013/Weather%20and%20climate/Structure/atmslayers.gif>

中間圏(Mesopause)で高度を下げると温度が高くなり成層圏界面で温度がピークとなり、さらに高度を下げると対流圏までは温度が-40℃まで低下します。

その下の層の対流圏では水蒸気が雲になり、雨を降らせて H₂O が対流しています。

ここで、太陽から地球に到達する H⁺ の量を磁界の影響を無視して計算してみます。今日の太陽から放出される H⁺イオンの典型的な量は N=10⁹ kg/sec です。地球に直接到達する H⁺の量は、地球の断面(S_{Earth})と太陽を中心とした地球までの距離(1.5x10⁸ km)[4]p.77 を半径にした表面(S_{sphere})の比率によって推定します。

$$(N \cdot S_{\text{Earth}} / S_{\text{sphere}}) = (10^{12}) \times (6.02 \times 10^{23}) / \{4\pi(1.5 \times 10^{13})^2\} = 6.02 \times 10^{35} / (2.83 \times 10^{27}) = 2.1 \times 10^8 \text{ [pieces/(cm}^2 \cdot \text{sec)]}$$

これはおよそ 1 μm² に 2.1 個に相当します。地球に到達する H⁺の量は 39,000 kg/day です。

3.2 太陽風によるオゾンホールの形成

Earth probe 衛星や Aurora 衛星の測定によるオゾン(O₃)全量分布図[4]p.985-986 では O₃ が赤道付近と北極や南極地域で O₃ の濃度が低いです。南極上空でオゾンホールができることが明らかになり、塩素酸化物などが O₃ 層の破壊物質として論議されました[5]。極地成層圏雲を生成する化学物質も検討されました[6]。

しかし、O₃ はむしろ南半球の方が北半球より濃度が高いです。O₃ 層は対流圏と成層圏の界面の上部にできます。図 2 の温度変化で示すように O₃ 層は低温領域です。水の微粒子はほぼ-40℃を境にそれ以下の温度で氷晶化します。-78℃では確実に氷晶に変えられるといわれています [7]。

平均 450 km/sec の速度を持つ太陽風の荷電粒子の H⁺が電離層を通過して、氷晶の H₂O に衝突して H₂ を放出して、O₃ が生成されることが考えられます。

H⁺が多量に集まる南極の冬の成層圏の低層では気温が下がり乾燥します。そこで、H⁺が O₃ と衝突して H₂O ができれば、その H₂O は直ちに氷晶となり、虹色に輝く極地成層圏雲ができ、O₃ 層が消失します。

著者は、このように O₃ の生成・消滅には太陽風の H⁺と氷晶が関与するという仮説を提案します。

3.3 電離層におけるオーロラの形成

オーロラは、高緯度地域(北極と南極)で見られます。それが発生する高度は 100km~500km の電離層の領域であり、X 線や紫外線で電離したイオンが極地で地磁気に巻きついてオーロラを発生しています。

4. 地球の磁気圏及ぼす太陽風の影響

4.1 太陽風による地球の磁気圏の変形

太陽から放射される太陽風の放射速度は平均 450km/sec の高速であるので、地球の磁気圏は図 3 に示すように太陽風によって変形しています。太陽に面する側の磁気圏は圧縮され、反対側に拡大します。地

球の自転により磁気圏が回転すると、膨張した側の磁気圏は、圧縮された側よりも太陽風の影響を強く受けます。

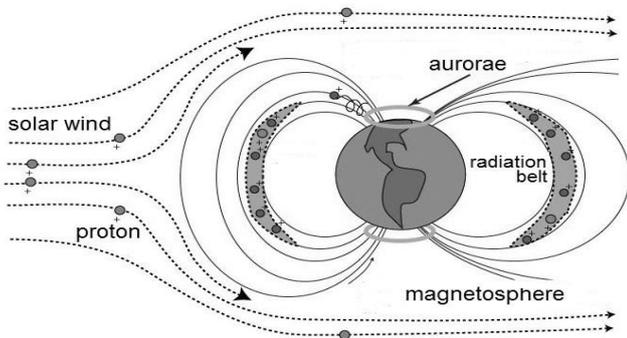


図3 地球の磁気圏 (改変コピー元 website)
Fig. 3 Magnetosphere of the Earth
<http://www.astronomynotes.com/solarsys/radiationbelts.png>

4.2. 太陽風による大気の地球を周回する運動

地球上では貿易風の東風と偏西風の西風が常に吹いています。この地球の周りを周回する連続的な風は、地球の外側からの力なしでは維持されません。

太陽に面する側（昼半球側）の磁気圏は圧縮され、反対側（夜半球側）は伸長します。北極星から見て反時計方向に地球の自転で地球の磁気圏も回転します。ここで、地球の自転による地表は 463m/sec です。他方、太陽風の放射方向速度は平均 450 km/sec です。

通過する太陽風は地球の自転で東側では加速され磁気圏の尾部を新たに作り、西側で磁気圏の尾部を押し返すように作用します。この太陽風が及ぼす衝突作用の東西の差によって、地磁場によって捉えられた H⁺ と地球の上層の大気が西側から東側に移動して偏西風が吹きます。

他方、太陽も地球も反時計方向に自転しています。太陽は自転を 25.4 日ですべてして太陽表面の放出されたプロトンが赤道付近で回転速度は最大値 2km/sec になります。この円周方向の回転運動を含んでいる太陽風が直面する昼半球に太陽風が衝突する際に大気分子を歯車が噛み合うように回転させるので東から西に地球の自転と反対の大気を移動します。地球の裏側の夜半球には衝突に伴う回転力はありません。そこで、赤道付近では東から西に周回する貿易風が吹き続けます。

4.3. 台風及びハリケーンの発生のメカニズム

台風になる積乱雲群の上空では水蒸気が凝結して低気圧になります。その低気圧の中心に向かって乾燥した冷たい空気が流れ込みます。

北半球では上空の大気が貿易風と偏西風により回転して流れ込みます。その際に角運動量が保存されて

回転中心に移動するので中心部では時計回転方向の渦の回転が速くなります。その回転の遠心力が中心への求心力より強くなると台風の目ができます。そこに乾燥した冷たい大気が集まります。他方、海面上に発生した積乱雲は上昇気流と雨を伴って低気圧の中心に向かって移動します。台風の目と積乱雲が衝突する境界領域では面では上空の冷たい乾燥した気体と積乱雲の水蒸気を多く含んだ上昇気流が混ざり合い、水蒸気が凝結して雨となり落下し続けます。大気分子群が混ざり合う際に、噛み合う歯車のように同じ方向に回転力を得るので、積乱雲は反時計方向に回転します。これらの積乱雲群全体の進路は上空の貿易風と偏西風の影響を受けて大きく時計方向に移動して北上します。

このようにして太陽風が関与して中緯度領域で台風が発達することだけでなく、熱帯低気圧の最大強度到達緯度の北上傾向や台風の急発達する最近の傾向を太陽風が強くなることで説明できます。

なお、単独の積乱雲の上空の気圧が低くなり、荷電粒子の H⁺ を含む乾燥した大気が集まりプラスの高電圧になります。水の分子の電気双極子が積乱雲の中で配列して積乱雲の底がマイナスに帯電することにより雷雲が発生します。

5. 大気の地球循環

5.1 ジェット気流のメカニズム

図4に示すように北半球太平洋上空では貿易風と偏西風による東西で反対に旋回する気流の渦が起こります。また、積乱雲には高度を上下に対流する大気の流れがあります。

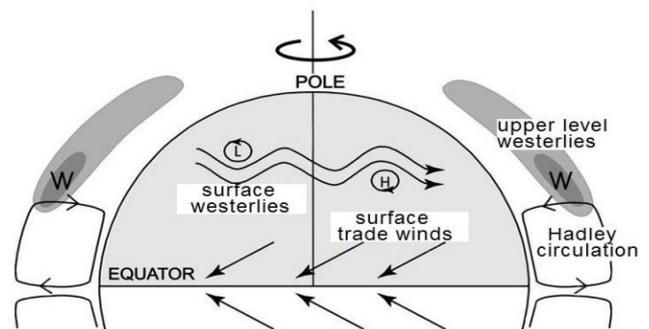


図4 大気の循環モデル(改変コピー元 website)
Fig.4 A large circulation model of atmosphere
http://paoc.mit.edu/labguide_old/gen_circ/theory/fig. 8.2.jpg

赤道付近の暑い空気が上昇し、上空で高緯度地域に向かい偏西風の影響で西風に変えられて、東に移動してから、貿易風により東風になる時計方向の巡回する Hadley circulation があります。

他方、北極では偏西風の速度がなくなります。冬には北極が低温になります。アジア大陸の上空の大気は

偏西風を受けながら反時計に回転します。その大陸の大気の巡回が日本の付近で Hadley circulation と衝突し、回転方向が南北で反対の二つの気流が合流するので、同方向の気流が合流してジェット気流になります。

5.2 地球の大気の子と太陽風の H⁺の反応

極低温の宇宙塵に含まれて CO₂ は固体で存在します。極微粒子同士は極低温で付着します。ビリアル定理により重力ポテンシャルエネルギーの半分が放出されるので、惑星が大きく成長する際にも中心部が暖められ、成長中にも地殻から CO₂ の脱ガスが起こります。

他方、太陽の Hayashi phase の期間中の活動は強烈に変化します[8]。太陽が T タウリ星の期間に至るまでに太陽系の惑星もある程度成長しており、強烈な変化の期間中には岩石惑星の内部の層も形成されたと考えられます。その時期の地球の大気中には脱ガスした CO₂ が大部分であり、O₂ は殆ど含まれていません。

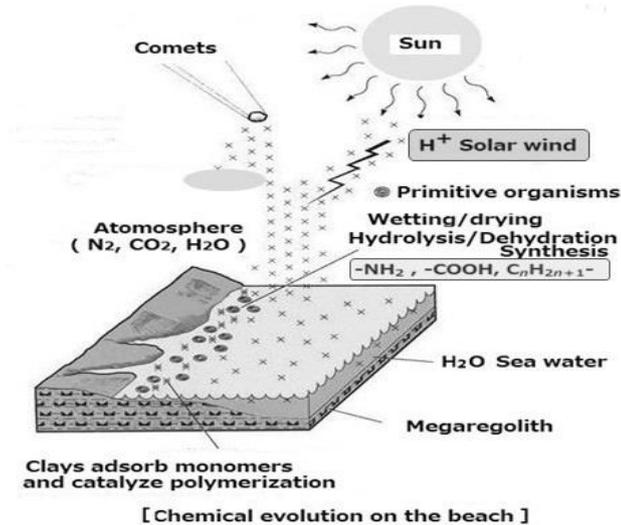


図 5 原始大気の子と太陽風の荷電粒子の H⁺との反応による炭化水素の生成[9]

Fig.5 Generation of hydrocarbons by reaction of CO₂ in primitive atmosphere and H⁺ of solar wind

図 5 に示すように脱ガスした大気中の CO₂ と太陽風の H⁺が衝突して H₂O が生成されます。その H₂O が凝縮して雨となりますが、地上が液体状態の H₂O の温度になると海ができました。高温の水には CO₂ や NH₃ などのガスは溶け込みません。水温が低くなり、大気中の CO₂ が海に溶け込み、カルシウム(Ca)と化学結合して石灰岩(CaCO₃)になって岩石圏に固定されました。

孤立した原子は高いエネルギー状態にあるので H⁺の衝突が続く状態で化学反応が進行します。H⁺は O²⁻イオンと結合し、H₂O が生成されます。H⁺と N³⁻イオンが結合して NH₃ が生成されます。最後に、C⁴⁺イオンと結合して CH₄ などの炭化水素が生成されました。

5.3 太陽風の H⁺と CO₂分子による有機分子の生成

太陽風の荷電粒子の H⁺と大気の子 CO₂ から合成された CH₄ のような炭化水素分子は大気中に留まり、その大気の中で太陽のエネルギーにより大きな分子量の炭化水素の分子に合成されます。

一般に炭化水素は比重が水より軽く水に溶けずに水面に浮かびます。液体状態の長い炭化水素の分子は強い分子間結合を持っています。それらの浮遊する分子が水面で集積されました。

水に浮かぶ炭化水素分子の末端の水素原子は、太陽風の H⁺との衝突により水酸基(OH⁺)またはカルボキシル基(COOH)で置換されます。次いで、酸性カルボキシル基末端を海水中の塩基性の NH₃ と結合させてアミノ酸が生成されます。そのアミノ酸は蛋白質を生成するペプチド結合を作ります。ペプチド結合は、炭化水素分子間の疎水性カップリングよりも強いです。

生物の細胞膜は C₁₆H₃₄ (融点 18 °C 沸点 287 °C) あるいは C₁₈H₃₈ (融点 28~30°C 沸点 317 °C) の分子で構成されています[10]。原始の海で液体状態であるそれらの有機分子が細胞膜を形成しました [11]。

6. 厚い大気の子スーパーローテーション

6.2 タイタンの大気の子スーパーローテーション

タイタンの大気の子気圧は地球の約 1.5 倍です。2005 年に欧州宇宙機関 (ESA) の探査機ホイヘンスが土星の衛星タイタンに着陸しました[12]。その際にホイヘンスは西から東に漂流しました。45 km 以上の高度でタイタンの赤道回転速度 12 m/sec よりも高速の風が測定されました。そのスーパーローテーションの速度のピークは約 120km の高度で 120 m/sec です。その風は地面に近づくにつれて減少しました。

タイタンの公転軌道の半径は 120 万 km で土星の約 110 万 km の磁気圏の一部を通過します。土星の自転期間は 10.7 時間で、タイタンの自転周期は 15.9 日です。土星の磁気圏は多くの H⁺を捕獲して、土星の自転により速い速度でタイタンの表面上を掃引しています。

タイタンの大気の子スーパーローテーションは土星の磁気圏によって捕獲された H⁺が土星の反時計方向の自転によりタイタンに衝突して発生していると考えます。

土星から遠く離れた土星の磁束の速度は、土星に近い磁束よりも高速で回転します。土星の磁場と一緒に移動する荷電粒子の H⁺の流れもタイタンの土星の反対側では土星に直面する側より早く流れます。そこで、土星の磁気圏の反時計方向の回転によってタイタンの大気の子反時計方向に回転されます。土星側と裏側の回転速度の違いは、最大で $\delta v_{max} = 2\pi \{ (L_{サターン-タイタン} + r_{タイタン}) - (L_{サターン-タイタン} - r_{タイタン}) \} / T = 843 \text{ m/sec}$ と計算されます。この差はタイタンの極域ではありません。

土星の磁気圏外に存在する状態において直接タイタンに到達する H^+ の量は少ないですが、タイタンの断面 ($S_{\text{Titan}} = 2.084 \times 10^{12} \text{ m}^2$) と球の表面 ($S_{\text{Sphere}} = 2.568 \times 10^{25} \text{ m}^2$) の比率によって推定できます。

今日の太陽から放出される H^+ の典型的な量は 10^9 kg/sec です。太陽を中心とした土星の位置までの距離を用いて球面の面積 S_{Sphere} を算出して、その一部が直接タイタンに達するとします。その H^+ の量は 0.81 g/sec であり、 70 kg/day であり、 $2.6 \times 10^4 \text{ kg/year}$ です。

6.4 太陽風による金星のスーパーローテーション

金星の大気のスーパーローテーションは東から西へ惑星を周回する強い風で、金星の自転方向と同じ方向です [13]。高度 60 km の上空で速度 100 m/sec ですが、高度を下げると周回する気流の風速は遅くなります。金星の自転は 243 日であり、金星の赤道での自転による地面の速度は 1.8 m/sec ですが、太陽の自転の回転方向とは反対です。なお、太陽の自転周期は 25.4 日です。その太陽の表面の回転速度は 2 km/sec です。太陽風の H^+ は放射速度が平均 450 km/sec であり、太陽の自転方向に垂直速度の 0.44% の回転速度を伴って放出され、太陽に面した金星の厚い大気中の分子に 2 km/sec の回転成分を含んだ H^+ の太陽風が直撃します。太陽の向く面だけが太陽風の直撃を受けます。太陽に面した側の大気のみが太陽風によって太陽の自転の反対方向に回転されます。こうして金星のスーパーローテーションが発生しますと説明しました [14] p.3-3。

また、長年にわたって吹き続ける金星の厚い大気のスーパーローテーションにより金星の自転が太陽の自転と反対の方向に変えられたと説明できます。

7. 結言

本報告では磁気嵐、オゾンホール、偏西風、貿易風、積乱雲、台風、雷などの現象を太陽風の荷電粒子の H^+ が関与するメカニズムとして説明しました。太陽風の荷電粒子の運動の影響を考えることで台風の発達などの地球の大気現象について統一的に説明できました。

オゾン層の形成についてはまだ仮説の段階ですが、太陽風が気象に及ぼす影響を考慮に加えることにより、スーパーローテーションなど惑星の大気現象で謎とされたことがいくつか理解できました。

従来の地球気象学では太陽の活動による X 線や紫外線がイオン化する現象を過大に評価していて、太陽風の荷電粒子の H^+ が地球の大気に及ぼす効果を過少評価していたのではないかと考えます。

著者は、人工衛星等を利用してさらに詳しい研究がなされることを期待しています。

文 献

- [1] R. A. Duncan, F - region seasonal and magnetic storm behavior, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **31**, 59-70, 1969
- [2] Jin, H. Maruyama T, "Temporary decrease in daytime F-region peak electron density due to eastward electric field penetration during magnetic storm" *J. Geophys. Res.*, Vol.113, A05305, 2008
陣 英克, 丸山 隆, 大きな磁気嵐中に観測された全電子数と NmF2 の異なった振舞, 情報通信研究機構季報 Vol.55 Nos.1-4 pp.335-341, 2009
- [3] 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 S I -13 and TIMED/GUVI observations, *J. Geophys. Res.*, 109, Oct. 2004
- [4] National Astronomical Observatory of Japan, Chronological scientific Tables 2018, p.77, p.985, Maruzen Pub. Co. Japan, 2017
- [5] J.W. Barrett, P. M. Solomon, R. L. de Zafra, M. Jaramillo, L. Emmons, Formation of the Antarctic ozone hole by the ClO dimer mechanism, *Nature* (ISSN 0028-0836), vol. 336, p. 455-458 Dec. 1988
- [6] 中根英昭, オゾン層の現状とオゾン層研究, 科学技術動向, 10月号, p.21-31, 2004
- [7] 小林禎作, 雪の結晶, ブルーバックス、b-163, 148-149, 1970
- [8] T. Kusaka, T. Nakano, C. Hayashi, Growth of Solid Particles in the Primordial Solar Nebula, *Prog. Theor. Phys.*, **44**, 1580-1595, 1970
- [9] S. Karasawa, "Collisions of the early Earth's atmospheric molecules (H₂O, CO₂, N₂) and solar-wind (H⁺)", *Viva Origino* Vol.46, Supplement, pp.49, Saitama Univ., March 2018.
- [10] B. Alberts, D. Bray, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, J. D. Watson, *Molecular biology of the cell*, Third Ed., p.479, 1994
- [11] Karasawa, S. The birth of life on the Earth, Web site (video) ,2018, <https://www.youtube.com/watch?v=p-PfUaZ1s7A>
- [12] Science highlights from Huygens, #2. Superrotating winds, Jan. 2017. <http://sci.esa.int/cassini-huygens/55223-science-highlights-from-huygens-2-superrotating-winds/>
- [13] Schubert, G., C. Covey, A. Del Genio, L.S. Elson, G. Keating, A. Seiff, R.E. Young, J. Apt, C.C. Counselman, III, A.J. Kliore, S.S. Limaye, H.E. Revercomb, L.A. Sromovsky, V.E. Suomi, F. Taylor, R. Woo, and U. von Zahn, Structure and circulation of the Venus atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **85**, 8007-8025, 1980 doi:10.1029/JA085iA13p08007.
- [14] S. Karasawa, Comparative planetology based on material physics - How planets were formed -, Web site: <http://www7b.biglobe.ne.jp/~shinji-Eg%20planetology%20index.htm> 2018.