

太陽活動変化とその地球超高層大気への影響*

藤 田 茂**

1. はじめに

大気温暖化や成層圏オゾンの減少が社会的問題となってきたため、科学者の関心が気候変動の問題に注がれるようになってきた。そのため太陽活動に伴う地球大気の変動についての研究も以前より盛んに行われるようになってきている。この小文では太陽活動と地球超高層大気（高度 100 km 以上）の変動の関連について述べる。

2. 太陽活動変化の特徴

2.1 太陽からのエネルギー流の特性

まず太陽からのエネルギー流（太陽放射と太陽風）の平均的様子をまとめよう。

太陽放射のスペクトルは、第1図（上）で示すように絶対温度で5770度の黒体放射として近似できる。図で示した波長域の外側に、X線や電磁波の放射も存在する。さらに太陽からは太陽大気を形成している物質（陽子・電子・ α 粒子などの荷電粒子）も地球に向けて流出しており、太陽風と呼ばれている。

太陽風と太陽放射は地球大気と相互作用する断面積が異なる。太陽放射は地球の断面積を通過する部分のみが地球大気に影響を与える。それに対し、太陽風は荷電粒子の流れであるから、地球の固有磁場によって軌道を曲げられてしまう。このような軌道の変化がおこる範囲が太陽風と地球大気の相互作用の断面積と考えられる。太陽風粒子が入り込めない地球の領域を磁気圏と呼んでおり、夜側に長く尾を引いた彗星のような形をしている（第2図）。平均的な大きさは、地球表面から磁気圏の太陽側境界（磁気圏界面）まで地球半

径の10倍程度、地球軌道での磁気圏の直径はやはり地球半径の10倍程度である。このように太陽風と地球の外圏大気（磁気圏）とがエネルギーのやり取りを行う断面積の半径は、地球半径の約10倍と見積ることが出来る。

以上のことを考慮にいて、地球に及ぼす太陽からの各種のエネルギー流の寄与率を推算すると、可視光による日射量：紫外線放射量：太陽風エネルギー量～1： 10^{-3} ： 10^{-5} 程度である。（但し、この見積りにおいて磁気圏断面に入り込む太陽風はすべてエネルギーを失うとしているが、これは過大評価である。実際はこの値よりやや小さいと見るべきであろう。）従って、紫外線領域の放射や太陽風のエネルギーは可視光に比べて非常に小さい。なお、地球の平均公転軌道での太陽から放射されるエネルギーは 1370 W/m^2 ($=1.964 \text{ cal/分/cm}^2$) である。

2.2 太陽からのエネルギー流の時間変動

太陽放射や太陽風の強さは一定でない。又太陽放射の変動量は波長域によって異なっている（第1図の下図に示す）。まず太陽活動の強弱を何をもって示すかについて説明する。

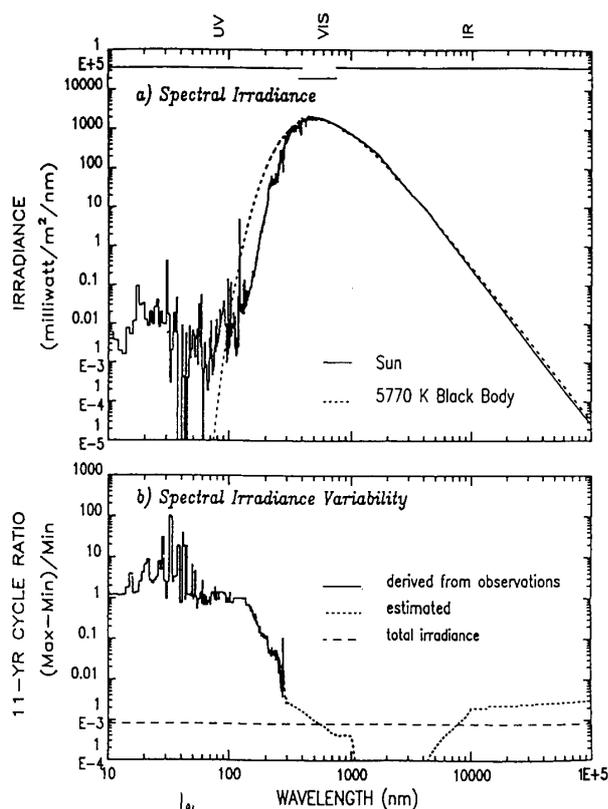
「相対黒点数」とその変化

太陽表面には周りより温度が低く黒く見える黒点と呼ばれるものがある。一般に黒点と呼ばれるものは普通数個の黒点の集まりから出来ている黒点群を形成している。そのため、客観的な個数を定義するには工夫が必要である。即ち、まずある天文台で観測された太陽表面上の黒点群の数に10を掛け、さらに各黒点群中の個々の黒点の数の総和を加えたものを求める。次に天文台毎に決められた望遠鏡の性能や観測者の個人的癖を補正するための係数を用いてその天文台の補正黒点数を算出し、世界各地からの天文台でのこうした補正黒点数の平均を求める。こうして求めた黒点数が「相

* Variation of the solar activity and its influence on the terrestrial upper atmosphere.

** Shigeru Fujita, 気象大学校.

© 1994 日本気象学会



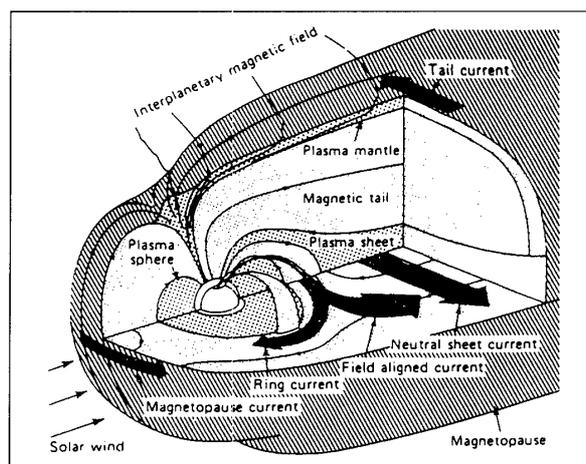
第1図 (上)太陽放射のスペクトル。UV：紫外線，VIS：可視光，IR：赤外線。点線は5770度の黒体輻射のスペクトル。図には示していないがUVの短波長側のX線領域やIRの長波長側の電磁波領域にも太陽放射が存在する。(下)11年変化の振幅のスペクトル。実線は実測，点線は推定，破線は全放射の平均的变化。(Lean, J., 1991, Rev. Geophys., 29, 505-535.)

対黒点数」である。この方式は1848年にウォルフが発表したもので「ウォルフ数」とも呼ばれている。以後こうして求めた「相対黒点数」を黒点数と呼ぶことにする。

太陽黒点数の11年周期は古くから知られている太陽の活動周期である。そのためこの11年周期に対する他の太陽地球系物理量の変動の関連が研究されてきた。この小文でもおもに地球超高層大気の11年変動について述べる*1。

第3図に1610年代から現在までの黒点数の変化を示す。これによると17世紀を除いて黒点数は約11年で増減していることが明瞭である。黒点の観測は1600年代から継続して行われており、その数が約11年周期で増

*1 周期の長さはゆらぎがあり、周期の長ささと地球大気の間には密接な関連があることを Friis-Christensen and Lassen (1991) が発見した。



第2図 磁気圏の外観図。本来双極子的である地球磁場と太陽風の相互作用によって彗星状の磁気圏が形成される。双極子磁場がこのように変形されることは、境界や内部に図で示されているような電流が流れていることと等価である。(Potemra, T. A., 1991, J. Geomag. Geoelectr., 43, 881-892.)

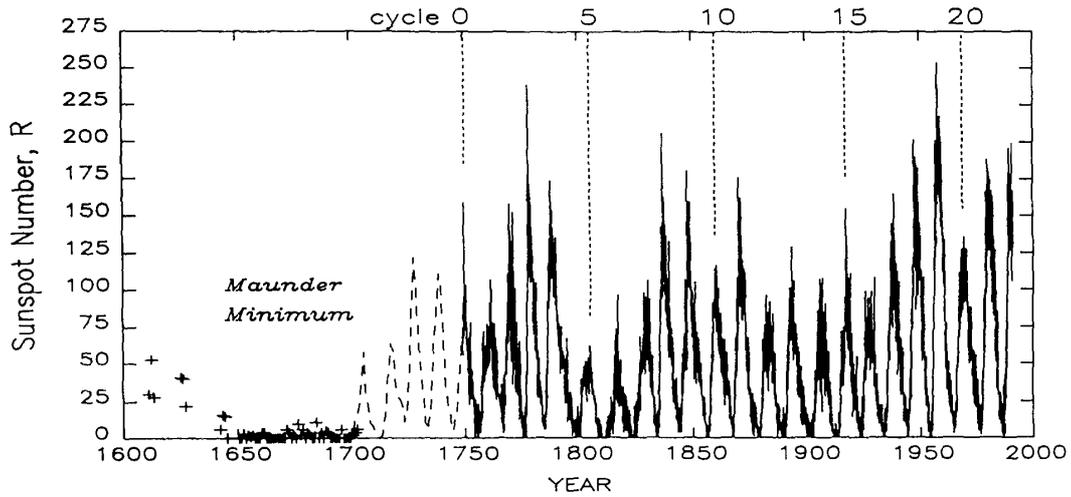
減していることは昔から気づかれていた。17世紀には黒点が殆ど存在しなかった期間があり、マウンダー極小期と呼ばれている。

太陽放射の11年変化

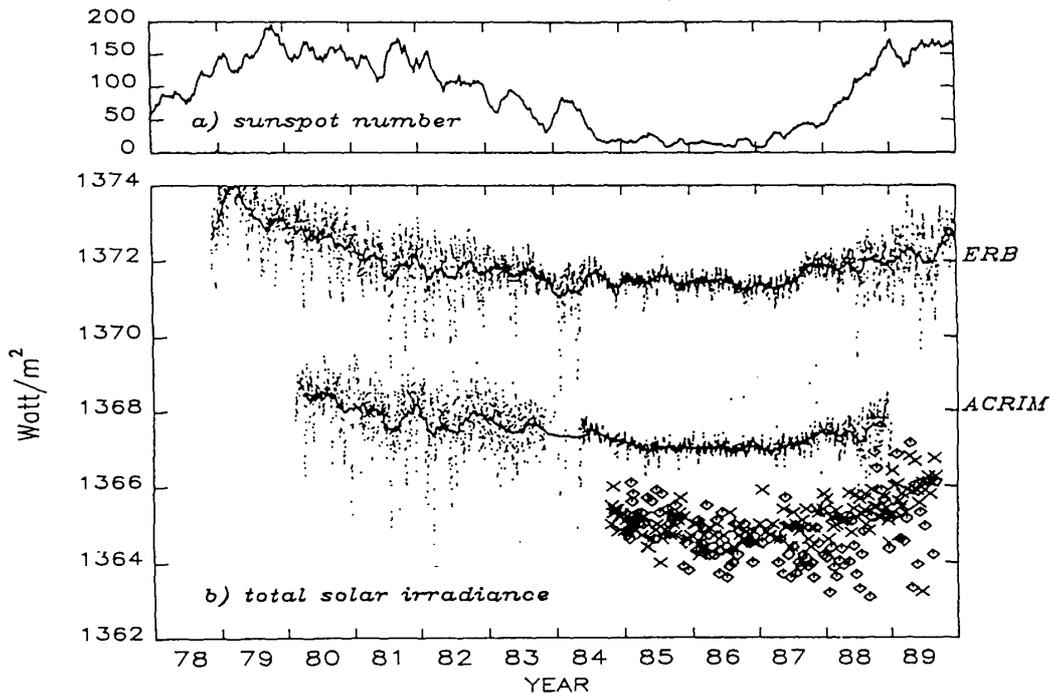
まず可視光領域について説明する。太陽活動にともなう可視光強度の変動を正確に観測するのは簡単ではなく今のところ1980年以降の1太陽活動周期程度のデータしかない。理由は雲の影響や地球大気の吸収を避けるために人工衛星高度で観測することが必要であることと、何年にもわたって安定している精度の良い放射計測器の開発が困難であったからである。アメリカで打ち上げた2つの人工衛星に積み込まれた測定器が約10年にわたって同じ傾向を示す結果を出したことによりこれが最初の信頼できるデータであるとされている(第4図)。なお、この図は実際は太陽からの全放射量の変動を示しているが全放射のほとんどは可視光が担っている。

第4図に示されるように、周辺より温度が低い黒点の数が多いときに太陽から放射されるエネルギーが大きくなるのは奇妙な感じがする。黒点数が増加したときは黒点の面積増大により減光効果があることは事実である。しかし、この時白斑とよばれる明るい部分の面積が増大する事による増光効果の方が大きい。従って、黒点数が多いときに太陽の光度が増すのである。

第4図に示される太陽放射の時間変化には11年変化



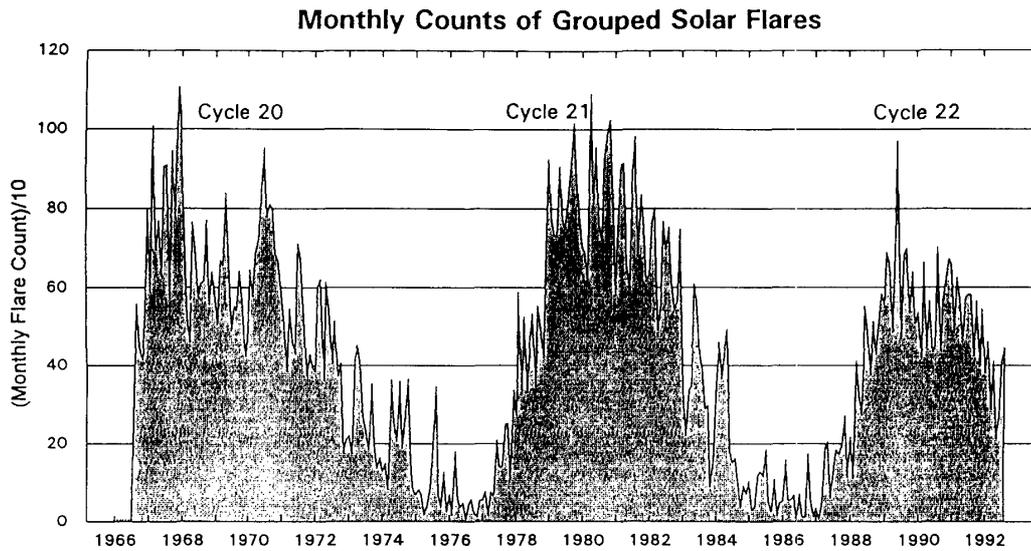
第3図 1610年以後の黒点数の変化. 1610-1750は年平均値, それ以後は月平均値を示している. 11年変化が明瞭である. さらに75~80年周期が重疊している. 17世紀にはマウンダー極小期とよばれる無黒点期があった. (Lean, J., 1991, Rev. Geophys., 29, 505-535.)



第4図 (上)黒点数. (下)人工衛星による地球大気吸収のない場所での太陽放射の観測. 2つの人工衛星 (ERB: NOAA の NIMBUS 衛星と ACRIM: NASA の SMM 衛星) に搭載された放射計の記録が独立に同じ時間変化傾向を示すことからこのデータは信頼がおけるものとされている. ◇と×はさらに別の衛星観測結果である. なお両者の絶対値が異なるのは較正值の差であって, 今は問題にしない. (Lean, J., 1991, Rev. Geophys., 29, 505-535.)

以外にスパイク状の変動がある. これは後で述べる太陽フレア現象のためである. 黒点数が増加したときはフレアの数が増加するためスパイク状の変動が多くなり, 極小期では少なくなる.

紫外線領域 (波長 10~400 nm) の太陽放射は太陽活動に同期して変動し, その振幅は可視光のそれより大きい. また振幅は波長が短いほど大きくなり, 例えば成層圏オゾンを作り出す波長 200 nm 程度の紫外線は



第5図 フレアの発生数の年変化. 黒点数の増減と関連がある. (World Data Center-A, 1993, Solar Geophysical Data, 583-Part 2.)

第1表 各スペクトル帯の太陽放射の11年変化. 地球大気の吸収領域も示す. (Lean, J., 1991, Rev. Geophys., 29, 505-535.)

スペクトル帯	11年変化の振幅	吸収領域
X線 (-10 nm)	10倍~1000倍	中間圏
10-120 nm	2倍~10倍	熱圏 (150-300 km)
121.6 nm	2倍	熱圏 (60-100 km)
(ライマンα線)		
125-175 nm	50%	熱圏 (100-160 km)
175-205 nm	15%	成層圏 (20-80 km)
205-250 nm	4%	成層圏
250-300 nm	0.5%	成層圏・対流圏
300-400 nm	0.1%	対流圏 (0-15 km)
400-800 nm	0.08%	対流圏・地表・海洋

4%~10%, 電離層プラズマ生成に主要な役割を果たすライマンα線 (121.6 nm) では2倍の変動を示す.

第1表に各波長領域の太陽放射が11年周期でどの程度変化するかをまとめてみた. この表から対流圏の気象現象に最も影響する可視光領域 (波長 300~800 nm) の放射エネルギーはほぼ0.1%の変動しかない. 一方, 波長の短い領域ほど変動が大きい. また, 太陽放射は波長によって吸収される高さが違うため太陽活動による地球大気の変動は高さによって大きく異なる.

太陽風の変化

太陽風は粒子の流れであるから, 強さの変動は密度×速度³ (エネルギーフラックス) の変動である. 以下強さという言葉はこのフラックスの量の変動として考えて頂きたい.

太陽黒点と太陽風の強さの関係はフレアと呼ばれる

爆発現象の頻度で説明されている. 巨大な黒点においてはしばしばフレアが起こり, それに伴い通常より高エネルギー・高密度の太陽風が発生し地球に押し寄せる. フレアは黒点数が多いときほど多く出現する (第5図). フレアに伴い, X線や太陽電波, 太陽宇宙線と呼ばれる超高エネルギー粒子も発生する.

太陽風は太陽の固有磁場を引きずって地球まで吹いてくる. 次の章で述べるが, 太陽風と地球磁気圏の相互作用にはこの太陽風中の磁場 (Interplanetary Magnetic Field, IMF と略す) が大きな役割を果たす.

太陽表面にはコロナホールと呼ばれる場所があり, ここから発生する高速高密度の太陽風が太陽の自転のため27日毎に地球に向かって吹いてくる. このために太陽風の強さには27日周期の変動もある. 太陽自転に伴う現象として IMF の太陽に向かう極性と反対の極性のセクター構造が交互に現れる準周期的変化がある. 地球全体の雷の活動度と関連があるとの研究がある.

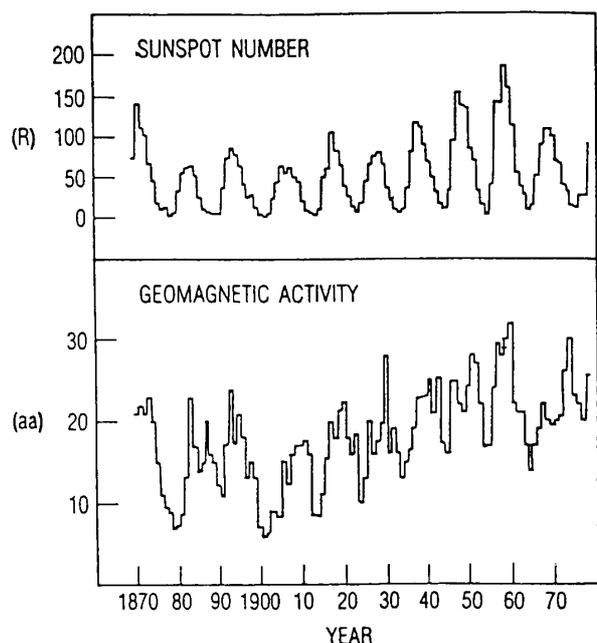
3. 磁気圏の変動^{*2}

ここでは太陽活動に伴う磁気圏の変動についてまとめる.

3.1 磁気圏擾乱と太陽風の関係

太陽放射は地球大気の中に直接入り込み, 波長によって特定の大気物質に吸収されてエネルギーを相手

^{*2} この章の内容については例えば Nishida, A., 1978, Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere, Springer Verlag に詳しい.



第6図 磁気圏擾乱の指数としての地磁気活動 (aa 指数と呼ばれるもの) と黒点数との相関。相関係数は0.5程度である。(Gorney, D. J., 1990. Rev. Geophys., 28, 315-336.)

に与える。これに対し太陽風は地球の磁場との相互作用があるため太陽放射とは異なった形で大気(磁気圏)にエネルギーを与える。

太陽風の動圧が第2図で説明したように地球磁気の影響圏(磁気圏)を有限の大きさに閉じ込めているため、磁気圏の大きさは太陽風の強さによってコントロールされる。即ち、太陽風のモーメント(密度×速度)が直接磁気圏に影響を与えている。これにより磁気圏の中に電場が発生し、プラズマの大規模な運動(第2図の電流系)を作り出している。この電場は太陽風の速度が早いときほど大きい。磁気圏中の磁力線の電気抵抗は殆ど0であるので磁力線に沿って電場ポテンシャルは一定であると見なせる。よって磁気圏の電場は磁力線を通して極域電離層の電場になる。このように、太陽風の運動モーメントは磁気圏や電離層内のエネルギーとして地球大気の中に入ってくる。

太陽風粒子は直接磁気圏内に入ってくることは出来ない。無衝突磁化プラズマ^{*3}は、磁場と共に運動する。無衝突磁化プラズマの中に異なる起源の磁場が存在している場合、そのままでは磁力線は交わらないのでプラズマ同士も混じり合えない。これが太陽起源の磁場

^{*3} プラズマ中に電流が流れていると磁場が発生している。このようなプラズマを磁化プラズマと呼ぶ。

を持つ太陽風プラズマが地球起源の磁場とプラズマで満たされている磁気圏の中に入ってこれられない理由である。しかし2つのプラズマが接している場所で、お互いの磁力線が反対方向を向いているときは、ある種の高周波プラズマ不安定現象が起き無衝突性が崩れプラズマが混じり合えるようになる。これを磁力線の再結合と呼んでいる。太陽風と磁気圏の場合、IMFの南北(地球の自転軸)成分(B_z)の極性が太陽風粒子の入り込みをコントロールしていることになる。即ち、IMF- B_z が磁気圏前面(太陽側の面)の北向き地球磁場と反対方向の南向き成分を持つとき、IMFと地球磁場の再結合という現象がおり、太陽風中の荷電粒子が磁気圏内に入り込んでくる。この粒子は磁気圏内に擾乱を引き起こし加速されて極域の電離層に振り込みオーロラを光らせる。その結果電離層のプラズマ熱化が引き起こされる。この一連現象をまとめてサブストームと呼んでおり、多くの磁気圏物理学者の興味を引いてきた研究テーマである。

フレアが起きたときの磁気圏の応答を説明する。フレアが太陽に発生しそこから出た強い太陽風が地球の方向を向いていたとき、ほぼ一日で地球に到着する。太陽風の動圧が高くなるため磁気圏が圧縮される。この時間スケールは数分であり、磁気圏の急激な圧縮は磁気圏内の電磁流体擾乱として地上に到達し、中低緯度観測所での地磁気水平成分の急激な増加という特徴的な磁場変化をもたらす。もし磁力線再結合がおけると、磁気圏の中に多量の太陽風粒子が入り込み、磁気圏内に西向きの環電流を作り出すと共に、頻繁にオーロラを発光させる。この現象全体をまとめて「磁気嵐」と呼ぶ。もし磁力線再結合が起きない場合、磁気圏への太陽風粒子の侵入はなく磁気嵐は発達しない。

磁気嵐の発生には時折27日周期が見られることがある。これは前述の太陽の自転に伴うコロナホールからの高速太陽風の影響である。

3.2 太陽活動に伴う磁気圏擾乱の変化

黒点数の増減と磁気嵐の発生に関する関係についてまとめてみる。磁気嵐はフレアによって引き起こされる。前述のようにフレアの発生には黒点がかかわっている。実際の観測結果の統計もそれを支持している(第5図)。

磁気嵐の発達する条件にIMFの B_z の極性が絡んでいるが、これについての太陽黒点数依存性は未だ十分に研究されていない。IMF- B_z は0を中心として正負に同じくらいの確率で揺らいでいると仮定するなら

ば、磁気嵐の発生と黒点数との関連はフレアの発生数がほぼコントロールしていると考えられる。今後の研究が待たれる。磁気嵐で代表される磁気圏擾乱の程度は地磁気活動指数というものでほぼ表すことが出来る。黒点数と地磁気活動度の変化を調べてみると関連があることがわかる(第6図)。しかしながらその相関係数は0.5程度でそれほど高いとは言えない。同様にオーロラ活動度にも黒点数の変動と同期する11年周期があるが、相関係数は同程度である。磁気嵐は黒点数が極大を過ぎてやや下がり始めた頃に多くなる傾向があるとされるが、原因は不明である。

太陽の固有磁場は地球同様双極子的なものであることがわかっている。この極性は22年周期で反転する。巨大磁気嵐の発生には22年周期があるとする説があるが今の所データの上からは明確ではない。

3.3 磁気圏擾乱エネルギーの行方

磁気嵐及び磁気圏サブストームにおいて、まず磁気圏内の高エネルギー粒子の増加、電流(プラズマ流)の強化、プラズマ不安定の発生による爆発的エネルギー解放(今の場合磁場エネルギーからプラズマ粒子の加速)、電磁流体波動の発生等の現象が起こる。こうして発生したエネルギーは下層の電離層に流入していく。(一部は磁気圏尾部の後ろ側の地球から遠ざかる方向に向かうエネルギーもある。)これらの電離層へのエネルギー流入の中で最も重要なものはプラズマ粒子加速に伴うオーロラの発生である。これにより高緯度の電離層ではプラズマ密度が増大し、最終的に電離層(熱圏)中性粒子の熱化が行われる。さらに磁気圏内の電場の増大は磁力線を通じ極域電離層の電場の強化になる。この電場により電離層プラズマの運動が大きくなり、中性粒子との衝突を通じて熱化に寄与している。

このような熱化現象が何をもちたらずかを次の章で考えてみる。

4. 熱圏(電離層)の変動

磁気圏と電離層(電離圏とも呼ばれる)の間には明瞭な境界は存在しない。下層電離層では中性の粒子密度がプラズマ密度に対して大きい。上層に行くに連れプラズマ密度が相対的に増加し徐々に完全電離気体から出来ている磁気圏に移行する。磁気圏に入ってきた太陽風起源のエネルギーは電場や加速粒子の振り込みを通して直接電離層に入り込むことが出来る。

4.1 プラズマと中性大気粒子の相互作用

気象学で熱圏と呼ばれる領域は電離層と呼ばれる領

域にほぼ一致する。特に熱圏の下部(高度約100 km)はE層と呼ばれる領域であるが、ここにおいてはプラズマと中性大気が混在し相互作用を行っている。

電離層では正の電荷をもつイオンは中性大気と頻りに衝突をし、両者は同じ方向に運動する。一方電子はその軽い質量のため速度が早く中性大気との衝突があまり起こらないことと、地球の磁場を横切って動けないこと**により中性大気の流れに追従しない。従ってE層に中性大気の流れがあると正イオンのみの流れが生じE層に電流が流れることになる。E層においては昼夜の変化による中性大気加熱の非一様により1日及び半日周期の大気潮汐波と呼ばれる波動が生じ正イオンを引きずる。この電流が地上で観測される地磁気日変化をもたらす。一方高緯度(極域)の電離層に磁気圏から電場がかかっているとプラズマの流れが生じるが、これにより中性大気を引きずることになる。こうして磁気圏で発生した太陽風起源の電場エネルギーが熱圏の中性大気のエネルギーに変換することになる。このようにE層ではイオンと中性大気との運動量の交換が起こるため、中性大気の運動とプラズマの流れはお互いに独立でない。

磁気嵐やオーロラが発生したとき電離層に中性大気重力波が励起されることが観測から明らかになっており理論や数値的研究もなされている。逆に下層大気で発生した重力波が中間圏を通り熱圏下部にエネルギーを輸送出来るとすると、プラズマの存在により重力波と磁気圏側の電磁場が直接エネルギー結合をしよう。E層高度において下層から運ばれるエネルギーは日射によるその高度の大気加熱と同程度になるというモデル計算もある。

4.2 太陽活動の変動による影響

太陽にフレアが起こり、高速太陽風が地球に到来し、太陽風中のプラズマが磁気圏に侵入しやすい条件があると磁気嵐がおこる。この時は極域ではオーロラが頻発し磁気圏電場による極域電離層プラズマ循環も発達する。さらに中低緯度の電離層にも高緯度の電場の一部が侵入してくる。

先に述べたように11年周期の太陽活動にともないその極大期と極小期を比較して第1表に示すように紫外線で50%~数倍にわたる変化がある。この紫外線が電

** 荷電粒子には速度と磁場ベクトルの外積に比例したローレンツ力が働く。例えば圧力の勾配があってもローレンツ力のため粒子の軌道は曲げられてしまうので見かけ上コリオリ力に似ている。

離層高度において中性粒子を電離させプラズマを作り出すため熱圏の中性大気やプラズマの密度や温度が大きく変化する。加えて、太陽活動の極大期にはフレアが頻発しオーロラや磁気嵐が数多く発生するための電離層プラズマの温度や密度の上昇効果に加わり、太陽風と磁気圏の相互作用による電場の強化もあり、極小期に比して大きなエネルギーを持つ。こうして熱圏に与えられたエネルギーは他の領域に移動することになる。高温の熱圏から下部に向けて熱伝導によりエネルギーが移動することが考えられ、そうすると中間圏の

温度が上がることになる。熱圏で発生した重力波の下方伝播もエネルギー輸送に関わるであろう。このように下層と上層の大気はお互いにエネルギー的に結合している。よって太陽活動の変化により熱圏に引き起こされる大きな変動がある程度下層の大気に影響を与えている可能性がある。この方面の研究はまだ十分でなく1990年～1995年のSTEP (Solar-Terrestrial Energy Program) という国際研究事業の中の重要なテーマとして取り組まれている所である。

「気象談話室」への投稿をお願いします

教育と普及委員会
「天気」編集委員会

教育と普及委員会および「天気」編集委員会では、気象学の専門分化や気象学会員の職業の多様化が進むなか、会員相互の交流を促進するため、「気象談話室」欄を一層充実させたいと考えています。当欄は教育と普及委員会による依頼原稿が主ですが、投稿も受け付けています。当欄にふさわしいテーマがありましたら積極的にご投稿ください。また、取り上げてほしいテーマをお知らせくだされば、委員会で執筆者を探すことも検討します。

「気象談話室」は、論文や解説とは異なり、気楽に読める読物を掲載します。気象学的なものの方・考え方についての示唆に富んだ話、一般の普及書や教科書には入り切らないような様々な現象の考え方・考え方、説明の難しい問題に対する答えや考え方、最近のトピックに関する説明、気象業務や気象教育の現場の話題、小・中・高校生や一般の方々の研究例の紹介、国際交流、Q&A など、広く多様な題材を扱います。執筆にあたっては、①高校卒業程度の学力で読める平易な記事とし、②長さは印刷頁4頁以内、③引用文献は原則として避け、④学術用語は少な目にし正確で平易な説明をつける、⑤気象学研究・気象業務を職業とする人たちの社会特有な用語は用いない、などの点にご留意ください。

採用の期準は、会員に有意義な情報が分かりやすく記述されていることです。「気象談話室」よりも他の欄の方がふさわしいと思われる原稿については、執筆者の了解を得た上で他の欄にまわす場合もありますが、執筆段階ではどの欄が適当かをあまり悩まないでいただきたいと思います。どの欄であれ、本誌を読者の身近なものにするような記事を増やすことが大切であると考えています。