

小特集

宇宙天気予報

Space Weather Forecast

1. はじめに

亘 慎一, 永岡賢一¹⁾
 情報通信研究機構, ¹⁾核融合科学研究所
 (原稿受付: 2006年7月11日)

最近, 「宇宙天気」という言葉をよく耳にするようになりました。宇宙と聞くと真空の世界でほとんど環境の変動がないと考えている方も多いと思います。しかしながら, 実際は希薄ながら高エネルギーの粒子が存在し, その変動の影響で地球の磁気圏や電離圏は大きな変動を受けています。たとえば, 太陽爆発に伴う地球周辺の高エネルギー粒子のフラックスは静穏時と擾乱時では最大4桁くらい変動します。このような大きな変動が衛星の不具合などの原因となります。

宇宙空間に初めて人工衛星が打ち上げられたのは約50年前ですが, その後, 宇宙の実利用は着実に進んできました。気象衛星からの雲の画像は, 毎日, お茶の間に届けられており, 今では欠かせないものとなっています。また, 海外で行われるサッカーやオリンピックなどの国際試合の様子は通信衛星によって我々のもとに届けられています。最近ではGPS衛星を用いたカーナビなどの測位システムが必需

品となりつつあります。

このような状況のなかで, 人間が作った宇宙や地上のシステムに影響を与える宇宙環境の変動を地上の天気のアナロジーとして捉えて「宇宙天気」と呼び, その予測を行おうとする「宇宙天気予報」研究が欧米をはじめとする世界中で進行中です。特に太陽地球系物理学・科学委員会(SCOSTEP)が2004年から5ヶ年計画で進めている太陽-地球系の天気と気候変動(CAWSES, Climate and Weather of the Sun-Earth System)という国際研究プロジェクトの中で「宇宙天気」は中心的な研究テーマのひとつになっています。このような動きの中で日本は世界に先駆けて, 情報通信研究機構(旧通信総合研究所)が1988年から宇宙天気研究プロジェクトをスタートさせました[1]。

宇宙天気の概要を図1に示します[2-4]。太陽で磁場の歪として蓄えられたエネルギーが解放されるときに強い電磁波の放射, 粒子の加速, プラズマ雲の放出などが起こり

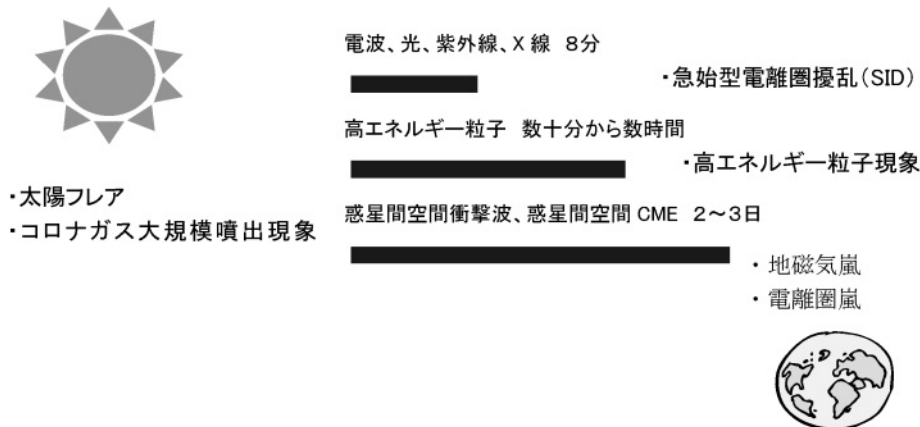


図1 各宇宙環境擾乱のタイミング。

表1 宇宙天気に関連する各領域の代表的なプラズマのパラメータ.

	太陽光球	太陽コロナ	太陽風	磁気圏	電離圏
密度(/cc)	10^{14}	10^6	10	10	10^6
温度(K)	10^4	10^6	10^5	10^7	10^3
磁場(G)	10^3	10	10^{-4}	10^{-1}	10^{-1}

ます。電波やX線は約8分程度して地球にやってきます。次に数十分から数時間程度たつとエネルギー解放に伴って加速された高エネルギー粒子がやってきます。また、太陽でのエネルギー開放に伴って放出されるコロナガス大規模噴出現象(CME, Coronal Mass Ejection)と呼ばれる現象は、惑星間空間では前面に衝撃波を伴い強い磁場を凍結したプラズマの雲として観測されます。このCMEは1,000 km/s程度の速度を持っており2日くらいかけて地球まで到来し、強い南向きの磁場と地球の磁気圏との相互作用により地磁気嵐を起こします。惑星間空間に放出されたCMEは、ICME(Interplanetary Coronal Mass Ejection)と呼ばれることもあります。さらに地磁気嵐の影響で電離圏F領域の電子密度が減少する負相の電離圏嵐が引き起こされます。

宇宙天気の対象とする領域は太陽、太陽風、地球磁気圏、電離圏という複数の領域にまたがり、表1に示したように各領域を形作るプラズマの様相もかなり違います。太陽コロナでは100万度のプラズマですが、地球近傍の太陽風では数万度のプラズマ、磁気圏では数千万度、電離圏では千度程度のプラズマが支配する世界です。また、宇宙天気は磁場のリコネクション、衝撃波による粒子の加速、波動によるプラズマの加熱など多くのプラズマ物理の素過程を含んでいます。このように宇宙天気はさまざまな側面を持っており、多くの異分野の人たちが学際的に取り組んでいく必要があります[3-7]。

今後の宇宙天気研究の方向性として環境変動の予測をするという類似性から気象予報研究の歴史を参考にすることができると考えられます[8]。現在の宇宙天気は、磁力計などからのデータをもとに現在の状況をリアルタイムで伝えるナウキャストが中心です。予報モデルも経験モデルに近い

ものです。気象予報のように早急に数値モデルを導入しデータ同化によりその精度を向上させていくということが大きな課題と考えられます。

一方で、宇宙天気予報の研究は、プラズマ物理に基礎を置くプロジェクト研究ではありますが、当学会や核融合研究コミュニティとは、これまで意外なほど接点が少なかったように感じます。宇宙天気予報研究と核融合研究は各種プラズマ物理に基づく学際的なプロジェクトという点では、共通点が多くみられますし、同じプラズマ物理が数多く議論されているように思われます。つまり、先の予測と制御という違いはありますが、プラズマの振る舞いを理解するという意味においては、共通の物理があるのです。両者の学術的な交流は、多くの学問的発展の可能性を有していると思われまふ。その第一歩として、宇宙天気予報研究の最先端を解説していただくというのが、本特集の意図の一つであります。

本特集では、宇宙天気の我々の生活への影響や太陽、太陽風、磁気圏、電離圏のそれぞれの領域における宇宙天気について専門の先生方に解説していただくことにしました。新しい学問領域である「宇宙天気」についての理解を深めていただければ幸いです。

参考文献

- [1] K. Marubashi, Space Science Reviews 51(1-2), 197 (1989).
- [2] B. Poppe, *Sentinels of the Sun: Forecasting Space Weather* (Johnson Books, Boulder, 2005).
- [3] 大林辰蔵: 宇宙空間物理学 (裳華房, 1970年).
- [4] 恩藤忠典: 宇宙環境科学, 丸橋克英編(オーム社, 2000年).
- [5] 寺沢敏夫: 太陽圏の物理 (岩波書店, 2002年).
- [6] M.G. Kivelsohn and C.T. Russell, *Introduction to Space Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [7] K. Scherer, H. Fichtner, B. Heber and U. Mall (eds.), *Space Weather: The Physics Behind a Slogan, Lec. Notes Phys. 656* (Springer, Berlin Heidelberg, 2006).
- [8] G. Siscoe, A culture of improving forecast: Lessons from metrology, Space Weather, Vol. 4, S01003, 10.1029/2005SW000178 (2006).



2. 宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報

亘 慎一

情報通信研究機構

(原稿受付：2006年7月11日)

「宇宙天気」について具体的なイメージを持っていただくために「宇宙天気」が我々の生活に与える影響について述べるとともに宇宙天気予報を行っている国際宇宙環境情報サービス (ISES, International Space Environment Service) や宇宙天気研究の現状について紹介する。

Keywords:

space weather, International Space Environment Service (ISES)

2.1 はじめに

人類が初めて宇宙に送り出した人工衛星は旧ソ連のスペースドニクで、それから約50年がたった。はるか遠くの宇宙に目を向けると米国のNASAが打ち上げた探査機ボイジャーが我々の住む太陽圏の境界に迫りつつある。一方、地球のまわりの宇宙空間に目を向けるとそこはいろいろな目的のために実用される空間となってきた。たとえば、気象予報の中にてでくる雲画像を毎日、届けてくれているのは気象衛星「ひまわり」であり、国際的に大きな事件や災害が起こったときに地球上のあらゆる場所からのニュースの中継を可能にしているのは通信衛星である。また、カーナビなど自分の位置を正確に教えてくれる測位システムにはGPS衛星が使われている。表1に示したように宇宙環境の擾乱「宇宙嵐」が、これら宇宙を利用したシステムに影響を与えることが問題となってきた[1-14]。宇宙のシステムだけでなく地上のシステムでも宇宙嵐の影響を受けるものがある。ここでは、宇宙嵐による影響を具体的に紹介するとともに、宇宙嵐を予測しようという活動について紹介する。

2.2 宇宙天気による社会システムへの影響について

宇宙環境の擾乱「宇宙嵐」には、「電磁波嵐」、「高エネルギー粒子嵐」、「放射線帯電子嵐」、「地磁気嵐」、「電離圏嵐」などがある。「電磁波嵐」はフレアと呼ばれる太陽面の爆発現象によりエックス線、紫外線、電波など強い電磁波が放射される現象である。「高エネルギー粒子嵐」というのはフレアやコロナガス大規模噴出現象 (CME) によって加速された粒子が地球に押し寄せてくる現象である。高速の太陽風の影響により放射帯の高エネルギー電子のフラック

2. *Impacts of Space Storms on Technologies and Space Weather Forecast*
WATARI Shinichi

author's e-mail: watari@nict.go.jp

一部カラーの図を本学会ホームページに載せています。ご参照下さい。

スが増加するのが「放射線帯電子嵐」で、太陽からのCMEが運んでくる強い南向きの磁場により地球の磁場が大きく乱されるのが「地磁気嵐」である。図1にESAとNASAが共同で打ち上げたSOHO衛星に搭載されたLASCOと呼ばれるコロナグラフによって観測されたCMEを示す。CMEは1,000 km/s程度の速度で2日くらいかけて地球までやってくる。「電離圏嵐」は地磁気嵐の影響で電離圏F領域の電子密度が変動するものである。これらの嵐は、宇

表1 宇宙嵐に伴う具体的な障害の例。

発生時期	影響
1989年3月13-14日	大きな地磁気嵐のためカナダで送電システムの障害による大規模な停電が発生した。
1994年1月20日	通信衛星Anik E1, E2が姿勢制御に不具合を生じた。
1994年2月22日	日本の通信衛星BS-3aに不具合が生じ、冬季オリンピックのジャンプ中継が中断された。
1997年1月11日	通信衛星Telstar 401が放電により機能を停止した。
2000年7月15日	日本のX線天文衛星「あすか」が大気抵抗により姿勢制御に不具合を生じた。
2002年4月21日	高エネルギー粒子現象により日本の火星探査機「のぞみ」の通信系と電源系のシステムに不具合が生じた。
2003年10月24日	日本の地球観測衛星「みどり2」が放電による障害のため、太陽電池から電力を得られなくなり機能停止した。
2003年10月28日	日本のデータ中継衛星「こだま」が地球センサーへのノイズの増加によりsafe modeになった。
2003年10月30日	大きな地磁気嵐のためスウェーデンで送電システムの障害による停電が発生した。

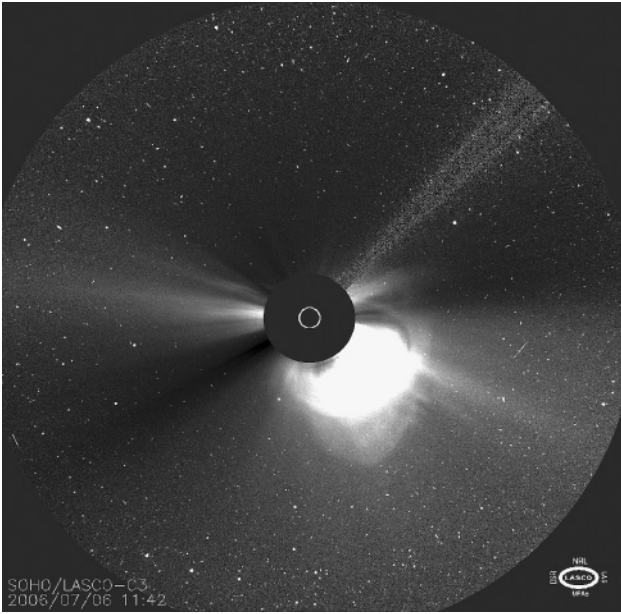


図1 ESAとNASAが打ち上げたSOHO衛星によって観測されたコロナガス大規模噴出現象(CME)。

宙を利用したシステムや地上のシステムにさまざまな影響を与える[1-14] (表2および図2参照)。

2.2.1 衛星や有人宇宙飛行への影響[9-11]

「高エネルギー粒子嵐」に伴って衛星でメモリエラーなどが起こることがある。このような高エネルギーの陽子(プロトン)や重イオンなどの荷電粒子による半導体論理回路の誤動作または故障をシングルイベントアップセット(SEU)と呼ぶ。SEUにより衛星の姿勢を制御するための地球センサーなどに異常が起こると衛星の姿勢がおかしくなってしまうこともある。また、「高エネルギー粒子嵐」は太陽電池の発生電流と電圧の減少を加速し衛星の寿命を縮める。有人宇宙飛行においては宇宙飛行士の被ばく量の増加という問題が起きる。特に船外活動を行うような場合に

表2 宇宙嵐に伴う障害。

影響を受ける対象	影響を与える現象	影響
宇宙機	高エネルギー粒子(陽子, 重イオン)	シングルイベントアップセット 太陽電池の劣化
	高エネルギー電子	帯電
	地磁気嵐	姿勢制御への影響
	超高層大気の変動	大気抵抗による軌道変動
有人宇宙活動	銀河宇宙線	被ばく
	太陽高エネルギー粒子	
旅客機	銀河宇宙線による二次放射線	被ばく PCAによる短波帯通信の途絶
	太陽高エネルギー粒子による二次放射線	
	太陽フレア	短波帯通信の途絶
通信	太陽電波バースト	携帯電話への混信
	太陽フレア	短波帯通信の途絶
	電離圏嵐	短波帯通信の品質劣化
GPS測位	電離圏嵐	測位精度の劣化
	シンチレーション	位相ロックはずれ
送電システム	地磁気嵐による誘導電流(GIC)	送電システムの障害による停電
パイプライン	地磁気嵐による誘導電流(GIC)	電気腐食
空中磁気探査	地磁気擾乱	探査精度の劣化
鳩レース	地磁気擾乱	迷子となる鳩の増加
オーロラ観光	地磁気擾乱	オーロラの発生(観光資源)

問題となる。

「放射線帯電子嵐」に伴って増加する高エネルギー電子は衛星の深部まで侵入して帯電を起こす。このような帯電を深部帯電と呼ぶ。深部帯電は衛星に流入する電子とイオンの量が異なることにより衛星の表面が帯電する表面帯電に比べて帯電を解消するのが難しいため、最近ではこの深部帯電が問題となっている。

低軌道の地球周回衛星の場合は、超高層大気による摩擦



図2 宇宙嵐による社会システムへの影響。

が衛星を減速させ軌道を低下させる。太陽からの紫外線の増加や地磁気嵐に伴う超高層大気の加熱は、衛星と超高層大気との摩擦を増加させ、軌道を維持するための燃料の消費を早めて衛星の寿命を短くする。

衛星の打ち上げなどに伴って発生した大小のごみを「デブリ」と呼ぶ。デブリを宇宙天気の影響にいかるとどうかは議論の分かれるところであるが、高速で地球の周りを回っているデブリは、ひとたび衛星に衝突すると致命的なダメージを与える危険性を持っている。

2.2.2 通信への影響[9, 13]

「電磁波嵐」による強いエックス線や紫外線により地球の昼間側の電離圏D領域が電離され吸収により短波帯の通信が途絶することがある。このような現象を発見者の名前にちなんでデリンジャー現象と呼ぶ。この現象を短波障害(SWF, Short Wave Fadeout)あるいは突発性電離圏擾乱(SID, Sudden Ionospheric Disturbances)と呼ぶこともある。また、「高エネルギー粒子嵐」に伴って極域に侵入したエネルギーの高い陽子により極域の電離圏D領域の吸収が増加し、短波による通信ができなくなることがある。このような現象を極冠吸収(PCA, Polar Cap Absorption)と呼ぶ。

「地磁気嵐」によって熱圏大気の風や温度、大気の成分が変化し電離圏F領域の電子密度が減少することがある。この現象を「電離圏負相嵐」と呼ぶ。電離圏負相嵐は短波帯(3-30 MHz)の電波を使った通信に影響を与える。中緯度では地磁気嵐に伴う電離圏負相嵐は夏に起こりやすいという季節的依存性を持っている。これとは逆に地磁気嵐に伴って電子密度が増加することもあり「電離圏正相嵐」と呼ばれる。「電離圏正相嵐」は中緯度では冬季に起こりやすいという季節的依存性を持っている。

電離圏の不規則構造により衛星からの電波が乱されてその強度が変動する現象を「シンチレーション」と呼ぶ。シンチレーションは主にVHF帯やUHF帯の電波を使った衛星との通信に影響を与えるが、強い「地磁気嵐」に伴う異常な電場変動によりマイクロ波帯にまで及ぶ強いシンチレーションが起こることが報告されている[12]。

「電磁波嵐」に伴って太陽から強いマイクロ波帯の電波が放射されることがある。太陽の方向と地上の携帯電話のアンテナの方向が一致したとき、この強い電波が地上の携帯電話網へ影響を与えたという事例が報告されている[9]。

高度100 km程度に突発的に現れる局所的に電子密度の濃い層をスプラディックE層(Es層)と呼ぶ。日本付近では夏に発生が多く、発達したスプラディックE層は時にはVHF帯の電波まで反射し防災無線やテレビ電波に混信を与える原因となることがある。スプラディックE層は超高層大気中のダイナミクスによって生成されるものであるが、電離圏の現象であり宇宙天気の影響に入れることができると考えられる。

2.2.3 航空機への影響[9, 13]

航空機が使用する短波帯の電波を使った通信は「電磁波嵐」によるデリンジャー現象や「高エネルギー粒子嵐」による極冠吸収の影響を受ける。特に北極の近くを通る航路

では、地上にVHF帯の通信局がなく、赤道上空の静止軌道にある通信衛星も利用できないので地上と航空機との通信ができなくなるという問題が生じる。

また、航空機は約10 kmの高度を飛行するため、地上に比べて銀河宇宙線による二次放射線の影響を受けやすくなる。銀河宇宙線の影響に加えて、地球の磁力線が開いている極域では「高エネルギー粒子嵐」に伴う高いエネルギーの粒子の影響で被ばく量が増えることがある。日本では2005年12月に文部科学省の審議会により航空機の乗務員に対する年間の被ばく量の上限として5ミリシーベルトというガイドラインが示された。胃のX線撮影を1回行うと0.6ミリシーベルト程度の放射線を浴びることになる。5ミリシーベルトという値はこの約8回分の値に相当する。

2.2.4 電力設備やパイプラインへの影響[9]

地磁気変動に伴う誘導電流が送電線やパイプに流れシステムの障害を起こしたり、金属パイプの腐食を促進することがある。このような現象をGIC(Geomagnetically Induced Current)と呼ぶ。アラスカなど高緯度地方にある石油や天然ガスのパイプラインではオーロラ活動に伴って繰り返し流れる誘導電流がパイプの電気腐食の要因の一つとなる。地球の高緯度地域ではオーロラ活動に伴う強い電流がGICの主な原因であるが、CMEに伴う衝撃波の到来によるSC(Sudden Commencement)やSI(Sudden Impulse)と呼ばれる地磁気急激な変化もGICによる障害の原因になると考えられている。GICは海底ケーブルの中継器に電源を供給するケーブルや鉄道の線路を使った信号の伝送などにも影響を与えることが報告されている。

2.2.5 磁気探査への影響

磁場を使った地質や資源探査には大きくわけて二つの手法がある。一つは航空機や船舶などから精密な地磁気観測を行うことにより地下資源の探査を行うもの、もう一つは地磁気変動に対する応答を使って探査を行うMT法(Magnet-Telluric Method)と呼ばれる手法である。航空機や船舶による磁気探査では地磁気の変動が測定の妨害となるため、地磁気が静穏なときに実施する必要がある。一方、MT法では地磁気変動に対する応答を使っているため地磁気が擾乱しているときに探査を行う必要がある。磁気探査は宇宙天気静穏な期間の予報を知りたいという人たちと擾乱する期間の予報を知りたい人たちがいるという両極端の宇宙天気ユーザーである。

2.2.6 衛星測位への影響[13]

GPSによる測位は、複数の衛星からの電波の到来時間の差を使って位置を決める。衛星からの電波は電離圏を伝わるときにその中のプラズマによって少し遅れが生じるため、「地磁気嵐」などに伴って電離圏の電子密度が大きく変動すると遅延時間が変わり位置の誤差が大きくなってしまふという弱点がある。この伝搬遅延の変動による誤差を小さくするためにディファレンシャルGPS(DGPS)といって基準となる固定受信局からのデータを使って補正する方法もあるが空間的な変動が大きいと補正を行うことは難しくなってしまうという欠点がある。また、電離圏の不規則構造によるシンチレーションのためにGPS衛星からの電波が

受信できなくなって測位が行えないという現象もある。現在、米国などでGPSを使った航空機の離着陸システムの導入が検討されているが、測位誤差をいかに小さくし信頼性のあるシステムにするかということが大きな課題となっている。

2.2.7 オーロラ観光や宇宙旅行

「地磁気嵐」に伴って極域ではオーロラが見られる。我々が唯一、地上で「宇宙天気」を感じることができるのが、このオーロラ現象である。近年、日本からも北欧やアラスカへオーロラを楽しむ観光客が増えている。地上の天気が良いということも重要だが、きれいなオーロラを見るためには宇宙天気情報を活用する必要がある。最近では民間会社が宇宙旅行のツアーを売り出し始めており、我々が宇宙旅行にいけるようになる日も近いと思われる。宇宙旅行に行く場合は、「高エネルギー粒子嵐」による被ばくの危険などがあるため、宇宙天気予報を確かめてからいくことになるであろう。

2.2.8 生物への影響[14]

地球の磁場が生物に何らかの役割を果たしているのではないかということがいわれている。例えば、鳩などは地磁気を使って方向を決めている。「地磁気嵐」の時に迷子になる鳩が多くでてしまうということで、鳩レースの際には地磁気の静穏な時期が選ばれるという話がある。鳥だけでなく、我々人間についても心臓障害と地磁気活動に高い相関があるなどという報告例がある。

2.3 宇宙天気予報センターについて

宇宙天気予報を行う国際的な機関として国際宇宙環境情報サービス (ISES, International Space Environment Service) と呼ばれるものがある [15]。この ISES は、国際電波科

学連合 (URSI, International Union of Radio Science) の下部機関で、1928年に国際的なデータ交換を迅速に行うために設けられた URSI Central Committee of URSIgram と約50年前に行われた国際地球観測年 (IGY, International Geophysical Year) の際につくられた International World Days Service が統合して1962年につくられた IUWDS (International URSIgram and World Days Service) が宇宙天気予報を行う国際的な機関として1996年に改称されたものである。

現在は、米国コロラド州のボウルダーというところにある米国海洋大気庁 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Agency) の宇宙環境センター (SEC, Space Environment Center) を本部として、図3に示したカナダ、オーストラリア、日本、中国、インド、ロシア、ポーランド、チェコ、スウェーデン、ベルギーの11カ国が加盟して活動している。表3に示したように天文台や地磁気観測所など様々な機関が宇宙天気予報センターの運営機関として活動しており、日本では、独立行政法人情報通信研究機構が ISES の予報センターを運営している。毎日、日本時間の午後3時に太陽フレア、地磁気嵐、高エネルギー粒子に関する宇宙天気予報を発令するとともに大きな宇宙嵐が発生した際には随時、臨時情報を発信している。宇宙天気に関する情報は図4に示したような Web (<http://swc.nict.go.jp>)、電子メール、ファックスなどを使って提供されている。

2.4 宇宙天気研究の状況について

米国では、1995年に NOAA, NSF, NASA, など7つの省庁の共同プロジェクトとして宇宙天気研究, National Space Weather Program (NSWP) をスタートさせた [16, 17]。一方、欧州では ESA が中心となって1998年から

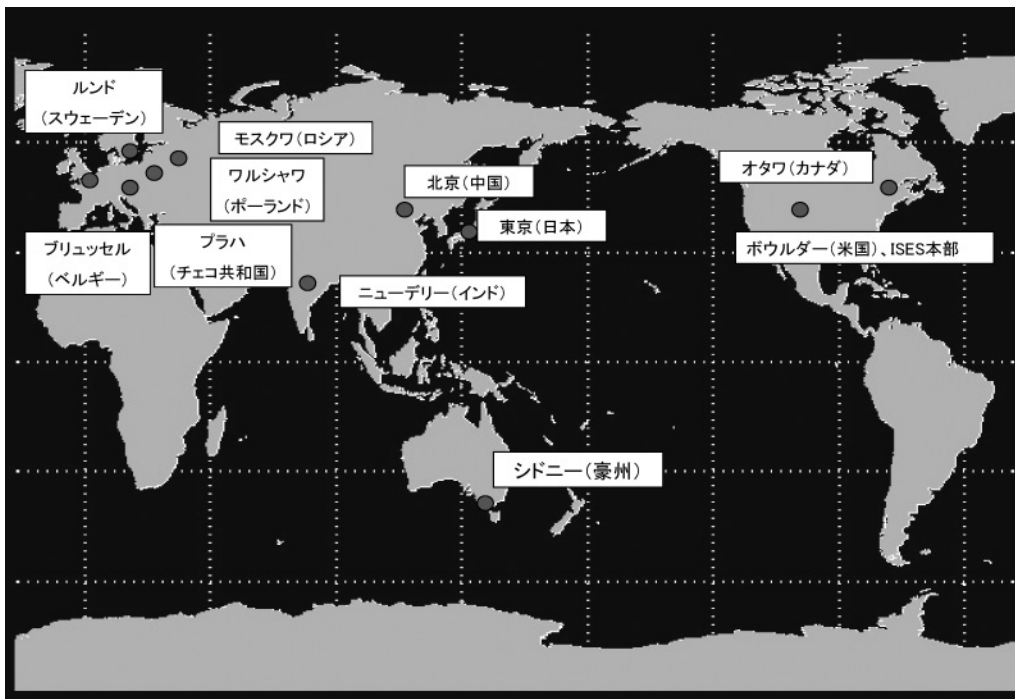


図3 国際宇宙環境情報サービス (ISES) の予報センター。

表3 国際宇宙環境情報サービス (ISES) の予報センター。

予報センター所在地	運営機関	URL アドレス
米国 (コロラド州ボルダー)	米国海洋大気庁 (NOAA)/宇宙環境センター (SEC)	http://www.sec.noaa.gov/
カナダ (オタワ)	地質調査所 Natural Resouce Canada (NRC)	http://www.spaceweather.gc.ca/index_e.php
オーストラリア (シドニー)	電離圏予報サービス (IPS)	http://www.ips.gov.au/
日本 (東京)	情報通信研究機構 (NICT)	http://swc.nict.go.jp/
中国 (北京)	北京天文台 宇宙科学応用センター 電波伝播研究所 測地・地球物理研究所	http://rwcw.bao.ac.cn/
インド (ニューデリー)	国立物理学研究所	http://www.npl-cgc.ernet.in/atul/cgc/rwc/INTRUDUCTION4_BuIn.htm
ロシア (モスクワ)	水文気象サービス	http://www.geospace.ru/
ポーランド (ワルシャワ)	宇宙研究センター	http://www.cbk.waw.pl/rwc/rwc.html
チェコ共和国 (プラハ)	超高層大気研究所 天文学研究所 地球物理研究所	http://rwcprague.ufa.cas.cz/
ベルギー (ブリュッセル)	ベルギー王立天文台	http://sidc.oma.be/
スウェーデン (ルンド)	ルンド宇宙天気センター	http://www.lund.irf.se/



図4 Webによる宇宙天気情報の提供 (http://swc.nict.go.jp/).

宇宙天気に関する研究をはじめた[18]。これらの動きに先立って日本では1988年から情報通信研究機構（当時の郵政省通信総合研究所）が宇宙時代をにらんだ「宇宙天気予報」の研究に着手し、今日に至っている[19]。

2004年からは5ヶ年計画で太陽地球系の気候と天気 (CAWSES, Climate and Weather of the Sun-Earth System) という SCOSTEP (Science Committee on Solar-Terrestrial Physics) の国際的な学術研究プロジェクトが進められており[20]、そのプロジェクトの中で宇宙天気は主要な研究テーマのひとつとして位置づけられ世界中で研究が行われるようになってきている。また、1957年から1958年にかけて行われた国際地球観測年 (IGY, International Geophysical Year) と呼ばれる国際共同観測プロジェクトの50周年を記念して国際太陽系観測年 (IHY, International Heliophysical Year) [21]、国際デジタル地球年 (eGY, Electrical Geophysical Year) [22]、国際極年 (IPY, International Polar Year) [23] といった宇宙天気に関係した国際的キャンペーンが2007-2008年に計画されている。IGYの際には地磁気、電離圏、宇宙線などの地上観測網やデータセンターが整備され、バンアレンによる放射線帯の発見など多くの研究的な成果があげられた。それから50年がたち、格段に進歩した情報通信技術の活用などにより宇宙天気の分野で大きな成果が出るものと期待されている。

2.5 最後に

太陽活動は11年周期で変動しており、2006年から2007年にかけてはその極小期にあたる。次の活動サイクル24の極大は2010年あたりと予想され、その活動も大きいのではないかとこの予測もなされている[24]。宇宙嵐による障害を最小限にするため、次の極大に向けて関連分野の研究者が協力して研究を加速する必要がある。

参考文献

[1] 大林辰蔵：宇宙空間物理学（裳華房，1970年）。

- [2] 恩藤忠典：宇宙環境科学，丸橋克英編（オーム社，2000年）。
- [3] 寺沢敏夫：太陽圏の物理（岩波書店，2002年）。
- [4] S.T. Suess and B.T. Tsurutani, *From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays* (AGU Washington, DC, 1998).
- [5] J. Lilensten and J. Bornarel, *Space Weather: Environment and Societies* (Springer Dordrecht, 2006).
- [6] K. Scherer, H. Fichtner, B. Heber and U. Mall (eds.), *Space Weather: The Physics Behind a Slogan, Lec. Notes Phys. 656* (Springer, Berlin Heidelberg, 2006).
- [7] B. Poppe, *Sentinels of the Sun Forecasting Space Weather* (Johnson Books, Boulder, 2005).
- [8] J.W. Freeman, *Strom in Space* (Cambridge University Press, 2001).
- [9] I.A. Daglis (ed.), *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure* (Kluwer Academic Publishers Dordrecht / Boston / London, 2004).
- [10] 榎野文命：科学衛星と宇宙ステーション（岩波書店，2004年）。
- [11] A.C. Tribble, *The Space Environment Implications for Spacecraft Design* (Princeton University Press, 2003).
- [12] T. Tanaka, *J. Geomag. Geoelectr.* **39**, 659 (1987).
- [13] J.M. Goodman, *Space Weather & Telecommunications* (Springer, 2005).
- [14] 前田 坦：太陽惑星環境の物理学（共立出版，1982年）。
- [15] <http://ises-spaceweather.org/>
- [16] <http://www.ofcm.gov/nswp-sp/pdf/NSWP-SP-1995-scan.pdf>
- [17] <http://www.nswp.gov/images/nswpip2000.pdf>
- [18] <http://esa-spaceweather.net/index.html>
- [19] K. Marubashi, *Space Science Reviews* **51** (1-2), 197 (1989).
- [20] <http://www.bu.edu/causes/>
- [21] <http://ihy2007.org/>
- [22] <http://www.egy.org/>
- [23] <http://www.ipy.org/>
- [24] M. Dikpati, G. Toma and P.A. Gilman, *J. Geophys. Lett.* **33**, L05102, doi:10.1029/2005GL025221(2006).



3. 太陽プラズマ

浅井 歩

国立天文台野辺山太陽電波観測所

(原稿受付：2006年7月10日)

太陽磁気プラズマの活動は、高エネルギー粒子や地磁気嵐の原因となる擾乱の発生源となり得るという点で、宇宙天気研究分野において大変重要である。特に宇宙天気の観点から注目されているプラズマ噴出現象やコロナ質量放出 (CME) も、磁気リコネクションに伴う現象のある一側面を見ているといえる。本章では、太陽フレアでのエネルギー解放機構や、フレアとプラズマ噴出現象・CME との関係、またそれらに関する研究が宇宙天気研究に果たす役割を簡単にレビューする。

Keywords:

solar flare, corona, photosphere, magnetic reconnection, filament eruption, CME

3.1 はじめに

「神」として信仰されていた古代の頃から、またはそれ以前から、太陽は人類にとって最も注目されてきた天体であり、我々は感謝、畏怖、感動など特別な感情や影響を受け続けてきている。天文学における研究対象としての太陽も、常に最前線にあったといえよう。ガリレオ・ガリレイが手製の望遠鏡で太陽表面上に「黒いしみ-黒点-」を発見したことに始まる太陽物理学は、近年の太陽観測装置の急激な発達に伴い、ますますの発展を遂げている。そしてそれらにより、太陽表面が非常にダイナミックでさまざまな活動現象が絶えまなく起きていることを、我々は知ることとなった。一方「宇宙天気研究」においては、太陽は「擾乱の発生源」という絶対的な位置に君臨している。つまり太陽表面活動現象の解明が非常に重要であることは疑う余地がない。本章では、宇宙天気予報研究における太陽プラズマ現象の役割やそれらの研究の現状について述べてみたい。

3.2 発生源としての太陽表面活動現象

太陽表面で生じるさまざまな活動現象は、高エネルギー粒子や地磁気嵐など太陽地球環境での擾乱の源となる。太陽フレアはその中でもひととき目を引く現象である。「太陽フレアとは何ぞや」という問いに最も簡潔に答えるなら、恐らく「短時間のうちに磁場のエネルギーを解放することによって生じる、太陽系内最大の爆発現象」とでもするのが適当であろう。ここで短時間とは数分から数時間を指し、解放されるエネルギーはおおよそ 10^{22} – 10^{25} Jで、これは100メガトン級の水素爆弾の数百万発分のエネルギーにも

相当する。また答えに付け加えるなら、「電波から γ 線に至るさまざまな波長域において、増光現象が見られる」ことが不可欠であろう。そしてさらに詳しくは、そのそれぞれの波長域において観測される、多種多様の現象の各々を説明することになるだろう。例えば、軟X線ではカスプ型ループ構造[1] (図1)、アーケード構造[2]、プラズマ塊の噴出現象[3]などが、 $H\alpha$ 線では、フレアリボンの形成 (図1)、ポストフレアループ構造、フィラメント・プロミネンスの噴出現象などが、またこれ以外にも、フレアループ上空の硬X線放射源[4]、インフロー現象[5]、ダウンフロー現象[6]、そしてコロナ質量放出^{注1} (Coronal Mass Ejections: CMEs) などが観測される。また、太陽フレアの規模を表すためによく軟X線強度が用いられるが、この軟X線強度の増加はプラズマが数千万度にまで加熱されたことを示唆しており、やはりフレアに付随する現象の一つであるといえる。加えて、非常に高エネルギーにまで加速された粒子 (電子、陽子、イオン) からの非熱的な放射もフレアに伴い観測される。これらの粒子加速の場所やメカニズムなどはよくわかっておらず、太陽フレアにおける大問題の一つとなっている。

ただしこれらの現象のすべてが、あらゆるフレアでいつも観測されるわけではない。例えば、きれいなカスプ型構造を示すフレアは、サイズが大きく (構造がはっきり見える)、リムに近い位置で発生する方が望ましい (真上から見るとわかりにくくなる) など、条件によりその現象が観測されるかどうかが変わってくる。噴出現象についても同様である。プロミネンス/フィラメントの噴出現象がいつも

注1 この日本語訳は、Massの訳として「質量」を当てており、これは日本の天文学会において通例となっているものである。一方でMassを「大量・多数」と解釈することに基づき、CMEを「コロナガス大規模噴出現象」などと訳す場合もある。

3. Solar Plasma

ASAI Ayumi

author's e-mail: asai@nro.nao.ac.jp

一部カラーの図を本学会ホームページに載せています。ご参照下さい。

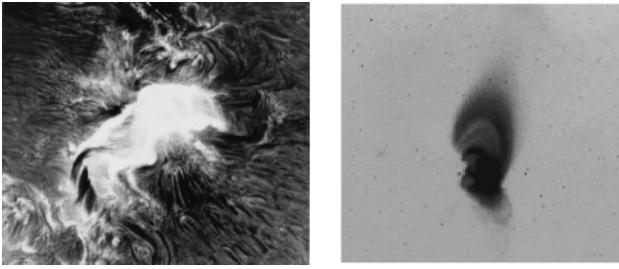


図1 H α 線(右)およびX線(左)で観測した太陽フレアの様子。H α 線では二すじの明るい領域(フレアリボン)が、X線ではカスプ型のフレアループ構造が見られる。

観測されるわけではないし、逆に噴出現象が起きて「フレアと認識される程度の軟X線強度の増加」を伴わない場合もある。これらについては、後でもう少し詳細に議論する。

3.2.1 磁気リコネクション

では、太陽フレアにおける磁気エネルギー解放機構とは何であろうか。ここ50年のパラダイムとして、「磁気リコネクション」がその答えとして挙げられる。長年にわたって論争が繰り返されたが、特に1991年にわが国の太陽観測衛星「ようこう」が打ち上げられて以降、太陽フレアの発生機構が磁気リコネクションによる磁気エネルギー解放によるものであることは、少なくとも定性的・形態学的には決定的なものとなった。そして、先に述べた様々な「フレア付随現象」は磁気リコネクションの枠組内で整合性良く説明付けられている。磁気リコネクション(magnetic reconnection: 日本語では「磁力線のつなぎ替え」や「磁力線の再結合」と呼ばれる)は、物理の素過程の一つである。原理的には、その名のとおりに、接近した反対方向の磁力線の間でつなぎ替えが生じることであるが、磁力線がゴムのように張力を持つため、つなぎ替え後に収縮しその過程で磁場のエネルギーを熱やプラズマの運動のエネルギーに変換するものである(本稿の読者である、プラズマ・核融合学会関係の方々にとってこのような記事を書くのは、まさに「釈迦に説法」であろう...)。図2に太陽フレアでの磁気リコネクションと、関連する観測現象の模式図を示す。この模式図は、現在最も標準的なフレアモデルとされている「CSHKPモデル[7-10]」に基づいている。ここでのこれ以上の説明は省略するが、[11]などをご参照願いたい。

また、太陽フレアを想定した磁気リコネクションの数値シミュレーション結果の例[13]を図3に示す。図中の白線は磁力線を示している。このシミュレーションでは熱伝導の効果も考慮しており、またフレアループ足元での彩層蒸発現象やカスプ型構造をよく再現している。図1(観測結果)、図2(観測の模式図)と図3(数値計算の結果)を見比べてみると、よく似た形状があることがわかる。

3.2.2 フィラメント/プラズマ塊噴出現象

ここからは、太陽フレアに付随して観測される現象の中で、宇宙天気研究と関わりが深いものを取り上げる。特に太陽表面からの噴出現象は、大量のプラズマを惑星間空間に放出する現象であり、関心が高い。太陽表面からの噴出現象と一言でいっても、観測波長に応じてさまざまな観測

注2 Solar Dyanmic Observatory

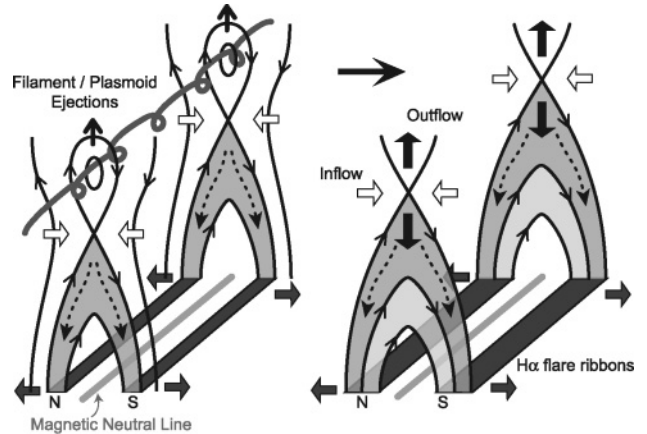


図2 磁気リコネクションの模式図[12]。黒い実線は磁力線を、NとSは磁場の極性を表す。つなぎ替った磁力線は、カスプ型構造などを伴うポストフレアループを形成する(灰色の領域)。また磁力線に沿って熱伝導や高エネルギー粒子が伝搬し(破線の矢印)、そのフレアループ足元で彩層に突入する際にH α フレアリボンなどとして観測される増光を引き起こす(暗い灰色の領域)。

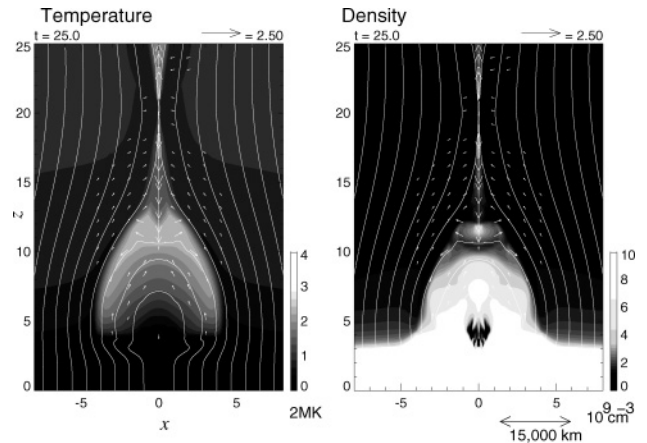


図3 磁気リコネクションに関する数値シミュレーションの結果[13]。左図は温度分布、右図は密度分布を示す。図中の白い実線は磁力線を、また矢印は速度ベクトルを表す。

現象があり、それぞれに名前がついている。

まず、H α 線で観測される、フィラメント(太陽円盤の外側にあれば、プロミネンスと呼ばれる)の噴出現象を取り上げる。H α 線での観測は歴史的に長く、またその噴出現象と地磁気嵐との相関が高いことも古くから知られている。このようなフィラメントは、磁気中性線の上空の磁場構造に低温プラズマが閉じ込められたものと考えられており、磁気リコネクションが起きると上方へと押し上げられる(図2参照)。しかし、これまでも様々な研究がなされてきたが(例えば[14])、その形成過程や噴出のタイミングなどはまだよくわかっておらず、2006年9月に打ち上げ予定のSOLAR-B衛星や2008年打ち上げ予定のSDO^{注2}衛星(どちらも2006年7月現在の予定に基づく)などの次世代観測装置に残された課題の一つとなっている。ただし、その噴出過程の定性的な特徴については、詳細に研究されるようになってきた([15,16])。図4にその結果の一例を示す。左

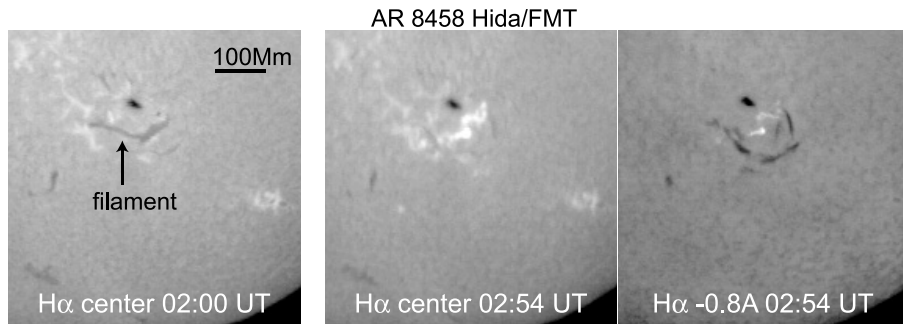


図4 1999年2月16日に活動領域 NOAA 8458 で観測されたフィラメント噴出の H α 線画像[16]. 図の上が太陽の北、左が太陽の東である. 観測時刻と波長域が図の下に示されている. フィラメントはまず H α 線中心で暗く見えるが(左図). 噴出する際には短波長側 0.8Å の画像でよりはっきりと見える (右図).

と中の図はどちらも H α 線中心の画像で時刻が異なる. 黒い筋状の構造がフィラメントで, 中図ではこれが飛び出しており代わりに明るい領域(フレアリボン)が現れた. 右図は噴出中の時刻での H α 線から短波長側に 0.8Å ずれた波長での画像である. 飛び出す動きは我々に近づく方向になるため, 短波長側でよりはっきり見える. このように H α 線付近の波長帯を複数で観測し線スペクトルを推定することで, 視線方向速度をそのドップラーシフトから導出し, またプラズマの量も見積もる. 一方, 画像内のフィラメントの動きから視線方向と直角の平面内の速度を求めることにより, 3次元速度場構造を詳細に調べることができる. このようにして, フィラメントの加速の度合と噴出されるプラズマ量との関係を知ることができるようになった.

また, 「ようこう」衛星搭載の軟 X 線望遠鏡により, 軟 X 線での類似の噴出現象が, 新たな驚きとともに発見され

た[3, 17]. それまで軟 X 線カスプ構造や H α 線リボン構造, フィラメント噴出といった現象は, 主に, いわゆる典型的な LDE フレア (長時間持続フレア: Long Duration Event flare) に付随する現象であると考えられており, 一方, インパルスフレア (LDE と対照的に短時間しか持続しないフレア: impulsive flare) ではほとんど観測されなかったため, これらのフレアで生じている物理過程は異なるのではないか, という議論がなされていた. ところがこの高温プラズマ塊の噴出現象は, そのインパルスフレアに付随して発見されたのだ. つまり, LDE フレアとインパルスフレアという分類に物理的な差異はなく, フレアの持続時間も先に述べたような太陽フレアを特徴づける一要因に過ぎないことが証明されたのだ. またこのプラズマ塊が, 太陽フレアで最もエネルギー解放が激しい時間帯で強く加速を受けていることがわかった. この時間帯は「インパルス

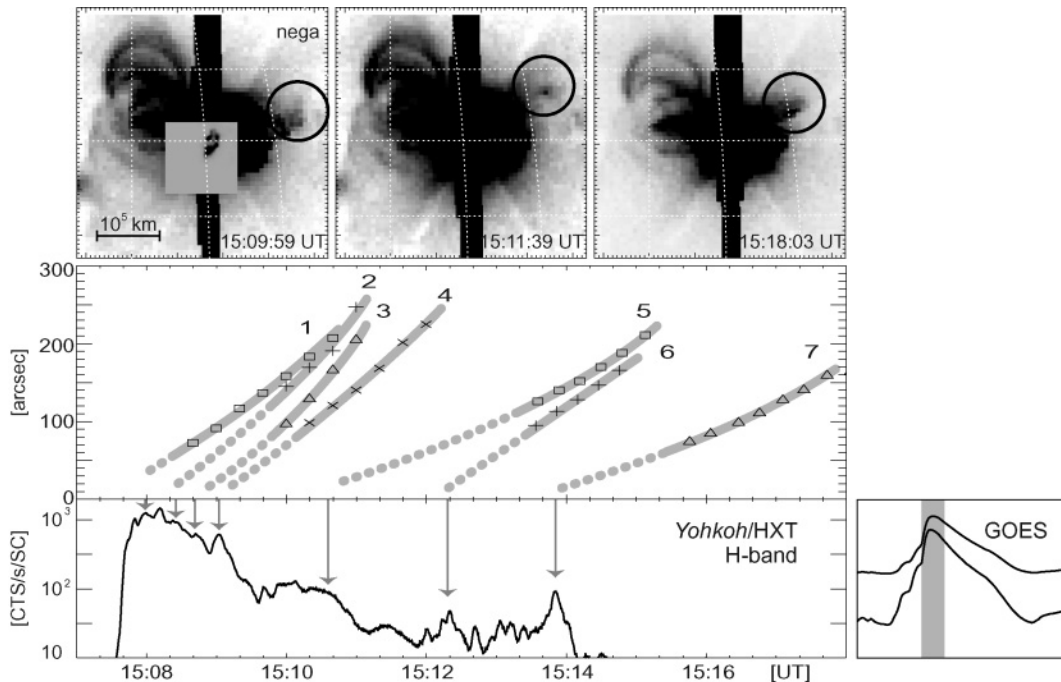


図5 上図: 2001年11月24日のフレアに伴い観測された, プラズマ塊噴出現象の軟 X 線画像. 黒○で囲まれた領域が噴出するプラズマ塊. プラズマ塊はフレアのコア領域と比べ格段に強度が弱い. 中図: 各プラズマ塊の高さ変化. 横軸は時刻, 縦軸はフレアコア領域から測ったプラズマ塊の距離. 下図: 硬 X 線強度曲線. 右下は GOES 衛星による軟 X 線強度曲線. ピーク付近の灰色で示した部分が注目している時間帯. (Courtesy of H. Takasaki)

相」と呼ばれ、硬 X 線やマイクロ波での非熱的放射が観測されるなど、強いエネルギー解放が、つまり速いリコネクションが起きていると考えられる。

さらに最近では、一つのフレアに付随して複数のプラズマ塊噴出現象が観測される例が報告された[18]。そして、その各々の噴出のタイミングに合わせて硬 X 線放射が強くなっていったのだ。図 5 上段の黒○で囲った部分はそれぞれ異なるプラズマ塊である（一方図 5 から、フレアのコアの領域が、プラズマ塊に対し小さく非常に明るいこともわかる：左上図の中心に低露出の画像を埋め込んだ）。図 5 中段にフレアのコア領域から測った、各々のプラズマ塊の位置を、下段には硬 X 線強度を示した。このことから、エネルギー解放の強さとプラズマ塊噴出機構との間には密接な関係があることがわかる。現在では、典型的な $H\alpha$ 線フィラメントと軟 X 線プラズマ塊噴出現象が同じフレアに付随して同時に観測される例も報告されており、このようなプラズマ噴出現象が、太陽フレアに付随する現象の中でも普遍的なものと考えられるようになってきた。

3.2.3 コロナ質量放出 (CME)

CME は全質量が 50–500 億トンという莫大なプラズマが太陽コロナから 10–1,000 km/s ほどの速度で惑星間空間に放出される現象であり、このプラズマが惑星間空間の擾乱源として直接的に働くため、宇宙天気研究においても注目されている現象である。図 6 (b) に示す観測例のように典型的には、内側から、「明るいコア」「空洞」「ループ状のエッジ」の 3 つの構造からなることが知られている。CME に関する研究は、1995 年に米国の NASA と欧州宇宙機関 (ESA) が打ち上げた SOHO 衛星搭載の LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment) と呼ばれる観測装置により飛躍的に進んだ。そもそも太陽コロナは大変希薄であることから、日食の時を除いては構造を見ることができない。LASCO では、太陽円盤を掩蔽 (えんぺい) し、人工日食状態で太陽外層大気を観測しており、打ち上げから 2005 年末までに観測された CME の個数は 10,000 を超えた。これらはカタログ化^{注3}されており、またその統計研究の結果が [19, 20] などにとまめられている。

特に文献 [20] では、フレアの軟 X 線強度の規模にも依るが、約半数のフレアにしか CME が付随しないことが報告されている。このような事由から、よく、磁気嵐にとって重要なのは CME であり、フレアは実はそれほど重要でない、という類の発言を耳にすることがある。しかし、これは太陽物理学の立場から考えると、全く奇妙に聞こえる。例えばサイズが小さいフレアでは、大域的な磁場構造に閉じ込められていることも多々ある。この場合 X 線の強度も低いことが多く、たとえフレアとして認識されるほどの増光があっても、外側の磁場構造を取り除いてプラズマを惑星間空間に噴出するほどのエネルギーは解放されないかもしれない。太陽フレアでの発生頻度としては、このような「小さな」ものが圧倒的に多い (ちなみに、その分布は地震と同様にきれいな冪分布に従うことが知られている [21])。小さなフレアの場合、「X 線強度は上がったのに(これによ

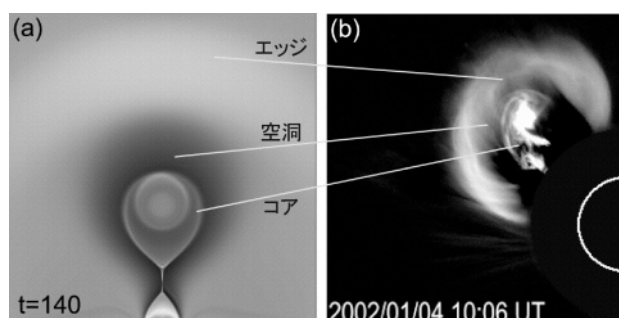


図 6 CME に関する数値シミュレーション結果と観測の比較。(a) 塩田ら [27] による数値シミュレーションによる密度分布。(b) 2002 年 1 月 4 日に発生した CME を SOHO 衛星搭載の観測装置 LASCO C 2 で観測したもの [28]。

りフレアと認識される)、CME が発生していない」ということになりうる。逆に大規模な構造がゆっくりとエネルギー解放する場合を考える。この場合、軟 X 線の強度は普通のフレアとは異なり非常にゆっくりと上昇するため、「フレア」とは認識されない可能性がある。しかしこのような場合でも、大規模な CME に伴う巨大アーケード形成が軟 X 線で観測されたり [22]、同時に巨大なフィラメント/プロミネンス噴出が観測されていることから [23]、磁場のエネルギー解放現象は起きているし、その機構が普通のフレアと大きく変わることはない。つまり CME もまた磁気リコネクションに付随して観測される現象の一つに過ぎず、CME をフレアから完全に切り離して議論することはできない。

ただし逆に、「CME を発生させやすいフレアや磁場構造」があるのも間違いがない。それらの特徴を知り発生を予測することが、太陽物理学者に求められている課題であろう。例えば CME の前兆現象として、シグモイド (sigmoid) が注目されている [24]。シグモイドとは S 字型 (または逆 S 字型) をしたコロナループのことで、ループに沿って電流が流れているためこのような構造に見える。このことは余分なエネルギーがこの構造に蓄えられていることを示している。そしてフレアもしくは CME の発生後に、よりエネルギーの低い形状へ移行することが知られている [25]。一方、数値シミュレーションを用いたの研究も盛んである (例えば [26, 27])。このため図 6 に示すように、数値シミュレーションの結果と観測結果を直接比較することも可能になってきている。CME については、2006 年秋に打ち上げ予定の STEREO 衛星により (2006 年 7 月現在の情報に基づく) 立体構造を観測することが計画されており、その研究分野は一層進むことであろう。

3.2.4 活動領域の特徴とフレア・CME

ここまで述べてきたことを簡単にまとめると、1) 太陽フレアでの磁気リコネクションにより解放されたエネルギーを駆動源とし、2) 太陽コロナから惑星間空間に放出される大量のプラズマが擾乱源となるが、3) 解放されるエネルギー量やフレアのサイズ、大域的な磁場構造など様々な要因によりプラズマの放出の可否やそのインパクトが決まる。つまり、「CME を発生しやすいフレア」がどの

注 3 http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

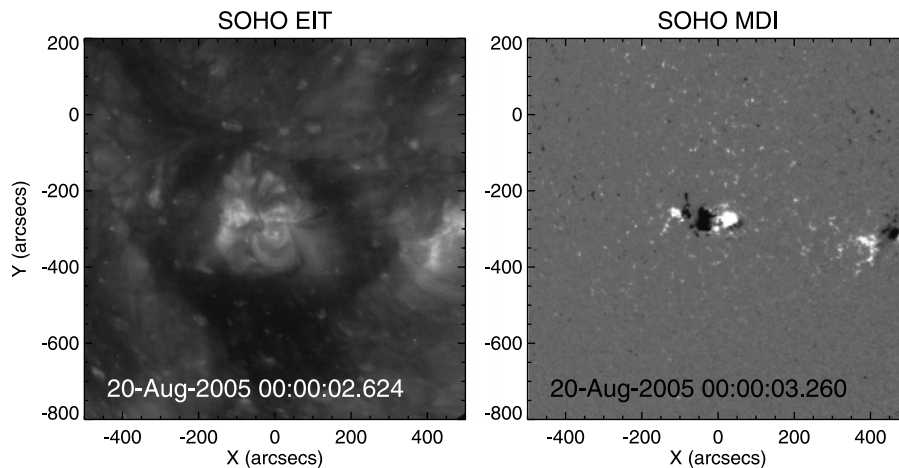


図7 2005年8月に現れた活動領域 NOAA 10798 の極紫外線 (195 Å) 画像 (左図) と光球磁場画像 (右図)。活動領域が小さなコロナホール (極紫外線画像で暗い領域) に囲まれていることがわかる。

ようなものであるかは、太陽表面の活動現象そのものだけでなく、活動領域全体や周りとの磁場構造上での関係も考慮に入れて議論する必要がある。また、本章は主に活動現象を中心として述べているため詳細には触れないが、「コロナホール」と呼ばれる領域もまた、宇宙天気研究においては重要である。コロナホールでは磁場が大域的に弱く、惑星間磁場と直接つながった磁場構造をしており、軟 X 線画像では「暗い領域」として観測される。太陽面での磁場活動という点では静穏であるが、磁力線が惑星間空間に開いていることで、高速太陽風の源となっている。

ここで、太陽フレアや CME といった現象を大域的な磁場構造との関わりという点で調べた研究例として、2005年8月24日に活発な磁気嵐を生じた活動領域 NOAA10798 の多波長観測の結果を紹介する。光球磁場構造やコロナでの磁場構造からこの活動領域の成長過程を追うと、まずこの領域が小さなコロナホール中に浮上し、アネモネ (sea anemone: イソギンチャク) 構造と呼ばれる特殊な構造を形成していることがわかる。図7の左図は極紫外線で観測したこの活動領域の様子を示しており、活動領域は明るくコロナホールは暗く見える。右図は光球磁場画像であり、正 (白) 負 (黒) 極性の対が比較的静穏な領域に浮上してきている。この浮上磁場は一見すると、単純な磁場の対のようであるが、実は「ヘールの極性法則」で決まる磁場極性とは逆の磁場極性であり、光球下に非常に複雑な構造がある可能性を示唆している。ヘールの法則とは、太陽活動周期や南北半球によって先行/後行の黒点の極性が決まる、という経験則である。また、この活動領域で発生したフレアは中規模であったが、それに対して CME が極めて速いことがわかった。コロナホール内は通常は静穏な領域であるが、ひとたびフレアや CME が発生すると、その噴出されたプラズマは減速されることなく惑星間空間を伝搬することができ、結果として地球磁気圏に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。このように惑星間空間へのインパクトは、浮上してくる活動領域の特徴と成長過程、および周りの磁場との関係が重要であることがわかる。

3.3 太陽フレア研究のこれからの課題

太陽物理学において、もしすべての太陽フレアの発生を事前に予報できるとすれば、これに優る宇宙天気研究への貢献はないであろう。逆にいえば、太陽活動現象を完全に理解できるという意味で、これが太陽物理学の究極的な目標となるのかもしれない。しかし太陽観測はリモートセンシングによる監視にのみ頼っている状況であり、フレアの発生の予知はたいへんな困難を伴うものである。現実的な貢献として太陽物理学分野に求められているのは、まず「特に太陽地球環境に影響を及ぼしやすい太陽フレアの特徴は何か？」を過去のフレアの統計などから明らかにすることであろう。これには大域的な磁場構造、つまり活動領域全体やさらにその周辺に注目する必要がある。また、活動領域の浮上から成長の過程を詳細に調べる研究も有効である。さらには、これまでの研究結果から「巨大フレアの発生を予測すること」は幾分簡単であろうと考えられている。というのは巨大フレアは、非常に複雑な活動領域で発生することが知られている。例えば、強く捻れられた磁力線はキンク不安定によりコブのような構造になることがあるが、このようなコブ状になった構造がそのまま浮上し、非常に複雑で活発な活動領域になることがある [29, 30]。先ほどの例で挙げた「ヘールの極性法則を破るような磁場極性の対の浮上」も、このような活動領域に分類されるであろう。それらの活動領域が太陽表面に現れたらいち早く注目することができ、2, 3日程度の誤差で大フレアの発生を予報することが現在でも可能になってきている。一方で、「明日フレアが発生するのか」よりも、「数ヶ月後の太陽は、あるいは3年後の太陽は活発であろうか」ということが宇宙開発においては重要になることもある。スペースシャトルの打ち上げや宇宙ステーションの進捗などに関係がある。このような要求に対し、太陽周期活動の研究から、統計的にどの時期が太陽活動が活発になりそうかの予報を立てることが必要とされている。

このようなさまざまな課題に対する取り組みとして、現在、学術創成研究「宇宙天気予報の基礎研究」^{注4}(代表: 柴

注4 <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/spw/>

田一成氏)が進められている。この研究は、2005年から5ヶ年の計画で、「現代社会の基盤をゆるがす宇宙の嵐を解明し、『宇宙天気』の予報の基礎を築く」ことを目的としている。そのために、太陽や太陽風から地球磁気圏・電離圏に至る観測データの解析とコンピュータシミュレーションを駆使し、太陽から地球に至るまでを一つのシステムとして扱う階層間結合モデルの構築が推進されている。太陽はこれまで、宇宙天気分野においてエネルギー源としての役割しか担っていないとの認識が強かったが、この研究では、本稿で述べたさまざまな太陽活動現象の諸問題の解明が大きな課題として取り上げられている。また、2006年9月に打ち上げ予定のSOLAR-B衛星も、宇宙天気研究に大きな躍進をもたらすと期待されている。SOLAR-B衛星を始めとするスペース太陽観測の発展が、現在の宇宙天気研究で太陽研究が重視されている理由であり、また結果とも成りうるためである。また、国際的にも国際太陽地球物理学・科学委員会(SCOSTEP^{注5})により、2004年から5年間の国際共同研究計画CAWSES (Climate And Weather of the Sun-Earth System; 太陽地球系の気候と天気)^{注6}が実行されており、そのテーマ2として「宇宙天気の研究と応用(Space Weather: Science and Applications)」が掲げられている。その遂行のためには、太陽地球環境に関わるあらゆる研究分野とより一層関係を図ることとともに、そのそれぞれでの分野で研究発展が必要であることはいうまでもない。また、磁気リコネクションや粒子加速機構など、太陽フレアでのエネルギー解放機構の研究も、同時に進められる必要があるだろう。

参考文献

- [1] S. Tsuneta *et al.*, Publ. Astr. Soc. Japan **44**, L63 (1992).
- [2] M.J. Aschwanden and D. Alexander, Sol. Phys. **204**, 91 (2001).
- [3] K. Shibata *et al.*, Astrophys. J. **451**, 83 (1995).
- [4] S. Masuda *et al.*, Nature **371**, 495 (1994).

- [5] T. Yokoyama, K. Akita, T. Morimoto and K. Inoue, J. Newmark, Astrophys. J. **546**, L69 (2001).
- [6] A. Asai *et al.*, Astrophys. J. **605**, L77 (2004).
- [7] H. Carmichael, in *The Physics of Solar Flares*, ed. W.N. Hess (NASA SP-50) (1964) p.450.
- [8] P.A. Sturrock, Nature **211**, 695 (1966).
- [9] T. Hirayama, Sol. Phys. **34**, 323 (1974).
- [10] R.A. Kopp and G.W. Pneuman, Sol. Phys. **50**, 85 (1976).
- [11] K. Shibata, J. Plasma Fusion Res. **77**, 955 (2001) [*in Japanese*].
- [12] A. Asai *et al.*, Astrophys. J. **611**, 557 (2004).
- [13] T. Yokoyama, and K. Shibata, Astrophys. J. **549**, 1160 (2001).
- [14] E. Tandberg-Hanssen, *The Nature of Solar Prominences* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995).
- [15] T. Morimoto and H. Kurokawa, Publ. Astr. Soc. Japan **55**, 505 (2003).
- [17] M. Ohyama and K. Shibata, Publ. Astr. Soc. Japan **49**, 249 (1997).
- [16] T. Morimoto and H. Kurokawa, Publ. Astr. Soc. Japan **55**, 1141 (2003).
- [18] H. Takasaki, *in private communication*.
- [19] S. Yashiro *et al.*, J. Geophys. Res. **109**, A07105 (2004).
- [20] S. Yashiro, N. Gopalswamy, S. Akiyama, G. Michalek and R.A. Howard, J. Geophys. Res. **110**, A12S05 (2005).
- [21] T. Shimizu, Publ. Astr. Soc. Japan **47**, 251 (1995).
- [22] A.H. McAllister *et al.*, J. Geophys. Res. **101**, 13497 (1996).
- [23] Y. Hanaoka *et al.* Publ. Astr. Soc. Japan **46**, 205 (1994).
- [24] R.C. Canfield, H.S. Hudson and D.E. McKenzie, Geophys. Res. Lett. **26**, 627 (1999).
- [25] T. Sakurai *et al.*, Publ. Astr. Soc. Japan **44**, L123 (1992).
- [26] P.F. Chen and K. Shibata, Astrophys. J. **545**, 524 (2000).
- [27] D. Shiota *et al.*, Astrophys. J. **634**, 663 (2005).
- [28] H. Cremades and V. Bothmer, Astron. Astrophys. **422**, 307 (2004).
- [29] T.T. Ishii, H. Kurokawa and T.T. Takeuchi, Publ. Astr. Soc. Japan **52**, 337 (2000).
- [30] H. Kurokawa, T.J. Wang and T.T. Ishii, Astrophys. J. **572**, 598 (2002).

注5 <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SCOSTEP/scostep.html>

注6 <http://www.bu.edu/cawses/>



4. 太陽風プラズマ

小島正宜

名古屋大学太陽地球環境研究所

(原稿受付：2006年5月22日)

太陽風の宇宙天気予報とは、どのような物理的特徴（速度、密度、温度、磁場等）を持つ太陽風が、いつ地球磁気圏に吹き付けてくるか、それを予報することである。予報すべき太陽風を三つに大別し説明する。その一つは、定常的に吹いている太陽風で、地球に吹き付けてくる太陽風は太陽の自転に伴い27日周期で変化し、共回転太陽風と呼ばれる。もう一つの太陽風は、太陽面爆発現象に伴い短時間に惑星間空間に大量のプラズマが放出されたものでCME (Coronal Mass Ejection) と呼ばれている。これらの2種類の太陽風とは性格が異なる惑星間空間現象に、低速でありながら密度がきわめて低くなる太陽風消失現象と呼ばれるものがある。名古屋大学太陽地球環境研究所（以下、STE研）では、天体電波を用いたリモートセンシング技術を用いて、人工衛星等の飛翔体では観測不可能な太陽風三次元構造を短時間に求め、地球に吹き付けてくる太陽風の予報を試験的に行っている。

Keywords:

solar wind, coronal mass ejection, interplanetary scintillation, forecast

4.1 はじめに

太陽風は陽子と電子を主成分とする超音速磁化プラズマ流で、100万度を超える高温の太陽コロナプラズマが、その熱圧で太陽重力を振り切り惑星間空間へと吹き出したものである(表1)。この太陽風観測のために、多くの探測機が打ち上げられてきたが、広大な惑星間空間を吹く太陽風の全貌をとらえるには打ち上げられた軌道が限られている。フレアなどの太陽面爆発現象に伴い惑星間空間を吹き抜けて行く衝撃波の様子や、定常的に吹いている太陽風の構造を三次元的にとらえるには、広い緯度、経度に同時に多くの探測機を必要とする。また、太陽風の三次元構造は、太陽黒点活動とともに大きな変化をしており、その変化を観察するには太陽活動周期の11年以上にわたる安定した連続観測が必要である。このような観測を可能とするのが天体電波の惑星間空間シンチレーション現象 (IPS: interplanetary scintillation) を利用した地上からのリモートセンシングである。

太陽風の宇宙天気予報を行うのに、人工衛星などの宇宙空間探測機を利用する方法があるが、本章ではこの方法と

は異なり、太陽風の三次元構造を解析しその動きから予報を行う方法を紹介する。まず、STE研で行われているIPS観測から得られたデータなどを用いて予報すべき太陽風について概説し、次に三次元太陽風構造をとらえる方法を紹介する。IPS観測を用いた宇宙天気予報は、試験的であるが次のサイトで行っているのを見ていただきたい <http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/forecast/>。また米国カリフォルニア大学サンディエゴ校へIPSデータを準実時間で送り、それを用いた宇宙天気予報を http://cassfos02.ucsd.edu/solar/forecast/index_v_n.html のサイトでも日米共同で行っている。

4.2 共回転太陽風

太陽極軌道探査機ユリシーズは、1994年から1995年の約10ヶ月をかけて太陽の南半球から北半球へと大きく緯度を変え、図1に示す太陽活動静穏期の太陽風速度の緯度構造を観測した。太陽活動静穏期には、高緯度に速度700-800 km/sの高速風、低緯度に300-400 km/sの低速風が吹いており、その両者は急峻な速度勾配で隔てられている。低緯度で繰り返し現れているスパイク状の高速は、低緯度まで伸び出した高速風が観測されたものである。このように太陽活動静穏期の太陽風は、低速風と高速風の2種類に大別でき、太陽風のbimodal構造と呼ばれている。

図2は、IPS観測から得られた太陽風速度の緯度経度分布の11年の周期変化である。1996年の太陽風構造は、太陽活動極小期にユリシーズが観測したものと同じで、太陽赤

表1 地球公転軌道付近を吹く太陽風の性格。

	速度 km/sec	陽子密度 1/cc	磁場 $\times 10^{-5}$ gauss	陽子温度 $\times 10^4$ °K
平均像	468 ± 116	5-7	6.2 ± 2.9	12.5 ± 9
高速太陽風	750~800	2.5	4	20
低速太陽風	300~400	9	5	4

4. Solar Wind Plasma

KOJIMA Masayoshi

author's e-mail: kojima@stelab.nagoya-u.ac.jp

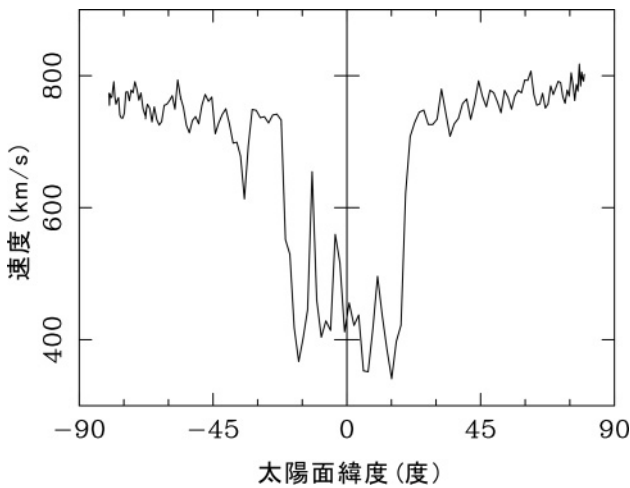


図1 太陽活動極小期に 太陽極軌道探査機ユリシーズが観測した太陽風速度の緯度分布。

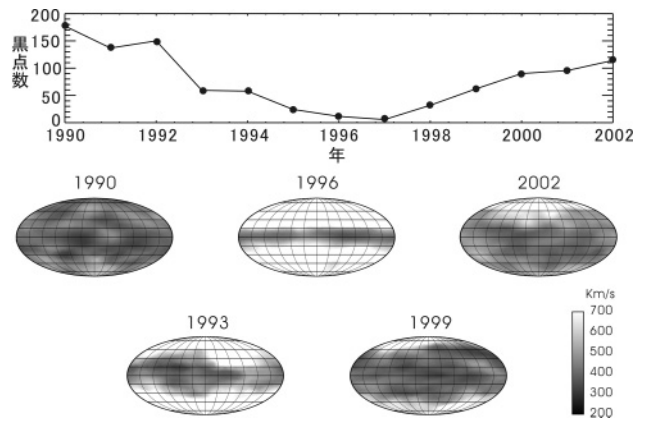


図2 太陽速度緯度経度分布の太陽黒点活動依存。速度分布はIPS トモグラフィ解析で得られた。

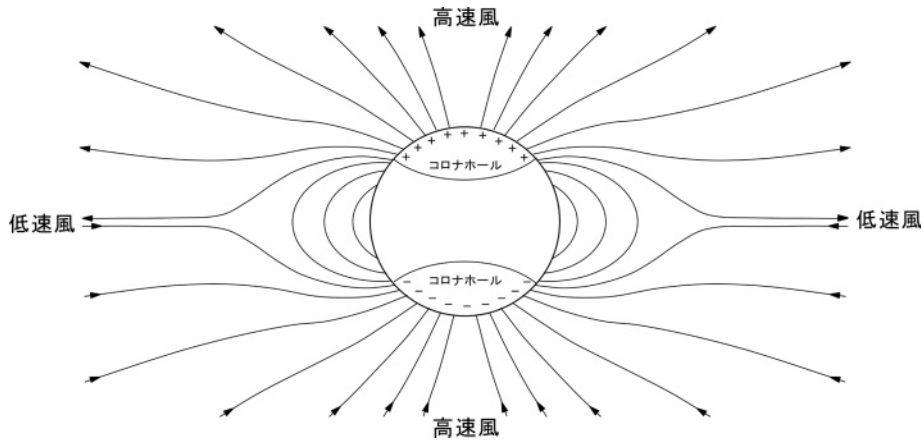


図3 太陽活動極小期の太陽磁場構造。この磁場構造が太陽風速度の緯度構造を表している。

道に添う細い帯状に低速風が分布し、中緯度から高緯度の広範囲に高速風が分布している。太陽活動が活発になると、低速風領域が緯度幅を広げ太陽全面へと広がり高速風領域が極域に小さくなっていき、太陽活動極大期にほとんど消滅してしまう。

太陽活動極小期の太陽磁場は、図3に示すようにダイポール構造となり、赤道上空のループ磁場は太陽風により惑星間空間へと引き出され磁気中性面を惑星間空間に形成する。そしてこの磁気中性面に沿い高密度の低速風が流れる。太陽活動が活発になるに連れ、磁気中性面(低速風帯)は太陽赤道に対し大きな傾きを成すようになる。このため太陽活動減衰期や上昇期の低緯度には高速風と低速風とが混在し、太陽の自転に伴い低速風の後ろから高速風が吹いてくるので、両者の境界には共回転相互作用領域と呼ばれる密度、磁場の増加領域が生じる。この太陽風三次元構造は太陽自転周期程度の時間では大きな変化をしないので、構造が求まれば、太陽の自転に伴い何時どのような速さの太陽風が地球に吹き付けてくるのか予報ができる。

4.3 惑星間空間擾乱 Coronal Mass Ejection

フレアやフィラメント消失現象に伴い大量のプラズマが惑星間空間に放出される現象をCMEといい、その放出エ

ネルギー総量の平均は $10^{23} - 10^{24}$ J、総質量は $10^{15} - 10^{16}$ gにも達する。高速のCMEは、惑星間空間を衝撃波を作りながら伝搬し、この衝撃波では高エネルギー粒子 (keV - 10 MeV) が連続して加速される。コロナで観測されるCMEは、core, frontal loopとその間に挟まれた低密度のcavityの3構造をしている(図4)。一方、惑星間空間で観測される高速のCME (ICME) は、衝撃波の内側に磁場が強く低温・低密度な磁気雲と呼ばれる領域があり、衝撃波面と磁気雲に挟まれた領域は圧縮され、高密度・高温になっている。太陽風中のCME前面にある密度の高いプラズマの相当量は伝搬過程で太陽風プラズマを集積してきたものと考えられ、CMEのFrontal Loopがこの密度増加にどれだけ寄与しているかは未だによくわかっていない。また、磁気雲は太陽近傍CMEのCavityに対応すると考えられるが、その内部にあるはずのCoreに対応する濃密なプラズマは、太陽風中の観測からは同定されていない。このためコロナ中のCMEと惑星間空間のICMEとの対応関係を確立することは、CMEの起源や伝搬機構を理解し、正確な宇宙天気予報を行うために重要である。

CMEがいかにして太陽から地球軌道まで伝搬するかについても、我々は非常に限られた知識しか持っていない。これまでの観測結果からは、ICMEは伝搬中に太陽風との

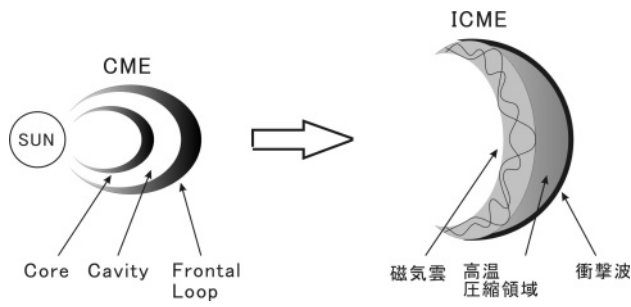


図4 コロナと惑星間空間における CME 構造の模式図.

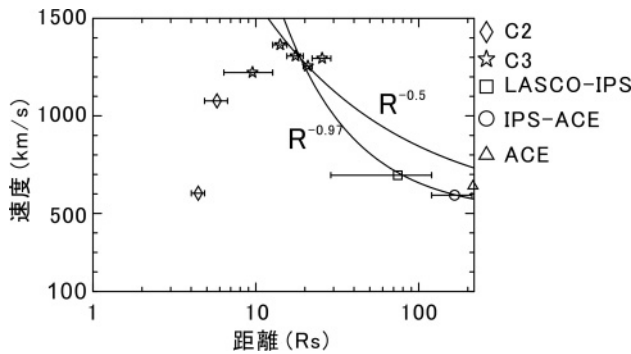


図5 2000年7月10日の CME イベントの伝搬速度の距離依存性. C2, C3 は SOHO 衛星搭載のコロナグラフ LASCO が観測したプラズマの動きから求めた速度. LASCO-IPS および IPS-ACE は, LASCO, IPS, ACE のそれぞれが CME を観測した場所の太陽からの距離と時間から推測した平均速度.

相互作用を通じて減速されていることが知られている[1]. 図5は, CME のコロナでの速度と惑星間空間での速度の関係で, CME が太陽風との相互作用を通じて減速している様子を示している[2]. この減速の強さは, 相互作用する太陽風と CME との速度差に依存すると思われるので, 太陽風との相互作用による CME の減速を予測するためには, CME の三次元構造と, それが伝搬していく惑星間空間を常時吹いている太陽風構造の両者を求める必要がある.

4.4 太陽風消失現象

1999年5月11-12日地球磁気圏に吹きつけていた太陽風は突然, 低速 (350 km/s 以下) でありながら密度がきわめて薄いものとなった(図6). 普段地球半径の約11倍の大きさの磁気圏は, 太陽風動圧の大きな減少を受けて地球半径の60倍にも膨らんだ. この現象は disappearing solar wind と呼ばれ, その起源は謎であった. 低緯度に現れる小さなコロナルホールからは, 図8に示すように流管がコロナ中で大きく開き, それが原因で低速なストリーマーが吹き出すことが知られており[3], Janardhan らは, 異常低密度低速風をこの小さなコロナルホールで生じた過渡的な変化によると説明した[4].

この現象が太陽に起源を持つ証拠の一つが, この太陽風のもう一つの特徴である速度方向が動径方向に対し太陽自転方向に大きくずれていることである. この速度の太陽自転方向成分 v_y は, 図7に示すように密度が薄いほど大きい. これは, 太陽近傍において太陽風プラズマは太陽と共

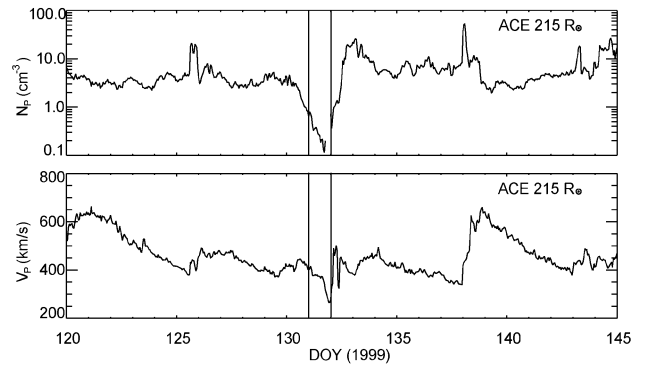


図6 人工衛星 ACE の観測した太陽風密度と速度.

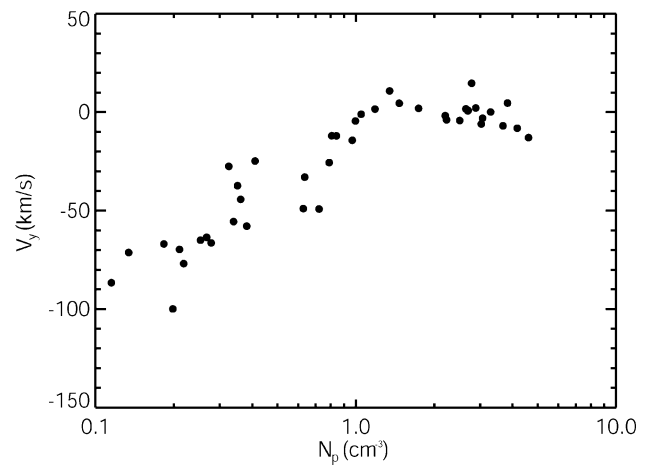


図7 太陽自転方向の太陽風速度と密度との相関図. ([4]より転載)

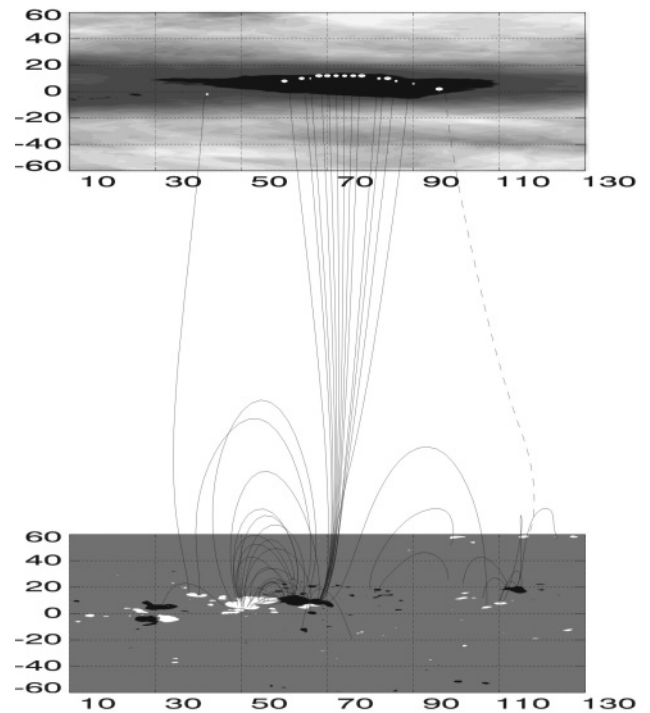


図8 太陽活動極小期に現れた低速ストリーム. 上図は, 2.5 太陽半径の距離にプロットした太陽風速度の緯度経度分布図. 経度70度付近の黒色の領域は速度 370 km/s 以下を表す. 下図は, 米国キットピーク観測所で観測された太陽面上の磁場分布で, 黒白で極性を表している. 上図と下図を結ぶ黒線は, ポテンシャル磁場で, 太陽風の流管を表す. ([3]より転載)

が進展すれば、コロナ磁場の観測から、太陽風の三次元構造を予測することが可能となる。

4.6 まとめ

宇宙天気予報を気象予報に例えるならば、太陽観測で何時フレアやCME現象が発生するかを監視し予報することは、台風発生の予報といえる。一方太陽風の観測は、惑星間空間擾乱がいつ地球に到達するのか、あるいは影響しないのかを予報することであり、それは台風の規模とその進路予報をすることに似ている。台風の進路予報には、日本周辺の気圧配置が必要であると同様に、惑星間空間においても、衝撃波が伝搬していくバックグラウンドである常時吹いている太陽風の様子を知ることが必要である。

太陽活動とともに大きく様子を変える太陽風を広大な三次元惑星間空間の構造として常時監視することが宇宙天気予報には必要であるが、現在のところそれが可能なのは惑星間空間シンチレーションが唯一有効な手段である。この惑星間空間シンチレーション観測専用の電波望遠鏡を有し、定常観測を継続しているのは名古屋大学太陽地球環境研究所とインドのターター研究所である。近々メキシコUNAMの新しい装置が観測を始めるので、異なる経度の観測所の国際共同で太陽風の長時間連続観測も可能となる。

参考文献

- [1] N.Gopalswamy, A.Lara, R.P.Lepping, M.L.Kaiser, D.Berdichevsky and O.C. St Cyr, *Geophys. Res. L.* **27**, 145 (2000).
- [2] M. Yamashita, M. Tokumaru and M. Kojima, *Solar Wind Ten*, AIP Conference Proceedings **679**, Editors: by M. Velli, R. Bruno and F. Malara (AIP, New York, 2003) p.754.
- [3] M. Kojima, K. Fujiki, T. Ohmi, M. Tokumaru, A. Yokobe and K. Hakamada, *J. Geophys. Res.* **104**, 16993 (1999).
- [4] P. Janardhan, K. Fujiki, M. Kojima, M. Tokumaru and K. Hakamada, *J. Geophys. Res.* **110**, doi:10.1029/2004JA010535 (2005).
- [5] K. Asai, M. Kojima, M. Tokumaru, A. Yokobe, B.V. Jackson, P.L. Hick and P.K. Manoharan, *J. Geophys. Res.* **103**, 1991 (1998).
- [6] B.V. Jackson, P.L. Hick, M. Kojima and A. Yokobe, *J. Geophys. Res.* **103**, 12049 (1998).
- [7] M. Kojima, M. Tokumaru, H. Watanabe, A. Yokobe, K. Asai, B.V. Jackson and P.L. Hick, *J. Geophys. Res.* **103**, 1981 (1998).
- [8] K. Hayashi, M. Kojima, M. Tokumaru and K. Fujiki, *J. Geophys. Res.* **108**, doi:10.1029/2002JA009567 (2003).
- [9] M. Tokumaru, M. Kojima, K. Fujiki, M. Yamashita and A. Yokobe, *J. Geophys. Res.* **108**, doi:10.1029/2002JA009574 (2003).
- [10] Y.M. Wang and N.R. Sheeley Jr., *Astrophys. J.* **355** 726 (1990).
- [11] Y.M. Wang and N.R. Sheeley, Jr., *Astrophys. J.* **372**, L45 (1991).
- [12] L.A. Fisk, N.A. Schwadron and T.H. Zurbuchen, *J. Geophys. Res.* **104**, 19765 (1999).
- [13] M. Hirano, M. Kojima, M. Tokumaru, K. Fujiki, T. Ohmi, M. Yamashita, K. Hakamada and K. Hayashi, *Eos Trans. AGU*, **f84(46)**, Fall Meet. Suppl., Abstract SH21B-0164 (2003).
- [14] D. Baba, M. thesis, Nagoya Univ. (2004) [*in Japanese*].
- [15] M. Kojima, K. Fujiki, M. Hirano, M. Tokumaru, T. Ohmi and K. Hakamada, *The Sun and the heliosphere as an Integrated System*, Editors: Giannina Poletto and Steven T. Suess (Kluwer Academic Publishers, 2004) p.147.
- [16] T.K. Suzuki, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **349**, 1227 (2004).
- [17] T. Suzuki, *Astrophys. J.* **640**, L75 (2006).



5. 磁気圏プラズマ

小原隆博

独立行政法人 情報通信研究機構 電磁波計測研究センター 宇宙環境計測グループ

(原稿受付：2006年6月23日)

地球周辺の宇宙空間は決して真空の世界ではなく、地球磁場は広がっていて、プラズマや放射線粒子が独自の領域(磁気圏)を形成している。本説では、磁気圏の構造とダイナミクスを紹介し、太陽風から侵入するエネルギーの蓄積や解放のプロセスを概観する。宇宙の嵐が、この領域における重要な現象であるが、嵐の結果発生する放射線粒子は、磁気圏を飛翔する人工衛星に甚大な悪影響を引き起こす。宇宙天気予報について最後に触れるが、科学としての基礎にたった研究が進められている状況を解説する。

Keywords:

magnetosphere, magnetic storm, magnetic substorm, radiation belt, space weather

5.1 磁気圏の形成

地球に向かって吹き付けてくる太陽風は、超音速のプラズマの流れであるので、地球は障害物として認識されることになる。磁場や大気のない惑星であれば、惑星そのものが太陽風が感ずる惑星の大きさであるが、地球は磁場を持つ惑星である。このような場合は、周囲に広がっている惑星磁場も含んだ形で、惑星の大きさが認識される。模式的に描いたのが図1である。地球とその周辺の空間を、太陽に向かう方向を左に見て、手前と上半分を切り取った形で示している。地球起源の磁力線が非常に変形している。これは吹き付ける太陽風の圧力(動圧)によるもので、地球の昼側(前面)では、地球磁場が太陽風の動圧によって押し込められている。つりあう点は、太陽風の動圧とこれをさえぎる地球磁場の磁気圧がつりあう点で、具体的には、地球の半径の約11倍のところに境界ができる。これをマグネトポーズ(磁気境界面)と呼んでいる。太陽風は、地球半径にして10倍程度の大きさを障害物の大きさとして認識するが、先に述べたように太陽風は超音速(マッハ数で7~8)であるので、境界の外側に衝撃波が形成される。太陽方向にとんがった、丁度、船の舳先のような形をしていることから、バウ(舳先の意)ショックと呼ばれている。バウショックとマグネトポーズの距離は数千kmあり、この領域は遷移を意味するシース領域と呼ばれている。太陽風プラズマは、このシース領域を境界面に添って流れていくが、衝撃波を通過するときに加熱され、100万度近い温度になっている。

一方の夜側は、太陽風によって今度は引き伸ばされることになる。図1にその様子が示されているが、この夜側に伸びている部分を、総称して磁気圏尾部(マグネトテール)と呼んでいる。磁気境界面に囲まれた領域は、本節で扱う

磁気圏であるが、最初に各部に付けられている名称について説明する。磁気赤道には、薄くシート状にプラズマが広がっている。その形状にちなんで、プラズマシートという名前が付けられている。赤道を挟んで、北と南に伸びている空洞な領域をローブと呼ぶ。ローブは磁気圏境界面(マグネトポーズ)で、シースに接しているが、シースを流れる太陽風プラズマは、磁気圏の内部にしみ込んでくる。流れ込んできた太陽風プラズマを、プラズママンテルと呼んでいるが、プラズマの性質は太陽風プラズマに近い。ローブの領域は、プラズママンテルから後述する磁気圏対流によってプラズマが徐々に侵入する領域で、赤道面に向かって密度は下がっていく。赤道面付近では、磁場が反平行になっていて、磁場強度は非常に弱い。ここに高温(数 keV)のプラズマが集積して、プラズマシートを作っている。

プラズマ圏は、電離圏で作られたプラズマで満たされた低温高密度のプラズマ領域である。これに対して、プラズ

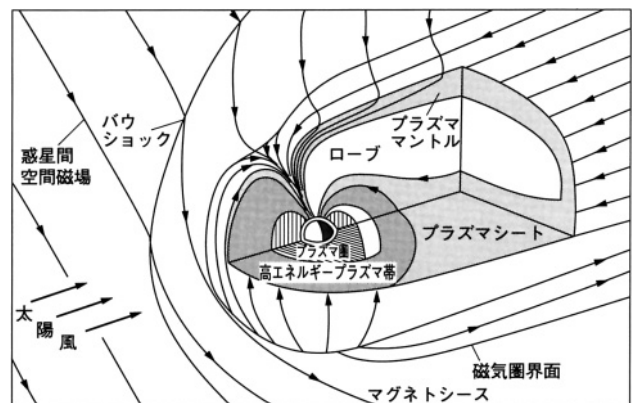


図1 地球磁気圏の構造図。

5. Magnetospheric Plasma

OBARA Takahiro

author's e-mail: T.Obara@nict.go.jp, obara.takahiro@jaxa.jp

マ圏の外側の高エネルギープラズマ帯は、プラズマシートから磁気圏対流によって地球周辺に向かって侵入し加熱された高温低密度プラズマ領域である。後述するが、これが磁気圏対流の発達時には、さらに地球に向かって押し込められ、通常のプラズマ圏位置まで侵入し、リングカレント(赤道環電流)の源になる。図1には、示されていないが、プラズマ圏の領域に、非常にエネルギーの高い放射線の帯(放射線帯)が存在する。主成分は、電子と陽子で、電子放射線帯は、2重構造をとっている。これに対して陽子の放射線はシングルベルトである。後述するが、ひとたび磁気嵐が発生すると、電子放射線帯は大きく変化する。静止軌道衛星は、電子放射線帯の外帯の裾野を飛翔しているが、放射線電子の量が著しく増加すると、衛星故障が電子の影響で発生することが多い。

以上、地球磁気圏の構造を概観したが、次節では、磁気圏のプラズマや磁力線の運動について述べる。

5.2 磁気再結合と磁気圏対流

磁気圏の構造と磁力線の運動について見るために、磁気圏を真昼と真夜中の子午面で南北に切った断面を図2に示している。ここでは、太陽風磁場は、南を向いている場合を考えているが、地球の前面で南向きの太陽風磁場と北を向いている地球磁場の磁力線同士の結合(磁気再結合)が起こる(図2の番号2)。太陽の磁力線と繋がった地球磁力線は、開いた磁力線となり下流(夜側)へと運ばれていく。太陽風の運動量が、磁気圏内部に運動を引き起こすのである。再結合により開いた磁力線は、一つは北極を回り一つは南極を回り、共に夜側へと運動していくが、十分に流れていった先で、これら2本の磁力線は再び巡り会うことになる(図2の番号7)。ここで、再び結合して1本の閉じた磁力線となり(図2の番号8)今度は、太陽側に向かって戻る運動を始めることになる。磁力線とともに、太陽風プラズマも磁気圏に侵入する。磁気圏の夜側には、大量の運動量と磁場のフラックスそしてプラズマが蓄積される。

では、一体どのようにして磁力線の再結合が起こるのだろうか。図3は、紙面に垂直な平面(磁気中性面)の上下2本ずつの反対向きの磁力線を示している。これらを近づけていくと、アンペールの法則により、境界に電流が発生する。この電流を磁気中性面電流と呼ぶ。電気伝導度が無限大と仮定すると、いくら磁力線が近づいても、強い電流の壁ができるだけで、磁力線は隔たったままである。もし、中性面のどこかで、電気抵抗が生じたとすると、そこでは、

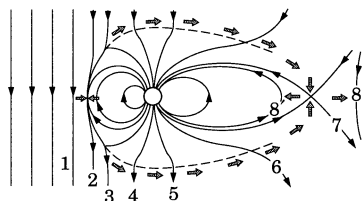


図2 磁気圏における磁力線の運動を示す。太陽風の磁力線は地球の磁力線と再結合して、磁気圏が形成され、数字(1~8)に従って磁力線は運動する。

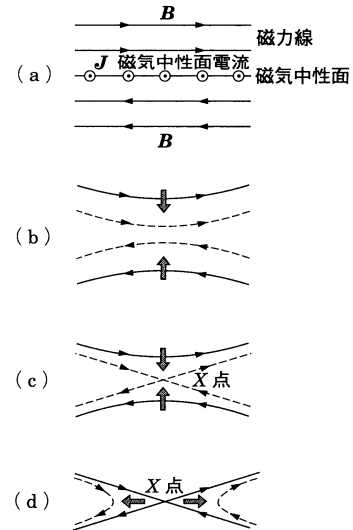


図3 磁力線の再結合を示す模式図。

磁場のエネルギーが消費される。周囲の磁場は、この消費を補うように、その領域に向かって拡散していく。図3(c)には、X点として磁力線の集中が起こる場所が示されているが、そこで新たなつなぎ換えが起こる。図3(d)で示された新しいペアの誕生が、磁力線の再結合と言われるものである。

再び図2に戻ると、磁力線の再結合は、昼に1ヶ所(番号2)夜に1ヶ所(番号7)で起こっている。図2で点線で囲まれた領域を磁気圏と考えると、太陽風磁場との再結合により、磁気圏内部に磁力線の巨大な対流が発生していることがわかるが、夜側にもう1つ出現する再結合ポイントの存在により、昼側で消費された磁場のフラックスが夜側から補給されていくという図式が判明する。このような磁気圏の対流構造の存在は、1964年にダンジーが提唱[1]したもので、その後、40年以上も生き続けている息の長いパラダイムであるといえる。

5.3 MHD 発電と磁気圏電流系

図2が長い間、磁気圏の研究者のパラダイムであったことを、前節で紹介したが、磁力線の運動には実はMHD発電が強く関与していることを述べたい。MHD発電とは、電磁流体における発電であって、具体的には磁場が運動することで起電力が発生することをさす。図4を見ていただきたい。ここでは、昼側で再結合した磁力線が、北極域上空を通過していく様子を模式的に示している。簡単のために、朝側から出た磁力線と夕方側から出た磁力線を描いている。これらは、いずれも太陽風磁場と結合した磁力線であり、太陽風の運動量を得て夜側(向かって手前)に運動しようとしている。このとき2本の磁力線の間には、太陽風があたかも電位差を与えており、いわばダイナモの働きをしている状況が描かれている。このダイナモで、朝側の磁力線には地球に向かって電流が流れ(沿磁力線電流)、夕方側の磁力線には地球から外に向かう電流が流れる。説明は省略してきたが、極域も含めて地球の上層大気には、太陽紫外線により電離された電離圏と呼ばれる領域が存在す

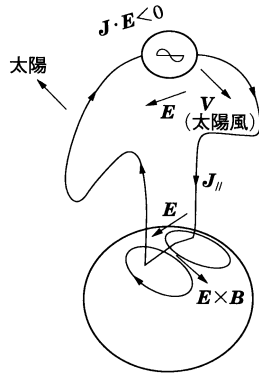


図4 磁気圏境界面ダイナモが沿磁力線電流とプラズマ対流を発生させる模式図。

る(6章で詳しく述べられる)。磁力線に沿って流れてきた電流は、今度は水平電流となって極域を朝夕に横断する。この電流が地球磁場から力を受けて、磁力線の根っ子も夜側に移動する。ダンジーが提唱した磁気圏の対流運動は、こうして電流を介在させることで、深い理解が得られることになったのである。

前節図2で、赤道に近い閉じた磁力線の領域に、大量のプラズマが存在していることに触れたが、図5にはその様子が更に正確に描かれている[2]。赤道に近い領域の磁場は、非常に引きのばされた形状を示している。赤道の北側の磁力線は地球の北極に向かう一方、赤道の南側の磁力線は地球の南極から外に向かっている。赤道域は、北側と南側の相反する磁力線が接している領域で、磁場がキャンセルされることで、非常に磁気圧が小さな領域が発生する。太陽風プラズマはこの磁場の弱い領域に入り込み、薄いシート状にプラズマのシートを形成する。これは、その名のとおりプラズマシートと呼ばれていて、図5で赤道付近に黒くハッチされたのがそれである。プラズマシートのプロトンのエネルギーは、太陽風速度(約400 km)がそのまま熱化した約1 keV程度を少し上回るエネルギーを典型的に持っている。図5には、赤道を朝側から夕方側に貫く赤道電流(尾部電流と呼ぶ)が流れている。この電流は、その外側に磁気圏が夜に長くのびるために発生する境界面電流と接続しているが、尾部電流が流れることで、プラズマシートのプラズマと磁力線が太陽方向に運動することが可能になっている。

さて、図5で興味深いポイントは、地球に近いプラズマシートのプラズマが、磁力線に沿って南北の極域に到達していることであろう。南極や北極の夜空を美しく彩るオーロラは、古来多くの人々を魅了し続け、オーロラの科学研究も19世紀になってから盛んに実施されるようになった。オーロラは、超高層大気で発生する放電現象であることは、地上からの観測でわかってきていたが、図5に示したプラズマシートのプラズマが、オーロラを輝かせる原因であることがわかったのは、人工衛星による直接観測を待たなければならなかった。北極域について、オーロラ領域上空の磁力線を地球の尾部にマッピングすると、プラズマシートにいたる。図6にはその様子が描かれているが[3]、オーロラの発生にとって最も重要な要素は尾部電流であ

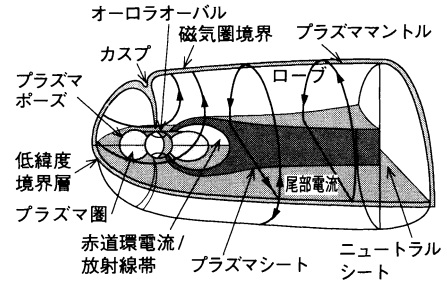


図5 磁気圏の構造と電流系[2].

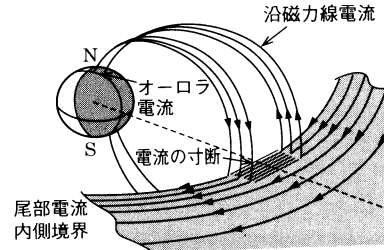


図6 サブストーム発達相における磁気圏尾部の電流構造[3].

る。先の図5にも示されていたように、プラズマシートを朝側から夕方側に向かって、尾部電流が流れている。通常の静穏な磁気圏状態の場合(オーロラ活動が見られない場合)尾部電流はプラズマシートを水平に流れている。太陽風速度や南向き磁場成分が大きくなると、磁気圏に注入されるエネルギー量は増大すると同時に、磁気圏内の対流速度も増す。これは尾部電流から見ると、電流量の増大にほかならない。プラズマシートは、その性質(無衝突プラズマ)として、ある一定量の電流を超えると、電流を流さなくなる。抵抗が異常に増大し、これによって尾部電流は寸断される。行き場を失った尾部水平電流は、今度は磁力線に沿って極域電離層に流れ込む。真夜中過ぎの領域に流れ込んだ電流はそのまま電離層中を流れて、真夜中前の領域から磁気圏に流れ出す。極域電離層中を流れる電流の空間的広がり、尾部電流寸断領域の広がりに対応すると考えている。

5.4 オーロラの嵐

次に、オーロラの構造や謎について見ていくことにする。ここでもやはり、人工衛星は活躍をしている。オーロラは、非常にしばしば、急に輝きを増すことがある。オーロラ爆発(ブレイクアップ)と呼ばれているこの増光は、磁力線に沿った電流量の急激な増加と一致していた。図7は、オーロラブレイクアップと沿磁力線電流の関係を模式的に示す[4]。オーロラは東西にのびる構造を持っていて、よく見るとカーテン状になって出現する。現れる領域は、磁気緯度65度付近で、真夜中よりも少し前の時間帯を中心にして出現する。オーロラの輝く領域をアークと呼ぶことがあるが、アークの先頭(西側)では、強い上向きの沿磁力線電流が観測される。一方、後方の比較的広い領域では、下向きの沿磁力線電流が見られる。オーロラのブレイクアップは、明るい領域が周囲に向かって拡大していく状況

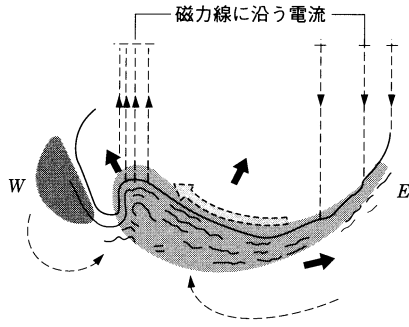


図7 オーロラブレイクアップと沿磁力線電流[4].

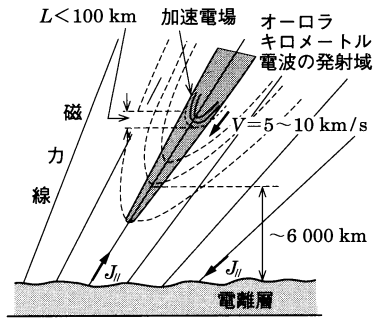


図8 オーロラポテンシャルの模式図[5].

を生む。東西にのびたアークの中には、西向き電流が流れている。この電流量も、オーロラの明るさと良い対応がある。

人工衛星の時代に入って、オーロラを引き起こす粒子の研究が著しく進んだ。磁力線に沿った上向き電流が存在する領域では、プラズマシートの電子が電流を担うことが判明してきた。図5で見たプラズマシートの粒子が極域のすぐ上空まで達している姿は、人工衛星によって明らかにされた。問題が1つ発生するが、これは磁気圏プラズマシートの電子密度が少ないことである。少ない電子で、大きな電流を流さなければならないことで、電子は磁力線に沿って加速されることになる。加速は時に10 kVまで達することがあるが、人工衛星でくまなく探査した結果、加速の起こる領域は空間的に非常に狭いことが判明し、加速域と名づけられた。図8に模式図を示すが[5]、加速域の高さ方向の幅は、100 km程度であり、地上6,000 kmを中心に3,000 kmから12,000 kmまで広がっているのがほとんどであるが、全体に下に向かって5~10 km/秒の速度で移動しているケースが多い。この加速が特に強まる領域からは、強い電波が放射されており、オーロラキロメートル電波として観測されている。磁力線方向に電場を発生させる機構として、異常抵抗モデルが提唱されている。沿磁力線電流がある閾値を超えると、プラズマに電流駆動不安定が起これり、この波動により異常抵抗が発生する。次にこの抵抗によって沿磁力線電場が作られ、それによって電子が加速されるというものである。

専門用語では、オーロラの嵐のことを、サブストームと呼ぶ。これは後述するストーム(磁気嵐)に対応する用語

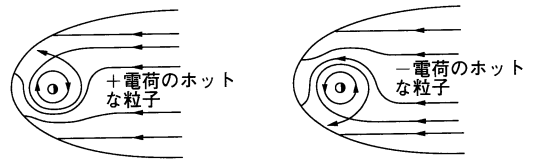


図9 磁気圏赤道面での電子と陽子のドリフトの模式図.

であるが、50年前はオーロラが磁気嵐を構成する要素であると信じられていた。ストームの基本要素というサブストームという言葉が用いられたのは、以上の経緯による。現在では磁気嵐(ストーム)とオーロラ嵐(サブストーム)は、異なった現象を対象とするという考えが主流である。

5.5 磁気嵐

オーロラ嵐(サブストーム)が、地磁気の高緯度(65度~75度)付近に発生するエネルギーの解放現象であることに対し、磁気嵐は中緯度から低緯度にわたって発生する磁気圏最大のエネルギー現象である。赤道域のプラズマシートのプラズマは、朝側から夕方側に電流を流しているが、赤道域には垂直北向きの地球磁場成分が存在するので、プラズマはローレンツ力を感じて、太陽方向に運動(ドリフト)する。この様子を図9に示すが、電子と陽子はともに磁気圏尾部を太陽方向にドリフトしている。地球に近づくにつれてプラズマシートの熱い粒子は、磁場の勾配と曲率によって大きく軌道を変え、プラスの電荷を持った陽子は西向きに、マイナスの電荷を持った電子は東向きにドリフトするようになる。陽子、電子ともに2種類の軌道を分離する境界線(面)が存在し、それより内側の閉じた軌道には、プラズマシートのプラズマは侵入できない。この侵入限界がプラズマシートの地球側境界である。図9において、境界の内側の軌道は閉じている。磁気嵐を起こす赤道環状電流は、実はこの閉じた軌道の粒子が発生させる電流である。

赤道付近に置かれた磁力計のデータが一斉に減少し、その減少は数時間から1日程度続くことがあり、回復するには1週間以上にも及ぶ現象がドイツのフンボルトにより19世紀の初頭に初めて報告された。この現象が地磁気嵐と呼ばれる現象であり、太陽風磁場が大きく南に向くことや動圧の増加によって引き起こされる。

太陽風の変動に伴う磁気圏対流速度や尾部電流量の時間変化により、プラズマシートの内側境界が大きく位置を変える。こうした変化は、図9において閉じた軌道領域に大量の熱いプラズマを注入する働きをする。地球半径の数倍の領域に、温度にして数十keV程度の陽子が集中する。図10は非常に模式的に描いた図であるが、地球を取り囲むように存在するプラズマが西向き電流を発生させている状況を示している。この赤道環状電流が作る磁場は、地球磁場を減少させる働きをする。大きな磁気嵐では500ナノテスラも地球磁場が減少することがある。

磁気嵐が発達する過程では、磁気圏対流が増加する。このことによってオーロラ嵐(サブストーム)は頻発することになる。磁気嵐中のオーロラは非常に活発で、磁極を中

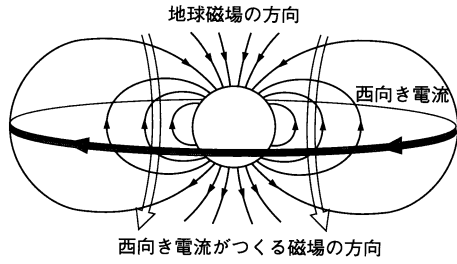


図10 赤道環電流の概念図.

心にぐるりと輪になって輝く特徴がある。図6で示した電流寸断が、主として夜側を想定して考案されたモデルであるが、磁気嵐中のサブストームは通常のモデルを超えた特別なモデルを必要としているといえる。現在、大きな磁気嵐の研究が、世界の各所で開始されているが、筆者のグループでも巨大磁気嵐とその関連現象について研究を進めているところである。

5.6 放射線帯の変動

1957年からの宇宙時代の最大の発見の一つに、地球を取り巻く放射能のおび(帯)である放射線帯の発見がある。放射線帯は、発見者の名前をとってバンアレン帯とも呼ばれる。我々のグループも、次節に述べる宇宙天気予報の観点から、このバンアレン帯の変動を詳しく調査している。これまでの理解を以下に記すが、総じて太陽や太陽風、時には銀河系の彼方からやって来て地球の磁場に捕獲された高エネルギー粒子(電子、陽子、アルファ粒子など)が、磁気圏内部にて更なる加速を受けながら、ゆっくりと地球の極近傍まで輸送されて放射線帯(内帯)になったと考えている。陽子、電子ともに内帯領域においては消失の時定数は非常に遅く、一度内帯に入った放射線粒子は数ヶ月から数年間存在し続けることになる。消失の時定数は地球からの距離が大きくなると急速に短くなる。すなわち短い時間にロスしてしまう。このような事情で、内帯のピークは、地球半径の1.5倍程度の所にできる。

電子については、外側に外帯が存在する。図11に電子放射線帯の概要を示しているが、図のように地球を2重に取り囲む姿が明白である。さらに断面を示しているが、外帯のピークは地球半径の4~5倍程度の所に存在している。内帯と外帯の間の領域は、スロット(谷間)と呼ばれていて、放射線電子がほとんど存在しない領域になっている。

外帯の成因について、我々が提案した新しい考えは、これを磁気圏のダイナミクスの視点から理解するものであった。我々は、電子放射線帯を、前述の赤道環状電流と同一のものであるとしたことにある。赤道環状電流の電子は、エネルギーとしては数十keVと低い。放射線帯電子は、数百keVから数MeVと10倍から100倍エネルギーが高い。いきなり1MeVの電子を放射線外帯領域に発生させることは、至難のわざであるが、我々は波動との相互作用を考えた。図12に外帯電子の軌道を書いているが、磁力線の周りを回転(サイクロトロン運動)しつつ、磁力線に沿って南北両半球をバウンスしている。さらに磁場の勾配と曲率により東向きに地球の周りを回転するという、3種類の運動

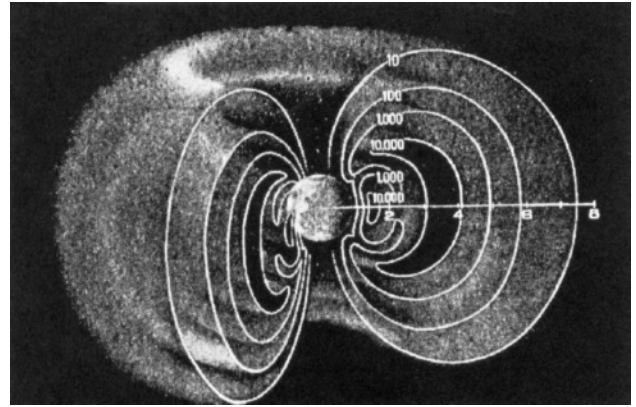


図11 電子放射線帯の模式図。地球に近いのが内帯で、その外側に外帯が存在する。内帯と外帯の間はスロットとよばれ、電子がほとんど無い領域がある。

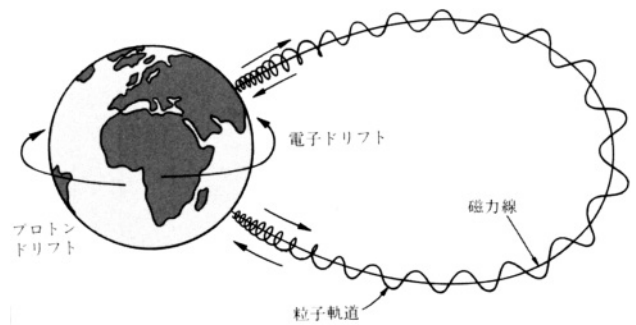


図12 放射線粒子の運動を示す模式図。

を行っている。我々は、この領域には、特に磁気嵐時には、強いプラズマ波動が発生することに着目し、波動による電子加速を提案し観測とコンピュータシミュレーションの両面から立証した。これは別名「内部加速説、2段加速説」と呼ばれている。この説に立つと、大きな磁気嵐では、より地球に近い領域に外帯が形成されることになるが、人工衛星による放射線帯電子の観測は、我々の説と符合した。

波動を用いての加速は、1~2日の時間を実際に要する。加速の条件が磁気嵐の比較的早い時期に整ったとしても、一定の時間遅れが発生し、実際にMeV電子が有為に増加してくるのは、磁気嵐が回復に移行した頃である。図13は、それぞれの距離でMeV電子数の時間変化を示したものである。下のパネルには、磁気嵐の指標である磁場の減少量(D_{st} と表記)さらにオーロラ活動の指標(K_p と表記)が示されている。 D_{st} の減少が磁気嵐の発生を示しているが、少なくとも4個の磁気嵐がこの期間、発生しているが、最も大きかった4月の磁気嵐では $L=3$ (地球半径の3倍)の領域まで、カウントが増加していた。小さな磁気嵐では、増加領域の距離(L)が遠くなっていた。注意してみると、増加の勾配が L が大きくなるほど緩やかになっている。我々は、 L が4付近に増加領域があり、生成されたMeV電子が周囲にゆっくりと拡散していくと考えている。

5.7 宇宙天気予報

磁気圏に嵐が発生すると、オーロラは激しく輝き、地球磁場は減少し、放射線帯は活性化することがわかってき

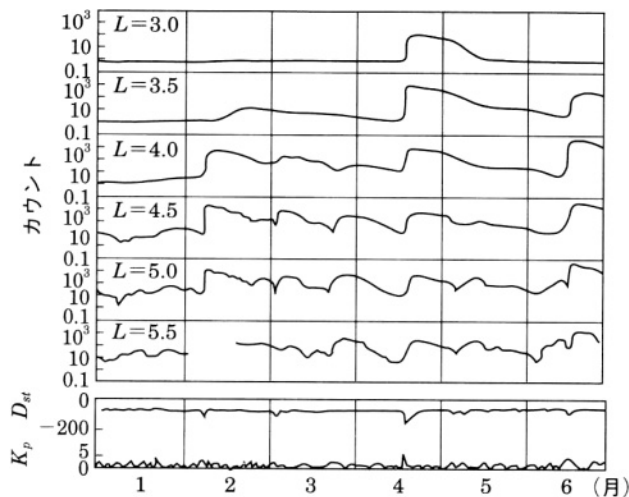


図13 放射線電子に対する磁気嵐の影響。4つの磁気嵐が、2月、3月、4月、6月に起こっている。

た。近年になって、特に放射線粒子の異常増加が、人工衛星に故障を発生させる事例が数多く報告されはじめています。これは一つには、耐放射線宇宙部品の開発が需要に追いつかず、放射線に十分に強いとはいえない部品が使われている事情による。宇宙空間で、性能の良い部品を多く使いたい事情は、宇宙で複雑な制御や計測を実現したいとする工学的・技術的要求による。しかし、高度な部品は一般的には放射線に弱い。一方、宇宙環境は常に劣悪な環境ではなく、宇宙の嵐が起るのは実時間にして数%以下である。ここに、嵐の起るタイミングを事前に察知して、危険な状況では複雑なオペレーションを避けるというアイデアが登場した。宇宙放射線環境の変動を予測するという「宇宙天気予報」のコンセプトである。

人工衛星の場合は、将来的には放射線に強い部品の開発に期待が寄せられるが、宇宙飛行士の場合は、そのような期待はできない。放射線環境が劣悪な時（場所）は、避難が原則である。これまで述べてきた、捕捉放射線についてのみならず、太陽放射線など外来放射線の変化にも注意する必要がある。外来放射線は、これまでは地球磁場によりかなりの部分が遮蔽できると考えられていたが、我々の研究などにより磁気嵐発生の瞬間時などには、地球に非常に近い領域まで危険が及ぶことが明らかになってきた。これは、磁気圏内に発生するパルス磁場の影響に依るが、詳細を述べることは紙面の都合で割愛する。

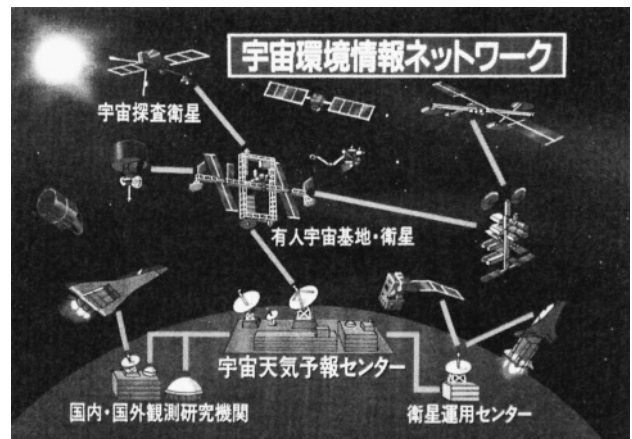


図14 NICT で進めている宇宙天気予報センターの概念図[6]。

現在、情報通信研究機構では、東京都小金井市の同機構本部内に、宇宙天気予報センターを開設し、図14に示すような、予報サービスを開始している[6]。昨年には、日本人宇宙飛行士が宇宙ステーションに滞在し、宇宙での活動を行った。この時、宇宙天気予報センターは、宇宙飛行士の安全のために、宇宙天気予報を非常に短い間隔で出した。日本やハワイ上空の静止軌道位置には気象衛星や通信衛星などの実用衛星が運用中である。地球を周回する低軌道人工衛星だいちも観測を開始している。そして来年度には、日本の月探査機も打ち上げられる。宇宙空間は決して安全な空間でないことは、これまでの調査で明白である。宇宙の安心と安全を守る努力は今後とも重要である。

参考文献

- [1] J.W. Dungey, J. Geophys. Res. **69**, 3913 (1964).
- [2] T.E. Cravens, *Physics of Solar System Plasma, Atmospheric and Space Science Series* (Cambridge University Press, 1997) p.477.
- [3] C.R. Clauer and R.L. McPherson, J. Geophys. Res. **79**, 2811 (1974).
- [4] 大林辰蔵：宇宙空間物理学（裳華房，1974）p.484.
- [5] 大家 寛：巨大惑星のオーロラ，現代の太陽系科学（下），大家 寛，大林辰蔵編（東京大学出版会，1984），p.140.
- [6] 恩藤忠典，丸橋克英，丸山 隆，富田二三彦，小原隆博：宇宙環境科学（オーム社，2000）p.302.



6. 電離圏プラズマ

丸山 隆

独立行政法人 情報通信研究機構

(原稿受付：2006年7月10日)

電離圏プラズマは中性大気の一部が太陽からの極端紫外線の放射を受けて生成される。最も電子密度の高い領域でも僅か0.1%の大気が電離しているに過ぎないが、電波の伝搬には大きな作用がある。短波の反射、衛星電波の伝搬遅延、信号強度の揺らぎなどである。一方、弱電離の電離圏プラズマは中性大気の変化に強く影響される。中性大気組成の変動による生成と消滅のバランス変化、中性大気風によるダイナモ電場と磁場の作用、重力と磁場によるプラズマ不安定などが電離圏プラズマの変動や擾乱の大きな要因となる。したがって、電波の効率的な利用のためには、これらの変動・擾乱過程をよく理解する必要がある。

Keywords:

ionospheric space weather, ionosphere, electron density, ionospheric critical frequency, ionospheric storm, total electron content, equatorial anomaly, plasma bubble, scintillation, GPS

6.1 はじめに

「宇宙天気予報」では、予め変動を報せる（そのためには知る）ことが研究開発の目標であり、また報せを必要とする側の要求を考慮しなければならない。電離圏に関してみると、歴史的には、短波帯の電波を反射する媒体としての存在が重要であり、短波通信の運用者は電離圏の変動を予め知って、用いる周波数を選んでいたのである。現在でも電離圏で反射する短波は特定の通信で重要な役割を持っているが、近年これに加えて、電離圏を通過するVHF帯以上の衛星電波の利用が広まり、電離圏の電波伝搬への影響が問題となっている。GPSに代表される航法測位衛星は1.5 GHz帯の電波を用いるので電離圏プラズマの影響を少なからず受ける。利用目的によってはその影響が致命的になることすらある。電離圏の振舞が標準的なモデルで記述できるならば、影響の評価も難しくはないであろうが、無秩序とも映る変動が重なり合っているのが実態である。その変動の原因あるいは背景と物理機構を知らなければ、先の予測は困難である。原因の多くは太陽・惑星間空間・磁気圏を伝搬してくる「原因と結果の連鎖」であって、そこが「宇宙天気」と呼ばれる所以である。この章では、電離圏の変動と擾乱を理解するのに、まず大気としての電離圏プラズマの特徴を概観する。続いて、変動・擾乱の代表格ともいえる電離圏嵐、プラズマバブル、それにスポラディックEを取り上げる。

6.2 電離圏プラズマの基礎

電離圏の最も濃いところはF領域と呼ばれ、地上から300 kmほどの高さになる。そこでは電子密度が 10^{11} から

10^{12} 個/ m^3 に達する。これに対して中性大気粒子の密度は 10^{15} 個/ m^3 である。したがって、電離圏プラズマとは呼んでも高々0.1%しか電離していないのであるから、中性大気の状態を考えずして、電離圏プラズマの変動を議論することはできない。最初に、ある高度に電子密度の極大が現れることを説明する。図1は地球超高層大気の組成と密度を示したものである。ここで、重要なのは酸素原子(O)、窒素分子(N_2)、および酸素分子(O_2)である。地上と大きく異なり、酸素原子が主成分になるのは太陽紫外線(UV)による解離の効果である。中性大気粒子は太陽極端紫外線(EUV)により電離されるが、酸素イオンと分子イオンとは再結合の過程が異なる。分子イオンは解離再結合により元の中性大気粒子に戻るが、酸素イオンは、分子(N_2, O_2)

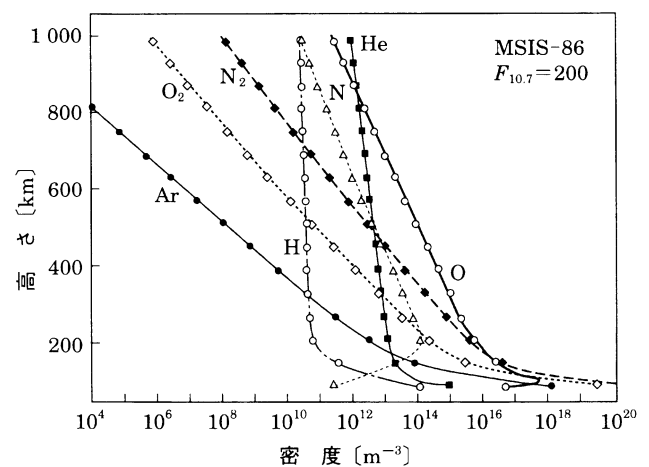


図1 経験モデル[1]による超高層大気の組成。

6. Ionospheric Plasma

MARUYAMA Takashi

author's e-mail: tmaru@nict.go.jp

表1 電離圏中で重要なイオン化学反応.

$O+h\nu$	\rightarrow	$O^+ + e$	フォトンによる電離生成
$N_2+h\nu$	\rightarrow	$N_2^+ + e$	〃
$O_2+h\nu$	\rightarrow	$O_2^+ + e$	〃
$O^+ + N_2$	$\xrightarrow{k_1}$	$NO^+ + N$	組替え衝突
$O^+ + O_2$	$\xrightarrow{k_2}$	$O_2^+ + O$	〃
$N_2^+ + O$	$\xrightarrow{k_3}$	$NO^+ + N$	〃
$NO^+ + e$	$\xrightarrow{\alpha_1}$	$N + O$	解離再結合による電離消滅
$O_2^+ + e$	$\xrightarrow{\alpha_2}$	$O + O$	〃
$N_2^+ + e$	$\xrightarrow{\alpha_3}$	$N + N$	〃

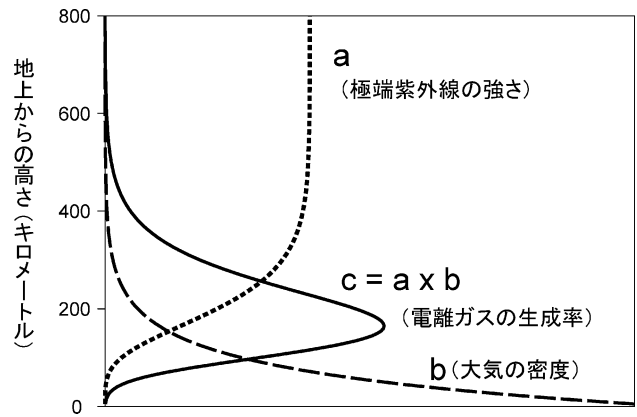


図2 電離生成率の高さ変化.

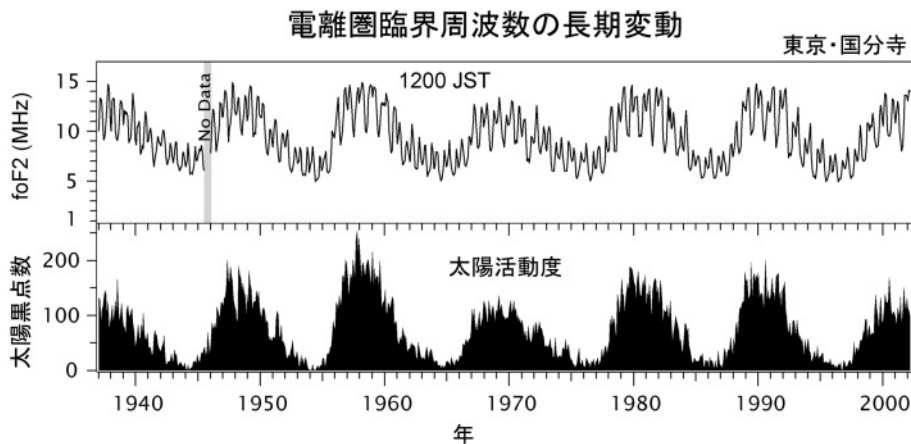


図3 東京における電離圏臨界周波数の長期変動と太陽黒点数.

との組替え衝突を経て中性大気に戻る. 表1に, 重要な反応について挙げる.

分子イオンの再結合反応は組替え衝突の反応に比べて十分早いため, O^+ を主体とする電離圏プラズマの消滅係数(β)は, N_2 と O_2 の密度によって決まる.

$$\beta = k_1 [N_2] + k_2 [O_2]$$

図1をみると, 低高度ほど分子の組成比が高く, プラズマの消滅が早いことがわかる.

電離生成についてみると, 大気の薄い上空ではEUV放射は減衰を受けることなく地球超高層大気に浸入する. 高度の低下とともに大気密度が上昇し, EUVはOを電離することによって吸収され減衰する. しかし, まだOの密度が低いうちは電離生成はそれほど大きくない. さらに高度が低下するとO密度が増加し, 電離生成も増加するが, 同時にEUVの減衰も加速される. ついにはEUVがすべて吸収され, 電離生成も無くなる. その様子を図2に示す. およそ180 kmの高度で電離生成が最大になることがわかる. 高度200 km程度より下層領域では生成, 消滅ともに反応時間が短く, 両方の反応がつりあった光化学平衡状態になる. 光化学平衡の電子密度が上層ほど高くなることは, 消滅に寄与する分子の比率が急速に小さくなる(図1)ことから理解できる. しかし, 高度300 km 辺りから上では, 生成, 消滅ともに反応が遅くなり, 代わって, 拡散や電場ド

リフトなどの力学的効果が支配的になる. そこでは, 電子密度分布は重力と拡散のつりあった静水圧平衡に近づく.

6.3 電離圏の変動

6.3.1 規則的な変動

生成と消滅を考えると電離圏状態のさまざまな変動(ここでは, 規則的に変わるものを変動と呼び, 突発的に変わることを擾乱と呼ぶことにする)が理解できる. 太陽活動はよく知られた11年の周期で増減を繰り返す. 図3は太陽EUV放射変動の目安になる太陽黒点数の変化と電離圏最大電子密度に対応する臨界周波数(電子プラズマ周波数), foF2を示したものである. 両者の間にはきわめて良い対応が見られる. しかし, 細かく見るとfoF2の変動には1年あるいは半年の周期的な変動が重なっている. 1年間の変動を拡大してみると, 図4(下段)のように春と秋に極大が現れ, 夏に極小となっている. 夏には太陽高度が高く, 大気に入射するEUV束が増加することを考えると, 極小値をとることは意外であるが, 電離生成の増加以上に, 消滅係数が増大するためである. 電離圏高度の大気組成は夏にはOが減少し, N_2 が増加する変動特性を持っているのである[1].

6.3.2 電離圏嵐

図4(上段)には, A_p 指数と呼ばれる値がプロットしてある. A_p 指数は地磁気活動を表す目安のひとつであり, こ

電離圏臨界周波数の季節変動と電離圏嵐

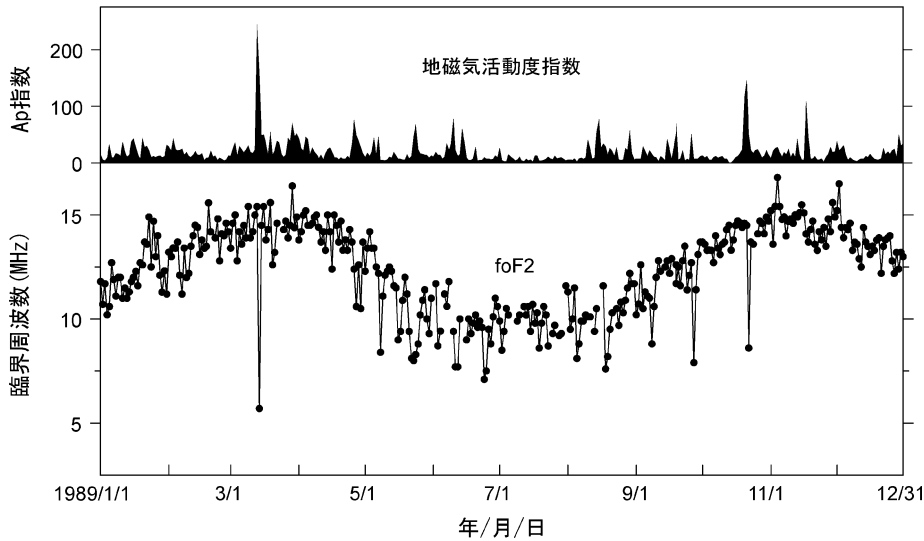


図4 東京における電離圏臨界周波数の季節変動。

の値が高いときには、オーロラ帯でエネルギーが大気に注入されると考えてよい。上下のプロットを比較すると、1年の間に数回 A_p のスパイクと、これに対応した foF2 の低下が見られる。この foF2 の突発的な低下 (擾乱) は電離圏嵐と呼ばれてきたもので、かつて短波が遠方との主要な通信手段であった時代には、通信の途絶を引き起こす厄介な現象であった。地磁気活動と電離圏嵐の関係は、やはり、生成と消滅のバランスの変化で説明できる。オーロラ帯でのエネルギー流入によって大気温度上昇[2]とそれに伴う大循環 (地球規模での中性大気流) の変動[3]から、組成変動が起こる。すなわち、分子の比率の高くなった大気が低緯度へ流れ込み、プラズマの消滅を加速するのである [4]。太陽面現象によって引き起こされた太陽風の擾乱が磁気圏との相互作用を経て高緯度地帯にエネルギーを注ぎ込む擾乱連鎖の最終的な形が電離圏嵐である。連鎖の上流側の擾乱を知ることで、電離圏の擾乱を予測する (宇宙天気予報) ことが可能となる。

6.3.3 衛星電波の遅延

地上から地球大気の限界 (実際には GPS 衛星の軌道程度の高度、約 2 万 km までで十分) まで電子密度を積分すると全電子数 (TEC: total electron content) と呼ばれる量が定義できる。単位断面を持つ柱の内にある電子の総数で、 5×10^{16} から 200×10^{16} 個/m² の範囲で変動する。電離圏を通過する衛星電波は TEC (N_T) の大きさに決まる群遅延 (Δt) を生じ、周波数 (f) の電波では次のようになる。

$$\Delta t = 1.3446 \times 10^{-7} \frac{N_T}{f^2} \text{ (sec).}$$

GPS 衛星の L₁波 (1575.42 MHz) の場合、0.3~100 ns になり、距離に換算すれば、1~30 m の誤差になる (図 5)。このような電離圏による GPS 衛星電波遅延は精密な位置決定等の応用面で大きな誤差を生む。そこで、遅延を補正するためのさまざまな技術開発 (差分 GPS 技術など) がなされているが、解決すべき課題も多い。TEC は積分値である

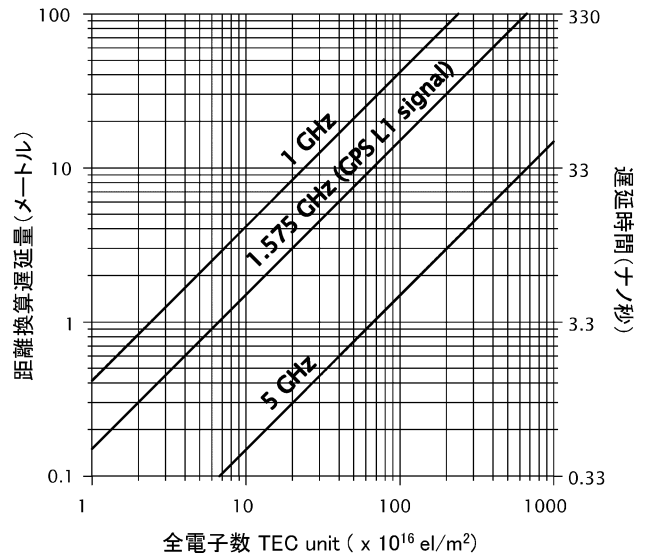


図5 電離圏を透過する電波の遅延。

が、F 層最大電子密度高度付近からの寄与が大部分を占めるので、永年蓄積されてきた foF2 についての「宇宙天気予報」の知見は、TEC の場合にも当てはまる。

6.3.4 GPS 衛星を用いた電離圏研究

電離圏伝搬遅延は実利用上では誤差要因であるが、電離圏の研究側からすれば、これを積極的に利用して観測手段にできる。GPS 衛星は先の L₁波のほかに L₂波 (1227.60 MHz) を送出している。ひとつの周波数で遅延量の絶対値を求めることは容易でないが、異なった2つの周波数の電波を用いれば、相対的な遅延量がわかる。そこから遅延量の周波数依存性を用いて TEC を求めることができる [5]。電離圏研究への GPS 衛星電波の利用にはいくつかの大きな利点がある。電離圏の観測は「電離層垂直打ち上げ」(別名イオノゾンデ) 観測が基本であるが、イオノゾンデは大型のレーダー施設であり、観測施設の配置にもさまざまな制約がある。日本の場合、情報通信研究機構の運用する 4 ケ

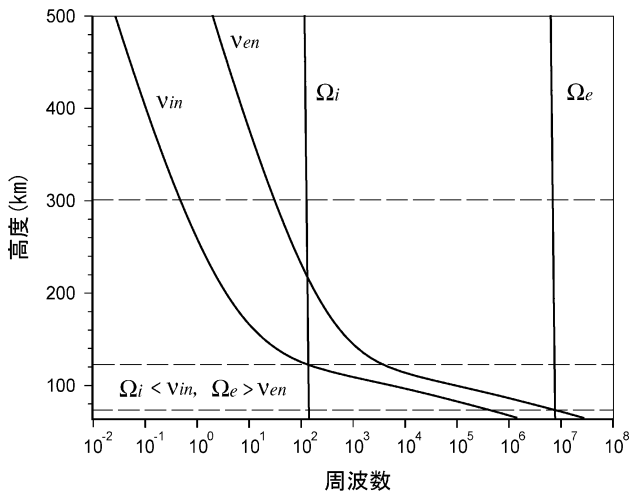


図6 電子およびイオンのジャイロ周波数と中性大気粒子との衝突周波数。

所の観測施設など数えるほどしかない。これに比べてGPS衛星受信機は数多く設置されている。国土地理院のGEONET (GPS earth observation network) は約1,300の受信機からなっている。このデータを利用し、それまでの点の観測が面の観測へと拡充され、電離圏変動や擾乱の詳細な空間構造が明らかにされつつある[6,7]。

6.4 電離圏ダイナモ

電離圏プラズマが中性大気に強く影響される他の例としてダイナモ作用がある。図6は荷電粒子と中性大気粒子の衝突周波数と地球磁場の下でのジャイロ周波数をあらわしたものである。衝突周波数(ν)が高度とともに非常に広い幅で変化するのに対して、ジャイロ周波数(Ω)は高度による変化が殆どない。そのためこれら特性周波数の大小関係が高さによって入れ替わり、電離圏プラズマ特有の現象が起こる。中性大気風による発電効果がひとつの例である。中性大気は昼間に暖められ、夜には放射によって冷えることから大気大循環(風)が生じる。高度75~120 kmの範囲では、衝突周波数がジャイロ周波数より高いイオンは中性大気に引きずられ、衝突周波数がジャイロ周波数より低い電子は磁場に捉われる。イオンと電子の運動のずれは電流となる。定常状態では、地球全体の電流の連続性が保たなければならないから、これを充たすような電場が発生する[8]。一種の発電機構であり、電離圏ダイナモと呼ばれている。

ダイナモ電場は磁力線に沿って上方に投影される(電子はジャイロ周波数が他の特性周波数より高く、磁力線方向にのみ自由に移動でき、磁力線は等電位とみなせる)。電離圏F領域では電子、イオンともにジャイロ周波数が衝突周波数より高くなる(図6)ので、下層から投影された電場の効果で、プラズマは電場(E)と磁場(B)に直角な方向(E×B)にドリフトする。電場ドリフトの効果で特に重要なのは、磁気赤道付近のプラズマの再分布である(地球磁場は双極子が歪んだ構造を持ち、赤道付近で磁力線が水平になる場所がある。そこを磁気赤道と呼んでいる)。昼間の

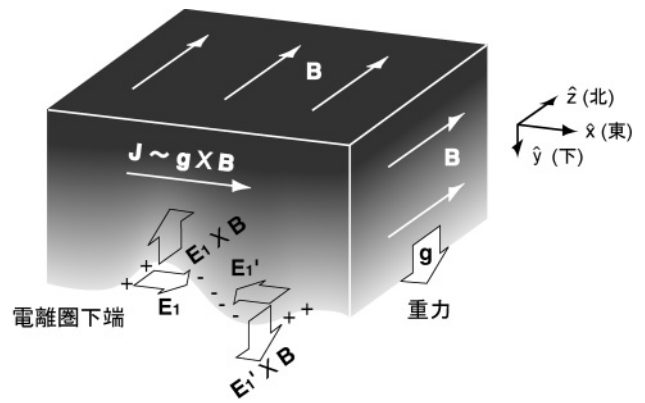


図7 赤道電離圏の不安定性。

磁気赤道付近では電離圏ダイナモによる電場の向きが東向きになる。磁場は水平で北向きであるから、E×Bドリフトは鉛直上向きになる。上昇したプラズマは、イオンと中性粒子との衝突周波数がさらに低下し、抗力が小さくなるから、磁力線に沿って落ちてくる。磁力線はアーチ状であるから、磁気赤道から離れた低緯度(磁気緯度10~15度)にプラズマが集中し、南北に2つの極大領域ができる(赤道異常)[9]。この過程は赤道で真上に吹き上げられたプラズマが離れたところへ落ちることから、fountain effectとも呼ばれる。低緯度の電離圏最大電子密度は、このようにダイナモ電場に大きく支配される。しかし、ダイナモ電場の強さは、太陽活動度や季節によって変わり、さらに原因の特定しにくい日々変動を示す。電場変動を精度良く把握・予測することがTECやfoF2の予報に繋がる。

6.5 プラズマ不安定

電離圏の空間構造は時に、きわめてダイナミックに、かつ大振幅で乱れることがある。磁気赤道では重力(g)と磁場(B)の向きが互いに直角で、イオンはこの2つのベクトルと直角東向き(g×B)にドリフトする。質量の小さい電子は殆ど磁力線に捉われているから、東向き電流が生じる。この電流によって、以下に述べるようなプラズマ不安定(Rayleigh-Taylor不安定)が起こる。電離圏あるいは中性大気の中には常に小さな揺らぎ(地球物理的なノイズ)があると考えられる。いま、図7に示したように赤道の電離圏下端が上下に波打っていたとする。電子密度の小さい部分では周囲に比べて導電率(Pederson conductivity)が小さいので電流の連続性から分極電場(E1)が生じる。この電場によるプラズマのE×Bドリフトは鉛直上向きであるから、密度の低い部分は周囲との密度差をさらに大きくする。すなわち、プラズマ不安定となる。

赤道電離圏の下端(電子密度勾配が上向き)に生じたRayleigh-Taylor不安定は非線形的に発達し、低密度領域は電離圏の最大電子密度高度(300 km)を突き抜けて1,000 km以上の高度まで上昇する[10]。周囲との電子密度の差は2桁以上にも達し[11,12]、泡が浮かび上がる様子を擬えて、プラズマバブルと呼ばれる。電離圏F領域のプラズマは磁力線方向に容易に再分布し、かつ磁力線は等電位と

みなせるから、この不安定性は interchange instability [13] で、バブルは磁力線方向に数千 km の長さ、東西方向には、数十 km から 100 km の規模に発達する。プラズマバブルの発達過程では、二次的なプラズマ不安定が起こり、プラズマバブルの境界あるいは内側にさらに小さなスケールの粗密構造が作られる [14]。粗密構造は衛星電波の伝搬に大きな影響を与える。数百 m 規模の粗密構造は、そこを通過する GPS 衛星電波 (~ 1.5 GHz) の位相を乱し、地上に到達したときに電離圏シンチレーション [15] と呼ばれる振幅揺らぎを引き起こす (Fresnel 回折)。シンチレーションの振幅が ~ 20 dB になると受信機は衛星電波の補足に失敗するので、実用化間近な GPS を利用した航空機の運行管制では、この問題が大きく懸念されている。シンチレーションの発生を予測するには、プラズマ不安定の条件を詳しく調べるとともに、種となる微小揺らぎを捕らえることも大事である [16]。ある種の微小揺らぎの起源は下層大気や気象現象にあると考えられている。

6.6 スポラディック E 層

電離圏の下部、90~150 km の高度は E 領域と呼ばれ、ここでは光化学平衡にある分子イオン (NO^+ , O_2^+) が主成分である。他に、僅かではあるが、流星が燃え尽きて残した金属イオン (Fe^+ , Mg^+ など) が存在する。電離圏ダイナモの節で述べたように、E 領域ではイオンが中性大気風に引きずられるが、両者の運動は全く同じではなく、イオンは磁場と風の向きに直角な運動成分を持つ。ある高度より下では東向きの風、これより上では西向きの風であったとする (風向きのこのような変化をウィンドシアアと呼ぶ)。この風によってイオンは、シアアの下側では上向き、上側では下向きの運動成分を持ち、プラズマはシアアの高度に集中する。このとき、分子イオンは電子密度の二乗に比例して再結合し、急速に消滅するが、消滅の時定数が極めて大きい金属イオンは維持され、薄い層を形成する。これがスポラディック E (E_s) 層である。層の最大電子密度に対応する臨界周波数、foEs は散発的 (sporadic) に高くなり、ときに 20 から 30 MHz に及ぶこともある。スポラディック E 層の発達は、文字どおり「風まかせ」で予測が極めて難しいが、統計的にみると夏の正午前と日没後に活発になる傾向がある。

宇宙天気予報からみたスポラディック E 層の重要性は VHF 電波の異常伝搬にある。電離圏に入射角 i で進入した

電波は臨界周波数の $\sec(i)$ 倍まで反射される。スポラディック E 層は高度 100 km 付近で最も発達するため、遠方からの電波は大きな入射角で斜めに進入することになる。そのため、通常は見通し内の伝搬しか想定していないテレビ放送や航空無線の VHF 電波が数千 km 以上も伝搬し、混信障害を引き起こす。

6.7 おわりに

この章では電離圏の形成機構から始めて、代表的な変動と擾乱現象を取り上げた。周囲の中性大気との関係が深く、磁気圏、太陽風とも結合している。一方、近年では下層大気と電離圏との結合過程も注目されている。宇宙天気予報の研究は宇宙環境の変動・擾乱が引き起こす社会システムへの障害を軽減・回避することが目的であるが、そのためには幅広く基礎研究を推し進めなければならないことを理解していただけたと思う。

参考文献

- [1] A.E. Hedin, J. Geophys. Res. **88**, 10170 (1983).
- [2] H. Liu and H. Lühr, J. Geophys. Res. **110**, A09S29, doi:10.1029/2004JA010908 (2005).
- [3] T.J. Fuller-Rowell, M.V. Codrescu, R.J. Moffett and S. Quegan, J. Geophys. Res. **99**, 3893 (1994).
- [4] G.W. Prölss, Rev. Geophys. Space Phys. **18**, 183 (1980).
- [5] G. Ma and T. Maruyama, Ann. Geophys. **21**, 2083 (2003).
- [6] A. Saito, M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Tsugawa, Y. Otsuka, S. Miyazaki and M.C. Kelley, Earth Planets Space **54**, 31 (2002).
- [7] T. Maruyama, G. Ma and M. Nakamura, J. Geophys. Res. **109**, A10302, doi:10.1029/2004JA010451 (2004).
- [8] H. Rishbeth, J. Atmos. Sol-Terr. Phys. **59**, 1873 (1997).
- [9] H. Rishbeth, Ann. Geophys. **18**, 730 (2000).
- [10] R.F. Woodman and C. La Hoz, J. Geophys. Res. **81**, 5447 (1976).
- [11] J.P. McClure, W.B. Hanson and J.H. Hoffman, J. Geophys. Res. **82**, 2650 (1977).
- [12] S.-Y. Su, H.C. Yeh, C.K. Chao and R.A. Heelis, J. Geophys. Res. **107**, 1404, doi:10.1029/2001JA007552 (2002).
- [13] A.E. Kherani, M. Mascarenhas, E.R. de Paula, J.H.A. Sobral and F. Bertoni, Space Sci. Rev. **121**, 253 (2005).
- [14] M.C. Kelley, R.C. Livingston, C.L. Rino and R.T. Tsunoda, J. Geophys. Res. **87**, 5217 (1982).
- [15] K.C. Yeh and C.-H. Liu, Proc. IEEE **70**, 324 (1982).
- [16] M.A. Abdu, J. Atmos. Sol-Terr. Phys. **63**, 869 (2001).

小特集執筆者紹介



わたり しんいち
亘 慎一

博士(理学)。1984年4月郵政省電波研究所(現独立行政法人情報通信研究機構)に入所。1994-95年米国海洋大気庁宇宙環境センター(NOAA/SEC)客員研究員。現在、独立行政法人情報通信研究機構宇宙環境計測グループ研究マネージャー。主な研究分野は、宇宙天気、太陽地球系物理学、特に、地磁気嵐の原因となるような惑星間空間擾乱とそれに対応した太陽面現象。



なが おか けんいち
永岡 賢一

2002年名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。その後、核融合科学研究所大型ヘリカル研究部・助手。中性粒子ビーム入射加熱・電流駆動、高速イオン閉じ込め、周辺プラズマの揺動計測などに関する実験を行っている。家族は、妻と娘。この小特集の執筆期間中に娘が生まれ、生活が大きく変化した。体重も良い相関を示し、テニスやソフトボール大会では、悔しい思いばかりしている。



あさ い あゆみ
浅井 歩

国立天文台野辺山太陽電波観測所上級研究員。理学博士。2004年京都大学大学院理学研究科博士課程修了(物理学・宇宙物理学専攻)。同年より現職。主な研究分野は、太陽物理、特に爆発やジェットなど派手な現象が好み。剣道二段だが、今はスポーツ全般を観戦するのみ。アイスクリームが大好き。足の数が6以上の節足動物がとにかく嫌い(でも甲殻類は大丈夫)。



こじま まさよし
小島 正宜

名古屋大学太陽地球環境研究所教授。1970年名古屋大学大学院理学研究科修士課程修了後、名古屋大学空電研究所助手、助教授を経て、1991年より同大学太陽地球環境研究所教授。1982年から約2年間カリフォルニア大学サンディエゴ校にて研究。VHF帯フェーズドアレーアンテナやUHF帯シリンドリカルパラボラアンテナの建設を行い、それらを用いて天体電波のシンチレーション現象を利用した太陽風プラズマの観測的研究を行っている。



おほら たかひろ
小原 隆博

独立行政法人情報通信研究機構 宇宙環境計測グループ長。1957年岩手県生まれ。1985年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了、理学博士。文部省宇宙科学研究助手、郵政省通信総合研究所室長を経て、2006年4月から現職。現在の専門は、宇宙プラズマ・放射線環境の衛星観測と変動予測モデルの開発。国際宇宙空間委員会、国際宇宙天気会議、日本地球惑星科学連合の役員、日本学術会議 SCOSTEP 小委員会委員。著書は、アシモフの宇宙探検シリーズ(全26巻訳)、宇宙環境科学(共著)など。家族は妻と2男1女。趣味は東京の散策、水彩画。



まる やま たかし
丸山 隆

1975年より郵政省電波研究所(当時)にて電離圏の研究に従事、現在に至る。特に電離圏プラズマ不安定に興味がある。近年、赤道電離圏の研究のため東南アジア地域に電離層観測網を整備。その過程で民俗学にも開眼(?)。