

## 次期太陽活動極大期に向けての展望

## —磁気圏予報—

佐川 永一<sup>\*1</sup> 丸山 隆<sup>\*2</sup> 秋岡 眞樹<sup>\*3</sup>

(1997年1月17日受理)

TOWARD THE NEXT SOLAR MAXIMUM  
—MAGNETOSPHERE ACTIVITY FORECAST—

By

Eiichi SAGAWA, Takashi MARUYAMA,  
and Maki AKIOKA

Variations in the solar wind cause disturbances in the earth's magnetosphere. The magnetosphere disturbances have a significant impact on human activities in space and on the ground. The space environment, particularly near the geosynchronous orbit where a number of satellites serve to support modern society, is one of the major concerns for satellite operators. On the ground, magnetospheric storms and substorms cause a wide variety of problems in short-wave communication, navigation, and technological systems such as the power grid. The CRL's "Space Weather Forecast Program" aims to improve the forecast of magnetosphere disturbances before the next solar maximum period (around 2000). In magnetosphere forecasting, it is important to understand the connection between the sun's surface and the magnetosphere. We are far from a complete understanding of this connection. The recent flood of observation data on the sun, interplanetary space, and the magnetosphere will enable us to find the empirical relationships between the causes and effects more easily than before. A comprehensive morphology is a good starting point for physical understanding, and also useful for forecasting. The ACE satellite, which will deliver real-time solar wind data continuously, will improve our ability to identify the current status of the magnetosphere activity and our understanding of the solar wind and magnetosphere coupling, through the use of a forecast model of the magnetosphere.

[キーワード] 宇宙天気予報, 太陽風, 磁気圏じょう乱, 衛星異常, 誘導電流.

Space weather forecast, Solar wind, Magnetosphere disturbances, Satellite anomaly, Ground induced currents.

## 1. はじめに

平磯における現在の磁気圏活動の予報は柿岡で観測される地磁気  $K$  指数の一日の最高値を予測するものであ

る。そのために太陽面現象（フレア、コロナホール、フィラメント噴出等）と地磁気活動の履歴と現況を参考にしている。最近ではインターマグネットや WWW で提供される各地の地磁気観測データ、Wind や SOHO の太陽風データを参考にすることが可能となったために、定性的な現況の把握は従来に比べて格段に進んでいる<sup>(1)</sup>。今後、磁気圏じょう乱予報の精度（的中率）向上をはかると同時に現在の  $K$  指数の予測に加えて多様な情報を

\*1 平磯宇宙環境センター

\*2 宇宙科学部 宇宙空間研究室

\*3 平磯宇宙環境センター 太陽研究室

含めていくことが求められている。

スプートニクの打ち上げ以来米国と旧ソ連を中心として宇宙開発が進み、地球磁気圏、特に静止軌道は通信衛星や気象衛星などの実用衛星の活躍する場となった。そのために、静止軌道付近での宇宙環境じょう乱が実際的な問題となってきている。例えば、放射線帯の高エネルギー粒子は宇宙機に様々な障害をもたらす。また、サブストームに伴う磁気圏尾部からの高エネルギープラズマの侵入は衛星の異常帯電を引き起こし、時には障害の発生することもある。具体的な例として1994年1月20日に三つの通信衛星 Intelsat K, Anik E-1 と E-2 で高エネルギー電子によると思われる障害が発生し、この中で Anik E-2 はその後数ヶ月間使用できない状態が続いた<sup>(2)</sup>。また、1997年1月には Telstar 401 が永久機能停止に陥るといふ事故が発生している。これらは最悪のケースであるが、静止軌道付近での宇宙環境の予測に対するニーズは高い。

一方、磁気圏変動に伴う極域を中心とした上層大気へのエネルギーの流入は電離層に強い電流を流し、誘導電流がその直下の地上の設備に被害を与えると同時に、世界的な規模の電離層じょう乱を引き起こして、電離層反射を利用する短波通信や電離層を通過する電波（衛星通信、GPS）の利用者に対して影響を与える。これに対しては磁気嵐とサブストームに伴う地上磁場変動と電離層への影響を予測することが要求される。

本報告では、第2節で太陽面現象と磁気圏じょう乱の関連について述べ、平磯での磁気圏じょう乱予報の現状と課題をまとめる。第3節では磁気圏じょう乱の影響について宇宙環境の変動と地上/電離層/上層大気への影響に分け、次期太陽活動極大期へ向けて予報の中へ取り入れていくべき課題をのべる。

## 2. 太陽面現象と磁気圏じょう乱予報

太陽風じょう乱は磁気圏の変動をもたらす。大部分の太陽風じょう乱は太陽面現象によってドライブされているため、太陽さえ見ていれば宇宙天気予報が実現するかという問題はそれほど簡単ではない。太陽面で発生したじょう乱が惑星間空間を伝搬して地球近傍に到達し、磁気圏と反応して磁気嵐などの現象を引き起こすプロセスはきわめて複雑であり、未解決の問題が多い。特に、突発的な太陽面じょう乱の惑星間空間における伝搬過程については、現状では観測手段がきわめて限られているためブラックボックスとして扱わざるを得ないケースが多く、基礎研究でさえまだまだこれからの分野である。そのため、太陽面でのじょう乱現象が発生した場合に、地球磁気圏にじょう乱が発生するかどうかは経験的にか

なりの程度予測できるようになりつつあるにもかかわらず、どのような性質の現象がどの程度の規模で発生するかを的確に予測することは困難であると言わざるを得ない。本節では、このような状況の下で次期太陽活動極大期における予報を目指していく上での現状と当面の課題について議論する。

磁気圏じょう乱の原因となる太陽面現象は、高速太陽風の起源と言われているコロナホールと太陽フレア、CME（コロナルマスイジェクション）やフィラメント噴出（以下フレア等と呼ぶ）に分けられる。コロナホールは太陽面をX線で見えた場合高温のコロナガスによる放射がほとんど見られない領域で、1972年のスカイラブにより存在が明らかになった。ある程度の規模のコロナホールによる太陽風と磁気圏じょう乱の発生は経験的に推定できる。コロナホールの位置は、X線望遠鏡や10830 Å のヘリウムの吸収線の単色像から知ることができ、平磯では1992年頃より「ようこう」衛星の軟X線画像やキットピーク国立天文台（米国）のヘリウム単色像を取得して、太陽画像データベースとして利用しているが、これらのデータを用いることによりコロナホールの存在と位置を特定しており、じょう乱発生時期の予測が可能になりつつある。

フレア性の太陽風じょう乱に基づく磁気圏じょう乱の予測は、これも太陽面を精密に監視することにより、その発生の予測が徐々に可能になりつつある。LDE（Long Duration Event）タイプのフレアに伴うケースが多いことが知られているが、LDEフレアの発生は高精細H $\alpha$ 望遠鏡やGOES等のX線強度の時間変化から知ることができ、フレア性の磁気圏じょう乱は太陽からのプラズモイドが放出されることによる衝撃波が原因であると考えられる。これは太陽電波ダイナミックスペクトル計の観測データから推定することができる。また、これらの現象の後に、X線画像においてアーケード構造が形成される場合が多く、軟X線望遠鏡のデータが参考になる。このようにして、磁気圏じょう乱の発生を予測することが徐々に可能になりつつある。

しかしながら、磁気圏じょう乱の規模と時間変化に関する予測は今だ困難である。そのためには、地球に到達する前に太陽風じょう乱の発展の様子を知ることが重要である。Wind, SOHO 衛星の観測により、L1点での太陽風観測データが得られるようになりつつある。また、98年1月から運用を開始するACE衛星は、リアルタイムでの太陽風情報を地上に伝送してくる予定である<sup>(3)</sup>。これにより、地球に到達する約1時間前の太陽風の状況を知ることが可能となる。もっとも、仮に太陽風データ

に基づいた予報が可能としても、1時間前では現在の予報体制ではその活用は容易ではない。よって、太陽監視による影響の出始める時期の予測にもとづいて数日間の予報を出し、じょう乱発生の可能性の高いときにはL1点の太陽風データをリアルタイムに監視すると言った運用の工夫は必要であろう。このようなアプローチで磁気圏じょう乱を的確に予測するためには地球近傍の太陽風パラメータとじょう乱の発展過程の関係が確立されていることが必要である。これまでの太陽風データを用いた解析を急ピッチで進めることにより経験則を確立することが予報の観点からは重要である。また、あとで述べるMSFMのようなモデリング技術の開発もその助けとなるだろう。

このようにして出される予報をより実用的にするためには、アラートレベルをどのように設定するかが重要である。アラートレベルとは実利用の面から宇宙環境が何らかの危険をもたらす状態になるかどうかの判断基準であり、現在の平磯のアラートは磁気圏じょう乱に関しては柿岡のK指数の予測に基づいている。第1節で述べたように1994年1月のAnik衛星、あるいは1997年1月のTelstar 401の事故が発生しているが、ともに静止軌道での高エネルギー電子フラックスがきわめて高い値になったことが原因と考えられている。高エネルギー電子については磁気圏じょう乱との関連が深いのでK指数の予測は一定の指標となるが不十分である。今後、これまでの衛星障害の事例に基づいて、太陽面現象から宇宙機の障害発生までのプロセスを総合的に検討し、それに基づいたより実用的なアラート体系の確立が必要である。

### 3. 地球磁気圏じょう乱の影響

本節では太陽風の変動に起因する地球磁気圏じょう乱の影響とその予測について磁気圏内の宇宙環境と地上/電離圏/上層大気に分けて次期太陽活動極大期に向けた展望と課題をのべる。

磁気圏じょう乱の規模を決定する太陽風から磁気圏へ供給されるエネルギー量は太陽風のパラメータによって大きく変動し、惑星間空間磁場(IMF)の南北成分に強く依存している。これは、太陽風中の磁場と地球磁場の方向が反並行に近づくことによって磁気圏前面での磁力線再結合(reconnection)を通じたエネルギーの伝達が効率よく進むためである。従って、強い南向きの磁場と高速の太陽風は、大きなエネルギーを磁気圏に供給し、磁気圏内部でのエネルギー消散過程として磁気嵐やサブストームを発生させる<sup>(4)</sup>。サブストームは高緯度地域への加速された粒子による爆発的なエネルギーの流入

とそれによるオーロラの増光をとめない、極域の電離層に強いオーロラジェット電流を流し、継続時間は1時間程度である。これに対して、磁気嵐は中低緯度の磁場の減少をもたらす赤道環電流の増加によって特徴づけられ、継続時間も一日から数日にわたる。第1表に太陽風からのエネルギー入力、磁気嵐、及びサブストームで消費されるエネルギーのオーダーを示す<sup>(2)</sup>。地球磁気圏に到達する太陽風のエネルギーの約1%が磁気圏内部で消費される。この消費されるエネルギーが磁気圏じょう乱として次に述べるような様々な影響を与える。

#### 3.1 磁気圏内の宇宙環境

磁気圏予測の中でも特に静止衛星軌道付近を中心とした磁気圏の宇宙環境を予測することは、人工衛星の運用上重要である。サブストームに伴って流入する100 keV以下のプラズマによって衛星の表面帯電が発生し、障害につながることもある。衛星の表面電位分布計算の精密化や、表面の導電加工技術の発達によってその影響は小さくなりつつあるが、完全には解決していない。したがって、低エネルギープラズマの静止軌道付近の分布は衛星運用上の参考資料として現在でも重要である。また、最近注目を集めているのは相対論的なエネルギーの電子(> MeV)である。第1節で紹介したAnik衛星などの障害は高エネルギー電子の増加が原因と考えられている。

##### 3.1.1 100 keV以下のプラズマ予測

静止軌道付近の100 keV以下のプラズマ分布を予測する実用的なモデルをめざした開発が進んでいる。代表的なものとして、米空軍がライス大学のグループに委嘱して開発し、現在使用されているMSM(Magnetosphere Specification Model)、およびその改良型で

第1表 太陽風エネルギーの磁気圏内での消費過程とその量<sup>(2)</sup>

入力	
太陽風エネルギー	$10^{13} - 10^{14}$ W
磁気圏への入力	$10^{11} - 10^{12}$
エネルギー蓄積	
磁気圏尾部	$10^{15} - 10^{16}$ J
赤道環電流	$10^{15} - 10^{16}$
エネルギー再配分とロス	
赤道環電流への尾部からの流入	$10^{11} - 10^{12}$ W
電離層ジュール加熱	$10^{10} - 10^{11}$
電離層降下粒子	$10^{10} - 10^{11}$
オーロラ発光	$10^9 - 10^{10}$
オーロラキロメートル波放射	$10^7 - 10^9$
プラズモイド	$10^{11} - 10^{12}$
総エネルギー	
サブストーム	$\sim 5 \times 10^{11}$ W
磁気嵐	$> 10^{12}$ W

ある MSFM (Magnetosphere Specification and Forecast Model) がある。MSM と MSFM は実用的なプラズマ環境の予測モデルであり、それまでに研究目的で開発されたライス大学モデルを基礎として、ほぼリアルタイムの観測データを入力し、動作することも可能な設計になっていることが実用的な特徴である<sup>(5)</sup>。MSM/MSFM では入力パラメータとして太陽風、Kp, Dst, ポーラーキャップの電位差等、多数の現況データを必要とし、出力として 100 eV-100 keV のプラズマ密度の時間発展を計算する。また、MSFM では太陽風動圧の変化による磁気圏境界面 (マグネトポーズ) の位置を計算しており、大規模な太陽風じょう乱によってマグネトポーズが静止軌道の内側に入り、静止衛星が磁気圏の外に出る現象 (マグネトポーズクロッシング) を予測することが可能である。

我々も ACE 衛星による太陽風データから磁気圏電場/磁場モデルを構築し、その中で粒子の運動を追跡するモデルの実用化をめざしている<sup>(3)</sup>。現在粒子追跡のコードを開発しており、次のステップはリアルタイムの電場/磁場モデルをどのように構築するかが研究課題である。最初は従来のモデルを実時間で動かせるような工夫 (一部に予測フィルターを取り入れる等) を行ない、実時間での静止軌道付近のプラズマ環境を出力することが考えられる。将来的にはシミュレーションによる研究の成果を反映した物理モデルの構築を検討するべきである。また、これらのモデルの検証には磁気圏の要所で観測を行っている ISTP 衛星群のデータと地上に展開されている磁場観測ネットワークなどのデータを使用する必要がある。

### 3.1.2 放射線帯電子とその影響

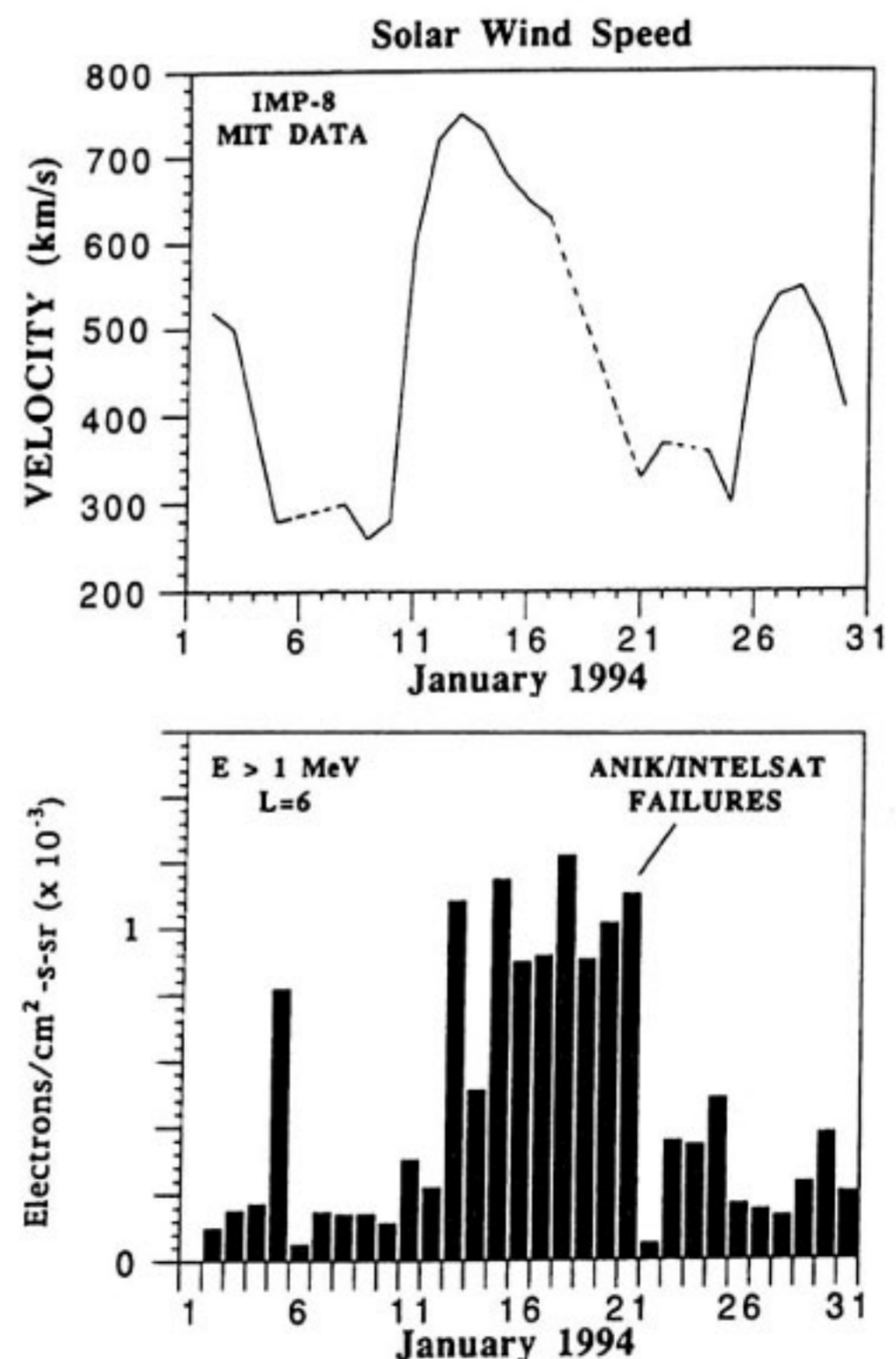
地球周辺の放射線帯は  $L = 1.5 \sim 6$  の高エネルギー粒子が存在する領域である<sup>(6)</sup>。放射線帯の変動では太陽フレア起源の高エネルギー粒子 (SPE) と磁気圏の活動と関連する相対論的なエネルギーの電子 ( $\sim \text{MeV}$ ) が実用上重要である。SPE は高エネルギーのイオン (おもにプロトン) の爆発的増大をもたらす。宇宙機の誤動作や有人宇宙飛行における放射線被爆につながる重要な現象である。SPE の予測は基本的には太陽フレアの予測と同義と言える。一方で高速太陽風による磁気圏じょう乱は放射線帯の変動をももたらす。静止軌道は放射線帯の最外部に位置し、その変動を強く反映する。特に、静止軌道で発生する人工衛星障害との関連から、高エネルギー電子の変動が注目されている。

第1節でのべた Anik 衛星などに障害が発生した時期 (1994 年 1 月 20 日) の地磁気活動状況は、1 月 10 日から高速太陽風のために活動的な状況が続いていたが、1

月 20 日には静穏な状況へと戻りつつあった。その一方 GOES 衛星で観測される静止軌道での高エネルギー電子 ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) フラックスは 1 月 14 日頃から高いレベルであったことが報告されている (第 1 図<sup>(7)</sup>)。Intelsat や Anik 衛星の事故はこのような状況で発生し、高エネルギー電子フラックスの値との相関が注目されている。

高エネルギー電子が人工衛星に与える影響として深部絶縁体帯電 (Deep Dielectric Charging) が考えられている。エネルギーの高い電子は衛星内部の電子回路や同軸ケーブルなどに使われている絶縁体の中まで侵入するが、その時に絶縁体内部に電荷を残す。この電荷によって作られる電場は、絶縁体内部できわめて高い値になる可能性がある。したがって、長期間強い高エネルギー電子フラックスにさらされることで放電が発生することが考えられる<sup>(7)</sup>。

放射線帯の高エネルギー電子の振るまいについては高速太陽風との関連が指摘されている。しかし、その起源については地球磁気圏内での加速過程を通して生成されると考えられているが、大きな謎である。予報の観点からは時間的に連続した太陽風データからある種の予測



第1図 1989年1月の太陽風速度(上)とGOES衛星による高エネルギー電子フラックス(下)<sup>(7)</sup>

フィルターを用いた予報は可能となると考えられる。そのために現象論的な解析を進めて予測手法を確立する必要がある。同時にその基礎的な物理過程に対する研究を進めることも重要である。

### 3.2 地上/電離圏/上層大気への影響

高緯度地域ではサブストームにともなう強いオーロラジェット電流が流れ、地上で磁場変動が起きる。このために北米大陸などの地磁気緯度の高い地域では磁場変動による誘導電流が問題となる。1989年の3月に発生した大規模な磁気嵐では数多くのサブストームが発生し、それにともなう、地上の送電網に強い誘導電流が流れた。カナダのケベック州で大規模な停電が発生したのをはじめ、米国の北部でも送電網に多数の被害が発生したことが報告されている<sup>(6)</sup>。また、オーロラジェット電流と磁気圏からの降下粒子は極域の電離圏と中性大気を加熱する。これによって、全球的な大気構造の変動が起こり、低高度衛星軌道での大気密度の上昇、すなわち衛星に対する空気抵抗が増大し、ときには衛星やロケットの残骸の軌道が変化して落下予測を大きく狂わせる。一方、磁気嵐に伴う電離圏嵐は短波通信に大きな影響を与えると同時に、GPSや通信衛星の電波にシンチレーションを発生させ、障害となる。このように、磁気圏じょう乱は宇宙環境だけではなく、地上のインフラストラクチャーに影響を与えるものであり、宇宙天気予報に対する期待は大きい。これらの影響を予報するためには、磁気嵐とサブストームの定量的なモデル化が重要である。また、電離圏嵐はその大きな原因は熱圏の組成と大気大循環の変化であり、磁気圏からのエネルギー流入量を見積もる磁気圏予報に帰結する。当面の予報業務の課題としては現況を正確に把握するため、地磁気などのキーパラメータについて全球的な観測網（例えば、インターマグネット等）を国際的協力の下に整備するとともに観測データを予報に有効に活用するためのデータベース技術の開発が必要である。

## 4. 磁気圏予報の課題 —まとめ—

磁気圏予報の面からの次期太陽活動極大期に向けての課題をまとめる。

### 太陽面現象との関連

太陽面の現象に起因する太陽風じょう乱が磁気圏に達するまでには2～3日の時間差があるので太陽面のできるだけ近くで太陽風じょう乱を検出することが実際の予報にとってはきわめて重要である。このために太陽面現象（フレア、コロナホール、フィラメント消失等）とL1点で観測される太陽風じょう乱の関連についての解析を進め、予報へフィードバックできる形にまとめてい

く必要がある。そのためにはL1点での観測データとともにこれまで平磯で整備してきた太陽画像データベースを有効に活用できる。また、太陽風じょう乱が惑星間空間を伝搬する過程の研究が重要である。

### 磁気嵐の詳細予測

L1点で観測されるリアルタイムの太陽風データを前提とした詳細な磁気嵐の予測を進める。これには、モデルによる静止軌道近傍でのプラズマ環境予測、予測フィルター等に基づいた放射線帯電子フラックスや赤道環電流(Dst)予測などが含まれる。予報の観点から言えばL1点のデータからは約1時間後の予測ができるだけなので、現在の予報体制の中でこれらを有効に活用することにも配慮していく必要がある。これらの開発を通じて太陽風と磁気圏の相互作用に関し一層の理解が進むことは重要である。また、実際の障害事例との比較を通じて予報の出し方の検討を進めることが必要である。

### 磁気圏現況データの取得

平磯で参照している磁気圏の現況データは従来に比べてはるかに充実したが、全体像を把握するために、重要なデータについてはインターマグネット計画のような国際協力も含めて引き続き収集の努力が必要がある。例えば、磁気圏対流電場を観測するHFレーダー網のデータなどをリアルタイムに近い形で収集することが考えられる。また、これらの収集されたデータを予報に有効に活用していくためにデータベースの整備と解析手法の充実を計る。

## 5. おわりに

宇宙天気予報は日本のみならず、米国を中心に国際的な広がりを持つようになり、研究者の関心も世界的に高まっている。世界に先駆けてスタートしたCRLの宇宙天気予報プロジェクトでは、これまで述べたように、次期太陽活動極大期に向けて太陽面の監視やフレア予報の研究とともに磁気圏じょう乱をよりの確に予報することを目指した研究と「宇宙天気予報」としての予報業務の確立をめざしていく。

### 参考文献

- (1) 長妻, 大山, 岡野, 秋岡, “宇宙環境予報業務,” 通信総研季, 43, 2, pp.301-308, June 1997.
- (2) D.N. Baker, “Solar wind - magnetosphere drivers of space weather,” J. Atmos. Terr. Phys., Vol.58, pp.1509-1526, 1996.
- (3) 丸山, 渡辺, 大高, 島津, “ACE衛星による太陽風モニター計画,” 通信総研季, 43, 2, pp.285-290, June 1997.

- (4) W.D. Gonzalez, J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani, and V.M. Vasylinus, "What is a geomagnetic storm?" J. Geophys. Res., Vol. 99, pp. 5771-5792, 1994.
- (5) J.W. Freeman and A. Nagai, "The magnetospheric specification and forecasting model: moving from real-time to prediction," In Solar-Terrestrial Prediction - IV, pp.524-539, Ottawa, 1992.
- (6) 五家, 松本, "高エネルギー粒子環境," 通信総研季, 43, 2, pp.249-256, June 1997.
- (7) D.N. Baker, J.B. Blake, S. Kanekal, and B. Klecker, "Satellite anomalies linked to electron increase in the magnetosphere," EOS, Vol.75, pp.401-406, 1994.
- (8) J.G. Kappenman, "Geomagnetic disturbances and power systems effects," In Solar-Terrestrial Prediction - IV, pp.131-141, Ottawa, 1992.



佐川 永一  
Eiichi SAGAWA  
平磯宇宙環境センター  
磁気圏/電離圏物理  
esagawa@crl. go. jp



丸山 隆  
Takashi MARUYAMA  
宇宙科学部 宇宙空間研究室  
超高層大気物理  
tmaru@crl. go. jp

秋岡 真樹  
Maki AKIOKA  
平磯宇宙環境センター 太陽研究室  
太陽物理学, 光学観測装置, 宇宙天気  
予報等の研究に従事  
akioka@crl. go. jp

