

宇宙環境予報業務

長妻 努^{*1} 大山きよ子^{*1} 岡野 朱美^{*2}
秋岡 眞樹^{*2}

(1997年1月17日受理)

SPACE ENVIRONMENT FORECAST SERVICE

By

Tsutomu NAGATSUMA, Kiyoko OHYAMA, Akemi OKANO,
and Maki AKIOKA

Our geospace environment is affected by solar activity. Artificial satellites, telecommunications equipment, and human activities in space are adversely affected by intense X-ray radiation from solar flares and high-energy particles accelerated through the geomagnetic disturbance. To use the geospace environment safely, space weather forecast is needed. The space weather forecast project at the CRL started in 1988, when our radio-wave alert service was extended to space environment forecast service. We now provide our space environment forecast service to users in a variety of fields. The current space environment forecast service at the CRL/HSTRC is described in detail.

[キーワード] 宇宙環境予報, 太陽フレア, 地磁気擾乱.

Space weather forecast, Solar flare, Geomagnetic disturbance.

1. はじめに

地球周辺の宇宙環境は、太陽活動によって大きく変動する。コロナホールや太陽フレア等の太陽面現象による高速太陽風の影響で地磁気嵐が発生し、人工衛星の故障の一つの要因である磁気圏内の高エネルギー粒子量の増加を引き起こす。また、磁気嵐のエネルギーは地球の極域へ流入して熱圏擾乱、更に通信障害の要因である電離圏擾乱を引き起こす。一方、太陽フレアによって発生したX線や高エネルギー粒子は、人工衛星の誤動作や宇宙空間で活動する宇宙飛行士達の被ばくの原因となっている。我が国は21世紀へ向けて本格的な宇宙開発・宇宙利用の時代を迎えようとしている。今後、宇宙通信や有

人宇宙活動等を積極的に進めていくためには、宇宙環境の研究のみならず、宇宙環境の監視や擾乱現象の予報が不可欠である。

1957年以来「平磯」は電離層を用いた短波通信をサポートするための電波警報業務を担当し、予・警報につながる研究と業務を行ってきた。その一環として1965年にURSIの下にもうけられた宇宙環境予報のための国際的な組織であるInternational Ursigram and World Day Service (IUWDS) (1996年よりInternational Space Environment Service (ISES)に名称変更)に参加し、西太平洋地域警報センター (Regional Warning Center (RWC) Tokyo)として日々予報業務を遂行してきた。時代と共に短波通信に対する需要が低下する一方で、人工衛星運用、送電線網等の地上の巨大システム運用などの宇宙環境変動の影響を受ける様々の分野で、より詳細な宇宙環境情報が要求され

*1 関東支所 宇宙天気予報課

*2 関東支所 太陽研究室

ている。当センターも1988年度より「宇宙天気予報システムの開発⁽¹⁾」に着手し、それに併せて業務内容も電波警報から宇宙環境予報へと発展的に移行し、現在に至っている。本資料では現在平磯宇宙環境センターで行われているRWC Tokyoとしての宇宙環境予報業務について述べる。なお、当センターでは予報業務の他に宇宙環境情報サービス⁽²⁾や宇宙環境データベース⁽³⁾等の外部サービスも併せて行っているが、それらの現状については他の論文、資料を参照されたい。

2. 予報業務に利用しているデータ及びその収集

宇宙環境を予報するためには太陽から磁気圏・電離圏・地磁気等グローバルで多様な観測データを迅速に収集する必要がある。そのため、当センターではコンピュータネットワークを通じて人工衛星や世界各地の観測データをリアルタイム・準リアルタイムで収集するシステムを構築し、同時に研究目的で開発・整備を進めてきた太陽観測（光学・電波）設備^{(4), (5), (6)}を積極的に活用することで、予報内容の充実や予報精度の向上をはかってきた。かつては太陽から地磁気までの多様なデータが、ウルシグラムコード^{(7), (8)}という特殊なコードに圧縮・簡略化され、テレックス通信網を介して収集/配布されていたが、現在ではコンピュータネットワーク技術の発達によってウルシグラムのみならず、従来データ量が膨大で送ることの難しかった画像データも直接リアルタイム・準リア

ルタイムで迅速に収集/配布できるようになっている。このようにして収集されたデータはデータベース化によって、予報業務への効率的な利用が可能となると同時に、太陽地球環境変動の速報値を外部公開するにも有効な手段となる。当センターでは1988年よりリアルタイム・オンラインデータベースシステム（通称SERDIN）を開発し運用してきた⁽⁹⁾。このシステムはその後World Wide Web (WWW)を用いた分散型データベースシステムへと発展し、各種の観測データを参照する有効な手段となっている⁽³⁾。このように、ウルシグラムコードに頼って予報業務を行っていた頃に比べて、観測データの質、量及びデータの取り扱い技術は格段に向上している。現在当センターで予報のために扱っているデータの一覧を、第1表に示す。

3. 予報の判断基準（予報スキーム）

予報発令の判断は、収集された多様な観測データを分析することによってなされる。我々は現況の太陽地球環境の把握能力を高めることによって、予報精度の向上をはかってきた。詳細で定量的な予報を実現するためにはモデルに基づいた予報が不可欠であるが、太陽フレアや地磁気擾乱に関しては未解決の問題も多く、信頼できる予報モデルの構築に向けて今後も研究・開発を進めていく必要がある。現在は太陽地球環境の各領域の現況を把握し、過去の活動履歴や経験に基づいた気象予報で言う

第1表 予報に用いるデータの一覧（ウルシグラムを除く）。

対象	観測量	観測方法・入手先	利用
太陽	H α	光学望遠鏡（平磯：高精細H α 望遠鏡，Big Bear 天文台）	太陽全面，活動領域，H α フレア
	可視光	光学望遠鏡（平磯：黒点監視望遠鏡）	
	磁場	マグネトグラフ（Kitt Peak 天文台）	
	ヘリウム吸収線	光学望遠鏡（Kitt Peak 天文台）	コロナホール
	軟X線	ようこう衛星SXT（宇宙研）	X線放射，X線フレア
	X線強度	GOES衛星（NOAA/SEC）	
	電波	電波望遠鏡（平磯：HiRAS）	電波バースト
太陽風	磁場，速度，密度	Wind衛星，SOHO衛星（NOAA/SEC, NASA）	太陽風変動（高速太陽風，CMEの有無）
磁気圏	高エネルギー粒子	GMS衛星（気象庁：平磯直接受信），GOES衛星（NOAA/SEC）	磁気圏擾乱
	地磁気	地上磁力計（平磯，Intermagnet）	
電離圏	電離層電子密度	イオノゾンデ（各地方観測所）	Es，電離層擾乱
	VLF位相	オメガ電波（犬吠観測所）	SPA，X線フレアモニタ

ところの「観天望気」的な予報を実施している。当センターの予報スキームを以下に示す。

3.1 太陽フレア予報

太陽フレアは太陽大気中での大規模な爆発現象である。そのエネルギーの源は一般に磁気リコネクションによると考えられている。そのため、活動領域のプラズマの運動や磁場構造を詳細に理解することがフレア予報には大切である。しかしながら、フレアの発生メカニズムの詳細は現在も未知の部分が多く、宇宙天気予報と言えるレベルに到達するには、研究・開発すべき事が多く残されている。現段階では、活動領域の現況と今後の推移を予報として提供している。

まず太陽面全体を概観した後、それぞれの活動領域を詳細に見ていく。太陽面全体の現況や活動度の推移の把握には、太陽X線放射のバックグラウンドレベル、黒点総面積、F10.7指数を調べる。次に過去48時間以内のフレア発生頻度と強度分布の履歴を調べ、太陽フレア発生の現況を把握する。個別の活動領域については、フレアを頻発する黒点群の形状(D, E, F型)や磁場構造(γ , δ タイプ)の有無、およびEFR (Emerging Flux Region)の有無やサージ、フィラメント活動等のH α イベントの有無等の現況のチェックを行い、成長の大きな黒点群やデルタ黒点の形成、黒点固有運動と反対極性の衝突、H α イベントの増減やフィラメント形状の急速な変形の有無等の活動領域の推移から、今後24時間の間に活動度が上昇するか衰退するかの判断を行う。当センターの高精細H α 望遠鏡や黒点監視望遠鏡は活動領域の詳細やその変化を把握するのにきわめて有効であり、予報の精度向上に役立っている^{(4), (5)}。

3.2 地磁気擾乱予報

地磁気擾乱現象は基本的に太陽風の変動に支配されている。そのため、太陽風の磁場の向き、速度、密度を正しく把握または予測することが、地磁気擾乱予報には不可欠である。しかし現状では惑星間空間における太陽風変動の観測データが不足しているため、詳細な地磁気擾乱予報には惑星間空間での太陽風変動の観測やモデリング等の研究・開発要素が残されている。現段階では太陽面現象から太陽風変動を経験的に推定し、地磁気擾乱現象の中でもっとも大規模な磁気嵐を予測している。

磁気嵐はコロナホールによる回帰性の磁気嵐と、太陽フレア等による突発性の磁気嵐に大別できる。回帰性磁気嵐では、太陽の自転の前周期、前々周期の地磁気擾乱や太陽風の変動の履歴が予報の第一のよりどころになる。さらにコロナホールの状態把握が重要なので、当センターでは、回帰性磁気嵐の予報に人工衛星「ようこう」の観測する軟X線画像と Kitt Peak 天文台で観測されたヘ

リウム吸収線(He 1083 nm)画像を用いてコロナホールの形状及びその変化を把握している。そして、コロナホールの東側のエッジが太陽の子午線を通過した日時を基準にして高速太陽風のフロントがいつ頃地球に到達するかを予測している。

突発性の磁気嵐の予測には、フレア、フィラメント消失、CME等の太陽面現象の把握が重要である。当センターでは、高精細のH α 望遠鏡を用いて活動領域の変化やフレアに伴うフィラメント消失及び静穏フィラメントの消失の有無をモニターし、太陽電波観測システム(HiRAS)を用いてフレアに伴う太陽電波のバースト現象を監視している⁽⁶⁾。その他にGOES衛星のX線データから、過去4日のLDE(Long Duration Event)型フレアの有無を確認している。これらのデータから太陽風変動の規模を推定し、突発性の磁気嵐の予測を行っている。

現況の地磁気は当センターの観測や、インターマグネット⁽¹⁰⁾で収集したデータで監視をしている。さらにWind衛星やSOHO衛星の観測から地球近傍での太陽風の状態を把握し、現況で地磁気擾乱が発生している場合にはその要因の理解につとめている。

3.3 プロトン現象予報

太陽フレア発生に伴って数10~数100 MeVの高エネルギープロトンが生成され、30分~数時間で地球へ到達し、磁気圏内の高エネルギープロトンのフラックスを増加させることがある。この現象をプロトン現象と呼んでいる。プロトン現象はLDE型のフレアやIV型太陽電波バーストに伴って発生することが知られている⁽¹¹⁾。このため、プロトン現象予報は本質的には太陽フレア予報の一部としてとらえることができる。現在当センターでは、気象庁のGMS-4衛星搭載のSEM(Space Environment Monitor)観測データを直接受信し、プロトン現象及び磁気圏内の高エネルギー粒子の増加を監視している。

4. 業務内容

予報業務は1週間交代で1人の研究者が予報官となって行われる。ただし、発令する予報内容に関しては、各研究者が持つ専門的知識を生かし、予報精度の均質化をはかるため、センター内の研究者全員による予報会議で最終決定される(第1図)。予報官がデータを十分に整理、検討する時間を確保するために予報の発令時刻は午後3時(06:00 UT)に設定されている。業務に必要なデータの収集及びウルシグラムコードの翻訳等は自動化⁽¹²⁾・省力化されており、予報官はデータの分析に専念できる。

4.1 発令される予報内容

①GEOALERT [毎日]

前述の予報スキームに基づいて太陽フレア、地磁気擾乱、プロトン現象の3種類について、状況に応じて1~4日の予報を各警報センターに送信している。予報のレベルを第2表に示す。各警報センター間でのGEOALERT情報の交換は、ウルシグラムコードで行っている。

②テレホンサービス (宇宙環境情報サービス) [毎日]

テレホンサービスは宇宙環境予報の外部サービスの1つである。その日のGEOALERTや電離層擾乱予報、及び太陽活動度や地磁気活動度の指数 (黒点相対数, F10.7 指数, 地磁気K指数等) を登録する。このシステ



第1図 予報センターで毎日開かれる予報会議。

ムの詳細や利用の現状については他の論文を参照されたい⁽²⁾。

③太陽地球環境予報 [毎週金曜日]

今後1週間の太陽活動、地磁気活動に関する予報を行う。内容は文章にまとめ、関係諸機関にFAXで配布し

太陽地球環境予報		郵政省 通信総合研究所 平磯宇宙環境センター TEL (029)265-9719(総機) TEL (029)265-7121(課) FAX (029)265-9720					
No. 9 1997年 2月14日 15時00分JST 発令							
【概況】 太陽活動は静穏でした。今後も静穏な状態で推移するでしょう。地磁気活動は8日から11日にかけて地磁気擾乱がありました。今後は静穏でしょう。							
【太陽活動】 現在、太陽面には黒点がありません。東縁から回帰する黒点領域がなく、静穏な状態が続くでしょう。							
過去1週間に発生した主なフレアは以下の通りです。 月/日 発生時刻 (UT) X線/光学 領域 電波バースト							
なし							
【地磁気】 地磁気活動は8日から11日かけて地磁気擾乱がありました。8日、9日の擾乱は原因がわかりません (コロナホールなのか?)。10日、11日の擾乱は7日のCME現象によるものと思われます。8日 (7時-24時UT頃) には Gradually Storm が発生し、地磁気水平成分の最大変動は約 85 nT です。9日 (1321 UT) には Impulsive Disturbance が発生しました。今後は静穏な状態が続くでしょう。							
【F10.7】 過去1週間の F10.7 の値 (ペンティクトン) を掲載します。							
	07	08	09	10	11	12	13
F10.7	76	75	73	72	71	71	71
以上 (相当 永 井)							

第2図 太陽地球環境予報の例。

第2表 GEOALERTの予報レベル (ウルシグラムコード)。

1.FLARE FORECAST	2.MAGNETIC FORECAST	3.PROTON FORECAST
0 Quiet (静穏) (C-class Flares < 50%)	0 Quiet (静穏)	0 Quiet (静穏)
1 Eruptive (やや活発) (C-class Flares > 50%)	1 Active (やや活発) (A>20 or K=4)	1 Proton Event (10pfu at >10MeV)
2 Active (活発) (M-class Flares > 50%)	2 Minor Storm (活発) (A>30 or K=5)	2 Major P-Event (100pfu at > 100MeV)
3 Major Flares (非常に活発) (X-class Flares > 50%)	3 Major Storm (非常に活発) (A>50 or K=6)	7 Event in Progress (>10MeV)
4 Proton Flares (Proton Flares > 50%)	4 Severe Storm (非常に活発) (A>100 or K>7)	8 Warning (No Numeric Forecast)
8 Warning (No Numeric Forecast)	7 Storm in Progress (A>30 or K=4)	9 Nil (End of Alert Period)
9 Nil (End of Alert Period) / No Forecast	8 Warning (No Numeric Forecast)	/ No Forecast
	9 Nil (End of Alert Period) / No Forecast	

ている。予報文の例を第2図に示す。大磁気嵐や大規模な太陽フレア、プロトン現象等の発生が予想される場合、又は発生したときには、臨時発令する。

④週間予報 [毎週火・金曜日]

太陽フレア、地磁気擾乱予報に基づいて、今後1週間のSWF (Short Wave Fade-out: デリンジャー現象)の発生確率の予測 (* : 30-50%, ** : 50%以上)と、短波伝搬状態の予測 (指数で1 (非常に不安定) ~ 5 (きわめて静穏)) を行う。予報内容はウルシグラムコード (RATEF) で各警報センターに送信し、FAXで関係機関に配布している。

⑤ JJY [随時]

JJY 信号の中に10分おきに電波警報信号が挿入されている。電離層擾乱の有無を地磁気擾乱予報をもとに判断し、必要に応じて警報信号の内容を変更する。提供している信号は以下の3種類である。N: 送信時から12時間以内に電波伝搬上の異常現象の発生が予想されず、現に電波の伝搬状態が安定しているとき。U: 送信時から12時間以内に電波伝搬上の異常現象の発生が予想されるがその確実性が低いとき。W: 送信時から12時間以内に電波伝搬上の異常現象の発生が予想されるとき又は現に異常現象が発生しているとき。

第3表 問い合わせ内容の一覧。

問い合わせ内容	割合
太陽黒点相対数・地磁気K指数等のデータ請求	47.2%
太陽活動や擾乱現象、電波伝搬状態の現況及び宇宙環境・擾乱現象電波伝搬に関する質問	40.6%
予報業務・外部サービスに関する質問	7.1%
その他	5.2%

(1987年~1996年の総計)

第4表 問い合わせ利用者の割合。

利用者名	割合
通信関係	17.9%
報道関係	13.2%
アマチュア無線	12.3%
メーカー	9.7%
官公庁	8.7%
大学・研究機関	5.2%
電力会社	2.9%
航行 (空港)	2.2%
NASDA	2.2%
その他・一般	25.6%

(1987年~1996年の総計)

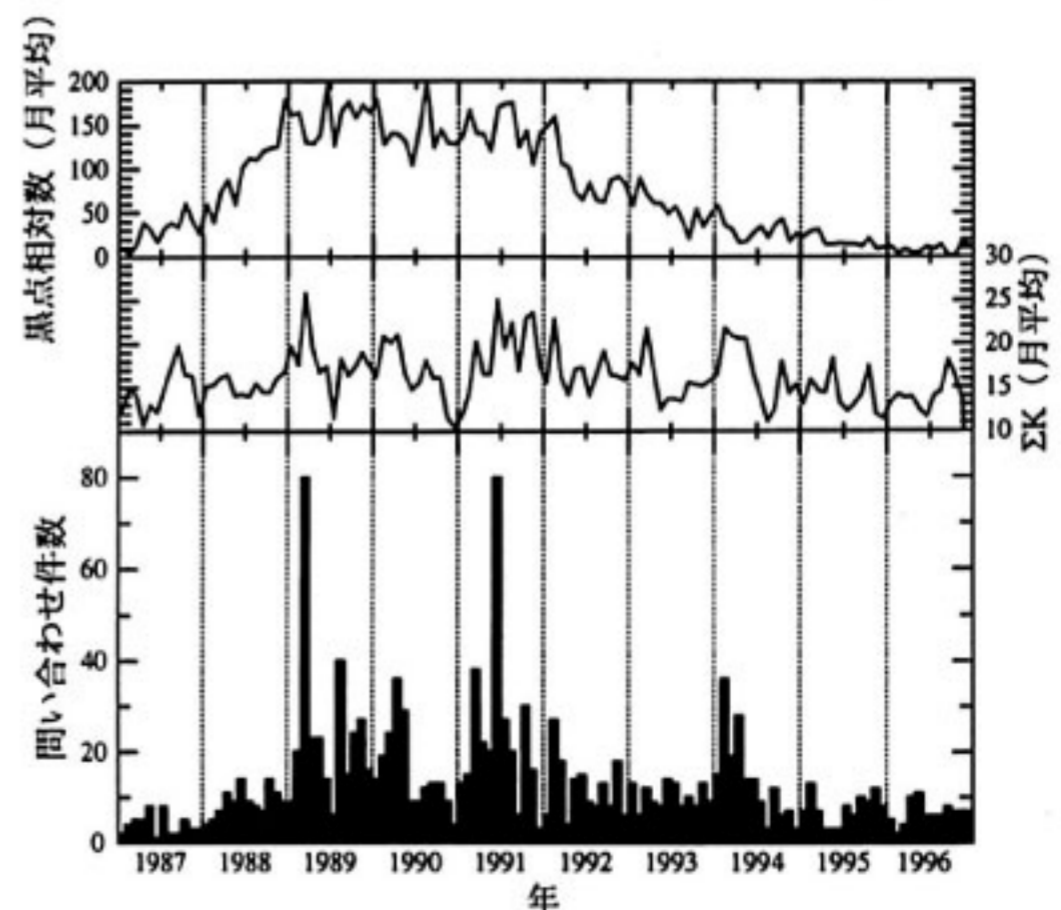
4.2 宇宙環境に関する個別問い合わせ

予報の利用者側の要求として我々が発令している日々の子報内容以外に、通信障害や衛星運用のトラブルの原因追求や、太陽・地磁気活動の現況や過去の履歴を調べるために、各種の観測データを必要とする場合が存在する。そこで当センターでは予報業務の一環として、宇宙環境に関する問い合わせへの対応を行っている。第3表に問い合わせの内容とその割合を示す。当センターで収集しているデータや太陽・地磁気活動の指数の請求や、太陽・地磁気活動の現況や擾乱現象の有無に関する問い合わせが多い。問い合わせサービス利用者の一覧を第4表に示す。一般からの問い合わせのほか、通信・報道関係及びアマチュア無線利用者からの問い合わせが数多く寄せられている。第3図に、過去10年間の問い合わせ件数の推移を示す。全体的な傾向として、太陽活動の極大期 (1989年~1991年) に問い合わせ件数が増加していることがわかる。また、1994年の前半にも問い合わせの増加が見られる。この時期の太陽活動は極小期に近かったが、地磁気活動の月平均値が高かった (地磁気擾乱が頻発していた) ために、問い合わせの件数が増加したと考えられる。

5. 予報の評価

現在我々が用いている予報スキーム及び予報の精度を評価するために、太陽フレアと地磁気擾乱について予報と実際の活動度の関係を調べた。プロトン現象に関しては、現象の頻度が低いのでここでは評価の対象としない。

太陽フレア予報と実際のフレア (X線強度) の関係をマトリクスの形で第5表に示す。各要素内の数字はイベントの数である。フレアの有無と規模共に予報と実績が



第3図 問い合わせ件数の変化と黒点相対数、ΣKの関係。ΣKは1日のK指数の総和。

第5表 太陽フレア予報と実績（フレアのクラス）の関係。
フレア（X線強度）

	<B	C	M	X
予報値	Quiet	103	5	0
Eruptive	185		89	2
Active	6	92	58	6
Major F.	0	0	3	0

（92年2月～96年3月の総計）

第6表 地磁気擾乱予報と実績（1日の最大k指数）の関係。
1日の最大K指数

	K<3	K=4	K=5	K=6	K=7
予報値	Quiet	197	54	7	1
Active	205	164	91	12	4
Minor S.	22	36	42	6	2
Major S.	1	1	5	1	0
Severe S.	4	0	0	0	0

（92年3月～96年12月の総計）

一致している要素は濃い網掛けで示してある。フレア発生の有無は予報できているが、その規模の予報が正しくない場合は薄い網掛けで示した。大規模なフレア（M、Xクラス）は頻度が低いため、あまり統計的に有意とはいえないが、現段階の我々の予報スキームにおいても、フレア発生の有無については70～80%程度予報出来ていることがわかる。しかし、フレアの規模の的中率に関してはまだ不十分な点があることは否めない。太陽フレアの発生を規模も含めて詳細に予報していくためには太陽面の磁場構造の精密計測を行うための技術開発や、フレア発生メカニズムの研究等を進めていく必要がある。

第6表に、地磁気擾乱予報と1日の最大K指数の関係を示す。地磁気擾乱の有無と規模共に予報できている要素は濃い網掛けで、擾乱の有無は予報出来ているが、規模が正しくない場合は薄い網掛けで示した。太陽フレア予報同様、大きな磁気嵐（最大K指数6,7）は頻度が低く、統計的に有意とはいえないが、最大K指数が4の時を除いて、70～80%の割合で擾乱の発生を予報していることがわかる。最大K指数が4の時は予報の精度

が低く、的中率が50%程度にとどまっている。これは、最大K指数5以上の擾乱（地磁気嵐）は比較的太陽面現象との関連や回帰性があるために、現在収集しているデータから擾乱発生の有無を予報しやすいのに対し、K指数が4程度の地磁気擾乱は主として太陽風中の短期的な変動（具体的には南向きの磁場変化）が原因で生じるため、惑星間空間での太陽風の状態を詳細に把握することが難しい現在は、予報が困難であることを示している。もっとも、最大K指数が4程度の擾乱は磁気嵐と無関係に生じることが多く、通信障害や衛星運用に重大な影響を及ぼす可能性は比較的低いことが経験上わかっている。いずれにせよ、磁気嵐の規模や継続時間の予測は、今後の課題として残されているといえる。

6. おわりに

現在の平磯宇宙環境センターの予報業務について紹介した。今後宇宙開発や宇宙利用が高度化するにつれて、詳細な宇宙環境の監視や予報の重要性が高まっていくものと思われる。太陽地球環境の現況把握能力の向上につとめてきた結果、フレアや磁気嵐の有無に関してある程度の予報が実現できているが、フレアや磁気嵐の規模や継続時間等の定量的な予報を実現するためには太陽面現象や太陽風、磁気嵐に関する研究を今後も継続し、その結果を予報スキームに反映していく必要がある。今年8月にはACE衛星が打ち上げられ、L1付近を回るHalo軌道上で24時間太陽風を観測する予定であり、CRLもデータ受信の一部を担当する⁽¹³⁾。このデータはリアルタイムで当センターに供給される予定となっており、約1時間後の磁気嵐の有無を判断することができる。また、ACEデータを入力パラメータとした磁気嵐に伴う高エネルギー粒子の増加予測を行うためには、磁気圏モデルの開発も必要になる。得られた予測結果は、WWW等のユーザーインターフェースを活用することで、最新予報内容として準リアルタイムで更新し、利用者に提供することも可能となる。これらを組み合わせた短期予報の実現等も今後検討していく必要がある。

参考文献

- (1) Marubashi, K., "The space weather forecast program", Space Sci. Rev., 51, 197, 1989.
- (2) 川崎和義, 石橋弘光, 徳丸宗利, "宇宙環境情報サービス", 通信総研季, 43, 2, pp.271-275, June 1997.
- (3) 石橋弘光, 川崎和義, "分散型宇宙環境データベースの開発", 通信総研季, 43, 2, pp.257-270, June 1997.
- (4) 秋岡眞樹, 岡野朱美, "太陽彩層面の観測 - 高精細

