

ACE 衛星による太陽風モニター計画

丸山 隆* 渡辺 成昭* 大高 一弘*
島津 浩哲*

(1997年1月17日受理)

REAL TIME SOLAR WIND MONITOR
USING ACE SATELLITE

By

Takashi MARUYAMA, Shigeaki WATANABE
Kazuhiro OHTAKA, and Hironori SHIMAZU

An Advanced Composition Explorer (ACE) satellite will be launched by NASA at the libration point on the sun-earth line (L1), 1.5 million km upstream to the sun. The primary scientific purpose of ACE is to determine and compare the isotopic and elemental composition of the solar corona, the interplanetary medium, local interstellar medium and Galactic matter. Besides this, the basic parameters of the solar wind which are pertinent in forecasting space environment variations near the earth, especially the onset of geomagnetic storm will be predicted. This sub-mission has been proposed by NOAA/SEC and is called the RTSW option. RTSW data will be transmitted in real-time at a low-bit rate of 434 bps for 24 hours/day. To achieve 24-hour real-time monitoring we need at least three ground telemetry stations evenly-spaced in longitude. The Communications Research Laboratory will operate one of these stations in the Far East longitude sector.

[キーワード] ACE 衛星, 太陽風, 惑星間磁場, L1ポイント, 磁気嵐.

ACE satellite, Solar wind, Interplanetary magnetic field, L1 point, Magnetic storm.

1. はじめに

太陽面現象を原因とする地球周辺宇宙における環境変動を予測する宇宙天気予報計画のなかで、二つをつなぐ位置にあるのが太陽と地球の間の宇宙空間で、惑星間空間とも呼ばれてる。太陽面からのプラズマ流としてのエネルギー放出は、放射線にくらべ、数 100 km/s という遅い速度で惑星間空間を伝搬する。完全に磁化されたプラズマの流れ(太陽風)は、太陽面での磁場の構造あるいは、フレアや CME などの過渡的な擾乱によって常に

変動している。地球近傍にやってきた太陽風は地球磁気圏と相互作用し、エネルギーを地球圏内に注ぎ込む。その過程は磁気圏擾乱として現れ、熱圏、電離圏の擾乱へとエネルギー流入が続く。したがって、太陽面現象から地球周辺宇宙の擾乱を予測する上で、中間過程である惑星間空間の擾乱を観測することは原因と結果の因果関係をより明瞭にする。

飛行体による太陽風の直接観測はこれまでにいくつかの例があるが、本稿で述べる ACE 衛星によるリアルタイム太陽風モニター計画(ACE/RTSW)は、宇宙天気予報業務をはっきりと目指している点がこれまでと異なる。RTSW は米国 NASA の打ち上げる ACE 衛星

* 宇宙科学部 宇宙空間研究室

(Advanced Composition Explorer) の観測データのうちで宇宙天気予報に有効な太陽風の基本的パラメータをリアルタイムで地上に送信するものである。

2. ACE 衛星計画の概要とリアルタイム太陽風モニター

ACE 衛星計画そのものは、宇宙科学研究を目的とした NASA の Explorer ミッションのひとつである。すなわち、太陽コロナ、惑星間物質、銀河物質中の同位体組成比や荷電状態を観測し、それぞれの物質の起源と進化、太陽コロナの形成、太陽風の加速などを解き明かす目的を持っている。この目的のために、衛星は地球-太陽線上の重力均衡点 (libration point) L1 を中心とした楕円軌道、いわゆるハロー軌道に打ち上げられる。また、ペーロードとして、Cosmic Ray Isotope Spectrometer (CRIS), Solar Isotope Spectrometer (SIS), Ultra Low Energy Isotope Spectrometer (ULEIS), Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer (SEPICA), Solar Wind Ion Mass Spectrometer (SWIMS), Solar Wind Ionic Charge Spectrometer (SWICS), Electron, Proton, and Alpha Monitor (EPAM), Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor (SWEPAM), Magnetometer (MAG) の 9 種類のさまざまな粒子の状態を測定する装置を搭載する。これらの観測データは基本的には搭載データレコーダーに記録された後、2-3 時間を要して 6944 bps のデータレートで地上に送信される。これには NASA の深宇宙ネット

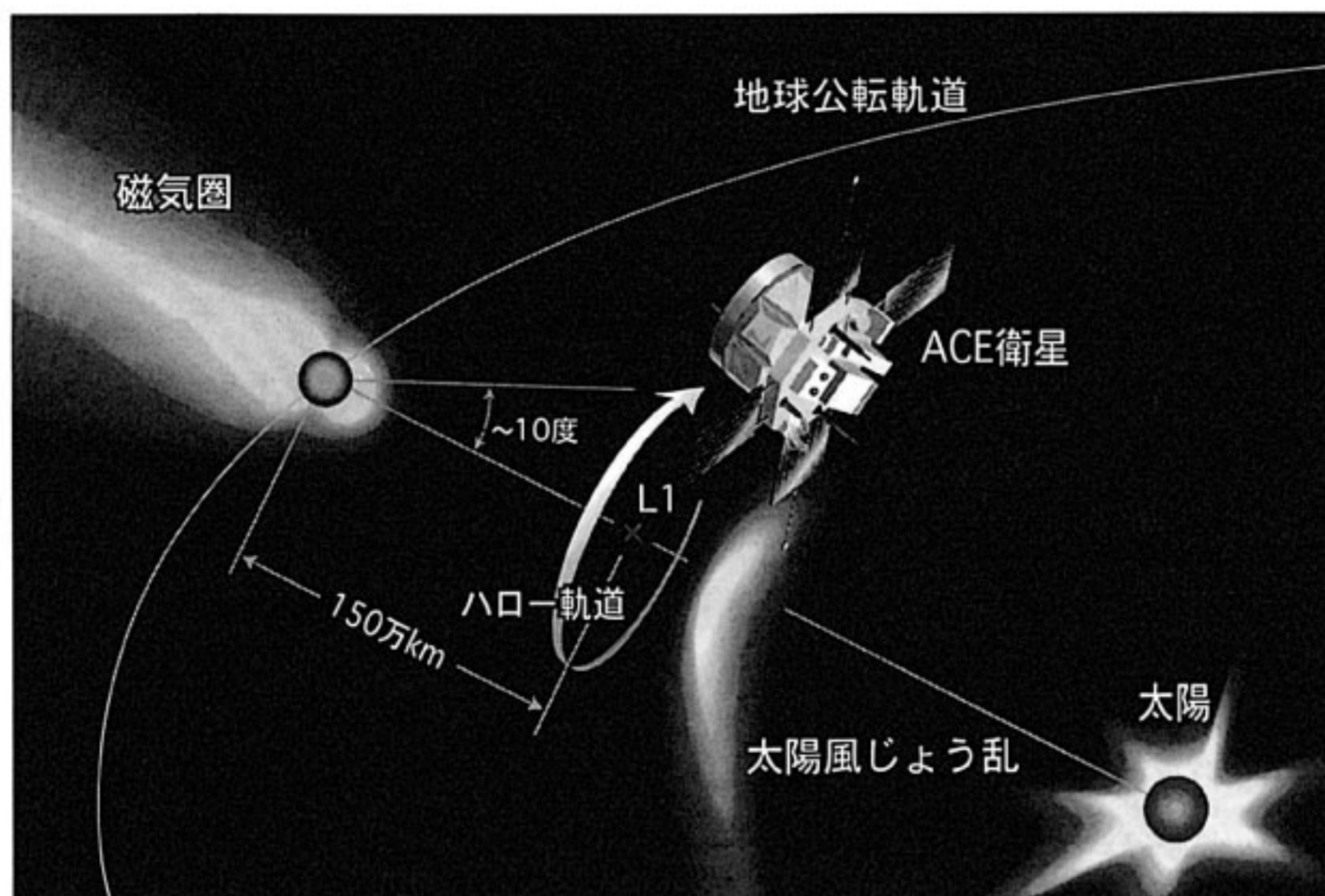
ワーク (DSN) 施設が用いられる。

このような基本的な運用とは別に、上に述べた 9 つの測定器の中から、MAG, SWEPAM, EPAM, および SIS については、24 時間連続して 434 bps の低データレートで実時間送信される。このサブミッションはリアルタイム太陽風モニター (RTSW) と呼ばれ、米国 NOAA 宇宙環境センター (SEC) の主導で計画しているものである。L1 衛星は地球から見れば太陽から 5-10 度離れた位置を太陽の運行に同期して運動する。したがって、24 時間の体制でモニターを実施するには、地球上に異なった経度で、少なくとも 3 局以上の受信施設が必要となる。宇宙天気予報計画を進める通信総合研究所 (CRL) は、極東経度での受信局を担当することになる。

L1 ポイントは地球-太陽線上で地球から約 150 万 km 太陽側にあるため、平均的な太陽風の速度を 500 km/s とすれば、L1 ポイントを通過した太陽風の擾乱は約 1 時間で地球に達する。すなわち 1 時間前に確度の高い地磁気擾乱警報が可能になると期待される。ACE 軌道の概念図を第 1 図に示す。

3. RTSW データの予報ツールとしての意義

太陽フレア、フィラメント消失、あるいはコロナホールなどの太陽面現象が地磁気嵐の原因になることは統計的には確かであるが、個々の事象から地磁気嵐の発生を予報するとなると必ずしも容易ではない。また、太陽面に対応する現象が見つからない磁気嵐も多くある⁽¹⁾。太陽面でのある種の活動によって乱された、さまざまな太陽風のパラメータの中で、惑星間磁場の南向き成分が



第 1 図 ACE 衛星の軌道概念図。太陽と地球の距離は 1.5×10^8 km であるから 1/50 に縮めてある。

大きくなるのが磁気嵐の発生に必要なことが分かっている。さらに、太陽風が磁気圏に作用するときの圧力、すなわち太陽風の速度と密度が磁気嵐の発達に関与している⁽²⁾。これらの観点から次の観測器のデータをRTSWのサブセットとして、一部あるいはRTSW用のフォーマットに再構成してモニターする。高エネルギー粒子については、フレアに伴う、宇宙飛行士や宇宙機器の被曝の現況把握としての重要性がある。

これらのデータはリアルタイム性を最重視しており、生データの物理量への変換過程で衛星の姿勢等が必要であるものについては予測値を用いる。したがって、科学研究目的には、より精密な変換過程を経た最終データが用いられなければならない。

磁場測定器 (MAG)

ACE衛星の磁場測定器は衛星近傍の惑星間磁場(IMF)をその方向と強度について測定し、IMFの変動と大規模構造を観測する。センサーはブームの先端に取り付けられた3軸フラックスゲート型で、 ± 0.004 から 65536 nT の測定範囲を持つ。IMFの強度と方向は1/30秒毎に測られ、FFTによって変動のスペクトルが得られるが、RTSWのサブセットとしては、1秒毎の磁場ベクトルが送信される。

プラズマモニター (SWEPAM)

太陽風中の電子、プロトン、およびアルファ粒子について、速度、密度、および温度を測定する。RTSWサブセットとして64秒の時間分解能で送信される。

低エネルギー粒子モニター (EPAM)

30 keV以上のエネルギーの電子についてフラックス

と方向、50 keV以上のイオンについてフラックスと方向を、さらにこれらイオンの組成比も測定する。方向の測定は衛星のスピンの(5 rpm)で行う。

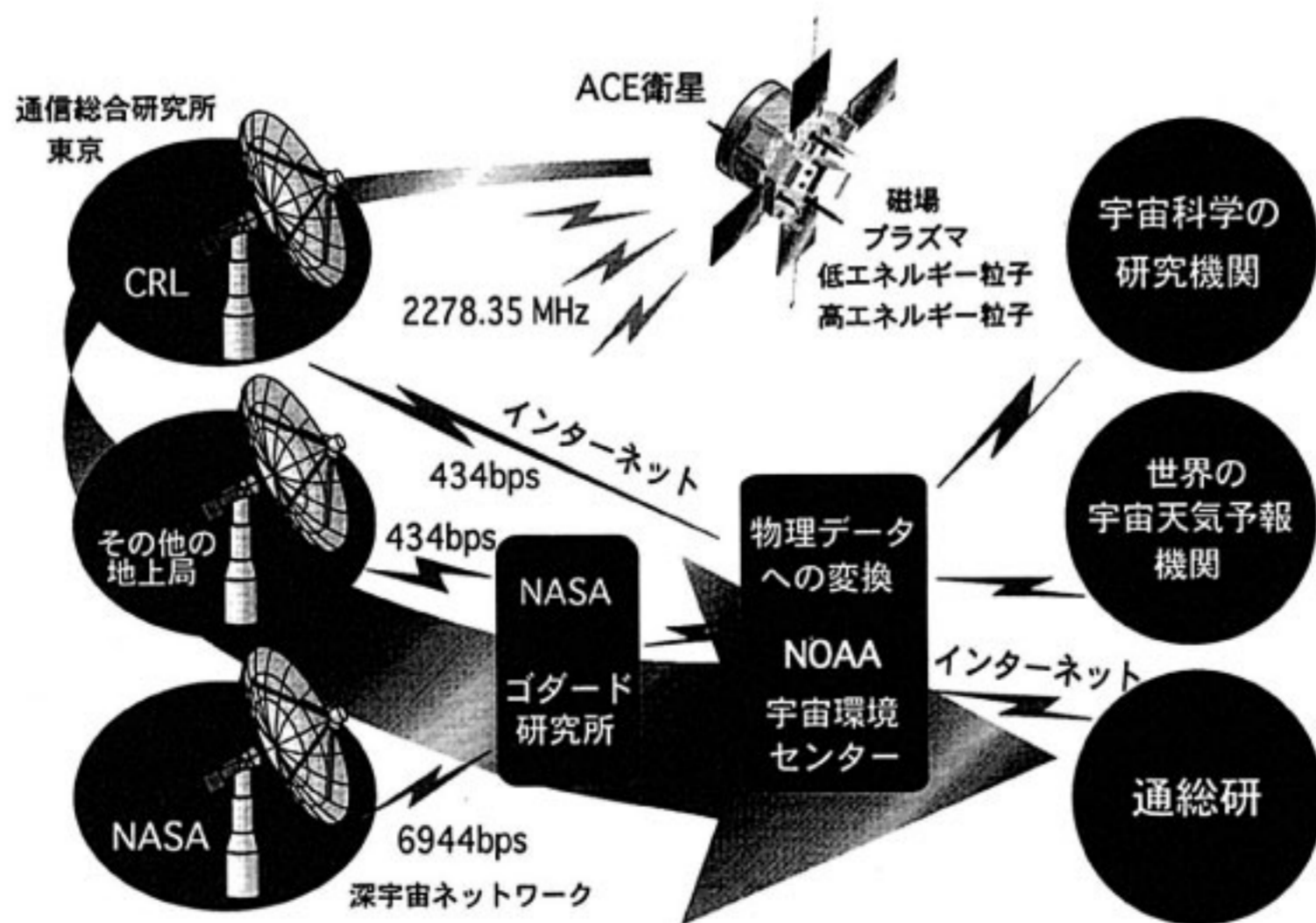
高エネルギー粒子モニター (SIS)

Solar Isotope Spectrometerはエネルギーレンジ10-100 MeVでリチウムから亜鉛までの粒子フラックスを測定するが、その一部のデータをRTSWサブセットとして送信する。

4. RTSW データの流れ

4.1 リアルタイムデータフローの概略

L1ポイント付近にある衛星からのRTSWデータ受信を24時間体制で行うには、少なくとも互いに離れた経度領域に3点以上の地上局を配置する必要があることは既に述べた。高データレートで行われるプレイバックモード時には6944 bpsのデータフレームの中にRTSWフォーマットのデータを割り振って24時間リアルタイム性を確保する。このように、複数の地上局からの受信データと異なったフォーマットのデータを一括して処理し、予報業務のサイトへリアルタイムで配信するには、1受信局でのデータ取得/処理とは異なるいくつかの注意が必要になってくる。基本的に各観測装置のデータを解読し有意な物理量に変換するプロセスはNOAAの宇宙環境センター(SEC)で担当する。したがってCRLでは受信して434 bpsのデータストリームに復調した結果をNOAA/SECへリアルタイム伝送する必要がある。CRL-SEC間はインターネットで接続するが、他の受信局はそれぞれ異なるネットワーク接続となる。デー



第2図 太陽風リアルタイムモニターデータの流れ

タ受信は各受信局で可能な限りの時間にわたって実施し、受信局間での時間割調整を行わないので同一のデータが複数の局から SEC へ伝送される場合が有り得る。これらデータはネットワークによって異なった遅れ時間を持っているため、SEC ではデータの取捨選択が要求される。SEC での一連の処理の後、24 時間連続したリアルタイムデータはデータ収集と同様なネットワークを介して、CRL, NASA/GSFC, および米国内の他の予報機関に配信される。ここまでの全過程を通しての遅れ時間は最大 5 分を計画している。データの流れの概念図を第 2 図に示す。

4.2 軌道、衛星、および姿勢

ACE 衛星の軌道は、太陽-地球を結ぶ線上で、地球から約 150 万 km 太陽よりの L1 ポイントを中心とする軌道長半径約 200,000 km, 軌道周期約 180 日の楕円軌道である。衛星を地球から見た太陽からの離角は 7.6 度となり、テレメトリーを行うのに太陽電波雑音の混信を避けることができる。

衛星は差し渡し 1.6 m の 8 角形デッキに高さ 1 m の本体で、4 枚の太陽電池板を持っている。磁気センサーはそのうち 2 枚の太陽電池板の先端から突き出たブームのさらに先端に取り付けられている。姿勢は周期 5 rpm のスピン安定で、スピン軸を太陽-地球方向に平行にする。したがって大半の測定器は太陽方向を向いたデッキ上に取り付けられ、地球側を向いたデッキには直径 76 cm のテレメトリー送信/コマンド受信用パラボラアンテナが取り付けられている。テレメトリーの送信周波数は 2278.35 MHz である。本体重量は燃料 189 kg を含めて全体で 785 kg である。

4.3 ACE テレメトリーパラメータ

RTSW フォーマットは 434 bps で、16 秒 (6944 bits) を 1 フレーム (major frame) として構成される。これにリードソロモン符号が付け加わる。ダウンリンクのパラメータを第 1 表に示す。

4.4 CRL 地上局

CRL では小金井の本所に設置したサイエンティフィックアトランタ社製の直径 11 m のパラボラアンテナを用いる。このアンテナを用いた場合の信号レベルの評価を第 2 表に示す。

アンテナの制御は NASA/GSFC から定期的に送られてくる軌道情報を基に PC で行う。アンテナの制御、受信機/復調器の設定、データの送出は基本的に自動化されている。

第 1 表 ACE ダウンリンクパラメータ概要

送信周波数	2278.35 MHz
データレート	434 bps
R/S シンボルレート	498 bps
コーディング	996 bps
変調	PCM (Biphase-L) /PM

第 2 表 11 m アンテナを用いる場合の回線設計

項目	備考	
送信出力	5.0 W	37.0 dBm
送信損失		-0.7 dB
アンテナ利得	76 cm dish	19.0 dB
EIRP		55.3 dBm
伝搬損失	170 万 km 最大	-224.2 dB
偏波損失		-0.2 dB
大気損失		-0.2 dB
ポインティング損失		-1.0 dB
受信アンテナ利得	S/A 11 m dish	46.2 dB
受信電力		-124.1 dBm

5. ACE/RTSW データの宇宙天気予報への利用

5.1 予報モデルの重要性

ACE 衛星によって太陽風中の擾乱を地球に到達する約 1 時間前に上流で観測できることはすでに述べた。この擾乱が地球近傍の宇宙空間にどのような変動をひきおこすのか調べるのが、宇宙空間物理学の大きなテーマである。宇宙空間物理学の進展により、3 節に述べたように磁気嵐と太陽風との関連など、これまでいろいろなことがわかってきている。したがって、これまでの宇宙空間物理学の成果を利用すれば、さまざまな予報を約 1 時間前におこなうことが可能である。例えば、アメリカの通信衛星 Telstar 401 が行方不明になった今年 1 月 11 日の磁気嵐では太陽風の圧力の上昇により地球の磁気圏が圧縮され、静止軌道の昼間側の人工衛星が磁気圏の外に出た。このような状況は ACE 衛星のリアルタイムデータがあれば太陽風の圧力上昇をあらかじめとらえることができる。

一方、サブストームと呼ばれる現象のように、太陽風にそのエネルギー源があることがわかっているにもかかわらず、いつそれが引き起こされるか予報できない現象がいまだに存在する。このような現象の総合的な解明のためには、地球の磁気圏のモデル化の研究が必要であるとされている。さらに、予報という観点からは、よく知られている現象についても、さらなる定量的、かつ高精度なモデル化の研究が不可欠である。

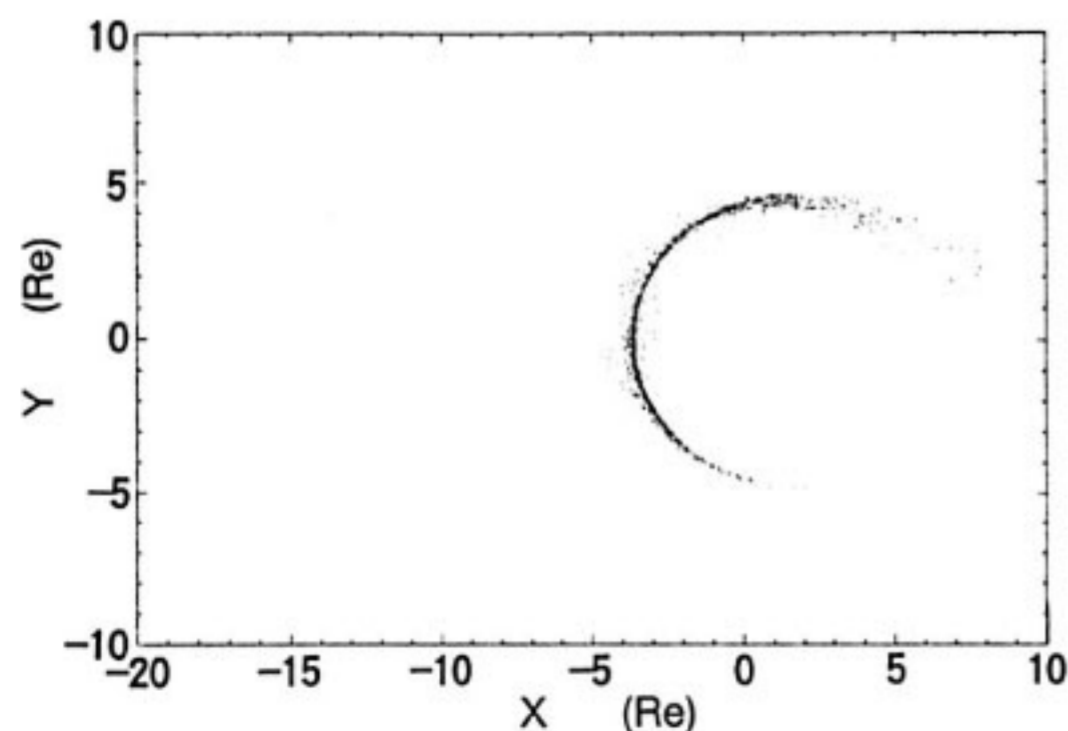
現在、地上の天気予報の高精度化には気象庁の数値モデルの寄与が大きい。これは、地球上の多くの点で観測

されたデータを初期条件にして、気象現象を支配する連立微分方程式の時間発展を数値的に追いかけるものである。宇宙天気予報においても同様な数値モデルが有効に活用されるべきである。ここでは、モデル化の試みの一つとして、計算機を用いた磁気圏内の荷電粒子変動のモデル化と ACE 衛星データの利用について述べる。

5.2 荷電粒子の軌道追跡モデル

磁気圏モデル電磁場中で、様々なエネルギーの多量の荷電粒子の軌道を一度に追跡する数値モデルを開発した。目的は、静止衛星軌道付近での粒子の到達時刻、到達量、エネルギー分布などを予測することにある。この粒子の軌道計算においては、ドリフトだけでなく、磁場に平行方向の運動方程式も解き（第2断熱量保存の仮定なし）、3次元で扱うので、ピッチ角が90度以外の粒子も扱える。初期条件として、多量の粒子がある温度で磁気圏尾部にロードされると仮定した。粒子のエネルギーとしては、サブストームに関連した1~100 keV帯を考慮し、粒子の消滅過程（荷電交換、再結合など）は含まれていない。モデル電磁場としては、磁場に Tsyganenko 1989 モデル⁽³⁾、電場に Volland-Stern モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾を使用した。両モデルともに地磁気 Kp 指数に依存するが、Kp 指数と ACE 衛星のリアルタイムデータから得られる太陽風の磁場変動とを関連づけるために、Ballif 他⁽⁶⁾の経験式を利用した。

第3図に標準偏差が8 nTの太陽風磁場変動が続いているとき、尾部から流入した磁気圏内の陽子の分布を、流入後2.3時間後について示す。x軸は太陽の向きに、y軸は黄道面内夕方向きにとってあり、陽子の分布を黄道面上に投影したものである。夕方側(y>0)に朝側(y<0)より多く、かつ、より高エネルギーの陽子が流れ込んでいる。電子はこの逆の傾向を示す。この結果



第3図 尾部から流入した磁気圏内の陽子の分布。x軸は太陽の向きに、y軸は黄道面内夕方向きにとってあり、流入後2.3時間後の陽子の分布を黄道面上に投影している。単位は地球半径(Re)。

を利用すれば、粒子流入後の粒子の到達時刻等を知ることができる。

さらに、このモデルのより詳細な研究により、静止衛星による粒子観測結果と矛盾しないエネルギー分布図を得た。サブストームにかかわる粒子流入境界概念との関連についても調べている。

6. おわりに

太陽風磁気圏の相互作用は複雑な過程であるから、ACE/RTSWの実現によって地磁気嵐の予報が直ぐに定量的に高確度で行えると考えるのは早い。IMFの南向き成分から予測される1時間後の地磁気擾乱開始は警報として行えると期待している。ACE/RTSWの特徴を十分に活かすには、磁気圏の粒子状態、地磁気などのリアルタイムデータと同時に分析することが大事である。定量的な磁気圏擾乱予測を実現するためには、ACE/RTSWを入力とした5節で述べたような予測モデルの開発が必須である。数値シミュレーションの他にニューラルネットワークなどのAI技術の応用も考えられる⁽⁷⁾。一方で、太陽面現象と太陽風擾乱とを結び付ける研究を進展させるためにもACE/RTSWへの期待は大きい。

参考文献

- (1) J.A. Joselyn, "Geomagnetic activity forecasting: The state of the art", *Rev. Geophys.*, Vol.33, pp.383-401, 1995.
- (2) W.D. Gonzalez, J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani, and V.M. Vasylunas, "What is a geomagnetic storm?", *J. Geophys. Res.*, Vol.99, pp.5771-5792, 1994.
- (3) N. A. Tsyganenko, "A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet", *Planet. Space Sci.*, Vol.37, pp.5-20, 1989.
- (4) H. Volland, "A semiempirical model of large-scale magnetospheric electric fields", *J. Geophys. Res.*, Vol.78, pp.171-180, 1973.
- (5) D. P. Stern, "The motion of a proton in the equatorial magnetosphere", *J. Geophys. Res.*, Vol.80, pp.595-599, 1975.
- (6) J. R. Ballif, D. E. Jones, and P. J. Coleman Jr., "Further evidence on the correlation between transverse fluctuations in the interplanetary magnetic field and Kp", *J.*

Geophys. Res., Vol.74, pp.2289-2301, 1969.

(7) J. Freeman and A. Nagai, "The magnetospheric specification and forecasting

model: moving from real-time to prediction", Solar-Terrestrial Predictions- IV, pp.524-539, 1992.



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



渡辺 成昭
Shigeaki WATANABE
宇宙科学部 宇宙空間研究室
宇宙空間物理学
watanabe@crl. go. jp



大高 一弘
Kazuhiro OHTAKA
宇宙科学部 宇宙空間研究室
電離圏観測
ohtaka@crl. go. jp



島津 浩哲
Hironori SHIMAZU
宇宙科学部 宇宙空間研究室
宇宙空間物理学
shimazu@crl. go. jp

