

## 3-2 太陽風パラメタを用いたニューラルネット法による地球磁気擾乱の予測

### 3-2 Prediction of the Dst Index from Solar Wind Parameters by a Neural Network Method

渡邊成昭 佐川永一 大高一弘 島津浩哲

WATANABE Shigeaki, SAGAWA Eiichi, OHTAKA Kazuhiro, and SHIMAZU Hironori

#### 要旨

常に地球前面にあるラグランジュ静止点で、ACE (Advanced Composition Explorer) は太陽風の各パラメタを観測している。そのうち6パラメタ(速度、密度、磁場3成分と絶対値)をエルマン型ニューラルネットの入力とし、出力を2時間後の地球磁場擾乱指数Dstとする予測モデルを開発した。1998年4月から実時間予報をインターネット上 (<http://www2.crl.go.jp/uk/uk223/service/nnw/index.html>) で公開している。この短時間予報は精度が高く、かつ、定量的であるため、衛星運用、地磁気嵐時の地上インフラへの障害に対する運用情報として役に立つ。1998年2月から10月まで-80 nT以下の磁気擾乱は11個あった。これらのうち、10は最小時のDstの絶対値は地上値と予報値との予測誤差は23%以下であり、初めての試みとしてはおおむね満足できるものと思われる。しかし、10月19日から始まる時期嵐の時48%であった。また、人工入力により、パラメタの働きを定性、定量的に調べた。密度の増加がない場合に対して、存在する場合はDstはおおよそ10%強調されることが分かった。速度の効果は密度のそれに比べはるかに大きいことが確認された。この運用モデルは、他の幾つかのモデルに比べ嵐の大きさに関係なく、安定した予測を行っている。

Using the Elman-type neural network technique, operational models are constructed that predict the Dst index two hours in advance. The input data consist of real-time solar wind velocity, density and magnetic field data obtained by the Advanced Composition Explorer (ACE) spacecraft since May 1998 (<http://www2.crl.go.jp/uk/uk223/service/nnw/index.html>). During the period from February to October 1998, eleven storms occurred with minimum Dst values below -80nT. For ten of these storms the differences between the predicted minimum Dst and the minimum Dst calculated from ground-based magnetometer data were less than 23%. For the remaining one storm (beginning on 19 October 1998) the difference was 48%. The discrepancy is likely to stem from a imperfect correlation between the solar wind parameters near ACE and those near the earth. While the IMF Bz remains to be the most important parameter, other parameters do have their effects. For instance, Dst appears to be enhanced when the azimuthal direction of IMF is toward the sun. A trapezoid-shaped increase in the solar wind density enhances the main phase Dst by almost 10% compared with the case of no density increase. Velocity effects appear to be stronger than the density effects. Our operational models have, in principle, no limitations in applicability with respect to storm intensity.

#### [キーワード]

Dst 予測, 宇宙天気, ニューラルネット, 環電流, 太陽風

Dst prediction, Space weather, Neural network, Ring current, Solar wind

# 1 はじめに

最近の宇宙科学の発達により、宇宙での人間活動、通信、放送及び気象衛星等地上の生活基盤を支える衛星も多くなってきた。また、高中緯度では地上の多くのインフラも地球磁場擾乱の悪影響を受けることが分かってきた。磁気嵐中には異常帯電／放電が生じ、衛星機能を停止することもある。大気の膨張による摩擦上昇が引き起こす衛星姿勢異常変化等は、衛星落下を引き起こすこともある。誘導電流異常増加により地上送電線系に障害を与えることもある。衛星と送電線系等の運用上、地球磁場擾乱指数の短時間ではあるが精度の良い予報を行うことが重要な課題となってきた。

時系列解析の良いところは、太陽風プラズマ及びその磁場と地球磁気圏の解明すべき物理過程が分からない段階でも、答え(予報)が可能であることにある。もし、相関が線形ならば予報は極めて簡単である。すなわち、応答は一義に決まるインパルス応答関数と入力との畳込みで表される。家森他(1979)は線形応答の立場でインパルス応答関数を解析し地球前面の太陽風パラメータ変化と、サブストーム(AL、AE)の最大擾乱時との間には約40分程度応答時間差があることを示した。BlanchardとMcPherron(1992)はAL指数を二つのインパルス応答関数でよく表し、原因が地球朝方と尾部にあると説明した。しかし、二つのインパルスの大きさ及び時間間隔が事例によって異なるため予報には役に立たなかった。地球擾乱の他の指数、例えばKp、AE、AL等も線形予報の努力が多くの研究者によって試みられたが、いずれも良い結果が得られなかった。

Dst及び擾乱時の環電流Dst\*は、Burton等(1975)によって常微分方程式の形で表され、短時間予測の古典的手法として良く引用された。非線型にするため変化するフィルター係数を用いた手法がKlimas等(1997、1998)によって開発された。また、プラズマシートからの粒子を追いかけ、シミュレーションして得た環電流予測法が海老原と江尻(1998、2000)によって開発された。様々な手法のニューラルネットワーク法(以下NN法と略称する)は、宇宙科学の予報分野

に、主としてLundstedtとWintoft(1994)によって導入された。Kugblenu等(1999)は良質の磁気嵐を20イベント選び少量の教師信号を作り、予想されるより良質のモデルを作成した。WuとLundstedt(1997a、b)によって隠れ層から入力層に帰還するElman型(1990)を発展させ、学習時系列を主として嵐時のデータを用いDst予測相関係数を0.9まで引き上げる好成績のモデルを開発した。

運用モデルは、いかなる状況(欠測、大嵐、静穏期)でも良好に働かなくてははいけない。2に、筆者が作成したモデルの1998年の成績と作り方を紹介する。3ではいかにして運用モデルを採用したかを述べる。4では1998年2月から10月までの成績と、幾つかの注目すべき時期の考察を行う。5では太陽風の密度、速度、磁場のDst応答を解析する。6ではBurtonモデル及びその改良型と我々の運用モデルを比較検討し、まとめを7で行う。

## 2 エルマン型帰還NN法の作成

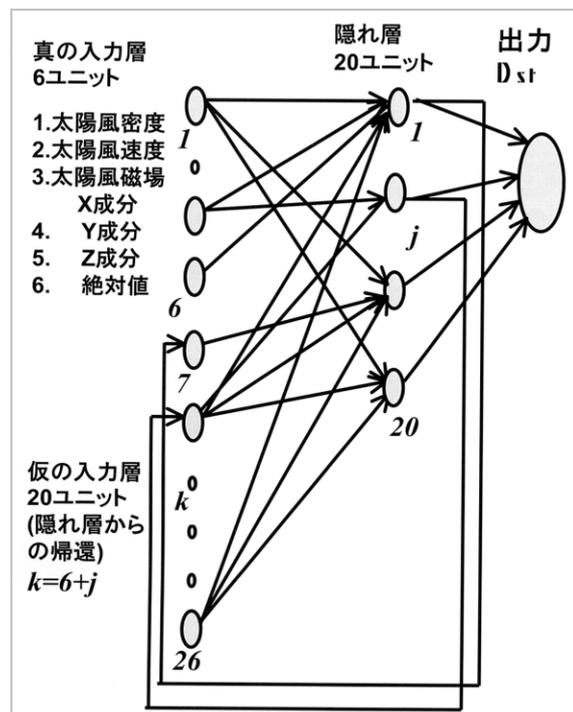


図1 Elman型ニューラルネットワークの概念図

筆者はWuとLundstedt(1997a)を参考にしながら、学習時系列、イタレーションの途中変化

方式等に新規性を持たせてNN法の運用モデルを作成した。第1図で示されるような構造を持つ。すなわち、入力6 ( $R=6$ ユニット)成分は、隠れ層 ( $S=20$ ユニット)と  $w_{kj}$ なる結合係数で結びつき、隠れ層の出力は結合係数  $W_j$ でDstと結びつくと同時に、1時間遅れて、あたかも正規の入力のような顔をして、入力層のユニット7-26に帰還して、再び隠れ層に結びつく。数式表現は(1)(2)式に示される。正規の入力  $I$ と隠れ層から戻った  $V_j$ は各々隠れ層と  $w$ で結びつき、双曲関数  $\tanh$ を伝達関数とした隠れ層の出力  $V_j$ は、直接出力Dstに結びつくと同時に1時間後(時系列の1ステップ後)入力層に戻る。

$$V_j^t = \tanh\left[\sum_{k=1}^R w_{kj} I_k^t + \sum_{K=R+1}^{R+S} w_{kj} V_{k-R}^{t-1}\right] \quad (1)$$

$$Dst = \sum_{J=1}^S W_J V_J^t \quad (2)$$

第1、2式の  $I$ 、 $V_j$ の右肩の  $t$ は時間であり、本稿においては、1時間を単位とする時系列を示す。

したがって、この予報NNモデルを作ることは各ユニット間の結合係数  $w_{kj}$ と  $W_j$ を求めることにある。この結合係数をいかに自然現象(Dst)を反映するように求めるかが重要にしてかつ最終目的となる。現用モデル(モデルC)は1998年12月から運用開始しているが、隠れ層は20ユニットを持ち、入力6個(太陽風速度、密度、磁場3成分及びその絶対値)なので  $w_{kj}$ は( $20 \times 26 = 520$ 個)、 $W_j$ が20個、計540個の結合係数を求め、最も性能の良かった結合係数群をモデルとしている。なお、旧バージョン、モデルAの入力は、太陽風速度、密度、太陽風磁力線の南向き成分入力の3個で、(結合係数群は： $w_{kj}=20 \times 23=460$ 、及び  $W_j$ が20個、計480個を使用)1998年4月から同年11月まで運用していた。本稿で使う座標はGSM系である。すなわちX軸は太陽方向、Z軸はX軸と双曲子磁場の北向き軸とのなす平面の中で、X軸と直角北方向にZ軸の正方向をとる。Y方向はX、Y、Z軸がデカルト座標を作るように定める。

結合係数群を求めるに当たって、はじめは小さい値から始め、第1、2式を計算し、既に、京大C2センターで地上値を基に計算してあるDst(以下、Dstの地上値と略称する)と比べ、その誤

差が最小となるようにイタレーションを10万回近く繰り返して求める。このように結合係数群を求める時は試行錯誤を繰り返すので時間がかかるが、一旦求められると、予報計算は1998当時のワークステーションを用いると1秒以下で終了した。

## 2.1 教師信号と太陽風学習データの作成

教師信号：過去の地上磁場観測から導出されたDst時系列。予想されるべき時系列。

学習時系列：過去のDst地上値に対応する太陽風パラメータの時系列。これを用いて過去のDstを予測しながら、結合係数群、すなわちモデルを自動的にイタレーションで決めていく。

これらの時系列の長さや構成、磁気嵐の教師時系列に占める割合、等で異なるモデルが汎用できる。その評価を行って最終的に二つの候補が6入力モデルに関して作成した。すべての学習データは太陽風データが比較的連続して得られる1978-1982年の米国宇宙科学データセンターNSSDC/NASAの太陽風OMNIデータを用いた。予測すべき教師信号は最終Dstの地上値データを基に作成した。予測モデルを作成する時使用した学習データは地球近傍での観測値、あるいはそれに換算した値である。ラグランジュ静止点(L1点 = 150万km程度太陽方向)にあるACE衛星で観測された太陽風は速度に依存するが、約1時間程度経過して地球に到達する。ACE衛星の観測パラメータは、変動する経過時間の補正を行い、予測モデルの入力データとして使用する。すなわち、運用モデルの予測時間とはL1点から地球までの太陽風の経過時間と、ニューラルネット予測モデルの予測時間(現在1時間)との和になる。現用の運用モデルの予測時間は結局2時間を採用している。

モデルAは1978-1982年で生じた、主として50以上の擾乱時(一つ以上の嵐を含む)に関する、太陽風密度、速度、磁場の南向き成分の学習時系列5077時間を用いて作成したものである。このモデルはACE衛星が打ち上げられ、宇宙天気用のRTSW(Real Time Solar Wind)データの供給しはじめた時に使用した。初期の運用モデル

であるが性能は良い。実際のDstとACE衛星の科学用データによるモデルAの予測Dst(A)との比較を行ったところ、相互相関係数はおおむね0.89程度であった。予測誤差は主として、モデルの不完全性による誤差及びACE衛星周辺の太陽風プラズマ—地球周辺の太陽風プラズマとの悪相関による誤差から構成される。ACE衛星で観測された太陽風プラズマと地球周辺の太陽風プラズマの相関は必ずしも良くないとの報告(Paularena et al. 1998、Richardson et al. 1998)を考慮に入れるとかなり良質のモデルである。

以下に、本稿で用いたElman型予測モデルを紹介する。求める(2)式で与えられるDst時系列はイタレーションの各段階、計算途中で常に地上値と比較され(差の絶対値、相互相関係数)、その差が最小値を取り、限界で停滞した時及び相互相関係数等モデルの良さを決める指数が良い値をとった時、一つのモデルが得られる。このため、極端な事を言えば、少し手法が適当でなくても、常に地上値と比較されて進行するので、良い実績のあるモデルを得ることができる。

本稿では、エルマン型NNを利用したDst予測の方法を述べる。多くの時系列区間を結合して、一つの長い教師・学習時系列を作成する時、結合前後で注意すべき優先条件は：

- i) 区間の終了時と次の区間の始まりとは、静穏時、擾乱時にかかわらず、Dstの絶対値が小さいこと。Bzが正でDstが負の方向にまだ大きい、嵐の回復期を区間の端に持つてくることは最悪の結合である。回復期から計算を始めると、嵐も何もなかったこととして、静穏なレベルと解釈してしまう。
- ii) Bzがあまり差がなく、できるだけ滑らかに結合できること(ただし:Bzは正で0近傍)
- iii) 速度があまり差がなく、できるだけ滑らかに結合できること

である。これ等を念頭に置いて、各領域を結合させて、長い時系列を作成する。

密度も大きな不連続なく結合できれば、申し分ないが、前記を優先させると多くの場合、ある程度不連続になるのは避けられない。しかし、実際の自然現象において、他のパラメタが滑らかでありながら、密度だけが急に高くなることも多いので、さほど気にすることもなさそうで

ある。いずれにせよ、前記の条件の優先度を高く持つてくること。

なお、経験的には、Dstの絶対値の大きい擾乱時だけを、学習させて作ったモデルBよりも、静穏時も多く入れて学習した方が擾乱時にも安定して良い予報を行った。モデルCは学習時系列の44%は静穏時のデータである。

## 2.2 イタレーションの操作

### 2.2.1 イタレーションのはじめ

(1)(2)式中の $w_{kj}$ と $W_j$ は小さい値とする。筆者は小さい乱数を用いた。 $V$ は小さい値。 $W$ の次のイタレーション段階への変化分： $\Delta W$ も小、もしくは0。

以下の式に出てくる、 $\alpha$ は1に近い数字、 $\eta$ は0に近い数字を設定するのが良いようである。

### 2.2.2 イタレーションの途中

予想値と求める値との差の絶対値平均は

$$E = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N (T(t) - Dst(t))^2 \quad (3)$$

で表される。Tは予想されるべきDstの地上値、Dstはイタレーションの有る段階での予測値である。tは時間若しくは、時系列中のサンプリングの順番である。

このように、イタレーションの各ステップでEを計算し、どの位モデルの精度が上がったかを判定する基準に用いる。ほかにも、相互相関係数等をも計算して性能判断材料に用いる。

まず(2)式中の隠れ層と出力Dstとの結合係数 $W_j$ を求める。イタレーションでの変加分 $\Delta W$ を時間 $\tau$ について求める。

$$\Delta W_j(\tau) = (1 - \alpha)\eta \sum_{t=1}^N \delta' V_j' + \alpha \Delta W_j(\tau - 1), \quad (4)$$

$$\delta' = T' - Dst', \quad (5)$$

$V$ 、 $W$ 共にイタレーションの有る段階での値である。次に入力層と隠れ層ユニットとの結合係数 $w$ を決める方式を示す。ある時刻 $\tau$ の $w$ の変化率は1時間前の $w_{\#}$ を使う。

$$\Delta w_{jk}(\tau) = (1-\alpha)\eta \sum_{t=1}^N \delta_k^t I_k^t + \alpha \Delta w_{jk}(\tau-1), \quad (6)$$

$$k = 1, \dots, R,$$

$$\Delta w_{jk}(\tau) = (1-\alpha)\eta \sum_{t=1}^N \delta_j^t V_{k-R}^{t-1} + \alpha \Delta w_{jk}(\tau-1), \quad (7)$$

$$k = R+1, \dots, R+S$$

ただし、式中の  $\delta$  は

$$\delta_j^t = (1 - (V_j^t)^2) W_j \delta^t, \quad j = 1, \dots, S \quad (8)$$

(6) (7) 式の  $\eta$ 、 $\alpha$ 、は  $0 < \eta < 1$ 、 $0 < \alpha < 1$  で与えられる数である。この値によって収斂の早さ及び良いモデルが得られるかどうかを支配する。イタレーション中で自動的に調整される。 $\eta$  の変化率は計算の途中で次の方式を用いる。

$$\Delta \eta = \begin{bmatrix} +a\eta & \Delta E < 0 \\ -b\eta & \Delta E > 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

a、bは適当な正の定数。 $\Delta E$ が正とはイタレーションが発散し、 $\eta$ も減少するので各定数を変更する等対策を講ずる。

### 3 学習データに対する依存性

表1 モデルを作成した学習時系列の諸元

モデル名	学習データの 状態	学習データの 時間	学習パラメタ	稼働期間
モデルA	主として嵐時	5077時間	速度、密度 IMF Bs	モデル第1号 1998年4月から 1998年11月まで
モデルB	主として嵐時	5077時間	速度、密度 IMF Bx,By,Bz,Bt	
モデルC	嵐時と静穏時	9058時間	速度、密度 IMF Bx,By,Bz,Bt	モデル第2号 1998年12月から 現在に至る

表1にモデルと学習データのまとめを示した。モデルAを作成した教師信号の期間で磁場の南向き成分の代わりに、GSM系のBx、By、Bz、Bt(全磁力)を用い、計6入力でモデルBを作成した。さらに静穏期を大幅に増やし、全体の44%を占めるようになったデータ時系列(9058時間)を学習させてモデルCを作成した。モデルB、C共予測値と地上値との相関係数は0.9以上であった。この運用NNモデルの相互相関係数は静穏時、

Dst=-10nT、の時10nTの差は100%の誤差となる。学習時系列には、このような静穏時を多く含んでいるので、全期間にわたる相関係数:0.9と言う値は極めて良質のモデルと言えよう。また、平均二乗誤差( $\sqrt{E}$ )はおおむね10nT程度以下であった。

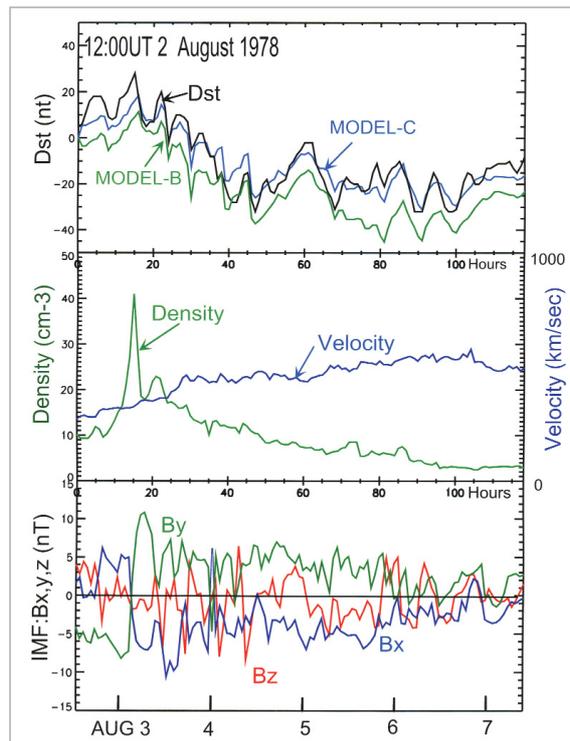


図2 1978年8月2日から始まる140時間 Dst地上値(黒)とモデルB(緑)とモデルC(青)による予測値の比較

第2段目はニューラルネットワークによるDst予測に用いられた太陽風の密度(緑)と速度(青)、第3段目は太陽風磁場: Bx(青)、By(緑)、Bz(赤)

1978年の予測テスト及び1998以来の予測結果によるモデルの評価を行った。モデルB、Cの典型的比較結果として1978年8月2日12 UTから140時間について紹介する。図2の最上段に地上値は黒線、モデルBの予測値が緑線、モデルCによる予測値が青線で示されている。この期間、中段に太陽風速度(青線)を0-1000 km/secの範囲で、粒子(緑線)は0-50個 cm<sup>-3</sup>の範囲で示した。速度は8月2日11 UTに274 km/secから6日20 UTに578 km/sec達する上昇部があり、通常より早くなったが、以後変化の少ない高速の丘を形成し減少していく。密度は3日03 UTに41個 cm<sup>-3</sup>のピークを持ったが急速に減少した。最下段に

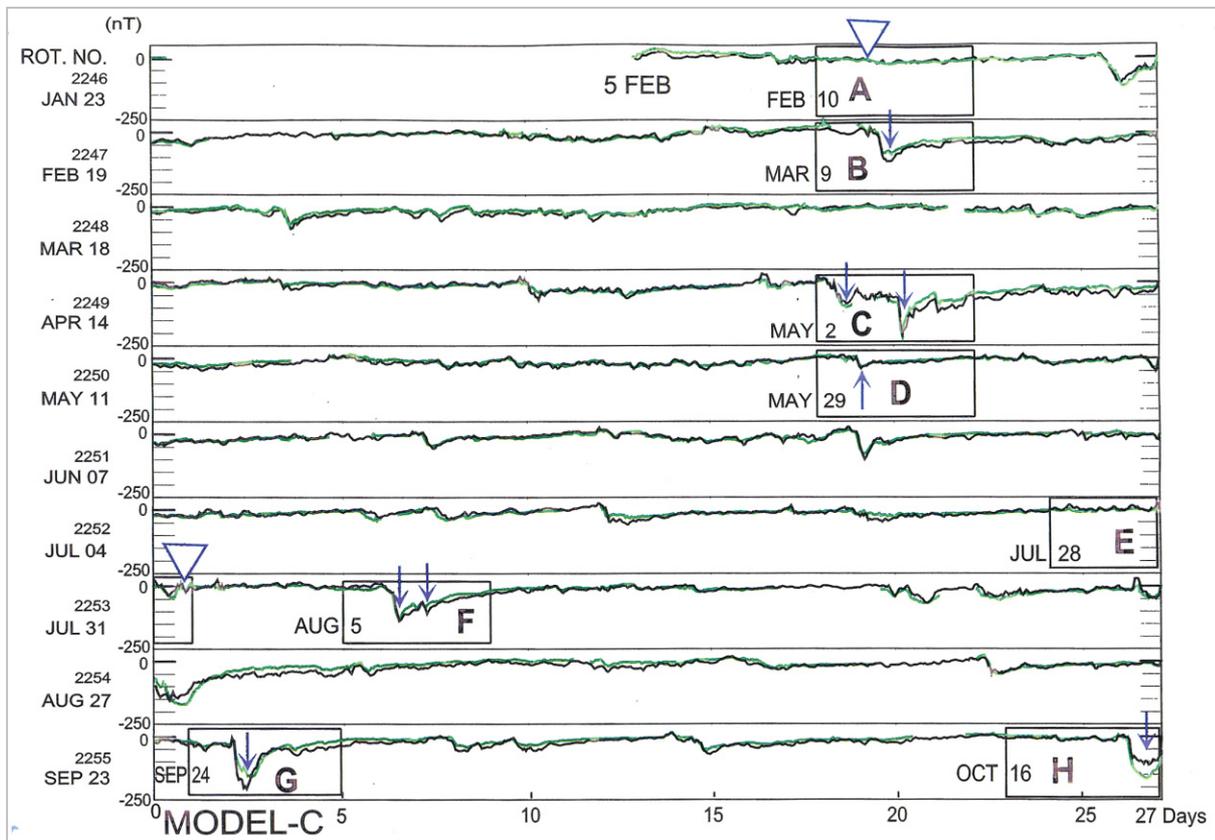
磁場の値が-15nTから+15nTの範囲で示されているが、Bz(赤線)が-10nTより下がることもなく、さらに-5nT以下では持続性がないので、Dstも大きく発展せず、穏やかな時期を示している。予測結果は明らかにモデルCの方が地上値に接近している。これは、静穏期を多く取り込んだための効果と思われる。また、磁気嵐時においても安定してモデルCが良好な予測を行っている。したがってモデルCが、1998年12月からDst運用モデルとして、モデルAの代わりに働いている。

#### 4 モデルCの予測精度

モデルCは太陽活動期の1978-1982年の太陽風データとDstデータで学習した。しかし、太陽静穏期から上昇中の1998年においても有効であることが示されている。

図3は1998年2月から10月までの連続した

Dst地上値(黒線)とACE衛星によって観測されたデータを用い、モデルCで予測した(緑線)成績が示してある。ただし、衛星の事情で欠測した部分は除いてある。使用した太陽風データは較正された最終値：レベル2データとも科学データとも呼ばれているもので、クイックデータではなく、NSSDC/NASA及びACE Science Center for providing ACE dataからWEBを通じて提供されている。太陽風がACE衛星の位置を吹き抜け、地球磁気圏に到達するための、最大応答時間を考慮した1-2時間の予測時間をずらして図3が作られている。図の左端はパネルの始まる日付が記してある。また、太陽のBartels番号が記してある。この期間(1998年2月から10月まで)でDstが-80nT以下の強い磁気嵐は11イベントあった。そのうち10イベントのDstは23%以内の予測誤差であった。残る1イベントが48%と大きな予測誤差であった。これは、ラグランジュ点と地球近傍とのパラメタ相関が期待され



**図3** 1998年2月から10月末までのDst地上値(黒線)とモデルCによって予測した曲線(緑)  
 図の左側に、太陽自転のBartels番号と、開始の日付を示した。四角で囲まれ、AからHまでのアルファベットで示され、日付が示された期間の太陽風のパラメタは図4で詳しく説明されている。

るほど強くなかったことからくる誤差と考えられる。この誤差を除けば、太陽活動が最大であった1978-1982のデータで作成したモデルは、太陽活動の最小期から上昇期に向かう1998年にも有効であることを示している。図3の四角いボックスは、幾つかの注目すべき期間(4日)であり、図4で詳しく調べてみる。

図4において、各パネルで赤い実線が太陽風内の磁場のBz(GSM座標)を示し、フルスケールは-25nTから+25nTである。しかし、パネルCにおいて大きなBzをプロットするため、例外としてフルスケールは-50nTと+50nTに設定した。青線は太陽風速度で0 km/secから1000 km/secまでをプロットしてある。緑線は密度で0から100個/cm<sup>3</sup>の間で描いてある。また、B、Cパネルにおける密度と速度のギャップは欠測を示している。図3の青矢印は嵐の最も激しい時(主相の終わり)を示し、図4の黒い矢印に対応し、おおむねBzが負から正に移行する時刻の付近にある。以下各事象について考察する。

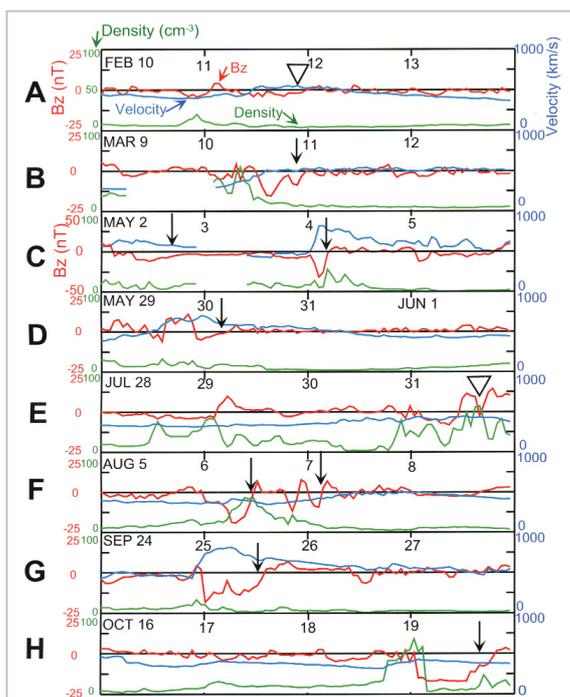


図4 A...Hで示された注目すべき4日間の太陽風パラメータ

太陽風速度(青色)、密度(緑色)とBz(赤色)が示されている。各パネル内の左上に始まりの日付が示されている。矢印は、Dstの極小値。下向き三角は注目して欲しいところ。

(2月10-13日)4Aパネル:速度は2月11日に500 km/sec以上に達し、高速が持続するが、Bzは-3 nT程度より高い値を示すので、下向き▽が示すように、地上値のDstも-29 nTと穏やかな値を示し、予測値も誤差がほとんどない状態である。

(3月9-12日)4Bパネル:速度はデータ欠測の後3月10日03 UTより300 km/secからパネル4Aと同じく上昇し10日15 UT以後は500 km/sec以上が続く。これは太陽1回転前の4Aパネルのと同じコロナルホールから吹き出たものである。10日04 UTと09 UTの40 cm<sup>3</sup>以上の密度ピークは初期相における正のDstピークを形作る。Bz成分は10日15時に-15 nTとなり、-11 nT以下が3時間続く。これが10日20 UTに-116 nTの磁気嵐を作り出す。この時の予測誤差は22%であった。

(5月2-5日)4Cパネル:このイベントは1998年で最も大きな嵐の一つである。速度は二つのピークを持つ。2日06 UTの646 km/secと4日04 UTの825 km/secである。Bzも主として二つの谷があり、2日12 UTの-12 nTと4日03 UTの-32 nTである。これに対応して、Dstの谷の一つが2日18 UTに生じ-85 nTであり、第2のDstの谷は4日05 UTに生じ-205 nTであった。予測誤差はそれぞれ22%、21%であった。これらはコロナルホールと磁気雲と思われる。

(5月29-6月1日)4Dパネル:この時期には最高705 km/secという太陽フレアによる非常に高速の太陽風が5月30日00 UTに観測されている。しかしながら、パネルに示されているように高速域にはBzは正の山があり、かろうじて-5 nT程度の浅い谷しか観測されていないので、図3のD期間に見られるように、穏やかなDstの擾乱しか生じなかった。予測誤差は非常に少なくモデルCは有効に働いている。

(7月28-31日)4Eパネル:1998年で最も密度が多かった期間の一つ。そのピークは7月31日16 UTで57.3 cm<sup>3</sup>であった。この前後のBzは正の山で、下向きの▽で示される領域は動圧が大きいにもかかわらずDstは大きな谷となっていない。予測誤差も小さい。

(8月5-8日)4Fパネル:速度は360-500 km/secの間を緩やかな丘をなしている。一方、密度は8月6日10 UTに43 cm<sup>3</sup>をピークにしたおおむね緩やかな変動をしている。これに対してBzは6-7

日にかけて3回谷が見られる。主たる谷は08 UTで-19.2nTに達するが、21 UTに-11.7nTさらに7日03 UTに-9.2nTの小規模な谷が見られる。これに対して、まず6日11 UTにDstが-138nTの主たる嵐とその回復期の7日05 UTに-108nTの嵐が見られる。各々図3に青い二つの矢印で示してあり、主たる嵐の予測誤差はわずか6%である。

(9月24-27日)4Gパネル:最大826 km/secの大きな速度の山が観測され、呼応してBzの大きな谷(-18nT)があり、大きな嵐が予想される。最小のDstは9月25日09 UTに-169nTを記録しており、予測誤差は18%であった。

(10月16-19日)4Hパネル:この期間中速度はおおむね一定していた。密度は19日01 UTに68 cm<sup>3</sup>の大きなピークを持つが、他の期間は単調である。Bzが問題で、密度ピークから負の大きな値に転じ、-11nT以下の値が19日02 UTから15 UTまで続きゆっくりと回復し正の値となる。したがって-166nTと大きな負のDstの値を予測した。実際の地上値は-112nTであり、大きな予測誤差(48%)となった。しかし、この時WIND衛星(位置はXse=95 Re, Yse=32 Re, Zse=6 Re)もBzとして-15nT以下という大きな負の値を02-15 UTまで観測しており、モデルCの性能が悪いと言うよりは、衛星位置と地球位置の太陽風相関があまり良くなかったのではないと思われる。

## 5 太陽風パラメタに対するDst応答

NNモデルは学習した範囲内の現象を反映している事は問題ないが、更に拡張した現象をどの程度反映させることができるかどうかは難しいことで、現在その専門家の議論の種となっている。しかるに、モデルCに、自然界でありそのような人工的入力を加えて、太陽風各パラメタの役割を明らかにする試みを行った。自然界における二つの事象で、一つのパラメタだけが独立に変化し、他のパラメタが二つの事象で同じ変化をする事象があれば、一つのパラメタの役割が観測事実から経験則として引き出すことができる。しかし、太陽風との応答系では速度、密度、磁場各成分等多くの入力が基本的に考えられる

ので、前記のような事象を観測データから見つけ出すのは極めて難しい。特に磁場のZ成分以外はより弱い働きをするので、大きな働きをする他のパラメタの中に埋もれてその特性を従来の手法で明らかにすることは極めて難しい。NN予測法に人工的に変化させたパラメタを入力し、その働きを探ることは意義深いと思われる。なお、この時の入力はラグランジュ点近傍のパラメタではなく、地球近傍と設定する。すなわち、L1点から地球近傍までの伝播ゆがみを避けるためである。1978-1982年のデータによる予測の相関係数は0.91以上であり、かつ1998年以降のACEデータでも好成績を上げているので、NN法による試験には適切と思われる。また、微妙なマイナーパラメタの働きは他の学習時系列から作成したNNモデルでも確かめた。定性的にはモデルCと同じ傾向であったので本稿で紹介することとした。

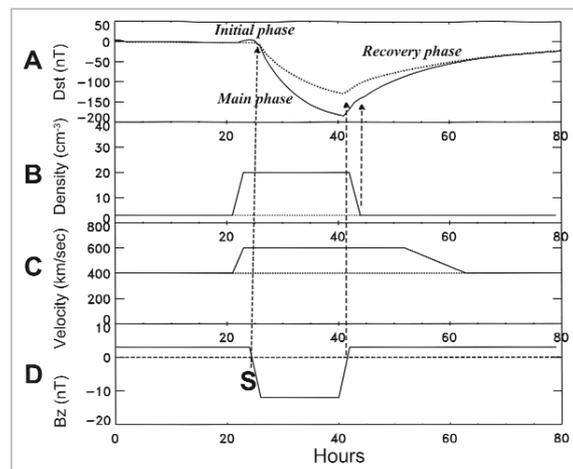


図5 人工入力をモデルCに入れて嵐を作った様子

パネルAは計算(予報)されたDst、パネルBは太陽風密度、パネルCは太陽風速度、パネルDは惑星間空間の磁場のZ成分。パネルA、B、Cでの点線は、密度と速度共に変化のない場合。実線は密度、速度共に変化のある場合。

はじめの試みとして、実際の太陽風の振る舞いとしておかしくない単純なパラメタの動きを入力とした。図5において太陽風磁場のX-Y成分に関してはBx=10nT、By=0nTとし、Bzははじめ+3nTに固定し、Sと記した時点(Bz成分が負、すなわち南向きのスタート時点)で2時間かけて-12nTになる。この状態が15時間続き、2時間

かけて+3 nTに復帰する。はじめは密度、速度の変化なく、それぞれ $3\text{cm}^3$ 、 $400\text{km/sec}$ とする。これらは図5のB、Cの点線、Dパネルの実線で表される。この入力による出力(モデルCで計算されたDstの様子)はAパネルの点線で示されるように、動圧の変化がないので初期相で見られる正のピークは見られない。この時の主相で最小Dstは、約-130 nTまで発達し、Bzが負から正に転じる所で回復期となる。これは図3と図4のB、C、D、F、G、Hパネルの矢印で示されるように、実際の嵐でもBzの谷の終わり付近でDstの最小値がくる。

嵐の次の試みでは、Bzの振る舞いは前の試みと同じでパネルDの実線で示される。速度はS時-3時に $400\text{km/sec}$ から2時間かけて $600\text{km/sec}$ に上昇し、30時間持続し、10時間かけて元の $400\text{km/sec}$ に戻る。密度はS時-3時に $3\text{cm}^3$ から2時間かけて $20\text{cm}^3$ に変化し、20時間続き、後 $3\text{cm}^3$ に戻る。これらの変化はパネルB、Cの実線で示される。動圧の変化があるので、初期相で+7 nT程度の正のピークが見られる。速度変化は動圧変化だけでなく、 $(\mathbf{V} \times \mathbf{B}_z)$ の電場の効果が新たに加わることをも意味する。パネルAの実線が示すように主相で大きな谷が形成され、Dstの最小値(擾乱の最大値)はおおむね-185 nTまで発達し、Bzの負から正への転換点で回復期となることを矢印で示した。また、回復相内で密度の丘が終了すると、Dst曲線がゆがむが詳しくは後に述べる。

### 5.1 密度の効果

図6はBzの谷の継続時間を5時間から5時間ずつ増やし、最長25時間として得られた5個の嵐におけるDst変化の集約を点線で示す。Bx、Byは図5の場合と同じである。密度の効果調べのため速度は $400\text{km/sec}$ で固定(図5パネルCの点線)し、密度の丘がない場合と、ある場合を設定したが、その時系列は図5のBパネルと同様でそれぞれ点線、実線で表してある。なお、図6の第3番目の嵐、すなわち負のBzの継続時間が15時間の場合で作られた嵐、の点線は図5のパネルAの点線と同じ場合で一致している。速度変動がない場合の動圧は図5より小さく思われるが、図6で表される初期位相における正のピークは若干

高く、+10 nT程度となる。誤差の範囲という可能性も捨てきれない。動圧の変化はChapman-Ferraro電流の変化をもたらし、Dstを正の方向に押し上げる。図5パネルAの実線の場合は密度・速度変動を伴い、動圧はより大きい。しかしBzはまだ正方向なので、より早い速度による $\mathbf{V} \times \mathbf{B}_z$ の電場は尾部からの環電流の種となるべきプラズマをより強く押し戻す方向で働く。これが初期位相における正のピークが図5Aの場合より図6の場合が高くなる理由と思われる。

主相では図6の実線(密度の丘がある)が点線(密度変化なし)より負の方向に強調されている。電場はBzが南向き、負の方向であるので、プラズマシートから環電流の方向に多く流れ込む。また、そのプラズマシートに太陽風のプラズマが若干の時間差で入っていくとの報告もEbihara and Ejiri (1998, 2000)によりなされている。これらが、図6で密度上昇、丘を形成した時、Dstがより負の方向に強調される原因と思われる。図5の嵐の場合、Bzの負の期間は15時間で、最小のDstは密度変化のない場合に比べ10%程度強調される。

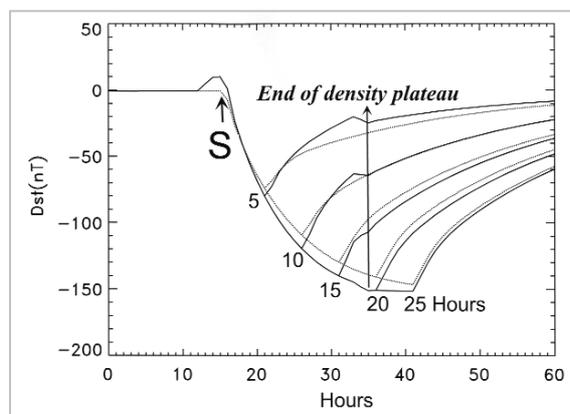


図6 Bzの谷が-12nTであり、継続時間が5時間ずつ長くなっていく時、計算されたDstの集約図

実線は密度の丘があり、点線は密度変化がない場合である。密度変化がないとした時でBzの谷が15時間である時、図5の点線と同じようになる。

図6、7に示されるように、一般に時間とともに南向きBzが延長されると、Dstの絶対値が発展するが、やがて緩やかになり、飽和したように発展しなくなる。Burton等(1975)は、Dstの振る舞いを常微分方程式で表した。その解の第2

項は対数型となるので、大まかな定性的変化は合っているとも言える。すなわち、環電流の生成項と崩壊項がつりあってくるので、Dstの変化が止まり、やがて逆になる。更なる解析は詳しく6で述べる。

回復期では、初期相のごとく、Bzが正となるので動圧は正の方向にDstを押し上げる働きをする。20時間過ぎると前述のごとく密度の丘はなくなる。動圧が急に少なくなるので、Chapman-Ferraro電流の激減をもたらし、Dstは矢印の示す所で減少する。

### 5.2 速度効果

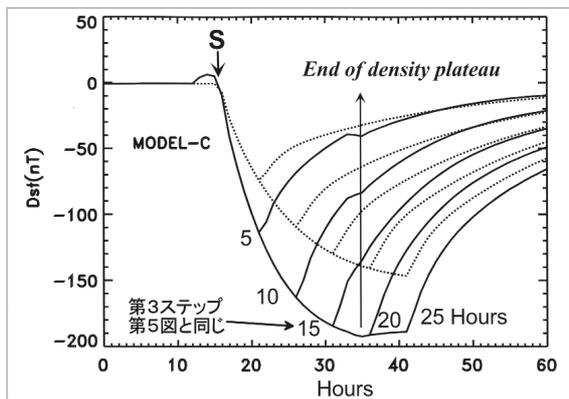


図7 人工入力によって作られたDst

密度(600km<sup>3</sup>)と速度(20cm<sup>-3</sup>)の丘がある時実線、両者の丘がない時点線である。

図7の計算では、密度だけでなく速度の増加を図5Cのように付け加える。主相におけるこの増加は西向き電場を更に強力にし、尾部のプラズマシートからより多くのプラズマがE×Bドリフトによって、地球に向かい環電流の種を運ぶ。点線は図6と同じであるが、比較のためプロットした。第3番目の嵐は、負のBzの継続時間が15時間の場合であり、図5の実線と同じ例である。なお、50%の速度増加(400から600kms<sup>-1</sup>へ)だけの場合及び570%の密度増加(3から20cm<sup>3</sup>)だけの場合、最小Dstはそれぞれ-170nT及び-140nT程度と算出された。速度効果の方が密度効果よりも大きいことが示された。

### 5.3 惑星間空間磁場(IMF)の方位角成分の効果

今までの計算では、X-Y平面上の磁場成分はすべてX方向であった。図8では、X-Y平面上の成分の絶対値は固定し、X軸から各嵐ごとに回転さ

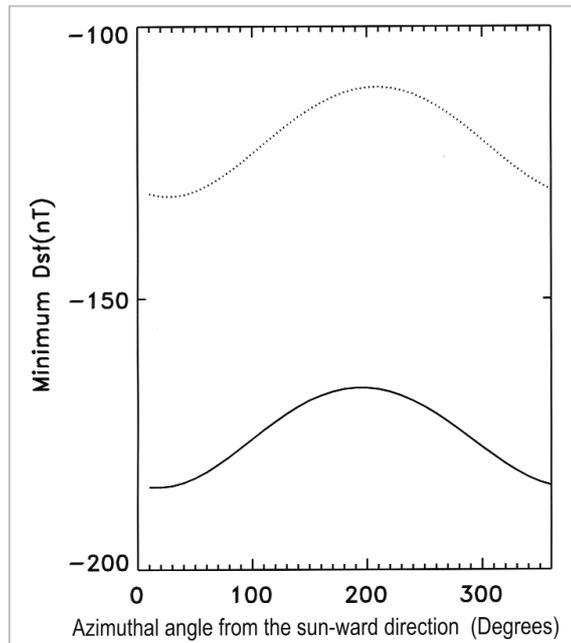
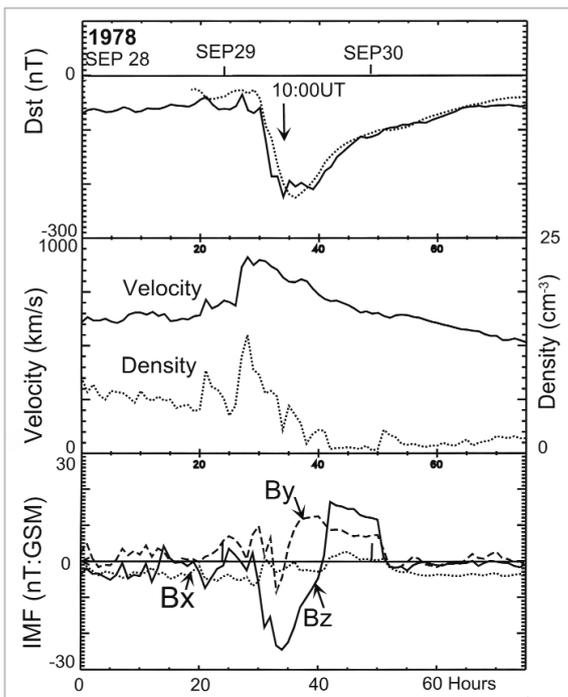


図8 惑星間空間磁場の方位角(太陽方向から反時計方向の角)に対するDstの依存性

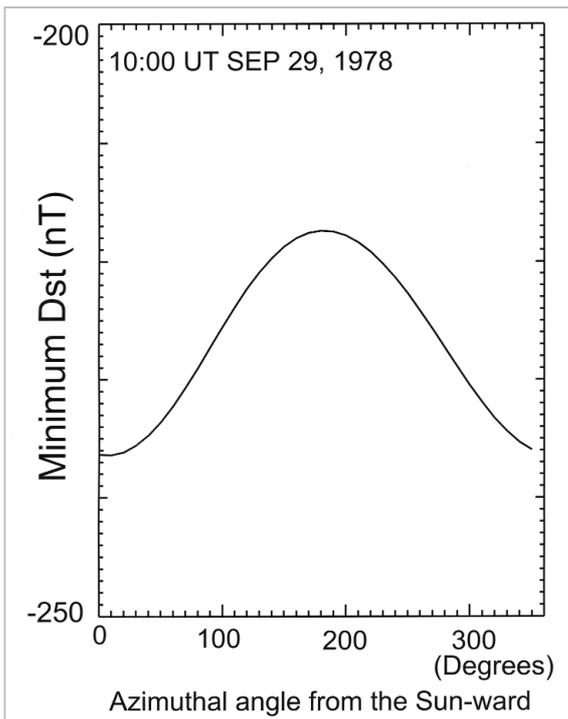
実線は密度と速度の丘がある場合、点線は両者ともなかった場合。

せながら、角度依存性を調べる図である。X-Y平面上の磁場成分を10nTとする例を解析する。密度、速度、南向き磁場は図5の点線、実線と同じく変化をする。予想モデルで計算すると、速度と密度の増加があるなしに関係なく、最小Dst(最も激しい嵐)はX方向から時計回りに10°から30°付近に存在している。図8における最大値と最小値の差はおおむね20nTである。また、X-Y平面上のIMFの絶対値を15nTとすると最大値と最小値の差はおおむね30nTとなる。この定性的効果はモデルBでも同じである。このことから、方位角成分の効果は有意と考えられる。実際の嵐時の密度、速度、Bzを用いX-Y平面上の成分の絶対値を10nTとして試してみる。図9は、よく参照される嵐である。1978年9月29日から始まった嵐で最小地上値は-224nTであった。図9の上段パネルの実線が地上値、点線が予想値で極めて良好に予測している。中段パネルは非常に早い速度(実線)と、密度上昇(点線)が衝撃波を形作る様を示している。下段パネルに示されるように、Bz(実線)の南向き成分が発達し、強い嵐を作り出している。

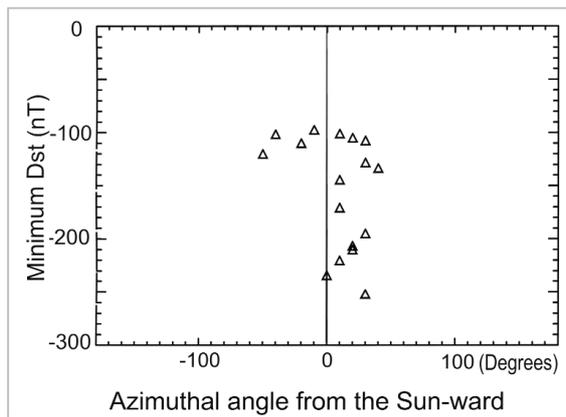
図10は図9に示された嵐で、磁場のX-Y成分以外すべて観測値(図9に示してある)を用い、



**図9** 上段パネル：1978年9月28日から始まる3日間のDst地上値(実線)、実際の太陽風パラメータによる予報値(点線) 中段パネル：太陽風 velocity (実線) と密度 (点線) の様子 下段パネル：惑星間空間磁場のGSM系のX、Y、Z成分。X成分(点線)、Y成分(破線)、Z成分(実線)



**図10** 第9図の実際の太陽風パラメータによる方位角に対する計算されたDst依存性 X-Y面内での大きさは10nTに固定。



**図11** 1978年から1982年にかけて単純な17例について、嵐の最小Dstを与える太陽風磁場の方位角成分依存性

最も激しい値を与える磁場の太陽方向から反時計回りの角と磁気嵐の大きさをプロットした。

$\sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  を10 nTとし、X-Y面上で回転させながらできた各々の嵐の最低値をプロットしたものである。図10によれば、X-Y成分が太陽方向に向かった時嵐が最大であることを示している。この例では、方位角に依存する最大最小の予測の差は20 nT程度である。同様な試みを1978年から1982年に生じた単純な嵐であった17事例について行い、図11に示した。複雑な構造の嵐は最小のDstを与える時刻(最も嵐が発達した時刻)が方位角によって異なり、解析を面倒にするので除外した。図11において嵐の大きさを縦軸に、各嵐についてDstの最小値を与える方位角を横軸にプロットした。この図によれば、嵐の大きさと無関係にX-Y成分がおおむね太陽方向に向かった時、嵐は最も発達するようである。

## 6 議論

短時間予報に用いられる古典的方程式BurtonモデルとNN法について議論する。Burtonモデル(Burton et al. 1975)は必ずしも予報という立場から見ると優秀ではないが、物理過程を知る上で優れている。以下にBurtonモデルで使われた式を示す。

$$\frac{dDst^*}{dt} = F(E) - \frac{Dst^*}{\tau} \quad (10)$$

$$Dst^* = Dst - b\sqrt{P} + c \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 F(E) &= 0 & E_y < 0.5 \text{ mV/m} \\
 F(E) &= d(E_y - 0.5) & E_y > +0.5 \text{ mV/m} \\
 b &= 16nT(nPa)^{-1/2}, & c &= 20nT \\
 d &= -5.4 \times 10^{-3} nT(\text{mV/m})/s \\
 \tau &= 7.7 \text{ hours} \\
 E_y &= VBz & 10^{-3} \text{ mV/m} \\
 P &= nV^2 & 10^{-2} \text{ eV/cm}^3
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

ただし、Pは太陽風動圧、 $E_y$ は西向き電場、Bzは磁場の南北成分

(10)式でDst\*はDstから静穏時の環電流及びChapman-Ferraro電流の効果を取り除いた環電流の嵐時の増加分を示す。(3)式のF(E)は環電流の生成項、Dst\*/ $\tau$ は環電流の崩壊項、 $\tau$ はライフタイム。Burtonモデルでは彼等の統計的処理により $\tau$ を7.7時間と固定している。

このモデルは多くの研究者により参照モデルとしてよく用いられる。その後、 $\tau$ は定数では現象をよく反映してないということで、多くの研究者がDst、 $\epsilon$ (磁気圏への太陽風エネルギーの流入パラメタ)そしてU(環電流へのエネルギー供給率)等によって変化するモデルを提唱している。

この古典的Burtonモデルの著者の一人(McPherron)が後に改良版を提唱した(O'Brien and McPherron, 2000:以下OMモデルと記す)。OMモデルの最大の特徴は、 $\tau$ が夕方向き電場 $E_y$ の関数となることである。すなわち

$$\tau = 2.40 \exp[9.74 / (4.69 + VB_s)] \tag{13}$$

であり、他の係数が若干変化し

$$\begin{aligned}
 F(E) &= 0 & E_y < E_c = 0.49 \text{ mV/m}, \\
 F(E) &= -4.4(VB_s - E_c) & E_y > E_c = 0.49 \text{ mV/m},
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$Dst^* = Dst - 7.26P^{1/2} + 11nT \tag{15}$$

ただし、BsはBzの南向き成分である。

Bzが北向きの場合、 $\tau$ は19.2時間というこのモデルの最高値をとる。Bzの南向き成分が大きくなるにつれ $\tau$ は小さくなる。図12でNN法、Burton法とOM法を、1980年10月10日と1982年3月2日に始まる嵐について比較する。これらの嵐を選んだ理由はO'Brien and McPherron

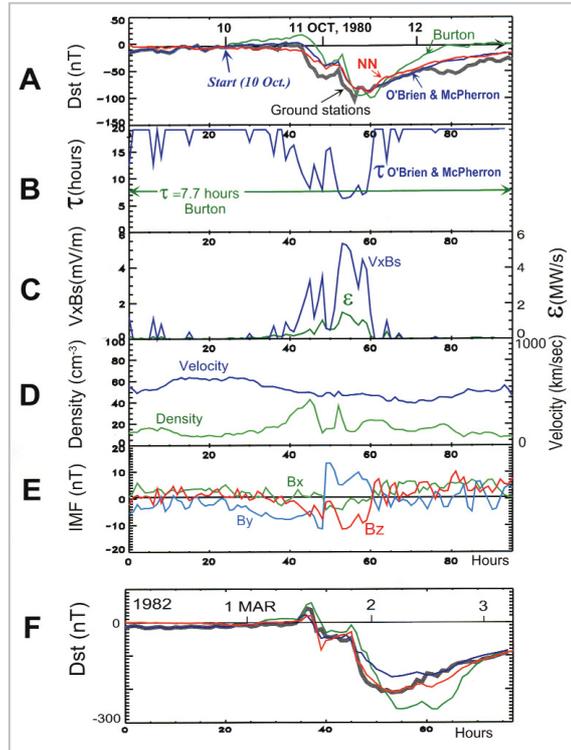


図12 NNモデル、Burtonモデルその改良型モデル(OMモデル)の比較

パネルA: 1980年10月9-12日の嵐時の予測値。地上値(太い灰色)、NNモデル(赤色)、Burton(緑色)、O'BrienとMcPherronモデル(青色)。  
 パネルB: 崩壊時間 $\tau$ 。Burtonモデル(緑)、O'BrienとMcPherronモデル(青)。  
 パネルC: 太陽風のVBsと $\epsilon$ 。  
 パネルD: 太陽風速度(km/s)と密度( $\text{cm}^{-3}$ )。  
 パネルE: 惑星間空間磁場のGSM系での3成分。  
 パネルF: 1982年2月28日-3月3日の嵐に対する三つのモデルによる予測比較。色はパネルAに同じ。

(2000)の論文の図8a、8bで彼等が解析しているからである。この二つの嵐のDst最小値は地上で-104 nT及び-211 nTであった。

図12のパネルAで、各モデルの予測値が比較されている。地上値は太い灰色の線、NNモデルは赤、Burtonモデルは緑色、OMモデルは青色で描いてある。なお、OMモデルの予測値はO'Brien and McPherron(2000)においてMulti-Stepと記された線である。この微分方程式を解くに当たってAdams-Bashforth-Moulton法を用いる。この方法ははじめの4点が既知である必要があるため、実際の地上値を代用して計算した。NNモデルでは、時間依存性が長いので、一日早く計算をスタートさせた。しかし、実際の運用

NN法では、一旦走らせると、何かシステムの故障がない限り、数か月あるいは数年継続して計算が続くので、初期値の効果はなくなっている。

パネルBには $\tau$ に関しての計算結果がプロットしてある。OMモデルの $\tau$ は、初期の初相と回復相でBurtonモデルの固定値7.7時間より長い。パネルAに見られるように、Burtonモデルでは $\tau$ が回復相においてOMモデルより短いため、磁気嵐は早く回復している。パネルCにはOMモデルのライフタイム $\tau$ を支配する $E_y=VB_s$ 西向き電場の大きさと、嵐時に磁気圏に流入する太陽風からの総合エネルギー $\varepsilon$ を示した。赤祖父(2001)は下記のように嵐の大きさを分類した。

弱い嵐  $\varepsilon \sim 0.25 \text{ MW/s}$

並の嵐  $\varepsilon \sim 1.4 \text{ MW/s}$

大変強い嵐  $\varepsilon \sim 8.0 \text{ MW/s}$

1980年10月10日の嵐は、パネルCに示されるように $\varepsilon$ (緑)は約1.5 MW/sに達するので、この分類からすると並の嵐と言うことになる。

パネルDに速度(青 km/s)と密度(緑  $\text{cm}^{-3}$ )が示されているが、速度の変化は緩やかで、非ショック性の嵐であり、初期相があまりはっきりしていない。パネルEに示されている $B_z$ の曲線(赤)が嵐の進行状況を支配している。OMモデルは、NNモデル同様Burtonモデルより綺麗に地上値を追いかけている。

OMモデルは良いモデルであるが、OMモデルの提唱者も明記しているように、 $-150 \text{ nT}$ 以下の大きな嵐には使えない。 $-150 \text{ nT}$ 以下の嵐は結構多くあるのでOMモデルは運用には使えない。一方NNモデルは、ほとんど制限はなく良く予報している。パネルFには参考のためO'Brien and McPherron(2000)の論文の図8bの場合を示す。この時の地上値は太い灰色の線でプロットしてあり、最小値は $-211 \text{ nT}$ であった。Burtonモデルは緑線で描いてあるが、主相から回復相において大きく外れている。これは、 $\tau$ を7.7時間より小さく評価すべきであった誤差からくる。OMモデルでは、Dstの絶対値が実際より小さく評価されているが、これは、著者達が明確に指摘しているように適用圏外であるためであり、批判できない。一方、NNモデル(赤線)では、極めて地上値に近い値と曲線を描いている。NNモデルの有用性が示されている。

なお、地上値の予想誤差は先述したように、L1点と地球周辺環境間の相関誤差が含まれる。Paularena *et al.*(1998)はL1付近のプラズマを6時間ごとの区間に分け、地球周辺と比べ、相関が平均して0.7程度であると報告した。また、Richardson *et al.*(1998)は磁場の方が相関が良いと報告している。Crooker *et al.*(1982)も太陽風パラメータ相関はある程度の限界があるとしている。

## 7 まとめ

ACE衛星が観測した実時間データを使って、1998年5月から稼動しているDstの時間予測モデルを作成した(<http://www2.crl.go.jp/uk/uk223/service/nnw/index.html>)。1998年2月から10月末まで、 $-80 \text{ nT}$ 以下の大きさを持つ大きな嵐は、11例あった。そのうち10例の大きさの予測誤差は23%以内であった。残る一つは43%であった。ACE衛星(地球より150万 km 離れている)周辺プラズマと地球周辺プラズマとの相関が良くないことによると思われる。

地磁気擾乱の基本的要因は、惑星間空間磁場の $B_z$ の南向き成分であることが確認されたが、 $B_x$ の正成分(太陽方向)が擾乱の程度を増大させるように働く。

太陽風の密度変化はダイナミック圧力を増加させる。したがってChappmann-Ferraro電流の増加はDstを正の方向に押し上げる効果を持つ。しかし、 $B_z$ が負の時、主相ではDstを下げる、すなわち激しい嵐にするように密度増加は働く。

NNモデルによる検証では、速度の働きは密度効果よりも大きい。

我々の運用Dst予測モデルは基本的には、ほとんどの嵐に適用できる。

## 謝辞

ACE SWEPAM計測機グループ、ACE MAG計測機グループの皆様、ACEデータを供給するACE科学センターの皆様にご感謝いたします。通読していただいた杉浦正久博士にご感謝いたします。

参考文献

- 1 Akasofu, S.-I., "Predicting Geomagnetic Storms as a Space Weather Project", Geophys. Monogr. Ser., 125, edited by P. Song, H. J. Singer, G. L. Siscoe, AGU Washington DC, 329-337, 2001.
- 2 Blanchard, G. T., and R. L. McPherron, "A bimodal representation of the response function relating the solar wind electric field to the AL index", in Solar-Terrestrial Prediction Proc., vol. 2, pp. 479-486, U. S. Dept. of Commerce, Boulder, Colo., 1992.
- 3 Burton, R. K., R. L. McPherron, and C. T. Russel, "An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst", J. Geophys. Res. 80, 4204-4214, 1975.
- 4 Crooker, N. U., G. L. Siscoe, C. T. Russell, and E. J. Smith, "Factors controlling degree of correlation between ISEE 1 and ISEE 3 interplanetary magnetic field measurements", J. Geophys. Res. 87, 2224-2230, 1982.
- 5 Ebihara, Y., and M. Ejiri, "Modeling of solar wind control of the ring current buildup: A case study of the magnetic storms in April 1997", Geophys. Res. Lett. 25, 3751-3754, 1998.
- 6 Ebihara, Y., and M. Ejiri, "Simulation study on fundamental properties of the storm-time ring current", J. Geophys. Res. 105, 15843-15859, 2000.
- 7 Elman, J. L., "Finding structure in time", Cognitive Sci. 14, 179, 1990.
- 8 Feldstein, Y. I., "Modeling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters", Space Sci. Rev., 59, 83-165, 1992.
- 9 Klimas, A. J., D. Vassiliadis, and D. N. Baker, "Data-derived analogues of the magnetospheric dynamics", J. Geophys. Res. 102, 26993-27009, 1997.1.
- 10 Klimas, A. J., D. Vassiliadis, and D. N. Baker, "Dst index prediction using data-derived analogues of the magnetospheric dynamics", J. Geophys. Res. 103, 20435-20447, 1998.
- 11 Kugblenu, S., S. Taguchi, and T. Okuzawa, "Prediction of the geomagnetic storm associated Dst index using an artificial NN algorithm", Earth Planet Sci. 51, 307-313, 1999.
- 12 Iyemori, T., H. Maeda, and T. Kamei, "Impulse response of geomagnetic indices to interplanetary magnetic field", J. Geomagn. Geoelectr. 31, 1-9, 1979.
- 13 Lundstedt, H., and P. Wintoft, "Prediction of geomagnetic storms from solar wind data with the use of a neural network", Ann. Geophys. 12, 19-24, 1994.
- 14 O'Brien T. P., and R. L. McPherron, "An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay", J. Geophys. Res. 105, 7707-7719, 2000.
- 15 Paularena, K. I., G. N. Zastenker, A. J. Lazarus, and P. A. Dalin, "Solar wind plasma correlations between IMP 8, INTERBALL-1, and WIND", J. Geophys. Res. 103, 14601-14617, 1998.
- 16 Richardson, J. D., F. Dashevskiy, and K. I. Paularena, "Solar wind plasma correlations between L1 and Earth", J. Geophys. Res. 103, 14619-14629, 1998.
- 17 Wu, J.-G., and H. Lundstedt, "Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks", J. Geophys. Res. 102, 14255-14268, 1997a.
- 18 Wu, J.-G., and H. Lundstedt, "Neural network modeling of solar wind-magnetosphere interaction", J. Geophys. Res. 102, 14457-14466, 1997b.



わたなべ しげあき  
**渡邊成昭**

電磁波計測部門宇宙天気システムグループ主任研究員 理学博士  
宇宙天気予報、プラズマ波動

さがわ えいち  
**佐川永一**

電磁波計測部門宇宙天気システムグループ主任研究員 理学博士  
宇宙天気



おおたか かずひろ  
**大高一弘**

電磁波計測部門宇宙天気システムグループ研究員  
宇宙天気予報



しまづ ひろし  
**島津浩哲**

電磁波計測部門シミュレータグループ主任研究員 博士(理学)  
宇宙プラズマ物理学

磁気圏／太陽風パラメータを用いたニューラルネット法による地球磁気擾乱の予測

