

リアルタイム世界地磁気データによる 磁気圏ダイナミックスの診断

上 出 洋 介*

DIAGNOSIS OF MAGNETOSPHERIC PROCESSES FROM REAL-TIME GEOMAGNETIC DATA

By

Yohsuke KAMIDE

This paper discusses several potential problems in constructing an algorithm to utilize ground magnetic observations for predicting the occurrence of electromagnetic processes in the earth's magnetosphere-ionosphere system. It explains how crucial geomagnetic records are in the sense that they contain valuable information on magnetospheric dynamics, such as variations in electric fields and currents. The present scheme operative at the Space Environment Services Center (SESC), however, appears not to take full advantage of geomagnetic data in forecasting magnetic storm/substorm activity. It is suggested that since spatial/temporal patterns of magnetospheric processes are quite complicated, efforts must be made toward quantitative prediction modeling by combining real-time ground magnetic observations and satellite observations with computer simulations.

1. ま え が き

太陽-地球システム (Solar-Terrestrial Environment) で発生する電磁気現象、とくに地球磁気圏擾乱のモニターに、地上で観測される磁場の果たす役割は大きい。地球表面には固定された定常磁場観測点が約 200 カ所にあり、この点宇宙空間を高速で飛翔するわずか数個の人工衛星や、電離層の限られた領域の状態しか測定できないレーダーと比較し、磁場擾乱の時間変動と空間変化の分離が比較的容易である。実際、この 100 年間電離圏、磁気圏の物理的状态を感知するために、地上磁場変動はもっともよく使われてきた量である。磁気擾乱の大きさを使得、地磁気活動指数 (geomagnetic activity indices) も定義され、グローバルな磁気の乱れの度合が人工衛星で測定された物理量、たとえば太陽風スピード、と定量的に相関がとられるようになってから 30 年近くにもなる。

しかし、これらの相関関係はあくまで研究段階の域を出ず、実用にはあまり生かされていない。現在、米国商務省 Space Environment Services Center (SESC*) で行われている磁気圏ダイナミックスの予報に、世界地磁気データはあまり効率よく使われているとは思われない。また、磁気圏擾乱の最も基本的な形態であるサブストーム (substorm) は 1 年に約 2000 個も発生している⁽¹⁾ にもかかわらず、ほとんどの場合、1 年に 10~20 個起こる太陽フレアやコロナホールによる磁気嵐 magnetic storms の予報に主眼がおかれている。

本稿では、シンポジウム「STE 予報モデル」の主旨に鑑み、磁気圏ダイナミックスの現象論的モデルや理論的解釈よりも、実際の予報スキーム作成に向けての問題点を指摘したい。まず、磁気圏擾乱の予報に関連し、今 SESC でどのような方法がとられているかの概略を述

* 京都産業大学理学部
Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

* Space Environment Services Center, R/E/SE2, U. S. Department of Commerce, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80303, U.S.A. Tel. (303) 497-5127; Telex (230) 888776 NOAA BLDR, 592811 NOAA MASC BDR; FAX (303) 497-6004.

べ、次に磁気圏ダイナミクスに関する最新の議論に触れる。磁気圏ダイナミクスを探るための地上磁場データの重要性も指摘する。最後に、最近発表されたリアルタイム世界地磁気データを記録するネットワーク計画を紹介し、この計画とコンピュータ・モデリングとの関係を記述する。

2. 今 SESC で何が行われているか

SESC は政府機関と民間ユーザーのために宇宙環境 (Space environment, あるいは Earth-Space environment) をモニターし、リアルタイムのデータを使い、この環境で発生する現象を予報することを目的としている。ここで、宇宙空間環境とは、太陽、惑星空間、地球磁気圏、電離圏、高層大気を含んでいる。SESC の活動については、Joselyn⁽²⁾⁽³⁾ にまとめられている。SESC に登録されている大部分のユーザはローカルな現象よりも、汎世界的地磁気活動度に興味をもっているが、地磁気活動のレベルによって直接・間接に影響を受ける現象は、ユーザーの要求を大別すると次の7つになる。

(1) オーロラ——このカテゴリーに含まれるユーザーは、最先端に行く研究者と全くの素人である。前者の行う研究プロジェクトは、とくにロケット・バルーン実験を始めとする地上、宇宙での観測項目は、オーロラの出現と密接な関係があるし、後者では、とくに中・低緯度に住む一般市民は、神秘的な光の饗宴に強い興味をもっているからである。

(2) 電波通信、レーダー——オーロラをひきおこす荷電粒子の降下により、高緯度、中緯度の電離層が乱れる。とくに HF (High Frequency, 3-30 MHz) 通信システムは大きな打撃を受ける。また、極光帯の VHF (30-300 MHz), UHF (300 MHz-3 GHz) レーダーも異常データを出し、人工衛星が高層大気を運動すると、衛星の各部分が異なる効率で帯電する。これが放電するとき、衛星のエレクトロニクスに障害をおこすことがある。もちろん、高エネルギーの宇宙線による“直接”ダ

メージも深刻であるが、衛星全体の帯電の確率は地磁気活動度が高くなるにつれて高くなる。

(3) 衛星抗力——降下粒子や電離層電流は中性大気を温める。ときには大気密度が1ケタも高まり、摩擦抗力を大きくする。抗力は衛星の形や材料によるが、衛星の軌道や寿命を予測する機関にとって重大である。

(4) 誘導電流——地球磁場が変動すれば、誘導電流がオイル・パイプラインや通信ケーブル、送電線に流れる。パイプラインでは流量計にエラーをおこしたり、腐食を速める。送電線の場合はもっと深刻で、変圧器にダメージを与える。

(5) 地球物理的調査——“物探”とよばれる、オイルや鉱物を探し出したり、考古学的調査には地磁気の強度マップを使う。航空測量を使って磁気マップを作成するときには、擾乱状態ではいけない。一方、磁気マップを作成するときには、擾乱状態ではいけない。一方、磁気テルリック (telluric) 法と呼ばれる地下の電気抵抗を探索するときには 1 Hz 以下の磁気擾乱データを使う。

(6) 磁気生物学——地球磁気の変動が生態系に影響を与えている証拠が多く蓄積されてきている。とくに、伝書鳩や渡り鳥は、飛ぶ方向を探るために地球磁場を使っていることは実験により明らかである。伝書鳩のレースは磁気嵐の状態では危険を伴う⁽⁴⁾。第1図は1988年6月の国際伝書鳩レースで、フランスからイギリスへ向けて放たれた約5000羽のうち、95%近くの鳩が方向感覚を失って行方不明になったという新聞記事(1988年7月3日付読売新聞)である。

SESC ではこれらの7つのカテゴリーのユーザーを対象にし、経験則を使って磁気嵐、擾乱の予報を出している。実際の方法は、大別して次の2つがある。

1. 太陽観測データを用いて磁気嵐を予報すること——たとえば、フレアー、コロナホール、フィラメント消滅や磁気嵐の回帰性、持続性を観測データより察知する。しかし、問題は、フレアーやコロナホールのすべてが嵐をひきおこすわけではなく、その確率は実際半分以下である。したがって、現在のこのスキームによれば、磁気

帰って来ておくれ
フランス中部から英国北部
へ向かう伝書鳩・レースで
四千羽以上のハトが行方不明
になり、飼い主らが悲嘆に暮
れている。

専門家の話によると、伝書
鳩の大群は、レース初
日の六月二十四日に一時間三
十分をわたり続いた太陽の
黒点が大爆発するフレアー現象
が原因らしい。この現象で、
ほとんどのハトが方向感覚を
失ったとみられる。

一日後のレース閉幕直ま
でに英国にたどり着いたハト
は五千羽のうちわずか二百八
十三羽だった。六月二十四日
は年に一回の国際伝書鳩・
レース・デーで、欧州では各
地で四万羽以上のハトが放た
れたが、行方不明の事件が相
次いでいるという。一羽最高
四万羽(約九百二十万円)も
するエリートハトの多くが、
いまだに公園で観光客のくれ
るエサをついばんでいるとみ
られる。

(共同)

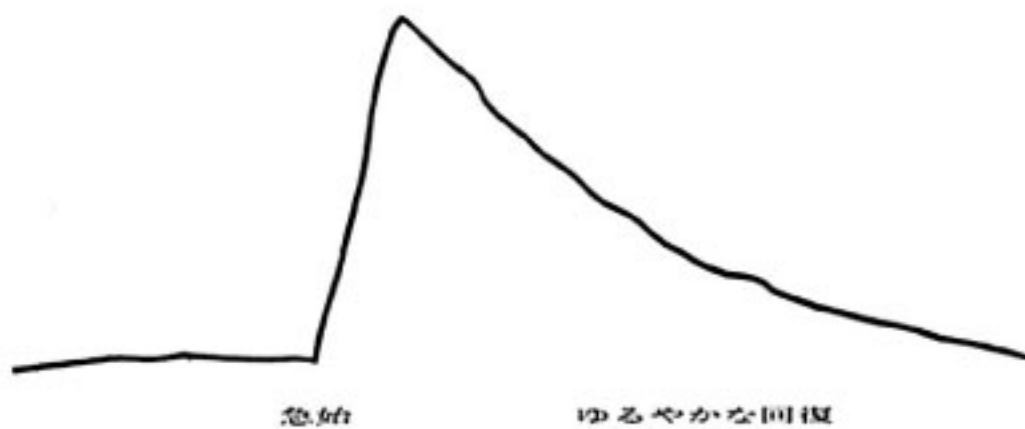
第1図 伝書鳩・レースで4000羽以上のハトが行方不明になったことを報じる新聞記事(読売新聞, 1988年7月3日付)。

嵐予報中の確率は最高で 50% である。

2. Fredericksburg の A 指数を向う 3 日間分予報すること——このアルゴリズムが明確ではない。第 2 図に示したように、自然現象の多くは、爆発的に現象が始まり、ピークに達したあとはゆっくりともとの静穏レベルと復帰するというパターンを示す。したがって、「今」の状態が「明日」も続くと予報しておけば、現象の急始部を除いては、だいたい予報の当たる確率は高いものである。最新の知識と技術を使っての予報の成功率は、このような“非科学的”な方法の成功率よりはるかに高いものでなければならない。ただし、この方法が見事にはずれることもある。第 3 図は、1982年8月の、上から順に、AE 指数、惑星間空間磁場の南北成分 B_z 、太陽風の速さ V 、 D_{st} 指数、さらに 5 か所 (Narssarssuag, Fort Churchill, Barrow, Baker Lake, Tucson) からの地磁気水平成分 (H または X 成分) 記録である。8月8日の AE 指数の変動や高緯度磁場記録は、8日以前、以後のデータに比べると、エラーではないかと疑いたくなるほど静穏である。このような“突然”静穏日はしばしばではないが、磁気嵐の回復期に見出される。

SESC の現在の予報システムについて、筆者が問題点を列記するならば、次の 4 点に分類される。

1. 上に述べたように、使われている予報アルゴリズムがかなり古いこと。経験則を用いるにしても、最新の学会での研究発表をも考慮に入れて、アルゴリズムを最新化すべきである。また、1日に1つのスカラー量 (たとえば A 指数) を与えるだけでは不十分である。
2. リアルタイムデータを眼前に、実際 24 時間勤務に当たっている予報官への太陽-地球系物理学の教育の問題。
3. SESC では、静止軌道衛星で観測している粒子、磁場データをもリアルタイムでモニターしているし、米国/カナダの IMS ネットワークからの磁場データも入ってくる。一時は ISEE-3 衛星からの太陽風データも



晴れ、時々曇り; ところによってにわか雨

第 2 図 自然現象の“突然始まり、ゆっくり終る”という特徴を表す模式図。

あった。これらのデータをフル活用し、総合的な予報をすべきである。

4. 1か月に1回か2回発生する磁気嵐のみならず、1日に平均数回発生しているサブストームの予報も中心課題に入れるべきである。MSM (Magnetospheric Specification Model) と呼ばれるリアルタイムで磁気圏ダイナミクスを定量的に“予測”しようという計画が、ライス大学 (Rice University) と空軍研究所 (Air Force Geophysics Laboratory) の共同プロジェクトとして進んでいるが、これは予報 (forecast) というよりは、今報 (“now” cast) というべきであろう。というのは MSM プログラムを走らせるには、現在の K 指数や衛星 (たとえば, TIROS/NOAA) からの粒子観測データを重要な境界条件として使うからである。

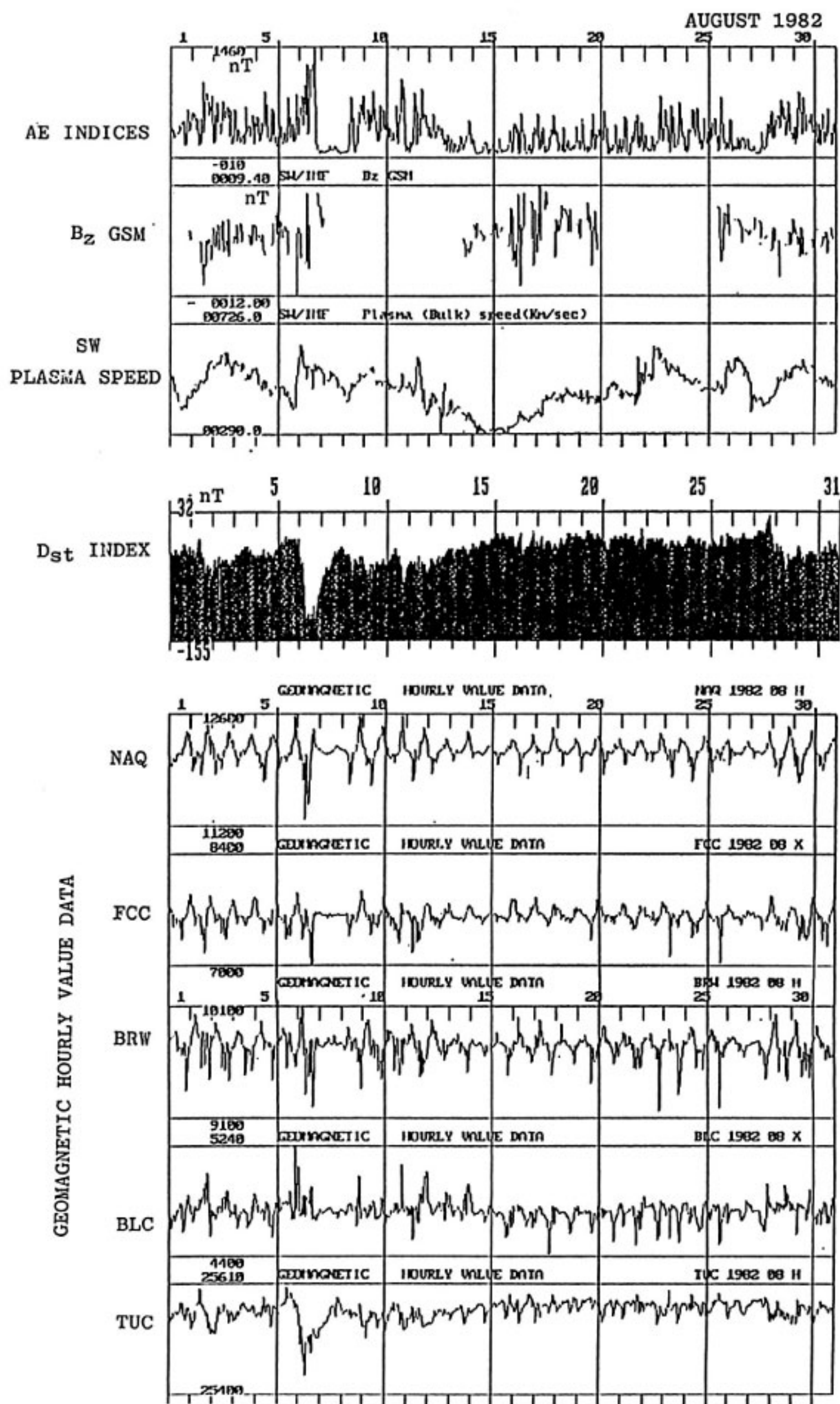
3. 磁気圏ダイナミクス

この章では、地上での磁場データを使って磁気圏過程のダイナミクスを診断したり、予報したりする場合に注意すべきことを述べる。まず、ある特定の磁気圏過程、たとえば磁気圏サブストーム、を予報するという事は、そのプロセスを反映している現象が、(i)いつ (when), (ii)どこに (Where), (iii)どれぐらいの大きさ (how intense) でおきるか、の3つを定量的に与えることである。もちろん予報はすべて確率で表されるから、これらの3つのうちのいずれかが信頼度ゼロ (すなわち、予報できないこと) であっても、予報の情報としては無益ではない。学問的興味からすれば、いかに (how) その現象がおきるかも大切であることはいうまでもない。

3.1 地磁気指数の予報

汎世界的な地磁気活動度を表す指数 (geomagnetic indices) の代表的なものに、 K_p , AE , ap 指数がある⁽⁶⁾。これらの指数は当然磁気嵐 (magnetic storm), サブストーム (substorm), その他による地球磁場環境のグローバルな乱れを定量的に反映している。しかし、複雑な時間/空間特性をもち、局所的擾乱が大きいサブストーム等の詳細を1つのスカラー値で表現することは根本的に不可能なことである。

したがって、地磁気指数が表現するのは、一般的な (あるいは平均的な) 地球磁界の擾乱に限ることを認識すべきである。また、それぞれの指数の定義と、その物理的意味をよく知っておく必要がある。たとえば、 K_p は3時間内の地磁気擾乱 (in nT) の対数に比例する量であり、静穏日からのずれではない。また、 AE は 12~13 のいわゆる AE 観測所での水平磁場成分の最大値 (平均値ではなく) で定義されるので、オーロラ、ジェ



第3図 1982年8月のAE指数、惑星間空間磁場南北成分(Bz)、太陽風スピード、Dst指数と地上5箇所の磁場水平成分の記録。データはすべて1時間値で単位は太陽風スピード(km/秒)以外はnTを用いている。地上磁場観測所は上から順に、Narssarsuaq (NAQ), Fort Churchill (FCC), Barrow (BRW), Baker Lake (BLC), Tucson (TUC)。

ット電流の最大電流密度に比例する量であり、積分された全電流を表してはいない⁽⁷⁾。

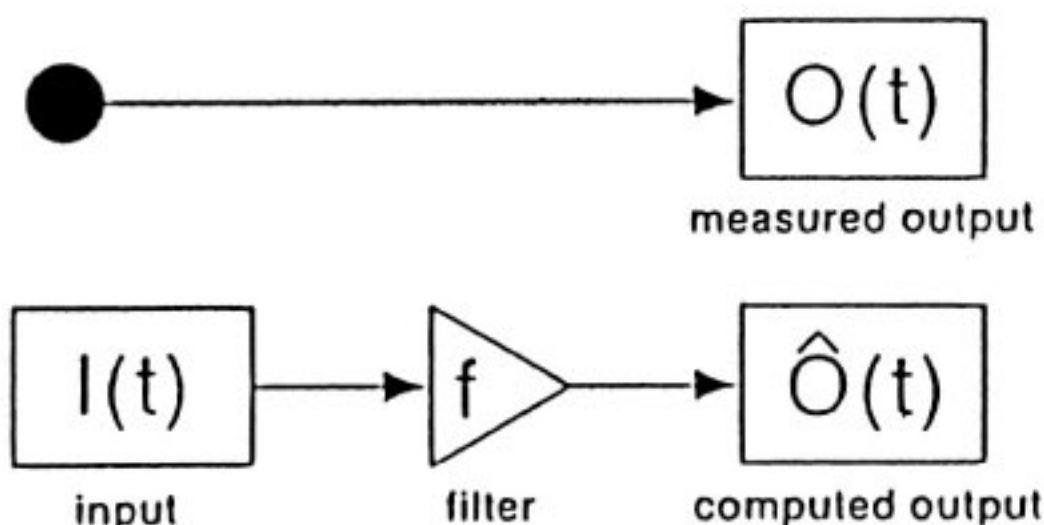
地磁気指数を定量的に予報するには N. Wiener⁽⁸⁾ が連続時系列について開発した線形予測関数 (linear prediction function) を使うのが効果的である⁽⁹⁾。この方法は、第4図に模式的に示したように、線形性と時間不変性を仮定したシステム (われわれの場合は、地球磁気圏と電離圏) にインプット (太陽風および惑星間空間での物理量) が与えられたときの応答または、アウトプット (地磁気変動など) を、地球表面で連続的に観測しているという原理に立っている。数式で表せば、インプット $I(t)$ とアウトプット $O(t)$ に関して、フィルターと呼ばれる関数 f を通して、

$$O(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) I(t-\tau) d\tau$$

の関係性を仮定しているわけである。実際には、長い期間のインプットとアウトプットの時系列を使って、 f をあらかじめ統計的に計算しておく。そうすれば、上の式で f が既知であり、いかなる $I(t)$ に対しても $O(t)$ が予測計算されるはずである。

このテクニックを使って地磁気指数を予測する場合のいくつかの問題点をリストアップしてみると：

- (a) まず基本的な仮定であるフィルターの「線形性」と「不変性」が疑問である。とくに、極サブストームの急始 breakup のように、極光粒子加速の非線形、フィードバック性が重要な要素として指摘されているときに、線形フィルターの使用がどれくらい現実を反映しているかチェックされなければならない。また、この方式は端的に言えば、「過去のフィルター」と「現在のインプット」を使って、「現在の (将来ではなく!) アウトプット」を予測するという一見奇妙なことではある。しかし、インプットとして、たとえば磁気圏前面ラグランジュ点での太陽風量を使うことができれば、“現在”のアウトプットは“将来”の (1時間後の) アウトプットでもあり得る。一番問題なのは、“過去”の平均的フィル



第4図 ウィーナーの線形予測理論を表す概念図 (Clauer, 1986).

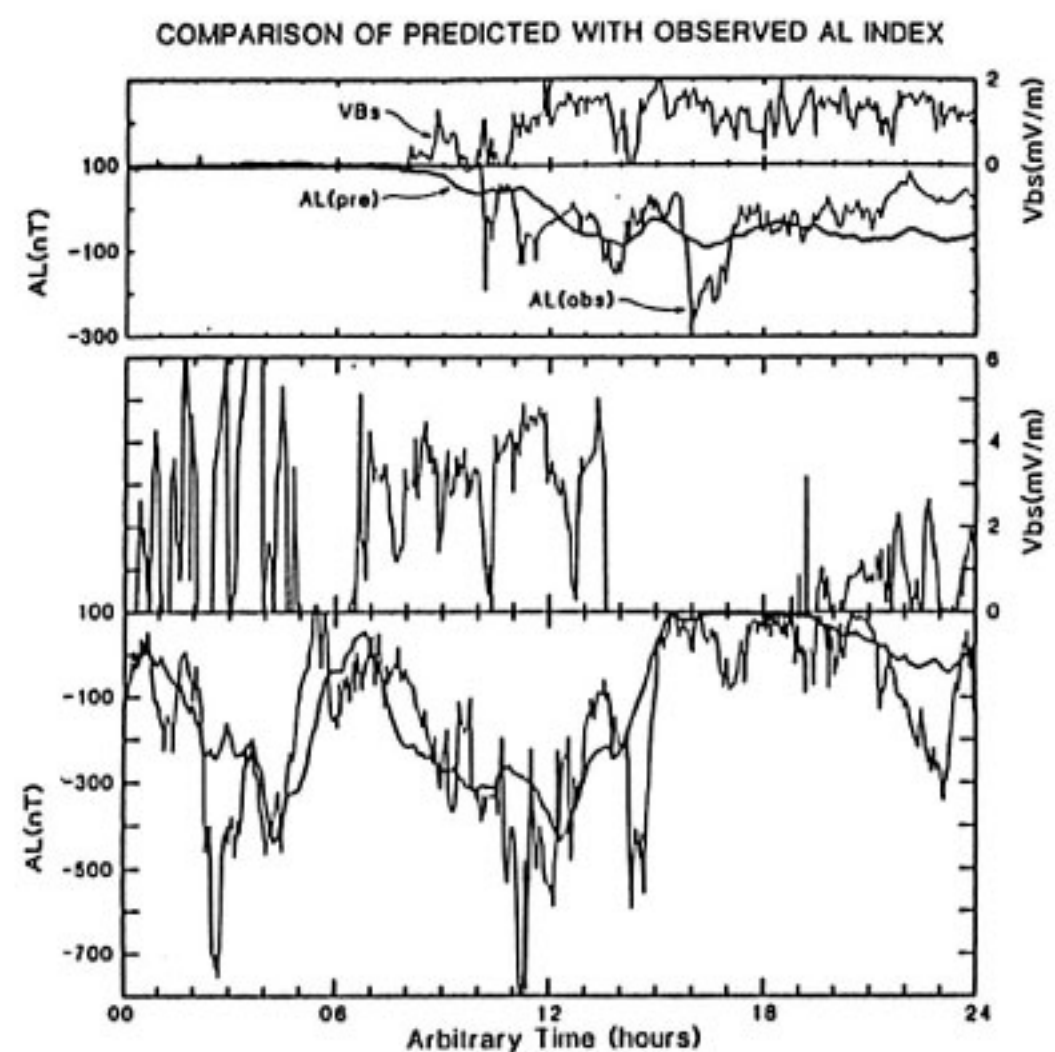
ターがどれくらい現在あるいは未来の磁気圏の状態を表しているか、という点である。

- (b) このように、現実の現象の「非線形性」と「非不変性」の厳密なチェックなしに線形予測法を実データに適用すれば、数学的には高周波部分がなくなった (high-cut filier), あるいは平均化された予測アウトプットが出てくるのは当然である。第5図は太陽風データより予測計算された AL 指数と、その期間の実際の AL 指数を比較したものであるが、変動の平均的ふるまいは予測 (再現) されていることがわかる。しかし、再現 variance はわずか 40~50% である⁽¹⁰⁾。 AU 指数については、再現率は極端に低い。

- (c) さらに線形予測フィルター f は、どの太陽風パラメータをインプットにするかや、どんな地磁気指数をアウトプットに選ぶかにより、特性が大きく異なる。このことは物理的に何を意味するのか不明である。

3.2 2つのモード

この最後の問題に関連し、最近の磁気圏ダイナミクス研究から1つの話題を提供してみたい。それは、地上磁場変動に表れる磁気圏の擾乱には本質的に異なる2つのモードあるいはパターンがあり、そのミックスを地磁気活動指数が反映しているのではないか、ということである。2つの大きさの割合は時間とともに変わるために、データの数学的取り扱いと得られた結果の物理的解



第5図 線形予測理論を使って予測した AL 指数 (pre) と実際に観測された AL 指数 (obs)。上の図は中程度に磁場が乱れている状態、下の図は強く乱れている期間。インプット関数として、上下の図とも $V B_s$ (太陽風の電場: 単位 mV/m) を使っている。(Clauer, 1986: オリジナルは R. L. McPherron より)

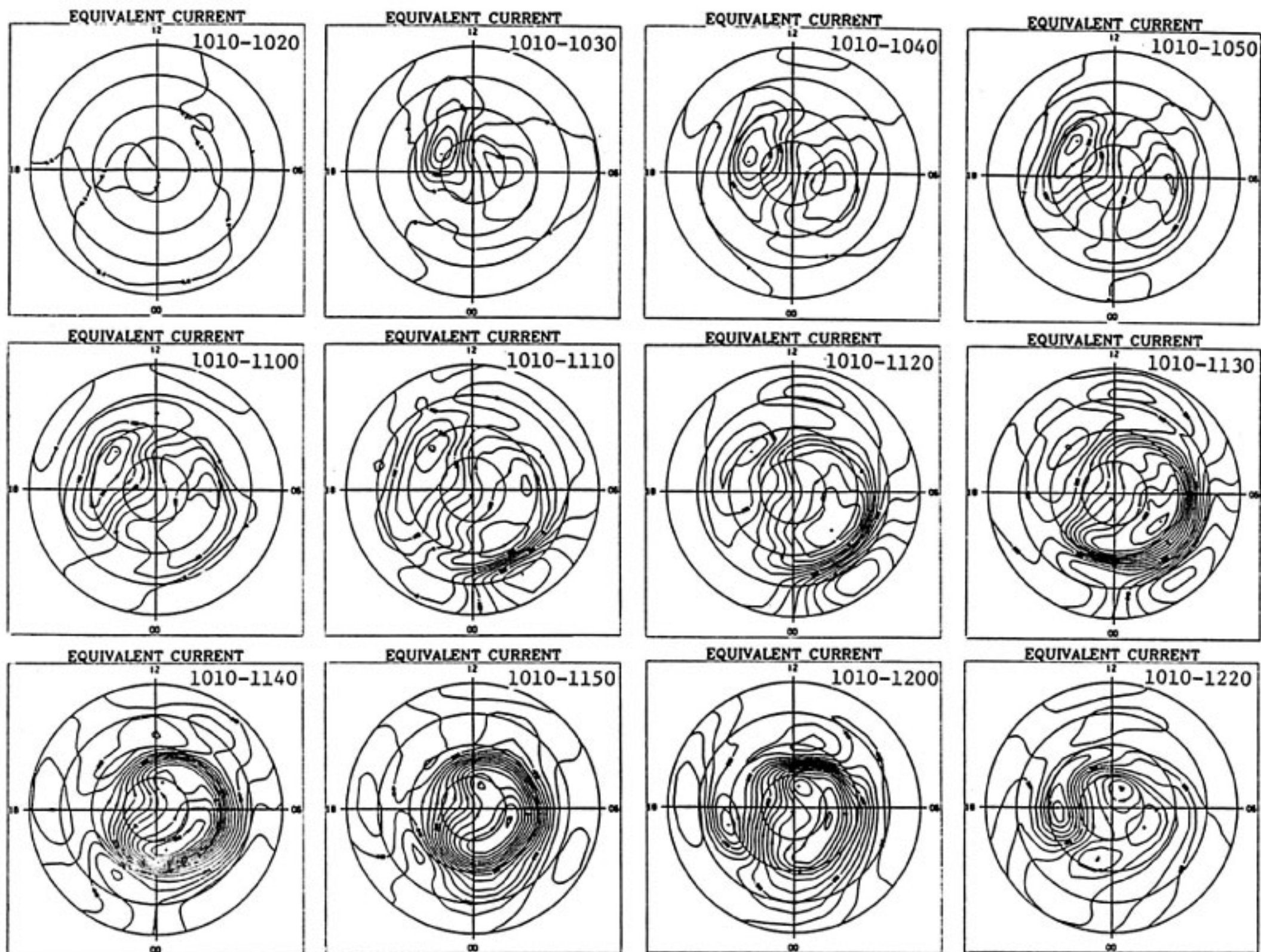
積の間にもいつもギャップが生じる。

その2つのモード/パターンとは、磁気圏ではプラズマ対流とサブストーム爆発である。地上磁場変動としては前者は比較的ゆっくりとした変化をするが、後者は突発的变化を示す。それぞれの典型的な例を第6図に示してある。この図は、孤立したサブストーム (isolated substorm) の急始前から回復までの約2時間について、地磁気データより計算した等価電流系⁽¹¹⁾を表現したもので、サブストームの急始(2段目、左から1番目と2番目の間)以前にはいわゆる2渦 (twin-vortex) システムの電流系が卓越しているのがわかる。またサブストームの急始から爆発期 (expansion phase) には、真夜中から朝方に強い西向きジェット電流が発達しているのが明らかである。このように2つの全く異なる空間パターンをもつ電流系(したがって物理過程も全く異なることが容易に推測される)が存在しているにもかかわらず、地磁気指数というスカラー値(しかもこの値は定義より局所値である)でグローバル量を代表することは不

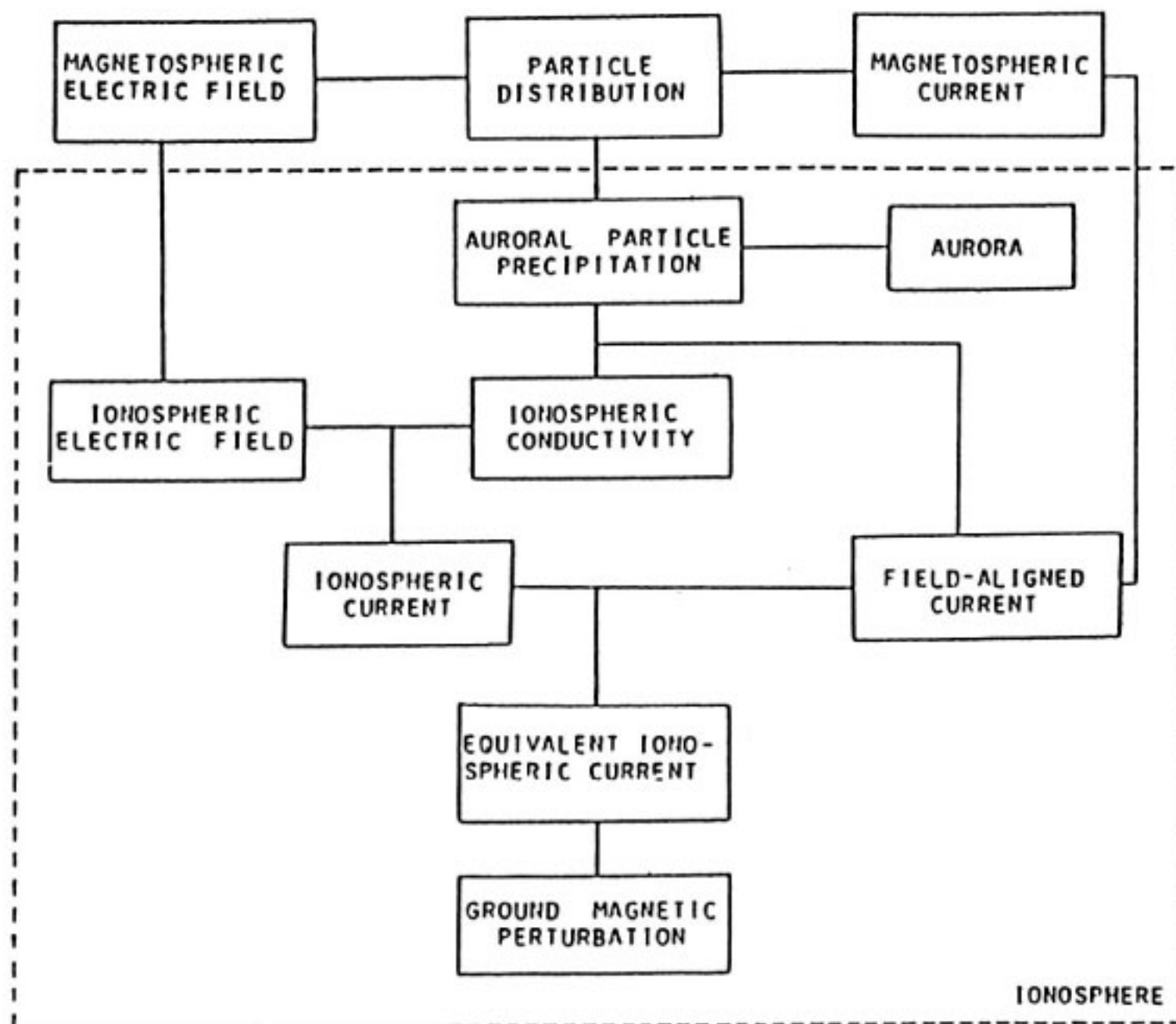
可能なことである。今後の磁気圏ダイナミクスの予報にはこの点を考慮に入れる必要がある。

3.3 地磁気データの有用性

磁気圏ダイナミクスを診断し、予報することに地磁気データの果たす役割は大きい。その理由の1つは、地磁気擾乱の世界マップから電流関数の分布図を作ると⁽¹²⁾、単に磁気擾乱の空間パターンがわかるだけでなく、電離圏-磁気圏カップリングの度合い、磁気圏の電位分布まで推定できるからである。磁気圏の電位モデルがたとえば5分毎に計算できれば、もともになる太陽風-磁気圏相互作用や磁気圏赤道面でのプラズマ過程を予想することができる。磁気圏内の電場、プラズマ圧力の電流分布と電離圏電場、電流の関係の模式図、さらに地上磁場擾乱との関係を第7図に示してある。この図は、地上磁場変動が電離層電流と沿磁力線電流のみによって生ずるという仮定がほぼ満足される高緯度(>50°)についてのみ適用されることに注意すべきである。地磁気データから電位分布を計算するには、電離層(球殻とみなす)の電



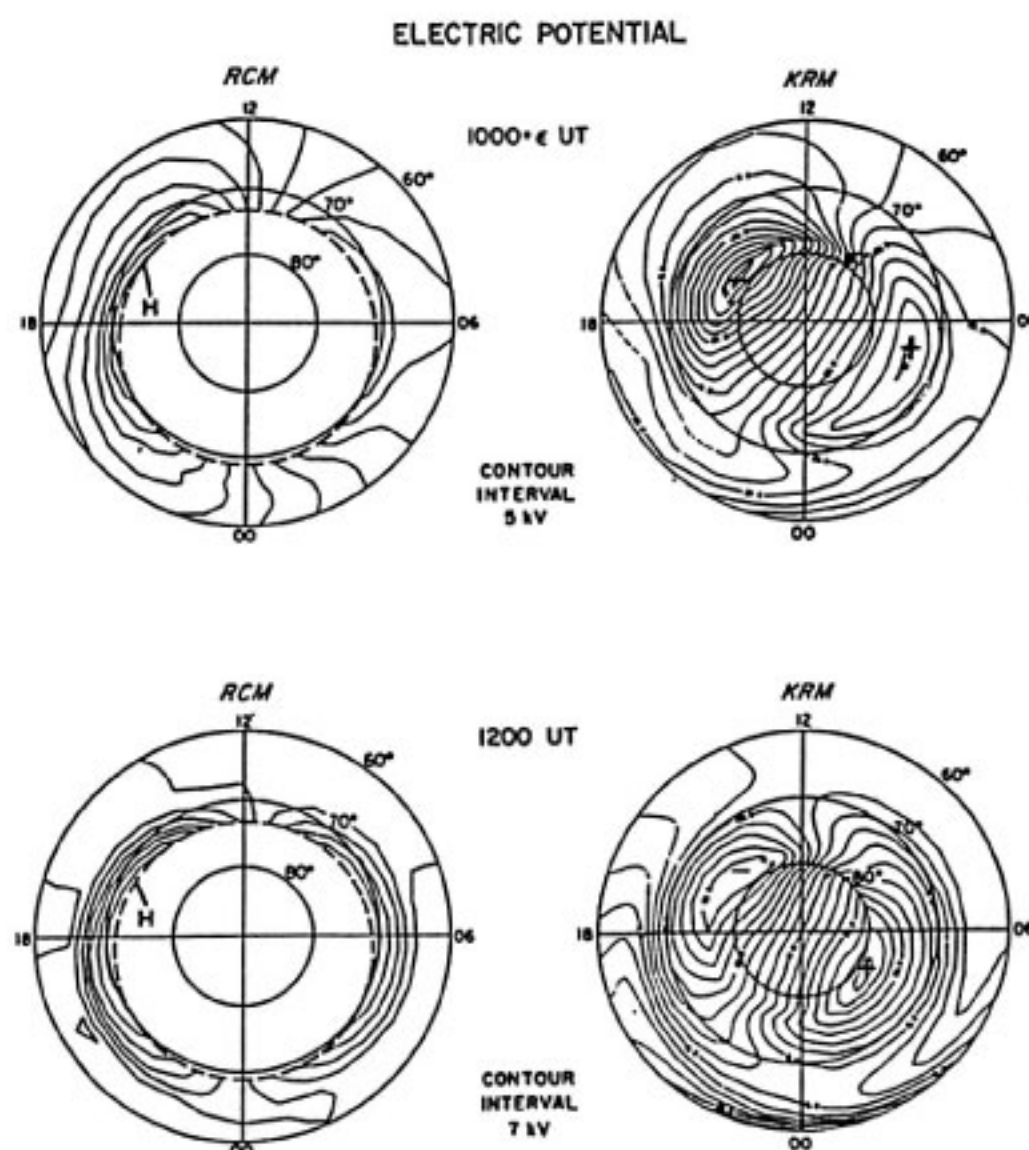
第6図 1979年3月22日(CDAW 研究期間)のサブストームについて、地上の磁場データから計算した北半球電離層等価電流系(Clauer and Kamide, 1985)。となり合う電流線間には8万アンペアの電流が流れている。一番外側の円は地磁気緯度50°を表す。たとえば、時刻1010-1100は、1100 UTの電流関数値を、1010 UTの関数値を基準にして表現したことを示す。サブストームの急始は1055 UT。



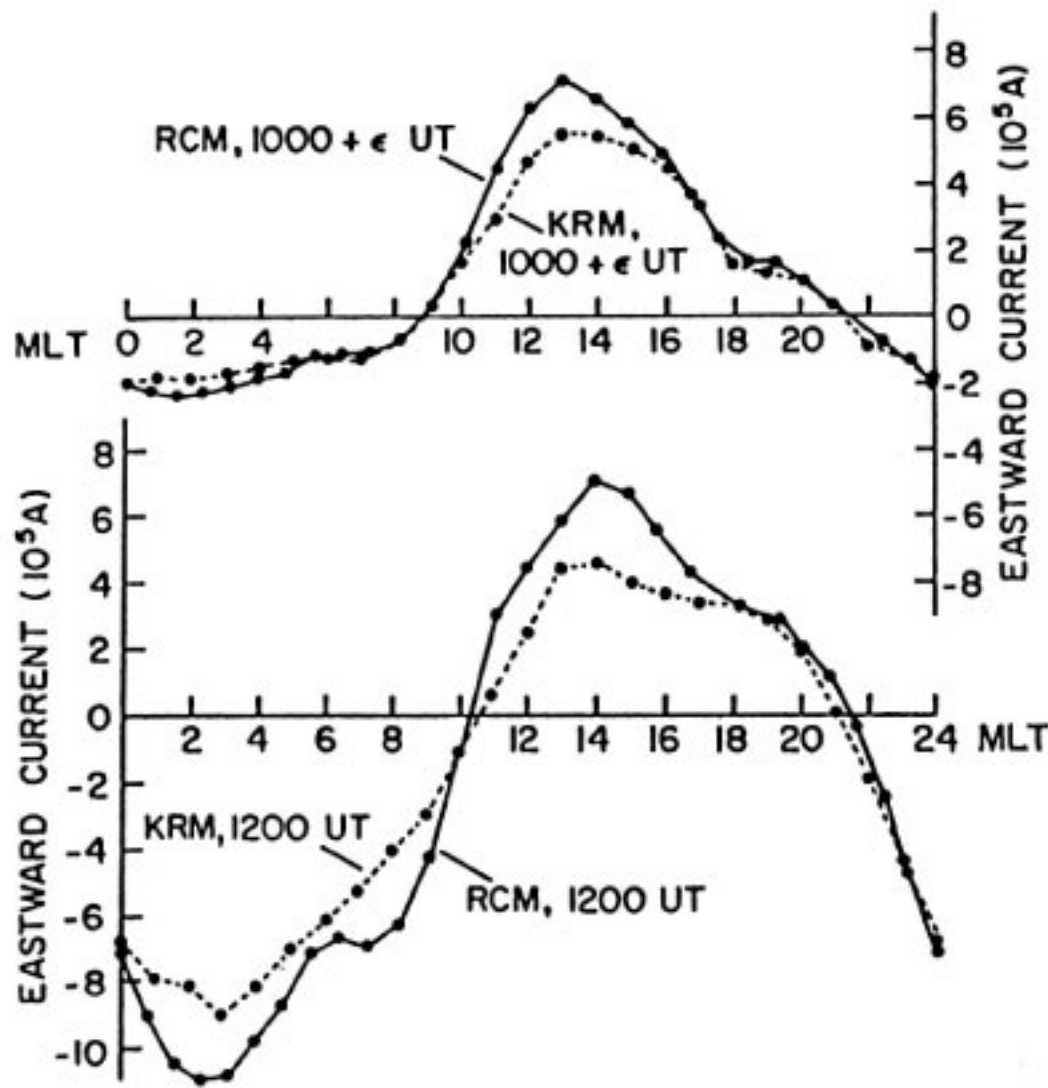
第7図 磁気圏諸物理量(一番上の3つ)が電離圏の量とどのように関係しているかを示す模式図. 地上磁場変動は, 高緯度(>50°)では, 電離層電流と沿磁力線電流が主な源である.

気伝導度を知る必要があることもつけ加えておく.

次に, 地磁気データの有効性について1つのテスト結果を紹介しておこう. RCM (Rice University Convection Model) と呼ばれる大コンピュータ・シミュレーションのモデルがある. これは, 磁気圏赤道面に何種類かのプラズマ粒子をおき, 電場・磁場のもとでの Δt 秒後の分布を追跡するモデルで, 粒子圧力分布から電流を計算し, この一部が沿磁力線電流となって電離層に流れ込むと仮定する. さらにこの電流は電離層電流, ほとんどは極光ジェット電流に結合されているはずであるが, 電離層電流は各点で電場と電気伝導度によりコントロールされる. 電離層の電場は初めに仮定した磁気圏電場と矛盾してはいけないし, 沿磁力線電流はもとの磁場分布を変形させる. これら一連のプロセス(といっても Δt 内では準定常状態とみなす)は, 極冠境界での電位分布を境界条件として適当なグリッド上で解くことができる. 境界での電位は日時を指定して, 極軌道衛星の観測データより決定し, インプットする. 第8図の左側に, こうして求めた電位分布をサブストーム開始前と, ピーク時に対して示してある⁽¹³⁾. RCMにより, 第7図のいくつかのパラメータが計算できる. その中から電離層電流と沿磁力線電流を選び, 地上の磁場を計算する⁽¹⁴⁾.



第8図 RCM(ライス大学プラズマ対流モデル)とKRMアルゴリズム(地上磁場データから電離層量を計算する方法)から計算した電位分布. 上の図はサブストーム爆発直後(1000+ε UT), 下の図はサブストーム最大期(1200 UT). RCMは, 磁力線が開いている領域(極冠域)を扱うことができない.



第9図 第8図で示した2つのUTについて、RCMとKRM法から計算した東西方向の電離層電流(積分値)。

こうして得られた地上磁場擾乱ベクトルは、この日時に実際観測されたものではないので、仮に理論的磁場変動記録 (theoretical magnetograms) と呼んでおこう。図8の右側に示した2つのダイアグラムは、この理論磁場記録から出発し(磁気圏プラズマではなく) KRM法⁽¹⁵⁾を使って電場分布を計算したものである⁽¹⁶⁾。左側と右側には明らかな類似点があり、第9図に示したように極光ジェット電流の強度も85%の精度で両者(RCMとKRM法)が一致している。RCMのシミュレーションは、第8図でわかるように、極冠域、すなわち磁力線が開いている領域、には適用されないが、地上磁場データから出発するKRM法にはこのような制約はない。このテストの成功は、地上の磁場観測ネットワークを使って、磁気圏電位、プラズマ過程の診断を量的に行える可能性を示唆している。

4. 将来

前章で述べてきたことは次のようにまとめることができる。

- (1) 地上で観測される磁場変動は磁気圏で発生している様々な電磁現象に関する重要な情報を多く含んでいる。地球表面には約200もの定点観測所があるため、観測された磁場変動の時間/空間の分離が比較的容易である。
- (2) したがって地上磁場データを効率よく使えば、(i)汎世界的磁場擾乱、(ii)電離圏-磁気圏ダイナミクス過程の予報に有益である。しかし、現在のSTE予報システ

SESC SATELLITE BROADCASTS

GEOMAGNETIC DATA

Total Field	1-min averages in gammas measured at Boulder, Colorado
Geosynchronous	1-min values of the geomagnetic field components at two geosynchronous satellites
K-indices	Numbers scaled every 3 hours at Boulder and for a composite of 6 mid- and high-latitude stations
A-indices	A daily indicator of activity derived for Boulder and for the composite of 6 stations

SOLAR DATA

X-ray	1-min averages
X-ray background	Daily value
10-cm flux	Daily value and 90-day mean
Sunspot number	Daily consensus value
Protons	5-min averages at >1, >10, >100 MeV
Polar cap absorption	15-min values in db.
Total energy deposition	Daily average power input to the upper atmosphere from precipitating particles
Neutrons	15-min values
Proton fluences	Daily integrated values at >1, >10 MeV

IONOSPHERIC DATA

FOF2	Hourly values in Mhz
M3000	
FMIN	
FOES	
TEC	Hourly values in electrons/square meter

FORECASTS

X-ray events	Daily probability forecasts for the next 3 days
Protons	
10-cm flux	
A-indices	Predicted daily indices for the next 3 days
K-indices	

WARNINGS

Geomagnetic	Daily descriptions of expected activity levels
Proton	
Solar	

ALERTS

Radio bursts	Notification of occurrence or expected occurrence of events in these categories
Proton events	
X-ray events	
A-values >20	
K-values >4	
Stratwarms	
High-altitude radiation hazard	

SPECIAL SUPPORT

Customer support and system status messages issued as required	
--	--

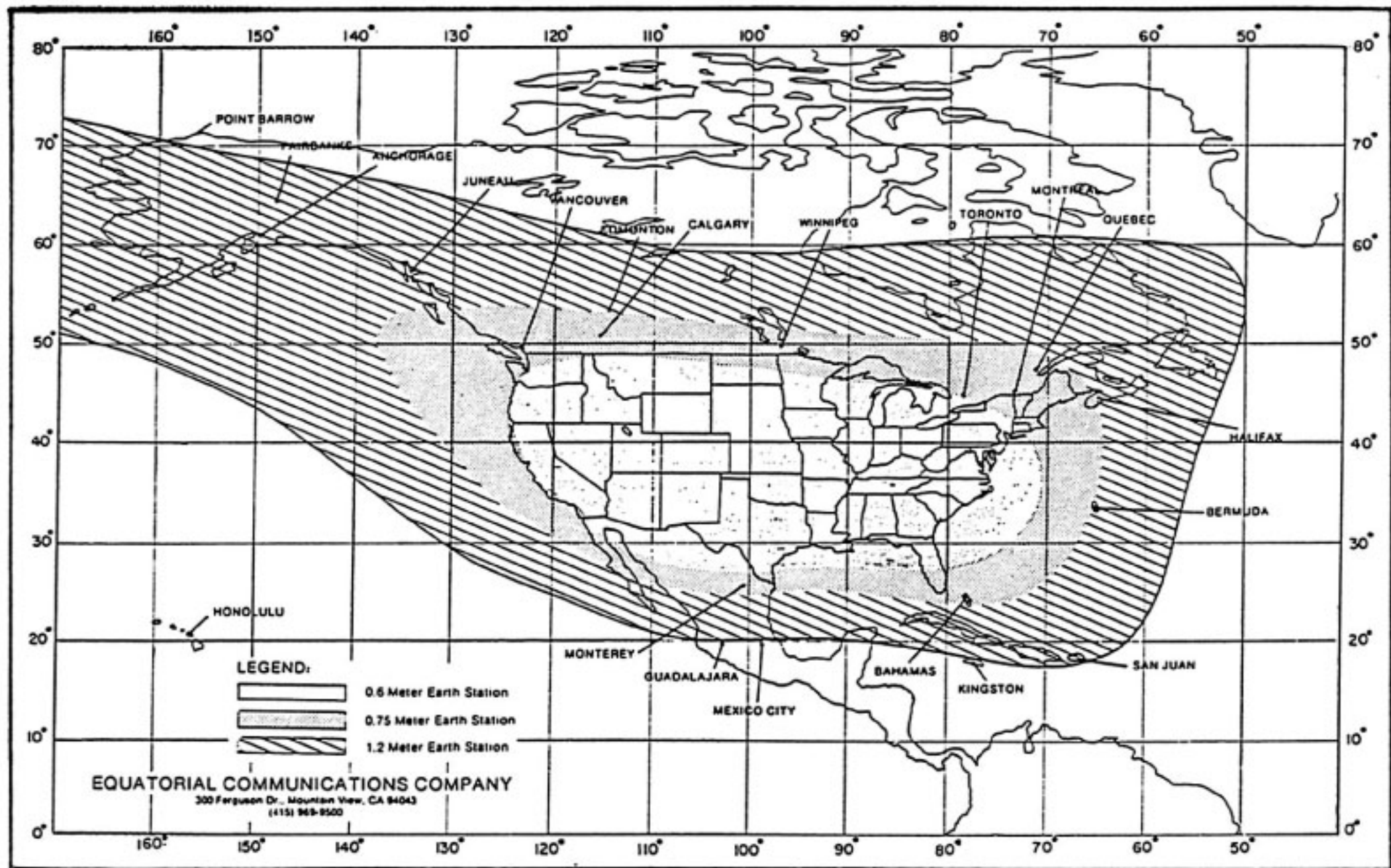
第10図 Real-Time Satellite Broadcast System でユーザーに提供される情報 (K. L. Carran, SESC 提供)。

ムでは、地上磁場データがあまり積極的に、効率よく使われているとは思われない。

(3) 地上磁場変動/分布には何種かの独特のパターンがあり、このことは磁気圏ダイナミクスの複雑性を反映している。地磁気活動指数はこの複雑なパターンを1つのスカラー量で表すので、個々のサブストームの強度を正確には表現し得ない。

これらの問題をかかえ、近い将来 STE 予報モデルに関連して、次の3つのプロジェクトが提案されている。

Magnetospheric Specification Model (MSM)—これは Rice 大学の J. Freeman と R. Wolf らによって USAF のために開発されているモデリングで、これが実際コンピュータを使ってオンラインで動き出すと、STE 予報システムに画期的な情報を与える。MSM はいわば経験的ルールと理論的バックグラウンドを組み合わせたシミュレーション・モデルである。地上磁気デー

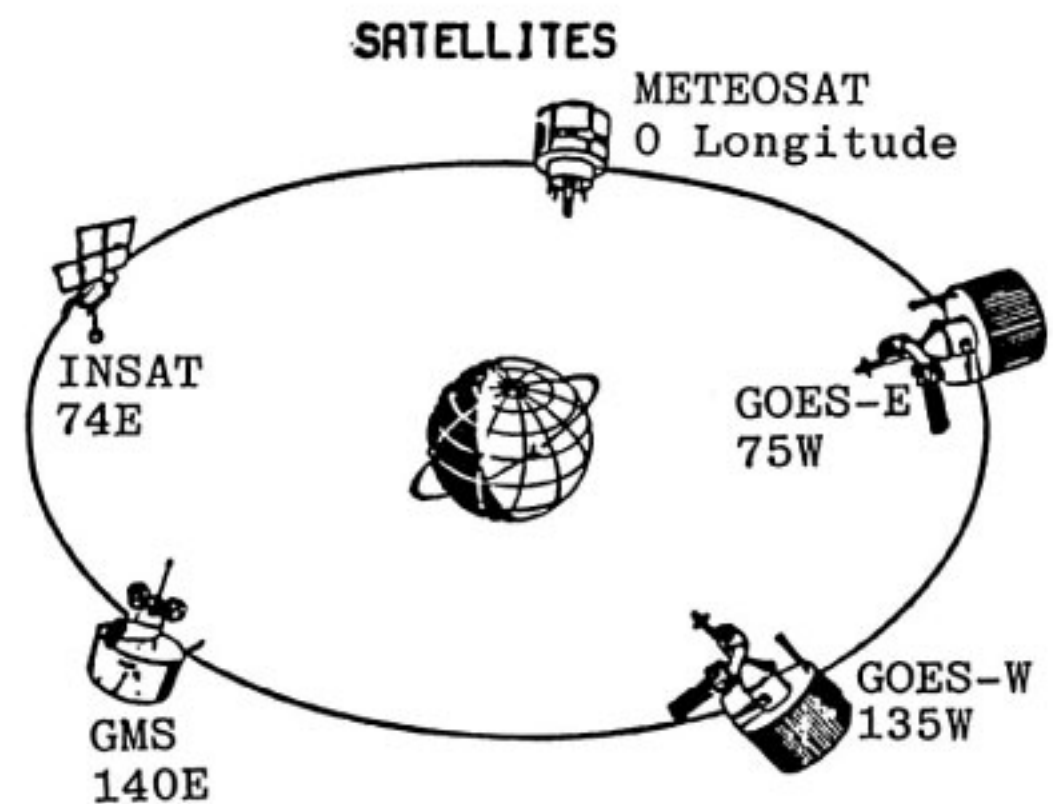


第11図 Real-Time Satellite Broadcast System の衛星 (Westar IV号) 信号が受信可能な地域 (K. L. Carran 提供).

タからリアルタイムで計算された K 指数 (将来はもっと精度の高い指数) と粒子フラックスの観測を用いて、いわゆる RCM (Rice Convection Model) を走らせ、 Δt 秒後の電場・電流を計算するものである。

Real-Time Satellite Broadcast System—このシステムは SESC で開発され、北アメリカのどこにいても、小型 (直径24インチ) アンテナさえあれば、リアルタイム STE データが衛星経由で得られるものである。得られるデータは第10図のようにまとめられ、データが即刻得られる地域は第11図に示されている。経由衛星は Westar IVである。このシステムの利点は、軽量のポータブルの地上局によって受信可能であることで、近い将来、テレタイプ、電話に代る低コストのデータ・警報サービスとなるだろう。詳細は Kurt L. Carran, Satellite Broadcast Manager, Space Environment Services Center, Tel. 303-497-3188 まで問合せること。

Intermagnet—これは W.F. Stuart (British Geological Survey, Edinburgh) と A.W. Green (U.S. Geological Survey, Denver) が中心となって進めているプロジェクトである。第12図に概念図を示す。日本の GMS を含む5つの静止衛星を経由して地上の磁場データをリアルタイムで送り、将来は K_p , A_p , D_{st} 指数や AE 指数までも瞬間的に計算してしまおうというものである。3成分の磁場データ (1分値) が12分毎に送信さ



第12図 Intermagnet システムで使用する人工衛星の配置図 (J. A. Joselyn, NOAA 提供).

れることになっている。現在は地上局が米国の Golden, Colorado と英国の Hartland にあるが、Paris, Kakioka, Bombay, Canberra, Ottawa, Hermanus, Honolulu にまで増加する予定である。このシステムに入っている磁気観測所は今のところ、米国がスポンサーになるものが21, 英国3, フランス8の計32か所であるが、将来は

Australia	5	Brazil	1
Canada	13	Chile	1

Denmark	7	New Guinea	1
Finland	2	Indonesia	1
India	6	Mexico	1
Italy	1	Japan	3
Norway	2	South Africa	2
Spain	1	Sweden	2
West Germany	2		

が加わることが予定されている。

1986年の9月に極小になった太陽の黒点活動は、現在盛んに上昇を続けている。1990～1991年にピークに達すると予想され、すでにたとえば今年1月20日には大磁気嵐が発生している。SESCの観測によると、現在の周期(サイクル22)では、太陽活動が今までの歴史では記録されていないようなスピードで増加している。(1958年にピークになったサイクル19では、 D_{st} 指数が -400nT 級の磁気嵐が数回発生した。)太陽・惑星間空間変動の地球への影響は宇宙天気予報、サブストーム予報と称して新しいスキームが提案されつつある⁽¹⁷⁾。STE予報は、地球周辺の電磁気学という科学的興味のみならず、通信システムや動物・人間の生活などにも影響する重要なテーマである。

最後に、STE予報モデルの最終ゴールは、(i)アルゴリズムを定量的にすること、(ii)観測データをなるべく使わずに磁気圏ダイナミックスの予報ができることである。

謝 辞

本レポートを作成するに当たり、SESCのJ.A. Joselyn, K.L. Carranからは資料と助言を、WDC-AのJ.H. Allenからは未発表のデータをいただき、お世話になりました。

参 考 文 献

- (1) Kamide, Y., "The two-component auroral electrojet", *Geophys. Res. Lett.*, 9, 1175-1178, 1982.
- (2) Joselyn, J.A., "Real-time prediction of global geomagnetic activity", in *Solar Wind-Magnetosphere Coupling* (Y. Kamide and J.A. Slavin ed.), Terra/Reidel, Tokyo, pp. 127-141, 1986.
- (3) Joselyn, J.A., "Working group D report on geomagnetic activity and aurora forecast", in *Solar-Terrestrial Predictions, Proceedings of a Workshop at Meudon, France, June 18-22, 1984* (P.A. Simon et al. ed.), Air Force Geophysics Laboratory, Bedford, MA, pp. 401-414, 1984.

- (4) Davies, K., "Review of recent progress in ionospheric predictions", *Radio Sci.*, 16, pp. 1407-1416, 1981.
- (5) Gould, J.L., "The case for magnetic sensitivity in birds and bees (such as it is)" *Amer. Scientist*, 68, pp. 256-260, 1983.
- (6) Mayaud, P.N., *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices*, Amer. Geophys. Union, Washington, D.C., 1980.
- (7) Kamide, Y. and Akasofu, S.I., "Notes on the auroral electrojet indices", *Rev. Geophys. Space Phys.*, 21, pp. 1647-1656, 1983.
- (8) Wiener, N., *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications*, M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1942.
Clauer, C.R., "The technique of linear prediction filters applied to studies of solar wind-magnetosphere coupling," in *Solar Wind-Magnetosphere Coupling* (Y. Kamide and J.A. Slavin ed.), Terra/Reidel, Tokyo, pp. 39-57, 1986.
- (9) Iyemori, T., Maeda, H. and Kamei, T., "Impulse response of geomagnetic indices to interplanetary magnetic fields", *J. Geomag. Geoelectr.*, 31, pp. 1-10, 1979.
Clauer, C.R., McPherron, R.L., Searls, C. and Kivelson, M.G., "Solar wind control of auroral zone geomagnetic activity", *Geophys. Res. Lett.*, 8, pp. 915-918, 1981.
- (10) Clauer, C.R. and McPherron, R.L., "The relative importance of the interplanetary electric field and magnetospheric substorms on partial ring current development", *J. Geophys. Res.*, 85, pp. 6747-6759, 1980.
- (11) Kroehl, H.W. and Richmond, A.D., "Magnetic substorm characteristics described by magnetic potential maps for 26-28 March 1976", in *Dynamics of the Magnetosphere* (S.-I. Akasofu ed.), Reidel, Hingham, MA, pp. 269-286, 1979.
Clauer, C.R. and Kamide, Y., "DP 1 and DP 2 current systems for the March 22, 1979, substorms", *J. Geophys. Res.*, 90, pp. 1343-1354, 1985.
- (12) Boström, R., "Polar magnetic substorms", in *The Radiating Atmosphere* (B.M. McCormac ed.), Reidel, Dordrecht, Netherlands, pp. 357-

365, 1971.

Kamide, Y., Kanamitsu, M. and Akasofu, S.-I., "A new method of mapping worldwide potential contours for ground magnetic perturbations; Equivalent ionospheric current representation", *J. Geophys. Res.*, 81, pp.3810-3820, 1976.

(13) Harel, M. A., Wolf, R. A., Reiff, P. H., Spiro, R. W., Burke, W. J., Rich, F. J., and Smiddy, M., "Quantitative simulation of a magnetospheric substorm, 1, Model logic and overview", *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 2217-2241, 1981.

(14) Karty, J. L., Chen, C.-K., Wolf, R. A., Harel, M., and Spiro, R. W., "Modeling of high latitude currents in a substorm", *J. Geophys. Res.*, 87, pp. 777-784, 1982.

(15) Kamide, Y., Richmond, A. D., and Matsushita, S., "Estimation of ionospheric electric field, ionospheric currents, and field-aligned currents from ground magnetic records", *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 801-813, 1981.

(16) Wolf, R. A. and Kamide, Y., "Inferring electric fields and currents from ground magnetometer data—A test with theoretically derived input", *J. Geophys. Res.*, 88, pp. 8129-8135, 1983.

(17) Tsurutani, B. T. and Baker, D. N., "Substorm warnings: an ISEE-3 real-time data system", *EOS*, 60, pp. 702-704, 1979.

Hewish, A., "The interplanetary weather forecast", *New Scientist*, May. 19, 1988, pp. 46-50.

