

2-2 宇宙環境(ジオスペース環境)の監視と予測

2-2 Monitoring and Prediction of Geospace Environment

2-2-1 ジオスペースじょう乱の監視・予測とその重要性

2-2-1 Monitoring and Forecasting of Geospace Disturbances, and its Importance

長妻 努

NAGATSUMA Tsutomu

要旨

ジオスペース(地球周辺の宇宙空間)は人類がその活動領域を宇宙空間へと拡げて行く上で避けて通ることのできない領域である。ジオスペースでは太陽活動に起因する様々なじょう乱現象が発生する。これらは、人工衛星に対して影響を与えるのみならず、地上の社会インフラに対しても影響を与える。そのため、同領域におけるじょう乱現象を監視し、現象を予測することは重要である。本稿では、情報通信研究機構におけるジオスペースじょう乱の監視と予測の取り組みに関して紹介する。

Geospace (space around the Earth) is a region which we cannot avoid when the people try to expand their activity to space and beyond. Many kinds of disturbances are occurred in geospace, due to solar activity. These disturbances affect artificial satellite and ground-based social infrastructures. Therefore, monitoring the geospace and prediction of disturbances in the geospace are important. Monitoring and prediction of geospace disturbances in NICT is introduced.

[キーワード]

ジオスペース, 観測ネットワーク, じょう乱, 監視, 予測

Geospace, Observation network, Disturbance, Monitoring, Prediction

1 はじめに

地球は磁場を持つ天体であり、太陽から吹き付けるプラズマの風(太陽風)によって、磁気圏が形成され、その内部に特徴的なプラズマの領域が形成される。また、太陽風と磁気圏の相互作用によって、磁気圏の内部には様々な電磁的現象が引き起こされる(参照:“宇宙天気予報特集1—宇宙天気諸現象の研究—”、通信総合研究所季報、Vol.48、No.3、2002)。「宇宙」や「スペース」という言葉は、地球の大気よりも外側の宇宙空間をすべ

て包含する広い概念に対応していて、この言葉が人々に与えるイメージは多種多様である。このため、電離圏や磁気圏の内部領域を指し示す用語としては必ずしも適切ではない。そこで、人類が進出し活動を展開する身近な地球周辺の宇宙空間を指し示す用語として、近年では「ジオスペース(geospace)」がよく使われるようになりつつある。

ジオスペースにおける環境の変動(ジオスペースじょう乱)は、人間の宇宙空間における活動に影響を与えるのみならず、地上の社会インフラに対しても大きな影響を与える場合がある。通信・

放送等の社会インフラや宇宙活動の安心・安全のためには、ジオスペースを監視し予測するための研究である宇宙天気予報が重要である。本稿では、情報通信研究機構で行っているジオスペース環境の監視・予測についての取り組みと、その重要性について述べる。

2 ジオスペースじょう乱の影響

ここでは、ジオスペースにおけるじょう乱現象が人工衛星や地上の社会インフラなどに対してどのような影響を与えるのかについて述べる。なお、電離圏における電子密度変動が測位に与える影響については、別論文で取り上げられているので、そちらを参照されたい[1]。

2.1 放射線帯粒子変動

地球磁気圏の内部には、放射線帯と呼ばれる領域が存在している。放射線帯には、高エネルギーの陽子が主成分の内帯と高エネルギーの電子が主成分の外帯がある。放射線帯外帯の高エネルギー電子は、太陽風-磁気圏-電離圏複合系の作用によってジオスペースに生じるもっとも大規模なじょう乱現象である地磁気嵐に伴って大きく変動する[2]。放射線帯外帯電子は、地磁気嵐の主相において一度粒子数が減少するが、その後地磁気嵐の回復相に伴って内部磁気圏領域において加速・加熱が起こり、粒子数が増大することがある。外帯の高エネルギー電子の主成分は1 MeV以上のエネルギーを持つ電子であり、通常的人工衛星の構体を突き抜けて、内部に侵入し、内部(深部)帯電を引き起こすことが知られている。その結果として放電が発生すると内部の電子回路等に障害が起こり、衛星の故障等につながる場合がある。1994年1月の地磁気嵐後にカナダのAnik1、2という通信衛星が相次いで故障した要因は、地磁気嵐後の放射線帯外帯粒子の増大に伴う内部放電であると考えられている[3]。

2.2 サブストーム粒子変動

太陽風-磁気圏-電離圏複合系の相互作用によってジオスペースに生じる基本的なじょう乱現象の一つにサブストームがある。サブストームは、オーロラ・オーバルの真夜中領域で爆発的にオー

ロラが輝き、それから真夜中付近のオーロラ・オーバルが南北東西へと拡大し、オーロラがダイナミックに変化する状態が、30分から2時間程度継続する現象である。オーロラの活動に伴って、電離圏を流れる電流も増大するため、極域の地磁気も急激な変化を示す。また、サブストームに伴って、磁気圏の内側に数十 keV 程度のエネルギーを持つ高温のプラズマが注入される。これが静止軌道に到来すると同軌道の人工衛星の表面に帯電を引き起こすことが知られている[4]。衛星表面が高電圧に帯電すると放電のリスクが高まり、放電した場合には衛星に障害をもたらすことがある。2003年10月25日のみどり2号の事故は、衛星の表面材料がオーロラ電子によって帯電したことが電力ケーブル間の短絡につながったとされている[5]。また、衛星障害の要因の54%が前述の深部帯電も含めた帯電現象によるものと分析されている[6]。

2.3 地磁気変動

前述したサブストームや地磁気嵐等によって、ジオスペース内の電流系はダイナミックに変化し、地上に地磁気変動をもたらす。特に、極域においては、オーロラ活動に伴う大振幅の地磁気変動が観測されることが知られている。導体が存在する領域において、激しい地磁気変動が生じた場合、導体には電流が誘導される。そのため、長距離の送電線や金属製のパイプラインなどにおいて、地磁気変動の影響で誘導電流が流れ、電力網のトラブルやパイプの腐食などが発生することがある。

また、地磁気変動の情報を使って地下構造を推定する磁気探査と呼ばれる手法がある。これは、地下構造を計測する方法の一つで、交流磁場の表皮効果を応用して地下の比抵抗構造を計測する手法と、局所的な磁場構造を計測して地下構造を推定する手法がある。前者では地磁気変動が信号源となるため、地磁気じょう乱時にS/N比の高いデータが取得できる。一方、後者では地磁気じょう乱はノイズ源となるため、地磁気静穏時にS/N比の高いデータが取得できる。これらの手法においては、障害回避のためではなく、効果的な探査の実施のために、地磁気変動の情報が必要となる[7][8]。

2.4 電離圏嵐

サブストームや地磁気嵐に伴って極域のオーロラ活動や電離圏電流が増加すると、粒子降下やジュール加熱等を介して磁気圏から極域電離圏に流入するエネルギー量が増加する。このエネルギーは熱圏大気を加熱し、大気組成比を変動させたり、大規模な大気の運動を引き起こしたりする。これによって、電離圏の臨界周波数に変化する電離圏嵐が発生し、通信障害を引き起こすことがある^[9]。また、地磁気嵐などに伴って熱圏大気が加熱されて膨張することで、低高度を飛んでいる人工衛星の姿勢や軌道が著しく変化することがある。このため、低高度衛星の軌道制御や衛星の再突入制御などのためにも、地磁気じょう乱の予測情報が必要とされている。

3 ジオスペースじょう乱の監視

ジオスペースじょう乱は、ジオスペースにおける電磁場変動やプラズマ粒子変動、イオン組成の変化などとして現れる。プラズマ粒子環境を監視する場合、宇宙空間で直接計測する必要がある。しかし、基本的には点(その場)の観測となるため、監視領域を拡大する場合には、複数衛星による多点の観測ネットワークを構築し、同時に観測を行う必要がある。

一方、電磁場の変動については、磁気圏や電離圏を流れる電流系によって作り出されるため、地上からリモートセンシング的に監視することが可能である。我々は、ジオスペースじょう乱の監視として、地上の観測ネットワークを構築して電磁場の変動を観測している他、ネットワークを介して衛星が直接計測しているプラズマ粒子の情報や上流となる太陽風の情報等も利用している。なお、ジオスペースじょう乱のうち、電離圏じょう乱に関する監視・予測やその影響に関する研究は本特集号の別論文を参照されたい。

3.1 INTERMAGNET

インターネットが普及し始める 1990 年代半ば以前には、観測データをオンラインで準リアルタイムに収集することは極めて困難であった。当時、即時的な情報交換が可能なものは、ウルシグラムと呼ばれるコード化されたローカルな地磁気の指

数やイベントの情報のみであり、世界中の地磁気データを用いて Kp 指数や Dst 指数、AE 指数などの汎地球規模の地磁気活動度の指数を導出するためには数日から数カ月を要していた。

これを克服し、準リアルタイムに汎地球規模の地磁気データを収集するネットワークの構築に貢献したのが INTERMAGNET である。INTERMAGNET は観測データの品質維持と観測の標準化、及び即時的なデータの交換等を目的として、英国、米国を中心に 1980 年代後半に組織され、日本では情報通信研究機構(当時 通信総合研究所)、京都大学地磁気世界資料解析センター、及び気象庁地磁気観測所が中心となって参加した。これは、遠隔僻地にある地磁気の観測所とデータ収集ノードとなる GIN (Global Information Node) を気象衛星回線をつなぎ、12 分毎にデータを送信して、準リアルタイムに地磁気 3 成分の 1 分値を収集するもので、それまで、ウルシグラムによる限られた地磁気じょう乱情報しか無かった当時には画期的であった。平磯宇宙環境センター(現 平磯太陽観測施設)は GIN として活動し、地磁気じょう乱の監視及びリアルタイムのデータ公開等に本データを活用している^{[10][11]}。

その後、インターネットの普及によって、地磁気データの交換も INTERMAGNET の設立当初と比べると容易となりつつあり、INTERMAGNET に参加する観測所も 100 以上を数えるに至っている(図 1)。リアルタイムのデータ利用のためには、観測所側のデータ公開ポリシーとの調整が必要なケースもあるが、汎地球的に地磁気じょう乱現象を観測・監視できるネットワークが構築され、そのデータが利用可能となりつつあることの意義は大きい。また、1 秒値のリアルタイムデータ交換についても近年議論が進みつつある。これが実現できれば、放射線帯粒子の加速や消失を知る手掛かりとなる ULF 波動の現況把握に有用である。

3.2 PURAES/RapidMAG

オーロラは太陽風-磁気圏-電離圏複合系における放電現象の一種である。また、オーロラ活動に伴って強い電離圏電流が流れるために、極域の地磁気が大きく変動することが知られている。この極域の地磁気変動をオーロラ帯の地磁気活動の

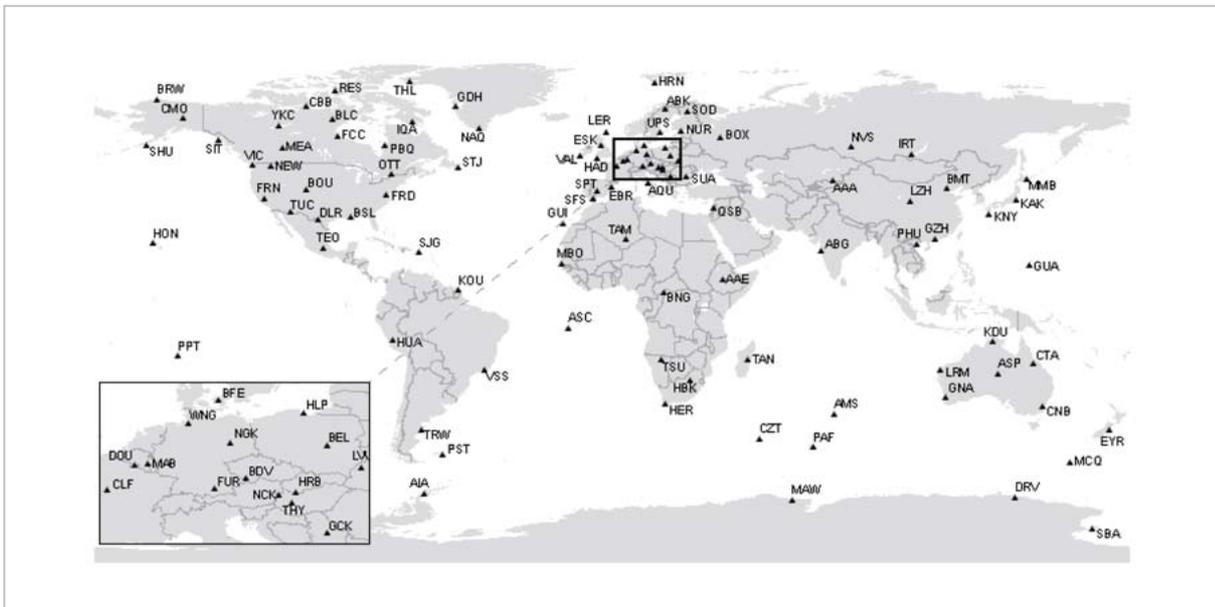


図1 INTERMAGNETに参加している観測所の分布図

指標として用いたものに AE 指数がある。AE 指数は Davis and Sugiura [1966] によって算出されたオーロラ帯のジェット電流の指標である [12]。オーロラ帯の地磁気観測点 (AE 観測所) の地磁気データを、静穏レベルを基準に重ね合わせ、東向き of 電離圏電流強度に対応する + 側の包絡線 (AU 指数) と、西向き of 電離圏電流強度に対応する - 側の包絡線 (AL 指数) の両方の振幅を足し合わせたものを AE 指数と呼んでいる。この指数はオーロラ帯の地磁気の活動状況の把握や、オーロラ活動に伴う超高層大気の加熱等の影響を予測するモデルの入力パラメータとして用いられる。このことから、AE 指数を迅速に算出し、公開することが広く求められていた。

しかしながら、オーロラ帯の観測所 (AE 観測所) のうち、ロシア域は 1990 年代半ば過ぎまで古い世代の磁力計が使われていたため、データの品質が悪く、迅速なデータ交換も行えない状態であった (図 2)。そのため、日本 (情報通信研究機構、京都大学地磁気世界資料解析センター) と米国 (Applied Physics Laboratory, Geophysical Institute)、ロシア (Arctic and Antarctic Research Institute, Institute of Geospheres Dynamics) の研究機関が協力して、AE 観測所の地磁気データを迅速に集配信するためのプロジェクトを立ち上げた。これが PURAES (Project for Upgrading Russian AE Stations) そして後継プロジェクトの

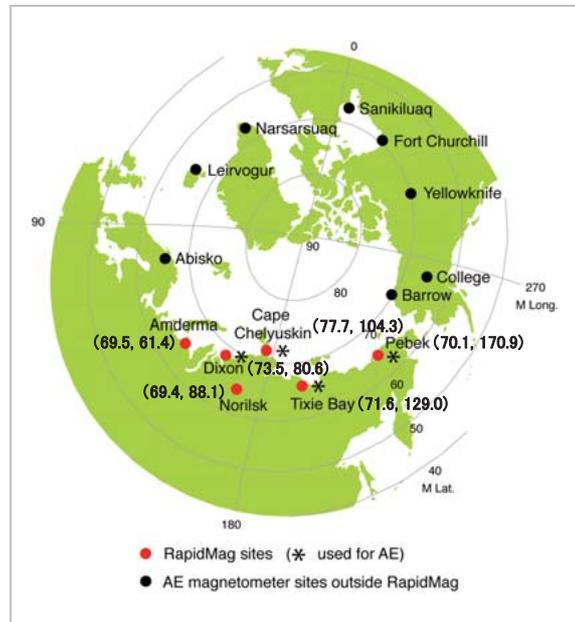


図2 AE 観測所の分布図

赤丸が RapidMAG でデータ収集を行っている観測所の位置。

RapidMAG (Russian auroral and polar ionospheric disturbance MAGnetometers) である。NICT はこのプロジェクトの中で、主に静止衛星を介したデータ伝送部分を担当している [9]。AE 観測所の地磁気データは京都大学地磁気世界資料解析センターへ送られ、そこで準リアルタイムに AE 指数を算出した後に、指数データは Web を通じて一般に公開されている。我々のグループの Web

ページからは、リアルタイム AE 指数のデータの時間幅やスケールを、インタラクティブに変更しながら閲覧・利用することが可能である (URL: <http://kogma.nict.go.jp/cgi-bin/qlae.cgi/>) (図 3)。

3.3 NICT_MAG

NICT では、宇宙環境モニタリング (NICT_SWM) の一環として日本の経度域を中心に独自の地磁気観測ネットワーク (NICT_MAG) も展開している。設置している観測所の一覧を図 4 に示す。このネットワークは INTERMAGNET や RapidMAG と相補的であり、前者と同様に 1 分値の準リアルタイムデータ収集を行っている。加えて、後述するように、1 秒値のリアルタイムデータの活用についても検討している。

準リアルタイムに収集した地磁気データは、オンラインデータベースとしてリアルタイムにデータ表示を行っている他、日時や表示期間、スケール等を変更することでインタラクティブにデータを描画させることも可能である [13]。3 つのネットワークによって、現在 NICT に準リアルタイムでデータを収集している観測所の一覧を表 1 に示す。

3.4 SuperDARN 短波レーダーネットワーク

地磁気変動はジオスペースにおける電流系の変動によって作り出される。そのため、地磁気変動の情報を電離圏や磁気圏の電流変動の推定に役立てることが出来るが、電流系を介して極域に流入するエネルギー量を精度良く推定するには、地磁気の情報のみでは不十分であり、電場や電離圏電気伝導度の情報が必要となる。広範囲の電場を計測する手段として、短波レーダーがある。これは、地上から斜め上方に短波帯の電波を送信し、散乱対象となる電離圏の沿磁力線イレギュラリティなどから戻ってくるエコーを受信することで、そのドップラーシフト量から電離圏でのプラズマ速度を推定することができる。プラズマ速度が推定できれば、 $E \times B$ ドリフトから電場の量が推定可能である。エコーが戻ってくるかどうかは、散乱条件を満たす不規則構造が電離圏において生成されるかどうかにかかっているが、地磁気が点 (1 次元) の観測であるのに対し、面 (2 次元) で視線方向のプラズマ速度及び電場の導出が可能になるといふ点などが短波レーダーの大きな利点である。

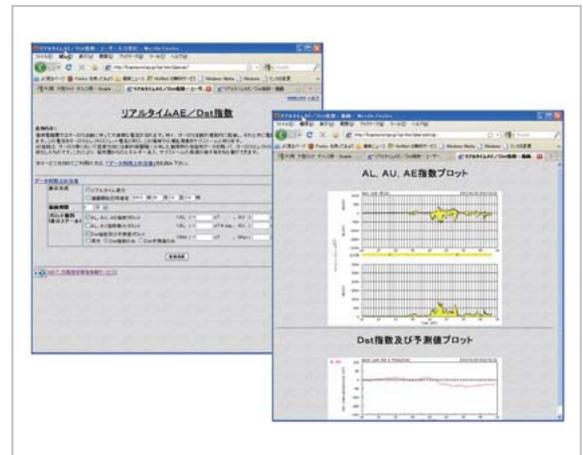


図 3 リアルタイム AE/Dst 指数 Web ページの入力画面 (左) と描画面 (右)

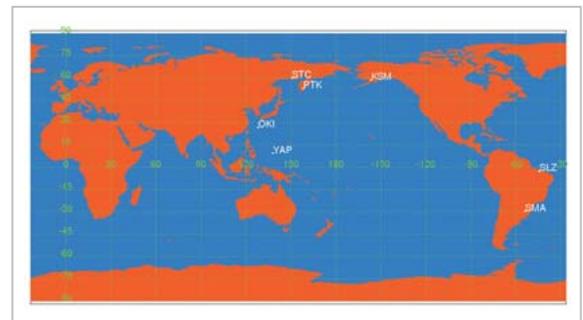


図 4 NICT 地磁気観測ネットワークの分布図

このことから、イギリス、フランス、米国、日本、南アフリカ等様々な国の研究機関が協力して、北極域と南極域に短波レーダーの観測網を構築した。これが SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) である。SuperDARN によって、極域のプラズマ対流及び電場分布の状況を 2 次元的に把握することが可能である。但し、電場の情報が得られるかどうかは、散乱条件を満たすイレギュラリティが形成されているかどうか依存する点には注意が必要である。NICT は米国アラスカ州キングサーモンに短波レーダーを 1 基有している。このレーダーを用いて日本の経度の極域となるシベリア東部の電離圏電流や電場の状態を監視することが可能となっている [14] (図 5、図 6)。

4 ジオスペースじょう乱予測の取り組み

現象を予測する手法として様々な方法が考えられているが、大きくは数値予測モデル (数値シ

表1 NICTが準リアルタイムデータ収集している観測所の一覧

地名	観測所 コード	地理緯度	地理経度	磁気緯度	磁気経度	協力機関
INTERMAGNET						
Furstenfeldbruck (ドイツ)	FUR	48.17	11.28	48.38	94.61	LMU
Tihany (ハンガリー)	THY	46.90	17.89	45.99	100.46	ELGI
女満別 (日本)	MMB	43.90	144.20	35.16	211.00	JMA
柿岡 (日本)	KAK	36.23	140.18	27.18	208.50	JMA
Guam (米国)	GUA	13.59	144.87	5.30	215.64	USGS
Hermanus (南アフリカ)	HER	-34.43	19.23	-33.92	83.68	HMO
RapidMAG						
Amderma (ロシア)	AMD	69.5	61.4	61.7	147.7	AARI,他
Dixon (ロシア)	DIK	73.5	80.6	64.2	162.6	AARI,他
Norilsk (ロシア)	NOK	69.4	88.1	64.2	166.4	AARI,他
Cape Chelyuskin (ロシア)	CCS	77.7	104.3	67.7	178.0	AARI,他
Tixie Bay (ロシア)	TIK	71.6	129.0	62.1	194.1	AARI,他
Peveck (ロシア)	PBK	70.1	170.9	64.1	224.0	AARI,他
NICT_MAG						
King Salmon (米国)	KSM	58.68	203.35	58.01	257.88	GI
Magadan (ロシア)	STC	59.97	150.86	52.12	213.82	IKIR
St.Paratunka (ロシア)	PTK	52.94	158.25	45.58	221.13	IKIR
沖縄 (日本)	OKI	26.75	128.22	16.87	198.41	UR
Yap (ミクロネシア連邦)	YAP	9.49	138.09	0.38	209.21	NOAA
Sao Luis (ブラジル)	SLZ	-2.60	315.78	6.69	27.52	INPE
Santa Maria (ブラジル)	SMA	-29.45	306.17	-19.45	16.34	INPE

LMU: Ludwig-Maximilians-University Munich

ELGI: Eötvös Loránd Geophysical Institute

JMA: Japan Meteorological Agency

USGS: U.S. Geological Survey

HMO: Hermanus Magnetic Observatory

AARI: Arctic and Antarctic Research Institute

GI: Geophysical Institute, University of Alaska

IKIR: Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation

UR: University of the Ryukyus

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

INPE: National Institute for Space Research

ミュレーション)と経験モデルの2種類に分類できる。数値予測モデルは物理の基礎方程式に基づき計算・予測を行うもので、予測に必要な物理過程やパラメータがすべて既知であり、計算機の能力も十分であれば、初期値に基づいて客観的かつ信頼性の高い結果を提供することが期待される。しかしながら、現状は物理過程の解明も含めてまだ研究途上にあり、実用化にはまだ時間が必要な状況である。NICTにおける数値シミュレーションの取り組みについては、別論文を参照されたい[15]。

経験モデルは、仮説レベルにせよ背後の物理過程を踏まえて構築しているものから、単なる相関関係に立脚するものまで、多種多様なものが存在する。そのため、モデルの信頼度についてもまちまちではあるが、入力パラメータを与えてやることで比較的簡便に結果が得られるという点では、実利用向きでもある。我々は、予報業務に供することを想定し、地磁気じょう乱の予測として地磁気指数の経験的予測モデルの研究を行っている。地磁気じょう乱はジオスペースじょう乱の中でも基本的なじょう乱現象であり、地磁気指数は更に

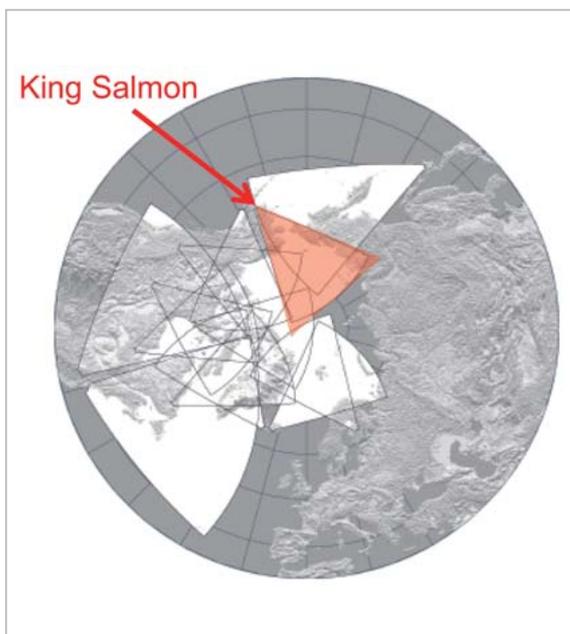


図5 北半球における SuperDARN の観測視野。赤で示した領域が King Salmon レーダーの観測視野



図6 レーダーの写真

他の経験モデル(例えば、放射線帯粒子変動モデル)への入力パラメータとしての利用も可能であるため、汎用性が高いと考えている。

これまでに、地磁気指数の予測モデルとして、太陽風パラメータを入力とした様々なカップリングの式が考えられてきた。これらのほとんどが太陽風-磁気圏のカップリングの効率を一定と仮定したものであった。しかしながら、効率が一定と仮定したモデルでは、地球の自転軸の傾きの変化に関連した地磁気変動の季節依存性(Equinocial/McIntosh 効果)が説明出来ず、カップリングの効率が季節変化することを考慮する必要性が指摘されていた。ただし、その変化の要因については、物理的な解釈がなされていない状況であった。

一方、ここ 10 年くらいの研究によって、磁気圏のプラズマ対流(極冠電位差)は線形に発達せず、頭打ちになることが知られている[16]。この性質

の解釈として、プラズマ対流を駆動する Region1 電流系が発達することによって、Region1 電流系の作り出す磁場そのものが磁気圏の形状を変形させ、太陽風-磁気圏相互作用の効率を低下させるという考え方がある[17]。この考えに基づく太陽風電場と極冠電位差の関係式を以下に示す。

$$\Phi_{PC} = 57.6 E_m P_{sw}^{1/3} / (P_{sw}^{1/2} + 0.0125 \zeta \Sigma_P E_m) \quad (1)$$

$$\zeta = 4.45 - 1.08 \log \Sigma_P \quad (2)$$

ここで、 Φ_{PC} は極冠電位差、 E_m は $E_m = V_{sw} B_r \sin^2(\theta/2)$ で表わされる merging electric field と呼ばれる太陽風電場の物理量[18]、 V_{sw} は太陽風速度、 B_r は太陽と地球を結ぶ軸を X とした場合の YZ 面の磁場の大きさ、 θ は北を 0 度とした角度、 P_{sw} は動圧、 ζ は幾何学ファクター、 Σ_P はペダーセン電気伝導度である。

Region1 電流系の強さは極冠電位差と極冠域電離圏の電気伝導度の積なので、電場の発達のみならず、電気伝導度の増加によっても、Region1 電流系は増加し、その結果としてプラズマ対流の発達が抑制される。Region1 電流系は北半球と南半球それぞれに存在することから、極冠電位差の発達の度合いが極冠域電離圏の電気伝導度(北極と南極の両極間域の電気伝導度の和)に依存することがこれまでの研究によって示されている[19]。このことは、極冠域の電気伝導度の大きさによって、太陽風-磁気圏-電離圏相互作用の効率が変化することを意味している。そこで、我々は汎地球的な地磁気活動の指数 am 指数及びその対数スケールの指数である Km 指数を用いて、太陽風-磁気圏-電離圏相互作用の効率変化の特徴を調べ、この考え方に基づく経験モデルの開発を行った。am 指数、Km 指数を用いる利点は、指数の導出に用いる観測点の分布の偏りを出来るだけ無くしてしまふことで、人工的な季節変化が生じないように工夫されている点である。Kp 指数の場合、指数作成にしている観測点の分布に偏りがあり、人工的な日変化・季節変化が生じる。そのため、統計的な取り扱いには注意が必要である。

図7に地磁気活動と太陽風電場の関係を NetSZA の関数として各 Km 指数毎にプロットしたものを示す。NetSZA は北磁極と南磁極の太陽天頂角の和 ($\cos \chi_{NP} + \cos \chi_{SP}$) で、後述するように南北両

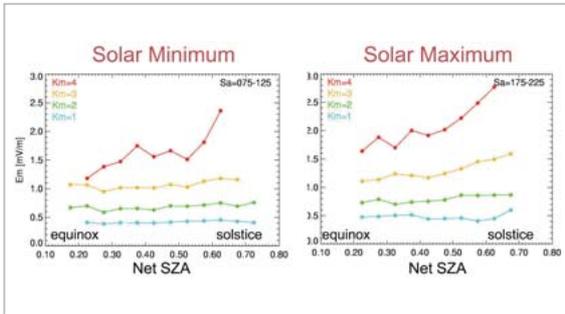


図7 地磁気活動に必要な太陽風電場の大きさを各 Km 指数毎に NetSZA の関数として表示 (左図：太陽活動極小期、右図：太陽活動極大期)

極冠の電気伝導度の和に比例するパラメータである。また、NetSZA の値は春分、秋分 (Equinox) の頃に最小となり夏至、冬至 (Solstice) の頃に最大となる。左図に太陽活動極小期 (F10.7 指数が 75 以上 125 未満)、右図に太陽活動極大期 (F10.7 指数が 175 以上 225 以下) を示している。

まず左図に注目すると、NetSZA が小さい時には、弱い太陽風電場でも Km 指数が 3、4 まで増加するのに対し、NetSZA が大きい時には、Km 指数を 3、4 まで上げるためには、より強い太陽風電場が必要となる。右図でも、基本的な特徴は同じである。但し、左図と右図を比べた場合、太陽活動の極大期には、同一レベルの地磁気活動のために更に強い電場が必要になることがわかる。このことから、太陽風-磁気圏-電離圏の相互作用は、極冠域の電気伝導度が小さい時ほど効率が上昇し、電気伝導度が大きい時ほど効率が低下することが明らかになった。また、南北両極冠域の電気伝導度の総和は春分、秋分の頃にもっとも小さくなり、夏至、冬至の頃にもっとも大きくなる。この考えに基づくと、Equinoctial 効果を物理的に解釈することも可能である。更に、電気伝導度は太陽活動によっても変化するため、太陽活動が活発な時には相互作用の効率は低下し、静穏な時には効率が上昇する。このことは図 7 の結果とも整合的である。以上のことを踏まえて、太陽活動の極大期と静穏期を併せて南北両極冠の電気伝導度の和の関数として地磁気活動に必要な太陽風電場の大きさを表現したものを図 8 に示す。電気伝導度は、太陽天頂角と F10.7 指数を入力パラメータとして計算を行う過去のモデル [20] に独自の改良を加えた下記の式を用いている。

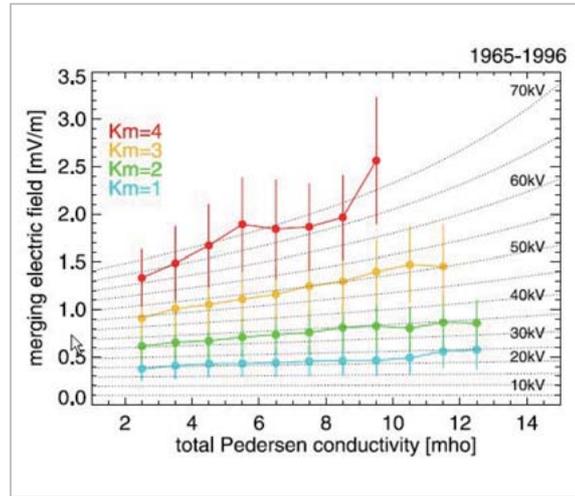


図8 太陽風-磁気圏相互作用効率の電気伝導度依存性

$$\begin{aligned} \Sigma_P &= Sa^{0.5} (1.2 \cos \chi + 0.1736) \quad (3) \\ \Sigma_{Ptotal} &= \Sigma_{PN} + \Sigma_{PS} = Sa^{0.5} (1.2 (\cos \chi_{NP} + \cos \chi_{SP}) \\ &\quad + 0.3472) \quad (4) \end{aligned}$$

背景の線は Siscoe から予測される極冠電位差の値である。両者の変動の傾向は良い一致を示している。このことは、Km 指数及び am 指数の変動が極冠電位差の関数として表せることを意味している。

この結果を踏まえて、am 指数を予測するための経験モデルを開発した。am 指数は前述のような極冠電位差に対する依存性の他に、太陽風動圧に対する依存性、粘性効果による磁気圏対流に対する依存性があるため、それぞれに対して、太陽風パラメータと am 指数の解析を行い、下記のような 3 つの経験式を導出した。

$$am(\Phi_{PC}) = -7.47 - 0.097 \Phi_{PC} + 0.0079 \Phi_{PC}^2 \quad (5)$$

$$am(P_{SW}) = -1.48 + 7.51 (P_{SW})^{0.5} \quad (6)$$

$$am(V_{SW}) = -0.88 + 0.55 (V_{SW}/100)^2 \quad (7)$$

以上を踏まえて、構築される am 指数の経験式は次の通りである。

$$am = -9.83 - 0.097 \Phi_{PC} + 0.0079 \Phi_{PC}^2 + 7.51 (P_{SW})^{0.5} + 0.55 (V_{SW}/100)^2 \quad (8)$$

式 (8) 及び前述の式 (1)、(2)、(4) を用いて am 指数を太陽風の速度、密度、磁場、F10.7 指数、南北両極の太陽天頂角によって計算することができる。この経験式によって、地磁気の日変化、

季節変化、太陽活動周期変化も再現することが可能である。

図9に4太陽活動周期にわたる太陽活動の変化とam地磁気指数の変化、及び我々の経験モデルから得られた予測結果との比較を示した。太陽活動の変動に関わらず、am指数の変動と予測値は良く一致しており、本経験モデルを用いることで長期間にわたって安定的に地磁気活動を予測することが可能になった。

5 むすび

ジオスペースは、人間が宇宙環境に進出していくにあたって、避けて通ることができない空間であると同時に、同領域におけるじょう乱現象は、下部の熱圏や超高層大気、地上の社会インフラへも影響を及ぼす。我々は、ジオスペースじょう乱の監視と共に、モデルを用いた予測への取り組みを今後強化していく必要がある。また、予報する内容も、他のじょう乱現象の基盤となる地磁気じょう乱のみならず、放射線帯変動や電離圏嵐などに拡大していく必要があるだろう。

参考文献

- 1 石井守, “通信放送・測位・航空管制における電離圏効果の重要性”, 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-1-1, 2009.
- 2 長妻努, “地磁気嵐”, 通信総研季, Vol.48, No.3, pp.123-136, 2002.
- 3 中村雅夫, “磁気圏シミュレーションによる静止軌道プラズマ環境変動の予測”, 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-2-3, 2009.
- 4 G. Rostoker, "Commentary on the Anik satellite upsets", Report to Telesat Canada, Canadian Network for Space Research Report, January, 1994.
- 5 宇宙開発委員会調査部会, “環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどりII」の運用異常に係る原因究明及び今後の対策について”, 宇宙開発委員会報告書, 2004.
- 6 H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder and P. C. Anderson, "The impact of the space environment on space systems", Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, AFRL-VS-TR-20001578, pp.7-11, 1998.
- 7 小川康雄, “MT法による地下構造探査”, 地質ニュース, Vol.428, pp.48-54, 1990.
- 8 笹井洋一, “地球電磁気探査-日本列島の電気的地下構造”, 地球, Vol.10, No.3, pp.194-200, 1988.
- 9 丸山隆, “4.4 電離圏あらし”, ウエーブサミット講座 宇宙環境科学, 丸橋克英・恩藤編著, オーム社, 2000.
- 10 石橋弘光, 野崎憲朗, “INTERMAGNET/HiraisoGINシステムの開発”, 通信総研季, Vol.43, No.2, pp.291-299, 1997.

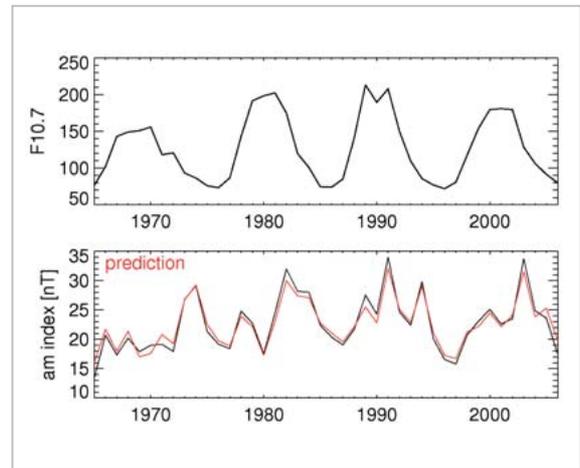


図9 4太陽活動周期にわたる太陽活動変化とam指数の変化、及び我々の経験モデルから得られた予測結果(赤線)

謝辞

am、Km指数はInternational Service of Geomagnetic Indices (ISGI)の提供によるものです。太陽風データにはNASAのOMNI2データベースを利用致しました。感謝致します。

- 11 長妻努, 石橋弘光, 野崎憲朗, “地磁気オンラインデータベースシステム”, 通信総研季, Vol.46, No.4, pp.219-228, 2000.
- 12 T. N. Davis and M. Sugiura, "Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations", J. Geophys. Res., Vol.71, pp.785-801, 1966.
- 13 国武学, 石橋弘光, 長妻努, 菊池崇, 亀井豊永, “シベリア域からのリアルタイム地磁気データの収集と活用-PURAES計画-”, 通信総研季, Vol.48, No.4, pp.75-84, 2002.
- 14 菊池崇, 橋本久美子, 篠原学, 野崎憲朗, ビル ブリストウ, “アラスカKing Salmonレーダーによる宇宙天気の研究”, 情報通信研究機構季報, Vol.53, Nos.1/2, pp.113-121, 2007.
- 15 品川裕之, “統合型宇宙天気シミュレーションの意義と重要性”, 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-3-1, 2009.
- 16 T. Nagatsuma, "Saturation of polar cap potential by intense solar wind electric fields", Geophys. Res. Lett., Vol. 29, No.10, 1422, doi:10.1029/2001GL014202, 2002.
- 17 G. L., Siscoe, G. M. Erickson, B. U. O. Sonnerup, N. C. Maynard, J. A. Schoendorf, K. D. Siebert, D. R. Weimer, W. W. White, and G. R. Wilson, "Hill model of transpolar potential saturation: Comparisons with MHD simulations", J. Geophys. Res., Vol.107, No. A6, 1075, doi:10.1029/2001JA000109, 2002.
- 18 J. R. Kan, and L. C. Lee, "Energy coupling function and solar windmagnetosphere dynamo", Geophys. Res. Lett., Vol. 6, pp.577-580, 1979.
- 19 T. Nagatsuma, "Conductivity dependence of cross-polar potential saturation", J. Geophys. Res., Vol.109, No. A04210, doi:10.1029/2003JA010286, 2004
- 20 J. Moen, and A. Brekke, "The solar flux influence on quiet time conductances in the auroral ionosphere", Geophys. Res. Lett., 20, 971-974, 1993.



長妻 努

電磁波計測研究センター宇宙環境計測
グループ研究マネージャー 博士(理
学) 太陽地球系物理学