

3-4 北磁極域からの準リアルタイム地磁気データ収集

3-4 *Quasi-Real Time Geomagnetic Data Transfer from Near Northern Magnetic Pole Region*

長妻 努 石橋弘光 小原隆博 林 幹治

NAGATSUMA Tsutomu, ISHIBASHI Hiromitsu, OBARA Takahiro, and HAYASHI Kanji

要旨

磁極付近の地磁気変動から作成されるPC指数は、太陽風—磁気圏相互作用によって駆動される磁気圏対流の指標となることが知られている。北磁極域のPC指数(PCN)はグリーンランドのQaanaaq(旧称Thule)の地磁気データを用いて作成される。しかし、PCNは準リアルタイムに作成・公開されていないので、磁気圏対流の現況把握を行うためには、独自に北磁極域の地磁気データを準リアルタイムに収集し、PCNと等価の指数を作成する必要がある。そのために、北磁極付近に位置するカナダのEurekaの地磁気観測データを準リアルタイムに収集し、通信総合研究所(CRL)へ転送するためのシステムを開発した。本システムは1999年夏に現地への設置を行い、現在運用中である。

このデータを用いて独自にPCNと等価の指数を作成するために、EurekaとQaanaaqの地磁気データの比較を行った。その結果、夏季の太陽天頂角が70度以下の期間を除くと、Eurekaの地磁気変動からPCNと等価の指数が作成可能であることが明らかになった。

It is well known that the magnetic field variations in the near geomagnetic-pole region can be used as an index of magnetospheric convection driven by solar wind-magnetosphere coupling (PC index). Northern PC index (PCN) is derived from Qaanaaq (formally, Thule). Unfortunately, PCN is not produced in near-real time. To monitor the current condition of magnetospheric convection, it is necessary to collect geomagnetic field data in the near-geomagnetic pole region and to produce PCN-like index from those data. We have developed the system for collecting magnetic field data from Eureka, which is located in the northern near-pole region and transferring the data from Eureka to CRL in near real-time. Our system was installed at Eureka and has been operated since summer of 1999.

Before producing PCN-like index from Eureka, we have compared geomagnetic field variations at Eureka and those at Qaanaaq. From the results of our data analysis, we have confirmed that PCN-like index can be derived from Eureka except for the period of low solar zenith angle (SZA < 70 deg.).

[キーワード]

太陽風電場, 磁気圏対流, 地磁気観測, PC指数, 宇宙天気予報

Solar wind - magnetosphere - ionosphere coupling, Magnetospheric convection, Geomagnetic observation, PC index, Space weather forecast

1 はじめに

地球磁気圏では太陽風との相互作用によってプラズマの対流運動が駆動され、磁気圏と電離圏をつなぐ3次元電流系が形成される。地球の磁

場(地磁気)はこの電流系の影響を受けて変動するため、地磁気変動から磁気圏の状態を推定することが可能となる。宇宙天気予報を実現するためには、まず地球周辺の宇宙環境の現況を正しく把握する必要がある。地磁気変動をモニタ

一することは磁気圏や電離圏を流れる電流の状態をモニターする上で重要である。特に、磁極付近の地磁気水平成分の変動からは、PC指数と呼ばれる磁気圏対流の状態を示す指標が作成できるため、これを準リアルタイムに算出すれば太陽風-磁気圏相互作用の現況把握に有用である。しかしながら、北磁極のPC指数(PCN)は、準リアルタイムに公開・作成されていないのが現状である。

CanadaのEurekaは現在最も北磁軸極に近い地磁気観測拠点である。Eurekaの地磁気データを準リアルタイムに収集し、PC指数とほぼ等価の指数を算出することで、磁気圏対流の現況把握が実現できると期待される。また、CRLではL1点で太陽風を観測しているACE衛星のリアルタイムデータを受信している[1]。この二つの観測を比較することで原因(太陽風)と結果(磁気圏対流)の逐次分析が可能となり、太陽風-磁気圏相互作用の研究や日々の予報の向上が期待される。

本論文では、Eurekaに設置した準リアルタイムデータ収集・転送システムの概要を紹介し、収集したデータからPCN指数と等価の指数を算出するためにQaanaaqとEurekaの地磁気データの相関関係について解析を行った結果について紹介する。

2 PC指数

極冠域の地磁気変動は、磁気圏の対流運動を反映している。電離層の電気伝導度が一様であると仮定した場合、磁気圏電流、沿磁力線電流及び電離層のPedersen電流で構成される3次元電流系の影響は地上には現れないため、地磁気変動は電離層のHall電流の影響と考えることができる。しかし、実際の電離層では電気伝導度に空間的な非一様があり、3次元電流系とHall電流系は結合している。そのため、両者の影響を分離することは難しい。夏季は極冠域の電気伝導度が高く比較的一様であるため、近似的にHall電流系の影響として解釈することができる。一方、冬季は極冠域の電気伝導度が低くなり、Hall電流系の影響が小さくなるため、極冠域の磁場変動は磁気圏の3次元電流系の影響を反映していると考えられている。

これまでの研究から、極域の地磁気変動は大別すると2種類に分けられることが知られている。一つはサブストームと呼ばれる現象の発達に関連したDP-1電流系で、もう一つは磁気圏対流の発達に関連したDP-2電流系である。DP-2電流系による極冠域の地磁気水平成分の変動は惑星間空間磁場の南向き成分の発達と良い対応関係にあることが知られている[2]。Troshichevらの統計的な解析によると、磁極域の地磁気水平成分の変動はKanとLee[3]によって提唱されたmerging electric field ($E_m = VB_1 \sin^2(\theta/2)$)と呼ばれる太陽風パラメータと最も相関が良いことが示されている[4]。この関係に基づいて定義されたのがPC指数であり、磁気圏対流の指標として用いられている[5]。なお、太陽風パラメータと地磁気変動の対応関係は電離層の電気伝導度の変化に依存するため、指数導出に際しては、地方時(LT)依存性と季節依存性を統計的に規格化している。

PC指数は磁気圏の様々な物理量との対応関係が示されている。Troshichevらは極冠電位差とPC指数が線形関係にあることを示した[6]。また、極域のJoule加熱量と良い対応関係にあることが知られている[7]。さらに、太陽風パラメータとPC指数の統計解析から、磁気圏に強い太陽風電場が作用した際に、磁気圏対流の強さが頭打ちになることが示されている[8][9]。

3 Eureka

Eureka(ERK)はCanadaのEllsmere島にある気象観測拠点(北緯80.0度、東経274.1度)で、図1に示すようにQaanaaq(THL)よりも磁極付近(修正磁気緯度(Corrected Geomagnetic Latitude(2000):CGMLat)88.5度、修正磁気経度328.2度)に位置している。Eurekaにおける磁場変動の連続観測は、東京大学のグループがSolar-Terrestrial Energy Project(STEP)極域地磁気観測網整備の一環として1991年に磁力計を設置し、以来観測が継続されている。現地は民間の航空路が開設されていない極めて辺りなところであり、有線のネットワークが構築されていないのはもちろんのこと、静止衛星経由の通信も地平線すれすれの仰角のため極めて厳しい通信環境

下にある。しかし、カナダの気象庁が大パラボラアンテナを用いて衛星回線を維持しており、Internetを利用できる環境が確保されている。このため、現地の磁力計からデータを収集し、Internet経由でCRLに転送するシステムを構築することで、Eurekaの準リアルタイムの地磁気データを宇宙天気予報に役立てることが可能となる。

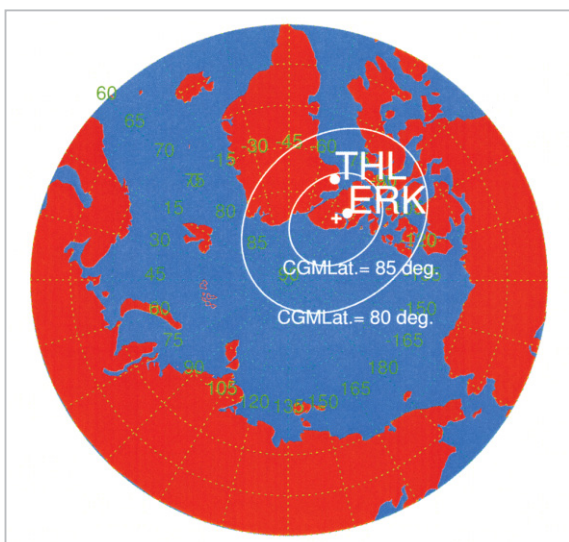


図1 Eureka(ERK)とQaanaaq(THL)の位置関係

なお、PC指数は磁気圏対流の指標として用いる場合、夏季には電離層の電気伝導度が增大して電離層のHall電流の影響が卓越するために、IMFが北向きの場合には、極冠域に生じる逆向き対流の影響を受けて負の値をとることに注意する必要がある[5]。このため、磁気圏対流のモニターとしてPC指数を用いる場合、できるだけ北磁極付近と南磁極付近の地磁気変動を同時にモニターし、常に冬半球のデータを取得できるようにすることが重要である。

現在、PC指数はInternational Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) Division Vの勧告に基づき、北磁極域ではDenmarkのQaanaaq(旧称Thule)、南磁極域ではRussiaのVostokのデータを用いて作成されている。算出アルゴリズムの違い等からQaanaaqのPC指数はPCN、VostokのPC指数はPCSと呼ばれている。Vostokの地磁気データはロシア極地研究所(AARI)、ミシガン大学、京都大学、CRLの協力

で、気象衛星(GMS)経由で準リアルタイムにデータ収集が行われており、PCSはAARIで準リアルタイムに作成・公開されている(http://www.aari.nw.ru/clgmi/geophys/pc_main.htm)。しかしながら、Qaanaaqについてはデータが1日遅れで公開されるため、PCNを準リアルタイムに利用できる状況になっていない。そのため、Qaanaaqと同様に北磁極域で地磁気観測を行っているEurekaの地磁気観測データを準リアルタイムに収集・転送し、そのデータを用いて準リアルタイムにPC指数と等価の指数を作成することで、磁気圏対流の現況把握を行うことを目指している。

4 システム概要

今回開発したシステムは図2に示すように、磁力計の出力を取り込みDigital化するデータ収集PCと、収集したデータを準リアルタイムにCRL内部にある地磁気データサーバへ転送する転送PCに分けられる。

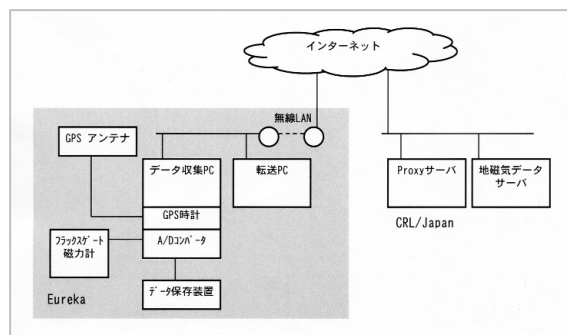


図2 システムの模式図

データ収集PCでは、フラックスゲート磁力計直交3成分のアナログ出力を16bitA/Dボードでデジタル化して取り込んでいる。磁力計の出力電圧は±10Vであり、磁束密度に換算すると±2000nTとなる。このため、16bitのA/D変換による量子化単位は0.305176mV(6.10352×10⁻²nT)となる。10Hzサンプリングを行い、10個のデータを加算平均することで、1秒値を算出している。時刻合わせ及び同期には、GPS時計ボード(DATUM製BC627AT)からの信号を用いている。データは1分ごとのファイルに格納され、ソケット通信を用いて転送PCへ伝送されると同

時に、ハードディスク (HDD) と jaz ドライブに保存される。HDD に格納されたファイルはディスク容量の都合で1年経過したものは自動的に削除される。システム制御には Windows 95+ LabView を用いている。

データ収集PCからソケット通信で伝送されたファイルは、転送PCにて1時間ごとの1秒値ファイルと12分ごとの1分値ファイルに変換される。1分値は60秒間のデータを平均することで作成される。転送PCのOSにはLinuxを用いて、変換されたファイルは、cronプロセスによって、1分値は12分ごと、1秒値は1時間ごとにCRLの地磁気データサーバへ転送される。当初は所外に準備した中継用サーバへファイルをftpで転送し、所内の地磁気データサーバから中継サーバへ定期的にデータを取りにっていた。現在はセキュリティの向上と転送手順の簡略化のために、sshのport forwarding機能を用いることで、CRLのproxyサーバ経由で転送PCからCRL内部ネットに接続された地磁気データサーバへデータを直接転送している。転送PCの時刻同期にはntpを用いている。さらに、磁力計を設置している建物はInternet環境が整備されている建物から約1.5km離れているため、無線LANシステム (Lucent Technology 製) を用いて磁力計を設置している建物までのNetworkを独自に構築した。

地磁気データサーバでは、Eurekaのデータのほかに、INTERMAGNETやCRL独自の観測ネットワークの地磁気データがすべて保管されている。Eurekaの1分値データは本データサーバで210度フォーマット[10]と呼ばれるデータフォーマットへ変換される。また、地磁気データサーバから外部公開用Webサーバにデータが転送され、地磁気オンラインDBとしてデータやQLプロットが公開される。

このEureka用準リアルタイムデータ収集・転送システムは、1998年度～1999年度春にかけて国内での開発・試験を行い、1999年夏に現地へ輸送し、実装を行った(図3参照)。そして、2000年1月より現地での運用を開始した。現地でのトラブル(停電やネットワーク障害等)により、時々欠測となる場合があるが、おおむね順調に稼働している。QLプロットについては、試験段

階ではあるが、以下のURLで参照することができる。表示例を図4に示す。

http://crlgin.crl.go.jp/sedoss/eureka/quick_look

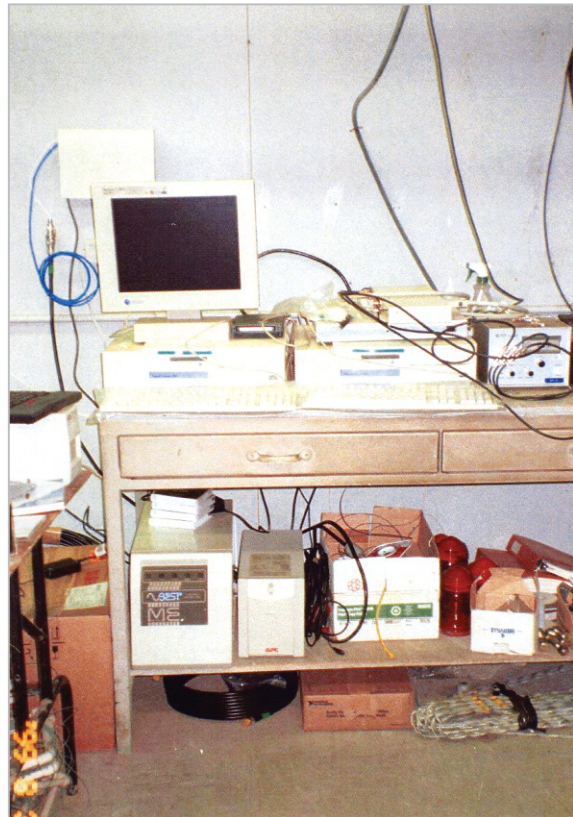


図3 現地の設置状況

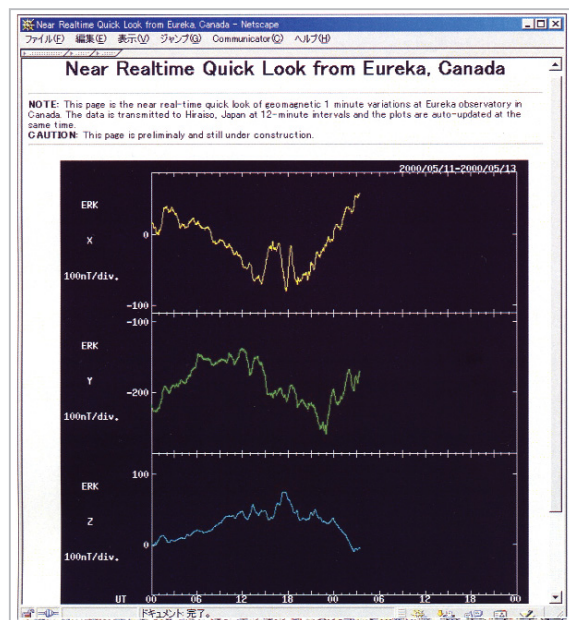


図4 EurekaデータQLモニター用Webページの表示例

また、将来的には準リアルタイム地磁気オンラインデータベースシステムでのデータ公開を予定している[11]。

5 EurekaとQaanaaqの地磁気変動の比較

Eurekaは北磁極付近に位置する観測点なので、Qaanaaq同様に磁気圏対流の指標としてその地磁気変動が利用できると考えられる。その際には、極冠域における磁場変動の一様性が保証されている必要がある。Papitashvili and Rasumussenは、Greenlandの同一経度に並んだ地磁気観測網のデータを用いて、磁極から半径15度以内では、Qaanaaqと同じ手法でほぼ同一のPC指数を作成することが可能であるという結果を示した[12]。しかし、彼らが実際に示したのは、Qaanaaqよりも低緯度の観測点との比較であり、Qaanaaqよりも高緯度側に位置するEurekaに対して適用可能であるかどうかは明らかではない。そこで、QaanaaqとEurekaの地磁気変動を比較することで、Qaanaaqよりも高緯度側の地磁気変動の一様性について調べた。

EurekaとQaanaaqの地磁気水平成分変動の相関は夏季に低く、冬季に高くなり、その変化は太陽天頂角の変化と対応していることが長妻ら[13]の予備的な解析で明らかになっている。ここでは、季節依存性に加えて、UT依存性について解析を行った。比較に用いたのはEurekaとQaanaaqの5分平均の地磁気水平成分で、地磁気静穏日の変動を差し引いている。図5に1993年と1994年のEurekaとQaanaaqの地磁気水平成分変動の相関係数をコンターマップにしたものを示す。なお、3月には、欠測期間が長く、相関係数を導出することはできなかった。図中に点線でEurekaとQaanaaqの地磁気地方時(MLT)の正午を示している。冬季には1日中相関が高い状態が保たれているのに対し、夏季にはMLTの正午付近で相関が低くなる傾向があり、MLTの真夜中付近で相関が高くなる傾向が見られる。

図5と同期間のEurekaとQaanaaqの太陽天頂角のコンターマップを図6に示す。図5と図6の比較から、太陽天頂角が70度以上の場合には、相関係数が0.9以上であるのに対し、太陽天頂角

が70度以下の場合に相関係数が低くなっていることが分かる。このことから、太陽放射による電離層の電気伝導度の増加が作り出す局所的なHall電流の発達、相関を低くする要因であることが示唆される。以上の結果から、夏季の太陽天頂角が70度以下の期間を除くと、極冠域の地磁気変動はほぼ一様で、Eurekaの地磁気変動をQaanaaqの代用として利用してPCN指数と等価の指数を作成することが可能であることが示された。

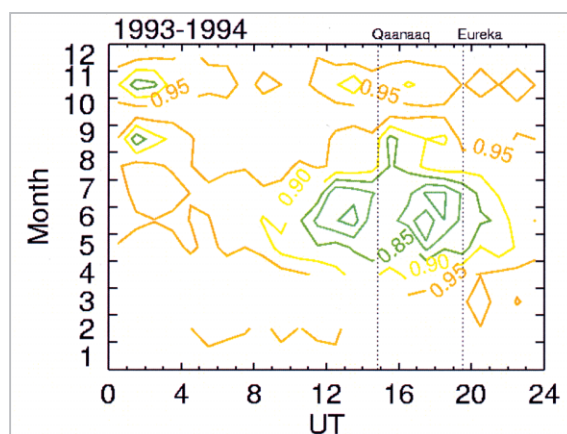


図5 QaanaaqとEurekaの地磁気水平成分変動の相関係数のコンターマップ

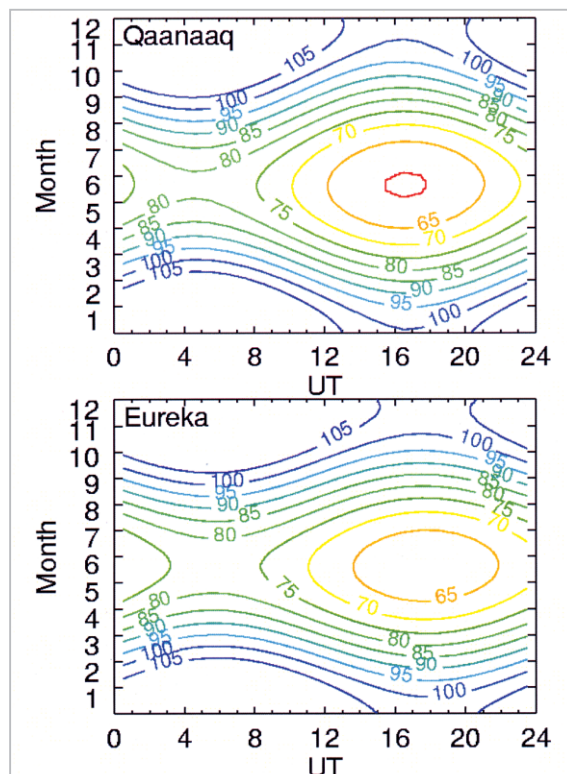


図6 Qaanaaq(上)とEureka(下)の太陽天頂角のコンターマップ

6 まとめ

北磁極付近に位置する Eureka の地磁気観測データを準リアルタイムで収集し、CRL へ転送するためのシステムを開発・設置し、現在運用している。現状では、現地でのトラブルでデータ欠損が生じる場合があるが、ほぼ準リアルタイムでのデータ取得を実現している。また、Eureka と Qaanaaq の地磁気データの比較から、夏季の太陽天頂角が 70 度以下の期間を除くと相関が良く、Eureka の地磁気データから PCN 指数と等価な指数が作成可能であることが示された。今後は、指数導出のためのアルゴリズムを開発し、データ取得後直ちに PCN 指数と等価な指数を算出することによって、太陽風-磁気圏相互作用の現況分析に役立てていく予定である。

謝辞

システムのメンテナンスと Eureka からのネットワーク利用に関して Meteorological Service Canada (MSC) のご協力に感謝いたします。システムの設置作業や MSC との交渉に際して、University of Saskatchewan の D.J. McEwen にサポートしていただきました。感謝いたします。PC 指数は DMI より提供を受けています。また、PC 指数の導出に関して、O. A. Troshichev、V. O. Papitashvili らの助言に感謝いたします。また、データ収集・転送システムの開発に当たっては、情報数理研の方にご協力いただきました。設置前の現地調査に際しては、科学技術庁振興調整費のサポートを受けました。お礼申し上げます。

参考文献

- 1 丸山 隆, 渡辺成昭, 大高一弘, 島津浩哲, "ACE 衛星による太陽風モニター計画", 通信総研季報, 43, 285-290, 1997.
- 2 Nishida, A., "Coherence of geomagnetic DP 2 fluctuations with interplanetary magnetic variations", J. Geophys. Res., 73, 5549-5559, 1968.
- 3 Kan, J. R. and Lee, L. C., "Energy coupling function and solar wind magnetosphere dynamo", Geophys. Res. Lett., 6, 577-580, 1979.
- 4 Troshichev, O. A., Dmitrieva, N. P., and Kuznetsov, B. M., "Polar cap magnetic activity as a signature of substorm development", Planet. Space Sci., 27, 217-221, 1979.
- 5 Troshichev, O. A., Andersen, V. G., Vennerstrom, S., and Friis-Christensen, E., "Magnetic activity in the polar cap -A new index", Planet. Space Sci., 36, 1095-1102, 1988.
- 6 Troshichev, O. A., H. Hayakawa, A. Matsuoka, T. Mukai, and K. Tsuruda, "Cross polar cap diameter and voltage as a function of PC index and interplanetary quantities", J. Geophys. Res., 101, 13,429-13,435, 1996.
- 7 Chun, F. K., D. J. Knipp, M. G. McHarg, G. Lu, B. A. Emery, S. Vennerstrom, and O. A. Troshichev, "Polar cap index as a proxy for hemispheric Joule heating", Geophys. Res. Lett., 26, 1101-1104, 1999.
- 8 Nagatsuma, T., T. Obara, and H. Ishibashi, "Relationship between solar wind parameters and magnetic activity in the near-pole region: Application to space weather forecasting", Adv. Space Res., 26, 103-106, 2000.
- 9 Nagatsuma, T., "Saturation of polar cap potential by intense solar wind electric fields", Geophys. Res. Lett., 29(10), 10.1029/2001GL014202, 2002.
- 10 Yumoto, K., Y. Tanaka, T. Oguti, K. Shiokawa, Y. Yoshimura, A. Isono, B.J. Fraser, F.W. Menk, and 210 MM Magnetic Observation Group, "Globally coordinated magnetic observations along 210 magnetic meridian during STEP period: 1. Preliminary Results of low-latitude Pc 3's", J. Geomag. Geoelectr., 44, 261-276, 1992.

- 11 長妻 努, 石橋弘光, 野崎憲朗, "準リアルタイム地磁気オンラインデータベースシステム", 通信総研季報, 46, 219-228, 2000.
- 12 Papitashvili, V. O., and O. Rasmussen, "Effective area for the northern polar cap magnetic activity index", Geophys. Res. Lett., 26, 2917-2920, 1999.
- 13 Nagatsuma, T., T. Obara, H. Ishibashi, K. Hayashi, and D. J. McEwen, "Real-time monitor of geomagnetic field in the near-pole regions as an index of magnetospheric electric field", Adv. Polar Upper Atmos. Res., 13, 132-138, 1999.

補遺：Eureka地磁気データフォーマット

1 観測PC用フォーマット

1秒値を1分ごとのファイルとして管理する。また、このファイルは観測用PCで保管すると同時に転送用PCに転送される。

1.1 ファイル名規則

ファイル名：¥raw_data¥yyyy¥mmdd¥yyyyymmddhhmm.erk

yyyy:西暦、mmdd:月日、hh:時、mm:分、erk:観測所コード(Eureka)(固定)

1.2 データフォーマット

erk1secYYYYMMDDHHMMSS(ヘッダ21 bytes) + (X(2 bytes) + Y(2 bytes) + Z(2 bytes)) × 60 = 381 bytes
(YYYYMMDD:年月日、HHMMSS:最初のデータの時分秒)(欠落値はFFとする。)

2 転送PC用フォーマット

1秒値データは1時間ごとのファイルとして管理する。1分値は12分ごとのファイルとして管理する。

2.1 ファイル名規則

1秒値ファイル名:/trans_data/yyyy/mmdd/Syyyyymmddhh.erk

S:秒の意味(固定) yyyy:西暦、mmdd:月日、hh:時、erk:観測所コード(Eureka)(固定)

1分値ファイル名:/trans_data/yyyy/mmdd/Myyyyymmddhhn.erk

M:1分値の意味(固定)、yyyy:西暦、mmdd:月日、hh:時、n:12分単位のカウンタ(0-4)、erk:観測所コード(Eureka)(固定)

2.2 データフォーマット

1秒値:erk1secYYYYMMDDHHMMSS(ヘッダ21 bytes) + (X成分(2 bytes) + Y成分(2 bytes) + Z成分(2 bytes)) × 3600 = 21621 bytes
(YYYYMMDD:年月日、HHMMSS:先頭データの時分秒)(欠落値は16進数でFFとする。)

1分値:erk1minYYYYMMDDHHMM(ヘッダ19 bytes) + (X成分(2 bytes) + Y成分(2 bytes) + Z成分(2 bytes)) × 12 = 91 bytes
(YYYYMMDD:年月日、HHMMSS:先頭データの時分秒)(欠落値は16進でFFとする。)



長妻 努

電磁波計測部門宇宙天気システムグループ主任研究員 博士(理学)
太陽地球系物理学

石橋弘光

電磁波計測部門太陽・太陽風グループ主任研究員
太陽風、宇宙天気



小原隆博

電磁波計測部門シミュレータグループリーダー 理学博士
磁気圏物理学



林 幹治

東京大学大学院理学系研究科助教授
理学博士
磁気圏物理学

