

4-1-3 リアルタイム宇宙天気予報

4-1-3 Space Weather Forecast Using Real-time Data

亘 慎一

WATARI Shinichi

要旨

近年、情報通信技術の進歩により、宇宙天気に必要な宇宙や地上からの観測データをほぼリアルタイムで収集することができるようになってきた。リアルタイムデータは、宇宙環境を常時監視して状況を認識し、必要に応じて警報を発する宇宙天気のナウキャストを可能にした。その他にもリアルタイムデータを予測モデルの入力データとして用いる数値予測など多くの応用が考えられる。本稿では、宇宙天気におけるリアルタイムモニタリングの役割について述べる。

Recent advances of information and communication technology enable to collect data from space and ground-based observations in real-time. It is possible to monitor, understand, and warn present situation of space environment using the real-time data. There are many applications of the real-time data in space weather forecasts. For example, the real-time data can be used as input data to numerical simulation of space environment. The importance of real-time monitoring in space weather is discussed in this report.

[キーワード]

リアルタイムモニタリング, 宇宙天気, 国際宇宙環境情報サービス, 国際地球観測年
Real-time monitoring, Space weather, International Space Environment Service,
International Geophysical Year

1 まえがき

国際地球観測年(IGY: International Geophysical Year)と呼ばれる国際共同研究プロジェクトが1957年から1958年に実施された。IGYのために電離圏、地磁気、太陽、宇宙線などの世界的な観測網や「世界資料センター(WDC: World Data Center)」と呼ばれるデータセンターが整備され、多くの研究成果があげられた。

このIGYの期間中、太陽や地球環境の国際的な共同観測のため、Space World Interval(SWI)と呼ばれる地磁気嵐の24時間予報が参加機関の間で交換された。日本では、電波研究所(現情報通信研究機構)がSWIを実施した。このSWIが国際宇宙環境情報サービス(ISES: International Space Environment Service)の宇宙天気情報のひとつのルーツである。IGY当時は、多量の観測

データを即時に送れるような通信手段がなかったため、観測情報はコード化され、テレックスにより各拠点に伝送された。各拠点からは、モールスコードに変換して短波放送された。図1にコード化された観測情報の例を示す。その後、この活動を継承してIUWDS(International URSIgram and World Days)が形成された。図2にIUWDSでの国際連携による情報交換の状況を示す。

IGYの時期にソビエト連邦(現ロシア共和国)による人類初の人工衛星、スプートニク1号の打ち上げやアメリカ合衆国の人工衛星エクスポローラー1号による放射線帯の発見などが行われた。それから50年以上が経過し、通信、放送、測位、気象観測などのために多くの人工衛星が使われている。宇宙環境の影響による衛星障害を経験することにより、人間が作った宇宙や地

```

BOUTOK 31051
USSFS 32404 31077 ///32 29003 11335 21405 UMGF 32505 81031
0930/ 30097 1/014 22344 33222 99999 UMGF 36701 81030 0900/
29098 1/144 22366 35322 21600 52001 29356 UMGF 33603 81031
0000/ 30007 1/015 23213 32532 21630 UMGF 43501 81031 0300/
30005 1/018 2///3 34432 UMGF 39601 81031 0300/ 30009 1/015
22223 33443 ///// UMGF 47701 81031 0300/ 30038 1/095 22145
36321 UMGF 45601 81031 0300/ 30002 1/017 23224 34432 UMGF
38501 81031 0330/ 30037 1/010 22122 34311 UMGF 36801 81031
0000/ 30006 1/647 24544 33964 10600 91630 99999 URANJ 32404
81031 00245 11110 01311 URANJ 32404 81031 00410 11110 03411
URANJ 32404 81031 00610 11110 05211 URANJ 32404 81031 01415
11110 05311 URANJ 32404 81031 02695 11110 06911 URANJ 32404
81031 04995 11110 12111 URANJ 32404 81031 08800 11110 19311
URANJ 32404 81031 15400 11110 47111 UMGF 31523 81031 /////
3000/ 1/019 23223 33543 99999 URANJ 34502 81031 03000 07120
06509 URANJ 34502 81031 00204 07120 00609 USSFS 21305 31165
///32 37006 13505 01209 URANJ 17401 81031 00245 16160 01016
URANJ 17401 81031 00410 16160 02116 URANJ 17401 81031 00610
16160 03816 URANJ 17401 81031 01415 16160 05416 URANJ 17401
81031 02695 16160 06316 URANJ 17401 81031 04995 16160 12516
URANJ 17401 81031 08800 16160 20416 URANJ 17401 81031 15400
16160 46016 URANJ 22501 81030 02800 16170 07017
    
```

図1 コード化された観測情報の例

上のシステムに影響を与える宇宙環境、すなわち「宇宙天気」の予報の必要性が認識されるようになった。IUWDSは、この宇宙天気予報の国際的な機関として1996年に国際宇宙環境情報サービス (ISES) と改称した。現在では、世界中で宇宙天気に関する研究が行われるようになってきている [1] - [3]。

近年の高速インターネットの急速な普及は、地上の観測所や衛星からの多量の観測データをほぼリアルタイムで取得することを可能にした。そのため、衛星や地上の観測データをモニターしながら共同観測を進めることができようになり、活動状況によってフレキシブルに観測対象

を変更するなど共同観測の可能性を大きく広げた。宇宙天気においては、リアルタイムデータにより宇宙環境を常時監視し、状況を認識することが可能になった。また、太陽高エネルギー粒子の到来、惑星間空間衝撃波の到来など障害を与えるような現象を自動的に検出して、利用者に警報を送信することを可能にした。図3に示す情報通信研究機構の宇宙天気予報センターでは、衛星や地上観測網からのリアルタイムのデータをモニターし、宇宙嵐が発生した場合には、利用者に臨時情報を送り注意を喚起している。宇宙環境の状況認識だけでなく、予測モデルへの入力データとしてリアルタイムデータを使うことができる。予測モデルの活用により予測精度の向上が期待される。情報通信研究機構では、太陽風のリアルタイム観測データを入力としてニューラルネットワークを用いた地磁気Dst指数の予測 [4] や地球磁気圏の磁気流体モデルをリアルタイムで計算する試み [5] を行っている。さらに、地球磁気圏のシミュレーション結果を使った電離圏のリアルタイムシミュレーションや太陽表面の磁場観測データを用いた太陽・太陽風のシミュレーションが行われている。

通信インフラが整備されていない観測点からリアルタイムデータを収集するためには、人工衛星を使ったデータ収集が有効な手段の一つである。人工衛星によるリアルタイムデータ収集の先駆的

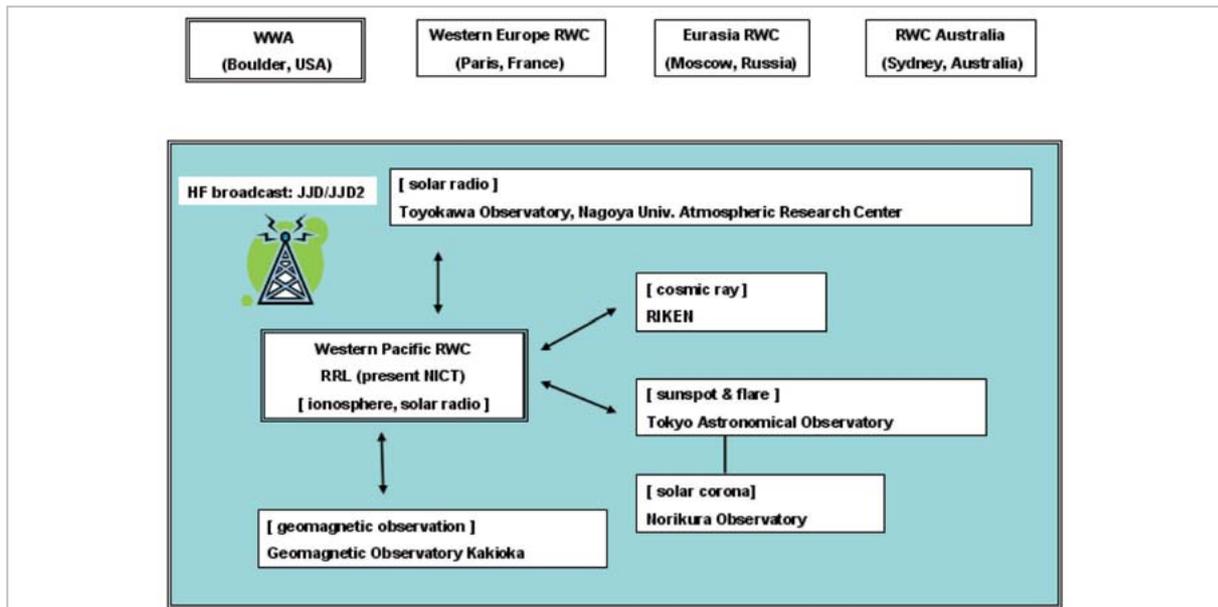


図2 IUWDS での国際連携による情報交換の状況



図3 衛星や地上観測網からのリアルタイムデータをモニターしている情報通信研究機構の宇宙天気予報センター

なプロジェクトとして、1980年代の終わりに始められたインターマグネット (INTERMAGNET: International Real-time Magnetic Observatory) と呼ばれる国際プロジェクトがある [6]。インターマグネットでは、観測点からの地磁気データをリアルタイムで収集するために、気象衛星 (GOES、ひまわり、METEOSAT) の通信チャンネルを利用している。情報通信研究機構では、1992年からインターマグネットに参加して、気象衛星「ひまわり」を利用した柿岡地磁気観測所、女満別地磁気観測所などからの地磁気データのリアルタイムデータ収集を始めた。

本稿では、これまでの情報通信研究機構における実践などを含めて、宇宙天気におけるリアルタイムデータの有用性について述べる [7]。

2 リアルタイムデータを用いた宇宙天気警報

リアルタイムデータを用いることにより、宇宙環境を常時監視して、その状況を認識することができるようになる。これにより、太陽高エネルギー粒子の到来、地磁気嵐の発生、静止軌道における高エネルギー電子の増加など宇宙機に障害を与えるような現象に対して、いち早く利用者へ警報を発することができる。現象の発生を自動的に検出して警報を出すことも可能である。例えば、篠原他 [8] は、NICT 地上地磁気観測網のリアルタイムデータを用いた地磁気



図4 宇宙天気情報を提供する Web ページ

嵐の急始部の自動検出システムを開発した。このシステムでは、リアルタイム地磁気観測データを用いて、惑星間空間衝撃波の到来に伴う地磁気のインパルス的な変化をその振幅、立ち上がり時間、時間変化の最大値から自動的に検出して電子メールにより知らせるものである。図4は、地磁気嵐の発生、デリンジャー現象、太陽高エネルギー粒子の到来、高エネルギー電子の増加、スポラジック E 層の発生を自動的に検出して Web ページから知らせるものである [9]。現象の自動検出には、米国の気象衛星 GOES からの太陽 X 線、太陽高エネルギー粒子、高エネルギー電子などのリアルタイム観測データを用いている。

3 宇宙天気予測モデルへの入力としてのリアルタイムデータ

リアルタイムデータは、予測モデルの入力データとしても使うことができる。予測モデルを活用することにより予測精度の向上が期待される。NASA が打ち上げた ACE 衛星 (Advanced Composition Explorer) は、地球から約 150 万キロ上流の太陽と地球の重力がつりあう L1 点で太陽風の観測を行い、1997 年以降、リアルタイムで連続的に太陽風の観測データを送り続けてい

る。情報通信研究機構は、NOAA/SWPC (National Oceanic and Atmospheric Administration/Space Weather Prediction Center) に協力して、ACE 衛星からのリアルタイムデータ受信の分担を行っている [10]。ACE 衛星からのリアルタイム太陽風データにより、地球に到来する 30 分から 1 時間程度前に擾乱の到来を検出することが可能である。リアルタイム太陽風データの利用の試みとしては、1980 年 3 月から 1982 年の半ばにかけて地磁気嵐の早期警戒のために NOAA/SEC (現 NOAA/SWPC) が NASA と協力して実施した ISEE-3 (International Sun Earth Explorer 3) 衛星からのデータ受信がある。このとき、データは主に常時監視により状況を把握するために使われた [11]。

リアルタイム太陽風データを利用したニューラルネットワークモデルによる予測システムの開発がいくつか行われている。渡辺他 [3] は、エルマン型ニューラルネットワークを用いて、地磁気嵐の指標となる地磁気 Dst 指数の予測モデルを開発した。渡辺他 [3] は、太陽風のリアルタイムデータ (速度、密度、磁場強度、磁場の x, y, z 成分) を入力データとして用いた。図 5 にこのモデルによる Dst 指数の予測例を示す。亘他 [12] は、静止軌道における高エネルギー電子フラックス変動のニューラルネットワークによる予測モデルを開発した。静止軌道の高エネルギー電子フラックスの増加は、衛星の深部帯電による障害の原因となるため、その予測が必要とされているものである。リアルタイム太陽風データおよび GOES 衛星によって観測された高エネルギー電子フラックスを入力して、24 時間先のフラックスの予測を行う。図 6 にこのモデルによる静止軌道における高エネルギー電子フラックスの予測例を示す。

リアルタイム太陽風データは、数値計算モデルへの入力データとしても使うことができる。図 7 に情報通信研究機構で行っているリアルタイム太陽風データを入力とした地球磁気圏の磁気流体コードによるシミュレーションの例を示す [4]。計算結果は、Web ページから公開されている。このシミュレーションの計算結果を用いて、AE 指数と呼ばれるオーロラ活動を表す地磁気指数の計算が行われている [13]。

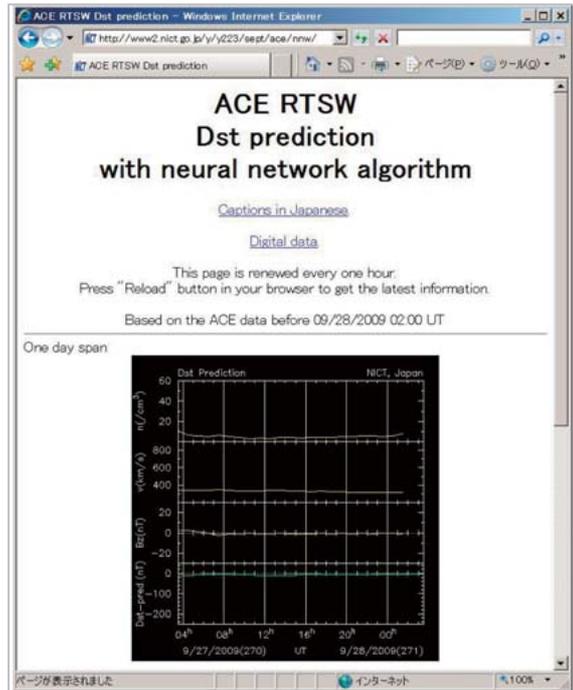


図5 リアルタイムデータを入力としたニューラルネットワークによる Dst 指数の予測

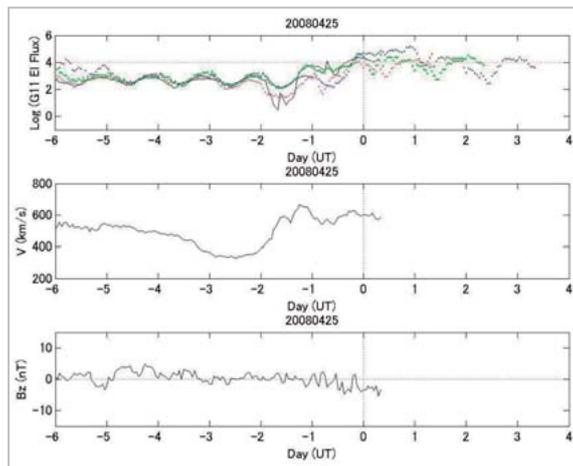


図6 リアルタイムデータを入力としたニューラルネットワークによる静止軌道の高エネルギー電子フラックスの予測

4 リアルタイムデータと宇宙天気研究

リアルタイムデータにより、観測衛星や地上観測網のデータを常時モニターすることが可能になり、共同観測を実施する際の可能性が広がった。たとえば、観測ロケットの打ち上げタイミングを決めるなど観測対象の活動状況により、観測のタイミングや観測対象をフレキシブルに変更することが容易にできるようになった。

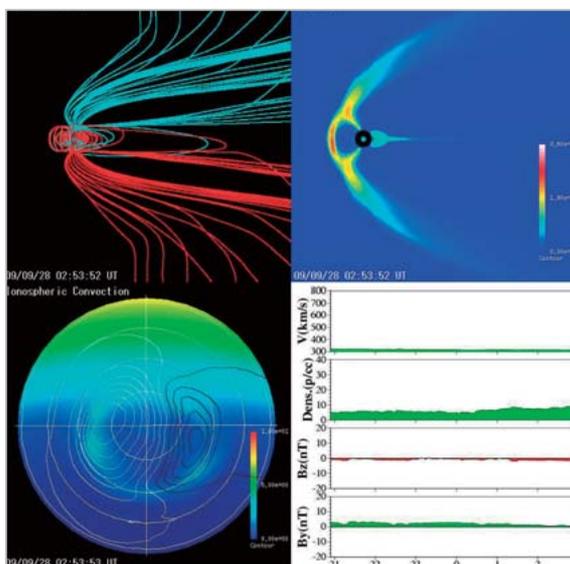


図7 リアルタイム太陽風データを入力とした地球磁気圏の磁気流体コードによるシミュレーション

リアルタイムデータをたえずモニターしていることにより、これまで注意していなかったリアルタイムデータストリームの中からの新たな現象を発見できる可能性がある。また、データがリアルタイムで取得されていることにより、新たな現象を発見した際にすぐに関連データを参照してアイデアを検証することが可能となる。

5 リアルタイム宇宙天気データの教育啓蒙活動への活用

リアルタイムデータを使った宇宙天気情報は、教育や一般への啓蒙活動のための優れたコンテンツとなる。リアルタイムで提供されるオーロラや太陽画像などは、一般の人々にも現在の宇宙天気を身近なものとして感じさせてくれる。例えば、ESAとNASAが打ち上げたSOHO衛星(Solar and Heliospheric Observatory)では、図8に示すWebページを通じて白色光、極端紫外線、コロナグラフなどにより撮像された太陽の画像をほぼリアルタイムで公開している[14]。一般の人々は、このWebページにアクセスして現在の太陽の状況を楽しむことができる。

宇宙天気は我々の生活に影響を与えることがあり、一般の人々の宇宙科学への興味の入り口となりえる。例えば、1989年3月に起きた強い

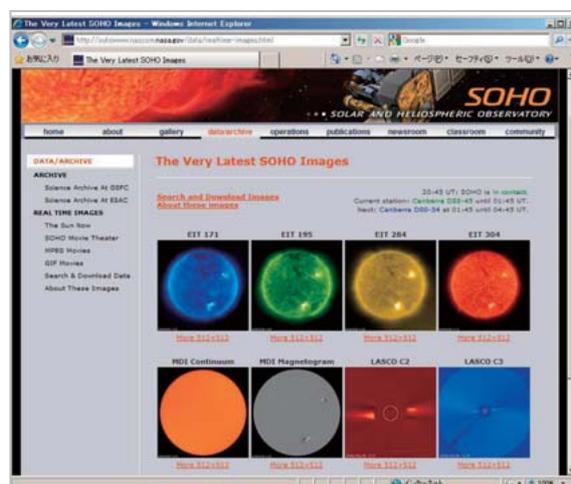


図8 SOHO衛星からのリアルタイムデータを公開しているWebページ

地磁気嵐の際には、地磁気誘導電流のため、カナダのケベック州で大規模な停電が発生し、約600万人が影響を受けた[15]。また、宇宙嵐により通信衛星や放送衛星に障害が起これ、通信や放送のサービスを中断させる事態も発生している[16]。

6 リアルタイムモニタリング技術について

リアルタイムデータの収集網をグローバルに展開するには、データ収集の手段、電源の確保、機器の故障の際のメンテナンスなどの検討が必要である。特に無人の観測点では、機器トラブルの際の復旧が難しいため、信頼性の高いシステムの構築やトラブルの際のアクセスが容易な場所への観測点の設置などを考慮しなければならない。電源に関しては、電源が得られない場合や得られても停電や電圧が不安定な場合がある。また、無停電電源装置による停電対策、太陽電池や風力発電機などの利用、機器の省電力化などが必要となる。データ収集の手段として、通信インフラが整備されていない場所へ観測点を設置する場合、リアルタイムでデータ収集を行うためには人工衛星の利用が考えられる。例えば、イリジウム衛星システムは地上から約780kmの高度を周回する66機の衛星間で相互に通信を行うことにより、小さな端末でグロー

バルな通信網を実現している。通信料金が依然として高いという問題はあがあるが、イリジウムを使うことによりグローバルな地上観測網からほぼリアルタイムでデータを収集することが可能になる。国立極地研究所では、イリジウムを使った無人の地磁気観測装置の開発を行い、南極での広域地磁気観測網を構築している[17]。地上の通信網としては、携帯電話網が急速に普及しており、携帯電話を利用したリアルタイムデータ収集が考えられる。また、無線ネットワーク装置の高性能化、低価格化により、観測点から最寄りのインターネット網のアクセスポイントまでの間に無線ネットワークを使うことにより、比較的安価にデータ収集網を構築できるようになってきている。

7 むすび

人工衛星の障害など我々の社会システムに影響を与える可能性のある宇宙嵐の到来に際してタイムリーに注意を喚起するためには、宇宙環境を常に監視する必要がある。近年の情報通信技術の進歩が宇宙環境を監視するためのリアルタイムでの宇宙環境データの取得を可能にした。しかし、グローバルなリアルタイム観測網の構築を考えた際、北極域や南極など依然として通信網の確保が難しい場所が存在する。今後の課題として、グローバルな観測点からのリアルタイムデータの収集を可能にする信頼性が高く安価な通信システムの開発が望まれる。

参考文献

- 1 P. Song, H. Singer, and G. Siscoe(eds), "Space Weather", Geophys. Monogr. Ser., Vol.125, Washington, D.C., pp.11-22, 2001.
- 2 I. A. Daglis(ed.), "Effects of Space Weather on Technology Infrastructure", NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2004.
- 3 巨慎一, "宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報", プラズマ核融合学会誌, Vol.82(11), pp.739-744, 2006.
- 4 渡邊成昭, 佐川永一, 大高一弘, 島津浩哲, "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圏擾乱の予測", 通信総合研究所季報, Vol.48(4), pp.59-73, 2002.
- 5 M. Den, T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hayashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, H. Takahara, and T. Takei, "Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code", Space Weather, Vol.4, S06004, doi:10.1029/2004SW000100, 2006.
- 6 http://www.intermagnet.org/Welcom_e.html
- 7 S. Watari, "Space weather and real-time monitoring", Data Science Journal, Vol.8, pp.S78-S84, 2009.
- 8 篠原学, 菊池崇, 野崎憲朗, "急始型地磁気嵐の自動検出システムについて", 情報通信研究機構季報, Vol.51(3/4), pp.177-184, 2005.
- 9 <http://www.swc.nict.go.jp/>
- 10 佐川永一, 渡邊成昭, 大高一弘, 島津浩哲, "ACE/IMAGE 衛星リアルタイムデータ受信", 通信総合研究所季報, Vol.48(4), pp.47-57, 2002.
- 11 J. A. Joselyn, "Real-time prediction of global Geomagnetic activity", in Solar Wind-Magnetosphere Coupling, edited by Y. Kamide and A. Slavin, Tokyo, TERRAPUB, pp.127-141, 1986.
- 12 巨慎一, 徳光政弘, 北村健太郎, 石田好輝, "ニューラルネットワークによる静止軌道の高エネルギー電子フラックスの予測について", 信学技法, SANE2007-83, pp.7-12, 2007.
- 13 K. Kitamura, H. Shimazu, S. Fujita, S. Watari, M. Kunitake, H. Shinagawa, and T. Tanaka, "Properties of AE indices derived from real-time global simulation and their implications for solar wind-magnetosphere coupling", J. Geophys. Res., 113, A03S10, doi:10.1029/2007JA012514, 2008.

- 14 <http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>
- 15 D. H. Boteler, "Space Weather Effects on Power Systems", in Space Weather, Geophys. Monogr. Ser., Vol.125, edited by P. Song, H. Singer, and G. Siscoe, AGU, Washington, D. C., pp.347-352, 2001.
- 16 E. J. Daly, "Outlook on Space Weather Effects on Spacecraft", G., in Effects of Space Weather on Technology Infrastructure, NATO Science Series, edited by I. A. Daglis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp.91-108, 2004.
- 17 A. Kadokura, H. Yamagisi, N. Sato, K. Nakano, and M. C. Rose, "Unmanned magnetometer network observation in the 44th Japanese Antarctic Research Expedition: Initial results and an event study on auroral substorm evolution", Polar Science, Vol.2(3), pp.223-235, 2008.



つなだ けんじ
目 録

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、宇宙天気