

3-3 静止軌道の宇宙環境監視・予測の重要性

3-3 Importance of Monitoring and Forecasting of Space Environment in Geostationary Orbit

長妻 努 坂口歌織

NAGATSUMA Tsutomu and SAKAGUCHI Kaori

静止軌道では通信・放送・気象観測等様々な実利用目的の衛星が運用されている。一方、静止軌道の宇宙環境は太陽風の影響等によって大きく変動し、人工衛星の不具合や障害等の原因となることが知られている。そのため、安全・安心な衛星運用の実現には宇宙環境変動の現況や予測情報を用いたリスク回避や、障害発生時の迅速な状況分析・対応が必要となる。ここでは、静止軌道における宇宙環境変動とその衛星障害リスクや、我々が取り組んでいる静止衛星の高エネルギー粒子観測データを用いた静止軌道の宇宙環境の監視、数理モデルを用いた将来予測、個別の衛星の材料や形状を考慮して人工衛星の帯放電リスクを推定・予測するシステム SECURES の開発、静止軌道での宇宙環境計測の将来検討の概要について述べる。

In geostationary orbit, satellites for various practical purposes such as communication, broadcasting, and weather observations are operated. On the contrary, it is known that malfunctions and failures of satellites in geostationary orbit sometimes happens due to the space environment disturbances driven by the solar wind. To realize safe and secure satellite operation, nowcast and forecast information of space environment needs to be used for avoiding risks of satellite anomalies and quick diagnosing and responding in the event of satellite anomaly. We will introduce the space environment disturbances and its risk of satellite anomalies, monitoring of the space environment using high-energy particle observations, forecast of space environment using mathematical models, the development of SECURES, a system for estimating and predicting the risk of satellite charging/discharging in consideration of the material and shape of the satellite, and the future plan of space environment monitoring in geostationary orbit.

1 はじめに

地球半径の約 6.6 倍 (高度約 3 万 6 千 km) の赤道上空の円軌道の公転周期は、地球の自転周期と同じ約 23 時間 56 分である。この軌道上の人工衛星は、地上から静止して見えることから静止衛星と呼ばれ、その軌道は静止軌道と呼ばれている。この軌道特性を活かし、通信・放送・気象観測等、様々な実利用目的の人工衛星が静止軌道に打ち上げられており、2021 年 1 月 4 日現在、534 機の人工衛星が静止軌道で運用されている [1]。静止衛星は我々の生活に欠かすことのできない社会インフラとなりつつあり、予期せぬ機器の障害・故障に伴う人工衛星の機能損失や制御不能状態は、サービスの中断をもたらすとともに、スペースデブリの増加や他の静止衛星との電波干渉等の問題につながる危険性がある。

宇宙空間では、太陽活動等に起因する宇宙環境変動

によって人工衛星に様々な不具合・障害が発生するリスクがあるため、人工衛星の設計段階で、投入軌道や軌道上の寿命に基づく対策を施している。さらに、軌道投入後の安全・安心な衛星運用を実現するためには、衛星周辺の宇宙環境の現況やその後の推移予測の情報を元に、障害リスクを回避する衛星運用を実施したり、万が一人工衛星に不具合・障害が発生した場合の即時対応の際には、宇宙環境情報等を活用した原因の即時分析を実施したりすることが必要となる。このようなレジリエントな衛星運用には宇宙環境の監視とその推移予測、リスク評価等の宇宙天気予報が重要な役割を担っている。本稿では、静止軌道の宇宙環境の監視・予測の重要性と、情報通信研究機構 (NICT) における具体的な取組について述べる。

2 静止軌道における宇宙環境変動とその影響

地球周辺の宇宙空間には、地球磁場と太陽風との相互作用によって地球磁気圏と呼ばれる領域が形成されている。太陽活動によって大きく変動する太陽風との相互作用によって、地球磁気圏内ではサブストームや地磁気嵐と呼ばれるじょう乱現象が発生し、地球周辺の宇宙環境は大きく変化する [2]。この宇宙環境変動は、人工衛星や地上インフラに対して影響を与え得る [3]。また、太陽フレア爆発やコロナ質量放出現象に伴う惑星間空間衝撃波によって生成される 10 MeV 以上の高エネルギー陽子（太陽プロトン現象）、地球磁気圏外部から到来する様々な高エネルギー粒子（銀河宇宙線など）も、地球周辺の宇宙環境を変動させ、人工衛星や地上インフラに影響を及ぼす要因である。ここでは、静止軌道における宇宙環境変動とそれが人工衛星に与える影響について述べる。

人工衛星に搭載される CPU やメモリ等の半導体素子は、外部からの高エネルギー陽子、重イオン等の入射によって、ビットエラーや誤動作、時には永久故障を引き起こすことがある。これをシングルイベント効果 (Single Event Effect: SEE) と呼んでいる。地表や低軌道衛星においては、極域や南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly: SAA) と呼ばれる局所的に磁場強度が弱い領域を除いて地球の強い磁場がこれらの粒子の侵入を防いでいるため、SEE の影響は限定的であるが、静止軌道の磁場強度は地表の 300 分の 1 程度であるため、太陽プロトン現象や銀河宇宙線の影響を受けやすい。

宇宙空間では、人工衛星周辺のプラズマから衛星表面への電子やイオンの流入出や、太陽光の影響による光電子の放出等によって、衛星表面に電位が形成される。これを表面帯電と呼んでいる。表面帯電は、数 keV ～数百 keV 程度のプラズマによって引き起こされる。衛星表面の電位は材質に依存するため、異なる材質間の電位差が閾値^{しきいち}を超える場合には、放電が起こり、衛星の不具合・障害の原因となる [4]。数 keV ～数百 keV のプラズマの変動をもたらし磁気圏内のじょう乱現象としてサブストームがある。サブストームの際には、極域電離圏において真夜中付近のオーロラが突然爆発的に明るくなり、経度・緯度方向に拡大・発達していく様子が観測される。この時地球磁気圏では、磁気圏尾部から地球半径の 10 倍よりも内側の領域にプラズマが注入され、プラズマの圧力が増大することが観測やシミュレーションによって示されている。静止軌道ではサブストームに伴う数 keV ～数百 keV のプラズマ粒子の増大によってプラズマの温度、密度変動が急激に変化し、これが表面帯電・放電を引き起

こすと考えられている。

一方、数百 keV 以上の高エネルギー電子は、衛星の構体を貫通して衛星内部に侵入し、ケーブルや基板上の絶縁体を帯電・放電させると考えられている [5]。これを深部帯電と呼んでいる。静止軌道は、数百 keV ～数 MeV の高エネルギー電子が磁力線によって捕捉されている放射線帯外帯の外縁部に位置している。放射線帯外帯は太陽風変動によって駆動される地磁気嵐に伴い、高エネルギー電子のフラックスがダイナミックに変動することが知られている。地磁気嵐の後に静止軌道の高エネルギー電子フラックスが高い状態が数日間にわたって継続することがあり、このような状況下で発生する人工衛星の不具合・故障は、深部帯電が原因であると考えられている。

3 静止気象衛星による宇宙環境計測とその利用

前述のとおり、静止軌道は宇宙環境変動に伴う衛星障害のリスクが高いため、衛星及び搭載機器の運用・維持・管理のためのハウスキーピング情報として機器の温度等とともに衛星周囲の宇宙環境を計測している衛星も少なくない。我が国では、1977 年に気象庁が気象衛星ひまわり (Geostationary Meteorological Satellite: GMS) を打上げ、日本上空での気象観測を開始した。GMS には衛星のハウスキーピングや故障解析を目的とした宇宙環境計測装置 (Space Environment Monitor: SEM) が搭載され、高エネルギー電子・陽子等を計測していた [6]。GMS シリーズは 5 号機まで打ち上げられたが、そのうち 4 号機までは SEM が搭載されていた。

当時、電波研究所 (現、NICT) 平磯支所では、電波予報・警報業務を実施しており、プロトン現象や放射線帯電子フラックスの状況の参考情報として、気象庁気象衛星センターから電波研平磯支所へ毎日、前日 1 日分の SEM データ (2 分平均値のプロット図) がファクシミリで送付されていた [6]。1988 年度からは、通信総合研究所 (現、NICT) において「宇宙天気予報システムの研究開発」が始まり [7]、電波予報・警報は宇宙環境予報へと発展的に移行している。通信総合研究所平磯宇宙環境センターで実施していた宇宙環境予報業務においても、米国海洋大気局 (National Oceanographic and Atmospheric Administration: NOAA) の静止気象衛星 (Geostationary Operational Environmental Satellites: GOES) の X 線強度データや高エネルギー粒子データと併せて、SEM データは活用されてきた [8]。SEM のデジタルデータの利活用のために、1991 年に電話回線を用いたデータ伝送システムが開発・導入され [9]、

1994年には気象衛星ひまわりから直接SEMデータを受信する装置を整備し、日本上空の静止軌道の宇宙環境(高エネルギー粒子環境)をリアルタイムで監視できるようになった[10]。

残念なことに、その後のGMS 5号機、運輸多目的衛星1号、2号(MTSAT-1R, 2)では宇宙環境計測装置は未搭載であった。しかし、2014年10月、2016年11月に打ち上げられたひまわり8号、9号には宇宙環境データ取得装置(Space Environment Data Acquisition monitor: SEDA)が搭載され[11]、日本上空における静止軌道の宇宙環境のリアルタイムモニタリングが再開している。

SEDAの外観を図1、諸元を表1、2に記す。SEDA



図1 SEDAの外観

表1 SEDAの諸元

項目	諸元
チャンネル数	陽子: 8 電子: 8
エネルギー範囲	陽子: 15–100 MeV 電子: 0.2–4.5 MeV
時間分解能	10 秒
視野角	陽子: ± 39.35 deg. 電子: ± 78.3 deg.

表2 陽子と電子の各チャンネルのエネルギー

チャンネル	陽子のエネルギー [MeV]	電子のエネルギー [MeV]
0	21.6	0.2
1	29.9	0.3
2	37.9	0.45
3	45.4	0.65
4	57.8	1.0
5	68.4	1.5
6	75.2	2.0
7	81.4	4.5

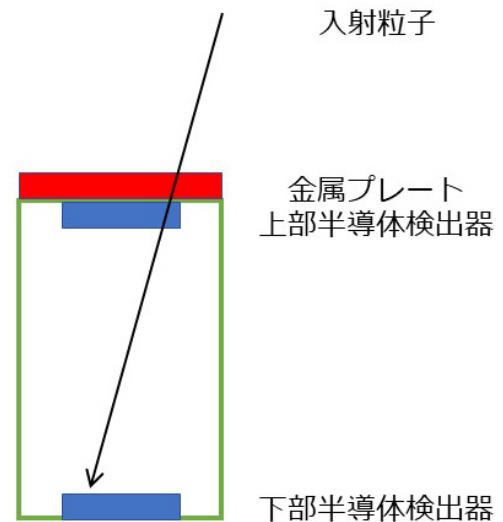


図2 SEDA-p計測チャンネルの概念図



図3 Himawari/SEDA Database

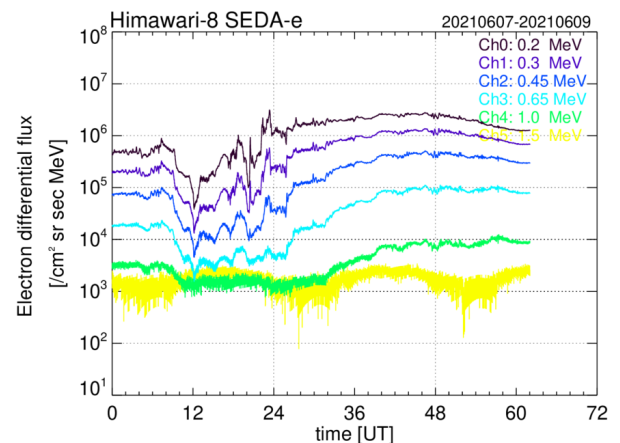


図4 Quick Look Plotの例

は高エネルギー陽子センサー (SEDA-p) と高エネルギー電子センサー (SEDA-e) で構成されている。SEDA はひまわり 8、9 号の東の側面に取り付けられており、荷電粒子の旋回運動の関係で、地球側から旋回してくる陽子、地球の外側から旋回してくる電子を計測している。

SEDA-p の計測チャンネルの概念図を図 2 に示す。SEDA-p はチャンネルごとにセンサーの上部と下部に取り付けられた 2 枚の半導体検出器で高エネルギー陽子を検出する。上部検出器の前段の金属シールドの厚みを変えることで検出するエネルギー範囲を変えている。SEDA-p は数 MeV 以上の電子フラックスにも感度があり、高エネルギー電子フラックスがノイズとして混入したフラックス変動が観測される [12]。

SEDA-e は金属板に侵入した荷電粒子(主に電子)を電流として計測する装置である。電子が金属板に侵入できる厚みはエネルギーに依存するため、厚みの異なる 8 つの金属板の間隔を空けて配置することで、0.2 ~ 4.5 MeV のエネルギーを計測する。このセンサーは、高エネルギー陽子フラックスの混入が無いことが特徴であるが、観測されるフラックス値が小さい場合にバイアス電流の差し引きの誤差により、人工的な日変化やマイナスの値を示すことがある。また、4.5 MeV の電子を検出するチャンネル (Ch.7) は静止軌道のフラックスに対する十分な感度が無く、2 MeV の電子を検出するチャンネル (Ch.6) もフラックスが増大する期間を除くと、十分な感度がない [12]。

NICT では、10 分ごとに気象庁から SEDA データを収集し、これを 5 分平均値のテキスト形式及び Common Data Format (CDF) 形式のデータに変換・蓄積したものを Web 上で Himawari/SEDA データベースとして公開する (<https://aer-nc-web.nict.go.jp/himawari-seda/>) とともに (図 3)、準リアルタイムの Quick Look Plot を表示し (図 4)、日々の予報業務等に活用している。

4 静止軌道の宇宙環境予測・リスク評価

4.1 放射線帯電子予測

放射線帯の変動による衛星障害のリスクを軽減するためには、その変動を事前に予測することが重要である。例えば通信衛星 Galaxy15 は、2010 年にトランスポンダーがアクティブなまま衛星が地上からのコマンドを受け付けない事態に陥った。この事故では電波を出しながらコントロール不能な状態に陥り、そのまま軌道を外れたため他の衛星へも危険をもたらした [13]。このような場合、宇宙環境が悪化すると予測された時に、事前に安全な運用に切り替えることができれば、



図 5 放射線帯予報ウェブサイト画面

衛星障害発生時のリスクを軽減できたかもしれない。

現在、我々は数日先までの静止軌道における電子フラックス及び 24 時間フルエンスの予測モデルを開発しウェブサイト「放射線帯予報」で公開している (<https://radi.nict.go.jp>)。図 5 にウェブサイトのイメージを示す。予測手法は、多変量自己回帰モデルとカルマンフィルタを組み合わせた時系列モデルで、モデルへの入力には Deep Space Climate Observatory (DSCOVR) 衛星による太陽風の観測値及び京都大学地磁気世界資料解析センターが提供している地磁気の Dst 指数等を用いている。予測対象は、米国の静止気象衛星 GOES が位置する経度 135 ~ 75 度付近の 2 MeV 以上の電子の推移 [14] と、日本の静止気象衛星ひまわり 8 号が位置する経度 140 度の 1 MeV の電子の推移 [15]、また、日本のジオスペース探査衛星 ERG が飛翔する中軌道の数 MeV 電子の推移 [16] である。放射線帯予報ウェブでは、これらの予報結果を随時更新し提供している。

4.2 SECURES

宇宙環境予測モデルの高精度化は進みつつあるが、その一方で衛星周辺の宇宙環境の状態が同じであっても、人工衛星自身の材料や形状等の違いによって、衛星の表面帯電・深部帯電に起因するリスクは異なる。そのため、衛星運用担当者にとっては、汎用的な宇宙環境の予測情報のみでは、自分達が運用する個別の衛星のリスク評価・判断は難しい。そこで、他の研究機関との協力の下、個別の衛星の材料や形状を考慮して人工衛星の帯放電リスクを推定・予測するシステムとして、Space Environment Customized Risk Estimation for Satellites (SECURES) を開発している [17]。SECURES の基本コンセプトは宇宙環境を予測するモデル・シミュレーションと、衛星の材料・形状モデルに基づきある宇宙環境下における表面帯電、深部帯電を推定する帯電ツールを組み合わせ、個別の衛星の帯電リスクを推定するものであり、静止衛星用のシステムが開発されている。SECURES はグローバル MHD シミュレーションと衛星表面帯電モデルを結合した表

面帯電モジュール、放射線帯モデルと衛星深部帯電モデルを結合した深部帯電モジュールで構成されている[18]。現在、仮想的な人工衛星の材料・形状モデルを用いた静止軌道の表面帯電に伴うリスク推定・予測を行う SECURES Web サイトの試験公開の準備を進めている。

5 静止軌道の宇宙放射線・帯電量計測の将来計画

大気^{ひこ}の庇護を受けない宇宙空間を飛しょうする人工衛星は、宇宙環境変動による誤動作や不具合が発生するリスクと常に隣り合わせて運用される。特に前述の様に静止軌道衛星は、放射線帯やサブストーム、太陽高エネルギー粒子によるリスクに常に曝^{さら}されている。このリスクを軽減、回避するためには、衛星近傍の宇宙環境を定常的に計測し、具体的な対処を促すための予報・警報を発信し、事業者が対応するための時間を確保する必要がある。環境と同時に衛星の帯電状況等を常に監視することが可能になれば、宇宙環境変動に対する衛星固有の状態変化を直接的に把握すること、また、衛星設計標準にその結果を反映して、宇宙環境変動に強い衛星を設計する指針を得ること等が期待できる。そこで、静止衛星の宇宙環境変動に対する抗たん性の向上を目的として、放射線帯電子・太陽高エネルギー粒子・銀河宇宙線を測定する衛星搭載センサーと、衛星材料の帯電状態を監視する内部帯電センサーの開発に着手している。

<電子線センサー>

現在の宇宙天気予報では、2 MeV 以上の電子線の積算値を基準として現況把握と予報を行っている。放射線帯電子フラックス増大と衛星障害の対応関係等から、MeV エネルギー帯の電子線が衛星構体を貫通して蓄積し、衛星構体内の帯電（深部帯電）の原因となることが懸念されているためである。しかしながら、衛星構体を貫通する電子線のエネルギーは衛星構体の厚さに依存することから、衛星構体の厚みによっては如何なるエネルギー帯の電子も表面帯電や深部帯電等の衛星不具合に寄与し得る。今後、これらの可能性を考慮した衛星障害発生リスク評価を行うためには、幅広いエネルギー帯の電子線を計測する必要がある。そこで、数十 keV を計測下限値とし、放射線帯電子が存在する 5 MeV 程度まで計測可能な電子線センサーを宇宙航空研究開発機構（JAXA）と共同開発し、静止軌道衛星への搭載を目指す。

<陽子線センサー>

陽子線に関する宇宙天気予報の基準は 10 MeV 以上のエネルギーを持つ陽子線の積分フラックス値である。

10 MeV 以上の陽子線の増大は、人工衛星の不具合発生が懸念されるのみならず、電離圏の乱れ（極冠吸収）を発生させる原因にもなっており、通信・放送・測位等への影響も懸念されている。大規模太陽フレア発生時は、エネルギーが 100 MeV 以上の陽子線が急増することがある。これはシングルイベント効果やトータルドーズ効果により衛星機器の誤動作や寿命短縮の要因であるとともに、航空機高度における放射線被ばくの原因となる。エネルギーが高いほど地表に近い高度への影響度が大きいことから、地上等への影響を評価するには 1 GeV 程度の陽子線の計測が必須である。そこで宇宙天気予報基準に合致し、かつ、陽子線による通信・放送・測位・被ばく等の影響評価に資するデータを取得するため、10 MeV から 1 GeV までのエネルギーを持つ陽子線を計測可能な装置を JAXA と共同開発中であり、電子線センサーと共に静止軌道衛星への搭載を目指している。

<内部帯電センサー>

上記で記述したエネルギー帯の電子線及び陽子線の一部は、人工衛星材料内部に侵入し帯電するため、それを起因とした静電放電による不具合を発生させる。これまで国内では、表面電位が計測可能な装置の開発が行われてきた。しかしながら、帯電材料が衛星不具合の原因となるのは、耐電圧を超えて放電した時であり、放電の発生を予測するには表面だけではなく材料内部を帯電の状態を計測する技術を確立する必要がある。内部帯電を計測する技術は既に地上実験装置として開発されているため[19]、今後、その装置を宇宙用に改良し、実宇宙空間で材料内部の電荷分布及び電荷総量が計測可能な電位計を、東京都市大学と共同開発する予定である。帯電計測装置を電子線・陽子線センサーを静止衛星に同時に搭載することができれば、環境変化とそれに追従する衛星への影響を直接評価することが可能となる。

2021 年現在、我が国の宇宙天気予報は、米国の気象衛星 GOES が計測している宇宙放射線のデータを基準として利用している。しかし、米国上空と我が国上空の宇宙環境には差異があり、我が国の社会インフラを担う人工衛星の保全のためには、我が国の経度域の静止軌道の状況を把握する必要がある。3 で紹介されている静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号搭載の宇宙環境データ取得装置（SEDA）は、予報業務で参考情報としているが、ハウスキーピング目的で搭載されているため、電子線・陽子線ともに計測エネルギー範囲と精度が十分とはいえない。そこで、上記の様な宇宙天気予報及び人工衛星保全のために利用可能な計測装置を開発し、我が国の次期静止軌道衛星に搭載することで、我が国上空の宇宙天気の状態監視及び予報の高度化を

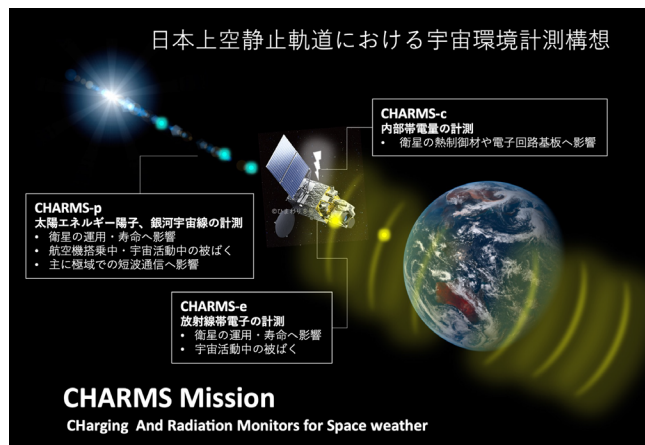


図6 日本上空静止衛星における宇宙環境計測構想

目指す。本計画のミッション概念図を図6に示す。

6 まとめ

本稿では、社会インフラとしての実利用が進んでいる静止軌道における宇宙環境変動に起因する衛星障害リスク、衛星の周辺とその状況を把握するための宇宙環境の監視や障害リスクに備えるための予測の現状、そして宇宙環境計測・予測の将来計画について紹介した。静止軌道はその特異性により今後も社会インフラとして積極的に活用されることから、今後もレジリエントな衛星運用の実現を支援するために宇宙環境監視や予測モデルの拡充と高精度化を進めていく必要がある。

一方、宇宙環境の利用は静止軌道に留まらず、低軌道や中軌道の利活用や、多数の小型衛星コンステレーションによる通信や地球のネットワーク観測等の計画なども進みつつある。さらに、現在利用されている第5世代移動通信システム(5G)の次の世代の情報通信ネットワーク(Beyond 5G)においては、宇宙から地球までを多層的に接続されるネットワークが前提になると考えられており[20]、今後はこのような宇宙利用の拡大・発展の状況を踏まえ、宇宙環境監視や予測の対象領域を広げていくことも必要とされている[21]。

【参考文献】

- 1 List of Satellites in Geostationary Orbit <http://www.satsig.net/sslist.htm>
- 2 長妻努, “地磁気嵐,” 通信総合研究所季報, vol.48, no.3, pp.123-136, 2002.
- 3 長妻努, “ジオスペースじょう乱の監視・予測とその重要性,” 情報通信研究機構季報, vol.55, nos.1-4, pp.57-66, 2009.
- 4 村中崇信, “3.1 宇宙機帯電の原理と数値解析モデリング(小特集 帯電事故防止のための宇宙環境・衛星帯電数値シミュレーション),” J. Plasma Fusion Res., vol.88, pp.87-91, 2012.
- 5 安田雅昭, 渡邊力夫, “4. 衛星材料内部の電子軌道解析と蓄積電荷分布解析(小特集 帯電事故防止のための宇宙環境・衛星帯電数値シミュレーション),” J. Plasma Fusion Res., vol.88, pp.96-100, 2012.

- 6 操野年之, “GMSによって得られたSEMデータの有効性と利用動向,” 気象衛星センター技術報告, 第12号, pp.45-55, 1985年12月
- 7 K. Marubashi, “The space weather forecast program,” Space Sci. Rev., vol.51, 197, 1989.
- 8 長妻努, “宇宙環境予報業務,” 通信総合研究所季報, vol.43, no.2, pp.301-308, 1997.
- 9 徳丸宗利, 川崎和義, “宇宙天気予報のための宇宙環境モニターデータ伝送システムの開発,” 通信総合研究所季報, vol.39, pp.65-71, 1993.
- 10 M. Den, T. Obara, and F. Tomita, “Development of GMS data Acquisition and database systems,” Adv. Polar Upper Atmos. Res., vol.13, pp.191-196, 1999.
- 11 K. Bessho, K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shimoji, Y. Sumida, M. Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota, and R. Yoshida, “An introduction to Himawari-8/9 - Japan's new-generation geostationary meteorological satellites,” J. Meteorol. Soc. Jpn., vol.94, 2016. <http://doi.org/10.2151/jmsj.2016-009>.
- 12 T. Nagatsuma, K. Sakaguchi, Y. Kubo, P. Belgraver, F. Chastellain, R. Muff, and T. Otomo, “The Space Environment Data Acquisition Monitor on board Himawari-8 as Space Environment Monitoring on Japanese Meridian of GEO,” Earth, Planets and Space, vol.69, article number 74, 2017. doi:10.1186/s40623-017-0659-6.
- 13 Dale Ferguson, William Denig, and Juan Rodriguez, “Plasma Conditions During the Galaxy 15 Anomaly and the Possibility of ESD from Subsurface Charging,” AIAA 2011-1061, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Jan. 2011.
- 14 K. Sakaguchi, Y. Miyoshi, S. Saito, T. Nagatsuma, K. Seki, and K. T. Murata, “Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model,” Space Weather, vol.11, issue 2, pp.78-89, 2013. <https://doi.org/10.1002/swe.20020>
- 15 坂口歌織, 長妻努, “ひまわり8号衛星搭載の宇宙環境データ取得装置による高エネルギー電子の監視と変動予測,” 第53回宇宙科学技術講演会論文, 2 L09, 2015.
- 16 K. Sakaguchi, T. Nagatsuma, N. Higashio, T. Takashima, T. Mitani, A. Matsuoka, Y. Miyoshi, I. Shinohara, and M. Nose, “Prediction of outer radiation belt electron flux by multivariate autoregressive models based on realtime data of ARASE and Dst index,” Proceedings of the 15th Spacecraft Charging Technology Conference, 2018.
- 17 長妻努, “衛星運用の安心・安全に資する宇宙環境予測の実現に向けて,” 日本航空宇宙学会誌, 第65巻, 第4号, pp.96-99, 2017.
- 18 T. Nagatsuma, A. Nakamizo, Y. Kubota, M. Nakamura, K. Koga, Y. Miyoshi, and H. Matsumoto, “Development of space environment customized risk estimation for satellites (SECURES),” Earth, Planets and Space, vol.73, article number 26, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01355-x>
- 19 Hiroaki Miyake, and Yasuhiro Tanaka, “Space Charge Distribution in Polymethyl Methacrylate and Quartz Glass Irradiated by Protons,” Sensors and Materials, vol.29, no.8, pp.1213-1222, 2017.
- 20 衛星通信と5G/Beyond 5Gの連携に関する検討会 報告書, “国立研究開発法人情報通信研究機構, 2020年2月
- 21 T. Nagatsuma, A. Kumamoto, M. Ozaki, K. Kitamura, Y. Saito, T. Takashima, M. Nose, J. Kurihara, H. Kojima, K. Ishizaka, A. Matsuoka, R. Nomura, T. Ishida, and Y. Takahashi, “A sensor package for space weather global monitoring based on micro satellite constellation,” Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, vol.16, no.7, pp.687-690, 2018. <https://doi.org/10.2322/tastj.16.687>



長妻 努 (ながつま つとむ)

ネットワーク研究所
レジリエント ICT 研究センター
企画連携推進室
室長／
電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
研究マネージャー (兼務)
博士 (理学)
太陽地球系物理学



坂口歌織 (さかぐち かおり)

電磁波研究所
電磁波伝搬研究センター
宇宙環境研究室
主任研究員
博士 (理学)
磁気圏物理学、超高層大気物理学