

Jason-3 搭載放射線モニタによる 放射線帯の陽子・電子のフラックス変動に関する研究

○河守由人（鹿児島大学）、木本雄吾（宇宙航空研究開発機構）

Research on the variability of proton and electron fluxes
in the radiation belts, on-board the Jason-3 satellite.

Yujin Kawamori (Kagoshima university) Yugo Kimoto (Japan Aerospace Exploration Agency)

Key Words: 磁気嵐, 放射線帯

概要

宇宙空間は、地上より激しく宇宙線が存在する環境である。そのため宇宙空間でミッションを行う人工衛星は、宇宙環境特有の障害に見舞われるケースがある。よって人工衛星の設計・開発・運用にあたり、宇宙環境の把握は欠かせない。ここでは、Jason-3 に搭載された LPT(軽粒子観測装置)のデータを使用し、2024 年の放射線帯の宇宙環境を特に陽子と電子について考察する。2024 年は太陽活動極大期で、大規模な太陽フレアが 5 月と 10 月に 2 回発生した。結果、陽子・電子フラックスの変動には、2 回の太陽フレアに伴う磁気嵐が大きく関係していることが分かった。また陽子、電子について、AP8、AE8 モデルとの比較の結果、2024 年はモデルの予測より大きいフラックスだったことが分かった。

1. 研究の目的と背景

近年、宇宙技術を利用した企業やサービスが増えており、それに伴い人工衛星の数は飛躍的に上昇している。例えば、静止軌道衛星「ひまわり」を用いた天気予報や、GPS 衛星を用いた位置情報特定サービスなどが挙げられる。地球近傍の宇宙環境の変化は我々の生活に以前より大きな影響をもたらすようになった。このような理由から、宇宙環境の把握の需要は高まっている。

最初に、2024 年について、放射線帯の陽子・電子フラックスの変動と、宇宙天気イベントの関わりを調査した。図 1 は、横軸に時間、F10.7¹⁾（太陽から放出される 10.7cm の輝線）の値の推移（緑）と、X レベル以上の太陽フレアの発生時期（青と橙のプロット）を示している（y1 軸に F10.7 の値、y2 軸に X レベル以上太陽フレアの強度をとっている）。F10.7 の値は 200 前後を示しており、2024 年は太陽活動極大期であった。また、太陽発生時期のプロットより、1 年を通じて強力な太陽フレアが複数回発生したことが分かる。特に、5 月や 10 月に頻発している。この宇宙環境の変化において、粒子フラックスがどのような変化を受けたかの調べるために、2024 年の陽子・電子フラックスに着目する。

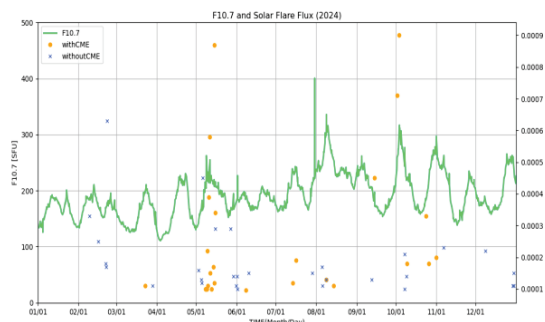


図 1 F10.7 の推移と太陽フレア発生時期
(橙は CME を伴うフレア
青は CME を伴わないフレア)

2. Jason-3

Jason-3 (図 2) は、海洋の巡回パターン・海面水位のグローバルおよび地域的変化、気候や生態系への影響に対する研究のための情報を提供することを目的としており、NOAA と EUMETSAT によって運用されている。

本研究は、Jason-3 に搭載された宇宙環境計測装置（Light Particle Telescope : LPT）により取得された陽子・電子のフラックスのデータを使用する。LPT はフランス国立宇宙研究センター（CNES）及び JAXA との協力の一環として、Jason-2 に引き続いて²⁾、Jason-3 衛星へ搭載された。

表 1 に Jason-3 の基本情報を示す。

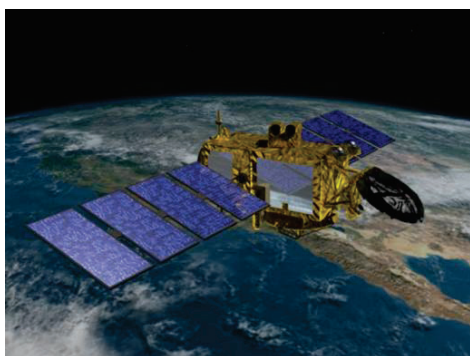


図 2 JASON-3 の全体図³⁾

表 1 JASON-3 の基本情報

打ち上げ日	2016/1/18 (Falcon9)
軌道	準回帰軌道 (回帰日数 9.9 日)
周期	112 分
軌道高度	1336km
軌道傾斜角	66.05°

4)

3. LPT

LPT は、LPT-S (センサ部) と LPT-E (電気処理部) で構成されている (図 3)。LPT-S は後述する電子・陽子等の宇宙放射線を計測し、LPT-E は計測したデータを処理すると共に衛星システムと電力、テレメトリ、コマンド等をインターフェースする。

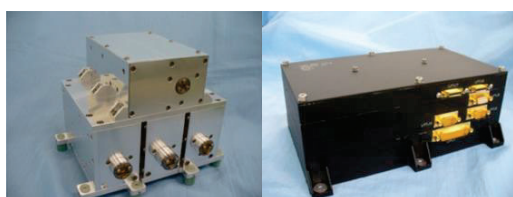


図 3 LPT-S (左) と LPT-E (右)

LPT-S は、以下の表 2 に示す 4 種のセンサで構成されている。ELS-A, ELS-B は電子を計測しており、ELSA は、0.00 ~ 1.41 MeV のエネルギー範囲の電子を 0~20ch で計測している。一方 ELS-B は 0.03 ~ 20.00 MeV のエネルギー範囲の電子を 0~13ch 計測している。APS-A, APS-B は陽子、重水素、三重水素、He3、He4 を計測している。APS-A は陽子について、0.04~34.00 MeV のエネルギー範囲の陽子を 0~20ch で計測し、1.50~160.0 MeV のエネルギー範囲の陽子を 0~11ch で計測している。

表 2 LPT-S を構成するセンサ

ELS-A	電子 (0.00 ~ 1.41 [MeV])
ELS-B	電子 (0.03 ~ 20.00 [MeV])
APS-A	陽子 (0.04~34.00 [MeV]) deuteron, tritium, He3, He4
APS-B	陽子 (1.50~160.0 [MeV]) deuteron, tritium, He3, He4

LPT は 1 秒毎に各粒子のフラックスを計測するが、この研究では、LPT により得られたデータについて 1 分平均したデータを用いる。

○計測原理 ($\Delta E \times E$)^{5) 6) 7)}

$\Delta E \times E$ は、荷電粒子がその飛跡の単位長さあたり与えるエネルギー ΔE と入射エネルギー E との積が粒子により異なることを用いた計測方法である。

図 4 に、 $\Delta E \times E$ 法の計測装置のイメージ図を示す。検出器を通過する間に入射した粒子はエネルギーを失う。通過型 ΔE 検出器から厚い E 検出器の間で止まった粒子の弁別、エネルギー計測を行う。

ベーテの公式

$$\frac{dE}{dx} = C_1 \frac{mz^2}{E} \ln C_2 \frac{E}{m}$$

* C_1 と C_2 は定数, m : 粒子の質量, z : 粒子の電荷
より、 E と dE/dx の積を求めると、その結果は mz^2 に比例する。

$$\Delta E \times E \propto m \times z$$

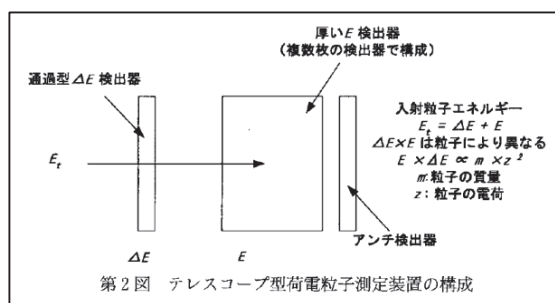
したがって、入射放射線が大きく違わないエネルギーを持つ異種の粒子が混在する場合でも両検出器からのパルス波高の積は、粒子の種類によりほぼ一定の値になり粒子弁別が可能となる。

②エネルギー計測

ΔE 検出器と E 検出器からのパルス波高を加算すれば入射エネルギー (E_t) が求められる。

E_t (入射してきた粒子のエネルギー: total)

$= \Delta E$ (ΔE 検出器で失う分) + E (E 検出器で失う分)



第 2 図 テレスコプ型荷電粒子測定装置の構成

図 4 $\Delta E \times E$ 法⁵⁾

4. 解析結果

○電子のフラックス変化

JASON-3 搭載の ELSA により計測された、電子フラックスの時間変化を示す（図 5）。横軸は時間、縦軸は FLUX [$\text{cm}^2/\text{sr}/\text{s}/\text{MeV}$] である。前述のように、フラックスの値は ELSA で得られたデータを 1 分平均したものを用いている。

1 年のうち、5 月中旬に最も大きくフラックスが増加している。その後フラックスの値は緩やかに減少している。また、1 月初旬や 3 月下旬、9 月中旬にも大きく増加している。

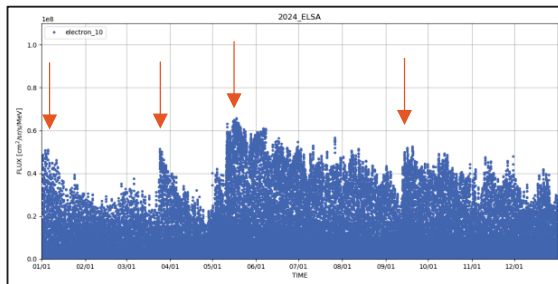


図 5 電子のフラックス変化
(0.23 ~0.27 [MeV])

○陽子のフラックス変化 (APS-A)

APS-A により計測された、陽子フラックスの時間変化を示す。縦軸、横軸は図 4 と同じである（図 6, 図 7）。

図 6 は、APS-A の計測エネルギー範囲のうち、比較的小さい 0.50 ~ 0.60 [MeV] の陽子のフラックス変化を示している。電子と同様に 5 月中旬にフラックスが最も大きく増加している。またその後も、6 月中旬や 7 月初旬、10 月中旬にもフラックスの増加がみられる。

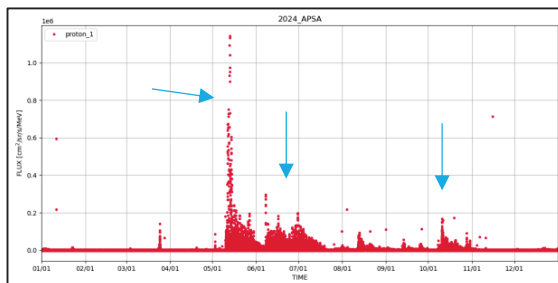


図 6 陽子のフラックス変化 (0.50 ~ 0.60 [MeV])

図 7 は、APS-A の 6.00 ~ 8.00 [MeV] の陽子のフラックス変化を示している。1 年を通じてフラックス

の値は大きく変化していない。

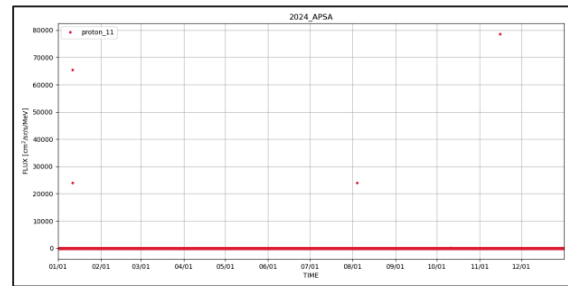


図 7 陽子のフラックス変化 (6.00 ~ 8.00 [MeV])

電子・陽子フラックスがこのような変化を見せた原因を次の章で考察する。

5. 考察

○磁気嵐との関連

磁気嵐の発生を示す指標として、Dst 指標⁸⁾を用いた。Dst は地球磁場の現象度合いを表す値である。磁気嵐の原因は、南向きの強い磁場を持つ太陽風が地球にやってくることである。太陽風の南向きの磁場が、地球の北向きの磁場と磁気リコネクションすることで磁力線がつながる。つながった磁力線を通じて、太陽風の持つ高エネルギー粒子が地球に流れ込む。これにより、地球を西向きに流れる赤道環電流が増加する。赤道環電流が地球の内側に作る磁場は南向きであり、地球磁場と打ち消しあう。このようにして磁気嵐が発生し、Dst の値が減少する⁹⁾。

4 項で示した電子および陽子の解析結果で Dst の時間変動をプロットした図を示す（図 9, 図 10, 図 11）。

Dst は、5 月中旬と 10 月中旬に特に大きく減少している。そのため、この時期に磁気嵐が発生したと考えられる。

○電子フラックスとの比較

電子フラックスの変化と Dst 指標の変化を比較したところ、5 月の電子フラックス増加と Dst の減少が一致している。このため、5 月中旬の電子フラックスの急激な増加は、磁気嵐の発生に伴うものであると考える。その後、フラックスが高い値を維持しているのは、入りこんだ電子が地球磁場に拘束されているのだと考える。しかし、10 月に Dst の値が大きく減少したときには、5 月のような電子フラックスの値の大きな増加は見られなかった。

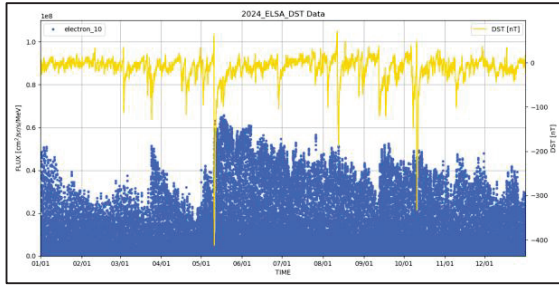


図9 電子フラックスと Dst の比較
(0.23 ~0.27 [MeV])

○陽子フラックスとの比較

陽子フラックスの変化と Dst 指標の変化を比較した。図10の0.50~0.60 [MeV]の陽子については、電子と同様に、陽子フラックス増加と Dst の減少の時期が一致している。その後、急速に陽子フラックスは減少した。また、10月のDst減少の時期に陽子フラックスが増加している。

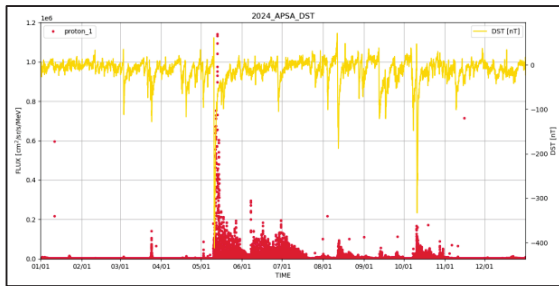


図10 陽子フラックスと Dst の比較
(0.50 ~0.60 [MeV])

図11の6.00~8.00 [MeV]の陽子については、1年を通じて Dst 減少の時期と相関がみられるようなフラックスの変化は見られなかった。

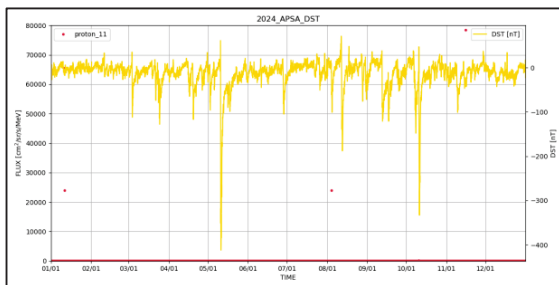


図11 陽子フラックスと Dst の比較
(6.00 ~8.00 [MeV])

電子・陽子のどちらについても5月の大きな磁気

嵐発生による粒子フラックスの増加が起こったと考えられる。ただ、陽子については、低いエネルギーと高いエネルギーでフラックス変化と磁気嵐との関連性に違いがみられた。より高いエネルギーの陽子は、磁気嵐の発生に寄与せず、また磁気嵐の影響も受けにくいのではないかと考える。

電子の1月初旬のフラックス増加に関しては、現状調査している範囲では Dst との関連はないように見えるが、2023年のデータを解析することで、磁気嵐との関連を見られる可能性がある。

○モデルとの比較

SEES (宇宙環境計測情報システム) より¹⁰⁾、AE8・AP8の2024年のフラックスの予測データを取得した。AE8は電子、AP8は陽子の粒子フラックスモデルである¹⁰⁾。

○電子

図12にELS-Aにより計測された電子フラックスとAE8から得られた電子フラックスの予測を比較したものを示す。青色がELS-Aにより計測された電子フラックスの値、黄色がAE8から得られた電子フラックスの予測である。AE8のデータは1日毎に3つの値を記録しており、ELS-Aのデータ(1分毎に1つの値)に比べて時間間隔が広がっている点に留意する必要がある(AP8とAPS-Aの比較においても同様)。

1年を通じて、AE8による予測フラックスより、JASON-3搭載のLPTによる計測フラックスの方が10~100倍ほど大きく出ている。AE8/AP8モデルについては、粒子の磁場に対する方向分布(ピッチ角分布)を考慮せずに全方向均一に粒子が入射するとしていたり、磁気嵐や磁場の変動による放射線環境の変動が考慮されていなかったりという仮定や制限があるため⁶⁾、電子フラックスが過少評価されていると考える。

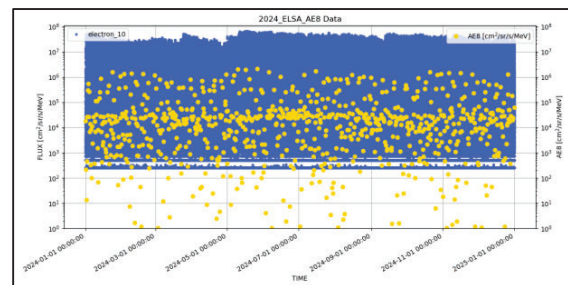


図12 AE8と電子フラックスの比較
(0.23 ~0.27 [MeV])

○陽子

図 13、14 はそれぞれ APS-A による陽子の計測フラックスと AP8 によるフラックスの予測との比較を示している。赤色が APS-A により計測された陽子フラックスの値、黒色が AP8 から得られた陽子フラックスの予測である。

0.50~0.60MeV の陽子について (図 13)、1 年を通じておおむね AP8 が示す陽子フラックスの予測範囲に収まっているが、5 月のフラックスが大きく増加した時期をはじめ、ところどころ予測値を上回っている。特に 5 月は、予測フラックスよりも 10~100 倍近く大きなフラックスが計測されている。

一方、6.0~8.0MeV の陽子は (図 14)、1 年のどの時期でも AP8 による予測フラックスの範囲内に収まっている。0.50~0.60MeV の陽子と異なり、磁気嵐による陽子フラックスの大きな変動も見られなかったため、このような結果になったとも考えられる。

0.50~0.60MeV と 6.0~8.0MeV の AP8 による予測モデルのおさまり具合の違いから、前述のような、磁気嵐や磁場の変動による放射線環境の変動が考慮されていないことに従う結果になったと考えられる。

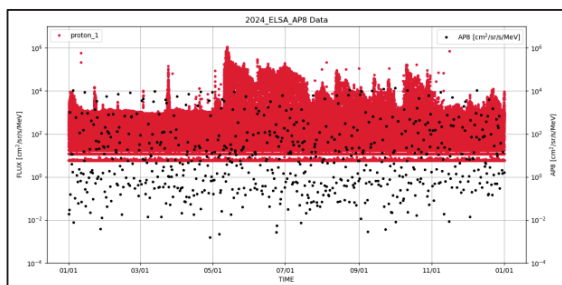


図 13 AP8 と陽子フラックスの比較
(0.50 ~ 0.60 [MeV])

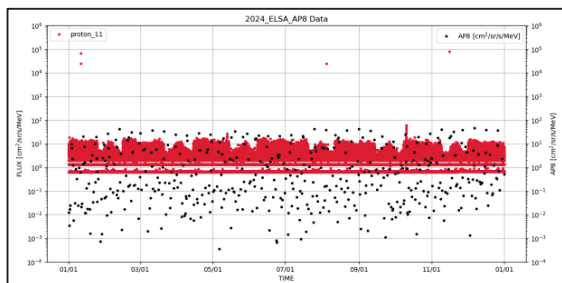


図 14 AP8 と陽子フラックスの比較
(6.00 ~ 8.00 [MeV])

電子・陽子ともに、フラックスが大きく増加した時期はモデルによる予測を大きく超えていた。一方、電

子フラックスに関しては、1 年を通じて常にモデルよりも 10~100 倍ほど高い値を示しているが、陽子フラックスは、基本モデルの範囲内に収まっている。このため、陽子と電子のモデル精度に違いがあるのではないかと考えた。

6. まとめ

2024 年の陽子・電子フラックスの変動に関して、以下のようなことが分かった。

○電子

5 月の中旬にフラックス大きく増加し、その後緩やかに減少していった。この時期は、X レベルの巨大な太陽フレアが頻発しており、Dst が大きく減少した時期とも一致しているため、太陽フレアによって放出された高エネルギー粒子が、地球の磁気圏内部に流入したことが原因であると考えられる。

一方で、10 月の Dst の減少時には、フラックスの増加は確認できなかった。この原因については現在調査中である。

また AE8 との比較で、AE8 による予測よりも計測されたフラックスが 10~100 倍ほど大きかった。

○陽子のフラックス変動

0.50~0.60MeV の比較的エネルギーの小さい陽子は、5 月をはじめ何度か大きく増加した。一方、6.0~8.0MeV の比較的エネルギーの大きい陽子は、1 年を通じて大きく変化しなかった。

0.50~0.60MeV の陽子について、Dst の減少時期とフラックス増加の時期が一致していたため、電子と同様に、太陽フレアで放出された高エネルギー粒子による、磁気嵐の発生が寄与したと考える。

6.0~8.0MeV の陽子は、磁気嵐による影響が小さいと考えられる。

0.50~0.60MeV の陽子について AP8 との比較の結果、5 月の JASON-3 による実測フラックスはモデルによる予測よりも 10 倍近く大きかった。

6.0~8.0MeV の陽子は、モデルの予測範囲内にとどまった。

○今後の展望・課題

ELSA の電子フラックスの計測で、1 月初旬にフラックスが増加している様子が見られたが、Dst との関連については現段階では言及できていない。そのため、2023 年の ELSA の解析や Dst のデータを用意して比較し、1 月初旬の粒子フラックス増加と磁気嵐の関連があるのかどうかを調査する。

また、人工衛星の軌道情報と照らし合わせ、Jason-3の周回軌道上で、場所によるフラックスの違いについても調査を行う。

そして L 値の情報をフラックスの情報に取り入れることで、地球の磁場に捕捉されている粒子分布の時間による変化や、宇宙環境との関連を調査する。

7. 謝辞

この研究のデータ解析において、Jason-3 搭載の LPT による計測データを利用させていただきました。LPT 製作を担当されました明星電気株式会社様に感謝申し上げます。また、モデルとの比較にあたり、宇宙環境計測情報システム (SEES) のモデル解析ツールを使用させていただきました。SEES 運営の関係者の皆様に感謝申し上げます。

そして、Jason-3 の設計・運用にかかわった、NOAA や EUMETSAT、CNES や JAXA をはじめとする関係者の皆様すべてに感謝申し上げます。

8. 参考文献

1) Laboratory for Atmospheric and Space Physics
University of Colorado Boulder .

Interactive Solar Radiation. Datacenter LISIRD
https://lasp.colorado.edu/lisird/data/noaa_radio_flux
(2025/10/7)

2) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構. “JAXA 宇宙環境計測装置の CNES/Jason-2 衛星への搭載について”. (2025/9/30)
https://www.jaxa.jp/press/2005/10/20051012_sac_jason-2_j.html

3) Jet Production Laboratory. “Jason-3”.
<https://www.jpl.nasa.gov/missions/jason-3/>, (2025/9/23).

4) 一般財団法人リモート・センシングセンター.
“Jason-3”. <https://www.restec.or.jp/satellite/jason-3.html>,
(2025/9/23).

5) 松本 晴久 . 宇宙環境計測 . 日本航空宇宙学会誌.
2003 年 , 第 51 巻, 第 599 号, p.28-34 (322-328) .

6) 五家 建夫 . 高エネルギー粒子環境 . 通信総合研究所季報 . 1997 , 第 43 巻数, p.249-256.

7) 丸山 健太 . “だいち衛星 (ALOS) 軌道に於ける宇宙放射線環境評価- 計測結果と太陽活動極小期宇宙放射線環境モデルの比較-”. 鹿児島大学修士論文 .

8) 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto.
<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html>
(2025/10/7)

9) 国立研究開発法人情報通信研究機構. “磁気圏”. 宇宙天気予報.
<https://swc.nict.go.jp/knowledge/magnetosphere.html>
(2025/9/24)

10) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構. SEES (宇宙環境計測情報システム) .
<https://sees.tksc.jaxa.jp>
(2025/9/24)