

# あらせ衛星における帯電対策 ～サイエンスと安全の両面から～

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
ジオスペース探査衛星プロジェクト  
高島 健 柴野 靖子  
ERGプロジェクトチーム


第14回 宇宙環境シンポジウム@神戸大学

## 捕らえろ粒子。感じろ電磁波。



### 謎に包まれた ヴァン・アレン帯の発見（1958年）

ヴァン・アレン帯は人類の宇宙進出を象徴する発見です。  
その特性を把握しておくことは、将来の人類の宇宙進出を支える上で重要な要素です。



SCIENTISTS WILLIAM PICKERING, JAMES VAN ALLEN AND WERNHER von BRAUN (LEFT TO RIGHT) DISPLAY THE UNITED STATES' FIRST SATELLITE, EXPLORER I.

Explorer Iに搭載されたガイガーカウンターは、高エネルギー粒子（宇宙線）の測定をめざしていました。



Iowa大学のVan Allen教授

実際、高エネルギー粒子の生成は、宇宙空間の最大の特徴の一つです。

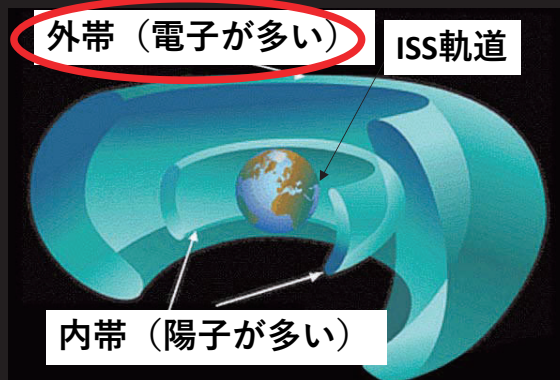
**そうであるにもかかわらず、生成の現場を直接観測したことはほとんどないのです！**

2



## ヴァン・アレン帯（放射線帯）とは？

- 静止軌道付近より内側に、2重の帯状にエネルギーの高い電子が存在する領域です。
- ヴァン・アレン帯の電子は、100キロ電子ボルト～数10メガ電子ボルト（ほぼ光の速さで運動する。）の高エネルギーに達します。
- ヴァン・アレン帯は、太陽活動に起因する宇宙嵐等の宇宙環境変動時に大きく変動し、ダイナミックに生成・消滅します。



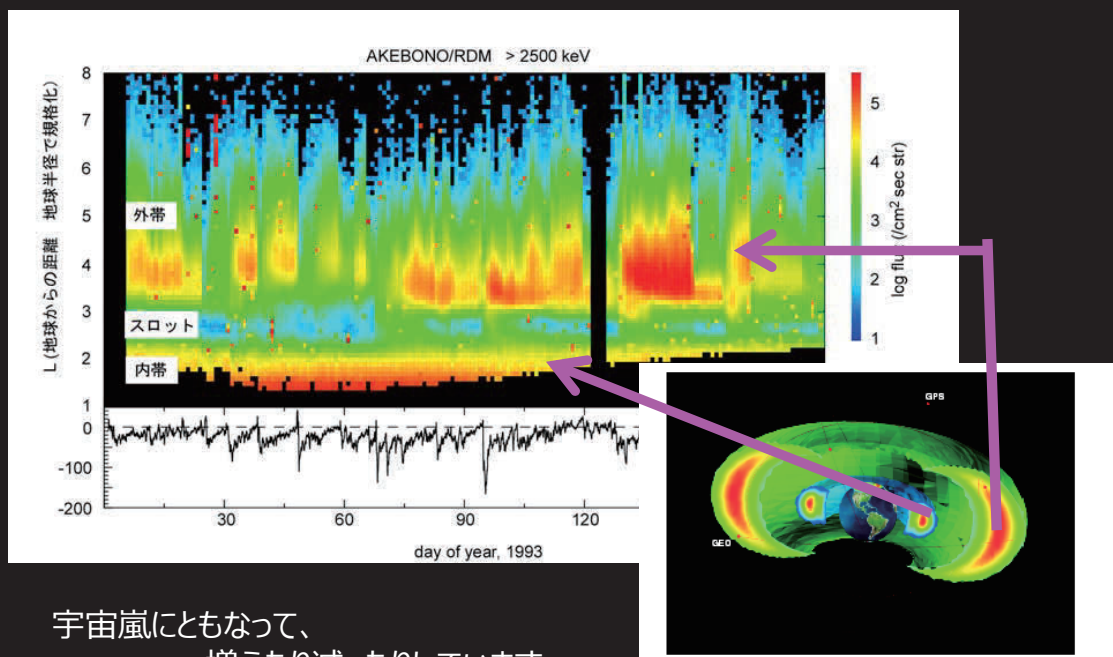
ここで生成された粒子がいろいろな障害を引き起こす原因となります！

3



## 激しく変動するヴァンアレン帯

### 2.5 MeVの電子の変化（宇宙放射線的一种）



宇宙嵐にともなって、  
増えたり減ったりしています。



# 宇宙放射線は何故怖いのか？

宇宙放射線が人工衛星・探査機の電子回路を故障させる原因となる。

人工衛星の安全な運用に大きな影響

日本経済新聞  
2004年(平成16年)2月15日(日曜日)

**BSデジタル放送一時中断**  
NHKと一部民放

イビジョン、民放の映画専門局「スター・チャンネルBS」、音画放送「ミュージックパレード」、データ放送など。民放十局のBSデジタル放送には影響はなかった。NHKによると、放送が中断したのは、画面が凍りついたまど、画面が凍りついて、視聴者から問い合わせが相次いだ。NHKと民放などが出資する衛星運用会社の放送衛星システム(東京)で、放送衛星(BS)等への衝撃に切り替えていた。トラルのあった放送は、衛星の中継器を共有しており、この中継器の故障が原因とみて調査している。当時、NHKのBS1とBSハイビジョンでは大相接の録画公演を生継していた。

**ひまわり「不具合」6号で姿勢異常 気象観測不能に**

ひまわり6号は、気象観測衛星の6号機が、姿勢異常を来月、観測不能になる。ひまわり6号は、2月15日、姿勢異常を来月、観測不能になる。ひまわり6号は、2月15日、姿勢異常を来月、観測不能になる。

2006/04/17  
日経



# 宇宙空間における高エネルギー粒子生成

- 宇宙空間を充たす気体は、気体を構成する物質がイオンと電子に電離した状態(プラズマ)にあります。このため、その運動は電磁場の影響を強く受けます。
- また、**宇宙空間は非常に希薄(地球付近では太陽風中で数個/ccの粒子密度)なので、粒子はお互いに衝突することがありません。**
- これらの特性によって、**一部の少数の粒子が極めて高いエネルギーを獲得することが可能となっていると考えられています。**
- この高エネルギー粒子生成メカニズムを理解することは、宇宙物理における大問題のひとつです。

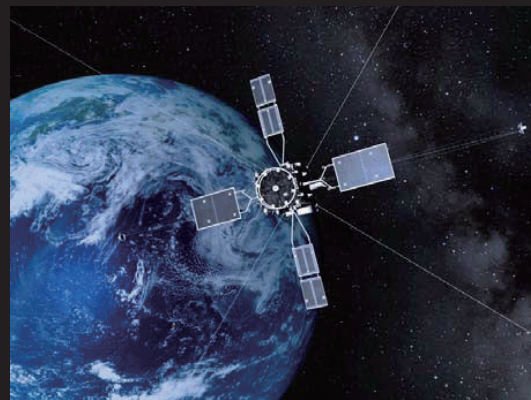
地球周辺空間を充たすプラズマの起源は2つあります。

- 太陽上層大気(コロナ)を起源とする太陽風
- 地球超高層大気が紫外線によって電離したもの

前者中の電子のエネルギーは~10電子ボルト、後者は~0.1電子ボルトしかありません。これらの低エネルギー電子は、どのように数メガ電子ボルトまでのエネルギーを獲得するのでしょうか？



## ERGは、 ヴァン・アレン帯を精密に観測します。



4台の電子センサーで10から2千万電子ボルトまでの電子を計測します。

長いアンテナを伸ばして、自然界の微弱なプラズマによる電波を計測します。

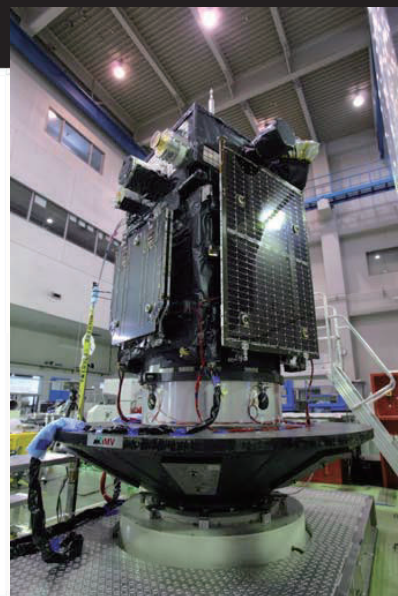
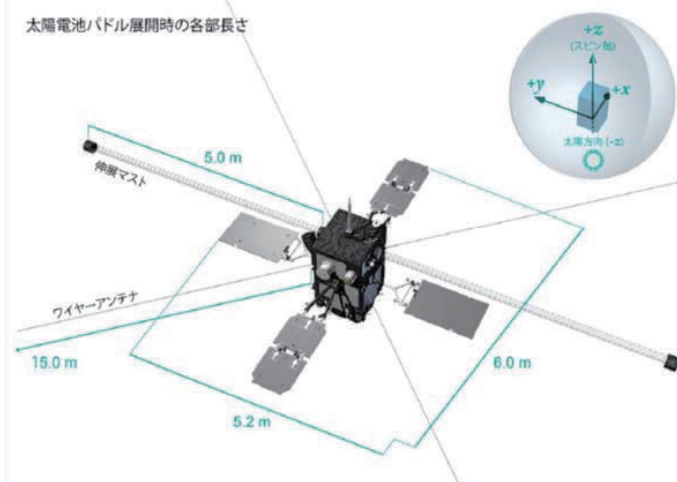
電磁場と粒子 これらの精密な観測データを同時に得ることで、世界ではじめて高エネルギー電子がうまれいく過程を「その場」で観測することを目指します。




## ERG 衛星の外観

での外観（太陽電池パドル展開時）

太陽電池パドル展開時の各部長さ



1.5m x 1.5m x 2.7m  
355kg



## ミッション部機器配置

超高エネルギー電子

低エネルギー電子

磁力計 (フラックスゲート)

高エネルギー電子

中間エネルギー電子

低エネルギーイオン

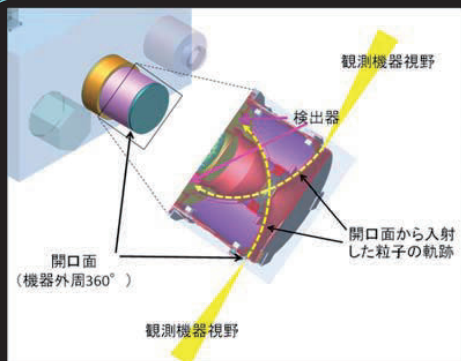
中間エネルギーイオン

ミッション系 計算機

磁力計 (サーチコイル)

ワイヤアンテナ (角部4ヶ所)

- ・ 粒子系 (電子・イオン) 観測装置 : ±X面に配置. (XEPのみY面に配置)
- ・ 磁力計/伸展マスト (磁場計測) : ±Y面にを配置
- ・ ワイヤアンテナ (電場計測) : 角部4方向に配置



観測機器視野


検出器

開口面から入射した粒子の軌跡


開口面 (機器外周360°)

観測機器視野

スピンすることで全球視野を確保



粒子系観測機器の視野



## サイエンス要求にもとづく帯電対策

【熱制御系へのミッション要求】

- ミッション要求を満足する姿勢及び軌道に対して、打上げ後1年間以上、規定の温度範囲で熱制御を行うこと。
- 耐放射線要求に適合すること。
- EMC要求に適合すること(表面導電性,磁場).
  - ✓ 表面電位を1V以下に抑える。
  - ✓ 浮き導体も影響を与えるため、側面パネルまで電氣的に接続すること。
  - ✓ 面積が小さい場合でも規則的に非導体部分が露出する箇所は許容しがたい。

**ERGの特徴**

LEP-eにおいて低エネルギーのelectronを計測するため、衛星表面が帯電するとelectronの粒子経路が曲げられ正しいデータ取得ができない。一方で、ERGの形状の制約から、機器の視野が側面パネルに並行した状態にしかできないため、機器側だけでなくシステムとしての対策が必要となる。念のため、表面に露出する熱制御材に対して帯電計測を実施したところ、埃レベルのサイズであっても数十Vに帯電することが明らかになった。

10



## 衛星表面導電性対策（MLI編）

### 【ERGの規定】

- 宇宙空間露出/非露出部の導電性  
宇宙空間のプラズマに曝された衛星表面の最大電位差を1V以下とすることが設計目標である。

- 宇宙空間にさらされた導電体：衛星構体に接続すること。

露出面積	ボンディング抵抗
10cm <sup>2</sup>	<10MΩ
100cm <sup>2</sup>	<1MΩ
1m <sup>2</sup>	<10kΩ

SELENEも1V以下  
ERGの目標は<10<sup>8</sup>Ω

- 宇宙空間にさらされた非導電面：電氣的導電体によって表面を覆い、グラウンドに接地すること。

露出面積	表面抵抗	ボンディング抵抗
10cm <sup>2</sup>	<10MΩ/square	<10MΩ
10cm <sup>2</sup>	<1MΩ/square	<1MΩ
1m <sup>2</sup>	<10kΩ/square	<10kΩ

SELENEは  
100MΩ/square



## 衛星表面導電性対策（MLI編：選択）

- MLI最外層には表面導電性を有するブラックカプトン(160XC)を採用する。
  - SELENEの際には100XCを採用したが、ERGにおいてはより表面抵抗の小さい160XCを選択した。
  - MLI設計時にはボンディングストラップを2か所持つこととし、サイズの関係でどうしても取り付けられない場合はJAXA側と相談した上で許容した。
- \* SELENEでは1m<sup>2</sup>以上のMLIの場合は3点などの規定があるが、ERGのMLIは1m<sup>2</sup>以下のためMAXで2点で納まっている。

Table1 Black Kaptonの表面導電性(出典：Redbook/Sheldahl)

Parameter	Specified Value			
	100CB	100XC	160XC	275XC
Film surface resistivity	≥10 <sup>13</sup> Ω/square	10 <sup>5</sup> to 10 <sup>9</sup> Ω/square	300-430 Ω/square	230-290 Ω/square

SELENEは100XCを採用

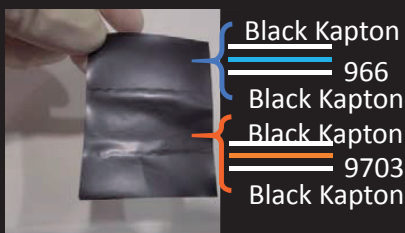
課題：入手に規制,ロール販売のため高価,ERGのサイズは小さかったため余る。



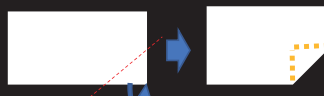
## 衛星表面導電性対策（Tape編）

- 非導電性テープを使う以外の選択肢がなかったため、テープの耳折りして使用し、導電性を確保する。
  - 粘着力が高めの3Mの導電性テープ9704販売終了（需要が少ないとの理由から）
  - 3M9703のメーカー推奨温度範囲は-40～+85℃であり、衛星最外層では剥がれが懸念された。⇒温度サイクル試験(-160～+140℃)で剥がれは生じた。
  - 非導電性ではあるが3M966は剥がれないことが明らかになったため、テープの貼り方の検討、貼付け後のチェックを徹底して実施した。

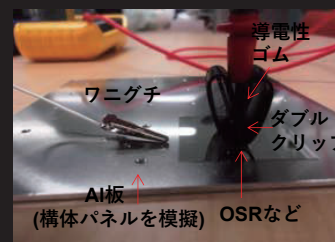
[9703の剥がれ]



[耳折りテープ]



[測定方法]



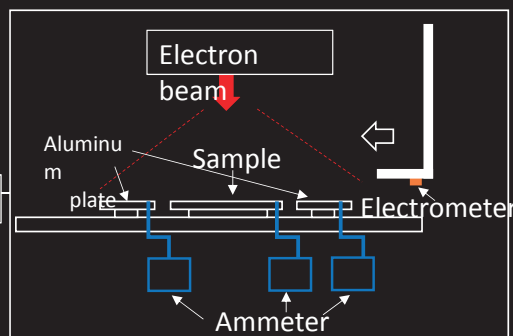
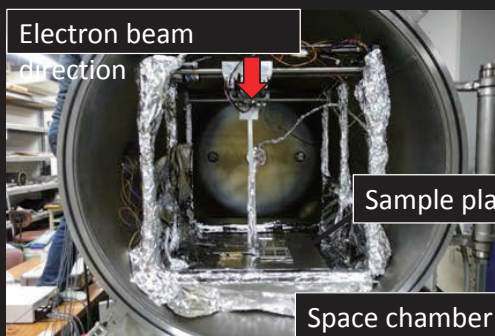
- 100XCでの耳折りテープは安定して導電性が取れないが160XCでは折り曲げるだけで安定して導電性を確保できる。



## 衛星表面導電性対策（OSR編）

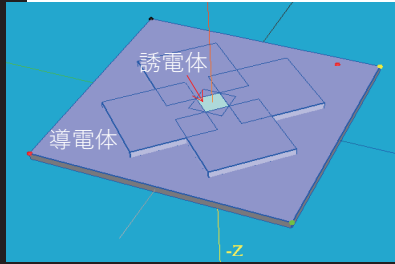
- 帯電試験（電子ビーム照射 1min、2 nA/cm<sup>2</sup>）の結果、ITO付きOSRの角、OSR間の接着材露出部が大きく帯電することが判明した
  - OSR表面は各角部にITO層が無い箇所があることが明らかになった
  - OSRを貼付けていた接着剤(MAPSIL1123QS)は導電性があるのに白色であることが売りであったが、導電性の粉体を混ぜたものであり、単体では導電性が無かった
- OSRの接着剤露出部にELASTOSILS-692を塗布して導電性を確保した

【導電性確認試験(帯電試験)】





## OSRカド部について MUSCATによる解析・結果

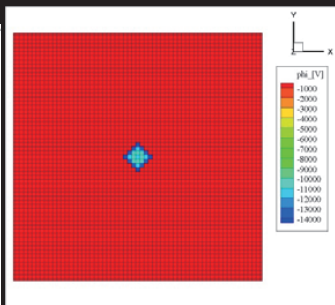
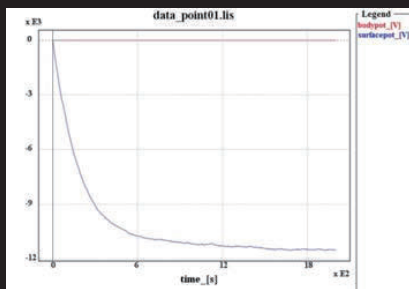


### 【解析条件】

- 空間解像度0.5mm、計算体系は1辺6.4cmの立方体
- ビーム電子(+Z方向から角度依存性のみCOS則)  
 $i_b = 2E-5 \text{ A/m}^2$ ,  $T_b = 0.2\text{eV}$ ,  $E_b = 15\text{keV}$
- 背景プラズマ(プラズマ電流=実質0)  
 $n_p = 1E12 / \text{m}^3$ ,  $T_e = T_i = 1E-10 \text{ eV}$
- 導体部電位: 0V
- 時間積分:  $dt = 4\text{sec}$

### 【解析結果】

- OSRの周囲が全て導電体であっても、OSR表面の帯電電位は-11kV程度する。

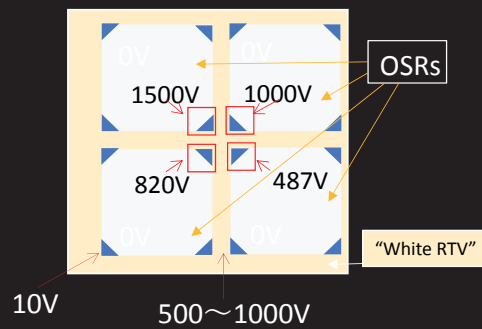
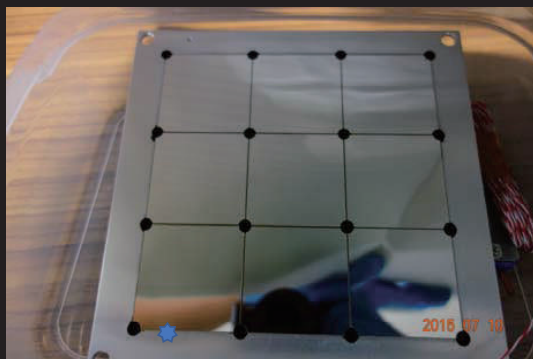


\* 測定結果と同等の結果となり、周囲の接着剤の種類に関わらず処置が必要であることが明らかになった。  
 →衛星の側面パネルに平行にミッション機器の視野があり、バス部でも処置が必要。

MUSCATスペース・エンジニアリング (株)



## 衛星表面導電性対策 (OSR編)



Qioptiqへの確認結果

For PS 613 optical solar reflectors (OSRs).

Total uncoated area of all 4 corners is  $\leq 8\text{mm}^2$ .





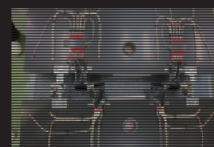


## 衛星表面導電性対策（SAP編）

- ▶ パネルの帯電計測を実施し、要求に見合ったものに変更(最初は含侵させていた接着剤によって帯電してしまっていた)。
- ▶ パネルのケーブル類がそのまま露出していたためあと処置を検討したが、対応しきれない箇所もあった。



S-692(導電性)の接着力だけで足りず、S-691(非導電性)を補助的に使用



パネル側面に使用されている青色の接着剤が剥き出し  
→アルミ板で一部覆う対策も実施




ミッション機器の視野からは遠いことから検討・調整の結果、許容した。

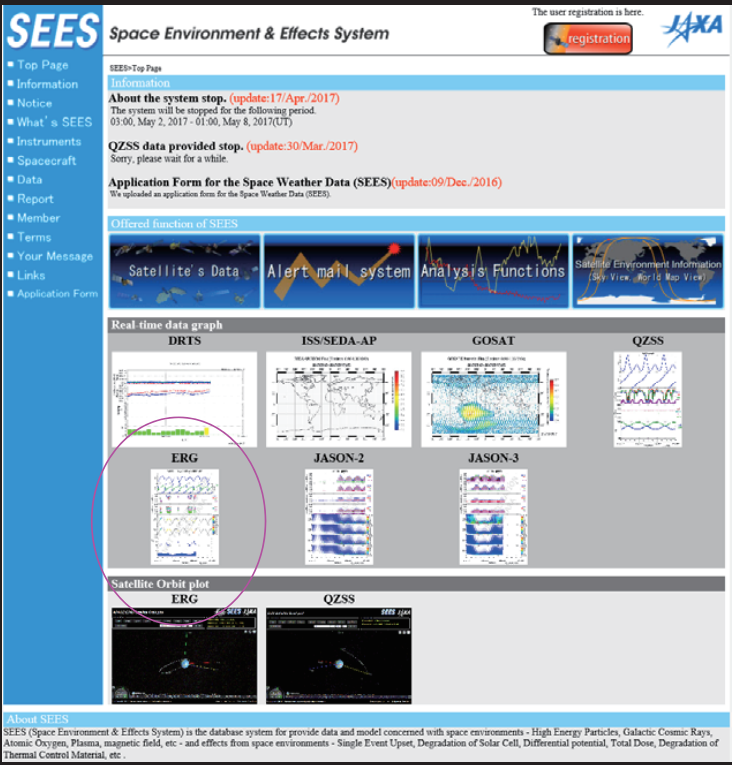


## まとめ

- 低エネルギープラズマ計測のために、ERG衛星では、衛星表面導電性確保をできるかぎり実施した
- 上記の対策によって、局所帯電する箇所もかなり少なくなっていると考えている
- 対策の効果は、取得データならびに衛星周辺環境を含めたシミュレーションを行い、確認していく予定である
- ERG衛星では、帯電等に関する高エネルギー電子のリアルタイムデータ配信を行っている  
(SEES@JAXA) 適宜参照いただければ幸いです




## 環境情報の発信 あらせ宇宙天気データリアルタイム公開



あらせ衛星可視運用時の  
宇宙天気リアルタイムデータ

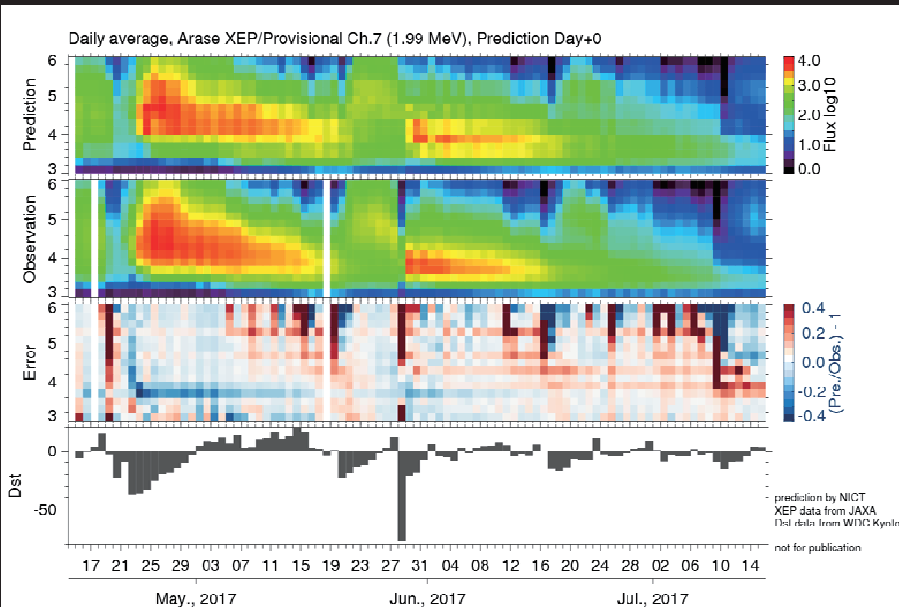
SEES (JAXA) ページから  
他衛星データとともに公開



## あらせ宇宙天気データを用いた環境予測研究 (紹介)

情報通信研究開発機構 (NICT) 坂口氏による地球電磁気学会での発表より  
<http://seg-web.nict.go.jp/arase-spaceweather/forecast.html> 公開中

Result 1: Modeling (AR coefficient estimation)



2017/10/17
SGEPSS
20