



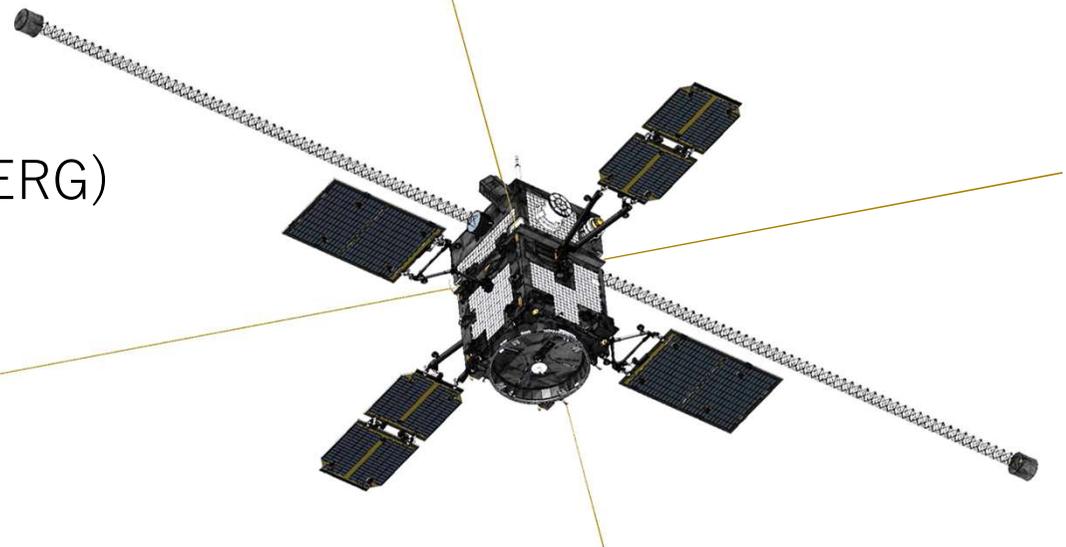
ERG (Energization and Radiation in Geospace)

資料46-3

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第46回) 2019. 1. 30

ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG) の科学成果等と後期運用計画について

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(ERG)
プロジェクトチーム
2019年1月30日





目次

1. 報告の目的
2. 科学成果概要
3. 宇宙天気予報への応用
4. 国内外の研究体制
5. 国際ミッション評価の実施
6. 成功基準の達成状況
7. 後期運用の達成目標と意義
8. まとめ



1. 報告の目的

- ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)は、平成28(2016)年12月に内之浦宇宙空間観測所から、イプシロンロケット2号機より打上げられ、平成29(2017)年3月から定常観測を開始。

(参考) これまで宇宙開発利用部会においてミッション概要と開発状況を報告。

- 第31回(平成28(2016)年)11月17日)
ジオスペース探査衛星(ERG)の開発状況について
 - 第30回(平成28(2016)年)9月29日)
イプシロンロケット2号機のミッション概要。
- 着実に観測成果を積み重ね、当初予定していた定常観測運用を終え、平成30(2018)年12月にJAXAにてプロジェクト終了審査を実施し、定常運用の終了と後期運用への移行を妥当と判断した。
 - 今回は、これまでの「あらせ」による科学成果や、後期運用計画などについて報告する。



2. 科学成果概要

ミッションの概要 目的と意義

背景・目的

- ◆ 地球周辺の宇宙空間（ジオスペース）は、太陽活動の影響下で常に激しく変動する。とくに激しい変動時にはヴァン・アレン帯の高エネルギー電子が急激に増加することが知られている。
- ◆ 高エネルギー電子がどこでどのように生成されるかはヴァン・アレン帯発見以来の謎として残されている。
- ◆ 「あらせ」衛星は、ヴァン・アレン帯の中心部で直接、高エネルギー電子が生まれる過程を世界ではじめて観測することに挑み、ヴァン・アレン帯形成と変動の謎の解明を目指す。
- ◆ 本計画は、人工衛星にとっては厳しい放射線環境下での観測に最適化した小型衛星によって、宇宙プラズマ物理学分野ならびに宇宙環境変動の研究に於いて国際的競争力をもった一級の科学成果を得ることを目指している。

研究体制

- ◆ 「あらせ」衛星は、ヴァン・アレン帯の中心部で直接、高エネルギー電子が生まれる過程を世界ではじめて観測するために、台湾から提供される1機器を含む8つのセンサーによって幅広いエネルギーの電子とイオンと超高時間分解の電磁場変動を計測する。
- ◆ 更に関連する地上観測ネットワークと組み合わせることで、総合的なヴァン・アレン帯探査を行う。
- ◆ 「あらせ」衛星は、国内外の大学、研究機関の100人を超える研究者がプロジェクトに参加する太陽地球環境科学分野の中心的ミッションと位置付けられている。

科学的意義

- ◆ ジオスペースにおける高エネルギー粒子の生成過程の究明を通して、磁場を持つ惑星や天体における粒子加速研究に応用し得る新たな知見を得る。
- ◆ 水星探査計画の観測戦略立案へのフィードバックや、将来の木星磁気圏探査での粒子加速研究に繋ぐ。

社会的意義

- ◆ 宇宙放射線の変動過程を理解することから、宇宙天気予報の精度向上へ貢献することができる。宇宙天気予報の基礎を支えることは、人類の宇宙活動における安全な活動を確保することに繋がる。

技術的意義

- ◆ 小型衛星による強放射線下での測定技術の確立は、強放射線環境を有する木星等の惑星探査に向けた重要な技術要素となる。
- ◆ 宇宙空間におけるプラズマの波と粒子のエネルギー交換過程を直接計測する新しい装置（波動-粒子相互作用解析装置）の軌道上実証を行う。これにより、高度な機上データ処理技術を確立する。



2. 科学成果概要

科学成果概要

- 「あらせ」は第24太陽サイクルの活動下降期において、(Dst指数が-150を超える大きな宇宙嵐を含む)規模の異なる**多数の宇宙嵐時の放射線帯変動を観測することに成功**した。
- 海外衛星(米国 Van Allen Probes衛星, MMS衛星, THEMIS衛星, など)および国際的な地上観測ネットワーク(電離圏レーダー観測, オーロラカメラ, 電波観測(超長波:数~数10kHz)・地磁気観測, など)との協調観測により、「あらせ」を中心とした**宇宙嵐時における国際的なジオスペース総合観測を実現**した。
- 「あらせ」はその初期科学成果として、**宇宙嵐時の放射線帯では、内部磁気圏内部で高エネルギー電子が確かに生成されている(内部加速)ことを実証し、放射線帯の高エネルギー電子の生成・消失過程において、ジオスペース中に発生するプラズマの波が大きな役割(波動-粒子相互作用)を果たしていることを発見**した。
- これら成果は、**地球周辺の宇宙空間における高エネルギー電子の増減の物理素過程を捉えた世界ではじめての成果**である。このような**プラズマの波を介した高エネルギー電子の加速・消失は、磁場をもつ惑星をはじめとして宇宙で普遍的に発生していることが予想されることから、広く宇宙プラズマ研究にインパクトのある成果**である。
- 国内研究チームにおけるデータ解析研究は現在進行形であり、更なる科学成果の公表が準備されている。また、**2018年8月からは「あらせ」の観測データを世界の研究者に対して一般公開を開始**したことで、今後は海外研究者による「あらせ」の科学成果の創出が期待される。

※Dst指数は宇宙嵐の大きさを表す数値で、負の値が大きくなるほど、大きな宇宙嵐であることを意味する。



ジオスペース現象を理解することの意義

● 宇宙空間における現象の「その場」観測

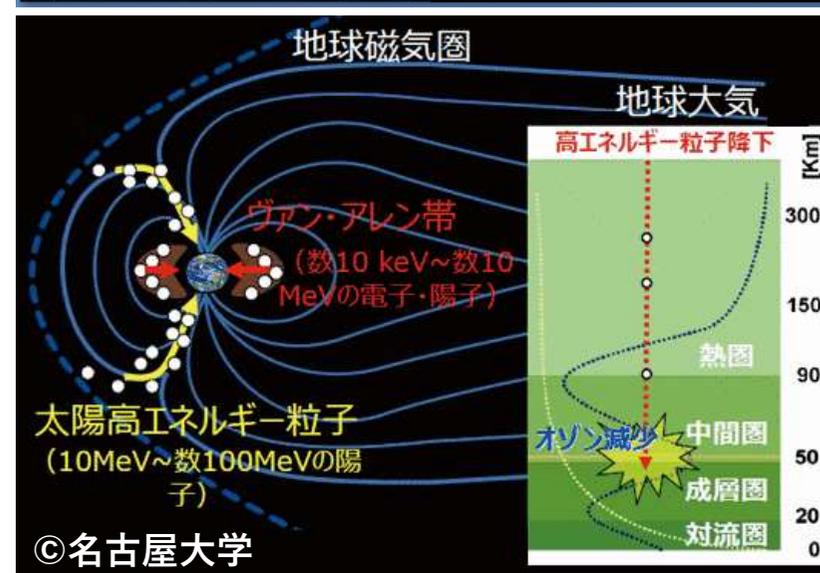
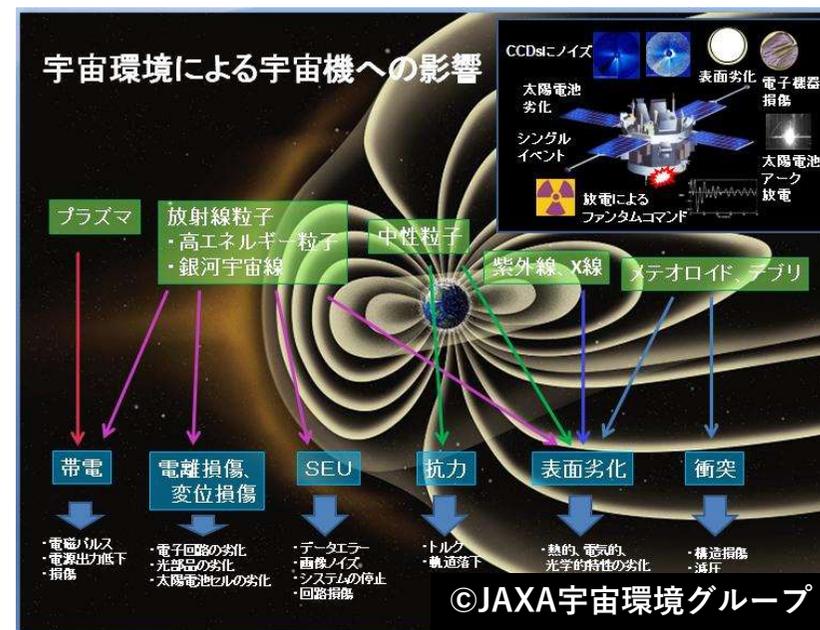
- 太陽系惑星空間は、唯一、衛星・探査機によって宇宙プラズマ現象を「その場」で何が起きているかを精密に観測できる場です。ジオスペース現象の理解を広げて、宇宙プラズマ現象の理解を深めることができ、関連分野を含めて、学術的に意義があります。（例えば、粒子加速現象は多くの関心を集めています。）

● 宇宙天気予測

- 地球で観測されるオーロラや地磁気擾乱といった電磁気現象は、太陽風と地球磁気圏との相互作用の結果によるものです。太陽での爆発現象（太陽フレア）に伴い、ジオスペースでは大きな宇宙嵐が発生すると、実用衛星や電力線ネットワークの機能障害の原因になる、など、私たちの生活にも大きな影響を及ぼす可能性があります。その精密な予測を通して社会貢献を実現するには、ジオスペースの観測に基づいた、ジオスペースの基礎研究が不可欠です。

● 地球超高層大気を介した地球環境への影響

- 従来、ジオスペース現象は、非常に希薄なプラズマ中に発生するので、地球環境への影響は無視できると考えられてきました。しかし、近年の観測では、エネルギーの高いヴァン・アレン帯の電子が大気に降り込むことで、中間圏大気を電離させ、中間圏の化学組成に影響をおよぼす可能性が指摘されるなど、地球環境への影響についての研究が盛んになりつつあります。





2. 科学成果概要

宇宙嵐時の放射線帯変動はどのように起こるのか？

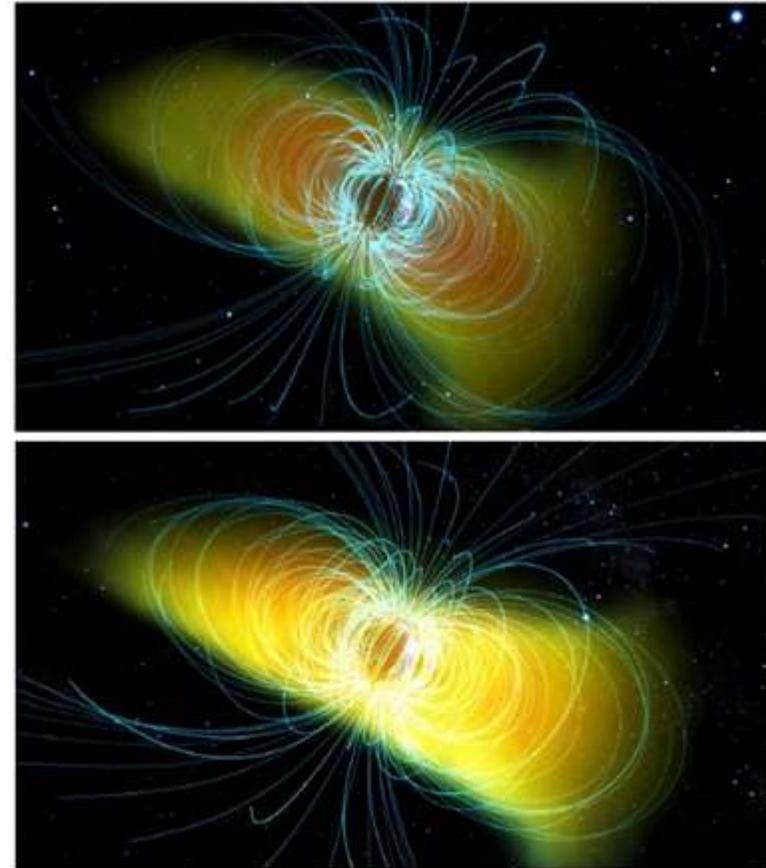
宇宙嵐の発生直後（～数時間）：
数時間で放射線帯が消失する。

…何が放射線帯を消すのか？

宇宙嵐の終了期（～数日）：
消失した状態から電子の数が増加し、放射線帯が再形成される。
高エネルギー電子の数は、もともとの状態に比べて、**100～1000倍以上増える**こともある。

…何が放射線帯を作り出すのか？

あらせの成果のポイント
プラズマの波が起こす放射線帯の変化



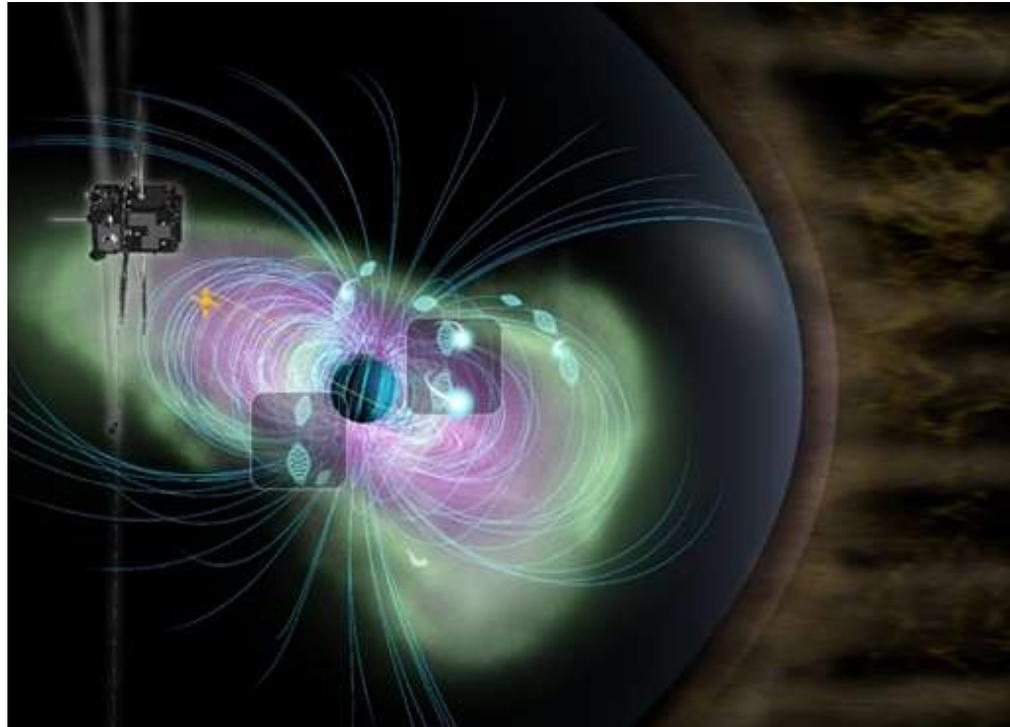
- 大きな太陽風変動が地球磁気圏に到達することで、宇宙嵐と呼ばれるジオスペースの電磁環境の大変化が発生する。
- 宇宙嵐時には、ジオスペースに大電流が流れ、オーロラが爆発的に発生したり、大きな磁場変動が起こる、などの現象が発生する。
(大きな宇宙嵐では、日本でもオーロラが見えることもある。)
- **放射線帯は消失と再形成という変化を示す。**



2. 科学成果概要

ジオスペースにおけるプラズマの波の役割

ジオスペースには、多様なプラズマの波が存在するが、
「それらが宇宙空間でどういう働きをしているのか」はよく解っていなかった。



「あらせ」がターゲットとする代表的なプラズマの波

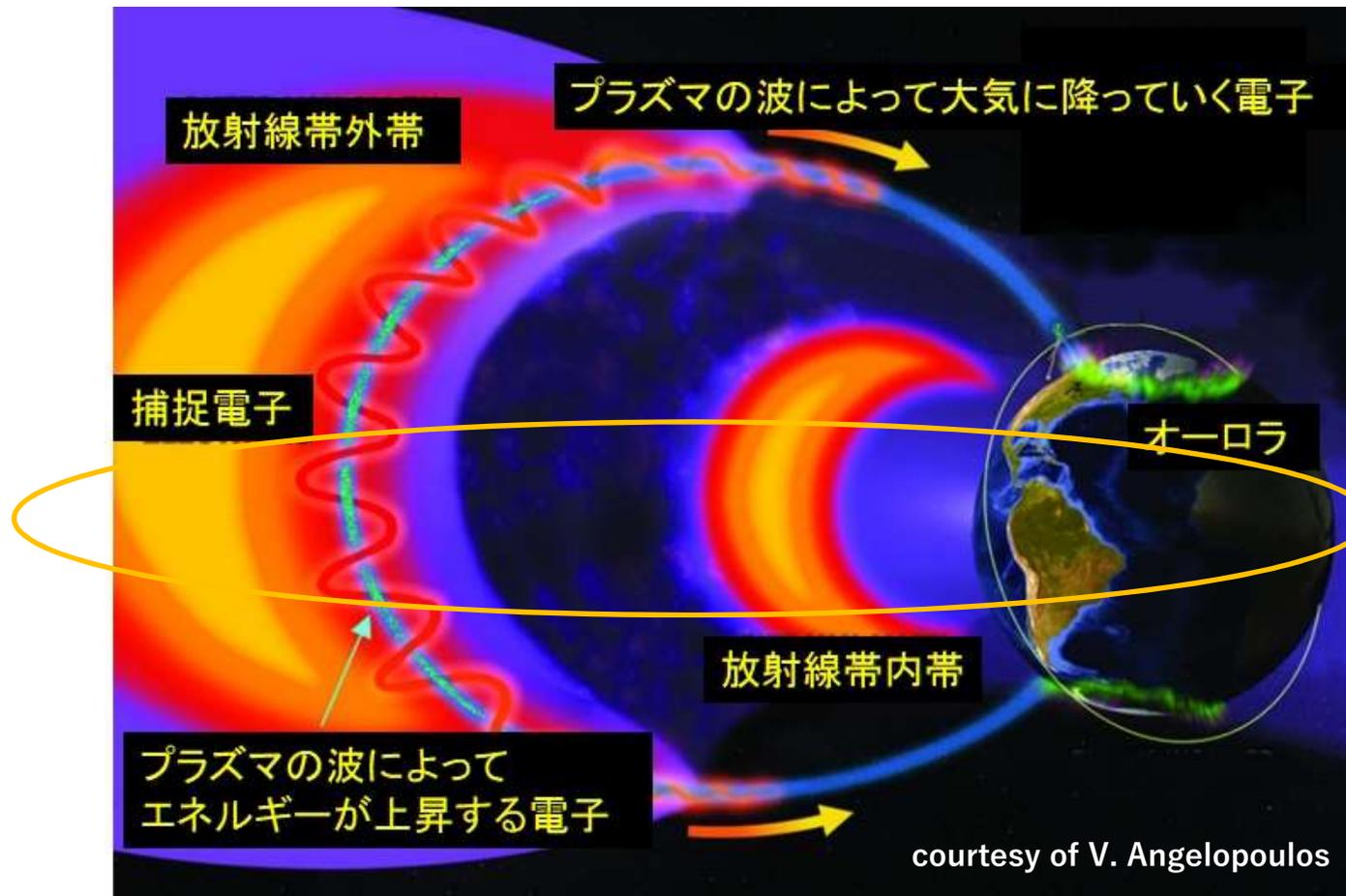
- コーラス波：周波数=数百～数十 kHz（磁力線に沿って伝搬，電子に関係）
- イオン波：周波数=数 Hz（磁力線に沿って伝搬，イオンに関係）
- 静電波：周波数=数十～数百 kHz（その場にとどまって振動，電子に関係）



2. 科学成果概要

「あらせ」によるジオスペースの新しい描像

あらせ衛星の観測から「放射線帯の高エネルギー電子の増減にはプラズマの波が大きく関わっている」という新しい描像が得られつつある。



あらせ軌道

近地点高度：約400km
遠地点高度：約32,000km
軌道傾斜角：約31度

放射線帯をくまなく探査できる。

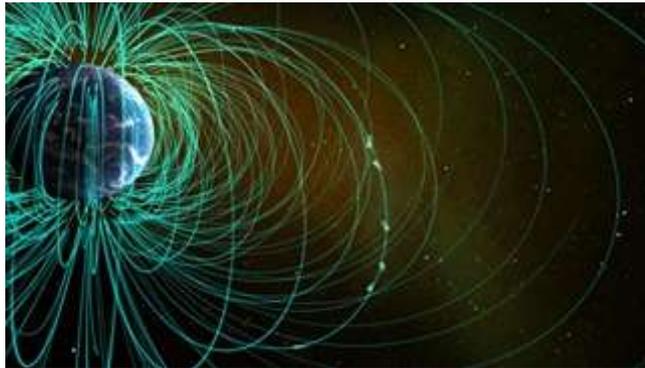
- 世界最先端の観測をジオスペースで実現した成果
- あらせ衛星と地上との連携観測の成果



2. 科学成果概要

プラズマの波によって、ジオスペースの電子が大気へと降り込む

通常状態

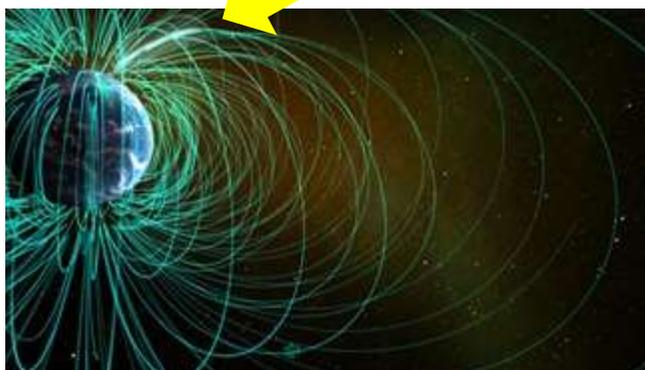


放射線帯の電子は、磁力線に巻き付いて運動
 = 宇宙から、地球に、電子は落ちてこない

コーラス波やイオン波が電子と相互作用



コーラス波やイオン波のもつ電界・磁界の変動によって電子の軌道が散乱される



その結果、電子が大気へと降り込む

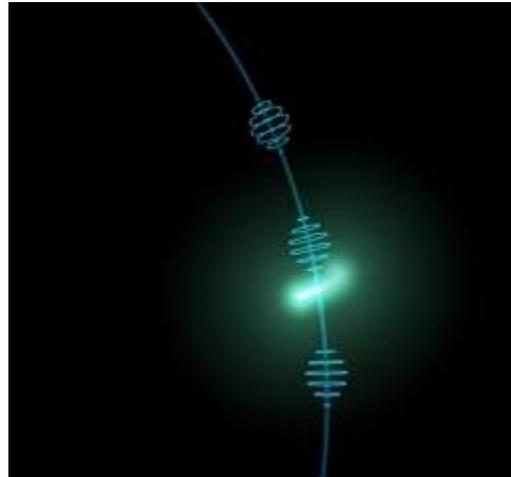
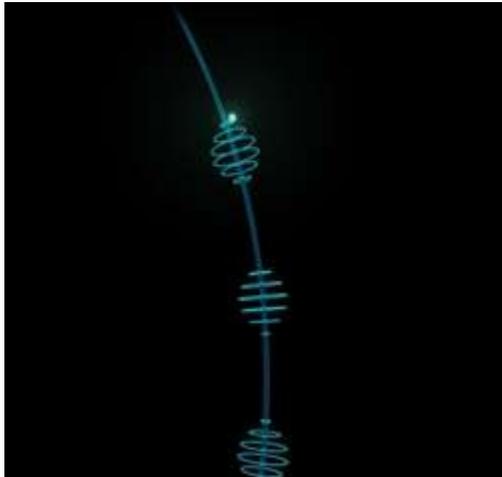
- 放射線帯が宇宙空間から消える
- 高度100km付近でオーロラが光る
- 高度数十km付近の大気が電離し、大気の組成が変化する



プラズマの波によって、ジオスペースに放射線帯の高エネルギー電子が生まれる

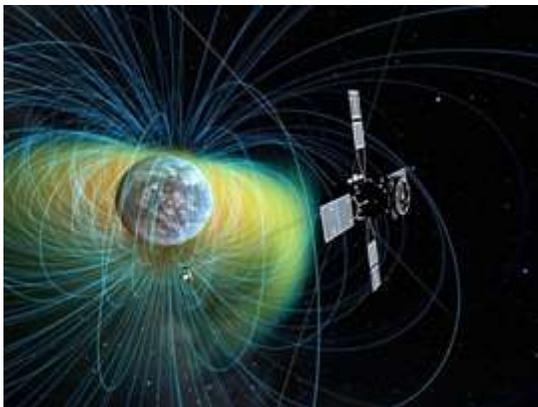
要素となる物理過程：コーラス波と電子が相互作用

コーラス波のエネルギーが電子へと渡され、電子エネルギーが増加する。（サイクロトロン共鳴）



電子のエネルギーが上昇する

宇宙嵐時などにコーラス波がたくさん発生すると放射線帯の電子が増える。



放射線帯の再形成，増大



プラズマの波による電子消失を実証

プラズマの波による電子消失

- 地球の磁場に捉えられた**高エネルギー電子が、プラズマの波によって散乱され（波動-粒子相互作用）、地球大気へ降り込む（高エネルギー電子の消失）過程の直接証拠を得ることに成功した。**
- **長年未解明であった「プラズマの波によって散乱された電子が大気に降り注ぎ、脈動オーロラを発生させる」というシナリオを決定付ける成果**であり、Nature誌に掲載された。
- 「あらせ」の電子観測器の高角度分解能とプラズマの波の高時間分解能観測による成果。
Kasahara et al. [Nature, 2018] （2018年のNature誌のEditor's Choice に選出.）

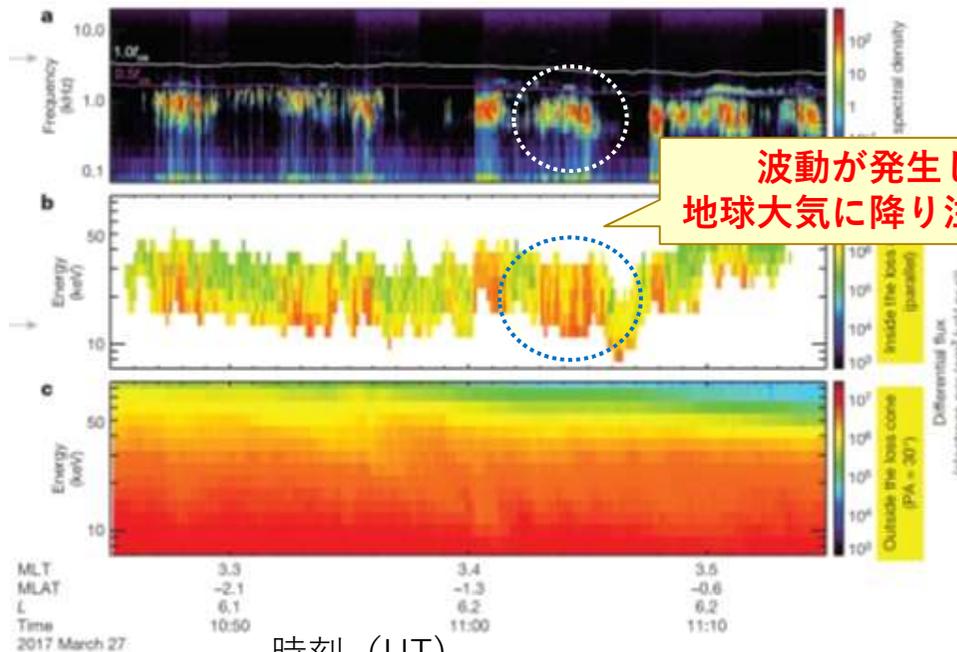
プラズマの波
周波数スペクトル

地球に
降り込む電子
エネルギースペクトル

磁気圏に
捕捉された電子
エネルギースペクトル

波動の周波数 (kHz)
電子のエネルギー (keV)

プラズマの波の周波数スペクトルと
地球へ降り込む電子のエネルギースペクトルの対応



時刻 (UT)

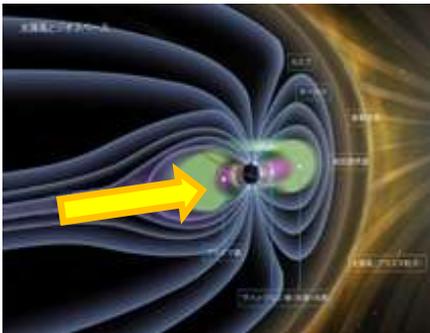


2. 科学成果概要

内部加速の証拠を観測

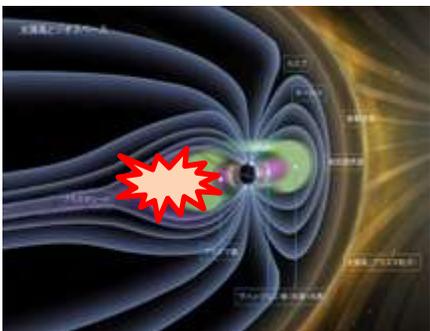
- 放射線帯のメガ電子ボルトを超える電子がジオスペースのどこで生まれているかを、位相空間密度と呼ばれる量を精密に計測することで切り分けることに成功。
- 複数の宇宙嵐において内部加速を示す結果を観測し、プラズマの波が放射線帯のメガ電子ボルト電子の生成を担っている可能性を指摘。

放射線帯電子の外部供給



- 地球周辺の磁場が強い場所に輸送されることで加速される。
- ベータトロン加速と呼ばれる物理過程によると考えられている。

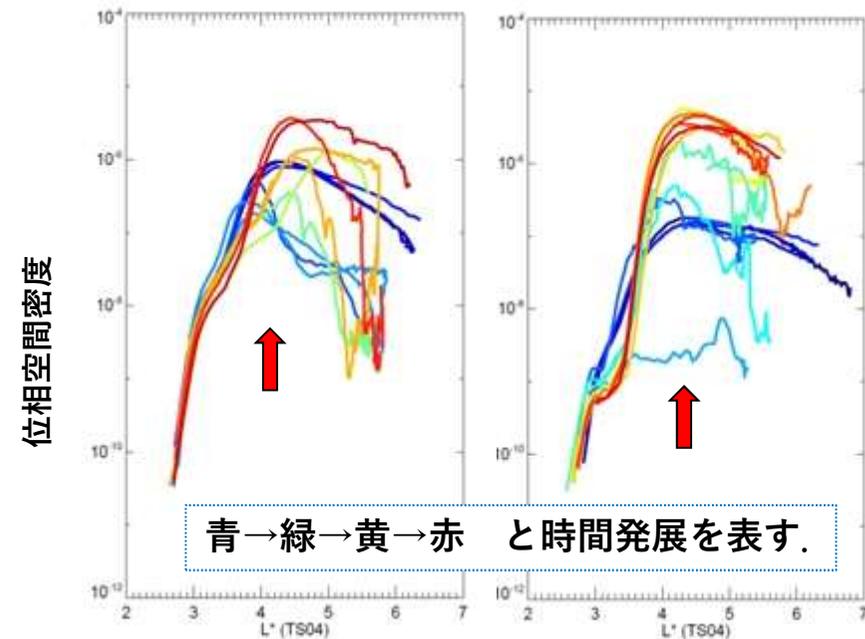
放射線帯電子の内部加速



- プラズマの波によって、地球近傍（放射線帯中心部）で加速される。
- 加速の担い手はプラズマの波で、波動粒子相互作用によって、高エネルギー電子が生まれると考えられる。

小規模の宇宙嵐

中規模の宇宙嵐



青→緑→黄→赤 と時間発展を表す。

地球からの距離（地球半径で規格化）

[Miyoshi et al., to be submitted]

- 地球半径の4-5倍(放射線帯の中心部)で、位相空間密度の上昇を観測した。
- 外部供給では説明できない変化であり、プラズマの波による内部加速を示す証拠と考えられる。



2. 科学成果概要

衛星-地上協調観測で、プラズマの波による散乱素過程を観測

プラズマの波による電子散乱素過程の観測

プラズマの波による電子散乱過程の素過程について、「あらせ」のプラズマの波の波形観測(毎秒 64000 点サンプリング)と、連携地上観測チームによる高感度カメラ観測(毎秒 100フレーム)の連携観測によって、世界で初めて、数百ミリ秒以下のプラズマの波の変化と、オーロラのフラッシュ的な変化の1対1対応を実証した。

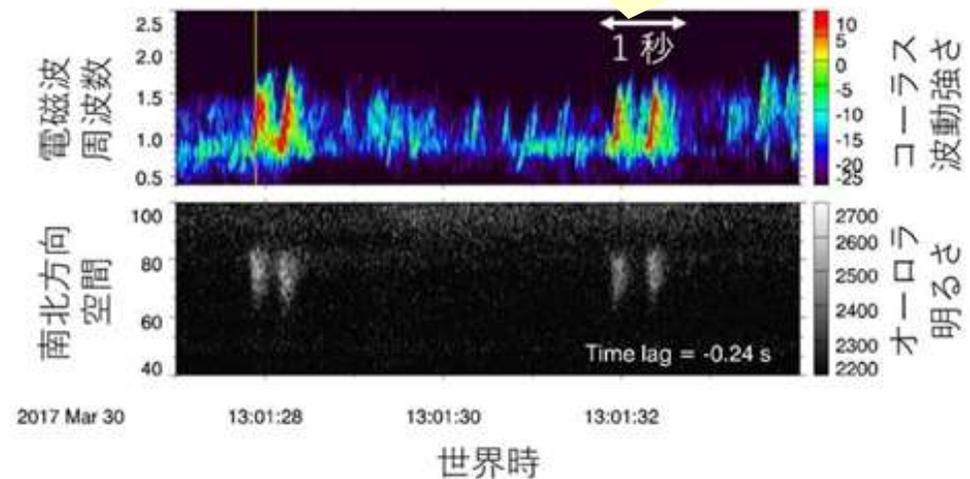
- 衛星と地上の高時間分解能観測による「プラズマの波による電子散乱の素過程」を示したものであり、Nature Communications誌に掲載された。
- 科学戦略にもとづいた「あらせ」プラズマの波観測と連携地上観測との連携による成果。
Ozaki et al. [Nature Communications, 2019]

科研費・特別推進や基盤Sで
整備した地上観測拠点



同一磁力線上で、タイミングを
あわせて、あらせが波形観測を実施

1秒以下の時間で見られるプラズマの波
の構造とオーロラの発光が一対一対応



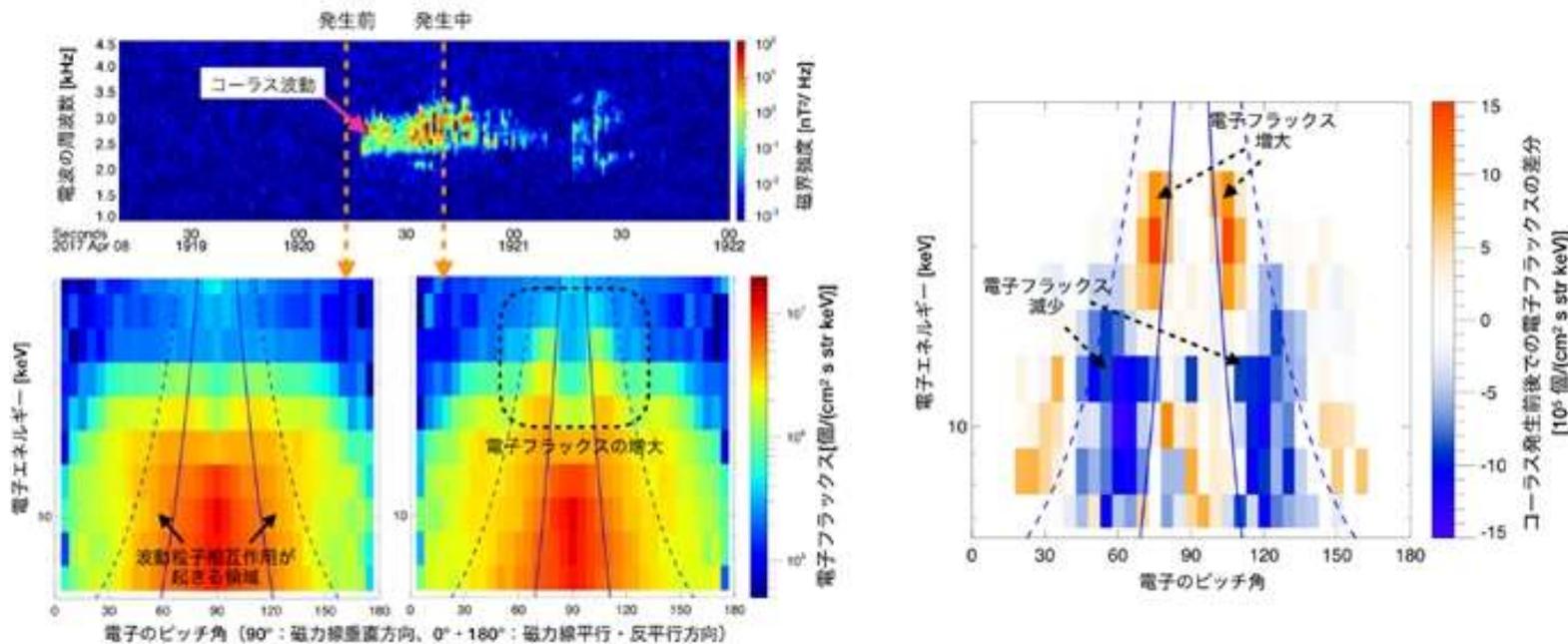


プラズマの波による電子加速の瞬間を実証

- 自然界の微弱なプラズマの波によって、電子が加速され、電子の速度分布関数が変化する様子をはじめ捉える事に成功した。
- 理論曲線に沿って、低エネルギー電子が減って高エネルギー電子が増加することを明らかにした。
- 「あらせ」の電子観測器による高エネルギー分解能・高角度分解能による成果。

Kurita et al. [GRL, 2018]

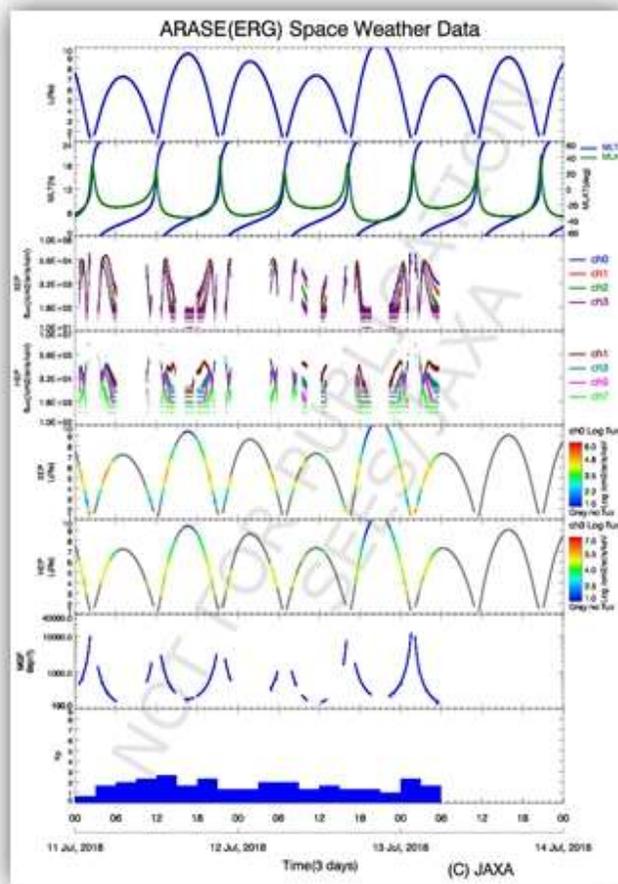
- プラズマの波の出現とともに、電子のエネルギー、および磁力線に対する角度に対するフラックス（数）を分析すると、プラズマの波の発生に伴って特定の角度の電子フラックスが増大することが判明。
- 理論的に予想される波動粒子相互作用の起こる領域での電子フラックスの増大が起こっており、プラズマの波による加速の瞬間を捉えていると考えられる。
- 高エネルギー側での電子フラックスと同時に、低エネルギー側では電子フラックスの減少も発生していることを特定し、プラズマの波による電子の変調過程のエネルギー依存性を明らかにした成果。



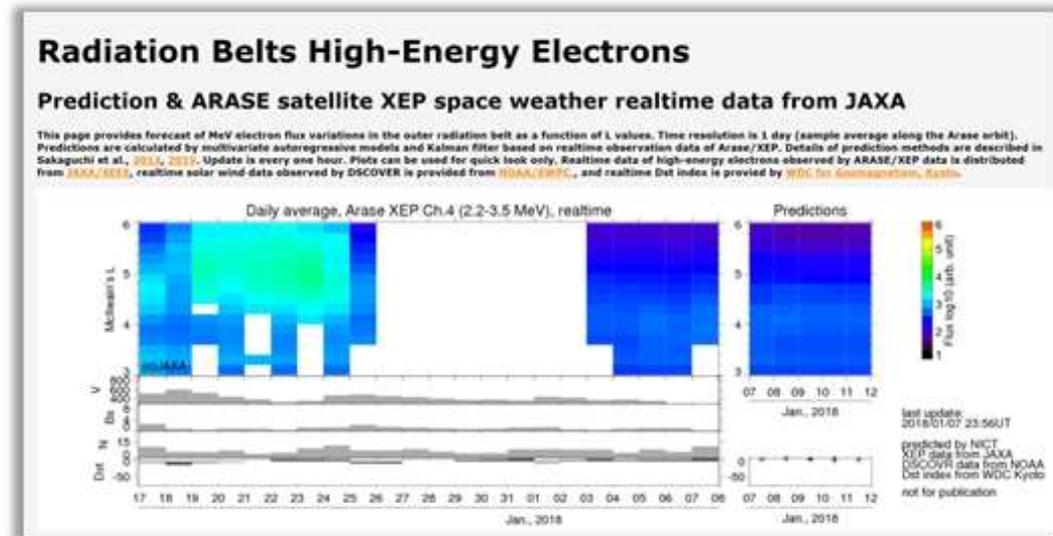


3. 宇宙天気予報への応用

- 「あらせ」の宇宙天気向けサマリーデータ（高エネルギー電子および磁場）は、ほぼリアルタイムにJAXAのSEES※システムのウェブサイトにてデータプロットを閲覧できる。
- 宇宙天気向けのリアルタイム・サマリーデータは、国内外の研究機関にSEESから配信され、各研究機関の宇宙天気研究に供されている。
- 情報通信研究機構（NICT）では、「あらせ」の宇宙天気データを用いた放射線帯予測モデルを開発し、モデルの参照・評価が行われている。



NICTにおける放射線予測モデル



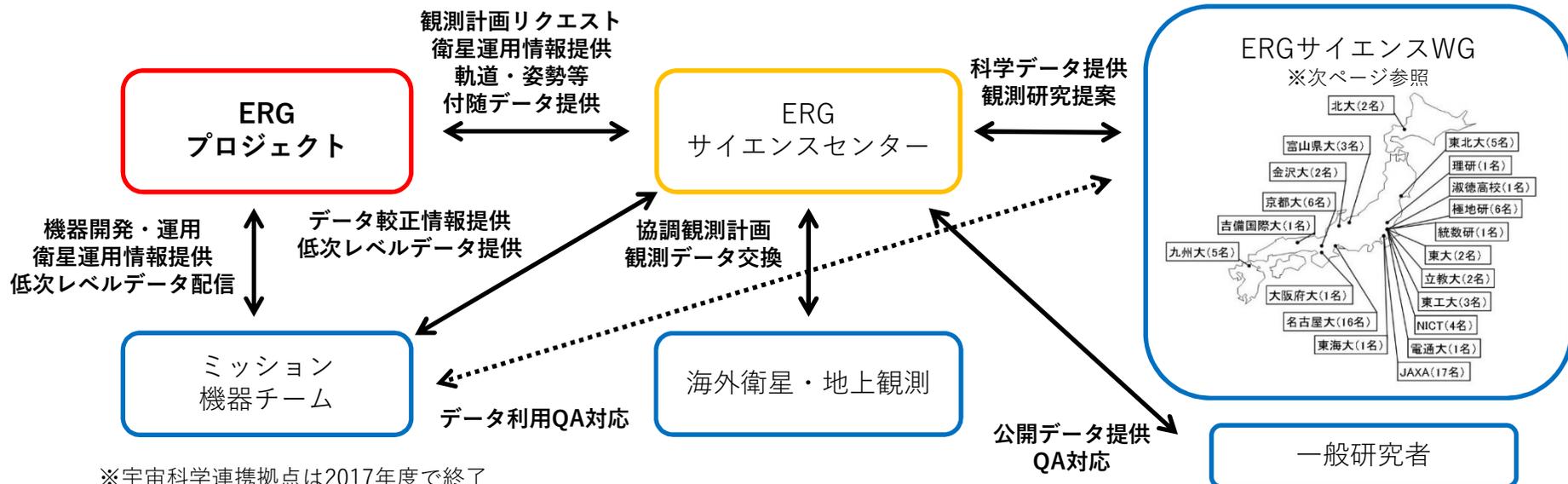
<http://seg-web.nict.go.jp/ERG-spaceweather/forecast.html>

※SEES (Space Environment & Effects System)は、JAXA研究開発部門で運用する、宇宙環境とそれらによる影響に関するデータとモデルを提供するデータベースシステム。



4. 国内の研究協力体制 (1/2)

- 「あらせ」衛星に搭載されるミッション機器9つの内、3機器は（PWE（東北大・金沢大・京都大・富山県立大）, S-WPIA（京都大・金沢大）, LEP-e（台湾ASIAA））によって開発が担当され、打ち上げ後も機器の運用，取得された科学データの評価・校正作業，等をPIを中心に実施している。（※MEP-eのPIは総合試験中に東京大に，MEP-iのPIは定常運用移行後に大阪大にISASから異動した。）
- 「あらせ」のミッションである科学研究は，プロジェクトサイエンティストを中心に，ERGサイエンスセンターを核として，国内外の研究コミュニティと共に進められる。
- ISASの宇宙科学連携拠点※として名古屋大学に設置されたERGサイエンスセンターは，衛星の観測計画の取りまとめを担い，「あらせ」衛星と海外衛星や地上観測との協調観測を計画する。また，国内外の研究コミュニティの窓口として共同研究をコーディネートする。
- ERGサイエンスセンターは，PIチームと協力して，科学データプロダクトのプロセッシングを行い，科学データの世界の研究者への公開も担う。また，科学データを解析するためのデータ解析ツールの開発も担当する。
- 大型科研費（新学術領域，特別推進研究，基盤S）の研究と密接に連携している。



※宇宙科学連携拠点は2017年度で終了。
2018年度から共同研究契約を締結して，連携を維持している。



4. 国内の研究協力体制 (2/2)

ERGサイエンスWGに参加いただいている研究機関について

サイエンスチームに参加いただいている方々の所属研究機関は次の通り
(順不同, 2019年1月時点)

北海道情報大学	玉川学園	九州大学
北海道大学	大乘淑徳学園	九州工業大学
東北大学	中京大学	北九州工業高等専門学校
東北工業大学	名古屋大学	鹿児島工業高等専門学校
千葉大学	富山県立大学	台湾・中央研究院天文及天文物理研究所
東京大学	金沢大学	台湾・国立成功大学
電気通信大学	京都大学	韓国・韓国天文研究院
武蔵野大学	大阪大学	
立教大学	大阪府立大学	
東海大学	大阪電気通信大学	
国立極地研究所	神戸大学	
統計数理研究所	吉備国際大学	
情報通信研究機構	高知工業高等専門学校	
国立天文台	徳山工業高等専門学校	



5. 国際ミッション評価の実施

- ERGプロジェクト終了審査を実施するにあたり，達成状況の評価，後期運用計画の科学的意義と期待される成果，後期運用に向けたミッション機器の状態の評価について，国際外部評価（ミッション分科会）を2018年8月8日に実施した。
- 評価の観点，審査委員構成は以下の通り。

#	Review Items	Review Points
1	Achievement of project objectives	Review the achievement of success criteria based on data acquired during nominal mission period.
2	Validity of phase-up to the extended mission period	Review the following points: 1) The scientific significance and expected results during extended mission period. 2) The validity of the plan during extended mission period (spacecraft status, operation plan, resources)

Name	Affiliation	Specialty
Prof. Kanya Kusano (Chair)	Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University	Solar Physics, Space Weather
Prof. Toshihiko Iyemori	Graduate School of Science, Kyoto University	Solar-Terrestrial Physics, Data Science
Prof. Takuji Nakamura	National Institute of Polar Research	Upper Atmosphere Physics, Remote-sensing of Atmosphere
Prof. Yoshifumi Saito	JAXA/ISAS	Space Physics, Space Plasma Measurement
Prof. Toshifumi Shimizu	JAXA/ISAS	Solar Physics
Prof. Daniel Baker	Laboratory for Atmospheric and Space Physics, Colorado University	Space Physics
Dr. David Gary Sibeck	NASA/Goddard Space Flight Center	Sun-Solar System Connection Physics
Prof. Vassilis Angelopoulos	Institute of Geophysics and Planetary Physics UCLA	Space and Astrophysical Plasmas.

ミッション分科会報告書から抜粋（概要の抄訳）

「あらせ」ミッション分科会は、「あらせ」プロジェクトの成果およびミッション延長計画について注意深く評価した結果，プロジェクトは非常に良い成功を収めていること，ミッションの延長はインパクトのある科学の成果を生むことを期待できること，を結論しました。当分科会としては、「あらせ」のミッションを2019年度から2021年度の少なくとも3年間延長すること，他のミッション・プログラムとの国際共同研究をさらに発展させることを推奨します。



6. 成功基準の達成状況 (1/2)

レベル	レベル設定の考え方	課題	成功基準	成功基準達成の評価指針に基づいた再表現	審査会評価
ミニマムサクセス	イベント・スタディーを実施する科学研究	I	N/A	N/A	N/A
		II	内部磁気圏赤道面近傍でのプラズマ総合観測を実現し、波動粒子相互作用による相対論的高エネルギー電子の加速機構を同定する。	(1) 波動粒子相互作用による相対論的高エネルギー電子の加速機構を同定するために、PWE/MGFによるプラズマ波動とLEP-e/MEP-e/HEP/XEPによる電子エネルギー分布の総合観測を行う。	達成
				(2) (1)のプラズマ波動と電子エネルギー分布の総合観測結果から、電子加速に関与するプラズマ波動の励起過程やプラズマ波動による電子加速過程に関するイベント・スタディーを実施し、波動-粒子相互作用による電子加速の候補となる現象を見つける。	達成
		III	地上観測・モデリングと組み合わせ、波動粒子相互作用による消失過程を観測し、放射線帯変動への影響を推定する。	(1) 波動粒子相互作用による相対論的高エネルギー電子の消失過程を同定するために、PWE/MGFによるプラズマ波動とLEP-e/MEP-e/HEP/XEPによる電子エネルギー分布の総合観測を行う。また、ERG衛星の観測とコーディネートされた地上観測を実施する。	達成
				(2) (1)のプラズマ波動と電子エネルギー分布の総合観測結果から、必要に応じて地上観測結果や数値モデリングと組み合わせながら、電子消失に関与するプラズマ波動の励起過程やプラズマ波動による電子消失過程に関するイベント・スタディーを行い、放射線帯変動への影響を考察する。	達成
		フルサクセス	多様な宇宙環境変動下におけるイベント・スタディーを実施する科学研究	I	規模の異なる宇宙環境変動下の内部磁気圏赤道面近傍において、粒子・磁場計測器による位相空間密度の動径方向分布の時間変化を計測し、放射線帯高エネルギー電子の外部供給・内部加速を切り分ける。
(2) 規模の異なる宇宙環境変動下(※)の数例のイベントにおいて、(1)の計測を行い、放射線帯内部加速の有無を確認する。	達成				
(3) 規模の異なる宇宙環境変動下(※)のイベントを網羅的に解析し、放射線帯高エネルギー電子生成における放射線帯内部加速の寄与を定量的に明らかにする。	今後の研究によって達成 (観測データは取得済)				
II	規模の異なる宇宙環境変動下でプラズマ総合観測を行い、地上観測・モデリングと組み合わせ、太陽風条件と発動する加速機構の関係を理解する。			(1) 規模の異なる宇宙環境変動下(※)において、波動粒子相互作用による相対論的高エネルギー電子加速機構を同定するために、PWE/MGFによるプラズマ波動とLEP-e/MEP-e/HEP/XEPによる電子エネルギー分布の総合観測を行う。また、ERG衛星の観測とコーディネートされた地上観測を実施する。	達成
				(2) (1)の観測結果に基づいて、必要に応じて地上観測や数値モデリングと組み合わせながら、太陽風条件による電子加速のメカニズムや加速効率の差異について考察する。	達成
				(3) 異なる宇宙環境変動下(※)において、どのような電子加速機構が支配的か、その関係性を理解する。	今後の研究によって達成 (観測データは取得済)
III	規模の異なる宇宙環境変動下において、リングカレント効果を含めた各種の消失機構を観測し、放射線帯変動への影響を検証する。			(1) 規模の異なる宇宙環境変動下(※)において、波動粒子相互作用による相対論的高エネルギー電子の消失機構を同定するために、PWE/MGFによるプラズマ波動とLEP-e/MEP-e/HEP/XEPによる電子エネルギー分布の総合観測を行う。また、LEP-i/MEP-iによってリングカレント・イオンを観測する。	達成
				(2) (1)の観測結果に基づいて、必要に応じて地上観測や数値モデリングと組み合わせながら、異なるタイプの電子の消失イベントを同定し、放射線帯変動への寄与について考察する。	達成
				(3) 異なる宇宙環境変動下(※)において、どのような電子消失機構の影響が支配的か、その放射線帯変動への影響との関係性を理解する。	今後の研究によって達成



6. 成功基準の達成状況 (2/2)

レベル	レベル設定の考え方	課題	成功基準	成功基準達成の評価指針に基づいた再表現	審査会評価
エクストラサテライト	ERG衛星と海外衛星との同時観測を中心としたイベント・スタディーを実施する科学研究/長期間観測によって、より多数の事例を集める、あるいはより発生頻度の低い宇宙環境変動の事例を観測することを実施する科学的研究	I	規模の異なる宇宙嵐を観測し、ケースごとの外部供給・内部加速の違いを明らかにする。	(1) 規模の異なる宇宙嵐下(※)において、XEP, HEPによる数百キロ電子ボルトから数メガ電子ボルトの電子フラックスとMGFが計測する背景磁場データから、磁気赤道における電子位相空間密度の空間分布を推定し、地球から動径方向の電子位相空間密度の空間分布を求める。	部分的達成
				(2) 規模の異なる宇宙嵐下(※)の数例のイベントにおいて、(1)を行い、放射線帯内部加速の寄与の有無を確認する。	部分的達成
				(3) 規模の異なる宇宙嵐下(※)のイベントを網羅的に解析し、放射線帯高エネルギー電子生成における放射線帯外部供給・内部加速の寄与を定量的に明らかにする。	今後の研究によって達成
		II	長期観測の実現により、宇宙嵐時の加速域の空間分布や加速効率を含む定量的側面を明らかにする。さらに、海外ミッションとの協力により、異なるL値、地方時で同時観測を実施する。	(1-a) 波動粒子相互作用による相対論的高エネルギー電子加速機構を同定するために、PWE/MGFによるプラズマ波動とLEP-e/MEP-e/HEP/XEPによる電子エネルギー分布の総合観測を、定常観測期間以上の長期間観測を行い、宇宙嵐下の電子加速イベントを観測する。 (1-b) (1-a)と共に、海外衛星と協力して、異なる地点での宇宙嵐の同時観測を実施する。 (1-c) WPIAの観測を行い、プラズマ波動と電子のエネルギー交換過程の直接観測を実施する。	達成
				(2-a) (1-a)の観測結果に基づいて、必要に応じて地上観測結果や数値モデリングと組み合わせながら、宇宙嵐時の電子加速の宇宙嵐の規模による差の有無を確認する。 (2-b) (1-b)の観測に基づいて、電子加速領域の空間分布について考察する。 (2-c) (1-c)の観測と数値モデリングを組み合わせ、プラズマ波動と電子のエネルギー交換を定量的に考察する。	部分的達成
				(3-a) (1-a)の観測結果に基づいて、必要に応じて地上観測や数値モデリングと組み合わせながら、電子加速の起こり方が宇宙嵐の規模にどのように依存しているかを明らかにする。 (3-b) (1-b)の観測によって、電子加速が起きている領域の空間分布について定量的に評価する。 (3-c) (1-c)の観測結果を(3-a)や(3-b)の研究に応用する。	今後の研究によって達成 (観測データは取得済)
		III	海外ミッションとの協力により、異なるL値、地方時で同時観測を実施し、宇宙嵐時の相対論的電子の生成と消失のバランスを定量的に検証する。	(1) 波動粒子相互作用による相対論的高エネルギー電子の消失機構を同定するために、宇宙嵐時に、PWE/MGFによるプラズマ波動とLEP-e/MEP-e/HEP/XEPによる電子エネルギー分布の総合観測を行い、海外衛星と協力して異なる地点間にて、放射線帯電子の消失を観測する。また、PWE/MGFとLEPi/MEPiの観測から、放射線帯電子の消失を引き起こす波動の励起過程の観測を行う。	達成
				(2) (1)の観測結果に基づいて、必要に応じて地上観測や数値モデリングと組み合わせながら、放射線帯電子の生成と消失のバランスについて、イベント・スタディーから考察する。	未達成
				(3) (2)の観測結果を蓄積し、必要に応じて地上観測結果や数値モデリングと組み合わせながら、放射線帯電子の生成と消失のバランスについて定量的に検証する。	今後の研究によって達成 (観測データは取得済)

【評価指針】

- (1) 成功基準に述べられた科学目標の達成の為に必要な観測データが定常運用期間中に取得できたか。
- (2) 定常運用期間中に取得した観測データに基づいて、成功基準に述べられた科学目標の達成に繋がる「初期科学成果」が得られているか。
- (3) 成功基準に述べられた科学目標の達成を、得られたデータを評価・解析し、科学成果として公表し、認知されるには時間を要する。したがって、これらの研究は定常運用終了後の研究課題として識別し、「それら課題に対する科学成果を査読付き国際誌などを通じて公表したか。」をその達成基準として、後期運用期間に実施する。



7. 後期運用の達成目標と意義

[後期運用期間]

2021年度末までの3年間

[達成目標]

- I. 第24-25太陽活動遷移期間の宇宙環境変動下において、波動粒子相互作用による放射線帯電子加速と消失を同定するために、プラズマ総合観測を行う。
- II. 上記のデータを解析し、太陽活動遷移期間における波動粒子相互作用による放射線帯、ジオスペース変動に関する科学成果を創出する。

[更なる達成目標]

- III. 米国などの新たな衛星と連携し、ジオスペースの総合観測に貢献する。
- IV. 打上げ以降の全期間の観測データに基づき、より長い時間スケールにおける太陽風とジオスペース、放射線帯の変動、特に波動粒子相互作用による変動への寄与に関する科学成果を創出する。

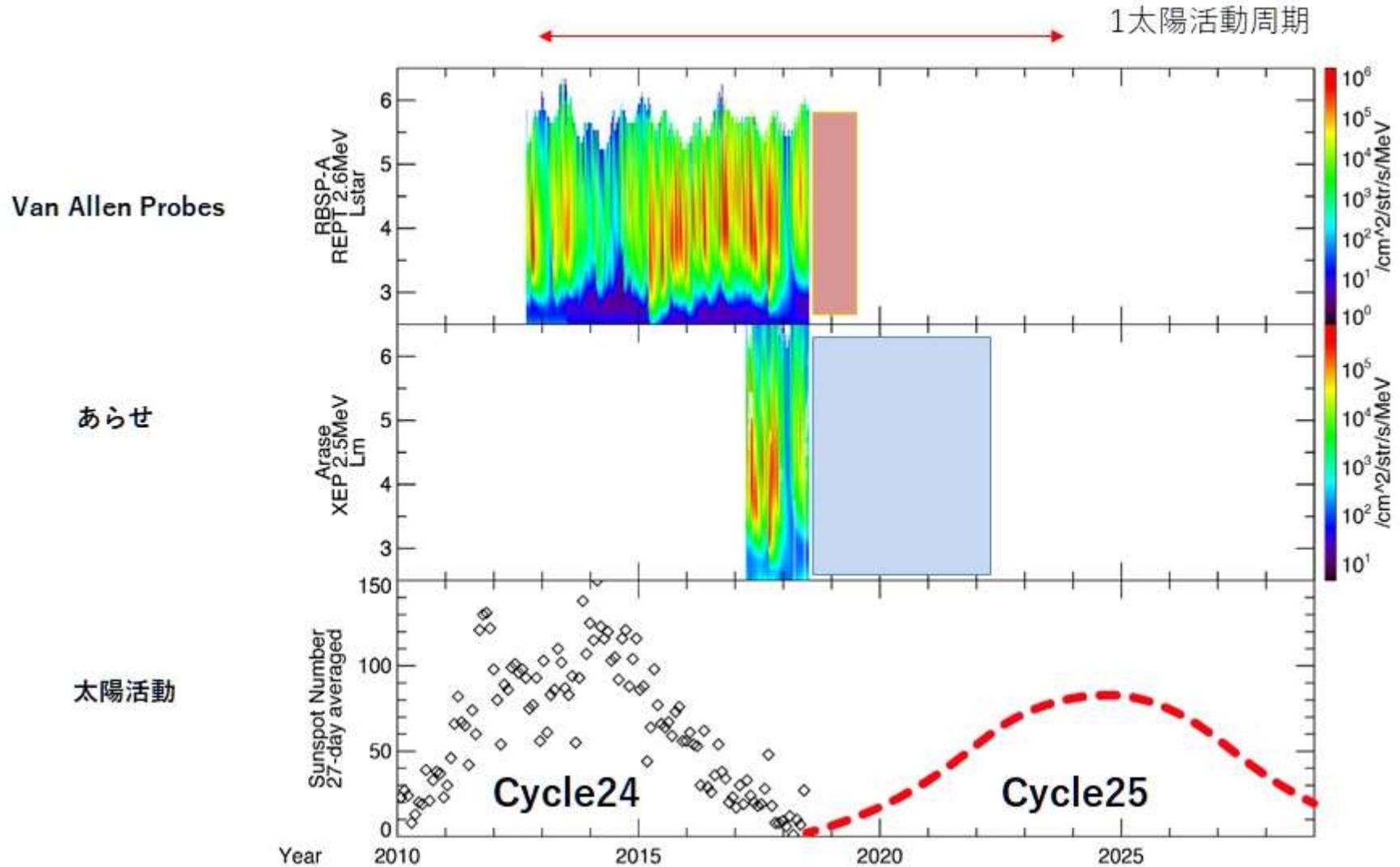
● 後期運用の科学的意義

第24-25期太陽サイクル遷移期間のジオスペース総合観測を実施することで、

- **世界ではじめて太陽活動極小期の放射線帯の維持・形成のメカニズムに観測的に迫る**ことができる。
- 「定常観測期間とは質的に異なることが予想される太陽風」による影響を観測することで、より多様な太陽風に対するジオスペース・放射線帯の応答を観測し、**より普遍的に、ジオスペースの太陽風に対する応答メカニズムの理解を目指す**ことができる。



まもなく衛星運用を終了する米国Van Allen Probes衛星の観測を補い、1太陽活動周期に亘る放射線帯観測データを取得することを最終目標とする。



- 太陽活動下降期の観測：高速太陽風に伴う擾乱現象を観測
- 極小期の観測：小規模宇宙擾乱時の現象を観測
- 太陽活動上昇期：太陽面爆発に伴う擾乱現象を観測

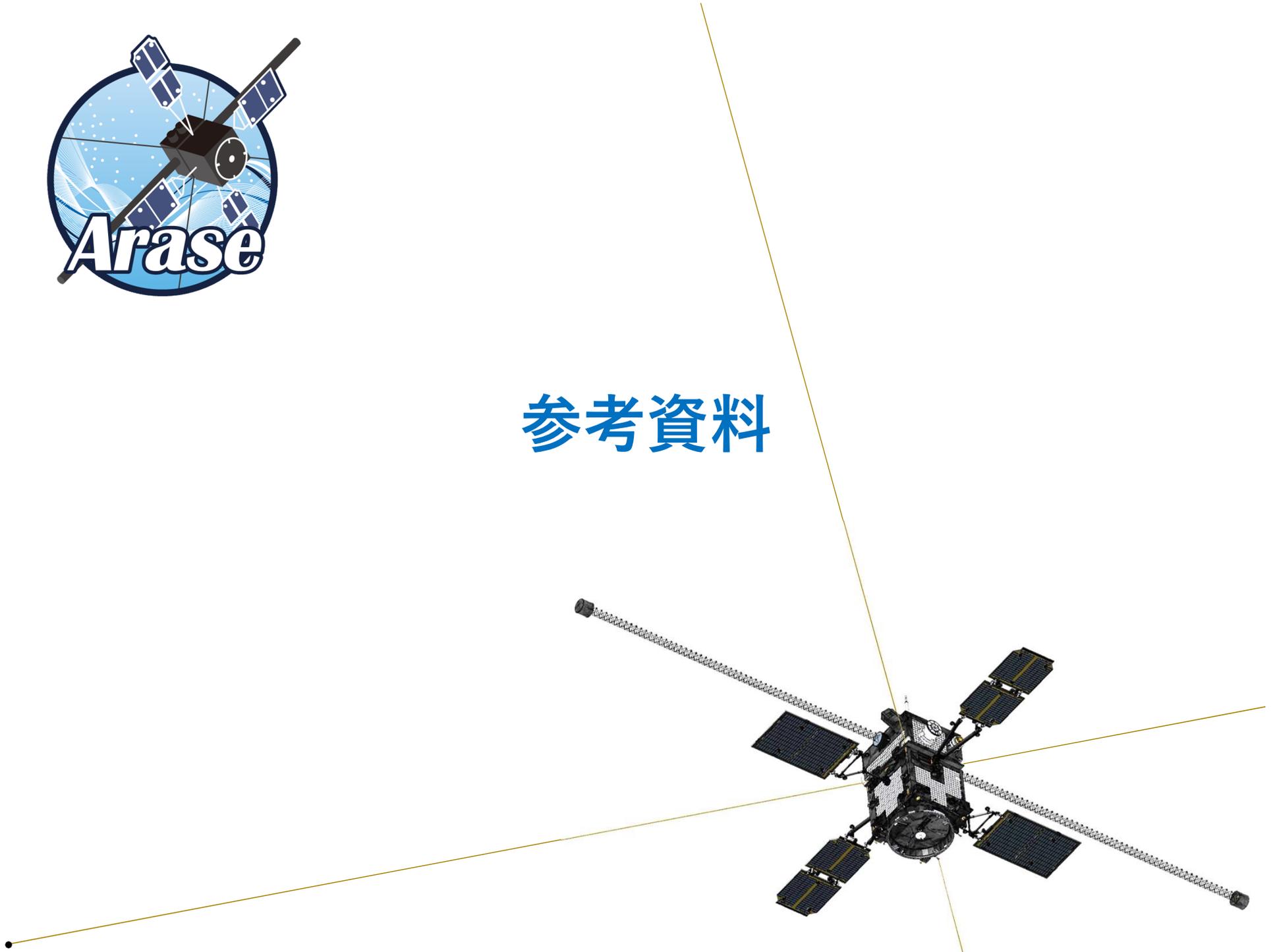


8. まとめ

- 「あらせ」は、2016年12月20日の打上げ以降、ほぼトラブルの発生無く、第24太陽サイクルの活動下降期において、規模の異なる多数の宇宙嵐時の放射線帯変動を観測することに成功しました。
- 「あらせ」を中心とした宇宙嵐時における国際的なジオスペース総合観測により、プラズマの波を介した高エネルギー電子の加速・消失過程を明らかにする、広く宇宙プラズマ研究にインパクトのある科学成果を創出しました。
- 「あらせ」の観測データを世界の研究者に対して一般公開を開始しており、今後は海外研究者による「あらせ」の科学成果の創出も期待されます。定常運用期間に取得した観測データから更なる科学成果の積み上げにより、当初設定の成功基準の達成を目指します。
- 衛星状態は健全であり、後期運用の目標達成にむけて、更なる科学成果の創出にむけて、引き続き観測運用を実施します。



参考資料

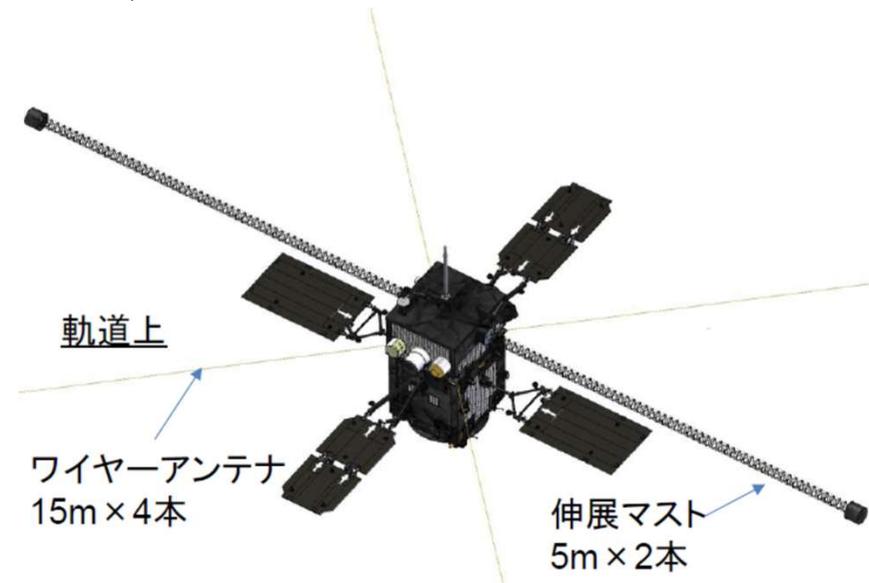




ミッションの概要 衛星システム



振動試験の風景（28年3月7日）



主要衛星諸元

主な項目	諸元
大きさ	(伸展物伸展前) 約 1.5 m × 1.5 m × 2.8 m
	(伸展物伸展後) 約 31 m × 31 m × 2.8 m
打上げ質量	約365kg
軌道	近地点高度 約 400 km 遠地点高度 約32,000 km
運用期間	定常観測開始以降1年以上



ミッションの概要 ミッション機器

6つの粒子センサーと2つの電磁場計測器，ミッションデータプロセッサ（MDR）とミッションデータレコーダ（MDR）がミッション部に搭載されている。

搭載観測機器

LEP-e: Low-Energy Particle Experiments - Electron Analyzer

LEP-i: Low-Energy Particle Experiments - Ion Mass Analyzer

MEP-e: Medium-Energy Particle Experiments - Electron Analyzer

MEP-i: Medium-Energy Particle Experiments - Ion Mass Analyzer

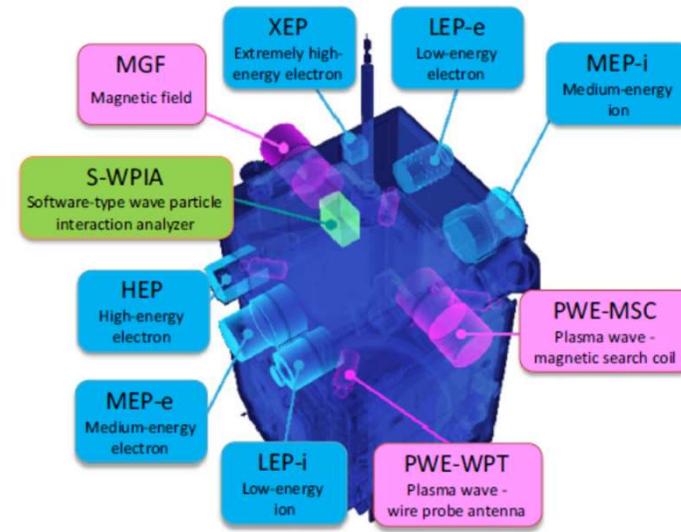
HEP: High-Energy Electron Experiments

XEP: Extremely High-Energy Electron Experiments

PWE: Plasma Wave and Electric Field Experiment

MGF: Magnetic Field Experiment

S-WPIA: Software-Type Wave Particle Interaction Analyzer





科学成果公表状況

- 科学成果は、Nature誌に最初の論文が掲載されたことを皮切りに、Geophysical Research Letters誌の特集号（22編掲載済，2編査読中）に掲載され，その他，Nature Communications誌（1編受理），Journal of Geophysical Research誌（1編受理），など，国際的な査読付き論文誌に出版されている。
- 各成功基準課題に対応する査読付き論文誌への出版状況

	成功基準Ⅰ	成功基準Ⅱ	成功基準Ⅲ	その他
受理・掲載済	0	7 (GRL)	7 (GRL) 1 (Nature) 1 (Nature Comm.)	8 (GRL) 1 (JGR) 1 (Int. J. Astron.)
査読・投稿準備中	1 (in prep.)	1 (GRL)	1 (GRL) 1 (EPS)	1 (EPS) 1 (Space Weather) 2 (in prep.)
合計	1	8	11	14

- GRL 22編は「あらせ」特集号に掲載済。
- ミッション分科会に上記の論文成果に基づき，成功基準の達成状況を評価して頂いた。
- 「あらせ」開発段階で準備を進めた「あらせ」関連の衛星計画に関連する論文や地上観測網の科学成果については，2016年度までで累計58編の査読付き論文誌に掲載済み。
- 「あらせ」と同様に地球の放射線帯を探索したNASAの「Van Allen Probes」と比較すると，「Van Allen Probes」は打上げてから2年間での論文掲載数が48編なのに対し「あらせ」は，打上げてから2年間で47編（上記に加え，衛星・ミッション機器開発関連の論文21編を含む。）である。「あらせ」は世界の研究者に対するデータ公開による成果がまだ出ていないが，論文数として「Van Allen Probes」にひけをとらない初期科学成果を発信している。



社会的／政策的／国際的貢献状況 (1/2)

【国際的・社会的貢献に関する背景】

- 地球周辺の宇宙空間（ジオスペース）は、太陽活動の影響を受けて常に変動をし、太陽と地球を結ぶ様々な現象が発生する領域である。その為、ジオスペース現象を正確に理解するには、太陽・太陽風・磁気圏・放射線帯・電離圏・等の多くの領域を同時に観測する必要がある。
- 現在では、NASAのHeliophysics System Observatory (HSO)をはじめとした、衛星・探査機による国際的な観測協力によって、多くの領域の同時多数観測が行われるようになり、研究が大きく進みつつある。
- 「あらせ」衛星は、この国際ジオスペース観測網の中で、比較的観測が手薄だった内部磁気圏領域をNASAのVan Allen Probes衛星とともに観測することによって、重要な国際貢献を行っている。
- 「あらせ」衛星は、ジオスペースで最も放射線環境が厳しい放射線帯を精密に計測することで、科学研究にとどまらず、多くの実用衛星が活動するジオスペースの宇宙環境を常時モニターして、宇宙天気情報を提供することができる。
- 研究開発部門の運用するSEES*システムより、準リアルタイム宇宙天気データを配信するサービスを実施しており、宇宙天気情報の提供を通じた社会的貢献を行っている。

● 社会的貢献状況や波及効果

- 情報通信研究機構にて、「あらせ」衛星の準リアルタイム宇宙天気データを用いた放射線帯活動予測モデルの研究が開始された。開発された予測モデルは、実験的な情報として、情報通信機構の宇宙天気予報の現場でも参考情報として参照されている。
- この他にも、米国海洋大気庁 (NOAA)等の機関から、準リアルタイム宇宙天気データに対する問い合わせが寄せられている。

*SEES (Space Environment & Effects System)は、JAXA研究開発部門で運用する、宇宙環境とそれらによる影響に関するデータとモデルを提供するデータベースシステム。主に、ETS-V以降のJAXAの利用衛星などに搭載された宇宙環境を計測する装置のデータ取得・アーカイブを行い、宇宙環境モニター情報として配信している。



社会的／政策的／国際的貢献状況 (2/2)

● 国際的貢献状況や波及効果

- 2018年8月から、「あらせ」衛星の科学データの世界の研究者への公開が開始された。
- Van Allen Probesプロジェクト、欧州非干渉散乱レーダーなどとは、日本の研究コミュニティが長年培った研究者間の信頼関係をベースとして、相互の科学成果に繋げるための協力を打ち上げ前から検討していた。
- 事前準備を入念に進めたことで、予定通りに協調観測のスキームを流すことができ、取得された観測データの交換が進んでいる。
- これまでの国際協調観測の実績として、①Van Allen Probesとの両衛星のタイミングをあわせたバーストモード観測の実施：261回（2018年末までの予定を含む）、世界各国の8-14箇所のSuperDARN※レーダ網におけるERGモードでの観測：SuperDARN: 1116時間（2018年末までの予定を含む）、③欧州非干渉散乱レーダの全加盟国による特別実験課題：249時間（日本の実験枠での同時観測を含む）、などがあり、科学成果の公表が始まりつつある。

※SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) は世界11ヶ国による国際共同プロジェクト。北半球に22基、南半球に12基のレーダーが極域及び中緯度域を埋め尽くすように展開されている。

● 学術的貢献状況や波及効果

- ERGプロジェクトの科学検討や機器開発、地上観測網整備などの研究を含めれば、100編以上の関連論文が査読付き国際学術誌に出版されており、また、関連研究テーマでこれまで博士21名、修士37名の学位取得者を輩出する、等、国内の大学関係者等からなる学術コミュニティの発展に寄与している。
- 「あらせ」衛星搭載機器の内、プラズマ波動観測器（PWE）と波動粒子相互作用解析装置（WPIA）は、大学共同利用システムの下に、大学研究者らによって開発が担われた。
- また、「あらせ」の学術研究活動は、2013-2017年の5年間、宇宙科学連携拠点として、ISAS-名大の協力の下に名大に設置されたERGサイエンスセンターが中心となって推進されている。
- 「あらせ」衛星が取得した科学データは、ERGサイエンスセンターにて、公開データの製造・管理やデータアーカイブ運用が行われている。公開データはERGサイエンスセンターから研究者に一般公開されており、学術成果の拡大に大きく貢献している。



人材育成

- ERGプロジェクトに配置された人材およびサブコンポーネントを担当した人材の多くは、プロジェクト発足から定常運用移行まで、衛星の開発・審査・射場作業から初期運用までを一貫して経験することができた。これにより、それぞれの専門性を伸ばしつつ、開発・打上経験を蓄積することができた。
- ERGプロジェクト発足当初は、衛星開発経験のほとんど無いメンバが多かったが、プロジェクト内外の科学衛星プロジェクトの開発に経験豊富な職員の指導の下、一連の開発を経験する中で、それぞれの開発能力を向上させ、ミッション達成に大きく貢献した。（入社3-5年が多数）
- 定常運用においても、軌道上技術評価や不具合対応などを通じて、専門能力を向上させている。
- ERGプロジェクトに配属されていた一般職職員および工学系教育職職員は、定常運用移行終了とほぼ時を置かず、ERGプロジェクトを離れた。現在、それぞれ新たな業務の中核メンバとして、ERGプロジェクトの経験を活かして、JAXA事業に貢献している。
- 学術的には、国内の研究コミュニティにて、プロジェクト移行前からERG計画の科学検討や機器開発、地上観測整備などの研究が進められており、これらの研究で2016年度までに博士19名、修士30名、学士20名の学位取得者を輩出している。更に、衛星の打上げ後の2017年度には、博士2名、修士7名、学士11名が「学位」を取得している。



他大学等の機器を多数搭載したERG固有の教訓・成果

- 大学研究者（ISASも含む）しか持たない技術と宇宙機製造メーカーが保有する技術を融合することによって、世界初・トップレベルの観測データの取得を行うことができた。メーカー設計・製造のみでは決して得ることができない大きなメリットである。
- JAXA/大学に依らず、豊富な宇宙機搭載機器の開発経験のある研究者が多数、参加していたことが成功に繋がったと考えている。例えば、PIが大学研究者であったPWEは、東北大・金沢大・京大・富山県立大の大学連合によるチームであり、製造メーカーは三菱重工/日本飛行機と地理的に離散した開発体制であったが、主要関係者は科学衛星（Geotail/のぞみ (Planet-B)/かぐや (SELENE)/みお (MMO)) と搭載機器開発の豊富な経験を持ち、その下にポストクなどの若手研究者が開発に加わることによって、世界最先端レベルの観測データを取得できる装置を作り上げることができた。
- サイエンス要求により9種類の観測機器を搭載することになり、ミッション部の開発・試験作業は多くの労力および時間を必要としたことは事実である。
- 「あらせ」衛星の開発では、ミッション部とバス部を機械的にも電氣的にもI/Fをクリアに分離することで、それぞれの開発を独立に進めることができたのは大きなメリットであった。
- 機器の多いミッション部のみで手順確立・テレメトリ表示確認を実施し、完成させた後にバス部との結合・システム総合試験に臨んだことで、システム総合試験時に個々の観測機器による不具合発生によってシステム試験時間が奪われることなく、十分な衛星システム試験を実施できた。これにより、地上にて不具合を抽出し、対策を取ることができたと考えている。
- 小型衛星標準バスをベースにして設計・製造を実施したため、多くの試験治具・手順書を再利用することが可能となり、総合試験準備・実施の時間短縮を行う事ができた。



ASTRO-H運用異常を受けての総点検の結果

- 「ひとみ」異常事象を受け、以下の視点で総点検を受審した。
 - － 異常事象を受けた4つの対策の視点
(マネジメント体制見直し、企業との役割・責任分担見直し、文書化・品質記録の徹底、審査・独立評価の見直し)
 - ① 衛星システムの開発に関する視点
 - ② 衛星サバイバビリティ設計（衛星全損のリスクを最小にする設計）の妥当性確認
 - ③ 衛星の品質・信頼性
 - ④ 運用準備（運用準備計画、運用文書類）確認の視点

- 得られた成果と問題点
 - － 全JAXA的に編成された総点検チームの知見によって、衛星サバイバビリティについて当初想定よりも前倒しで検討を進めることができた。それにより、検討結果に基づいた追加試験を実施することができ、訓練時間にも余裕をもつことができた。
 - － ASTRO-H運用異常を踏まえた対策について、総点検チームから提言事項を頂いた。対策が十分に反映されていることは、初期運用準備審査会にて確認された。
 - － 全JAXAの協力の下に追跡管制隊が編成され、24時間体制でクリティカル・初期運用フェーズにおける衛星運用を実施したことにより、伸展物伸展運用などでは、想定される不具合への対応を含めた運用計画を組むことが可能となり、安全な運用という観点で大きなメリットだった。
 - － 追跡管制隊の人員が確保されたことにより、適材適所に担当を配置することができたことも、余裕のある安全な運用に繋がった。
 - － システム総合試験と総点検受審の時期が重なったことから、総点検チームには最大のご配慮を頂いたものの、総点検対応と総合試験対応にプロジェクトチームのマンパワーを分散させざるを得なくなった。また、当初想定していない規模の追跡管制隊を、打ち上げの約4ヶ月前の時点から立ち上げることになり、その準備作業にもかなりのマンパワーを割かなければならず、プロジェクトメンバーの負荷レベルが限界に達してしまった。