



ERG (Energization and Radiation in Geospace)

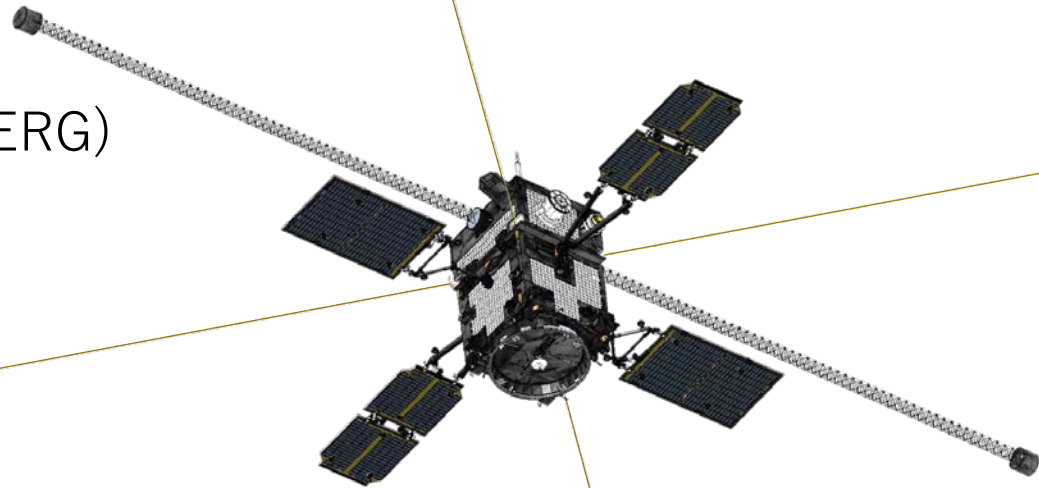
「あらせ」衛星によるジオスペースの新しい描像

- ヴァン・アレン帯の変動はプラズマの波が作り出している -

ジオスペース探査衛星(ERG)

プロジェクトチーム

2019年1月24日





「あらせ」 衛星のミッション目的と現状

ジオスペース（地球周辺の宇宙空間）の高エネルギー電子の生成・消失メカニズムと宇宙嵐にともなうヴァン・アレン帯の激しい変動メカニズムを解明すること。

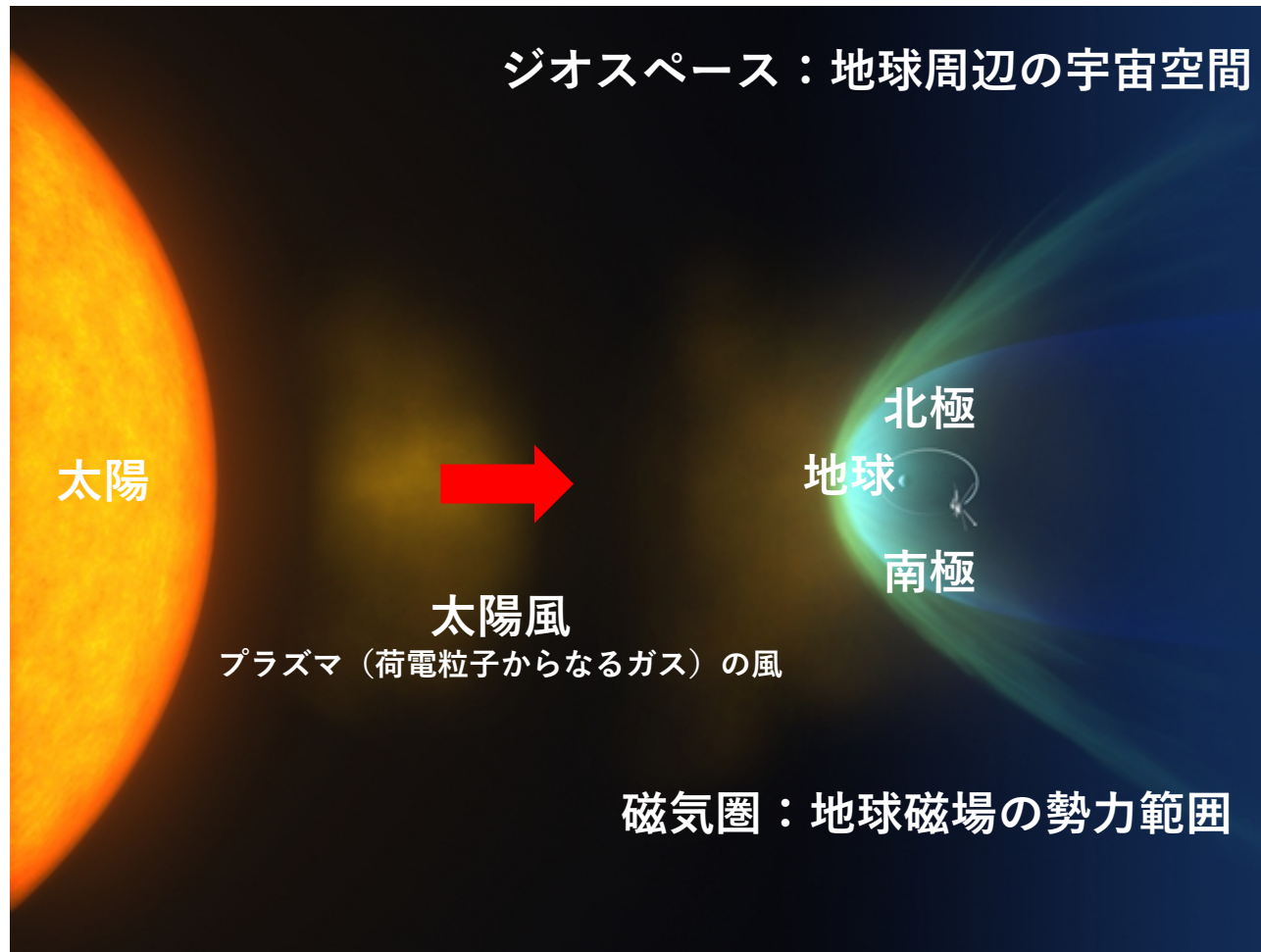
- 「あらせ」衛星は、2017年3月末の定常観測運用の開始から現在までに数多くの宇宙嵐に遭遇し、ヴァン・アレン帯の変動現象を観測することに成功しました。
- 2018年1月に出版された、笠原他によるNature誌の論文（本論文はNature誌の2018年のEditor's Choiceに宇宙科学分野全体の中から唯一つ選ばれました。）を皮切りに、米国地球物理学連合Geophysical Research Letters誌での、「あらせ」初期科学成果に関する特集号が出版されるなど、当初約1年間と設定していた定常観測運用※の結果、多くの科学成果をあげることができました。

（※定常運用期間を終了し、2018年10月より後期運用に移行しました。）

- 衛星状態は健全であり、打上げから2年を経た現在でも順調に観測を続けています。「あらせ」チームとしては、今後とも新しい科学成果をあげていきたいと考えています。本日は、これまでの「あらせ」の科学成果の概略と、Geophysical Research Letters誌の「あらせ」特集号から4つの科学成果をご紹介します。



ジオスペースとは？

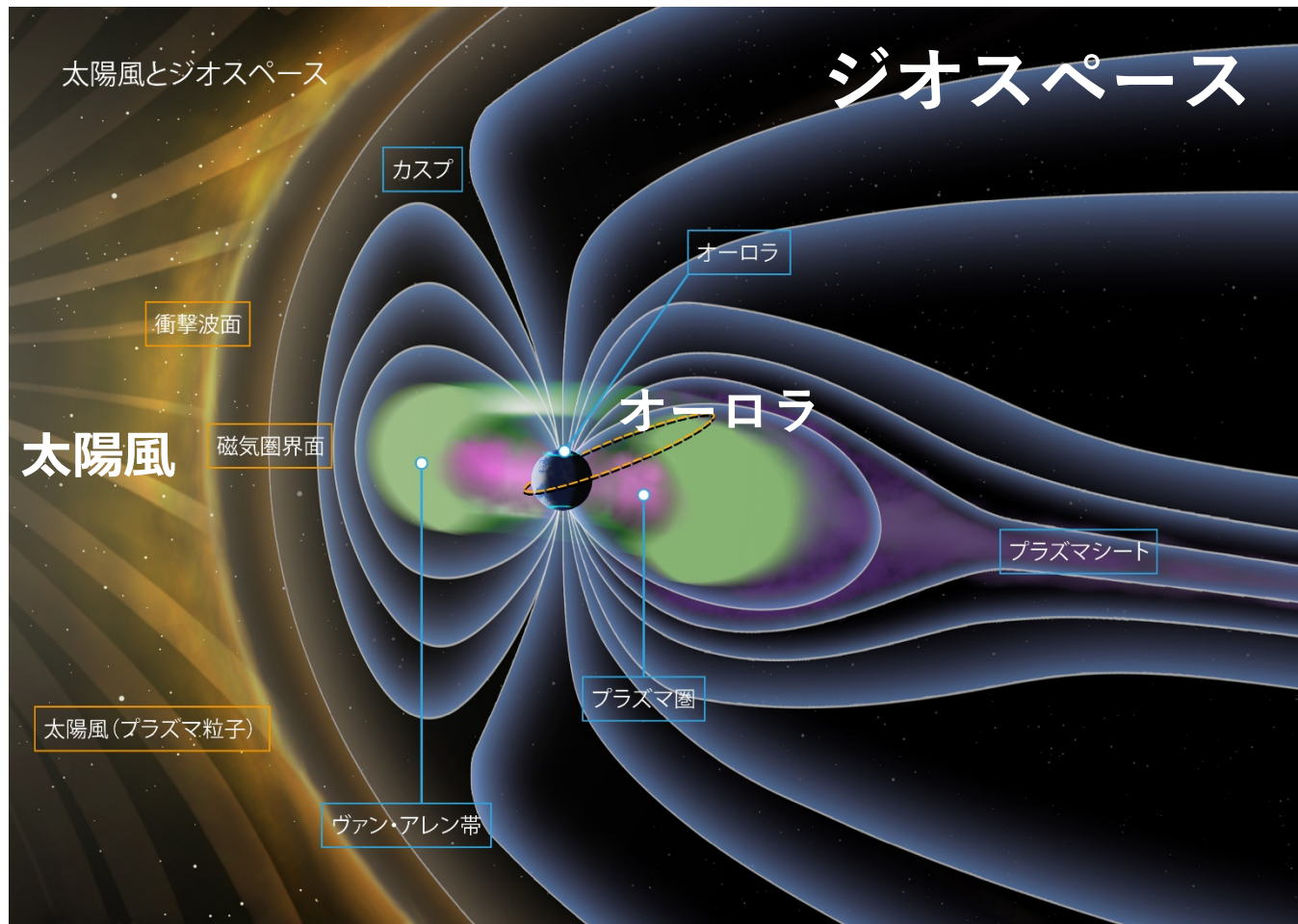


- 地球周辺の宇宙空間は，ジオスペース (GeoSpace) と呼ばれています。
- 太陽から太陽風と呼ばれる超音速のプラズマ流が宇宙空間に向かって流出しています。
- 太陽風は地球の磁場によって遮られ，磁気圏と呼ばれる領域が形成されます。



ジオスペースに発生する現象

ジオスペースでは、太陽風を介して太陽活動の影響をうけて様々なことが起こります。



- 太陽風の変化にあわせて、磁気圏では様々なプラズマ現象が発生します。
- オーロラは磁気圏から大気へ高エネルギー粒子が降り込むことで発生します。
- 地球の近くでは、地球を取り囲むように高エネルギー粒子が集まったヴァン・アレン帯（放射線帯）が形成されます。



なぜ、ジオスペース現象を研究するのか？

● 宇宙空間における現象の「その場」観測

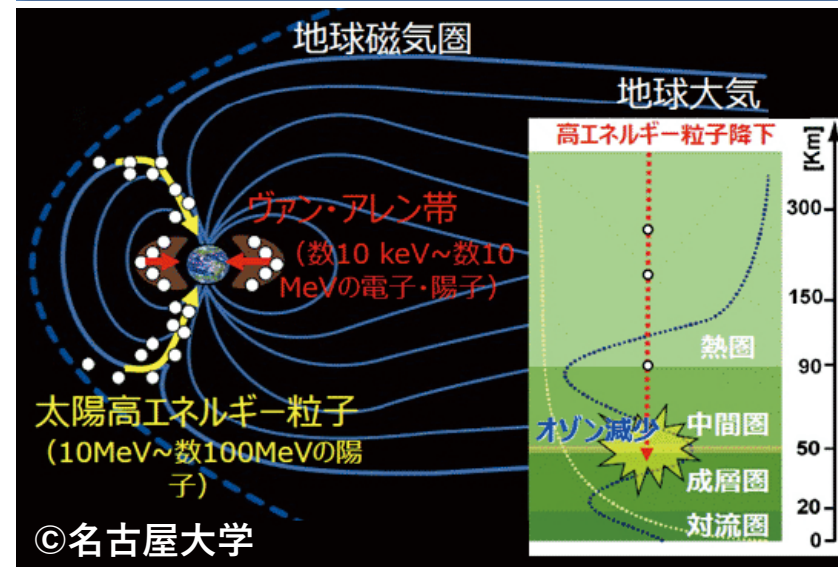
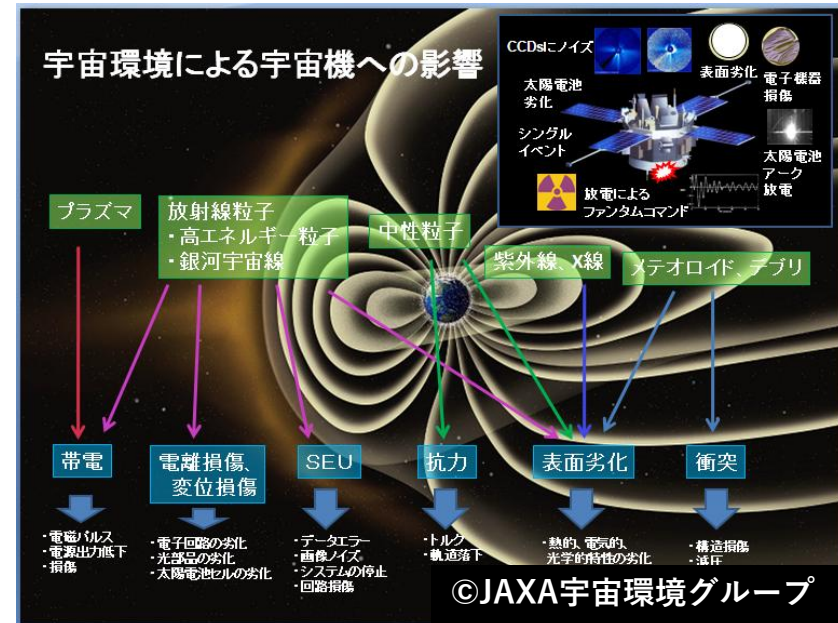
- 太陽系惑星空間は、唯一、衛星・探査機によって宇宙プラズマ現象を「その場」で何が起きているかを精密に観測できる場です。ジオスペース現象の理解を広げて、宇宙プラズマ現象の理解を深めることができ、関連分野を含めて、学術的に意義があります。（例えば、粒子加速現象は多くの関心を集めています。）

● 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。





本日の発表のポイント

世界最先端の機器を搭載した科学衛星「あらせ」の観測を中心とし、地上からの世界的なネットワーク観測と連携することによって、**ジオスペースに存在する多様なプラズマの波が、ジオスペースの粒子環境を大きく変化させている**ことを発見しました。



日本、台湾から 100名以上の研究者による、「あらせ」衛星-地上観測群-シミュレーションが連携した研究チームを組んで、「あらせ」を中心とした科学研究を進めています。

- 科研費新学術領域研究「地球電磁気圏擾乱現象の発生機構の解明と予測」（代表：三好由純，研究課題番号：15H05814）
- 科研費特別推進研究「地上多点ネットワーク観測による内部磁気圏の粒子・波動の変動メカニズムの研究」（代表：塩川和夫，研究課題番号：16H06286）
- 科研費基盤研究(S)「極限時間分解能観測によるオーロラ最高速変動現象の解明」（代表：藤井良一，研究課題番号：15H05747）
- 科研費基盤研究(S)「宇宙プラズマ中の電磁サイクロトロン波による電子加速散乱機構の実証的研究」（代表：大村善治，研究課題番号：17H06140）

の大型科研費などの研究資金の補助を受けています。



最も高いエネルギーと最も低いエネルギーの粒子

ヴァン・アレン帯： ジオスペースで一番エネルギーが高い粒子
プラズマ圏： ジオスペースで一番エネルギーが低い粒子

高エネルギー粒子

低エネルギー粒子

ヴァン・アレン帯

プラズマ圏



図はEbihara and Miyoshi (2011)

- ジオスペースで最もエネルギーの高い粒子が存在する場所。
- 外帯と内帯の2重構造を持ちます。
- 粒子は地球のまわりを取り囲むように運動します。
- 1958年に米国初の人工衛星エクスポーラ1号で発見されました。
- 発見者にちなんでヴァン・アレン帯と呼ばれる。

- ジオスペースで最もエネルギーの低い粒子が存在する場所。
- 超高層大気のパズマが宇宙空間に流出して形成されます。
- ヴァン・アレン帯と重なり合うように存在します。
- プラズマ圏はプラズマの波の性質を変える特長があるため、ヴァン・アレン帯の変動に関連していると考えられています。



宇宙嵐時のヴァン・アレン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）：

数時間でヴァン・アレン帯が消失する。

…何がヴァン・アレン帯を消すのか？

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、

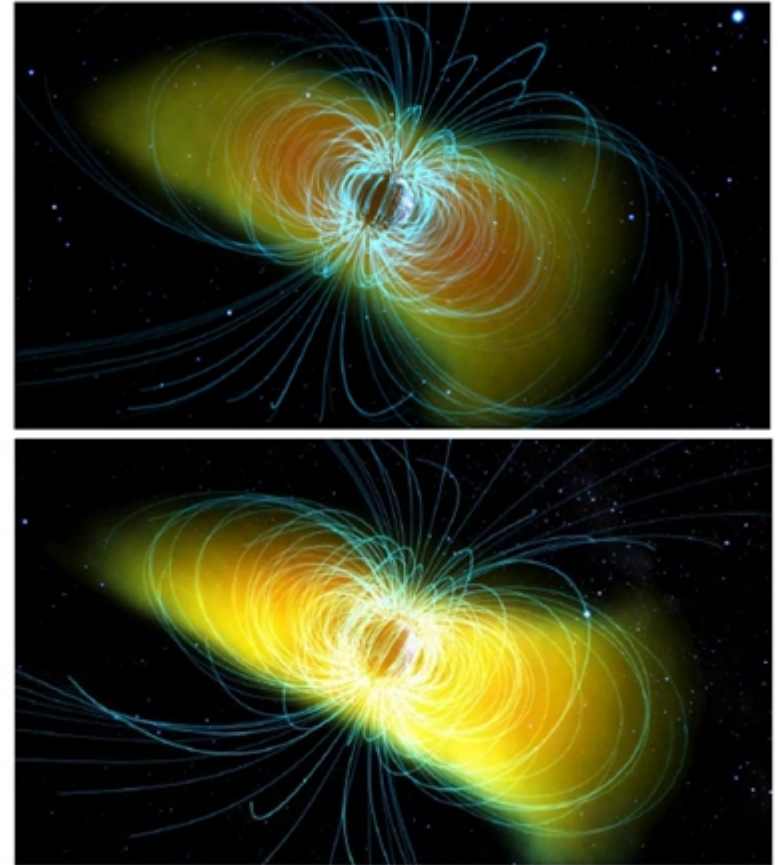
ヴァン・アレン帯が再形成される。

高エネルギー電子の数は、元の状態に比べて、**100～1000倍以上増える**こともある。

…何がヴァン・アレン帯を作り出すのか？

「あらせ」の成果のポイント

プラズマの波が起こす
ヴァン・アレン帯の変動



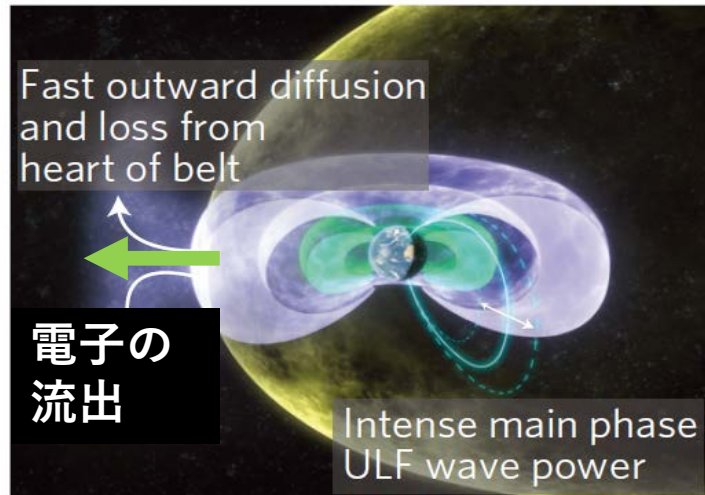
- 大きな太陽風変動が地球磁気圏に到達することで、宇宙嵐と呼ばれるジオスペースの電磁環境の大変化が発生する。
- 宇宙嵐時には、ジオスペースに大電流が流れ、オーロラが爆発的に発生したり、大きな磁場変動が起こる、などの現象が発生する。
(大きな宇宙嵐では、日本でもオーロラが見えることもある。)
- **ヴァン・アレン帯は、消失と再形成という変化を示す。**



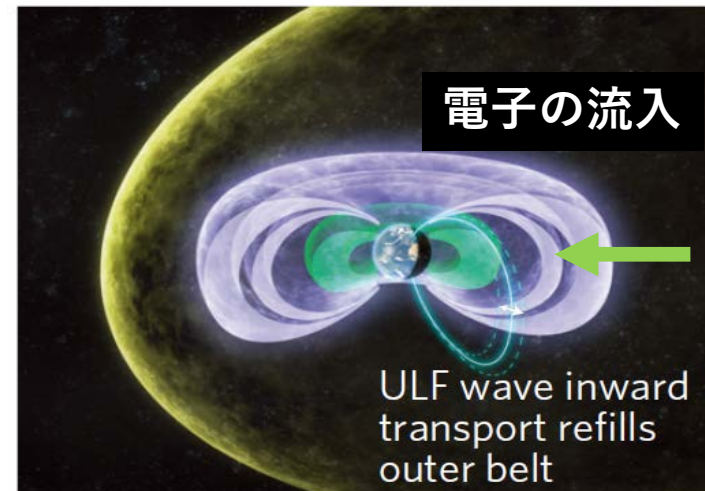
これまでの代表的な考え方

- 宇宙嵐発生直後：高エネルギー電子の消失
 - 大規模な磁気圏の変形に伴って磁気圏境界から、磁気圏外の太陽風中へ流出する。
- 宇宙嵐終了期間：高エネルギー電子の加速
 - ヴァン・アレン帯の地球から遠いところで生成された高いエネルギーの電子が、地球に向かって運ばれながら磁場の強さが強まるとともに、エネルギーが増加する。これらの高エネルギー電子が地球の強い磁場に捕捉されてヴァン・アレン帯を形成する。

ヴァン・アレン帯電子の消失
(太陽風中へ出て行く)



ヴァン・アレン帯電子の生成
(外から運ばれる)

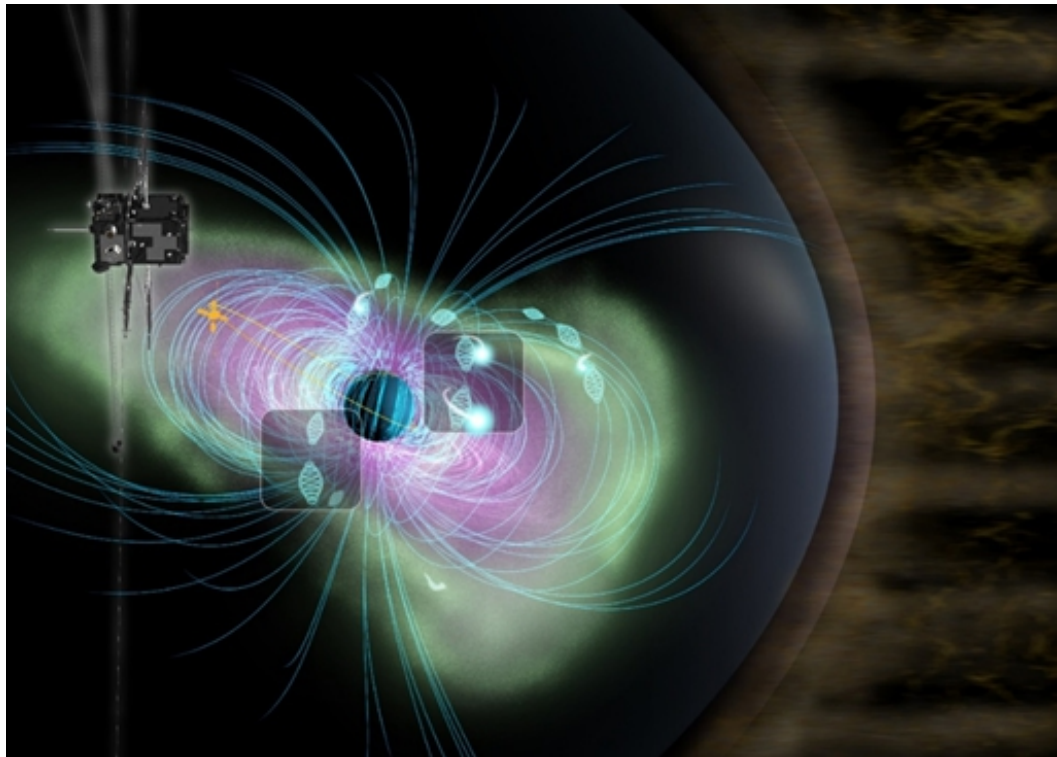


図は, I. R. Mann et al., Nature Physics (2016) からの引用



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しています。
「それらが宇宙空間でどういう働きをしているのか」はよく解っていませんでした。



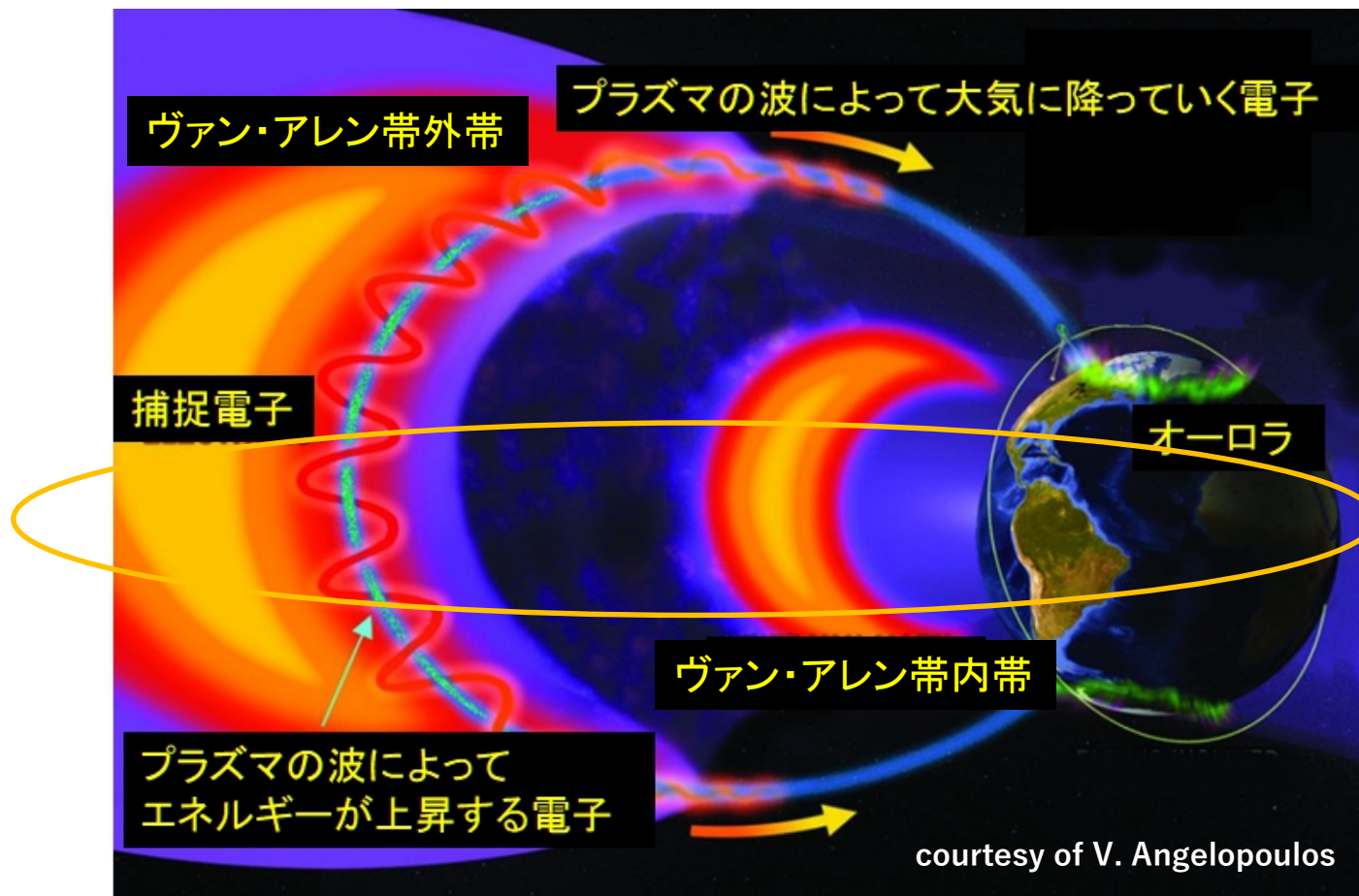
「あらせ」がターゲットとする代表的なプラズマの波

- 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）



「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「**ヴァン・アレン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

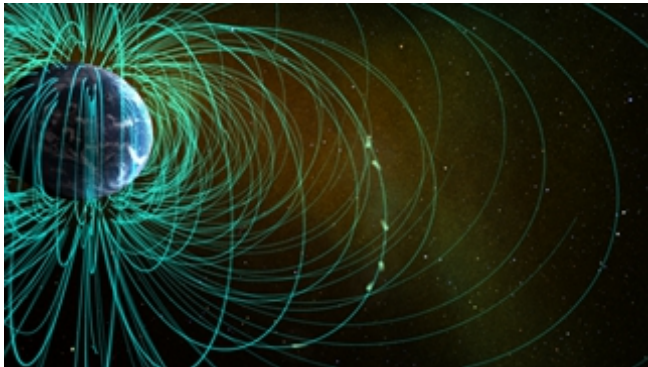
ヴァン・アレン帯をくまなく探査できる。

- 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



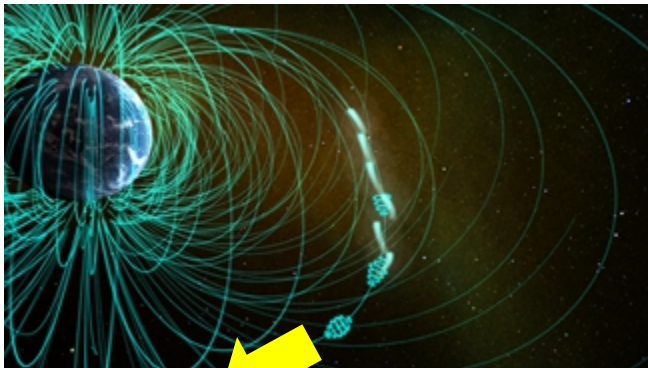
プラズマの波によって ジオスペースの電子が大気へと降り落とされる

通常状態

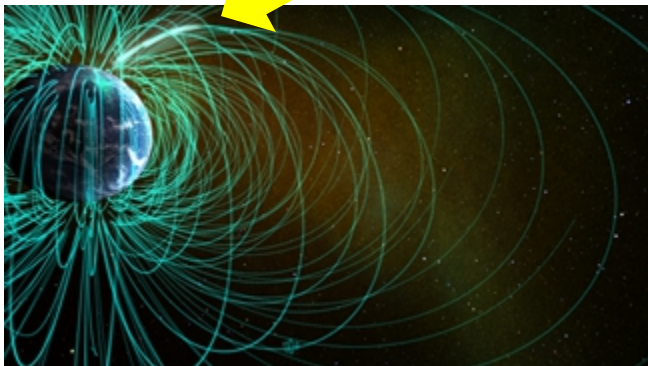


ヴァン・アレン帯の電子は、磁力線に巻き付いて運動
＝宇宙から、地球に、電子は落ちてこない

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

- ヴァン・アレン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

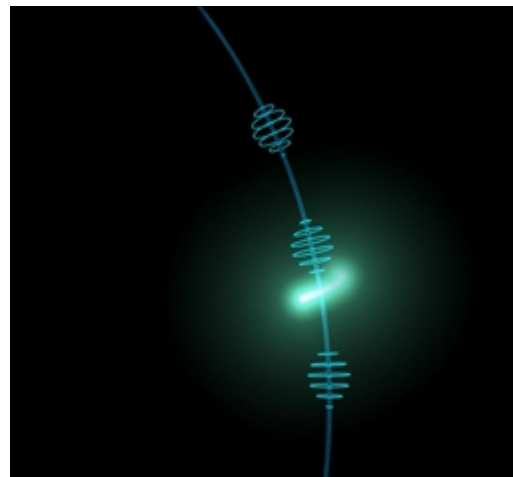
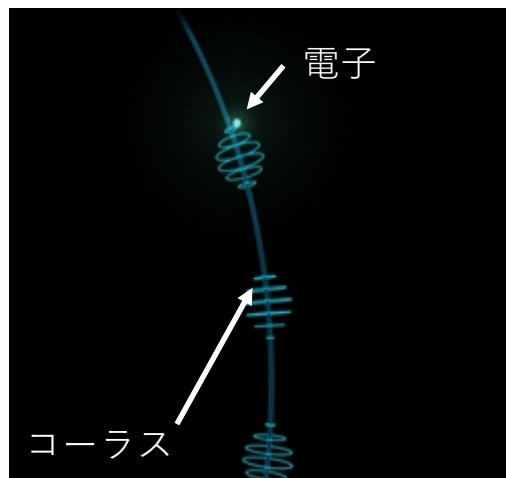


プラズマの波によって

ジオスペースにヴァン・アレン帯の高エネルギー電子が生まれる

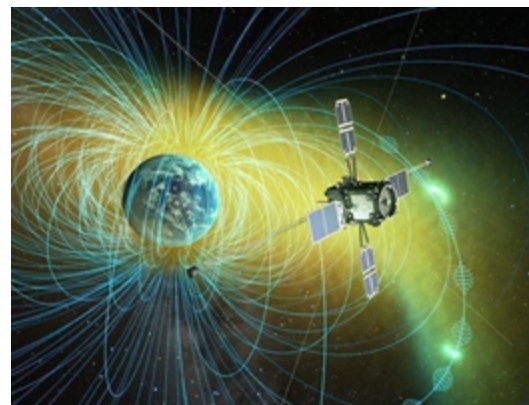
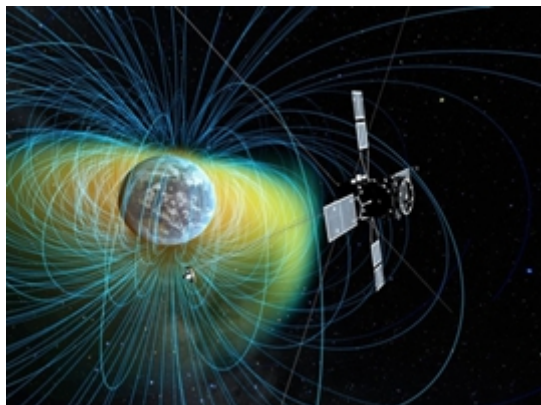
要素となる物理過程：コーラス波と電子が相互作用

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ヴァン・アレン帯の電子が増える。



ヴァン・アレン帯の再形成、増大



米国地球物理学連合のGeophysical Research Letters誌に「あらせ」関連の論文特集号を企画し、「あらせ」の初期科学成果として21編の論文が公表されました。
本日は論文特集号のハイライトとして、以下の4編の論文を各著者から解説をさしあげます。

脈動オーロラの多様な時間特徴を明らかにするコーラス波観測

Ozaki, M., Shiokawa, K., Miyoshi, Y., Hosokawa, K., Oyama, S., Yagitani, S., et al. (2018). Microscopic observations of pulsating aurora associated with chorus element structures: Coordinated Arase satellite - PWING observations. Geophysical Research Letters, 45, 12,125–12,134. <https://doi.org/10.1029/2018GL079812>

コーラス波がジオスペースの電子を加速する現場を初めてとらえました。

Kurita, S., Miyoshi, Y., Kasahara, S., Yokota, S., Kasahara, Y., Matsuda, S., et al. (2018). Deformation of electron pitch angle distributions caused by upper band chorus observed by the Arase satellite. Geophysical Research Letters, 45, 7996–8004. <https://doi.org/10.1029/2018GL079104>

静電波がジオスペースの最低エネルギーのプラズマで制御されている様子を示しました。

Kazama, Y., Kojima, H., Miyoshi, Y., Kasahara, Y., Usui, H., Wang, B. - J., et al. (2018). Density depletions associated with enhancements of electron cyclotron harmonic emissions: An ERG observation. Geophysical Research Letters, 45, 10,075–10,083. <https://doi.org/10.1029/2018GL080117>

ヴァン・アレン帯消失を引き起こすイオン波の空間分布を解明

Matsuda, S., Kasahara, Y., Miyoshi, Y., Nomura, R., Shoji, M., Matsuoka, A., et al. (2018). Spatial distribution of fine - structured and unstructured EMIC waves observed by the Arase satellite. Geophysical Research Letters, 45, 11,530–11,538. <https://doi.org/10.1029/2018GL080109>



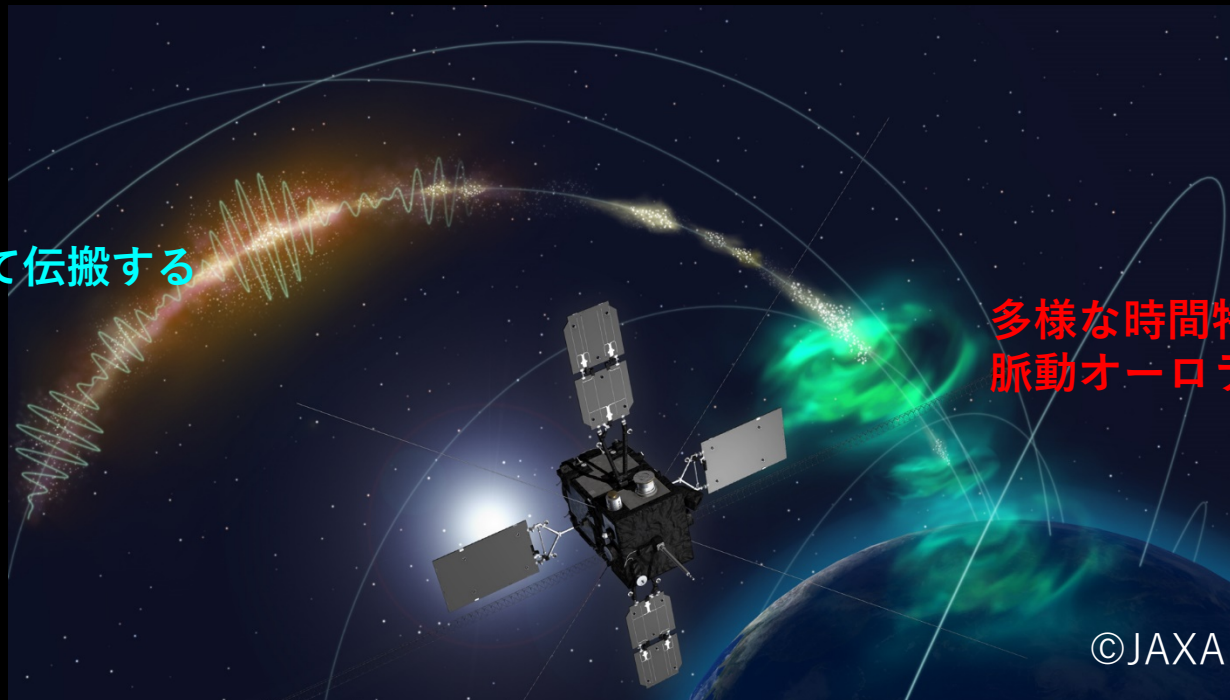
脈動オーロラの多様な時間特徴を明らかにするコーラス波観測

- 脈動オーロラは数秒から数十ミリ秒まで多様な時間特徴をもって変動するオーロラです。衛星と地上オーロラ観測網を綿密に連携させることによって、世界ではじめて高い時間分解能で脈動オーロラとコーラス波の衛星-地上の同時観測に成功しました。
- 観測の結果、コーラス波の強度と脈動オーロラの明るさは数百ミリ秒で両者の変動が完全一致することが明らかになりました。より速い10ミリ秒オーダーの両者の変動の対応までもが示唆されます。さらに、拡大・縮小するオーロラの形状変化までもがコーラス波の強弱と関係していることが発見されました。
- 今回の結果は、ジオスペースでどこまで素早く電子が加速されているかを知る大きな手がかりになります。脈動オーロラ観測から「宇宙空間でどのようにコーラス波が発生するか」を知る可能性を示した成果です。関連する Ozaki et al., Nature Communications, 2019（プレスリリース済）もご参照下さい。

(Ozaki, M., Shiokawa, K., Miyoshi, Y., Hosokawa, K., Oyama, S., Yagitani, S., et al. (2018). Microscopic observations of pulsating aurora associated with chorus element structures: Coordinated Arase satellite - PWING observations. Geophysical Research Letters, 45, 12,125–12,134.)

磁力線に沿って伝搬する
コーラス波群

多様な時間特徴を示す
脈動オーロラ



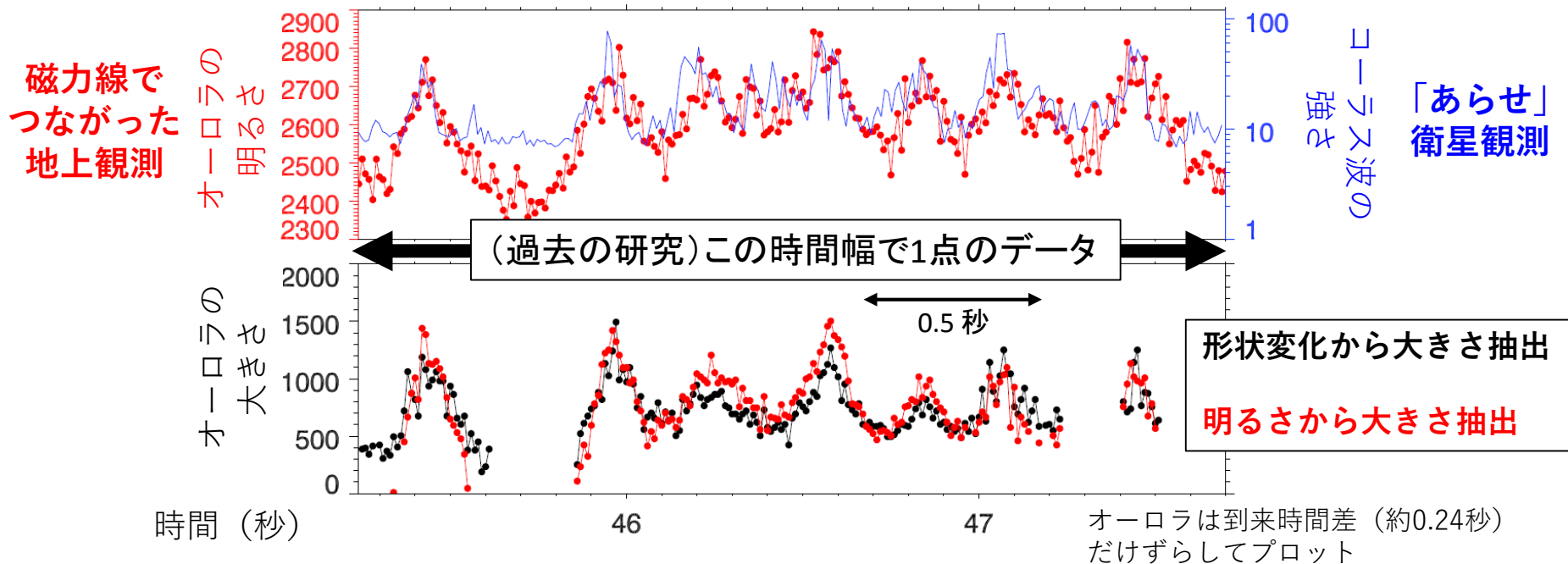
©JAXA



脈動オーロラの多様な時間特徴を明らかにするコーラス波観測

【観測結果のポイント】

- 「コーラス波の強さ」と「脈動オーロラの明るさ」の関係
(従来研究) 秒オーダー◎ (本研究) 数百ミリ秒オーダー◎, 数十ミリ秒オーダー○?
- 「コーラス波の強さ」と「脈動オーロラの大きさ」の関係
(従来研究) 抽出困難 △ (本研究) 拡大と縮小の繰り返しを伴っている発見!



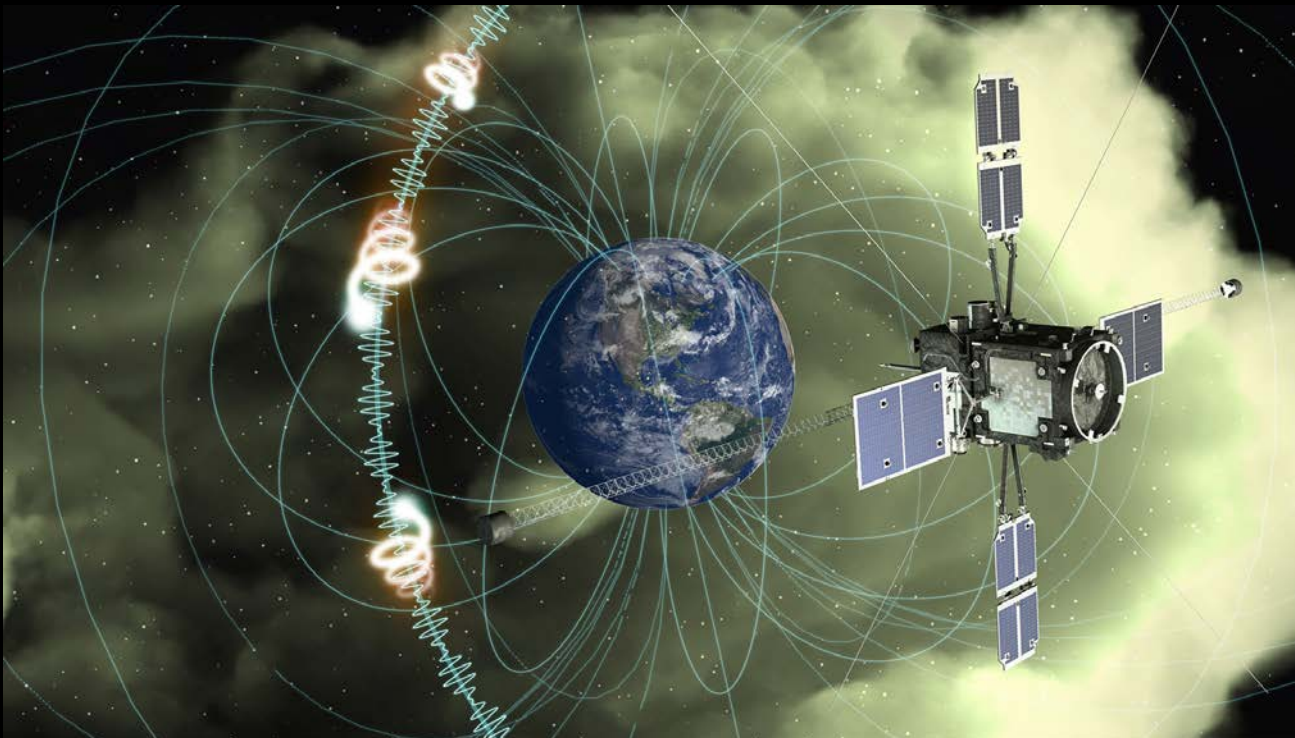
電磁波の遠くに伝わるという性質、オーロラの磁力線に沿って生じるという性質を使い、広大な宇宙の中で「いつ、どこで、コーラス波が発生しているか」を遠くの場所からでも知る手がかりとなる。



コーラス波による急速な電子加速の瞬間

- 電子がコーラス波からエネルギーを受け取ることによってエネルギーが上昇し、放射線帯が増加するプロセスの存在が指摘されています。これまで、エネルギーのやり取り・上昇は「ゆっくり・じわじわ」と起こり、数時間から数日の時間スケールで新たにエネルギーが高い電子が生まれると考えられていました。
- しかし、コーラス波の発生に伴い、エネルギーの高い電子は30秒以内に新たに生まれていることが発見されました。この高エネルギー電子は、コーラス波と相互作用できることが理論的に確認され、コーラス波による急速な電子加速メカニズムが可能であることが明らかになりました。
- このような急速な電子加速が頻繁に観測されています。このプロセスがジオスペースの放射線帯変動にどのように寄与をしているのかについて、今後さらなる研究を進めていきます。

(Kurita, S., Miyoshi, Y., Kasahara, S., Yokota, S., Kasahara, Y., Matsuda, S., et al. (2018). Deformation of electron pitch angle distributions caused by upper band chorus observed by the Arase satellite. *Geophysical Research Letters*, 45, 7996–8004.)





コーラス波による急速な電子加速の瞬間

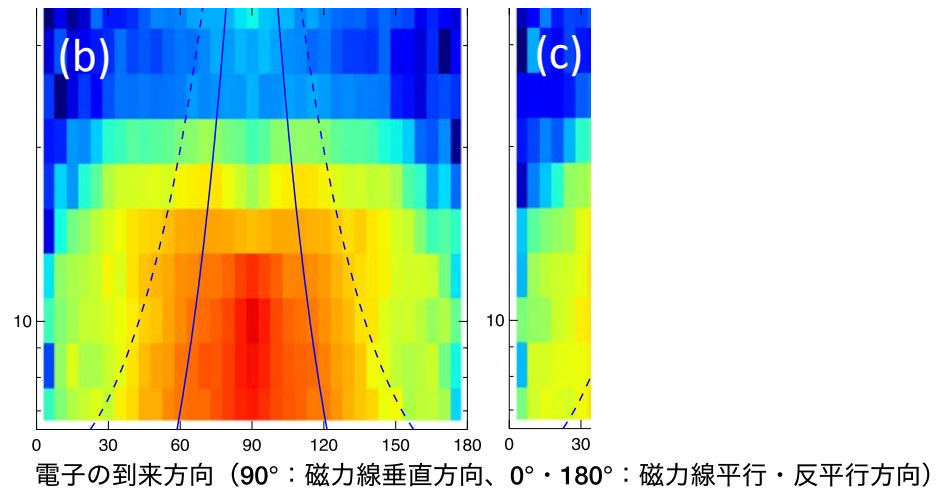
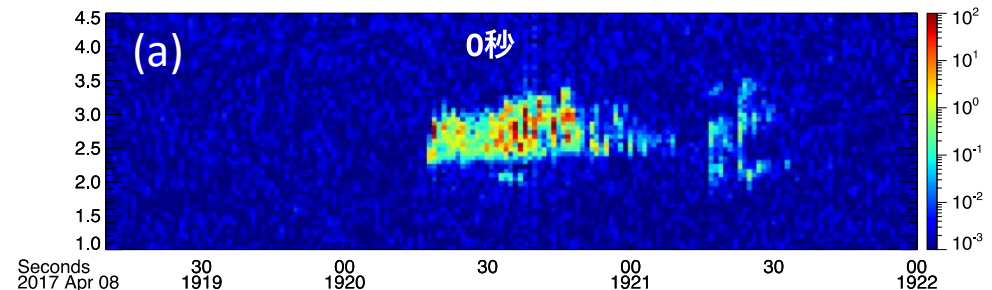
(a) プラズマ波動計測器によって、コーラス波が30秒程度の間、観測された。

(b, c) コーラス波の観測の前後において、中間エネルギー電子分析器によって観測された電子の分布を示す。

両者を比較すると、コーラス波発生中に磁力線と垂直方向の電子数が増大している。

電子分布上の実線と破線で囲まれた領域は、コーラス波と電子が相互作用する領域を理論的に示したものである。

コーラス波発生中に電子数が増大している領域は、相互作用が起きる領域に対応している。
これは、コーラス波が電子を急速に加速し、新たな電子が生成された瞬間を捉えたことを示している。



- これまでのコーラス波による高エネルギー電子生成の理解
「ゆっくり・じわじわ」と起こり、数時間から数日の時間スケールで生成
- 「あらせ」衛星が捉えた新しい描像
コーラス波が発生してから数十秒程度のうちに新たな高エネルギー電子が生成

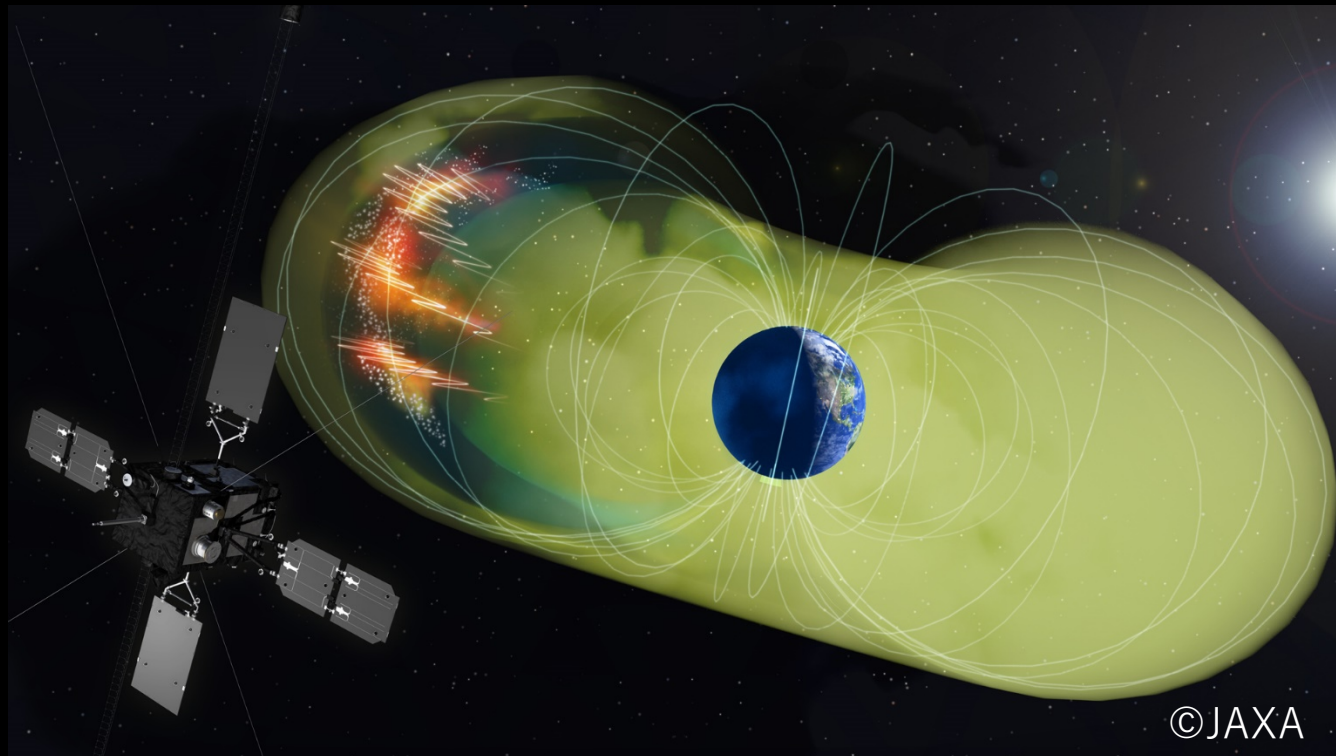
今回明らかになった急速な電子加速は、これまでのジオスペースでの電子加速過程では考慮されておらず、従来の考え方の妥当性・新たなシナリオの検討の余地を提案する観測結果である。



プラズマ圏の局所的な電子低密度領域における静電波放射

- プラズマ圏の外縁部の密度にはゆらぎがあります。そして、プラズマ圏電子の密度が局所的に薄いところこそ、まさに静電波が強く発生している場所と対応することをはじめて明らかにしました。
- 「あらせ」の電子の広いエネルギー観測範囲よりもさらに低いエネルギーの電子が静電波放射に関与していると考えられます。しかし、静電波の放射メカニズムはこれまでの理論では説明ができません。
- この静電波もコーラスと同じく、磁気圏の電子を地球大気へ降り落とすことができると考えられているので、地球大気への粒子の流れを大局的に理解するためにも意義のある発見です。

(Kazama, Y., Kojima, H., Miyoshi, Y., Kasahara, Y., Usui, H., Wang, B. - J., et al. (2018). Density depletions associated with enhancements of electron cyclotron harmonic emissions: An ERG observation. *Geophysical Research Letters*, 45, 10,075–10,083.)





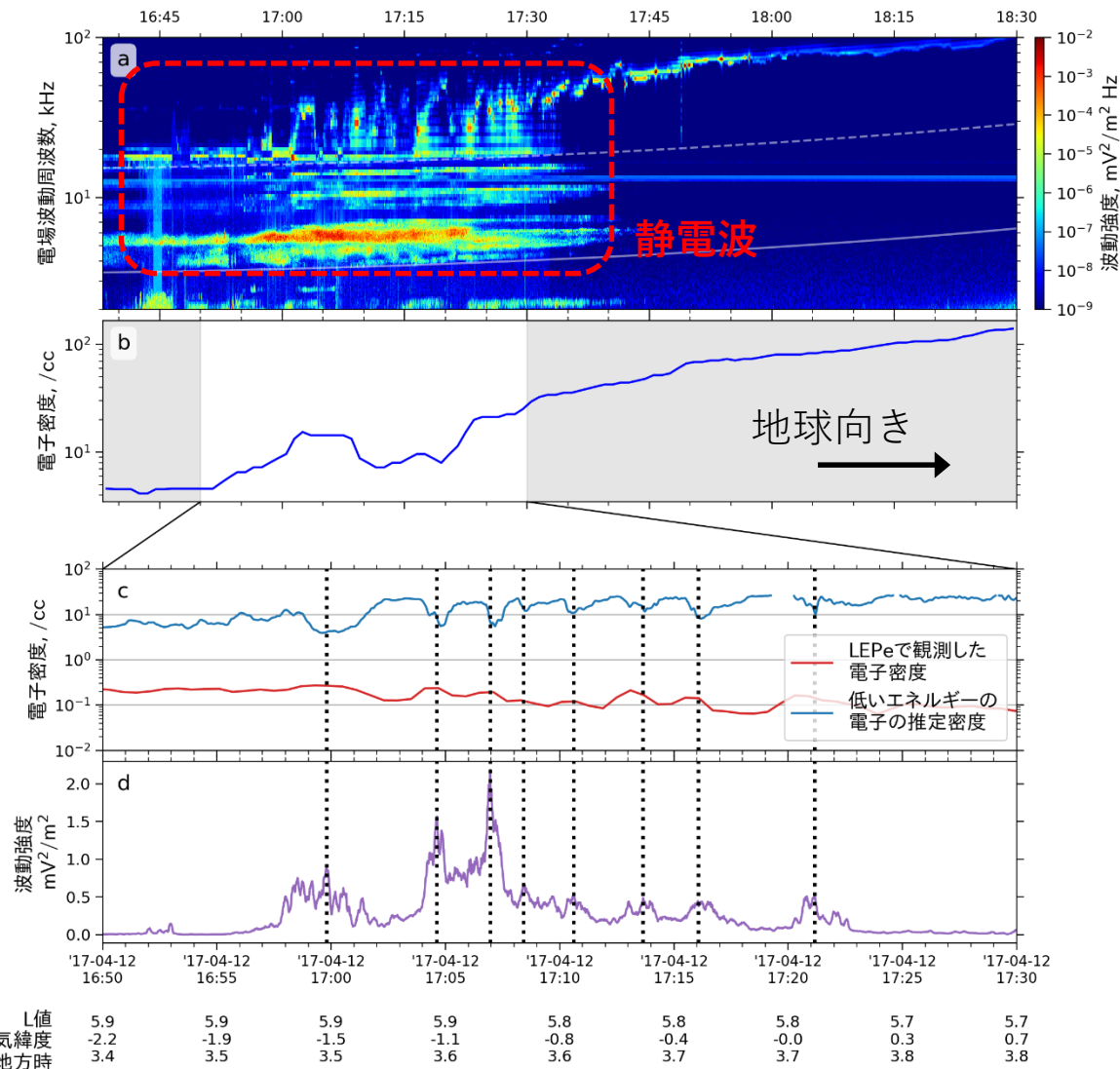
プラズマ圏の局所的な電子低密度領域における静電波放射

(a) 「あらせ」衛星で観測された静電波動スペクトル。静電波は図中の赤枠の部分。

(b) プラズマ圏電子の推定密度。衛星は電子密度の低い領域から、プラズマ圏と呼ばれる密度の高い領域へ飛翔している。

(c) プラズマ圏電子の詳細な推定密度（青線）と、低エネルギー電子計測器LEPeで測定した電子の密度（赤線）。非常に低いエネルギーを持つプラズマ圏電子の局所的な密度減少が観測されている。

(d) 静電波の強さの時間変化。
プラズマ圏電子の密度減少と波動強度の増大が対応している。



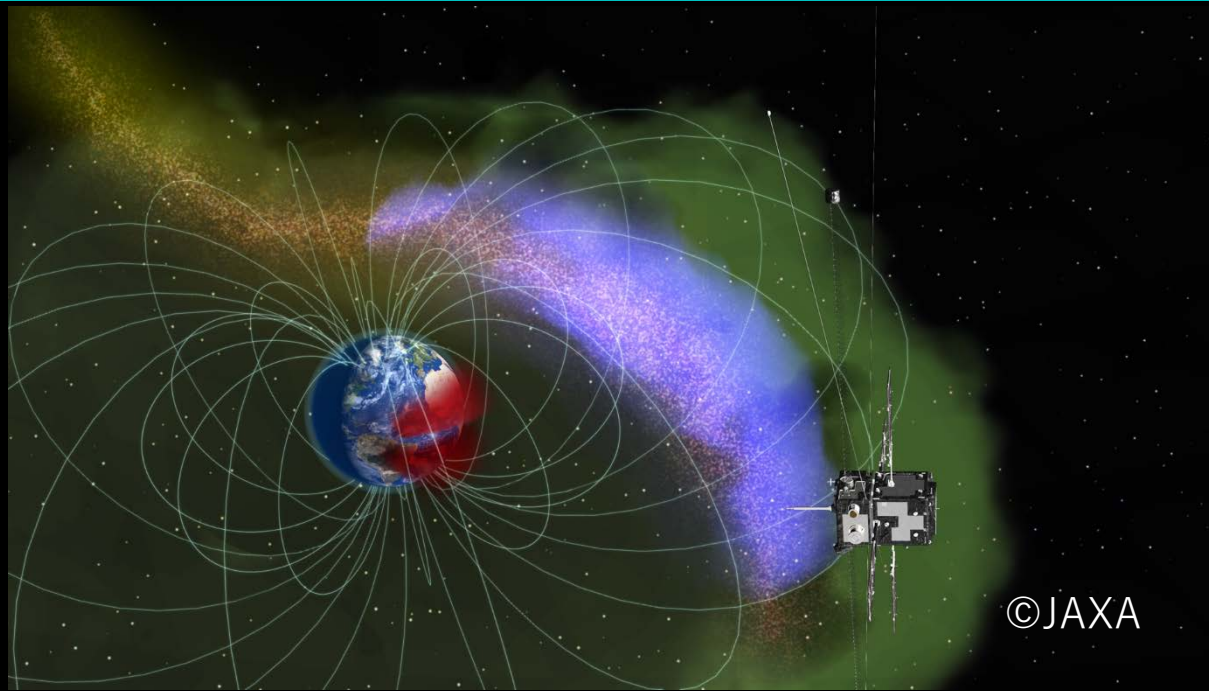
※この論文で取り扱う「静電波」は、より詳細には「電子サイクロトロン高調波」と呼ばれるプラズマの波です。



ヴァン・アレン帯消失を引き起こす「イオン波」の空間分布を解明

- ヴァン・アレン帯消失を引き起こす「イオン波」の空間分布を、約400例のイオン波の精密観測から調査し、広いジオスペースにおいて、イオン波の空間分布に特徴的な偏りがあることを世界ではじめて明らかにしました。イオン波の発生種となるジオスペースの「イオン」はジオスペースの一部に偏って存在すると考えられており、今回の結果はその分布と整合的です。
- イオン波は、2種類に分類できることを明らかにしました。それらは性質や空間分布が大きく異なることから、ヴァン・アレン帯に対する影響が異なることが予想されます。
- 解明された波の空間分布は、ヴァン・アレン帯の変動が「いつ・どこで・何をきっかけに」発生しているかを解明する大きな手がかりとなります。イオン波からヴァン・アレン帯がどのように影響を受けるのか、今後さらに解析を進めていきます。

(Matsuda, S., Kasahara, Y., Miyoshi, Y., Nomura, R., Shoji, M., Matsuoka, A., et al. (2018). Spatial distribution of fine-structured and unstructured EMIC waves observed by the Arase satellite. *Geophysical Research Letters*, 45, 11,530–11,538.)



©JAXA

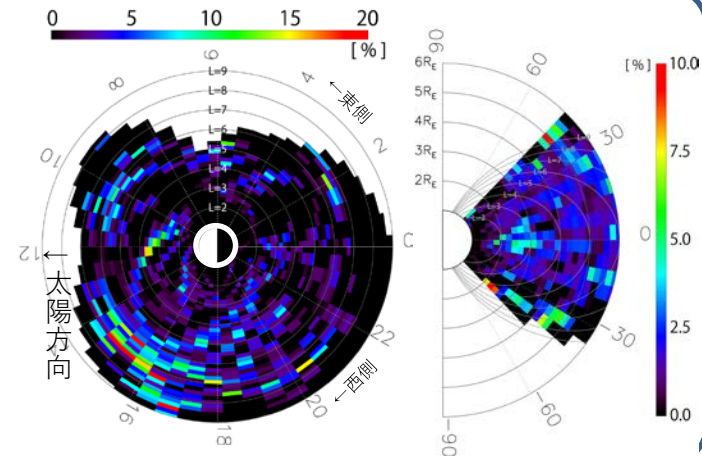
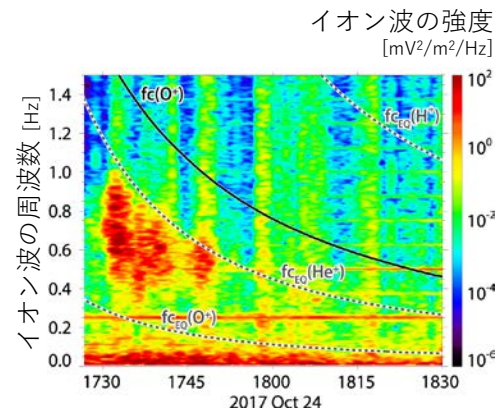


ヴァン・アレン帯消失を引き起こす「イオン波」の空間分布を解明

2種類のイオン波と ジオスペースにおける空間分布

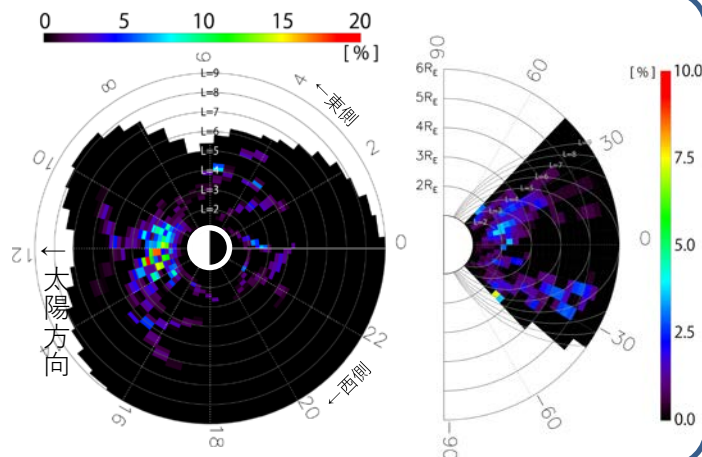
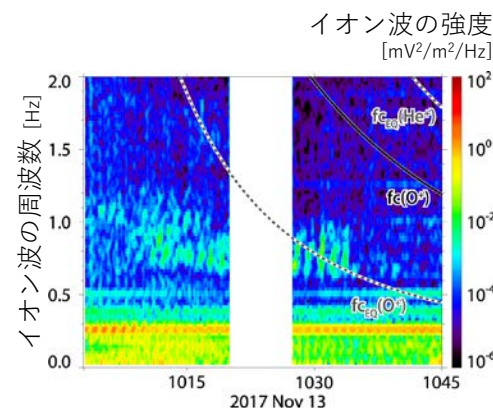
典型的なイオン波

- 波の周波数が時間変化しない。
- 広いジオスペースで分布の偏りがあり、太陽に向かって西側で多く観測される。
 - 約1年半に及ぶ継続観測の成果
 - イオン波の種（ジオスペースのイオン）の理論的分布と整合的であり、**理論と観測が紐づいた。**



周波数変動を伴うイオン波

- 短周期の周波数変動を繰り返す。
 - 高感度/高分解能観測による成果
- 典型的なイオン波と空間分布が異なる。
 - 「ヴァン・アレン帯」に対する影響が異なることが予想される。
 - ヴァン・アレン帯変動を解明するための新たな「カギ」を手に入れた。



※この論文で取り扱う「イオン波」は、より詳細には「電磁イオンサイクロトロン波」と呼ばれるプラズマの波です。



- Geophysical Research Letters誌の「あらせ」特集号については、以下をご参照ください。今回ご紹介した4編を含めて、21編の論文が出版されています。

Geophysical Research Lettersホームページ

Initial results of the ERG (Arase) project and multi-point observations in geospace

[https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/\(ISSN\)1944-8007.ARASE1](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)1944-8007.ARASE1)

- あらせが観測したプラズマの波のうち、コーラス等は可聴帯の周波数のため、音声として聴くことができます。以下のページには、あらせが観測したジオスペースのプラズマの音が掲載されています。

ジオスペースが奏でる音(ERGサイエンスセンターホームページ)

<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/outreach/sound.shtml.ja>



参考資料



いくつかの用語の解説

宇宙空間は「何もない」真空ではなく、とても希薄ですが、ガスに充たされています。本発表では、宇宙空間で起こっている現象を説明するために必要な、以下の単語が頻出します。

- 荷電粒子（本説明では単に「粒子」と呼びます。）
 - － 正の電気を帯びた「イオン」と負の電気を帯びた「電子」のこと。
- プラズマ
 - － イオンと電子からなるガスのこと。プラズマは荷電粒子から構成されるので、ガスの運動は電磁氣的な力の影響をうけます。宇宙空間の希薄なガスは、プラズマのことです。
- 高エネルギー電子（またはイオン）
 - － プラズマ中の電子（イオン）の平均的なエネルギーよりもずっと高いエネルギーを持つ電子（イオン）を「高エネルギー電子（イオン）」と呼びます。
- 電子ボルト
 - － エネルギーの単位。素電荷（電子一個の持つ電荷の符号を+に代えた量）が1ボルトの電位から得られるエネルギー量を1電子ボルトと呼びます。
- 高エネルギー粒子の生成・消失
 - － 「生成」はプラズマを構成する粒子が高エネルギー粒子になるまでエネルギーを増加させること、「消失」は、高エネルギー粒子が別の場所へ出て行き、そのエネルギーを失うこと、を意味します。



精密な電磁波観測を実現できた「あらせ」衛星の技術

微弱な宇宙の電磁波を観測するには，衛星本体そのものが電磁氣的にクリーンで観測器に影響を及ぼさない必要があります．このような電磁雑音の放射，耐性をEMCと呼びます．あらせ衛星は厳しいEMC基準をクリアしたことにより，本研究において微弱な電磁波変化の観測に成功しました．衛星開発で培った不要な電磁雑音を出さない技術および電磁雑音を防ぐ技術は，電気自動車やスマートフォンをはじめとする様々な電気電子システムにおいて重要であり，ICTの根幹を担うEMC技術が科学観測も支えています．





サイエンスチーム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
北海道大学
東北大学
東北工業大学
千葉大学
東京大学
電気通信大学
武蔵野大学
立教大学
東海大学
国立極地研究所
統計数理研究所
情報通信研究機構
国立天文台

玉川学園
大乘淑徳学園
中京大学
名古屋大学
富山県立大学
金沢大学
京都大学
大阪大学
大阪府立大学
大阪電気通信大学
神戸大学
吉備国際大学
高知工業高等専門学校
徳山工業高等専門学校

九州大学
九州工業大学
北九州工業高等専門学校
鹿児島工業高等専門学校
台湾・中央研究院天文及天文物理研究所
台湾・国立成功大学
韓国・韓国天文研究院