

ヴァン・アレン帯の電子が加速される場所の特定に成功 ～ 日米の2機の人工衛星と地上観測による国際協調観測 ～

九州工業大学の寺本万里子 助教（2019年3月まで名古屋大学宇宙地球環境研究所特任助教）、名古屋大学の三好由純 教授、金沢大学の笠原禎也 教授、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の松岡彩子 准教授、東尾奈々 主任研究開発員および日本、米国、ロシアの研究者からなる共同研究グループは、JAXAが開発した「あらせ」衛星とアメリカ航空宇宙局（NASA）が開発した「Van Allen Probes」衛星によって、宇宙空間の異なる場所で高エネルギー電子と磁場の同時観測を実現し、ヴァン・アレン帯の高エネルギー電子がエネルギーを獲得する場所の特定に初めて成功しました。地球周辺の宇宙空間においてヴァン・アレン帯の高エネルギー電子は、人工衛星等の故障などを引き起こす存在として知られています。本研究の成果は、ヴァン・アレン帯の電子の生成の変化に関する予測精度を向上させ、宇宙空間の安全な利用にも貢献することが期待されています。

ポイント

- これまでの人工衛星1機だけの観測では、ヴァン・アレン帯のエネルギーが高い電子が、広い宇宙空間のどこで作られているか分からなかった。
- 日米の複数の人工衛星と地上観測網による多点観測により、夕方側に局在する地球磁場の乱れによって、ヴァン・アレン帯のエネルギーが高い電子が作り出されることを初めて発見した。
- この発見は、ヴァン・アレン帯の電子や変化に関する予測精度の向上につながり、衛星運用のリスクヘッジが可能になる。

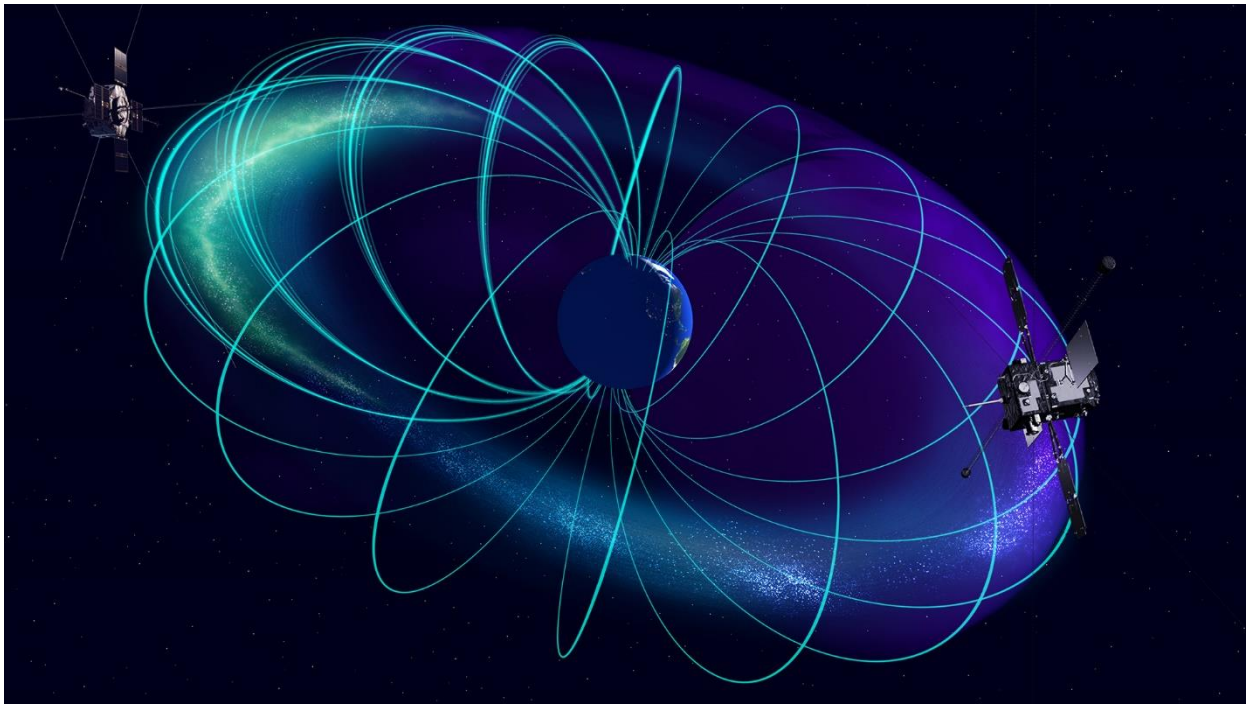


図1：ヴァン・アレン帯の電子が加速される場所をあらせ衛星と Van Allen Probes 衛星で特定

宇宙空間に地球を取り囲むように存在するヴァン・アレン帯には、エネルギーが高い電子が大量に捉えられています。このヴァン・アレン帯の電子群は太陽の影響を受けてダイナミックに変動し、しばしば人工衛星の故障を引き起こすなど、大きな損害をもたらすことがあります。

ヴァン・アレン帯電子を生成する仕組みの一つに、地球の磁場が乱れることに伴って、電子のエネルギーが高まることが考えられています。これまでは、ヴァン・アレン帯のエネルギーが高い電子がどの領域でどの程度広がりを持って作り出されるか分かっていませんでした。

本研究では、日本のあらせ衛星と NASA の Van Allen Probes 衛星によって、宇宙空間の異なる場所でのヴァン・アレン帯電子と磁場の同時観測を実現しました。また、ロシア・アメリカの地上磁場観測網から、地球の磁場の乱れによってヴァン・アレン帯の電子が加速される領域は、従来考えられているよりも経度方向に狭いことを示しました。ヴァン・アレン帯の電子を計測できる観測機器を搭載した衛星が、宇宙空間において経度方向に大きく離れて、同時多点で計測を行なった例は過去になく、あらせ衛星と Van Allen Probes 衛星および地上地場観測網による国際協調観測によって初めて実現できた新しい成果です。

なお、この研究成果は、米国地球物理連合の速報誌「Geophysical Research Letters」（日本時間 2019 年 11 月 6 日午前 0 時）に掲載されました。

【研究概要】

1. 背景

地球の宇宙空間には数百キロ電子ボルト～数十メガ電子ボルトの高いエネルギーを持つ電子が集まる「ヴァン・アレン帯」という領域があります。ヴァン・アレン帯の電子は、太陽から放出されるプラズマ流（太陽風）の変化に応じて消失・生成を繰り返しています。ヴァン・アレン帯の電子は時に人工衛星等に障害を引き起こすことから、ヴァン・アレン帯の生成消滅のメカニズムを知ることは人工衛星の運用において非常に重要です。

ヴァン・アレン帯電子の生成メカニズムの一つに、地球磁場の振動に伴い発生する電場によって、東向きに運動しているヴァン・アレン帯電子が経度方向の広い範囲でエネルギーを獲得するというものがあります。このヴァン・アレン帯電子がエネルギーを受ける領域が、宇宙空間において経度方向にどの程度広がっているかはこれまで明らかではありませんでした。ヴァン・アレン帯電子がエネルギーを獲得する領域を調べるためには、ヴァン・アレン帯電子や宇宙空間の電場と磁場を直接計測できる機器を搭載した複数の人工衛星が、経度方向に広がって観測を行う必要があります。これまで、ヴァン・アレン帯電子と電場・磁場を計測することのできる衛星が経度方向に広がって、同時に観測を行っていたことはなかったため、ヴァン・アレン帯電子がエネルギーを獲得する領域がどれほど広がっているかは、よく分かっていませんでした。

2. 研究手法

本研究では、JAXAが開発したあらせ衛星とNASAが開発したVan Allen Probes衛星の観測データを用いました。

あらせ衛星は、2016年12月20日に鹿児島県にあるJAXA内之浦宇宙空間観測所にて打ち上げられました。あらせ衛星には超高エネルギー電子分析器（Extremely High-Energy Electron Experiment, XEP）が搭載されており400キロ電子ボルトから20メガ電子ボルトのエネルギーを持つヴァン・アレン帯電子を計測することができます。また、磁場観測器（Magnetic Field Experiment, MGF）およびプラズマ波動・電場観測器（Plasma Wave Experiment, PWE）によって、ヴァン・アレン帯電子の生成に関わる電磁場の振動を計測することができます。NASAが開発したVan Allen Probes衛星にも、ヴァン・アレン帯電子と電磁場を計測することのできる機器が搭載されています。

3. 研究結果

本共同研究グループは、あらせ衛星が朝側に位置していた時に、電子の量の周期的な変動が観測された一方で、電磁場の変動は観測されていないことに気がつきました（図2）。従来のグローバルな生成モデルによって、ヴァン・アレン帯の電子が加速されたのだとすれば、あらせ衛星には電子の量の変動と電磁場の周期的な振動が同時に観測されるはずですが、あらせ衛星の観測では、電子の量の変動が観測されました。また、低いエネルギーの電子の量に見られる変動は、高いエネルギーの電子の変動に比べ、時間が遅れて観測されます。このことは、ヴァン・アレン帯電子の加速される領域があらせ衛星が観測を行なっている場所にあるのではなく、ヴァン・アレン帯電子の加速される領域があらせ衛星よりも遠方にあることを示しています。

一方、同時刻に夕方側に位置していたVan Allen Probes衛星においては、電子の量の変動と磁場の

変動の両者が観測されました（図3）。また、Van Allen Probes 衛星が観測した高エネルギーと低エネルギーの電子の量の変動の時間差は、あらせが観測した時間差より短かったことから、Van Allen Probes 衛星の観測は、ヴァン・アレン帯電子が加速を受けるまさにその場にいたことを示しています。

あらせ衛星に搭載されている XEP が観測したヴァン・アレン帯電子各エネルギーにおける変動の時間差から、ヴァン・アレン帯電子のモデル磁場中での後方追跡を行い、あらせ衛星で観測された電子の量の周期変動の発生源が夕方側にあることを確かめることができました。また、地上観測網によって地磁気の変動を調べたところ、夜側領域では地磁気の変動はなく、夕方側にかけて地磁気の変動が観測され、ヴァン・アレン帯電子の加速に関わる地磁気の変動は夕方側の限られた領域であることも確認できました。

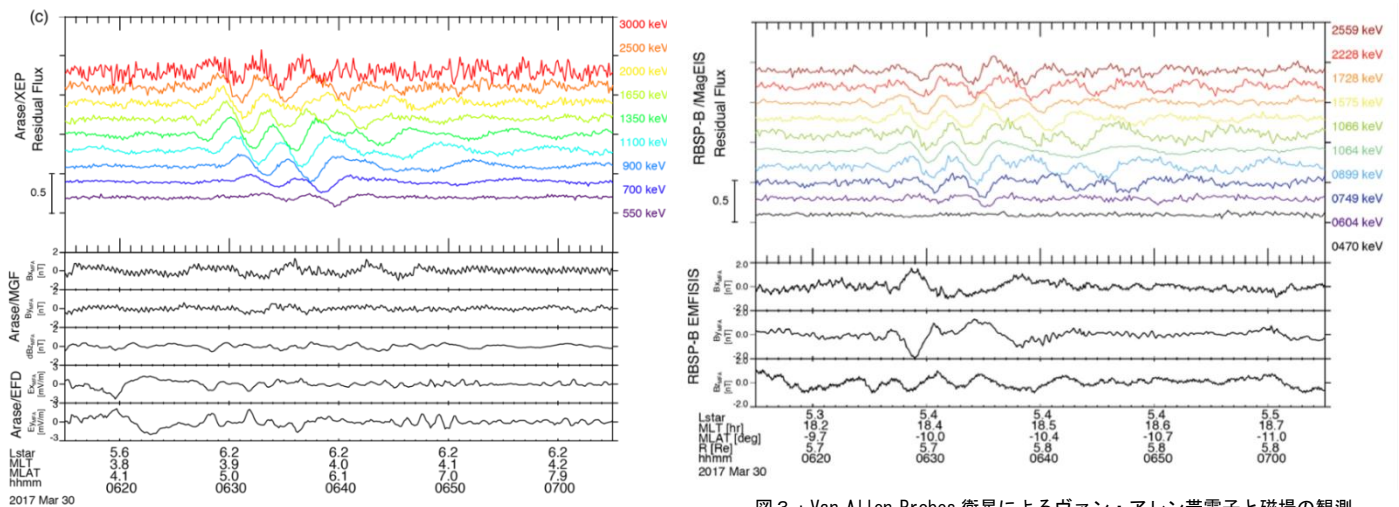


図2：あらせ衛星によるヴァン・アレン帯電子と電場・磁場の観測
 (上段) XEP が観測したヴァン・アレン帯電子の量の変動を示している。色の違いが観測している電子のエネルギーの違いを表している。550 キロ電子ボルト-3000 キロ電子ボルトで3サイクルの周期的な変動が見られる。エネルギーの高い変動の方が低いエネルギーの変動に比べ、早いタイミングで観測されている。(中段) MGF が観測した磁場3成分を示している。(下段) PWE の電場計測器 (Electric Field Detector, EFD) が観測した電場2成分を示している。電場・磁場には電子の量に見られるような周期的な変動は観測されていない。

図3：Van Allen Probes 衛星によるヴァン・アレン帯電子と磁場の観測
 (上段) ヴァン・アレン帯電子の量の変動を示している。470 キロ電子ボルト-2559 キロ電子ボルトで3サイクルの周期的な変動が見られる。(下段) 磁場3成分。磁場にも周期的な変動が観測されている(最下段のパネル)。

過去の研究において地磁気の変動によってヴァン・アレン帯電子がエネルギーを受ける場所は、地球の周辺に経度方向に大きく広がっていると考えられてきました。今回の研究結果は、ヴァン・アレン帯電子がエネルギーを獲得する場所は従来考えられているようなグローバルな領域ではなく、夕方側の限られた局所であることを示す重要な結果です（図4）。

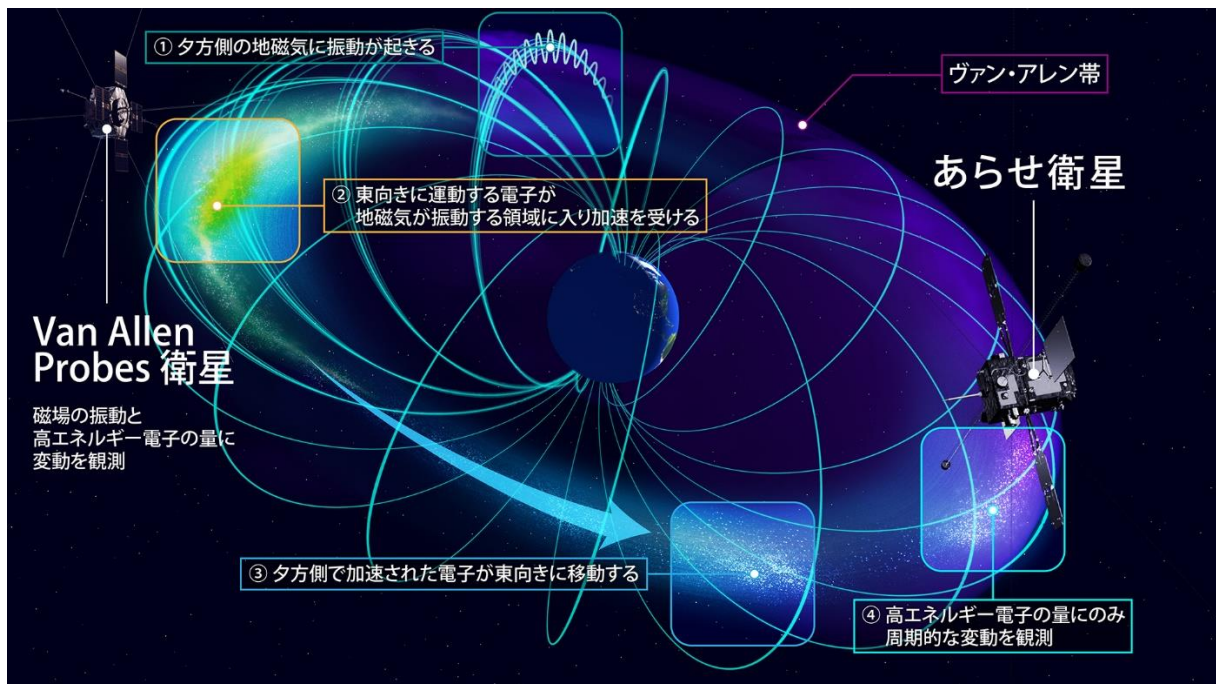


図4：本研究によって地球の磁場の変動によって電子が生まれる領域は夕方側に限られていることが分かった

【今後の展望】

本研究では、Van Allen Probes 衛星が夕方側、あらせ衛星が朝側にいる場合の解析を行いました。今後は解析例を増やし、地球磁場の変動に伴ってヴァン・アレン帯電子がエネルギーを獲得する領域が夕方側にどの程度広がっているのかをさらに詳しく調べていきたいと考えています。また、この研究によって得られた結果をヴァン・アレン帯モデルに適応し、ヴァン・アレン帯の生成モデルをより現実的なものに近づけたいと考えています。ヴァン・アレン帯予測精度の向上に貢献することは、私たちの生活に関わっているさまざまな人工衛星が、ヴァン・アレン帯に電子による故障の危機を回避することにつながります。

【共同研究グループ】

寺本 万里子 九州工業大学大学院工学研究院 助教 (2019年3月まで 名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教)

堀 智昭 名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任准教授

齊藤 慎司 情報通信研究機構 (NICT) 研究員

三好 由純 名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授

栗田 怜 名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教

東尾 奈々 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 主任研究開発員

松岡 彩子 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 准教授

笠原 禎也 金沢大学総合メディア基盤センター/理工研究域先端宇宙理工学研究センター 教授

笠羽 康正 東北大学大学院理学研究科 教授

高島 健 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 准教授

野村 麗子 国立天文台 特任研究員

能勢 正仁 名古屋大学宇宙地球環境研究所 准教授

藤本 晶子 九州工業大学大学院情報工学研究院 助教

田中 良昌 国立極地研究所 特任准教授
小路 真史 名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教
津川 靖基 名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教 (2019年3月まで)
篠原 学 鹿児島工業専門学校 教授
篠原 育 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 准教授
J. B. Blake エアロスペースコーポレーション 博士
J. F. Fennell エアロスペースコーポレーション 博士
S. G. Claudepierre エアロスペースコーポレーション 博士
D. Turner エアロスペースコーポレーション 博士
C. A. Kletzing アイオワ大学 教授
D. Sormakov ロシア北極・南極研究所 博士
O. Troshichev ロシア北極・南極研究所 博士

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会、科学研究費補助金 (17H06140、15H05815、15H05747、16H06286、19K03948) の補助により行われました。

【論文】

論文雑誌名 : Geophysical Research Letters

タイトル : Remote detection of drift resonance between energetic electrons and ULF waves:
Multi-satellite coordinated observation by Arase and Van Allen Probes.

著者 : M. Teramoto, T. Hori, S. Saito, Y. Miyoshi, S. Kurita, N. Higashio, A. Matsuoka,
Y. Kasahara, Y. Kasaba, T. Takashima, R. Nomura, M. Nosé, A. Fujimoto, Y. -M.
Tanaka, M. Shoji, Y. Tsugawa, M. Shinohara, I. Shinohara, J. B. Blake, J. F.
Fennell, S. G. Claudepierre, D. Turner, C. A. Kletzing, D. Sormakov, and O.
Troshichev.

D O I : [10.1029/2019GL084379](https://doi.org/10.1029/2019GL084379)