巨大宇宙嵐で放射線帯の“破られない壁”が破られた！
～鍵は内壁で生まれる超高エネルギー電子、「あらせ」衛星が初観測～

【本研究のポイント】

・2024 年 5 月の観測史上最大級の宇宙嵐[注 1)]で、超高エネルギー電子が入り込めない「破れない壁」とされてきた地球近傍(高度約 1 万 2 千 km 以下)の領域の内側に、超高エネルギー電子が新たに生まれていた。「あらせ」衛星[注 2)]が世界で初めてこれを直接とらえた。

・壁の内側で電子の量(位相空間密度)[注 3)]が局所的に増えていたことから、電子は壁の外から入ってきたのではなく、壁の内側で生成されていた。「安定している」とされてきた領域が、巨大な宇宙嵐のときには、超高エネルギー電子の発生源になりうることが分かった。

・加速を起こしたのは、鳥のさえずりのように聞こえる宇宙の電波「コーラス波」[注 4)]。嵐に伴う「負の電離圏嵐」[注 5)]の影響で壁の内側のプラズマが極端に薄くなり、コーラス波が電子を効率よく加速できる状態になっていた。

・この仕組みを宇宙天気[注 6)]予報に取り入れれば、人工衛星や有人宇宙活動に影響する放射線環境をより正確に予測できると期待される。

【研究概要】

名古屋大学宇宙地球環境研究所の三好 由純 教授らの国際研究グループは、地球の放射線帯(ヴァンアレン帯)のうち、これまで超高エネルギーの電子を寄せ付けない高度 12000 km 以下の“破れない壁”と考えられてきた宇宙空間領域で、2024 年 5 月の観測史上最大級の宇宙嵐の際に、超高エネルギー電子が“壁の中”で新たに生み出されていたことを世界で初めて明らかにしました。この電子は、人工衛星に障害を引き起こしうる危険な宇宙の放射線の一種です。

研究グループは、日本のジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG)[注 2)]の観測データを解析しました。その結果、壁のすぐ内側で超高エネルギー電子の存在量を表す指標が局所的に急増する様子をとらえたことに加え、この電子の増加とほぼ同じ場所・同じタイミングで、「コーラス波」と呼ばれる宇宙の電波が強く発生していたことも見いだしました。さらに、壁の中で周囲のプラズマの密度が、通常よりも極端に低下しており、この特殊な環境下でコーラス波が電子を効率よく加速していたことを指摘しました。

本研究は、これまで「安定した領域」と考えられてきた地球近傍の宇宙空間が、極端な宇宙嵐の下では新たな超高エネルギー電子の発生源になりうることを示すもので、人工衛星や有人宇宙活動に影響を与えうる「危険な宇宙天気」の理解を深めるものです。本研究成果は、2026 年 10 月 26 日午後 10 時(日本時間)付で米国地球物理学連合速報誌 Geophysical Research Letters に掲載されました。

【研究背景】

地球の周りには、高エネルギー粒子が地球磁場にとらえられてできる「放射線帯(ヴァン・アレン帯)」が広がっています。放射線帯の高エネルギー電子は、高度約 18000 km から 30000 km 付近に分布しており、宇宙嵐のたびに大きく増減することが知られています。

なぜ、宇宙空間に“破れない壁”があるのか？

一方、高度 12000 km 以下の地球近傍は、これまで数々の観測から、エネルギーがメガ電子ボルトの高エネルギーの電子をほとんど寄せ付けない、安定した領域だと考えられてきました。その理由は、この領域が二つの「門番」に守られているからです。一つ目は地球自体の強い磁石の力。外側から電子が近づいてくるスピードが、この強い磁場の影響で遅くなります。二つ目は、この領域を普段満たしている低温で濃いプラズマの壁（プラズマ圏）。たとえ高エネルギー電子が入り込んでも、この濃いプラズマとの相互作用で発生する別の電波（ヒス）によって、すぐに地球大気へと落とされてしまいます。この二重の「門番」に守られた領域は、研究者の間で“インペネトラブル・バリア（impenetrable barrier、破れない壁）”[注7)]と呼ばれています。

過去の 2003 年 10 月から 11 月にかけて発生した「ハロウィン嵐」と呼ばれる巨大宇宙嵐の際、この壁の内側で高エネルギー電子が増加した痕跡が、低高度を飛ぶ衛星観測から報告されたことがありました。当時の研究では、周囲のプラズマ密度（低エネルギーの電子）が嵐によって大きく減ったことが、その一因ではないかと推測されていました。しかし、この壁の中での高エネルギー電子の増加を宇宙空間で観測した人工衛星はこれまでになく、“壁の内側で本当に何が起きているのか”は長年の謎として残されていました。

【研究の内容と成果】

2024 年 5 月に発生した磁気嵐は、2003 年以来最大級とされる、観測史上有数の規模の宇宙嵐で、日本も含めた世界中でオーロラが見えたことでも話題になりました。日本のジオスペース探査衛星「あらせ」は、この宇宙嵐の間も継続的に観測しており、研究グループはこのデータを詳しく解析しました。

その結果、“破れない壁”のすぐ内側（高度 12000 km 以下）で、電子の存在量を表す指標である「位相空間密度」と呼ばれる量が、嵐の回復期に入ってから局所的に、かつ急激に増加していく様子がとらえられました。これは、電子が壁の外側から単純に運ばれてきたのではなく、“まさに壁の中で”新たに加速されて生まれたことを示す、決定的な証拠です。

同時に「あらせ」衛星は、この電子が増加した領域とほぼ同じ場所・同じタイミングで、“コーラス波”と呼ばれる宇宙の電波が強く発生していたこともとらえていました。コーラス波は、電波として受信して音に変換すると鳥のさえずりのように聞こえることからその名がついた、宇宙空間で発生する自然電波の一種です。研究グループは、このコーラス波が電子と相互作用（共鳴）し、観測された高エネルギー電子の増加を起こしうることを指摘しました。

なぜ今回、“壁”は破られたのか？

壁を守る二つの「門番」のうち、今回は低温で濃いプラズマ（プラズマ圏）が大きく崩れてしまいました。原因は、電離圏（高度数百 km 付近）で発生した「負の電離圏嵐」と呼ばれる現象。この影響で、壁を満たしていた低温のプラズマが、通常の 2 倍以上長い期間にわたって失われたままになっていたのです。すると、この「門番不在」の隣をつくように、普段は壁の外側でしか発生しないコーラス波が、壁のすぐ内側で発生しました。プラズマが

薄い環境ではコーラス波が電子を効率よく加速できることが知られており、まさにこの「門番不在」の状態が、壁の内側で新たな超高エネルギー電子を作り出す鍵になっていたのです。

本研究グループはこれらの観測に基づき、今回の現象の全体像を図（下図）のような 3 段階のシナリオとしてまとめました：（嵐が起こる前）“壁”の外側に通常の放射線帯があり、コーラス波は存在しない。（嵐の始まり）プラズマ圏が大きく収縮し、“壁”のすぐ外側でコーラス波が強く発生し始める。（嵐の回復期）電離圏の異常によりプラズマ圏の回復が遅れ、コーラス波が持続。この間に“壁”の内側で超高エネルギー電子が新たに生成され、その後は内側・外側の両方向へ広がっていく。

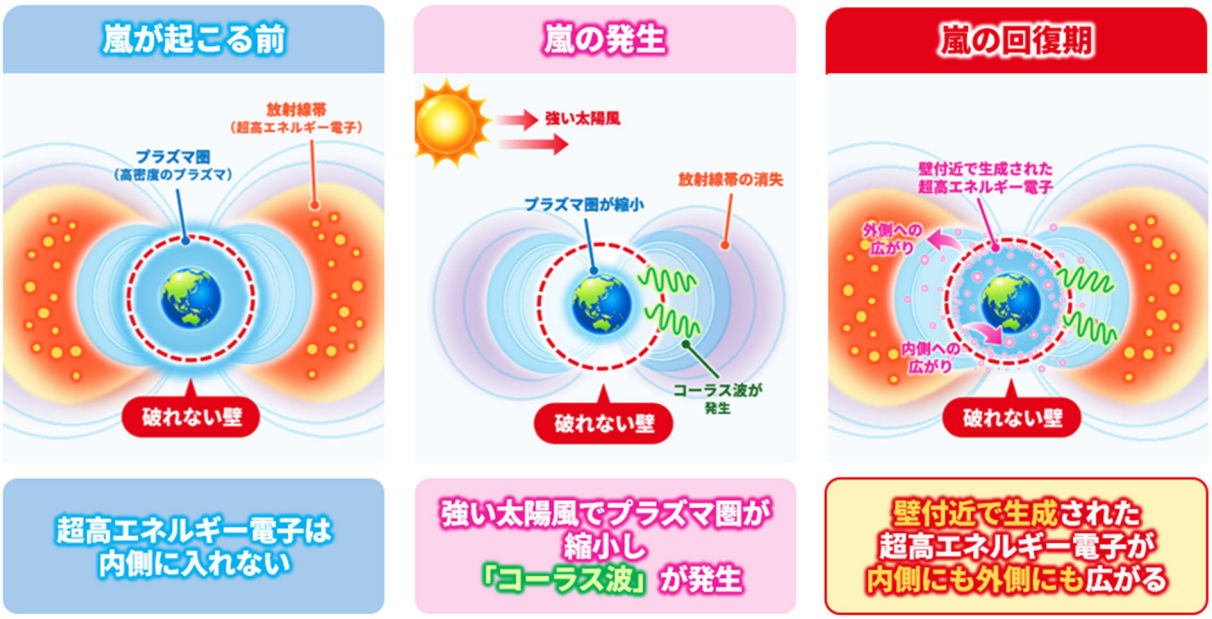

図　2024 年 5 月の巨大磁気嵐における地球周辺の磁気圏の変化を示す模式図。
（a）嵐が起きる前：放射線帯（ピンク）は“破れない壁”（赤い破線の円、L*≈3 付近）の外側に限られ、コーラス波は存在しない。（b）嵐の開始：プラズマ圏（青緑）が大きく収縮し、“壁”のすぐ外側で強いコーラス波（緑）が発生する。（c）嵐の回復期：プラズマの回復が電離圏の異常により遅れる中、コーラス波が持続し、“壁”の内側で超高エネルギー電子が新たに生成される。

【今後の展開】

本研究は、これまで“安定した領域”と考えられてきた地球近傍の宇宙空間が、極端な宇宙嵐の下では新たな超高エネルギー電子の発生源になりうることを、世界で初めて直接観測によって示したものです。この成果は、人工衛星や有人宇宙活動に影響を与えうる「危険な宇宙天気」の理解を深め、将来的な宇宙天気予測の精度向上に貢献することが期待されます。

今後は、理論にもとづいた物理シミュレーションを行い、“壁”の内側で電子がどこまで、どれくらいの期間とどまるのかをより詳しく明らかにしていくことが課題です。また、将来起こりうるより巨大な宇宙嵐時に“壁”がどのように変化していくのかを予測し、宇宙の安全・安心な利用に貢献していくことを目指しています。

【用語説明】

注 1)宇宙嵐:

太陽活動の影響によって地球の磁気圏や電離圏が大きく乱れる現象。ここでは、地球周辺の宇宙環境が大きく変化する一連の現象を「宇宙嵐」と呼ぶ。巨大宇宙嵐:宇宙嵐のうち特に規模の大きなものを、ここでは「巨大宇宙嵐」と呼ぶ。「巨大」について厳密に統一された定義があるわけではないが、2024 年 5 月の宇宙嵐は観測史上最大級の規模の一つであった。

注 2)「あらせ」衛星/ジオスペース探査衛星「あらせ」(ERG):

2016 年 12 月に打ち上げられた JAXA の科学衛星。宇宙嵐の変動過程およびヴァン・アレン帯電子の加速・消失機構の解明を主目的としている。あらせ衛星に関するサイエンスセンターが、JAXA 宇宙科学研究所と名古屋大学宇宙地球環境研究所によって運営されている(https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp)

注 3)位相空間密度:

あるエネルギー・場所に電子がどれだけ存在するかを表す指標。外部から電子が単に運ばれてきた場合と、その場で新たに作られた場合では、この指標の分布の仕方が異なるため、電子がどこで生まれたかを見分ける手がかりとなる。「あらせ」はきわめて正確にこの位相空間密度を計測することができる。

注 4)コーラス波:

宇宙空間で自然に発生する電磁波(プラズマ波動)の一種。電波として受信して音に変換すると鳥のさえずりのように聞こえることからこの名がついた。電子と共鳴(サイクロトロン共鳴)することで、電子を高いエネルギーまで加速できることが知られている。

注 5)負の電離圏嵐:

磁気嵐に伴って地球の電離圏(高度数百 km 付近)で電子密度が一時的に減少する現象。この影響で、宇宙空間のプラズマ(電子)密度が低い状態が続くことが知られている。

注 6)宇宙天気:

太陽活動に伴って変化する、地球周辺の宇宙空間の状態やその変動を指す。激しい宇宙天気現象は、人工衛星や有人宇宙活動などに影響を与えることがある。現在、その変動の予測を目指した研究が進められており「宇宙天気予報」と呼ばれる。

注 7)インペネトラブル・バリア(impenetrable barrier、破れない壁):

地球の内部放射線帯(地球半径の約 3 倍より内側の領域)で、これまでの多くの観測から、磁気嵐が乱れた際でも超高エネルギー(数百万電子ボルト以上)の電子をほとんど通さない、安定した領域とされてきた。この性質から研究者の間でこのように呼ばれている。2014 年に Nature 誌でその存在が報告された。

【論文情報】

雑誌名：Geophysical Research Letters（米国地球物理学連合発行）
論文タイトル：Local Acceleration of Multi-MeV Electrons Inside Earth's Impenetrable Barrier During the May 2024 Superstorm

著者：
三好由純：名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授
栗田怜：京都大学生存圏研究所 准教授
新堀淳樹：名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教
山本和弘：名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教
Chae-Woo Jun（チョン チェウ）：名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教
松田昇也：金沢大学理工研究域電子情報通信学系／先端宇宙理工学研究センター 准教授
齊藤慎司：情報通信研究機構（NICT）プランニングマネージャー
片岡龍峰：沖縄科学技術大学院大学主幹研究員
Wang Dedong：GFZ ヘルムホルツ・ドイツ地球科学センター研究員
篠原育：宇宙航空研究開発機構（JAXA）教授
高島健：宇宙航空研究開発機構（JAXA）教授
三谷烈史：宇宙航空研究開発機構（JAXA）助教
東尾奈々：宇宙航空研究開発機構（JAXA）参事
松岡彩子：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 教授
笠原禎也：金沢大学学術メディア創成センター/理工研究域先端宇宙理工学研究センター 教授
土屋史紀：東北大学教授
熊本篤志：東北大学准教授
堀智昭：名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任准教授
北村成寿：名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教
寺本万里子：九州工業大学准教授

DOI：10.1029/2026GL125879