

地球に届く電磁波の経路可視化に成功

松田 昇也

Matsuda Shoya

1. 宇宙の電磁波とは？

電磁波と聞くと、携帯電話やテレビ・ラジオ放送等、通信のために人工的に生み出されるものを想像する読者が多いだろう。本誌を愛読する専門家は、より短波長の電磁波である γ 線やX線等を利用した医療機器等を想像するかもしれない。一方、宇宙では非人工的に発生する電磁波があることをご存じだろうか。「自然プラズマ波動」とも呼ばれる宇宙の電磁波は、数Hz以下から数MHz程度に及ぶ幅広い周波数帯域で、宇宙の環境を左右する重要な役割を担っている。

地球周辺の宇宙空間は「ジオスペース」と呼ばれ、領域を満たすプラズマ（電離されたイオン・電子）の密度やエネルギーの違いに着目すると、特徴的ないくつかの領域に分けることができる。特に「放射線帯」は地球半径の2~5倍程度の領域にトーラス状に存在し、数~数十MeVに及ぶ相対論的エネルギーのプラズマが捕捉されている。ジオスペースを満たすプラズマの大部分は数eV程度のコールドプラズマであることから、桁違いに高いエネルギーのプラズマが集まる放射線帯は極めて特異である。放射線帯を構成する相対論的プラズマは、太陽活動に起因する地磁気擾乱現象（地磁気嵐）をきっかけとしてダイナミックに生成・消失を繰り返している。放射線帯周辺のプラズマは、低密度（およそ1個/cc以下）ゆえに無衝突性であり、プラズマ同士の衝突によるエネルギー授受が非支配的である。それではどのようにして、放射線帯の相対論的エネルギー電子が生まれ、消えていくのか？それを支配している

のが、宇宙で非人工的に発生する電磁波の電場・磁場による作用である。放射線帯を通過する科学衛星では「放射線被ばく」によって半導体の異常動作や破壊が引き起こされる恐れがあるため、電磁波の寄与を調べて放射線帯のダイナミクスを理解することは極めて重要な課題である。

宇宙の電磁波の役割としてより分かりやすいものは、地上からも見ることが出来るオーロラであろう。オーロラは宇宙から降り注ぐプラズマが地球大気に衝突することで生じる発光現象である。宇宙のプラズマは磁力線に沿って南北方向に運動しており、ある地点で跳ね返されることから、通常は大気に降り注ぐことはない。一方、宇宙で電磁波が発生すると、この往復運動を破る効果をもたらして大気中にオーロラを生む。地上から見える多様なオーロラの成因は、宇宙の電磁波の効果なのである。

2. 放射線帯に突入せよ！

放射線帯は人工衛星にとって極めて過酷な場所であるから、現場で宇宙の電磁波やプラズマを測る衛星を運用することは簡単ではない。他の人工衛星が通常避けたがる危険な領域にあえて突入し、厳しい放射線環境に耐えながらそれらを観測するのは、2016年に打ち上げられた日本の科学衛星「あらせ」である¹⁾。「あらせ」は優れた対放射線耐性を有する9つの装置を搭載し、宇宙の電磁波とプラズマを同時精密計測することを目指して作られた（図1）。約6年もの間、放射線帯を中心とする領域で観測をし続けており、実に様々な電磁波の詳細描像を明ら

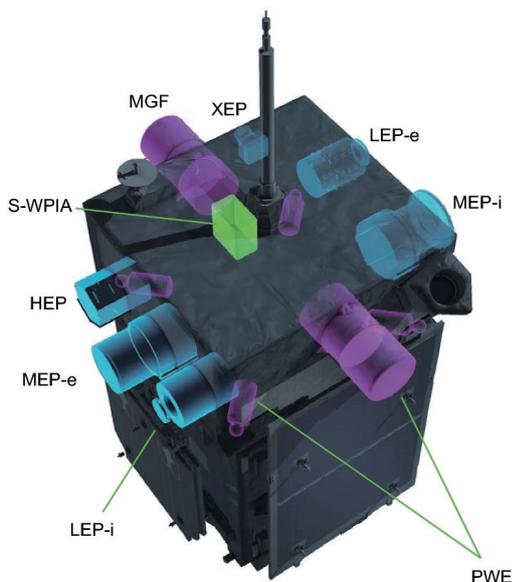


図1 「あらせ」に搭載された科学観測装置の概略図¹⁾
 紫色で示された装置が、電場や磁場の振動（宇宙の電磁波）を計測する装置。青色で示された装置が、イオンや電子（宇宙のプラズマ）を計測する装置

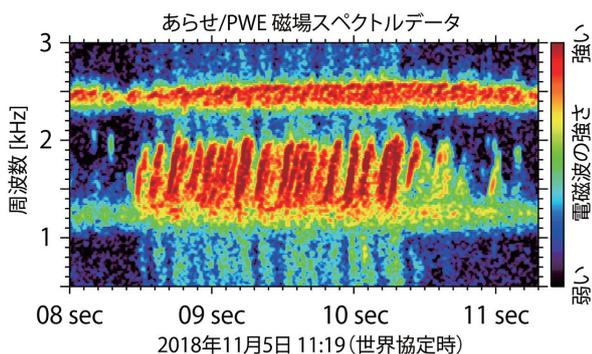


図2 「あらせ」が観測した宇宙の電磁波の観測例

かにしてきた。図2は「あらせ」が観測した電磁波の観測例である。横軸に観測時刻、縦軸に現象の周波数を取り、色で現象の強度を示している。このような図を周波数-時間ダイアグラムと呼ぶ。電磁波は宇宙空間を伝わる「波（=振動）」であるから、振動の周波数が重要なパラメータである。「あらせ」は直流から10 MHzまでの非常に広帯域の振動を計測ことができ、このうち数 Hz 程度の周波数帯域にみられる「イオン波」や、数 kHz から十数 kHz 程度にみられる「コーラス波」が、放射線帯形成やオーロラ発光に寄与する。空気中を伝わる音波であれば、丁度人間の可聴域の帯域であることから、「あらせ」が観測した電磁界の振動を音声ファイルに変

換すれば、振動の様子を耳で聞くことも可能である。ERGサイエンスセンター²⁾では、実際に「あらせ」が観測した宇宙の電磁波を、音声ファイルに変換して公開している。興味がある読者はぜひ「ジオスペースが奏でる音」で検索し、Webサイトを訪れることを勧めたい。

3. 電磁波の三次元的観測

宇宙の電磁波は「波」であるから、宇宙空間を伝わっていくことができる。すなわち、とある場所で生まれた電磁波が、空間を伝わる過程で、様々な場所の宇宙環境を変化させるのである。宇宙の電磁波の効果を正しく理解するには、それがどこで生まれ、どのような経路を伝わり、どこへ向かっていくか—これらを統合的に網羅する三次元的観測が必要である。1基の人工衛星による単地点観測では、空間を伝わる過程の一部分を切り取って見ることしかできないため、複数の人工衛星や地上観測拠点を組み合わせた同時多地点観測に筆者らは挑戦してきた。その取組みの一部を本稿で紹介したい。

人工衛星軌道の特徴を示す要素の1つに、軌道傾斜角がある。赤道面に対して衛星軌道面が何度傾いているかを示す値であり、「あらせ」の軌道傾斜角は約31度である。宇宙の電磁波が南北方向に伝わっていくと予想すると、異なる軌道傾斜角の人工衛星で同時多地点観測すれば、空間を伝わっていく電磁波の三次元的観測ができそうである。そこで着目したのが、軌道傾斜角約10度の「ヴァンアレンプローブズ」である。「ヴァンアレンプローブズ」は2012年にアメリカが打ち上げた科学衛星であり、「あらせ」と同様に宇宙の電磁波がもたらす宇宙環境変動の調査を目的として2019年まで運用された。宇宙の電磁波は宇宙空間を伝わって地上にも到達できることから、北米に展開された2つの地上観測拠点でも同時観測を狙った。2つの地上観測拠点のうち、1つは日本のPWINGプロジェクト³⁾が展開するガコナ局（アラスカ南部のPWING国際拠点の1つ）であり、もう1つはカナダのCARISMAプロジェクトが展開するドーソン局（アラスカ）である。「あらせ」と「ヴァンアレンプローブズ」は軌道運動によって宇宙空間を高速に移動するため、互いの位置関係や地上観測

*）日本学術振興会（特別推進研究PWINGプロジェクト：16H06286）

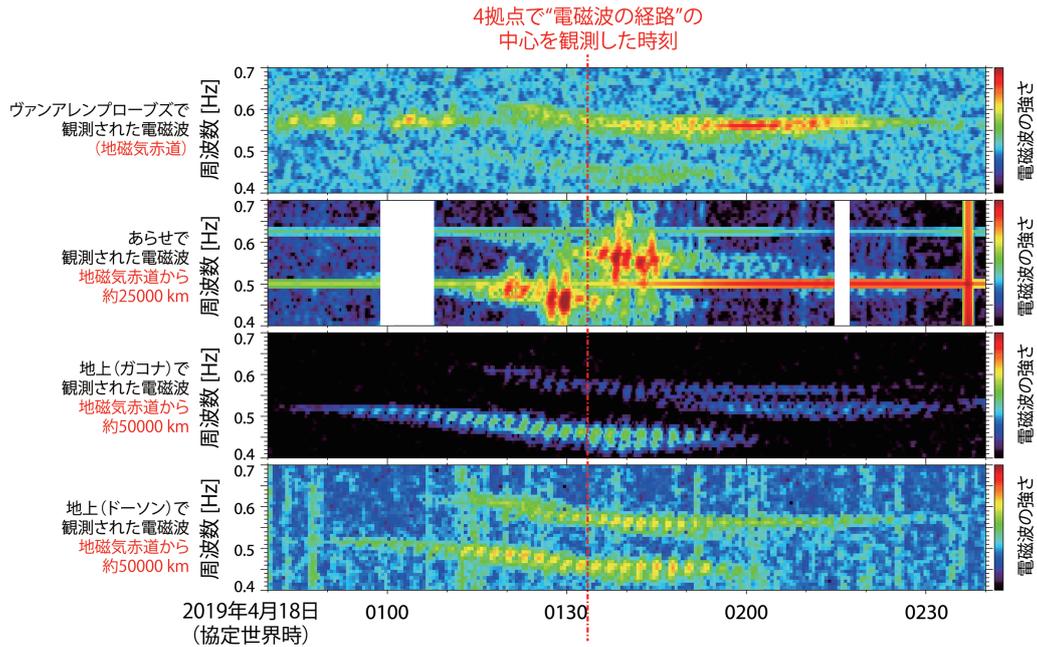


図3 2019年4月18日に実現した、電磁波の同地多地点観測の結果

拠点との距離が常に変化する。すなわち、全拠点が南北方向に列を成し、「同時観測体制」を満たす機会は非常に限定的である。加えて、宇宙の電磁波は自然現象ゆえに常時出現しているわけではないから、「同時観測体制」を満たすときに運良く現象が出現していないと、同時多地点観測は失敗である。

筆者らが「あらせ」を打ち上げた2016年以降、衛星軌道を緻密に計算して同時多地点観測の機会を推定し、各国の連携によって同時に宇宙の電磁波を計測する取組みを進めてきた。そして2019年4月18日に実現したのが、本稿で紹介する「電磁波の同時多地点観測」であった³⁾。図3は、4つの拠点で同時に観測された電磁波の様子であり、各軸の意味は図2と同様である。各拠点で特徴的な縞模様が現れていることが見て取れ、縞模様の個々の要素は、時間と共に周波数が上昇するパターンが繰り返されている。この時、「ヴァンアレンプローブズ」はほぼ地磁気赤道（地球の磁軸を基準とした赤道）に位置しており、「あらせ」は地磁気赤道から約25000 km、PWINGのガコナ局とCARISMAのドーンソン局は、地磁気赤道から約50000 kmの位置にあった。地球の南北半球をつなぐ磁力線に沿って電磁波が伝わっていくと予想し、「ヴァンアレンプローブズ」と「あらせ」がほぼ同一の磁力線を通過した時刻を図中の赤破線で示している。地上の2拠点は厳密に同一磁力線上に位置しないが、電磁波が地球の

電離圏に到達すると水平方向に広がって伝わる特性があることから、やや離れていても人工衛星が観測したものと類似した現象が観測されるはずである。これを踏まえて図3を見ると、確かに赤破線の時刻を中心として、類似したスペクトルパターンの現象が各拠点で同時に観測されたことが分かる。すなわち、宇宙から地上までの50000 kmもの電磁波の経路を、観測的に明らかにできたのである。

この時の人工衛星の軌道を計算すると、「ヴァンアレンプローブズ」はほぼ同一の磁力線上にとどまっていた。また、地上の2拠点は位置が不変であるため、磁力線との位置関係は固定されている。一方、「あらせ」は複数の磁力線を大きく横切る軌道を飛行していた。ここで改めて図3をご覧ください。4拠点が同一磁力線上を観測していた時刻には、各拠点で観測されたスペクトルの様子がよく一致しているが、赤破線の時刻から少し前後に目を移すと、「あらせ」でだけ周波数方向に広いスペクトルを持った特異な電磁波が観測されている。これは他の3拠点では観測されておらず、「あらせ」が他の磁力線上に移動したことで、異なる電磁波を捉えたと解釈できる。すなわち、赤破線の時刻を中心として、「あらせ」が他の拠点と同じ特徴の電磁波を観測した距離が、現象を地磁気赤道から地上まで伝える「電磁波の通り道」の断面の空間スケールであると考えることができる。この空間スケールは、地

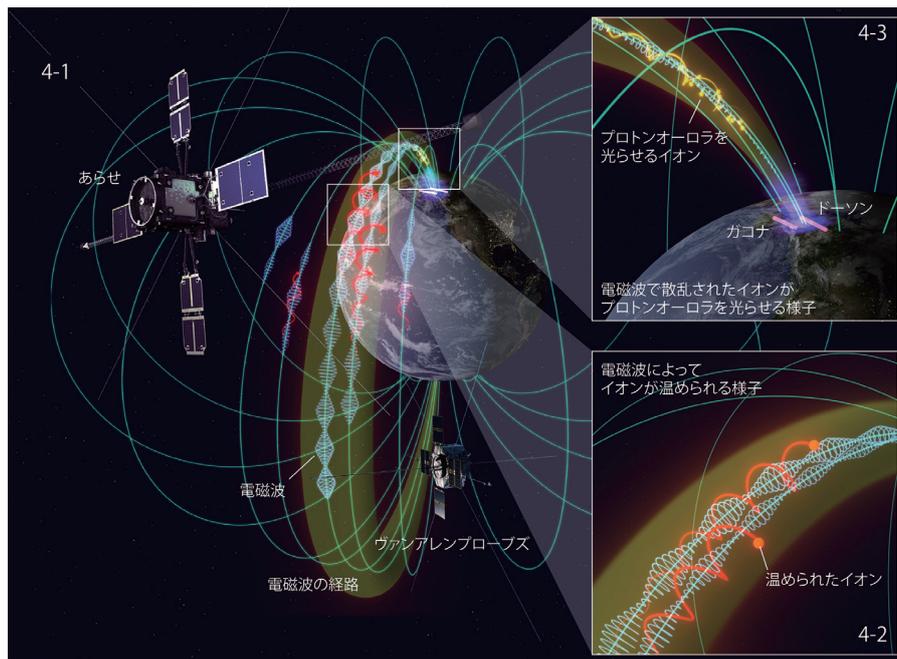


図4 同時多地点観測のイメージ図

球の電離圏高度にマッピングすると約 80 km 程度であり、通り道の長さに対応する 50000 km に対してはるかに小さいことが分かる。図 4-1 のイメージ図に示すように、電磁波の経路は細長いストロー状を成しており、その長さ太さが今回の同時多地点観測によって明らかにされた。

4. 電磁波による宇宙環境変動

宇宙の電磁波は、プラズマとの電磁気的作用によってイオンや電子にエネルギーを与えたり、逆にエネルギーを奪ったりする。電磁波からプラズマにエネルギーが与えられた結果、宇宙のプラズマは加熱され、新たな電磁波を生み出す等の様々な効果をもたらす。筆者らが「あらせ」と「ヴァンアレンプローブズ」のイオン計測データを精密に調べたところ、電磁波が捉えられたのと時を同じくして、宇宙プラズマ中のイオンが加熱されていることが分かった。すなわち、宇宙の電磁波が伝わる経路に沿って、宇宙の環境変動が起きていることを観測的に明らかにしたのである。また、今回観測された種類の電磁波は、宇宙空間の水素イオンを散乱させ、プロトンオーロラと呼ばれる青白いオーロラを発光させることが知られている。地上では、今回観測された電磁波に対応するプロトンオーロラが発生していただ

うと予想される (図 4-2 及び図 4-3)。

宇宙の電磁波による宇宙環境変動は、近年着目されている「宇宙天気」を左右する重要な要素である。宇宙を飛び交いながら環境変動を引き起こす電磁波を三次元的に捉え、その影響範囲や規模をモニタリングすることで、今後の宇宙天気予報の精度向上に貢献することができただろう。筆者らは水星に向けて航行中の水星磁気圏探査機「みお」や、木星氷衛星探査機「JUICE」に搭載する電磁波計測装置の開発も担当している。本研究の成果を踏まえて、地球以外の惑星でも電磁波が発生し伝わっていく仕組みを解明し、宇宙環境変動の網羅的理解と普遍性の解明へと歩みを進めていきたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (14J02108, 16H06286, 17H06140, 20K14546, 20H01959), 並びに 2 国間交流事業 (JPJSBP120192504) の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Miyoshi, Y., et al., *Earth Planets Space*, **70**, 101 (2018)
- 2) ERG サイエンスセンター, <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>
- 3) Matsuda, S., et al., *Geophysical Research Letters*, **48** (2021)

(金沢大学理工研究域 電子情報通信学系)