

オーロラを発生させる高エネルギー電子が大気圏に降り注ぐ仕組みを解明

国立極地研究所の 田中 良昌 特任准教授、名古屋大学宇宙地球環境研究所の 三好 由純 教授、塩川 和夫 教授、金沢大学、東京大学、東北大学、JAXA 宇宙科学研究所、電気通信大学などの研究グループは、地上と科学衛星の同時観測により、地球周辺の宇宙空間で生まれる電磁波が原因となって南極、北極の上空の深く、すなわち成層圏近くまで高エネルギーの電子が降り注いできていることを世界で初めて明らかにしました。成層圏のオゾンの破壊を誘発すると考えられている高エネルギー電子がどのように極域大気に降り込んでくるのか、その仕組みの解明を一步進めた成果です。

オーロラは、高度約 100～300km における大気の高エネルギー電子の発光現象であり、地球周辺の宇宙空間から磁力線に沿って降り込んでくる数十キロ電子ボルト (keV(注 1)) 以下のエネルギーを持つ電子が極域大気の大気原子や分子に衝突することによって発生します。さらに高い数百 keV 以上のエネルギーを持つ電子は、より地上に近い「中間圏(注 2)」と呼ばれる高度約 50～90km の大気層まで侵入し、その組成を変化させ、中間圏のすぐ下にある成層圏のオゾン破壊の要因となると考えられています。

本研究グループは、地球周辺の放射線環境を調査する科学衛星「あらせ」により電磁波を、南極、北極に設置された大型大気レーダー「PANSY(注 3)」、「MAARSY(注 4)」により大気の高エネルギー電子を、同時に観測しました。その結果、「あらせ」が宇宙空間で電磁波を観測した同時刻に、南北両極では大気レーダーが上空 55～80km からの強い反射エコーを捉えました。これは、宇宙空間で生じた電磁

波が、オーロラを光らせるエネルギー数十 keV 以下の電子だけでなく、より高いエネルギー(数百～数千 keV)の電子を南極、北極の上空深くまで降り込ませたことを示しています。

<研究の背景>

北極や南極の空を美しく彩るオーロラは、高度約 100～300km に現れる大気発光現象であり、地球の周りの宇宙空間から磁力線に沿って大気圏に降り込んでくるエネルギー約 0.1～数十キロ電子ボルト(keV)の電子が極域大気に衝突することによって発生します。さらに高い数百 keV 以上のエネルギーを持つ電子は、中間圏と呼ばれる高度約 50～90km まで侵入し、窒素酸化物(NO_x)や水素酸化物(HO_x)などの分子を増加させます。これらの分子は、中間圏のオゾン破壊するとともに、下降流に乗ってオゾン層を含む高度約 10～50km の成層圏まで運ばれ、オゾン層の破壊を誘発すると考えられています。また、オゾン層は大気の熱バランスを保つ働きをしているため、高エネルギー電子の降り込みによる成層圏オゾン減少が地球規模の気候変動に影響を与える可能性も指摘されています。そのため、高エネルギー電子の降り込みがいつ、どこで、どのように起こるのかを明らかにするため、国際的な連携による研究が精力的に行われています。

これまでの研究により、宇宙空間で生じるいくつかの電磁波が高エネルギー電子と相互作用し、電子を散乱して極域大気に降り込ませることが分かっています。例えば、「コーラス(注 5)」と呼ばれる周波数が数 kHz の電磁波は、エネルギー数十 keV の電子と共鳴し、数秒周期で明滅を繰り返す「脈動オーロラ」を引き起こします。また、数 Hz の周波数帯の「電磁イオンサイクロトロン波(注 6)」は、数百～数千 keV 前後の高エネルギー電子の降り込みの原因となります。しかし、地上と科学衛星の同時観測によって宇宙空間の電磁波と極域中間圏の応答を直接比較した研究は、これまで行われていませんでした。

<研究の内容>

本研究グループは、地球周辺の放射線環境を調査する科学衛星「あらせ」(2016年12月打ち上げ)と、昭和基地(南緯 69.00°, 東経 39.58°)に設置された南極最大の気象レーダー「PANSY」(Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar、図 1)、並びに、PANSY と似た緯度経度(北緯 69.30°, 東経 16.04°)にある北極の気象レーダー「MAARSY」(The Middle Atmosphere Alomar Radar System)による同時観測を実施しました。両レーダーとも、上空に向けて強力な電波を発射し、大気中で散乱されて戻ってきたわずかな電波(反射エコー)を検出することで、大気の動き(風)や、電子密度を観測します。本研究では、反射エコーから電子密度の増加、つまり大気層への高エネルギー電子の降り込みを検出しました。

宇宙と地上での観測の結果、科学衛星「あらせ」が宇宙空間で観測した電磁波と、南北両半球の気象レーダーが捉えた上空 55～80km からの強い反射エコー、つまり高エネルギー電子の降り込

みが、同時に発生し、良く似た時間変動をしていることを明らかにしました(図 2、図 3)。同時刻に、北極のアイスランドでは、脈動オーロラが観測されていました(動画 1)。これらの現象の高い相関は、宇宙空間で生じた電磁波が、北極でオーロラを発生させた数十 keV 以下のエネルギーの電子だけでなく、はるかに高いエネルギー(数百～数千 keV)の電子を南北両極の上空深くまで降り込ませ、大気を電離した証拠です。

これらの現象は、太陽から吹いている高速太陽風の前面が地球に到達した直後に、明け方の時間帯で発生しました。高速太陽風の到来は、(1)地球周辺の地磁気の圧縮および、(2)オーロラ爆発、をもたらしました(図 4)。(1)は電磁イオンサイクロトロン波を成長させ、(2)は宇宙空間夜側から熱い電子を朝側に運び、コーラスを発生させたと考えられます。これらの電磁波が宇宙空間に存在する高エネルギー電子と相互作用して、南北両極の大気に電子を落とし、上層で脈動オーロラ、下層で中間圏の大気電離を引き起こしたことが明らかになりました。

<今後の展望>

これまで、数百 keV 以上の高エネルギー電子の地球大気への降り込みは、激しいオーロラ爆発が頻発する磁気嵐と呼ばれる大規模なイベントのときに発生すると考えられてきました。しかし、本研究は、高速太陽風の到来や単発のオーロラ爆発といった比較的小規模なイベントのときにも、高エネルギー電子が極域中間圏まで降り込んでいることを明らかにしました。特に、オーロラ爆発は、平均して 1 日に数回と頻繁に発生するため、地球の大気に大きなインパクトを与える可能性があります。今後、小規模なオーロラ現象が、どのくらい高エネルギー電子を降り込ませ、地球の気候変動に影響を与えるのか、定量的に調査することが重要です。

<注>

注 1:電子ボルト

エネルギーの単位で eV と表される。1 電子ボルトは 1 個の電子が 1 ボルトの電位差で加速される時のエネルギー。1keV=1000eV。

注 2:中間圏

地球の大気の層の一つで、高度約 50～90km に位置する。その下の高度約 10～50km には、オゾン層を含む成層圏がある。

注 3:PANSY

昭和基地(南緯 69.00°, 東経 39.58°)に建設された、南極最大の気象レーダー。1045 本のアンテナで構成される。上空に向けて強力な電波を発射し、大気中で散乱され戻ってきたわずかな電波(反射エコー)を検出することで、上空 500km までの大気の風速や電子密度等を観測する。

注 4:MAARSY

北極のノルウェー・アンドーヤ(北緯 69.30°, 東経 16.04°)に設置された大型気象レーダー。433 本

のアンテナから成る。PANSY レーダーと同様の大気観測を行っている。

注 5: コーラス

宇宙空間に存在する電磁波の一種で、磁力線に沿った電子のらせん運動を伴う。音声に変換すると鳥のさえずりのように聞こえることから、コーラスと呼ばれる。

注 6: 電磁イオンサイクロトロン波

宇宙空間に存在する電磁波の一種で、磁力線に沿ったイオンのらせん運動を伴う。

< 発表論文 >

掲載誌: Journal of Geophysical Research – Space Physics

タイトル: Direct comparison between magnetospheric plasma waves and polar mesosphere winter echoes in both hemispheres

(磁気圏プラズマ波動と南北両半球の極域中間圏冬季エコーの直接比較)

著者: 田中良昌^{1,2,3}、西山尚典^{1,3}、門倉昭^{1,2,3}、尾崎光紀⁴、三好由純⁵、塩川和夫⁵、大山伸一郎^{1,5,6}、片岡龍峰^{1,3}、堤雅基^{1,3}、西村耕司^{1,2,3}、佐藤薫⁷、笠原禎也⁸、熊本篤志⁹、土屋史紀⁹、吹澤瑞貴⁹、疋島充¹⁰、松田昇也¹⁰、松岡彩子¹¹、篠原育¹⁰、能勢正仁⁵、長妻努¹¹、篠原学¹²、藤本晶子¹³、寺本万里子¹⁴、野村麗子¹⁵、行松彰^{1,3}、細川敬祐¹⁶、小路真史⁵、Ralph Ratteck¹⁷

1 国立極地研究所、2 情報・システム研究機構データサイエンス共同利用基盤施設、3 総合研究大学院大学複合科学研究科、4 金沢大学理工研究域、5 名古屋大学宇宙地球環境研究所、6 Ionosphere Research Unit, University of Oulu, Finland、7 東京大学大学院理学系研究科、8 金沢大学総合メディア基盤センター、9 東北大学大学院理学研究科、10 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、11 情報通信研究機構電磁波研究所、12 鹿児島工業高等専門学校一般教育科、13 九州工業大学大学院情報工学研究科、14 九州工業大学大学院工学研究科、15 国立天文台、16 電気通信大学大学院情報理工学研究科、17 Leibniz-Institute of Atmospheric Physics, Germany

URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JA026891>

DOI: [10.1029/2019JA026891](https://doi.org/10.1029/2019JA026891) 論文公開日: 令和元年 11 月 26 日

< 研究サポート >

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業(基盤研究 S 15H05747、基盤研究 A 25247075、基盤研究 A 15H02628、基盤研究 B 24340121、特別推進研究 16H06286)、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究(15H05815)、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CRESTCREST JPMJCR1663 の助成を受けて実施されました。

< 図表 >



図 1: 南極昭和基地の大型大気レーダー「PANSY」のアンテナ群

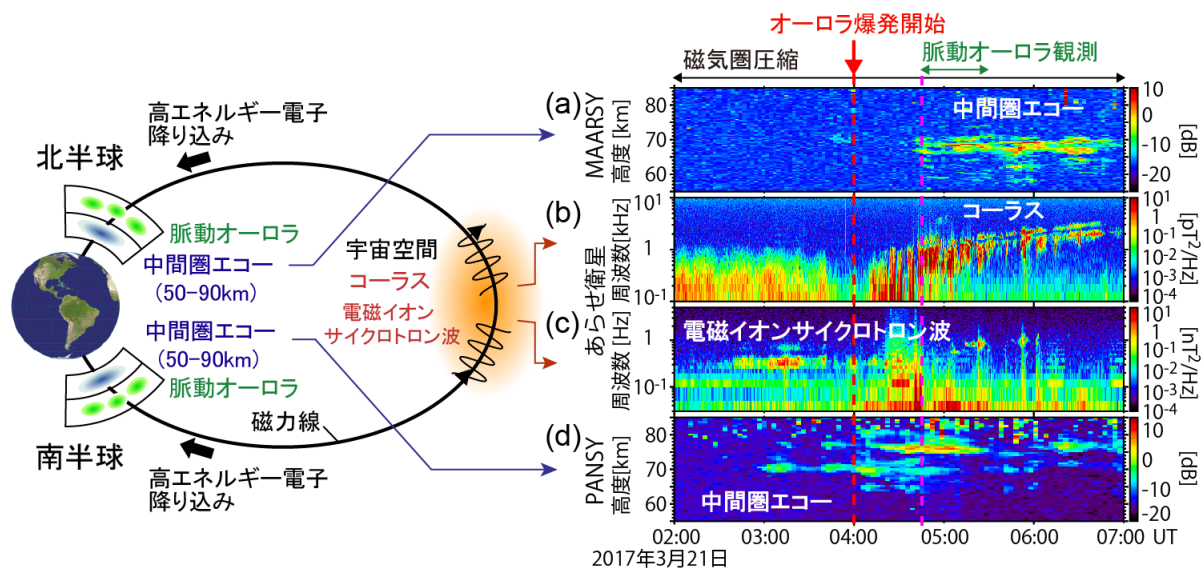


図 2: 2017年3月21日02~07時に、あらせ衛星で観測された地球周辺の宇宙空間の電磁波と南北極域の大型大気レーダーPANSY、MAARSYで観測された中間圏エコー。(a) ノルウェーの MAARSY レーダーで観測された高度 55~85km からの反射エコー強度。(b) あらせが観測した高周波帯(0.1~10kHz)、(c) 低周波帯(0.03~5Hz)の電磁波の強度。(d) 南極昭和基地の PANSY レーダーで観測された高度 55~85km からの反射エコー強度。(b)、(c)で、あらせが電磁イオンサイクロトロン波(2:30~4:45)、コーラス(4:45~7:00)を観測した時間帯に(a)、(d)で南北両半球のレーダーが中間圏エコーを観測した。

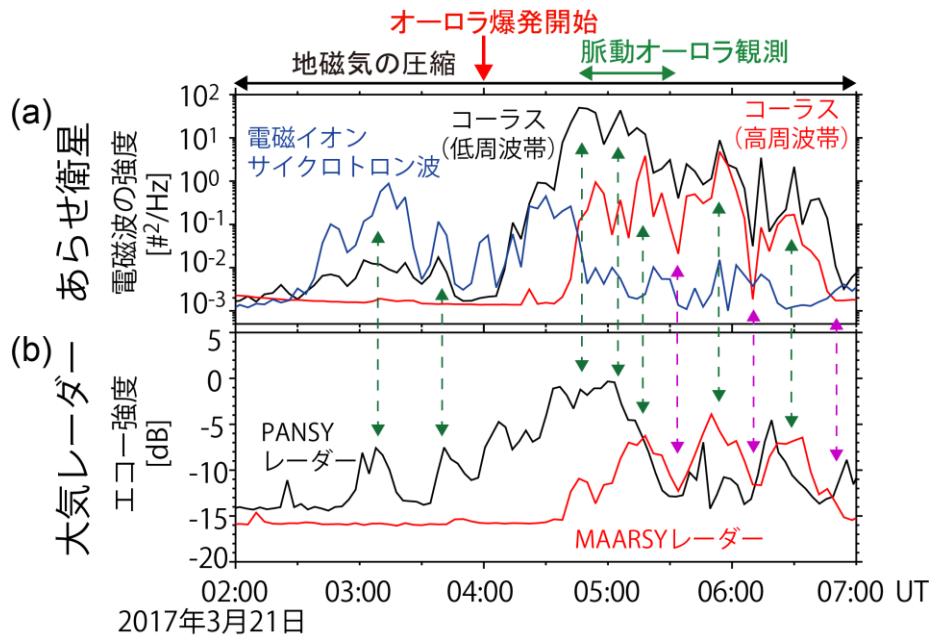


図 3: (a) あらせ衛星が観測した電磁波の強度の時間変化。電磁イオンサイクロトロン波は卓越周波数帯(0.2~0.5Hz)における平均値を、コーラスは高周波帯と低周波帯に分け、それぞれの周波数帯における平均値を示す。(b) PANSY、MAARSY レーダーが観測した中間圏エコーの強度の時間変化。緑と紫の矢印が示すように、宇宙空間の電磁波強度と中間圏のエコー強度は良い対応関係を示している。

動画 1: (上):アイスランドのフッサフェルの全天カメラで観測されたオーロラ。(下)あらせが観測した高周波帯(0.1~10kHz)の電磁波の強度。宇宙空間で電磁波コーラスが観測された 4:45~5:32に、地上で脈動オーロラが観測された。

(国立極地研究所ホームページ: <https://www.nipr.ac.jp/> で公開)

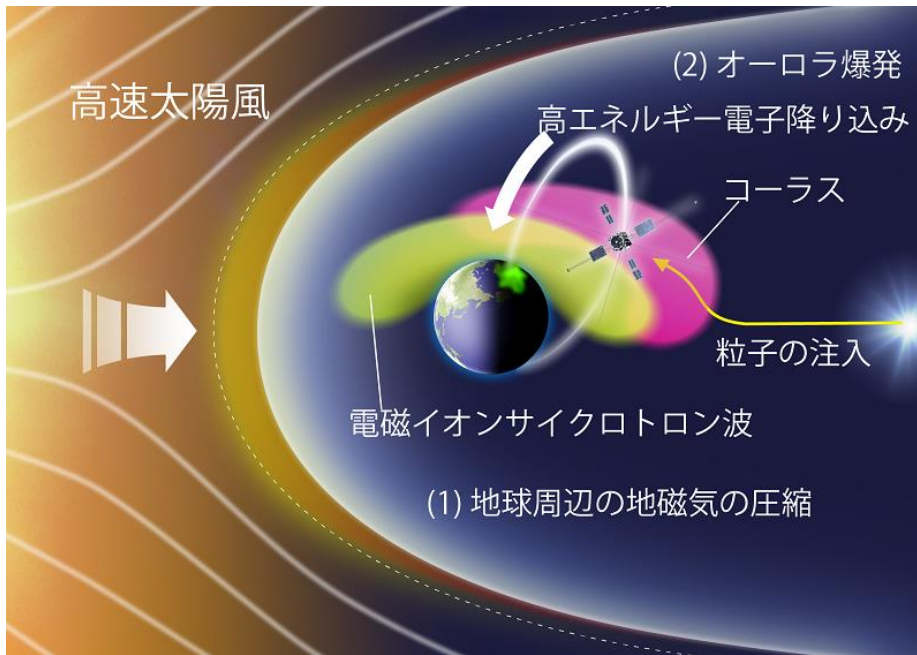


図 4: 高エネルギー電子が大気へ降り込む過程のイメージ。(1)太陽から吹く高速太陽風が地球周辺の地磁気を圧縮し、電磁イオンサイクロトロン波を成長させ、その後、(2)オーロラ爆発が発生し、宇宙空間夜側から熱い電子が朝側に運ばれ、オーロラを発生させた。これらの電磁波が宇宙空間の高エネルギー電子を磁力線に沿って極域大気に落とし、上層でオーロラを、下層で中間圏の大気電離を引き起こしたと考えられる。