

孤立陽子オーロラ直下で生じる中間圏 オゾン量の極端な減少を発見

尾崎 光紀
Ozaki Mitsunori

1. はじめに

オーロラが発生する高度とオゾンが分布する高度は全く異なり、両者は関係することのないものと考えられてきました。しかし、放射線となりえる高いエネルギーのプラズマを伴うオーロラもあり、宇宙から放射線が地球の大気へ向かって降下してくることもあります。このため、オーロラと大気中のオゾン量が密接に関係する現象を発見しましたので、その研究成果について、本稿でご紹介します。

地球のまわりの宇宙空間は、電子とイオンから成るプラズマで満たされていますが、この電子やイオンが光速に近いエネルギーまで加速されると放射線になります。人工衛星の静止軌道までの宇宙では、地球の持つ磁場に沿って螺旋回転する自然電磁波が発生し、この自然電磁波がヘリカルコイルのように振る舞い、keV (キロ電子ボルト) 帯電子を MeV (メガ電子ボルト) 電子まで加速させることや、MeV 電子を地球の大気へ降下させる等の現象が報告されています¹⁾。地球の大気へ向けて降下するプラズマは、そのエネルギーによりどの高度まで侵入できるかが決まります。keV 帯電子であれば高度 120 km 程度まで侵入することができ、夜空にオーロラを輝かせます。一方、MeV 電子になると中間圏から成層圏界面 (高度 80~50 km 程度) まで侵入することができ、侵入高度までの大気を電離させ、窒素酸化物 (NO_x) や水素酸化物 (HO_x) を生成します²⁾。この NO_x や HO_x は触媒反応サイクルによってオゾンを破壊するため、人類の産業活動だけでなく宇宙から降下する放射線量が我々の気候に影響を与えている可能性が示唆されています。しかし、放射線電

子は検出器がないと“いつ”、“どこで”降下してきたのか特定できません。人工衛星に搭載された放射線検出器が都合よく世界中を飛び回っているわけではないので、宇宙からの放射線電子降下の位置と時間の検出は困難です。この問題を解決するのに、筆者らはオーロラ現象を使いました。

2. オーロラの道標

宇宙から降り注ぐ放射線電子によるオゾン破壊を調べるために、なぜオーロラを使用したのでしょうか？この理由は、オーロラと共に放射線電子が降り注ぐ現象が知られていたからです。自然電磁波は、その発生周波数により MeV 電子だけでなく、もっと低いエネルギーの電子や陽子も一緒に降下させます。特に、周波数 1 Hz 程度で発生する電磁イオンサイクロトロン波動と呼ばれる自然電磁波は、MeV 電子と数十 keV 帯陽子を効率よく降下させることが分かっていました³⁾。地球へ向けて降下する数十 keV 帯陽子は、電子オーロラよりも暗く視認が難しいですが陽子オーロラを発生させます。そのため、筆者らは数十 keV 帯陽子によって発生する陽子オーロラが、宇宙から降り注ぐ放射線の位置の目印になると考えたのです (図 1)。また、この電磁イオンサイクロトロン波動に伴う陽子オーロラは、緯度方向には数百 km 程度、経度方向にも限定されます。そして、局所的な放射線降下が生じるため、周辺の大気環境からの変動と比較しやすいという利点もありました。孤立陽子オーロラ直下の大気微量成分を調べることで、宇宙からの放射線降下が地球大気に影響するののか詳しく調べることができる！と思いま

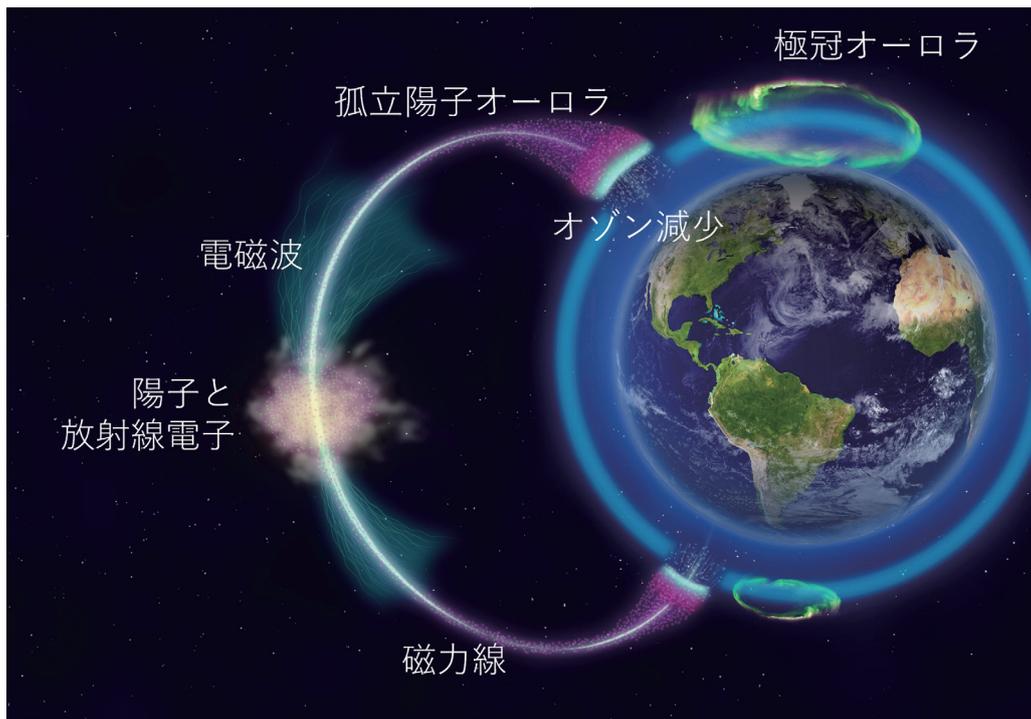


図1 孤立陽子オーロラ直下での中間圏オゾン減少のイメージ図⁴⁾

したが、筆者は電磁波やオーロラについては、専門家として多少の知識、技術を持っていますが、放射線や大気微量成分（オゾン等）の研究に関しては専門ではありません。

3. コロナ禍のメール

この研究を推し進めようとしたころは、日本はコロナ禍であり、国際学会で関連の研究を行っているような研究者と学会会場で直接コンタクトを取るようなことはまだ難しい時期でした。国際学会に現地参加することもできない状況です。当時このような状況の中、お会いしたこともなければ、研究分野も異なる大気微量成分の海外研究者らに直接メールで研究協力を送っていました。メールを送った後も、たぶん返事はないだろうと思っていました。しかし、幸運なことにメールをお送りした外国人研究者らからすぐに返事をいただくことができ、研究コンセプトを好意的に受け入れていただけました。こうして、プラズマ物理、オーロラ科学、大気微量成分センシング、電磁波工学に関わる広い研究分野の研究者が集った国際研究チームが誕生しました。通常であれば、知り合いの研究者等を通じて、自分に知識のない放射線や大気微量成分の研究者を紹介してもらう

ことが良いのかと思いますが、思い切ってメールを送ったのが功を奏しました。

4. 放射線電子が壊す中間圏オゾン

本研究で使用した DMSF 衛星に搭載された SSUSI 装置によるオーロラ観測は、可視光だけでなく、目に見えない波長の光の観測も可能です。このため、天候等の影響を受けることなく、オーロラ現象を検出できるメリットがあります。また、TIMED 衛星に搭載された SABER 装置によるオゾン観測は、広い空間範囲を計測できるというメリットがあります。国際宇宙ステーションに搭載された MAXI/RBM 装置や POES 衛星は、衛星軌道上の放射線電子を検出することができます。そして、地上では高感度な電磁界センサにより、特殊な 1 Hz 程度の電磁イオンサイクロトロン波動を地磁気脈動として検出できます。このように、複数衛星と地上観測により地上からも衛星が飛翔する宇宙からも遠い中間圏の総合観測と解析を行います。

データ解析を始めると、すぐに電磁イオンサイクロトロン波動を伴う孤立陽子オーロラの位置に、局所的な放射線降下を示すイベントが見つかりました。そして、大気組成を探索する SABER 装置

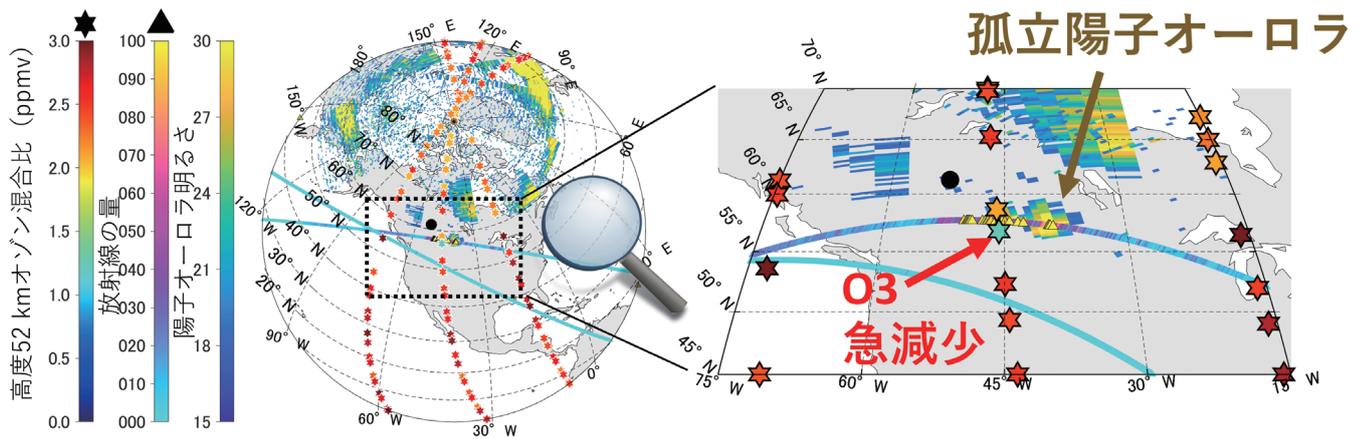


図2 孤立陽子オーロラ位置での放射線増大と中間圏オゾン減少⁴⁾ (2015年6月に北アメリカ大陸での観測例)
放射線は緯度に沿って測定され△で、オゾン混合比は経度に沿って測定され星型で示した

(TIMED 衛星) により、孤立陽子オーロラ直下の中間圏オゾンの明らかな減少が検出されました(図2)。解析当初は、あまりにも孤立陽子オーロラの発生位置と中間圏オゾン減少の対応が良いため、解析にミスがないか、観測データに人工的な雑音等の影響がないかを徹底して調べました。そのような影響は見当たらなかったため、偶然に対応が良かっただけということがないかを排除するために、他のイベントも探しました。すると、孤立陽子オーロラ直下での中間圏オゾン減少を示す複数のイベントが見つかりました。このことから、これは自然現象として対応があると確信を持つことができました。

詳細に解析したイベントでは、孤立陽子オーロラの発生に伴わずに1.5時間後に孤立陽子オーロラ直下の中間圏において10~60%ものオゾンが減少していることがわかりました(図3)⁴⁾。孤立陽子オーロラの空間サイズは南北方向に400 km程度であり、空間的に非常に限られた孤立陽子オーロラ直下のみに、オゾンが急減少する様子が明らかになりました。この様子は、穴のあいた障子を想像しても良いと思います。観測結果に対し、放射線電子のどのエネルギー帯が中間圏オゾン破壊に直接影響するかについて、観測された電磁イオンサイクロトロン波動と共鳴できるプラズマを理論計算より評価しました。理論計算の結果では、観測された電磁イオンサイクロトロン波動と共鳴できるプラズマは、エネルギーが2 MeV以上の超相対論的電子であることが強く示

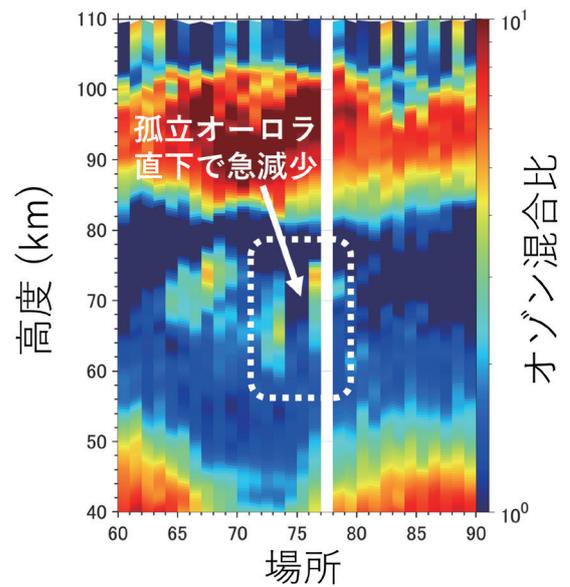


図3 2014年8月に南極域で観測された中間圏オゾンの急減少⁴⁾

唆されました。しかし、放射線電子を観測したPOES衛星や国際宇宙ステーションに搭載されたMAXI/RBM装置にエネルギー決定性能がないため、観測からは詳細なエネルギー帯が明らかになりませんでした。このため、オゾン層破壊に直接影響する放射線電子のエネルギー範囲を明らかにすることは、今後の研究課題になります。

5. まとめ

コロナ禍という特殊な事情の中、リモートでつながった国際研究チームにより、宇宙の電磁イオンサイクロトロン波動が揺さぶる放射線電子が、中間圏オゾンに極端に減少させることが明らかになりました。電磁イオンサイクロトロン波動によって揺さぶられるプラズマが作り出すオーロラ現象は、地球だけでなく木星においても観測されています⁵⁾。自然電磁波が宇宙のプラズマを効率良く加速と散乱するメカニズムを地球では詳細観測と複数のデータを組み合わせた総合解析が可能です。こうして得られる知見は、磁場を帯びた惑星の環境理解にも応用が可能です。自然電磁波により散乱され地球へ向けて降下した放射線電子により生成されるNO_xは、大気環境中のライフタイムが長く、その効果は風に乗って、極域、より低い高度にまで、長期間（月～年）気候へ影響するという研究も報告されています⁶⁾。このため、中間圏オゾンの密度は、成層圏（高度約10～50 km）オゾンに比べて圧倒的に少ないですが、その影響は長期に、グローバルに地球環境への影響を及ぼすかもしれません。この定量的な影響は、今後、地球規模での孤立陽子オーロラの発生頻度と共に、調査が必要です。更に、温室効果ガス（二酸化炭素等）の増大による環境変動の影響は、大気密度の低い超高層大気においてより顕著にその影響が「寒冷化」として表れています⁷⁾。対流圏（地表から高度約10 km）では、温室効果ガスにより熱が蓄

積され温暖化の傾向が指摘されています。一方で、成層圏より上の高度では、下層大気からの熱が跳ね返されてしまうため、熱が奪われてしまい寒冷化が顕著に進行すると考えられています。下層大気の温暖化の進行をいち早く把握するためにも、中間圏の環境変動のセンシングは重要です。今後も、電波、光の特性を巧みに利用し、人工衛星が安定に飛翔するには高度が低すぎ、地上から直接調べるには高度が高すぎ、そして、大気密度が低いために気候変動の影響の指標と成りえる中間圏の環境変動を、定量的に検知できる技術開発、解析研究を推し進めていきたいと考えています。

謝辞

本研究はJSPS 科研費JP16H06286, JP20H02162の支援を受けて実施されました。

参考文献

- 1) Baker, D.N., *et al.*, *Earth, Planets Space*, **73** (2021)
- 2) Turunen, E., *et al.*, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, **71**, 10-11 (2009)
- 3) Miyoshi, Y., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **35** (2008)
- 4) Ozaki, M., *et al.*, *Sci Rep.*, **12**, 16300 (2022)
- 5) Yao, Z., *et al.*, *Science Advances*, **7** (2021)
- 6) Andersson, M. E., *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **123** (2018)
- 7) Ogawa, Y., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **41** (2014)

(金沢大学大学院 自然科学研究科)