

宇宙の電波が生存圏を変える？

栗田 怜^{1*}

Contributions of “waves in space” to Humanosphere

Satoshi Kurita^{1*}

概要

我々の住む地球は、分厚い大気に覆われ、固有磁場を有する惑星である。大気は、地表面からの高度が上がるにつれて薄くなり、いわゆる「真空状態」と呼ばれる宇宙空間に達する。実のところ、この宇宙空間は、「プラズマ」と呼ばれる電気を帯びた非常に密度の薄い気体で満たされており、その中をさまざまな電波が伝播している。このプラズマ中を伝播する電波である「プラズマ波動」により、宇宙空間の環境は大きく変動していることがわかっている。近年の研究では、その影響が地球の高層大気まで及ぶことが明らかになってきている。本稿では、プラズマで満たされた宇宙空間に関する基本構造とその変動に加え、高層大気まで影響を及ぼす過程について紹介する。

1. はじめに

地球の大気は重力によって地表面に捉えられた中性の気体で構成されており、その密度は高度が上昇するにつれて減少していく。質量の重いものがより重力の影響を受けるために、気体を構成する分子の中で軽いものほどより高い高度まで存在する。また、高度 80km を超えると、大気の一部は太陽光線を浴びて電離し、プラスの電気を帯びたイオンと、マイナスの電気を帯びた電子に分離する。この地球大気が一部電離した領域を電離圏と呼ぶ。図 1 に、高度 700km 程度までにおける、地球大気の構造を示す。我々の普段の生活に密接に関係のある領域はおおむね高度 10km 程度であるが、地球の大気はより高高度まで広がっており、その温度や密度によってさまざまな呼称を持つ。特に、オゾン層は高度 30km 前後にピークを持ち、高度 90km 程度まで広がっている。また、電離圏は高度 70-80km 程度に位置する D 層から、さらに上空では高度域によって E 層・F 層と呼ばれている。国際宇宙ステーションが飛翔する高度は約 400km 程度の電離圏の中であり、地球大気が十分に存在している領域である。一方で、GPS 衛星が周回する高度約 20,000km や、気象衛星が周回している高度約 36,000km では、地球の中性大気の影響はほぼなく、非常に希薄なプラズマが存在するのみである。興味深く、また、注意しなければならないのは、この希薄なプラズマの状態が時々刻々と変化していくことで、時には人工衛星にとって危険な状態にまで達することである。宇宙空間は静かで穏やかな領域ではなく、激しく変化に富んだ領域であり、この変化を理解することを、地上付近の天気予報になぞらえて「宇宙天気予報」と呼び、現在積極的に研究が進められている。

2. 地球周辺の宇宙環境

宇宙空間、特に、地球周辺の宇宙環境にはさまざまな種類のプラズマが存在している。これらのプ

2023 年 8 月 14 日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所宇宙圏電磁環境探査分野.

* E-mail: kurita.satoshi.8x@kyoto-u.ac.jp

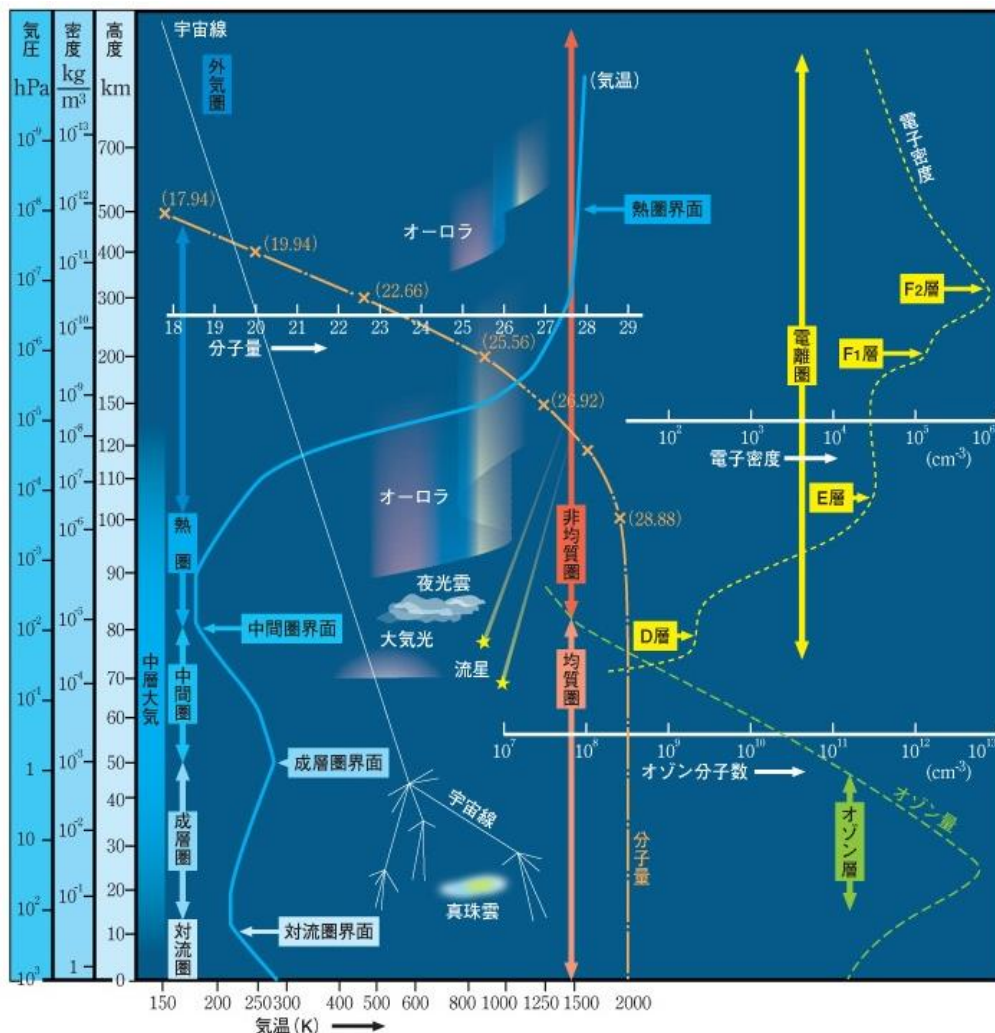


図 1：高度 700km 以下における大気の流れ・密度・温度・大気平均分子量の高度変化。右側にはオゾン濃度の高度分布と電離圏の電子密度も示している。¹⁾

プラズマは、太陽を起源とするものと、地球の電離圏を起源とするものがある。

太陽は、巨大なプラズマの塊であり、また、巨大な磁石でもある。太陽からは、プラズマと磁場が宇宙空間に向かって絶えず噴出しており、「太陽風」となって地球などの惑星に向かって流れてきている。地球もまた磁石を有しており、太陽風の磁場と相互作用をすることによって、地球の磁場が支配的となる「磁気圏」と呼ばれる空間を形成する（図 2）。

この磁気圏の中には太陽風のプラズマが流入し、地球の磁場に捕捉されて地球の周りを周回している。地球の周りを周回しているプラズマの中で、10-100 キロ電子ボルト程度のエネルギーを持つものを「リングカレント」、1 メガ電子ボルト以上のエネルギーを有するものを「放射線帯」と呼ぶ。放射線帯の電子の速さは、ほぼ光の速さに等しく、非常に高いエネルギーを有していることがその名前の由来であり、前述の人工衛星の障害を引き起こす原因となるプラズマ群である。地球の電離圏からは、磁気圏に向かってプラズマが湧き出してきており、磁気圏の中を電離圏プラズマの一部が満たしているような領域が存在する。この領域を「プラズマ圏」と呼び、構成するプラズマのエネルギーは 1 電子ボルト程度であると考えられている。

図 3 に、プラズマ圏・リングカレント・放射線帯の存在する典型的な領域を示しているが、興味深いのは、エネルギーが異なるプラズマ群が、一緒に領域に存在していることである。例えば、我々の

身の回りで考えてみると、100度の熱湯と0度の冷たい水を同量混ぜると、50度のお湯ができるのに対して、プラズマではそうならない、ということである。

この異なるエネルギーのものが同居できる、という宇宙空間のプラズマの特異な性質は、このプラズマが極端に希薄で、粒子同士の衝突がほぼ起こらないことに起因する。前述のお湯ができる過程において、熱湯はエネルギーが高い水分子、冷たい水はエネルギーが低い水分子で構成されている。これらを混ぜた時、エネルギーが高い水分子がより低い水分子にエネルギーを与え、全体の水分子が同じようなエネルギーを持った状態がお湯である。プラズマの場合、衝突によるエネルギー交換が起こらないために、異なるエネルギーを持つプラズマ群同士が同居できるのである。この粒子同士の衝突のしやすさの目安として、ある粒子が別の粒子に衝突するまでの距離を用いることがある。太陽風のプラズマの場合、この距離はおおよそ太陽-地球間の距離に相当し、ほぼ衝突しない、といえる。このプラズマのことを、「無衝突プラズマ」と呼ぶ。

ここで、太陽風を起源とするリングカレント・放射線帯でエネルギーが大きく異なっていることは興味深い。衝突を経ることなく、エネルギーを交換・獲得する過程が存在することを意味している。

3. 宇宙の電波：プラズマ波動

無衝突のプラズマがエネルギーを獲得する過程で重要な役割を持つのが、プラズマ中を伝播する電波である「プラズマ波動」である。我々の生活に関係のある大気中を伝播する電波は電場・磁場を有するが、プラズマ波動の性質は周辺のプラズマ環境に大きく依存する。これは、プラズマが電気を帯びた粒子の集まりであり、プラズマ波動の電場・磁場に影響を与えるためである。逆に、プラズマ波動の持つ電場・磁場が周辺のプラズマ波動に影響を与えることもあり、プラズマとプラズマ波動の間の相互作用により、宇宙環境が変化していく。この相互作用を「波動粒子相互作用」と呼び、地球周辺の宇宙環境の変動を考える上で不可欠な物理メカニズムである。

前述のプラズマ圏の冷たいプラズマ・リングカレントに対応する熱いプラズマは、波動粒子相互作用

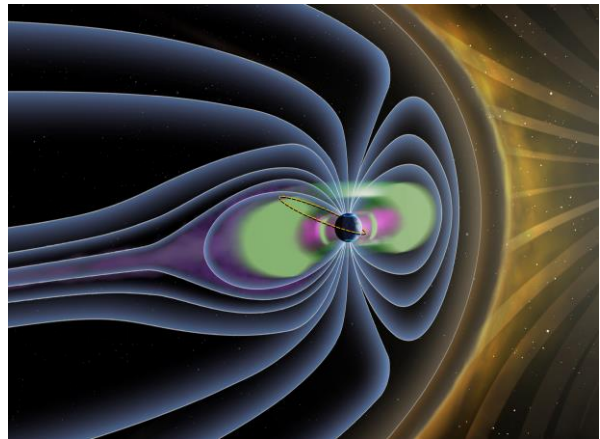


図2: 磁気圏の模式図²⁾。図の右側に太陽があり、太陽から噴き出すプラズマと磁場が地球の固有磁場が相互作用した結果、地球の磁場が支配的な領域である磁気圏が図の左側に向かって広がっている様子を示している。

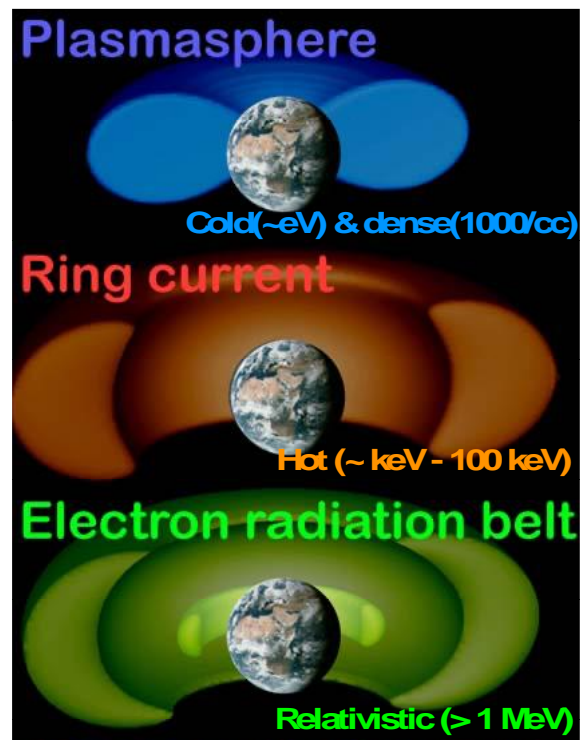


図3: プラズマ圏 (plasmasphere)・リングカレント (ring current)・放射線帯 (radiation belt) の典型的な空間分布³⁾

用を考える上で特に重要な役割を果たす。冷たいプラズマは一般的に最も高い密度を持っており、プラズマ波動から見れば、波動が伝播する際の「媒質」としての役割を持つ。つまり、冷たいプラズマの密度の変化は、磁気圏内におけるプラズマ波動の伝播の仕方に大きな影響を与える。一方で、リングカレントの熱いプラズマは、プラズマ波動の振幅を増大させるためのエネルギー源であると考えられており、熱いプラズマの数が地球周辺の宇宙空間において増大し、不安定となると、プラズマ波動が現れる。熱いプラズマによって生まれたプラズマ波動が冷たいプラズマを媒質として伝わり、放射線帯に対応するエネルギー帯の電子を生み出す、というメカニズムが現在では提唱されており、異なるエネルギー帯のプラズマが、プラズマ波動を介して結合するという「エネルギー間階層構造」が形成されていると言われている。

数あるプラズマ波動の中でも、ホイッスラーモード・コーラス波動と呼ばれる電磁波が、地球周辺の宇宙環境では重要な役割を持っていると考えられている。このプラズマ波動は、電子のサイクロトロン周波数よりも低い周波数帯域に存在し、地球磁気圏においては、人間の可聴域の周波数帯に対応する。科学衛星によって取得されたコーラス波動の信号を音声に変換すると、鳥の囀りのように聞こえる事が、このプラズマ波動の名前の由来である。我が国の科学衛星である「あらせ」衛星で観測されたコーラス波動の事例を図4に示す。コーラス波動は、短い時間に周波数の変化を繰り返す電磁波であることが大きな特徴である。

コーラス波動の持つ重要な特徴として、磁気圏に存在する幅広いエネルギー帯の電子と波動粒子相互作用によってエネルギーの交換を行うことができることが挙げられる。放射線帯は、リングカレントの電子の一部がコーラス波動からエネルギーを受け取り、メガ電子ボルトまで加速されているという説が現在では有力視されている。一方で、コーラス波動は、リングカレントや放射線帯電子が地球磁場に沿って跳ね返り運動をしている軌道を乱し、その結果、地球の大気へと降り込む過程を引き起こすことも知られている(図5)。これは、波動粒子相互作用が宇宙空間のプラズマの変動だけでなく、大気への降り込みを引き起こすことで、宇宙の変動と地球大気の変動を紐づけていることを示唆している。

4. 高エネルギー電子大気降り込みと高層大気変動現象

コーラス波動によって大気に降り込んだ電子は、地球の高層大気へと吸収されることで磁気圏からは消滅することになる。その一方で、大気へと降り込んだ電子は、自身の持つエネルギーを高層大気を構成する分子・イオンに与え、大気の電離や加熱を引き起こす。分子・イオンは、降り込み電子からえた余剰なエネルギーを光として放出するが、この光がオーロラに対応する。オーロラは、宇宙から地球大気に向かって高いエネルギーを持つプラズマが到来していることを示しているのである。

コーラスなどのプラズマ波動との波動粒子相互作用の結果として発光しているオーロラは、いわゆるカーテン状のオーロラではなく、ぼんやりとしたオーロラに対応する。このオーロラを「ディフューズオーロラ」と呼んでいる。ディフューズオーロラにも種類があり、特に、周期的にオーロラの強度が変化するものは「脈動オーロラ」と呼ばれている。脈動オーロラは、その発光のON/OFFは、コーラス波動のON/OFFに対応するという説が提案されてきた。あらせ衛星と、地上に展開されたオーロラ観測用カメラ群の協調観測により、この説が実証されている。

脈動オーロラを光らせるような電子のエネルギーは、概ね数千電子ボルトから数十キロ電子ボルト

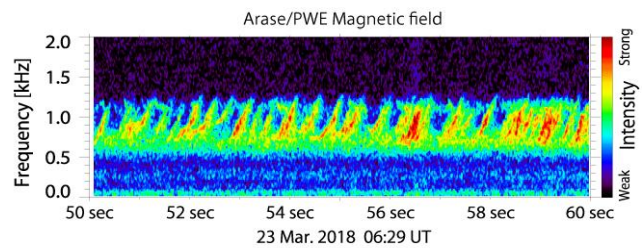


図4：あらせ衛星に搭載された電波観測装置で受信されたコーラス波動の1例⁴⁾。横軸が時間を、縦軸は電波の周波数を示しており、電波強度が色で表されている。

ト程度であることが知られている。図 6 は、磁気圏から降り込んだ電子が、大気分子を電離させる効率を示しており、電子が到達できる最低高度は、その電子が最も電離を引き起こす高度に対応する。脈動オーロラを引き起こす電子は、図 6 から、高度 80km 付近まで侵入し、地球大気 of 電離・加熱を引き起こしていると考えられている。近年の研究によれば、コーラス波動は脈動オーロラを引き起こす電子に加えて、数百キロ電子ボルトから 1 メガ電子ボルトを超えるような、放射線帯に存在する電子も降り込ませることが明らかになっている。これらのエネルギーの非常に高い電子は、脈動オーロラの電子よりもより低い高度まで到達し、大気の電離・加熱を引き起こすと考えられる。脈動オーロラは一般的に見られるオーロラであるため、脈動オーロラに伴う大気の電離・加熱現象は頻繁に発生し、地球大気の組成変化に大きな影響を与えると示唆されており、数値実験などにおいて、オゾン破壊するとされる窒素酸化物の量の変化が引き起こされる可能性が示されてきている。

この高エネルギー電子の大気降り込みが引き起こす電離・加熱現象による影響は近年大きな注目を浴びており、研究が盛んに進められ始めている。オーロラの活動の活発化に伴い、窒素酸化物の量が変化する現象が知られていたが、オーロラに伴う降下電子のみを考慮したモデルでは説明することができず⁷⁾(図 7)、モデルと観測結果の差異が明らかではなかった。しかしながら、このオーロラに伴う高エネルギー電子の降り込みを組み込むことが、観測結果とモデルの差異を埋める要因となりうるため、振り込み電子のエネルギー分布やその量を定量的に調査する試みが進められている。

4. おわりに

以上に述べたように、宇宙空間で自然に発生する電波のプラズマ波動は、波動粒子相互作用を通して、地球の高層大気へ高エネルギー電子を降り込ませる。この過程により、地球の大気では電離・加熱が起こり、大気中の窒素酸化物やオゾンの量に変化が起こる。この大気中の成分の変動によって、地球の大気が太陽光からのエネルギーを吸収する量に変化が起こり、大気 of 温度構造に影響を及ぼす可能性が提案されている。大気 of 温度構造に変化が起きると、大気 of 構造が安定となる状態にも変化が起きる可能性がある。もしかすると、

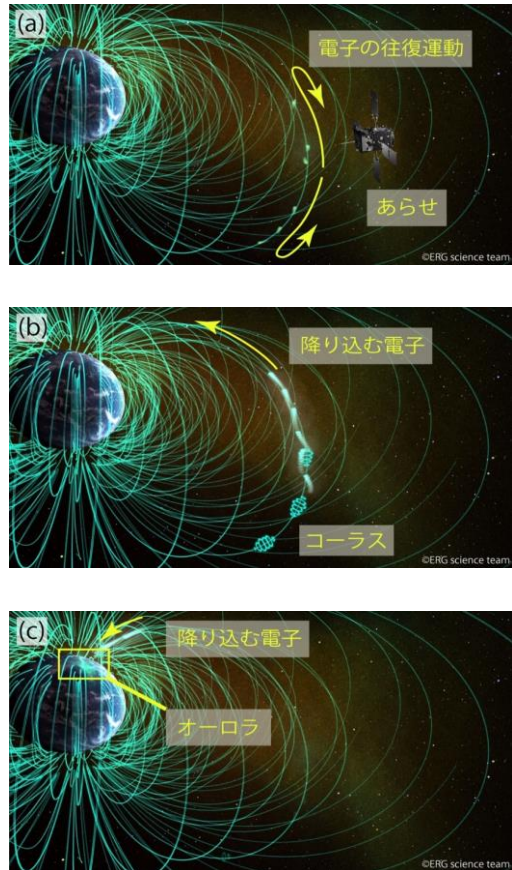


図 5 : コーラス波動との相互作用により、磁気圏内の電子が消失する過程の模式図⁵⁾

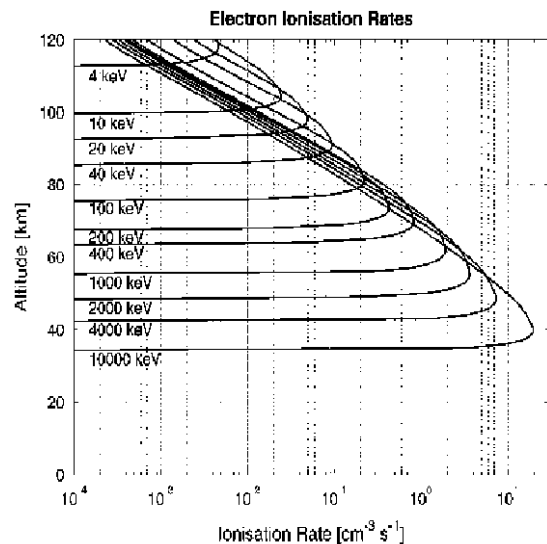


図 6 : 地球大気 of 電離を引き起こす効率を、高度と降り込み電子 of エネルギーごとに計算した理論値⁶⁾

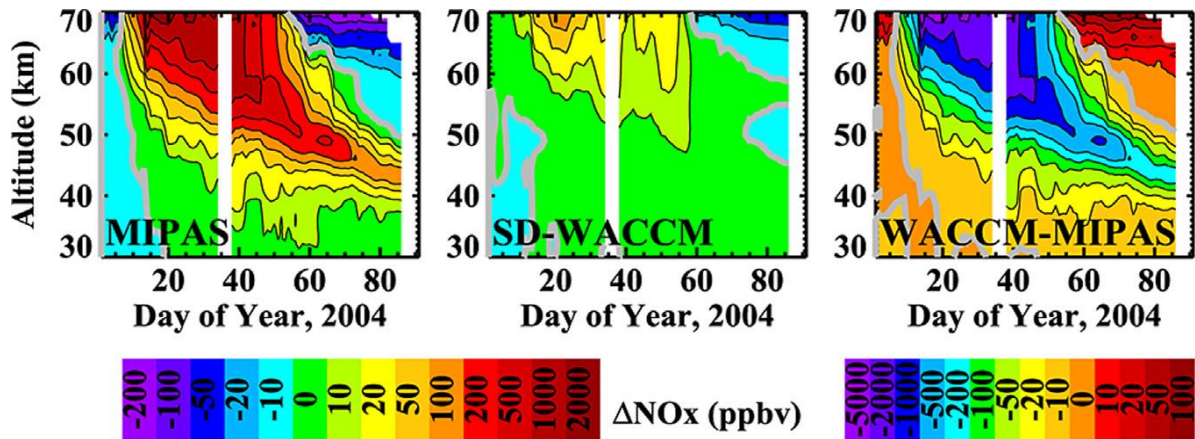


図7：左から順に、MIPAS（Michelson Interferometer for Passive Atmosphere Sounding）で観測された窒素酸化物の2004年1月1日に対する変化量、SD-WACCM（Specified Dynamics version of Whole Atmosphere Community Climate Model）と呼ばれるモデルから計算された窒素酸化物の変化量、MIPASの観測結果とSD-WACCMの数値計算結果の差分⁷⁾

長い地球の大気進化の過程で、宇宙からの高エネルギー粒子降り込みによる電離・加熱が、過去に重要な役割を果たしていた時期があったかもしれない。一見、宇宙と地球の大気は無関係に見えるものの、宇宙で起きた現象が、大気に大きな影響を及ぼす、かもしれないということである。

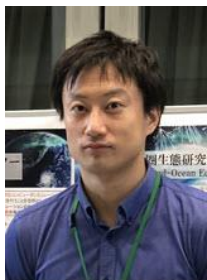
上記で可能性についてのみ言及しているが、これは、高エネルギー電子による降り込みの量が不確定な部分が多くあり、実際にどれほど大気の温度構造などに影響を与えているかが十分に把握できていないためである。高エネルギー電子の降り込みの量は、宇宙空間に存在する量と、プラズマ波動の電波の強さなどに関係があり、宇宙環境を丹念に探査する必要がある。降り込んでくる量を定量的に、直接評価することも重要であろう。

現在、人類の活動は宇宙へと拡大していき、宇宙圏を理解することが生存圏の科学として重要視されていく一方、宇宙と大気が結合しており、影響を与えているという側面にも注目し、生存圏全体を理解していく側面も重要である。

参考文献

- 1) 理科年表オフィシャルサイト：https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo_006.html
- 2) 宇宙科学研究所、ジオスペース（地球周辺の宇宙空間）と太陽風の相互作用、想像図：
<https://www.isas.jaxa.jp/gallery/feature/erg/02.html>
- 3) Ebihara, Y. and Y. Miyoshi, Dynamic Inner Magnetosphere: A Tutorial and Recent Advances, “The Dynamic Magnetosphere”, W. Liu and M. Fujimoto, IAGA Special Sopron Book Series Vol. 3, p145-187, 2011.
- 4) ジオスペースが奏でる音：<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/outreach/sound.shtml.ja>
- 5) 宇宙科学最前線：明滅するオーロラの期限に光を照らす <https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/190605.html>
- 6) Turunen, E., et al., Impact of different precipitation energies on NO_x generation during geomagnetic storms, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **71**, 1176–1189, doi:10.1016/j.jastp.2008.07.005.
- 7) Marshall et al., The AEPEX mission: Imaging energetic particle precipitation in the atmosphere through its bremsstrahlung X-ray signatures, *Advances in Space Research*, **66**, 1, 66-82, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.003>.

著者プロフィール



栗田 怜 (Kurita Satoshi)

<略歴> 2014年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程修了(博士(理学)) / 同年名古屋大学太陽地球環境研究所 学振PD / 2017年名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究員 / 2019年名古屋大学宇宙地球環境研究所 ERGサイエンスセンター特任助教 / 2020年京都大学存圏研究所准教授、現在に至る。<研究テーマと抱負> 飛翔体による宇宙電磁環境探査、宇宙環境の地球超高層大気への影響に関する研究。<趣味など> ウェイトトレーニング、ドライブ、バレーボールなどのスポーツ観戦