

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01952

研究課題名(和文) 南北両極から探る高エネルギー粒子が大気環境に与える影響の観測的研究

研究課題名(英文) Study of the influence of energetic particle precipitation on atmospheric environment in both polar regions

研究代表者

水野 亮 (Mizuno, Akira)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：80212231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、南極域昭和基地と北極域EISCATトロムソサイトの南北両極域からの同時観測により、高エネルギー粒子降り込み(EPP)に伴う成層圏から下部熱圏の地球大気環境への影響を観測的に理解することを目指し、新たな技術を導入し観測情報の範囲拡大とデータ質向上をめざした。コロナ禍により北極域に渡航できず観測研究すべてを計画通りに進めることはできなかったが、南極域昭和基地では多周波ミリ波分光計、スペクトルリオメータを設置し観測を開始した。特に独自開発の導波管型周波数マルチプレクサを用いた多周波ミリ波分光計は、地上からのO3、NO、CO、HO2の多輝線ミリ波同時観測を世界で初めて実現させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

北極および南極では、太陽活動に伴い高エネルギーの荷電粒子が地球に降り込んでくる。こうした高エネルギー粒子は空気分子を電離して窒素酸化物を増加させ、オゾンを破壊するなど地球環境に影響を与える可能性が示唆されている。本研究は、観測データが乏しい地球大気への反応を新たな技術により観測的に明らかにすることを目指したものである。電波信号を周波数帯毎に分離して複数の超伝導受信機に分配し、それらの出力を再合成することで4種類の異なる分子の変動を同時に観測できる装置を開発・実用化し、世界初の地上からのミリ波多輝線大気観測を実現させた。この技術は電波天文学などの他分野のミリ波サブミリ波分光にも応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to understand the influence of energetic particle precipitation (EPP) on the global atmospheric environment from the stratosphere to the lower atmosphere through simultaneous observations from Syowa Station in the Antarctic region and the EISCAT Tromsø site in the Arctic region. By introducing new technologies, we aimed to expand the range of observational information and improve data quality. Due to the COVID19 that prevented us from traveling to the Arctic region, we could not complete the observational research as we originally planned, but we succeeded in installing a multi-frequency millimeter-wave spectrometer and a spectral riometer at Syowa Station and began observations. In particular, the uniquely developed multi-frequency millimeter-wave spectrometer using a waveguide-type frequency multiplexer realized the world's first simultaneous ground-based observations of O3, NO, CO, and HO2 in millimeter waves.

研究分野：大気科学、電波天文学

キーワード：高エネルギー粒子降り込み 極域科学 ミリ波分光 中間圏 大気環境変動

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽活動に伴う高エネルギー粒子の降り込みの大気影響

中層大気中の微量分子は、気候変動に係るエネルギー収支や有害な太陽紫外線の吸収など、地球環境で重要な役割を果たしている。微量分子は、フロンに代表されるような人為起源による影響の他、太陽活動に伴う高エネルギー粒子の降り込み(Energetic Particle Precipitation;以下EPPと記す)、同じく太陽活動に伴う紫外線量の変化、大気循環に伴う輸送、気候変動に伴う温度環境変化など様々な自然要因によっても変動する。

こうした自然要因の中で最も理解が遅れているのがEPPの影響である。具体的にはEPPにより電離された空気分子がイオン化学反応により反応性の高いNO_xやHO_xを生成し、その結果として有害紫外線を吸収するオゾンが減少する、という一連の化学反応であり、地球環境への影響の有無が議論となっている。その理解の遅れの大きな要因は因果関係の「果」に相当する地球大気側の微量分子変動の観測データが乏しいことが挙げられる。

(2) 昭和基地での地上ミリ波観測

我々は、こうしたEPPの影響、特にその時間変化を地上から捉えるため、昭和基地にミリ波分光計を設置し、2011年からモニタリング観測を行ってきた。その結果、EPPに伴う短期的な(数日間の)NOの増加イベントと冬季に数ヶ月にわたりNOが増加する季節変動を検出し、(1)EPP由来の短期イベントについては、昭和基地のような磁気緯度がやや低いオーロラ帯では、それまでの衛星観測で注目されていた太陽陽子の影響よりも放射線帯で加速された電子の影響が支配的であることを初めて示し、(2)季節変動は日照時間と相関があり光化学反応が変化の主要因であることを明らかにした(Isono et al. 2014)。ただし詳細に見ていくと、夏季の短期イベントは冬季に比べ相対的に弱い傾向が見られ、EPP由来のイオン化学反応の影響だけでなく、短期イベントも光化学反応(紫外線によるNOの解離)の影響を受けていることが示唆された。また、2014年には季節変動の振幅が大きく落ちこんだが、その時期には高エネルギー電子の総降り込み量が減少していたことが明らかになり、季節変動は降り込み電子の影響も受けていることが明らかになった。このように、EPPと光化学は同時に影響を与えている。さらにEPP起源のNO_xが冬季極域で下方輸送され高度分布が変化しているという報告もあり(下降流による間接効果)(Seppälä et al. 2007など)、大気輸送も重要なファクタである。EPP発生時に、こうしたイオン化学、光化学、輸送の影響がどのように効いているのか? それら素過程の観測的な理解が未解決な問題であり、本研究で明らかにしようとした課題である。

2. 研究の目的

1で述べた背景を踏まえ、本研究では高エネルギー粒子の降り込み(EPP)、特に電子の降り込みに伴い発生する分子の生成/消滅の素過程を、定点における複数分子輝線の同時連続観測を通して明らかにすることを目指した。そのために世界初の多周波超伝導ミリ波分光計、および降り込み電子の密度やエネルギースペクトルを観測するためのスペクトルリオメータを新たに導入し、さらに既存のレーダーやナトリウムライダーを組み合わせて観測体制を強化し、南極昭和基地とノルウェーのトロンソ EISCAT 観測施設の南北両極域からの地上観測を通して高エネルギー粒子降り込み時に起きる様々な変動を捉えることを目的とした。

3. 研究の方法

地上からの大気分子の観測法としては、ミリ波分光以外にも赤外線分光観測がある。逆問題を解いて鉛直分布を導出するのに必要な線幅-高度関係(衝突脱励起と不確定性関係から決まるいわゆる圧力幅関係)は、ミリ波では赤外線よりも周波数が低いため高度70-80 km程度までドップラー幅に飽和しない。そこでミリ波観測は中間圏までの鉛直分布とそれ以上の高度のコラム量が導出できる。すなわちミリ波は中間圏以上に感度を持つ唯一の観測手法と言える。

しかしながら、線スペクトルの周波数は分子種によって異なり、ミリ波帯では異なる分子間の周波数間隔が分光計が一度にカバーできる帯域幅よりも大きいため、同時に観測できるのは通常1ないし2分子程度である。実際、2011年から続けてきた昭和基地でのミリ波観測では、NOとO₃を同時に観測できないため、分光計受信機の設定を切り替えて交互に観測を行ってきた。特に強度の弱いNOを十分なS/Nで観測するためには長い積分時間を要し、O₃の観測は1日に8回各30分しか行うことができなかった。そこで名古屋大学では、新たに開発した導波管型周波数マルチプレクサ(Nakajima et al. 2020)を用いて、周波数帯ごとに入力信号を分離して複数の超伝導受信機に分配し、それを常温の中間周波数回路で再統合して最終

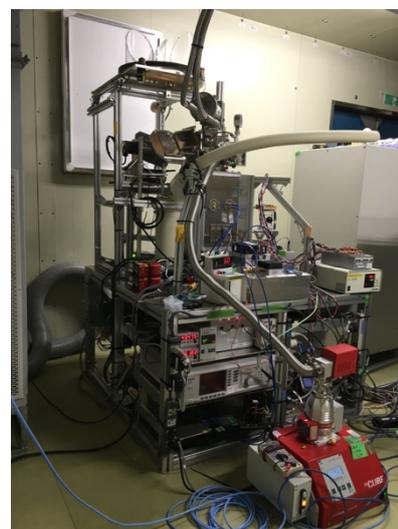


図1. 本研究で多周波化アップグレードした昭和基地の超伝導ミリ波分光計。

段のデジタルFFT分光計に導入する独自の多周波超伝導ミリ波分光計を構想した。本研究では、この新分光計を実用化し南北両極に設置して化学的な特性の異なる NO, O₃, CO, NO₂ を同時観測し、それらの比較を通して EPP、光化学、輸送といった異なる物理・化学過程を切り分けることを目指した。そして最終的には、モデル関係の研究協力者らの協力を得て、電離圏・熱圏シミュレーションなどのモデルとも比較し、EPP 時に生起する素過程を明らかにすることを目指した。ただし、採択された予算額では南北両極に新多周波分光計を設置するのは困難であり、これまでの運用実績の高い南極昭和基地に新多周波分光計を導入し、北極域トロムソ EISCAT 観測施設では既存の単周波分光計を用いて観測を進めることとした。さらにトロムソでは、2019 年度に液体窒素製造装置から水漏れがあり一時的に観測不能な状態となった。そしてその後のコロナ禍による渡航制限のため、復旧ができないまま研究期間が終了した。そのため、北極域の新たなミリ波観測データを本研究に活かすことはできなかった。

また、大気組成を変化させる原因となる高エネルギー電子の電子密度および高度分布等を観測的に明らかにするためのスペクトルリオメータを開発し、南極昭和基地に設置した。既存のイメージングリオメータと比較して、スペクトルリオメータは電子の鉛直分布が得られることが特長である。

4. 研究成果

(1) 多周波ミリ波分光計の開発

多周波観測のための導波管型周波数マルチプレクサは、我々が国立天文台(当時)の浅山准教授らと共同で開発し、北海道の名古屋大学陸別観測所やアルゼンチン南端部リオガジェゴス OAPA のミリ波分光計で使用している導波管型イメージバンドフィルタ(Asayama et al. 2015)をカスケード接続したものである。4ポートデバイスである 90 度ハイブリッドをバンドパスフィルタ前段に埋め込むことにより信号入射ポートと反射ポートを分離独立させ、反射ポートに現れるフィルタ阻止帯域の信号を次段フィルターの入力信号とする。これを繰り返すことで必要な周波数の信号を効率よく取り出すことができる。今回開発した導波管型周波数マルチプレクサは、250, 230, 200, 180 GHz 帯の4つの周波数帯に入力信号を分離し、ヘテロダイン受信において問題となるイメージバンドもあわせて除去できるものである(Nakajima et al. 2020)。ただし、低周波側の2つの周波数帯は導波管の伝送ロスが大きかったこと、4周波数帯すべての超伝導受信機を冷却するには省電力型の昭和基地の極低温冷凍機では冷却能力が不足していること等の理由のため、250, 230 GHz 帯の2つの帯域のみを用いて受信システムを構成することとした。同帯域内には、EPP によるイオン化学反応で増加する NO, NO₂、またそれらの触媒反応や紫外線により破壊されるオゾン(O₃)、化学的な寿命が長く鉛直輸送の良いトレーサとして利用される CO などの分子スペクトルが含まれており、本研究の目的であるイオン化学、光化学、輸送の影響を明らかにする上で必要十分な分子が含まれている。

図2に示すように、2つの超伝導受信機により 250, 230 GHz 帯の信号は 8-12 GHz の信号に変換され、その後続く中間周波数回路によってさらに周波数変換を行い、0-2 GHz のデジタルFFT 分光計の帯域内に再合成される。中間周波数回路では、山梨大学の関谷准教授らが開発した超伝導フィルタを用い、急峻なスカート特性により、隣り合う帯域相互のクロストークを抑えるようにした。ただし、初回の運用では昭和基地で同フィルタが故障したため、予備として用意していた常温のフィルタを用いて観測を行なった。また、多周波同時観測を実現させる上では、受信機の前に設置し大気から放射される電波信号を集めて受信機に導入する曲面鏡群とフィードホーンから構成されるビーム伝送光学系の広帯域化開発も必要であった。これは Gonzalez (2016) で提案されている周波数無依存光学系の設計手法を用いて GRASP や CHAMP などの物理光学シミュレータや電磁界シミュレータソフトを用いて設計/製作した。図3に高度角スイッチング法を用いて取得したスペクトルデータを示す。IF 出力周波数~517 MHz と~690 MHz にはエネルギー状態の異なる2本のオゾンと~1,740 MHz に CO のスペクトルが明瞭に確認できる。また、分光計帯域内には、矢印部分に NO と HO₂ の周波数が含まれているが、この強度スケールではノイズに埋もれて確認が難しい。24 時間積分すると NO も明瞭なスペクトルが確認でき、その時間変化の例を図4に示した。HO₂ は 24 時間積分しても検出限界以上の信号は検出できなかった。また図3には

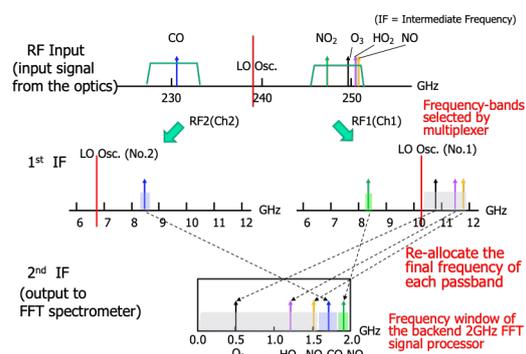


図2. 昭和基地での多輝線同時観測時(第1期)の超伝導ミリ波分光計の周波数変換チャート。

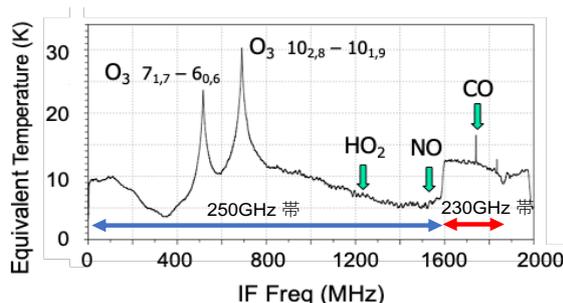


図3. 2020年10月6日に新ミリ波分光計の多輝線同時観測で取得したスペクトルデータ(1日平均)。

NO₂が含まれていないが、これは現地において外部からのスプリアスノイズの混信をさけるため、周波数設定を変更したため残念ながら同時受信を断念したことによる（なお、後述するようにその後の改良で復活させた）。このように、新たに開発した多周波ミリ波分光計により地上からのミリ波観測として世界初の多輝線同時観測が実現できた。

(2) 多周波受信機の改良

昭和基地において2020年11月に多輝線同時地上観測を始めて3ヶ月後の2021年2月に突発停電が発生し、それに伴い発振機が2台故障した。予備機が1台しかなかったため、230

GHz帯のCOの観測を断念した（第2期同時観測）。前述のNO₂観測の断念、超伝導フィルタの故障等も含め、今後10年以上の観測運用を考えた場合、このままの状態では観測を継続するよりも、ここで状況を改善して当初計画の性能を実現させ、今後の観測に備えた方が長期的な成果につながると判断し、もう一度研究員を第63次越冬隊員として派遣して観測システムの改良を行うこととした。現地の周波数設定に自由度を持たせるため、デジタルFFT分光計の周波数帯域を2.0 GHzから2.5 GHzに拡張した。デジタルFFT分光計の仕様により周波数帯域はソフトウェアの変更だけで対応できた。2.5GHz帯域に拡張した場合、周波数分解能は~61 kHzから~76 kHzに若干大きくなるものの、最も線幅の狭いNOのスペクトルでも線幅は500 kHz程度はあり、解析上大きな問題にならないと判断した。また、併せて中間周波数回路および超伝導フィルタの周波数設計も見直した。超伝導フィルタも故障の原因となった部分の力学的強度を増強し、専用の冷却ジグも準備した。これらの準備を踏まえて2021年12月末から昭和基地での多周波受信機の改良を開始した。2021年度末の時点で作業はまだ完了していないが、改良が完了した超伝導受信機部分では受信機雑音温度(SSB)で40 K程度の改善が確認された。その後光学系の再調整、デジタル分光計の調整、試験観測等を行い、6月中には当初計画通りのNO、O₃、HO₂、CO、NO₂の線スペクトルを含む周波数帯での同時観測（第3期同時観測）を開始する見通しである。

(3) スペクトルリオメータの開発

スペクトルリオメータに関しては、2019年度に装置一式を購入し（本研究とは別財源、第IX期南極地域観測・萌芽研究観測経費、代表：田中良昌）、アンプ、ソフトウェアラジオ受信装置（USRP）、制御PCの動作確認を行った。2020年度内に国内の柿岡地磁気観測所で仮組みし、国内試験観測を行った上で年度内に昭和基地に輸送する計画であったが、コロナの影響で国内試験観測を予定通りに実施することができず、昭和基地移設後に装置に不具合が発見された場合現地では対処できない事態に陥る可能性が大いにありうるため、輸送と設置は2021年度に先送りすることとした。その結果、本研究期間内には十分な観測データを取得することができなくなるが、今後10年以上にわたり同装置が運用され関連研究者に有益な観測データを提供することを考慮すると、拙速は避けるべきと判断した。国内実験では、まず目的とする20~60 MHzの銀河雑音電波の周波数スペクトルを約0.1秒間隔で取得できることを確認した。さらに実際の観測では、昭和基地で稼働中の大型大気レーダー（PANSYレーダー）からの電波干渉が予想されたため、PANSYレーダーのブランキング信号を利用し、PANSYレーダーが電波を送信していない時間のみデータを取得できるようにUSRPを用いたデジタル信号処理のハードウェアとソフトウェアを開発した。また、現地での隊員の負荷を低減でき、長期間安定して運用可能なソフトウェアの開発を行なった。

2022年1~2月に第63次南極地域観測において昭和基地にスペクトルリオメータを設置して連測観測を開始し、目的とする周波数帯の銀河雑音電波データが連続的に得られることが確認された。他方で、観測された周波数スペクトルには、PANSYレーダーとの干渉以外のノイズが含まれていたことから、64次隊においてこのノイズ対策を実施する計画である。今後、得られたデータから銀河雑音吸収を抽出し、最終的に電離圏電子密度プロファイルを導出可能かどうか検討する。なお、本研究で雇用した研究員は第63次南極地域観測越冬隊員として、本装置の現地での設置作業およびノイズ調査なども行なっている。

(4) 昭和基地のオゾン観測データの再吟味と新しい解析プログラムの開発

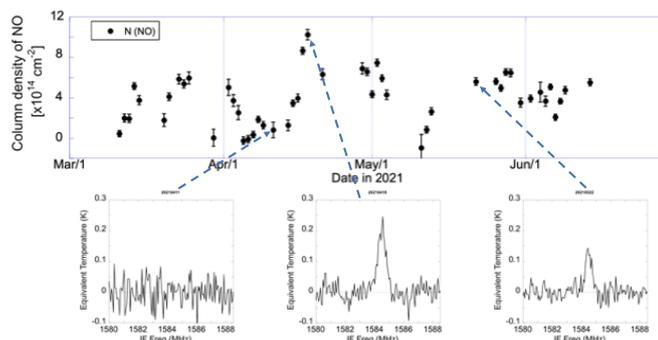


図4. 昭和基地の新ミリ波分光計で取得した2021年3月から6月にかけてのNOの日平均柱密度の時系列変化(上)と典型的なNOスペクトルデータの例(下)。NOの強度は100 mKオーダーと、上のオゾンと比べてはるかに弱い。



図5. 昭和基地に設置し、観測運用を開始したスペクトルリオメータ。

データ解析面、特にオゾンの鉛直分布解析の開発を進めた。これまで20年以上110 GHz帯でオゾンの観測を継続してきた北海道陸別に比べ、昭和の250 GHz帯での観測は、下層大気の影響を受けやすいことが明らかになった。特に高度角スイッチングで観測する2方向で雲等の影響により光学的厚みが局所的に異なる場合に大きな誤差が生じるなど、昭和でのオゾン観測から導出したオゾン混合比はばらつき大きいという問題があることが明らかになった。EPPの影響の研究では、短期間のオゾンの変動を十分な精度で評価しなければいけないため、導出したオゾン混合比のばらつき(=標準偏差)を抑えることは重要である。そこで、昭和基地で取得されているオゾンゾンデデータも活用した新たなデータスクリーニング条件を導出した。これにより改善は見られたものの、衛星測器AURA/MLSとの比較で、標準偏差は21–55 kmの範囲で17%以下とまだ大きなばらつきが残っている。今後光学的厚みのより適切な補正式を実験的に求めて改善を行いたい。

また、(1)で述べたミリ波分光計の多周波化アップグレードに伴い、新観測システムに対応するためのデータ解析プログラムの更新を進めた。新システムでは電波強度が弱いNO等の分子を観測するため、観測効率が高い周波数スイッチング法を用いて観測する。周波数スイッチング法は、同じ高度角(天頂)を向いた状態で周波数軸方向にスペクトルをシフトさせてスイッチングを行ない大気放射や受信機ノイズのオフセット成分を差し引く方法であり、高度角スイッチング法に比べて局所的な雲の影響を受けにくく、観測効率が高くS/Nの向上も見込まれる。通常周波数スイッチング法ではシフトさせた周波数だけ元に戻して反転させたデータとの平均を取ること(リフォームと称する)で、最終的にon-時間とoff-時間の双方のスペクトルを足し合わせて $\sqrt{2}$ 倍の感度向上が得られるが、反面、周波数のシフト幅を超えて広がったスペクトルデータの解析には不向きを考慮されていた。そこで、今回リフォームする前の段階のスイッチングデータを再現するフォワードモデルを作り、リトリバル解析を行うことを発想してプログラムの開発を進めた。その結果、衛星測器AURA/MLSとの比較で標準偏差が33–60 kmの範囲で10%以下まで抑えられた(図6)。またアベレーシングカーネルから求めた観測応答は21 kmまでの高度で0.5以上の値をとっており、線幅の広い低高度の成分まで情報を引き出せていることがわかった。ただし、衛星測器AURA/MLSとの統計誤差に相当するバイアスの値の振れが大きく、更なる改善が必要であり、今後、光学的厚みの補正改善やオゾンゾンデデータの活用等を行う計画である。

(5) 今後の展望

本研究により、我々が新たに開発した導波管型周波数マルチプレクサにより、20 GHzほど離れた2つの周波数帯の異なる分子からの線スペクトルを同時に受信し分光することが可能な超伝導ミリ波分光計を開発した。2020年10月には、地上から1台のミリ波分光計でO₃, NO, HO₂, COの同時観測を世界で初めて成功させた。

ただしコロナ禍や半導体不足などにより、計画通りに研究を進めることは難しかった。特に、北極域トロンソでは、2019年度に金属メッシュによるEISCATレーダーからの混信対策実験を成功させ、その後の観測に活かそうと意気込んでいたところへ2020年度、2021年度と現地に渡航できず、観測データをまったく取得できなかったのは大きな痛手であった。当初目的とした南北両極からの観測が叶わず、研究期間を終了することとなったのは非常に残念であった。他にも部品の故障によるトラブルや国内出張規制などのために遅れは生じたが、ミリ波分光計の多周波化とスペクトルリオメータの開発と設置・初期運用が達成できたことは非常に大きな意義があったと考えている。これらの装置は今後10年以上にわたって稼動すると期待される。現在は極大期にむけて太陽活動が活発になり始めているところであり、今後EPPイベントの数、規模が増加すると予想され、今後の観測が本当の正念場になる可能性が高い。それに備え、時間は想定以上にかかってしまったが、完成度の高い観測装置まで持っていったことには大きな意義があったと考えている。これらの昭和基地に結実させた新たな技術を北極域、特に太陽極大期に発生頻度が高まる太陽陽子イベントを観測できる極冠域へと拡張し、EPPに関する観測的知見を深めていくことに貢献したいと考えている。

<参考文献>

- Asayama et al., *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, 36, 445–454, doi: 10.1007/s10762-015-0148-6, 2015.
 Gonzalez, A., *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, 37, 147–159, doi:10.1007/s10762-015-0205-1, 2016.
 Isono, Y. et al., *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 7745–7761, doi: 10.1002/2014JA019881, 2014.
 Nakajima, T. et al., *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, 41, 1530–1555, doi: 10.1007/s10762-020-00740-z, 2020.
 Seppälä et al., *J. Geophys. Res. Atmosphere*, 112, D23303, doi: 10.1029/2006JD008326, 2007.

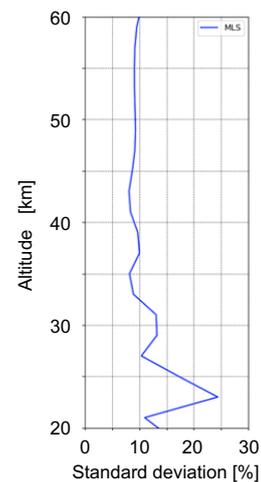


図6. 2021年7月から11月に昭和基地で取得した周波数スイッチングデータから導出したオゾン体積混合比をAURA/MLS衛星の結果と比較した時の両者の差の高度ごとの標準偏差。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tsuda, T. T., Y.-M. Tanaka, R. Tozu, K. Takizawa, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, T. D. Kawahara, and T. Nakamura	4. 巻 73
2. 論文標題 Relationship between Na layer and CNA variations observed at Syowa, Antarctic	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 73:7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01335-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Taku Nakajima, Kohei Haratani, Akira Mizuno, Kazuji Suzuki, Takafumi Kojima, Yoshinori Uzawa, Shin'ichiro Asayama, Issei Watanabe	4. 巻 41
2. 論文標題 Waveguide-Type Multiplexer for Multiline Observation of Atmospheric Molecules using Millimeter-Wave Spectroradiometer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Infrared Milli. Terahz Waves	6. 最初と最後の頁 1530-1555
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10762-020-00740-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mondal S., Sarkhel S., Agarwal Jay, Chakrabarty D., Sekar R., Yuan Tao, Cai Xuguang, Liu Alan Z., Nozawa Satonori, Saito Norihito, Kawahara Takuya D., Mlynczak Martin G., Russell James M.	4. 巻 124
2. 論文標題 On the Long Lasting "C Type" Structures in the Sodium Lidargram: The Lifetime of Kelvin Helmholtz Billows in the Mesosphere and Lower Thermosphere Region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 3110 - 3124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JA026630	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamamoto Mamoru, Hocking Wayne K., Nozawa Satonori, Vierinen Juha, Liu Huixin, Nishitani Nozomu	4. 巻 71
2. 論文標題 Special issue "Recent Advances in MST and EISCAT/Ionospheric Studies -- Special Issue of the Joint MST15 and EISCAT18 Meetings, May 2017"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 71:99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1070-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Xu Heqiucen, Shiokawa Kazuo, Oyama Shin-ichiro, Nozawa Satonori	4. 巻 71
2. 論文標題 High-latitude thermospheric wind study using a Fabry-Perot interferometer at Tromsø; in Norway: averages and variations during quiet times	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 71:110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1093-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogawa Y., Tanaka Y., Kadokura A., Hosokawa K., Ebihara Y., Motoba T., Gustavsson B., Brandstrom U., Sato Y., Oyama S., Ozaki M., Raita T., Sigernes F., Nozawa S., Shiokawa K., Kosch M., Kauristie K., Hall C., Suzuki S., Miyoshi Y., Gerrard A., Miyaoka H., Fujii R.	4. 巻 23
2. 論文標題 Development of low-cost multi-wavelength imager system for studies of aurora and airglow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100501 ~ 100501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2019.100501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka, Y.-M., T. Nishiyama, A. Kadokura, M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa S.-I. Oyama, R. Kataoka, M. Tsutsumi, K. Nishimura, K. Sato, Y., Kasahara, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Fukizawa, M. Hikishima, S. Matsuda, A. Matsuoka, I. Shinohara, M. Nose, T. Nagatsuma, M. Shinohara, A. Fujimoto, R. Latteck, 他5名	4. 巻 124
2. 論文標題 Direct Comparison Between Magnetospheric Plasma Waves and Polar Mesosphere Winter Echoes in Both Hemispheres	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 9626 ~ 9639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JA026891	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計37件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Akira Mizuno, Taku Nakajima, Tomoo Nagahama, Daichi Tsutsumi, Genma Mizoguchi, Naoto Sekiya, Takuma Hayashi, Yoshihiro Tomikawa, Mitsumu K. Ejiri, Masaki Tsutsumi, Kaoru Sato
2. 発表標題 New Millimeter-Wave Spectrometer for Simultaneous Multi-Line Observations Operating at Syowa Station
3. 学会等名 Quadrennial Ozone Symposium (QOS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoo Nagahama, Akira Mizuno, Taku Nakajima, Tianliang Yang
2. 発表標題 Exploring Short-term Variations in Mesospheric Ozone due to Large-scale Solar Flares Using a Ground-based Millimeter-wave Radiometer at Rikubestu, Japan and Aura/MLS Ozone Measurements
3. 学会等名 Quadrennial Ozone Symposium (QOS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tianliang Yang, Tomoo Nagahama
2. 発表標題 Time Variations of Mesospheric Ozone During the Solar Eclipse Observed with AURA/MLS
3. 学会等名 15th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics Symposium (STP-15) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akira Mizuno, Daichi Tsutsumi, Takahiko Kosegaki, Hiroyuki Iwata, Kouki Satani, Taku Nakajima, Kohei Haratani, Tomoo Nagahama, Syoki Iriyama, Genma Mizoguchi, Shixun Fan, Naoto Sekiya, Takuma Hayashi, Masaki Tsutsumi, Yoshihiro Tomikawa, Mitsumu K. Ejiri, Kaoru Sato
2. 発表標題 Current status of the new multi-frequency millimeter-wave spectrometer installed at Showa Station and initial results of multi-line observations
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshimasa Tanaka, Masayuki Yamamoto, Koji Nishimura, Hisao Yamagishi, Antti Kero, Akira Kadokura, Akira Mizuno, Akira Sessai Yukimatu, Herbert Akihito Uchida, Ryuho Kataoka, Yasunobu Ogawa, Takanori Nishiyama, Masaki Tsutsumi, Mitsunori Ozaki, Yoshizumi Miyoshi, Shin-ichiro Oyama, Fuminori Tsuchiya
2. 発表標題 Development of spectral riometer for observation of energetic electron precipitation at Syowa Station, Antarctica
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島拓, 溝口玄真, 山口倫史, 加藤智隼, 藤森隆彰, 藤井由美, 水野亮, 江崎翔平, 宮地晃平, 藤井泰範, 小嶋崇文, Shan Wenlei, 鶴澤佳徳, 野口卓
2. 発表標題 200 GHz帯直列接合型SIS素子の開発: 伝送線路と雑音温度特性の関係性
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 溝口玄真, 中島拓, 藤森隆彰, 水野亮, 鶴澤佳徳, 小嶋崇文, 藤井泰範, Shan Wenlei, 宮地晃平, 江崎翔平
2. 発表標題 大気微量分子観測のための200 GHz 帯SIS 受信機の開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島拓, 後藤宏文, 長濱智生, 野澤悟徳, 大山伸一郎, 三好由純, 川端哲也, 鈴木和司, 児島康介, 藤森隆彰, 水野亮
2. 発表標題 ノルウェー・トロムソにおけるミリ波分光観測装置を用いた中層大気微量分子観測
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第150回総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤宏文, 中島拓, 長濱智生, 野澤悟徳, 児島康介, 川端哲也, 藤森隆彰, 鈴木和司, 小川泰信, 水野亮
2. 発表標題 ノルウェー・トロムソにおけるNO柱密度の導出と、高エネルギー電子の降り込みとの関係性の考察に関する研究
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第150回総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中良昌, 山本真之, 西村耕司, 山岸久雄, Antti Kero, 門倉昭, 水野亮, 行松彰, 内田ヘルベルト陽仁, 片岡龍峰, 小川泰信, 西山尚典, 堤雅基, 尾崎光紀, 三好由純, 大山伸一郎, 土屋史紀
2. 発表標題 南極昭和基地におけるスペクトルリオメータ観測
3. 学会等名 南極における宙空圏研究・観測の将来構想に関する研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中良昌, 山本真之, 西村耕司, 山岸久雄, Antti Kero, 門倉昭, 水野亮, 行松彰, 内田ヘルベルト陽仁, 片岡龍峰, 小川泰信, 西山尚典, 堤雅基, 尾崎光紀, 三好由純, 大山伸一郎, 土屋史紀
2. 発表標題 JARE63における南極昭和基地でのスペクトルリオメータ観測
3. 学会等名 MTI研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Nakajima, G. Mizoguchi, Y. Saito, T. Nagahama, and A. Mizuno
2. 発表標題 Research on a Next-Generation Ground-Based Millimeter-Wave Atmospheric Radiometer
3. 学会等名 The 21st EA Sub-mm-wave Receiver Technology Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長濱智生, 水野亮, 中島拓
2. 発表標題 大規模太陽フレアによる中間圏オゾン短期変動の検出可能性に関する研究
3. 学会等名 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田健、長濱智生、中西慎吾
2. 発表標題 Analysis of the mesospheric ozone enhancement event in the Arctic winter with a new ISEE Chemical Lagrangian Model
3. 学会等名 JpGU _ AGU Joint Meeting 2020:Virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長濱智生、中西慎吾、藤田健、中島拓、水野亮
2. 発表標題 Development of a new ISEE Chemical Lagrangian Model to elucidate the atmospheric composition changes in the mesosphere
3. 学会等名 JpGU _ AGU Joint Meeting 2020:Virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林拓磨、關谷尚人、中島拓、小瀬垣貴彦
2. 発表標題 多輝線同時観測分光観測装置に用いる超伝導DB-BPFの開発
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島拓、溝口玄真、齊藤善治、長濱智生、水野亮、谷口暁星、藤森隆彰、児島康介、小林和宏、鈴木和司、林拓磨、關谷尚人、田島治、安達俊介、大塚稔也、小嶋崇文、鶴澤佳徳、藤井泰範、SHAN Wenlei、江崎翔平、宮地晃平、渡邊一世
2. 発表標題 南極/北極における中層大気環境計測のための広帯域ミリ波分光ラジオメータの開発研究
3. 学会等名 第21回 ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 溝口玄真、中島拓、水野亮、藤森隆彰、小嶋崇文、鶴澤佳徳、藤井泰範、SHAN Wenlei、江崎翔平、宮地晃平
2. 発表標題 200GHz帯広帯域広ダイナミックレンジ超伝導ミキサの開発
3. 学会等名 第21回 ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Tanaka, T. Nishiyama, A. Kadokura, M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, S. Oyama, R. Kataoka, M. Tsutsumi, K. Nishimura, K. Sato, Y. Kasahara, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Fukizawa, M. Hikishima, S. Matsuda, A. Matsuoka, I. Shinohara, M. Nose, T. Nagatsuma, M. Shinohara, A. Fujimoto, M. Teramoto, R. Nomura, 他4名
2. 発表標題 Simultaneous observation of magnetospheric plasma waves and PMWE observed by Arase satellite and MST radars
3. 学会等名 SuperDARN Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A.Mizuno
2. 発表標題 Research activity and instrumental development for microwave measurements at Nagoya University
3. 学会等名 NDACC Science Workshop in Tsukuba (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nakajima, T. Nagahama, A. Mizuno
2. 発表標題 Monitoring of Minor Constituents in the Middle Atmosphere at Polar Regions with the Millimeter-Wave Spectroradiometer
3. 学会等名 Chemical Aeronomy in the Mesosphere and Ozone in the Stratosphere (CHAMOS) Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, N. Umemura, A. Shinbori, S. Abe, S. Ueno, M. Nose
2 . 発表標題 Advanced tools for research on upper atmosphere and their future perspective
3 . 学会等名 World Data System Asia-Oceania Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Nozawa, T. T. Tsuda, N. Saito, T. Takahashi, T. Kawahara, Y. Ogawa, H. Fujiwara, S. Wada, Y. Ogawa, C. Hall, and A. Brekke
2 . 発表標題 Statistical study of Sporadic Sodium Layer (SSL) observed at Tromsoe
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, T. Nishiyama, A. Kadokura, M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, S. Oyama, R. Kataoka, M. Tsutsumi, K. Nishimura, K. Sato, Y. Kasahara, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Fukizawa, M. Hikishima, S. Matsuda, A. Matsuoka, I. Shinohara, M. Nose, T. Nagatsuma, M. Shinohara, A. Fujimoto, M. Teramoto, R. Nomura, 他4名
2 . 発表標題 Atmospheric responses in both hemispheres to relativistic electron precipitation
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Nozawa, T. T. Tsuda, N. Saito, T. Takahashi, T. Kawahara, Y. Ogawa, H. Fujiwara, S. Wada, T. Kawabata, C. Hall, and A. Brekke
2 . 発表標題 Statistical study of Sporadic Sodium Layer (SSL) observed at the high latitude station at Tromsoe
3 . 学会等名 The Tenth Symposium on Polar Science
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Mizuno, T. Nagahama, T. Nakajima, T. Kosegaki, S. Iriyama, G. Mizoguchi, K. Haratani, H. Iwata, D. Tsutsumi, N. Sekiya, T. Hayashi, Y. Tomikawa, M. K. Ejiri, K. Sato
2 . 発表標題 Development of multi-frequency mm-wave spectrometer for atmospheric observation
3 . 学会等名 The Tenth Symposium on Polar Science
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, A. Kero, K. Nishimura, R. Kataoka, O. Yasunobu, T. Nishiyama, A. Kadokura, A. Yukimatu, H. Yamagishi, Y. Miyoshi, M. Ozaki, F. Tsuchiya, M. Tsutsumi
2 . 発表標題 Spectral riometer observation of atmospheric ionization due to energetic electron precipitation
3 . 学会等名 The Tenth Symposium on Polar Science
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, T. Nishiyama, A. Kadokura, M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, S. Oyama, R. Kataoka, M. Tsutsumi, K. Nishimura, K. Sato, Y. Kasahara, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Fukizawa, M. Hikishima, S. Matsuda, A. Matsuoka, I. Shinohara, M Nose, T. Nagatsuma, M. Shinohara, A. Fujimoto, M. Teramoto, R. Nomura, 他4名
2 . 発表標題 Conjugate observation of magnetospheric plasma waves and polar mesosphere winter echoes by Arase satellite and MST radars in both hemispheres
3 . 学会等名 The Tenth Symposium on Polar Science
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 中西慎吾、長濱智生、水野亮、中島拓、石島陸
2 . 発表標題 中間圏大気組成変動機構の解明を目指したラグランジュ型化学輸送モデルの開発
3 . 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 中西慎吾、長濱智生、水野亮、中島拓、石島陸
2. 発表標題 ラグランジュ型化学輸送モデルによる中間圏大気組成の短期変動機構の研究
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 入山奨基、中島拓、長濱智生、水野亮、藤井泰範
2. 発表標題 ミリ波受信機の高感度化に向けた局部発振信号の雑音特性改善の研究
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小瀬垣貴彦、中島拓、長濱智生、水野亮、林拓磨、關谷尚人
2. 発表標題 ミリ波分光観測装置における多分子輝線同時観測IF系の開発
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島拓、小瀬垣貴彦、佐谷昂樹、原谷浩平、水野亮、鈴木和司、小嶋崇文、鵜澤佳徳、浅山信一郎、渡邊一世
2. 発表標題 多輝線同時観測のための200GHz帯導波管型マルチプレクサの開発 2
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島拓、原谷浩平、佐谷昂樹、水野亮、鈴木和司、小嶋崇文、鶴澤佳徳、浅山信一郎、渡邊一世
2. 発表標題 Development of a Waveguide-Type Multiplexer for Millimeter-Wave Receiver with Wide RF Range
3. 学会等名 Nobeyama Science Workshop -令和元年-
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 溝口玄真、山口倫史、中島拓、藤森隆彰、水野亮、鶴澤佳徳、宮地晃平、藤井泰範、小嶋崇文、Shan Wenlei
2. 発表標題 Development of Low Noise and High Dynamic Range SIS Mixer in Millimeter Band
3. 学会等名 Nobeyama Science Workshop -令和元年-
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐谷昂樹、中島拓、水野亮、渡邊一世、笠松章史、落合啓
2. 発表標題 次世代大気ミリ波分光計の導波管回路の開発と評価
3. 学会等名 2019年度先端ICTデバイスラボ・ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中良昌、門倉昭、小川泰信
2. 発表標題 オーロラの南極広域ネットワーク観測とデータベース
3. 学会等名 オーロラの南極広域ネットワーク観測とデータベース
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学宇宙地球環境研究所 水野研究室
<http://skx1.stelab.nagoya-u.ac.jp/index.html>
ナトリウム温度ライダープロジェクト
<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/~nozawa/LIDAR/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 良昌 (Tanaka Yoshimasa) (50425766)	国立極地研究所・研究教育系・特任准教授 (62611)	
研究分担者	野澤 悟徳 (Nozawa Satonori) (60212130)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授 (13901)	
研究分担者	長濱 智生 (Nagahama Tomoo) (70377779)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授 (13901)	
研究分担者	中島 拓 (Nakajima Taku) (90570359)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	堤 大陸 (Tsutsumi Daichi)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・研究員 (13901)	2019年6月より2021年3月まで雇用、第6 1次南極地域観測隊越冬隊員として派遣
研究協力者	溝口 玄真 (Mizoguchi Genma)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・研究員 (13901)	2021年9月より2022年3月まで雇用、第6 3次南極地域観測隊越冬隊員として派遣

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	コロラド大学 LASP			
ノルウェー	ノルウェー北極大学	EISCAT科学協会		
フィンランド	ソダンキラ 地球物理学観測所			