

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340145

研究課題名(和文) 太陽極大期の高エネルギー粒子の降込みが極域中間圏大気に及ぼす影響の観測的研究

研究課題名(英文) Observational study of atmospheric change in the polar mesosphere due to energetic particle precipitation during the solar maximum

研究代表者

水野 亮 (MIZUNO, AKIRA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：80212231

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽活動が地球大気に与える影響をとらえるため、南極昭和基地において3年間にわたるミリ波分光モニタリングを実施した。その結果、中間圏から下部熱圏の一酸化窒素(NO)が不定期に数日間で増加する短期変動と極夜前後に4ヶ月程度にわたり増加する季節変動を示すことを明らかにした。短期変動はそれまで注目されていた太陽陽子よりも磁気嵐の発生に伴い加速される放射線帯の高エネルギー電子が主要な役割を担っていること、季節変動は光化学反応と高エネルギー電子の降り込みが要因となっていることを観測的に明瞭に示した。

研究成果の概要(英文)：Temporal variation of nitric oxide (NO) in the mesosphere and the lower-thermosphere related to solar activities has been studied by using a superconducting millimeter-wave spectrometer at Syowa Station. Two types of time variations are identified; one is short-term variation lasting for several days and the other is seasonal variation occurring for about four months around the polar-night period. We revealed that the short-term variations are caused mainly by the energetic electrons precipitation from the radiation belt after the geomagnetic storm rather than solar proton events based on the comparison with the proton- and electron-flux data obtained by POSE satellite. On the other hand, the seasonal variations are related to both photochemistry and energetic electron precipitation; the time variation pattern is determined by the UV photo-dissociation of NO, and the amplitude of the variation is determined by the total flux of energetic electrons.

研究分野：大気科学、電波天文学

キーワード：中間圏大気 極域 リモートセンシング 太陽活動 環境変動

### 1. 研究開始当初の背景

中層大気中の微量分子は、太陽からの紫外線を吸収、地表からの赤外線を吸収・放射し、地球のエネルギー収支で重要な働きをしている。こうした微量分子の存在量は人為的要因および自然要因によってさまざまなスケールの空間的・時間的変動を示すが、太陽活動はその自然要因のうちの重要な一つである。北極および南極は磁力線が宇宙空間に開いており、太陽活動の極大期には太陽から放出された高エネルギーの太陽陽子が上部成層圏まで侵入して微量分子に影響を与えることが衛星観測などから示されていた。具体的には、高エネルギー粒子が窒素分子や酸素分子を電離し、それに引き続くイオン-分子反応が NO<sub>x</sub>、HO<sub>x</sub> といったオゾン破壊物質の増加とオゾンの減少を引き起こす。こうした上部成層圏から中間圏で起きるオゾン破壊は、破壊物質である NO<sub>x</sub> の光化学反応寿命の短いため数日間で終息するが、NO<sub>x</sub> が大気循環により成層圏の下部まで輸送されると光化学寿命が伸びるため、長期にわたって地球環境に影響を与える可能性があるといった指摘がなされていた。衛星観測は高エネルギー陽子が影響を与える空間範囲を描き出すには適している一方、周回軌道上を時々刻々と動いていくため、定点上の時間変化を追跡するには必ずしも適しているとは言えない。そこで、地上からの定点モニタリング観測により、定点上空の時間発展を詳細に研究することを発想した。

### 2. 研究の目的

本研究は、太陽活動に伴って地球大気に降り込む高エネルギー粒子によって引き起こされるイオン-分子反応が地球の中層大気、特に中間圏の微量分子組成に与える影響を、南極昭和基地に設置した地上ミリ波分光計を用いた連続観測に基づき定量的に評価することを目的とするものである。

### 3. 研究の方法

本研究における微量分子の観測にはミリ波分光計を用いた。ミリ波分光法は、熱的に励起された極性分子からミリ波帯に放射される線スペクトルを受信し、線スペクトルの形状および強度から微量分子の鉛直分布を導出する観測手法である。紫外線や赤外線などの吸収線スペクトルを観測する手法が太陽のような背景光原を必要とすることと対照的に、放射スペクトル線を観測するミリ波分光は背景光原を必要としないため、昼夜を通して 24 時間観測可能であることが大きな特長である。特に白夜、極夜といった昼あるいは夜が長期間継続する極域では、昼夜を問わず観測ができるミリ波分光のアドバンテージは大きい。

しかし密度が低い上層の大気から放射される線スペクトルの強度は微弱で、それをするだけ高い S/N で検出するための観測装置

が必要となる。名古屋大学では国立極地研究所と共同で超伝導を用いた高感度低雑音のミリ波受信機システムを開発した。同システムは徹底した省電力化開発により消費電力を従来機の 4 分の 1 まで抑え、発電量に限界がある南極昭和基地での連続モニター観測を実現可能にした。

本研究では、新たに開発した上記の観測システムを南極昭和基地に設置し、230-260GHz 帯に線スペクトルをもつ NO、NO<sub>2</sub>、オゾンのモニタリングを行うこととした。初年度に研究代表者の水野と連携研究者の磯野が南極地域観測隊の隊員として、現地での観測装置の設置・調整にあたり、磯野はそのまま越冬し 1 年目の観測運用を行なった。2 年目以降は、一般の越冬隊員が観測を継続している。観測データは、周波数分解能を下げたクイックルックデータを随時日本に転送しているが、フルレゾリューションのデータは年に一度南極観測船しらせで日本に持ち帰り解析を行っている。

### 4. 研究成果

#### (1) 南極昭和基地における微量分子ミリ波観測体制の確立

本研究で使用した超伝導ミリ波分光計は、2010 年 11 月に日本を出発した第 52 次南極地域観測隊の活動の一環として昭和基地の光学観測棟内に設置された。設置後の調整と試験観測がほぼ終了した 2011 年 4 月に本研究が開始した。初年度は電波強度校正用液体窒素ガラスデュワーの破損、超伝導素子を冷却するための極低温冷凍機の不具合等のトラブルが発生し、当初計画通りの連続観測は実現できなかったが、2 年目からは初年度の経験に基づき予備品を充実させ連続観測を可能にした。また、遠隔モニターソフトを開発し、日本から観測機器の稼働状態の監視を可能にした。他にも 2 年次、3 年次において、天候等により変化する大気透過度に合わせて大気補正用の誘電体板を遠隔で切り替える機構を追加したり、自動

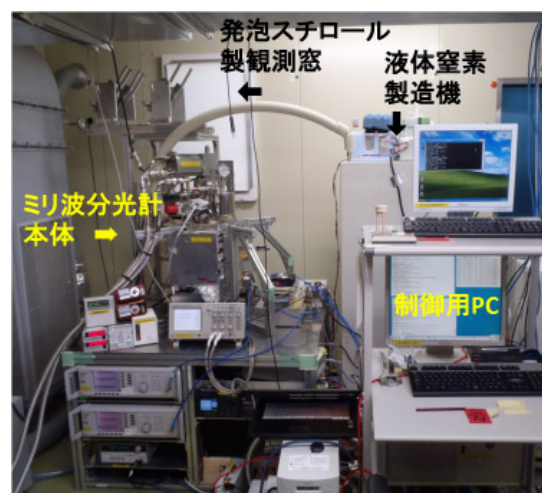


図 1. 昭和基地で稼働中の超伝導ミリ波分光計

的にプログラムした観測を遂行する観測スケジューラソフトを開発するなどの改良を加え、観測効率を向上させ、電波工学の専門知識のない一般の越冬隊員でも観測運用が行える観測システムに完成度を高めることができた。超伝導ミリ波受信機は、雑音温度 80K(DSB)程度と所期の目標値を達成し、20 時間の実観測時間 (デッドタイムを含む)、約 60kHz の周波数分解能でスペクトルデータのノイズを 15mK 程度まで落とすことができ 100mK の強度の微弱なスペクトルの信号を十分な S/N で検出することができた。

### (2) 太陽活動に伴う中間圏・下部熱圏の一酸化窒素 (NO) の変動 (短期変動) の検出

初年度当初はそれまでの衛星測器による観測実績のあった NO<sub>2</sub> とオゾンターゲットに観測を開始した。オゾンについては高い S/N で線スペクトルが検出できたものの、メインのターゲットである NO<sub>2</sub> に関しては有意な線スペクトルの検出ができない期間が続いた。初年度後半の 2012 年 1 月に 10MeV 以上の陽子フラックスが 6000pfu を超える観測開始以降最も大きな太陽陽子イベントが発生し、この時にメインターゲットを NO<sub>2</sub> から NO に変更したところ、50mK 程度の NO スペクトルの検出に成功した。NO は分光計帯域内の 3 つの異なる周波数に線スペクトルをもち、その 3 周波数全てで信号が検出されたため、受信機起因のスプリアスノイズではなく、大気中の NO からの線スペクトルであると結論した。また、10 日後には線スペクトルの強度が 1/2 程度に有意に低下したため、太陽陽子イベントに関連した NO の増加を検出したと結論した。

その後、同年 3 月にも同程度の太陽陽子イベントが発生し、NO の数日間にわたる増加を検出したが、4 月下旬には太陽陽子の増加がまったく検出されていないにもかかわらず NO の強度が 1 月および 3 月の太陽陽子イベントの増加量よりもさらに 2 倍程度大きい NO の増加イベントを検出した。この時期はちょうど高速太陽風が地球に到達し大きな磁気嵐が発生した時期に対応し、磁気嵐に伴い増加した放射線帯の相対論的電子の降りこみに起因する増加であると結論した。それまでの衛星観測でほとんど注目されずにいた放射線帯の高エネルギー電子による NO の増加を明瞭に示した貴重な観測結果であった。

### (3) 昭和基地上空における NO の短期変動の要因解明

2012 年の 1 月から 2013 年の 10 月までに取得した NO スペクトルデータについて、数日のタイムスケールで NO が増加する現象について詳細に調べた。要因と考えられる高エネルギー陽子と電子の降り込み量は、磁力線が昭和基地につながっている空間領域の降り

込み量を調べるため、低高度の極軌道を回る POES 衛星 (Polar Orbiting Environmental Satellite) のデータから導出した。また、太陽活動との関連を調べるため、地球磁場の擾乱を示す Dst 指数、Ap 指数などの量も解析に用いた。線スペクトルの強度から大気中の NO を 200K と仮定し、NO のカラム量を導出した。この NO カラム量は、線スペクトルの形状から高度 75km から 105km 程度の領域に存在する NO のカラム量を表している。

図 2 に 2012 年の NO カラム量の日平均値、磁気擾乱指数、陽子・電子の降り込み量の時系列変化を示す。4 月から 8 月の南極の冬期、すなわち極夜の前後は NO のカラム量が系統的に増加している (季節変動、後述)。この長期変動に重畳して、数日間の短期変動がいくつも確認できる。この短期変動の成分だけを抽出するため、2012 年および 2013 年の NO のカラム量の時系列変化から、1 年、半年周期の正弦関数で季節変動をフィッティングして差し引いた。そして、太陽陽子イベント期間 (5 例) と大規模な磁気嵐の発生期間 (9 例) を抽出し、NO の短期変動と陽子・電子のフラックスとの相関を調べた。2012 年の 3 月の太陽陽子イベントの際は、陽子だけでなく電子の降り込み量も増加しており、NO 増加の原因が陽子であると断定するのは難しかった。また、2012 年の 4 月のイベントのように陽子の有意な降り込みは見られないが、電子の降り込みがあり、NO カラム量が増加しているイベントが他にも見つかった。陽子の降り込み量と NO カラム量との間の相関プロットを作ったところ、両者には相関が見られなかったが、電子の降り込み量と NO カラム量との間には、相関係数 0.33 と弱いながらも t-検定により 99% 以上の信頼度で有意な相関が見られた。これらの解析結果から、昭和基地上空の中間圏・下部熱圏においては太陽陽子よりもむしろ磁気嵐によって加速され地球に降り込む放射線帯の高エネルギー電子が NO の生成で重要な役割を果たしていると結論した。これは、それまでほとんど注目されなかった高エネルギー電子の NO<sub>x</sub> への影響を観測的に明瞭に示した結果として、重要な成果である。

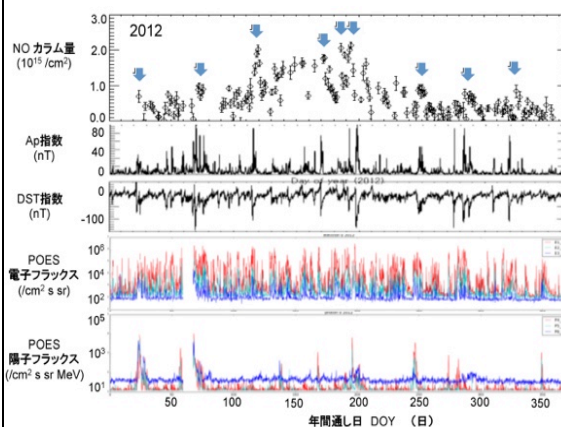


図 2. 2012 年の昭和基地上空の NO カラム量、磁気擾乱指数、陽子・電子降り込み量の時系列変化。矢印で示したところで数日間の NO の増加 (短期変動) が見られる。



(4) 2012年4月末のNO増加イベントにおける高エネルギー電子の dawn-dusk 非対称性の効果の検出

2012年4月末のNO増加イベントは本研究の観測期間中で最もNOの増加量が高い顕著なイベントで、高いS/NのNOスペクトルデータが取得できたため、年間通算日(以下DOYと記す)110日から125日の間のNOカラム量の3時間毎積分値を用いてより詳細な時間変化を調べることができた(図3)。POES衛星の電子フラックスデータに関しても同じ時間分解能で変化を調べた。DOY 115日にDst指数の急激な落ち込みが起き磁気嵐が発生した。その回復相で高エネルギー電子の降り込み量の増加とともにNOカラム量が増加し、5日間NOが生成・蓄積されDOY 120日でNOカラム量がピークに達した。NOカラム量の増加は単調な増加ではなく、磁気地方時の0時を境に夕暮れ側で一旦やや減少し明け方側で増加する傾向が見られた。これは高エネルギー電子の磁気ドリフトに伴い明け方側で電子が増加する dawn-dusk 非対称性に対応してNOカラム量も変化したためと解釈され、高エネルギー電子の降り込みによるNOの生成が1時間程度の短いタイムスケールで進行することを観測的に示唆している。

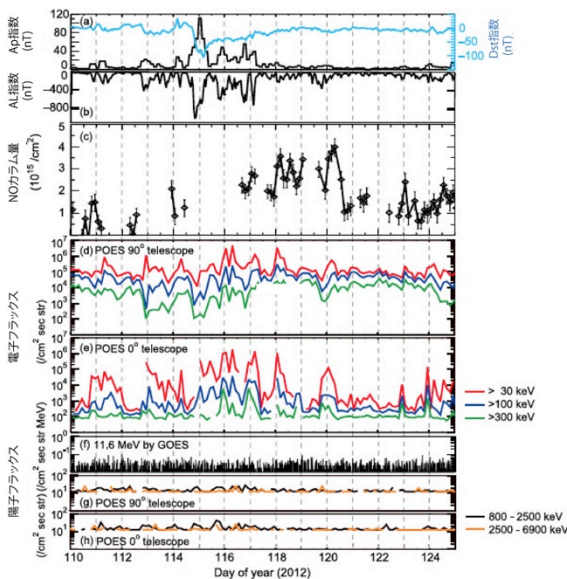


図3. 2012年4月末の昭和基地上空の3時間毎のNOカラム量、磁気擾乱指数、陽子・電子降り込み量の時系列変化。

(5) NOの季節変動の検出とその変動要因

(3)で簡単に触れたようにNOは極夜期の前後で増加する長期変動を示す。これは2012年、2013年の2年間でほぼ同様の傾向を示したことから季節変動を表すものと解釈された。こうした季節変動の要因としては、日照時間の季節変動に伴う光化学反応の違い、大気循環の季節変動に伴う熱圏からの下降流の影響等が考えられる。そこで、NOカラム量の季節変動と日照時間および光化学寿命が長く大気輸送のよいトレーサと考えられているCO分子の鉛直分布の時間変化(MLS衛星

の観測データを使用)との比較を行った。その結果、NOカラム量の時間変化パターンは昭和基地上空100kmの夜間長さの変化パターンとよい相関を示す一方、COの鉛直分布とは変化パターンが異なることが明らかになった。これは、昭和基地上空のNOの季節変化には大気輸送からの寄与は支配的ではなく、191nmより短波長の紫外線でNOが短時間で光解離し消失していく過程が変動パターンを規定していることを示唆している。

また、2012年から2014年までの3年間の季節変動の振る舞いを比較すると、前の2年間に比べ、2014年は季節変動の振幅が4分の1程度に大きく減少していることが明らかになった(図4)。太陽活動の活動度を示す太陽黒点数やF10.4指数などでは2014年が前2年間に比べ顕著に減少した傾向は見られず、むしろ若干高い傾向が出ていた。一方、POES衛星によって測定された陽子・電子のフラックスを調べたところ、2014年は季節変動でNOカラム量が増加する極夜前後の4ヶ月間で30keV以上の高エネルギー電子の降り込み量の月別積算量が大きく減少していたことが明らかになった。30keV以上の高エネルギー電子は中間圏から下部熱圏に到達することができる。

これらの観測結果より、昭和基地上空の中間圏・下部熱圏のNO量の季節変動には高エネルギー電子の降り込みによる「その場」反応がNO生成に寄与し、変動パターンの形成には日照による光解離反応が主要な役割を果たし、振幅にはNO生成に寄与する高エネルギー電子の降り込み量が影響していることが初めて観測的に示された。

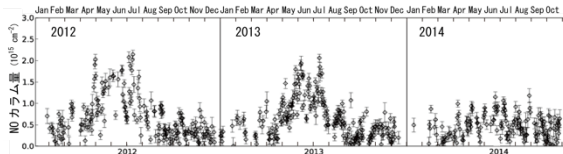


図4. 2012年から2014年の昭和基地上空NOカラム量。

(6) 昭和基地におけるミリ波分光モニタリングのまとめと今後の展望

本研究において、初年度は昭和基地でミリ波分光計によるモニタリング観測の基盤体制を固め、2年度以降の観測を通して、(3)-(5)に記載した成果を得た。それまでの衛星観測に基づく研究では、太陽陽子の影響が注目されていた。これはそれまでの研究者が、より磁気緯度が高く、磁力線が宇宙空間に開いて太陽陽子が降り込みやすいポーラーキャップ領域に注意を向けていたためと考えられる。これに対し、昭和基地が位置するオーロラ帯では、磁気緯度が低く磁力線も放射線帯につながっているため、磁気嵐に伴う放射線帯の高エネルギー電子の影響を受けやすいと考えられる。理論やモデルなどではこれまでも放射線帯の高エネルギー電子の重要性は指摘されてはいたが、それを支持する観測データはほとんど得られていな

かった。放射線帯の高エネルギー電子の影響を観測結果として明瞭に示した点が本研究の最も重要な意義であると考えている。

本研究では、一酸化窒素(NO)とともにオゾンの観測も行っている。メインターゲットはNOであり、スペクトル強度も弱いため観測時間の大部分はNOの観測に費やし、オゾンの観測は日に4回6時間毎ないし8回3時間毎に行っている。オゾンの観測データからは春先に出現するオゾンホールや冬季に見られる第3の極大(中間圏におけるオゾンの増加)など既知の現象は検出されている一方、NOの変動に呼応する太陽活動起源の混合比の変化は、いくつかの可能性を示唆する兆候は見えているものの、観測時間が断続的であることもあり、データ量と質が十分な段階に達しておらず、まだ明瞭な検出には至っていない。また、以前の23期の太陽極大期に比べ、現在の24期の極大期での太陽活動度が低く、高エネルギー粒子の降り込み量自体が少ないことも、オゾンの応答が顕著に見えにくい要因かもしれない。現時点ではNOとオゾンの同時観測はハードウェア的に困難であるが、実験室において同時観測を実現するための受信機システムの開発を進めている。今後は、複数の分子の同時観測、また南極だけでなく北極との比較観測(昭和基地とほぼ同じ磁気緯度のノルウェーのトロムソでの観測を2015年度より開始する計画である)を実施することにより、太陽活動の大気環境に与える影響の研究をより詳細に進めていきたいと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Isono, Y., A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, H. Fujiwara, H. Maezawa, and M. Uemura, “Ground-based observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica in 2012–2013”, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 9, 7745–7761, doi: 10.1002/2014JA019881, 2014. 査読有
- ② Isono, Y., A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, H. Fujiwara, and H. Maezawa, “Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica associated with a magnetic storm in April 2012”, *Geophysical Research Letters*, 41, 7, 2568–2574, doi:10.1002/2014GL059360, 2014. 査読有

[学会発表] (計31件)

- ① Mizuno, A., T. Nagahama, T. Nakajima, H. Oyama, Y. Isono, Y. Kojima, H. Maezawa, H. Ogawa, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, and T. Nakamura, “Monitoring of Chemical Compositions in the Mesosphere and Lower Thermosphere by Using a Network of Ground-based Millimeter-wave Spectrometers”, 11th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS 2013), Sapporo, 28 July - 1 August, 2014.
- ② Nagahama, T., A. Mizuno, T. Nakajima, H. Ohyama, Y. Isono, Y. Kojima, M. Tsutsumi, T. Nakamura, H. Maezawa, and H. Ogawa, “Monitoring of molecular compositions in mesosphere with a network of ground-based millimeter-wave radiometers”, Japan Geophysical Union meeting 2014 (JPGU2014), Yokohama, 28 April - 2 May, 2014.
- ③ Mizuno A., Y. Isono, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M. Ejiri, H. Fujiwara, and H. Maezawa, “Millimeter-wave observation of Nitric Oxide at Syowa Station in Antarctica”, International CAWSES-II Symposium, Nagoya, 18–22 November, 2013.
- ④ Isono, Y., A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, H. Fujiwara, and H. Maezawa, “The seasonal variation and the short-term variation of Nitric oxide in the MLT region at Syowa station”, 4th Symposium on Polar Science, Tachikawa, 12–15 November, 2013.
- ⑤ 水野亮、磯野靖子、長濱智生、桑原利尚、児島康介、前澤裕之、中村卓司、江尻省、有田真、町屋広和、大市聡、三浦夏美、堤雅基、山岸久雄、「昭和基地ミリ波分光計による太陽陽子イベントに伴う中間圏NO<sub>x</sub>の増加の検出」、日本地球惑星科学連合2012年大会、2012年5月20日–25日、千葉、幕張メッセ
- ⑥ 水野亮、磯野靖子、長濱智生、前澤裕之、桑原利尚、児島康介、福井康雄、中村卓司、有田真、町屋広和、堤雅基、富川喜弘、山岸久雄、森平淳志、中根英昭、「昭和基地からのミリ波分光計を用いた高エネルギー粒子の降り込みが中層大気組成に与える影響の観測的研究」、日本地球惑星科学連合2011年大会、2012年5月22

日-27日、千葉、幕張メッセ

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://skxl.stelab.nagoya-u.ac.jp/index.html>

地球電磁気・地球惑星圏学会 2012年度学生  
発表賞(オーロラメダル)受賞  
「南極昭和基地のミリ波分光観測で検出さ  
れたMLT領域のNOの増加」 磯野靖子

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

水野 亮 (MIZUNO Akira)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号: 80212231

### (2) 研究分担者

長浜 智生 (NAGAHAMA Tomoo)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号: 70377779

前澤 裕之 (MAEZAWA Hiroyuki)

大阪府立大学・理学系研究科・准教授

研究者番号: 00377780

### (3) 連携研究者

中村 卓司 (NAKAMURA Takuji)

国立極地研究所・研究教育系・教授

研究者番号: 40217857

堤雅 基 (TSUTSUMI Masaki)

国立極地研究所・太研究教育系・准教授

研究者番号: 80280535

中島 拓 (NAKAJIMA Taku)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号: 90570359

大山 博史 (OYAMA Hirofumi)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・研究員

研究者番号: 50600962

磯野 靖子 (Isono Yasuko)

国立極地研究所・研究戦略企画室・URA

(本研究参加時の所属: 名古屋大学・太陽地球  
環境研究所・研究員)

### (4) 研究協力者

児島 康介 (KOJIMA Yasusuke)

名古屋大学・全学技術センター・技術職員

桑原利尚 (KUWAHARA Toshihisa)

名古屋大学・理学研究科・大学院生

近藤秀作 (KONDOU Syusaku)

名古屋大学・理学研究科・大学院生

飯野孝浩 (IINO Takahiro)

名古屋大学・理学研究科・大学院生