

平成21年5月25日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18340150  
 研究課題名（和文） 磁気圏加速電子との相互作用による大気微量分子の組成変動機構の観測的研究  
 研究課題名（英文） A study of chemical composition changes in the mesosphere related with penetration of magnetospheric high energy electrons  
 研究代表者  
 長濱 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

研究成果の概要：太陽活動に伴う高エネルギー粒子の地球大気への侵入による地球の中間圏大気微量分子の組成に与える影響を観測的に明らかにするために、高周波数分解能デジタル分光計を搭載したミリ波大気放射分光観測装置を用いて、中間圏オゾンおよび二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）の連続観測を行った。その結果、250GHz帯でのNO<sub>2</sub>スペクトルの連続観測に初めて成功し、これらが中間圏に存在するNO<sub>2</sub>から放射されたものであることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2007年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：超高層大気環境，超高層物理学，地球観測，中間圏，磁気圏・電離圏，大気微量分子，加速電子，オゾン

## 1. 研究開始当初の背景

近年、太陽活動が地球周辺環境に与える影響の理解を目指した「宇宙天気」研究が大きな注目を集めている。宇宙天気が人間活動へ与える影響は、人工衛星の活用等により活動範囲を広げてきた人間社会においては、社会・経済的にも無視できなくなっており、宇宙天気と地球周辺環境との相互作用の理解は今日的な緊急の課題の一つである。国際的にも2004年からCAWSES（Climate And Weather of the Sun-Earth System）の枠組みのもと、太陽地球システムで生起する様々

な時間スケールの環境変動メカニズムの包括的な理解を目指した研究が国際的に進展しつつある。

## 2. 研究の目的

本研究は宇宙天気と地球大気との相互作用に着目し、太陽活動に伴う高エネルギー粒子（陽子および電子）の地球大気への侵入による地球の上層大気、特に中間圏の微量分子組成に与える影響を観測的に明らかにし、その程度を定量することで組成変動機構の解明を進めることが目的である。

### 3. 研究の方法

中間圏の微量分子組成への影響を観測するために、南米チリ共和国のアタカマ砂漠（南緯 23 度、西経 68 度、標高 4800m）に設置してある 250GHz 帯ミリ波超伝導受信器システムを用いて、オゾン、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HO}_x$  の放射スペクトルの同時観測を行い、これらの分子の高度分布を連続的に観測する。観測された中間圏微量分子の時間変動データと太陽活動および磁気圏加速電子のデータからミリ波観測期間中に観測地域上空で発生した磁気圏加速電子の侵入と微量分子組成の時間変動との関連を調べ、これらの現象の中間圏大気質への影響を評価する。

本研究では、高エネルギー現象、特に磁気圏加速電子の侵入によって組成変動の影響を受けると考えられる微量分子のうち、250GHz 帯のオゾンと  $\text{NO}$ 、 $\text{HO}_2$  の放射スペクトルを主に観測する。中間圏では  $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}$  と  $\text{HO}_2$  はそれぞれ  $\text{HO}_x$  と  $\text{NO}_x$  の主要な要素であり、高エネルギー現象による  $\text{HO}_x$  と  $\text{NO}_x$  の変動を知るには、 $\text{HO}_x$  と  $\text{NO}_x$  の変動を観測することでそれらを十分に把握することが可能である。また、オゾンは  $\text{HO}_x$  と  $\text{NO}_x$  の増加に伴う連鎖反応で著しく減少するため、変動の最も敏感なセンサーとして用いることができる。これらの理由から、我々はオゾンと  $\text{NO}$ 、 $\text{HO}_2$  の同時観測を主として行う。3 つのスペクトルを一台の受信器で同時にカバーするために、それぞれのスペクトルが近い周波数となる 250GHz 帯において観測を行う。

観測に用いる 250GHz 帯ミリ波超伝導受信器システムに、新たに開発する多周波同時高周波数分解能デジタル分光計を搭載し、オゾン等のスペクトルを同時に取得する。すでに超伝導受信器を用いたミリ波放射分光計がアタカマ砂漠に設置されており、オゾン、 $\text{ClO}$ 、水蒸気等のミリ波観測が行われている。本研究で開発を行うデジタル分光計は、高集積化された DSP (Digital Signal Processor) および FPGA (Field Programmable Gate Array) 等のデバイスを使って FFT もしくは自己相関デジタル信号処理を実現することで、調整不要ではがきサイズ程度の周波数帯域 50MHz、周波数分解能 10kHz の複数の周波数領域を同時にカバーするデジタル分光計を開発する。

250GHz 帯ミリ波超伝導受信器システムによる観測は、チリのアタカマ砂漠で行う。これは、1) ブラジル磁気異常帯の直下に位置するため、磁気圏加速電子が侵入しやすく、高い頻度で侵入イベントが期待できる、2) 気象条件が極めてよいため、1 年を通じて連続観測が可能である、3) すでに水蒸気等のミリ波連続観測が行われ、観測を行うのに十分な施設があること、が理由である。観測は

基本的に無人・自動で行い、適宜、衛星回線ネットワークを通じて豊川より装置の状態と観測データの質を監視する。3 ヶ月に 1 回程度の頻度でアタカマ砂漠に行き、装置のメンテナンスと観測データの回収を行う。

観測された微量分子のスペクトルデータから逆問題 (リトリーバル) により高度分布を求める。本研究においては微量分子の高度別時間変動を検出することが必要であり、リトリーバル法としては従来用いられているロジャース法ではなく、長濱が開発した高度分解能を一定にする手法を複数のスペクトルの同時リトリーバルができるようアルゴリズムを拡張する。

太陽活動や磁気圏活動と大気組成との相互作用を調べるための、太陽活動性や磁気圏加速電子の分布などに関するデータベースの整備を行う。さらに、磁場の構造からアタカマ砂漠上空での大気への加速電子の侵入状況を予測するモデルを構築し、さらに電子との衝突で電離した微量分子の化学反応過程および輸送・拡散過程のモデル化を行い、アタカマ砂漠で観測された微量分子組成の時間変動から大気との相互作用による影響評価を行う。

### 4. 研究成果

本研究では、まず 250GHz 帯ミリ波超伝導受信器システムに搭載する多周波同時高周波数分解能デジタル分光計の開発・評価を行った。中間圏オゾン、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HO}_x$  等、高エネルギー粒子の影響を受ける分子のスペクトルを同時に高い周波数分解能で分光観測するためには、複数入力の高周波数分解能電波分光計が必要となる。我々は、1 入力の高速度 A/D 変換器と FPGA を同一基盤に配置した評価ボードを入手し、帯域 50MHz の 4096 点実時間 FFT 回路を合成した。これに信号発生器から数 10MHz の信号を入力したところ、信号のスペクトルが連続的に取得でき、分光計として動作することを確認した。次に、この 1 入力の評価ボードによる高周波数分解能デジタル分光計をアタカマ砂漠のミリ波観測装置に組み込んで中間圏オゾン、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{HO}_x$  等、高エネルギー粒子の影響を受ける分子のスペクトルの検出を試みた。その結果、高度 4800m においては高速 A/D 変換器及び FPGA の冷却不足により動作時の装置温度が 80°C を越え、分光計としての連続動作が困難であることがわかった。この評価ボードは構造上、冷却用のファンやヒートシンク等を追加して取り付けることが困難で、ボードの形状の再設計が必要であった。再設計にかかる時間的な制約から、本研究では他のミリ波観測用に導入されていた広帯域デジタル分光計 (アキリス社・AC240) を本研究に用いることとした。これにより、複数の微量分子スペクト

ルを同時に取得することが困難となるが、時間ごとに観測周波数を切り替えることで、これに対応することは可能である。このAC240をアタカマ砂漠で安定して動作させるように、新たに冷却機構を取り付ける改造を行い、観測に用いることにした。AC240の筐体に付属している小型冷却ファンを取り外し、外部に大型シロッコファンを設置し、高地における十分な風圧を確保した。また、AC240ボード上のA/D変換器とFPGAに付いている冷却板にさらに高さ 10mmの冷却用放熱フィンを取り付け、冷却効率の向上を図った。改造したAC240の高地における連続動作を確認するために、これを減圧チャンバーに入れ、高度 5000m相当の環境での動作試験を行った。その結果、気温 30°Cの環境で1日間連続動作させた場合でも、A/D変換器、FPGAともに 60°C以下で動作することが確認できた。これらの成果はAOGS2007の招待講演で口頭発表した。



図1：減圧チャンバーにおける動作試験

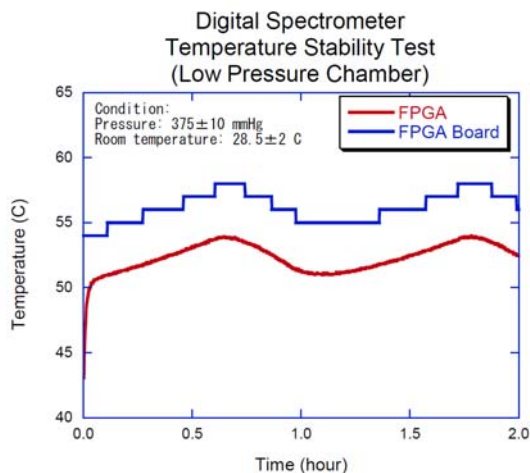


図2：高度 5000m 環境下でのデジタル分光計 (AC240) の動作試験結果の一部

分光計の改造と並行して、放射伝達モデルを用いてアタカマ砂漠における中間圏HO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、NOスペクトルの観測シミュレーションを行い、観測可能性を評価した。観測装置のシステム雑音温度を 150K (SSB)と仮定し、

MIPAS標準大気モデルによる中緯度地域での高度分布を用いて各スペクトルの放射強度を計算し、評価を行った。その結果、250GHz帯においては、定常状態では昼間のHO<sub>2</sub>、夜間のNO<sub>2</sub>は6時間積分で十分なS/Nのスペクトルが取得できるのに対し、NOは検出困難であること、高エネルギー粒子侵入時に各微量分子が1～2桁増加すればNOも6時間積分で有意に検出できることがわかった。さらに、アタカマ砂漠での中間圏HO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>スペクトルのシミュレーションデータを使い、観測で得られる高度分布の精度を評価した。250GHz帯においてHO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>スペクトルを6時間積分で観測した場合、高エネルギー粒子侵入時には高度 10kmの分解能でHO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>の増加が有意に検出できることがわかった。これらの成果は、COSPAR2006でポスター発表した。

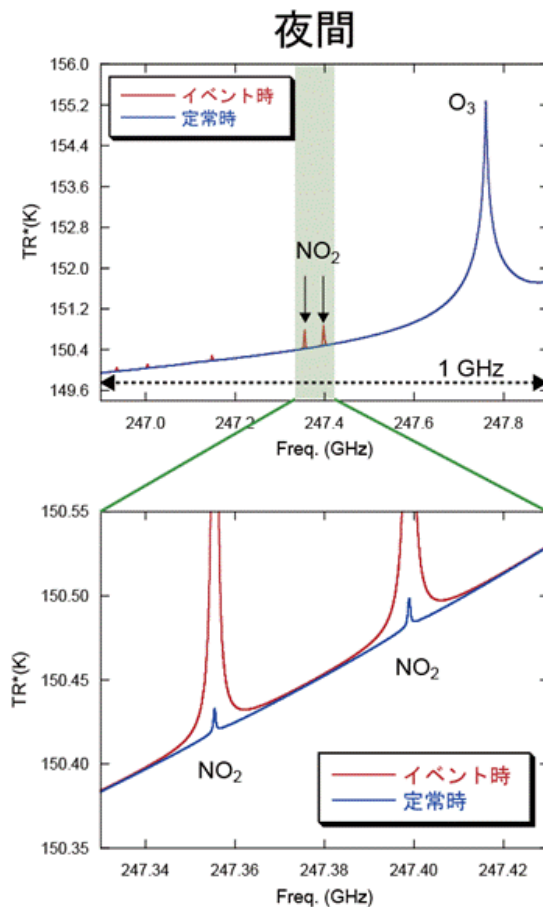


図3：アタカマ砂漠における中間圏NO<sub>2</sub>スペクトルの観測シミュレーション結果

改造した広帯域デジタル分光計 (AC240) をアタカマ砂漠に設置されているミリ波観測装置に組み込み、250 GHz帯における大気微量分子からの放射スペクトルの試験観測と性能評価を行った。まず、観測システムの動作を確認するために、N<sub>2</sub>Oガスを封入した光路長 10cmのセルを新たに製作し、そこからの放射スペクトルをミリ波観測装置で測

定した。その結果、 $N_2O$ スペクトルが分子の静止周波数で検出できた。また、ガスセル内の圧力に比例して、スペクトルの線幅が変化する様子を正しく検出した。このことから、ミリ波観測装置全体が正常に動作していることを確認した。

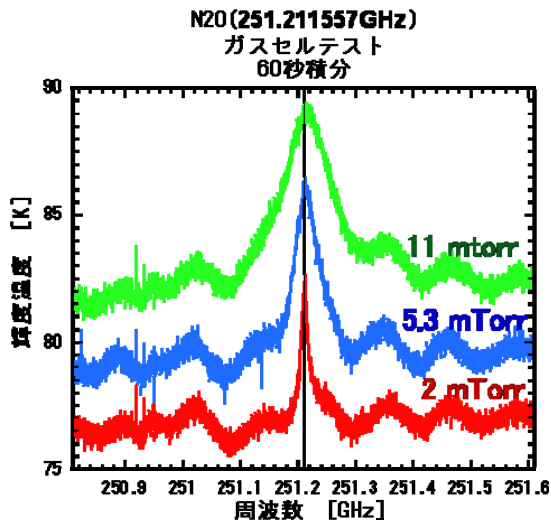


図4：測定されたガスセルからの $N_2O$ 放射スペクトル

次に、大気微量分子のなかでスペクトルの輝度温度が高いオゾンおよび $N_2O$ の検出を試みた。アンテナを高度角20度の方向に向け、1分間の積分観測を行ったところ、239.093GHzのオゾンスペクトルがS/N比100以上で検出できた。また、 $N_2O$ スペクトルも1日間積分観測により十分なS/Nで検出することができた。

以上の試験観測から、ミリ波観測装置全体が正常に動作し、大気観測に使用できることが確認できたので、高エネルギー現象と関連すると思われる中間圏オゾン、 $NO_x$ 、 $HO_x$ の観測を行った。デジタル分光計の制限から、観測対象としてまず、夜間にスペクトル輝度温度が高い $NO_2$ を選んだ。これは $NO_2$ が夜間には安定して存在し、時間変動をしないため6時間程度積分しても十分な精度で高度分布が求められると判断したからである。試験観測は2008年11月より開始した。高度角20度において2分の積分時間によって連続的にスペクトルを取得し、後にコンピュータ上で夜間のスペクトルデータのみ積分して、S/Nの良いスペクトルを得るようにした。その結果、夜間2.5時間の積分により247.355GHzの $NO_2$ スペクトルが輝度温度50mKで検出できた。観測された $NO_2$ スペクトルの線幅は約1MHzであった。このことは気圧による線幅の圧力広がりから、高度60km付近の $NO_2$ からの放射であることを表わしている。さらに、観測期間中の気象データが未入手のため、CIRA86気候値の気温データを用いて

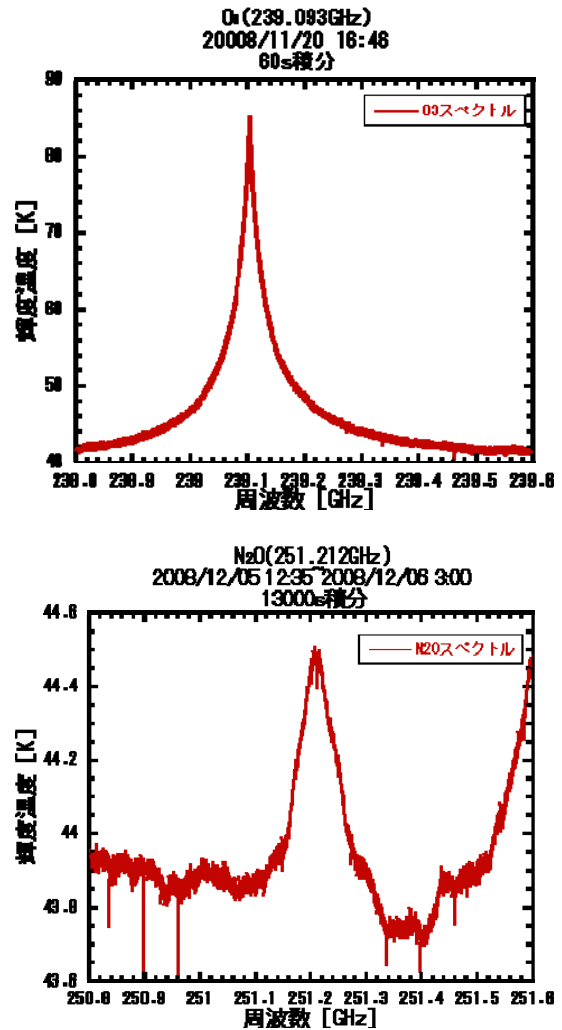


図5：アタカマ砂漠で観測されたオゾン(上)と $N_2O$ (下)スペクトル

$NO_2$ 高度分布の限定的な高度分布解析を行ったところ、 $NO_2$ が上部中間圏に存在する様子がわかった。この後、さらに2008年12月末までの約3週間観測を継続し $NO_2$ スペクトルを連続して観測することができた。このように中間圏の $NO_2$ が大気観測用地上ミリ波観測装置で連続して観測されたのは世界初である。しかし、アタカマ砂漠における悪天候および電源事情の悪化により、2009年1月から観測を停止せざるを得なかった。そのため、計画していた $HO_2$ の試験観測は行うことができなかった。また、連続観測を行った期間中は大きな磁気嵐など現象はおこらず、定常時の $NO_2$ スペクトルのみが観測されたと考えられる。本研究終了後もアタカマ砂漠にて $NO_2$ 、 $HO_2$ の観測を継続して行い、磁気嵐などの活動による中間圏微量分子の変動の検出を目指すことを計画している。

アタカマ砂漠で取得される微量分子のスペクトルデータの解析に必要な気象データ、太陽活動及び磁気圏加速電子のデータの整



図6：アタカマ砂漠の観測施設（上）とミリ波大気観測装置（下）

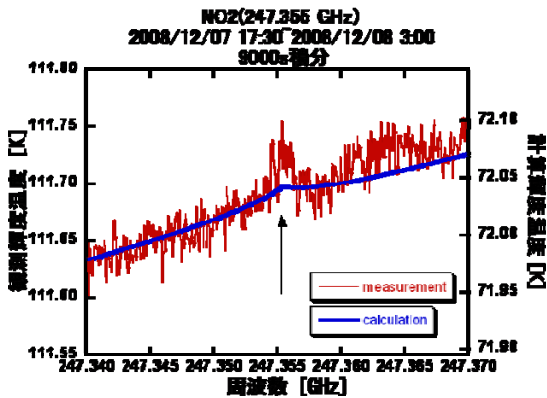


図7：アタカマ砂漠で観測されたNO<sub>2</sub>スペクトル（赤線）とシミュレーションスペクトル（青線）

備を研究期間中に継続して行った。気象データとしてはNCEP再解析データ、UKMOデータを収集し、CIRA86気候値を使って高度80kmまで延長した日々の気象データを整備した。さらに早期に観測値上空のデータを入力できるNASA Goddard Automailerによるデータ収集プログラムを新たに整備した。これにより観測から数ヶ月以内で精度の良い高度分布解析ができるようにした。

また、NOAAやGOES衛星による高エネ

ルギー粒子フラックス等のデータを整備した。時系列データを迅速に検索、表示できるように環境を整備し、アタカマでの観測において観測アラートなどの支援を行えるように準備した。また、微量分子の観測データとの関連・比較を迅速に行えるように扱いやすいデータフォーマットへの変換などの準備も行った。

##### 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 3 件）

①Kuwahara, T., Mizuno, A., Nagahama, T., Maezawa, H., Morihiro, A., Toriyama, N., Murayama, S., Matsuura, M., Sugimoto, T., Asayama, S., Mizuno, N., Onishi, T. and Fukui, Y., “Ground-based millimeter-wave observations of water vapor emission (183 GHz) at Atacama, Chile”, *Advances in Space Research*, 査読有, 42, 2008, 1167-1171.

②Nagahama, T., Nakane, H., Fujinuma, Y., Morihiro, A., Mizuno, A., Ogawa, H. and Fukui, Y., “Ground-Based Millimeter-Wave Radiometer for Measuring the Stratospheric Ozone over Rikubetsu, Japan”, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 査読有, 85, 2007, 495-509.

③Nagahama, T., Mizuno, A., Maezawa, H., Nakane, H., Fujinuma, Y., Morihiro, A., Ogawa, H. and Fukui, Y., “Continuous Measurements of the Stratospheric and Mesospheric Ozone by Using Ground-based Millimeter-wave Radiometers”, *Proceedings of International Conference on Submillimeter Science and Technology*, 査読有, 2006, 20-23.

〔学会発表〕（計 8 件）

①Mizuno, A., et al., Millimeter-wave observations of the stratospheric and mesospheric chemical composition change over Syowa station, 第32回極域宙空圏シンポジウム, 2008年8月4日, 国立極地研究所、東京.

②Nagahama T., Mizuno, A., Maezawa, H., Toriyama, N., Kojima, Y., Kuwahara, T., Toki, K., Terada, R. and Morihiro, A., Measurements of mesospheric O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and HO<sub>2</sub> with a ground-based millimetre-wave radiometer at Atacama, Chile, Quadrennial Ozone Symposium 2008, 2008年6月30日, Tromsø, Norway.

③Kuwahara, T., Mizuno, A., Nagahama, T.,

Maezawa, H., Terada, R. and Morihira, A., A first result of ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric C10 over Atacama, Chile, Quadrennial Ozone Symposium 2008, 2008年6月30日, Tromsø, Norway.

④長浜智生、水野亮、前澤裕之、桑原利尚、寺田良平、森平淳志、南米チリ・アタカマ高地における成層圏C10のミリ波観測、地球惑星科学連合大会2008、2008年5月26日、幕張メッセ、千葉。

⑤Nagahama, T., Mizuno, A., Maezawa, H., Kuwahara, T., Sugimoto, T., Matsuura, M., Murayama, S., Toki, K., Toriyama, N., Morihira, A. and Fukui, Y., Ground-based Millimeter-wave Measurements of Vertical Distribution of H<sub>2</sub><sup>18</sup>O in Upper Stratosphere and Mesosphere over Atacama, Chile, 4th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, 2007年7月31日, Bangkok, Thailand.

⑥Nagahama, T., Mizuno, A., Maezawa, H., Toriyama, N., Kuwahara, T., Sugimoto, T., Matsuura, M., Murayama, S., Morihira, A., Nakane, H. and Fukui, Y., Ground-based Millimeter-wave Measurements of Vertical H<sub>2</sub><sup>18</sup>O Distribution at Atacama, Chile, 2006 American Geophysical Union Fall Meeting, 2006年12月11日, San Francisco, U.S.A..

⑦Nagahama, T., Mizuno, A., Maezawa, H., Toriyama, N., Kuwahara, T., Sugimoto, T., Matsuura, M., Murayama, S. and Morihira, A., A Plan for Continuous Measurements of Mesospheric Ozone, NO<sub>x</sub> and HO<sub>x</sub> with a Ground-based Millimeter-wave Radiometer in Chile, 36th COSPAR Scientific Assembly, 2006年7月17日, Beijing, China.

⑧長浜智生、水野亮、前澤裕之、桑原利尚、杉本朋世、松浦真人、村山智史、森平淳志、ミリ波分光法による中間圏オゾン、HO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>のモニタリング観測計画、日本地球惑星科学連合2006年大会、2006年5月15日、幕張メッセ、千葉。

[その他]

研究者アウトリーチ活動

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

研究者情報ホームページ

<http://kenpro.mynu.jp:8001/Profiles/002>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長濱 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

### (2) 研究分担者

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

前澤 裕之 (MAEZAWA HIROYUKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：00377780

三好 由純 (MIYOSHI YOSHIKAZUMI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：10377781

### (3) 連携研究者

なし