

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18403008
 研究課題名(和文) チリ共和国アタカマにおける成層圏・中間圏の水蒸気同位体およびオゾンの観測的研究
 研究課題名(英文) Observational study of the stratospheric and mesospheric water vapor isotopomers and ozone over Atacama highland in Chile
 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

研究成果の概要(和文)：標高 4800m のチリ共和国アタカマ高地に 180GHz 帯から 260GHz 帯の高感度ミリ波分光観測装置を設置し、中層大気中の水蒸気およびオゾン破壊関連物質の新たな観測拠点を整備した。水蒸気同位体 H_2^{18}O の 4 カ月にわたる連続観測を遂行し、AURA/MLS の H_2O データと比較することにより、アタカマ高地上空で春から夏にかけてこの高度で ^{18}O の同位体偏重度 $\delta^{18}\text{O}$ が増加していることを見出した。

研究成果の概要(英文)：We established a new millimeter-wave spectroscopic monitoring station at high altitude place in the Atacama highland (4,800m altitude), Chile, in order to observe water vapor isotopomers and ozone depleting substances in the middle atmosphere. We carried out a continuous measurement of H_2^{18}O for four months and newly revealed that the ^{18}O isotopic deviation factor, $\delta^{18}\text{O}$, increases from spring to summer over Atacama.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2007 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：環境変動,大気現象,リモートセンシング,超伝導材料・素子

1. 研究開始当初の背景

中層大気中の水蒸気は、上部成層圏から中間圏における光化学や成層圏の放射エネルギーバランスで重要な役割を果たしていると考えられているが、観測データは必ずしも豊富ではなかった。衛星からの水蒸気観測が本格化する 1990 年代以前は気球を用いた

「その場」観測がわずかに行われていただけであったが Oltmans のグループの冷却型露点湿度計による観測は、1981 年から 20 年以上にわたって同一地点で定期的に行われた唯一のもので、下部成層圏の水蒸気の増加を明瞭に示した。気球による「その場」観測は、高い高度分解能で測定できる利点がある反

面、高度が 30km 程度の下部成層圏までしかカバーできない弱点がある。1984 年には SAGE II が、1991 年には HALOE が打ち上げられ、衛星観測により広範囲なデータが取得できるようになった。ただし、衛星による水蒸気観測の多くは太陽掩蔽法を用いており、日の出時と日没時のデータしか取得できなかった。全球的なデータを取得できる半面、緯度方向の衛星の移動に 1 ヶ月程度要するため、定点のデータは 1 ヶ月に 1 度程度の割合でしか取得できなかった。

1990 年代にはいって、新たに進歩したのがマイクロ波による地上観測で、22GHz 帯の水蒸気分子から放射される線スペクトルが観測されるようになった。昼夜を問わず 24 時間観測可能なこと、また地上から定常的に観測できるため、欠損なく（無論天候等の影響は若干受ける）連続観測を行うことができるのが大きな特長である。米国およびスイスのグループが観測を進めていた。赤外線のパラフィン分光もいくつか観測例があったが、下層大気による吸収が大きいため、気球または航空機で対流圏より上まで測定装置を持ち上げる必要があり、連続観測には不向きであった。本研究は、下層大気の吸収が小さい標高 4,800m の高地から 180GHz から 260GHz 程度のミリ波帯で観測を行うことにより、通常の H_2O のみならず、その同位体である $H_2^{18}O$ 、HDO およびオゾン等も同一地点で観測するという点が他にない特徴である。

2. 研究の目的

成層圏の水蒸気は主要な温室効果ガスのひとつであり、また上部成層圏から中間圏におけるオゾン破壊で主要な役割を演じる HOx ラジカルの源でもある。成層圏水蒸気の増加により成層圏は寒冷化し、対流圏は温暖化する。特に極域においては成層圏の寒冷化が極域成層圏雲の発生頻度を増加させオゾンホール拡大・長期化を招くと考えられている。本研究は、南米チリ共和国のアタカマ高地に設置した超伝導ミリ波分光放射計を用い、水蒸気同位体対比およびオゾンの連続観測を行い、成層圏から中間圏における放射バランスの鍵を握る水蒸気とオゾンの季節変化・経年変化の実態把握とその変動メカニズムの解明を目指している。

上記の目的を達成するため、以下の項目にわたり観測装置の開発とそれを用いた観測を行う。

- (1) 180-210GHz 帯および 230-260GHz 帯のダブルサイドバンド受信器用の超伝導素子の低雑音化開発を進める。
- (2) 現有の 180-210GHz 帯大気分子分光観測装置を用いた H_2O および $H_2^{18}O$ の連続観測を行う。
- (3) 新たな 230-260GHz 帯大気分子分光観

測装置を開発し、水蒸気同位体 HDO のスペクトル観測を行う。

(4) 亜熱帯域に位置するアタカマ高地における成層圏および中間圏水蒸気とその同位体の高度別季節変動・経年変化等の動態を観測的に明らかにする。

3. 研究の方法

180GHz 帯から 260GHz 帯の稼働型のインピーダンス調整機構を持たない広帯域の PCTJ (並列結合 2 接合)型超伝導 SIS ミクサ受信器を開発し、標高 4,800m のチリ共和国アタカマ高地のミリ波大気分光観測装置に搭載し、水蒸気および水蒸気同位体の連続観測を行う。同高地での連続観測を実現するため、自動観測制御システムと遠隔モニタ・制御システムを開発する。

また、研究期間半ばより電子計測メーカーにより実用化された高速 FFT 型デジタル分光計を従来より用いていた音響光学型分光計 (AOS) に置き換えることにより、周囲の温度変化に対する安定性を向上させ、データの信頼度を高める。同デジタル分光計へのリプレースに伴い、中間周波数 (IF) 信号処理系の改良と観測制御プログラムの改良を行う。

観測は水蒸気同位体 $H_2^{18}O$ の観測を軸に同分子の連続観測から中層大気の高高度別時間変動の実態を把握するのと並行して、受信機開発の状況および大気の状態を見ながら適宜 H_2O 、HDO の試験観測を行う。 $H_2^{18}O$ の連続観測結果と AURA/MLS 等の衛星測器による H_2O 観測データとの比較を行い、同位体比の季節変動の実態把握とその原因を探求する。また、研究期間最終年度は、国際宇宙ステーション「きぼう」に搭載された日本のサブミリ波リムサウンダー SMILES が打ち上げられ観測を開始したため、SMILES の重要ターゲットのひとつである一酸化塩素 (ClO) の観測を行い、SMILES データとの比較、相互検証を行う。

4. 研究成果

(1) 180-210GHz 帯 (導波管サイズ WR-5) と 230GHz-260GHz 帯 (導波管サイズ WR-4) の PCTJ 型超伝導 SIS ミクサを開発した。前者は中心周波数 2.1GHz、帯域幅 1GHz の冷却 HEMT 増幅器、後者は中心周波数 6GHz、帯域幅 4GHz の冷却 HEMT 増幅器を介して IF 信号処理系に接続され、さらに周波数変換、フィルタリング、増幅を行い、最終的に音響光学型分光計 (中心周波数 2.1GHz) およびデジタル分光計 (中心周波数 0.5GHz) に導入しスペクトル信号を分光する。実験室における受信器システム雑音温度測定により、前者は 150K (DSB)、後者は 100K (DSB) と世界最高水準の受信機性能を得ている。

(2) 標高 4,800m のアタカマ高地では気圧が平



図1. チリ共和国アタカマ高地(標高 4,800m)のミリ波大気分子観測施設。背景のドームは、同地域で稼働中の名古屋大学理学研究科の NANTEN2 電波望遠鏡。

地の約半分まで低下する。これに伴い、ミリ波信号を吸収する下層大気の水蒸気量が平地の半分以下まで下がるため電波強度が微弱な水蒸気同位体等の極微量の分子からの放射スペクトル線が観測可能となる一方、平地とは異なる環境下での新たな観測機器への対応が必要となった。ミリ波観測の電波強度較正では、液体窒素冷却の冷却黒体と室温の常温黒体の2つの基準電波信号を用いて強度較正係数を導出するが、気圧の低下に伴い、液体窒素製造量の低下と液体窒素蒸発量の増加という問題が生じ、液体窒素製造装置の大型化と液体窒素断熱容器の改良を行い、高地での観測に対応した。また、気圧の低下は、電子機器の放熱効率の低下を招き、音響光学型分光計の光源であるダイオードレーザの不安定化、およびデジタル FFT 分光計の集積回路の誤動作等の障害を引き起こした。ダイオードレーザに関しては、シリコングリス等の放熱材を用いて温度安定化を図ったが、最終的に観測使用可能なレベルの安定度には達しなかった。一方、デジタル分光計は冷却ファンの大型化と筐体内の空気の流路の改良により冷却効率を向上させ、実験室での減圧チャンバーを用いた試験評価を経て、標高 4,800m でも安定に動作させることが可能となり、最終的に音響光学型分光計をデジタル分光計にリプレースした。

(3)デジタル分光計の導入に伴い、それまでの MS-DOS による観測制御システムから Windows-Linux の観測制御システムに移行した。デジタル分光計はメーカーから Windows 対応ドライバが供給されていたため、これを活用するためにデジタル分光計の制御は Windows を用いることとした。一方、研究グループで自作した観測制御のメインプログラムは、自由度が高い Linux を用い、分光計と Socket 通信で装置間の同期を取るようにした。また、html による観測データ・

機器ステータスのグラフ表示やウェブカメラ画像などを用い、インターネットを介した遠隔モニタリングシステムを開発した。これにより、日本からの観測データと装置の状態の準リアルタイムモニタを可能にした。

(4) また、230-260GHz 帯観測システムの開発において、光学系内のビームパターンを測定するための測定評価システムを開発し、ビームを集光するための曲面鏡群の効率的で高精度な設定・調整手法を確立した。またこの測定システムを用いた評価過程で、一次ホーンの問題点が明らかになり、ホーンの再設計・製作を行ない、ほぼ設計通りのビームを得ることができた。現時点での伝送系の損失は 0.35dB、光学系込みのシステム雑音温度は約 100K(DSB)と世界トップクラスの性能を達成した。

(5)観測面においては、チリ共和国アタカマ高地の名古屋大学ミリ波大気観測施設において、180GHz 帯の H₂O スペクトルの観測に成功し、同データより高度 40km から 64km の水蒸気混合比の鉛直分布の導出した (Kuwahara et al. 2008)。また、同観測により、ダブルサイドバンド受信器では H₂O スペクトルのあるシグナルバンドと同スペクトルがないイメージバンドで大気透過度が大きく異なり、精度の高い大気補正を行うためには受信機のシングルサイドバンド化が必要であることが明らかになった。

また、2009 年には、230-260GHz 帯の受信

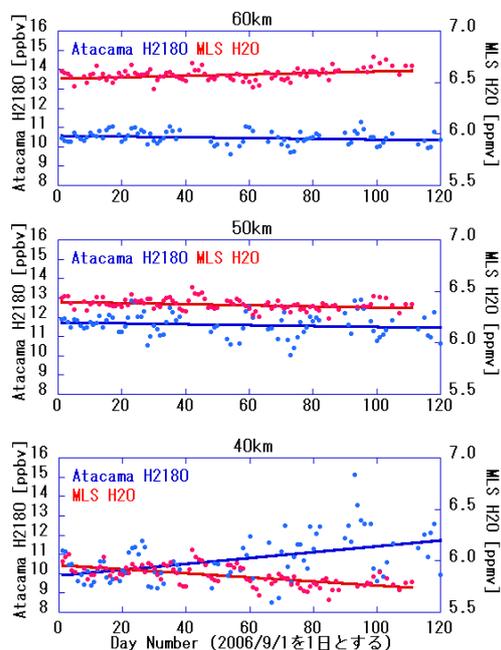


図2. チリ共和国アタカマ高地上空における2006年9月から12月にかけての高度40km, 50km, 60kmの高度ごとのH₂O(赤丸), H₂¹⁸O(青丸)混合比の時間変化。

機システムを用い、241GHz 帯の HDO の試験観測を行い、約 20mK の非常に微弱な線スペクトルの検出に成功した。

(6) 204GHz 帯の H₂¹⁸O スペクトルの連続観測は、2006 年の 9 月から 12 月の 4 カ月間にわたり行い、春から夏にかけて高度 40km では約 4%/月で混合比が増加している傾向が見られる一方、高度 50km, 60km では混合比がほぼ一定で推移していることを明らかにした。AURA 衛星のミリ波リムサウンダ(MLS)によって得られたアタカマ高地の位置での H₂O のデータでは、高度 50km, 60km はほぼ同様の傾向が見られる一方、40km では H₂¹⁸O とは逆に混合比が減少している傾向が見られ、春から夏にかけてこの高度で ¹⁸O の同位体偏重度 δ¹⁸O が増加していることを見出した。これは対流圏から成層圏に流入してくる際の水蒸気の輸送に伴う同位体分別では説明が難しく、何らかの化学反応に伴う同位体置換が効いているものと考えられる。

(7)2009 年度 9 月に日本のサブミリ波観測機 SMILES が国際宇宙ステーション「きぼう」に設置され観測を開始することになった。比較研究のため、SMILES の最重要ターゲットの一つであり、オゾン層破壊過程の理解に重要な一酸化塩素(CIO)の観測を 2008 年と 2009 年にわたり実施した。CIO スペクトルは、オゾンスペクトルに比べて強度が 2 桁程度小さい極めて微弱な信号のため、地上観測で衛星観測と比較できるだけの S/N のデータを取得するのは、観測条件の優れたアタカマ高地以外では難しい。AURA 衛星の MLS が先行して観測を行っていたが、50km 以上の CIO 混合比の決定精度はよくない。高度 40km から 50km で我々の観測結果は AURA/MLS のデータとよい一致を示している。また、CIO の混合比鉛直分布の短期変動に関しても、絶対値での違いがあるものの、変化の基本的な振る舞いは AURA/MLS と同様の傾向を示している。CIO 混合比鉛直分布

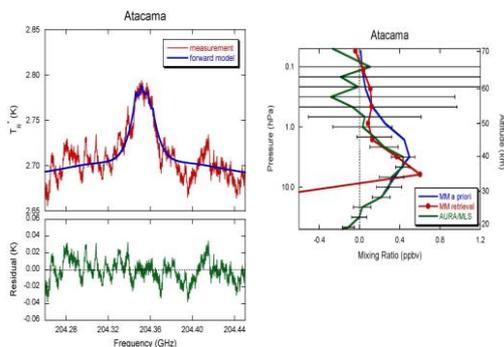


図 3. チリ共和国アタカマ高地上空における 2008 年 12 月に取得した CIO スペクトル(左図)と同スペクトルから導出した鉛直分布(右図赤線)。高度 40km から 50km で AURA/MLS の観測結果(右図黒線)とよい一致を示している。右図青線は初期推定値。

の絶対値に関しては、現時点では電波強度較正の吟味を行いながら詰めているが、AURA/MLS では信頼性の低い 50km 以上の値など今後利用可能となる SMILES データとの相互比較を通してさらに追い込んでいく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

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

② T. Nagahama, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, A. Mizuno, H. Ogawa, and Y. Fukui, “Ground-based millimeter-wave radiometer for measuring the stratospheric ozone over Rikubetsu, Japan”, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 495-509, 2008, 査読あり

③ T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, H. Ogawa, and Y. Fukui, “Continuous measurements of the stratospheric and mesospheric ozone by using ground-based millimeter-wave radiometers”, *Proceedings of the International Conference on Submillimeter Science Technology (ICSST 04)*, 2006, 査読あり

[学会発表] (計 19 件)

① T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, T. Kuwahara, R. Terada, and Y. Kojima, “Ground-based millimeter-wave measurements of mesospheric NO₂ in Atacama Highland, Chile”, *AOGS 2009 6th Annual Meeting*, 11-15 August 2009, Singapore.

② 桑原利尚, 水野亮, 長濱智生, 前澤裕之, 鳥山哲司,

「チリ・アタカマ高地における 200 GHz 帯ミリ波放射分光計を用いた成層圏 CIO の高度分布観測」,

日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 16 日~21 日, 千葉幕張メッセ

③ 長濱智生, 水野亮, 前澤裕之, 桑原利尚, 寺田良平, 児島康介, 「南米チリ・アタカマ高地における中間圏 NO₂ のミリ波観測」, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 16 日~21 日, 千葉幕張メッセ

④ A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, T. Kuwahara, N. Toriyama, A. Morihira, H. Nakane, N. Mizuno, and Y. Fukui, “Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric H₂¹⁸O over Atacama highland, Chile”, *Quadrennial Ozone Symposium 2008*, 25 June-5

July, 2008, Tromsø

⑤A. Morihira, A. Mizuno, K. Toki, T. Nagahama, H. Maezawa, and T. Kuwahara, “A new compact and power-saving millimeter-wave radiometer for ground-based measurements of O₃ and ClO at 110 GHz and/or 200 GHz”, Quadrennial Ozone Symposium 2008, 25 June-5 July, 2008, Tromsø

⑥T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, R. Terada, N. Toriyama, N., Y. Kojima, and A. Morihira, “The first results of ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric ClO over Atacama, Chile”, Quadrennial Ozone Symposium 2008, 25 June-5 July, 2008, Tromsø

⑦T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, N. Toriyama, Y. Kojima, T. Kuwahara, K. Toki, R. Terada and A. Morihira, “Measurements of mesospheric O₃, NO₂ and HO₂ with a ground-based millimetre-wave radiometer at Atacama, Chile”, Quadrennial Ozone Symposium 2008, 25 June-5 July, 2008, Tromsø

⑧水野亮, 長濱智生, 前澤裕之, 桑原利尚, 森平淳志, 中根英昭, 福井康雄, 「チリ共和国アタカマ高地における水蒸気同位体 H₂¹⁸O のミリ波観測」, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 25 日~30 日, 千葉幕張メッセ

⑨長濱智生, 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 ClO のミリ波観測」, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 25 日~30 日, 千葉幕張メッセ

⑩T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, N. Toriyama, T. Sugimoto, and M. Matsuura, “A new development of uncooled 22 GHz band spectroscopic radiometer for observations of stratospheric water vapor”, AOGS 2007 4th Annual Meeting, 30 July-4 August 2007, Bangkok.

⑪T. Nagahama, A. Mizuno, H. Maezawa, T. Kuwahara, T. Sugimoto, M. Matsuura, S. Murayama, K. Toki, N. Toriyama, A. Morihira, and Y. Fukui, “Ground-based Millimeter-wave Measurements of Vertical Distribution of H₂¹⁸O in Upper Stratosphere and Mesosphere over Atacama, Chile”, AOGS 2007 4th Annual Meeting, 30 July-4 August 2007, Bangkok.

⑫A. Mizuno, T. Sugimoto, T. Nagahama, H. Maezawa, T. Kuwahara, M. Matsuura, N. Toriyama, Y. Fukui, N. Mizuno, T. Onishi, H. Nakane, and A. Morihira, “Ground-based millimeter-wave measurements of stratospheric H₂¹⁸O in a subtropical region in the southern hemisphere, Atacama highland in Chile”, IUGG 24th General Assembly, 2-13 July, 2007, Perugia.

⑬松浦真人, 長濱智生, 水野亮, 中根英昭, 森平淳志, 「陸別上空の成層圏オゾンの短期

変動と、その力学的変動要因に関する研究」, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 19 日~24 日, 千葉幕張メッセ

⑭水野亮, 杉本朋世, 長濱智生, 前澤裕之, 桑原利尚, 松浦真人, 村山智史, 水野範和, 福井康雄, 中根英昭, 森平淳志, 「チリ・アタカマ高地における成層圏・中間圏 H₂¹⁸O の時間変動観測」, 日本気象学会春季大会, 2007 年 5 月 13-16 日, 東京

⑮A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, T. Kuwahara, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, and S. Asayama, “A new mm-wave spectroscopic radiometer for the measurements of stratospheric and mesospheric water vapor isotopomers”, 36th COSPAR Scientific Assembly, 16-23 July 2006, Beijing.

⑯M. Matsuura, T. Nagahama, A. Mizuno, H. Nakane, Y. Fujinuma, A. Morihira, H. Ogawa, and Y. Fukui, “Analysis of short-term Variation of Stratospheric Ozone Connected with Dynamical Variations”, 36th COSPAR Scientific Assembly, 16-23 July 2006, Beijing.

⑰T. Kuwahara, A. Mizuno, T. Nagahama, H. Maezawa, A. Morihira, N. Toriyama, S. Murayama, M. Matsuura, T. Sugimoto, and S. Asayama, “Ground-based millimeter-wave observations of water vapor emission (183 GHz) at Atacama, Chile”, AOGS 2006 Third Annual Meeting, 10-14 July 2006, Singapore.

⑱水野亮, 長濱智生, 前澤裕之, 桑原利尚, 松浦真人, 村山智史, 杉本朋世, 福井康雄, 水野範和, 大西利和, 小川英夫, 森平淳志, 「チリ共和国アタカマ高地における成層圏・中間圏水蒸気のミリ波(183GHz) テスト観測」, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 2006 年 5 月 14 日~28 日, 千葉幕張メッセ

⑲長濱智生, 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_x、NO_x 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 14 日~28 日, 千葉幕張メッセ

〔図書〕(計 1 件)

①中井直正, 坪井昌人, 福井康雄, 水野亮, ほかに全 14 名, 日本評論社, 宇宙の観測 II —電波天文学, 2009, 43-89

〔その他〕

ホームページ等

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

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

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

秋吉 英治 (AKIYOSHI HIDEHARU)

独立行政法人国立環境研究所・大気圏環境
研究領域・主任研究員

研究者番号：10270589

(3) 研究協力者

桑原 利尚 (KUWAHARA TOSHIHISA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・大学院
生

児島 康介 (KOJIMA YASUSUKE)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・技術職
員