

令和元年5月22日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05566

研究課題名(和文) 火星水循環・水流出における表層-大気-宇宙間結合の研究

研究課題名(英文) Regional coupling between surface, atmosphere, and space for understanding water cycle on Mars

研究代表者

中川 広務 (Nakagawa, Hiromu)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：30463772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：全球砂嵐時に伴う水蒸気の超高層大気での爆発的な増大をTGO観測により明らかにした。同時に、独自地上観測群を用いて火星連続観測を実現することに成功、大砂嵐時に超高層大気が加熱される様子を明らかにした。MAVEN観測により、下層大気で励起された大気重力波が超高層構造を変調し、散逸大気組成を支配する均一圏界面高度も季節によって大きく変動することを明らかにした。これらは下層から超高層に及ぶ効率的・短期的な物質・エネルギー輸送を示唆するに至った。巻き上がったダストが水蒸気を取り込み、活発になった大循環により高高度まで到達、直接的に水消失量を増大させる水の新たな高速散逸パスを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

約40億年前には豊富な液体の水をたたえ、温暖湿潤な気候を有していた火星は、劇的な気候変動を経て、現在のような寒冷で乾燥した惑星となった。火星のこの劇的な進化の過程で、温暖湿潤な環境を維持するための大量の大気と水がどこにどのようにして失われたかは、惑星表層環境の進化の理解にとって大きな謎として残されている。本研究により明らかになりつつある火星大気・水の散逸プロセスの理解は、生命を保持しうる惑星環境を理解する上で重要であり、昨今発見が相次ぐ系外惑星への示唆に富む。

研究成果の概要(英文)：TGO observations first reveal the vertical distribution of the H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>O up to 80 km, which suggest an increase of the abundance of H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O during the dust storm. Simultaneously, our ground-based observations found a remarkable enhancement of the atmospheric temperature at 80 altitudes during the dust storm. This could cause stronger atmospheric circulation and preventing ice cloud formation, which may confine water vapor to lower altitudes. Our MAVEN result indicates the detection of an extensive layer of warm air at altitudes 70 to 90 km, which has a good agreement with above. The atmospheric composition and wave activity in the upper atmosphere dramatically changes in season. Our study proposes an effective and high-speed mass/energy transportation into the upper atmosphere. The resultant stronger atmospheric circulation could carry the dust and water vapor into the upper atmosphere, which drive direct escape of water to space in a time-scale of weeks or months.

研究分野：超高層大気物理学

キーワード：火星 進化 水 散逸 観測

## 1. 研究開始当初の背景

約 40 億年前には豊富な液体の水をたたえ、温暖湿潤な気候を有していた火星は、劇的な気候変動を経て、現在のような寒冷で乾燥した惑星となった。火星のこの劇的な進化の過程で、水の宇宙空間への流出によって火星表面から大量の水が消失した可能性が高く、その消失過程の解明が急務となっている。水の宇宙空間への流出およびその流出量の算出は、これまで地上・宇宙望遠鏡観測ならびに火星隕石の物質分析による同位体計測によって提唱されてきたが、非常に限定されており不確定性が大きかった。このような現状を打開するため、NASA の火星探査機 MAVEN が 2014 年 9 月に火星周回軌道に投入された。MAVEN は世界で初めて火星の大気流出を総合的に観測する計画であり、超高層中の水素同位体 (重水素 D・水素 H) を周回機から初めて検出することができる。探査機の打ち上げに先立ち、NASA は同計画の科学研究に貢献する科学者 (Participating Scientist: PS) の世界公募を行った。研究代表者を含む日独国際チームは、この MAVEN PS プログラムに選出され、2013 年 11 月以降同探査機の正式メンバーとして、探査チーム会合への参加や、チーム内データ等へのアクセス権を取得、火星周回軌道投入後は、実際に得られた観測データを用いて研究活動を始めている。一方、申請者が開発した中間赤外レーザーヘテロダイン分光器は、ハワイでの専用望遠鏡への実装が完了し、金星・火星大気の観測を 2015 年 3 月より本格始動、既存測器では得ることができない超高分解能分光データ (波長分解能 100 万以上) を順調に取得し始めた (Nakagawa et al., 2016)。これらの状況を活かし、本研究は、MAVEN 衛星と独自地上望遠鏡群を用いた観測データを組み合わせ、火星の水消失に密接に関係する水の表層 大気 宇宙間の領域結合過程の解明を目指す。

## 2. 研究の目的

火星の過去の劇的な気候変動によって、温暖な気候下で存在し得た大量の水は消失し、宇宙空間へ流出したと考えられている。本研究は、火星の水循環・水流出を考える上で特に不確定性の高い表層 大気 宇宙間の結合に着目し、MAVEN 衛星、TGO 衛星 (2017 年火星周回軌道投入; 研究代表者は NOMAD サイエンスチームとして参画)、独自ハワイ地上望遠鏡群の観測データ解析を組み合わせ、火星の過去の水消失に密接に関係する水の表層 大気 宇宙間の領域結合過程を明らかにすることを目的とする。特に、表層 大気間の水循環と、下層 上層大気間における水流出を同時にとらえることで、水消失に果たすそれぞれの役割を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、探査衛星と独自地上望遠鏡による観測を組み合わせ、以下の項目を実現する。

### (1) 表層 大気間の水循環の定量的理解

地上観測により下層大気中における  $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$  の全球分布をとらえ、その時間変動を理解する。そのための、連続監視可能な独自の地上観測機器を開発・観測を実施する。

### (2) 超高層大気中の水流出の定量的理解

MAVEN 観測データ解析により、超高層大気中の D/H の時空間変動を明らかにし、そのメカニズムを明らかにする。

### (3) 下層 上層間の水鉛直輸送の定量的理解

TGO 観測データ解析、および MAVEN 観測データ解析を複合的に組み合わせることで、水蒸気の鉛直輸送メカニズムについて明らかにする。

## 4. 研究成果 (引用されている文献は全て業績リスト内を参照)

### < 1 > 表層 大気間の水循環

- 成層圏望遠鏡 SOFIA を用いて火星  $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  観測を実施した。その結果、 $\text{CH}_4$  の上限値をこれまでにない精度で (1-6ppb) 導出することができ、表層 大気間相互作用に制約を与えることができた (Aoki et al., 2017)。
- 自身で開発を推進してきた赤外ヘテロダイン分光器 (Nakagawa et al., 2016) によるハワイ山頂火星連続観測を実施するため、装置の改良を行った。日本からの遠隔制御を可能にした他、液体窒素から冷凍機冷却への移行のための冷却試験を実施した。放射遮蔽を施すことで目標温度までの冷却を実現することに成功した。
- 上記改良を進めたヘテロダイン分光器を用いて、2017 年 9 月にハワイ・ハレアカラ山頂東北大学観測施設にて初の火星観測に成功した。大気の上下結合に重要である一方、観測が困難だった中間圏の温度・風速を連続的に観測することが可能となった。
- 全球的な砂嵐時に水蒸気の超高層への輸送・宇宙への散逸が活発化することが最近の関連研究により明らかになったため、15 年ぶりに発生した全球砂嵐・火星大接近に合わせて ALMA およびヘテロダインによる地上複合観測を実施し、ALMA により  $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$  分布と高度 30 km・50 km の風速・温度分布、ヘテロダイン観測ではそれよりも上層高度 80 km の中間圏風速・温度の変動を観測することに成功した。ヘテロダインは 6, 8, 9, 10, 11 月に観測を連続的に実施、砂嵐により中間圏が大きく加熱されその後沈静化する様子を初めてとらえた。モデルでは再現できない温度変化であり、水蒸気をコールドトラップ無しに上層へ輸送するというこれまでの古典概念を覆すための鍵となることが期待され

る。

#### < 2 > 超高層大気における水流出

- ・ 他グループによる MAVEN データ解析により予測をはるかに超える超高層大気中の D/H 時空間変化が明らかになりつつある一方で、その要因やメカニズムは不明なままであった。本研究では、そのメカニズムを明らかにすべく、散逸する大気の組成を決定する下部熱圏の変動を調べた。その結果、微量大気成分の混合比が季節・場所により一桁以上大きく変動することを明らかにし、それら変動が下層大気の変動に伴う均一圏界面高度の変化によって説明可能であることを提案した。微量大気である水蒸気が散逸しやすい時空間特徴があることを明らかにしたことは D/H 変動の理解に重要であり、国内外で成果報告、学術雑誌に投稿準備を進めている。

#### < 3 > 下層から上層への水輸送

- ・ MAVEN データ解析により、物質・エネルギー鉛直輸送に重要な役割を担う大気重力波のグローバルな特徴を明らかにした。その結果、下層大気で励起された重力波が高度 130km まで到達できる可能性を観測的に初めて明らかにした。これら大気波動が背景場の密度・温度に大きく影響を与えることを数値モデルとの比較によって明らかにした他 (Medvedev et al., 2016) 更に高高度に (200 km 以上) おいても大振幅の擾乱構造が広範囲に確認され、その起源が議論された (Terada et al., 2017) England et al. (2017) は、それら超高層中の波状構造が、下層大気で励起された大気重力波のうち、長い鉛直波長成分が上方伝搬することで説明しうる仮説を唱えた。これらは背景の大循環・熱構造に大きな影響を与えるため、水蒸気の循環・上方伝搬に大きな影響を及ぼしていると考えられる。大気重力波のグローバルな特徴をまとめた成果についても、学術雑誌に投稿した。モデルとの不一致で不採択が続いたが、現在は観測結果に注力することでまとめたおし、再投稿の準備を進めている。
- ・ 全球砂嵐時の伴う水蒸気の超高層での爆発的な増大過程を TGO 観測データ解析により明らかにした。同位体の鉛直発展を明らかにしたのは初めてであり、青木連携研究者が中心に貢献した本研究は Nature に投稿され受理された (Vandaele et al., 2018)。
- ・ MAVEN 観測データ解析により、これまでみられなかった高高度 70 - 90 km にサブミクロン粒子のエアロゾル・ヘイズ遊離層が存在することが明らかになった。地上付近から水蒸気を輸送するキャリアの成れの果てであることが示唆されており、その上、太陽光を効率的に吸収することで中間圏夏半球を部分的に温度上昇させ、近年新たに発見された同高度の水蒸気遊離層の形成を促している仮説を立てた。モデルと比較した結果、予測値よりも 30 - 40 K も高い異常昇温が本研究による MAVEN 解析で発見されており、上記地上ヘテロダイン観測と合致する。この熱構造が夏半球の水散逸増大、つまり新たな水散逸パスの重要な貯蔵庫となっていることを示唆している。本成果は、学術雑誌に投稿準備を進めている。

## 5. 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 11 件)

1. 倉本圭, 川勝康弘, 藤本正樹, 源田英典, 平田成, 今村剛, 亀田真吾, 松本晃治, 宮本英昭, 諸田 智克, 長岡 央, 中川 広務, 中村 智樹, 小川 和律, 大嶽 久志, 尾崎 正伸, 佐々木 晶, 千秋 博紀, 橘 省吾, 寺田 直樹, 臼井 寛裕, 和田 浩二, 渡邊 誠一郎, MMX study team, 太陽系ハビタブル惑星の成立を探る火星衛星探査計画 MMX, 日本惑星科学会誌遊星人, 27, 3, 207-215, 2018.
2. 青木翔平, 中川広務, 小郷原一智, 神山徹, 今村剛, 笠羽康正, 特集「火星圏のサイエンス」ExoMars TGO と火星衛星探査計画 MMX による火星大気観測, 日本惑星科学会誌遊星人, 27, 3, 224, 2018.
3. A. C. Vandaele, O. Korablev, F. Daerden, S. Aoki, L. R. Thomas, F. Altieri, M. López-Valverde, G. Villanueva, G. Luizzi, M. D. Smith, J. T. Erwin, L. Trompet, A. A. Fedorova, F. Montmessin, A. Trokhimovskiy, D. A. Belyaev, N. I. Ignatiev, M. Luginin, K. S. Olsen, L. Baggio, J. Alday, J.-L. Bertaux, D. Betsis, D. Bolsée, R. T. Clancy, E. Cloutis, C. Depiesse, B. Funke, M. Garcia-Comas, J.-C. Gérard, M. Giuranna, F. Gonzalez-Galindo, A. V. Grigoriev, Y. S. Ivanov, J. Kaminski, O. Karatekin, F. Lefèvre, S. Lewis, M. López-Puertas, A. Mahieux, I. Maslov, J. Mason, M. J. Mumma, L. Naery, E. Neefs, A. Patrakeev, D. Patsaev, B. Ristic, S. Robert, F. Schmidt, A. Shakun, N. A. Teanby, S. Viscardy, Y. Willame, J. Whiteway, V. Wilquet, M. J. Wolff, G. Bellucci, M. R. Patel, J.-J. López-Moreno, F. Forget, C. F. Wilson, H. Svedhem, J. L. Vago, D. Rodionov, & NOMAD Science Team and ACS Science Team, Martian dust storm impact on atmospheric H<sub>2</sub>O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter, Nature, accepted, 2019. (査読有)
4. O. Korablev, A. C. Vandaele, F. Montmessin, A. A. Fedorova, A. Trokhimovskiy, F. Forget, F. Lefèvre, F. Daerden, I. R. Thomas, L. Trompet, J. T. Erwin, S. Aoki, S. Robert, L. Neary, S. Viscardy, A. V. Grigoriev, N. I. Ignatiev, A. Shakun, A. Patrakeev, D. A. Belyaev, J.-L. Bertaux, K. S. Olsen, L. Baggio, J. Alday, Y. S. Ivanov, B. Ristic, J. Mason, Y. Willame, C. Depiesse, L. Hetey, S. Berkenbosch, R. Clariquin, C. Queirolo, B. Beeckman, E. Neefs, M. R. Patel, G. Bellucci, J.-J. López-Moreno, C. F. Wilson, G. Etiope, L. Zelenyi, H. Svedhem, J. L. Vago, and The ACS &

- NOMAD Team, No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations, *Nature*, accepted, 2019. (査読有)
5. Vandaele, A. C., J.-J. Lopez-Moreno, M. R. Patel, G. Bellucci, F. Daerden, B. Ristic, S. Robert, I. R. Thomas, V. Wilquet, M. Allen, G. Alonso-Rodrigo, F. Altieri, S. Aoki, D. Bolsee, T. Clancy, E. Cloutis, C. Depiesse, R. Drummond, A. Fedorova, V. Formisano, B. Funke, F. Gonzalez-Galindo, A. Geminale, J.-C. Gerard, M. Giuranna, L. Hetey, N. Ignatiev, J. Kaminski, O. Karatekin, Y. Kasaba, M. Leese, F. Lefevre, S. R. Lewis, M. Lopez-Puertas, M. Lopez-Valverde, A. Mahieux, J. Mason, J. McConnell, M. Mumma, L. Neary, E. Neefs, E. Renotte, J. Rodriguez-Gomez, G. Villanueva, S. Viscardy, J. Whiteway, Y. Willame, M. Wolff, the NOMAD Team, NOMAD, an Integrated Suite of Three Spectrometers for the ExoMars Trace Gas Mission: Technical Description, Science Objectives and Expected Performance, *Space Sci. Rev.*, 214, 80, 2018. (査読有)
  6. Jakosky, B. M., D. Brain, M. Chaffin, S. Curry, J. Deighan, J. Grebowsky, J. Halekas, F. Leblanc, R. Lillis, J. G. Luhmann, L. Andersson, N. Andre, D. Andrews, D. Baird, D. Baker, J. Bell, M. Benna, D. Bhattacharyya, S. Bougher, C. Bowers, P. Chamberlin, J.-Y. Chaufray, J. Clarke, G. Collinson, M. Combi, J. Connerney, K. Connour, J. Correia, K. Crabb, F. Crary, T. Cravens, M. Crismani, G. Delory, R. Dewey, G. DiBraccio, C. Dong, Y. Dong, P. Dunn, H. Egan, M. Elrod, S. England, F. Eparvier, R. Ergun, A. Eriksson, T. Esman, J. Espley, S. Evans, K. Fallows, X. Fang, M. Fillingim, C. Flynn, A. Fogle, C. Fowler, J. Fox, M. Fujimoto, P. Garnier, Z. Girazian, H. Groeller, J. Gruesbeck, O. Hamil, K. G. Hanley, T. Hara, Y. Harada, J. Hermann, M. Holmberg, G. Holsclaw, S. Houston, S. Inui, S. Jain, R. Jolitz, A. Kotova, T. Kuroda, D. Larson, Y. Lee, C. Lee, F. Lefevre, C. Lentz, D. Lo, R. Lugo, Y.-J. Ma, P. Mahaffy, M. L. Marquette, Y. Matsumoto, M. Mayyasi, C. Mazelle, W. McClintock, J. McFadden, A. Medvedev, M. Mendillo, K. Meziane, Z. Milby, D. Mitchell, R. Modolo, F. Montmessin, A. Nagy, H. Nakagawa, C. Narvaez, K. Olsen, D. Pawlowski, W. Peterson, A. Rahmati, K. Roeten, N. Romanelli, S. Ruhunusiri, C. Russell, S. Sakai, N. Schneider, K. Seki, R. Sharrar, S. Shaver, D. E. Siskind, M. Slipski, Y. Soobiah, M. Steckiewicz, M. H. Stevens, I. Stewart, A. Stiepen, S. Stone, V. Tenishev, N. Terada, K. Terada, E. Thiemann, R. Tolson, G. Toth, J. Trovato, M. Vogt, T. Weber, P. Withers, S. Xu, R. Yelle, E. Yigit, and R. Zurek, Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time, *Icarus*, 315, 146-157, doi:10.1016/j.icarus.2018.05.030, 2018. (査読有)
  7. Aoki, S., Y. Sato, M. Giuranna, P. Wolkenberg, T. Sato, H. Nakagawa, Y. Kasaba, Mesospheric CO<sub>2</sub> ice clouds on Mars observed by the Planetary Fourier Spectrometer onboard Mars Express, *Icarus*, 302, 175-190, doi:10.1016/j.icarus.2017.10.047, 2018. (査読有)
  8. Aoki, S., M.J. Richter, C. DeWitt, A. Boogert, T. Encrenaz, H. Sagawa, H. Nakagawa, A.C. Vandaele, M. Giuranna, T.K. Greathouse, T. Fouchet, A. Geminale, G. Sindoni, M. McKelvey, M. Case, Y. Kasaba, Stringent upper limit of CH<sub>4</sub> on Mars based on SOFIA/EXES observation, *Astron. Astrophys.*, A78, 9, doi:10.1051/0004-6361/201730903, 2018. (査読有)
  9. Sakanoi, T., M. Kagitani, H. Nakagawa, T. Obara, Y. Kasaba, S. Okano, J.R. Kuhn, S.V. Berdyugina, I.F. Scholl, and M. Yoneda, Optical and IR observations of planetary and exoplanetary atmospheres, *SPIE*, doi:10.1117/2.1201612.006817, 2017. (査読無)
  10. Terada, N., F. Leblanc, H. Nakagawa, A.S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, T. Hara, S.L. England, H. Fujiwara, K. Terada, K. Seki, P.R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, J. Grebowsky, and B.M. Jakosky, Global distribution and parameter dependences of gravity wave activity in the Martian upper thermosphere derived from MAVEN/NGIMS observations, *J. Geophys. Res.*, 122, doi:10.1002/2016JA023476, 2017. (査読有)
  11. England, S. L., G. Liu, E. Yigit, P. R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, H. Nakagawa, N. Terada, and B. Jakosky, MAVEN NGIMS observations of atmospheric gravity waves in the Martian thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 122, 2310-2335, doi:10.1002/2016JA023475, 2017. (査読有)
  12. Medvedev, A.S., H. Nakagawa, C. Mockel, E. Yigit, T. Kuroda, P. Hartogh, K. Terada, N. Terada, K. Seki, N.M. Schneider, S.K. Jain, J.S. Evans, J.I. Deighan, W.E. McClintock, D. Lo, Comparison of density and temperature in the Martian thermosphere from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7, 3095-3104, doi:10.1002/2016GL068388, 2016. (査読有)
  13. Nakagawa, H., Aoki, S., Sagawa, H., Kasaba, Y., Murata, I., Sonnabend, G., Sornig, M., Okano, S.; Kuhn, J.R.; Ritter, J.M.; Kagitani, M.; Sakanoi, T.; Taguchi, M.; Takami, K., IR heterodyne spectrometer MILAHI for continuous monitoring observatory of Martian and Venusian atmospheres at Mt. Haleakala, Hawaii. *Planet. Space Sci.*, 126, 34-48, doi:10.1016/j.pss.2016.04.002, 2016. (査読有)

**[学会発表](計 24 件)**

1. Nakagawa, H., S. Aoki, N. Yoshida, N. Terada, T. Imamura, K. Ogohara, Ando, Noguchi, A. Miyamoto, K. Takami, T. Kuroda, I. Murata, Y. Kasaba, MAVEN/IUVS team, Water cycle on

- Mars revealed by space-born and ground-based observations, Symposium on Planetary Sciences (SPS), Sendai, February, 21, 2019.
2. [Nakagawa, H.](#), A. Miyamoto, K. Takami, S. Aoki, H. Sagawa, T. Kuroda, N. Terada, Y. Kasaba, N. Yoshida, K. Toriumi, Mars mesospheric zonal wind at global dust storm 2018, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS), Nagoya, November, 25, 2018.
  3. [Nakagawa, H.](#), N. Terada, N. Yoshida, H. Fujiwara, K. Seki, IUVS team, Evolution of aerosol profile and convective instability resulting from superposition of atmospheric waves in the middle atmosphere on Mars, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS), Nagoya, November, 24, 2018.
  4. **中川広務, 寺田直樹, 吉田奈央, 青木翔平, 笠羽康正, 火星超高層大気における大気重力波の特性**, 日本気象学会 2018 年度秋季大会, 仙台, 10 月 31 日, 2018.
  5. [Nakagawa, H.](#), N. Terada, N. Yoshida, S. Aoki, T. Kuroda, Y. Kasaba, The effect of atmospheric gravity waves on the water transport and its escape on Mars, JpGU, 2018.
  6. Kasaba, Y., [H. Nakagawa](#), et al., Exploring the Atmosphere of Mars with remote observations: Activities in Japan for the Belgium-Japan partnership (AMAVERO), European Planetary Science Congress (EPSC) 2018, Berlin, September 20, 2018.
  7. T. Kuroda, A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, [H. Nakagawa](#), Simulation of the coupled atmosphere and hydrosphere on early Mars using a GCM, EPSC 2018, Berlin, September 18, 2018.
  8. Mahieux, A., S. Aoki, M. Toyooka, [H. Nakagawa](#) et al., Spectral inversion of OMEGA /MEX limb observations considering multiple scattering, EPSC 2018, Berlin, September 20, 2018.
  9. Montmessin, F., N. M. Schneider, J. I. Deighan, S. K. Jain, J. S. Evans, M. Crismani, M. H. Stevens, D. Y. Io, J. T. Clarke, M. S. Chaggin, M. Mayyasi, F. Lefèvre, A. Stiepen, E. Royer, Z. Milby, H. Gröller, R. Yelle, [H. Nakagawa](#), Four years of upper atmospheric exploration at Mars with MAVEN and IUVS, EPSC 2018, Berlin, September 19, 2018.
  10. Toyooka, M., H. Iwabuchi, S. Aoki, A. Mahieux, [H. Nakagawa](#), Y. Kasaba, Modification of the retrieval tool JACOSPAR for the Martian limb observation, EPSC 2018, Berlin, September 20, 2018.
  11. Aoki, S., M. J. Richter, C. DeWitt, A. Boogert, T. Encrenaz, H. Sagawa, [H. Nakagawa](#), A. C. Vandaele, M. Giuranna, T. K. Greathouse, T. Fouchet, A. Geminale, G. Sindoni, M. McKelvey, M. Case, and Y. Kasaba, Search of CH<sub>4</sub> on Mars by SOFIA/EXES, Mars Science Workshop, 2018, Madrid, February 27, 2018.
  12. Kasaba, Y., [H. Nakagawa](#), H. Sagawa, T. Kuroda, T. Imamura, I. Murata, N. Terada, T. Sakanoi, K. Takami, S. Aizawa, M. Toyota, T. Akiba, Y. Kasai, A. Yamazaki, T. M. Sato, H. Maezawa, A. C. Vandaele, S. Aoki, S. Robert, V. Wilquet, A. Mahieux, P. F. Coheur, Exploring the Atmosphere of Mars with Remote Observations and numerical works, Mars Science Workshop, Madrid, February 27, 2018.
  13. **中川広務, 寺田直樹, 吉田奈央, 青木翔平, 黒田剛史, 笠羽康正**, The effect of atmospheric gravity waves on the water upward transport on Mars, 惑星圏研究会, 仙台, 2 月 21 日, 2018 年.
  14. [Nakagawa, H.](#), A. Medvedev, T. Kuroda, E. Yigit, N. Terada, K. Terada, H. Fujiwara, K. Seki, P. Hartogh, H. Grollier, R. V. Yelle, F. Montmessin, N. M. Schneider, and B. M. Jakosky, Seasonal variations of small-scale waves in the martian lower thermosphere, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS), Kyoto, October 16, 2017.
  15. [Nakagawa, H.](#), A. Medvedev, T. Kuroda, E. Yigit, N. Terada, K. Terada, H. Fujiwara, K. Seki, P. Hartogh, R. V. Yelle, F. Montmessin, N. M. Schneider, and B. M. Jakosky, Global distribution of **GW activity in Mars' lower thermosphere derived from MAVEN/IUVS stellar occultations** and analyzed using two MGSMs, Japan Geoscience Union Meeting 2017, Chiba, May, 10, 2017.
  16. Aoki, S., [H. Nakagawa](#), Y. Kasaba, H. Sagawa, M. J. Richter, and C. DeWitt, Search of CH<sub>4</sub> on Mars by SOFIA/EXES, Japan Geoscience Union Meeting 2017, Chiba, May, 10, 2017.
  17. Terada, N., K. Terada, [H. Nakagawa](#), F. Leblanc, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, T. Hara, S. L. England, H. Fujiwara, P. R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, J. Grebowsky, and B. M. Jakosky, Thermospheric perturbations at Mars, Venus, and Earth: Solar wind or lower atmosphere forcing?, AOGS, Singapore, August 8, 2017.
  18. Aoki, S., M. J. Richter, C. DeWitt, A. Boogert, T. Encrenaz, H. Sagawa, [H. Nakagawa](#), A. C. Vandaele, M. Giuranna, T. K. Greathouse, T. Fouchet, A. Geminale, G. Sindoni, M. McKelvey, M. Case, and [Y. Kasaba](#), Search of CH<sub>4</sub> on Mars by SOFIA/EXES, European Planetary Science Congress 2017, Riga, September 19, 2017.

19. [Nakagawa, H.](#), S. Aoki, T. Imamura, K. Ogohara, T. Sato, T. Sakanoi, Y. Kasaba, M. Taguchi, T. Nakamura, T. Iwata, NIRS4 members, Near Infrared Hyperspectral Imager NIRS4/MacromOmega onboard MMX to investigate water cycle on Mars, Japan Geoscience Union Meeting 2017, Chiba, May, 10, 2017. (invited)
20. [Nakagawa, H.](#), A. Medvedev, C. Mockel, S. Jain, S. Evans, N. Schneider, T. Kuroda, N. Terada, K. Terada, K. Seki, S. Aoki, H. Sagawa, Y. Kasaba, K. Takami, I. Murata, G. Sonnabend, M. Sornig, M. Kagitani, T. Sakanoi, S. Okano, M. Taguchi, J. Kuhn, J. Ritter, Regional coupling between lower and upper atmosphere revealed by MAVEN/IUVS and complementary study by Earth-based observations, International GEMISIS and ASINACTR-G2602 Workshop: Future Perspectives of Researches in Space Physics, Nagoya, March 24, 2016. (Invited)
21. [Nakagawa, H.](#), A. S. Medvedev, T. Kuroda, E. Yigit, N. Terada, K. Terada, H. Fujiwara, C. Mockel, P. Hartogh, K. Seki, N. M. Schneider, H. Groller, R. V. Yelle, F. Montmessin, J. I. Deighan, S. Jain, B. Jakosky, A global view of small-scale wave perturbations in Mars' lower thermosphere derived from MAVEN/IUVS, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS), Fukuoka, November 19, 2016.
22. [Nakagawa, H.](#), A. Medvedev, C. Mockel, E. Yigit, T. Kuroda, P. Hartogh, K. Terada, N. Terada, K. Seki, N. Schneider, S. Jain, S. Evans, J. Deighan, W. McClintock, D. Lo, and B. Jakosky, Comparison of the Martian thermosphere density and temperature from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling, Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, May, 23, 2016. (Invited)
23. [中川広務](#), [青木翔平](#), [佐川英夫](#), [笠羽康正](#), [村田功](#), [高見康介](#), [鍵谷将人](#), [坂野井健](#), J. Kuhn, J. Ritter, [岡野章一](#), [田口真](#), Methane and HDO/H<sub>2</sub>O in the Martian atmosphere studied by ultra-high spectral resolution, Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, May 24, 2016.

#### 〔図書〕(計3件)

1. [H. Nakagawa](#), Atmosphere of Mars, Astrobiology (From the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence), Ed. by A. Yamagishi, T. Kakegawa, and T. Usui, Springer, ISBN 978-981-13-3639-3, 2019.

#### 〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

#### 〔その他〕

#### アウトリーチ活動

2018

- SGEPSS 一般向け公開イベント, 「はかせとワクワク大科学実験 地球と宇宙のひみつを解明しよう!」, 名古屋, 11月23日.
- 仙台市天文台 × 東北大学大学院理学研究科公開サイエンス講座「火星ってどんなところ? ~人が住めるか考えよう~」, 仙台市天文台加藤・小坂ホール, 7月28日.
- 中川広務, 宮城第一高等学校コスモス・カレッジ・インターンシップ, 「火星へ」, 仙台, 9月28日.

2017

- SGEPSS 一般向け公開イベント, 「京都で体験! キミの知らない宇宙と地球の物語」, 京都大学, 10月15日.
- 学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ 2017, 「惑星(わくせい)ってなんだろう?」, 東北大学, 7月15日 (1 賞受賞).
- 仙台市天文台 × 東北大学大学院理学研究科公開サイエンス講座「巨大惑星をめぐる旅」, 仙台市天文台, 8月19日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 笠羽 康正

ローマ字氏名: KASABA YASUMASA

研究協力者氏名: 佐川 英夫

ローマ字氏名: SAGAWA HIDEO

研究協力者氏名: 黒田 剛史

ローマ字氏名: KURODA TAKESHI

研究協力者氏名: 青木 翔平

ローマ字氏名: AOKI SHOHEI

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。