

令和 4 年 4 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03943

研究課題名（和文）大気波動を介した下層大気から宇宙への物質輸送の研究

研究課題名（英文）Vertical transport from the lower atmosphere to space via atmospheric waves 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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超高層への水・物質輸送過程を明らかにすべく、特に大気波動を介した領域間結合に着目して、探査機と地上望遠鏡による観測を実施した。（1）高速放射計算コードの開発を進めた結果、疑似データを用いた検証が終え、火星大気中のダスト・氷雲の密度および粒径の導出に世界で初めて成功した。（2）火星中層大気の掩蔽観測データを用いて、水蒸気の鉛直輸送過程・夜側の温度構造・大気重力波の上方伝搬過程・ダストストーム中の東西風加速を明らかにした。（3）より高高度の大気組成変化を調べた結果、下層大気の時節変化やダストストームに伴う変動が宇宙に散逸しうる超高層大気組成を大きく変化させることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火星は兄弟星でありながら全く異なる惑星環境を形成するに至った。多様性に富むこれら地球型惑星の水・大気進化解明は、過去そして現在における生命生存環境の理解に重要である。表層から宇宙まで領域間をつなぐ新たな研究手法を実現したことで、火星における水・大気の新たな消失パスの理解に貢献した。今後加速する火星探査開拓時代へ向けた複合ミッションの長期的な技術要素土台構築へとつながる。

研究成果の概要（英文）：We clarified the process of water and material transport to the upper atmosphere via atmospheric waves using a space-born and ground-based observations. (1) Our new-developed fast radiative calculation code is capable to retrieve the density and particle size of dust and ice clouds in the Martian atmosphere. (2) Using occultation observations in the Martian middle atmosphere, we clarified the vertical transport process of water vapor, the temperature structure in the night side, the upward propagation process of atmospheric gravity waves, and the acceleration of zonal winds during the dust storm. (3) Seasonal changes in the lower atmosphere and variations associated with dust storms can significantly alter the composition of the upper atmosphere, which can be escaped into space.

研究分野：惑星大気

キーワード：火星 水 大気 進化 観測 大気波動 物質輸送

## 1. 研究開始当初の背景

火星・地球・金星は兄弟星でありながら全く異なる惑星環境を形成するに至った。火星・金星は水・大気の宇宙への消失によって劇的な気候変動が引き起こされた可能性が高く、その物理機構の解明が急務となっている。生命にとって重要な水・大気はどのように生成・循環・消失しているのか。近年の火星周回機観測の重要な発見の一つに、既存の理論では説明がつかない水・大気の超高層への高速輸送とそれに伴う大量の宇宙消失がある。この新たな宇宙への散逸パスは、従来の拡散過程のみを考慮に入れただけでは説明がつかない。

## 2. 研究の目的

本研究では、最新の探査機群と地上望遠鏡を用いて、超高層への水・物質輸送過程の普遍的理解を目指す。NASAのMAVEN探査機・欧州のTrace Gas Orbiter (TGO)による中層大気掩蔽観測、自身が独自に開発した超高分解能赤外レーザーヘテロダイン分光器による風速観測、散逸大気その場計測など多岐にわたる観測手法を組み合わせることで下層大気から超高層大気まで幅広い高度領域をカバーし、上層大気に水・物質がどのように高速輸送されるかを初めて明らかにする。

## 3. 研究の方法

以下を明らかにすることで超高層への水・物質輸送過程を理解する。

(1) これまで開発を進めてきた高速放射コードを用いて、下層における水・ダスト層の生成過程を明らかにする。

(2) MAVEN・TGO搭載の最新掩蔽観測を用いて、中層・上層への水・ダストの輸送・発達過程を明らかにする。

(3) MAVEN・TGOによる掩蔽観測による高分解能鉛直プロファイルから温度擾乱成分を抽出し、スペクトル分析することにより大気波動を介した水・ダスト輸送メカニズムを理解する。地上観測から探査機では導出不可能な中層大気の風速を求めることにより、大気波動上方伝搬に影響を及ぼしうる背景風の変化を明らかにする。

(4) MAVEN/NGIMSによるその場計測により、宇宙散逸する大気組成への影響を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 下層における水・ダスト層の生成過程

エアロゾル多重散乱高速放射計算コード JACOSPAR 火星版の開発を進めた結果、疑似データを用いた検証を終え、火星大気中のダスト・氷雲の密度および粒径の同時導出に世界で初めて成功した。計算時間も先行研究 D' Aversa et al. (2022) に比べ格段に短縮されている。MEX搭載 OMEGA によって得られた観測データを用いた実検証に移行することができた。まだ実データを用いた2次元分布の導出・ガスも含めた複合導出には至っていないが、水・物質の惑星規模の輸送過程を明らかにする重要な解析ツールの構築の目処がたった。これまでの成果を学術論文にまとめつつ (Nakagawa et al., in prep.), MEX/OMEGAのみならず TGO/NOMAD, MMX/MIRS など最新・将来火星探査ミッションへの幅広い援用拡充を企図する。

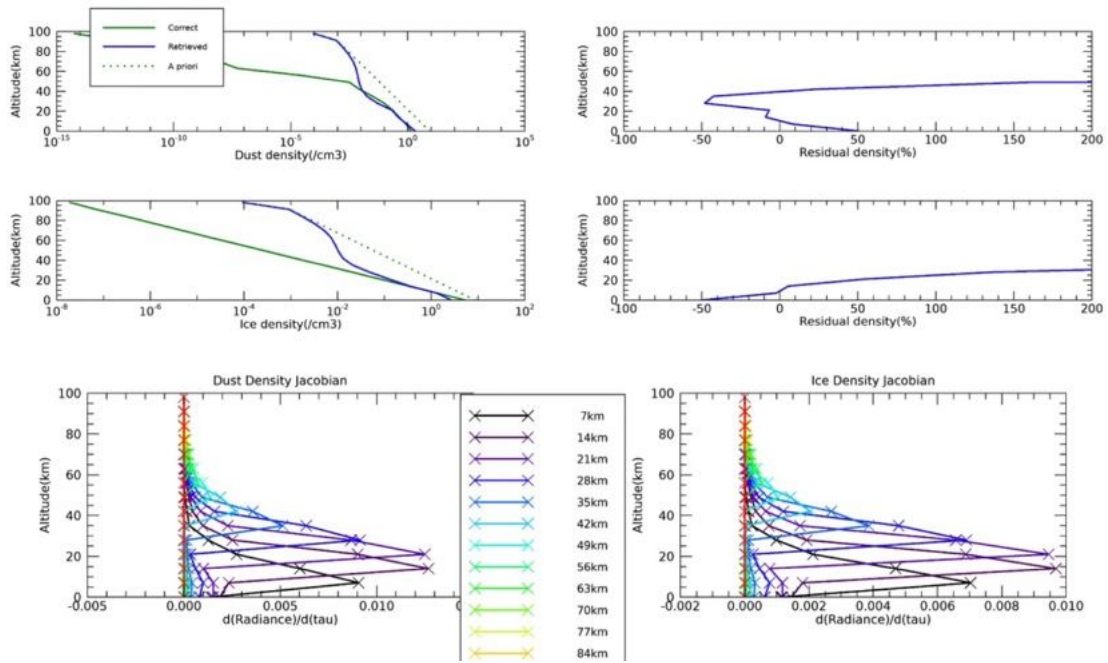


Fig.1. ダストと氷雲の密度に対して(i)真値, (ii)アプリアリ(初期推定値), (iii)JACOSPAR リトリーバルで得られた導出結果を比較した図. 高度 40km まで精度 100%程度で求めることに成功している (Nakagawa et al., in prep.).

### (2) 中層・上層への水・ダストの輸送・発達過程

TGO/NOMAD を用いて火星中層大気の太陽掩蔽観測データを用いて, 水蒸気の鉛直輸送過程を明らかにした. 南北半球で水蒸気分布が大きく異なる様子や, ハドレー循環が水蒸気を高高度に輸送する様子を明らかにした (Vandaele et al., 2019; Aoki et al., 2019). また, 火星中層大気夜側においてモデル予測値よりも 100K も温度の高い異常昇温層を発見した (Nakagawa et al., 2020a).

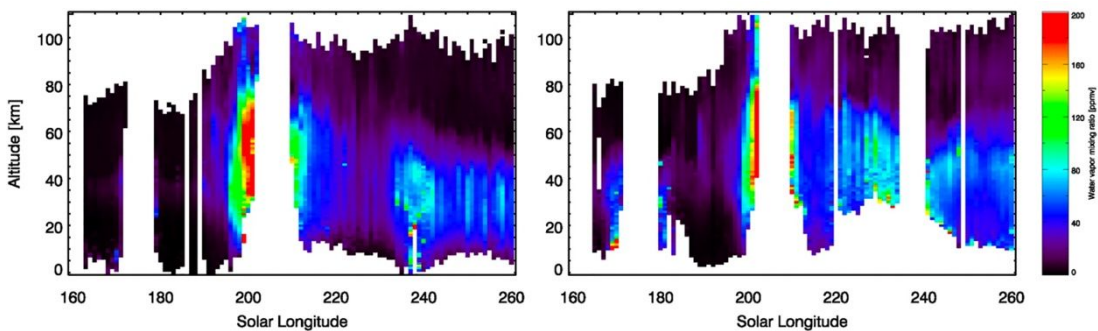


Fig. 2. TGO/NOMAD で得られた火星水蒸気高度分布の季節変化 (南北半球比較) (Aoki et al., 2019). ダストストームに伴い高度 80km に達するほど水蒸気が高高度に輸送されている様子が捉えられている.

### (3) 大気波動を介した水・ダスト輸送メカニズムの理解

中層大気における温度擾乱成分を詳細にスペクトル解析した結果, 鉛直波長 10-30km 以上の比較的長い波長の大気重力波が下層から上方伝搬し, 運動量・エネルギー輸送に大きく寄与していることを明らかにした (Nakagawa et al. 2020b). 加えて, 地上観測結果から, ダストストーム中では中層大気で高速の東西風が加速されていることを明らかにし, 大気重力波の碎破や水蒸気の伝搬過程に背景風の変化が影響を及ぼしうることを示唆した (Miyamoto et al., 2021).

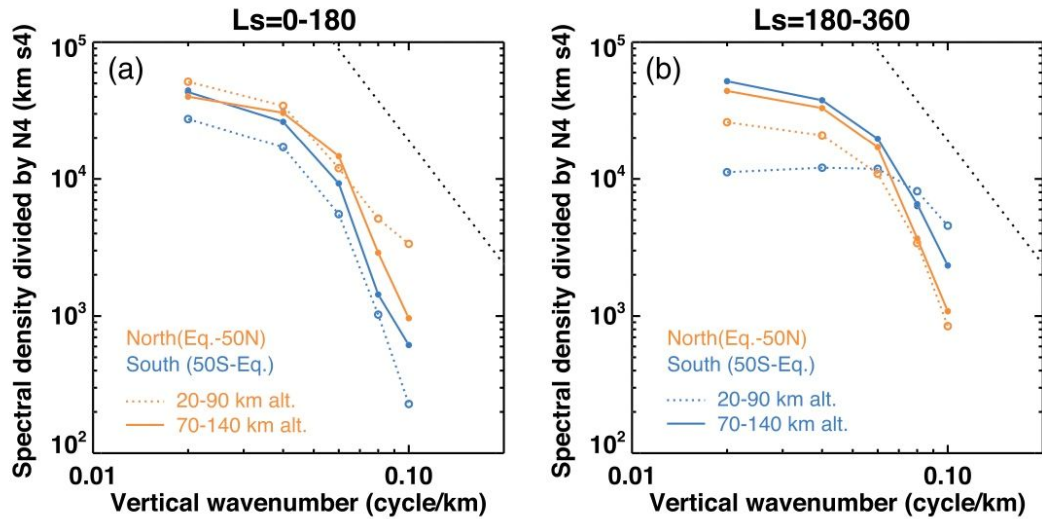


Fig. 3. 高度 20-140km で得られた火星中層大気中の温度擾乱スペクトル密度. 特に, 南半球が夏となる近日点付近で長波長側のスペクトル密度が急増している様子がみてとれる (Nakagawa et al., 2020b).

#### (4) 宇宙散逸する大気組成への影響

MAVEN/NGIMS を用いて, 大気が宇宙に消失しうる外圏底付近の高高度の大気組成変化を調べた結果, 下層大気の季節変化やダストストームに伴う変動が宇宙に散逸しうる超高層大気組成を大きく変化させることを明らかにした (Yoshida et al., 2020; Yoshida et al., 2021). これには下層から伝搬する大気重力波が中層大気で砕破・飽和することで乱流活動が活発になり, 均一圏界面高度を大きく変化させることが要因であることが明らかになりつつある (Yoshida et al., under review; Nakagawa et al., in prep.).

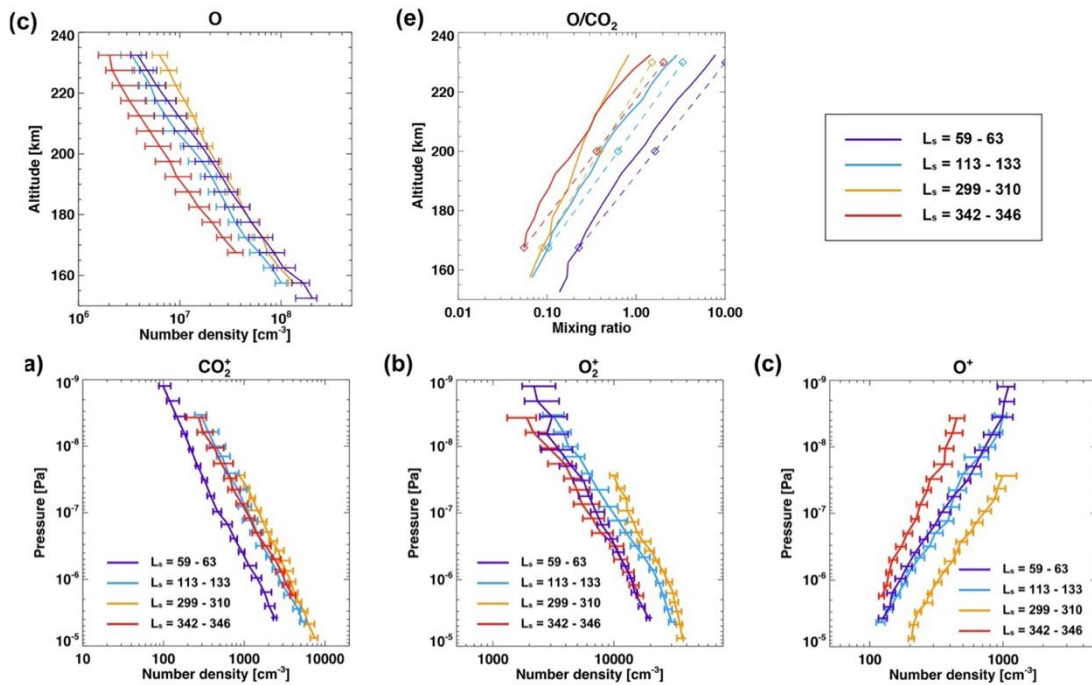


Fig. 4. MAVEN/NGIMS によって得られた季節毎・およびダストストーム時 (赤) に分けた外圏底付近の大気組成変化 (Yoshida et al., 2021). 中性・イオンともに大きく組成比が変化している様子が捉えられた.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakagawa Hiromu, Jain Sonal K., Schneider Nicholas M., Montmessin Franck, Yelle Roger V., Jiang Fayu, Verdier Loic, Kuroda Takeshi, Yoshida Nao, Fujiwara Hitoshi, Imamura Takeshi, Terada Naoki, Terada Kaori, Seki Kanako, Gr?ller Hannes, Deighan Justin I.	4. 巻 47
2. 論文標題 A Warm Layer in the Nightside Mesosphere of Mars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 47,57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL085646	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 Nakagawa Hiromu, Terada Naoki, Jain Sonal K., Schneider Nicholas M., Montmessin Franck, Yelle Roger V., Jiang Fayu, Verdier Loic, England Scott L., Seki Kanako, Fujiwara Hitoshi, Imamura Takeshi, Yoshida Nao, Kuroda Takeshi, Terada Kaori, Gr?ller Hannes, Deighan Justin, Jakosky Bruce M.	4. 巻 125
2. 論文標題 Vertical Propagation of Wave Perturbations in the Middle Atmosphere on Mars by MAVEN/IUVS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1,14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JE006481	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 Yoshida N., Nakagawa H., Terada N., Evans J. S., Schneider N. M., Jain S. K., Imamura T., Chaufray J. Y., Fujiwara H., Deighan J., Jakosky B. M.	4. 巻 125
2. 論文標題 Seasonal and Latitudinal Variations of Dayside N <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> Ratio in the Martian Thermosphere Derived From MAVEN IUVS Observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1,17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JE006378	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 Takami, K., H. Nakagawa, H. Sagawa, P. Krause, I. Murata, Y. Kasaba, T. Kuroda, S. Aoki, T. Kouyama, T. Kostiuik, T. A. Livengood, G. Gilli	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of a method to retrieve temperature and wind velocity profiles of the Venusian nightside mesosphere from mid-infrared CO <sub>2</sub> absorption line observed by heterodyne spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-020-01188-0	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 S. Aoki et al. (Nakagawa as 68th author)	4. 巻 -
2. 論文標題 Water vapor profiles on Mars in dust storms observed by TGO/NOMAD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JE006109	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 Kamada, A., T. Kuroda, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa, K. Toriumi	4. 巻 338
2. 論文標題 A coupled atmosphere-hydrosphere global climate model of early Mars: A 'cool and wet' scenario for the formation of water channels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.113567	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 Miyamoto Akiho, Nakagawa Hiromu, Kuroda Takeshi, Takami Kosuke, Murata Isao, Medvedev Alexander S., Yoshida Nao, Aoki Shohei, Sagawa Hideo, Kasaba Yasumasa, Terada Naoki	4. 巻 48
2. 論文標題 Intense Zonal Wind in the Martian Mesosphere During the 2018 Planet Encircling Dust Event Observed by Ground Based Infrared Heterodyne Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL092413	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 Yoshida Nao, Terada Naoki, Nakagawa Hiromu, Brain David A., Sakai Shotaro, Nakamura Yuki, Benna Mehdi, Masunaga Kei	4. 巻 126
2. 論文標題 Seasonal and Dust Related Variations in the Dayside Thermospheric and Ionospheric Compositions of Mars Observed by MAVEN/NGIMS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JE006926	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 Mahieux A., Yelle R.V., Yoshida N., Robert S., Piccialli A., Nakagawa H., Kasaba Y., Mills F.P., Vandaele A.C.	4. 巻 361
2. 論文標題 Determination of the Venus eddy diffusion profile from CO and CO2 profiles using SOIR/Venus Express observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114388 ~ 114388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114388	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 Koyama Shungo, Terada Naoki, Nakagawa Hiromu, Kuroda Takeshi, Sekine Yasuhito	4. 巻 912
2. 論文標題 Stability of Atmospheric Redox States of Early Mars Inferred from Time Response of the Regulation of H and O Losses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 135 ~ 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf0ac	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 Vandaele Ann Carine et al.	4. 巻 568
2. 論文標題 Martian dust storm impact on atmospheric H2O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 521 ~ 525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-019-1097-3	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 Korablev Oleg et al.	4. 巻 568
2. 論文標題 No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 517 ~ 520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-019-1096-4	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 Kamada A., Kuroda T., Kasaba Y., Terada N., Nakagawa H.	4. 巻 368
2. 論文標題 Global climate and river transport simulations of early Mars around the Noachian and Hesperian boundary	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114618 ~ 114618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114618	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9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Hiromu Nakagawa, Roger V Yelle, Fayu Jiang, Sonal Jain, Loic Verdier, Franck Montmessin, Nao Yoshida, Nicholas McCord Schneider, Francisco Gonzalez-Galindo, Naoki Terada, Hitoshi Fujiwara, Takeshi Imamura, Kaori Terada, Justin Deighan, Bruce Martin Jakosky
2. 発表標題 Day-night variation of O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> in Mars lower thermosphere
3. 学会等名 AGU fall meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川 広務, 笠羽 康正, 青木 翔平, Mahiaux Arnaud, 小暮 李成, 岩淵 弘信, 出村 裕英
2. 発表標題 米欧火星探査機群観測データによる新大気リトリバル技術の検証 (2) -欧 ExoMars Trace Gas Orbiter および 日 MMX への応用展開 準備-
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川 広務, 吉田 奈央, 寺田 直樹, 藤原均, 今村剛, 寺田香織, 関 華奈子, Schneider Nicholas M, Jain Sonal, Yelle Roger V, Montmessin Franck, Groller Hannes, Jakosky Bruce M
2. 発表標題 Day-night variation of O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> in Mars lower thermosphere
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第148回総会・講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 中川 広務, Jain Sonal, Schneider Nicholas, Montmessin Franck, Yelle Roger, Jiang Fayu, erdier Loic, 黒田 剛史, 吉田 奈央, 藤原 均, 今村 剛, 寺田 香織, 寺田 直樹, 関 華奈子, Groller Hannes, Deighan Justi
2. 発表標題 A warm layer in the nightside mesosphere of Mars
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nao Yoshida, Naoki Terada, Hiromu Nakagawa, David Brain, Shotaro Sakai
2. 発表標題 Seasonal variation of dayside ionospheric compositions coupled with neutral upper atmosphere on Mars
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromu Nakagawa
2. 発表標題 A warm layer in the summer night side mesosphere of Mars
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川広務
2. 発表標題 Global characterization of wave perturbations in the middle atmosphere on Mars
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川広務
2. 発表標題 Water cycle and its evolution: High-speed H2O transport to upper atmosphere on Mars
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川広務
2. 発表標題 Unexpected warmlayer in the nightside mesosphere of Mars
3. 学会等名 SGEPSS
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hiromu Nakagawa (Ed. by A. Yamagishi, T. Kakegawa, and T. Usui)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 14 (in 454)
3. 書名 Atmosphere of Mars (Astrobiology (From the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence))	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	青木 翔平  (Aoki Shohei)  (60773629)	東北大学・理学研究科・客員研究者   (11301)	

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
---------	---------