

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03980

研究課題名(和文) 高分解能大気シミュレーションが拓く火星気象の精緻な理解と予報へのアプローチ

研究課題名(英文) Frontier of detailed understanding of meteorology on Mars and approach to its forecasting with high-resolution atmospheric simulations

研究代表者

黒田 剛史 (Kuroda, Takeshi)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：40613394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：2018年に観測された火星の全球規模のダストストームが大気重力波の励起と伝播に与える影響について、全球約 $1^\circ$ 分解能の大気モデルによる計算から、下層大気では安定度が高まる影響で励起が弱まり、中層大気では平均風速場の変化に伴いエネルギーが強まることを示した。また大気モデルの結果は最近の観測で示された温度場・風速場の特徴的な変動に対する議論に用いられ、さらに火星表面に季節的に表出する斜面の筋模様を液体の水と仮定した場合の底からの水蒸気の拡散とその観測可能性、レゴリス層の吸湿性とその水循環過程に対する影響についてもシミュレーション研究を行い、5編の査読論文発表につなげた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義は、火星大気複雑な現象を高分解能大気モデルと観測データを組み合わせて解明することにある。特に全球規模のダストストームが与える細かな波動等への様々な影響、水蒸気の挙動など、従来の観測・モデル研究から明らかにされていない気象の謎に迫り、将来火星探査で行うべき観測を提案していくことを目指す。さらには火星の気象予報の実現に向けての根幹となるダストストームの生成・発展過程の理解に関しての新たな知見を得ることにつながる。社会的にも将来の有人火星探査において重要かつ実用的な火星天気予報システム、及びエネルギー源確保や生命維持に必要な水資源探査に協力する体制を構築する足がかりとなる。

研究成果の概要(英文)：Calculations using an atmospheric model with a global resolution of approximately  $1^\circ$  were conducted to examine the impact of the global dust storm on Mars as observed in 2018 on the excitation and propagation of gravity waves. The results showed that the increase of stability led to a weakening of the excitation in the lower atmosphere, while the wave energy was enhanced due to changes in the zonal-mean wind field in the middle atmosphere. Also, the results of the atmospheric model were used to discuss the characteristic variations in temperature and wind speed fields recently observed. Furthermore, the simulation studies to investigate the possible diffusion of water vapor from the recurring slope lineae on the surface of Mars were conducted to discuss the observability of the diffusion, as well as the impact of the processes of water vapor adsorption by regolith on the water cycle on Mars. These efforts resulted in the publication of five peer-reviewed papers.

研究分野：惑星気象学

キーワード：火星 大気大循環モデル 大気重力波 大気物質循環 表層水環境 レゴリス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

火星大気の高分解能な観測データの蓄積が進んでおり、特にダストや水蒸気については、 $0.1^\circ$  (約 6km 相当)の水平分解能での精緻な分布観測データも得られ、観測事実の理論的な検証が待たれる状況に入っていた。理論検証の道具となる火星大気大循環モデル(MGCM: Mars Global Climate Model)は、世界で約 10 の研究チームが水平グリッド間隔  $5^\circ$  (約 300km)程度で高度約 80km 以下の観測温度場を再現し、水・ダストなどの物質循環モデリングも合わせて進められていたが、観測データの精緻さを十分に活かせる全球水平高分解能でのシミュレーションは、遂行に十分な計算機資源確保の困難さもありなされていなかった。

研究代表者はこれまでの研究の中で、水平分解能 $\sim 1.1^\circ$  ( $\sim 67$  km 相当、スペクトルモデル切断波数 T106)での MGCM シミュレーションを行い、水平波長 200 km 以上の大気重力波の励起と伝播をパラメタリゼーションを用いずに再現、その中で特に下層で励起される波長 200~350 km の重力波が上方に伝播される中で砕波して中上層大気(高度 50~80 km)の風速場に影響を与えることを示した[Kuroda et al. 2015, 2016, 2019]。加えて 2018 年に発生した全球規模のダストストームが水蒸気や微量物質の分布に広範囲な高度で影響を与えることが示され[Aoki et al. 2019; Neary et al. 2019]、大気重力波の励起と伝播についてもダストストームの影響を大きく受けることが示唆された。火星の大規模なダストストームは大気温度場・安定性・雲生成・組成など火星気象のあらゆる側面に影響を与えることから、高分解能 MGCM と観測データを用いた多角的な検証は火星の大気散逸過程・気候変動を探る上で急務であった。

また、以上からもダストストーム発生機構の理解が予報の実現に向けた精緻な火星気象理解の肝となるが、それには km スケール以下の擾乱の再現が鍵となるため、これまで研究に用いられてきた高分解能 MGCM よりもさらに分解能を上げた「超高分解能 MGCM」の開発に取り組む必要があった。km スケールの全球計算は Kuroda et al. [2015, 2016, 2019]で用いた静力学モデルでは困難で、非静力学モデルの活用を検討する必要があった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者がこれまでに行った当時世界最先端の火星大気水平高分解能計算を用いた研究を土台に、観測されているがこれまでの理論計算では解明されていない火星の気象の謎に迫ることである。モデルの精緻化により当時最新の周回線観測から窺えるダストや水蒸気の細かい動きを再現してそのメカニズムに迫るとともに、大気重力波のような細かい波動が全球の大気力学に与える影響を検証する。火星における様々なスケールの気象現象を包括的に理解することによりダストストームの生成・発展過程の解明につながる知見を得て、2030 年代以降に見込まれる有人火星探査に向けて必要不可欠かつ実用的な「火星の天気予報」を行う足掛かりとする。

### 3. 研究の方法

研究代表者が長年開発に携わってきた MGCM (東京大学大気海洋研究所等で開発された MIROC の力学コアに火星大気のパラメタ・物理過程を導入)を用いた水平分解能 $\sim 1.1^\circ$ 計算を行い、全球ダストストーム時に相当するダスト光学的厚さを導入した計算からダストストームが大気重力波の励起・伝播や大気場そのものに与える影響を観測との比較を通して調べた。またこの分解能で水蒸気の輸送過程の計算を行い、考えられる地表からの水蒸気放出を導入した上でその拡散の過程と観測可能性に迫り、さらにレゴリスによる水蒸気吸着の効果を検討した計算にも着手し、精緻な水分分布観測データの検証に有用なモデルの開発を進めた。

### 4. 研究成果

#### (1) 全球規模ダストストームが大気重力波の励起と伝播に与える影響

全球ダストストームが発生した 2018 年(Mars Year 34)の北半球秋~冬にかけての光学的厚さ [Montabone et al. 2020]に相当する全球水平分解能 $\sim 1.1^\circ$ の MGCM 計算を行い、全球ダストストーム不発生の場合の同季節の計算結果[Kuroda et al. 2019]と比較した。全球ダストストーム発生に伴い下層大気では安定度が高まったことで大気重力波の活動が最大 2 倍以上のファクターで弱まり、これは Mars Climate Sounder により火星周回から取得した大気観測データの解析結果 [Heavens et al. 2020]と定性的に一致した。一方で中層大気(高度 70 km 付近)では、平均帯状風の変化に伴い下層大気で発生した大気重力波の成分の多くが上層に向かう途中でフィルタリングされることなく到達する影響で、逆に最大約 2 倍のファクターで強まった(図 1)。この成果は Journal of Geophysical Research Planets [Kuroda et al., 2020]にて査読論文として発表された。

#### (2) 中上層大気温度場・風速場観測との連携：ダストストーム、大気重力波の影響

火星探査機 MAVEN の紫外分光観測により、北半球春~夏にかけての夜側中間圏(高度 $\sim 80$  km)においてこれまでの MGCM 計算による見積もりよりも最大 90 K 程度の昇温が見られることが発見された[Nakagawa et al. 2020]。また地上望遠鏡による赤外分光のドップラーシフト観測により、全球ダストストームの前後での高度 $\sim 80$  km 赤道域の東風が  $200 \text{ m s}^{-1}$  超にも達することが示された[Miyamoto et al. 2021]。研究代表者はこれらの観測論文の共著者として、得られた結果の

科学的解釈を行い、特に後者においては MGCM の計算結果[Kuroda et al. 2019, 2020] を用いて東風加速のメカニズムについて詳しく議論した。

(3) 大気中の水蒸気輸送と観測可能性 及び 地下～大気間の水の出入り

火星の地表面では RSL (Recurring Slope Lineae) と呼ばれる季節的に表出する斜面の筋模様がいくつも観測されており[Stillman et al. 2017]、液体の(塩)水が表出して大気中への水蒸気を供給源となっている可能性がある。そこで全球水平分解能 $\sim 1.1^\circ$ の MGCM 計算により、実験[Altheide et al. 2009]から見積もられる放出量をもとに RSL から放出される水蒸気がどのように大気中に広がり、またそれがリモートセンシング等により観測可能であるかどうかを検証した。その結果、放出される水蒸気は昼間に大気境界層の中で急速に広がり、またその量は背景に存在する水蒸気量の  $10^{-3}\sim 10^{-4}$  のオーダーのため観測により特定の検出することは困難であることが示された(図 2)。一方で水蒸気が盆地や谷に蓄積される傾向が見られたことで、将来の火星水観測及びシミュレーション研究で目指すべき方向性について示唆を与えた。この成果は Icarus [Kurokawa et al. 2022]にて査読論文として発表された。

加えて火星の地表を覆うレゴリス層の吸湿性[Jakosky et al. 1997]に着目し、MGCM の水循環過程に地表のレゴリスによる水の吸着効果を導入した計算を進めた。具体的には大気～レゴリス間の水のやり取り、レゴリス内の水拡散・吸着・凝結(それに伴う空隙率と地面熱伝導率の変化も考慮)の過程、またレゴリスの粒径分布を熱慣性のデータから見積もった上で分子拡散とクヌーセン拡散を考慮したレゴリス内の水の鉛直輸送を導入した。結果については大気中の水蒸気の吸着量などにまだ改善の余地があるが、定性的な緯度分布については Mars Odyssey の熱外中性子フラックス分布からの見積もりと整合する結果が得られた[Kobayashi et al. 2023]。

(4) その他

非静力学モデルを用いて km スケールの全球計算を実現する「超高分解能 MGCM」については、理化学研究所で開発された非静力学正 20 面体格子モデル SCALE-GM を力学コアとしての開発が研究代表者も共著として進んでおり、現在までに水平分解能 0.9 km の地形入り計算が実現して観測と同スケールの対流セルの再現に至っている[櫻村他 2022]。また本研究課題の要素を拡張し、様々なスケールの大気シミュレーション、データ同化、ダストストーム発生データベースを活用した機械学習予測等を駆使して本格的な「火星の天気予報」に挑む JST 創発的研究支援事業課題「火星における天気予報の実現と水環境マップの構築」が 2022 年度より開始された。

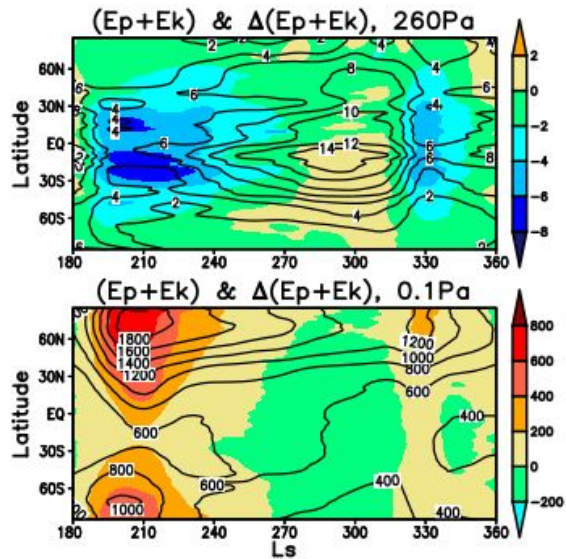


図 1: 大気重力波(水平波数 61~106)による単位質量あたりの位置エネルギーと運動エネルギーの和(単位  $J\ kg^{-1}$ )について、Mars Year 34 での計算結果(コンター)と同季節・全球ダストストーム不発生の場合の計算結果[Kuroda et al. 2019]との差分(カラーシェード)の高度 260 Pa ( $\sim 5$  km, 上)と 0.1 Pa ( $\sim 70$  km, 下)の季節・緯度分布。Kuroda et al. [2020]より(一部改変)。

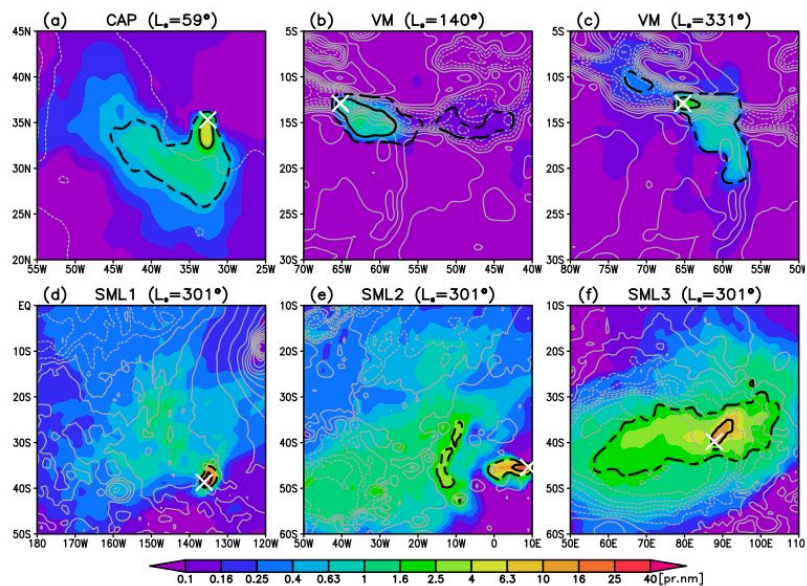


図 2: 火星で RSL が観測されている各地域における、1 つの RSL から 20 火星日間に放出された水蒸気カラム量の分布。実線コンターと破線コンターはそれぞれカラム量が最大値の 0.5 倍以上及び 0.1 倍以上の範囲、灰色コンターは地形を表す。Kurokawa et al. [2022]より。

< 引用文献 >

- Kuroda et al., 2015: A global view of gravity waves in the Martian atmosphere inferred from a high-resolution general circulation model. *Geophysical Research Letters*, 42, 9213–9222.
- Kuroda et al., 2016: Global distribution of gravity wave sources and fields in the Martian atmosphere during equinox and solstice inferred from a high-resolution general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73, 4895–4909.
- Kuroda et al., 2019: Annual cycle of gravity wave activity derived from a high-resolution Martian general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 1618–1632.
- Aoki et al., 2019: Water vapor vertical profile on Mars in dust storms observed by TGO/NOMAD. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 3482–3497.
- Neary et al., 2019: Explanation for the increase in high altitude water on Mars observed by NOMAD during the 2018 global dust storm. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL084354.
- Montabone et al., 2020: Martian Year 34 Column Dust Climatology from Mars Climate Sounder Observations: Reconstructed Maps and Model Simulations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2019JE006111.
- Heavens et al. 2020: A multiannual record of gravity wave activity in Mars's lower atmosphere from on-planet observations by the Mars Climate Sounder. *Icarus*, 341, 113630.
- Kuroda et al. 2020: Gravity Wave Activity in the Atmosphere of Mars During the 2018 Global Dust Storm: Simulations with a High-Resolution Model. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125, e2020JE006556.
- Nakagawa et al. 2020: A Warm Layer in the Nightside Mesosphere of Mars. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085646.
- Miyamoto et al. 2021: Intense Zonal Wind in the Martian Mesosphere during the 2018 Planet-Encircling Dust Event Observed by Ground-Based Infrared Heterodyne Spectroscopy. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092413.
- Stillman et al. 2017: Characteristics of the numerous and widespread recurring slope lineae (RSL) in Valles Marineris, Mars. *Icarus*, 285, 195–210.
- Altheide et al. 2009: Experimental investigation of the stability and evaporation of sulfate and chloride brines on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 282, 69–78.
- Kurokawa et al. 2022: Can we constrain the origin of Mars' recurring slope lineae using atmospheric observations? *Icarus*, 371, 114688.
- Jakosky et al. 1997: The Mars Water Cycle: Determining the Role of Exchange with the Regolith. *Icarus*, 130, 87–95.
- Kobayashi et al. 2023: Effect of water vapor exchange between the regolith and the atmosphere on the Martian water cycle on Mars GCM. International conference on new insights into Mars achieved by remote-sensing observation, numerical simulation, and laboratory experiment of trace gases.
- 櫻村他 2022: 火星大気の全球非静力学高解像度計算. 日本気象学会 2022 年度秋季大会.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 7件）

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 e2021GL092413
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kurokawa Hiroyuki, Kuroda Takeshi, Aoki Shohei, Nakagawa Hiromu	4. 巻 371
2. 論文標題 Can we constrain the origin of Mars' recurring slope lineae using atmospheric observations?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114688
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2021.114688	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kuroda Takeshi, Medvedev Alexander S., Yigit Erdal	4. 巻 125
2. 論文標題 Gravity Wave Activity in the Atmosphere of Mars During the 2018 Global Dust Storm: Simulations With a High Resolution Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2020JE006556
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JE006556	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kuroda Takeshi, Yigit Erdal, Medvedev Alexander S.	4. 巻 124
2. 論文標題 Annual Cycle of Gravity Wave Activity Derived From a High Resolution Martian General Circulation Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1618-1632
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018JE005847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する



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, Groeller 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 e2019GL085646
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kuroda Takeshi, Kurokawa Hiroyuki, Aoki Shohei, Nakagawa Hiromu, Kobayashi Mirai	4. 巻 -
2. 論文標題 Approach to the Mapping of Water Environment on Present Mars - Validation of Possible Water Vapor Emission from Recurring Slope Lineae Using a GCM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Abstract book of 'Seventh international workshop on the Mars atmosphere: Modelling and observations'	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) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 A. S. Medvedev, E. Yigit, E. D. Starichenko, D. S. Shaposhnikov, T. Kuroda, P. Hartogh	4. 巻 -
2. 論文標題 Gravity Waves and Their Effects During Quiet Times and Dust Storms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Abstract book of 'Seventh international workshop on the Mars atmosphere: Modelling and observations'	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) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 T. Kuroda, H. Kurokawa, S. Aoki, H. Nakagawa, M. Kobayashi
2. 発表標題 Approach to the Mapping of Water Environment on Present Mars - Validation of Possible Water Vapor Emission from Recurring Slope Lineae Using a GCM
3. 学会等名 Seventh international workshop on the Mars atmosphere: modelling and observations (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kuroda, H. Kurokawa, S. Aoki, H. Nakagawa
2. 発表標題 Simulation of the water vapor emission from recurring slope lineae using a global climate model
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kuroda, A. Kamada, M. Kobayashi
2. 発表標題 Current State of DRAMATIC Mars GCM: Simulations of Gravity Waves, CO2 Snowfall, Water Cycle and Beyond
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒田剛史, 黒川宏之, 青木翔平, 中川広務
2. 発表標題 火星RSLからの水放出シミュレーション
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田剛史
2. 発表標題 テラヘルツ測器による水・酸素観測に資する火星大気環境モデル
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kuroda, Y. Kasai, T. Yamada, H. Maezawa, R. Takahashi, S. Nakasuka
2. 発表標題 TEREX-1: A Micro-satellite Terahertz Lander for the Exploration of Water/Oxygen Resources on Mars
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kuroda, A. Kamada, N. Terada, Y. Kasaba
2. 発表標題 DRAMATIC on Mars: 3-Dimensional Simulations of Atmospheric Waves, CO <sub>2</sub> Snowfall, Water Cycle and Paleoclimate
3. 学会等名 The 4th International Conference on Lunar and Deep Space Exploration (LDSE) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田剛史, A.S. Medvedev, E. Yigit
2. 発表標題 火星における大気重力波の発生と伝播：高分解能GCM実験
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田剛史
2. 発表標題 火星全球気候モデリングの精緻化に向けて：水循環とH <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 比
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 T. Kuroda, A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2. 発表標題 Simulation of the Water Environment on the Present and Past Mars Using a Global Climate Model
3. 学会等名 Planet 2/RESCEU Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田剛史
2. 発表標題 火星大気大循環モデリングの精緻化：重力波と水輸送
3. 学会等名 第146回 SGEPSS総会および講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kuroda
2. 発表標題 GCM Simulations of the Martian Winter Polar Atmosphere and CO2 Snowfalls: Dependence of Horizontal Resolution and Radiative Effects of CO2 Ice Clouds
3. 学会等名 Seventh International Conference on Mars Polar Science and Exploration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒田剛史, 黒川宏之, 青木翔平, 中川広務
2. 発表標題 Simulation of Possible Water Emission from RSL on Mars using a High Resolution GCM
3. 学会等名 The 21st Symposium on Planetary Sciences
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kuroda, A. Kamada, M. Kobayashi
2. 発表標題 Overview of DRAMATIC MGC: Simulations of gravity waves, CO2 snowfall, water cycle and beyond
3. 学会等名 International conference on new insights into Mars achieved by remote-sensing observation, numerical simulation, and laboratory experiment of trace gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Kobayashi, A. Kamada, T. Kuroda, H. Kurokawa, S. Aoki, H. Nakagawa, N. Terada
2. 発表標題 Effect of water vapor exchange between the regolith and the atmosphere on the Martian water cycle on Mars GCM
3. 学会等名 International conference on new insights into Mars achieved by remote-sensing observation, numerical simulation, and laboratory experiment of trace gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古林未来, 黒田剛史, 中川広務, 寺田直樹
2. 発表標題 The regolith-atmosphere interaction on the amounts of water vapor on Mars
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古林未来, 黒田剛史, 鎌田有紘, 黒川宏之, 青木翔平, 中川広務, 寺田直樹
2. 発表標題 火星GCMによるレゴリス-大気間の水交換が水蒸気カラム量に与える影響
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第152回総会及び講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kobayashi, T. Kuroda, A. Kamada, H. Kurokawa, S. Aoki, H. Nakagawa, N. Terada
2. 発表標題 Diurnal variation of water vapor due to the regolith-atmosphere exchange simulated in a Mars Global Climate Model (MGCM)
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古林未来, 鎌田有紘, 黒田剛史, 黒川宏之, 青木翔平, 中川広務, 寺田直樹
2. 発表標題 レゴリスの粒径を考慮した火星GCMにおけるレゴリス～大気間の水蒸気交換が火星水循環に与える影響
3. 学会等名 第24回 惑星圏シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 櫻村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 全球非静力学火星大気大循環モデルによる鉛直対流とダスト巻き上げ輸送の計算
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 櫻村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 火星大気大循環の全球非静力学高解像度シミュレーションに向けて
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 全球非静力学火星大気大循環モデルの開発：地形あり計算
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 全球非静力学火星大気大循環モデルの開発：地形あり計算
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 全球非静力学火星大気大循環モデルの開発：地形あり計算
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 櫻村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 火星大気の全球非静力学高解像度計算
3. 学会等名 日本惑星科学会2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 櫻村博基, 八代尚, 西澤誠也, 富田浩文, 小郷原一智, 黒田剛史, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 火星大気の全球非静力学高解像度計算
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東北大学 大学院理学研究科 地球物理学専攻 惑星大気物理学分野  <a href="https://pat.gp.tohoku.ac.jp/">https://pat.gp.tohoku.ac.jp/</a>          Homepage of Takeshi Kuroda (Planetary Atmosphere)  <a href="http://kuroda.dramatic-planets.com/">http://kuroda.dramatic-planets.com/</a>          Researchmap  <a href="https://researchmap.jp/takeshi_kuroda/">https://researchmap.jp/takeshi_kuroda/</a></p>
---

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
研究協力者	Medvedev Alexander (Medvedev Alexander S.)		
研究協力者	Yigit Erdal (Yigit Erdal)		
研究協力者	中川 広務 (Nakagawa Hiromu)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	寺田 直樹  (Terada Naoki)		

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			
ドイツ	MPI for Solar System Research			
米国	George Mason University	University of Colorado	University of Arizona	
フランス	LATMOS			