

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05552

研究課題名(和文) 地表面から熱圏までをつないで気候変動に迫る，火星大気物理化学過程のモデリング研究

研究課題名(英文) Modeling study of the physical and chemical processes of Martian atmosphere connecting from the surface to thermosphere and approaching to the climate change

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：水平分解能約 $1.1^\circ$ の火星大気大循環モデルを用いて、重力波の励起と上層(モデル上端となる高度約80kmまで)への伝播の様子、大気温度・風速場に与える影響について水平波数依存性と季節変化を検証した。また水循環・HD0/H20同位体分別過程、極夜のCO2降雪過程の全球気候モデルによる再現における水平分解能依存性についてまとめ、最近の観測により理解が急速に進みつつある火星の大気上下結合に絡めた研究を進めた。さらに液体の海の存在を仮定した約38億年前の火星気候のシミュレーションを行い、赤道域で降雨・積雪が季節によって繰り返される「冷涼・湿潤」な気候であった可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

形成初期の液体の海が地表に存在したと考えられる状態から不可逆的に水を失った火星の気候変動過程に迫るべく、現在の火星下層大気における大気重力波の励起及び上層大気への伝播とそれらを考慮した精緻な水・物質循環を高分解能全球大気モデルを用いて再現し、熱圏での大気散逸過程に与える力学的・化学的な影響を調べた。合わせて初期火星の気候も全球大気モデルで推測し、観測されている事実と照合し妥当性を議論することで火星の気候変遷とそのメカニズムについて新しい理論的な示唆を与えた。

研究成果の概要(英文)：Using a Mars general circulation model (MGCM) with the horizontal resolution of  $\sim 1.1$  degrees, we investigated the generation and propagation (up to  $\sim 80$  km of the model top) of gravity waves, and the effects of them on the atmospheric temperature and wind fields, including the dependency of horizontal wavenumbers and seasonal changes. Also, we investigated the dependency of horizontal resolution of the MGCM on the simulated water cycle (including HD0/H20 isotopic fractionations) and polar-night CO2 snowfalls in the lower atmosphere, for the connections with the processes of upper atmosphere and atmospheric escape of which the observational investigations by the spacecrafts have significantly progressed recently. Moreover, we made the GCM simulations of paleo-Mars climate in  $\sim 3.8$  Ga, and indicated the possibility of a 'cool and wet' climate at that time which repeated the rainfall and snowfall seasonally in the equatorial regions.

研究分野：惑星気象学

キーワード：火星 大気大循環モデル 大気物質循環 古気候 大気重力波

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在は乾燥・寒冷な気候であるが、その地表には流水の痕(Valley Networks)があり過去には地表に液体の水が存在していたと考えられる火星。その誕生から現在に至るまで、どのような気候の変遷を経験してきたか。その鍵を求めて米国の火星探査機 MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution)が 2014 年 9 月に火星周回軌道に投入され、火星上層大気(高度 100km 以上)の大気密度・組成の観測を始めた。また、水・微量物質を含む詳しい下層大気の組成を観測する予定の欧州の火星探査機 EMTGO (ExoMars Trace Gas Orbiter)が 2016 年に打ち上げを控えていた。

火星の気候変動に迫る鍵の一つとして、大気上下結合過程(下層大気(高度 100km 以下)・上層大気間の力学的エネルギー及び物質のやり取り)の解明がある。とりわけ波長 200km 程度の大気重力波は火星の下層大気で励起され、上層大気に伝播して飽和状態になり砕波することで下層の運動量を上層へと輸送し、上層大気(高度 100km 以上)の温度・風速分布に大きな影響を与えることが先行研究 [Medvedev et al., 2011 など]から示されていた。しかし火星大気における上下結合の理論研究は水平分解能約 300km の大気大循環モデル(GCM)に地球大気研究で用いられる重力波抵抗パラメタリゼーションをそのまま適用して行われており、このパラメタリゼーションが本当にそのまま火星に適用可能かどうかは明らかでなく、この問題を解決する一つの方法としての火星下層大気(高度 100km 以下)の重力波励起を分解可能な水平分解能を用いた全球計算は研究代表者による成果 [Kuroda et al., 2015]以前には存在しなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は火星大気(高度 100km 以下)の力学・物質循環における上下結合過程のシミュレーションを通じ、MAVEN 観測との積極的連携のもと、下層大気(高度 100km 以下)の力学・物質循環過程が上層大気(高度 100km 以上)の散逸過程に与える影響に迫る。特に上下結合過程において重要な大気重力波の励起と伝播をパラメタリゼーションなしで再現可能な水平高分解能計算を行うことがポイントで、合わせて大気散逸シミュレーションとカップリング可能な上層大気(高度 100km 以上)の組成を得るための物理過程・化学過程を導入、EMTGO 観測とも連携し、初期の現在の地球に近い水惑星状態から現在に至るまでの火星の気候変動の様相を物理化学過程に基づき理論的に描く。

このアプローチにより、とりわけこれまで注目されていなかった小さなスケールの大気擾乱が火星の気候変動に及ぼす影響について知見が得られ、惑星のハビタビリティ研究・生命探査に対しても新しい示唆を与えることが期待された。

### 3. 研究の方法

研究代表者が長年開発に携わってきた、地球大気(高度 100km 以下)の GCM(東京大学大気海洋研究所等で開発された MIROC)の力学コアを用いた火星大気 GCM である DRAMATIC MGCM を水平分解能約 1.1°(グリッド間隔~67km)で運用し、その中でパラメタリゼーションを用いずに再現される大気重力波の励起のメカニズムとその伝播の様子、上層大気場に与える影響を解明する。並行して下層の物理化学過程、とりわけ水循環過程(HDO/H<sub>2</sub>O 同位体分別を含む)を洗練化させ、大気重力波の効果を詳しく考慮した上で下層~上層間の物質のやり取りを再現し、上層の大気組成、ひいては大気散逸過程・気候変動に与える影響について考察する。

### 4. 研究成果

#### (1) 重力波の励起・伝播とその波数依存性・季節変動

水平分解能約 1.1°の DRAMATIC MGCM を用いて、重力波の励起と上層(モデル上端となる高度約 80km まで)への伝播の様子、大気場に与える影響について波数依存性と季節変化を検証した。いずれの季節でも重力波は地形・山岳から励起されており、また秋季~春季の中緯度域に存在する西風ジェットからも励起が見られた。水平波数  $s=61\sim 106$  の重力波がもたらすエネルギーは、高度約 80km において平均で  $s=31\sim 60$  の約 3 倍、 $s=21\sim 30$  の約 10 倍に達し、風速場の加速度に対しても同様の割合で寄与している。またこの高度で重力波は大部分の季節・緯度では東西風を弱める方向に働くが、夏至・冬至前後の赤道域では東風風速を強める働きをしていた。これらの成果は Journal of the Atmospheric Science [Kuroda et al., 2016] 及び Journal of Geophysical Research Planets [Kuroda et al., 2019] にて査読論文として発表された。

#### (2) 水・物質循環過程の計算分解能依存性

下層大気の水循環過程(HDO/H<sub>2</sub>O 同位体分別を含む)を DRAMATIC MGCM に導入(図 1 参照)、水平分解能 5.6°~1.1°の間で 5 種類の計算を行い、水循環過程の分解能依存性を見た。その結果、高分解能計算の方が大気中の水蒸

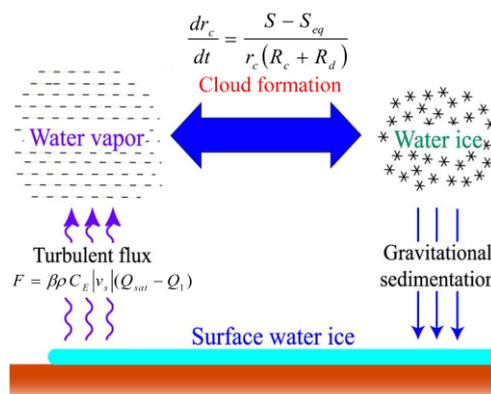


図 1: DRAMATIC MGCM に導入した水循環スキームの模式図。

気量が多くなる傾向がみられ、重力波の効果による温度・風速分布や地表からの水蒸気フラックスの変化など、論文投稿に向けて考えられる原因について分析を進めている。なお、極夜の CO<sub>2</sub> 降雪の再現性についても水平分解能依存性が見られ、極域の重力波のエネルギーが影響している可能性を指摘した[Kuroda, 2020]。

研究期間中の 2018 年に発生した全球ダストストームは、大気上下結合に関わる様々な観測データ及び関連研究成果をもたらした。一例として、水蒸気が高度約 100km にまで輸送される様子が EMTGO により観測され[Aoki et al., 2019]、またそれが上層大気の化学・大気散逸過程に影響を与える可能性も海外の GCM 研究により示唆された[Neary et al., 2019]。ただし Neary et al. [2019]では水平分解能 4°と粗めの GCM を用いており、本研究により精緻に評価される水循環過程を導入することで解釈が塗り替えられる可能性がある。精緻に評価された水循環と化学過程とをカップリングさせての大気散逸過程に対する評価は今後の課題として、引き続き研究を進める。

### (3) 火星古気候の GCM 計算

火星の気候変動を考える上での別角度からのアプローチとして、地表に液体の水が存在していたと考えられる約 38 億年前の火星気候シミュレーションにも取り組んだ。それまでの GCM を用いた先行研究では最大 2 気圧の二酸化炭素大気を仮定し、飽和水蒸気量相当の水蒸気の効果を含む大気放射過程を導入した計算が行われていたが、「暗い太陽のパラドックス」(当時の太陽放射量は現在の約 75%と推測される)もあり地表に液体の水が存在可能な温度は再現できず、Valley Networks の再現は火山・隕石衝突等による突発的な温度上昇による積雪の融解などを考えるしかないと言われていた[Wordsworth et al., 2015 など]。

本研究では DRAMATIC MGCM と MIROC モデルの積雲対流・降水スキームを基に、現在の火星地形の低地(標高-2.54km 以下)において液体の海の存在を仮定した初期火星の GCM を構築、また求められる降雨量・融雪量から地表の流水量分布を求めた。二酸化炭素と水蒸気の大気に 1~数%混合比の水素分子(惑星内部からの脱ガスにより供給される)の存在を仮定し、二酸化炭素と水素の衝突に伴う赤外線吸収を加えたところ、この効果で十分な温暖化が起きうることを示した。特に地表 1.5 気圧、水素混合比 3%の場合は赤道域で降雨・積雪が季節によって繰り返される「冷涼・湿潤」な気候となり、これが約 100 万年続くと現在残る流水地形が形成できる地表流水量をもたらすことが示された[Kamada et al., 2020](図 2)。これは特別なイベントが起きなくても、流水地形を作ることができることを初めて示した研究となったが、観測されている Valley Networks を完全に再現したものではなく、初期火星における地形の変化や氷河による浸食も考慮に入れた研究を引き続き進める。

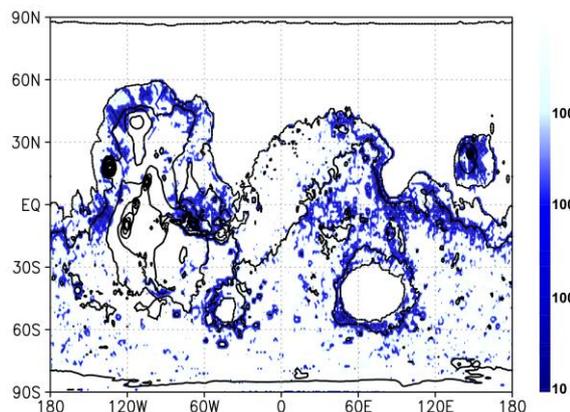


図 2: 地表 1.5 気圧、二酸化炭素 96%、水素混合比 3%の初期火星モデルで再現された、流水地形を作るのに必要な「冷涼・湿潤」な気候の継続期間(単位: 万年)。Kamada et al. [2020]より。

#### <引用文献>

- ① Medvedev et al., 2011: Influence of gravity waves on the Martian atmosphere: General circulation modeling. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116, E10004.
- ② 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.
- ③ Kuroda et al., 2016: Global distribution of gravity wave sources and fields in the Martian atmosphere during equinox and solstice inferred from high-resolution general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73, 4895–4909.
- ④ 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.
- ⑤ Kuroda, 2020: GCM Simulations of the Martian Winter Polar Atmosphere and CO<sub>2</sub> Snowfalls: Dependence of Horizontal Resolution and Radiative Effects of CO<sub>2</sub> Ice Clouds. *Seventh International Conference on Mars Polar Science and Exploration*.
- ⑥ 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.
- ⑦ 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.
- ⑧ Wordsworth et al., 2015: Comparison of “warm and wet” and “cold and icy” scenarios for early Mars in a 3-D climate model. *J. Geophys. Res. Planets* 120, 1201–1219.
- ⑨ Kamada et al., 2020: A coupled atmosphere–hydrosphere global climate model of early Mars: A ‘cool and wet’ scenario for the formation of water channels. *Icarus*, 338, 113567.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 6件）

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., Toriumi K.	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 113567
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 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 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 Jakosky B.M., Brain D., Chaffin M., Curry S., Deighan J., Grebowsky J., Halekas J., Leblanc F., Lillis R., Luhmann J.G., Kuroda T., 他	4. 巻 315
2. 論文標題 Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 146-157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.05.030	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 Larsson Richard, Kasai Yasuko, Kuroda Takeshi, Sato Shigeru, Yamada Takayoshi, Maezawa Hiroyuki, Hasegawa Yutaka, Nishibori Toshiyuki, Nakasuka Shinichi, Hartogh Paul	4. 巻 7
2. 論文標題 Mars submillimeter sensor on microsatellite: sensor feasibility study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems	6. 最初と最後の頁 331-341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gi-7-331-2018	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, T., Y. Kasai, S. Nakasuka, H. Maezawa and R. Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Weather forecast on Mars: Significances and what we need	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Abstract book of 'Mars Atmosphere Data Assimilation workshop 2018'	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 K. Noguchi, Y. Morii, N. Oda, T. Kuroda, S. Tellmann, and M. Paetzold	4. 巻 122
2. 論文標題 Role of stationary and transient waves in CO2 supersaturation during northern winter in the Martian atmosphere revealed by MGS radio occultation measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 912-926
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JE005142	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 Dmitry S. Shaposhnikov, Alexander V. Rodin, Alexander S. Medvedev, Anna A. Fedorova, Takeshi Kuroda, and Paul Hartogh	4. 巻 123
2. 論文標題 Modeling the Hydrological Cycle in the Atmosphere of Mars: Influence of a Bimodal Size Distribution of Aerosol Nucleation Particles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 508-526
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JE005384	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 黒田剛史, 佐川英夫, 関根康人, 笠井康子, Paul Hartogh	4. 巻 37
2. 論文標題 深宇宙探査機によるテラヘルツ波帯観測が拓く惑星科学	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本リモートセンシング学会誌	6. 最初と最後の頁 351-361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11440/rssj.37.351	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 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 and B.M. Jakosky	4. 巻 43
2. 論文標題 Comparison of the Martian thermospheric density and temperature from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 3095-3104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016GL068388	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 Kuroda, T., A.S. Medvedev, E. Yigit and P. Hartogh	4. 巻 73
2. 論文標題 Global Distribution of Gravity Wave Sources and Fields in the Martian Atmosphere during Equinox and Solstice Inferred from a High-Resolution General Circulation Model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Science	6. 最初と最後の頁 4895-4909
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-16-0142.1	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 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	4. 巻 122
2. 論文標題 Global distribution and parameter dependences of gravity wave activity in the Martian upper thermosphere derived from MAVEN/NGIMS observations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research Space Physics	6. 最初と最後の頁 2374-2397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JA023476	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 Kuroda, T., M. Kadowaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulation of the Small-Scale Dust Activities and their Mutual Interactions on the Atmospheric Dynamics using a High-Resolution Mars General Circulation Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Abstract book of 'Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration'	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 Kuroda, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 GCM Simulations of the Martian Winter Polar Atmosphere and CO2 Snowfalls: Dependence of Horizontal Resolution and Radiative Effects of CO2 Ice Clouds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Abstract book of 'Seventh International Conference on Mars Polar Science and Exploration'	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 Kuroda, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulation of the Water Cycle Including HD0/H2O Isotopic Fractionation on the Present Mars Using DRAMATIC MGCM	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Abstract book of 'Sixth 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 -

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2. 発表標題 GCM simulations of the present and past water environment on Mars
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, N. Terada and Y. Kasaba
2. 発表標題 DRAMATIC on Mars: 3-Dimensional Simulations of Atmospheric Waves, CO2 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HDO/H2O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 Kuroda, T., 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 SGEPSO総会および講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田剛史, 鎌田有紘, 鳥海克成, 笠羽康正, 寺田直樹, 中川広務
2. 発表標題 火星古気候の大気・水圏結合モデリング：Valley network再現に向けて
3. 学会等名 第146回 SGEPSO総会および講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa and K. Toriumi
2. 発表標題 A Coupled Atmosphere-Hydrosphere Global Climate Model of Early Mars: Reproduction of the 'Cool and Wet' Scenario and the Formation of Water Channels
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Kuroda
2. 発表標題 GCM Simulations of the Martian Winter Polar Atmosphere and CO <sub>2</sub> Snowfalls: Dependence of Horizontal Resolution and Radiative Effects of CO <sub>2</sub> 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 黒田剛史, 鎌田有紘, 鳥海克成, 笠羽康正, 寺田直樹, 中川広務
2. 発表標題 火星古気候の大気・水圏結合モデリング
3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuroda, T., R. Larsson, H. Sagawa, S. Aoki, and Y. Kasai
2. 発表標題 O <sub>2</sub> and related chemistry on Mars: Potential scientific targets for the future Mars terahertz sensor missions
3. 学会等名 AOGS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2. 発表標題 A coupled atmosphere-hydrosphere global climate model of early Mars: Reproduction of a 'cool and wet' scenario for the formation of water channels
3. 学会等名 COSPAR 2018 42nd Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2. 発表標題 Simulation of the coupled atmosphere and hydrosphere on early Mars using a GCM
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuroda, T., R. Larsson, H. Sagawa, S. Aoki, Y. Kasai, H. Maezawa and Y. Kasaba
2. 発表標題 O2 distributions and related chemistry on Mars: Potential scientific targets for the future Mars terahertz sensor missions
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒田剛史, 鎌田有紘, 鳥海克成, 笠羽康正, 寺田直樹, 中川広務
2. 発表標題 火星古気候を想定した全球3次元大気・水圏結合モデリング
3. 学会等名 日本惑星科学会2018年秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒田剛史, 山田崇貴, Larsson Richard, 佐川英夫, 青木翔平, 笠井康子, 前澤裕之, 笠羽康正
2. 発表標題 火星のO2分布と化学: テラヘルツセンサによる観測を見据えて
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第144回総会及び講演会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2 . 発表標題 GCM Simulations of the Water Environment on Mars: Present and Past
3 . 学会等名 The 20th Symposium on Planetary Sciences
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2 . 発表標題 Water environment on the present and past Mars:GCM simulations
3 . 学会等名 The 1st International Workshop for Aquaplanetology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2 . 発表標題 GCM simulations of the present and past water environment on Mars
3 . 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kuroda, T. and M. Kadowaki
2 . 発表標題 Simulation of the Small-Scale Dust Activities and their Mutual Interactions on the Atmospheric Dynamics using a High-Resolution Mars General Circulation Model
3 . 学会等名 Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Kuroda
2. 発表標題 Simulation of the Martian atmosphere using a General Circulation Model: Dynamics, CO2 snowfall, water cycle and paleoclimate
3. 学会等名 Rocks & Stars II Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Kuroda
2. 発表標題 Simulation of the high-resolution water cycle and HD0/H2O isotopic fractionation on Mars using DRAMATIC MGCM
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒田剛史
2. 発表標題 GCMを用いた火星の水循環とHD0/H2O同位体分別のシミュレーション：国際連携に向けて
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第142回総会及び講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒田剛史
2. 発表標題 火星大気モデルの開発状況と今後の展望
3. 学会等名 第9回深宇宙探査学シンポジウム-2020s火星への旅立ち-(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒田剛史
2. 発表標題 木星成層圏と火星古気候の放射計算
3. 学会等名 CPS/WTK 惑星大気放射計算ミニワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuroda, T., R. Larsson, H. Sagawa, S. Aoki, and Y. Kasai
2. 発表標題 O <sub>2</sub> and related chemistry on Mars: Potential scientific targets for the future Mars terahertz sensor missions
3. 学会等名 AOGS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuroda, T., A. Kamada, K. Toriumi, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa
2. 発表標題 A coupled atmosphere-hydrosphere global climate model of early Mars: Reproduction of a 'cool and wet' scenario for the formation of water channels
3. 学会等名 42nd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 Global distribution and parameter dependences of gravity wave activity in the Martian upper thermosphere derived from MAVEN/NGIMS observations
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1 . 発表者名 H. Nakagawa, Alexander Medvedev, Chris Mockel, Erdal Yigit, Takeshi Kuroda, Paul Hartogh, Kaori Terada, Naoki Terada, Kanako Seki, Nicholas Schneider, Sonal Jain, Scott Evans, Justin Deighan, William McClintock, Daniel Lo, Bruce Jakosky
2 . 発表標題 Comparison of the Martian thermospheric density and temperature from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling
3 . 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh
2 . 発表標題 Baroclinic waves and CO2 snowfalls in Martian winter polar atmosphere simulated by a general circulation model
3 . 学会等名 6th International Conference of Mars Polar Science and Exploration (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Kuroda, T., A.S. Medvedev, E. Yigit and P. Hartogh
2 . 発表標題 Global distribution of gravity wave fields and their seasonal dependence in the Martian atmosphere simulated in a high-resolution general circulation model
3 . 学会等名 DPS48/EPSC11 meeting (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 H. Nakagawa, 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
2 . 発表標題 A global view of small-scale perturbations in Mars' lower thermosphere derived from MAVEN/IUVS stellar occultation
3 . 学会等名 第140回SGEPSS総会および講演会
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 黒田剛史
2. 発表標題 DRAMATIC MGCMを用いた現在の火星環境における水循環のシミュレーション
3. 学会等名 第140回SGEPSS総会および講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中川広務, Alexander S. Medvedev, 黒田剛史, Erdal Yigit, 寺田直樹, 寺田香織, 藤原均, 関華奈子
2. 発表標題 MAVEN/IUVSと地上観測連携による火星中層大気観測
3. 学会等名 第30回大気圏シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 黒田剛史, Alexander S. Medvedev, Erdal Yigit, Paul Hartogh
2. 発表標題 高分解能火星 GCM による重力波の励起と伝播のシミュレーション：季節変化の解析
3. 学会等名 第30回大気圏シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 寺田直樹, Francois Leblanc, 中川広務, Alexander S. Medvedev, Erdal Yigit, 黒田剛史, 原拓也, Scott L. England, 藤原均, 寺田香織, 前田紗和, 関華奈子, Paul R. Mahaffy, Meredith Elrod, Mehdi Benna, Joseph Grebowsky, Bruce M. Jakosky
2. 発表標題 MAVEN/NGIMS による火星熱圏大気重力波の観測と大気散逸への影響
3. 学会等名 第30回大気圏シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kuroda, T., A.S. Medvedev, E. Yigit and P. Hartogh
2. 発表標題 Simulation of Gravity Wave Fields and Their Effects on the Large-scale Flow in the Martian Atmosphere Using a High-resolution General Circulation Model
3. 学会等名 6th international workshop on the Mars atmosphere: Modelling and observations (MAMO) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kuroda, T.
2. 発表標題 Simulation of the Water Cycle Including HDO/H2O Isotopic Fractionation on the Present Mars Using DRAMATIC MGCM
3. 学会等名 6th international workshop on the Mars atmosphere: Modelling and observations (MAMO) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Terada, N., F. Leblanc, H. Nakagawa, K. Terada, S. Maeda, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, T. Hara, S. L. England, H. Fujiwara, K. Seki, P. R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, J. Grebowsky, and B. M. Jakosky
2. 発表標題 MAVEN/NGIMS observations and full-particle DSMC simulations of gravity waves in the Martian upper thermosphere
3. 学会等名 第18回惑星圏研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Homepage of Takeshi Kuroda (Planetary Atmosphere)  
<http://kuroda.dramatic-planets.com/>

## 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.)	マックスプランク太陽系研究所	
研究協力者	門脇 正尚 (Kadowaki Masanao)	日本原子力研究開発機構	
研究協力者	青木 翔平 (Aoki Shohei)	ベルギー王立宇宙航空研究所・リエージュ大学	
連携研究者	寺田 直樹 (Terada Naoki) (70470060)	東北大学・理学研究科・教授  (11301)	
連携研究者	須藤 健悟 (Sudo Kengo) (40371744)	名古屋大学・環境学研究科・教授  (13901)	
連携研究者	中川 広務 (Nakagawa Hiromu) (30463772)	東北大学・理学研究科・助教  (11301)	