

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740317

研究課題名(和文) 表層過程と大気散逸を考慮した火星大気の水循環と水素同位体比分布のシミュレーション

研究課題名(英文) Simulation of the Martian water cycle and HDO/H<sub>2</sub>O isotopic fractionation taking the surface processes and atmospheric escape into account

研究代表者

黒田 剛史 (KURODA, TAKESHI)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40613394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題によって火星大気における物質循環、特に水循環・HDO/H<sub>2</sub>O同位体分別過程及び二酸化炭素氷雲生成・沈降による季節極冠生成過程を含む3次元モデリングについて大きく進展し、今後様々な観測データと連携して火星物質循環研究の土台となるモデルがほぼ完成した。観測との連携について一部の成果は論文発表され、とりわけ北極域冬季の二酸化炭素降雪・季節極冠生成シミュレーションの成果はNature Geoscienceにハイライトされるなど注目を集めた。また高分解能計算による重力波の励起と伝播の研究も、世界に先駆けて進めた。

研究成果の概要(英文)：With this research project, the 3-D modeling of Martian material transport using a general circulation model (GCM), especially the water cycle, HDO/H<sub>2</sub>O isotopic fractionation and CO<sub>2</sub> ice snowfall related to the formation of seasonal ice cap, has largely progressed. Now the development of a GCM which will be a basement of the studies of Martian material transport collaborating with various observational data has mostly completed. Parts of the research accomplishments collaborating with observations have publishes as papers. Especially the paper about the simulation of CO<sub>2</sub> snowfall and seasonal ice cap formations in northern winter polar region was highlighted by Nature Geoscience, and became an outstanding work. Also the first study of the generation of propagation of Martian gravity waves with a high-resolution GCM has been done.

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 大気重力波 高分解能計算 惑星探査

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当時は火星周回船や着陸船による観測から、過去の火星地表面に液体の水が潤沢に存在した証拠を示す地形がいくつも発見されたところで、火星の気候変動に絡めた水環境の変遷についての研究の機運が高まったところであった。また多くの水は太陽風により宇宙空間に散逸されたと考えられる一方で、一部の水は現在北極氷床および地下水(地下氷)として火星にとどまっていることもわかっており、現在の火星環境における水循環の様子についての研究の機運も高まっていた。

中でも水蒸気の HDO/H<sub>2</sub>O 同位体比観測は水の年代測定と合わせて水蒸気の動きを追いかける指標にもなるものであり、その空間・時間分布の観測の意義が注目されていた。しかし観測の現状は水蒸気のカラム量については周回船によってデータが蓄積されていたものの鉛直分布については観測量が乏しく、HDO/H<sub>2</sub>O 比は地上望遠鏡からの観測はなされていたものの全球平均値しか導出できず、その空間・時間分布を観測するまでは至っていなかった。よってこれらの火星の水環境について今後の新しい周回船による観測ミッションの立ち上げや既存の観測の精度向上を見据えて、大気大循環モデルを用いた理論的研究からその様子を推測し、観測提案に役立てる必要があった。

また大気散逸がもたらす水環境の変遷を含む気候変動の評価にあたり、大気の下層結合(下層大気の力学・物質循環が上層の熱圏に与える影響)の検証が注目を浴びつつあった。とりわけ地形や対流によって下層で励起される重力波が熱圏に与える影響について検証が進み始めた頃であるが、当時の一般的な大気大循環モデルでは重力波の励起と伝播を直接再現できるほど分解能は良くなく、地球大気における重力波の効果をもとにしたパラメタリゼーションを用いた検証しかなかった。

## 2. 研究の目的

太古の火星には液体の水が地表面に潤沢に存在していたと考えられており、その多くは現在までに宇宙空間に散逸したと推測される一方で、現在の火星においても北極氷床、地下水(氷)、大気中の水蒸気・氷雲という形で水が存在する。これらの水の起源を調べるにあたり同位体比(HDO/H<sub>2</sub>O 比)の測定は有用で、計画中の火星周回船や高分解能観測が可能な地上望遠鏡からの詳しい観測が期待されている。

研究代表者は火星大気の3次元シミュレーションに長年取り組んでおり、自ら開発した火星大気大循環モデルを用いて火星大気力

学・物質循環の研究を行ってきた。本研究では現在の火星環境における H<sub>2</sub>O 及び HDO の循環を大気・表層間の水の出入りや大気散逸の効果も見据えた上でシミュレーションするとともに、水平高分解能化によってこれまで直接の再現はできなかった重力波などの小さいスケールの波動について、その大気散逸過程や気候変動に及ぼす影響を検証し、火星環境の変遷に迫る。

## 3. 研究の方法

研究代表者が CCSR/NIES/FRCGC MIROC モデルをベースに開発してきた火星大気大循環モデル DRAMATIC (Dynamics, RAdiation, MAterial Transport and their mutual InteraCtions) MGCM (Mars General Circulation Model) に、水蒸気と氷雲のカラム量の時間・季節分布が観測と整合するように水循環過程を導入する。また HDO/H<sub>2</sub>O 同位体分別過程を導入し、これまでに得られている観測結果と比較しながら、同位体比の観測から得られる火星の水環境の歴史・気候変動への示唆について検証する。

また、火星大気において発生する大気中の雲は H<sub>2</sub>O の氷雲のみではなく、低温になる冬季の極域及び中間圏では CO<sub>2</sub> が凝結して氷雲になることもあり、太古の火星では CO<sub>2</sub> 氷による厚い雲が気候に影響を与えていたとも考えられている。そこで CO<sub>2</sub> の相変化及び氷雲の生成消滅の再現についても研究対象とし、火星の雲生成・物質循環という側面で H<sub>2</sub>O とともに現在の火星で見られるそのサイクル・気候に与える影響について検証を行う。

DRAMATIC MGCM はこれまでグリッド間隔約 300km で計算を行っており、これは重力波などの小さいスケールの波動の励起・伝播を取り扱うには十分でない。そこでグリッド間隔約 60km までモデルを高分解能化して、それによって小さいスケールの波動が物質循環や熱圏の力学にどのような影響を与えるかを検証し、大気散逸過程や気候変動の研究に新しい示唆を与える。

## 4. 研究成果

### (1) 冬の北極域における CO<sub>2</sub> 降雪

DRAMATIC MGCM 用いて、冬の北極域における CO<sub>2</sub> 大気の凝結・降雪とそれに伴う季節極冠の生成について、この季節に顕著な傾圧不安定波などの大気波動との関連性に焦点を当てて研究を行った。その結果、大気中の CO<sub>2</sub> 氷雲の生成は傾圧不安定波による規則的な温度変化の影響を大きく受け(図 1)、また高度 20km 以下の大気中で生成した CO<sub>2</sub> 氷雲の一部が地表面に降り積もって季節極冠の生成に寄与することを示唆した。傾圧不安定波の影響を受けるその降雪の様子は地球大

気に比べて規則性が強く、よって地球の降雪よりも精度よく長期に渡る予報が可能であると考えられる。

この研究成果は Nature Geoscience 2013 年 5 月号の Research Highlights に採り上げられ、合わせて共同研究を行ったドイツ・マックスプランク太陽系研究所からプレスリリースが出され、2013 年 5 月 13 日付朝日新聞の紙面にも掲載された。

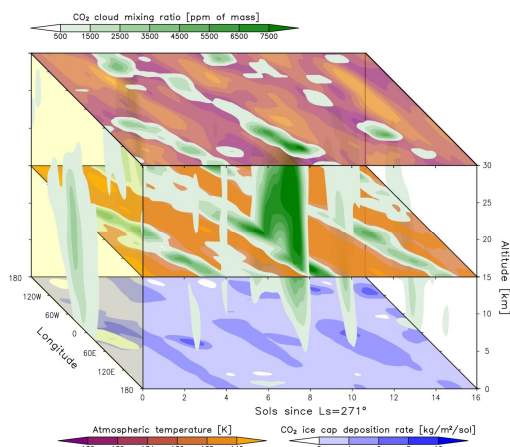


図 1 : DRAMATIC MGCM による北半球の冬至直後から 16 日間、北緯 80 度、高度 15km と 30km における大気温度[K]、地表面における CO<sub>2</sub> 季節極冠の生成率[kg m<sup>-2</sup> 火星日<sup>-1</sup>]の各ホフメラー図と CO<sub>2</sub> 雲量[ppm of mass]の緯度・高度・時間 3 次元分布の変化を重ね合わせた図。

## (2) 水循環とHDO/H<sub>2</sub>O同位体分別

DRAMATIC MGCMを用いて、火星大気中の水循環及び水同位体分別(H<sub>2</sub>OとHDO)のシミュレーションを行った。現状では水平分解能約5.6°(グリッド間隔約333km)、鉛直69層、大気上端高度約100kmで計算を行っている。大規模凝結スキームにより水蒸気と氷雲の相変化、また相変化に伴うH<sub>2</sub>OとHDOの同位体比分別を導入し、北緯80度以北に無限に水を供給できる氷床(D/H比を観測事実より7×SMOWに設定)の存在を仮定、等温静止・大気中に水蒸気も氷雲も存在しない状態最長で20火星年モデルを走らせた。それにより、水同位体比の定性的な季節・緯度変化についてはこれまでの観測や先行シミュレーションと概ね整合する結果が得られたが、水蒸気及び氷雲のカラム量の定量的な季節・緯度変化については観測と整合しない部分もあった。

その後、水循環スキームに、氷雲粒成長の微物理過程及び氷雲の放射効果を導入、その結果これらのカラム量の季節・緯度変化の結果については観測に近づく改善が見られた。

火星大気中の微量物質及び水同位体比の観測を目的とした欧州・ロシアの火星探査機 ExoMars Trace Gas Orbiterが2016年秋に火星周回軌道に投入される予定で、今後この水循

環・HDO/H<sub>2</sub>O同位体分別過程を含む3次元モデルを用いて、同探査機のチームと緊密な連携のもとで火星の水環境の変遷についての研究に取り組む。

## (3) 高分解能計算で見える重力波の振る舞い

DRAMATIC MGCMの水平分解能を約1.1°(グリッド間隔約67km)にまで上げて、地形の効果による小さいスケールの波動、とりわけ中間圏より上の大気に最も大きな効果を及ぼす波長200km程度の重力波について、その下層での励起と上層への伝播をシミュレーションした。北半球の冬至において重力波の励起源は大きく2つあり、1つは北半球(冬半球)の西風ジェットの中、もう1つは低緯度域の地形・山岳であった。前者は経度方向一様に励起が見られ、後者の励起はlocaltime依存性が見られた(13-16時で最大)(図2)。重力波は大部分が下層で励起され、そこから上層に伝播していく様子が見えたが、北半球の方がより高高度にまで到達していた。また重力波の水平伝播は背景風よりも遅い傾向にあり、上層に伝播していく中で消散し、背景風を弱める働きをしていることが示された。特にモデル上層にあたる中間圏においてその傾向は顕著であり、この高度域における重力波の効果が初めてパラメタリゼーションなしで示された。

その後は異なる季節についても高分解能計算を行い、重力波の励起・伝播の季節依存性について検証を進めている。さらにこのようなモデル結果と米国のMAVEN探査機(2014年秋に火星周回軌道に投入され、現在も熱圏・電離圏大気と大気散逸の様子を観測中)により得られる観測データから、火星大気の上下結合過程の研究を進める予定である。

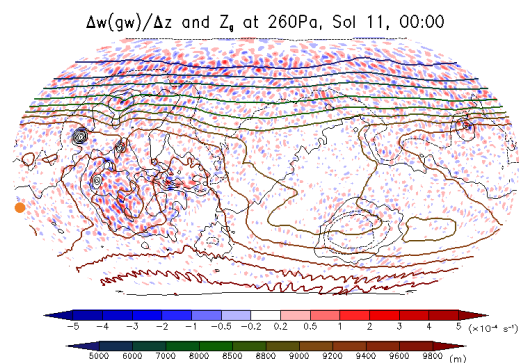


図 2 : 水平高分解能 DRAMATIC MGCM による北半球の冬至(Ls=270°)、260Pa (約 10km) 高度における重力波の励起の図。カラーシェードは重力波の divergence、カラーコンターはジオポテンシャル高度、オレンジ色の点は太陽直下点を示す。

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

Medvedev, A.S., H. Nakagawa, C. Mockel, E. Yiğit, T. Kuroda, P. Hartogh, K. Terada, N. Terada, K. Seki, N. Schneider, S.K. Jain, J.S. Evans, J.I. Deighan, W.E. McClintock, D. Lo and B.M. Jakosky, Comparison of the Martian thermospheric density and temperature from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling. *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, **43**, 3095–3104, 2016, doi:10.1002/2016GL068388.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, E. Yiğit and P. Hartogh, A global view of gravity waves in the Martian atmosphere inferred from a high-resolution general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, **42**, 9213–9222, 2015, doi: 10.1002/2015GL066332.

Yiğit, E., S.L. England, G. Liu, A.S. Medvedev, P.R. Mahaffy, T. Kuroda and B.M. Jakosky, High-altitude gravity waves in the Martian thermosphere observed by MAVEN/NGIMS and modeled by a gravity wave scheme. *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, **42**, 8993–9000, 2015, doi:10.1002/2015GL065307.

Haider, S.A., I.S. Batista, M.A. Abdu, P. Muralikrishna, S.Y. Shah and T. Kuroda, Dust storm and electron density in the equatorial D region ionosphere of Mars: Comparison with Earth's ionosphere from rocket measurements in Brazil. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 査読有, **120**, 8968–8977, 2015, doi:10.1002/2015JA021630.

Noguchi, K., S. Ikeda, T. Kuroda, S. Tellmann and M. Pätzold, Estimation of changes in the composition of the Martian atmosphere caused by CO<sub>2</sub> condensation from GRS Ar measurements and its application to the rederivation of MGS radio occultation measurements. *J. Geophys. Res. Planets*, 査読有, **119**, 2510–2521, 2014, doi:10.1002/2014JE004629.

Medvedev, A.S., E. Yiğit, T. Kuroda and P. Hartogh, General circulation modeling of the Martian upper atmosphere during global dust storms. *J. Geophys. Res. Planets*, 査読有, **118**, 2234–2246, 2013, doi:10.1002/2013JE004429.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, Carbon dioxide ice clouds, snowfalls, and baroclinic waves in the northern winter polar atmosphere of Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, **40**, 1484–1488, 2013, doi:10.1002/grl.50326.

〔学会発表〕(計39件)

Kuroda, T., A.S. Medvedev, E. Yiğit and P. Hartogh, Generation and propagation of gravity wave activities in Martian lower atmosphere simulated by a high-resolution GCM. International GEMSIS and ASINACTR-G2602 Workshop: Future Perspectives of Researches in Space Physics. 名古屋大学野依記念学術交流館, 愛知県名古屋市, 2016年3月24日.

黒田剛史, A.S. Medvedev, E. Yiğit and P. Hartogh, 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. 第29回大気圏シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2016年3月7日.

黒田剛史, A.S. Medvedev, E. Yiğit and P. Hartogh, Study of the gravity waves on Martian atmosphere using a high-resolution Mars General Circulation Model. 第17回惑星圏研究会, 東北大学青葉記念会館, 宮城県仙台市, 2016年2月24日.

黒田剛史, A.S. Medvedev, E. Yiğit and P. Hartogh, 高分解能火星 GCM が示した火星大気重力波の励起と伝播. 地球型惑星圏環境に関する研究集会, 立教大学太刀川記念館, 東京都豊島区, 2015年12月22日.

黒田剛史, Approaches to the material transport and climate change on Mars using a general circulation model. 第21回大気化学討論会, 東京工業大学地球生命研究所, 東京都目黒区, S-4, 2015年10月20日.

黒田剛史, 木星成層圏大気力学の概要/GCMにより示唆される火星大気における重力波の重要性. 第287回生存圏シンポジウム「電波を用いた観測が切り拓く地球および惑星大気科学」, 奈良女子大学, 奈良県奈良市, 2015年6月1日.

黒田剛史, A.S. Medvedev, P. Hartogh, Development of the Japanese-German Mars GCMs: Toward the coupling between lower and upper atmosphere. 二国間交流事業共同セミナー「日仏連携による惑星大気モデル研究」, 神戸大学, 兵庫県神戸市, 2015年5月11日.

黒田剛史, Atmospheric dynamics and material transport in the Martian lower atmosphere: towards the connection to upper atmosphere. 第16回惑星圏研究会, 東北大学青葉サイエンスホール, 宮城県仙台市, 2015年2月17日.

黒田剛史, 火星 GCM を用いた大気上下結合シミュレーション, および重力波の効果の研究. 地球型惑星圏環境に関する研究集会, 立教大学太刀川記念館, 東京都豊島区, 2014年12月26日.

黒田剛史, 火星極域の大気環境と二酸化炭素降雪: 天気予報の可能性. 日本惑星科学会2014年秋季講演会, O1-02, 東北大学片平さくらホール, 宮城県仙台市, 2014年9月24日.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, CO<sub>2</sub> snowfalls, seasonal ice cap formations and baroclinic waves in the winter polar atmosphere of Mars. 40th COSPAR Scientific Assembly, B0.2-0007-14, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 3 August 2014.

黒田剛史, Current status and future prospects

of the observations and modeling of Martian atmosphere. 第 15 回惑星圏研究会, 東北大学青葉記念会館, 宮城県仙台市, 2014 年 2 月 21 日.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, CO<sub>2</sub> Snowfalls Modulated by the Baroclinic Waves in the Northern Winter Polar Atmosphere of Mars. Fifth international workshop on the Mars atmosphere: modelling and observations, Martin Wood Conference Facility, Oxford, United Kingdom, 15 January 2014.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, Simulated CO<sub>2</sub> Snowfalls on Mars: Feasibility of Forecasts. 1st COSPAR Symposium, Centara Grand at Central Plaza Ladprao, Bangkok, Thailand, 14 November 2013.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, CO<sub>2</sub> Snowfalls and Baroclinic Waves in the Northern Winter Polar Atmosphere of Mars. European Planetary Science Congress 2013, EPSC2013-262, University College London, London, United Kingdom, 9 September 2013.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, Interactions between CO<sub>2</sub> Snowfalls and Baroclinic Waves in the Winter Polar Atmosphere of Mars. AOGS 2013, PS03-D5-PM2-P11-024, Brisbane Convention & Exhibition Centre, Brisbane, Australia, 28 June 2013.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, Y. Kasaba and P. Hartogh, CO<sub>2</sub> snowfalls affected by the baroclinic waves in the winter polar atmosphere of Mars. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, PPS04-03, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市, 2013 年 5 月 21 日.

黒田剛史, 笠羽康正, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh, 火星における CO<sub>2</sub> 大気凝結と傾圧不安定波の影響. 第 27 回大気圏シンポジウム, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2013 年 3 月 1 日.

黒田剛史, 大気大循環モデル(GCM)を用いた火星大気力学・物質循環研究の現状. 火星大気圏・電磁圏研究会, 立教大学, 東京都豊島区, 2012 年 12 月 20 日.

Kuroda, T., H. Sagawa, H. Nakagawa, Y. Kasai, N. Terada and Y. Kasaba, Approach to the history of water environment on Mars from the detections of water isotopic ratios and numerical simulations using an atmospheric general circulation model. 3rd Conference on Terrestrial Mars Analogues, Hotel Meridien N'Fis, Marrakech, Morocco, 25 October 2012.

②① Kuroda, T., Modeling of the atmospheric water and its isotopic fractionations on Mars. Rocks 'n' Stars, Veranstaltungszentrum am Wilhelmsplatz, Goettingen, Germany, 10 October 2012.

②② Kuroda, T., Simulation of the Water Cycle on Mars: Impacts of Supersaturation. AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, PS02-D4-PM1-Aqu3-010, Resorts World Convention Centre, Singapore, 16 August 2012.

②③ Kuroda, T., H. Sagawa, Y. Kasai, P. Hartogh, J. Urban, H. Nakagawa and Y. Kasaba, Scientific Targets of the Mars Sub-millimetre Sounder FIRE. AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, PS12-D1-AM1-Leo1-003, Resorts World Convention Centre, Singapore, 13 August 2012.

②④ Kuroda, T., Modeling of the atmospheric water and its isotopic ratio on Mars. International Symposium on Atmospheres of Terrestrial Planets: Observation & Modeling, Physical Research Laboratory, Ahmedabad, India, 24 July 2012.

②⑤ Kuroda, T., H. Sagawa, Y. Kasai, N. Terada and Y. Kasaba, Investigations of the water isotopic ratios on Mars by modeling and observation: Approach to the climate changes. 39th COSPAR Scientific Assembly, B0.2-0007-12, Narayana Murthy Centre of Excellence, Mysore, India, 19 July 2012.

②⑥ Kuroda, T., H. Sagawa, Y. Kasai and Y. Kasaba, Water isotopic ratio in the Mars atmosphere: observational plan and simulation using a general circulation model. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, PPS03-03, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市, 2012 年 5 月 24 日.

②⑦ Kuroda, T., H. Sagawa, Y. Kasai, N. Terada and Y. Kasaba, Modeling and observation of the water isotopic ratios on Mars: Approach to the climate changes. Mars Recent Climate Change Workshop, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA, 17 May 2012.

②⑧ 黒田剛史, Simulation of the water cycle on Mars: Effects of the supersaturation. 第 13 回惑星圏研究会, 東北大学青葉記念会館, 宮城県仙台市, 2012 年 4 月 4 日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

黒田剛史さん(東北大学助教)に聞く「気象学から宇宙へ—異分野をつなぐ存在へ」  
<http://c.gp.tohoku.ac.jp/~promotion/interview/article-vol5.html>

## 6. 研究組織

### (1) 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