

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20387

研究課題名（和文）ダストストーム及び大気波動が火星の大気流出へ果たす役割の解明

研究課題名（英文）Effects of dust storm and atmospheric waves on Martian atmospheric escape

研究代表者

益永 圭（Masunaga, Kei）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：60909521

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：火星上層大気からは、大気成分が宇宙空間へ流出している。従来、大気流出は太陽風や太陽放射という宇宙からの影響を強く受けると考えられてきたが、近年は下層大気で発生する現象にも強く影響を受けることが指摘されている。本研究ではその効果を調べるため、火星でダストストームや大気波動が発生した期間の観測データを多角的に解析した。その結果、火星の熱圏・外気圏の水素原子や酸素原子の総量がダストストームや大気波動の影響を強く受けて周期的に変化することを発見した。また、電離圏のイオンの密度も同様に周期変動することも観測的に示した。このことから、火星の大気流出は下層大気からの影響を強く受けて時間変動すると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、火星の大気流出が従来の太陽風や太陽放射の影響だけでなく、下層大気の現象からも強い影響を受けることを観測的に示した点で学術的に重要である。具体的には、ダストストームや大気波動が火星の熱圏・外気圏の水素原子や酸素原子の総量、電離圏のイオン密度に周期的な変動を引き起こすことを発見し、火星大気のダイナミクスや宇宙への大気流出の理解を深めた。この知見は将来の火星探査や有人火星ミッションにおける環境予測や設計に役立つ可能性がある。

研究成果の概要（英文）：From the upper atmosphere of Mars, atmospheric components are escaping into space. Traditionally, atmospheric escape was thought to be strongly influenced by external factors such as the solar wind and solar radiation. However, recent studies have indicated that phenomena occurring in the lower atmosphere also have a significant impact. In this study, we analyzed observational data from periods when dust storms and atmospheric waves occurred on Mars to investigate their effects. As a result, we discovered that the total amount of hydrogen and oxygen atoms in the thermosphere and exosphere of Mars undergoes periodic changes due to the strong influence of dust storms and atmospheric waves. Additionally, we observationally demonstrated that the density of ions in the ionosphere also fluctuates periodically. This suggests that atmospheric escape on Mars is strongly influenced by the lower atmosphere and varies over time.

研究分野：宇宙惑星科学

キーワード：火星 超高層大気 大気流出 ダストストーム 大気波動

### 1. 研究開始当初の背景

火星がかつて有した海の大部分は大気流出によって消失したと考えられており、火星の大気進化・気候変動を理解するためには、その物理機構を理解することが必要不可欠である。これまでの探査機観測の結果、太陽風状態に対する火星の大気流出の研究は比較的多く行われ、その形態はかなり明らかになってきた。一方、火星からの大気流出はダストストームや大気波動に伴う物質や運動量の輸送により大きく影響を受けることも予想されている。しかし、大気下層から超高層までの広い範囲を衛星一機で観測することは難しく、その影響はまだよく調べられていないのが現状であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙望遠鏡や複数の火星探査機の観測データを解析し、ダストストームや大気波動が火星上層大気中の水関連成分の総量や分布、流出量へ与える影響を調べることである。これにより、下層からの物質や運動量の輸送が火星超高層に存在する水関連成分の流出に果たす役割を調べる。

### 3. 研究の方法

2016年9月に火星で発生したダストストームが発生した。我々はJAXAの惑星分光観測衛星ひさきや欧米の複数の火星探査機(MRO, MEX, MAVEN, 及びCuriosity)による同時観測データを用い、下層大気から上層大気に渡る様々な物理量の変動の解析を進めた。

### 4. 研究成果

本計画では、主に以下の2つの成果が得られた。

#### (1)ダストストーム時の上層大気中の水素ガス・酸素ガスの増減及び周期変動

ひさきの火星上層大気分光観測データを用い、火星上層大気で発光する水素原子(HI Ly-β)及び酸素原子(OI 130.4 nm と 135.6 nm)の大気光変動を解析した。これらの大気光は太陽からの光の散乱や電離圏の電子との衝突により発光しており、発光強度は原子の(コラム)量に関連している。これと同時に欧米の火星探査機によって観測された下層大気中のダスト量、水蒸気量、氷雲、気温や気圧といった気象データ等も解析し、下層大気の状態と上層大気の水素や酸素の総量の関連について調査した。その結果、火星上層大気の水素原子や酸素原子の総量が、下層大気で発生する砂嵐や大気波動を介して増減することが示された。特に、火星で砂嵐が発生すると一時的に上層大気では水素原子の量が約2倍増加し、酸素原子の量が約3分の1に減少することが明らかになり、火星から水素原子が流出しやすく、酸素原子が流出しづらい状態となることが示唆された。また、同時期のローバー観測より火星地上では大気波動の発生が確認され、大気温度が周期的(約7日)に変化していた。上層大気の水素・酸素大気光の変動成分を調べたところ、これと同様の周期性が観測され、それぞれの明るさは交互に明暗を繰り返す反相関係を示した(図1)。これらの観測から、我々は大気波動の上層大気への伝播が上層大気の水素原子や酸素原子の生成や消失に関わっていることを提唱した。本研究結果は国際学術誌 Nature Communicationsへ掲載された。(Masunaga et al., 2022)

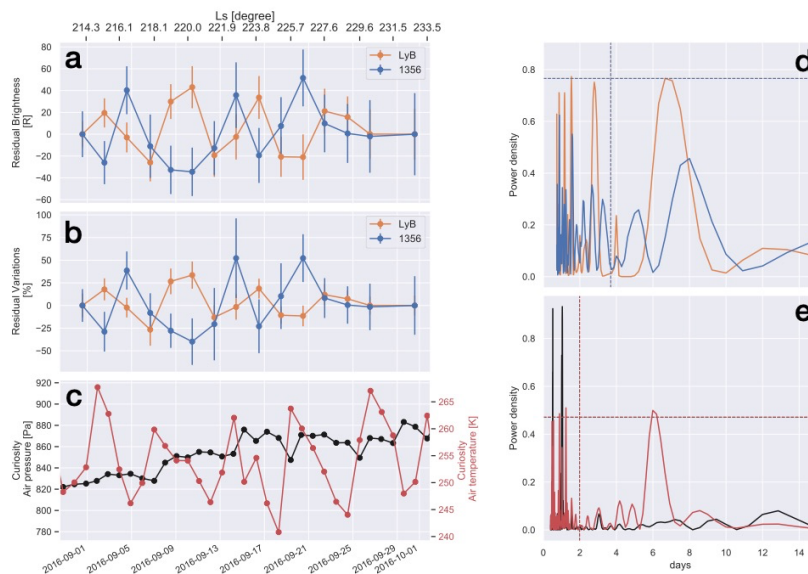


図 1. (a, b) ひさき衛星によって観測された大気光変動成分の時間変化, (c) Curiosity によって観測された火星地上気温及び気圧の時間変化 (c)大気光変動成分の周期解析結果、(e) 気温、気圧の周期解析結果. (Masunaga et al., 2022)

## (2) ダストストーム時のイオン密度周期変動

火星探査機 MAVEN の電離圏イオン観測データを用い、火星電離圏における H<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup> イオン密度の時間変化を調べた。その結果、これらのイオン密度の時間変化に短周期 (約 1 日)、中周期 (約 6-9 日)、及び長周期 (9 日以上) という特徴的な周期性が見つかった。短周期の時間変化は MAVEN が地殻磁場領域を横切る周期とほぼ一致していた。これは、Withers et al. (2019) によって報告された、地殻磁場領域の高イオン密度領域を MAVEN が周期的にまたぐことによって観測されることが明らかになった。長周期変動に関しては太陽放射の時間変化や MAVEN の軌道の時間変化に伴う変化によるものと考えられた。中周期変動に関しては、(1) のひさき衛星の観測で見つかった中性大気周期性と似ており、電離圏イオンにも下層大気から伝播した大気波動の影響が現れていることが示唆された。本研究結果は国際学術誌 *Journal of Geophysical Research Space Physics* へ掲載された。(Hara et al., 2024)

## 参考文献

1. Masunaga, K., N. Terada, N. Yoshida, Y. Nakamura, T. Kuroda, K. Yoshioka, Y. Suzuki, H. Nakagawa, T. Kimura, F. Tsuchiya, G. Murakami, A. Yamazaki, T. Usui, and I. Yoshikawa, Alternate oscillations of Martian hydrogen and oxygen upper atmospheres during a major dust storm, *Nature Communications*, 13, 6609, 2022
2. Withers, P., Flynn, C. L., Vogt, M. F., Mayyasi, M., Mahaffy, P., Benna, M., et al., Mars's dayside upper ionospheric composition is affected by magnetic field conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(4), 3100–3109, 2019
3. Hara, T., Masunaga, K., Terada, N., Sakai, S., Osanai, T., Seki, K., et al., On the periodic variation of the ion density in the Martian dayside ionosphere during the regional dust storm in September 2016. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129, e2023JA031848., 2024

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kei Masunaga, Naoki Terada, Nao Yoshida, Yuki Nakamura, Takeshi Kuroda, Kazuo Yoshioka, Yudai Suzuki, Hiromu Nakagawa, Tomoki Kimura, Fuminori Tsuchiya, Go Murakami, Atsushi Yamazaki, Tomohiro Usui, and Ichiro Yoshikawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Alternate oscillations of Martian hydrogen and oxygen upper atmospheres during a major dust storm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-022-34224-6	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 M. Persson, et al. (incl. K. Masunaga)	4. 巻 13
2. 論文標題 BepiColombo mission confirms stagnation region of Venus and reveals its large extend	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-022-35061-3	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 Y. J. Lee, A. Garca Muoz, A. Yamazaki, E. Qumerais, S. Mottola, S. Hellmich, T. Granzer, G. Bergond, M. Roth, E. Gallego-Cano, J.-Y. Chaufray, R. Robidel, G. Murakami, K. Masunaga, and et al.	4. 巻 3
2. 論文標題 Reflectivity of Venus' dayside disk during the 2020 observation campaign: outcomes and future perspectives	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Planetary Science Journal	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) 10.3847/PSJ/ac84d1	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 Lin, H., J. Guo, K. Masunaga, K. Seki, C. Mazelle, D. Zhao, H. Huang, J. Zhao, and L. Liu	4. 巻 934
2. 論文標題 In situ observations of solar-flare-induced proton cyclotron waves upstream from Mars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	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) 10.3847/1538-4357/ac7d4f	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 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 Hara Takuya, Masunaga Kei, Terada Naoki, Sakai Shotaro, Osanai Taiga, Seki Kanako, Fowler Christopher M., Hanley Kathleen Gwen, McFadden James P., Curry Shannon M.	4. 巻 129
2. 論文標題 On the Periodic Variation of the Ion Density in the Martian Dayside Ionosphere During the Regional Dust Storm in September 2016	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	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) 10.1029/2023JA031848	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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 長内大河、益永圭、寺田直樹、堺正太郎、吉田奈央、原拓也
2. 発表標題 MAVEN/STATICの観測に基づくダストストーム期間の火星超高層イオン密度変動の研究
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 長内大河、益永圭、原拓也、寺田直樹、堺正太郎、吉田奈央
2. 発表標題 MAVEN/STATICの観測に基づくダストストーム期間の火星電離圏イオン密度の周期変動の研究
3. 学会等名 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Masunaga
2. 発表標題 Mars's atmospheric escape and its interaction with Martian moons
3. 学会等名 The 82nd Fujihara Seminar (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Masunaga, N. Terada, N. Yoshida, Y. Nakamura, T. Kuroda, H. Nakagawa, K. Yoshioka, Y. Suzuki, T. Kimura, F. Tsuchiya, G. Murakami, A. Yamazaki, T. Usui, and I. Yoshikawa
2. 発表標題 Hisaki space telescope observations of the large oscillations of Martian hydrogen and oxygen upper atmospheres
3. 学会等名 EGU General Assembly 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 益永 圭、寺田 直樹、吉田 奈央、黒田 剛史、吉岡 和夫、木村 智樹、土屋 史紀、村上 豪、山崎 敦、吉川 一朗
2. 発表標題 火星ダストストーム発達中における水素および酸素大気光の周期変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長内 大河、益永 圭、堺 正太郎、吉田 奈央、寺田 直樹、原 拓也
2. 発表標題 MAVEN/STATICの観測に基づくダストストーム期間の火星超高層イオン密度変動の研究
3. 学会等名 第23回 惑星圏研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Masunaga
2. 発表標題 Alternate oscillations of Martian hydrogen and oxygen upper atmospheres during a major dust storm: Hisaki space telescope observations
3. 学会等名 MAVEN PSG meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>「ひさき」衛星が観た砂嵐による火星上層大気の変化 - 火星生命環境への示唆  <a href="https://www.isas.jaxa.jp/topics/003307.html">https://www.isas.jaxa.jp/topics/003307.html</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	

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		
米国	University of California Berkeley		