

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03731

研究課題名(和文)火星大気流出における領域間結合の役割の研究

研究課題名(英文)Role of vertical coupling on the atmospheric escape from Mars

研究代表者

寺田 直樹 (Terada, Naoki)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70470060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：火星の過去の劇的な気候変動の鍵を握る宇宙空間への二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の流出機構の中でも、特に不確実性が大きい「電離圏CO<sub>2</sub>+の流出機構」を調査した。火星電離圏への太陽風からの運動量輸送の影響においては、エントロピーを基準とした新たな混合層モデルを提唱するとともに、多成分磁気流体力学コードを用いて運動量輸送が電離圏イオンの流速と流出率に及ぼす影響を評価した。火星電離圏への下層・中層大気からの大気重力波の影響においては、熱圏における大気擾乱の特性と分布を探査機観測と数値実験を用いて明らかにし、鉛直波長が200km以上の大気重力波の伝搬と散逸によってCO<sub>2</sub>の存在度と流出率が増加しうることを示した。

研究成果の概要(英文)：The escape of ionospheric CO<sub>2</sub>+ from Mars is a key to understand the drastic climate change on ancient Mars and investigated in this study. The effects of momentum transfer from the solar wind on the ionospheric CO<sub>2</sub>+ escape were evaluated by introducing an entropy-based mixing layer model and by utilizing a multispecies magnetohydrodynamic model of the solar wind interaction with the Martian ionosphere. The effects of gravity waves propagating from the lower and middle atmosphere were also investigated using satellite observations and numerical experiments. We found that gravity waves with a vertical wavelength longer than 200km have large impacts on the mixing ratio and escape rate of CO<sub>2</sub> from the Martian upper atmosphere.

研究分野：数物系科学

キーワード：磁気圏・電離圏 宇宙科学 超高層物理学 大気現象 惑星探査 大気重力波 K-H不安定性

### 1. 研究開始当初の背景

約 40 億年前には豊富な液体の水を湛え、温暖湿潤な気候を有していた火星は、劇的な気候変動を経て、現在の寒冷で乾燥した惑星となった。火星のこの劇的な気候変動は、大気の宇宙空間への流出によって引き起こされた可能性が高く、物理機構の解明が急務である。火星大気の宇宙空間への流出を駆動する物理機構は、これまで様々なものが提唱されてきたが、現在までの探査機観測や理論研究には大きな不確実性が存在しており、不明な点が多かった。このような現状を開拓するため、NASA の火星探査機 MAVEN が 2014 年 9 月に火星周回軌道に投入された。MAVEN は世界で初めて火星の大気流出を総合的に観測する計画である。一方、JAXA の惑星分光観測衛星 Hisaki (SPRINT-A/EXCEED) は、金星・火星大気の観測を 2014 年 3 月より開始し、大気流出に関係する超高層および尾部領域における紫外分光観測データを順調に取得している。

近年の火星探査機 Mars Express による発見の一つに、既存の理論では説明できない、大量の二酸化炭素イオン ( $\text{CO}_2^+$ ) の流出がある。均質圏界面より高高度では、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) のような重い分子は、軽い酸素原子と比べて小さなスケールハイトを持つので、上部電離圏における  $\text{CO}_2^+$  の存在度は通常は非常に小さく、宇宙空間に大量に流出することは困難である。火星電離圏からの  $\text{CO}_2^+$  の大量の流出という観測事実を説明することが可能なシナリオとして、(1) 火星電離圏への太陽風から (上側から) の効率的な運動量輸送、(2) 火星電離圏への均質圏界面から (下側から) の効率的な  $\text{CO}_2$  輸送、がある。(1) を担う物理機構は、電離圏界面における Kelvin-Helmholtz 不安定性が主候補であり、(2) を担う物理機構は、下層・中層大気起源の大気重力波の砕波に伴う、下部熱圏における乱流拡散の増加 ( $\text{CO}_2$  の拡散輸送の増加) や、運動量の解放に伴う大規模風速場の変化がある。従って、火星からの大量の  $\text{CO}_2^+$  の流出機構を理解するためには、(1) と (2) それぞれの寄与を定量的に評価する必要があった。

### 2. 研究の目的

火星の過去の劇的な気候変動は、火星大気中の  $\text{CO}_2$  の宇宙空間への流出によって引き起こされた可能性が高いと考えられる。本研究は、火星の  $\text{CO}_2$  の流出機構の中でも特に不確実性が大きい「電離圏  $\text{CO}_2^+$  の流出機構」に着目し、MAVEN 衛星と Hisaki 衛星の観測データ解析と、本研究チームが得意とする数値シミュレーションを組み合わせて、火星の過去の気候変動に密接に関係する  $\text{CO}_2$  の流出機構を解明することを目的とする。特に、太陽風からの運動量輸送などの上側からの領域間結合と、大気重力波に起因する乱流拡散や大規模風速場の変化などの下側からの領域間結合の影響が、電離圏  $\text{CO}_2^+$  の流出に果たす役割

を明らかにする。

### 3. 研究の方法

上述の目的を達成するために、次の 2 つの課題について研究を実施する。(1) 太陽風からの運動量輸送が電離圏の  $\text{CO}_2^+$  の流速と流出率に及ぼす影響の定量的理解：本研究では、MAVEN 衛星と Hisaki 衛星の観測結果を数値シミュレーションの制約条件に取り入れて計算を実行する。研究の初期フェーズにおいては、MAVEN 衛星と Hisaki 衛星の観測データの解析が進むまでは、既存の MEX 衛星と MGS 衛星のプラズマ・磁場観測データも制約条件に用いる。そして、これらの衛星観測に基づいた境界条件と初期条件を用いて、火星電離圏界面における K-H 不安定性の局所シミュレーションを実行する。この局所シミュレーションの実行により、K-H 不安定性とその二次的不安定性の非線形段階における乱流輸送・混合過程を調べ、異常粘性係数を得る。次に、局所シミュレーションで得た異常粘性係数を、火星電離圏の多成分磁気流体力学コードに現象論的項を用いて組み込み、異常粘性係数を様々な変化させて繰り返し数値シミュレーションを実行し、MAVEN 衛星の観測機器群による観測結果を再現する異常粘性係数を求める。異なる太陽風パラメータにおける数値シミュレーションを多数回実行することによって太陽風パラメータ依存性を調査し、太陽風からの運動量輸送が電離圏  $\text{CO}_2^+$  の流速と流出率に及ぼす影響を定量的に評価する。(2) 下層・中層大気起源の大気重力波が電離圏の  $\text{CO}_2^+$  の密度分布に及ぼす影響の定量的理解：MAVEN 衛星の IUVS、NGIMS 観測機器群による観測データを用いて火星熱圏における大気擾乱の振幅・スペクトル特性とそれらの緯度分布・経度分布・季節変動を求める。そして大気重力波を含めた火星大気大循環モデルと火星熱圏・外圏の全粒子 (DSMC) コードによる数値計算を実行し、MAVEN 衛星による熱圏での大気擾乱の振幅とスペクトル特性の観測を説明する物理機構の検討と、大気重力波が火星熱圏の  $\text{CO}_2$  密度分布に及ぼす影響の定量評価を行う。異なる季節やダストストーム発生時などにおいても同様の数値計算を行い、大気重力波の影響のパラメータ依存性を明らかにする。これらの多数回の数値シミュレーションの実行と衛星観測との比較により、下層・中層大気起源の大気重力波が熱圏  $\text{CO}_2$  や電離圏  $\text{CO}_2^+$  の密度分布に及ぼす影響を定量的に評価する。

### 4. 研究成果

(1) 太陽風からの運動量輸送が電離圏の  $\text{CO}_2^+$  の流速と流出率に及ぼす影響の定量的理解においては、火星電離圏界面における密度勾配を考慮した K-H 不安定性の局所シミュレーションと MAVEN 衛星のプラズマ総合観測との比較に基づき、エントロピーを基準とした新たな混合層モデルを提唱した。MGS 衛星観

測や MAVEN 衛星のプラズマ総合観測に基づき、太陽風相互作用によって生じるプラズマ境界層位置の統計的特性を纏めて学術論文として公表した。太陽風-火星電離圏相互作用の多成分磁気流体力学コードへの粘性効果の組み込みにおいては、Bohm 型異常粘性項とプラズマ分子粘性項を用いて現象論的に粘性効果をコードに組み込み、各粘性項の大きさを変化させた計算を多数回実行してパラメータ依存性を纏め、太陽風からの運動量輸送が電離圏イオンの流速と流出率に及ぼす影響を定量的に評価した。(2)下層・中層大気起源の大気重力波が電離圏の CO<sub>2</sub>+ の密度分布に及ぼす影響の定量的理解においては、MAVEN 衛星の NGIMS や IUVS の観測データを解析し、火星熱圏における大気擾乱の振幅・スペクトル特性とそれらの高度分布・緯度分布・経度分布・季節変動の観測結果を纏めて学術論文として公表するとともに、大気重力波を含めた大気大循環モデルの計算結果との比較を行った。さらに Hisaki 衛星による金星超高層大気の周期変動解析により、中層大気から超高層大気への大気重力波伝搬もしくは太陽風相互作用の影響を示唆する結果を得て、学術論文として公表した。MAVEN 観測では大気重力波活動度の分布に明確な昼夜非対称が見られ、上部熱圏と下部熱圏では特性が大きく異なっていたため、火星熱圏・外圏 DSMC コードを用いて大気重力波の伝搬・散逸過程を調査し、観測の鉛直分布を説明するためには少なくとも 200km 以上の鉛直波長をもつ大気重力波が必要であることを示した。鉛直波長が 200km 以上の大気重力波の伝搬・散逸が熱圏密度分布に及ぼす影響は大きく、高度 150km 以上における密度増加は、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)で 20-30%、窒素(N<sub>2</sub>)で 10-15%、酸素原子(O)で 5-8%程度になることを明らかにした。本結果は、下層・中層大気から伝搬する大気重力波が、上部熱圏や上部電離圏における CO<sub>2</sub> の存在度および流出率を増加しうることを示すものである。

##### 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 22 件)

Matsunaga, K., K. Seki, D. Brain, T. Hara, K. Masunaga, J. P. McFadden, J. Halekas, D. Mitchell, C. Mazelle, J. Esplay, J. Gruesbeck, and B. M. Jakosky, Statistical Study of Relations Between the Induced Magnetosphere, Ion Composition, and Pressure Balance Boundaries around Mars Based on MAVEN Observations, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 査読有, Vol. 122, 2017, pp.9723-9737, doi:10.1002/2017JA024217

Masunaga, K., K. Seki, N. Terada, F. Tsuchiya, T. Kimura, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, C. Tao, F. Leblanc, and I. Yoshikawa, Dawn-dusk difference of periodic oxygen EUV dayglow variations at Venus observed by Hisaki, *Icarus*, 査読有, Vol. 292, 2017, pp.102-110, doi:10.1016/j.icarus.2016.12.027

Masunaga, K., K. Seki, D. A. Brain, X. Fang, Y. Dong, B. M. Jakosky, J. P. McFadden, J. S. Halekas, J. E. P. Connerney, D. L. Mitchell, and F. G. Epavier, Statistical analysis of the reflection of incident O<sup>+</sup> pickup ions at Mars: MAVEN observations, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 査読有, Vol. 122, 2017, pp.4089-4101, doi:10.1002/2016JA023516

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, Global distribution and parameter dependences of gravity wave activity in the Martian upper thermosphere derived from MAVEN/NGIMS observations, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 査読有, Vol. 122, 2017, pp.2374-2397, doi:10.1002/2016JA023476

England, S. L., G. Liu, E. Yigit, P. R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, H. Nakagawa, N. Terada, and B. Jakosky, MAVEN NGIMS Observations of Atmospheric Gravity Waves in the Martian thermosphere, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 査読有, Vol. 122, 2017, pp.2310-2335, doi:10.1002/2016JA023475

Kuroda, T., A. S. Medvedev, E. Yigit, and P. Hartogh, 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*, 査読有, Vol. 73, 2016, pp.4895-4909, doi:10.1175/JAS-D-16-0142.1

Terada, K., N. Terada, H. Shinagawa, H. Fujiwara, Y. Kasaba, K. Seki, F. Leblanc, J.-Y. Chaufray, and R. Modolo, A full-particle Martian upper thermosphere-exosphere model using the DSMC method, *Journal of Geophysical Research Planets*, 査読有, Vol. 121, 2016, pp.1429-1444, doi:10.1002/2015JE004961

Ruhunusiri, S., J. S. Halekas, J. P. McFadden, J. E. P. Connerney, J. R. Espley, Y. Harada, R. Livi, K. Seki, C. Mazelle, D. Brain, T. Hara, G. A. DiBraccio, D. E. Larson, D. L. Mitchell, B. M. Jakosky, and H. Hasegawa, MAVEN observations of partially developed Kelvin-Helmholtz vortices at Mars, *Geophysical Research Letters*, 査読有, Vol. 43, 2016, pp.4763-4773, doi:10.1002/2016GL068926

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, Comparison of the Martian thermospheric density and temperature from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling, *Geophysical Research Letters*, 査読有, Vol. 43, 2016, pp.3095-3104, doi:10.1002/2016GL068388

Masunaga, K., K. Seki, D. A. Brain, X. Fang, Y. Dong, B. M. Jakosky, J. P. McFadden, J. S. Halekas, and J. E. P. Connerney, O<sup>+</sup> ion beams reflected below the Martian bow shock: MAVEN observations, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 査読有, Vol. 121, 2016, pp.3093-3107, doi:10.1002/2016JA022465

Masunaga, K., K. Seki, N. Terada, F. Tsuchiya, T. Kimura, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, M. Kagitani, C. Tao, A. Fedorov, Y. Futaana, T. L. Zhang, D. Shiota, F. Leblanc, J.-Y. Chaufray, and I. Yoshikawa, Periodic variations of oxygen EUV dayglow in the upper atmosphere of Venus: Hisaki/EXCEED observations *Journal of Geophysical Research Planets*, 査読有, Vol. 120, 2015, pp.2037-2052, doi:10.1002/2015JE004849

Kuroda, T., A. S. Medvedev, E. Yigit, and P. Hartogh, A global view of gravity waves in the Martian atmosphere inferred from a high-resolution general circulation model, *Geophysical Research Letters*, 査読有, Vol. 42, 2015, pp.9213-9222, doi:10.1002/2015GL066332

Bougher, S., B. Jakosky, J. Halekas, J. Grebowsky, J. Luhmann, P. Mahaffy, J. Connerney, F. Eparvier, R. Ergun, D. Larson, J. McFadden, D. Mitchell, N. Schneider, R. Zurek, L. Andersson, D. Andrews, D. Baird, D. Baker, J. M. Bell, 他 75 名 80 番目 (K. Seki), Early

MAVEN Deep Dip Campaigns: First Results and Implications, *Science*, 査読有, Vol. 350, 2015, doi:10.1126/science.aad0459

Jakosky, B. M., J. Grebowsky, J. Luhmann, J. Connerney, F. Eparvier, R. Ergun, J. Halekas, D. Larson, P. Mahaffy, J. McFadden, D. L. Mitchell, N. Schneider, R. Zurek, S. Bougher, D. Brain, Y. Ma, C. Mazelle, L. Andersson, D. Andrews, 他 75 名 80 番目 (K. Seki), MAVEN Observations of the Response of Mars to an Interplanetary Coronal Mass Ejection, *Science*, 査読有, Vol. 350, 2015, doi:10.1126/science.aad0210

Brain, D. A., J. P. McFadden, J. S. Halekas, J. E. P. Connerney, S. W. Bougher, S. Curry, C. F. Dong, Y. Dong, F. Eparvier, X. Fang, K. Fortier, T. Hara, Y. Harada, B. M. Jakosky, R. J. Lillis, R. Livi, J. G. Luhmann, Y. Ma, R. Modolo, and K. Seki, The Spatial Distribution of Planetary Ion Fluxes Near Mars Observed by MAVEN, *Geophysical Research Letters*, 査読有, Vol. 42, 2015, pp.9142-9148, doi:10.1002/2015GL065293

Yigit, 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, *Geophysical Research Letters*, 査読有, Vol. 42, 2015, pp.8993-9000, doi:10.1002/2015GL065307

Masunaga, K., K. Seki, T. Hara, and D. A. Brain, Asymmetric Penetration of Shocked Solar Wind Down to 400-km Altitudes at Mars, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 査読有, Vol. 120, 2015, pp.6874-6883, doi:10.1002/2014JA020757

[学会発表](計 90 件)

Terada, N., K. Terada, H. Nakagawa, F. Leblanc, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, H. Fujiwara, and K. Seki, Gravity waves in the Martian exosphere, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 142 回総会および講演会, 2017 年

Nakagawa, H., A. S. Medvedev, T. Kuroda, E. Yigit, N. Terada, K. Terada, H. Fujiwara, K. Seki, P. Hartogh, H. Groller, R. V. Yelle, F. Montmessin, N. M. Schneider, J. I. Deighan, S. Jain, S. L. England, and B. M. Jakosky, 火星下部熱圏における大気重力波の季節変動, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 142 回総会および講演会, 2017 年

Sakai, S., K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, T. Tanaka, and Y. Ebihara, Ion escape from the Martian upper atmosphere with a weak intrinsic magnetic field, American Geophysical Union 2017 Fall Meeting, 2017 年

Kamada, A., T. Kuroda, Y. Kasaba, N. Terada, and T. Akiba, Simulation of the early Martian climate using a general circulation model, DRAMATIC MCM: Impacts of thermal inertia, European Planetary Science Congress, 2017 年

Terada, N., K. Terada, H. Nakagawa, F. Leblanc, 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, Thermospheric Perturbations at Mars, Venus, and Earth: Solar Wind or Lower Atmosphere Forcing?, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting, 2017 年

Seki, K., T. Hara, D. A. Brain, R. J. Lillis, N. Terada, D. E. Larson, D. L. Mitchell, J. R. Espley, J. E. P. Connerney, J. G. Luhmann, N. M. Schneider, S. K. Jain, and B. M. Jakosky, Solar energetic electron penetration into the Martian upper atmosphere observed by MAVEN, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年

Sakai, S., K. Seki, N. Terada, T. Tanaka, and H. Shinagawa, Variations of ion escape from the past to present at Mars, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年

Terada, N., K. Terada, H. Nakagawa, S. Maeda, F. Leblanc, 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, MAVEN/NGIMS observations and full-particle DSMC modeling of gravity waves in the Martian upper thermosphere, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年

Nakagawa, H., A. S. Medvedev, T. Kuroda, E. Yigit, N. Terada, K. Terada, H. Fujiwara, C. Mockel, P. Hartogh, K. Seki, H. Groller, R. V. Yelle, F. Montmessin, N. M. Schneider, J. I. Deighan, S. Jain, S. L. England, and B. M. Jakosky, Global distribution of gravity waves activity in Mars' lower thermosphere derived from MAVEN/IUVS stellar occultations and analyzed using two Martian General Circulation

Models, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年

Seki, K., T. Hara, D. A. Brain, R. J. Lillis, N. Terada, D. E. Larson, D. L. Mitchell, J. R. Espley, J. E. P. Connerney, J. G. Luhmann, N. M. Schneider, S. K. Jain, and B. M. Jakosky, Solar energetic electron penetration into the Martian atmosphere observed by MAVEN, International Conference on Mars Aeronomy 2017, 2017 年

Sakai, S., K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, and T. Tanaka, Effects of a weak intrinsic magnetic field on the Martian plasma environments based on global multi-species MHD simulations, International Conference on Mars Aeronomy 2017, 2017 年

Aizawa, S., N. Terada, Y. Kasaba, M. Yagi, and Y. Matsumoto, The spatial evolution of the mixing layer in the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause, American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, 2016 年

Matsunaga, K., K. Seki, D. A. Brain, T. Hara, J. P. McFadden, J. S. Halekas, D. L. Mitchell, C. Mazelle, J. R. Espley, and B. M. Jakosky, Statistical study of relation between the magnetic pileup boundary and ion composition boundary around Mars based on MAVEN observations, American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, 2016 年

Terada, N., F. Leblanc, H. Nakagawa, A. S. Medvedev, E. Yigit, T. Kuroda, T. Hara, S. L. England, H. Fujiwara, K. Terada, S. Maeda, K. Seki, P. R. Mahaffy, M. Elrod, M. Benna, J. Grebowsky, and B. M. Jakosky, 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, 第 30 回大気圏シンポジウム, 2016 年

Seki, K., T. Hara, D. A. Brain, R. J. Lillis, K. Matsunaga, K. Masunaga, N. Terada, D. E. Larson, D. L. Mitchell, J. R. Espley, J. E. P. Connerney, J. G. Luhmann, and B. M. Jakosky, MAVEN の観測に基づいた火星上層大気への降下 SEP 電子の特性の研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 140 回総会および講演会, 2016 年

Nakagawa, H., A. S. Medvedev, C. Mockel, E. Yigit, T. Kuroda, P. Hartogh, K. Terada, N. Terada, K. Seki, N. Schneider, S. Jain, S. Evans, J. Deighan, W. McClintock, and D. Lo, Comparison of the Martian thermospheric density and temperature

from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年

Kuroda, T., A. S. Medvedev, E. Yigit, and P. Hartogh, 高分解能大気大循環モデルを用いた火星大気重力波の励起と伝播の評価, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年

Seki, K., Y. Matsumoto, N. Terada, T. Hara, K. Matsunaga, K. Masunaga, M. Fujimoto, D. A. Brain, J. P. McFadden, J. S. Halekas, D. L. Mitchell, L. Andersson, J. R. Espley, J. E. P. Connerney, D. N. Baker, and B. M. Jakosky, Structure of plasma boundaries with a large density gradient observed by MAVEN and its effects on the Kelvin-Helmholtz instability, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, 2015 年

Matsunaga, K., K. Seki, D. A. Brain, T. Hara, K. Masunaga, J. P. McFadden, J. S. Halekas, D. L. Mitchell, C. X. Mazelle, J. E. P. Connerney, and B. M. Jakosky, Comparison of Martian magnetic pileup boundary with ion composition boundary observed by MAVEN, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, 2015 年

Aizawa, S., N. Terada, Y. Kasaba, and M. Yagi, An MHD simulation study of the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, 2015 年

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

寺田 直樹 (TERADA, Naoki)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 70470060

### (2) 研究分担者

関 華奈子 (SEKI, Kanako)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 20345854

藤本 正樹 (FUJIMOTO, Masaki)  
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・教授  
研究者番号: 30242811

中川 広務 (NAKAGAWA, Hiromu)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 30463772

### (3) 連携研究者

黒田 剛史 (KURODA, Takeshi)  
国立研究開発法人情報通信研究機構・ソー

シャルイノベーションユニット統合ビッグデータ研究センター・主任研究員  
研究者番号: 40613394

吉川 一郎 (YOSHIKAWA, Ichiro)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・  
教授  
研究者番号: 10311169

### (4) 研究協力者

Alexander S. Medvedev  
David Brain  
松本 洋介 (MATSUMOTO, Yosuke)  
寺田 香織 (TERADA, Kaori)