

令和 3 年 6 月 27 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860767

氏 名 益永 圭

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：コロラド大学ボルダー校（国名： 米国）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

二機の衛星の連携観測が明らかにする火星酸素コロナの空間分布と酸素イオン流出の関係

3. 派遣期間：平成 31 年 2 月 28 日 ～ 令和 3 年 5 月 27 日

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名：コロラド大学ボルダー校

部局名：Laboratory for Atmospheric and Space Physics

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10－別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

研究の目的

火星は現在寒冷・乾燥した気候で、表面に液体の水は存在していない。しかし近年の火星探査機の観測により得られた地理的特徴から、過去の火星は温暖で表面に液体の水が存在したと考えられている。過去に存在した水はどこへ行ったのか？この謎を探るため、これまでに火星には多くの探査機が送られ、火星表面、火星大気、そして火星周辺の宇宙環境といった幅広い領域の観測が今日まで行われている。

過去に存在した水の行方の一つとして、火星超高層大気からの宇宙空間への流出が挙げられる。火星下層大気中には微量の水蒸気が含まれているが、この量は季節に応じて変化する。この水分子は火星の大気循環により時に超高層まで輸送されることが近年の観測によりわかってきた。輸送された水分子は太陽紫外線の影響により乖離や電離されるため、酸素原子や水素原子またはこれらのイオンという形で超高層大気へ供給されることになる。これらの粒子が太陽放射や太陽風等の影響で加熱・加速されることで宇宙空間へ流出するため、火星超高層大気中の酸素原子や水素原子、およびこれらイオンのダイナミクスを調査することは火星からの水の流出を理解する上で重要である。

我々は JAXA の惑星分光観測衛星「ひさき」および NASA の火星探査機 Mars Atmospheric Volatile and Evolution Mission (MAVEN) によって観測されたデータを用い、火星超高層の酸素原子や水素原子およびこれらのイオンの輸送、加熱・加速、流出機構を明らかにすることを目的としている。

研究の実施状況・成果

我々は主にひさき衛星に搭載された極端紫外分光器 EXCEED によって観測されたデータを用い、火星超高層大気で発光する酸素原子 (OI 130.4 nm) および水素原子 (HI Ly- β) の大気光変動を解析した。これらの大気光は主に太陽放射の共鳴散乱により発光しており、光学的に薄い大気の場合は発光強度がコラム密度に比例する。この性質を用い、火星超高層大気中の酸素原子と水素原子のコラム密度の変動を調査した。

ひさき衛星は 2014 年から 2019 年にかけて 12 期間の断続的な火星観測を行ってきた。これはひさきの観測ターゲットが火星だけでなく木星や金星など様々な太陽系天体が観測ターゲットとなっているため、火星の観測時間を常に確保できないことによる。これら 12 の観測期間は火星の異なる季節をカバーする他、ダストストームや Comet Siding Spring の火星接近といった特徴的なイベントを含んでおり、火星超高層大気中の酸素原子や水素原子のコラム量が季節やイベントに応じてどのように変動するかを調べることができる。

2014 年から 2019 年までの長期観測データを解析した結果、以下の特徴が明らかになった。

- 酸素大気光の発光強度は太陽紫外 130.4nm 線の変動と正の相関がある。(図 1a)
- 水素大気光の発光強度は、火星下層大気のコラム密度の指標となる Column Dust Optical Depth (CDOD 値、Montabone et al. (2015)を参照) の観測データと良い相関を示す。(図 1b)
- 水素大気光の明るさはダストシーズン ($L_s > 180^\circ$) とそうでないシーズン ($L_s < 180^\circ$) で約 2-5 倍の明るさの違いがある。(図 1c)

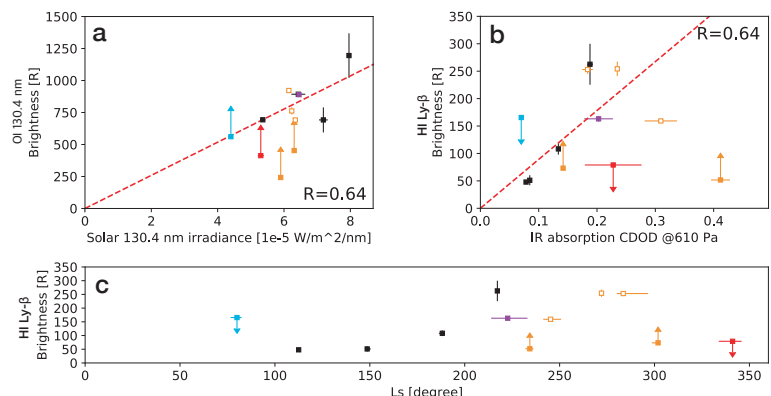


図 1. (a)火星の酸素大気光と太陽紫外 130.4nm 強度の関係、(b)水素大気光と火星大気ダストコラム量の関係および(c)水素大気光の季節変動。(注：色は異なる西暦を示す。また、上限値と下限値は相関係数の計算に含めていない。)

これらの結果から我々は以下の考察を行った。

- 火星超高層大気の酸素原子コラム量について

火星超高層大気中の酸素原子のコラム量は観測期間を通じて一定であったと考えられる。その理由としては、火星超高層には二酸化炭素の解離によって生成された酸素原子がすでに超高層大気に大量に存在しているため、水分子の解離から供給される酸素原子量はそれに比べ十分に小さいことが挙げられる。

- 火星超高層大気の水素原子コラム量について

CDOD 値と良い相関を示す水素原子のコラム量は主に火星表面から発生するダストストームに影響を受けていると考えられる。火星でダストストームが発生すると、大気中に巻き上げられたダストが大気を加熱することで水蒸気の凝結高度が上昇し、水蒸気が超高層大気まで輸送される。水蒸気が解離し、水素原子が供給されることにより、大気光強度が増大するというメカニズムであると考えられる。ダストシーズンの発光強度がダストシーズンでない時期に比べて 4-5 倍大きくなっているが、これは下層大気の水蒸気輸送量が 4-5 倍異なることを示唆している。この値は数値計算等の先行研究から予想されている値とも一致しており、ひさき衛星はその変化を観測的に捕らえられたことが期待できる。

本研究内容は、Masunaga et al. (2020)として、国際学術誌に出版された。

次に、我々は火星でダストストームが発生している 2016 年 9 月の観測データに着目した。この期間はダストストームが発生し、約 1 ヶ月の観測データを用い、火星超高層大気の水素 Ly- β 及び酸素 135.6nm 輝線の日変動に着目した。その結果、以下の特徴が明らかになった。

- 水素大気光の明るさはある周期を持ちながら単調増加する。
- 酸素大気光は太陽放射の変動に依存しつつ、周期的な変動をする。
- 水素大気光の季節変動や酸素大気光の太陽放射への依存性を取り除いた明るさの残差の変動を調べると、それぞれの大气光に 6-8 日の周期性がみられ、かつ水素と酸素の位相が半周期ずれたような変動を示す。(図 2 c)
- 火星地上では約 6-8 日周期の大气波動(傾圧不安定波)が発生している。(図 2 b)

以上の特徴より、ダストストームの発達に伴い下層大気から水蒸気が高層へ輸送された結果、超高層の水素原子が増加したと考えられる。これに加え、下層大気で発生した傾圧不安定波が高層へ上方伝搬することで火星超高層の動力学にも影響を及ぼし、超高層の水素原子の総量が周期的に変化していると考えられる。一方、全頁に示した観測においては酸素原子の総量は長期的には一定であったが、本観測により、数日スケールの短期間においては酸素原子の総量は 20-40%程度の変動を示すことが明らかになった。水素・酸素大気光の周期の位相が約半周期ずれていることから、ダストストームに伴って水素原子が増えるとき、酸素原子の量は減るということが示唆される。我々は、ダストストームに伴い水蒸気だけでなくその他の物質も輸送され、それが酸素と反応して消失することで水素と反対の振る舞いを示したと提唱した。

本研究は Masunaga et al.(2021)として国際学術誌へまもなく投稿予定である。

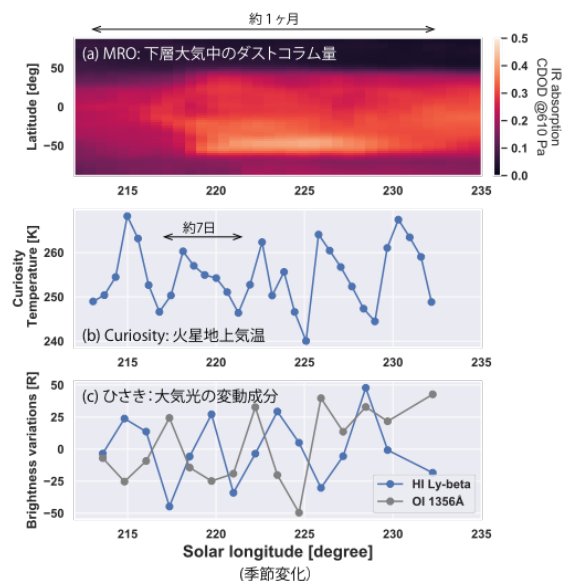


図 2: (a)Mars Reconnaissance Orbiter の観測に基づくダストコラム量の緯度分布の季節(時間)変化、(b)Curiosity によって観測された気温の季節(時間)変化、および(c)ひさきによって観測された火星大気光変動成分の季節(時間)変化。ダストストームが発生し、地表気温および超高層の大気光変動に約 6-8 日の周期性が見られる。

さらに、2020 年から 2021 年にかけて、火星を定期的に(Ls:10-20 度毎)観測した。Masunaga et al. (2020)で報告した結果にさらにデータを加えると、以下の特徴が明らかになった。

- Ly- β の明るさは $L_s=270$ 度付近でピークとなる。これは先行研究とも一致する。ダストシーズンの明るさはそうでない時期に比べて 5-6 倍大きい。(図 3 上図)
- MY32 の $L_s\sim 210$ 度付近では、水素、酸素大気光の双方が外れ値となっている。水素大気光の明るさは全観測の季節変動のトレンドに比べて有意に大きい。(図 3 上図) また、この時期の酸素 130.4nm 大気光の明るさも全観測期間で最大値となっている。(図 3 下図)

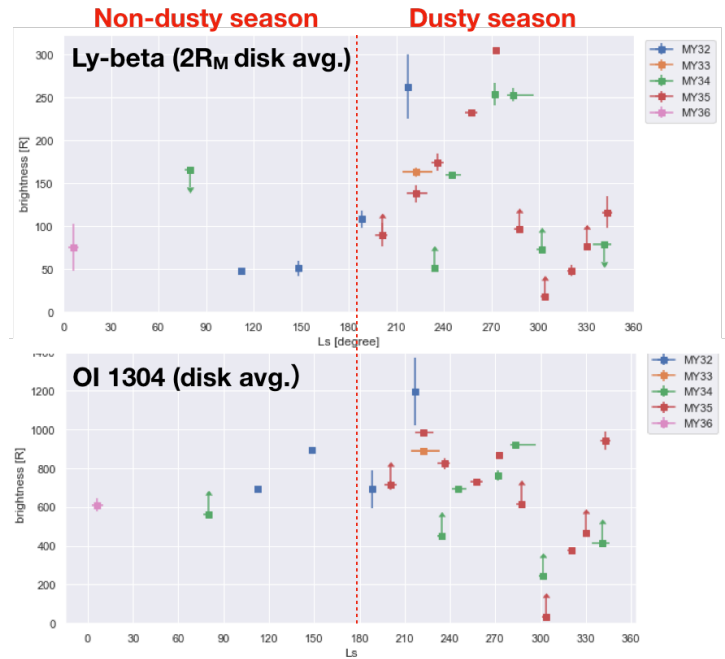


図 3: 2014 年から 2021 年にかけて観測された水素 Ly- β (Top)と酸素 130.4nm(Bottom)大気光の季節変動。色の違いは火星年(Mars Year)の違いを示す。

1 つ目の特徴より、超高層水素大気の季節変動は毎年似たような変動をしている可能性を示唆している。ただし、グローバルダストストームの活動がピークであった時期の観測はできていないため、グローバルダストストームが水素大気へ及ぼす影響については謎が残る。

2 つ目の特徴に関し、この観測期間は Comet Siding Spring が火星へ近づいた時期である。このことから、我々は彗星から火星へ大気成分が輸送された可能性が高いと結論づけた。

本研究成果は Masunaga et al.として今後国際学術誌へ投稿予定である。

これまではひさきの観測により火星超高層大気中に存在する水素原子や酸素原子の総量について議論を進めてきたが、火星超高層の水素大気の流出成分についても調べるため、火星探査機 MAVEN を用いてプロトンオーロラについても研究を広げた。火星昼側で発光するプロトンオーロラは、太陽風起源のプロトンが電荷交換反応を経て生まれた Hydrogen Energetic Neutral Atom (H-ENA) の Ly- α による発光現象である。すなわち、プロトンオーロラの発光量から H-ENA のコラム量を見積もることが可能であり、H-ENA のコラム量は電荷交換によって生成された水素イオンのコラム量に匹敵する。これら水素イオンの一部は太陽風によってピックアップされ火星から流出すると考えられるため、プロトンオーロラの観測により、火星からの水素イオン流出量を推定することにつながる。

本研究では、2014 年から 2019 年までの MAVEN の紫外分光観測データを用い、プロトンオーロラの発光強度の季節変動及び太陽風依存性について調査を行った。その結果、以下の特徴が明らかになった。

- 季節依存性について
プロトンオーロラの発光強度はダストシーズンに明るい傾向となることがわかった。(図 4) すなわち、ダストシーズンには、水素イオンの流出量が増加している可能性が高いことを示している。
- 太陽風依存性について
プロトンオーロラの発光強度は太陽風のフラックスに強く依存することが明らかになった(図 5)。太陽風の電場や磁場への依存性は観測されなかった。

以上から、水素イオンの流出フラックスはダストストームや太陽風の密度や速度に大きく依存すると考えられる。この仮説を証明するため、今後 MAVEN の水素イオン観測データの解析を進める予定である。

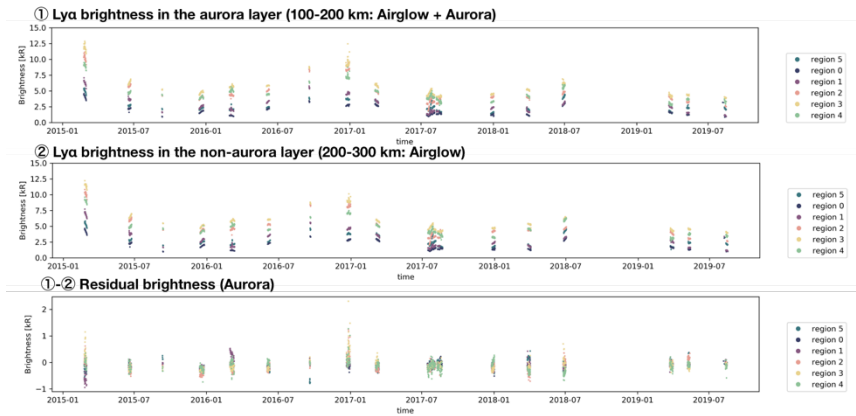


図 4. 2015 年から 2019 年にかけて観測された水素 Ly- α の明るさの時間変動。それぞれ、(top)大気光+オーロラ, (middle)大気光, and (bottom) 残差（オーロラ）の発光強度を示す。

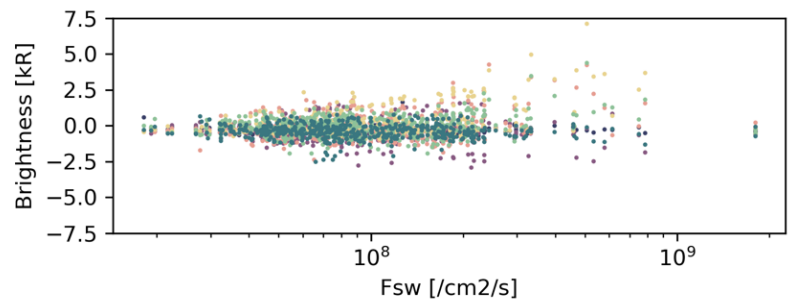


図 5. 2015 年から 2019 年にかけて観測された水素 Ly- α の明るさと太陽風のフラックスの関係。