

# ひさき衛星の火星・金星上層大気観測の成果

益 永 圭

〈山形大学学士課程基盤教育院 〒990-8560 山形県山形市小白川町 1-4-12〉

e-mail: kei.masunaga@cc.yamagata-u.ac.jp



現在の火星や金星表面に液体の水は存在していません。しかし、探査機の観測により、過去の火星や金星は温暖で表面に海が存在したことが示唆されています。これまで、過去に存在した水を除去する機構の一つとして大気の宇宙空間への流出が重要視され、太陽風が駆動する大気流出機構についての理解が進んできました。一方、近年の観測により、これらの惑星の上層大気のダイナミクスは砂嵐や大気波動という下層大気で発生する現象とも関連していることがわかってきました。そのため、火星・金星からの大気流出機構を理解するためには、太陽風のような宇宙からの影響だけでなく、惑星下層大気からの影響も調べる必要があります。本稿では、火星・金星の下層大気で起こる現象が大気流出へ及ぼす影響に関し、ひさき衛星の観測成果を概説します。

## 1. はじめに

地球の両隣に位置する火星と金星。火星は乾燥し寒冷な惑星（平均温度は約 $-55^{\circ}\text{C}$ ）であり、金星は高温高压の灼熱の惑星（平均温度は約 $460^{\circ}\text{C}$ ）で、現在どちらも生命が存在するのに適した環境を持っていません。しかし、これまでの観測から、過去の火星や金星は温暖湿潤な気候を有し、表面に液体の水（海）が存在していた可能性が示唆されています（図1）。特に火星については、周回機による遠隔探査やローバーの直接探査により水の痕跡を示す鉱物や地形が見つかっており、表面に海が存在していたことがほぼ確実視されています。では、これらの惑星にかつて存在した海はどこへ消えたのでしょうか。有力な仮説の一つとして、海の一部がガスとして宇宙空間へ流出したという説が挙げられます。

図2のように、火星や金星の上層大気は太陽放射や太陽風といった宇宙からの影響を受けて、大気成分が中性やプラズマの形で宇宙空間へ流出し

ています。これまで、多くの探査機の観測を通じて、太陽風や太陽放射が火星・金星の大気流出に及ぼす影響について比較的多くの研究が行われてきました。特に、米国の火星探査機 MAVEN や欧州の金星探査機 Venus Express の観測により、その実態は明らかになりつつあります。一方、近年の観測から、これらの惑星の上層大気は下層大気中で発生する砂嵐（ダストストームとも呼ばれますが、本記事では砂嵐で統一します）や大気波



図1 温暖湿潤な過去の火星の想像図 (Credit: The Lunar and Planetary Institute & NASA's MAVEN mission).

## 火星・金星からの大気流出

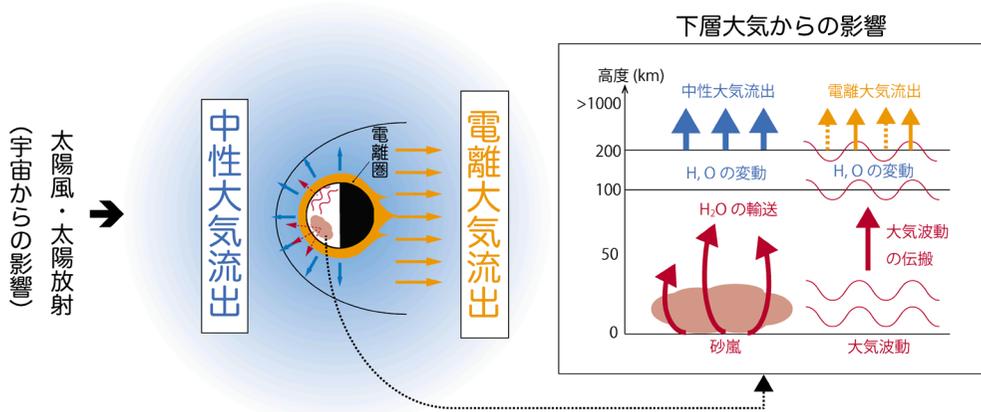


図2 火星及び金星からの大気流出の概要図. 大気流出は宇宙からの影響及び下層大気からの影響を受けて時間的・空間的に変動します.

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がわかってきました. このような物質や運動量の輸送が起これば, 上層大気の状態は大きく変動することになり, その結果, 大気流出にも影響を及ぼすと予想されます. しかし, その実態についてはまだよくわかっていないのが現状です.

私たちは火星や金星の大気流出がそれぞれの惑星の大気進化や気候変動に与える影響を理解するため, これまでにひさき衛星を含む観測データを用いて火星・金星の大気成分が宇宙空間へ逃げ出す仕組みを調べてきました. 特に, 本稿では, 火星や金星の上層大気が下層大気からどのような影響を受け, 大気流出に影響を及ぼすのか, ひさき衛星の観測から得られた成果について紹介します.

## 2. ひさき衛星により観測された火星・金星上層大気のスเปクトル

図3に火星観測および金星観測で得られたスเปクトルを示します. 図中に示すように, スリット内に火星や金星が導入されて分光されており, 大気由来のさまざまな輝線が検出されていることがわかります. これらの輝線は主に火星・金星の高度約100 kmより上空で発光しており, 太陽光を

吸収して発光する共鳴散乱や電離圏中の高エネルギーの電子との衝突, 二酸化炭素分子の解離・電離等で励起されているため, 発光強度は太陽紫外線フラックスや発光を担う分子の量(柱密度)と関連する量です. 一方, スリット全体に広がった光は地球大気(ジオコロナ)由来の発光で, 主に水素原子や酸素原子の輝線です. そのため, 火星・金星大気光の明るさはジオコロナの寄与を差し引いて導出する必要があります.

私たちは, 観測されたさまざまな輝線の中でも水の構成要素である水素原子や酸素原子の明るい輝線に着目して解析を進めてきました. 特に, ひさき衛星は地球軌道から広い視野で惑星を一望できるため, 惑星全球規模で起こる現象の時間変化を捉えることができます. 指向精度が惑星視直径と同程度(約20秒角)であるため[1], 本研究で登場する大気光の明るさは惑星全球における水素原子や酸素原子の平均柱密度に関連する量として考えています.

## 3. 砂嵐が火星上層大気へ及ぼす影響

### 3.1 火星の砂嵐

火星表面は砂や塵で覆われており, 風が吹くと

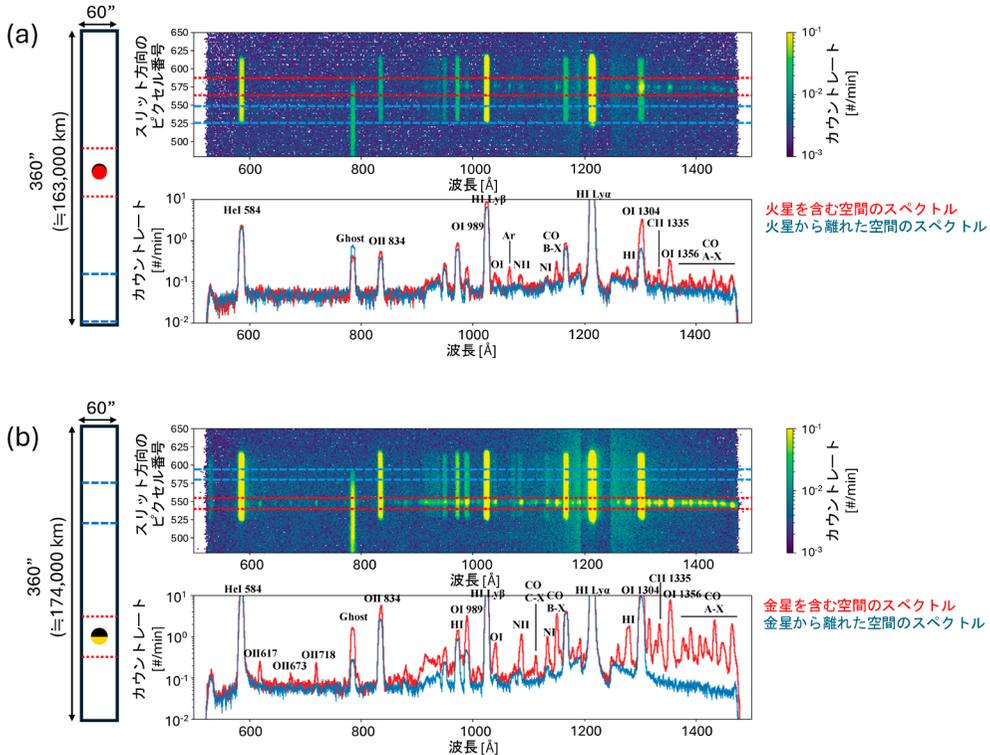


図3 ひさき衛星によって観測された (a) 火星上層大気及び (b) 金星上層大気のスペクトル。このデータの取得期間は火星、金星の視直径がそれぞれ15秒角、25秒角であったため、スリット方向の視野は、それぞれ火星付近で約163,000 km、金星付近で約174,000 kmに対応します。各パネルの上図は、スリットに沿って得られた光子のカウントレートを波長ごとに図示しています。惑星が導入された位置（各パネル左図の点線部）で光っているのが惑星の大気光で、スリットに沿って上下方向に広がった光は地球大気（ジオコロナ）の発光です。各パネル下図はそれぞれ、惑星を含む空間（各パネル左図や上図の点線部）と惑星から十分に離れた空間（各パネル左図や上図の破線部）の光を積分したスペクトルに対応しています。前者から後者を差し引くことにより、惑星の大気光の明さを導出します。なお、1216 Å付近は水素ライマンα線によるサチュレーションを防ぐために感度を落としてあります。780 Å付近に見える特異な信号は、ライマンα線由来の迷光に起因するゴーストです。

これらの砂塵（ダスト）が大気中へ巻き上げられます。大気中のダストは太陽放射を吸収し、大気を加熱する性質があるため、火星大気の熱構造や循環に大きな影響を与えることが知られています。また、火星には地球と同様に季節の変化があり、それに伴って大気循環も変化します。これにより、巻き上げられるダストの量も季節によって変動します。特に、火星が太陽に近づく南半球の夏を中心に、春から秋の季節（Solar Longitude;  $L_S = 180^\circ - 360^\circ$ ）には、大気中のダスト量が増加

し、加熱がさらに進むことになります。この加熱が大気循環を強め、さらに多くのダストを巻き上げるという正のフィードバックが働くことで、大規模な砂嵐へと発達していきます。

### 3.2 ひさき衛星及び複数探査機による砂嵐期間の火星上層・下層大気同時観測

砂嵐は火星表面付近だけでなく、火星の上層大気にも顕著な変化をもたらします。近年の欧州火星探査機TGOの観測により、通常は高度約20 km以下に分布している水蒸気が、大気加熱に

より高高度(約100 km)まで分布できるようになることが明らかになりました[2]。高高度に分布した水分子は太陽紫外線によって解離され、生まれた水素原子が上方へ拡散し、最終的に宇宙空間へ流出します[3, 4]。すなわち、砂嵐は火星から水起源の水素を除去する役割があることを意味しています。

では、水のもう一方の構成要素である酸素についてはどうなるのでしょうか。砂嵐期間中における上層大気中の酸素原子の量の時間変動についてはよく調べられていませんでした。そこで、私たちはひさき衛星を用いて、2016年9月に火星で砂嵐が発生した期間に火星上層大気で発光する大気光を約1ヵ月間モニターしました。その結果、上層大気の水素大気光(ライマンβ線)は約2倍増光するのに対し、酸素大気光(135.6 nm)は一時的に1/3程度減光することを発見しました(図4)。これは、砂嵐によって水起源の水素原子が上層大気中で増加したのに対し、何らかの原因で上層大気中の酸素原子の量は減少したことを示しています。複数の火星探査機(Mars Reconnaissance Orbiter, MAVEN, Mars Express)による同時期の観測データも解析した結果、上層大気ではひさき衛星と同様に酸素原子の一時的な密度

減少が確認され、下層大気では高高度にまで水蒸気や氷粒子が輸送されていることがわかりました。このことから、私たちは砂嵐に伴って輸送された水蒸気起源の元素との化学反応、氷粒子への吸着、乱流による物質混合などにより上層大気中の酸素原子が消失している可能性を提唱しました[5]。大気流出の源である上層大気成分の量に変化すれば、大気流出量にも影響が及ぶ可能性があります。つまり、砂嵐発生時は水素の流出は促進されるのに対し、酸素原子の流出は一時的に抑制される可能性を示唆しています。

#### 4. 大気重力波が金星上層大気へ及ぼす影響

##### 4.1 大気重力波

大気重力波とは、大気の浮力を復元力とする波であり、金星だけでなく、地球や火星など大気を持つ惑星に存在しています。金星では雲層高度(約45-70 km)を中心に大気がスーパーローテーション(自転に243日かかるのに対して、大気は4日で一周する)していることが知られていますが、近年の金星探査機あかつきの観測及び数値実験により、惑星サイズになる大スケールの大気重力波である熱潮汐波やケルビン波がスーパーローテーション

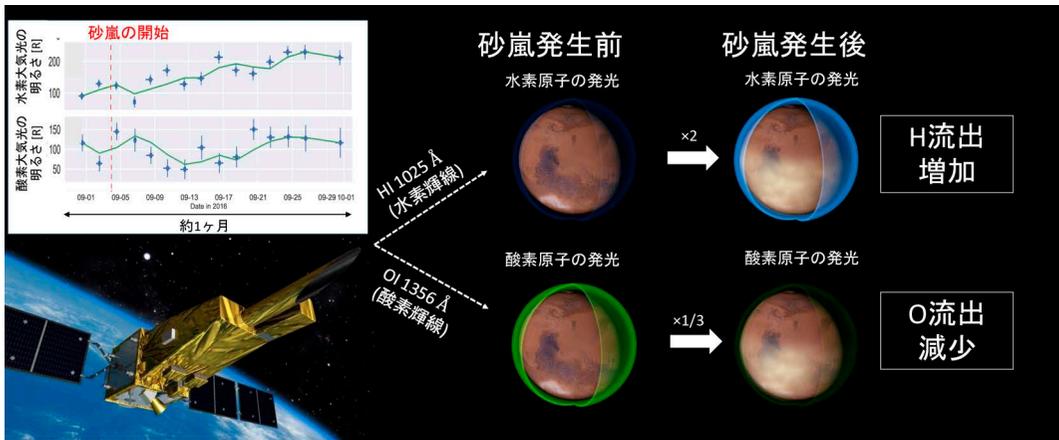


図4 砂嵐期間中に観測された火星水素大気光の明るさと酸素大気光の明るさの時間変動 [5]。なお、1 R (レイラー) の発光強度とは  $1 \text{ cm}^2$  を 1 秒間に 100 万個の光子が通過する明るさを示します。

の駆動・維持に関わっていることが明らかになっています。また、一部の大気重力波は生まれた高度から主に上方へと伝播しますが、大気は高度が上がるにつれて密度が減少するため、波の振幅は上方へ伝播するにつれて増大します。上層大気で最終的に波が壊れる（砕波）と、波のエネルギーが背景の大気に渡され上層大気の運動に変化を及ぼすことになります。このように、大気重力波は上層大気のダイナミクスに重要な役割を果たしていると考えられています。しかし、金星の上層大気と下層大気を同時に観測する機会は多くなく、その仕組みは観測的にも明らかになっていませんでした。

#### 4.2 ひさき衛星とあかつき探査機による金星上層・下層大気同時観測

私たちはひさき衛星を用いて断続的に金星の上層大気で発光する大気光の観測を行ってきました

た。特に、明るい輝線である酸素イオン・酸素原子の輝線（83.4 nm, 130.4 nm, 135.6 nm）の発光強度の時間変動に着目しました。その結果、金星の朝側を観測している際に酸素大気光に約4日周期の変動が観測されることが明らかになりました [6, 7]。同時期に欧州金星探査機 Venus Express 等によって観測された太陽風の変動との相関が見られなかったことから、この周期変動は下層大気から伝播する大気波動の影響を受けている可能性が提唱されました。

そこで、ひさき衛星とあかつき探査機の協調観測により、上層大気と下層大気（雲層高度約50–70 km）を同時に観測した結果、熱圏の酸素大気光及び雲層の東西風速の両方に共通する約4日周期の変動が観測されることを明らかにしました [8]（図5a, b）。これらの観測結果を説明する

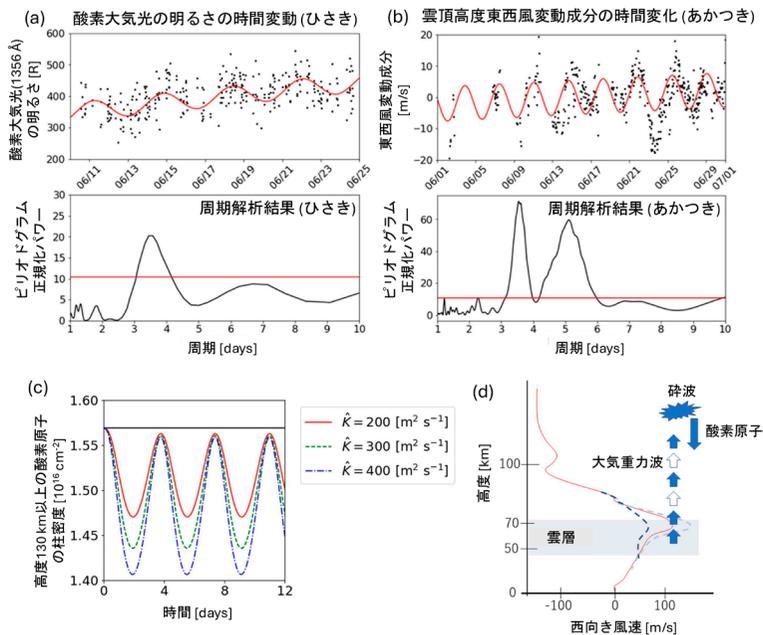


図5 (a) (上パネル) ひさき衛星によって観測された大気光の時間変動 (点) と周期解析により求めた周期 (3.6日) をもつ正弦関数 (曲線)。 (下パネル) ピリオドグラム周期解析結果。水平線はピリオドグラムの99%有意水準。 (b) (上パネル) あかつき探査機によって観測された雲層高度の風速東西成分の時間変動 (点) と周期解析により求めた周期 (3.6日) をもつ正弦関数 (曲線)。 (下パネル) ピリオドグラム周期解析結果。水平線はピリオドグラムの99%有意水準。 (c) モデルによって再現された熱圏 (高度130 kmより上空) の酸素原子柱密度の周期変動。 (d) 観測及びモデルから予想される金星大気の上層結合関係の概略図 [8]。

ために、1次元の波動鉛直伝搬モデルや光化学モデルを用いた数値計算を行った結果、金星の朝側では小スケール (<1,000 km) の大気重力波が雲層高度から熱圏高度まで伝搬可能であることや、雲層を伝播する惑星スケールの波の影響により、大気重力波の伝搬のしやすさが4日周期で変動することを示しました。また、熱圏に伝播した大気重力波の碎波に伴う大気の鉛直混合の影響により酸素原子の密度が変化し、酸素大気光の明るさが4日周期で変化することも明らかになりました (図5c, d)。この結果は、下層大気から伝播する大気波動の影響により大気流出の源となる上層大気の酸素原子の量が変動することを示しています。

## 5. 今後の展望

ひさき衛星の観測により、火星や金星の下層大気で発生する現象が、上層大気のダイナミクスや大気流出に多大な影響を及ぼす可能性が示唆されました。しかし、ひさき衛星の指向精度の制約上、上層大気で発光する水素原子や酸素原子が水平方向や鉛直方向にどのように広がり、宇宙空間へと流出していくのかについてはまだ謎が多いのが現状です。また、水素原子や酸素原子だけでなく、炭素や窒素などの生命にとって重要な元素の流出機構についても理解する必要がありますが、観測の不足からまだ理解が進んでいません。

現在検討中のLAPYUTA紫外線宇宙望遠鏡計画[9]では、火星や金星を十分に空間分解できる指向精度、様々な輝線を分解できる波長分解能、そして微弱な発光を検出できる高い感度を達成し、上記の課題を解決したいと考えています。これまでは、既存の観測装置の観測データを解析して研究を進めてきましたが、科学検討では「ある現象を理解するために、何(物理量)を測りたくて、それに必要な装置のスペック(要求値)は何か」という、普段使っていた考え方と逆の考えをしなくてはなりません。最初はこのギャップに戸

惑うこともありましたが、新たな視点で研究を見直す貴重な機会にもなっています。今後もチームのメンバーと協力しながら、計画の実現に向けてより詳細な検討を続けていく予定です。

## 謝辞

原稿の作成にあたり、編集委員の皆様には大変お世話になりました。特に、岩崎一成さんと仏坂健太さんに原稿を丁寧に校閲いただきました。お礼申し上げます。また、本稿の内容に関して東京大学の今村剛さんと宇宙科学研究所の山崎敦さんに助言をいただきました。感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] Yamazaki, A., et al., 2014, SSR, 184, 259
- [2] Aoki, S., et al., 2019, JGR Planets, 124, 3482
- [3] Stone, S.W., et al., 2020, Science, 370, 824
- [4] Chaffin, M.S., et al., 2021, Nat. Astron., 5, 1036
- [5] Masunaga, K., et al., 2022, Nat. Commun., 13, 6609
- [6] Masunaga, K., et al., 2015, JGR Planets, 120, 2037
- [7] Masunaga, K., et al., 2017, Icarus, 292, 102
- [8] Nara, Y., et al., 2020, JGR Planets, 125, e2019JE006192
- [9] Tsuchiya, F. et al., 2024, Proc. SPIE 13093 130930I

## Overview of Mars and Venus Observations Made by Hisaki

Kei MASUNAGA

*Institute of Arts and Sciences, Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawa-machi, Yamagata-shi, Yamagata 990-8560, Japan*

Abstract: Atmospheric escape from Mars and Venus plays a crucial role in understanding the loss of water on these planets. From 2013 to 2021, JAXA's Hisaki space telescope intermittently observed the upper atmospheres of Mars and Venus, focusing on the escape of hydrogen and oxygen. This article highlights the major findings of these observations, which revealed a strong coupling between lower atmospheric phenomena (such as dust storms and atmospheric waves) and the abundance of hydrogen and oxygen atoms in the upper atmosphere. These interactions potentially influence the atmospheric escape processes on both planets.