

令和元年6月11日現在

機関番号：32686

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13887

研究課題名(和文) 惑星超高層大気リモートセンシングへの応用を目指した無電極吸収・発光セル法の開発

研究課題名(英文) Development of an electrodeless absorption and emission cell for application to remote sensing of planetary upper atmospheres

研究代表者

田口 真 (TAGUCHI, Makoto)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：70236404

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系内の惑星や彗星の水散逸過程や水素重水素比を測定するために新しい吸収セル法を開発した。試作した吸収セルの最高性能を引き出すため、超高分解能分光器を用いた実験によりフィラメント形状、フィラメント電力、光路長、封入ガス密度を最適化した。吸収量の性能だけでなく吸収の安定性を考慮したフィラメント設計が重要であることがわかった。開発された水素吸収セルを搭載する衛星や惑星探査ミッションの検討が進められている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生命の誕生に液体の水の存在は不可欠であると考えられている。惑星や太陽系内小天体から散逸する水素原子の計測はそれらの天体に液体の水が現在どれだけ存在するか、あるいは過去にどれだけ存在したかを知る手がかりとなる。散逸する水素原子が散乱する太陽紫外線強度から水素原子密度と温度を推定することができる。しかしそのためには、高い波長分解能の分光器が必要である。本研究で開発された水素吸収セル法は小型軽量で高性能分光器に匹敵する波長分解能を実現できるため、それらの天体を対象とする宇宙ミッションに重要な観測手段を提供する。

研究成果の概要(英文)：A new absorption cell technique has been developed for measuring hydrogen escape and hydrogen deuterium ratio of planets and comets in the solar system. To maximize the performance of the developed cell, size, length and power of a filament, optical path length and hydrogen gas density have been optimized by an experiment using a spectrometer with ultra-high spectral resolution. It is found that not only depth of absorption but also stability of absorption is important in designing a cell. Satellite and planetary missions using the absorption cell technique developed in this study have been under consideration.

研究分野：惑星大気物理学

キーワード：惑星コロナ 散逸大気 ハビタブルゾーン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水が液体で存在できる領域をハビタブルゾーンと呼ぶこととして、液体の水は宇宙で複雑な有機分子が発達し、やがて生命が誕生するために必須であると考えられている。惑星表面上に存在する水の大部分は惑星形成時にそもそも含まれていたと考えられる。一方で、惑星からの水の散逸過程は、惑星における過去の液体の水の量を推定するために重要な情報である。下層大気では  $H_2O$  は太陽紫外光によって水素原子と水酸基に光解離する。生成した水素原子は上層大気に拡散し、外気圏底で脱出速度よりも大きいエネルギーを持つ水素原子は惑星の重力圏を振り切って宇宙空間へ散逸していく。

惑星の外気圏に広がる水素原子は太陽の水素ライマン  $\alpha$  光 (波長 121.567 nm) を共鳴散乱する。この散乱光のことを惑星コロナと呼ぶ。光学的に薄い領域では、惑星コロナの明るさは水素原子の柱密度に比例する。よって、水素ライマン  $\alpha$  光の強度の測定によって水素原子の密度分布を推定することが可能である。さらに、水素ライマン  $\alpha$  光の発光スペクトルプロファイルからはドップラー温度を推定することができる。例えば、外気圏温度が 500K のとき水素ライマン  $\alpha$  光の発光スペクトルプロファイルは半値全幅がおおよそ  $2 \times 10^{-3}$  nm のガウス関数型である。

2013年11月に打ち上げられた米国の火星探査機 MAVEN に搭載されている主たる観測装置は紫外撮像分光計 (IUVS) である。この装置は大きさが  $617 \times 541 \times 231$  mm<sup>3</sup>、質量が 26.8 kg もある。しかし、IUVS の最高性能の波長分解能をもってしても水素ライマン  $\alpha$  光の発光スペクトルプロファイルを分解することはできない。

一方、水素吸収セル法は惑星水素コロナの温度分布を測定する有力な方法である。この手法はフランスのグループによって地球コロナの観測に用いられたのが最初である。水素吸収セル法によって測定された外気圏温度は惑星からの水素原子の散逸過程を定量的に見積もるために不可欠な情報である。この手法を用いた観測装置は非常に小型軽量にまとめることが可能で、惑星探査や小型衛星ミッションへの搭載に適している。

かつて、日本の火星探査機「のぞみ」に水素吸収セルフォトメーター (UVS-P) が搭載された [Taguchi et al., 2000]。しかし、「のぞみ」の電源トラブルのため、UVS-P による火星コロナ観測は実現しなかった。「のぞみ」の開発上の様々な制約から、UVS-P に使用された水素吸収セルは必ずしも火星コロナ観測に最適化されてはいなかった。

### 2. 研究の目的

UVS-P の開発から四半世紀を経て、これまで世界で誰も成功していない惑星コロナ温度観測を実現するために、新たな水素吸収セルを開発することが本研究の目的である。「のぞみ」搭載 UVS-P に使われた水素吸収セル [Kawahara et al., 1997] の製造工程は確立されていたが、フィラメント形状、フィラメント電力、封入水素ガス密度、光路長は必ずしも最適化されていなかった。また、時を経て新たな水素吸収セルを製作するために、UVS-P 開発当時の製作技術を再現できるか不明であった。そこで、本研究では吸収セル製作方法の再確認と、吸収セルの性能を最大限に発揮するパラメーターを決定する。また、これまでの水素吸収セルの原理を超えた新しい水素吸収セルを検討する。

### 3. 研究の方法

図 1 に示すように、水素吸収セルは円筒状のガラスの両底面にフッ化マグネシウム ( $MgF_2$ ) 窓が取り付けられた構造をしており、内部には水素分子が封入されている。 $MgF_2$  は波長 110 nm-7500 nm の光を透過する光学結晶である。吸収セル内部に置かれたフィラメントを点灯す



図 1 . 試作した光路長 60 mm の吸収セル (左) 及び 100 mm の吸収セル (右)。

ると、吸収セル内部の水素分子は水素原子に熱解離する。MgF<sub>2</sub> 窓から入射した惑星コロナからの水素ライマン α 光はフィラメントが OFF のときにはセル内を透過するが、フィラメントが ON のときには解離生成した水素原子が共鳴散乱するためセルを透過しない。フィラメント OFF 時と ON 時の透過光量の差をとることで水素ライマン α 光の強度を測定することができる。重水素吸収セルには重水素が封入されており、同様にフィラメントの ON/OFF によって重水素ライマン α 光(121.534 nm)を検出可能である。中心波長が近接した水素ライマン α 光と重水素ライマン α 光を分光器で分離するには MAVEN/IUVS のような巨大な分光器が必要である。しかし、吸収セルを用いることで小型軽量なセンサーで水素、重水素ライマン α 光の強度を測定することが可能となる。

水素吸収セルの吸収幅は水素ガスの解離率と温度によって決まる。フィラメント電力が大きいかほど吸収幅は大きくなる。一方、惑星コロナの温度が高いほど、原子の速度は速くなり、放つ光が受けるドップラー幅は大きくなる。その結果、フィラメント電力と水素ライマン α 光の透過率の関係は、惑星コロナの温度によって違いが出る。この関係を利用して惑星コロナの温度を推定することが可能である。その他に、探査機の軌道速度変化による水素吸収セルの吸収率変化を利用して、水素ライマン α 光の発光プロファイルを推定する方法もある。

「のぞみ」搭載 UVS-P に使用された吸収セルを開発した際に確立された製作工程は以下である。

- セルガラスボディーの整形（外）
- セル内面のテフロンコーティング（大）
- フィラメントのボタンステムへの溶接（大）
- ボタンステムのセルボディーへの取り付け（浜）
- MgF<sub>2</sub>窓のセルボディーへの取り付け（浜）
- ベーキングしながら真空排気（大）
- 水素ガス導入・封じ切り（大）

このうち（大）は大学、（浜）は浜松ホトニクス、（外）は外部ガラス加工業者による作業を意味する。本研究では以下の工程で製作した。

- セルガラスボディーの整形（浜）
- フィラメントのボタンステムへの溶接（浜）
- ボタンステムのセルボディーへの取り付け（浜）
- MgF<sub>2</sub>窓のセルボディーへの取り付け（浜）
- ベーキングしながら真空排気（大）
- 水素ガス導入・封じ切り（大）

光路長の異なる 2 種類のセルにそれぞれフィラメント 5 種類を取り付けた。製作した吸収セルの吸収性能をフランスのパリ郊外にある SOLEIL Synchrotron という放射光実験施設で 2016 年と 2018 年の 2 回の実験で測定した。

#### 4. 研究成果

2016 年 7 月に SOLEIL Synchrotron で吸収セルの吸収性能評価を目的とした実験を行った。SOLEIL では、シンクロトロン放射による真空紫外領域の強い連続光を利用でき、ビームラインの一つに DESIRS と呼ばれる高い波長分解能のフーリエ変換分光計が備えられている。本実験ではセル内のガス密度、電力、光路長、フィラメントの種類、フィラメントの数の条件を変え、吸収セルのフィラメントを点灯させたときの吸収スペクトルの変化を測定した。この実験結果は Kuwabara et al. [2018]として上梓された。

主要な結果として、最も吸収効率が高いのは水素ガス圧力が 1~2 hPa、フィラメント線径が 0.0244 mm、フィラメント長さが 14.8 mm で、電力が 3 W のときであることがわかった。吸収セルの光路長 60 mm と 100 mm では吸収性能にほとんど違いがなかった。したがって、光路長は 60 mm あれば十分と考えられる。

2018 年 6 月に再び SOLEIL において吸収セルの性能評価実験を行った。新たに製作した光路長 40 mm のセルの吸収特性及び主に吸収の位置依存性を調べた。その結果、光路長 40 mm のセルは実験前のベーキング不足とフィラメント径を細くしたために、フィラメントがすぐに切れて実験評価に耐えるデータを取得する事ができなかった。一方、位置依存性測定実験では、定性的に予想される通り、ビームが通る位置がフィラメントに近いほど吸収を強く受ける結果を得た。セル内部の水素原子密度分布を解くシミュレーションと合わせた定量的な解析を進めているが、この報告書を書く段階ではまだ計算結果は出ていない。引き続き計算を進めて、吸収セル内部の水素原子分布を計算するスキームを確立する。

これまで吸収セルのガス導入管はオープンのまま、内部の水素ガスを出し入れして実験を行っていた。しかし、宇宙機に搭載する吸収セルはガスを導入して封じ切らなければならない。そこで、これまで SOLEIL での実験で使用した光路長 60 mm と 100 mm の 2 種類の吸収セルを使って、ガスを封じた吸収セルを試作した。封じ切る工程を行うのは「のぞみ」UVS-P 用吸収セルを製作して以来 25 年ぶりくらいなので、セルと同素材のガラス管で何度も練習して 2 名が心を合わせて 3 つのバーナーで均等に温めながら封じ切る手法を開発した。

試作した吸収セルのフィラメントの耐久性を調べるためにフィラメントに流れた電流値の時間変化を求めた。その際、分子科学研究所極端紫外光研究施設において、吸収量を測定しながら

ら、フィラメント電流を記録した。実験中フィラメントには 10 V の電圧の ON/OFF を繰り返していたため、電圧 ON/OFF 時の時間を累積しそれに伴う電流値の変化を調べた。フィラメントは吸収セルの上部と下部にそれぞれ 5 本ずつの計 10 本取り付けられているが、それぞれ 1 本ずつを使用して同時に点灯させた。実験の結果、約 62.5 時間で 1 本目のフィラメントが切れた。2 本目のフィラメント約 69 時間点灯し続けたが切れなかったが、徐々に流れる電流は低下した。フィラメントが消耗して細くなるために電気抵抗が上昇したためと考えられる。最初に切れたフィラメントと同じ電流値で切れるとすると、残りのフィラメントもさらに約 90 時間点灯し続けると切れると予測される。

今後吸収セルを用いた観測として視野に入れている地球コロナの観測ではミッションライフを 24 ヶ月、マージンとして 2 倍の 48 ヶ月を 10 本のフィラメントで平均して、1 本あたりの目標耐久時間は約 4.8 ヶ月が要求される。そのため、フィラメントの耐久性は改善の必要がある。フィラメントの寿命を縮めた要因としては、吸収効率を重視してフィラメント径を細くしすぎたこと、吸収セルのベーキングが十分ではなく、脱ガスによりフィラメントが酸化することが考えられる。そのため、フィラメント径については吸収効率だけでなく耐久性の面も含めた最適化をしていかなければならない。ベーキングについては、吸収セルと真空装置の接続部分のカルレッツ製 O リングの耐熱温度が 300 であること、使用している一部の温度調節器の警報出力温度が 200 であることによる温度上限を改善することでベーキング温度をより高く設定可能にする必要がある。吸収セルと真空装置の接続部分には、O リングでなく銅ガスケットを使用することができれば耐熱温度による温度上限は解消され、O リングシール部からのマイクロリークの心配も排除される。さらに、吸収セルのフィラメントは現在 10 本であるがフィラメントの本数を 20 本に増やし 1 本あたりの目標耐久時間を減らすなど対策を検討している。

また、フィラメント寿命の問題に対する別の解決方法として、フィラメントの代わりにマイクロ波で水素分子を解離する方法について検討した。実験室レベルではこの方法は実用化されているが、宇宙機に搭載するためには小型軽量化が必要で、現在のところでは実用化はかなり困難との結論に達した。

現在は吸収セル製作工程のかなりの部分を浜松ホトニクスに発注している。このため、吸収セルの製作コストが高くなっている。さらに封じ切り時のセル内部残留ガスのコンタミネーションがフィラメントの酸化の原因となり、吸収セルの寿命に大きく関係していると考えられる。そこで、製作コスト及びコンタミネーション低減のために本研究で取り入れた吸収セル製作工程とは全く異なる製作工程を考えている。これについてはまだ構想段階で公表できないので、次の研究課題とする。

本研究の成果として、水素吸収セルを宇宙ミッションに採用されることが現実味を帯びてきた。その一例として、米国 The Johns Hopkins University の Prof. Larry Paxton らのグループが NASA のプログラムに応募している SIHLA ミッションに本研究で開発された吸収セルが搭載されることになっている。このミッションは地球コロナ及び惑星間水素風の観測を目的としている。2019 年夏にミッションの採否が決定する。採用された場合は搭載品水素吸収セルを製作し、供給する。火星や彗星等の他の太陽系内天体探査小型ミッションへ水素吸収セルの搭載も平行して検討している。

## 参考文献

- Takuya D. Kawahara, Shoichi Okano, Toshihiro Abe, Hiroshi Fukunishi, and Kenji Ito, Glass-type hydrogen and deuterium absorption cells developed for D/H ratio measurements in the Martian atmosphere, *Appl. Opt.*, **36**, 2229–2237, 1997.
- Makoto Taguchi, Hiroshi Fukunishi, Shigeto Watanabe, Shoichi Okano, Yukihiro Takahashi, and Takuya D. Kawahara, Ultraviolet imaging spectrometer (UVS) experiment on board the NOZOMI spacecraft: Instrumentation and initial results, *Earth Planets Space*, **52**, 49–60, 2000.

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 1 件 )

Masaki Kuwabara, Makoto Taguchi, Kazuo Yoshioka, Tokio Ishida, Nelson de Oliveira, Kenji Ito, Shingo Kameda, Fumiharu Suzuki, and Ichiro Yoshikawa, Evaluation of hydrogen absorption cells for observations of the planetary coronas, *Rev. Sci. Instr.*, **89**, 023111-1–10, 2018. ( 査読有 )

### [ 学会発表 ] ( 計 5 件 )

Masaki Kuwabara, Makoto Taguchi, Kazuo Yoshioka, Shingo Kameda, and Ichiro Yoshikawa, Optimization of the hydrogen absorption cell dedicated to small satellite missions, 2018 AGU Fall Meeting, Washington, D. C., U.S.A., Dec. 10-14, 2018.

Masaki Kuwabara, Makoto Taguchi, Kazuo Yoshioka, Shingo Kameda, Fumiharu Suzuki, and Ichiro Yoshikawa, Optimization of the hydrogen absorption cell dedicated

for ultra-small missions, JpGU-AGU Joint Meeting 2018, Makuhari Messe, Chiba, 2018年5月.

吉岡和夫、桑原正輝、田口 真、川原琢也、亀田真吾、吉川一朗、D/H吸収セルの開発と惑星科学への貢献、第19回惑星圏研究会、東北大学、仙台、2018年2月.

田口 真、水素吸収セル法による惑星コロナ観測、「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」・「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会、核融合科学研究所、土岐、2016年12月20日~22日.

Masaki Kuwabara, Makoto Taguchi, Kazuo Yoshioka, Tokio Ishida, Shingo Kameda, and Ichiro Yoshikawa, Evaluation of hydrogen absorption cells for observation of the planetary coronas, 地球電磁気・地球惑星圏学会、第140回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、九州大学、福岡、2016年11月.

〔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〕

無し。

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

無し。

(2)研究協力者

無し。

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。