

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20936

研究課題名(和文)原子吸光原理を応用した高分解能光学フィルタの超小型探査機搭載実現に向けた研究

研究課題名(英文) Study for ultra-high resolution filter with resonance scattering suitable for the nano-spacecraft

研究代表者

吉岡 和夫 (Yoshioka, Kazuo)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：70637131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水素原子の共鳴吸収を利用したガスフィルタの原理実証と校正手法の確立に取り組み、以下の成果を得た。(1)遠紫外光を透過するMgF<sub>2</sub>を光軸方向に融着した硬質ガラスセルを試作し、衝撃・振動耐性を確認した。(2)光軸方向にKrガスを封入したセルを設置することで、10pm以上の精度で波長を正しく把握する手法を見出し、放射光施設の連続光を用いた吸収効率の評価手法を確立した。同時に、共鳴散乱を直交方向に導入する直交型セルも制作した。(3)タングステンフィラメントの形状を最適化し、長寿命化に求められる条件を把握した。これらの成果は、将来の彗星探査ミッションに搭載される観測装置に応用される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで超小型探査機は地球を周回しつつ地球を観測することが主な役割であり、惑星科学への応用は難しいと思われていた。これは超小型のリソースと科学要求の解離が極めて大きかったためである。本研究の成果は、超小型とトップサイエンスを両立させるものであり、超小型探査機が深宇宙に足を延ばすためのキー技術である。特に、本研究の基礎研究を基に、将来の彗星探査ミッションの搭載機器開発を具体化できたことは、学術的な意味でも、超小型探査技術の拡張という意味でも極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have demonstrated the principle and established the calibration method of gas-filter using resonant absorption of hydrogen atoms, and obtained the following results. (1) A glass cell with MgF<sub>2</sub> fused in the optical axis direction that transmits FUV was fabricated, and its resistance to shock and vibration was confirmed. (2) By setting up a cell filled with Kr gas in the optical axis direction, we found a method to correctly determine the wavelength with an accuracy of 10 pm, and established a method for evaluating absorption efficiency using continuous light from synchrotron radiation facilities. At the same time, we also produced an orthogonal cell that introduces resonant scattering in the orthogonal direction. (3) The shape and length of the tungsten filament was optimized, and the conditions required for a lifetime were determined. These results will be applied to the observation equipment to be installed in future comet exploration missions.

研究分野：惑星科学

キーワード：超小型探査機 共鳴吸収 ライマンアルファ 水素原子 彗星

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

太陽系の形成初期には、火星や金星など地球以外の天体にも生命誕生に必須な水が豊富に存在したが、それらの多くは進化の過程で宇宙空間へ散逸してしまったと考えられている。水の光解離で生成される水素の同位体比 (D/H) は、水の供給源と散逸過程を議論する上で重要な指標である。これまでの天体 D/H に関する研究は、大型望遠鏡による赤外分光や大型探査計画による観測が数例あるのみだが、誤差が大きい上に時空間的に平均化された値に限られている。大気進化の系統的理解には直接観測データの蓄積が不可欠だが、そのような探査は容易ではない。そこで本研究では、太陽光の共鳴散乱で光るライマンアルファ (Ly- $\alpha$ ) を用いた遠隔観測に着目した。H、D の Ly- $\alpha$  は、それぞれ波長 121.567, 121.534nm の真空紫外領域にある。これらを分離測定すれば遠隔的に D/H の時空間変動を把握でき、大気進化の理解が飛躍的に進む。しかし、波長差わずか 33pm の輝線分離には大型装置が必要であり、搭載機会は限られる。そこで本研究では、既存の技術とは根本的に異なる原子吸光分光を用いて H、D の Ly- $\alpha$  を分離測定する技術を確認し、超小型探査機に搭載可能なほど小型軽量な高分解能フィルタの実現を目指した。

## 2. 研究の目的

太陽系天体の水素同位体比を小型飛翔体から遠隔観測し、地球の水(H<sub>2</sub>O)の起源と進化に迫る観測的証拠を得る。そのための新しい原理の光学フィルタの開発が本研究の目的である。本研究で扱う原子吸光技術は、セルに封入された H、D による Ly- $\alpha$  の共鳴吸収を利用する光学フィルタである。封入するガス種次第で H、D それぞれの Ly- $\alpha$  を選択的に吸収し、既存の分光器と比べて桁違いに小型軽量の装置で輝線分離できる。なお、内部の清浄度を維持するためにセル本体はガラス製とし、入射部には遠紫外光を通す窓材(フッ化マグネシウム)を用いる。セル内部に設置されたタングステン製フィラメントを加熱すると、セル内部の水素分子が原子に解離され Ly- $\alpha$  を共鳴吸収する。従ってフィラメントの on/off 時の透過光量の差で対象天体の H、D の Ly- $\alpha$  光量を測定できる。しかし吸収セルの飛翔体搭載には温度や振動衝撃への脆弱性と、性能評価(校正)の難さという障壁がある。本研究では以下に示す手法でそれぞれの課題を克服し、地球の水の起源および大気進化の解明に繋げる。

## 3. 研究の方法

[1. ガラス製セルの製造手法の確立] 本体を構成する硬質ガラスにコバルトを混ぜて段階的に熱膨張率を変化させ、MgF<sub>2</sub> と溶着したセルを形成する(既に数種類の候補材質を選定済み)。さらに、コバルト線をフィラメント導入端子として封着する。十分にベーキングした後に、管を通してセル内に水素ガスを導入し、ガラスを溶かして封じ切る。同様の方法で透過タイプと散乱タイプ(後述の校正用)のセルをそれぞれ制作する。

[2. 校正方法の確立および散乱タイプ(校正用)セルの制作] 入射光のうち Ly- $\alpha$  のみが共鳴散乱されるような MgF<sub>2</sub> 窓を直角に配置したセルを制作し、予め放射光施設で校正した通常のセルフィルタと組み合わせて用いることで、新たな校正光源として用いる。

[3. セルの耐環境試験] 複数の材質を組み合わせたセルを試作し、熱真空環境および振動・衝撃環境試験を実施することで、組み合わせと保持機構を最適化する。なお超小型探査機搭載を意識し、衝撃吸収材を用いた軽量の保持構造を確認する。試験の評価基準は破損の有無だけでなく、環境試験前後の吸収特性の変化、及び光軸ずれの有無も対象とする。

## 4. 研究成果

本研究を通して、水素原子の共鳴吸収を利用したガスフィルタの原理実証と校正手法の確認に取り組み、以下の成果を得た。(1)遠紫外光を透過する MgF<sub>2</sub> を光軸方向に融着した硬質ガラスセルを試作し、衝撃・振動耐性を確認した。(2)光軸方向に Kr ガスを封入したセルを設置することで、10pm 以上の精度で波長を正しく把握する手法を見出し、放射光施設の連続光を用いた吸収効率の評価手法を確認した。同時に、共鳴散乱を直交方向に導入する直交型セルも制作した。(3)タングステンフィラメントの形状および運用方法を最適化し、長寿命化に求められる条件を把握した。これらの成果は、将来の彗星探査ミッションに搭載される観測装置に応用される。以下にそれぞれの詳細を示す。

### (1) フィルタ制作および環境耐性

図 1 に示すように直径 35mm、長さ 40mm のガラスセルを試作した。光軸方向には厚さ 1mm の MgF<sub>2</sub> を融着しており、さらにタングステン製フィラメントを 13 本取り付けてある。また、また、直径 50mm、長さ 100mm のセルも試作し、こちらは振動・衝撃試験に供した(図 2)。イプシロンロケットの打ち上げ時の環境条件と同じレベルの試験を行い、真空気密性破壊やフィラメント断線が生じていないことを確認できた。これにより、将来の探査機搭載への実現性が飛躍的に向上した。

### (2) 校正手法の確認

放射光施設の連続光を用いた吸収特性の評価手法を確認した。研究開始当初はフランスにある世界最高クラスの波長分解能を持つ放射光施設を利用する予定であったが、COVID-19 の影響により海外出張ができなくなり、国内の放射光施設を用いた実

験に切り替えた．100 倍ほど波長分解能が低い装置を用いたため，波長校正を正確に行い，統計的な解析をするために多くのデータを取得した．ここでは，既知の吸収線（124.5nm）をもつ Kr ガス（フィラメントによる解離作業が不要）を封入したセルを光軸上に置くことで，波長校正を極めて高精度で行い（ $\sim 10\text{pm}$ ），ライマンアルファの吸収特性評価の S/N を向上させ，約 5% の吸収を確認することができた（図 3）．また，直交型吸収セルも制作し，校正用光源として用いる準備を完了させた．

### （ 3 ） フィラメントの最適化

放射光施設で吸収特性を確認した後に，フィラメントの長時間運用を行った．これまではセル内の残存ガス（特に酸素）との反応で，タングステンを損耗してしまうことが問題であった．本研究では，120 ，48 時間のベーキングを施すことと，ゴールドカソードゲージによる酸素生成効果に注意することで，1800 ，30 時間以上のフィラメント寿命を達成することができた．この成果は，実際の探査機搭載を考慮する上で極めて重要である．



図 1. 直径 35mm，長さ 40mm の吸収セル試作品  
それぞれのセルに 13 本のタングステンフィラメントが設置されている．

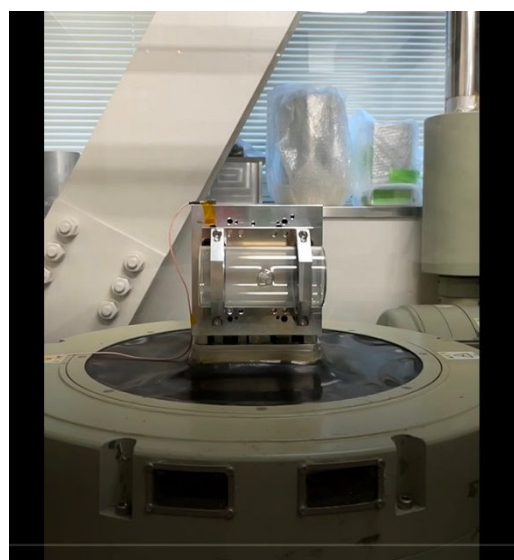


図 2. 試作セルの振動試験  
直径 50mm，長さ 100mm の試作セルに対して振動試験を行った．

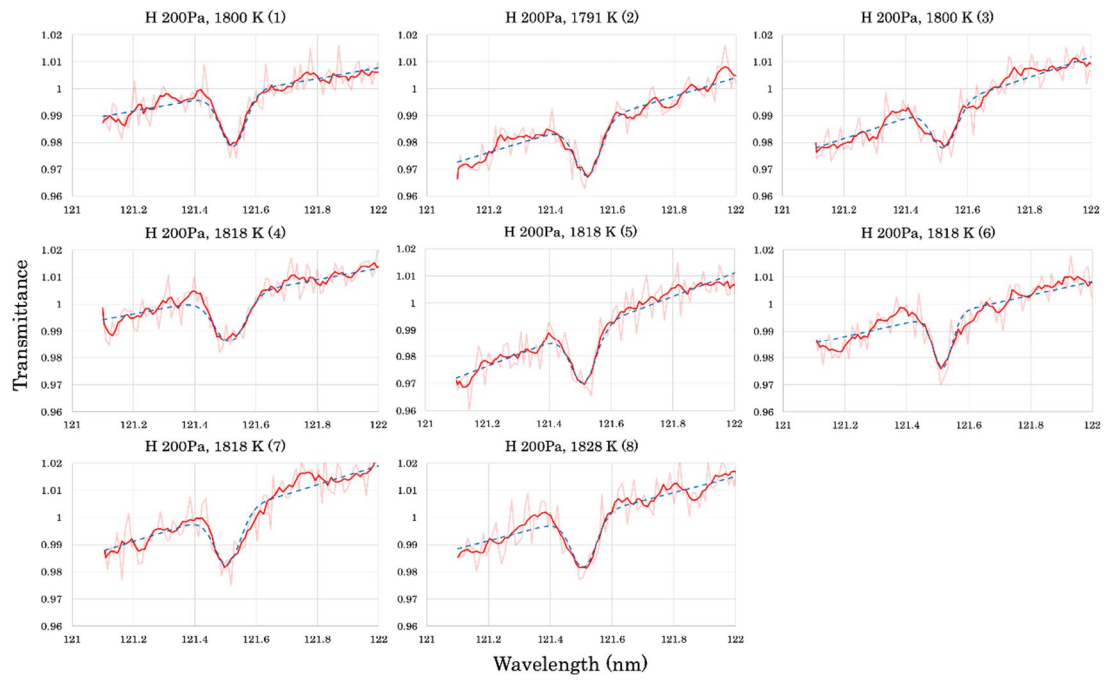


図3. 放射光施設におけるライマンアルファ吸収特性（測定結果）  
 フィラメントの温度を変化させながら吸収特性の有無および増減を確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miura Yayoi N., Okuno Mamoru, Cho Yuichiro, Yoshioka Kazuo, Sugita Seiji	4. 巻 193
2. 論文標題 Ne-Ar separation using a permeable membrane to measure Ne isotopes for future planetary explorations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 105046 ~ 105046
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pss.2020.105046	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 -
1. 著者名 Sasaki, Y., Suzuki, Y., Yoshioka, K., Taguchi, M., Kuwabara, M., Akadama, H., Kosugi, T., Lin, H., and Yang, J.	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance evaluation of an optical filter aiming for observation of atmosphere of comets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 UVSOR activity report 2021	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） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Suzuki, Y., Kuwabara, M., Taguchi, M., Yoshioka, K., Katsumata, T., Tateyama, M. Goda, K., Yamazaki, A., Inoue, K., and Tomioka, A.	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance evaluation of UV absorption filter onboard spacecraft	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 UVSOR activity report 2021	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） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Taguchi, M., Kuwabara, M., Katsumata, T., Tateyama, M., Yoshioka, K., Suzuki, Y., Goda, K., Inoue, K., Tomioka, A., and Yamazaki, A.	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of absorption stability of a hydrogen absorption cell	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 UVSOR activity report 2021	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） なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉岡和夫
2. 発表標題 惑星大気・プラズマの光学観測
3. 学会等名 日本表面真空学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡和夫、桑原正輝、村上豪、亀田真吾、鈴木雄大、田口真、川原琢也、吉川一朗
2. 発表標題 The water production rate and D/H ratio around comet measured by the Comet Interceptor mission
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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		
フランス	Synchrotron SOLEIL		