

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14550

研究課題名(和文) 金属拡散接合による新型吸収セルの開発

研究課題名(英文) Development of an absorption cell by atomic diffusion bonding

研究代表者

桑原 正輝 (Kuwabara, Masaki)

立教大学・理学部・特任准教授

研究者番号：60827575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：惑星大気の水素・重水素の密度・温度分布の時空間変動およびD/H比の遠隔観測を実現するために、原子拡散接合法による新型吸収セルの開発を進めた。MgF₂窓とAl合金を原子拡散接合しビューポートを試作した。リークテストの結果、接合面にリークが生じてしまっていることがわかった。ビューポートの試作と並行して、吸収セルの密封機構の製作を進めた。製作した機構により吸収セルを高温でベーキング処理した後、水素雰囲気中で密封することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

惑星の下層大気中にあるH₂OやHDOは太陽光によって光解離し、水素原子(H)や重水素原子(D)が生成される。惑星形成時と現在の惑星大気中の水素・重水素比(D/H比)を比較することで、過去に惑星から散逸した水の量を推定できる。また、惑星大気中の温度分布から、現在の熱的散逸の状況を知ることができる。これらは惑星の変遷、つまり生命体の有無や存在の条件を知る手掛かりとなる。これらの情報を遠隔で得るためには高波長分解能の分光器が必要となる。本研究で開発を目指す吸収セル法は小型かつ軽量で高波長分解能を実現可能なため、惑星を対象とする探査ミッションに必要な不可欠な観測技術になるだろう。

研究成果の概要(英文)：A new type of absorption cell using atomic diffusion bonding method has been proceeded in development for remote sensing of spatial and temporal variations in the density and temperature distribution of hydrogen and deuterium and D/H ratio in planetary atmospheres. The prototype viewports have been fabricated by atomic diffusion bonding of MgF₂ window and Al alloy. The results of the leak tests show that leaks had occurred on the bonded surfaces. In parallel with the fabricating of the viewports, a sealing mechanism of the absorption cell has been fabricated. It enables the absorption cell to be sealed in a hydrogen atmosphere after baking at high temperature.

研究分野：惑星大気物理学

キーワード：惑星コロナ 大気散逸 紫外線 水素ライマンアルファ 原子拡散接合

1. 研究開始当初の背景

惑星の下層大気中にある H_2O や HDO は太陽光によって光解離し、水素原子 (H) や重水素原子 (D) が生成される。これらの原子は超高層大気まで運ばれ、脱出速度よりも大きい速度を持つものは惑星の重力圏を脱して宇宙空間へ散逸する (熱的散逸)。重水素は水素の約 2 倍の質量を持つため散逸しにくく、大気の進化過程において水素・重水素比 (D/H 比) は増加する。そのため、惑星形成時と現在の惑星大気中の D/H 比を比較することで、過去に惑星から散逸した水の量を推定できる。また、惑星大気の温度分布から、現在の熱的散逸の状況を知ることができる。これらは惑星の変遷、つまり生命体の有無や存在の条件を知る手掛かりとなる。

惑星の高層大気に広がる水素原子や重水素原子は太陽のライマンアルファ線を共鳴散乱する。この散乱光の強度は、光学的に薄い領域では原子の柱密度に比例する。そのため、ライマンアルファ線の発光強度を測定することにより原子の密度分布を推定することができる。加えて、ライマンアルファ線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。

研究代表者はこれまで水素・重水素が放つライマンアルファ線を選択的に吸収可能なフィルタ (吸収セル) の開発を行ってきた。これまで我々が開発してきた水素吸収セルは、円筒状のガラスセルの両端に紫外線を透過する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、内部に水素分子ガスが封入されている。セル内部のフィラメントに通電すると、水素分子は原子に熱解離する。 MgF_2 から入射した水素ライマンアルファ線 (波長 121.567 nm) は、フィラメント非通電時にはセル内を透過するが、通電時には解離生成した水素原子が共鳴散乱するため透過しない。非通電時と通電時の透過光量の差から水素ライマンアルファ線の発光強度を推定できる。さらに、フィラメントに与える電力を変化させ、透過率の異なるデータを複数取得することで、セルに入射する水素ライマンアルファ線のドップラー温度を推定できる。重水素セルも同様の原理で重水素ライマンアルファ線 (波長 121.534 nm) の測定から発光強度、密度を推定できる。研究代表者はこれまで吸収セルの試作品の性能評価を実施し、従来の吸収セルに比べ 4 倍以上の吸収性能を有し、100 K 以上の精度で惑星の水素大気温度を推定可能なことを明らかにした。しかし、重要な開発課題は依然残されている。タングステンフィラメントの寿命が短く、宇宙機に搭載可能なレベルに達したとは言い難い。 H_2O がセル内に残留していると、タングステンと反応しウォーターサイクルと呼ばれる現象を引き起こす。これによりタングステンフィラメントは著しく消耗する。この点を改善できなければ、惑星探査に必要なとされる長寿命で安定な観測器は製作不可能である。従来の製造工程では、 MgF_2 とガラスセルを熱膨張係数の違うガラス材を用いて段シールで融着しているが、融着部に使用する粉末ガラスが熱に弱いため高温でベーキングできない。また、ガラスセル内の排気およびガス導入に用いる管が細いため、セル内を清浄にできず封入する水素ガスの純度を高くできない。これらの理由からウォーターサイクルによるフィラメントの劣化を抑えることができなかった。この問題を解決するためには吸収セルの製造工程を一新する必要があった。

2. 研究の目的

惑星大気の水素・重水素の密度・温度分布の時空間変動および D/H 比の遠隔観測 (リモートセンシング) を実現するために、新たな吸収セルを開発することが本研究の目的である。従来の製造工程を一新し、原子拡散接合法による新型吸収セルの実現可能性を評価する。

3. 研究の方法

従来の吸収セルは円筒状のガラスセルの両端に MgF_2 窓を融着し製造していた。融着部には粉末ガラスを用いて段シールで MgF_2 窓とセルの熱膨張率の差を補償していた。しかし、この融着部が熱に弱く、製造した吸収セルを高温でベーキング処理することができなかった。この点を改善するために、融着ではなく原子拡散接合法で MgF_2 窓を接合する。吸収セルには 100 Pa 程度の水素ガスを封入するため、高い密封度が必要になる。そのため、 MgF_2 窓と Al 合金を原子拡散接合し接合面の密封度を評価する必要がある。まず、 MgF_2 ビューポートを製作しリークテストを行い密封度を評価する。

ガラスセルのもう一つの問題点として、排気およびガス導入に用いる管が細くコンダクタンスが悪いため、効率よく排気ができず封入する水素ガスの純度を高くできないという点が挙げられる。この点を改善するため、ビューポートの製作と並行して、吸収セルを真空排気後に密封可能な機構を新たに製作する。この機構により、吸収セルを高温でベーキング処理し清浄にした後に水素雰囲気中で密封することが可能となる。

原子拡散による MgF_2 窓の接合と水素ガスの密封機構を確立することができれば、ウォーターサイクルによるタングステンフィラメントの劣化を防ぐことが可能となる。

4. 研究成果

研磨 洗浄したMgF₂とAl合金を原子拡散接合し、MgF₂ビューポートを計3組(サンプル1,2,3)製作し、密封度を評価した。

まず、サンプル1を製作した。図1に製作したサンプル1の写真を示す。目視では接合面に異物等は観察されず、接合面全面が接合されていた。その後、フード法によりヘリウムリーク量を測定した。その結果、接合面に10⁻⁸ Pa・m³/s程度のリークが検出された。SAT像を観察したところ、一部に非接合領域が点状に存在することが判明した。非接合領域が形成された原因として、接合時の加圧力が不足していた可能性があったため、SAT像観察後に加圧力を高め接合部を再加圧した。再びヘリウムリークテストを実施したところ、リーク量に改善は見られず10⁻⁷ Pa・m³/s程度まで増加してしまった。

サンプル1にリークが生じてしまったため、加圧力をサンプル1製作時よりも高めに設定しサンプル2の接合を実施した。サンプル2においても目視では接合面に異物等は観察されず接合面全体が接合されていた。しかし、サンプル1と同様にヘリウムリークが検出された。加圧力を高めたことによりリーク量はサンプル1よりも抑えることができ10⁻⁹ Pa・m³/s程度であったが、根本的な解決には至らなかった。次に、接合界面の原子再配列現象を促進させるため、加圧力をさらに高めながら100℃まで昇温した。しかし、降温後のサンプルを確認したところMgF₂窓が割れてしまっていた。この原因は熱膨張差によるものと推定される。

サンプル1,2ともに接合に失敗した原因を探るため、Al合金の表面観察を行った。実態顕微鏡で観察した結果、長い研磨傷が多く残存しており、接合面を完全に横切る傷も見られた。白色干渉顕微鏡を用いた表面観察の結果、表面の窪み内部に高さ100nmに達する突起状異物が形成されていることが明らかになった。Al合金研磨面の窪みはAlに添加されている異種金属と研磨剤の化学反応により引き起こされることが知られており、今回はCu組成に富む結晶粒に対応していると考えられる。窪みに突起状異物が形成される現象は、一部材料の研磨面において、研磨後数日から数週間で生じることが知られている。今回の研磨面においてもこのような経時変化が表面状態をさらに悪化させていると判断した。

研磨の初期段階で生じる研磨傷を最終工程で出来るだけ減少させるための条件出しを行い、Al合金の再研磨を実施した。その結果、表面のうねり(長周期の表面粗さ)は増加したが、研磨傷は減少させることができた。その状態でサンプル3の接合を実施した。これまでの2サンプルとは異なり、表面状態は改善され仮加圧だけでも部分的に接合できた。その後サンプル2と同様の加圧力で接合した。サンプル3にも他サンプルと同様にヘリウムリークテストを実施した。図2に全サンプルのヘリウムリークテストの結果をまとめたものを示す。サンプル3においてリーク量は2.2×10⁻⁹ Pa・m³/sまで低下したが、本質的な解決には至らなかった。

本研究で3回の接合を実施したが、いずれも接合面にヘリウムリークが生じてしまい、吸収セルに必要な密封度を有するビューポートの形成には至らなかった。原因はAlフランジの材質に用いたA2219にあると考えられる。A2219は硬度があるため、真空フランジに広く用いられるAl合金の一種である。本研究では、汎用性と製作実績からA2219をフランジ材として選定した。しかし、研磨剤は年々進化しており、最新の研磨剤を用いた鏡面研磨プロセスでは、研磨の初期段階(粗研磨)で生じる研磨傷を最終工程で消失させようとする、数十μm~数百μmのうねりが表面に生じてしまい、表面粗さを十分に低減できないことが判明した。また、経時変化でも表面粗さが増加することも判明した。A2219はCu組成に富む結晶粒が析出したような構造を有しており、これが上記の原因と考えられる。今後は、本研究の結果を踏まえ、研磨剤との親和性が良い別のAl合金を用いてMgF₂ビューポートの製作を進める予定であり、原子拡散接合法による新型吸収セルの実現を目指す。

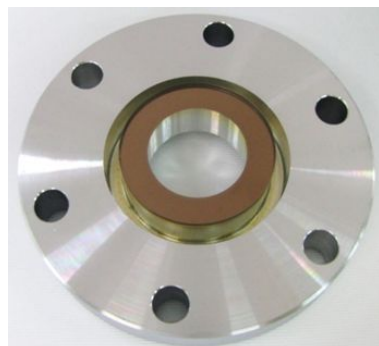


図1. MgF₂ビューポートの写真(サンプル1)

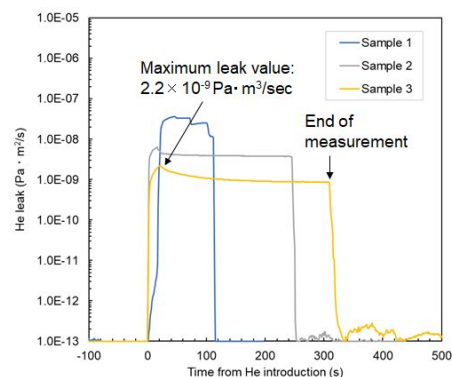


図2. ヘリウムリークテストの結果

MgF₂ ビューポートの製作と並行して、吸収セルの密封機構を製作した。製作した密封機構の写真を図 3 に示す。密封工程の概要は以下である。

- (1) 吸収セルを密封機構に取り付ける。
- (2) 密封機構をステンレス管に接続する。
- (3) ステンレス管を真空排気する。
- (4) 吸収セルを高温でベーキングする。
- (5) ベーキング後にステンレス管を 100 Pa 程度の水素ガスで満たす。
- (6) 密封機構の押しボルトを回し、水素雰囲気下で吸収セルを封じる。

この密封機構により、吸収セルを高温でベーキング処理し清浄にした後に水素雰囲気中で密封することが可能となった。



図 3. 密封機構の写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 桑原正輝, 吉岡和夫, 田口真, 川原琢也, 亀田真吾
2. 発表標題 Development of the absorption cell filters for remote D/H observation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuo Yoshioka, Masaki Kuwabara, Go Murakami, Shingo Kameda, Yudai Suzuki, Makoto Taguchi, Takuya Kawahara, and Ichiro Yoshikawa
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎朝, 合田和司, 鈴木雄大, 田口真, 桑原正輝, 吉岡和夫
2. 発表標題 Specifications and development of Hydrogen Imager for Comet Interceptor mission
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉岡和夫, 村上豪, 桑原正輝, 鈴木雄大, 亀田真吾, 田口真, 川原琢也, 吉川一朗, 新中善晴, 河北秀世
2. 発表標題 The Hydrogen Lyman-alpha imager for Comet Interceptor mission
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2022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
---------	---------