

令和元年6月23日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13875

研究課題名(和文) 月面における水のその場分析に向けた、宇宙機搭載用分光同位体分析装置の開発

研究課題名(英文) Development of an on-board optical isotope analyzer, toward in-situ analyses of water on the lunar surface.

研究代表者

橋爪 光 (Hashizume, Ko)

茨城大学・理工学研究科(理学野)・教授

研究者番号：90252577

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)：本研究にて開発を進めた水分子同位体分光分析装置は従来より格段に小型化された装置である。酸素・水素同位体分析に向けて、キャビティ・リングダウン・スペクトル(CRDS)分析の手法確立を進めた。赤外光源・ミラー及び光検出器という少数の軽量部品を核としたコンパクトな装置でありながら、高感度・高精度同位体分析が実現するのが特長である。CRDS分析装置は、装置の温度変動に敏感に反応し同位体分析値が変動する弱点があるが、これを克服するための方策を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された宇宙機搭載用の水分子同位体分析装置は、今後の宇宙生命探査における基盤技術となる。水は、惑星が生命を育むために最も重要な物質と考えられている。天体における水の供給、保持、散逸過程を解明するためには、微量な水が脆弱な状態で天体表面に束縛されたその現場を正確に理解する必要がある。これには、地球帰還試料・隕石分析や、天体上空からのリモートセンシングに加えて、天体表面におけるその場分析が必要である。月面は、惑星・水探査技術の確立に向けた格好の場である。月面着陸機搭載のその場分析装置により、固有の大気・海洋を持たない月面における、微量な水の実像とその挙動を解明することを目指す。

研究成果の概要(英文)：We developed a compact optical instrument aimed at in-situ analyses of isotope composition of water molecules. The instrument type is a cavity-ringdown spectrometer (CRDS), capable of high-precision hydrogen and oxygen three-isotope analyses. The core part of the instrument involves only a small number of optical parts, infra-red light source, a pair of mirror and a optical detector, which contributes in downsizing the volume and weight of the instrument. In this research, we worked at achieving the best analyses performance with the most simple hardware set-ups. We also prepared a software scheme to overcome the change of the isotope ratios in response to the temperature fluctuation, which is generally regarded as one of the weakness of the CRDS analyzer.

研究分野：惑星科学

キーワード：水分子 同位体組成 光学分析

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

1. 研究開始当初の背景

水、それは地球表層を特徴付ける最も重要な物質である。水は、海洋や大気の発生と挙動を直接的に支配するだけでなく、火成活動に強い影響を与えることにより天体表層の形状や様相を決める。そして、水は、生命の発現・進化にも深く関わる。天体における水の存在と重要性をより一般化し理解するために、天体表面における水の供給、保持、散逸過程の解明は不可欠である。

地球に最も近い天体である月は、上述の過程を理解する格好の対象である。月は固有の大気・海洋を持たないが、近年の研究によると、月面は決して水と無縁ではない。月表土試料分析からは、月面には水・有機物などの高揮発性物質を豊富に含む惑星物質が月面に降着し、その成分が月表土試料に保持されていることがわかってきた。近赤外リモートセンシングからは、月面における水酸基の存在が示唆されている。この水酸基の一部は太陽風プロトンが月岩石に照射されたことにより岩石表面で生成されたのではないかと提唱されている。また、月極域においては、相当量の水が表土中に捕獲されていることが示唆されている。これら各研究成果は、月面における水の動的な振る舞いの様々な断片を表しているらしい。本研究では、これらの断片を繋ぎ合わせ、月面の水の起源・生成過程、あるいは、月面における水捕獲の正確な現場など、月面の水循環を理解するための鍵を提供する。

2. 研究の目的

本研究では、同位体組成に注目し、月面上の水の起源と挙動を理解する。月面において、太陽風、惑星間塵、彗星、あるいは、月岩石中の酸素など、大きく異なる水素・酸素同位体組成を持つ様々な材料から水が生成しうる。同位体組成を調べることにより、月面における水生成プロセスが理解できる。例えば、太陽風が月岩石に照射され水が作られたなら、太陽組成の水素と月組成の酸素と一緒に観測されるはずである。惑星間塵起源の水なら、水素も酸素も惑星組成のものが期待される。また、同位体組成から月面上での水の移動や反応の様子もわかる。例えば、水が複数の起源によるものの混合で構成される場合、分子中の水素・酸素の同位体組み合わせ分布を解析することにより、水が月面において解離・結合を繰り返したか否かなどの情報を引き出せる。

本研究において、ペイロードの制限が厳しい月・惑星探査計画で搭載可能な小型の装置開発を進める。着陸機搭載用の水同位体計測器を念頭に置き、その中核を担う光分析装置を試作し、異なる同位体で構成される水分子スペクトルを分離・観測し、それぞれを定量出来ることを確認するまでを行う。

3. 研究の方法

本研究では、宇宙機搭載用の cavity enhanced absorption 型軽元素同位体分光装置を開発する。分子を構成する同位体によって、吸収波長がわずかに異なることを利用し、同位体組成を分析する手法である。質量分析計が必要なく、赤外光源・ミラー及び光検出器という少数の軽量部品を核としたコンパクトな装置であるため、軽量化が可能であり、宇宙機搭載に適している。この種の分析計は狭い波長域だけで性能を発揮するため、分析対象の分子種は限定され、質量分析計のような万能性はない。しかしながら、特定の対象分子に対しては、非常に高い検出感度と同位体選別性・定量性を持ち、惑星科学的な新しい知見を期待できる。

本研究では、媒質を封じ込めた一対の高反射率ミラー間で赤外光を多数回往復させるキャビティリングダウン吸収分光 (CRDS) 法を採用する。この手法では、空隙の両端に高反射率ミラーを配置した光トラップにより、最大 10km に及ぶ実質光路長を実現し、高感度分析を可能にしている。同じ光路長 (感度) でもサイズは Herriot Type Cell の場合より格段に小さく、軽量である。この手法は、反射の度に、高反射ミラーを一定率わずかに透過した光を計測し、その減衰を見ることにより封じ込められた媒質の数密度を推定する。この方式は、光の減衰係数だけを元に密度決定を行うので、初期入射光の強度が分析の度に変動しても正しく媒質数密度が求まる、等の堅牢性を持つ。本研究では、ピエゾ素子を用いミラー間距離を自動調整する仕組みを導入する、あるいは、キャビティ内の分子数密度を最大化するためにキャビティの形状を工夫する等、分析の都度分析条件を細かく調節できない宇宙機上の無人操作に向け、コンパクト化を推し進めた上で、更に堅牢性・性能を高めるための最適化を進める。

4. 研究成果

(1) キャビティリングダウン吸収分光 (CRDS) 装置を構築した。本研究において、2.0 ミクロン帯における水の吸収線を読み取るための試験装置を組み立てた。図 1 にその構成図を示す。試験ガスを封入するキャビティとその両端に配置されて高反射率ミラー、その前段に配置された赤外レーザーと高速光遮断スイッチ (AOM)、ならびに、検出器 (PD) とその信号を処理するオシロスコープから構成される。ミラー間の距離をピエゾ素子により動かし、その距離が波長の半

整数倍になった時にキャビティ内に赤外レーザー光が蓄積し、その後、AOM で入射光を遮断し、減衰スペクトルを検出器で読み取る、連続波 CRDS 装置を構築した。減衰スペクトルから減衰係数（減衰時定数の逆数）を算出する。キャビティ内を真空にした時の減衰係数に比べ、キャビティ内の水分子密度に比例した量だけ減衰係数が大きくなり、その差を読み取ることで、キャビティ内の水分子密度を定量するのが、本装置の原理である。図 2 では、その実機像を示す。キャビティ本体を温度制御する必要があり、その部分は保温材に覆われている。

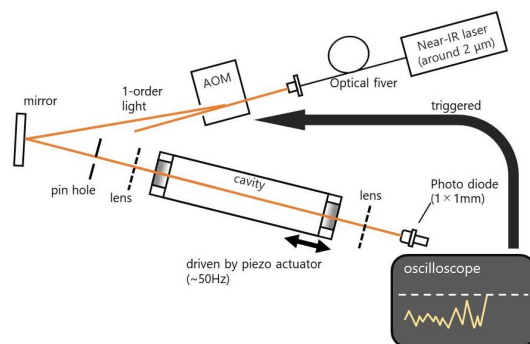


図 1. 本研究で構築した CRDS 装置構成図

(2) 構築した CRDS 装置を用い、水同位体組成読み取り原理実証を進めた。赤外線レーザー装置の発振部分の温度を制御することにより、レーザー光の波長を変化させることが可能である (Tunable Laser)。図 3 に本装置により読み取った水分子吸収線スペクトルの一例を示す。本研究において、光学部品の精査などのハード面、ならびに、減衰係数データ解析などのソフト面諸技術の改善を図り、同位体組成測定精度が向上した。同位体組成が既知の同位体標準水を用い、HDO/HHO 実測値を HITRAN 吸収線データベースから導かれる理論値と比較したところ、20 パーミルの精度で一致することが確認された。また、一定条件での同一水分子吸収線の定量を繰り返したところ、その変動率が標準偏差 8×10^{-5} (0.08 パーミル)の繰り返し再現性を示すことが確認され、十分な精度での同位体比測定が原理的に可能であることがわかった。

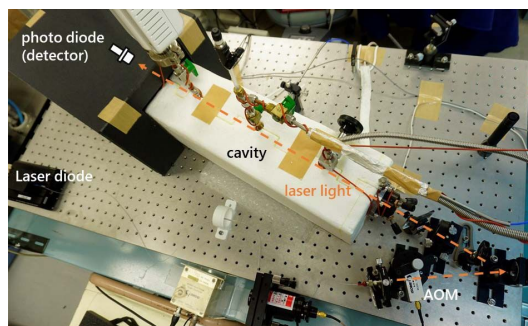


図 2. 本研究で構築した CRDS 装置実機像

(3) 宇宙機搭載に向けた問題点の洗い出しを進め、以下のような点が、本研究で進めた実験と考察により明らかになった。

水分子のメモリー効果。CRDS 装置に限定された問題ではないが、水分子が分析管内壁や鏡を始めとした内部部品に吸着され、試料ガスを入れ替えても、前に測定した試料ガスがキャビティ内に残留する、メモリー効果と呼ばれる問題が実験的に確認された。現状の測定温度・分析装置構成において、メモリー効果を解消するためには、7 サイクル以上、試料ガスの導入・排気手順を繰り返す必要があることが判明した。

本研究において、その対策が詳細に議論された。水分子の吸着度合を低減させるための、以下の取り組みについて、長所・短所を含め逐次詳細検討した。(a) 測定温度を上げ管壁の吸着効率を下げる。(b) キャビティ内にコーティングを施す。(c) キャビティ内容積を小さくすることにより水蒸気分圧を上げる。(d) キャリアガスとして He などのガスを活用する。

同位体比計測値の温度依存性。水分子による赤外線吸収強度は、一般に温度に依存して変化する。その変動の様子を実験的に求めた。その一例を図 4 に示す。吸収線により相当異なるが、典型的に数%/K 程度の温度依存性を示す。月面水の同位体組成から有意義な科学的結論を導くためには、少なくとも、水素同位体比(D/H)組成で数十パーミル、酸素同位体比 ($^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)組成で 1 パーミルより高い精度で同位体比を決めることが必要である。従って、科学

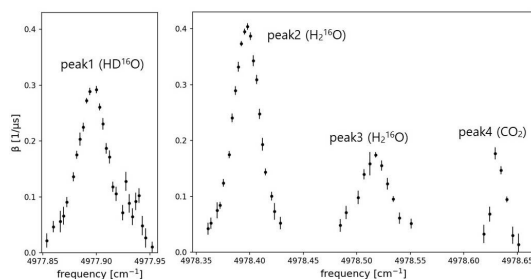


図 3. CRDS 装置により読み取った、異なる吸収波長の HH^{16}O ならびに HD^{16}O と隣接する CO_2 吸収線スペクトル。縦軸は減衰スペクトルから得られた減衰係数である

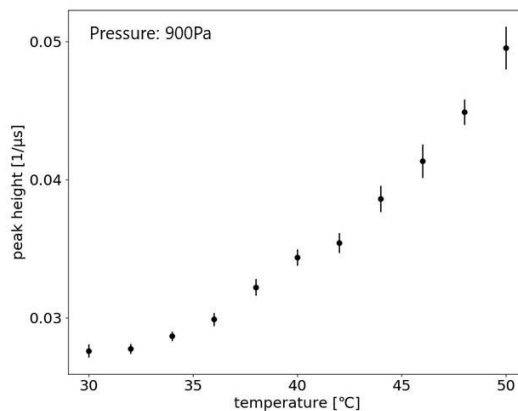


図 4. 同じ HH^{16}O 吸収線の吸収強度を温度を変えて測定した例。この例では、吸収強度が 3%/K の割合で温度と共に上昇した。

目標を達成するためには、キャビティー内の温度を 0.1-1 K の精度で一定に保つ、あるいは、温度変動が同位体比測定に与える影響を正確に補正する仕組みが必要であることがわかった。

キャビティーの温度変動による影響を回避する仕組みとして、以下のような可能性が検討された。(a) 標準ガスを封入したリファレンス・セルと試料ガス・セルを同時測定する。二つのセルの間で温度差が生じない熱設計を講ずることにより、温度変動の影響がキャンセルされる仕組みである。(b) 温度変動を正確に把握する仕組みを構築する。温度プローブによるキャビティ近傍の温度測定は、その測定する温度と、キャビティー内の水蒸気の実効的な温度が一致する保証がないので不十分である。本研究では、同じ同位体組み合わせで構成される水分子について、温度依存性の異なる複数の吸収線を用い、その測定値の比較から水分子の実効温度を算出し、同位体比の温度補正に用いるのが有効であるとの結論を得た。(c) 異なる同位体で構成される水分子吸収線の吸収強度を比較して同位体比を求める際に、その 2 種の吸収線の温度依存性が近接していると、温度による強度変化がキャンセルされ、安定な同位体比が得られる。本研究では、1.39, 1.6, 2.0, 2.7 μm の各水分子吸収波長帯において、HITRAN データベースを用いて水分子吸収線の温度依存性を網羅的に調べた結果、温度依存性が同位体比の分母と分子で温度依存性が類似した、最適な測定対象吸収線候補を絞り込むことが出来た。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

橋爪 光、月面に供給される揮発性元素とその起源、日本惑星科学会誌遊星人、査読有、Vol. 28, No. 1, 6-13, 2019

鹿山雅裕、橋爪 光、月内部に存在する揮発性成分、日本惑星科学会誌遊星人、査読有、Vol. 28, No. 1, 24-33, 2019

〔学会発表〕(計 18 件)

Hashizume, K. Supplies and storage of volatiles on Moon, New Views of the Moon 2, 2018

橋爪 光、月の水、第 19 回惑星圏研究会(招待講演)、2018

橋爪 光、鹿山雅裕、月岩石圏の水-水惑星・地球の出自を求めて、月サンプルリターンワークショップ、2018

橋爪 光、草野広樹、長岡 央、月極域表土中の水の拡散・捕獲機構と、中性子分光法によるその検出、第 62 回宇宙科学技術連合講演会、2018

橋爪 光、月の科学探査意義、第 62 回宇宙科学技術連合講演会、2018

山中千博、橋爪 光、村山純平、新述隆太、キャビティリングダウン分光による水同位体吸収線の温度依存性と探査装置の設計指針、第 62 回宇宙科学技術連合講演会、2018

山中千博、橋爪 光、村山純平、田坂直也、月面微量水の同位体測定へ向けた CRDS(Cavity Ring-down Spectroscopy)測定装置の開発、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018

新述隆太、山中千博、橋爪 光、村山純平、月面水の同位体比測定レーザー分光装置の開発、第 36 回レーザーセンシングシンポジウム、2018

橋爪 光、月の水：理学的立場から見た極域探査・揮発性物質探査、月惑星シンポジウム、2017

山中千博、橋爪 光、田坂直也、新述隆太、レーザー軽元素同位体アナライザーの現状：課題と将来、第 61 回宇宙科学技術連合講演会、2017

田坂直也、山中千博、橋爪 光、新述隆太、月面水の同位体分析に向けた宇宙機搭載用光学分析装置の開発、第 61 回宇宙科学技術連合講演会、2017

橋爪 光、既存データによる成果と課題(濃集機構の観点から)、月極域探査機ワークショップ、2017

山中千博、観測機器提案 微量水分析、月極域探査機ワークショップ、2017

田坂直也、山中千博、橋爪 光、新述隆太、月面水の同位体分析に向けた宇宙機搭載用光学分析装置の開発、日本惑星科学会秋期講演会、2017

橋爪 光、藤谷 渉、春山純一、山中千博、月の水、地球の水、そして、月探査、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016

橋爪 光、山中千博、時田茂樹、田坂直也、宇宙水・揮発性物質探査への取り組み、第 60 回宇宙科学技術連合講演会、2016

山中千博、時田茂樹、橋爪 光、田坂直也、新述隆太、月地下の微量水に対するレーザー同位体分光測定、第 60 回宇宙科学技術連合講演会、2016

山中千博、橋爪 光、田坂直也、時田茂樹、月地下における微量水の同位体計測に向けたオンラインレーザー分光装置の開発計画、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：山中 千博
ローマ字氏名：(YAMANAKA, Chihiro)
所属研究機関名：大阪大学
部局名：大学院理学研究科
職名：准教授
研究者番号(8桁)：10230509

研究分担者氏名：時田 茂樹
ローマ字氏名：(TOKITA, Shigeki)
所属研究機関名：大阪大学
部局名：レーザーエネルギー学研究センター
職名：講師
研究者番号(8桁)：20456825

(2)研究協力者

研究協力者氏名：田坂 直也
ローマ字氏名：(TASAKA, Naoya)
研究協力者氏名：新述 隆太
ローマ字氏名：(NIINOBE, Ryuta)
研究協力者氏名：村山 純平
ローマ字氏名：(MURAYAMA, Junpei)

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。