

中赤外レーザーによる軽元素同位体分析機器開発

山中 千博¹, 時田 茂樹², 橋爪 光³, 村山 純平¹, 足立 裕美子⁴

¹大阪大学大学院 理学研究科, ²大阪大学レーザー科学研究所, ³茨城大学 理学部, ⁴大阪大学 理学部

INTRODUCTION

近年のリモートセンシングにより、月面極域の低温部分には、隕石などによって運ばれた水が固体として存在していると考えられるようになった。以降、惑星科学的な関心だけでなく、この月面水を宇宙開発の資源として利用することを想定した国際的な月面水の探査競争が開始されている。こういった月面水の起源、月面での挙動や存在可能時間などを明らかにするには、水の同位体測定が欠かせない。また月試料を微量地球に持ち帰るミッションでは、同位体分析に至るまでに地球水による「汚染」が無視できなくなるため、月面その場で同位体測定を行うことが望ましい。

我々は、月面上でレーザー同位体分析法により同位体分析を行うことを考えて、小型で高感度な装置開発を行っている。測定においては、惑星科学的に意味ある同位体精度として $\delta D \rightarrow 10\%$ 、 $\delta^{17,18}O \rightarrow 1\%$ 程度を得ることを想定している。ここで δ 値は、対象とする試料水と地球標準水(SMOW)の同位体比のずれを表す数値で、マイナー同位体濃度 m に対するメジャーな同位体濃度 M の比を用いて以下のように表される。

$$\delta m = \left(\frac{\left(\frac{m}{M}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{m}{M}\right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad [\text{‰}]$$

同位体比は、蒸発や化学反応により、変化することが知られており、これを同位体分別と呼ぶ。水素は同位体分別の激しい元素であり、基本的には太陽系内の水を分析するために、「軽い」太陽風の水素と、「重い」太陽系外周水（彗星など）の区別が行えればよい (Fig. 1)。一方で、酸素同位体の場合は、地球を形成したコンドライト隕石のもつ同位体組成範囲

で詳しく分析する意味があるため、より精密な分析精度が必要である。

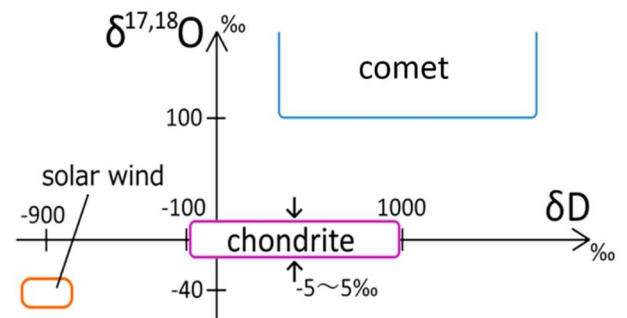


Fig.1 Hydrogen and Oxygen isotopes in the solar system.

測定の際の環境温度は、気体として存在する水蒸気の分圧に影響を与える。月の砂（レゴリス）の想定水分濃度を 0.5 wt% であるとし、測定機器として 0.1 wt% に対応する場合を考える。この場合、質量 1 g の月レゴリスから 50 μ mol の水が抽出され、分析計の総容積を仮に 1000 cc と仮定すると、その水蒸気圧は 100 Pa と計算される。温度基準の飽和蒸気圧では、5°C で、871.8 Pa であるから、サンプル中の水分は基本的に水蒸気として存在する。我々の装置では、100-1000 Pa 程度の圧力を想定するので、1 g 程度のレゴリス回収で、目的量の月面水を回収することが期待でき、室温程度の測定温度で、同位体測定を行うことが可能と判断できる。

水蒸気の振動準位の吸収線は、光学的な下準位から上準位への光吸収であり、場合によってその下準位密度が、環境温度に従った熱分布により変化するため、吸収強度は温度依存性を持つことが知られている。このため、光学的な測定では、測定温度を一定にするか、複数の吸収線を組み合わせるなどして

温度補正を行いつつ、吸収強度を評価することが必要である。月面における測定においては、適切な蒸気圧を維持しつつ、かつ光学セル保温の為に電力を抑えることが必要であり、電子機器の安定性等を考慮すると、測定温度は地球における常温レベルを選択することが適切である。

EXPRIMENTS

本年度我々は、レーザー同位体分析計の宇宙機器としての基本仕様や熱設計などを検討した。また、JAXA、産総研、神栄テクノロジー社などと共に開発した小型 CRDS (Cavity Ringdown spectrometer, 5cm cavity at 1.39 μ m wavelength)、および既存の標準サイズ CRDS (50cm, @2.0 μ m), さらに TDLAS (Tunable diode laser absorption spectrometer, 37.5cm @2.7 μ m) を用いて同位体濃度既知のアクアスタンダード試料の測定安定性などを調べた。

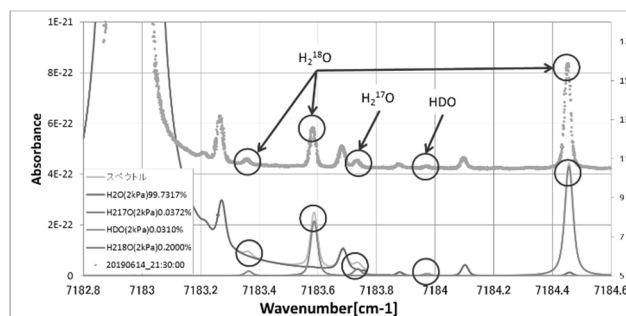


Fig. 2 Water isotope spectra at 1.39 μ m with 5 cm CRDS (courtesy of Shinei-Technology Corp.). An aqua standard with $\delta D_{\text{SMOW}} = -44.4 \pm 0.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = -6.93 \pm 0.08\text{‰}$ was used. Measurement was performed with conditions of 2000 Pa and $28.3 \pm 0.31\text{°C}$. Another intense absorption of HDO is observable outside of this figure at 7179.1 cm^{-1} .

Fig. 2 に小型 CRDS による水試料の測定例を示す。水の同位体計測としては、レーザー波長 1.39-1.4 μ m (倍音領域) および 2.6-2.7 μ m (基本モード領域) の CRDS/TDLAS 法が候補となる。前者は、光通信でよく使用される波長帯で、製作コストが安価である。しかし、5 cm の光セルでは、標準海水程度の

水試料を用いて、 δD 、 $\delta^{17,18}\text{O}$ のスペクトルを得ることはできるが、 δ^{17} を正確に反映させることに難点があり、共振器長はなるべく長くすることが望ましい。一方、後者は、 δD 、 $\delta^{17,18}\text{O}$ について、吸収強度が 1~2 桁強く、最も感度よく測定できる波長域であるが、高反射光学部品等の製作・評価にコストがかかる問題はあ

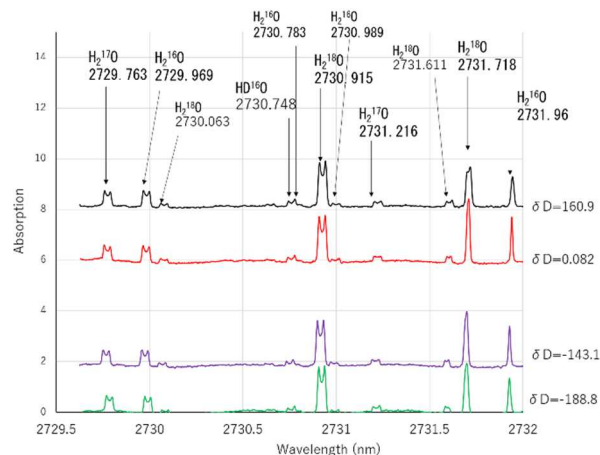


Fig.3 TDLAS spectra at 2.7 micron wavelength for four aqua standards. D/H ratio was varied as $\delta D = 160.9, 0.082, -143.1$ and -188.8 , respectively.

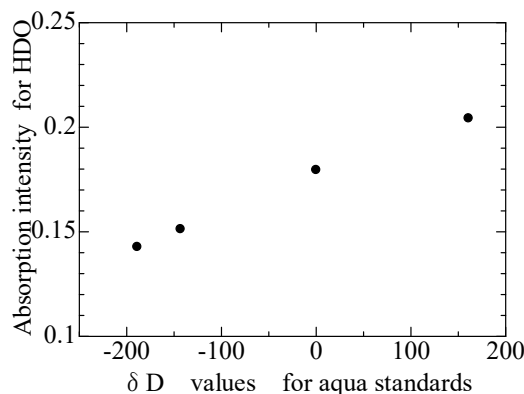


Fig. 3 Correlation of absorption intensity and δD values for aqua standards.

REFERENCE(S)

[1] 山中, 橋爪, 村山: 月極域探査にむけたレーザー水同位体分析法の開発 宇宙科学技術連合講演会講演集 1F13 (JSASS-2019-4089) (2019)