

2021, Jan.
No. 394

CONTENTS

- レーザー技術総合研究所所員一同
- 新年のご挨拶
- 月極域探査にむけた
- レーザー水同位体分析法の開発

LASER CROSS

ISSN 0914-9805



レーザー技術総合研究所所員一同

【表紙写真】

前列左より 藤田雅之、中神保秀、井澤靖和、中塚正大、中島信昭、大道博行
中列左より コチャエフ オレグ、幸脇朱美、宮永憲明、コスロービアン ハイク、本越伸二、山本和久、片岡紀子
後列左より 倉橋慎理、谷口誠治、坂本高保、染川智弘、稲田順史、古河裕之



公益財団法人レーザー技術総合研究所
レーザー・クロス

新年のご挨拶

所長 井澤靖和

2021年の新年を迎え、ご挨拶を申し上げます。昨年来、新型コロナウイルス感染症が猛威をふるい、世界は社会的にも経済的にも大きな影響を受けています。一方で、リモートワークやリモート会議の普及など、新しい生活スタイルの導入が始まりました。今年は、新型コロナウイルスに対するワクチンの接種が開始され、明るい方向も見られようとしています。

私どもでは、昨年の夏、鳥田義則君の急逝という大変悲しい出来事にみまわれました。彼は、インフラ構造物の健全性を、非破壊で、遠隔から検査できる、レーザー超音波、あるいはレーザー打音といわれる技術の開発研究を展開し、多くのユーザーの皆様と連携してその実用化に向けた努力を積み重ねてきました。また、主任研究員として、レーザー計測研究チームを牽引するとともに、研究所の運営にも大きく貢献してきました。研究所として大きな損失であります。彼が主体となって進めてきた今年度の研究については研究員全員がカバーしあい、研究計画の大きな変更に至ることなく遂行できる見込みですが、一部で計画の遅延が出ましたことを深くお詫び申し上げます。

「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」では、最終目標の実現に向けてUVレーザー出力ビームの品質向上と商品化の努力を重ねました。「共鳴ラマン効果による大気中微量有害物質遠隔計測技術の開発」では、深紫外域への波長変換効率向上をめざすパルス圧縮と、レーザー装置の小型化研究を進め、可搬型深紫外域波長可変光源を次年度に計画している野外実験に供給する準備を進めました。「高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御の研究」のプロジェクト研究は3年目に入り、高速波面制御をめざして小型可変形鏡試作機の設計・製作を本格化させ、単体での性能評価試験で10kHzでの高速波面制御を実証しました。また、波面センサーとの結合試験も開始しました。

レーザーエネルギー、レーザープロセス、レーザー計測、レーザーバイオ化学、理論・シミュレーションとレーザー技術開発室の体制で進めているチーム研究では、素粒子研究分野で計画されている2重ベータ崩壊実験で必要とされるレーザー技術開発や原子炉廃止措置のためのレーザー応用研究などの新しい研究を開始しました。また、土木・建築分野におけるレーザー応用研究、レーザーラマン分光を利用した海上観測、フェムト秒レーザーを用いた生体関連物質の機能解明研究、地震予知に関連するレーザープラズマシミュレーション研究、光学素子の損傷評価と高耐力化研究、新方式3次元構造体の形成研究などを継続して進めました。

2021年も所員一同、これまで以上に積極的に研究開発に取り組んでまいります。皆様方には、今後ともなお一層のご支援、ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

月極域探査にむけた レーザー水同位体分析法の開発

大阪大学大学院理学研究科 山中千博、村山純平、瀧上駿

茨城大学理学部 橋爪光

レーザー総研 染川智弘

■月の砂漠に水を求めて

20世紀の初め、スウェーデンの地理学者Hedin (Sven Anders Hedin)が、タクラマカン砂漠を調査し、さまよえる湖「ロプノール」を発見した。井上靖の小説「楼蘭」の元になったエピソードである。月も長らく、砂漠のように水のない天体であると思われてきた。実際、20世紀半ばのアポロ計画で採取された月岩石試料の初期分析では、米国Pasadenaの地球水の混入によって月面水の判別はできなかった。その後精密分析により、一部の鉱物やガラスの中に水が発見され^{[1][2]}、これらは月マントル中に存在した、「内部水を含む試料」が時間を経て表面に現れたもの、と推測されている。さらに近年、リモートセンシング技術の発達により、月の極域表面には微量の水が存在することが示されている^[3]。

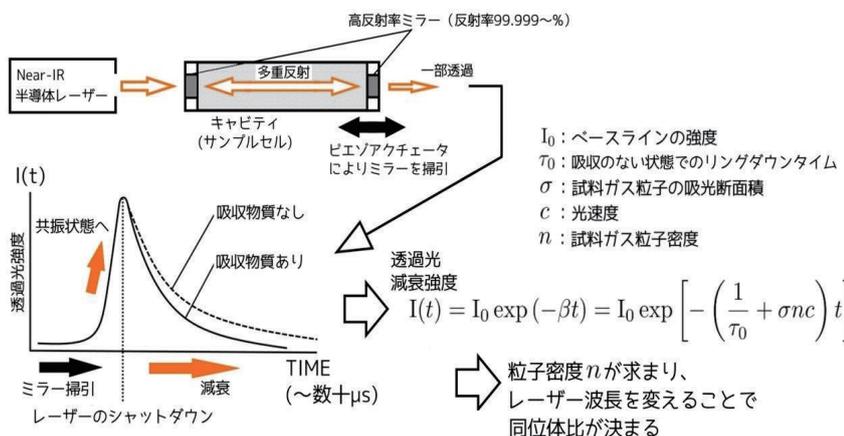
極域へ到達した隕石や彗星のカケラとして、月面に堆積した水は、蒸発拡散のおり、その多くは宇宙空間に逃散してしまうものの、深部方向へ拡散した水分は、堆積層のすきまにトラップされ凍結する。低温のクレーター永久影部分や地下に、微量ながらも0.5-3 wt.%程度の水を保持している部分があることが推定されている。しかし正確な水の存在する位置や量は定かではなく、そのため、月面その場観測が期待されている

状況である。これは、微量水のサンプルリターンでは、多量にある地球水による汚染が回避できないからであり、次いで月面における水の起源や存在時間を知るためには水の同位体測定がなされることが望ましい。

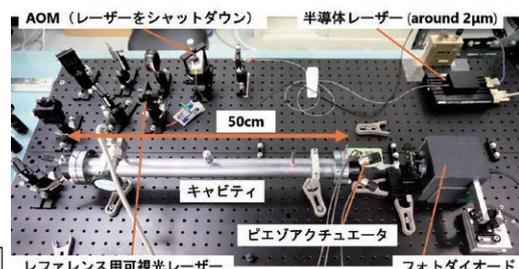
宇宙機搭載可能な装置として、レーザー同位体分析法は、装備が軽量に構成されるので有用である。レーザー法は、同位体分子ごとによって吸収波長がわずかに異なることを利用して測定物質の数密度決定や同位体分析を行う手法であり、既に地上では、半導体レーザーを用いた微量水分計測や軽ガスの同位体測定法が普及している。現在、我々は惑星科学的に意味ある精度を保ちつつ、宇宙機搭載用の軽量かつ堅牢なレーザー微量水・同位体分析装置を実用化することを目的として研究開発を行っている。水分子を構成する安定な水素同位体はDとHの2種類で、蒸発時などにその質量同位体分別効果が大きいことが知られている。一方、月面に供給される水素原子は、太陽風(極端なH rich)であるか、あるいは隕石や彗星によって持ち込まれるDを含有した氷・鉱物と考えられる。

同位体の異常度は、地球の標準海水からの偏差： δ 値で評価され、

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \text{ [‰]} \quad \text{パーミル単位}$$



【図1】CRDS装置の概略



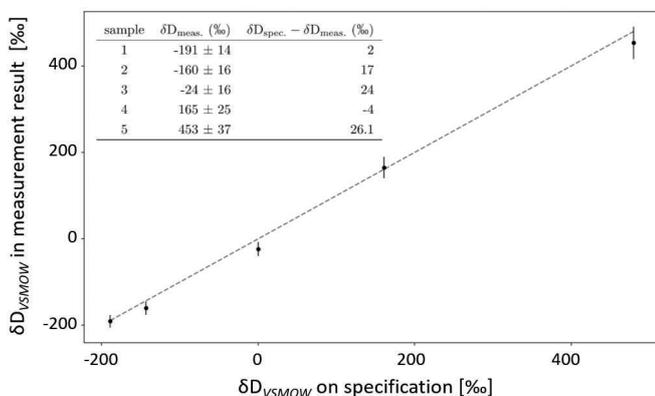
【図2】室内用CRDS実験装置。共振器周りの保温装置等を外した状態。ファイバーカップルのDFBレーザーを使用し、セル内圧力はPressure broadeningを考慮して、全圧200 Pa程度である。

ただし $R = \text{微量同位体量} / \text{主同位体量}$ である。より詳細には、酸素同位体 ^{16}O と ^{17}O 、 ^{18}O を用いて、それぞれの δ 値をとることで、質量分別作用と太陽系における起源の違いを区別できる。太陽系物質の同位体濃度を考慮すると、水素同位体では10%、酸素同位体の起源を区別するためにおよそ1%の精度が要求される。

■月面における同位体測定法

狭帯域の近・中赤外レーザーを用いたレーザー同位体分析装置としては、多重反射ヘリオットセルを用いたTDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectrometer)法があり、さらに現在では、反射率99.99%以上の鏡で構成された光共振セルを用いたさまざまな手法 (Cavity Enhanced Spectroscopy: CES)が開発されている。一般に、測定物質ガスは共振器内に導入され、共振によりkm以上に長大化した光路長を利用し、わずかな吸収係数を持つ吸収線にレーザーを同調して測定するものである。なかでもCRDS (Cavity Ring down Spectroscopy)法は、80年代から開発されたCESの代表的な手法である。我々は、CRDS法を月面環境での同位体分析に用いることを想定して、まず水・酸素の同位体分析が可能な波長の適合性を、HITRANデータベースを用いて近赤外-中赤外域(1.39 ~ 2.7 μm)で評価した。また実際に水の測定を宇宙で行う装置についての開発を進めてきた。図1に、CRDS法の原理を示す。

CRDS法では共振を利用するため、共振器(キャビティ)長をレーザー半波長の整数倍にする必要がある。これでは、透過できる波長は、共振器の自由スペクトル幅(FSR)で定まってしまうため、レーザー波長を掃引するだけでは、吸収スペクトルをとらえられない。よって共振器長を同時に変調させる必要があり、このため piezo素子やその他の機構が用いられる。CRDS法の特徴は、共振に達した瞬間にレーザーを遮断することで、そこからの透過光の時間減衰を計測すること



【図3】同位体濃度既知の標準試料を用いて得た水同位体 δD 検量線

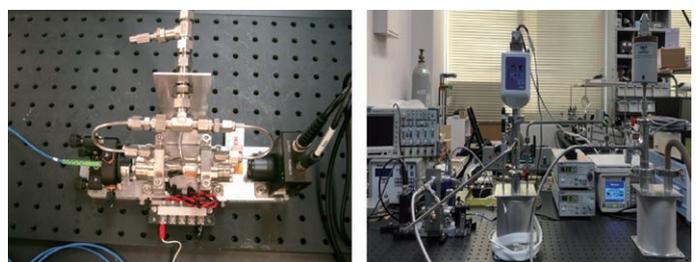
で、目的物質の吸収量に換算できることである。つまり通常の吸収分光法のように、入射/透過光を測定する必要はなく、入射レーザーの強度変化に対して影響を受けない特徴がある。図2に、我々の実験室における共振器長50 cmのCRDS装置の例を挙げる。この装置では、光路長は数kmに及んでいる。

実際、惑星探査に用いるためには、装置サイズやペイロードに大きな制限がかかる。長さ50 cmのCRDSは、当然サイズの縮小を余儀なくされる。市販のCES装置(CRDSやICOS法)は、すべて地球環境下で動作させる前提で用いられ、装置に連続的に気体をフローさせながら測定を行っている。しかし月面は、高真空であり、2週間ごとに訪れる昼夜の温度差は激しい。得られる水は極めて微量であって、完全な閉鎖系で測定することが必要である。また、月面極域では、昼間の太陽光は水平かつ、探査器片側方向から照射されることになり、その温度アンバランスを補うための電力の確保も問題となる。

以上のような問題を整理、解決するには、月面環境と含有水分量の想定を十分正確にすることと、用いる電力と断熱性を正しく踏まえた装置設計が必要であり、そのためには数ある水同位体吸収線の中から、月面の水同位体計測に最適な波長を選択し、ある程度の環境変動にも対応する正確な同位体比検量技術を確立することが必要である。図4に開発された小型CRDSのプロトタイプを示す。これをベースにさらなる開発を進めている。

参考文献

- (1) Saal, et al., *Nature* **454**, 192 (2008)
- (2) Saal et al., *Science* **340**, 1317 (2013)
- (3) Honniball, et al., *Nature Astronomy* (2020)
doi.org/10.1038/s41550-020-01222-x



【図4】左図: JST-JAXA宇宙探査イノベーションハブ(2016-2019)にて開発された共振器長5cmの小型CRDS装置: ((株)神栄テクノロジー、産総研、阪大、茨城大、鹿児島大)、右図: 小型CRDS法による水同位体測定装置