

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01204

研究課題名(和文) 中赤外レーザー分光による動的な水素同位体の移動現象の解明

研究課題名(英文) Dynamic Hydrogen Isotope Transfer Phenomena by Mid-Infrared Laser Spectroscopy

研究代表者

安原 亮 (Yasuhara, Ryo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：30394290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：水酸基の収縮振動モードに起因する同位体毎にピークの異なる大きな吸収を利用して、赤外レーザー光を物質表面や雰囲気中に照射すると、水素同位体種に対応した波長で光強度が減衰する。軽水及び重水の吸収ピークに合致した、2.9マイクロメートルと3.9マイクロメートルの2種類の波長のレーザー光源による水素同位体計測システムを構築し、中赤外レーザーによる計測システムの原理実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水同位体の移動拡散現象の解明は、核融合分野を始めとして多くの分野で重要な課題である。しかしながら、これまでの質量分析装置や分光装置などの閉空間で行う、固定的な計測では、環境中(例えば空間や物質表面)の動的な移動現象は観測できなかった。この課題を、本グループが取り組んできた中赤外固体レーザーと水素同位体定量研究の知見を基にして、その場計測可能なシステム開発に成功した。今後、地球科学や核融合工学等多くの分野での活用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Using the significant absorption with different peaks for each isotope caused by the vibrational contracting mode of hydroxyl groups, when infrared laser light is irradiated on a material surface or in an atmosphere, the light intensity decays at a wavelength corresponding to the hydrogen isotope species. We constructed a hydrogen isotope measurement system using a laser source with two different wavelengths, 2.9micro meter and 3.9micro meter, matching the absorption peaks of water and heavy water and demonstrated the proof of principle of the measurement system using a mid-infrared laser.

研究分野：レーザー工学、レーザー計測、核融合、プラズマ計測

キーワード：中赤外レーザー 水素同位体 エルビウムレーザー 量子カスケードレーザー

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

OH基、OD基、OT基を含む水素の同位体酸化物は、波長2.7から7 $\mu$ mの中赤外光に、図1(a)のように収縮振動モードに起因する大きな吸収ピークがある。それぞれは異なった吸収ピークを持ち、分光的手法によって分別可能である。本研究では、小型可搬で高感度な水同位体のリモート検出手法を、最先端の中赤外レーザーを用いた光測定によって実現する。中赤外波長可変レーザーの波長掃引を行いながらレーザー吸収分光することで(図1(b)、(c))水同位体の密度及び存在比を計測する。中赤外光の吸収は非常に大きく、例えば軽水では、1 $\mu$ m付近で10 $\text{cm}^{-1}$ 程度の吸収係数は3 $\mu$ mで104 $\text{cm}^{-1}$ と約3桁大きくなる。この大きな吸収を利用することで高感度な検出システムが実現する。

本計測システムは、レーザー光を利用しているため、レーザー光のスキャンやレーザー光のマルチビーム化によって2次元計測や3次元計測に拡張可能である。また、レーザービームの直接検出のみではなく、散乱光を利用することで将来的に検出器の設置場所を光源と一体化した小型システムも可能である。簡易的なレーザー光によるリモート検出手法が実現すればこれまで質量分析装置や分光装置などの閉空間で固定的な計測では不可能だった、空間内、物質表面の動的な移動現象の可視化が可能となる。

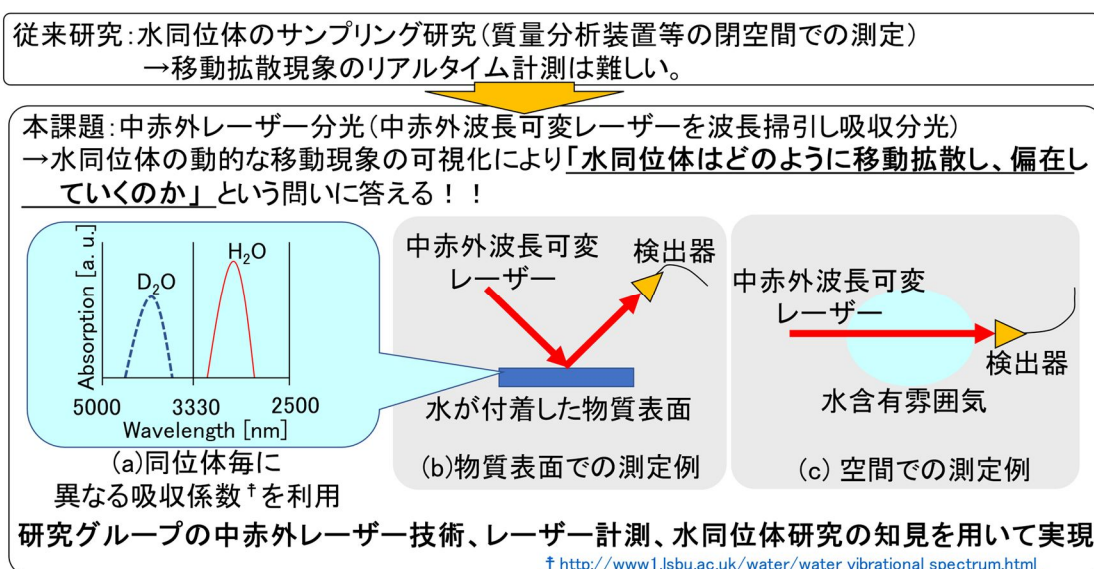


図1 中赤外レーザー分光を用いた水同位体の測定

### 2. 研究の目的

水同位体の移動拡散現象の解明は、核融合分野を始めとして多くの分野で重要な課題である。しかしながら、これまでの質量分析装置や分光装置などの閉空間で行う、固定的な計測では、環境中(例えば空間や物質表面)の動的な移動現象は観測できなかった。この課題を、本グループが取り組んできた中赤外固体レーザーと水素同位体定量研究の知見を基に解決する。水酸基の収縮振動モードに起因する同位体毎にピークの異なる大きな吸収を利用して、赤外レーザー光を物質表面や雰囲気中に照射すると、水素同位体種に対応した波長で光強度が減衰する。軽水及び重水の2種類の波長のレーザー光源による水素同位体計測システムを構築し、中赤外レーザーによる計測システムの原理実証を行うことを目的とする。

本研究によって、将来の核融合炉に向けて極めて重要な、水同位体の簡便かつ高感度なリアルタイム計測手法の実現と水素同位体の拡散移動現象の解明を目指す。

### 3. 研究の方法

図2に、開発した水素同位体の中赤外レーザー計測システムを示す[1]。本装置では、液体の重水と軽水を2.9 $\mu$ mと3.9 $\mu$ mの2色の中赤外レーザーによって検出する。2.9 $\mu$ mのレーザー光は、代表者らが開発したEr:YAPレーザーを用いた[2]。3.9 $\mu$ mのレーザー光には、量子カスケードレーザーを用いた(Thorlabs, QF4050C2)。軽水、重水の中赤外レーザー光路途中に設置したサファイアセル中に注入し、サファイアセルの透過光を検出器によって受光する。途中、ダイクロミックミラーによって2色のレーザー光を一つの同軸にし、サファイアセル透過後に分離す

る。このような光学系によって、軽水、重水の濃度変化を検出した。

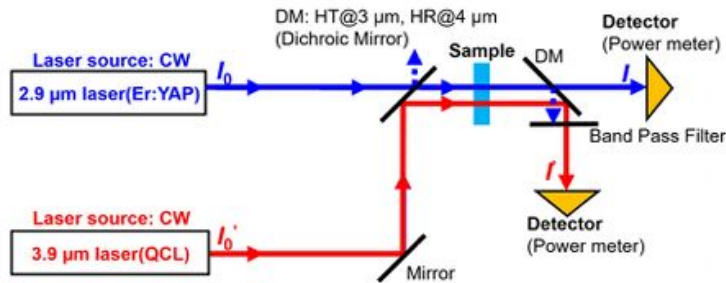


図2 中赤外レーザーによる軽水、重水の検出実験概要

#### 4. 研究成果

図3に、サファイアセル中に軽水を注入した後に、重水を注入したときの2色の中赤外レーザー透過光の時間変化を示す。図3(a)より、164 s付近までで、2.9 μm光の光出力は下限まで減衰している。サファイアセルに軽水が満たされたことを示している。350 sから550 sの間には、サファイアセルに重水を注入したことによって、2.9 μm光が透過し、3.9 μm光が減衰する様子が見られる。これは軽水から重水へとサファイアセル内容物が置換されたことを示している。図3(b)は軽水と重水の置換率を表している。このように、中赤外レーザーを用いることで動的な水素同位体の移動現象が簡便に検出できることが実証された。尚、本研究によって中赤外光源研究も大きく進み2.9 μm光源[2]等の多くの成果が得られた。

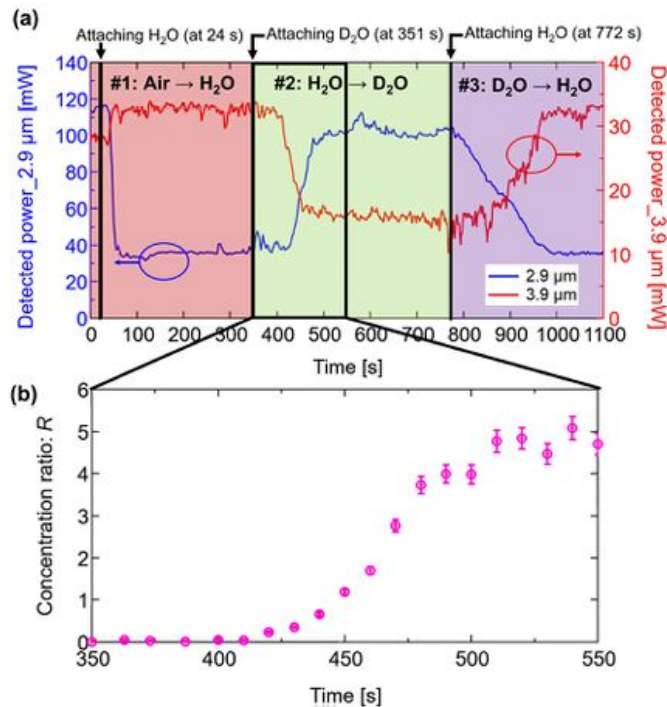


図3 軽水、重水置換実験結果

#### 参考文献

- [1]. Hiroki KAWASE et al., "Preliminary Results of H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O Real-Time Measurement Using Mid-IR Lasers with a Wavelength of 2.9 μm and 3.9 μm", Volume 17, 1205057 (2022).
- [2]. Hiroki Kawase and Ryo Yasuhara, "2.92-μm high-efficiency continuous-wave laser operation of diode-pumped Er:YAP crystal at room temperature," Opt. Express 27, 12213-12220 (2019).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Yao Weichao, Chen Hengjun, Uehara Hiyori, Yasuhara Ryo	4. 巻 10
2. 論文標題 Spectroscopic properties of Er:BZMT ceramics for laser emission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 3226 ~ 3226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.408858	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yasuhara Ryo, Uehara Hiyori, Yao Weichao, Chen Hengjun, Tokita Shigeki, Furuse Hiroaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Dy-doped Y2O3 transparent ceramics as a mid-infrared laser medium and saturable absorber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 2998 ~ 2998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.409848	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yao Weichao, Uehara Hiyori, Kawase Hiroki, Chen Hengjun, Yasuhara Ryo	4. 巻 28
2. 論文標題 Highly efficient Er:YAP laser with 69 W of output power at 2920nm	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19000 ~ 19000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.395802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Uehara Hiyori, Yao Weichao, Ikesue Akio, Noto Hiroyuki, Chen Hengjun, Hishinuma Yoshimitsu, Muroga Takeo, Yasuhara Ryo	4. 巻 3
2. 論文標題 Dy-doped CaF2 transparent ceramics as a functional medium in the broadband mid-infrared spectral region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 1811 ~ 1811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.398079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Kawase, Hiyori Uehara, Hengjun Chen, Ryo Yasuhara	4. 巻 12
2. 論文標題 Passively Q-switched 2.9 $\mu\text{m}$ Er:YAP single crystal laser using graphene saturable absorber	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 102006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab3e61	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 Ryo Yasuhara and Akio Ikesue	4. 巻 27
2. 論文標題 Magneto-optic pyrochlore ceramics of Tb <sub>2</sub> Hf <sub>2</sub> O <sub>7</sub> for Faraday rotator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 7485-7490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.007485	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Kawase and Ryo Yasuhara	4. 巻 27
2. 論文標題 2.92 $\mu\text{m}$ high-efficiency continuous-wave laser operation of diode-pumped Er:YAP crystal at room temperature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 12213-12220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.012213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki KAWASE, Hiyori UEHARA and Ryo YASUHARA	4. 巻 17
2. 論文標題 Preliminary Results of H <sub>2</sub> O and D <sub>2</sub> O Real-Time Measurement Using Mid-IR Lasers with a Wavelength of 2.9 $\mu\text{m}$ and 3.9 $\mu\text{m}$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1205057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1205057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Enhao Li, Hiyori Uehara, Weichao Yao, Shigeki Tokita, Fedor Potemkin, and Ryo Yasuhara	4. 巻 29
2. 論文標題 High-efficiency, continuous-wave Fe:ZnSe mid-IR laser end pumped by an Er:YAP laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 44118-44128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.444625	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Weichao Yao, Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara	4. 巻 29
2. 論文標題 Efficient diode-pumped Er:YAP master-oscillator power-amplifier system for laser power improvement at 2920nm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24606-24613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.429984	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Ryo Yasuhara
2. 発表標題 Terbium Aluminum Garnet Ceramics for the Optical Isolator in Ultra-High Power Lasers
3. 学会等名 Advanced Solid State Lasers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Yasuhara
2. 発表標題 High efficient mid-infrared Er:YAP laser
3. 学会等名 Seminar on Mid-Infrared Laser Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究 分担者	田中 将裕  (Tanaka Masahiro)  (00435520)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授   (63902)	
研究 分担者	赤田 尚史  (Akata Naofumi)  (10715478)	弘前大学・被ばく医療総合研究所・教授   (11101)	

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
---------	---------