

## 藤森科学技術振興財団 研究実施概要報告書

(西暦) 2022年 5月 24日

公益財団法人藤森科学技術振興財団  
理事長 藤森 明彦 殿

藤森科学技術振興財団の助成金による研究が終了しましたので、下記のとおり報告をいたします。

所属機関 東邦大学理学部物理学科

職 名 講師

氏 名 中嶋 善晶



### 【提出書類】

(1)研究実施概要報告書(本紙)

添付書類(A4版3枚以内):研究状況を示す写真等の資料

(2)収支報告書

添付書類:助成金を充当した経費の領収書

領収書を添付しない場合:支払一覧表と支払部門担当者確認署名

⑤

(1)テーマ

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

中赤外光コム光源技術の開発による新たな環境計測技術の創出

(2)本研究の期間

(西暦) 2021年4月～2022年3月

(3)本研究の目的

近年、地球温暖化による世界各地での異常気象や台風などの自然災害に対し、化石燃料の燃焼により放出される二酸化炭素などが原因との報告を気候変動政府間パネル IPCC が出している。産業革命から2000年までの世界平均気温上昇が1.0℃であるが、現状のままでは2050年までに2℃程度の上昇が予想されている。カーボンニュートラルや脱炭素社会の実現には、地球規模での温室効果ガスや大気汚染ガスの詳細な調査研究が必要になってきている。

これに対し、光の波長が5 μm 以上の中赤外波長域では、分子の基本吸収線が多数ある指紋領域の為、多数のガスの分子の同時計測が期待できる。また、中赤外波長域では水(H<sub>2</sub>O)の吸収が小さく、大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)やメタン(CH<sub>4</sub>)などの温室効果ガスや、硫化水素(H<sub>2</sub>S)などの大気汚染ガスに含まれる多数のガス分子の吸収強度が大きいため、レーザー光を用いた遠隔リモートでの高感度計測が期待できる。さらに、中赤外域における広帯域な分光計測が可能になれば、遠隔での多種類ガス計測が可能となり、地球温暖化対策に対する有益な情報を得られる可能性が高い。

本研究の目的は、「光コム」とよばれる高精度レーザー技術を基に、広帯域かつ小型・実用的な分光用の中赤外レーザー光源と、ガス分子の広帯域な分光計測が可能な技術を開発し、新たな環境計測技術の創出を目指すことである。

## (4)本研究の概要

本研究では「光コム」と言われる高度レーザー技術を基に、広帯域かつ小型・実用的な中赤外レーザー光源と広帯域な分光計測技術を開発し、遠隔での多種類ガス分子の同時検出技術の創出を目的とする。図 1(a)に示すように、光コムは多数の高精度レーザーが等周波数間隔で櫛の歯状に並んだスペクトル構造を有し、広帯域性や高分解能性といった特徴を有している。間隔周波数  $f_r$  がわずかに異なる 2 台の光コム (デュアルコム) を用いるデュアルコム分光法では、デュアルコムの各モードのヘテロダイン検波を複数同時に行うことで、 $f_r$  の差  $\Delta f_r$  による複数のビート信号を同時に検出できる。光コムの等間隔性により、光 ( $\sim 100$  THz) をマイクロ波 ( $\sim$  MHz) に正確に周波数変換できるため (図 1(b))、汎用的な電子計測器を用いた光スペクトルの計測が可能である。しかし、従来のデュアルコム分光法では、2 台のレーザー光源を用いて 2 台の光コムを発生するため、装置が大掛かりかつ複雑であった。この課題を解決するために、本研究では 1 台のレーザー光源で 2 台の光コムの同時発生が可能なデュアルコムレーザーを開発した。さらに、開発したレーザーを用いてデュアルコム分光法の実証実験を行った。

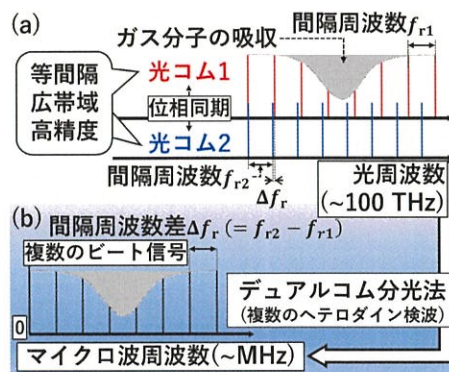


図 1 デュアルコム分光法の概要

## (5)本研究の内容及び成果

独自技術である機構共有型デュアルコムファイバレーザ[Optics Letters, Vol.46 (21), p.5401 (2021)]を基に、超小型ファイバモジュール化技術(Micro-optic package)を導入し、デュアルコムレーザさらなる小型化を目指し開発を行った。図 2(a)に示すように、半導体型の過飽和吸収ミラー(SESAM)と Er 添加光ファイバ(EDF)、偏波保持ファイバ(PMF)、および部分反射ミラー(PRM)を用いてファイバレーザを構成した。あらゆる環境での使用を想定し、レーザは全偏波保持ファイバ構成としており、環境変動に起因する偏波の変動に対し堅牢となっている。このレーザを 2 台作成し、小さな箱の中に密着させて設置した。図 2(b)と(c)に示すのは、デュアルコムレーザの光スペクトルと RF スペクトルである。光コム 1 は中心波長 1547 nm、光コム 2 は中心波長 1558 nm であり、スペクトルの一部が重なっている。また図 2(c)より、楕状のスペクトルが得られていることがわかる。図 2(d)に示すのは、光コム 1 と 2 の間隔周波数  $f_r$  とそれらの差  $\Delta f_r$  の時間変化である。2 台の光コムはフリーランであるため、実験室の温度変化により、測定時間 1000 秒において  $f_r$  は 60 Hz 程度変化しているが、 $\Delta f_r$  は平均値 300 Hz において標準偏差 0.1 Hz 程度で安定化された。これは、2 台の光コムが機構的に共有されているために  $f_r$  の変化が共通雑音となり、差をとることで相殺されるためである。図 2(e)と(f)は 2 台の光コムを空間的に重ねることで得られた干渉信号である。これを高速フーリエ変換することで得られたスペクトルが図 2(g)と(h)であり、波長 1550 nm 帯における光コムのスペクトルに相当する波形が得られた。図 2(h)に示すのは、図 2(g)を拡大したスペクトルであり、 $\Delta f_r$  の平均値 300 Hz に相当する間隔周波数で分解された光コムのスペクトルが観察できた。これは、2 台の光コムがフリーランでありながらも、高い相対安定性を有していることを示している。

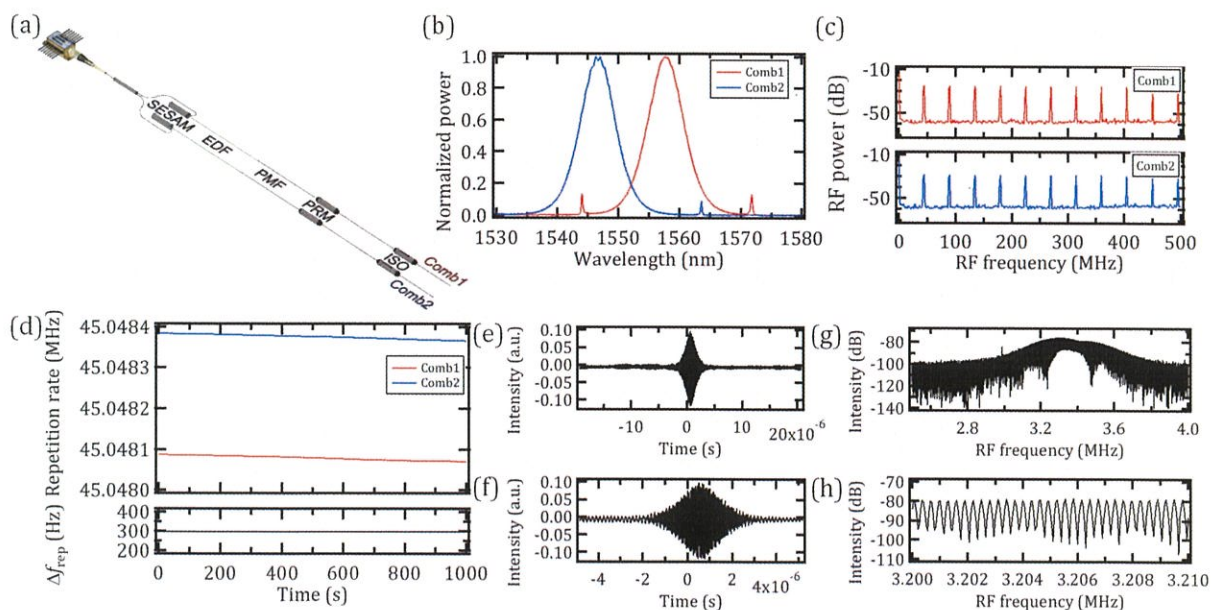


図 2 (a)機構共有型デュアルコムファイバレーザの構成、(b)光スペクトル、(c)RF スペクトル、(d) $f_{rep}$  と  $\Delta f_{rep}$  の時間変化、(e)干渉信号波形、(f)(e)の拡大図、(g)(e)を高速フーリエ変換して得られたスペクトル波形、(h)(g)の拡大図

⑤

(6)本研究の考察

本研究により、近赤外波長域における小型・実用的なデュアルコムレーザーの開発に成功したといえる。ただし、本年度は研究室立ち上げと並行して研究を行ったため、予定していた「光増幅器によるシード光コムの生成」と「中赤外光コムの生成」については未着手となった。しかし、どちらも実験準備は進めている。まず光増幅器の開発については、既に部品や評価に必要な測定器は入手している。また、中赤外光コムの生成に必要な非線形光学結晶についても、共同研究先より疑似位相整合型の半導体型非線形光学結晶を入手できた。さらに、発生する中赤外光コムの評価に必要な赤外光用のフーリエ変換分光器や HgCdTe 高速受光器も入手済みである。今後、中赤外光コムによる分光実験を行い、本研究テーマの目的である、温室効果ガスの遠隔検出技術など新たな環境計測技術の創出につなげていく予定である。

⑤

(7)共同研究者(所属機関名、役職、氏名)

--

(8)本研究の成果の公表先

国内学会発表

1. 湯本拓実、松田美一、松原伸一、時実悠、安井武史、中嶋善晶、“Micro-optic package を用いた全偏波保持型モード同期ファイバレーザーの開発、”レーザー学会学術講演会 第 42 回年次大会、B02-12a-II-03 (2022).
2. 松田美一、湯本拓実、中嶋善晶、“小型な双方向動作型デュアルコムファイバレーザー、”第 69 回応用物理学会春季学術講演会、24a-315-4 (2022).
3. 湯本拓実、松原伸一、時実悠、安井武史、中嶋善晶、“Micro-optic package を用いた全偏波保持型デュアルコムファイバレーザーの開発、”第 69 回応用物理学会春季学術講演会、24a-D315-5 (2022).

国際学会発表

1. Yoshiaki Nakajima, Takumi Yumoto, Shinichi Matsubara, Yu Tokizane, Takeshi Yasui, “A compact dual-comb fiber laser based on a mechanical sharing cavity configuration,” Conference on Lasers and Electro-Optic (CLEO) 2022, JW3B.103 (2022).

[注]この報告書を当財団のホームページ等に掲載します。予めご了承ください。