



2023年1月11日

報道関係者各位

慶應義塾大学
理化学研究所

超小型「光周波数のものさし」の精密制御を実証 —精密分光や低雑音マイクロ波発生源への応用へ向けて—

慶應義塾大学理工学部物理学科の藤井瞬助教は、同電気情報工学科の田邊孝純教授、熊崎基技術職員、同大学大学院理工学研究科修士課程の和田幸四郎氏（研究当時）、菅野凌氏、木暮蒼真氏らの研究グループおよび理化学研究所光量子工学研究センターの加藤雄一郎チームリーダー（同開拓研究本部 主任研究員）と共同で、高Q値単結晶微小光共振器※1を用いて生成した20 GHzを超える超高繰り返し光周波数コム（マイクロ光コム）を連続的かつ広範囲に制御する手法を開発しました。

直径数ミリメートル以下の高Q値微小光共振器を用いて発生される光周波数コム※2はマイクロ光コムとよばれ、小型かつ省エネルギー動作が可能な次世代型の光周波数コム光源として数々の応用が期待されています。しかし、その一方で発振器となる共振器素子の小ささゆえに性能の緻密な制御が難しいという課題がありました。本研究では、帰還回路を用いた光周波数の高速制御技術と共振器材料固有の熱物性を効果的に利用することで、マイクロ光コムの光スペクトルと出力パワーを広範囲において精密にチューニングできることを示しました。この成果は将来の精密分光や低雑音マイクロ波発生源への応用に向けた重要な指針となることが期待されます。

本研究成果は2023年1月10日（日本時間）に、英国科学誌のオンライン版 *Communications Physics* にて公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・高Q値微小光共振器を用いて発生した光周波数コムの性能を連続的かつ広範囲にチューニングするための精密制御手法を開発した。
- ・マイクロ光コムの光スペクトル、出力パワーの精密制御において共振器材料の熱的物性が関わるメカニズムを定量的に明らかにした。
- ・将来的な精密分光や低雑音マイクロ波発生源への応用に向けた重要な指針となる。

2. 研究背景

光周波数コムとは等間隔に並んだ、くし形の光スペクトルをもつレーザー光源で、一本一本の光周波数の精度が非常に高いことが特徴です。この特性を利用することで、光周波数測定や長さ計測、精密分光などさまざまな用途に使われています。すでに実用化されている光周波数コム光源は固体レーザーや希土類添加光ファイバーを用いたリング型発振器で構成されていますが、繰り返し周波数は高くても数百MHz程度に制限されていました。そこで近年、小型で高性能な微小光共振器デバイスを用いた光周波数コム（マイクロ光コム）の研究開発が世界中で進められています。マイクロ光コムは直径数百マイクロメートルから数ミリメートル程度の微小光共振器素子を発振器として用いることで、繰り返し周波数を数GHzから数百GHzと非常に高くできることが知られています。さらに原理的に小

型かつ省エネルギー動作が可能であるため、低雑音マイクロ波発生源や、Beyond 5G を代表される次世代無線通信システム、さらには高速大容量光通信の基盤技術としてますます期待が高まっています。その一方で、マイクロ光コムはその小ささゆえに他の光周波数コム光源と比較して堅牢性や性能の制御性などで劣るため、将来の実用化へ向けた課題とされてきました。

3. 研究内容・成果

本研究グループではフッ化マグネシウム単結晶から作製した直径 3 ミリメートル程度の高 Q 値微小光共振器を用いて約 23 GHz の高繰り返し周波数をもつマイクロ光コムを発生することに成功し、光スペクトルと出力パワーといった基本性能を大きくチューニングする手法を実証しました。また、マイクロ光コムの制御性には共振器材料の熱的物性が大きく関わっていることを発見し、そのメカニズムを定量的に明らかにしました。

マイクロ光コムの模式図を図 1 に示します。微小光共振器に光テーパファイバとよばれる特殊な細線導波路を用いて励起用連続光レーザーを入力すると、光カー効果※3 によって共振器内部で次々と波長変換が起こり、光周波数コムが形成されます。これを同じ導波路を用いて取り出すことでなだらかな包絡線をもつ光スペクトルが得られます。マイクロ光コムを構成する全ての光周波数は中心周波数、繰り返し周波数、キャリアエンベロープオフセット周波数（オフセット周波数）とよばれる三つの周波数から決まることが知られています。まず、当研究グループはペルチェ素子※4 を用いて微小光共振器の温度を制御することで、熱光学効果と熱膨張効果とよばれる二つの異なる効果により、光周波数を広範囲かつ連続的にチューニングできることを示しました。実験的に得られたチューニング効率 は理論的に予測される値とよく一致しています。特に中心周波数は 48 GHz 以上変化しており、繰り返し周波数の 200% 以上の周波数帯域でチューニング可能であることが示されました。さらに電気的な帰還回路を組み合わせることで、スペクトル幅を 1.5 THz から 2.4 THz まで可変とすることに成功しました。

またこのとき、温度制御にともなってマイクロ光コムの出力パワーも三倍以上大きく変化する様子が確認できました。この現象を理解するために、熱効果を考慮した定量的な数値シミュレーションを行うことで、微小光共振器の熱膨張効果が出力パワーに大きく影響を与えていることが分かりました。この効果を利用することで光スペクトルと出力パワーの同時チューニングも可能となると期待されます。

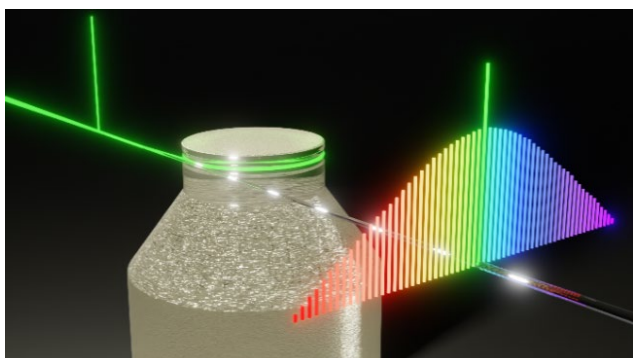


図 1：微小光共振器を用いたマイクロ光コム生成の模式図。連続光レーザーを高 Q 値微小光共振器へ入力することで、周波数軸上で等間隔なくし形の光スペクトルが得られる。

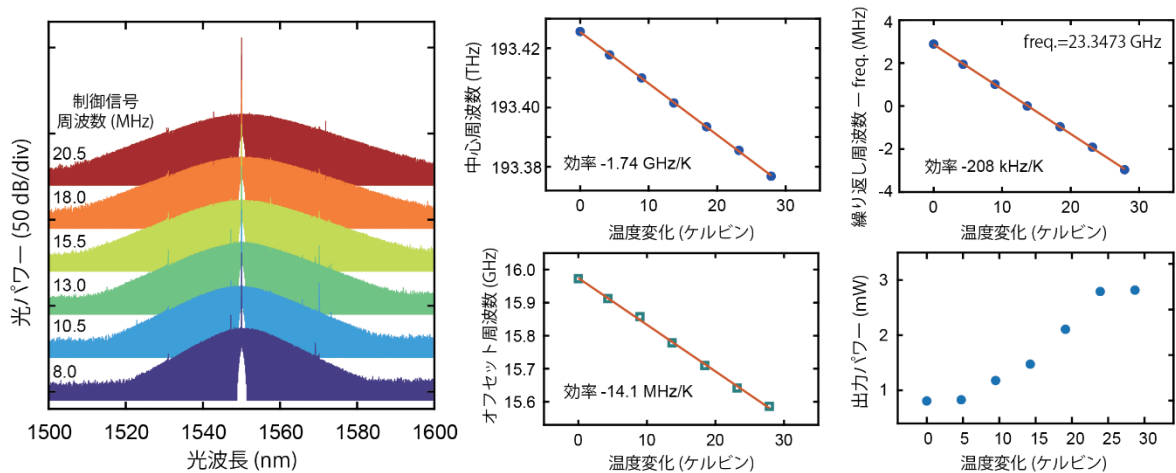


図 2 : 発生したマイクロ光コム の光スペクトル (左) と温度変化による光周波数と出力パワーのチューニング性能 (右)。

4. 今後の展開

本研究の成果はマイクロ光コム の近い将来の産業応用に向けた大きな進展だといえます。とりわけ温度制御という非常にシンプルな機構によって広範囲かつ緻密な制御が実現できたことは、特に分光用途や低雑音マイクロ波発生源などの高い精度で光スペクトルと出力パワーの制御が必要とされる応用において重要な意義があります。

本研究は日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金基盤研究 (A) ならびに同若手研究による支援を受けて行われました。

<原論文情報>

“Versatile tuning of Kerr soliton microcombs in crystalline microresonators”
 Shun Fujii, Koshiro Wada, Ryo Sugano, Hajime Kumazaki, Soma Kogure, Yuichiro K. Kato, and Takasumi Tanabe, *Communications Physics*, Vol.6 , No.1 (2023).
 doi: <https://doi.org/10.1038/s42005-022-01118-4>

<用語説明>

※1 直径数十マイクロメートルから数ミリメートルのリング状の光共振器素子を指す。特に空気界面との全反射によって光を閉じ込めるタイプをウィスパリングギャラリーモード (囁きの回廊モード) 共振器といい、非常に高い Q 値を示す。

※2 周波数軸上で等間隔な、くし (コム) 型のスペクトルをもつ超短パルスレーザー光源。非常に高い周波数精度と安定性から「光周波数のものさし」として利用されるだけでなく、精密計測など多くの応用先がある。

※3 三次非線形光学効果の一つで、強い光が媒質中を伝搬するときに光強度に応じた屈折率の変調や光周波数変換を引き起こす。

※4 電流を流すことで吸熱と発熱を行う半導体熱電素子。体積が小さく環境負荷も少ないため、冷蔵庫など多くの市販機器に使われている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 助教 藤井 瞬 (ふじい しゅん)

TEL : 045-566-1629 E-mail : shun.fujii@phys.keio.ac.jp

慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 教授 田邊孝純 (たなべ たかすみ)

TEL : 045-566-1730 E-mail : takasumi@elec.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (望月)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 050-3495-0247

E-mail : ex-press@ml.riken.jp <https://www.riken.jp/>