



2024年5月14日

報道関係者各位

慶應義塾大学

微小圧力で高繰り返しモード同期レーザーを実現 —マイクロ光コムデバイスの社会実装へ向けて—

慶應義塾大学理工学部物理学科の藤井瞬助教、同電気情報工学科の田邊孝純教授、同学部技術職員の熊崎基、同大学大学院理工学研究科修士課程の和田幸四郎（研究当時）および木暮蒼真（研究当時）らの研究グループは、15 GHz 程度の非常に高い繰り返し周期をもつ光周波数コム※1を、ピエゾ素子※2を利用した微小な機械的圧力によって発生させることに成功しました。本研究成果は高速大容量通信やマイクロ波レーダー、光時計への将来的な活用に大きく貢献することが期待されます。

高Q値微小光共振器※3を用いて発生される光周波数コムはマイクロ光コムとよばれ、その高い繰り返し周期と集積性から次世代の光周波数コム光源としてさまざまな応用先が提案されています。一般的にマイクロ光コムの発生には高性能レーザーの精密な波長制御が不可欠ですが、今回、本研究グループは単結晶からなる光共振器に微小な機械的圧力を加えるだけで、励起レーザーの制御を必要とせず、ソリトンコム※4とよばれるモード同期したマイクロ光コムの発生と繰り返し周波数の精密な制御が可能であることを示しました。

この手法を利用することで、高繰り返しマイクロ光コムの性能を格段に向上させることが期待されます。さらに将来的な市場展開を見据えたマイクロ光コムデバイスの小型化と低コスト化へ大きく貢献できる重要な結果です。

本研究成果は2024年4月24日（日本時間）に、ドイツのオンライン科学誌『*Laser & Photonics Reviews*』にて公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・ピエゾ素子を用いた微小圧力で高繰り返しマイクロ光コムの生成に成功した。
- ・マイクロ光コムの機能向上だけでなく、小型デバイス化と低コスト化へ向けた重要な結果。

2. 研究背景

光周波数コム（光コム）は、周波数軸上でくし（コム）状の光スペクトルを持つレーザー光源であり、光周波数の精密計測や光とマイクロ波周波数の相互変換などに利用されています。さらに等間隔に並んだ光信号一本一本を分離することによって大容量光通信用の多波長光源への利用や、光コムを高速な光検出器で光電変換することで精密なマイクロ波レーダー、次世代移動通信技術（6G）用のテラヘルツ波源としての活用が期待されます。ところが現在一般的に普及している光コムの周波数間隔は数十～数百 MHz であるため、光通信や数十 GHz を超えるようなマイクロ波・テラヘルツ波の発生に直接利用することは困難でした。

マイクロ光コムは微小光共振器を用いて発生される光周波数コム光源であり、直径数百マイクロメートルから数ミリメートル程度の高Q値微小光共振器を用いて発生されます。マイクロ光コムは隣り

合う光周波数の間隔が数 GHz から 1THz 程度と非常に大きく、低エネルギー動作が可能で集積性に優れるという従来の光源にない大きな特徴があり、将来的な社会実装が大きく期待されている光コム光源です。一般的に、マイクロ光コムを発生するためには光変調器やエレクトロニクス回路などを組み合わせ、高性能な連続光レーザーの波長を高速かつ正確に制御する必要があります。そのため微小光共振器自体のサイズと対照的に、発生に用いる周辺装置の複雑さやコストがデバイス化や量産化へ向けた大きなボトルネックになると考えられてきました。

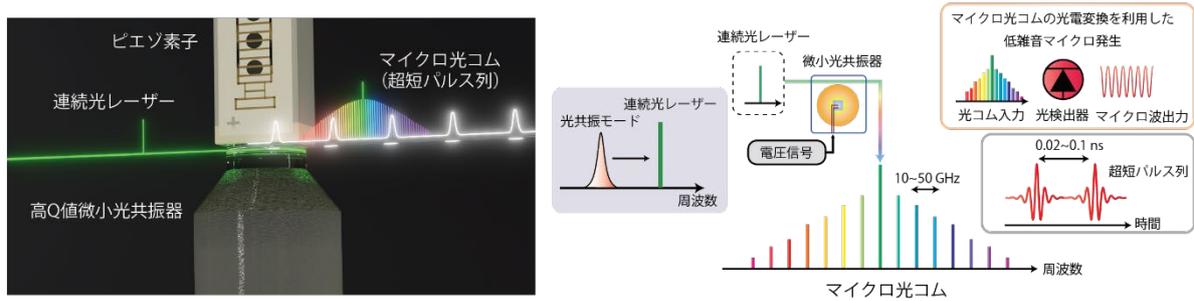


図 1：微小圧力によるマイクロ光コムの模式図。高繰り返しマイクロ光コムを光電変換することで数十 GHz を超えるマイクロ波出力が得られる。

3. 研究内容・成果

これまでに本研究グループは、フッ化マグネシウム (MgF_2) 単結晶を切削、研磨することで作製した微小光共振器を用いて高繰り返しマイクロ光コムの生成・制御技術に関する研究を行ってきました。2023 年には共振器温度を制御することで、マイクロ光コムの周波数スペクトルと出力パワー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^{注1)}。しかしマイクロ光コムを生成するためには、励起レーザーの波長を高速に変調した上で、電気的な帰還回路で波長を安定化する複雑なセットアップを利用していました。

本研究では、このような課題を克服するためピエゾ素子を用いて微小光共振器に機械的に圧力を与える機構を開発しました。外部からピエゾ素子に電圧をかけると、共振器との接触面を介して微小な圧力が光共振器に作用します。本研究で使用されたフッ化マグネシウム微小光共振器は 10^9 を超える超高 Q 値であるため、ほんのわずかな圧力でも共振線幅の 1,000 倍を超える非常に高い効率で共振波長の変化を引き起こせることが実験的に確認できました。この手法を用いることで、励起レーザーの波長を変調する代わりに微小光共振器の光共振モードを高速に変調することが可能となり、ソリトンコムとして知られるモード同期したマイクロ光コムの生成が期待されます。

本研究グループではこのような方針のもとで実験を行い、15 GHz の繰り返し周波数をもつマイクロ光コムの発生に成功しました。ピエゾ素子にわずか 200 mV 程度の電圧変化をかけたとき、励起レーザー光が微小光共振器へ注入されマイクロ光コムが発生しています。出力されたマイクロ光コムはパルス幅 200 フェムト秒程度の超短光パルスになっており、その証拠として非常になめらかなスペクトル包絡線が観測されています。また、ピエゾ素子にかかる電圧を調整することでソリトン結晶とよばれるマルチパルス状態の生成にも成功しました。このときの繰り返し周波数は 46 GHz に達していることが確認できました。

さらにピエゾ素子に任意の電圧波形を加えることで繰り返し周波数の動的な変調を試みました。正弦波や三角波などの周期的な信号に応じて、繰り返し周波数が数 kHz 程度変化していることが分かります。周波数変調量は、熱的な制御^{注1)}に比べて小さいものの、機械的圧力を用いることでより精密かつ高速な周波数変調が可能であることが実証されました。

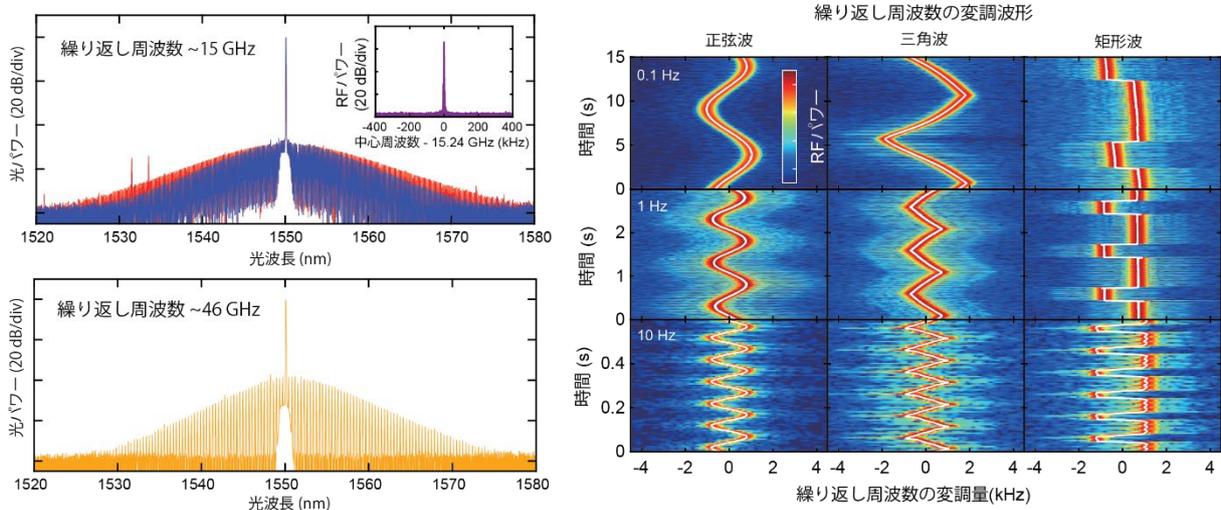


図2：発生したマイクロ光コム光の光スペクトル(左図)。電圧を変えることで大きく異なる繰り返し周波数を同じデバイスで実現した。ピエゾ素子に変調波形信号を与えたときの繰り返し周波数の変化量(右図)。

4. 今後の期待

数十 GHz 程度の繰り返し周波数をもつマイクロ光コムは、光通信だけでなく衛星通信や高性能レーザー、光時計への応用が期待されます。本研究において高性能な波長可変レーザーの波長制御の代わりに市販のピエゾ素子を用いて高繰り返しソリトンコムの生成に成功したことは、マイクロ光コム技術の近い将来における小型デバイス化と低コスト化へ大きく貢献することが期待されます。本研究で使用したフッ化マグネシウム単結晶とピエゾ素子のコストは合わせても数千円程度であり、高価な希少材料や大規模な半導体プロセスを必要としません。本研究グループは、本成果を活用することで励起レーザーを含めたマイクロ光コムの小型デバイス化へ向けて研究を行う予定です。

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、戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)、科学技術振興機構 研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)、みずほ学術振興財団、村田学術振興財団、慶應義塾次世代研究プロジェクト推進プログラムによる支援を受けて行われました。

<原論文情報>

“Mechanically Actuated Kerr Soliton Microcombs”

Shun Fujii, Koshiro Wada, Kumazaki, Soma Kogure, and Takasumi Tanabe, *Laser & Photonics Reviews*, 2301329 (2024). doi: <https://doi.org/10.1002/lpor.202301329>

<用語説明>

※1 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、精密計測など多くの応用先がある。微小光共振器を用いて発生される光周波数コムをマイクロ光コムという。

※2 力を加えることで電圧を発生したり、逆に電圧を加えることで圧力を発生したりする小型素子。

※3 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。

※4 波長分散と非線形光学効果のつりあいがとれることによって、マイクロ光コムが超短パルス化した状態。パルス波形とスペクトル波形の形状と位相関係が保たれており、応用に適している。

※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

・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/>