



2025 年 12 月 11 日

報道関係者各位

慶應義塾大学

超精密機械加工で高性能マイクロ光コムを実現

ー省エネかつ超低雑音な動作を実証、次世代のマイクロ波源へー

慶應義塾大学理工学部物理学科の藤井瞬助教、同学部電気情報工学科の田邊孝純教授、同学部システムデザイン工学科の柿沼康弘教授らの共同研究グループは、超精密機械加工によるトップダウン手法で作製した単結晶微小光共振器を用いて、25 GHz を超える高い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。

性能を詳しく調査した結果、従来広く用いられてきた研磨加工のみで作製された光共振器と比べて、マイクロ光コムの光スペクトルの再現性や平坦性、波長帯域が大幅に向上し、さらに動作に必要な消費エネルギーの低減にも寄与していることが分かりました。また、この光コムを用いて生成した約 26 GHz の電波（マイクロ波）の位相雑音特性を解析したところ、-140 dBc/Hz (100 kHz オフセット)を下回る極めて低い雑音特性を示すことを明らかにしました。

本手法で用いた超精密機械加工は、高性能なフォトニクス素子を作製することに広く用いられている産業技術であり、コンピュータ制御で大量生産可能という大きな利点があります。本成果は、マイクロ光コムの社会実装に加え、高速大容量光通信や低雑音マイクロ波源などへの活用と近い将来の市場展開に大きく貢献することが期待されます。

本研究結果は 2025 年 12 月 6 日(日本時間)に、米国物理学協会のオンライン誌 APL Photonics にて公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・超精密機械加工によって作製した微小光共振器を用いて、マイクロ光コムの生成に成功。
- ・従来手法に比べ、光スペクトルの再現性や波長帯域、平坦性が大幅に向上し、消費エネルギーも低減。
- ・生成したマイクロ波は極めて低い位相雑音特性を実現。

2. 研究背景

高性能な微小光共振器を用いて発生されるマイクロ光コムは、小型かつ省エネルギー動作が可能な光周波数コム光源として、世界中で盛んに研究開発が行われています。数十 GHz を超える高い繰り返し周波数をもつことから、リアルタイムな分光、測距、振動計といったセンサー応用だけでなく、大容量光通信用の多波長光源、低位相雑音なマイクロ波発振器、さらには次世代移動通信技術用のミリ波・テラヘルツ波源としても有力な候補です。

マイクロ光コムは非線形光学効果を利用して生成されるため、励起に使われる光エネルギーを高効率に利用できる高 Q 値（低損失）な微小光共振器は不可欠です。さらにその実現には、光共振器の導波路構造を緻密に設計・作製する必要があり、半導体加工やレーザー加工、研磨加工など様々な作製手法が材料の特性に合わせて検討されてきました。

本研究グループは以前より、フッ化物単結晶を用いた微小光共振器の研究を行ってきました。単結晶微小光共振器は一般的に研磨加工によって作製され、非常に高いQ値が得られる半面、微細構造の制御性や再現性に劣るという課題がありました。この課題の解決方法として、同グループは2020年に全コンピュータ制御によるミクロンスケールの形状製作が可能な超精密機械加工を用いて、当時世界最高性能の単結晶光共振器の作製に成功しましたが(注1)。しかし当時は、マイクロ光コムの発生には至っていませんでした。そこで本研究では、超精密機械加工のさらなる技術向上とマイクロ光コムの生成を目指した研究を行いました。

3. 研究内容・成果

マイクロ光コムのスペクトル特性(帯域・パワー・平坦性)は主にQ値と波長分散によって決まることが知られています。波長分散は共振器の微細構造に大きく影響を受けるため、まず超精密機械加工(旋削加工)を用いて、直径約3mm程度のフッ化物単結晶の円周上に高さ5μm程度の超微細導波路を作製しました。このような微細構造は、従来の研磨加工のみの手法では作製することはできません。

超精密機械加工で作製された光共振器は、理論予測通りの理想的な分散特性が得られるとともに、マイクロ光コムの生成を阻害する横モード混成※が大幅に抑制されていることが確認できました。

さらに、この微小光共振器を用いることで、約26GHzという非常に高い繰り返し周波数をもつマイクロ光コムの生成に成功しました。従来手法によるマイクロ光コムと比較したところ、光スペクトルの再現性や平坦性、波長帯域が大幅に向上しました。これらの諸特性は横モード混成によって悪影響を受けることが先行研究によって知られているため、本結果は精密機械加工を利用することでのみ得られる有益な成果であるといえます。さらに、数値シミュレーションにより、微細導波路をもつ本光共振器ではマイクロ光コム動作に必要な光エネルギーが半分以下と大きく削減できることが分かりました。

また、ここで得られたマイクロ光コムを用いて周波数約26GHzの電波(マイクロ波)を生成し、その位相雑音を評価したところ、-140dBc/Hz(100kHzオフセット)を下回る非常に低いノイズ特性を示すことを明らかにしました。これは、単結晶共振器で生成されたマイクロ光コム由来の低雑音性が反映されているといえます。

注1) 2020年6月11日 プレスリリース [超精密機械加工が可能とした高性能ナノフォトニクス素子の製作](#)

4. 今後の期待

本研究により、精密機械加工技術がマイクロ光コムデバイスの基礎性能の向上に大きく貢献することを実証しました。この技術は高性能なフォトニクス素子を作製することに広く用いられている産業技術であり、コンピュータ制御で大量生産可能という大きな利点があります。また、今回生成した~26GHz前後の高周波マイクロ波は、レーダーや長基線干渉法などに利用される重要な周波数帯であり、より低位相雑音なマイクロ波発振器の開発が求められています。将来的には、本成果によるマイクロ光コムデバイスが、現在広く用いられるような水晶発振器と電子回路からなる高性能なマイクロ波源に代わる存在になることが期待されます。

本研究は、JSPS 科研費(JP24K17624)、JST 研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)(JPMJTR23RF)、JST さきがけ(JPMJPR25L9)による支援を受けて行われました。

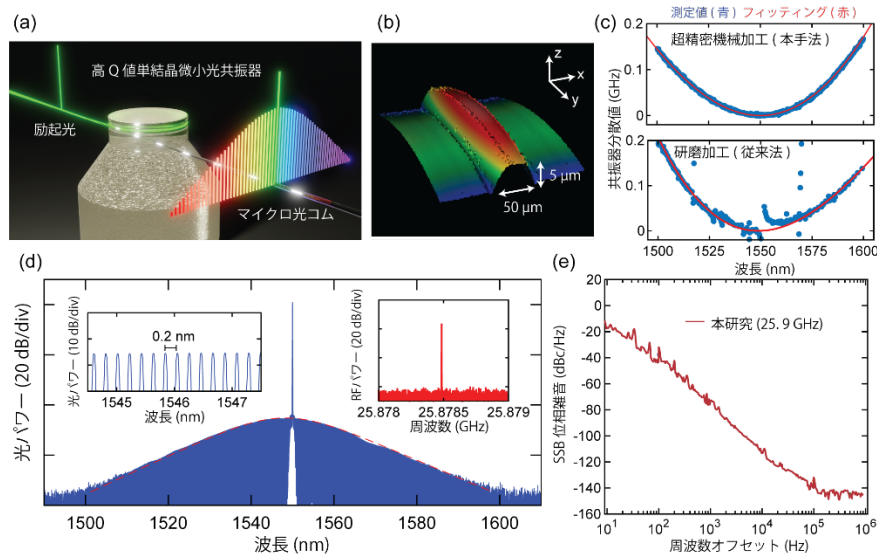


図1：(a)マイクロ光コムの模式図 (b)超精密機械加工で作製した微小光共振器の微細導波路形状（白色干渉系で測定）。(c)本手法と従来手法の共振器分散特性の比較。従来手法では測定値にランダムな変動が見られるが、本手法では変動が大幅に抑制されている。(d)マイクロ光コムの光スペクトル（右上挿入図は繰り返し周波数の測定値）。(e)本研究で生成した25.9 GHzのマイクロ波のSSB位相雑音。

<原論文情報>

タイトル：Systematic dispersion engineering of crystalline microresonators for broadband and coherent frequency comb generation

著者：Liu Yang (楊柳)、Ryomei Takabayashi (高林諒明)、Hiroki Moriguchi (森口大輝)、Hikaru Kodama (児玉耀)、Kazuma Miura (三浦和真)、Koshiro Wada (和田幸四郎)、Kai Yamaguchi (山口佳威)、Tatsuki Murakami (村上達希)、Hajime Kumazaki (熊崎基)、Yasuhiro Kakinuma (柿沼康弘)、Takasumi Tanabe (田邊孝純)、Shun Fujii (藤井瞬)

出版誌・巻号・発行年：APL Photonics, Vol. 10, No. 12, pp. 126109 (2025).

DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0294499>

<用語説明>

※横モード混成：多モード導波路である微小光共振器において発生する、異なる横モード間での相互作用。共振器の分散特性やQ値の局所的な変化を引き起こす。

※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 (増田)

TEL：03-5427-1541 FAX：03-5441-7640 Email：@adst.keio.ac.jp

<https://www.keio.ac.jp/>