



2020年6月11日

報道関係者各位

慶應義塾大学

## 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

### — トップダウンで作製した単結晶微小光共振器で世界最高性能を達成 —

慶應義塾大学大学院理工学研究科の藤井瞬（博士課程3年、日本学術振興会特別研究員DC1）と同理工学部電気情報工学科田邊孝純教授らの研究グループは、同理工学部システムデザイン工学科柿沼康弘教授らと共同で、超精密切削加工のみを用いて微小光学素子を製作し、トップダウン（※1）の手法で作製した単結晶微小光共振器として世界最高の光学性能（ $Q$ 値1.4億）を達成しました。

微小光共振器（マイクロ光共振器）は光を微小領域に閉じ込めることで光と物質の相互作用を引き出すことから、光周波数コム発生や高感度センシング、量子光学応用に用いられ、世界中で盛んに研究開発が進められています。高い光閉じ込め性能（ $Q$ 値）を得るのに適したフッ化物系結晶で作る光共振器では、半導体プロセスで用いられるような従来のナノ加工技術を用いることができないため、これまでは限られた形状の素子を研磨で作製するしかありませんでした。本研究では超精密機械加工技術をナノフォトニクス素子作製に適用することで、従来ではなしえなかった単結晶微小光共振器の高 $Q$ 値と精密な構造設計を両立させました。

本研究成果は2020年6月11日（日本時間）に、アメリカ光学会（OSA）の学術誌 *Optica* にて公開されます。

#### 1. 本研究のポイント

- ・光と物質の相互作用を高めるマイクロ光共振器のさらなる高性能化（高 $Q$ 値化）が求められている。
- ・高 $Q$ 値が得られる結晶微小光共振器素子を超精密機械加工を用いることで所望の構造で作製した。
- ・トップダウンで作製した単結晶微小光共振器として世界最高 $Q$ 値を達成した。

#### 2. 研究背景

近年、高性能な微小光共振器素子（※2）の研究開発が世界中で進められています。その背景には、この素子を用いると光と物質との相互作用を極限まで高めることができ、その結果得られる非線形光学効果をさまざまな応用に用いられることが挙げられます。その中でも近年特に、注目を集めている微小光共振器の応用が、くし形の光スペクトルをもつ光周波数コム（※3）光源の小型化です。高 $Q$ 値（※4）微小光共振器に、ある条件下で連続光を入力すると、光周波数コムを発生させることができます。そのような光をマイクロコム（※5）といい、分光や距離計測、光通信等に応用できます。

マイクロコムのプラットフォームである微小光共振器にはさまざまな光学材料が利用されていますが、フッ化マグネシウムやフッ化カルシウム等のフッ化物系結晶から作製されるマイクロ光共振器はその広い波長透過性、優れた光吸収特性から、特に精力的に研究されてきました。しかしながら従来の作製手法では、高 $Q$ 値を実現するためには長時間かつ繊細な研磨工程が必要であり、構造を詳細に設計できなかつたり、構想の再現性が悪かつたりするという大きな課題がありました。

### 3. 研究内容・成果

今回、超精密機械加工を用いることで「高 $Q$ 値」と「微細構造の制御性」という二つの重要な要素を両立する単結晶マイクロ共振器を得ることに成功しました。図1に超精密機械加工のセットアップと実際に作製された微小光共振器素子を示します。測定した共振特性からは、機械加工で作製されたものとしては世界最高 $Q$ 値となる約1.4億が得られていることが確認され（図2左）、構造によって決まる分散からはマイクロメートルオーダーで狙った通りに構造が作製できたことが確認できました（図2右）。

マイクロ光共振器の性能を向上させるためには表面散乱を減らす必要があります、表面の研磨工程は必要不可欠でした。ダイヤモンドバイトを用いた機械切削加工は表面が荒く、光が散乱しやすいのでこれまで微小光学素子の作製には適さないとされてきました。本研究グループは、単結晶のもつ結晶異方性や切り込み深さといった加工条件を解析し最適化することによって、切削加工でありながら研磨手法に匹敵する数ナノメートルオーダーの表面荒さを実現しました。これが今回性能向上につながった大きな要因であるといえます。今回、2種類の異なるフッ化物材料（フッ化マグネシウム、フッ化カルシウム）に対して共振器を作製し、そのどちらにおいても高い $Q$ 値を得ました。

微細構造の制御性は超精密機械加工の大きな利点であり、コンピュータ制御された装置によって事前に設計した通りにマイクロ共振器を削り出します。測定結果は数値シミュレーションと非常によく一致しており、これまで実現されてこなかった「高 $Q$ 値」と「構造制御性」の両立に初めて成功したことが確認できました（図2）。



図1：(左)超精密機械加工の実験セットアップ (右)作製したフッ化マグネシウム微小光共振器

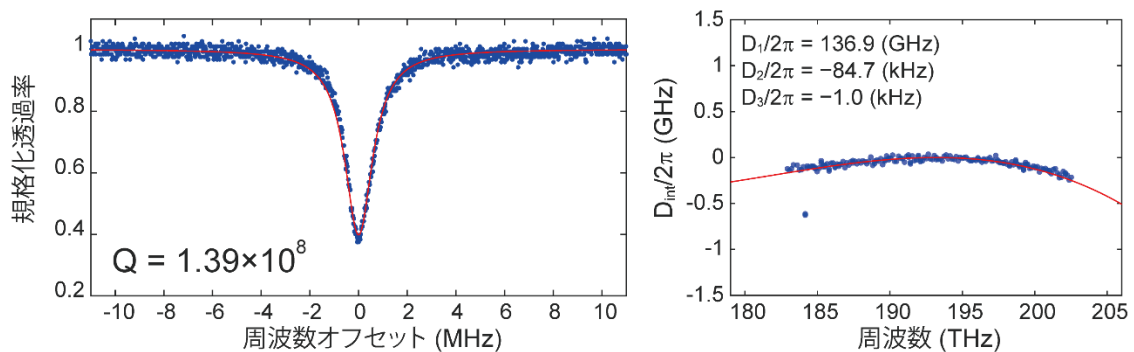


図2：(左)世界最高値を示した光共振スペクトルの測定結果（青）とそのフィッティング（赤）  
(右)構造再現性を確認した光共振モードの測定結果（青は実験値、赤は理論値を示す。）

#### 4. 今後の展開

本研究によるマイクロ共振器作製手法は、高性能なフォトニクス素子を確実に作製できることから、近い将来、産業的にも大きなインパクトを与えると期待されます。今後、従来では作製が難しいとされてきた、より複雑な微細構造を実現することで、マイクロコム光源の高機能化に飛躍をもたらすことが期待できます。

本研究は戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）の委託業務の結果得られました。また研究の一部は日本学術振興会科研費、並びに特別研究員奨励費の支援を受けています。

#### <原論文情報>

“All-precision-machining fabrication of ultrahigh-Q crystalline optical microresonators”

Shun Fujii, Yuka Hayama, Kosuke Imamura, Hajime Kumazaki, Yasuhiro Kakinuma, and Takasumi Tanabe, Optica, Vol. 7, No. 6, pp. 694-701 (2020). doi: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.394244>

#### <用語説明>

- ※1 トップダウン：ここでのトップダウンの語句の定義は「大きな素材から部分を削り取る」という意味に加えて「狙った形状に作る」という意味を含んでいます。
- ※2 微小光共振器素子：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。
- ※3 光周波数コム：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で、その発明者には 2005 年にノーベル物理学賞が授与された。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」として使うことができる。
- ※4 高 $Q$ 値：光の閉じ込め時間を表す微小光共振器の性能指数の一つ。光共振スペクトルの透過率測定によって評価できる。高い $Q$ 値は光密度を高めることができるため、非線形光学効果の発現にとって重要な要素となる。
- ※4 マイクロコム：微小光共振器内で連続的に非線形光学効果（四光波混合）が発生することによって形成される光コムを指す。その発現には非常に高い $Q$ 値と適切に設計、作製された共振器構造が必要とされる。

※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 電気情報工学科 教授 田邊孝純（たなべ たかすみ）

TEL : 045-566-1730 FAX : 045-566-1529 E-mail : [takasumi@elec.keio.ac.jp](mailto:takasumi@elec.keio.ac.jp)

#### ・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（村上）

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

Email : [m-pr@adst.keio.ac.jp](mailto:m-pr@adst.keio.ac.jp) <https://www.keio.ac.jp/>