プレスリリース

慶應義塾大学

2026 年 2 月 2 日

報道関係者各位

慶應義塾大学

結晶の「複屈折」を逆手に取り、マイクロコムの高出力・高効率化に成功

ー常識を覆す新手法で世界最高水準の出力と変換効率を達成ー

慶應義塾大学大学院理工学研究科の楊柳（博士課程 3 年・研究当時）、同大学理工学部物理学科の小川佳祐（学部 4 年）、藤井瞬助教らの研究グループは、西安交通大学との国際共同研究により、これまで微小光共振器から生成される光周波数コム（マイクロコム）には不利と考えられてきた結晶の光学特性を活用することで、マイクロコムの出力パワーと効率を飛躍的に向上させることに成功しました。
本研究では、単軸光学結晶であるフッ化マグネシウムの複屈折性と、それによって生じる光の振る舞いの変化を巧みに利用し、マイクロコムにおける新たな高出力動作領域を実現しました。これにより、従来は低効率が大きな課題であったソリトンマイクロコムにおいて、15 GHz 帯の高い繰り返し周波数を保ちながら、平均出力約 38 ミリワット、変換効率 28%を達成しました。
本成果は、光増幅器を必要としない高効率かつ低雑音な信号生成を可能とし、次世代通信、精密計測など幅広い分野でのマイクロコム技術の実用性を大きく前進させるものです。

本研究成果は、2026 年 1 月 26 日（日本時間）に、アメリカ物理学会が出版する物理学専門誌 Physical Review Letters に掲載され、特に注目すべき成果として編集部推薦論文「Editors' Suggestion」に選定されました。

１．本研究のポイント

・微小光共振器を用いたマイクロコムにおいて、従来の常識を覆す「高出力・高効率」動作領域を発見。
・繰り返し周波数 15.5 GHz で動作しながら、平均出力最大約 38 mW、変換効率最大 28%という世界最高水準を達成。
・高い光出力により光増幅器を介さずに高効率な光–電気変換が可能となり、低雑音マイクロ波生成や高精度クロック配信に有望な手法。

２．研究背景

光周波数コム（光コム）は、多数のレーザー光が等間隔に並んだ「光のものさし」とも呼ばれる光源であり、高速光通信、精密計測、低雑音マイクロ波生成など、幅広い分野での応用が期待されています。その中でも、微小光共振器を用いて生成されるマイクロコム（マイクロ光コム）は、指先にのるほどのごく小さな光共振器を使って得られる光コムであり「簡便・小型・省エネ・高繰り返し」という実用上の大きな利点をもつレーザー光源として、世界中で研究開発が盛んに行われています。マイクロコムの中でもコヒーレンス性が高く、雑音の低い状態であるソリトンコムは、多くの応用へ適しており社会実装へ向けた取り組みが始まっています。
　しかし、ソリトンコムには、出力光パワーと励起光からの変換効率が低いという根本的な課題があ

りました。特に、数 GHz から数百 GHz の高い繰り返し周波数で動作するソリトンコムでは、励起に用いる連続波レーザー光の大部分が共振器を素通りしてしまい、実際に利用可能なコム光は励起パワーの数%以下、出力にして数ミリワット以下にとどまることが一般的でした。そのため、高性能な応用には外部光増幅器が必要となり、システムの大型化や雑音増大化を招く原因となっていました。

これまで、パルス励起や結合共振器構造などの変換効率を向上させる手法が提案されてきましたが、これらはシステム全体として動作や構成が複雑になるという課題が残されていました。そこで、単純な発生機構を維持したまま、高出力かつ高効率なソリトンコムを実現する新たな物理的指針が求められていました。

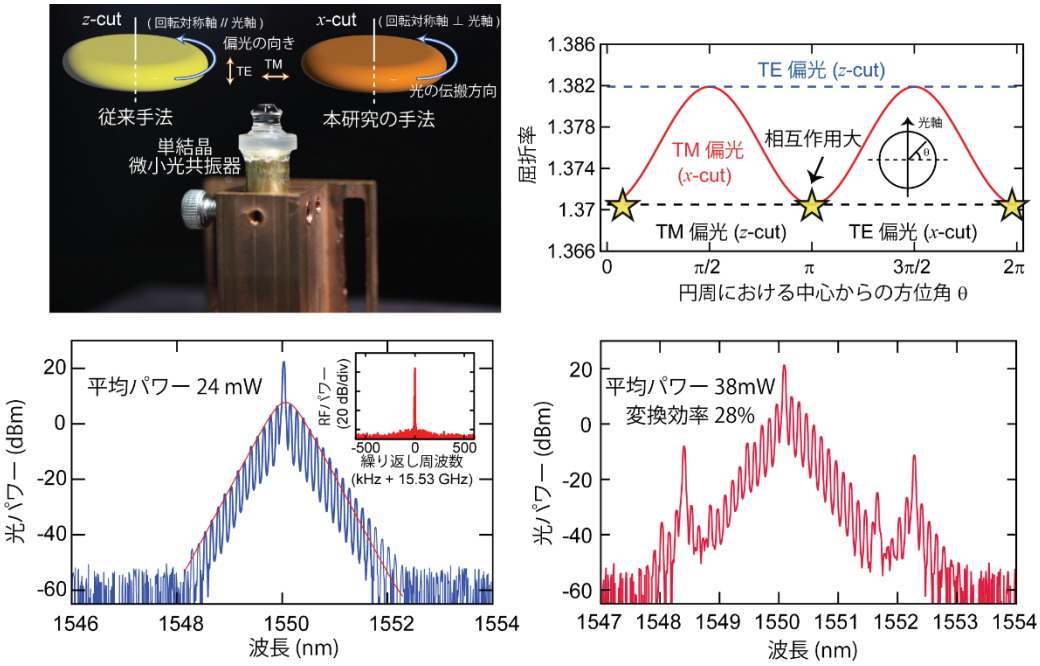

図１：(上)単結晶微小光共振器の写真と本研究手法のポイント。*x* カット共振器では、複屈折性に由来する偏光モード間での強い相互作用が生じる。（下）本研究で実証した高出力・高変換効率なマイクロコムの光スペクトル。

３．研究内容・成果

本研究では、フッ化マグネシウム（MgF_2）単結晶からなる超高 Q 微小光共振器に着目し、結晶がもつ強い複屈折性と、それに起因する光学的特性をあえて積極的に利用することで、これまでにない高出力・高効率のソリトンコムを実現しました。

MgF_2 は複屈折性を有する単軸結晶です。結晶の光軸に対する切り出し方向によって、共振器内を伝搬する光の性質が大きく変化します。従来は、安定したマイクロコム形成を可能にする、光軸と共振器の対称軸が一致する方向に切り出した「*z* カット」共振器が主に用いられてきました。しかし、*z* カット共振器では偏光ごとの屈折率が一定で、波長分散は比較的穏やかなため、ソリトンの出力や変換効率には限界がありました。

これに対し、本研究では光軸が共振器の対称軸と直交する *x* 軸方向に切り出した「*x* カット」共振器を取り入れました。*x* カット共振器では、結晶の複屈折により、光が共振器内を一周する間に特定の偏光モードの屈折率が周期的に変化します。この効果により、偏光モード間で強い相互作用が生じ、共振器の波長分散に大きな歪みが誘起されます。

通常、このような強いモード間相互作用はソリトンコムの形成を妨げる要因と考えられてきましたが、本研究グループは、この現象が特定の波長帯域で局所的な非常に強い異常分散を生み出すことを突き止めました。この局所分散領域をマイクロコム形成に利用することで、ソリトンコムのエネルギーを大幅に増強し、高出力動作を可能にしました。

実験の結果、*x* カット MgF_2 共振器において、繰り返し周波数 15.5 GHz で動作しながら、平均出力最大約 38 mW、変換効率最大 28%に達するマイクロコムの生成に成功しました。得られた光パルスは数ピコ秒のパルス幅を持ち、安定した低雑音動作を示しました。これは、連続波励起型のマイクロコムとして世界最高水準の性能です。さらに、理論解析を行うことで、強い異常分散が出力および変換効率を飛躍的に高めることを明らかにし、実験結果を裏付けました。

４．今後の期待

本研究で実現した高出力ソリトンマイクロコムは、光増幅器を介さずに、高効率で光-電気変換が可能であり、低雑音マイクロ波生成や基準クロック信号分配といった次世代の通信応用に大きな利点をもたらします。また、本技術はレーダー、精密分光、精密周波数合成への応用が期待されます。さらに、本研究で示した設計指針は、他の波長帯や集積型の共振器デバイスにも適用可能であり、実用的な高効率マイクロコムの開発に向けた重要な基盤技術となります。
本成果は、ソリトンコムの基礎物理に対する理解を深めるとともに、マイクロコム技術の社会実装を大きく前進させるものと期待されます。

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）、JST CRONOS(JPMJCS24N6)、慶應義塾大学次世代研究プロジェクトによる支援を受けて行われました。

＜原論文情報＞
タイトル：High-Power Picosecond Pulsed Kerr Soliton Microcombs
著者：Liu Yang (楊柳)、Keisuke Ogawa (小川佳祐)、Ryomei Takabayashi（高林諒明）, Yuta Motontani (元谷祐太)、Tatsuki Murakami (村上達希)、Hajime Kumazaki (熊崎基)、Yongyong Zhuang、Xiaoyong Wei、Shun Fujii（藤井瞬）
原著論文情報：Physical Review Letters **136**, 043802 (2026).　doi: https://doi.org/10.1103/vdrs-2cvt

※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：m-pr@adst.keio.ac.jp　https://www.keio.ac.jp/