特集 2-4

微小光共振器を用いた光周波数コム

Optical Frequency Comb with Optical Microresonator

田邉孝純　藤井　瞬　和田幸四郎　柿沼康弘

abstract

微小光共振器を用いると僅かな光入力でも効率的に四光波混合を引き起こすことができる．微小光共振器の共振モードは周波数に対してほぼ等間隔であり，四光波混合光は共振器モードに沿って発生する．その結果，適切に励起光を制御すれば，光周波数コムを得ることができる．しかし，それを実現するためには，微小光共振器の分散を精密に制御する必要がある．本稿では，微小光共振器による光周波数コム発生に必要となる様々な微小光共振器の種類について紹介したのちに，精密な分散設計手法について紹介する．特に筆者らが進めている機械加工による MgF_2 から成る光共振器の分散制御とそれを用いた光コム発生について重点的に紹介する．

キーワード：光周波数コム，微小光共振器，非線形光学効果，超精密加工

1. は　じ　め　に

1.1　微小光共振器の開発からマイクロコム発生まで

半導体微細加工技術は 1990 年から 2000 年にかけて，エレクトロニクス産業の要請に応えるべく目覚ましい進展を遂げた．微細加工技術の進展は，フォトニクスの分野にも恩恵をもたらし，シリコンフォトニクスや集積フォトニクスなどをはじめとするナノフォトニクス研究分野の興隆へとつながった．ナノフォトニクス研究分野における各種光素子の中でも，光を微小な空間に閉じ込めることができるマイクロメートルサイズの微小光共振器の開発は，光と物質の強い相互作用の実現をもたらし，非線形光学や量子光学等をはじめとする分野で重要な役割を果たした．光は高速なので，物質との相互作用は一般的には小さいが，微小光共振器に光子を閉じ込めることで，それを実効的に強めることができるためである．

角周波数 ω_0 で共振する光共振器の性能は式(1.1)で定義される Q 値で与えられる．

$$Q=\omega_0\frac{U}{P_{\mathrm{out}}}=\omega_0\frac{U}{-\dfrac{dU}{dt}} \tag{1.1}$$

ここで，U は共振器に蓄えられるエネルギー，P_{out} は単位時間当りのエネルギー（パワー）損であり，$P_{\mathrm{out}}=-dU/dt$ である．定常状態では P_{out} は入力パワー P_{in} と等しくなる（$P_{\mathrm{out}}=P_{\mathrm{in}}$）．したがって，光共振器の大きさを V としたとき，共振器内の光子の密度は Q/V に比例するので，高 Q 値でサイズ V の小さな微小光共振器ほど，微弱な光入力 P_{in} でも高い光子密度が実現できる．光と物質の相互作用を究極的に高めることで，非線形光学効果をはじめとする様々な光の機能を発現できる．

1992 年には後に量子光学でノーベル物理学賞を受賞する S. Haroche らが Q 値 10^7 のシリカ微小球共振器を作製しており[1]，その後も半導体チップ上に作製した高 Q 値微小光共振器は共振器量子電磁気学（cavity-QED）

田邉孝純　正員　慶應義塾大学理工学部電気情報工学科
E-mail　takasumi@elec.keio.ac.jp,
藤井　瞬　慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻
E-mail　s.fujii@phot.elec.keio.ac.jp,
和田幸四郎　慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻
E-mail　k.wada@phot.elec.keio.ac.jp
柿沼康弘　慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
E-mail　kakinuma@sd.keio.ac.jp
Takasumi TANABE, Member, Yasuhiro KAKINUMA, Nonmember (Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama-shi, 223-8522 Japan), Shun FUJII, and Koshiro WADA, Nonmembers (Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama-shi, 223-8522 Japan).
電子情報通信学会誌　Vol.103 No.11 pp.1105-1112 2020 年 11 月
©電子情報通信学会 2020

の重要な研究プラットホームとなった[(2)~(4)].

また，微小光共振器を用いると非線形光学効果が効率的に得られるので，非線形光スイッチなどの機能素子が開発された[(5)~(7)]．一方で，非線形光学効果は四光波混合（FWM）も可能とするが，微小光共振器におけるFWM光発生は，2000年にP. Absilらが GaAs/AlGaAs マイクロリングを用いて実験的に実証[(8)]したのに端を発して，2004年にはシリカトロイド微小光共振器を用いた実験が行われ[(9)]，2007年にはP. Del'Hayeらがこのプラットホームを用いた光カーコムの発生を報告した[(10)]．この報告が契機となり，微小光共振器を用いて光周波数コムを発生させる研究が興隆した．微小光共振器を用いて発生させた光周波数コムをマイクロコムと呼ぶ．マイクロコムを発生した一例を図1に示す．

1.2　マイクロコム発生に用いられる微小光共振器

微小光共振器の特徴は以下に三つにまとめられる．

① Q値が高いので非線形光学効果を効率的に得られる
② 小さいので集積化ができる
③ 共振器長が短いので縦モード周波数間隔が広い

これらの性質がマイクロコムを他の光周波数コム光源とは異なる特徴としている．既に①と②については説明したので③について解説する．共振器長 L のリング共振器は $L=m\lambda/n_{\mathrm{eff}}$（$m=1, 2, 3, \cdots$）を満たす光波長 λ で共振する．n_{eff} は共振器の実効的な屈折率である．すなわち，微小光共振器は L が小さいため，自由スペクトル領域（FSR）すなわち，共振周波数間隔（縦モード間隔）が広い．マイクロコムでは，共振器の縦モード間隔に一致して光スペクトルが発生するので，微小光共振器を用いるとスペクトル間隔が広い光周波数コムが得られる．周波数と時間のフーリエ変換の関係を考えれば，これは得られる光パルスが高繰返しであることを意味する．図1の挿入図に示すように，マイクロコムは従来の光周波数コム光源がカバーできなかった高い繰返し周波数領域をカバーする．

2007年に報告されたマイクロコム[(10)]は瞬く間に様々な微小光共振器プラットホーム上で実現されるようになり，現在では，ウィスパリングギャラリーモード（WGM）ウェッジ SiO_2 微小光共振器[(11)]，MgF_2 結晶WGM共振器[(12)]，Si_3N_4 マイクロリング[(12)~(14)]，AlGaAsマイクロリング[(15)]，ファイバフェルールファブリペロー共振器[(16)]等でそれぞれマイクロコム発生が確認され，様々な応用研究がなされている．それぞれの共振器はそれぞれの特徴がある．他文献[(17)]で記載した情報に最新の動向を加えて，詳細を表1にまとめた．また筆者らの研究室で作製または用いている微小光共振器の写真を図2に示す．

2. 分　散　設　計

2.1　微小光共振器の分散とソリトンコム

表1[(10)~(36)]に示したいずれの微小光共振器を用いたとしてもマイクロコムを発生させるためには，共振器の分散を適切に設計しなくてはならない．直感的には，図1に示すスペクトルの各縦モード間の位相がロックできれば，時間領域でパルスが形成されるが，これは共振器内をソリトン光パルスが周回している状態を作り出すことと同義である．この状態をソリトンコムと呼ぶ．

光パルスがソリトンパルスとして周回し続けるためには異常分散が必要である．正常分散の共振器を用いたとしてもダークパルス伝搬によるモードロック[(14)]は実現できるものの，コム生成に必要となる最初のトリガとなる変調不安定性を得るためには，局所的な異常分散が必要である．こうした共振器では単純な分散設計に加えて，異なる導波モード（横モード）の強結合を利用して，共振器の分散を局所的に異常分散に設計するなどの高度な分散設計が必要となる．近年この手法は，所望の

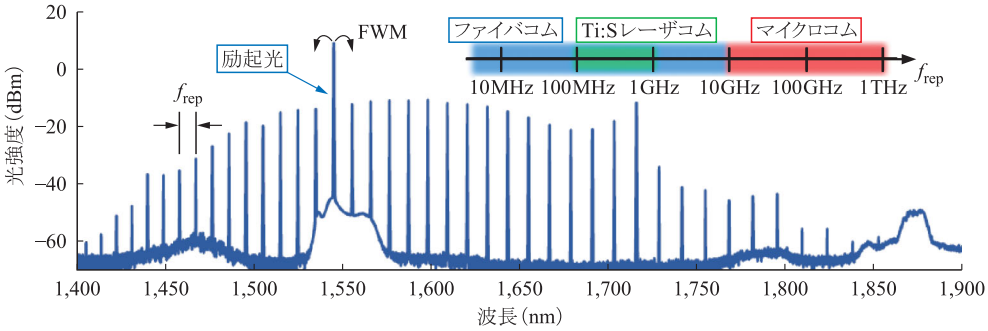
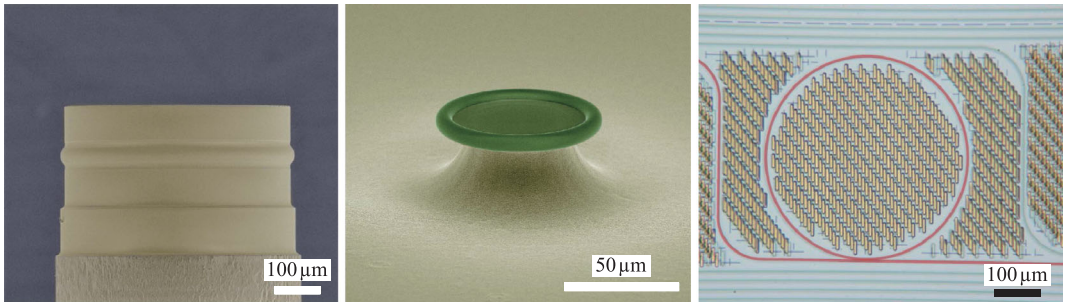


図1　シリカトロイド微小光共振器を用いて発生させた光周波数コム（マイクロコム）の例　1,550 nm帯の連続励起光源を発端とし，共振器の縦モードに一致した波長において連続的にFWM光が生成することで，光コムスペクトルが得られる．挿入図は異なる光周波数コム技術がカバーする光パルスの繰返し周波数．

表1　マイクロコム研究に用いられる微小光共振器プラットホーム[17]

タイプ	種類	材料	Q 値（typ.）	特徴
WGM 共振器	トロイド共振器	SiO_2	1.25×10^8	カーコムが初めて報告されたプラットホームであり，初期研究の多くがこの素子を用いて行われた[10]．分散制御ができないため，現在ではほとんど用いられていない．
	ウェッジ共振器	SiO_2	8.75×10^8	2012 年に開発され[11]，レーザリフロプロセスなしで高 Q 値が得られるため注目された．共振器サイズは mm オーダである．2015 年にソリトン化が報告され[18]．近年 f-$2f$ 自己干渉による外部レーザへの同期が達成された[19]．更にストークソリトンなどの波長帯域の拡大[20]や SiN 共振器との同期が実現されている[21]．
	ロッド共振器	SiO_2	1×10^9	2013 年に開発され[22]，2017 年にソリトン結晶状態が達成された[23]．共振器直径は数 mm 程度と大きい．
	結晶共振器	MgF_2	3×10^9	ソリトン状態に到達するための波長掃引手法が開発された際に用いられた素子である．微小共振器におけるソリトン状態が初めて達成された共振器である[12]．従来は研磨加工で作製されてきたが，近年機械加工による精密設計が可能となった[24]．
マイクロリング共振器		Si_3N_4	7×10^6	チップ集積が期待されているため，ソリトン化[12]～[14]，自己干渉による周波数安定化[25]，大容量コヒーレント光通信応用等[26]，研究が最も進んでいる素子といえる．Q 値も向上してきており極めて低パワーでのマイクロコム発生が報告されている[27],[28]．
		Hydex ガラス	1.2×10^6	SiO_2 と比べて非線形性が高く，0.06 dB/cm の低伝搬損も実現されている．光ファイバとの結合も良好で，ソリトン結晶が実現されており，一部のグループではそれを活用して精力的に光通信研究を進めている[29]．
		AlN	4.4×10^5	高非線形性が期待される材料であり，2013 年に光カーコム発生が報告されている[30]．近年 Q 値が向上してきており，透過スペクトルの広さもあり，$\chi^{(2)}$ 効果を用いた OPO[31] や広帯域なコム発生が報告されている[32] 注目の材料である．
		AlGaAs	2×10^5	光カーコム発生が実現できているが[15]，これまで二光子吸収を防ぐためにバンドギャップを広くとるためには Al 成分を高くする必要があり，作製が困難であった．近年作製技術が向上し，非線形性が強く光コム発生に必要な透過帯域を有した材料として注目されている[33]．
		$LiNbO_3$	1×10^6	$LiNbO_3$ は古い材料であるが，近年シリコンチップ上に薄膜形成できることから注目されている．大きな $\chi^{(2)}$ も得られるので電気光変調コムも実現されている[34]．光カーコム発生も報告されており[35]，バルク型の WGM 共振器では $\chi^{(2)}$ 効果を連続的に引き起こしてコムを発生させる実験が行われており，赤外や可視光への波長帯域拡大に期待される材料である[36]．
ファブリペロー共振器	ファイバ端面	SiO_2	3×10^7	共振器の FSR に同期したパルス励起を用いてソリトンパルスを発生させた研究報告に用いられた[16]．



(a) 機械切削で作製した MgF_2 結晶 WGM 共振器　(b) シリカトロイド微小光共振器　(c) Si_3N_4 マイクロリング共振器

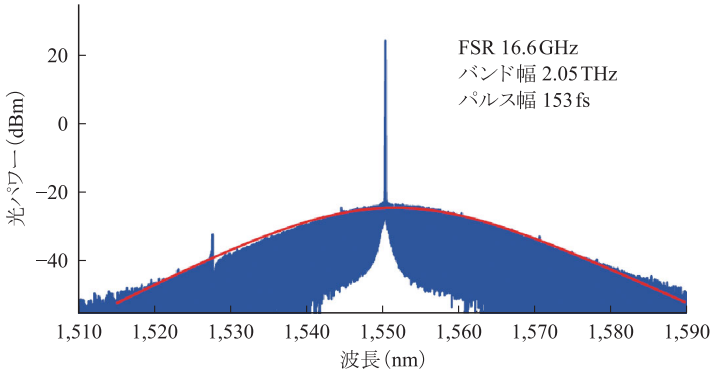
図2　微小光共振器

FSR 間隔を持つソリトン結晶と呼ばれる状態を生成するために用いられている[23]．

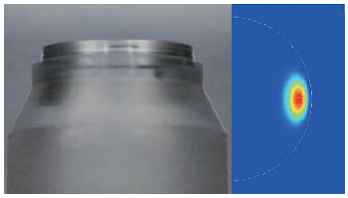
2.2　MgF_2 結晶 WGM 共振器の分散設計

一例として MgF_2 結晶 WGM 共振器における分散設計の例を示す[37]．図 3(a)，(b) に断面形状が球面の MgF_2 共振器を用いて発生したマイクロコムのスペクトルを示す．この共振器は比較的大きいので異常分散が実現できており，ソリトンマイクロコムが得られている．

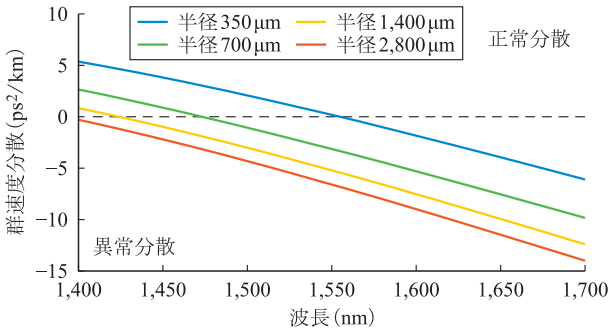
次に，得られる出力光パルスの高繰返し化を目指すために，より小さな微小光共振器を目指す．微小球共振器の半径を変化させたときの分散を図 3(c) に示す．FSR が 100 GHz を目指すには，半径～350 μm が必要であるが，このサイズでは通信波長帯において正常分散となっ



(a) FSRが16.6 GHzのMgF_2共振器で発生したソリトンコム



(b) 共振器の写真と共振器モードの断面プロファイル



(c) 微小光共振器(MgF_2)の分散

図 3　MgF_2 結晶 WGM 共振器

てしまう．つまり，これでは 100 GHz の繰返し周波数のマイクロコムは得られないことになる．

そこで，微小光共振器の断面形状を制御することで，構造分散を設計して異常分散を実現する．WGM 微小光共振器の分散設計は，直線導波路モードの分散がそのまま共振器の分散となる単一モードマイクロリング共振器の分散設計の思想とは若干異なる．

通常，構造分散は光のコアとクラッドの染み出し割合に波長依存性があることに起因すると考えられている．それは WGM 微小光共振器でも例外ではないが，それに加えて，電界モードの，回転対称中心軸からの距離に波長依存性があることが大きく寄与する．図 4(a)～(d) に構造を変化させたときの電界分布を示すが，この例では台形上底の幅が狭いほど，電界強度分布の中心位置の波長依存性が大きく，それが異常分散化に大きく寄与する．この自由度も持つので，WGM 共振器では分散を大きく変化できる可能性がある[37]．

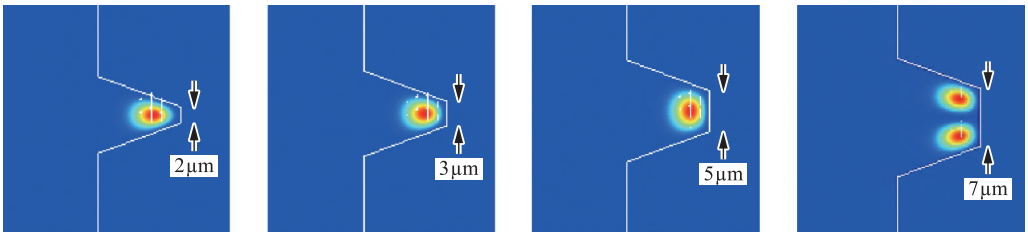
図 4(e) に台形の上底の幅を 5 μm に固定して内角を変化させたときの分散計算結果を示す．角度を小さくしていくと（方形に近づけていくと），異常分散へ傾いていくことが分かる．電界モードの位置を詳細に見ると，波長によって電界の中心位置がずれる効果が大きく寄与していることが分かる．

2.3　共振器の精密加工による作製

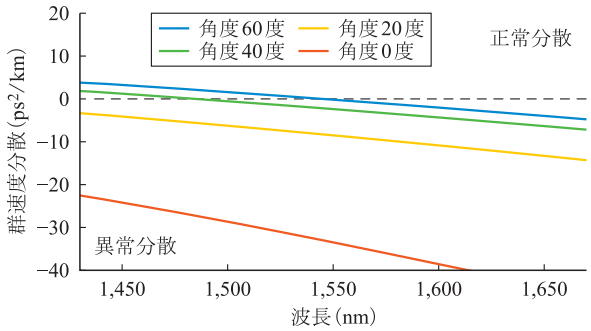
分散設計した構造を作製するのは容易ではない．WGM 共振器で高 Q 値を得るためには表面を滑らかにしなくてはならないので，従来はレーザリフロまたは研磨を利用して作製されてきた．しかしこの手法では構造を任意に調整することができなので，精密な分散設計が難しい．

現在分散設計が可能なのは，半導体のプロセスを用いることができるマイクロリング[12]～[15], [30]，及びウェットエッチングで構造形状を調整可能なウェッジ共振器[11]である．MgF_2 共振器は広帯域な波長に対して材料が透明であるという優れた特徴があるが，これまでは研磨で作製しなくてはならず，分散設計が容易ではなかった．そこで，筆者らは，超精密加工技術を導入して，微小光共振器を作製する技術を開発している（図 5(a)）[24]．

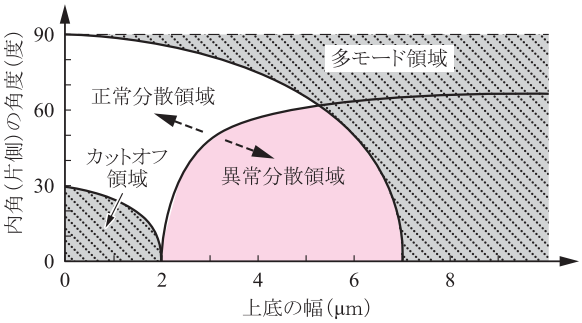
MgF_2 結晶は堅くもろいが，材料への切り込み深さを精密に制御して延性加工モードと呼ばれる加工を行うと滑らかな表面形状の共振器が切削加工のみで作製できる．切削加工は nm オーダの位置決め精度を持つコンピュータ制御で行われるので，共振器形状を極めて精密に制御できる．作製した共振器を図 2(a) に，得られた分散を図 5(b) に示す．設計値と実験で得られた分散値が正確に一致していることが見て取れる．またこの共振器の Q 値は$>10^8$ であった[24]．



(a)　(b)　(c)　(d)

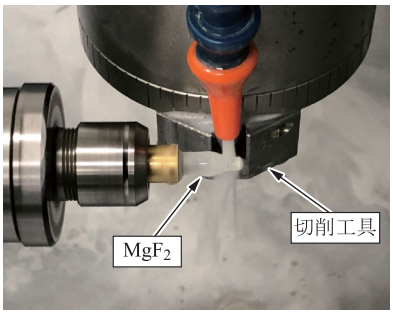


(e)幅5μmの台形構造の角度を変化させたときの分散

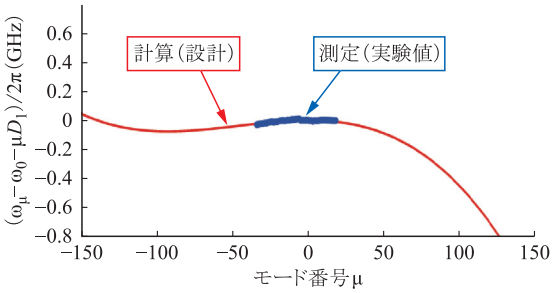


(f)異常分散が得られる領域を示した概略図

図4　MgF_2 結晶 WGM 共振器の分散設計　(a)～(d)半径 350 μm の MgF_2-WGM 光共振器において，高さ 10 μm，20 度の角度を持った台形構造の幅を変化させたときの電界モード分布．(e)角度 0 度は方形形状に対応する．(f)上記の台形断面形状の WGM 共振器の上底の幅と内角の角度をパラメータとしたときに，単一モードかつ異常分散が得られる領域を示した概略図．



(a)MgF_2共振器の超精密加工による切削加工



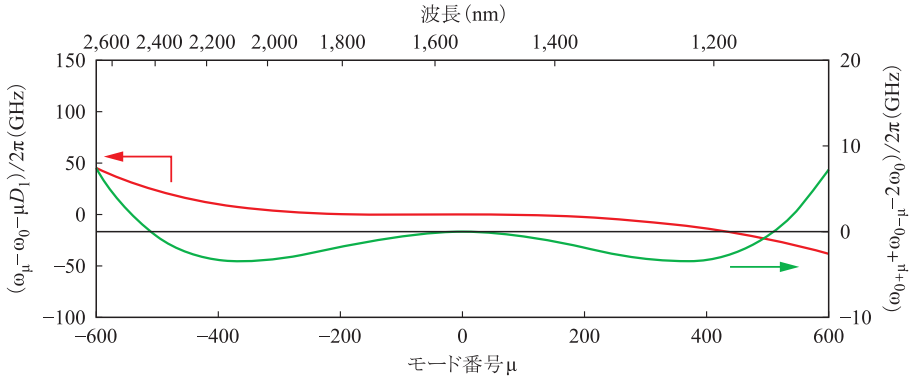
(b)設計した分散と測定結果

図5　MgF_2 結晶 WGM 共振器の切削加工による作製

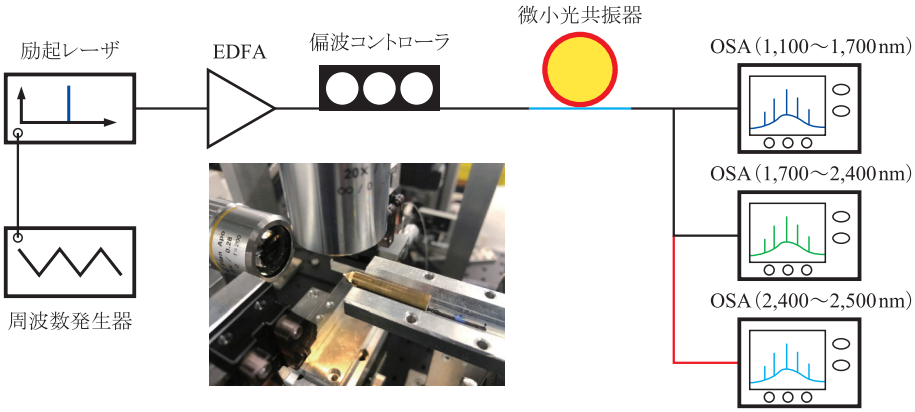
2.4　共振器の精密加工による作製

精密に分散制御した微小光共振器を用いれば，FWM 光発生を高度に制御できる．二次分散と四次分散が逆となるように分散を設計すると，励起光から遠く離れた波長で縮退 FWM 光を生成できる．図6(a)に二次分散を正に四次分散を負に設計した微小光共振器の分散と位相整合を示す．四次分散が二次分散を補償する形となるので，励起光モードから遠く離れた波長で位相整合が取れる．この共振器では励起光のモード番号を 0 としたときにモード番号 ±500 付近で位相整合が取れている．

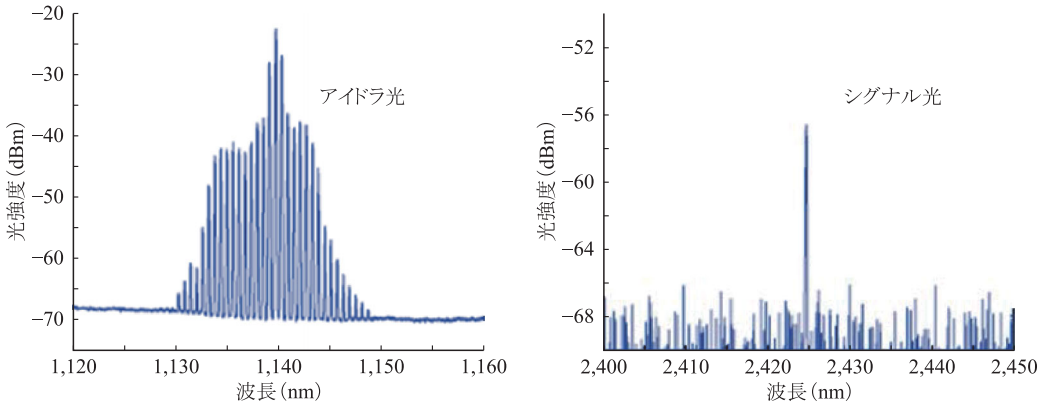
これを利用すると，広い波長範囲で微小な光パラメトリック光源（OPO）を実現することができる．実験セットアップを図6(b)に示す．連続光で微小光共振器を励起しその出力を光スペクトルアナライザで測定した．そのときに得られたアイドラとシグナル光をそれぞれ図6(c)及び(d)に示す．予測されたとおりに励起光波長から遠く離れた波長の光が生成できていることが確認された．また，この波長は入力光の波長を僅かに変化させるだけで大きく変化させることができる[38]．



(a)図5で作製した微小光共振器の分散(左軸)とFWM光発生に必要な位相整合条件(右軸)



(b)OPO発生のための実験セットアップ



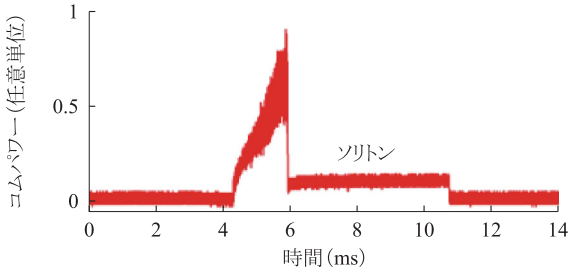
(c)アイドラ光　(d)シグナル光

図6　分散設計された MgF_2 結晶 WGM 共振器による光パラメトリック発振　(c)，(d)1,549.47 nm の光波長で励起したときに発生したアイドラ光とシグナル光.

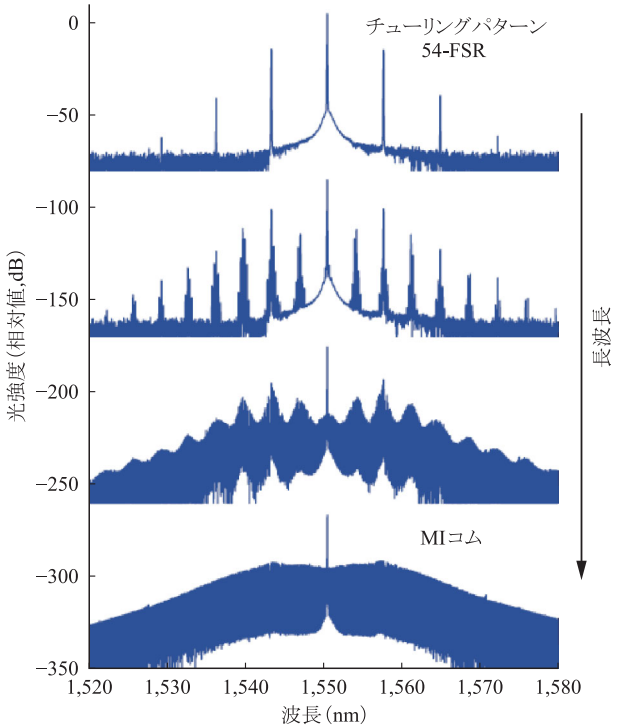
3. マイクロコム発生

3.1 マイクロコム発生

既に図3(a)に MgF_2 結晶 WGM 共振器を用いて発生したソリトンコムの結果を示した．ソリトンコムを発生させるためには，励起光の波長を共振器の共振器モードの短波長側から長波長側に沿って波長掃引する必要がある．出力光コムの強度をモニタしながら，励起レーザを 10 MHz/ms の速度で掃引した結果が図7(a)である．掃引中に生成する光コムの様子を捉えたのが図7(b)である．励起光が共振波長に十分近づくと，FWM しきい値を超えるので光コムが発生する．最初はチューリングパターンコムと呼ばれる状態からスタートし，変調不安定(MI : Modulation instability) コムと呼ばれる状態をとる．励起レーザの波長が共振波長に対して実効的に長波長側となった瞬間に，図7(a)に示すように透過率がステップ状に低下して図3(a)に示すようなソリトンコム状態が得られる．



(a)励起波長を短波長から長波長に沿って3MHz/msの速度で掃引したときの出力光コム強度の変化



(b)掃引中に発生する光周波数コムの様子

図7　ソリトン光コムの発生　　詳細は本文に解説している．

3.2　マイクロコムの通信応用

マイクロコム応用では多くの場合，ソリトンコム状態が最適と考えられているが，実はそれは応用による．例えば，マイクロコムを光通信用光源として用いる場合，光周波数が安定している必要があるので，最も雑音が低いソリトンコムは最適と考えられる．しかしトレードオフも存在し，ソリトンコムでは得られる出力光パワーが弱いという問題がある（図3(a)）．そこで，MIコムを利用すれば，励起光付近で約20 dBも高い光パワーが得られるのでSN比を大きくとることができる．得られる光コム強度はファイバコムのそれと比較しても高い．加えて，図7(b)に示されているように，MIコムはCバンド帯においてスペクトル包絡線強度がフラットな特性となっており，これも光通信応用には適している．

当然ながらMIコムの雑音が気になるが，筆者らがSi_3N_4マイクロリング共振器を用いて同様の実験を行い，得られるMIコムの一本一本のスペクトル線幅を測定したところ，線幅は約100 kHzと励起光源と遜色なく，光通信応用には十分な特性が得られていることが確認できている[39]．このように用途に応じて異なるコム状態を利用すると，従来光源を凌駕するような特性が得られる．

4. ま　と　め

本稿では光周波数コム光源を小形集積が可能なマイクロコムに焦点を当てて解説した．マイクロコムはその用いるプラットホーム（微小光共振器）によって特徴が大きく変わる．

一方で微小光共振器内の非線形光学効果を高度に制御するためには精密な分散設計が必要であり，その取組みについても紹介した．分散が異なれば異なる状態のコムが得られ，応用も大きく変わる．

本稿が国内のマイクロコム研究の興隆につながることを願う．

本研究の一部はQ-LEAP「光量子科学によるものづくりCPS化拠点」及びJSPS科研費JP19H00873の助成を受けた．

文　　献

(1) L. Collot, V. Lefèvre-Seguin, M. Brune, J.M. Raimond, and S. Haroche, "Very high-Q whispering-gallery mode resonances observed on fused silica microspheres," Europhys. Lett., vol. 23, no. 5, pp. 327-334, 1993.

(2) T. Yoshie, A. Scherer, J. Hendrickson, G. Khitrova, H.M. Gibbs, G. Rupper, C. Ell, O.B. Shchekin, and D.G. Deppe, "Vacuum Rabi splitting with a single quantum dot in a photonic crystal nanocavity," Nature, vol. 432, pp. 200-203, 2004.

(3) T. Aoki, B. Dayan, E. Wilcut, W.P. Bowen, A.S. Parkins, T.J. Kippenberg, K.J. Vahala, and H.J. Kimble, "Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator," Nature, vol. 443, pp. 671-674, 2006.

(4) J.L. O'Brien, A. Furusawa, and J. Vučković, "Photonic quantum technologies," Nat. Photonics, vol 3, no. 12, pp. 687-695, 2009.

(5) V.R. Almeida, C.A. Barrios, R.R. Panepucci, and M. Lipson, "All-optical control of light on a silicon chip," Nature, vol. 431, pp. 1081-1084, 2004.

(6) T. Tanabe, M. Notomi, S. Mitsugi, A. Shinya, and E. Kuramochi, "All-optical switches on a silicon chip realized using photonic crystal nanocavities," Appl. Phys. Lett., vol. 87, no. 15, 151112, 2005.

(7) W. Yoshiki and T. Tanabe, "All-optical switching using Kerr effect in a silica toroid microcavity," Opt. Express, vol. 22, no. 20, pp. 24332-24341, 2014.

(8) P.P. Absil, J.V. Hryniewicz, B.E. Little, P.S. Cho, R.A. Wilson, L.G. Joneckis, and P.-T. Ho, "Wavelength conversion in GaAs micro-ring resonators," Opt. Lett. vol. 25, no. 8, pp. 554-556, 2000.

(9) T.J. Kippenberg, S.M. Spillane, and K.J. Vahala, "Kerr-nonlinearity optical parametric oscillation in an ultrahigh-Q toroid microcavity," Phys. Rev. Lett., vol. 93, no. 8, 083904, 2004.

(10) P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, and T. Kippenberg, "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator," Nature, vol. 450, pp. 1214-1217, 2007.

(11) H. Lee, T. Chen, J. Li, K.Y. Yang, S. Joen, O. Painter, and K. Vahala, "Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip," Nat. Photonics, vol. 6, pp. 369-373, 2012.

(12) T. Herr, V. Brasch, J. Jost, C. Wang, N. Kondratiev, M. Gorodetsky, and T. Kippenberg, "Temporal solitons in optical microresonators," Nat. Photonics, vol. 8, pp. 145-152, 2014.
(13) D. Moss, R. Morandotti, A. Gaeta, and M. Lipson, "New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics," Nat. Photonics, vol. 7, pp. 597-607, 2013.
(14) X. Xue, Y. Xuan, Y. Liu, P. Wang, S. Chen, J. Wang, D. Leaird, M. Qi, and A.M. Weiner, "Mode-locked dark pulse Kerr combs in normal-dispersion microresonators," Nat. Photonics, vol. 9, pp. 594-600, 2015.
(15) M. Pu, L. Ottaviano, E. Semenova, and K. Yvind, "Efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator," Optica, vol. 3, no. 8, pp. 823-826, 2016.
(16) E. Obrzud, S. Lecomte, and T. Herr, "Temporal solitons in microresonators driven by optical pulses," Nat. Photonics, vol. 11, no. 9, pp. 600-607, 2017.
(17) 田邉孝純，鈴木　良，藤井　瞬，久保田啓寛，堀　敦裕，"微小光共振器によるマイクロコム発生，" レーザー研究，vol. 46, no. 2, pp. 86-91, 2018.
(18) X. Yi, Q. Yang, K. Yang, M. Suh, and K. Vahala, "Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator," Optica, vol. 2, no. 12, pp. 1078-1085, 2015.
(19) P. Del'Haye, A. Coillet, T. Fortier, K. Beha, D. Cole, K. Yang, H. Lee, K. Vahala, S. Papp, and S. Diddams, "Phase-coherent microwave-to-optical link with a self-referenced microcomb," Nat. Photonics, vol. 10, pp. 516-520, 2016.
(20) Q. Yang, X. Yi, K. Yang, and K. Vahala, "Stokes solitons in optical microcavities," Nature Phys., vol. 13, pp. 53-57, 2017.
(21) D.T. Spencer, T. Drake, T.C. Briles, J. Stone, L.C. Sinclair, C. Fredrick, Q. Li, D. Westly, B.R. Ilic, A. Bluestone, N. Volet, T. Komljenovic, L. Chang, S.H. Lee, D.Y. Oh, M.-G. Suh, K. Y. Yang, M.H.P. Pfeiffer, T.J. Kippenberg, E. Norberg, L. Theogarajan, K. Vahala, N.R. Newbury, K. Srinivasan, J.E. Bowers, S.A. Diddams, and S.B. Papp, "An optical-frequency synthesizer using integrated photonics," Nature, vol. 557, pp. 81-85, 2018.
(22) P. Del'Haye, S. Diddams, and S. Papp, "Laser-machined ultra-high-Q microrod resonators for nonlinear optics," Appl. Phys. Lett., vol. 102, no. 22, 221119, 2013.
(23) D. Cole, E. Lamb, P. Del'Haye, S. Diddams, and S. Papp, "Soliton crystals in Kerr resonators," Nat. Photonics, vol. 11, no. 10, pp. 671-676, 2017.
(24) S. Fujii, Y. Hayama, K. Imamura, H. Kumazaki, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, "All-precision-machining fabrication of ultrahigh-Q crystalline optical microresonators," Optica, vol. 7, no. 6, pp. 694-701, 2020.
(25) V. Brasch, E. Lucas, J. Jost, M. Geiselmann, and T. Kippenberg, "Self-referenced photonic chip soliton Kerr frequency comb," Light Sci. Appl., vol. 6, e16202, 2017.
(26) P. Marin-Palomo, J.N. Kemal, M. Karpov, A. Kordts, J. Pfeifle, M.H.P. Pfeiffer, P. Trocha, S. Wolf, V. Brasch, M.H. Anderson, R. Rosenberger, K. Vijayan, W. Freude, T.J. Kippenberg, and C. Koos, "Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications," Nature, vol. 546, p. 274, 2017.
(27) B. Stern, X. Ji, Y. Okawachi, A.L. Gaeta, and M. Lipson, "Battery-operated integrated frequency comb generator," Nature, vol. 5672, pp. 401-405, 2018.
(28) J. Liu, A.S. Raja, M. Karpov, B. Ghadiani, M.H.P. Pfeiffer, B. Du, N.J. Engelsen, H. Guo, M. Zervas, and T.J. Kippenberg, "Ultralow-power chip-based soliton microcombs for photonic integration," Optica, vol. 5, no. 10, pp. 1347-1353, 2018.
(29) B. Corcoran, M. Tan, X. Xu, A. Boes, J. Wu, T.G. Nguyen, S.T. Chu, B.E. Little, R. Morandotti, A. Mitchell, and D.J. Moss, "Ultra-dense optical data transmission over standard fibre with a single chip source," Nat. Comm., vol. 11, 2568, 2020.
(30) H. Jung, C. Xiong, K. Fong, X. Zhang, and H. Tang, "Optical frequency comb generation from aluminum nitride microring resonator," Opt. Lett., vol. 38, no. 10, pp. 2810-2813, 2013.
(31) A.W. Bruch, X. Liu, J.B. Surya, C.-L Zou, and H.X. Tang, "On-chip $\chi^{(2)}$ microring optical parametric oscillator," Optica, vol. 6, no. 10, pp. 1361-1366, 2019.
(32) J. Liu, H. Weng, A.A. Afridi, J. Li, J. Dai, X. Ma, H. Long, Y. Zhang, Q. Lu, J.F. Donegan, and W. Guo, "Photolithography allows high-Q AlN microresonators for near octave-spanning frequency comb and harmonic generation," Opt. Express, vol. 28, no. 13, pp. 19270-19280, 2020.
(33) L. Chang, W. Xie, H. Shu, Q.-F. Yang, B. Shen, A. Boes, J.D. Peters, W. Jin, C. Xiang, S. Liu, G. Moille, S.-P. Yu, X. Wang, K. Srinivasan, S.B. Papp, K. Vahala, and J.E. Bowers, "Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators," Nat. Comm., vol. 11, 1331, 2020.
(34) M. Zhang, B. Buscaino, C. Wang, A.S.-Ansari, C. Reimer, R. Zhu, J.M. Kahn, and M. Lončar, "Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator," Nature, vol. 568, pp. 373-377, 2019.
(35) C. Wang, M. Zhang, M. Yu, R. Zhu, H. Hu, and M. Loncar, "Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation," Nat. Comm., vol. 10, 978, 2019.
(36) J. Szabados, D.N. Puzyrev, Y. Minet, L. Reis, K. Buse, A. Villois, D.V. Skryabin, and I. Breunig, "Frequency comb generation via cascaded second-order nonlinearities in microresonators," Phys. Rev. Lett., vol. 124, 203902, 2020.
(37) S. Fujii and T. Tanabe, "Dispersion engineering and measurement of whispering gallery mode microresonator for Kerr frequency comb generation," Nanophotonics, vol. 9, no. 5, pp. 1087-1104, 2020.
(38) S. Fujii, S. Tanaka, M. Fuchida, H. Amano, Y. Hayama, R. Suzuki, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, "Octave-wide phase-matched four-wave mixing in dispersion engineered crystalline microresonators," Opt. Lett., vol. 44, no. 12, pp. 3146-3149, 2019.
(39) T. Ohtsuka, S. Fujii, H. Kumazaki, K. Wada, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, "Generation of Kerr frequency comb aligned with ITU-T DWDM grid for telecom applications," proc. CLEO : 2020, JTh2A. 163, May 2020.

（2020 年 7 月 7 日受付）

田邉（たなべ）　孝純（たかすみ）（正員）
2004 慶大大学院理工学研究科総合デザイン工学後期博士課程了，博士（工学）．同年日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所入社．2010 から慶大・理工・電子工・（現電気情報工学科）専任講師．准教授を経て，2018 から同教授，現在に至る．

藤井（ふじい）　瞬（しゅん）
2016 慶大・理工・電子卒．2018 同大学院理工学研究科総合デザイン工学修士課程了，同年 4 月から同大学院後期博士課程在籍．同時に日本学術振興会特別研究員（DC1）．

和田（わだ）　幸四郎（こうしろう）
2020 慶大・理工・電子工卒．同年 4 月から同大学院理工学研究科総合デザイン工学修士課程在籍．

柿沼（かきぬま）　康弘（やすひろ）
2006 慶大大学院理工学研究科総合デザイン工学後期博士課程了，博士（工学）．2005 から慶大・理工・システムデザイン工・助手，専任講師，准教授を経て，2019 から同教授，現在に至る．