

令和元年6月6日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05429

研究課題名(和文) 微小光共振器を用いた省エネルギー光周波数コム光源開発

研究課題名(英文) Study on energy-saving optical frequency comb source based on an optical microcavity

研究代表者

田邊 孝純 (Tanabe, Takasumi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：40393805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,200,000円

研究成果の概要(和文)：微小光共振器を用いた光周波数コムに関する研究において、分散設計された微小光共振器の作製が可能となった結果、所望の波長帯に光カーコムを発生させることができるようになった。加えて、微小光共振器中の誘導ラマン散乱や光輻射圧と光コム発生との関係を明らかにした。また光コム利用で重要となるモードロック状態を得るため手法について研究し、その現象が共振器の光双安定性と密接に関連していること、入力パワーを上げ下げすることで、ソリトン状態と呼ばれる、共振器がモードロックした状態が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光周波数コムは距離計測、大気計測、周波数基準や光通信など様々な応用が期待されているが、従来は装置も大きく高価であった。チップ集積も可能となるような微小光共振器を用いて光周波数コムを発生出来れば、光周波数コム光源を実験室から持ち出して、基礎研究のみに留まらず様々な応用に用いることができる。一方で、微小光共振器中では様々な非線形光学効果が生じることから、光周波数コムを制御することは、すなわちそれらの非線形光学効果の高度な制御が必要となることを意味しており、本研究を進めることは学術的にも価値が高い。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated that a dispersion controlled high-Q micro-cavity fabrication is possible by using ultra-precision machining. As a result, we successfully demonstrated Kerr comb generation at designed wavelength regime. We also studied and revealed the relationship between the generation of the Kerr comb and stimulated Raman scattering and optical-radiation effects. We also studied on the method to obtain the soliton state, and revealed the method is closely related to the optical bistable behavior of a cavity system, and demonstrated that a soliton state is possible to obtain when we increase and decrease the input power.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光周波数コム 微小光共振器 ナノフォトニクス 超高速光技術

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光周波数コムは楕状のスペクトルが等間隔に分布する光源であり、超高速・広帯域という時間領域の特徴と、周波数精度が高いという周波数領域の特徴を有する。そのため、精密光周波数計測や高精度分光への応用が期待される。しかし光周波数コムが発生には、3次の光学非線形効果を利用するので、高価な固体レーザーやファイバーレーザーが必要とされる。これでは、コム光源をセンサーや光通信応用に用いるにはあまりにもサイズが大きく、省エネルギーでもない。一方で微小光共振器は小さな空間に強く光を閉じ込め、光と物質の相互作用を増強でき、微弱な光入力でも効率的に非線形光学効果を利用できる。

微小光共振器を用いると他の装置では得られない超高速繰り返し光パルス列が得られる。海外ではSiNマイクロリング共振器を用いたモードロックパルス発生への報告はあるが、タイミングジッタ制御が達成できていない。このように、現在までに得られている微小光共振器における光カーコムでは、モード同期のタイミングジッタが大きく発生が不安定であり、その原因も完全には明らかにはされていない。

2. 研究の目的

光周波数コム光源は周波数標準器や超高精度分光への応用が期待されるが、固体レーザーやファイバーレーザーを必要とし装置が大がかりになってしまう。コム光源は時間領域では繰り返し光パルス列となるので、その高繰り返し化も試みられているが、それも装置を複雑にしてしまう。その一方で、全く異なる研究としてチップ集積が可能な高Q値微小光共振器の開発がある。近年その高性能化が進み、微小な入力光でも効率的に非線形光学効果が得られるようになり、様々な光機能が微弱な入力光で実現されるようになってきた。

そこで本研究では、光カー効果を利用して発生する光周波数コムに、この高Q値微小光共振器を用いることに着目しシリコンチップ上に集積した微小光共振器による光周波数コム光源を開発する。微小光共振器を用いることで、光源の超小型化・超省エネルギー化・超高速繰り返し化を実現する。光コム光源がフィールドで利用できれば、環境センサーやアクセス網用光源などへの用途を切り拓ける。

前述の研究開始当初の背景を踏まえ、本研究期間中には具体的には下記のことを明らかにすることとした。

(1) 微小光共振器中のモードロック機構の解明

周波数安定性を議論するためには、熱光学効果やラマン散乱の検討が必要である。加えて、周波数の分解能が可変な計算手法を新たに開発して、時間周波数解析を可能とし、微小光共振器における周波数安定性の定量的な理解を得る必要がある。光カー効果を考慮したモデルで、実験と理論を比較しながら、これらの検討を進める。

(2) 分散補償による光コム帯域化等による光コムにおける非線形光学効果の解明

共振器をゼロ分散にすることができれば光コム帯域の拡大が期待されるので、共振器の断面形状を適切に設計することで、構造分散を設計し帯域改善を目指す。

(3) タイミングジッタ低減やパッケージング化による光源の高機能化

固体レーザーで実装されているフィードバック制御を適用し改善を図る。また波長安定化光源への光周波数の同期を実現させる。これは自己参照光周波数コム実現の基本技術の蓄積につながる。さらに、チップ集積された微小光共振器は持ち運びが可能であるが、そのためには入力光ファイバとパッケージングする必要がある。そこで実験室外に光コム光源を持ち出すための技術を蓄積する。

3. 研究の方法

光共振器のモード間の相互作用は一般的には結合モード理論(CMT)が用いられるが、我々の計算は非線形ファイバ伝搬で広く用いられる、Lugiato-Lefever 式をスプリットステップフーリエ法(SSM)で解くモデルを基本としているので、熱光学効果(TO)やラマン散乱を考慮できる。そこで、特に誘導ラマンの効果を取り入れて、その効果について調査を行った。

シリカ微小光共振器は集積性に優れる。しかし光の入出力には数100nmまで細くした光ファイバを適切な位置に保持しなくてはならず、持ち運ぶためには素子と光ファイバの一体化が必要であるので、関連する技術の開発を進めた。

さらに微小光共振器を用いた光周波数コム基礎を明らかとする。特にモードロックの機構や、誘導ラマン散乱の影響、さらには光と輻射圧の関係等を明らかにするために、微小光共振器中での非線形光学効果の詳細について様々な角度から調査を進めた。

また、独自技術落として、共振器の超精密加工を利用した作製を進め、高Q値と高精度な分散設計の両方を実現させた。さらに、作製した共振器の精密な分散を測定しなくてはならないので、その分散測定技術の開発も行った。

4. 研究成果

4. 1. 光カーコムのシミュレーションモデルの構築

光カーコムのシミュレーション手法の一つが非線形結合モード理論(NCME: Nonlinear Coupled Mode Equations)を用いる方法である。NCMEは各コムモードの複素電界振幅が緩慢変化包絡線 (slowly-varying envelope: SVE) として近似できることを前提としており、任意の縦モード数に対して非線形モード方程式を立式し、それらを結合方程式として連立することで、光スペクトル発展と、スペクトルのフーリエ変換に対応する時間波形を逐次計算する手法である。非線形結合モード方程式は $|a_\mu|^2$ が各モードの光子数で規格化されるコムモード a_μ の微分方程式として次のように立式される。

$$\frac{da_\mu}{dt} = -\left[\frac{\gamma}{2} + i(\omega_\mu - \omega_0 + \Delta - \mu D_1)\right] a_\mu + ig \sum_{j,k} a_j a_k a_{j+k-\mu}^* + f \delta_\mu$$

ここで t は時間、 $\gamma = \omega_0/Q = \omega_0/Q_{\text{int}} + \omega_0/Q_{\text{ext}}$ は共振器 Q 値に対応する共振器ロス、 ω_μ は各モードの共振周波数、 $\Delta = \omega_0 - \omega_p$ は励起される共振周波数と入力周波数の差であるデチューニングを表している。このとき添字 μ は励起される共振周波数($\mu=0$)を基準としたときのモード番号を表しており、共振器の共振モードは次の式で与えられる。詳細の解説はここでは行わないが、この方程式を4次のルンゲクッタ法などを用いて解くことで、共振器内の電界を計算で求めることができる。またFFTによる高速化手法が提案されており、この手法を用いることで計算コストが低減できる。

カーコムシミュレーションのもう一つの手法がLLEを利用する方法である。LLEはNLSEを共振器モデルに拡張したモデルであり、デチューニング項と外部入力項が存在する点がNLSEと異なる。数学的には、LLEにおいてはこの2つの項が存在するために解析的にソリトン解を求めることが不可能となる点がNLSEとは異なる。NCMEは各コムモードの時間発展がそれぞれの方程式で表されるのに対してLLEは共振器一周の境界条件の下に、場全体の変化を計算する。境界条件を $\phi = [-\pi, \pi]$ とおいたとき、ここで計算される共振器の内部場はフーリエ変換の関係から $A(\phi, t) = \sum_\mu a_\mu(t) \exp(i\mu\phi)$ と表され、LLEは以下の式で与えられる。

$$\frac{\partial A(\phi, t)}{\partial t} = -\left(\frac{\gamma}{2} + i\Delta\right) A + i\frac{D_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \phi^2} + ig|A|^2 A + f$$

ここで ϕ は共振器円周上の位置に対応する方位角、 t は時間を表している。右辺の各項は順に共振器ロス、デチューニング、分散、光カー効果、外部入力を表す。NCMEとの大きな違いは周期境界条件の存在である。これによりスプリットステップフーリエ法を用いて計算することができ、高速な解析が可能となる。

異なる二つのモデリングを導入したが、これらは相補的なアプローチであり、同じ条件であれば当然同等の結果を導く。しかし、NCMEでは任意の縦モード数を設定できるほか、熱光学効果や異なる横モード間のモード結合を容易に導入することができる。一方でLLEの場合は誘

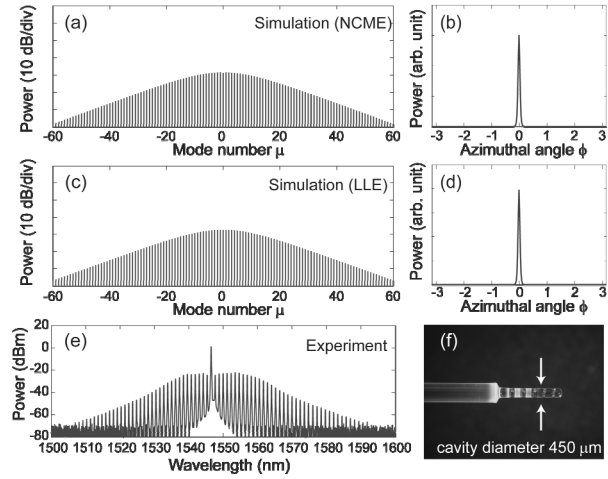


図1: (a)NCME及び(b)LLEで計算した光カーコムのスペクトルと時間波形。(e)マイクロロッド共振器で発生させた光コムのスペクトル波形。

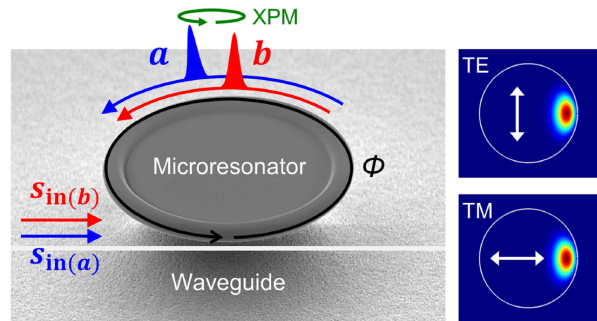


図2: 直交偏光デュアルポンプのシミュレーションモデル(左)とTE・TMモードの強度分布(右)。共振器内をソリトン伝搬するデュアルコムはXPMにより伝搬速度が変化する。

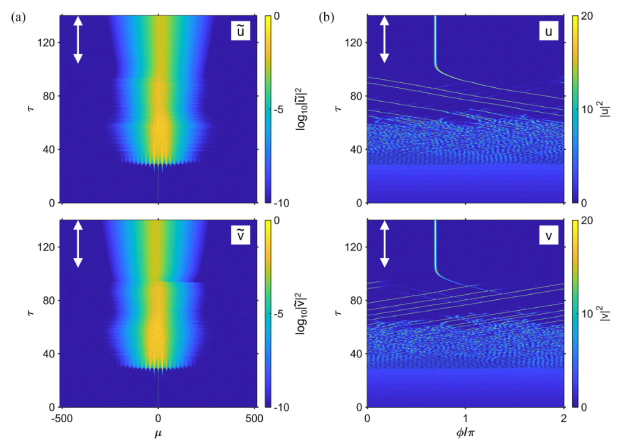


図3: 入力波長長波長にシフトさせた時の、マイクロコムスペクトル(左)と波形の変化(右)。上段と下段はそれぞれTEとTMに対応する。白矢印は、2つのソリトンマイクロコム間で、XPMによりソリトン補足が生じている領域を表す。

異なる二つのモデリングを導入したが、これらは相補的なアプローチであり、同じ条件であれば当然同等の結果を導く。しかし、NCMEでは任意の縦モード数を設定できるほか、熱光学効果や異なる横モード間のモード結合を容易に導入することができる。一方でLLEの場合は誘

導ラマン散乱やブリルアン散乱, 自己急峻化といった非線形効果を加えることに適しており, シミュレーションの用途に応じて利用することが可能である.

図1に NCME と LLE を用いた光カーブのシミュレーション結果と実験結果を示すが, 両方の計算結果が良く一致するだけでなく, 実験結果とも高い精度で一致することが分かる.

我々はここで開発したモデルを駆使して, 実験と理論の両輪で研究を進めた. スペースの都合上全てを紹介できないが, 下記にその一例を示す.

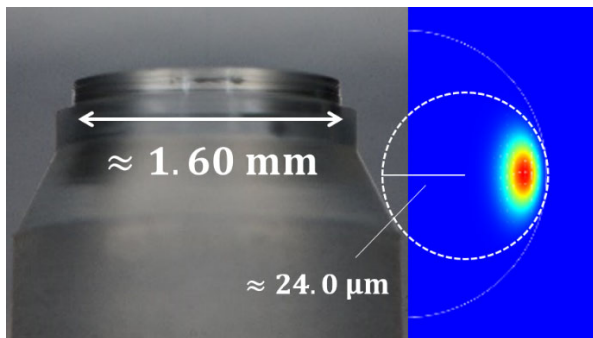


図4: 分散測定を行なった MgF₂ 微小光共振器. 超精密機械加工により WGM 導波路の直径や断面形状および大きさが設計できる.

デュアルコムは高速分光など様々な応用が期待されている. 我々が用いている微小光共振器はマルチ横モードを有するので, それを活用すれば, デュアルコムの発生が可能になると期待される. このシステムでは, 二つのコムが同じ共振器(機械的振動や熱的揺らぎ)とフィードバック機構を共有することで, コム同士の相対的なコヒーレンスが維持される.

図2に示すように, 二つの異なる横モードを励起して, デュアルコムを発生させる時に, どのようなふるまいをするのかを, 結合 LLE を用いてシミュレーションと解析を行った. 特にデュアルコム間のソリトン補足について詳細に調べた.

結合 TE モードと TM モードそれぞれで LLE によるモデルを構築し, さらに TE と TM モードは相互位相変調によって非線形に結合している状態を仮定した.

図2は, 入力波長のデチューニングに対応する α を負から正の値に変化させた時の, 直交した偏光を持つ横モードにおける, マイクロコムスペクトルと波形の変化を表す. 初めにチューリングパターンコムが発生し, 最終的には2つのモード間でソリトン捕捉が元の内部場のソリトンマイクロコムを種として発生することが分かる. ここに示した結果はソリトン捕捉している結果であるが, 共振器パラメータを変化させることによって, ソリトン捕捉せずに, 異なる繰り返し周波数領域でデュアルコムが発生する領域が存在することを示すこともできている.

以上のように, 微小光共振器中での様々な非線形光学効果を, LLE や NCME を駆使することで明らかにすることができた.

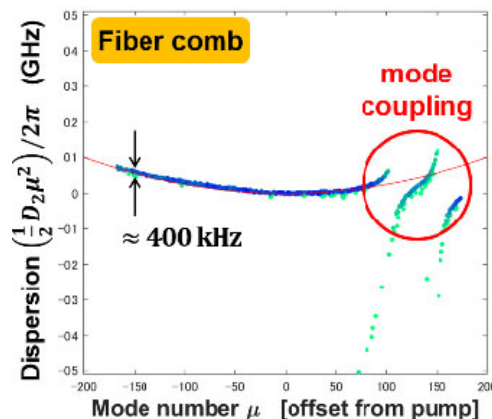


図5: 分散測定結果. 赤線は設計値.

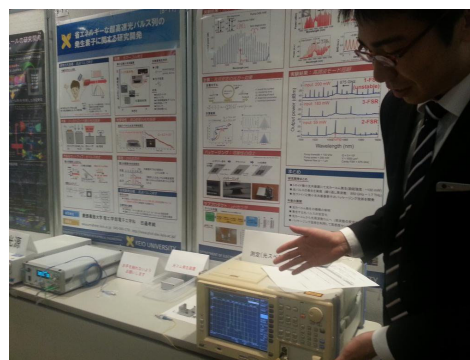


図6: 光コムの展示会での動態展示.

4. 2. 分散設計による光コムの広帯域化等による光コムにおける非線形光学効果の解明

分散設計した微小光共振器を得るために, 超精密加工を用いて, MgF₂ 共振器を作製した. その結果の例を図4に示す. Q 値は 1.7×10^8 の高い値が得られた. 超精密加工を用いるので, 形状を制御でき, その結果所望の分散が得られるようになった.

この共振器の分散を測定するために, 新たに精密な分散測定手法を開発した. f_{rep} が精密に求まっているファイバコムを周波数基準として用いるのがポイントであり, 透過スペクトルを測定するための波長可変レーザを, ファイバコム光と干渉させて, ビートを取得した. それによって, 波長可変レーザの波長軸を正確に求めることが可能となる. その結果と透過スペクトルの微小光共振器の共振波長の, 基準となる FSR からのずれの情報から, 共振器の分散を精密に求めることができた.

測定の結果を図5に示すように, 設計値と得られた値がピッタリと一致した. これによって, 1550 nm の光励起で 1130 nm と 2425 nm の遠くはなれた2つの波長帯域に分散波を発生させることなどが可能となった.

4. 3. タイミングジッタ低減やパッケージング化による光源の高機能化

シリカトロイド微小光共振器のパッケージング技術の高度化を進め、テーパ光ファイバと微小光共振器を約 10 cm 四方の箱にパッケージングをした。その装置は実験室の外でも安定して動作するので、図 6 に示すように展示会での動態展示が可能となった。これは、微小光共振器コムの実験室外への持ち出しを可能とする第一歩であり、微小光共振器コムのような利用を広げる可能性がある成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 25 件)

1. R. Suzuki, S. Fujii, A. Hori, and T. Tanabe, “Theoretical study on dual-comb generation and soliton trapping in a single microresonator with orthogonally polarized dual-pumping,” IEEE Phot. J., Vol. 11, No. 1, 6100511 (11 pages) (2019).
2. S. Fujii, Y. Okabe, R. Suzuki, T. Kato, A. Hori, Y. Honda, and T. Tanabe, “Analysis of mode coupling assisted Kerr comb generation in normal dispersion system,” IEEE Phot. J., Vol. 10, No. 5, 4501511 (11 pages) (2018).
3. T. Kumagai, N. Hirota, K. Sato, K. Namiki, H. Maki, and T. Tanabe, “Saturable absorption by carbon nanotubes on silica microtoroids,” J. Appl. Phys., Vol. 123, 233104 (6 pages) (2018).
4. Y. Honda, W. Yoshiki, T. Tetsumoto, S. Fujii, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, “Brillouin lasing in coupled silica toroid microcavities,” Appl. Phys. Lett., Vol. 112, 201105 (5 pages) (2018). (Featured Article) (Scilight) [arXiv:1712.09000v1]
5. R. Suzuki, A. Kubota, A. Hori, S. Fujii, and T. Tanabe, “Broadband gain induced Raman comb formation in a silica microresonator,” J. Opt. Soc. Amer. B, Vol. 35, No. 4, pp. 933-938 (2018). (Editor’s pick) [arXiv:1712.05091v1]
6. S. Fujii, T. Kato, R. Suzuki, A. Hori, and T. Tanabe, “Transition between Kerr comb and stimulated Raman comb in a silica whispering gallery mode microcavity,” J. Opt. Soc. Amer. B, Vol. 35, No. 1, pp. 100-106 (2018). (Editor’s pick) [arXiv:1712.04601v1]
7. 田邊孝純, 鈴木良, 鐵本智大, 柿沼康弘, 「高 Q 値微小光共振器の作製と応用」応用物理, Vol. 87, No. 3, pp. 181-186 (2018). (解説記事)
8. 田邊孝純, 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). (解説記事)
9. S. Fujii, A. Hori, T. Kato, R. Suzuki, Y. Okabe, W. Yoshiki, A. C.-Jinnai, and T. Tanabe, “Effect on Kerr comb generation in a clockwise and counter-clockwise mode coupled microcavity,” Opt. Express, Vol. 25, No. 23, pp. 28969-28982 (2017). [arXiv:1709.10226v1]
10. R. Suzuki, T. Kato, T. Kobatake, and T. Tanabe, “Suppression of optomechanical parametric oscillation in a toroid microcavity assisted by a Kerr comb,” Opt. Express, Vol. 25, No. 23, pp. 28806-28816 (2017).
11. S. Fujii, T. Kato, R. Suzuki, and T. Tanabe, “Third-harmonic blue light generation from Kerr clustered combs and dispersive waves,” Opt. Lett., Vol. 42, No. 10, pp. 2010-2013 (2017).
12. T. Kato, A. Hori, R. Suzuki, S. Fujii, T. Kobatake, and T. Tanabe, “Transverse mode interaction via stimulated Raman scattering comb in a silica microcavity,” Opt. Express, Vol. 25, No. 2, pp. 857-866 (2017).
13. A. C.-Jinnai, T. Kato, S. Fujii, T. Nagano, T. Kobatake, and T. Tanabe, “Broad bandwidth third-harmonic generation via four-wave mixing and stimulated Raman scattering in a microcavity,” Opt. Express, Vol. 24, No. 23, pp. 26322-26331 (2016).
14. Y. Nakagawa, Y. Mizumoto, T. Kato, T. Kobatake, H. Itobe, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, “Dispersion tailoring of a crystalline whispering gallery mode microcavity for a wide-spanning optical Kerr frequency comb,” J. Opt. Soc. Amer. B, Vol. 33, No. 9, pp. 1913-2920 (2016).
15. T. Kato, A. C.-Jinnai, T. Nagano, T. Kobatake, R. Suzuki, W. Yoshiki, and T. Tanabe, “Hysteresis behavior of Kerr frequency comb generation in a high-quality-factor whispering gallery mode microcavity,” Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 55, No. 7, 072201 (2016). (SPOTLIGHTS)
16. H. Itobe, Y. Nakagawa, Y. Mizumoto, H. Kangawa, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, “Bi-material crystalline whispering gallery mode microcavity structure for thermo-opto-mechanical stabilization,” AIP Advances, Vol. 6, No. 5, 055116 (2016).
17. 加藤拓巳, 陣内哲倫, 小島知也, 田邊孝純, 「シリカとロイド微小光共振器を用いたモード同期マイクロコム発生とその理論検討」, レーザー研究, Vol. 44, No. 7 pp. 532-536 (2016).

〔学会発表〕 (計 57 件)

1. T. Tanabe, “Brillouin Laser in Coupled Microresonator System,” The 3rd Workshop on OptoMechanics and Brillouin Scattering (WOMBAT2019), We8.1, Tel-Aviv, Mar 26-18 (2019). (招待講演)
2. T. Tanabe, R. Suzuki, and S. Fujii, “Kerr comb generation in a mode coupled system,” SPIE Photonics West, 10904-20, San Francisco, Feb 2-7 (2019). (招待講演)

3. 田邊孝純, 藤井瞬, 鈴木良, 熊谷傳, 石田蘭丸, 鈴木智生, 「微小光共振器によるマイクロコム発生」レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, 13aIX-5, 東海大学高輪キャンパス, 平成 31 年 1 月 12 日~14 日. (招待講演)
4. T. Tanabe, S. Fujii, R. Suzuki, and Y. Honda, “Microcavity based laser sources: Microresonator frequency comb and Brillouin lasing,” 23rd Microoptics Conference (MOC2018), H1, Taipei, Oct 15-18 (2018). (招待講演)
5. T. Tanabe “Brillouin lasing in a coupled toroid microcavities system,” CLEO Pacific Rim 2018, WS7-5, HongKong, Jul 29-Aug 3 (2018). (招待講演)
6. T. Tanabe, R. Suzuki, Y. Honda, and S. Fujii “Frequency comb and Brillouin lasing in optical microcavities,” Asia Pacific Laser Symposium (APLS), F1, Xi’an, May 28-31 (2018). (招待講演)
7. R. Suzuki, A. Kubota, A. Hori, S. Fujii, and T. Tanabe, “Raman comb generation through broadband gain in a silica microresonator,” CLEO:2018, SW3A.7, San Jose, May 13-18 (2018).
8. 田邊孝純, 「微小光共振器を用いた光コム光源開発」2018 年度精密工学会秋季大会シンポジウム, 函館アリーナ, 平成 30 年 9 月 5 日~7 日. (招待講演)
9. 田邊孝純, 鈴木良, 藤井瞬, 「マイクロ共振器を用いた光カーコム発生」第 28 回シリコンフォトニクス研究会, 11:05-11:35, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 平成 30 年 7 月 25 日. (招待講演)
10. 田邊孝純 「誘導ラマン散乱を用いたマイクロコム光の波長帯域の拡大」, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 京都市勧業館みやこめっせ, 平成 30 年 1 月 24 日~26 日. (招待講演)
11. T. Tanabe, “Stimulated Raman scattering comb in a silica microcavity,” Integrated Photonics Research, Silicon, and Nano-Photonics (IPR 2017), IM4A.3, New Orleans, 24-27 July (2017). (招待講演)
12. T. Tanabe, T. Kato, S. Fujii, R. Suzuki, and A. Hori, “Effect of Raman scattering and mode coupling in Kerr comb generation in a silica whispering gallery mode microcavity,” SPIE Photonics West, San Francisco, January 28-February 2 (2017). [Proc. SPIE, Vol. 10090, 100900F (2017).] (招待講演)
13. 田邊孝純, 藤井瞬, 本多祥大, 吉岐航, 鈴木良, 加藤拓巳 「マイクロ共振器を用いた非線形光学」超高速光エレクトロニクス(UFO)研究会 第 1 回研究会, 名古屋大学 東山キャンパス, 平成 29 年 6 月 14 日. (招待講演)
14. 加藤拓巳, 藤井瞬, 鈴木良, 田邊孝純, 「トロイド微小光共振器を用いた光カーコム発生」2017 年電子情報通信学会総合大会, C-4-5, 名城大学天白キャンパス, 平成 29 年 3 月 22 日~25 日. (招待講演)
15. T. Tanabe, T. Kato, R. Suzuki, and S. Fujii, “Kerr comb generation in a whispering gallery mode microcavity: The effect of mode coupling,” Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2016), 2P_13-1, Shanghai, August 8-11 (2016). (招待講演)
16. T. Tanabe, T. Tetsumoto, H. Itobe, R. Suzuki, and T. Kato, “Optical nonlinear control at a very low power in ultrahigh - Q microcavity systems,” 2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (IEEE OMN 2016), We2.3, Singapore, July 31-August 4 (2016). (招待講演)
17. 田邊孝純, 「シリコンファウンダリを活用した高 Q 値フォトニック結晶共振器の作製と応用」第 4 回集積光デバイスと応用技術研究会, NTT 厚木研究開発センタ, 平成 28 年 8 月 5 日. (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.phot.elec.keio.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：柿沼康弘

ローマ字氏名：Yasuhiro Kakinuma

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。