Title	結合共振器における非線形光学
Sub Title	Nonlinear optics in coupled resonators
Author	田邉, 孝純(Tanabe, Takasumi)
Publisher	
Publication year	2018
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2017.)
JaLC DOI	
Abstract	小さな空間に光を閉じ込めることができる,微小光共振器を複数結合させる, 結合共振器系を構築し,様々な機能を実現した。初めに性能が極めて高い(高Q値)シリカトロイド 微小光共振器の結合系を構築し,高い光閉じ込め性能を活用して, 従来では実現できなかった20ナノ秒の光閉じ込めや, 波長確度が極めて高いブリリュアン散乱を利用したブリリュアンレーザを実現させた。 また,制御性に優れたフォトニック結晶微小光共振器を用いて, それにテーパナノファイバを結合させることで,動的に共振器を形成させたり, これまでにない高い効率で光を取り出すことに成功した。 最後にフォトニック結晶とシリカトロイド微小光共振器の結合を実現させた。 A microcavity can confine light in a tiny space. We build coupled optical resonator system to demonstrate various functional operations. First, we constructed a coupled system using ultrahigh- Q silica toroid microcavities, and demonstrated photonic memories with 20-ns trapping time, or Brillouin lasing having high frequency accuracy. Next we tried to couple photonic crystals with tapered nanofiber and demonstrated dynamic formation of resonators. In addition, we achieved very high coupling of light to an optical fiber by using this setup. Finally, we demonstrated the coupling between silica toroid microcavity with photonic crystal slab.
Notes	研究種目 : 挑戦的萌芽研究 研究期間 : 2016~2017 課題番号 : 16K13702 研究分野 : 光エレクトロニクス
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_16K13702seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって 保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

# 科学研究費助成事業

研究成果報告書

<sup>2版</sup> 科研費

平成 3 0 年 6 月 6 日現在

機関番号: 32612 研究種目: 挑戦的萌芽研究 研究期間: 2016~2017 課題番号: 16K13702 研究課題名(和文)結合共振器における非線形光学

研究課題名(英文)Nonlinear optics in coupled resonators

研究代表者

田邉 孝純 (Tanabe, Takasumi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号:40393805

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文):小さな空間に光を閉じ込めることができる,微小光共振器を複数結合させる,結合共振器系を構築し,様々な機能を実現した.初めに性能が極めて高い(高Q値)シリカトロイド微小光共振器の結合系を構築し,高い光閉じ込め性能を活用して,従来では実現できなかった20ナノ秒の光閉じ込めや,波長確度が極めて高いブリリュアン散乱を利用したブリリュアンレーザを実現させた. また,制御性に優れたフォトニック結晶微小光共振器を用いて,それにテーパナノファイバを結合させることで,動的に共振器を形成させたり,これまでにない高い効率で光を取り出すことに成功した. 最後にフォトニック結晶とシリカトロイド微小光共振器の結合を実現させた.

研究成果の概要(英文):A microcavity can confine light in a tiny space. We build coupled optical resonator system to demonstrate various functional operations. First, we constructed a coupled system using ultrahigh-Q silica toroid microcavities, and demonstrated photonic memories with 20-ns trapping time, or Brillouin lasing having high frequency accuracy. Next we tried to couple photonic crystals with tapered nanofiber and demonstrated dynamic formation of resonators. In addition, we achieved very high coupling of light to an optical fiber by using this setup. Finally, we demonstrated the coupling between silica toroid microcavity with photonic crystal slab.

研究分野:光エレクトロニクス

キーワード: フォトニックナノ構造 微小光共振器 フォトニック結晶

#### 1. 研究開始当初の背景

サイズの小さな微小光共振器を用いて光 を閉じ込めると、光子密度を極限まで高める ことができ、非線形光学効果を増強できる. 微小光共振器は,光メモリや光コム光源素子 等の様々な研究のプラットフォームとなる. 数ある微小光共振器の中でも、フォトニック 結晶(PhC)共振器と, ウィスパリングギャラリ ー(WGM)共振器は、最も高い O/V 値が得られ る.ここでQは光の閉じ込め性能を表す指標 (Q 値), V は共振器の大きさである. Q/V が 高いと入力光が微弱であっても高い光子密 度が得られ, 強い光物質相互作用が達成でき る.しかしながら、その特徴を使い尽くすた めには、光共振器モードを外部とは完全に遮 断する必要があり,光の取り出し効率や高速 性が犠牲となる. そのため, 高速で効率的な 光変調器, 高速読み出しできる光メモリ, さ らには効率的に光を取り出し可能な広帯域 な光コム源の実現が難しかった.

## 研究の目的

このように高速な変調と長時間の光メモ リを当時に達成させる,という課題を解決す るために,PhC 共振器をゲートとし,WGM 光共振器を光保持用に用いるような,結合共 振器系を提案し(図 1),その原理実証実験を行 う.



図 1: シリカ WGM 共振器とフォトニック結晶との結合の概念図

#### 研究の方法

 シリカ WGM 共振器による結合共振器 初めにシリカ WGM 共振器同士の結合を実 現する.シリカ WGM 共振器を結合させるこ とで、光メモリやブリリュアンレーザなど 様々な機能を発現できる. シリカトロイド WGM 共振器を結合可能な ようにウェハ端に作製する(エッジ共振器と 呼ぶ)技術を開発し,共振モードを調整する ことで,反交叉スペクトルを確認する.さら に,結合モードを利用した,光メモリ動作や ブリリュアンレーザ発振のデモンストレー ションを行う.

(2) フォトニック結晶による結合共振器

フォトニック結晶とテーパナノファイバ との結合を行い,フォトニック結晶上に共振 モードを形成させる.これは,結合系の実現 だけでなく,フォトニック結晶素子から効率 的に光ファイバに光を取り出す技術の開発 にもつながり,微小光素子から光ファイバへ の結合が低いという多くの研究者が抱える 問題を解決できる可能性がある.

(3) 非対称共振器の結合とその応用

フォトニック結晶とシリカトロイド微小 光共振器の結合実験を行い,高機能なシステ ムを実現させる.

## 4. 研究成果

(1) シリカ WGM 共振器による結合共振器
 シリカ微小光共振器同士,あるいはシリカ微小光共振器とフォトニック結晶共振器を結
 合させるためには、シリカ微小光共振器を図
 2 に示すように、ウェハのエッジに作製する
 必要がある。



図2 シリカ WGM 共振器とフォトニック結晶との結合の概念図

そこで、我々は初めにエッジ共振器の作製方

法を開発した.作製手法及び作製された共振 器の写真を図3に示す.基本的なプロセスは 円形のトロイドと同様であるが,トロイドを チップ端面に位置させるためにダイシング する過程を含んでいることが大きな違いで ある.



図 3 (上)エッジ共振器の作製プロセス (下) (a)ダイシング直後 の共振器. (b) XeF2 エッチング後. (c) 完成した共振器

次に,この共振器の結合実験に取り組んだ. その結果を図4に示す.C1及びC2の2つの 共振器を近接させることで,結合させること ができ,微小光共振器としては極めて高い 11 GHz を超える結合強度を得ることに成功 した.



図4:(a) 結合共振器の結合強度の測定結果.(b) 11 GHz の結合 が得られた時の反交叉スペクトル.

結合共振器が得られれば、この共振器を用 いた様々な応用実験が可能となる.ここでは 2つの実験結果について示す.

ーつ目が,光バッファ動作である.もし2 つの共振器(C1, C2)の共振周波数が一致して いるなら,テーパ光ファイバを介して入力さ れた信号("Signal")光はまず C2 に結合し,そ の後 C1 へと移動する(図 5(a)の(1)Input を参 照).信号光が C1 に留まっている間,追加的 な高いパワーを持つ制御("Control")光を C2

の他のモードへ入力する((2)Buffer を参照). すると、制御光が光 Kerr 効果を誘起し C2 の 共振周波数をシフトさせ、C1 と C2 の共振周 波数の間にずれを生じさせる.このずれが、 C1 内の光が C2 へと抜けるのを防ぐので、制 御光が入力されている間,信号光は C1 に捉 われることになる.制御光入力を切った後は、 共振周波数が再び一致する. この状況では信 号光が C2 へ結合することが可能なので、最 終的に信号光は光ファイバへと出力される ((3)Output 参照). したがって、このでは、制 御光のパルス幅を調整することによって,任 意の時間信号光をバッファすることができ る. これが結合シリカトロイド微小光共振器 を用いた全光可変バッファの動作原理であ る.



図5:光バッファ動作原理.詳細は本文参照

図6に用いた結合共振器のスペクトルを示 すが、共振波長を一致させることで、光バッ ファメモリに必要な特徴的な透過スペクト ルが得られることが示された.



図 6: 光バッファに用いた結合共振器の透過スペクトル. (a) 共振波長の調整. (b) 結合強度の調整.

本スキームを用いて光 Kerr 効果の使用に より超高Q値なWGM 共振器を用いた全光可 変バッファを実現させ、実験のプラットフォ ームとしては、超高Q値(>2×10<sup>7</sup>)と小モード 体積を持ちチップ上に作製可能なシリカト ロイド微小光共振器を用いた.この超高Q値 と光 Kerr 効果とを組み合わせることにより、 先行研究では数百 ps 程度だった最大バッフ ア時間を 20 ns まで延伸することができた.

二つ目が、ブリリュアンレーザの実現であ る.2 つの反交叉スペクトルの周波数幅をシ リカのブリリュアンシフトである 11GHz と 一致させることで、レーザ発振が実現できる. 誘導ブリリュアン散乱(SBS)は低周波にダウ ンシフトするので、実験ではモードスプリッ トした高周波数側をポンプした.後方散乱し てきた光のスペクトルデータを図 7(a)に示す. これよりポンプした光に対して、低周波側に 11 GHz シフトしたところに SBS によるゲイ ンが確認できる.さらにポンプしたパワーに 対する SBS の出力パワーの関係は図 7(b)のよ うに測定することができた.これより、今回 の実験における SBS の閾値は約 50 mW であ ると確認できた.



図7:(a)SBS レーザ発振結果.(b)レーザ特性

(2) フォトニック結晶による結合共振器

シリコンのフォトニック結晶導波路を用 いることで高性能な共振器を形成した.以下 に共振器形成の原理を示す.図8(a)はフォト ニック結晶導波路の導波モードの分散関係 である.ここで,導波路にナノファイバを近 づけていくと実効屈折率の変化が起こるた め導波モードのカットオフ周波数は下方シ フトする.これにより,ナノファイバの接触 位置において局所的なモードギャップが形 成され,モードギャップ型のフォトニック結 晶共振器として機能する.FDTD 法を用いた 数値解析では,理論的にQ=1.4×10<sup>7</sup>とモー ド体積 1.9( $\lambda$ /n)<sup>3</sup>が得られた(図8(b)).



図 8: (a) ファイバ結合型フォトニック結晶共振器の分散関係. (b) ファイバ結合型フォトニック結晶共振器のモード分布.

次に、実験的にファイバ結合型フォトニック結晶共振器形成に取り組んだ. 図 9(a)に実験セットアップを示す. 凸型に曲げた直径約800 nm のテーパファイバをW0.98型のフォトニック結晶導波路に接触させ、ファイバを通じて光の入出力を行うことで共振器の透過スペクトルを測定した. Q値としては最高でQ=6.7×105(結合効率6.6%)が得られた(図9(b)).また、ファイバ径を変えた条件で透過スペクトルを測定することで最大結合効率99.6%(Q=6.1×103)が得られた.

共振器へナノファイバを結合させること で,動的な共振器形成を実現したのみでなく, この結合効率はフォトニック結晶共振器へ の光の入出力効率として世界最高値である.



図 9:(a) ナノテーパフォトニック結晶結合系の実験セットアッ プ.(b) 得られた共振モードとそのチューニング結果.

(3) 非対称共振器の結合とその応用 最後にフォトニック結晶導波路導波路とト ロイド共振器の結合実験を行った.初めに,
図 10 に示す実験セットアップを構築した.
ここでは、フォトニック結晶スラブ上からエ ッジシリカトロイド微小共振器をアプロー チできる構成とし、精密な結合調整を実現さ せた.



図 10:フォトニック結晶・シリカ微小光共振器結合実験のセッ トアップ

実験セットアップを構築したので,実際に フォトニック結晶導波路とトロイド共振器 を近づけた状態でフォトニック結晶導波路 側に光を入射して透過スペクトルを測定し た.その結果を図11に示す.



図 11:フォトニック結晶・シリカ微小光共振器結合実験結果. 結合させたときのみ共鳴が観測され、Q値は2.6×10<sup>4</sup>である.

多数の共振ピークが観測され、トロイドとフ オトニック結晶導波路との結合に世界で初 めて成功した.また、Q値は2.6×10<sup>4</sup>得た.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に は下線)

〔雑誌論文〕(計 6件)

- [1] <u>田邉孝純</u>, 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) (査読有り)
- [2] Y. Honda, W. Yoshiki, T. Tetsumoto, S. Fujii, K. Furusawa, N. Sekine, and <u>T. Tanabe</u>, "Brillouin lasing in coupled silica toroid microcavities," Appl. Phys. Lett., Vol. 112, 201105 (5 pages) (2018). (Featured Article) (Scilight) [arXiv:1712.09000v1] (査読有 り)
- [3] T. Tetsumoto, H. Kumazaki, K. Furusawa, N. Sekine, and <u>T. Tanabe</u>, "Design, fabrication and characterization of a high Q silica nanobeam cavity with orthogonal resonant modes," IEEE Photon. J. Vol. 9, No. 5, 4502609 (9 pages) (2017). (査読有 り)
- [4] W. Yoshiki, Y. Honda, T. Tetsumoto, K.

Furusawa, N. Sekine, and <u>T. Tanabe</u>, "All-optical tunable buffering with coupled ultra-high Q whispering gallery mode microcavities," Sci. Rep. 7, 28758 (2017). (査読有り)

- [5] W. Yoshiki, Y. Honda, M. Kobayashi, T. Tetsumoto, and <u>T. Tanabe</u>, "Kerr-induced controllable adiabatic frequency conversion in an ultra-high Q silica toroid microcavity," Opt. Lett., Vol. 41, No. 23, pp. 5482-5485 (2016). (査読有り)
- [6] H. Itobe, Y. Nakagawa, Y. Mizumoto, H. Kangawa, Y. Kakinuma, and <u>T. Tanabe</u>, "Bi-material crystalline whispering gallery mode microcavity structure for thermo-opto-mechanical stabilization," AIP Advances, Vol. 6, No. 5, 055116 (2016). (査 読有り)

〔学会発表〕(計 9件)

- T. Tetsumoto, H. Kumazaki, Y. Honda, and <u>T. Tanabe</u>, "Demonstration of direct coupling between a toroid microcavity and a photonic crystal waveguide," *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim 2017)*, 2-1L-4, Singapore, 31 July – 4 August (2017).
- [2] Y. Honda, W. Yoshiki, T. Tetsumoto, S. Fujii, K. Furusawa, N. Sekine, and <u>T. Tanabe</u>, "Brillouin lasing in coupled silica toroid microcavities," *Conference on Lasers and Electro-Optics – European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe – EQEC 2017), CD-5.1, Munich, 25-29 June (2017).*
- [3] W. Yoshiki, Y. Honda, T. Tetsumoto, K. Furusawa, N. Sekine, and <u>T. Tanabe</u>, "Demonstration of all-optical tunable buffering using coupled ultra-high-Q silica toroid microcavities," *CLEO:2017, SM2N2, San Jose, May 14-19 (2017).*
- [4] W. Yoshiki, Y. Honda, M. Kobayashi, T. Tetsumoto, and <u>T. Tanabe</u>, "Adiabatic frequency conversion in an ultra-high-Q silica microcavity using the Kerr effect," *CLEO*:2017, SM2N1, San Jose, May 14-19 (2017).
- [5] . Honda, W. Yoshiki, T. Tetsumoto, S. Fujii, K. Furusawa, N. Sekine, and <u>T. Tanabe</u>, "Tuning supermode splitting for stimulated Brillouin scattering," *The 6th Advances Lasers and Photon Sources Conference* (ALPS'17), ALPS8-4, Yokohama, April 18-21 (2017).
- [6] 田邉孝純,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)

- [7] 本多祥大,吉岐航,鐵本智大,藤井瞬, <u>田邉孝純</u>,「シリカトロイド結合共振器 によるブリルアン発振」第 64 回応用物 理学会春季学術講演会,15p-E205-18,パ シフィコ横浜,平成 29 年 3 月 14 日~17 日.
- [8] 鐵本智大,熊崎基,本多祥大,<u>田邉孝純</u>, 「シリカトロイド微小光共振器とフォ トニック結晶導波路の結合実験」第64
   回応用物理学会春季学術講演会, 16a-F202-4,パシフィコ横浜,平成29年 3月14日~17日.
- [9] T. Tetsumoto, Y. Ooka, and <u>T. Tanabe</u>, "Observation of isolated mode and formation of coupled cavity in fiber coupled PhC cavity platform," *The 12th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures* (*PECS-XII*), A28, University of York, July 17-21 (2016).

[その他]

ホームページ等

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

 6.研究組織
 (1)研究代表者
 田邉 孝純(TANABE, Takasumi)
 慶應義塾大学・理工学部・教授 研究者番号: 40393805