

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 31 年 4 月 26 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04974

研究課題名(和文) 光微小共振器の非エルミート性に基づく新奇光学現象の探求

研究課題名(英文) Novel optical phenomena in non-Hermitian microcavities

研究代表者

砂田 哲 (Sunada, Satoshi)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：10463704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外界との結合による散逸や利得のある光微小共振器系に注目し、例外点(exceptional point, EP)と呼ばれる特異な点近傍における光学・発振現象を理論的に調べた。その結果、(1) EP近傍で動作させたリング型微小共振器は回転摂動に対して従来の100倍以上大きな周波数シフトを与えること、(2) 周波数シフトだけでなく入力信号に対する応答強度も劇的に増幅できること、(3) アクティブ共振器では、量子的揺らぎに敏感に反応してレーザー発振線幅が大幅に増大することを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工学の観点において、エネルギー損失は低減すべきものとみなされてきたが、本研究によって、エネルギー損失はEPを発現させ、新規の光学現象を発現させる重要な要因であることが明らかにされ、そのセンシングやレーザー発振への応用展開が議論された。特に、回転摂動に対する周波数シフト増大は、光ジャイロ等のセンサへの応用に対して重要であり、応答強度増幅効果と合わせて、より一般的なセンシング感度増強法へ発展できる。また、本研究では、EPレーザーを提案し線幅増大が生じることを示した。この結果は、コヒーレンスを可変する新しい手法になると期待できる。

研究成果の概要(英文)：We numerically and theoretically studied optical phenomena in microcavities operating near exceptional points (EPs). The main results are as follows: (1) frequency splitting due to rotation can be enhanced in a ring resonator with a complex periodic structure. This opens a novel way of sensitivity enhancement toward on-chip optical gyroscopes.

(2) The frequency response function near an EP was derived. It was shown that the response can be enhanced in proportional to the fourth power of the loss rate of an optical cavity. (3) A novel laser operating at an EP was proposed. It was also shown that the laser linewidth can greatly be broadened, compared to normal lasers that do not operate an EP, suggesting that the laser coherence can be changed by using an EP.

研究分野：応用光学・量子光工学

キーワード：非エルミート光学 例外点 exceptional point 微小共振器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光微小共振器は、光波長程度の微小領域に光を閉じ込め、超低閾値レーザ発振、単一光子発生、光コム、ラマンレーザ、オプト・メカニカル効果等の発現を可能にする極めて魅力的なデバイスである。よって、微小共振器の応用を目指した立場からは、共振器からの光放射や吸収損失はその特性を低下させる主要因であり、抑制すべき対象と見做されている。一方、数理的な立場からは、損失のある光共振器は、非エルミート物理の研究対象となっている。ここで、非エルミート物理とは、エネルギーの流入出を伴う開放系の状態を扱う物理である。非エルミート物理によれば、共振器に共鳴する状態(共鳴モード)は、非エルミート行列作用素の複素固有値(実部が共鳴周波数、虚部が放射損失を表す固有値)を持つ状態として表現される。よって、複素の世界が光共振器と密接な関係を有することになる。

非エルミート物理の中心的概念のひとつは、あるパラメータ空間上の Exceptional point (EP) と呼ばれる特異的な点であり、その点で複数の固有状態は1つに融合する。光共振器の文脈では、EPは、複数の共鳴モードが1つに融合する特異なパラメータ値といえる。最近、EPに起因した現象が、ある特殊な光学系で実際に観測できることが指摘され、それを切欠に、光学系にて新奇で異常な光学現象(例えば、光損失によるレーザ発振、完全な吸収体の実現、光損失による透過率の増大、非相反な反射特性等)が次々と明らかにされ、EPを利用した新奇光学現象の発現及び、それらの応用可能性の探索が精力的に行われている。しかし、EPは非エルミート系における普遍的概念であるが、EPをめぐる研究の殆どは、吸収と利得がバランスし、かつ鏡映対称性を有するPT対称と呼ばれる特殊な系に限定していた。よってEPを制御するための系の自由度が制限され、EPに基づく光学現象の探索は限定的になっていた。一方、微小共振器系は、その形状や複素屈折率、利得等により多様な方法でEPにアクセス可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、微小共振器を対象として、非エルミート性を考慮した理論解析及び大規模数値計算を行い、EPに起因する共鳴特性、光伝播特性、更にレーザ発振特性等に関する新奇現象を解明する。

3. 研究の方法

本研究で取り組んだ具体的な研究テーマは次のとおりである。

(1) EPまわりの特異な摂動応答を発現させる微小共振器設計とセンサ応用

摂動の大きさを ϵ 程度とした場合、通常の縮退固有値の分裂幅は ϵ 程度にとどまるが、EPで融合した固有値の分裂幅は(縮退の次数 m に対して) $\epsilon^{1/m}$ 程度まで拡大する。その結果はEP近傍で動作する非エルミート系が周波数スプリットを原理とするセンサとして利用可能であることを示唆している。

共振周波数シフトを利用するセンサとして光ジャイロがある。光ジャイロは角速度を検出する高感度センサであるが、その感度はサイズに比例するためチップ上の小さなジャイロでは高精度に角速度を検出できない問題があった。本研究では、初めに、EPで動作可能な微小共振器として周期構造を有するリング型微小共振器に注目し、defective matrix に対する特異摂動理論に基づき、EPによる感度向上の条件を求めた。そして、光ジャイロ応用を想定して、回転座標系における波動方程式を導出し、回転の効果摂動項として、EP近傍のジャイロ特性について理論的に調べた。

(2) EPを利用した過剰な応答増強理論

(1)の研究を進める中で、EPは縮退周波数の分裂幅の拡大だけでなく、外部からの摂動(または入力)に対する出力そのものも増大させる可能性があることを発見した。そこで、(1)と同様にdefective matrix に対する特異摂動理論を用いてEPまわりのグリーン関数を求め、非エルミート共振系の周波数応答関数を導出することで入出力関係の一般論を得た。

(3) 量子的ノイズの過剰増幅とEPまわりのレーザ発振現象の解明

散逸・開放システムは常に外界からの揺動を受けている。特に増幅作用を有するシステムは強い揺動(光波動系では量子的・熱的ノイズの影響)を受ける。(2)の結果によれば、EP近傍で動作する系は、そのようなノイズの揺動に非常に敏感に反応することになる。(2)で明らかにした応答理論に基づき、量子ノイズ増幅の効果を調べた。更に、EPで動作した場合のレーザ発振特性をMaxwell-Bloch方程式による数値計算により調べた。

4. 研究成果

(1) EPまわりの特異な摂動応答理論に基づく、超高感度・光ジャイロ設計に向けた回転摂動検出の数値実証 [論文⑤]

はじめに、defective matrix に対する特異摂動理論に基づき、EPまわりの周波数シフト増大の条件を明らかにした。その条件を満たす共振器として、散逸(又は利得)と屈折率がともに周期的に分布するリング型微小共振器を提案した。この共振器では、その周期分布を制御するこ

とにより、EP まわりで動作できるため、実験的な展開が可能である。本研究では、回転振動が作用した場合に注目し、その微小共振器では、同じサイズの従来型リング共振器に比べて2桁近く大きな共振周波数シフトが生じることを明らかにした。

また、EP まわりで動作させた場合、時計回り (CW) または反時計回り (CCW) 波混合状態が固有状態となっており、回転振動に伴い CW または CCW 波へと変化していくことを明らかにした。これは共振器への結合効率の変化からも回転の効果が検出できることを示唆している。

(2) EP まわりの過剰な応答増強特性の解明 [論文①]

EP まわりで動作する共振器系に対する周波数応答関数を導出し、融合した共鳴まわりではその共鳴状態の損失レートの4乗に反比例した応答強度が得られることを解明した。EP における応答増幅の例を図1に示す。(a)はパルス入力を与えた場合の共振器系の応答強度であり、通常縮退 (DP) まわりの応答強度と比較している。また、(b)はランダム信号を入力したときの応答強度のダイナミクスの例である。図1(c)は応答強度の増幅率を共振器の損失レート γ_0 の関数として示した。共振器を励起して利得を与え、ある閾値 γ_n を超えて γ_0 を下げることにより、 γ_0 の2乗に反比例した劇的な増強が得られることがわかった。

更に、本研究では入射光とその応答光との干渉効果により、EP に起因した Fano 型周波数応答関数が得られることもわかった。特に、リング型共振器では、2方向からの入射光の強度や位相を制御することで、出力応答の光スイッチングができることを示した。

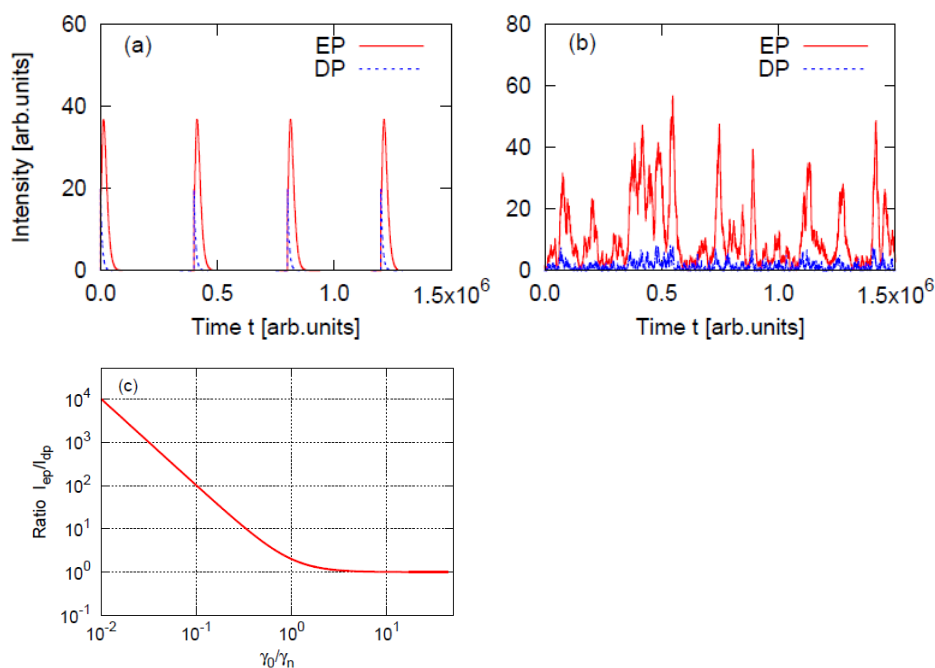


図1：EP による応答強度増強効果。(a)パルス入力と(b)ランダム信号入力に対する応答強度のダイナミクス。このように様々な入力信号に対して、単一共鳴や通常縮退 (DP) の場合と比較して大きな応答強度を得ることができる。(c) DP と EP における応答強度比の γ_0 依存性。

(3) 量子ノイズの過剰増幅 [論文①] と EP まわりのレーザ発振現象の解明

(2) で確立した理論解析によって、利得を有し且つ EP 近傍で動作できるアクティブ型共振器は、量子的ノイズに非常に敏感に応答する結果として大きなノイズ出力を得ることを示した。さらに、レーザ発振系における EP の効果を Maxwell-Bloch モデルに基づき調べた結果、レーザ発振線幅の増大が生じることが明らかにされた。図2は、複素屈折率型周期構造を有するリング共振器を EP 近傍で動作させ、レーザ共振器として利用したときのレーザスペクトルを示している。従来のリングレーザと比較して、その線幅は大幅に拡大されている。この線幅増大は EP との距離によって制御可能であることから、EP の制御で新奇のコヒーレンス可変レーザへと展開を示唆している。また、Maxwell-Bloch 方程式と縮約理論に基づく解析によって、Schawlow-Townes のレーザ線幅理論からは予期できない線幅とレーザへの励起パワーとの関係を得た。レーザ線幅拡大はレーザ発振閾値近傍で最大となり、励起パワーの約2乗に反比例して低下する [論文準備中]。このように2つの特異な転移点 (EP と閾値) 近傍での動作が、大幅な増大を与えていることが明らかにされた。

(4) 関連成果. 更に、本研究のアイデアを展開することにより、波動カオスレーザの理論 [論文③] と微小共振器を用いたリザーバー計算に関する研究成果に結びつくことができた。

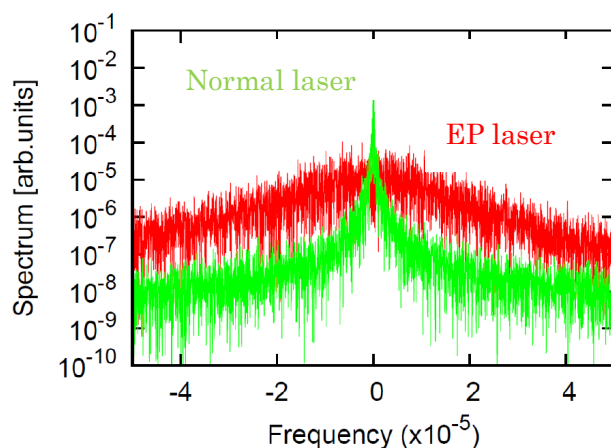


図 2. EP レーザにおけるスペクトル線幅の拡大.

波動カオス系の固有(共鳴)モードは, 対応する古典的カオスの性質と開放性(非エルミート性)によって空間的な広がりがある. よって, レーザ発振時には, 異なるモード間の競合的相互作用が強まり, 結果として単一モードでの発振となることを理論的に示した. この理論は波動カオス共振器でのレーザ発振実験の結果をよく再現していることがわかった.

また, 波動カオス共振器はその波動混合性により入力信号を拡散する. 情報処理の観点からこの現象を見てみると, 入力情報の高次元空間へのマッピングとみなすことができる. 本研究はリザーバー計算という学習法で波動カオス微小共振器が時系列データの高速処理デバイスとして動作できることを示した. また, 開放性(非エルミート性)をうまく利用することで, 機械学習型・微小共振器センシングとして利用できることも示した.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① S. Sunada, “Enhanced response of non-Hermitian photonic systems near exceptional points,” *Physical Review A* 97, 043804 (2018.04).
- ② Y. Kawashima, S. Shinohara, S. Sunada, and T. Harayama, “Self-adjustment of a nonlinear lasing mode to a pumped area in a two-dimensional microcavity,” *Photonic Research* 5(6), pp. B47–B53 (2017.11).
- ③ T. Harayama, S. Sunada, and S. Shinohara, “Universal Single-Mode Lasing in Fully-Chaotic Two-dimensional Microcavity Lasers,” *Photonics Research* 5(6), pp. B39–B46, (2017.11).
- ④ S. Shinohara, K. Arai, P. Davis, S. Sunada and T. Harayama, “Chaotic laser based physical random bit streaming system with a computer application interface,” *Optics Express*, Vol. 25(6), pp. 6461–6474 (2017.03).
- ⑤ S. Sunada “Large Sagnac frequency splitting in a ring resonator operating at an exceptional point,” *Physical Review A* 96, 033842 (2017.09).

[学会発表] (計 16 件)

- ① S. Sunada, T. Niiyama, A. Uchida, and K. Arai, “Photonic reservoir computing with a chaotic microcavity,” *Cognitive Computing 2018: Merging Concepts with Hardware*, NS 20, Hannover, Germany, 18th–20th December (2018).
- ② S. Sunada, K. Arai, and A. Uchida “Wave Dynamical Reservoir Computing at a Microscale,” 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2018), Paper ID 5017, Proc. pp. 154–155, Tarragona, Spain, 2nd–6th September (2018).
- ③ S. Sunada, “Fast photonic information processing with a chaotic microcavity,” Korea–Japan Joint Workshop on Optical Resonators and Nonlinear Complex Systems, Daegu, Korea, 19th–21st August (2018).
- ④ S. Sunada, “Excess enhancement of photonic response near an exceptional point,” Korea–Japan Joint Workshop on Optical Resonators and Nonlinear Complex Systems, Daegu, Korea, 19th–21st August (2018).
- ⑤ S. Sunada, “Fast photonic reservoir computing and sensing with microcavities” The 2nd International Workshop on Asymmetric Microcavity and Wave Chaos. Program Book p. 25, Fuzhou, China, 17th–20th May (2018).
- ⑥ D. Sakakibara, Y. Kawashima, S. Shinohara, S. Sunada, and T. Harayama, “Numerical

Simulations on Spectral Characteristics of the Cardioid Cavity Laser,” The 2nd International Workshop on Asymmetric Microcavity and Wave Chaos. Program Book p. 52, Fuzhou, China, 17th-20th May (2018).

⑦ Y. Suzuki, S. Shinohara, S. Sunada, and T. Harayama, “Bistability of Chiral Lasing States in an Asymmetric Microcavity Laser: Simulations by the Maxwell-Bloch Model,” The 2nd International Workshop on Asymmetric Microcavity and Wave Chaos. Program Book p. 53, Fuzhou, China, 17th-20th May (2018).

⑧ T. Harayama, S. Shinohara, and S. Sunada, “What is the role of quantum ergodicity in laser action of two-dimensional microcavity lasers?” The 2nd International Workshop on Asymmetric Microcavity and Wave Chaos. Program Book p. 15, Fuzhou, China, 17th-20th May (2018).

⑨ 砂田哲, “例外点における非エルミート光共振器の応答増強” 日本物理学会第73回年次大会, 22aPS-122, 千葉県野田市 (2018.03).

⑩ S. Sunada, S. Shinohara, T. Fukushima, and T. Harayama, “Mode competition in microcavity lasers” XXXVII Dynamics Days Europe, 2017. Proc. p. 139, Szeged, Hungary, 5th-9th June (2017).

⑪ S. Sunada, “Enhancing Dynamical Response in Non-Hermitian Systems,” 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2017), Paper ID 5043, Proc. p. 398, Cancun, Mexico, 4th-7th November (2017).

⑫ 吉川真生, 篠原晋, 砂田哲, 原山卓久 “カオス共振器レーザーにおける単一モード発振現象の数値的検証” 日本物理学会2017年秋季大会, 21aJ25-6, 岩手県盛岡市 (2017.09).

⑬ S. Sunada, “Chaotic Billiard Lasers,” Workshop on Chaos and Diffusion in Leaky Systems, Tokyo, Japan, February 21st-22nd, 2017.

⑭ Y. Kawashima, S. Shinohara, T. Fukushima, S. Sunada, and T. Harayama, “Chaos assisted emission and synchronization of two modes in two-dimensional microcavity lasers,” 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2016), Ogawara, Japan, 27th-30th November (2016).

⑮ S. Sunada, S. Shinohara, T. Fukushima, and T. Harayama, “Wave-Chaos-Induced Single-Frequency Lasing in Microcavities,” 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2016), Ogawara, Japan, 27th-30th November (2016).

⑯ 砂田哲 “非エルミート波動系の例外点まわりの摂動応答と超高感度・微小光ジャイロセンサの設計” 日本物理学会 第72回年次大会, 19pK-PS-43, 大阪府豊中市, (2017・03)

[図書] (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/physics/>

※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。