

放射損失の差を有する結合共振器の非エルミート結合モード理論

Non-Hermitian coupled mode theory for cavity arrays with contrast of radiation loss

NTT ナノフォトニクスセンタ¹, NTT 物性基礎研², 東工大³

○高田 健太^{1,2}, Nathan Roberts², 新家 昭彦^{1,2}, 納富 雅也^{1,2,3}

NTT Nanophotonics Center¹, NTT Basic Research Labs.², Tokyo Inst. Tech.³

○Kenta Takata^{1,2}, Nathan Roberts², Akihiko Shinya^{1,2}, Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: kenta.takata.ke@hco.ntt.co.jp

結合光共振器に利得や損失を与えると、それらの差の大きさに応じて固有モードが結合状態から局在状態へと相転移を起こす。これは、系の固有周波数離調が累乗根型の複素多価関数として現れることに起因しており、その零点は例外点(exceptional point: EP)と呼ばれる。例外点は上記の相転移における相転移点に相当し、そこでは固有周波数及び固有状態が同時に縮退を起こす。これまで、この例外点近傍の固有周波数及び固有状態の急激な変化に基づく様々な新奇現象や[1]、例外点状態そのものによる光学状態密度の増強[2]などの特異な性質が明らかになってきている。

元来、結合共振器の解析は結合定数に関し一次の範囲の結合モード理論によって行われ、個々の共振器の共鳴周波数にずれがなければ、利得・損失の制御により例外点が必ず現れると予想されてきた。しかし、現実的な構造を仮定したシミュレーションでは、このような場合でも例外点縮退が解ける例が散見される[3]。また関連する理論検討[4,5]も、この不一致の正確な起源を明らかにしてはしていない状況であった。そこで前回我々は、共振器媒質の材料利得及び損失を有する結合共振器の非エルミート結合モード理論を再構築した。そして、例外点縮退を解く原因が、従来無視されていた共振器間結合の虚部であることを示した[6]。今回は、放射損失の差を有する結合共振器の非エルミート結合モード理論と、結合虚部の発生機構や例外点に対する影響を報告する。

FDTD 法や有限要素法等でよく行われるように、結合共振器系から十分遠方の空気領域を仮想的な吸収体に置き換えることで放射損失をモデリングすると、系の結合モード方程式は前回と同様、方向に依存しない結合虚部 K_i を新たに含む形で導出される。そしてこの K_i は、二つの共振器モードの干渉による正味の放射損失の増減という本質的な要素として現れる。今回、図(a)に示す二つの Si フォトニック結晶点欠陥共振器の結合系における例外点の探索、及び我々のモデルによる解析を行った。まず、片方の共振器を空気穴のシフトにより高 Q 条件に固定する。対してもう片方の共振器では、最内殻空孔及び第二内殻空孔の外側へのシフトを s_1, s_2 とし、これらの制御により共振器共鳴周波数及び放射損失を調節する。 s_1, s_2 に対する結合六重極モード周波数の実部と虚部を各々図(b), (c)に示す。各図中の青色、赤色の(s_1, s_2)曲線上のデータにおいて、複素固有周波数差が実数または純虚数となっており、二者の境界で理想的な例外点が現れることを示している。この曲線上の条件における単一共振器のシミュレーションから、二つの共振器は 2.5 GHz 程度の一貫した周波数離調(2δ)を持つことが分かった。またこれら二種類の結果を合わせて複素結合を見積もることにより、結合実部 κ_t と損失差 $(\Gamma_1 - \Gamma_2)/2$ の釣り合いに加え、結合虚部 K_i と離調 δ が釣り合いその影響が相殺することで例外点が得られることを示した[図(d)]。詳細は当日議論する。

本研究は科研費 (20H05641) による助成を受けたものである。参考文献: [1] Feng, El-Ganainy, and Ge, *Nat. Photonics* **11**, 752 (2017). [2] Takata *et al.*, *Optica* **8**, 184 (2021). [3] Takata, Notomi, *Phys. Rev. Appl.* **7**, 054023 (2017)等。[4] Nguyen *et al.*, *NJP* **18**, 125012 (2016). [5] Benisty *et al.*, *JLT* **30**, 2675 (2012). [6] 高田他, 2021年春季応物, 17p-Z31-5.

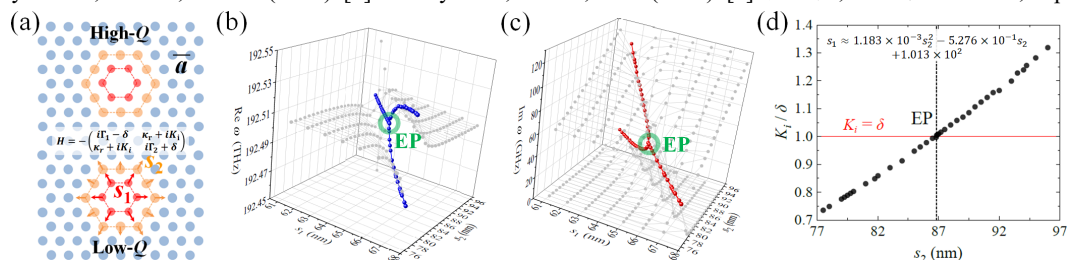


Fig. (a) Two Si H1 photonic crystal cavities and their effective Hamiltonian H . Slab thickness: 250 nm. Lattice constant a : 426 nm. s_1, s_2 : shifts for the innermost and second innermost shells of air holes. (b) Simulated $\text{Re } \omega$ and (c) $\text{Im } \omega$ of the system's eigenmode frequencies ω , which depend on s_1 and s_2 . (d) Ratio K_i/δ of the imaginary coupling to cavity frequency detuning along with the trajectory of colored data in (b) and (c) as a function of s_2 , showing $K_i = \delta$ at the EP.