

結合光学系の利得/損失により生成される光トポロジカル絶縁相

Photonic Topological Insulating Phase Induced by Gain and Loss

NTT ナノフォトニクスセンタ¹, NTT 物性基礎研², 東工大理³ ○高田 健太^{1,2}, 納富 雅也^{1,2,3}

NTT NPC¹, NTT BRL², Tokyo Inst. Tech.³, ○Kenta Takata^{1,2}, Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: takata.kenta@lab.ntt.co.jp

光回路にトポロジーの概念を導入する試みが近年進んでいる[1]。非自明な光波トポロジーを持つ結合光学系の端には、系の乱雑性や散乱に対し強固なトポロジカルエッジ状態が出現する。またエッジ状態は、トポロジーの源となる対称性に起因したカイラル自由度を持つ為、その応用が期待されている。これまでに検討された光トポロジカル系は、電子系のアナロジーによるものが主流である。ここでの光トポロジーは素子構造に由来するか、磁気光学効果や要素毎の変調といった制御機構を要する。また近年、光学系特有の検討として、非エルミート量子系に対応する利得や損失を含む系のトポロジカル状態が新たに研究されている[2, 3]。一方で、それらの従来研究では素子構造に基づくトポロジカル状態が利得、損失下でも存続する事に主眼が置かれており、利得と損失の制御性は注目されていなかった。

前回我々は、元々非自明なトポロジカル特性を示さない、一様な結合を持ったギャップレスな一次元結合共振器に対する利得と損失の導入のみにより、バンドギャップ及び有限系でのエッジ状態を示す光トポロジカル絶縁相を発現させる手法を初めて報告した[4]。その後の理論検討により、系の利得や損失に対する定性的応答、光波トポロジーの起源と屈強性、トポロジカル数及び相転移や界面状態の制御性等の詳細な特性が明らかになった為発表する。系は同一の共鳴周波数、及び一様な結合 κ を有する四つの共振器を単位胞とする[図(a)]。ここで、単位胞の両端の共振器に二つのレータ振幅の利得($+g_1 > 0$, $+g_2 > 0$)を導入し、内側の共振器に同振幅の損失を互い違いに導入する($-g_2$, $-g_1$)。この系は、バンド中心における固有周波数離調 ω の値に応じて五つの相に分類可能である[図(b)左]。二つの振幅の内片方のみを導入する相では($g_1 > 0$, $g_2 = 0$)、 $\text{Re}(\omega)$ のバンド構造はギャップレスとなり、特に $|g_1| < 2$ の時バンド中心で線形な交差を持つ[図(b)右下]。両方の振幅を導入すると($g_1, g_2 \neq 0$)、図(b)左の青色、赤色部分の相で系は $\text{Re}(\omega) = 0$ の周りにバンドギャップを持つ[図(b)右上]。これは、隣同士の共振器の虚ポテンシャル g (正: 利得、負: 損失) の差に依存して共振器間結合が実効的に弱くなる為である。またこの系ではその差が二通りしかない為、ダイマー化とそれに付随した非自明な光波トポロジーが生じ得る。今回、バンドギャップが開く領域で規格化非可換ベリー位相[5]と呼ばれるトポロジカル数 W を計算した結果、図(a)の配置($g_1 > 0$, $g_2 > 0$)の時 $W = 1$ (トポロジカルに非自明)、二番目、四番目の共振器の利得、損失を反転した場合($g_1 > 0$, $g_2 < 0$)では $W = 0$ (自明) となる事が分かった (トポロジカル相転移)。さらに、このように制御されたトポロジカルに非自明なアレイと自明なアレイを隣接させた系で、エッジ状態に対応する $\text{Re}(\omega) = 0$ のトポロジカル界面局在状態が生じる事を明らかにした[図(c)]。その他については当日議論する。本研究は JST, CREST (JPMJCR15N4) の支援を受けた。

前回我々は、元々非自明なトポロジカル特性を示さない、一様な結合を持ったギャップレスな一次元結合共振器に対する利得と損失の導入のみにより、バンドギャップ及び有限系でのエッジ状態を示す光トポロジカル絶縁相を発現させる手法を初めて報告した[4]。その後の理論検討により、系の利得や損失に対する定性的応答、光波トポロジーの起源と屈強性、トポロジカル数及び相転移や界面状態の制御性等の詳細な特性が明らかになった為発表する。系は同一の共鳴周波数、及び一様な結合 κ を有する四つの共振器を単位胞とする[図(a)]。ここで、単位胞の両端の共振器に二つのレータ振幅の利得($+g_1 > 0$, $+g_2 > 0$)を導入し、内側の共振器に同振幅の損失を互い違いに導入する($-g_2$, $-g_1$)。この系は、バンド中心における固有周波数離調 ω の値に応じて五つの相に分類可能である[図(b)左]。二つの振幅の内片方のみを導入する相では($g_1 > 0$, $g_2 = 0$)、 $\text{Re}(\omega)$ のバンド構造はギャップレスとなり、特に $|g_1| < 2$ の時バンド中心で線形な交差を持つ[図(b)右下]。両方の振幅を導入すると($g_1, g_2 \neq 0$)、図(b)左の青色、赤色部分の相で系は $\text{Re}(\omega) = 0$ の周りにバンドギャップを持つ[図(b)右上]。これは、隣同士の共振器の虚ポテンシャル g (正: 利得、負: 損失) の差に依存して共振器間結合が実効的に弱くなる為である。またこの系ではその差が二通りしかない為、ダイマー化とそれに付随した非自明な光波トポロジーが生じ得る。今回、バンドギャップが開く領域で規格化非可換ベリー位相[5]と呼ばれるトポロジカル数 W を計算した結果、図(a)の配置($g_1 > 0$, $g_2 > 0$)の時 $W = 1$ (トポロジカルに非自明)、二番目、四番目の共振器の利得、損失を反転した場合($g_1 > 0$, $g_2 < 0$)では $W = 0$ (自明) となる事が分かった (トポロジカル相転移)。さらに、このように制御されたトポロジカルに非自明なアレイと自明なアレイを隣接させた系で、エッジ状態に対応する $\text{Re}(\omega) = 0$ のトポロジカル界面局在状態が生じる事を明らかにした[図(c)]。その他については当日議論する。本研究は JST, CREST (JPMJCR15N4) の支援を受けた。

参考文献: [1] L. Lu, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić. *Nat. Photon.* **8**, 821 (2014). [2] C. Poli et al. *Nat. Commun.* **6**, 6710 (2015). [3] S. Weimann et al. *Nat. Mater.* **16**, 433 (2016). [4] 高田, 納富. 第 64 回応物春季講演会, 15p-E205-5 (2017). [5] S.-D. Liang and G.-Y. Huang, *PRA* **87**, 012118 (2013).

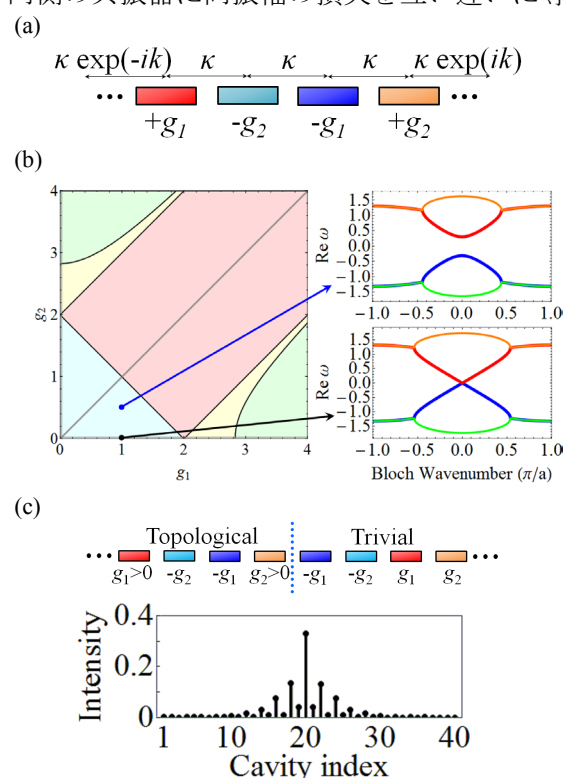


Fig. (a) Schematic of the considered system. (b) Left: system phase diagram in terms of the eigenfrequency detuning $\text{Re}(\omega)$ at the band center. $\kappa=1$. Lower and upper right: system band structures for $g_1=1, g_2=0$ and $g_1=1, g_2=0.5$, respectively. (c) Upper: Interface of topologically nontrivial and trivial lattices with 20 cavities for each. Lower: the intensity profile of the topological interface state.