

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14374

研究課題名（和文）構造体の連続変形による空間局在状態のトポロジカル生成

研究課題名（英文）Topological generation of spatially localized states by continuous deformation of structures

研究代表者

中田 陽介（Nakata, Yosuke）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号：50745205

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）：空間的に狭い領域で大きな振幅で振動し、そこから離れると急速に減衰するような波を局在波と呼ぶ。本研究では、局在波が2次元結晶においてどのように形成されるかというメカニズムについて研究した。結晶の連続変形による欠陥導入に着目し、以下の2つを理論的に明らかにした。(i) 2方向に結晶を並進する操作で結晶の角の部分に欠陥を導入すると、角にエネルギーが集中したコーナー状態と呼ばれる状態を生成できる。(ii) 2方向の並進方向を逆方向にしたひねり操作を考えると、移動量のベクトル和はゼロにも関わらず結晶境界で波動局在化が生じる。さらに、上記の2つのメカニズムについて実験的にも検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

欠陥周りで生じる波動局在化現象は90年以上前から知られているもののなぜ波動局在が生じるのか、という問いは捉えどころがなくアプローチすることは難しかった。本研究では欠陥の連続的導入を考え、2次元結晶ならではの局在波形成メカニズムを明らかにした。局在波は分野を問わず現れる。例えば、半導体に不純物を注入して生じる局在波は半導体デバイスの動作において決定的な役割を果たしているし、フォトリソグラフィ結晶ではエネルギーを小さな領域に集中させるために欠陥導波路が利用される。このため、本研究は様々なデバイス応用への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：A localized wave oscillates with a large amplitude in a spatially limited region and evanescently decays away from it. We have studied mechanisms of localized-wave formation in two-dimensional crystals, focusing on crystal deformations, which continuously introduce defects. The obtained theoretical results are as follows: (i) When considering spatial translations of crystals along two directions, corner states appear at the produced corner defects. (ii) Spatial translations along two opposite directions can produce wave localization at the boundary of the crystals, although they have zero displacement as a vector sum. Moreover, we have experimentally verified these two mechanisms.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：トポロジー 波動局在化 サウレスポンピング バルク・エッジ対応 フォトリソグラフィ結晶 マイクロ波

様式 F-19-1

1. 研究開始当初の背景

周期構造に欠陥が存在すると、その周りに波動が局在化することはよく知られている。古くからこうした局在化現象は研究されているものの、その本質的な機構を明確にとらえることは困難であった。近年、トポロジカル物理の発展により、欠陥局在状態形成のメカニズムに新たな視点からアプローチすることが可能になりつつある。例えば、1次元の周期構造に対しては欠陥を連続的に導入する操作を考えることで、局在化現象をトポロジカルに理解することができる(文献①)。この考え方では、構造変形の自由度が人工次元とみなされる。人工次元と波数からなる空間を考えると、そこでの波動関数のトポロジカルな性質が局在化現象の発現と関連する。こうした考え方をさらに拡張し、2次元以上の周期構造への展開を考えることで、1次元系では見られなかった新奇な現象の発現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、2次元以上の周期構造に連続的に欠陥を導入した際に生じる局在化現象を理論・実験の両観点から調べることを目的とした。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、まず、2次元フォトニック結晶を様々に変形し、その際に欠陥局在モードがどのように現れるのかについてシミュレーションによって調べた。得られた結果から局在化現象の要因を理論的に考察した。さらに2次元伝送線路により、シミュレーションと等価な系を実装し、実証実験を行った。

4. 研究成果

(1) コーナー状態のトポロジカルポンピング

2次元結晶の角に相当する欠陥に現れる状態をコーナー状態と呼ぶ。ここではフォトニック結晶に対し、コーナー状態を連続変形で生成する可能性について研究した。図1(a)の右側に示す四角い誘電体を含むユニットセルを考え、そのユニットセルを周期的に 7×7 並べてスーパーセルを構成する。スーパーセルの端には周期境界条件を適用する。このスーパーセルにおいて(図1(a)に示される縦方向の青破線より)右側領域を保ちながら、左側領域を横方向(x 方向)に ξ_x ユニット分右側にシフトさせる。同時に(横方向の青破線より)上側領域を保ちながら、下側領域を縦方向(y 方向)に ξ_y ユニット分シフトさせる。図1(a)に示されるように、この操作によって青線近辺に欠陥が形成される。得られた構造に対し、 $\xi_x = \xi_y$ の値を変化させながらTEモードに対する固有値解析を有限要素法により行った。結果を図1(b)に示す。ここで赤色で示すようにモードがバンド間を遷移する様子が観察された。図1(b)の青丸部分に対応する電場振幅の分布を図1(c)に示す。欠陥の重なる角領域で電場の局在化が見られ、コーナー状態が生じていることが分かる。バンド間を遷移するモードは $(\xi_x, \xi_y) = (0,0) \rightarrow (1,1)$ の変形によって、削除したセル数だけ現れている。以上の結果より、連続変形によりコーナーモードをポンピングできることが示され、加えて現れるモードの数をトポロジカルに説明できることもわかった。本研究成果は、日本物理学会2021年秋季大会にて発表された。

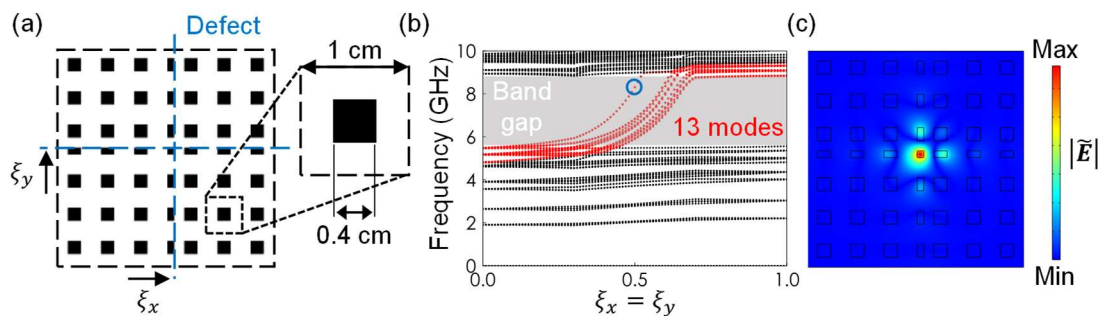


図1: (a) 2次元フォトニック結晶の連続変形による欠陥の導入。黒色の領域が誘電体(比誘電率25)、その他白色の領域を真空とし、 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ のユニットセル(拡大部)から構成されるスーパーセルを考えた。変形の尺度として ξ_x, ξ_y を定義し、青線右側領域(3×7 セル)を保ちながら青線左側領域を右方向に ξ_x ユニット分並進移動させ、次に青線上側領域(7×3 セル相当)を保ちながら青線下側領域を上方向に ξ_y ユニット分並進移動させた。この操作により青色の点線部に欠陥を作製した。(b) スーパーセルの Γ 点における固有周波数の変化。灰色の領域はユニットセルにおけるバンドギャップである。(c) 欠陥モードにおけるコーナー状態の発生($\xi_x = \xi_y = 0.5$, 8.3138 GHz)。図1(b)において、青色の円で囲まれたモードにおける電場振幅である。

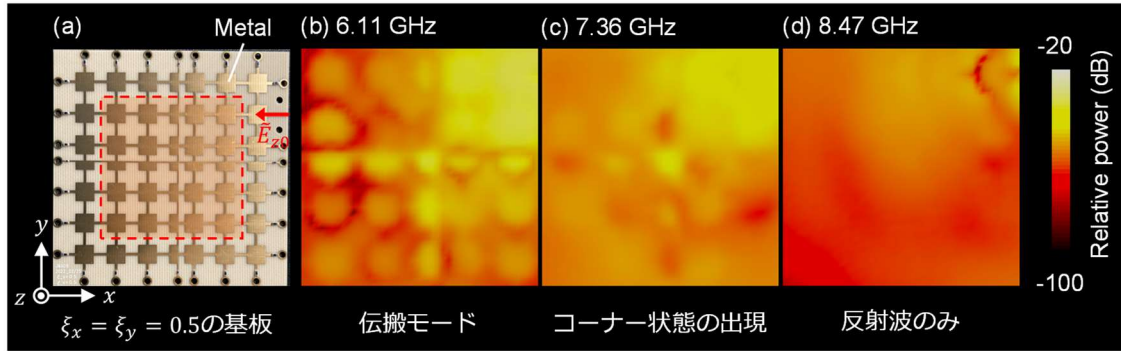


図 2 : (a) $\xi_x = \xi_y = 0.5$ の基板 (厚さ 0.4 mm、比誘電率 4.3@1 GHz、誘電正接 0.015@1 GHz の両面銅箔 FR-4 基板をパラメータ (ξ_x, ξ_y) ごとに加工したもの)。ユニットセルは 1 cm×1 cm、試作したプリント基板のユニットセルのサイズは全て同様である。また、各線路は 50 Ω のチップ抵抗にて終端している。エンドランチコネクタにより矢印で示す箇所から入力電場 \vec{E}_{z0} で励振している。近接場プローブにて、点線で囲まれた赤色の領域での電場振幅の 2 乗 $|\vec{E}_z/\vec{E}_{z0}|^2$ に比例した量を測定した。(b) 6.11 GHz での電場振幅の分布。(c) 7.36 GHz での電場振幅の分布。(d) 8.47 GHz での電場振幅の分布。

(2) 2次元伝送線路の角欠陥に発生するコーナー状態の観測

(1)で扱ったフォトニック結晶を2次元マイクロストリップ線路により実装した。裏面が一面銅箔となっているプリント基板の表面にパラメータ (ξ_x, ξ_y) で変形した銅箔パターンが形成される。様々な $\xi_x = \xi_y$ の値を持つ構造をそれぞれ別個に作製した。図 2(a)に実験で用いられたサンプルの一例を示す。実験ではマイクロストリップ線路に対してマイクロ波を入力し、近接場プローブを基板表面でスキャンすることで基板表面の電場分布を測定した。図 2(b)-(d)は各周波数における対応する基板表面の電場振幅の分布である。図 2(b)において、5.11 GHz でバンド内の伝搬モードが見られる。図 2(c)7.36 GHz ではコーナー状態が出現している。図 2(d)の 8.47 GHz はバンドギャップ中に位置し、反射波のみが観測されている。以上から、角欠陥部分に図 2(c)に示すようなコーナー状態が現れることがわかった。本成果は日本物理学会 2022 年秋季大会にて発表された。

(3) 波数空間トポロジと実空間トポロジの競合

図 3 はコーナー状態の連続変形に対する振る舞いを観測した結果である。図 3(a)で示す $(\xi_x, \xi_y) = (0.4, 0.4)$ では、コーナー状態の発生の予兆が見られる。さらにそこから変形した $(\xi_x, \xi_y) = (0.5, 0.5)$ においては図 3(b)で示すようなコーナー状態が明確に生じている。一方、図 3(c)で示す $(\xi_x, \xi_y) = (0.6, 0.6)$ では、コーナー状態が消滅している様子が観測された。パラメータ $(\xi_x, \xi_y) = (0.5, 0.5)$ から $(\xi_x, \xi_y) = (0.6, 0.6)$ の間で、連続変形により中央にある金属パッチが他の金属と繋がった状態から切れた状態へと変化する。まとめると、実空間における (表面の金

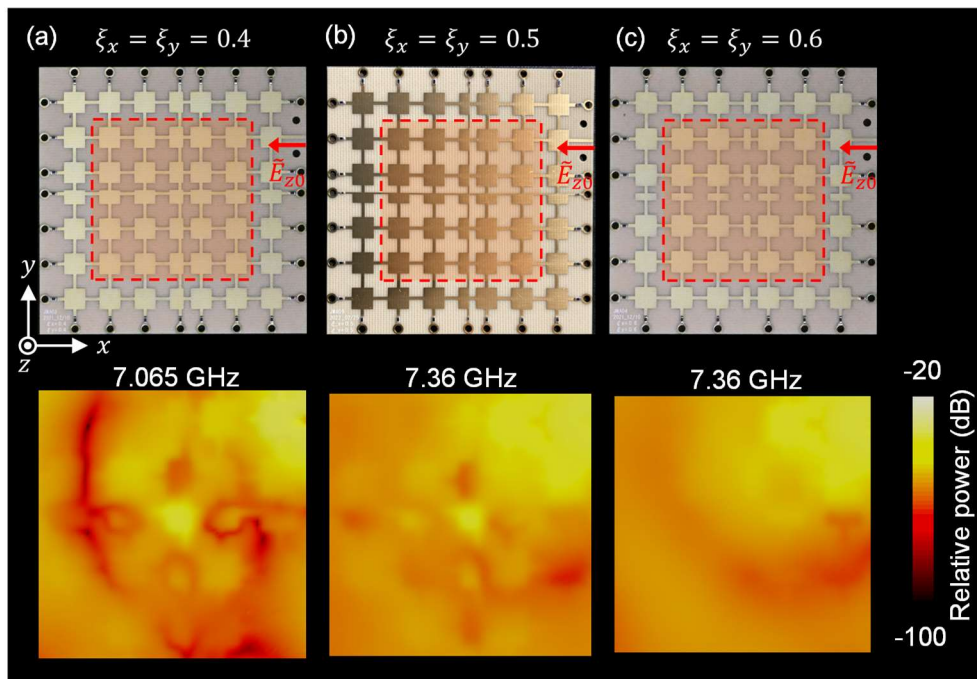


図 3 : (a) $\xi_x = \xi_y = 0.4$ のときの基板と 7.065 GHz における電場の分布。(b) $\xi_x = \xi_y = 0.5$ のときの基板と 7.36 GHz における電場の分布。(c) $\xi_x = \xi_y = 0.6$ のときの基板と 7.36 GHz における電場の分布。

属パターン) トポロジ変化がコーナー状態の遷移に影響を及ぼしていることが分かった。本成果も日本物理学会 2022 年秋季大会にて発表された。

上記で示した実空間トポロジ変化によるモード消滅は誘電体のみの系では生じない現象であり、金属系の特異性を示している。この考え方の本質を抽出することで、金属表面上に現れる表面プラズモンポラリトンの形成メカニズムにおいてモード添加・消滅が本質的役割を果たすことを明らかにした。本成果に関する論文執筆を行ない、現在論文投稿中である。加えて、実空間トポロジ変化を活用したデバイスに関しても実験を進め、その有用性を示すデータも得ている。

(4) チャーン数に基づかないトポロジカル局在モードの発生

1次元系の連続変形においては、並進移動量がチャーン数と呼ばれるトポロジカル数と関連する。トポロジカル数が異なる領域の境界にはバルク・エッジ対応によって、局在モードの存在が予言できる。通常の欠陥モード形成も、人工次元を加えた空間において捉えなおすことで、バルク・エッジ対応から説明できる。一方、2次元以上の空間自由度を持つ系では従来のチャーン数に基づいた理解では説明できない現象も生じる。ここではセル内での移動量のベクトル和が0となる連続変形を考案し、チャーン数に基づかない局在化現象を作り出せるか?という問いを追求した。

図4(a)にフォトニック結晶のユニットセルを示す。このユニットセルを縦に7個並べスーパーセルを構成した。このスーパーセルを左右に分け、左半分を $\xi/2$ ユニット分上側へ、右半分を $\xi/2$ ユニット分下側へ並進移動させる[図4(b)]。得られた構造が含む最大の長方形からはみ出した部分は削除するとする。最後に上記の操作で得られた長方形の上下対辺と左右対辺それぞれに周期境界条件を課す。この時、青色部分に欠陥が生成されていることに注意する。このように得られた構造に対しTEモードの固有値解析をした結果を図4(c)に示す。ここで赤色と青色で示す欠陥モードがバンド間をポンピングされる様子が観察できる。図4(d)は青色で示す欠陥モードのうち、上側のモードの $\xi = 0.5$ における電場振幅を表している。ここで欠陥周辺に電場が局在化している様子(エッジ状態)が見られた。以上の結果より、移動量がベクトル和としてキャンセルする、すなわちチャーン数がゼロであるような連続変形に対しても、局在モードをポンピングできた。この場合の局在モード数も消滅するユニット数によってトポロジカルに説明できる。本研究成果も日本物理学会 2021 年秋季大会にて発表された。

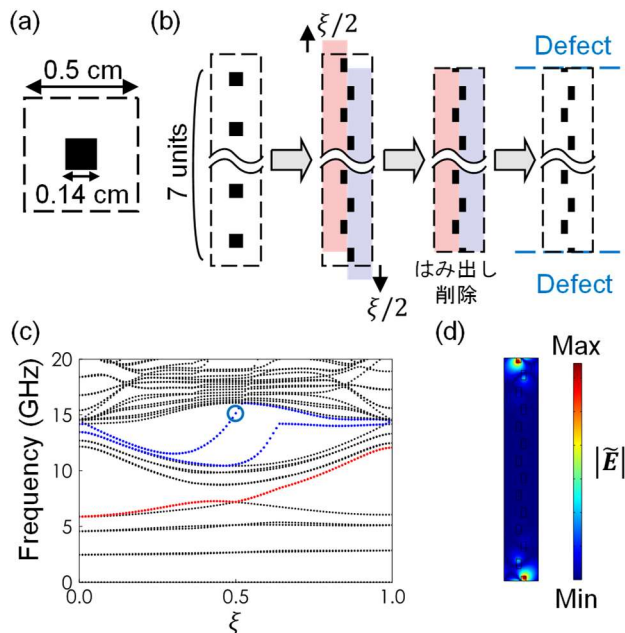


図 4: (a) 2次元フォトニック結晶のユニットセル。黒色の領域が誘電体(比誘電率 25)、その他白色の領域は真空。(b) 2次元フォトニック結晶の連続変形による欠陥の導入。7ユニットを縦に並べた構造をスーパーセルとし、スーパーセルの左半分を上方向へ $\xi/2 \times 0.5$ cm 並進移動させ、右半分を下方向へ $\xi/2 \times 0.5$ cm 並進移動させた。変形によりはみ出した部分は削除し、 $(7-\xi) \times 1$ セルの長方形を新たなスーパーセルとする。上下辺、および、左右辺は周期境界とした。得られた構造は青色破線部に欠陥を持つ。(c) スーパーセルの Γ 点における固有周波数の変化。赤色と青色の実線が各バンド間でポンピングされた欠陥モードを表す。(d) 欠陥モードにおけるコーナー状態の電場振幅($\xi = 0.5$, 15.152 GHz)。図4(c)において、青色の円で囲まれたモードに対応する。

(5) チャーン数に基づかない欠陥モード生成の実験的観測

(4)で扱った移動量のベクトル和が0であるような連続変形を2次元マイクロストリップ線路に適用し、その結果生じる現象を実験的に調べた。様々なパラメータに対する基板を試作し、図5(a)で示す実験系にてポート1での反射係数、ポート1からポート2への透過係数を測定した。測定された反射係数、透過係数の周波数特性をそれぞれ図5(b), (c)に示す。パラメータの変化とともに、反射係数においてはディップが、透過係数ではピークが遷移している様子が見られた。この遷移は欠陥モードのトポロジカルな移動に起因するものと考えられる。しかしながら、ポンピングされるモードに対応する信号は、終端抵抗、放射損、および、基板のロスに影響され、正確に追跡できていない。ポンピングされるモード数の正確な測定は今後の課題である。

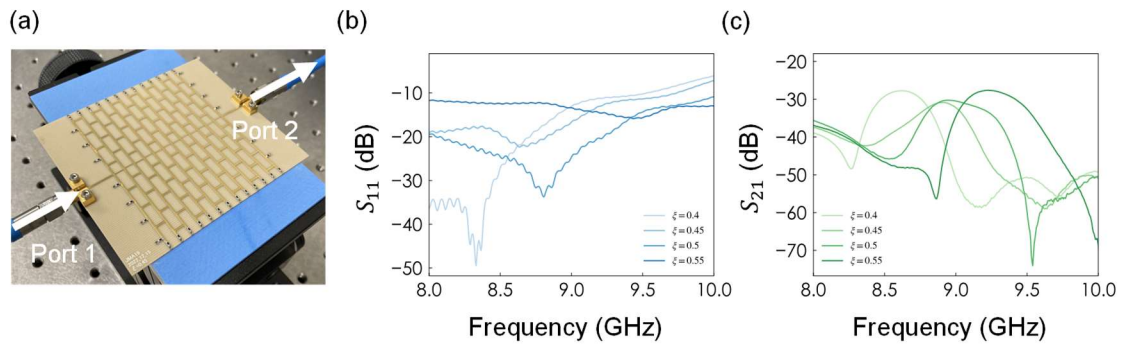


図 5 : (a) 反射係数と透過係数の測定系。試作基板 ($\xi = 0.45$) にエンドランチコネクタを取り付けられ、ベクトルネットワークアナライザにて反射特性と透過特性が計測される。(b) 反射係数。(c) 透過係数。

<引用文献>

- ① Y. Nakata *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 073901 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 中田 陽介, 浦出 芳郎, 中西 俊博	4. 巻 31
2. 論文標題 材料・光学部品	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 77-87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryo Takahashi, Yosuke Nakata and Shuichi Murakami
2. 発表標題 New formalism for studying topological phases of electric circuits
3. 学会等名 APS March Meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松平淳哉, 真田篤志, 中田陽介
2. 発表標題 2次元フォトニック結晶の連続変形によるトポロジカル局在状態の生成：理論的検討とマイクロストリップ線路による実装方法の検討
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田陽介
2. 発表標題 メタマテリアルのトポロジカルな電磁応答
3. 学会等名 光電相互変換第125委員会 第257回研究会「光とトポロジー」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田陽介
2. 発表標題 フォトニック結晶の連続変形によるトポロジカルモード生成
3. 学会等名 COMSOL Simulations WEEK 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田陽介
2. 発表標題 メタマテリアルにおける双対性・トポロジ
3. 学会等名 「物理工学の新展開」ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本明大, 中田陽介, 村上修一
2. 発表標題 超格子構造を持つ正負誘電体における電磁波の幾何学的位相の理論
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiro Okamoto, Yosuke Nakata, and Shuichi Murakami
2. 発表標題 Topological phases of electromagnetic waves in superlattices of negative- and positive- epsilon materials
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------