



丸文研究奨励賞 受賞者

北村 恭子

東北大学 大学院工学研究科 教授

## 変調フォトニック結晶による 光伝搬・偏光制御技術の開発

規則正しい周期構造への空間的な変位・変形付与による光制御

### 研究の背景

太陽光、白熱電球、LED...光は我々の手元を照らし続けてきた。「あかり」としての光に対して、最も理想的な光といえるレーザーは、その発展により、今や通信の担い手となり、センシング、板金加工、生命科学、光・量子コンピューターなど、我々の生活の基盤でもあり、最先端の科学技術を牽引するものでもある。レーザーの物理量

は、周波数、振幅、偏光、位相と、いわゆる波の物理量が挙げられる。これらの物理量の空間的な制御は、回折限界などの光の限界を超えたナノ空間での物質の操作を可能にし、世界共通の学術的関心事である。また、光の伝搬方向の制御は、光学センサーや光学迷彩などへの展開が指向され、工学的関心が高い。従来、このような空間的な光波の制御や伝搬方向の制御は、光源に対して、ミラーや偏光素子など

の外部光学素子を設けることで新たなレーザー共振器を構成したり、機械的駆動によって外部素子を動作したりと、光源以外の別素子で行われていた。これらを外部素子によらない単一素子で実現することは、装置構成の小型化やスイッチング速度の高速化等が見込まれる。

フォトニック結晶は、光の波長程度の半導体ナノ周期構造からなり、光を究極的に制御可能な材料として注目を集めてきた。フォトニック結晶では、それを構成する格子点の周期構造により、固体結晶中で原子配列により電子のバンド構造を形成するのと同様に、光に対するバンド構造を形成することができる。このフォトニックバンド構造のエンジニアリングがフォトニック結晶における光制御において極めて重要であることから、格子点の規則正しい周期構造を主として研究が進められてきた。本研究では、このようなフォトニック結晶に対して、格子点変位(変調、あるいは、歪)を与えることで、新たな光制御の可能性を見出すことを目指した。

### 研究の成果

1. 周期的な格子変位を与えた「変調フォトニック結晶」による、2次元ビーム出射方向制御・偏光制御、任意の偏光分布ビーム光源への展開

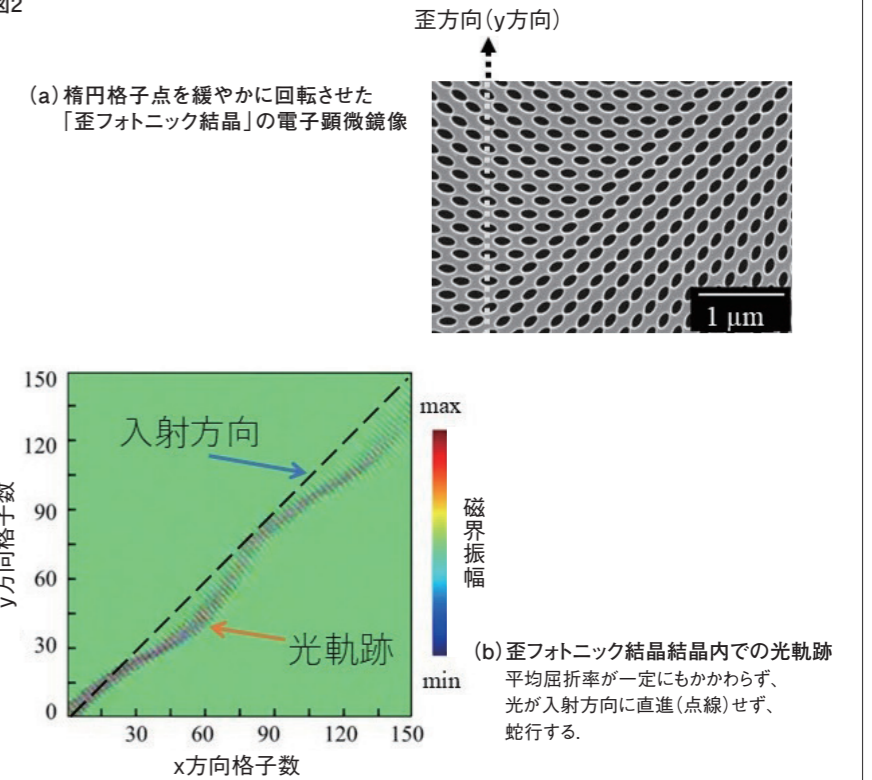
我々はフォトニック結晶に、周期的な格子点変位を与えた「変調フォトニック結晶(図1)」を考案し、半導体レーザーのスイッチングで、高速かつ小型に2次元的なビーム走査が可能な新たなフォトニック結晶レーザーを開発した。これにより、 $\pm 45^\circ$ の広範囲において、離散的にも、連続的にも単一素子での2次元ビーム走査を実現し

た[1-3]。これは、フォトニック結晶に対して、周期的な位置変位を与えることが、フォトニック結晶の2次元共振に対して任意の波数ベクトルを導入することに相当し、その結果、上方回折方向を制御できることによるものである。変調を与える方向も制御すると、上方回折される電界ベクトルを制御することも可能であり、円偏光を含む出射ビームの偏光状態制御を実現した[4]。さらに、変調方向を空間的にも拡張して制御すると、原理的に任意の偏光分布ビームを発生可能である[5]。

2. 各格子点の位置や形状を周期配列から緩やかに変位・変形させた、格子歪を有する「歪(ひずみ)フォトニック結晶」による、新たな光軌道制御への展開

光(電磁波)の伝搬は、透明な媒質中において屈折率により制御される。媒質内での光の操舵は、レンズに代表されるように、空間的な屈折率分布によって行われる。誘電率と透磁率の双方を制御可能なメタ材料は、一般にサブ波長の共振器からなり、金属などの損失の大きな材料によって構成されている。一方、フォトニック結晶を構成する格子点に対して、連続的かつ格子定数に対して数%以下の緩やかな変化(格子歪、と呼ぶ。図2の例では、楕円格子点が歪方向に38格子程度で90度回転する程度)を与えた「歪フォトニック結晶」を用いると、平均屈折率が一樣であっても光伝搬軌道を制御することが可能になる。我々は、格子歪の効果を微分幾何学の観点から理論的に明らかにし、その後、テラヘルツ波によりその光軌道を実験実証した[6,7]。これは、格子歪が、等方的なフォトニックバンド構造に対して、異方性を与えるためであり、歪フォトニック結晶面

図2



内で、光を入射すると、平均屈折率が一樣であっても、歪方向とは逆の方向に光の軌道を曲げたり、蛇行させたりすることができ。そのため損失はなく格子歪のみで光を操舵できる点に現実的な優位性がある。

た。特に、変調フォトニック結晶レーザーにより得られる偏光分布ビームや円偏光ビームは、金属やポリマー等との相互作用により、物質科学分野におけるキラリティーの制御への応用も期待される。

### 将来の展望

本研究では、元来、格子点の規則正しい周期構造で構成されるフォトニック結晶に対して、その実空間の格子点配列に空間的な格子変位を与えることで得られる、新たな光制御の可能性を示し

### 謝辞

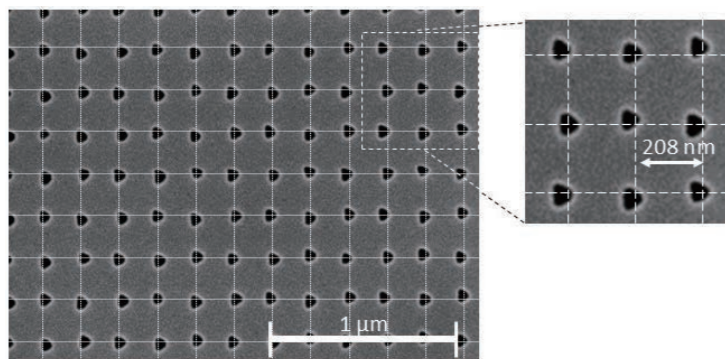
本研究は、京都大学・野田進教授および野田研究室のメンバー、大阪大学・富士田誠之准教授、ならびに、前所属の京都工芸繊維大学・北村研究室のメンバーのご支援・ご協力の下に行われました。この場をお借りして心より感謝申し上げます。

### References(参考文献)

- [1] S. Noda, K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda, and Y. Tanaka, Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 23, No. 6, 4900107(2017).
- [2] Y. Tanaka, A. Nishigo, K. Kitamura, J. Gellela, and S. Noda, AIP Advances, Vol. 9, Issue 11, 115204(2019).
- [3] R. Sakata, K. Ishizaki, M. D. Zoysa, K. Kitamura, T. Inoue, J. Gellela, and S. Noda, Applied Physics Letters 122(13) 130503-130503(2023).
- [4] K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda, and S. Noda, Optics Letters, Vol. 44, No.19, pp. 4718-4720(2019).
- [5] 「フォトニック結晶レーザー」特許7057949号
- [6] H. Kitagawa, K. Nanjyo, and K. Kitamura, Physical Review A Vol.103, pp. 063506(2021).
- [7] K. Nanjyo, Y. Kawamoto, H. Kitagawa, D. Headland, M. Fujita, and K. Kitamura, Physical Review A Vol. 108, pp. 033522(2023).

図1

(a) 変調フォトニック結晶の電子顕微鏡像  
格子周期の10%以下の変位のため、一見ランダムな構造に見える。



(b) 変調フォトニック結晶レーザーにより生成した偏光分布ビーム  
偏光の回転次数 $l$ や、暗点の大きさも自在に制御可能。

