

フォトニック結晶の特性

出典：John D. Joannopoulos 等, Photonic Crystals - Molding the Flow of Light

Ⅲ類 大淵研究室
2010070 今井 陸人

(輪講 A について)

輪講では John D. Joannopoulos らによる Photonic Crystals — Molding the Flow of Light のテキストを用いてフォトニック結晶の概要について学習を進めた。

第 1 章では、光の伝搬を完全にコントロールできる材料が何であるかを探すために、電子材料との類似性を基に検討した。電子材料では、結晶を伝搬する電子に周期的なポテンシャルが与えられて、結晶の構成要素と格子の形状により伝導特性が決定づけられた。結晶のエネルギーバンド構造にはギャップが存在し、電子が特定の方向に特定のエネルギーで伝搬することが禁じられていることを意味している。半導体では、価電子帯と伝導帯の間にバンドギャップが生じており、電子の伝搬を制御している。半導体の、光学的な類似体としてフォトニック結晶が挙げられる。フォトニックバンドギャップを持つような結晶構造を作成することで光を制御することができるということを学んだ。

第 2 章では、誘電体媒質に適用される巨視的なマクスウェル方程式を扱った。混合誘電体媒体内の伝搬にのみ限定することで、電荷や電流が存在しない状況を考える。この時、マクスウェル方程式は、線形演算子を用いることでエルミート微分方程式に変換することができる。この方程式を使うことでモードの直交性や電磁変分定理、誘電体系のスケーリング則などの有用な特性を容易に示すことができる。また、マクスウェル方程式では、長さスケールを持たない。したがって、調和モードがわかっている時、誘電率と周波数の間の関係を導くことが可能である。

第 3 章では、フォトニック結晶に適用される固体物理学と対称性理論の基本的な概念について扱った。フォトニック結晶は周期的な誘電体であり、バンドギャップを議論する上で、重要である並進、回転、ミラー、反転、時間反転対称性などの対称性を用いた議論が可能である。これらを用いて電磁波モードについて検討した。並進対称性を用いた例として 1 次元のガラス板におけるバンド構造を確認した。

第 4 章では、1 次元系のフォトニック結晶の特性を確認した。前章で学んだ対称性の議論を使って、フォトニック結晶の重要な性質であるフォトニックバンドギャップ、局在モード、表面状態について学習をした。1 次元結晶として、誘電率の異なる物質の膜を重ねた多層膜を用いて学習をした。多層膜の軸上伝搬のときのフォトニックバンド構造をプロットしてみると、誘電率のコントラストが大きければ大きいほど、フォトニックバンドギャップが大きくなることが確認できた。完全周期系の結晶の他に、欠陥を導入して並進対称性が崩れた系についても同様に検討をした。1 次元では欠陥面内に光を閉じ込めることができることを学習した。

第 5 章では、2 次元系のフォトニック結晶の特性について学習をした。この結晶は 2 方向に周期的であり、第 3 の方向には均一であるような結晶である。2 次元結晶として、誘電体柱を並べた結晶を考えた。この時、誘電体柱を正方格子状に並べる場合と三角格子状に並べる場合について検討をした。2 次元結晶では周期性のある面にフォトニックバンドギャップが現れる。この面内を伝搬する光の場合、モードを 2 つの偏光 (TE モードと TM モード) に分けることができそれぞれ独自のバンド構造を持つことを学習した。また、1 次元結晶の場合と同様にして欠陥を導入した際の振る舞いについても検討した。2 次元結晶の欠陥は点欠陥と線状欠陥の 2 種類ありそれぞれについて、欠陥に光が局在化していることを確認した。

第 6 章では、3 次元系のフォトニック結晶の特性を学習した。結晶のどの方向にも伝搬状態を許さない完全なフォトニックバンドギャップを持つ 3 次元結晶として、ダイヤモンド格子やヤブロノバイト、ウッドパイル、逆オパールなどの構造について学習した。3 次元結晶についても、点欠陥と線状欠陥について検討をした。