

# 光の断熱波長変換と共振器オプトメカニクス — 二層型フォトニック結晶を例に —

納 富 雅 也

## Adiabatic Energy Conversion and Cavity Optomechanics in Bi-Layer Photonic Crystals

Masaya NOTOMI

Here we show that if we employ a high  $Q$  optical micro-cavity effectively coupled to a certain mechanical displacement, we can realize ultraefficient energy conversion between electromagnetic and mechanical energies via the adiabatic wavelength conversion process. We also show that bi-layer photonic crystal cavities are especially promising for achieving ultrastrong optomechanical coupling, and demonstrate numerical and experimental results for this particular structure.

**Key words:** cavity optomechanics, photonic crystal, nanocavity, adiabatic wavelength conversion

近年、共振器オプトメカニクスとよばれる分野が活発に研究されている<sup>1,2)</sup>。この分野は従来、光マイクロマシン、または MOEMS (micro opto-electro-mechanical system) とよばれている分野とかなり重なっており、光によって力学運動を駆動したり、力学運動により光を制御することを目指しているが、特に近年実現可能になったマイクロ共振器を使って、光力学相互作用の増強を図っている点が、この研究の特徴である。

光と力学運動の結合は古くから知られている現象で、その代表的なものは輻射圧である。輻射圧は、光が物体に衝突する際に、光の運動量が物体に移って物体が駆動される現象である。一般に、衝突現象においてエネルギーの交換効率を高めようとするならば、Newton's cradle のように衝突物体の質量を等しくする必要がある。ところが光の場合は、この質量が小さい（静止質量はゼロ）ために、物体が相対論的領域にない限り、変換効率は極端に小さい。したがって、光ピンセットを使うには大きな光パワーが必要である。また、SF 小説に登場する光子ロケットは、相対論的速度に近づかない限り、効率は悪い。

しかし、実際には「光を局所的に強く閉じ込める系」を用いると、非相対論的領域においても上記の単純な衝突画像の限界を克服することができる。これがまさに、最近の共振器オプトメカニクスの分野での研究舞台となってい

る。ただ、この分野はかなり広範な広がりを見せているので、本稿では、われわれの研究グループが数年前から研究している構造を例に、どのように光閉じ込め構造を用いて光力学相互作用を増強できるかを紹介することにする。その中で、「断熱的波長変換」という一見オプトメカニクスとは関係がないように見える現象が、光力学相互作用の増強に大きな意味をもつことを示したい。

### 1. 二層フォトニック結晶における断熱波長変換と光力学エネルギー変換

本稿で紹介する構造は、図1に示す2層のフォトニック結晶である。フォトニック結晶に関する説明は他の文献に譲るが<sup>3)</sup>、「小型で高  $Q$  値の共振器を実現できる」という特徴がここでは重要である。図の構造は1層の（つまり通常の）超高  $Q$  共振器を半分にした構造になっているが、この2層構造も超高  $Q$  共振器として機能し、その  $Q$  値はギャップ長に依存しないことを、われわれは理論計算により見いだした<sup>4)</sup>。一方、共振波長はギャップ長に強く依存する（図2）。

この二層高  $Q$  共振器に光パルスを保持している状態で、共振器の片方の層を垂直に動かしギャップ長を変化させたとき、保持された光がどう変化するかを数値実験により調べたところ、共振波長が大きく変化するのに同調して、保持された光の波長が変換されることを見いだした（図2）<sup>4)</sup>。

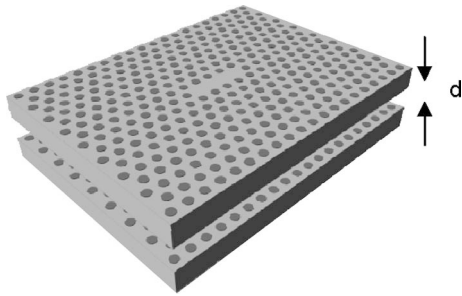


図1 二層フォトニック結晶共振器. 層間ギャップ  $d$  により力学自由度と結合する.

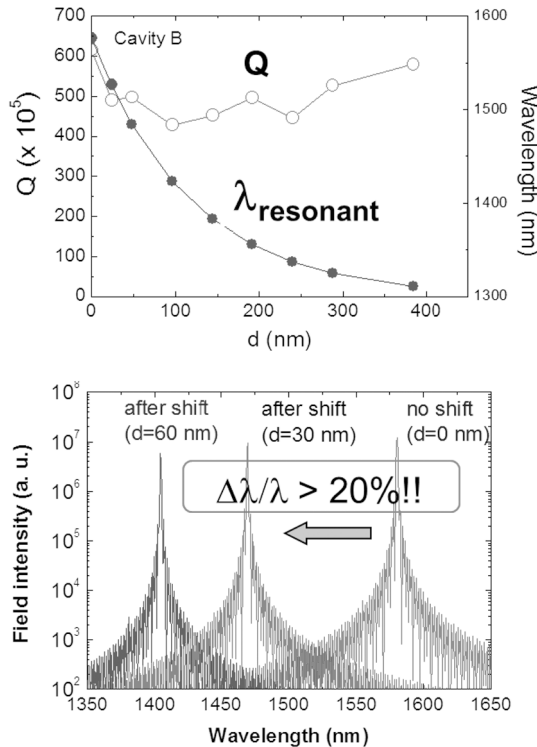


図2 二層共振器の  $Q$  値および共振波長のギャップ依存性 (上). 同共振器のギャップ変化による断熱波長変換の数値計算結果 (下).

これは、近年微小共振器の世界で関心を集めている、光の断熱波長変換<sup>5,6)</sup>に相当する。断熱波長変換とは、ギターの弦をつま弾いた後でペグを回して音程を上下するのと同じ原理で、光の波長を変える現象である。

この現象は別の見方をすると、力学運動が共振器に閉じ込められた光子1個1個に対して仕事をして、光子の周波数を変えているとみなすことができる。図2の結果では光子の周波数が20%も変化しており、力学運動が共振器の光子寿命内に完了すればほかにエネルギー損失はないので、高効率に力学運動を光のエネルギーに変換できる。

この現象は逆過程を考えることができる。初めに光パルスが保持された状態で共振器をフリーにすると、光パルス

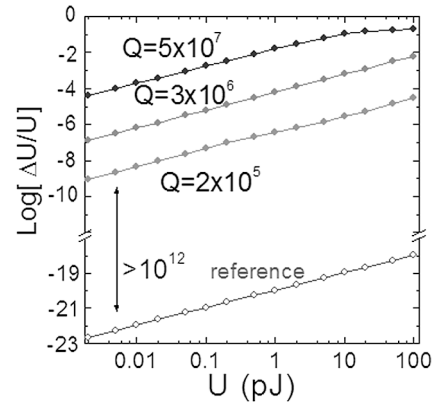


図3 共振器内光パルスの電磁場エネルギーから共振器の運動エネルギーへの変換効率.

のエネルギーが力学系に移り、共振器を駆動することができるはずである。これは次のように、力の発生とその力積作用という2つのプロセスに分けて考えることができる。

まず、共振波長が大きなギャップ長依存性をもつということは、閉じ込められた光にとっては光子のエネルギーがギャップ長依存性を持ち、 $d\omega_c/dz$  ( $\omega_c$ は共振周波数)が大きいということである。エネルギーの空間微分が力であることから、この閉じ込められた光は巨大な輻射圧を生じることがわかる。実際に図1の共振器では、ほぼ1 pJの光パルスで1  $\mu$ Jの力を生じる<sup>4,7)</sup>。この比率は、他の光マイクロマシンと比べると桁違いに大きな値である。

一方、この力がどれだけ作用を及ぼすかは、光の閉じ込め時間と力の積、つまり力積が決める。図1の構造は非常に  $Q$  値が高く、長い光子寿命が実現可能なので、力積も非常に大きくなる。結果として、どれだけのエネルギー変換効率が得られるかを運動方程式を解いて計算すると、図3のようになる。フォトニック結晶共振器はすでに数百万の  $Q$  値が達成されており<sup>8)</sup>、その値を考えても変換効率は数パーセントに達する。この値は通常の光マイクロマシンと比べると、12桁以上大きな値である。

このような巨大なエネルギー変換効率を得られた原因は、次のようにまとめることができる。(1) 共振器が小型であり特殊な配置を用いたために (要は  $d\omega_c/dz$  の大きな共振器) 輻射圧が増大、(2) 共振器が小型であるため質量が軽い、(3) 共振器の閉じ込めが強いために相互作用時間が長い。つまり、高  $Q$  値で小型の共振器があれば変換効率を増強できる、ということがわかる。この特徴は他のマイクロ共振器でも得ることができるが、特にフォトニック結晶は小型でかつ超高  $Q$  値が実現できるために、上記の効果が大きい。

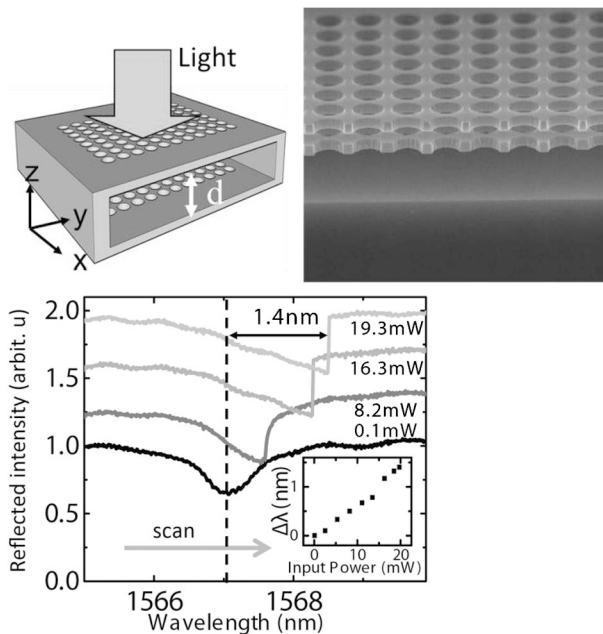


図4 作製したInP二層フォトニック結晶の構造と反射スペクトルの入射強度依存性. 膜厚およびギャップはどちらも200 nm.

## 2. 二層フォトニック結晶の作製と輻射圧の発生

上記の理論提案ののち、筆者らは実際に2層のフォトニック結晶を作製する試みを開始し、最近、図4のような構造の作製に成功した<sup>9)</sup>。われわれが知る限り、フォトニック結晶の二層構造の作製はこれが初の例である。この構造はまだ図1のような点欠陥型の共振器は入っていないが、フォトニック結晶のバンド端の共鳴準位を用いると、面型共振器として機能する。この構造では、2層の対称性が異なる even と odd の2つのバンド端準位が存在する。

図のように垂直方向からバンド端準位に共鳴した光を照射し、反射スペクトルを同時測定したところ、光強度に応じたスペクトルのシフトが観測された。このシフトの方向は even 準位と odd 準位では逆方向であったが、これは対称性の違いにより両準位の  $d\omega_c/dz$  の符号が逆であることと対応している。波長シフトは熱的変形でも起こりうるが、パリティに対応して変形の方法が逆転していることから、シフトが輻射圧による変形であることがわかる。

重要な点は、単位光エネルギーあたりどれだけの輻射力が発生しているかという点であるが、上記の実験における輻射力は10.6 nNであり、0.4 μN/pJ と見積もられた。この値は他のシステムと比べてもきわめて大きな値である。

この試料は高Q共振器ではないため、断熱的にエネルギー変換を行うところまでとはいっていないが、力学的な共振と組み合わせることによってエネルギー移行を起こすことができる。図5は、真空中で二層共振器を光励起することにより、フォトニック結晶全体の機械共鳴振動(1.5

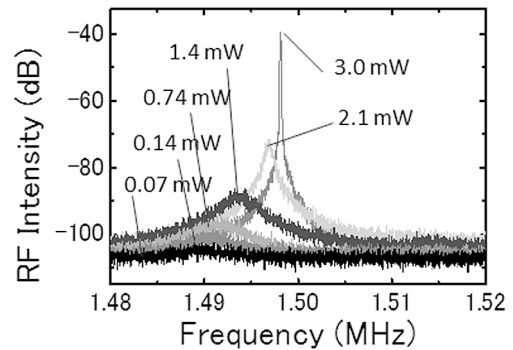


図5 機械共鳴振動の自励発振. 閾値2 mWで発振している。

MHz) を自励発振させた結果である。これは機械振動のレーザー発振に相当するもので、他のさまざまなオプトメカニクス系でも同様な観測が行われている。

近年、微小共振器と小型機械共鳴系を組み合わせた系で強い光力学相互作用が観測されており、機械振動の零点振動と単一光子の結合さえ見えはじめている。しかし、本稿の前半で紹介した、機械振動の共鳴を用いない断熱的なエネルギー変換は、まだ観測されていない。もしこれが実現すれば、光励起により高速でかつ大きな displacement を引き起こすことができる。そのためにはギャップに依存せず、高いQ値を保てる構造がきわめて重要である。

## 文 献

- 1) T. J. Kippenberg and K. J. Vahala: "Cavity optomechanics: Back-action at the mesoscale," *Science*, **321** (2008) 1172–1176.
- 2) M. Eichenfield, R. Camacho, J. Chan, K. J. Vahala and O. Painter: "A picogram- and nanometre-scale photonic-crystal optomechanical cavity," *Nature*, **459** (2009) 550–579.
- 3) M. Notomi: "Manipulating light with strongly modulated photonic crystals," *Rep. Prog. Phys.*, **73** (2010) 096501.
- 4) M. Notomi, H. Taniyama, S. Mitsugi and E. Kuramochi: "Optomechanical wavelength and energy conversion in high-Q double-layer cavities of photonic crystal slabs," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 023903.
- 5) M. Notomi and S. Mitsugi: "Wavelength conversion via dynamic refractive index tuning of a cavity," *Phys. Rev. A*, **73** (2006) 051803 (R).
- 6) T. Tanabe, M. Notomi, H. Taniyama and E. Kuramochi: "Dynamic release of trapped light from an ultrahigh-Q nanocavity via adiabatic frequency tuning," *Phys. Rev. Lett.*, **102** (2009) 043907.
- 7) H. Taniyama, M. Notomi, E. Kuramochi, T. Yamamoto, Y. Yoshikawa, Y. Torii and T. Kuga: "Strong radiation force induced in two-dimensional photonic crystal slab cavities," *Phys. Rev. B*, **78** (2008) 165129.
- 8) Y. Taguchi, Y. Takahashi, Y. Sato, T. Asano and S. Noda: "Statistical studies of photonic heterostructure nanocavities with an average Q factor of three million," *Opt. Exp.*, **19** (2011) 11916–11921.
- 9) Y. G. Roh, T. Tanabe, A. Shinya, H. Taniyama, E. Kuramochi, S. Matsuo, T. Sato and M. Notomi: "Strong optomechanical interaction in a bilayer photonic crystal," *Phys. Rev. B*, **81** (2010) 121101 (R).

(2011年10月3日受理)