

**一本のカーボンナノチューブとフォトニック結晶の高効率光結合を実現
ー微小な光デバイスへの応用に期待ー**

- 1. 発表者：** 加藤 雄一郎（東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 准教授）
荒川 泰彦（東京大学 生産技術研究所 教授）
岩本 敏（東京大学 生産技術研究所 准教授）
嶋田 行志（東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 助教）

2. 発表のポイント：

- ◆ 一本のカーボンナノチューブから出た光を推定効率 85%以上で光構造（注1）に伝搬（結合）させることに成功
- ◆ 独自に開発した新しいデザインのフォトニック結晶（注2）構造により効率を劇的に向上
- ◆ 原子一層からなる材料を利用したレーザーなど微小な光デバイスの実現に期待

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の加藤雄一郎准教授と同生産技術研究所の荒川泰彦教授らの研究グループは一本の単層カーボンナノチューブ（注3）から発生した光を推定効率 85%以上でフォトニック結晶構造中に伝搬させることに成功しました。単層カーボンナノチューブはよく光る微小な物質として知られており、光通信に使われる近赤外光（注4）を発生し、集積回路に利用されているシリコン上で合成できるため、微小な光デバイスへの応用が期待されています。しかし、強く発光させるために宙に浮いた状態にしたカーボンナノチューブでは、発生した光を光構造中に伝搬させる際の効率が低い点が課題となっていました。

研究グループは新しいデザインのフォトニック結晶構造を用いることで、通常はシリコン部分に閉じ込められている光が空気部分に大きく広がった分布を実現し、空気中に存在するカーボンナノチューブとの光結合（注5）効率を大幅に高めました。この技術は原子一層からなる材料を利用したレーザーなど微小な光デバイスへの応用が考えられ、光回路の微細化や新しい機能を持った光デバイスの開発に貢献することが期待できます。なお、本成果は英国科学雑誌「Nature Communications」（オンライン版：2014年11月25日）に掲載されました。

4. 発表内容：

＜研究の背景＞

単層カーボンナノチューブとは炭素原子一層のシートを直径数ナノメートルの筒状に丸めた構造の物質で、光通信に使われている近赤外光を発生することが知られています。また、集積回路に利用されているシリコン上で直接合成することができるため、微小な光デバイスへの応用が期待されています。しかし、構成原子すべてが表面にあるという単層カーボンナノチューブ独特の構造のため、発光現象は表面の状態に非常に敏感に反応し、他の物質と接触している

と光らなくなってしまう。そこで、発光を利用するために、溝をあらかじめ加工しておき、カーボンナノチューブを橋渡しして宙に浮かす方法が用いられます。一方で、光を伝える・曲げる・閉じ込めるために使われる光構造では、多くの場合、屈折率が大きく異なる物質へは伝搬しにくいという光の性質を利用しています。そのため、屈折率の小さい空気中に存在するカーボンナノチューブから発生した光を、屈折率の大きいシリコンでできた光構造中に伝搬させる際には、効率が原理的に低くなってしまう点が課題となっていました。

<研究成果>

研究グループは、独自に開発したフォトニック結晶構造を用いることにより、一本のカーボンナノチューブから発生した光を高効率に光構造内へと伝搬させることに成功しました。屈折率の周期的な変化を利用するフォトニック結晶では、光の性質を柔軟に制御して微小な領域に光を閉じ込めることができます。このような微小光共振器（注6）は、やはり微小なサイズであるカーボンナノチューブから光を伝搬させる光結合に適していますが、従来の構造では光が屈折率の高いシリコン部分に閉じ込められていて高効率な光結合が望めませんでした。そこで、新しいデザインを用いることで屈折率の低い空気部分に光が大きく広がっている構造とし（図1）、空気中に存在するカーボンナノチューブと光結合しやすくしました。

フォトニック結晶微小共振器構造はシリコンを微細加工して作製しており、その片側に配置した触媒からカーボンナノチューブを合成して共振器に取り付けます（図2）。高感度な近赤外顕微鏡により、一本のカーボンナノチューブと光結合した共振器を判別し、数十個以上について調べたところ、設計通りに空気部分で光結合していることが明らかになりました。また、光結合効率が約二倍以上と劇的に向上し、最も高いものでは85%に達していると推定されました。

<展望>

今回の成果により、原子一層からなる微小な材料から発生した光を高効率で光共振器に結合できることを示すことができました。これは、ナノメートル程度の大きさのレーザーなどの光デバイス実現に向けた重要な第一歩で、光をチップ上で制御する光集積回路の微細化に貢献する可能性があります。また、カーボンナノチューブでは通常の二倍の電流が発生する光電変換現象の報告があり、本成果と融合させた高効率太陽電池への応用も期待されます。将来的には、カーボンナノチューブ特有のスピンや量子物性を利用することにより、新しい機能を持った光デバイスの開発が期待されます。

なお、本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）、科学研究費補助金（24340066, 24654084, 26610080, 26870167）、旭硝子財団、キヤノン財団、KDDI財団、文部科学省イノベーションシステム整備事業および最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラムの支援を受けて行われました。また、デバイスの加工は東京大学超微細リソグラフィ・ナノ計測拠点で実施されました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」（オンライン版：2014年11月25日）

論文タイトル：Ultralow mode-volume photonic crystal nanobeam cavities for high-efficiency coupling to individual carbon nanotube emitters

著者: R. Miura, S. Imamura, R. Ohta, A. Ishii, X. Liu, T. Shimada, S. Iwamoto, Y. Arakawa, Y. K. Kato*

DOI 番号: 10.1038/ncomms6580

6. 問い合わせ先:

加藤 雄一郎 (かとう ゆういちろう)
東京大学 大学院工学系研究科 総合研究機構 准教授
URL: <http://ykkato.t.u-tokyo.ac.jp/>

7. 用語解説:

(注1) 光構造

光を制御するために使われる構造のこと。光を伝えたり、曲げたりするための導波路や、光を閉じ込めるための光共振器などがある。

(注2) フォトニック結晶

屈折率が周期的に変化する光構造で、特にその周期が光の波長程度の場合は光を制御することができる。フォトニック結晶では、光の伝搬を禁止するフォトニックバンドギャップが存在するため、これを利用して微小な空間に光を閉じ込めることが可能となる。

(注3) 単層カーボンナノチューブ

炭素一層からなる直径1~3ナノメートル程度の筒状物質のこと。炭素原子からなる六角形を平面状に並べた蜂の巣格子になっている単原子膜をグラフェンと言い、単層カーボンナノチューブはこれを巻いて筒にした構造を有する。発光特性を利用したフォトニクス応用が期待されている他にも、電気伝導や熱伝導、強度などで優れた物性を持っており、電子デバイスや構造材料応用に向けた研究も盛ん。

(注4) 近赤外光

赤色の可視光よりやや長い波長を持つ光。光ファイバー内の伝搬に適しているため光通信に利用される他、赤外線カメラや家電のリモコンなどでも使われる。

(注5) 光結合

光を介して結び合わさること。ここでは、カーボンナノチューブから発生した光が光共振器の中に伝搬することを指す。

(注6) 光共振器

光を閉じ込める構造のこと。最も単純なものは二枚の対面する反射鏡で構成されていて、鏡と鏡の間を光が往復して逃げ出さないようになっている。光共振器はレーザーの主要部分で、レーザー光を得るためには光共振器の中に光を増幅する媒質を入れる必要がある。

8. 添付資料：

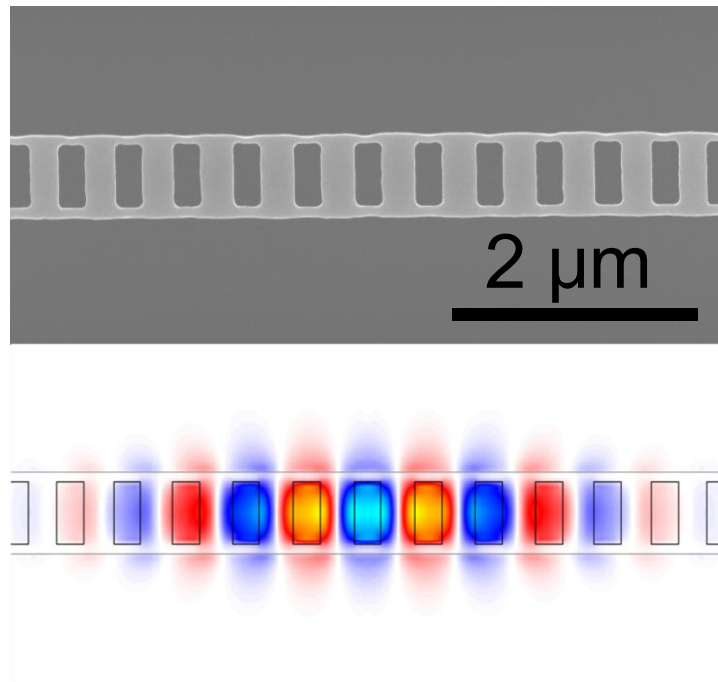


図1：独自開発した新しいデザインのフォトニック結晶共振器の電子顕微鏡写真（上）と光分布のシミュレーション結果（下）。穴の周期性の変調方法を工夫することによって、空気部分に光が多く存在する構造を実現した。

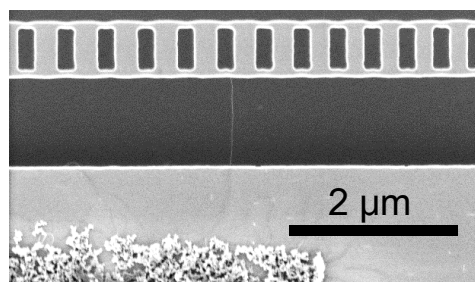
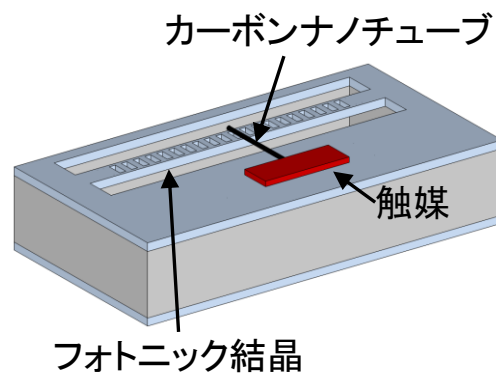


図2：カーボンナノチューブを取り付けたフォトニック結晶共振器の模式図（上）と電子顕微鏡写真（下）。