2026 年 8 月 5 日

報道関係各位

**カーボンナノチューブの配向を狙った場所だけ調整する新たな光プロセスを開発**

～サブマイクロスケールの空間解像度で局所制御、次世代半導体デバイス実現に期待～

東京理科大学
大阪大学
理化学研究所
科学技術振興機構（JST）

## 研究の要旨とポイント

- 無配向なカーボンナノチューブ（CNT）膜に、偏光制御された超短パルスレーザーを照射して、特定の向きに並んだ構造を局所形成する新技術を開発しました。
- サブマイクロスケールの空間解像度で、従来最高水準の極めて高い配向品質を達成しました。
- 同一チップ上に異なる方位の CNT を高密度集積でき、局所配向 CNT を画素とした「テラヘルツ偏光イメージセンサー」や、次世代の「高速・低消費電力ロジックデバイス」の実現が期待されます。

【研究の概要】

カーボンナノチューブ（CNT, ＊1）は優れた電気的・光学的特性を持つ次世代のデバイス材料ですが、デバイス応用にはその配向方向を厳密に制御する技術が不可欠です。東京理科大学 理学部第一部 物理学科の西原 大志准教授、産業技術総合研究所 センシング技術研究部門の鈴木 大地主任研究員らの共同研究グループは、大阪大学 産業科学研究所 先進材料実装研究分野、理化学研究所 光量子工学研究センター テラヘルツ光源研究チームらの共同研究グループとともに、製膜後の無配向 CNT 膜に対して、偏光制御された超短パルスレーザーを照射することで、特定の方向にきれいに並んだ CNT 構造を局所的に形成する新しい光後加工プロセス技術（光ポストプロセス技術）を開発しました。本技術は、材料の周囲に熱が伝わるよりも圧倒的に短い時間だけ光を照射する「超短パルスレーザー」を用いることで、CNT 固有の光学的特性を反映した非熱的な構造加工（レーザーアブレーション）を達成し、レーザー光を照射した箇所のみ CNT の配向方位をピンポイントで調整することに成功したものです。これにより、ワンショットでリアルタイムに偏光画像を撮像できるテラヘルツ偏光イメージセンサーや、次世代の高速・低消費電力ロジックデバイスの作製プロセスへの応用が期待されます。

本研究成果は、2026 年 8 月 1 日に国際学術誌「Nature Communications」のオンライン版で公開されました。

【研究の背景】

カーボンナノチューブ（CNT）は、ナノスケールの量子閉じ込め効果に由来した優れた電気的・光学的ならびに機械的特性を兼ね備えており、現在のシリコンの微細化限界を打破する次世代のデバイス材料として世界中で盛んに研究されています。CNT の材料物性はチューブの向きに強く依存するため、トランジスタやセンサーなどのデバイスに応用するためには、CNT の並ぶ向き（配向方向）を厳密に制御する技術が不可欠です。これまでにも機械的・化学的・電気的なアプローチを用いた様々な配向制御技術が開発されてきました。しかし、これらはすべて CNT を基板に製膜する前処理段階で実施されるため、配向を制御できる空間解像度はミリメートルスケールというデバイスサイズよりもはるかに大きな領域に限定されていました。そのため、「膜の中の狙った場所だけ、ピンポイントで異なる方位に配向させる」といった位置制御は難しく、これが異種配向構造を 1 つのチップ上に集積してデバイス化する上での最大の技術的課題となっていました。

【研究結果の詳細】

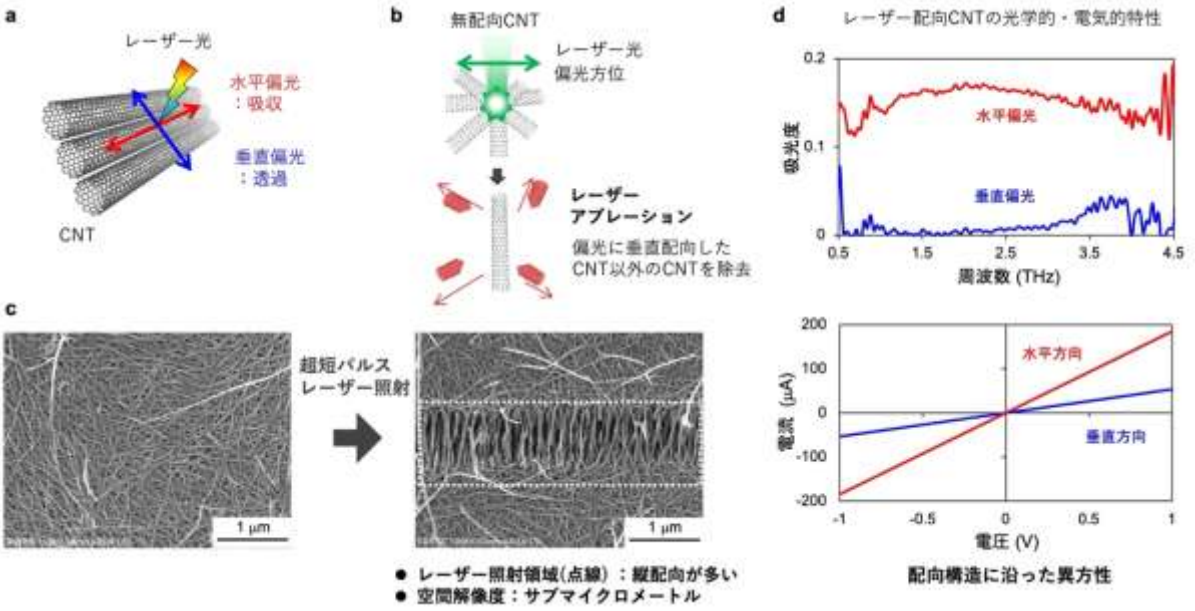



図 1 : 超短パルスによるカーボンナノチューブ配向制御のメカニズムと特性評価。(a) カーボンナノチューブ（CNT）は、チューブ軸に対して平行な偏光を強く吸収し、垂直な偏光は吸収せず、透過する。(b) 配向加工の原理。無配向な CNT 薄膜において、偏光とチューブ軸が垂直でない CNT は強く光を吸収して、高温となり、除去される。一方、チューブ軸が偏光と垂直な CNT はそのまま残る。(c) 超短パルスレーザー照射前後の CNT 薄膜の走査電子顕微鏡（SEM）像。レーザーの偏光は水平方向。(d) レーザー配向 CNT が示す、テラヘルツ帯における顕著な光吸収異方性（上図）および電気伝導特性の異方性（下図）。

本研究グループは、CNT が筒の長さ方向に対して平行な偏光を強く吸収し、垂直な偏光はほとんど透過するという強い光学的異方性（偏光特性）に着目しました（図 1a）。無配向の CNT 膜に特定の方向に偏光した超短パルスレーザーを照射すると、レーザーの偏光方向と垂直に配向していない CNT だけが光エネルギーを特異的に吸収して蒸発（アブレート）し、垂直に配向した CNT は破壊されずにそのまま残ります（図 1b）。この原理を用いて、無配向な CNT 薄膜において、レーザーを照射した場所だけレーザー偏光方位に直交した配向 CNT をサブマイクロメートル（1000 分の 1 ミリメートル以下）の空間解像度で形成することに成功しました（図 1c）。

本技術の最大の鍵は、パルス幅が数 10 ピコ秒（数 100 億分の 1 秒）以下という超短パルスレー

ザー光を使用した点にあります。光を吸収した CNT のみが一瞬で蒸発し、材料の周囲に熱が伝わるよりも圧倒的に早いタイムスケールでこの現象が起こるため、周囲の CNT には一切の熱ダメージを与えずに非熱的なナノ構造加工が可能となります。

一方、照射時間が長い一般的な連続波レーザーやナノ秒パルスレーザーでは、熱が周囲へ拡散して照射領域のすべての CNT が焼き切れてしまうため、このような構造選別加工を行うことはできません。

本技術によって作製された局所配向 CNT は、優れた電気的・光学的異方性を有していることを確認しています（図 1d）。レーザー配向 CNT の配向度を示す「2D ネマティック秩序パラメーター（＊2）」は 0.93（理想的な配向は 1）、偏光子としての性能指標である「吸光度比（＊3）」は 24.7 倍を記録しました。これは従来の大面積配向技術で得られる最高水準に匹敵するものです。また、CNT の除去に至らない極めて弱いエネルギーでレーザーを照射することにより、不要な分散剤だけを選択的に除去し、室温プロセスのまま CNT 膜の結晶品質（G/D 比、＊4）を劇的に向上させる洗浄効果があることも新たに判明しました。

【本研究の波及効果と今後の展望】

本技術の最大の特徴は、光を照射した領域だけをピンポイントで狙える圧倒的な位置制御性と空間解像度にあります。これにより、従来の技術では難しかった、マイクロメートル規模の狭い領域内に 4 つの異なる方位の CNT を並べて集積すること（図 2a）や、文字、縞状、円形といった複雑な複合構造体を膜上に直接描き出すこと（図 2b-d）が可能となりました。今後は、この光プロセス技術を活用し、局所配向 CNT を画素としたテラヘルツ偏光イメージセンサーや、次世代の高速・低消費電力ロジックデバイスの実現を目指します。

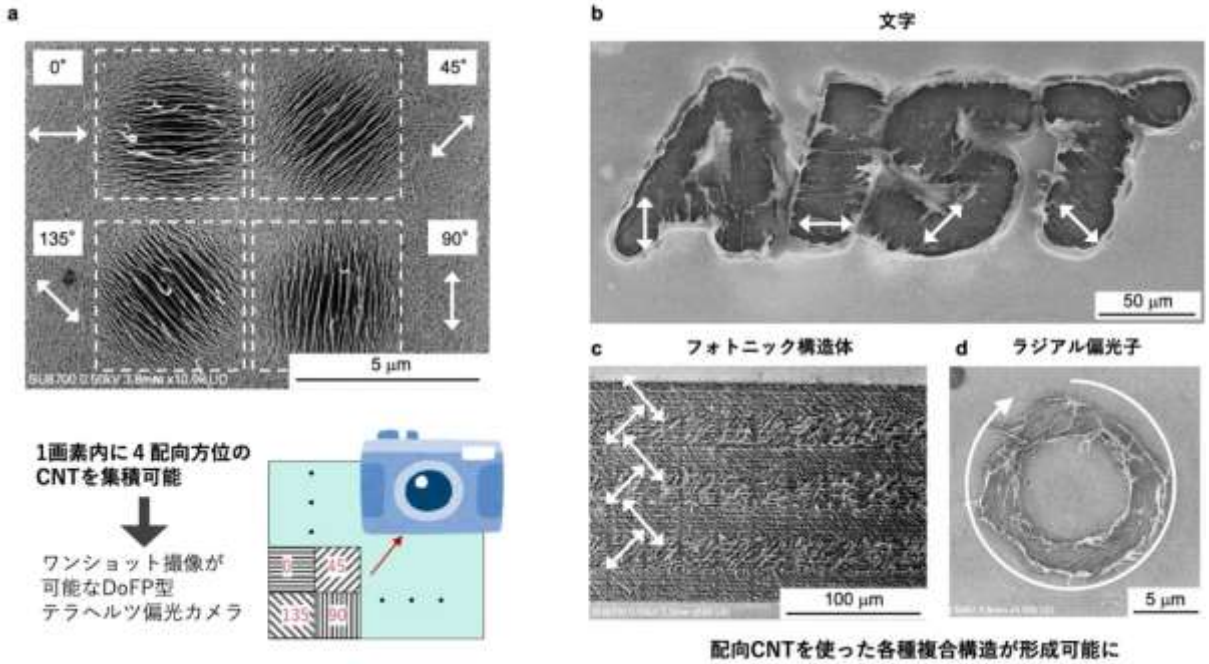



図 2：開発技術によりオンチップ形成された複雑な CNT 複合構造体。(a) 1 画素内に 4 つの方位（0°, 45°, 90°, 135°）の CNT を高密度に集積した、ワンショット偏光カメラ用素子の走査電子顕微鏡（SEM）像。(b) 「AIST」の文字形状に配向加工された CNT。(c) フォトニック構造体（縞状加工）。(d) 円形に配向方位を制御したラジアル偏光子。

※ 本研究は、科学技術振興機構 創発的研究支援事業（JPMJFR2128, JPMJFR222N, JPMJFR2022）、日本学術振興会 科学研究費助成事業（JP24K00903, JP25K01748）、ならびに公益財団法人天田

財団の助成を受けて実施されました。

【用語】

＊1: カーボンナノチューブ（CNT）

炭素原子が蜂の巣格子状に並んだシートが、直径数ナノメートル（10 億分の 1 メートル）のシリンダー状に丸まった 1 次元構造のナノ材料。優れた電気的・光学的・機械的性質を持ち、次世代の電子デバイス材料として期待されている。

＊2: 2D ネマティック秩序パラメーター

結晶や液晶、あるいはナノ材料の配向の揃い度合いを定量的に表す指標。完全にランダムな状態であれば 0、すべての分子が完全に一方向に揃っていれば 1 となる。本研究の 0.93 は、極めて高い配向品質を示している。

＊3: 吸光度比

特定の方向に偏光した光に対する材料の吸収の強さの比率。偏光子としての性能を測るベンチマークであり、この値が大きいほど高性能とされる。

＊4: G/D 比

ラマン散乱分光において炭素材料の結晶品質を評価する最も一般的な指標。欠陥のないクリーンなグラファイト構造に由来する G バンドの強度と、結晶の欠陥や乱れに由来する D バンドの強度の比率であり、値が大きいほど高品質・低欠陥であることを示す。

【論文情報】


| | |
|---|---|
| 雑誌名： | Nature Communications |
| 論文タイトル： | Localized polarization-guided alignment control in carbon nanotube films via femtosecond-pulse optical post-processing |
| 著者： | Daichi Suzuki*, Yung-Chang Lin, Yuma Takida, Hideaki Nakajima, Kaori Fujii, Takaaki Abe, Naoko Kurihira, Teppei Araki, Masanori Koshino, Toshiya Okazaki, Hiroaki Minamide, Nao Terasaki, and Taishi Nishihara*（*共同責任著者） |
| DOI： | 10.1038/s41467-026-76305-w |


【発表者】


| | |
|---|---|
| 西原 大志 | 東京理科大学 理学部第一部 物理学科 准教授　＜責任著者＞ |
| 鈴木 大地 | 産業技術総合研究所 センシング技術研究部門　＜責任著者＞ |