

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06187

研究課題名(和文)単層カーボンナノチューブデバイス分析のその場レイリーイメージング分光

研究課題名(英文)In-situ Rayleigh imaging spectroscopy for single-walled carbon nanotube device analysis

研究代表者

千足 昇平 (Chiashi, Shohei)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：50434022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：単層カーボンナノチューブ(SWCNT)の工学的デバイス応用展開の加速を目指し、光学分光計測技術を開発した。特にレイリーイメージング計測手法に着目しながら、他の光学分光イメージング法(ラマン散乱分光、蛍光発光分光など)と組み合わせ、同時に電子顕微鏡(SEM)や原子間力顕微鏡(AFM)と比較分析を行った。さらに、長尺なSWCNTの合成や、SWCNTの保護膜としてその外表面に窒化ホウ素ナノチューブを新たに合成する技術開発にも成功し、そのレイリーイメージング分析も実現した。また、SWCNT電子デバイス特性を計測しながら、光学分析も可能にする小型真空チャンバーの設計・製作にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SWCNTは注目されるナノ材料の1つであり、様々な応用デバイスが開発・報告されているが、その実用化においては多くの課題がある。その1つとして、SWCNT物性が周辺環境に非常に敏感であることが挙げられる。その為、優れたSWCNT物性をデバイス応用するには、その保護膜形成技術やデバイス機能中におけるSWCNTを非接触で計測・分析する技術が重要である。ここでは、ナノチューブによる保護膜形成技術およびレイリー分光を含めた複数の光学計測手法による非接触なイメージング計測手法を開発することに成功しており、その学術的意義だけでなく工学的応用を加速させる社会的意義も非常に大きいと考える。

研究成果の概要(英文)：We have developed an optical spectroscopic measurement technique in order to accelerate the development of single-wall carbon nanotube (SWCNT) devices. In particular, we focused on the Rayleigh image measurement method, combined with other optical spectroscopic imaging methods (Raman scattering spectroscopy, photoluminescence spectroscopy, and so on), and at the same time performed a comparative analysis with the electron microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM). Furthermore, we succeeded in synthesizing long SWCNTs on substrates and in developing technique to synthesize boron nitride nanotubes on the outer surface as a protective film for SWCNTs and realized Rayleigh image analysis. We also succeeded in designing and manufacturing a small vacuum chamber that enables optical analysis while measuring SWCNT electronic device characteristics.

研究分野：分子熱工学

キーワード：カーボンナノチューブ レイリー散乱分光 その場計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーの発展により、様々な分野にてナノマテリアルが応用されるようになってきた。構造や形状、組成の制御等によって特異な物性を示すナノマテリアルを用いることで、従来のバルク材料では成し得なかった機能や効率の実現が期待されている。ナノマテリアルの中で最も注目されるものの1つが単層カーボンナノチューブ (single-walled carbon nanotube, SWCNT) である。SWCNTは1枚のグラフェンを円筒状に巻いた構造の物質であり、直径は1~2 nm、長さは数 μm から数 mmにも達するアスペクト比の高い材料である。炭素原子の sp^2 結合のみから構成され化学的に非常に安定なだけでなく、構造によって変化する電気伝導特性 (金属的または半導体的)、高い機械的強度、軸方向に沿った高い熱伝導率など、他のバルク材料やナノマテリアルでも類を見ない多くの特異な物性を持つ。

研究代表者はこれまで SWCNT 合成法および分析技術の開発、そしてそれらを用いたデバイス応用の研究を進めてきた。応用としては SWCNT をチャネルとして用いた電界効果型トランジスタ、SWCNT 薄膜を電極とした太陽電池等が挙げられる。これらの SWCNT デバイス開発において、合成した直後、デバイスに組み込んだ状態、そして実際のデバイス動作中等といった様々なデバイス化過程において SWCNT 物性を分析・評価する必要性が明らかになった。何故ならば、SWCNT は原子1層分の厚さしかなく、置かれている周囲の環境の変化や外的要因 (接触、応力、温度変化、変形等) によってその物性が著しく変調されてしまうからである。どの段階・過程において、どのように物性が変化しているのかを把握・理解することは非常に重要であり、最終的に求められる特性を如何に発揮させるかがデバイス性能向上においてキーポイントとなる。

ナノマテリアルのデバイス応用における分析には、形状観察および物性評価の相補的な分析が重要になる。一般に、形状観察には電子顕微鏡 (SEM や TEM)、原子間力顕微鏡 (AFM) 等が用いられるが、SEM や TEM においては電子線照射の影響を無視することが難しく、また観察が真空条件に限られてしまう。一方 AFM における観察条件に制限はあまりないが、観察に長い時間が必要である。そのため、一般には形状観察と物性計測は別々に行われ、物性計測中に予想していないような現象 (例えば、SWCNT の変形、断線、分子等の吸着、化学反応等) が起き物性計測値に影響が生じても、その原因を知ることは難しい。

様々な環境条件下において短時間での測定が可能であり、SWCNT サンプルに対し非破壊・非接触でかつ SWCNT を検出できるほどの高い平面分解能を持つ観察法が実現し、物性計測中や動作中のデバイスをリアルタイムで形状観察することが可能になれば、物性評価・計測がより正確になるだけでなく、これまで明らかになってこなかった新たなナノスケールでの現象を見出すことが期待される。SWCNT の非破壊・非接触な計測手法として光学分析があり、その1つにレイリー散乱分光法が挙げられる。連続波長の白色の光を照射すると、SWCNT 特有の光学遷移エネルギーに対応した特定の波長の光だけが強いレイリー散乱ピークとして現れる。他の分光法とは異なりレイリー散乱分光法は、全ての構造や直径の SWCNT が計測可能だけでなく、測定のための特別な事前処理等が一切不要である。また、レイリー散乱光は他の散乱光に比べ強度が強いため、励起光のスポットサイズを広げることで広範囲のサンプル表面の情報 (イメージ) を得ることや、その短時間の測定も可能である。同時に、レイリー散乱によって SWCNT 以外の物質、構造体の形状観察も可能である。これらの特徴により、様々な環境におかれた任意の SWCNT の測定としてレイリー散乱イメージング分光法が有効であると考えられるが、SWCNT に対するレイリー散乱分光法は、比較的最近に開発されたものであり、その計測手法は発展途中にある。

2. 研究の目的

以上の研究背景を踏まえ本研究課題では、SWCNT サンプルの物性計測および動作中の SWCNT デバイスに対し、リアルタイム形状観察を可能にする、その場レイリー散乱イメージング計測光学系を開発し、物性計測中や動作中の様々な SWCNT サンプルや SWCNT デバイスにおけるその場形状観察を行う (図 1)。従来、サンプルの表面形状観察とは独立して行われてきた物性計測・デバイス評価を、その形状像を観察しながら行うことで、より正確な物性・デバイ

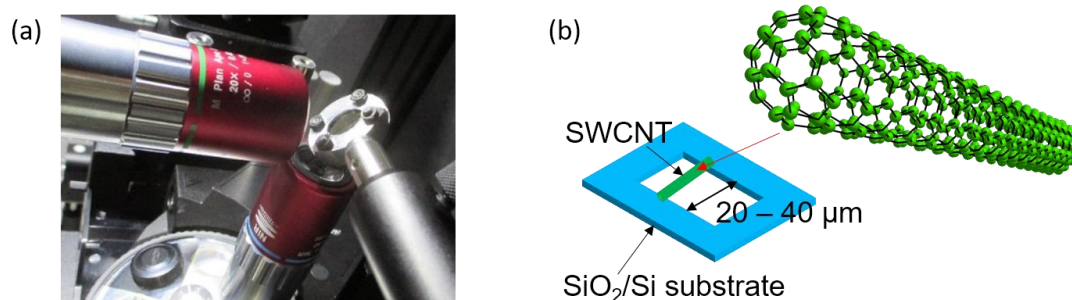


図 1 (a)レイリー散乱分光システム。2つの対物レンズを通じ、サンプルに白色レーザーを照射、散乱光を集光する。(b)スリットサンプル基板に架橋成長させた SWCNT の模式図。

ス評価が可能になるだけでなく、SWCNT 物性に与えるナノスケールの新たな現象の発見を目指していく。

3. 研究の方法

本研究課題では SWCNT サンプルとして、スリット間に直接成長させた架橋 SWCNT およびシリコン基板上的 SWCNT を用いる。架橋 SWCNT に対しては、集光したレーザー照射による光励起を利用した光学物性計測（ラマン散乱や蛍光発光）とレイリーイメージング計測を組み合わせる。集光したレーザーによって生じる SWCNT の空間温度分布、熱励起の機械的振動、ガス分子吸着等をその場レイリーイメージング計測により観察しながら、分光分析で得られる結果の外的要因の影響を明らかにしていった。シリコン基板上的 SWCNT サンプルにおいては、SWCNT のゲート電圧による物性変調の空間分布や、高電圧印加による SWCNT の破断現象（ブレイクダウン）や化学反応による SWCNT エッチングプロセス、トランジスタ特性計測時の電極接点や欠陥等からの電界発光現象等を電流電圧特性計測とレイリー形状観察の同時計測をしていく。これまでの SWCNT 物性研究の多くは SWCNT 自身の（intrinsic な）物性に着目したものであったが、応用に向け外的要因を含めた総括的な物性理解を目指す点が本研究課題の特徴的である。基礎物性および応用の両方の研究を行ってきた研究経験を活かし、その場レイリー観察を他の分析手法と組み合わせることで、より詳細な SWCNT 物性だけでなく、ナノスケールにおける新たな物理・化学現象の発見・解明を目指し、分析を行った。

まずは、レイリー散乱イメージング計測系の構築を行った。これまでに、レイリー散乱光の励起に必要な連続波長レーザー（波長 400~2000 nm, 出力 8 W）および分光器（可視波長および近赤外波長領域の検出器）を含むレイリー散乱スペクトル計測系の構築に成功している。さらにイメージ計測用の 2 次元カメラを組み合わせることで、イメージング計測系の構築を進めて行った。しかし、イメージング計測を実現するにあたり、対物レンズ下のサンプルからのレイリー散乱光における空間情報を保持しながら、効率よく 2 次元カメラまで導き結像する必要がある。同時に、レイリー散乱光は SWCNT だけでなく、（光学素子表面の傷やわずかな埃等を含む）全ての物質からも生じるため、余計な光（迷光）が生じやすい。絞りや複数の光学素子による共焦点系を採用することや、グランテーラー等の偏光子を組み合わせることで SWCNT の偏光依存性を利用し、可能な限りの迷光除去を目指していった。尚、レイリーイメージング計測は非常に広い波長範囲を取り扱うため、光学素子の波長依存性が強く現れてしまう。また同じ仕様の光学素子でも僅かに特性に差があることがあり、そのような違いを慎重に確認しながら、光学系の構築を行った。

同時に架橋 SWCNT サンプルの作製技術の向上を進めた。様々な幅のスリットを持つシリコン基板をフォトリソグラフィにより作製し、そのスリット間を架橋させるように SWCNT を直接合成する。SWCNT 合成には、エタノール化学気相堆積（CVD）法を用いる。エタノール CVD 法では、ナノサイズの金属微粒子に高温条件で炭素源となるエタノールガスを供給することで、金属微粒子から SWCNT を成長させる。長い架橋幅の SWCNT はレイリー散乱計測がより容易になる反面、速く安定した SWCNT 成長の持続が不可欠であり合成することは容易ではない。そこで、SWCNT 成長の核となる金属触媒種類、作製方法、スリット基板表面処理法、CVD 合成条件を吟味し、数 10 μm 程度の長さの架橋構造実現を目指した。また、サンプルの周辺雰囲気状態の制御用に環境制御チャンバーを設計・作製した。真空条件や特定のガス雰囲気でのレイリーイメージング計測を可能にし、同時に顕微鏡台に設置可能な小型のチャンバーは非常に多くの厳しい設計要件があるが、特に窓ガラス材やサンプル基板の固定方法に注意しながら進めた。

以上のように構築した光学計測系を用いて様々な SWCNT サンプルの物性計測の光学イメージング計測を行った。架橋 SWCNT に対しては、光学計測（蛍光発光、ラマン散乱）において集光した励起レーザー照射時に生じる軸方向の空間的温度分布、雰囲気ガス分子の吸着・脱離、熱励起による機械的振動等外的要因に注目し、光学物性における外的要因の影響について分析を行った。特に吸着脱離現象では、その時間変化を追跡することでダイナミクスについて検討を行った。また、SWCNT はその内部が空洞になっており、理想的な物質輸送のナノチャネルでもある。通常キャップ構造で閉じている SWCNT の端部を酸化することで開端し、内部に分子を導入させたときに現れることが期待される凝集現象や流体现象にも着目し分析を行った。基板

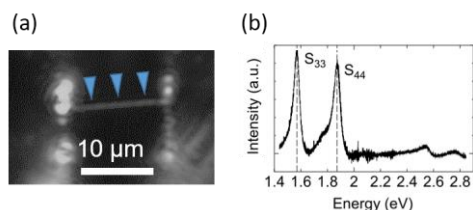


図 2 (a)架橋成長させた SWCNT のレイリーイメージ像と(b)レイリースペクトル。

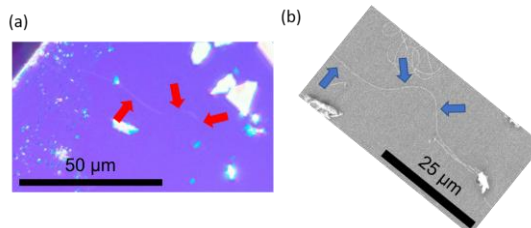


図 3 シリコン基板上的 SWCNT のレイリーイメージ像と SEM 像。

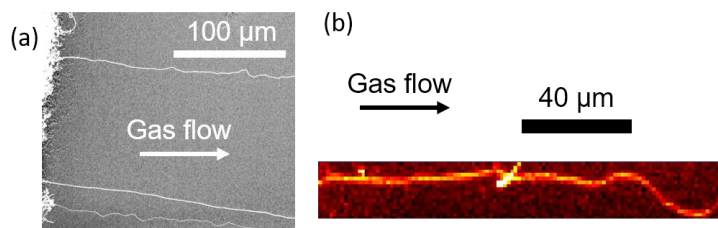


図4 ガス配向成長させた SWCNT の(a)SEM 像および(b)走査型ラマンイメージ像。

上の SWCNT サンプルにおいては、金属電極等を作製することで電子デバイス化した。印加電圧を変えたときの変調の空間分布や分子吸着・脱離の様子を明らかにしていく。

4. 研究成果

SWCNT の分光計測をより高効率、広い範囲に対し行うことを可能にするために、測定系の自動制御化を進めた。SWCNT を合成したサンプル基板をセットする電動ステージの X-Y 平面内における位置決め、分光器によるスペクトル測定条件（測定波長範囲、分解能、測定時間など）、サンプルへの励起レーザー光のオン/オフや、レーザー強度、波長等を制御することに成功した。架橋 SWCNT はスリット（幅：数 $10\ \mu\text{m}$ 、長さ：数 $100\ \mu\text{m}$ ）に、直接成長させるが、そのスリットのどこに成長するかまでは制御できない。そのため、サンプル位置、レーザー波長等を全て同期させることで、自動でスリット内のどこに架橋 SWCNT が成長しているか、さらにはどのような構造（直径原子構造（カイラリティ））の SWCNT が成長しているかを自動で検出できるようになった。このような架橋 SWCNT を検索するプロセスは、煩雑で時間がかかるものであり、特定の（例えば発光強度が強く見つけやすい）SWCNT についての考察しか行えていなかった可能性がある。しかし、この自動化により多数の SWCNT の情報を得ることができるようになり、より正確で統計性の高い分析が可能になった。より詳細な分析が可能になったことを踏まえ、測定スペクトルや励起レーザーの波長の校正も、厳密に行った。参照光スペクトルとしてアルゴンガスや水銀ガスからの発光ピークを用い、これらの発光スペクトルと、SWCNT から測定したスペクトルとを比較・校正を行うことで波長 $1\ \text{nm}$ 以下の精度でスペクトルを取得することが可能になった。測定例として、図 2(a)に架橋 SWCNT のレイリーイメージング像と図 2(b)にレイリースペクトルを示す。イメージ像からは SWCNT が直線的に架橋されている様子、スペクトルを分析することでこの SWCNT の原子構造（カイラリティ）が(19,17)であることが分かった。また、レイリー散乱の偏光特性を利用したイメージング計測も行った。図 3 にシリコン基板上に合成した SWCNT の(a)偏光レイリー散乱イメージ像と(b)その SEM 像を示す。形状が完全に一致しており、基板上でのレイリー測定に成功していることが分かる。

SWCNT サンプルの合成技術の向上を行った。一般にナノ材料の物性はその置かれた周囲環境（溶液中であれば濃度や pH、他のイオン濃度、基板上であれば基板表面状態など）に大きく影響を受ける。SWCNT の場合、基板として広く用いられるシリコンや酸化膜付シリコン基板上において、その光学物性は大きく変化してしまい、例えば蛍光発光を起こさなくなる。ここでは、基板上での蛍光発光とレイリー散乱発光の同時計測を目指し、非常に安定な原子層状物質として知られる六方窒化ホウ素（h-BN）基板を採用した。酸化膜付シリコン基板表面に機械剥離法により h-BN フレイクを転写、その表面に化学気相堆積法（CVD 法）による SWCNT の直接合成を行った。結果、CVD ガスの流速と基板表面温度の時間変化等の CVD 条件を精密に制御することで、CVD ガス流方向に長尺（長さ数 mm）の SWCNT を得ることができた。図 4 にガス配向成長させた長尺 SWCNT の(a)SEM 像と(b)走査ラマンイメージ像を示す。

さらに、この長尺 SWCNT を h-BN フレイク上に成長させることにも成功し、h-BN 上の SWCNT の光学物性を詳細に分析した。ラマン散乱分光計測においては、h-BN と単層 CNT 間の強い相互作用によって、ラマンピークの強度が低下することが明らかになった。一方、近赤外蛍光発光計測においては、明確な蛍光発光スペクトルを得ることに成功した。これは、これまで空間に架橋されたものや水溶液中で

界面活性剤によりラッピングされた特定の状況下の SWCNT からしか蛍光発光スペクトルは検出されなかったが、今回 h-BN 上での検出ができたことで、光学計測だけでなく、SWCNT の工学応用に向けても大きな進展を得ることが出来た。図 5 に h-BN 上に成長した SWCNT の原子間力顕微鏡（AFM）像および蛍光発光イメージ像を示す。SWCNT が h-BN 上にあることで、数 $10\ \mu\text{m}$ 以上の長さに渡り、蛍光発光を示しており、h-BN と SWCNT 間の相互作用

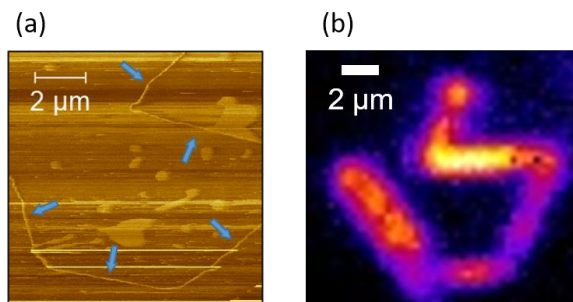


図5 h-BN 基板上に合成した SWCNT の(a)AFM 像と(b)蛍光発光イメージ像。

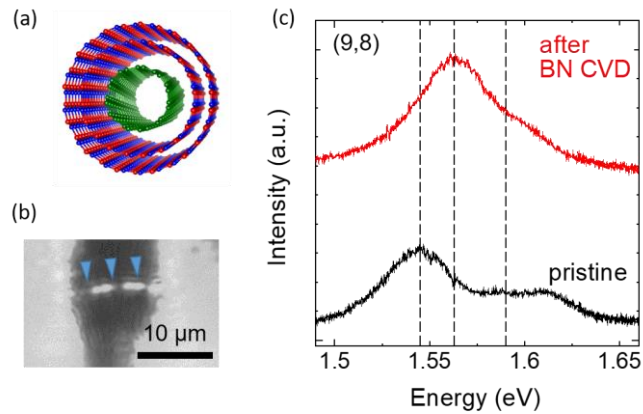


図 6 (a)SWCNT 外表面に新たに合成した BN ナノチューブ (BNNT) の模式図. (b) 架橋 SWCNT-BNNT からのレイリーイメージ像と (c)BN ナノチューブ形成前後におけるレイリースペクトルの変化.

が非常に弱く, SWCNT を保持する材料として h-BN が適した基板材料であることが分かった. SWCNT は, 優れた電気伝導特性, 熱伝導特性および光学特性を有するが, これらは周囲環境の条件に大きく影響を受ける. これは, SWCNT が原子 1 層のグラフェンを丸めた構造であり, 比表面積が非常に大きく, 表面を通じて物性が強く変調をされてしまうからである. また, 先の実験において h-BN と SWCNT との間の相互作用が弱いことが分かったことから, 優れた SWCNT 物性を保持する対策の 1 つとして, SWCNT 外表面に新たな BN 層 (BN ナノチューブ, BNNT) を形成することを行った. 図 6(a)に SWCNT-BNNT の模式図を示す. このように SWCNT を BNNT によりコート・保護することにより内部の SWCNT の物性を保ったまま様々な基板・環境における SWCNT 応用が可能になる. 実際に, 架橋 SWCNT に対し BN コート CVD を行った後のレイリーイメージ像 (図 6(b)) と BN コート CVD 前後でのレイリースペクトル (図 6(c)) を示す. イメージ像からは架橋構造が保たれていることが分かり, スペクトルからはピークエネルギーが BN コート前後で数 10 meV 変化しているが, SWCNT 特有の電子構造 (van Hove 特異性) が十分保持されていることが明らかになった. この SWCNT 外層に新たな BNNT を合成する技術は国内外から大きな反響を得ており, 有力学術誌 (R. Xiang, et al., *Science*, **367**, 537 (2020).) にも掲載された. さらに, 詳細にレイリーイメージ像観察やレイリースペクトルを分析することで, SWCNT 外表面に大気中の水分子が吸着層を形成していることが明らかになった. SWCNT 物性が表面敏感に変化することを応用した分析であり, 数 nm の吸着水層の検出に成功したという学術的意義だけでなく, BNNT との比較を行うことで SWCNT 表面に何が存在 (吸着, 付着, 接触) しているかを識別できるという応用に向けても有意義な結果であると言える.

さらに, SWCNT デバイス特性の光学分析評価を可能にするために, 図 7(a)に示した特殊チャンバーを設計・製作し成功した. 通常の顕微鏡のサンプル台に固定して使用できるように, 非常に小型・薄型に設計され, さらにサンプルの温度・ガス雰囲気, 複数の電極ポートを通じた電圧印加・電流計測が可能になっている. 図 7 に 1 本の SWCNT に 4 つの電極を作製した SWCNT 電子デバイスの一例を示す. SEM 像 (b)においてその構造が, (c)走査ラマンイメージング像において SWCNT の光学物性が分析可能である. 以上のように, 光学スペクトル・イメージング計測, および電子物性計測を複合的に組み合わせることで, 多角的な分析・評価が可能になった.

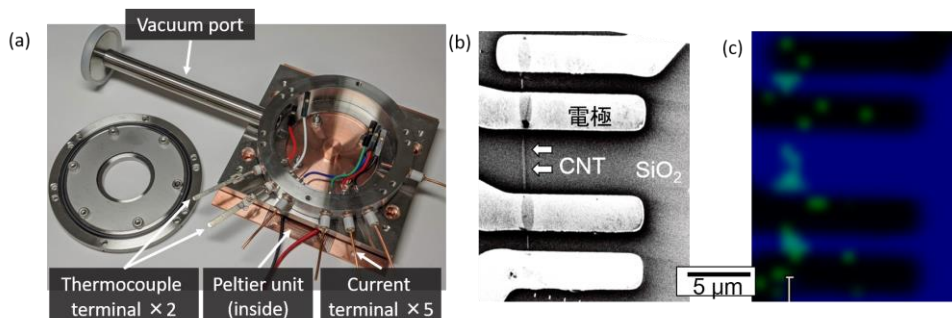


図 7 環境制御型光学計測用真空チャンバー. 孤立配向成長させた 1 本の SWCNT で作製した電子デバイスの (b)SEM 像と (c)走査ラマンイメージング像. SWCNT が SEM 像 (b)では 1 本の直線に, ラマン像 (c)ではラマンシグナルの強い部分 (緑色) として観測されている (青色は基板のシリコンからのシグナル).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Liu Ming, An Hua, Kumamoto Akihito, Inoue Taiki, Chiashi Shohei, Xiang Rong, Maruyama Shigeo	4. 巻 146
2. 論文標題 Efficient growth of vertically-aligned single-walled carbon nanotubes combining two unfavorable synthesis conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 413 ~ 419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2019.01.109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takezaki Hiroki, Inoue Taiki, Xiang Rong, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 96
2. 論文標題 Growth of single-walled carbon nanotubes by alcohol chemical vapor deposition with water vapor addition: Narrowing the diameter and chiral angle distributions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 160 ~ 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2019.05.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshikawa Ryo, Hisama Kaoru, Ukai Hiroyuki, Takagi Yukai, Inoue Taiki, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 13
2. 論文標題 Molecular Dynamics of Chirality Definable Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 6506 ~ 6512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.8b09754	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koyano Bunsho, Inoue Taiki, Yamamoto Shun, Otsuka Keigo, Xiang Rong, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 155
2. 論文標題 Regrowth and catalytic etching of individual single-walled carbon nanotubes studied by isotope labeling and growth interruption	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 635 ~ 642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2019.09.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xiang R.、Inoue T.、Zheng Y.、Kumamoto A.、Qian Y.、Sato Y.、Liu M.、Tang D.、Gokhale D.、Guo J.、Hisama K.、Yotsumoto S.、Ogamoto T.、Arai H.、Kobayashi Y.、Zhang H.、Hou B.、Anisimov A.、Maruyama M.、Miyata Y.、Okada S.、Chiashi S.、Li Y.、Kong J.、Kauppinen E.I.、Ikuhara Y.、Suenaga K.、Maruyama S.	4. 巻 367
2. 論文標題 One-dimensional van der Waals heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 537 ~ 542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz2570	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Cha JinHyeok、Chiashi Shohei、Inoue Taiki、Einarsson Erik、Shiomi Junichiro、Maruyama Shigeo	4. 巻 57
2. 論文標題 Fabrication of uniform vertically-aligned carbon nanotube?polymer composite thin films by capillary flow intrusion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 115101 ~ 115101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.115101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Qian Yang、An Hua、Inoue Taiki、Chiashi Shohei、Xiang Rong、Maruyama Shigeo	4. 巻 255
2. 論文標題 A Comparison Between Reduced and Intentionally Oxidized Metal Catalysts for Growth of Single Walled Carbon Nanotubes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1800187 ~ 1800187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201800187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Feng Ya、Inoue Taiki、Watanabe Makoto、Yoshida Shuhei、Qian Yang、Xiang Rong、Kauppinen Esko I.、Chiashi Shohei、Maruyama Shigeo	4. 巻 57
2. 論文標題 Measurement of in-plane sheet thermal conductance of single-walled carbon nanotube thin films by steady-state infrared thermography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075101 ~ 075101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.075101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hisama Kaoru, Yoshikawa Ryo, Matsuo Teppei, Noguchi Takuya, Kawasuzuki Tomoya, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 122
2. 論文標題 Growth Analysis of Single-Walled Carbon Nanotubes Based on Interatomic Potentials by Molecular Dynamics Simulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 9648 ~ 9653
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b12687	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Feng Ya, Inoue Taiki, An Hua, Xiang Rong, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 112
2. 論文標題 Quantitative study of bundle size effect on thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 191904 ~ 191904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021696	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Otsuka Keigo, Yamamoto Shun, Inoue Taiki, Koyano Bunsho, Ukai Hiroyuki, Yoshikawa Ryo, Xiang Rong, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo	4. 巻 12
2. 論文標題 Digital Isotope Coding to Trace the Growth Process of Individual Single-Walled Carbon Nanotubes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 3994 ~ 4001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.8b01630	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Otsuka, T. Inoue, Y. Shimomura, S. Chiashi, S. Maruyama	4. 巻 10
2. 論文標題 Water-assisted self-sustained burning of metallic single-walled carbon nanotubes for scalable transistor fabrication	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nano Research	6. 最初と最後の頁 3248-3260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12274-017-1648-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Otsuka, T. Inoue, E. Maeda, R. Kometani, S. Chiashi, S. Maruyama	4. 巻 11
2. 論文標題 On-chip sorting of long semiconducting carbon nanotubes for multiple transistors along an identical array	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 11497-11504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12274-017-1648-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Aikawa, S. Kim, T. Thurakitsee, E. Einarsson, T. Inoue, S. Chiashi, K. Tsukagoshi, S. Maruyama	4. 巻 112
2. 論文標題 Carrier Polarity Engineering in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors by Induced Charges in Polymer Insulator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 013501-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4994114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 B. Hou, C. Wu, T. Inoue, S. Chiashi, R. Xiang, S. Maruyama	4. 巻 119
2. 論文標題 Extended alcohol catalytic chemical vapor deposition for efficient growth of single-walled carbon nanotubes thinner than (6,5)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 502-510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2017.04.045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 K. Hisama, S. Okada, S. Chiashi, S. Maruyama,
2. 発表標題 Interaction between layers of single walled carbon nanotube coated with boron nitride nanotube
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 *S. Chiashi, Y. Homma,
2 . 発表標題 Water Adsorption and Desorption on Single and Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes by Spectroscopy,
3 . 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT19) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 *T. Inoue, B. Koyano, S. Yamamoto, S. Hiraoka, K. Otsuka, R. Xiang, S. Chiashi, S. Maruyama,
2 . 発表標題 Growth process of individual single walled carbon nanotubes analyzed by isotope labelling,
3 . 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 *Y. Homma, Y. Saito, Y. Tanaka, G. Yamaguchi, S. Chiashi,
2 . 発表標題 Temperature Change of Water Adsorption Layer on Suspended Single walled Carbon Nanotube
3 . 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 *S. Yotsumoto, T. Ogamoto, T. Murai, H. Arai, T. Inoue, R. Xiang, S. Maruyama, S. Chiashi,
2 . 発表標題 Photoluminescence Spectra from Single Walled Carbon Nanotubes on hexagonal Boron Nitride
3 . 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 *Y. Homma, S. Chiashi,
2. 発表標題 Characterization of phase of water confined in nanospace
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 *千足 昇平, 吉野 数基, 加藤 高士, 本間 芳和,
2. 発表標題 近赤外蛍光イメージング分光法による単層CNTの熱伝導率計測
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 *S. Chiashi,
2. 発表標題 Templated synthesis of nanomaterials with single-walled carbon nanotubes and their properties
3. 学会等名 第57回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 *S. Yotsumoto, H. Arai, Y. Zheng, T. Inoue, R. Xiang, S. Maruyama, S. Chiashi,
2. 発表標題 Rayleigh scattering measurement of suspended SWCNTs coaxially wrapped with BNNTs .
3. 学会等名 第58回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 *佐藤 周, 四元 聡, 番場 雅典, 井ノ上 泰輝, 丸山 茂夫, 千足 昇平,
2. 発表標題 h-BN上へのガス流配向CNTの合成とラマン分光測定
3. 学会等名 第58回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 B. Koyano, S. Yamamoto, A. Kobayashi, R. Ishimaru, K. Otsuka, T. Inoue, R. Xiang, S. Chiashi, S. Maruyama,
2. 発表標題 Isotope Labelling Analysis of Additive Gas Effects on Single-Walled Carbon Nanotube Growth
3. 学会等名 第58回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 *Y. Homma, S. Chiashi,
2. 発表標題 Single SWNT spectroscopy for nano-metrology,
3. 学会等名 7th Workshop on Nanotube optics and Nanospectroscopy (Wonton 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 *Y. Tanaka, T. Kato, K. Yoshino, S. Chiashi, Y. Homma,
2. 発表標題 Phonon Assigning of G-band from Suspended Single-walled Carbon Nanotubes
3. 学会等名 7th Workshop on Nanotube optics and Nanospectroscopy (Wonton 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 *S. Chiashi, S. Yotsumoto, T. Ogamoto, H. Arai, N. Ueda, T. Inoue, R. Xiang, S. Maruyama,
2. 発表標題 Photoluminescence from Single-walled Carbon Nanotubes on hexagonal Boron Nitride Substrates
3. 学会等名 7th Workshop on Nanotube optics and Nanospectroscopy (Wonton 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 *Y. Homma, S. Chiashi,
2. 発表標題 Water in Nanospace
3. 学会等名 Water on Materials Surface 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 *S. Chiashi, K. Yoshino, T. Kato, Y. Saito, J. Shitaba, T. Hanashima, K. Nagano, Y. Homma,
2. 発表標題 Thermal conductivity measurement of a suspended single-walled carbon nanotube by photoluminescence spectroscopy
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yoshino, K. Nagano, M. Horiguchi, Y. Tanaka, S. Chiashi, *Y. Homma,
2. 発表標題 Thermal Conductivity Measurements of Single-Walled Carbon Nanotubes by Photoluminescence Imaging Spectroscopy
3. 学会等名 Materials Research Society (MRS) Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Maruyama, R. Xiang, H. An, A. Kumamoto, T. Inoue, S. Chiashi, and Y. Ikuhara
2. 発表標題 The Evolution of W-Co-C Catalyst during the CVD Growth of Chirality-Selective Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes
3. 学会等名 231st ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Chiashi, K. Otsuka, T. Inoue, S. Maruyama
2. 発表標題 Fabrication of pure-semiconducting single-walled carbon nanotube arrays and nanotube transistors
3. 学会等名 The 9th US-Japan Joint Seminar on Nanoscale Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Homma and S. Chiashi
2. 発表標題 Single Carbon Nanotube Spectroscopy
3. 学会等名 IUMRS-ICAM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Homma, and S. Chiashi
2. 発表標題 Measurements of Thermodynamic Properties on Nano-Scale by Single Carbon Nanotube Spectroscopy
3. 学会等名 International Conference on Functional Carbons (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大塚 慶吾, 井ノ上 泰輝, 千足 昇平, 丸山 茂夫
2. 発表標題 金属性カーボンナノチューブ全長燃焼後の純半導体性アレイを用いた複数のトランジスタ作製
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井ノ上 泰機, 大塚 慶吾, 項 栄, 千足 昇平, 丸山 茂夫
2. 発表標題 アルコールCVD法による水平配向単層カーボンナノチューブの合成制御
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 項 栄, 熊本 明仁, 安 華, 井ノ上 泰輝, 千足 昇平, 幾原 雄一, 丸山 茂夫
2. 発表標題 Controlled synthesis of single-walled carbon nanotubes using alcohol catalytic chemical vapor deposition
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新行 将也, 大塚 慶吾, 井ノ上 泰輝, 児玉 高志, 千足 昇平, 塩見 淳一郎, 丸山 茂夫
2. 発表標題 自己ジュール発熱を用いた孤立単層CNTの熱伝導率測定
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤 裕太, 加藤 高士, 吉野 数基, 千足 昇平, 本間 芳和,
2. 発表標題 蛍光分光法を用いた単層カーボンナノチューブ内部における内包水の融点の測定
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中 湧一郎, 加藤 高士, 吉野 数基, 千足 昇平, 本間 芳和
2. 発表標題 架橋単層カーボンナノチューブにおける偏光ラマン測定
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Otsuka, S. Yamamoto, T. Inoue, R. Xiang, S. Chiashi, S. Maruyama
2. 発表標題 Tracing growth processes of individual single-walled carbon nanotubes by digital isotope coding
3. 学会等名 第54回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山元 隼, 大塚 慶吾, 井ノ上 泰輝, 項 栄, 千足 昇平, 丸山 茂夫
2. 発表標題 同位体ラベルによる個々の CNT の成長過程追跡
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井ノ上 泰輝, 鄭 永嘉, 柳 銘, 項 榮, 千足 昇平, 丸山 茂夫
2. 発表標題 単層カーボンナノチューブ周囲への窒化ホウ素ナノチューブの合成
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間 芳和, 齋藤 裕太, 田中 湧一郎, 清水 麻希, 千足 昇平
2. 発表標題 二次元シートとしてみた単層カーボンナノチューブ
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 千足 昇平, 本間 芳和
2. 発表標題 分光計測を用いた孤立架橋単層カーボンナノチューブにおける熱物性計測
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学工学部機械工学科千足昇平CV
<http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/~chiashi/CV-E.html>
 CV(千足 昇平)
<http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/~chiashi/CV-J.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	丸山 茂夫 (Maruyama Shigeo) (90209700)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	
連携研究者	本間 芳和 (Homma Yoshikazu) (30385512)	東京理科大学・理学部・教授 (32660)	