

配布先:文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

2026 年 10 月 22 日

報道機関 各位

カーボンナノチューブの“洗い残し”を光で検出！ ～ナノ材料デバイス製造工程の品質管理への技術応用に期待～

【本研究のポイント】

- ・半導体カーボンナノチューブ(CNT)^{注 1)}薄膜の表面に残るごく微量の有機分子(界面活性剤^{注 2)}やフォトレジスト^{注 3)}の残渣)を、ラマン分光法^{注 4)}の微弱なピークを用いて非破壊で検出することに成功。
- ・微弱ピークの強度から「残渣指標 R」を定義し、水洗浄・真空バーク・Y OCD 処理^{注 5)}という洗浄法の効果を半定量的に比較。X 線光電子分光(XPS)^{注 6)}では検出できない微量の残留界面活性剤も検出可能。
- ・残留分子の少ない CNT 薄膜で作製したトランジスタは、より高い伝達コンダクタンス・移動度と低い雑音を示し、CNT デバイス製造における品質管理技術への応用に期待。

【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科の内山 晴貴 助教、同大学未来材料・システム研究所の大野 雄高 教授らの研究グループは、半導体カーボンナノチューブ(CNT)薄膜の表面に残るごく微量の有機吸着分子を、ラマン分光法により非破壊で検出・評価する手法の開発に成功しました。

CNT を水溶液中で分散・選別する際に用いる界面活性剤や、デバイス作製時のフォトレジストの“洗い残し”は、トランジスタの性能劣化の原因となりますが、その量はごく微量であるため、これまで製造工程の中で簡便に確認する手段がありませんでした。本研究では、CNT の強いラマン信号の陰に隠れた微弱なピークに着目し、X 線光電子分光でも検出できない微量の残留分子の検出と、洗浄プロセスの定量的な比較を可能にしました。さらに、残留分子の少ない CNT 薄膜から作製したトランジスタがより高い性能と低い雑音を示すことを実証しました。本手法は、CNT をはじめとするナノ材料デバイスの製造における品質管理技術への応用が期待されます。

本研究成果は、2026 年 10 月 12 日付で炭素材料分野の国際学術誌「Carbon」オンライン版に掲載されました。

【研究背景】

カーボンナノチューブ(CNT)は、優れた電気特性をもつ一次元ナノ材料であり、次世代の電子デバイスやセンサーへの応用が期待されています。特に、水溶液中で界面活性剤を用いて CNT を分散し、半導体型 CNT だけを選別して基板に塗布する「水系プロセス」は、高純度・大面積・低コストの成膜が可能な有力な製造技術です。

一方、この製造過程で CNT の表面には、分散に用いた界面活性剤や、電極パターンの形成(リソグラフィ)に用いたフォトレジストがごく微量に残留します。これらの残留分子は、電荷のトラップや意図しないドーピングを引き起こし、トランジスタの移動度低下や雑音増大の原因となります。しかし、その量は極めて微量であるため、透過電子顕微鏡や X 線光電子分光(XPS)といった既存の分析手法でも捉えることが難しく、デバイス製造の途中で表面の清浄さを非破壊で確認する手段がないことが課題となっていました。

【研究成果】

本研究グループは、CNT 薄膜のラマンスペクトルにおいて、CNT 自身の強い信号(Gバンドや D バンド)の陰に隠れたごく微弱なピーク群に着目しました。界面活性剤(コール酸ナトリウム、SC)を意図的に再吸着させる実験や、フォトレジスト処理を繰り返す対照実験により、347、396、1133、1435 cm^{-1} のピークが残留界面活性剤に、1140、1186、1402、1439、1463 cm^{-1} のピークがフォトレジスト残渣に由来することを同定しました(図 1)。これらの信号は CNT の主要ピークのわずか 0.2%程度の強さしかありませんが、測定条件を最適化することで安定に検出できることを示しました。実際に、XPS では検出できない微量の残留界面活性剤を、本手法では明瞭に捉えることができました。

さらに、1133 cm^{-1} のピーク強度を CNT の G⁺バンド強度で規格化した「残渣指標 R」を定義し、水洗浄・真空バーク・YOCD 処理という 3 種類の洗浄法の効果を半定量的に比較しました(図 2)。水洗浄では大部分の界面活性剤が速やかに除去されるものの一部が残留すること、真空バークでは 600 °C で R が 0.01%まで低下すること、YOCD 処理では 250 °C という比較的低温で R が 0.03%まで低下することが明らかになりました。

残留量の異なる CNT 薄膜からトランジスタを作製して比較したところ、残渣指標 R の小さい(清浄な)薄膜を用いたトランジスタは、より高い伝達コンダクタンスと電界効果移動度を示し、低周波雑音(1/f 雑音)^{注 7)}も小さいことが分かりました(図 3)。これは、表面の残留分子がデバイス性能に影響することを示すとともに、残渣指標 R がデバイス品質の有用な指標となることを示す結果です。

【成果の意義】

本手法は、特別な試料加工を必要とせず、製造工程の途中のどの段階でも適用できる非破壊の表面評価技術です。洗浄条件の最適化やプロセスの品質管理(インライン検査)に活用することで、CNT デバイスの性能と信頼性の向上に貢献すると期待されます。また、微弱ラマンピークに基づく本アプローチは、吸着分子に固有のラマン信号を同定・検証すれば他の分子種にも拡張できるため、CNT に限らず、グラフェンなどの炭素系ナノ材料デバイス全般の表面品質評価技術として発展することが期待されます。

本研究は、日本学術振興会(JSPS)科学研究費補助金(21H05237、24K17306)、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 CREST(JPMJCR24A2)などの支援を受けて行われました。

【図面と説明】

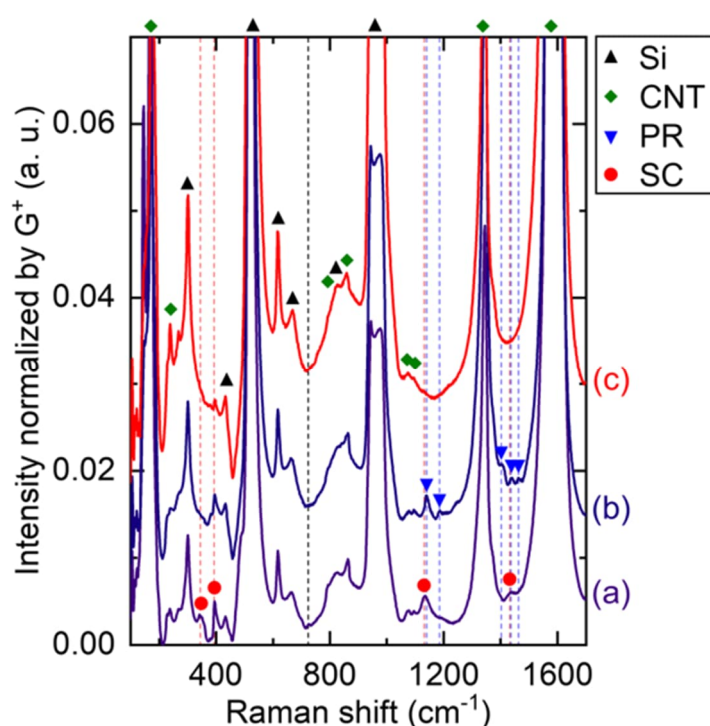


図 1. 表面状態の異なる CNT 薄膜の拡大ラマンスペクトル (a)成膜直後、(b)フォトリソ処理後、(c)YOCD 洗浄後。▲は Si 基板、◆は CNT、▼はフォトリソ残渣、●は界面活性剤(SC)に由来するピークを示す。洗浄処理により、吸着分子に由来する微弱ピークが消失していることが分かる(論文 Fig. 2 より)。

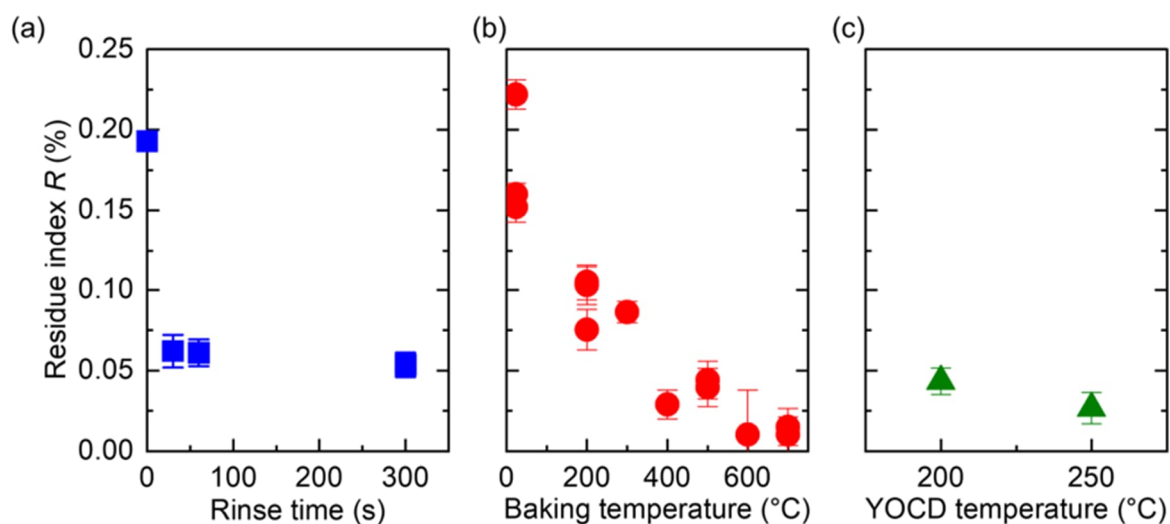


図 2. 残渣指標 R による洗浄法の比較 (a)水洗浄、(b)真空バーク、(c)YOCD 処理。水洗浄では速やかに減少するものの一部が残留し、真空バーク(600 °C)では 0.01%、YOCD 処理(250 °C)では 0.03%まで低下する(論文 Fig. 5 より)。

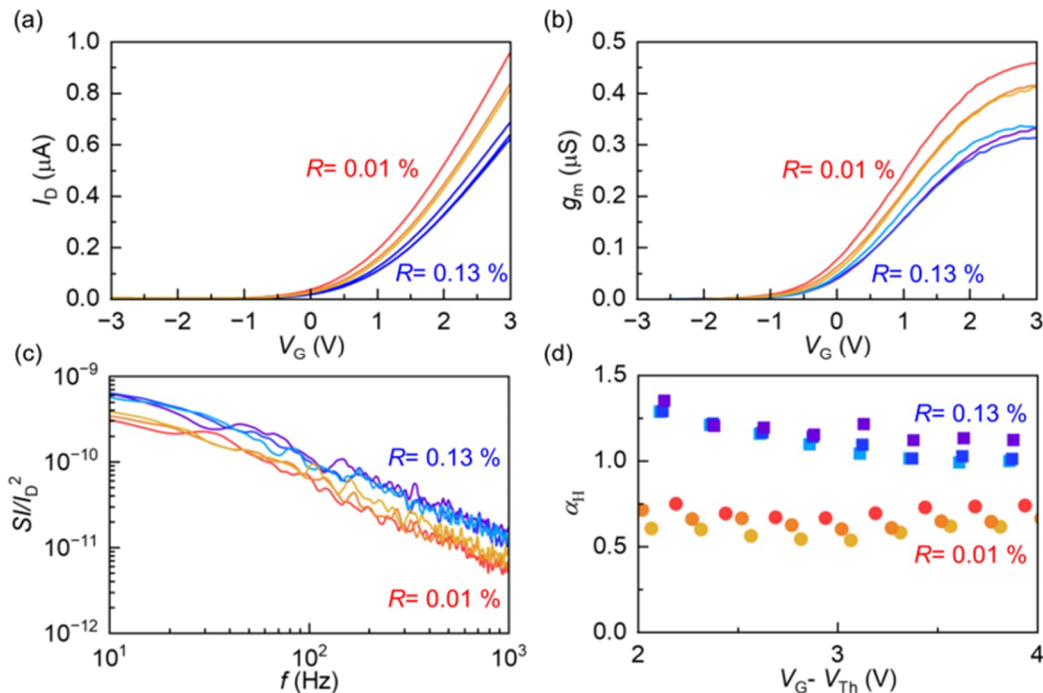


図 3. 残留量の異なる CNT 薄膜トランジスタの電気特性 (a)伝達特性、(b)伝達コンダクタンス、(c) 雑音電力スペクトル密度、(d)Hooge 係数。残渣指標 R の小さい清浄な薄膜(赤)のトランジスタは、高い電流駆動力と低い雑音を示す(論文 Fig. 6 より)。

【用語説明】

注 1)カーボンナノチューブ(CNT):

炭素原子のシートが直径約 1 ナノメートル(ナノは 10 億分の 1)の筒状に丸まった物質。電子の移動度が高く、次世代トランジスタやセンサーの材料として期待されている。電気的性質の異なる金属型と半導体型があり、トランジスタには半導体型のみを選別して用いる。

注 2)界面活性剤(コール酸ナトリウム):

水と油のように混ざりにくい物質をなじませる分子。本研究では、水に溶けない CNT を水中に分散させ、半導体型 CNT を選別するためにコール酸ナトリウム(SC)が用いられる。

注 3)フォトレジスト:

光を当てた部分だけが溶けるようになる(または溶けなくなる)感光性の樹脂。半導体デバイスの電極や配線のパターンを形成するリソグラフィ工程で用いられ、使用後は薬液で除去されるが、ごく微量が表面に残留することがある。

注 4)ラマン分光法:

物質にレーザー光を当て、散乱された光の波長のずれ(ラマンシフト)から、物質を構成する分子の振動を調べる分析手法。試料を壊さず、大気中で測定できる特長がある。

注 5)YOCD 処理(イットリウム酸化・除去処理):

CNT 膜の表面に金属イットリウムの薄い層を蒸着し、加熱酸化させた後に希塩酸で除去することで、表面の有機物を取り除く洗浄方法。比較的低温で高い洗浄効果が得られる。

注 6)X 線光電子分光(XPS):

物質に X 線を当てて飛び出す電子のエネルギーから、表面の元素組成を調べる分析手法。表面分析の標準的な手法だが、極微量の元素の検出は難しい。

注 7)低周波雑音($1/f$ 雑音):

周波数 f に反比例して大きくなる電気雑音。デバイス中の電荷のトラップ(捕獲・放出)に起因するとされ、センサーや増幅回路の感度を制限するため、小さいことが望ましい。

【論文情報】

論文誌:Carbon, Vol. 262, 122209 (2027)

タイトル:Raman spectroscopic detection of surface adsorbates on semiconducting carbon nanotubes

著者:内山 晴貴(助教)、吉川 雄大(博士前期課程学生)、関根 悠人(博士前期課程学生)、黒宮 英斗(博士前期課程学生)、片浦 弘道(客員教授)、大野 雄高(教授)

DOI:10.1016/j.carbon.2026.122209

URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2026.122209>

(オープンアクセス、CC BY 4.0)



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

