

EIT法を用いたカーボンナノチューブ薄膜の非破壊欠陥評価

Nondestructive testing of carbon nanotube thin films using EIT method

東京理科大学 先進工 ○皆川 敬哉, 金子 怜司, 山崎 智亮, 常盤 和靖, 生野 孝* *tikuno@rs.tus.ac.jp

研究背景

ナノカーボンデバイスの非破壊欠陥評価

蓄電・創電デバイス(LiB, SC, FCなど^[1-3])の電極材料の一つとして、ナノカーボンが用いられている。これらのデバイスは、イオンの空間的偏りを利用したものであり、デバイス性能とイオンの空間分布に相関がある。また、デバイス稼働中における、電極内部の副産物生成・結晶性劣化による性能低下が問題となっている。

そこで、安全性の観点から、使用中のデバイスのリアルタイム非破壊ヘルスマニタリング法の開発が期待されている。

- [1] V. Prabhakaran *et al.* Nat. Commun., 7, 11399 (2016).
- [2] A. Nomura *et al.* Sci. Rep., 7, 45596 (2017).
- [3] E. Akbari *et al.* Int. J. Energy Res., 41, 92 (2017).



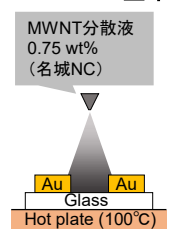
課題

パッケージングしたデバイス内部のナノカーボン電極内部におけるイオン・欠陥・不純物の空間分布を非破壊で可視化することは困難。

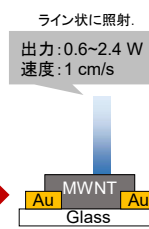
方法

試料作製・測定方法

1. スプレー塗布

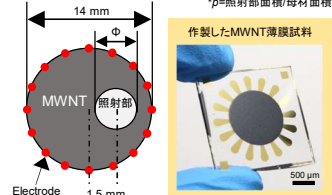


2. レーザ照射



測定条件

- ・注入電流: 10 mA (1 kHz)
- ・照射部Φ: 0.2 mm~3.0 mm (面積比 $p: 0.2 \times 10^{-3} \sim 45.9 \times 10^{-3}$)



逆問題解法

再構成結果を従来法と新規手法による逆問題解法で比較。

従来法

- [6] A. Adler *et al.* Physiol. Meas., 22, S25 (2006).

1. 反復ガウスニュートン法 (IGN) [6]

2. 機械学習法(1D-CNN)

有限要素法による時電場シミュレーション (COMSOL Multiphysics) を用いて学習データを作成
 ・学習データ数: 13200
 ・epoch数: 300
 ・畳み込み層: 4層
 ・出力: 100 × 100pixel

本手法

- [7] K. Minakawa *et al.* AIP Advances, 14, 015210 (2024).

3. AND法 [7]

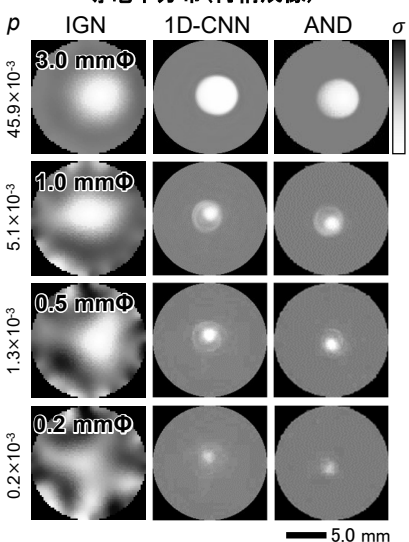
異なる手法による再構成画像の各画素値を規格化し、Polarと掛け合わせることで、論理積の考えを適用した画像解析手法。

	IGN	1D-CNN	Polar	AND
+	+	+	+	+
+	+	-	+	-
-	-	+	+	-
-	-	-	-	-

EIT法による導電率分布の可視化

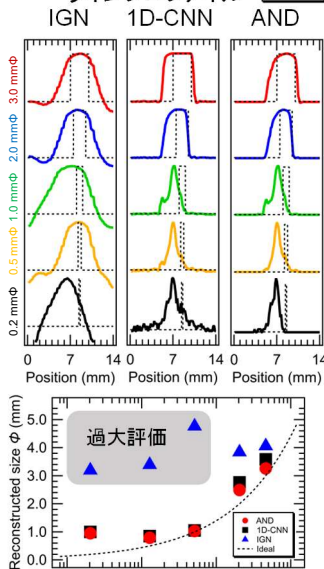
照射サイズ依存性 レーザ出力: 2.4 W

導電率分布(再構成像)



- ・IGN法は、サイズ比 p の低下に伴い欠陥を過大評価。
- ・AND法を用いることで、面積比 0.2×10^{-3} でも欠陥を可視化。

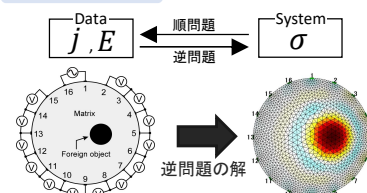
ラインプロファイル



着眼点

パッケージングされたデバイスに予め診断用電極を形成し、電気インピーダンストモグラフィ (EIT)法により、内部の導電率分布をリアルタイムに非破壊で可視化。

EIT法の基本原理



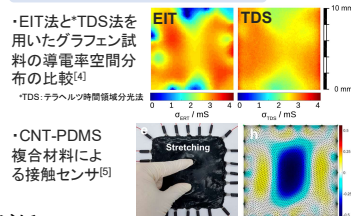
現状

1. 抵抗分布の空間分解能が低い。
2. 電気的情報と物質的情報の相関は明らかになっていない。

本研究

- ・機械学習を用いたEIT法による空間分解能の改善。
- ・CNT薄膜の結晶性分布と抵抗分布との相関。

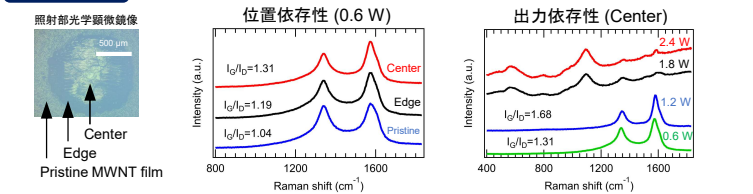
ナノカーボン材料への適用例



レーザ照射条件に対する結晶性・電気特性

結晶性

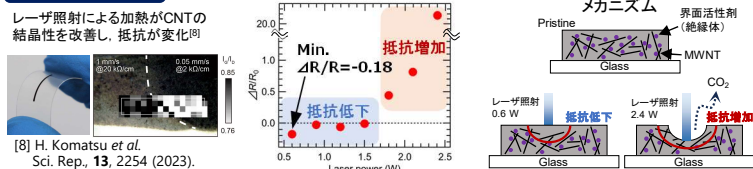
ラマン分光法を用いて位置と出力に対する結晶性の変化を評価。



- ・出力増加に伴い、 I_G/I_D 比が増加。
- ・出力が1.8 W以上のとき、GバンドとDバンドのピーク強度が低下。

電気特性

レーザ照射前後での抵抗の変化 $\Delta R/R_0$ を評価。

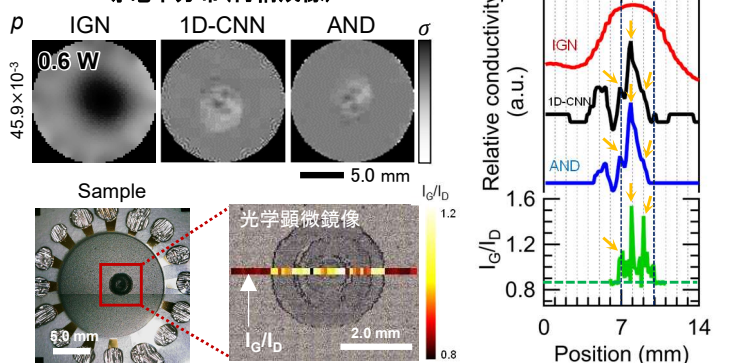


- ・低出力: 結晶性の改善と界面活性剤の除去→低抵抗化。
- ・高出力: MWNTが局所的に昇華し欠陥形成→高抵抗化。

結晶性分布と抵抗分布の相関

レーザ出力: 0.6 W (3 mmΦ 照射領域)

導電率分布(再構成像)



- ・1D-CNN法およびAND法により、精細な抵抗分布を可視化できた。
- ・ I_G/I_D ラインプロファイルのピーク位置と、1D-CNN法およびAND法により得た抵抗ラインプロファイルのピーク位置に相関があった。
- ・ $I_G/I_D=0.9$ 未満の領域とそれ以上の領域を区別できた。

結論

- ・1D-CNN法およびAND法により、EITの空間分解能が向上した。
- ・CNT薄膜の結晶性分布と抵抗分布との相関を確認したところ、CNT薄膜のわずかな結晶性の違いをEIT像として可視化できることを明らかにした。
- ・今後は、 μm オーダーの可視化技術開発とグラフェン等への適用を目指す。