

カーボンナノチューブを用いた パッチ型テラヘルツ撮像デバイス

産業技術総合研究所 九州センター
センシング技術研究部門
主任研究員
鈴木 大地

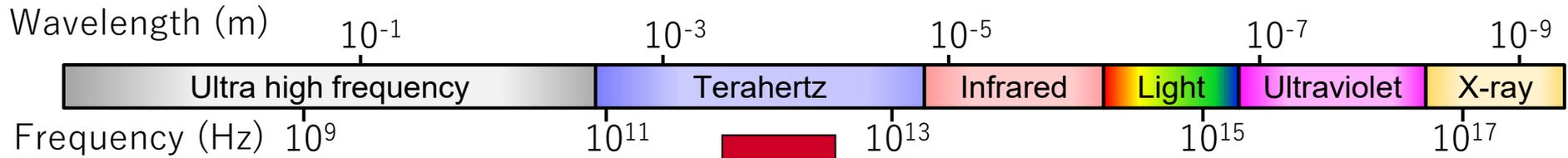


1. 自己紹介

2. テラヘルツ帯電磁波に関する背景

3. カーボンナノチューブを用いたパッチ型THz撮像デバイス (矢崎科学技術振興記念財団 2019年度奨励研究助成)

テラヘルツ (THz) センシング

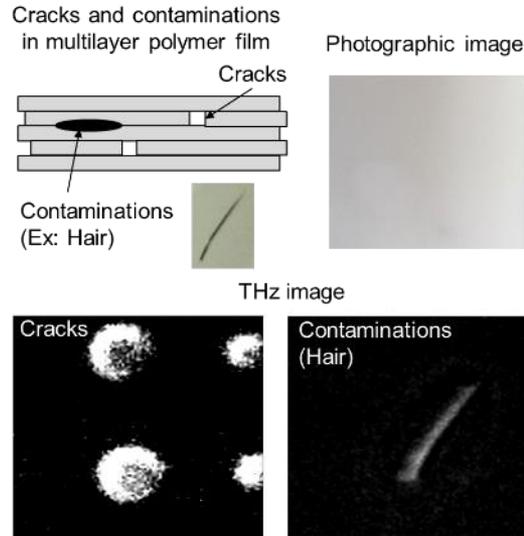
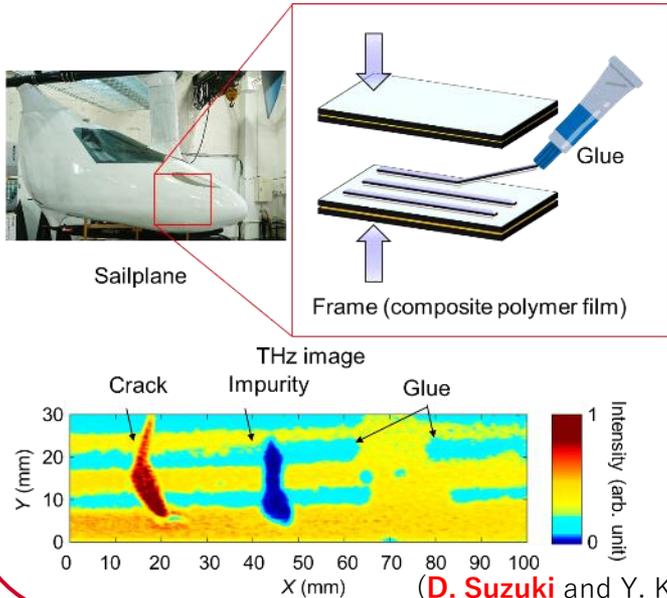


高い透過性

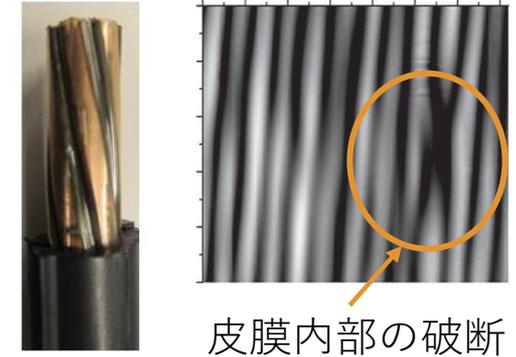
透過性と解像度を併せ持つ

高い直進性

製造物の品質検査

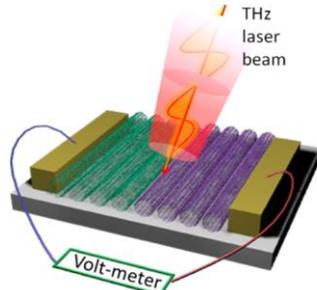


インフラの劣化診断



(S. Takahashi, et. al., *NDT&E Inter.*, **61**, 75, 2014)

強力な非破壊検査応用として実用化が期待



(X. He, et al., Nano Lett., 2014)

熱型THzセンサー

テラヘルツ波を材料が吸収し発熱
温度変化による物性値の変化を読み出す

読出物性値

室温動作・広帯域検出
時定数が遅い

抵抗値

熱膨張（体積変化）

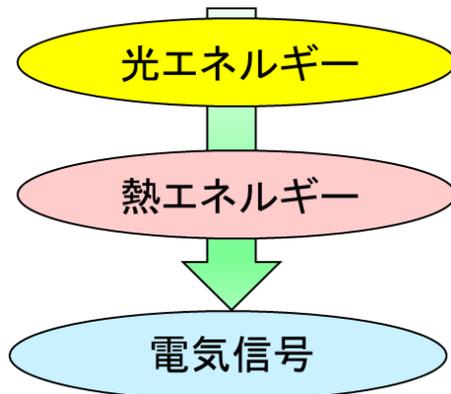
共振周波数

起電力

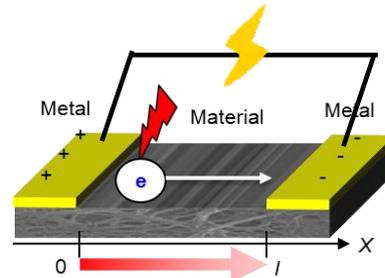
電荷分極（焦電効果）

→ センシング用途向き

光熱起電力効果



熱から電気を生み出す
プロセスについては
熱電発電素子と同じ
（ゼーベック効果）



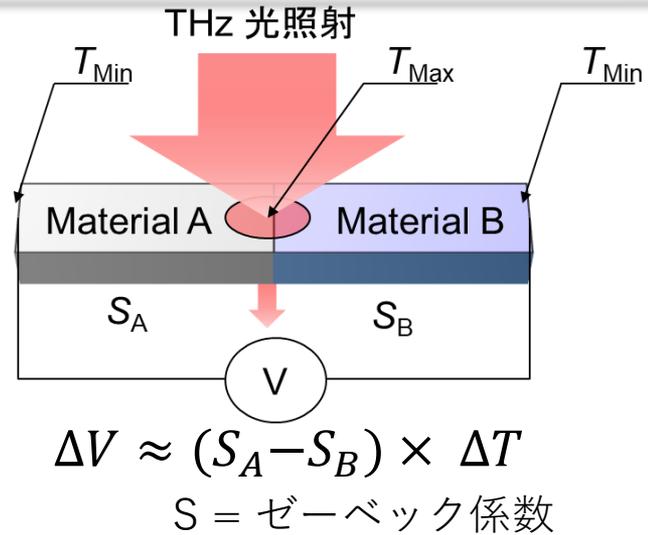
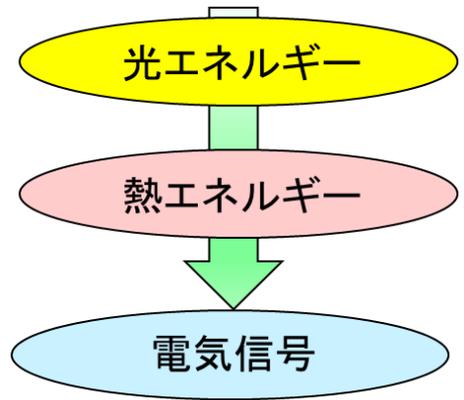
熱型の中での特徴

- ・ 自立素子として駆動
（生み出した電力が検出信号）
- ・ 簡素な素子構造
→ 物理/電気/化学的ロバスト性

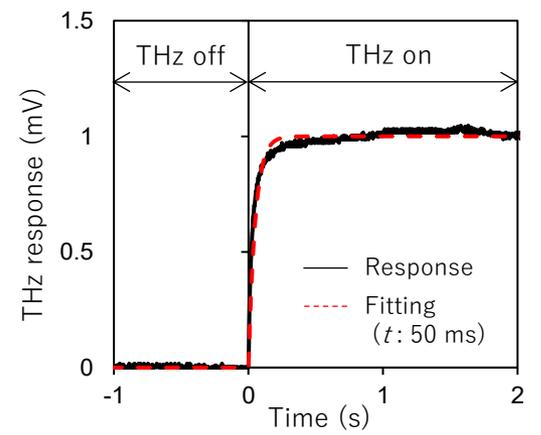
1. 自己紹介
2. テラヘルツ帯電磁波に関する背景
3. **カーボンナノチューブを用いたパッチ型THz撮像デバイス**
(矢崎科学技術振興記念財団 2019年度奨励研究助成)

光熱起電力効果と高感度化の指針

光熱起電力効果

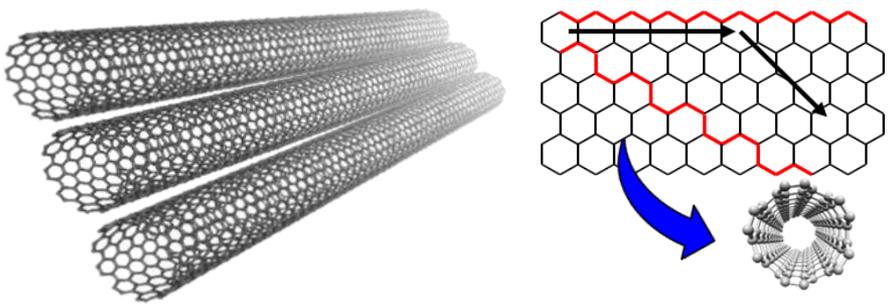


THz応答



高性能化 → 熱電特性 (ゼーベック係数) S および 熱勾配 ΔT の向上

低次元材料である
カーボンナノチューブの活用



高い熱電特性と光吸収率を持つ

$$\Delta T = \int_{x=0}^l R(x) Q_{\text{absorb}} dx$$

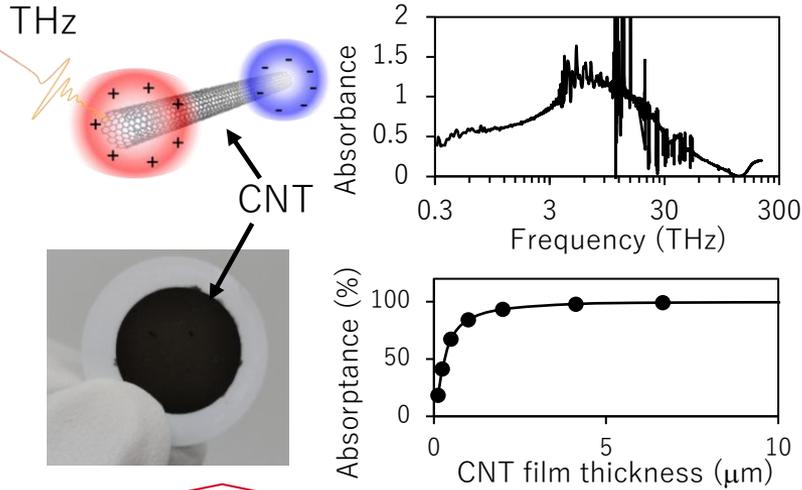
$$\approx \frac{l}{k \times t \times w} \times Q_{\text{in}} \times \alpha$$

↑ 熱的な項 ↑ 光学的な項

熱特性・光特性双方の
最適化に向けたデバイス設計

CNT膜に対するTHz吸収メカニズム

1D Plasmon resonance



THz~IR帯アブソーバーとして動作

本題

光熱効率を最大化させる
デバイス構造とは？

光熱効率 $\Delta T \approx \frac{l}{k \times t \times w} \times \alpha$

熱的 光学的

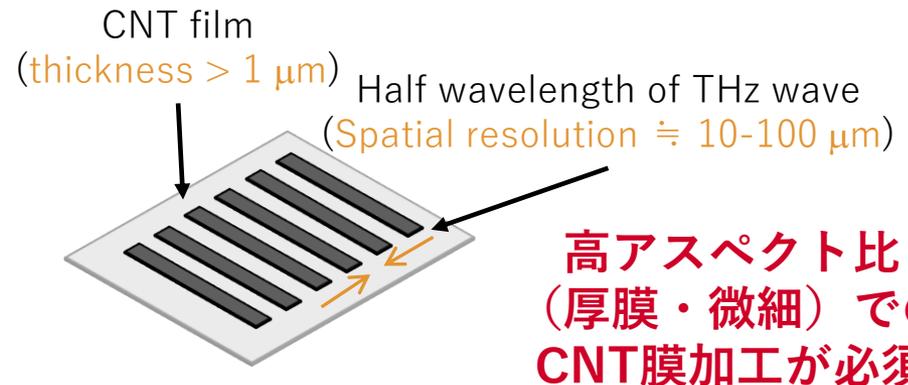
熱的には材料のサイズwが小さいほうが良いが、光的にはどうなる？

一般的に材料のサイズが入射電磁波の波長程度 (1 THz = 300 μm) まで小さくなると、共振や回折限界といったアンテナ特性を考慮する必要が出てくる

ただし、CNT膜を材料とした
THz帯アンテナ特性は未解明

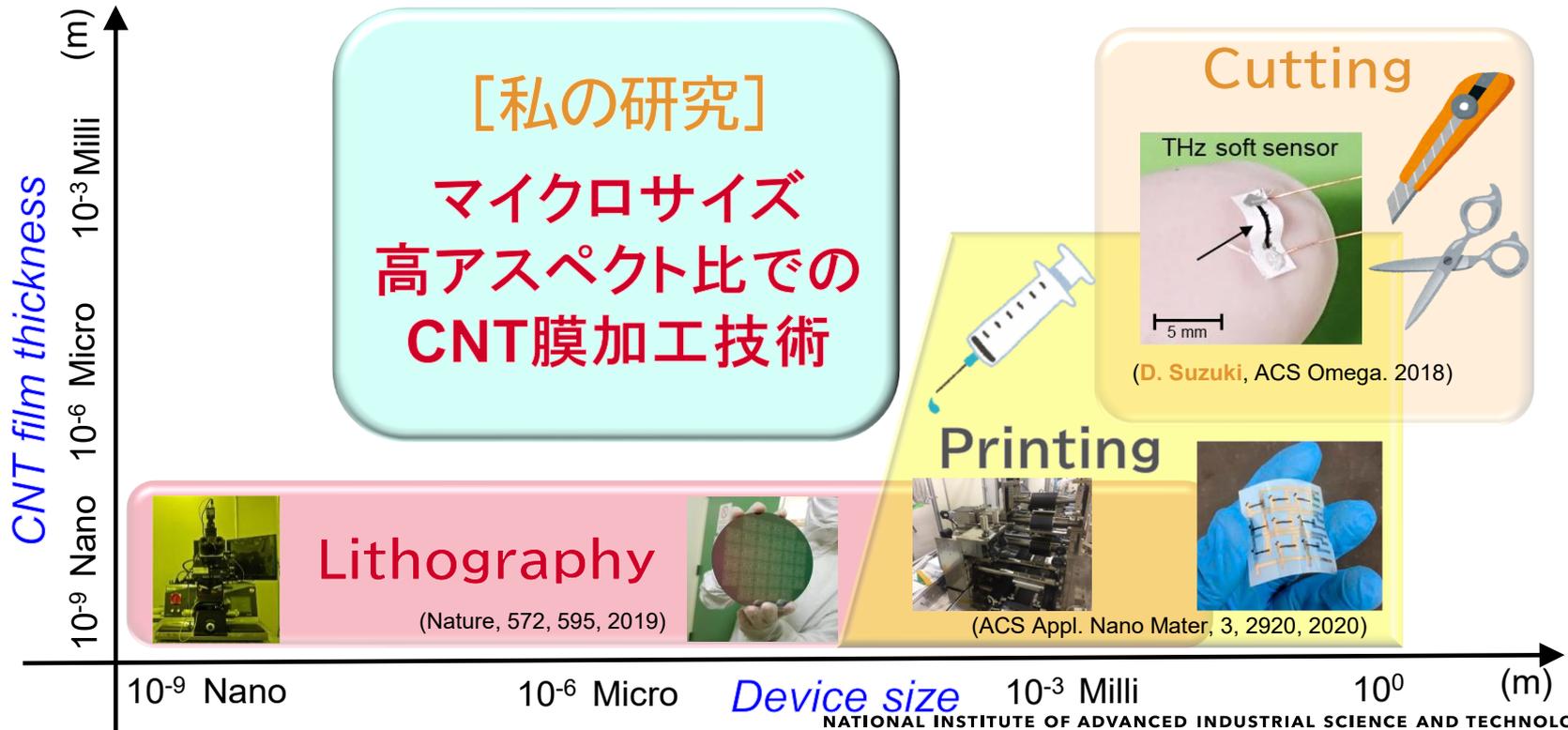
そもそも膜状構造体のCNT膜で
定在波とかサイズ効果が発生するのか？

未解明なら作って測ろう！
CNT膜によるTHzアンテナ

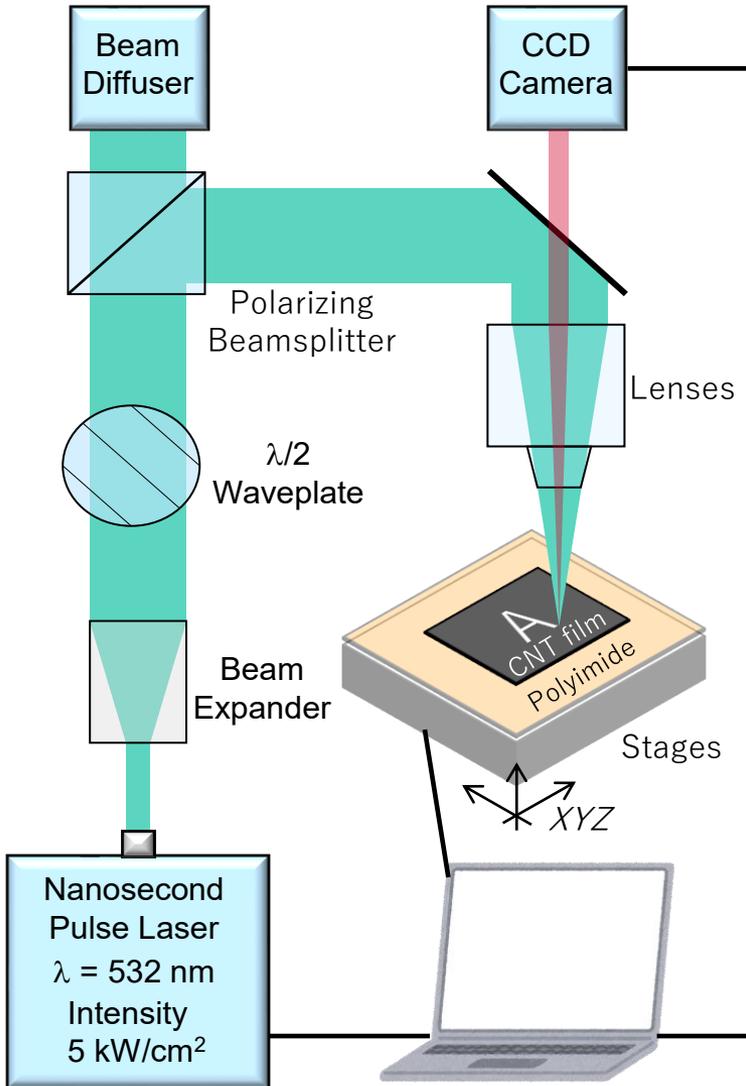


CNT膜のプロセス技術

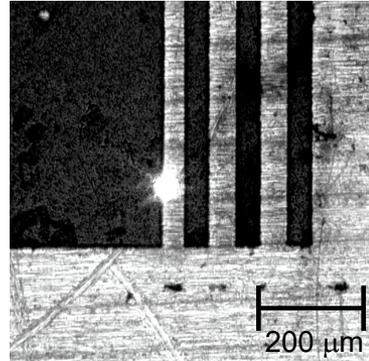
process	Device size	CNT thickness	Patterning	Annex (Disadvantages)
Cutting	× (Milli)	◎ (Milli)	△	Resolution depends on one's manual dexterity
Printing	△ (Sub-milli)	○ (Sub-milli)	◎	Tradeoff between resolution and thickness (viscosity of solution)
Lithography	◎ (Nano)	× (Sub-micro) Difficult for etching	◎	Not applicable to chemical-soluble materials (ex. chemical dopant)



Experimental Setups



レーザーアブレーション法

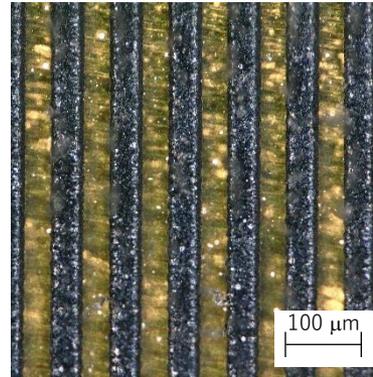


3 μm thickness
CNT film
on polyimide

(D. Suzuki, Appl. Phys. Express 2022)

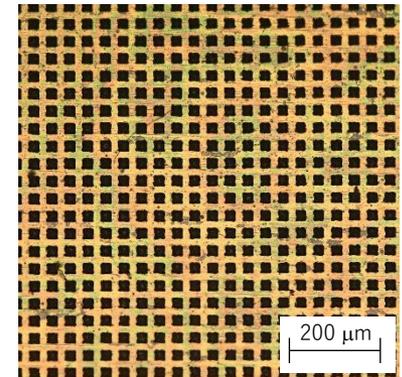
Slit antenna

Line & space: 40 & 40 μm



Array antenna

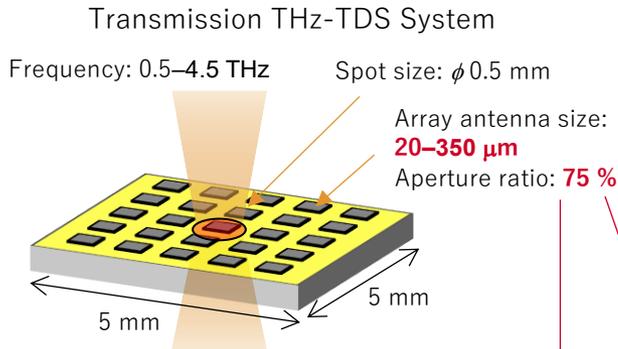
20 \times 20 μm^2



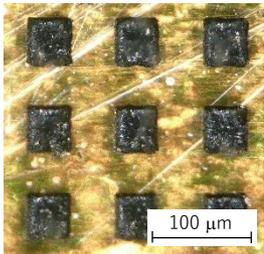
本技術により世界で初めてCNT膜を
THz帯光学素子のスケールで
加工できるようになった

THz characteristics of CNT films

Experimental setup

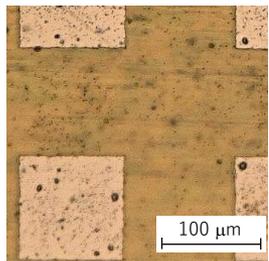
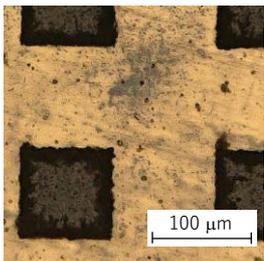
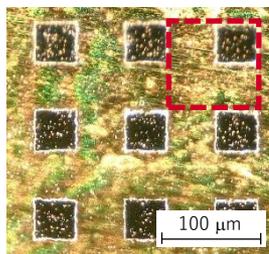


Array antenna
by CNT film

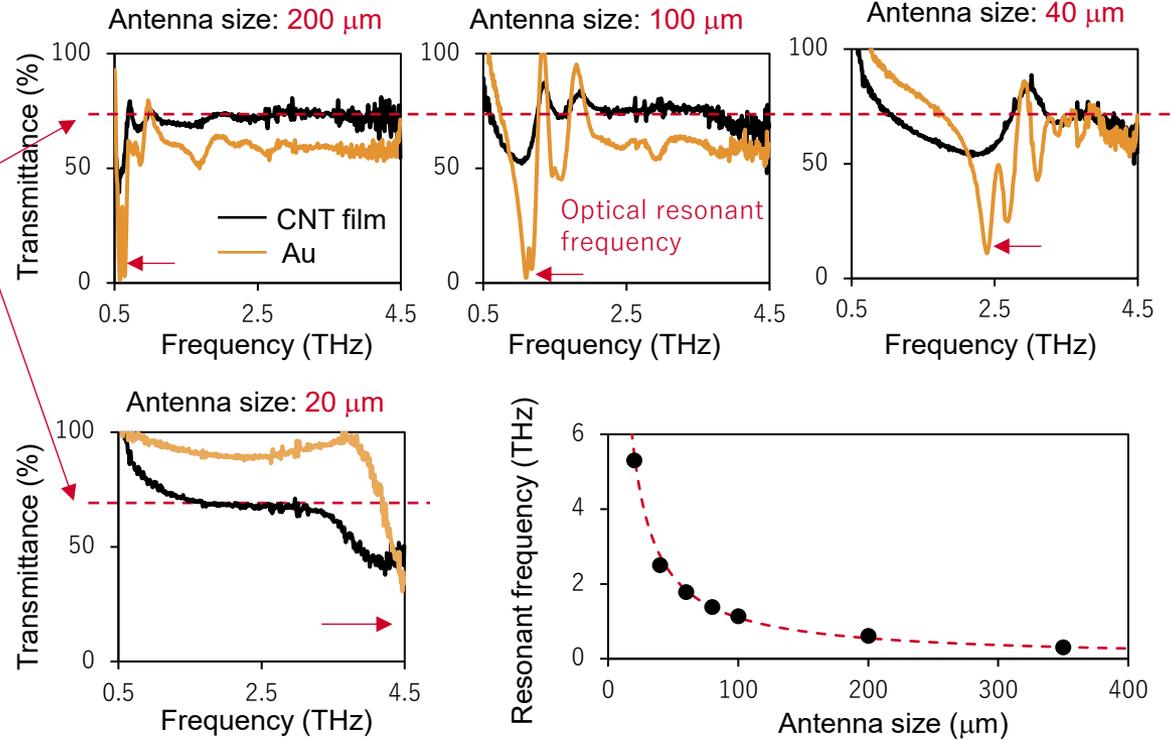


100 × 100 μm^2

Array antenna
by Au



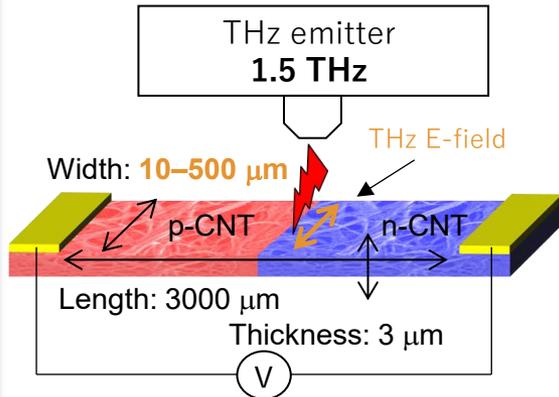
Antenna spectrum



- 1) アンテナ構造由来のキャリア共振(アンテナ効果)が観測
- 2) 共振周波数はアンテナ長で制御可能
- 3) CNT膜はブロードな共振特性

感度向上に向けた光熱構造の最適化

Experimental setups



光熱起電力

$$\Delta V = S \times \Delta T$$

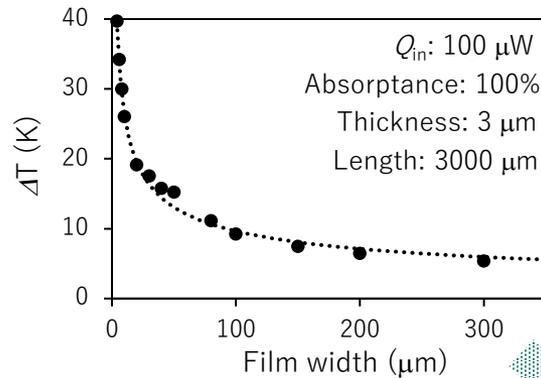
$$\Delta T = \int_{x=0}^l R(x) Q_{\text{absorb}} dx$$

$$\approx \frac{l}{k \times t \times w} \times Q_{\text{in}} \times \alpha$$

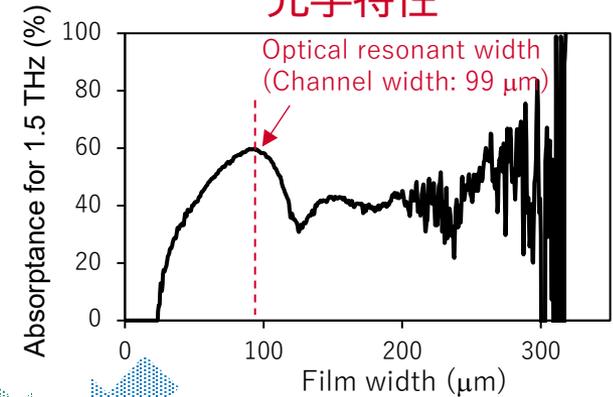
熱的な項

光学的な項

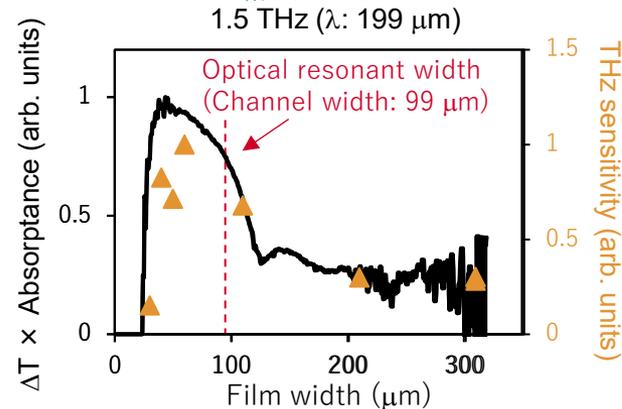
熱特性



光学特性



光熱効率 Photo-thermal efficiency



(D. Suzuki, Sci. Technol. Adv. Mater., 2022)

Optimal device structure that enhances
both thermal and optical factors

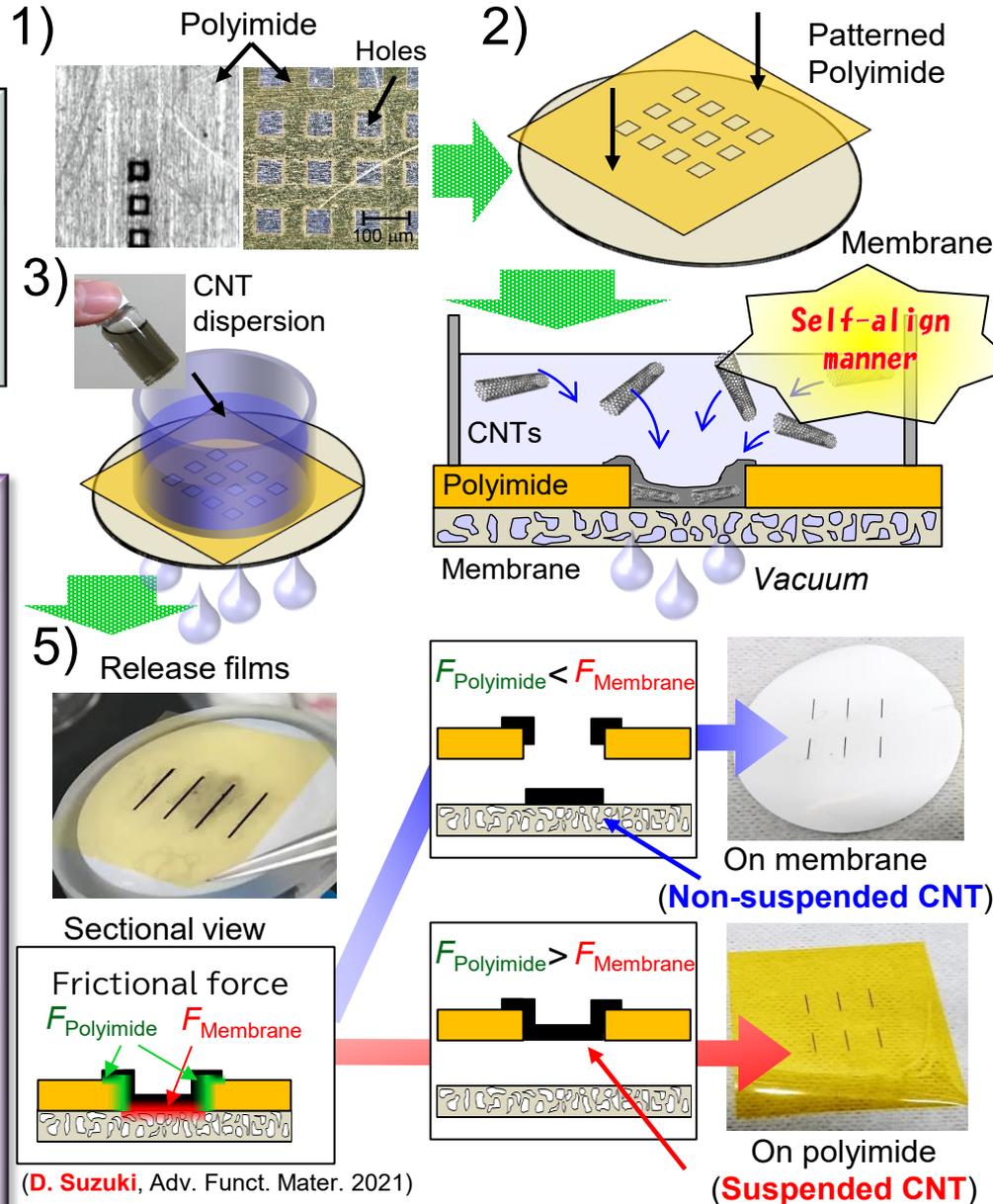
CNT film width : 65 μm @ 1.5 THz irradiation

New patterning process

CNT "架橋構造膜" アレイを実現する
 自己整合製膜技術

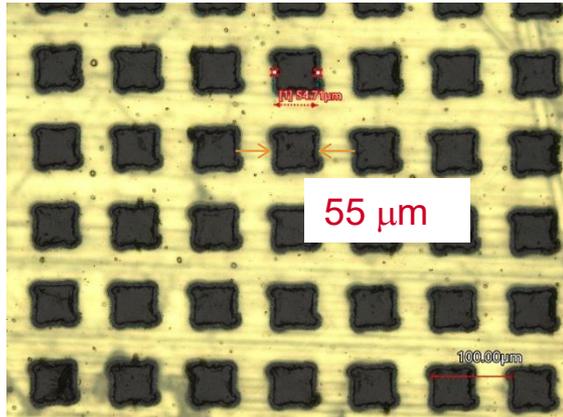
Process flows

- 1) 土台となるポリイミドにレーザー加工でスリットパターンを形成
- 2) ポリイミドとメンブレンを吸着
- 3) 上記複合フィルム越しにCNT分散液を濾過して製膜
パターン加工した箇所からのみ選択的にCNTが濾過製膜
- 4) CNT膜を乾燥
- 5) CNT膜を土台であるポリイミドごとメンブレンから剥離

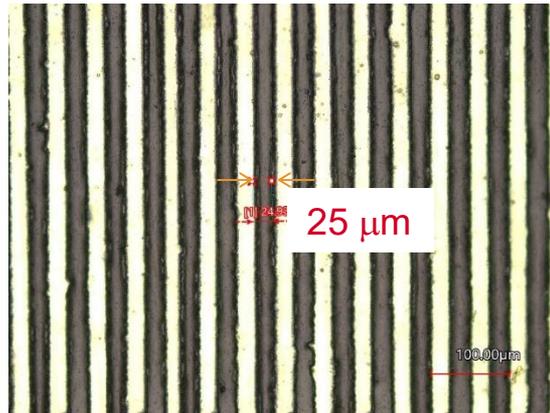


Various shapes of micro-scale suspended CNT films

Square array



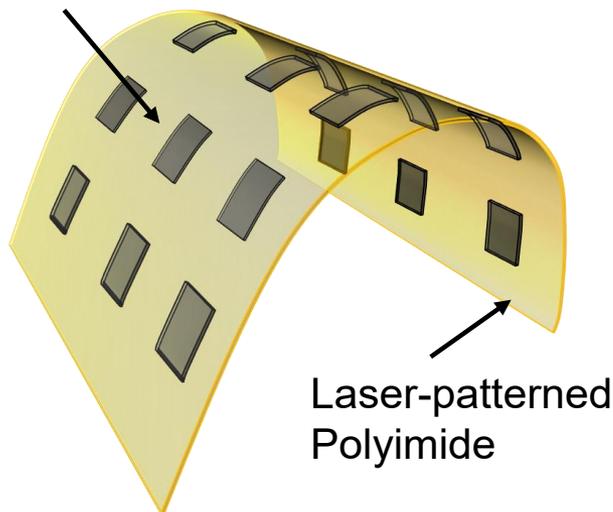
Slit-lines



My Name



Suspended, 2D, Micro-scale CNT films



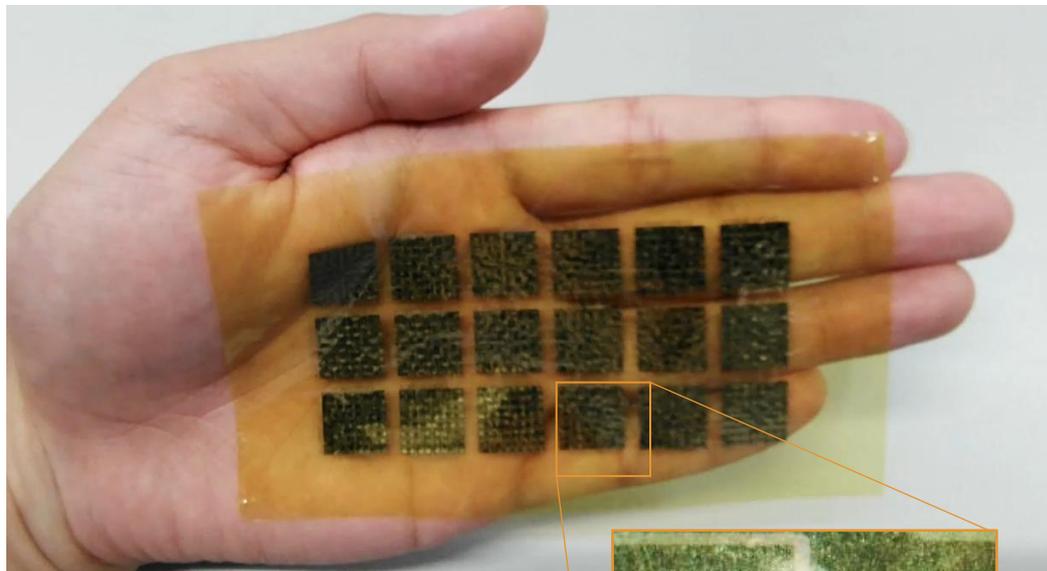
Points

CNT架橋構造膜のサイズと形状はレーザー加工のパターンに合わせてマイクロ～センチスケールで自由に調整可能！

光熱電デバイスの高性能化に向けた新規パターンニングプロセスとして有力

CNTによるパッチ型THz撮像デバイス

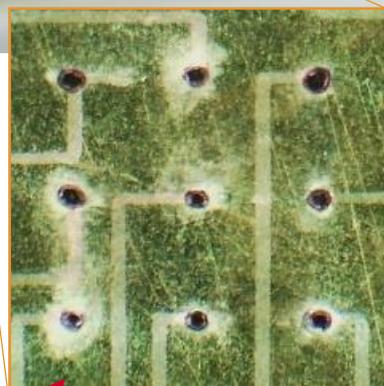
THzソフトカメラパッチ



Suspended
CNT film array

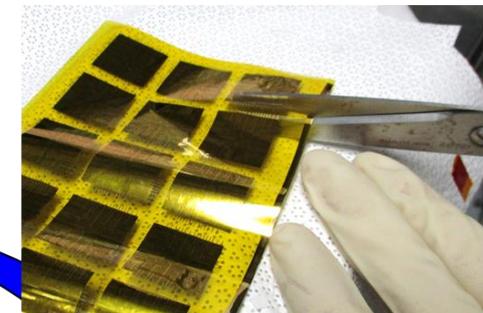
Signal line (Front)

Common GND (Rear)

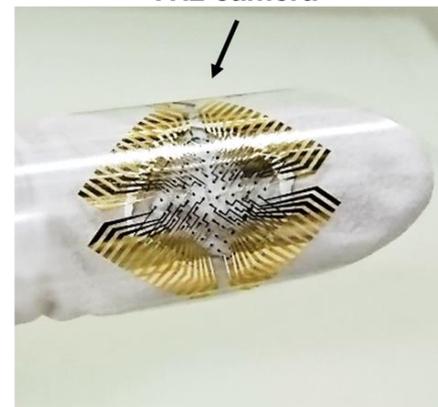


1 mm

Cut and paste



Wearable/portable
THz camera



Built-in/in-line
THz camera

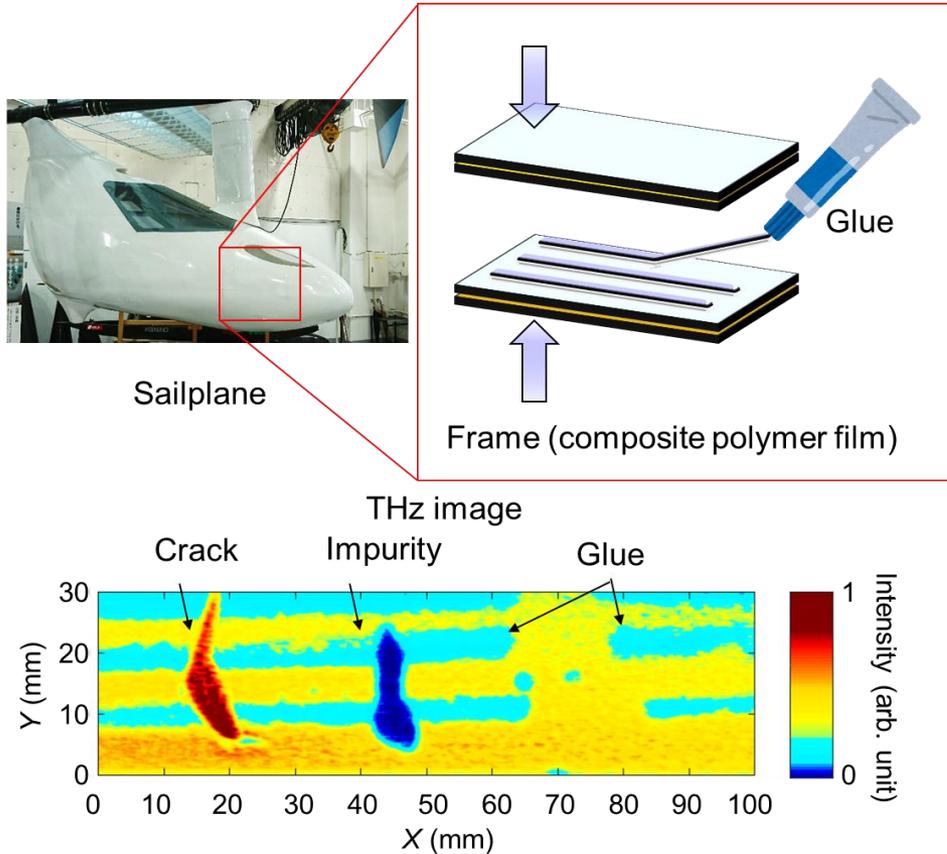


(D. Suzuki, Adv. Funct. Mater. 2021)

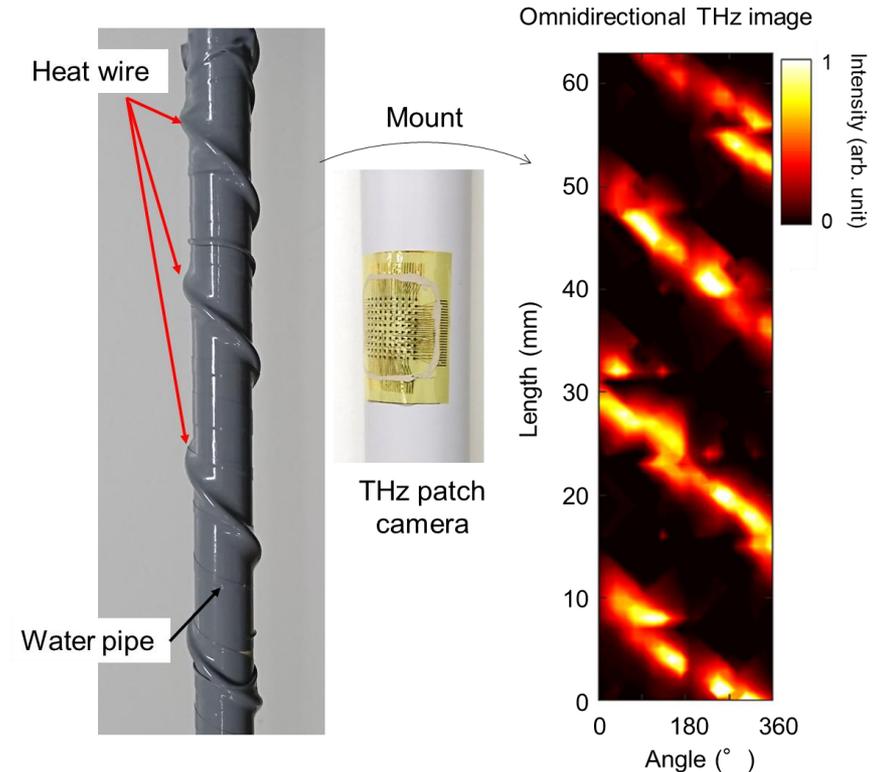
任意形状の被測定物に貼って使えるパッチ型撮像デバイス

インフラ設備に組み込めるビルトインTHzカメラ

樹脂合板の劣化診断

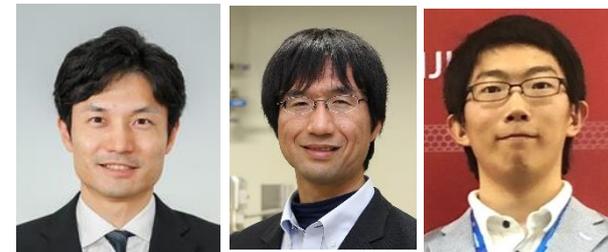
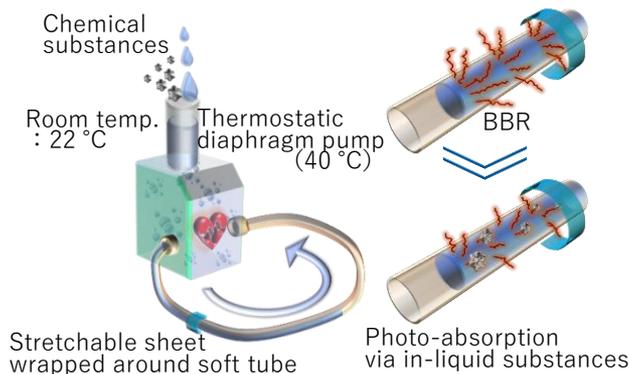
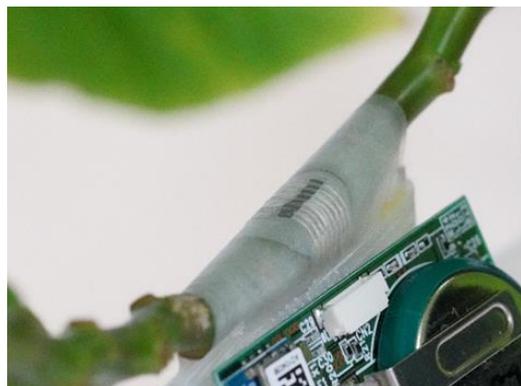


インフラ設備のリアルタイム診断



対象物の形状に制限されない自由度の高い非破壊検査応用

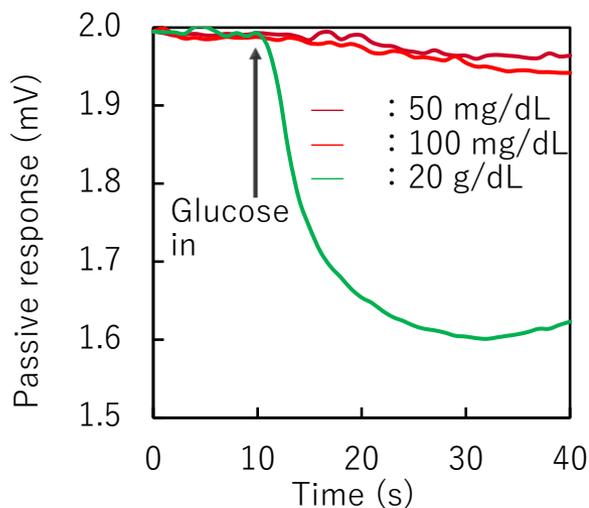
巻き付け型パッシブ化学センサー



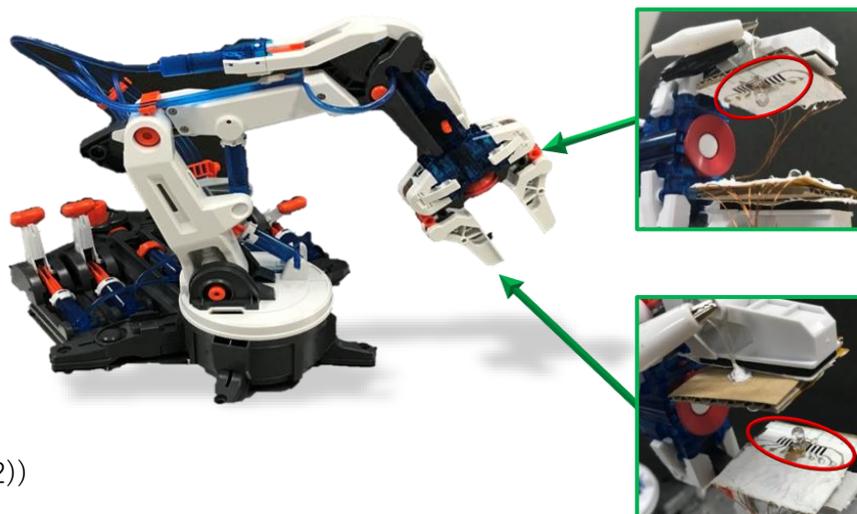
大阪大学 荒木准教授

中央大学 河野教授 李助教

光源を組み込んだインフラ設備の診断デバイス



(T. Araki, **D. Suzuki**, et al., Sci. Adv. 8, eabm4349, (2022))



(K. Li, **D. Suzuki**, et al., Nat. Commun. 12, 3009, (2018))

カーボンナノチューブを用いたパッチ型テラヘルツ撮像デバイス

レーザーによる新たな
CNTデバイスプロセスを開発

パッチ型THz撮像デバイス開発
自由度の高いセンシング応用

