

# 超伝導微細加工素子を用いた精密物性測定と量子デバイスへの応用

理工学部物理科学科 北野 晴久

## 超伝導の不思議さを活用する量子技術の開発を目指しています

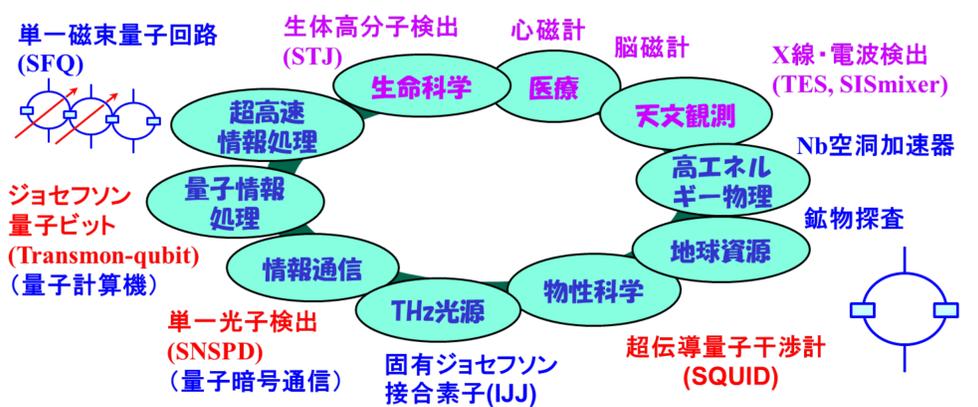
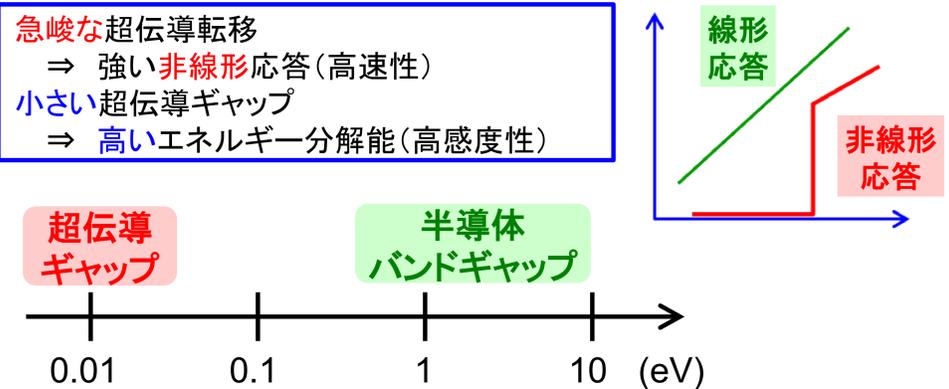
超伝導のゼロ抵抗（永久電流）は、古典物理では説明できない不思議な現象です。超伝導状態は、原子内の電子と同様に量子力学で記述されます。例えば、ゼロ抵抗で電流を輸送する超伝導電流密度は、超伝導の量子状態を表す巨視的な波動関数の空間変化によって与えられます。

$$j_s = \frac{e^* \hbar}{2mi} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) - \frac{e^* 2}{m} |\Psi|^2 A$$

超伝導のゼロ抵抗は、磁束量子の運動や超伝導波動関数の位相スリップなど様々な理由で破られてしまいます。我々は、外部から供給される電流がゼロ抵抗で輸送される非平衡な超伝導状態を詳しく調べるため、超伝導電子対の超高速な運動自体が超伝導状態を破壊する、対破壊電流密度（depairing current density）の測定に挑戦しています。

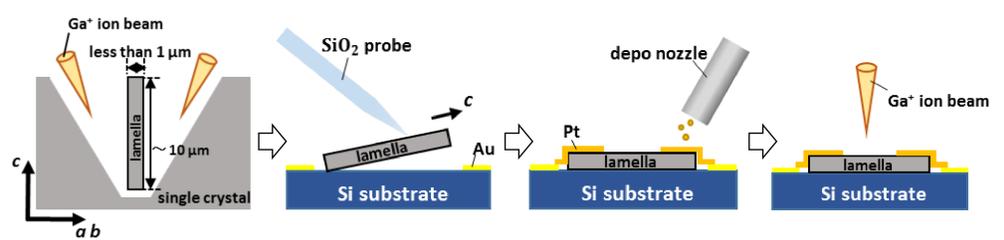
通常の試料形状では、自己磁場による磁束量子の侵入を抑えることが出来ず、電子対破壊領域に到達するよりも遥かに小さい電流密度でゼロ抵抗が破れてしまいます。我々は、集束イオンビーム照射による微細加工を駆使し、微小な超伝導ブリッジ素子を作製することにより、層状超伝導体の鉄系超伝導体単結晶に対する面間対破壊電流密度を初めて低温まで測定することに成功しました。

超伝導デバイスは、現在の半導体デバイスに比べ、低消費電力だけでなく、高感度性や高速応答性に優れ、様々な分野での活用が今後、期待されています。

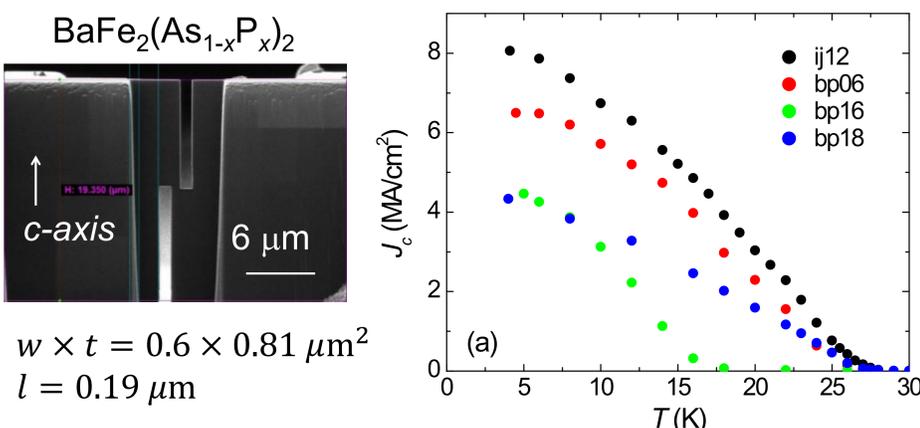


我々は、透過電子顕微鏡用の試料作製手法として利用されてきたFIBピックアップ法を応用し、微小な単結晶試料片の取り出しと微小ブリッジの作製にも成功し、清浄な金属-超伝導界面で発現するアンドレーエフ反射の観測に成功しました。

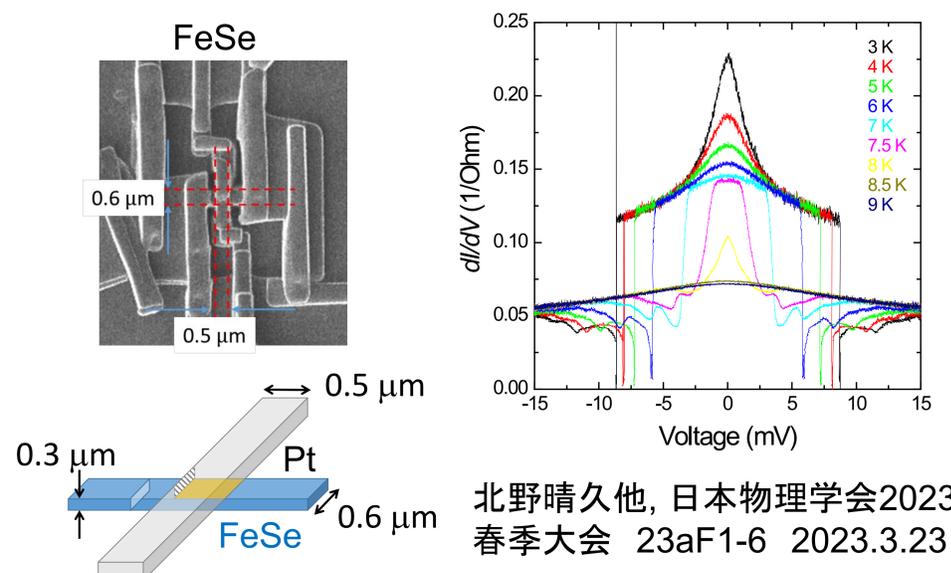
### FIB-pickup method



T. Miyazawa et al., J. Phys.: Conf. Ser. 1975, 012010 (2021).



Y. Mizukoshi et al., Phys. Rev. B 110, 104501 (2024)



北野晴久他, 日本物理学会2023年春季大会 23aF1-6 2023.3.23

今後は、鉄系超伝導体の超伝導微小ブリッジ素子を用いた単一光子検出の実験に挑戦し、将来の量子センサー技術の開発に役立てたいと考えています。

# 高性能高温超伝導バルク磁石の開発

理工学部物理科学科 下山淳一、元木貴則

## 研究背景

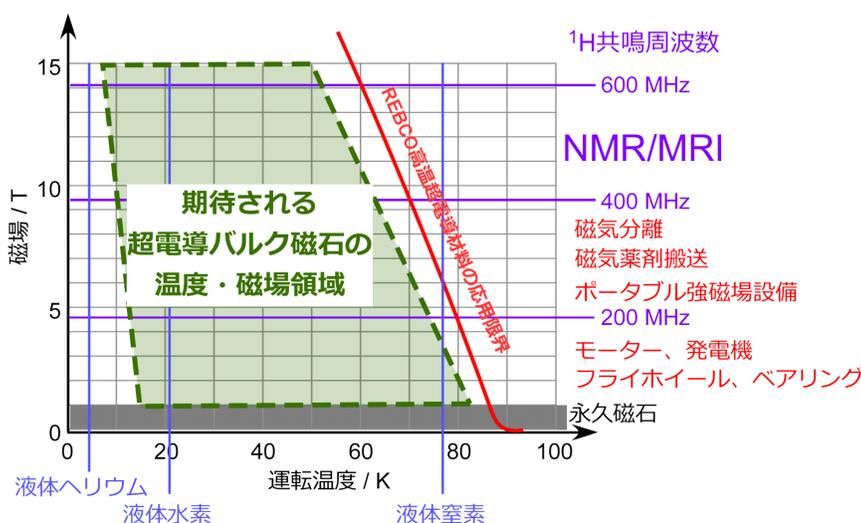
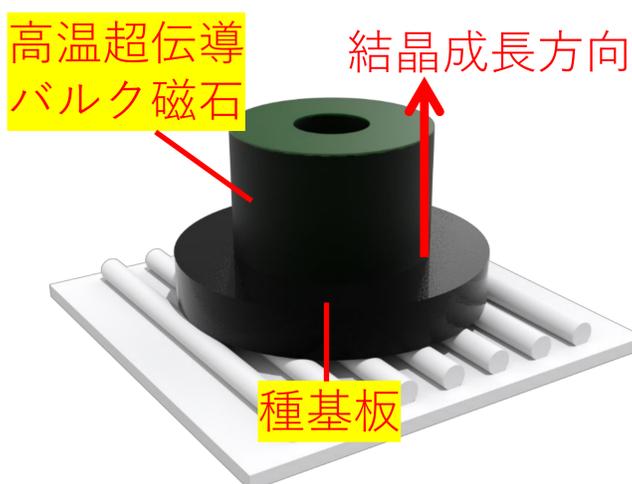
REBCOと呼ばれる希土類系の高温超伝導体( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ )は、90 K (-183°C)級の超伝導転移温度を示すことから、液体ヘリウム(-269°C)を必要としない強磁場発生や大電流送電に向けた研究開発が盛んに行われています。本研究では、REBCO材料を大型の単結晶状に独自の方法で結晶成長させたバルク材料を開発し、永久磁石よりはるかに強力な磁石としての様々な応用を目指しています。

## 研究の特徴

REBCO高温超伝導バルク磁石は、材料全体を単結晶状に成長させる必要があることから、結晶成長に非常に長い時間を必要とし、高性能な大型バルク育成が困難でした。我々は、一方向溶融成長(Single-Direction Melt Growth, SDMG)法という大型で高性能なバルク磁石を短時間で育成可能な手法を開発しました。結晶成長が一方向のみに進行するため、従来法では難しいリング形状といった複雑形状のバルク磁石の直接育成も可能です。

## 研究成果と展望

SDMG法を用いて、世界最大級の直径60 mmを超える大型のバルク磁石の育成に成功しています。高性能な大型高温超伝導バルク磁石開発を通じて、例えば液体ヘリウムを必要としない小型NMRの実現など、超伝導材料を用いたこれまでにない技術の社会実装を目指しています。



一方向溶融成長(SDMG)法による複雑形状バルク磁石作製の模式図

SDMG法で育成した大型バルク磁石 (直径~60 mm)

高温超伝導REBCOバルク磁石の期待される応用領域

# 無機薄膜の高次構造制御による高度な機能の発現

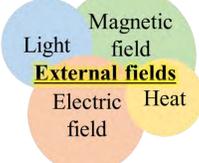
理工学研究科・機能物質創成コース 重里有三・金 叡

## 1. Background

### Thermal switching technology [1]

Technology to control heat flow by switching between low and high thermal conductivity.

Crystal structures, Electrical or thermal properties can be controlled by external fields. Switch performance (the ratio of thermal conductivity on On/Off states) exceed more or less 3.



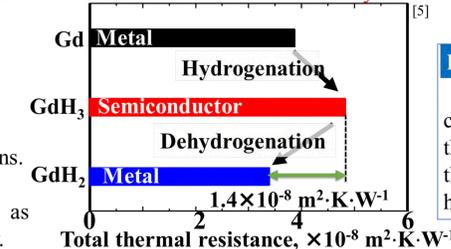
**To improve the thermal switching performance,** As the switching mechanisms, we focused on changes in the dominant heat carrier. Previous studies, e.g., VO<sub>2</sub>, have not been able to increase the thermal conductivity sufficiently at the high thermal conductivity state.

**One of the solid-state thermal conductivity switches** The results on the VO<sub>2</sub> suggest to use a metal with high thermal conductivity and reduce its thermal conductivity by hydrogenation.

### Variation of Gd crystal structures with hydro/dehydrogenation [4]

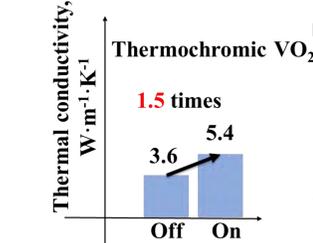


The total thermal resistances of Pd-capped Gd/Mo multilayered films with the electrochemical reactions. Pd: catalyst for the hydrogen intercalation



### Purpose of this study

To demonstrate the concept on the dominant heat carrier change between electron and phonon through clarification of the structural, electrical and thermophysical properties of Gd and the Gd hydride thin films.



### Advantages Switchable mirror thin films [3]

**In the high thermal conductivity state (Metal)** Metal has high thermal conductivity due to the free electrons. Phonon scattering factors affects slightly on heat transport with free electrons.  
**In the low thermal conductivity state (Semiconductor)** The dominant heat carrier is phonon. Phonon scattering factors such as interface and lattice defects are available to reduce the thermal conductivity.

## 2. Experimental details

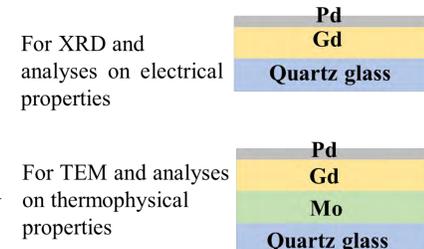
### Sample preparation

	Gd	Pd
Deposition method	dc magnetron sputtering	
Target	Gd (99.99%)	Pd (99.99%)
Sputtering gas	Ar	
Total gas pressure, Pa	1.0	0.5
Back pressure, Pa	< 4.0 × 10 <sup>-4</sup>	
Film thickness, nm	100	5
Substrate temperature	RT	
DC power, W	50	10
Substrate	Synthetic quartz glass	

### Hydro-/Dehydrogenation methods

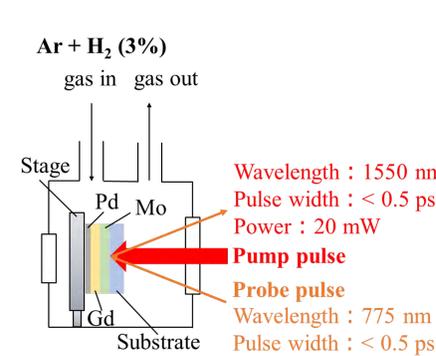
Gd thin films were hydrogenated by the gasochromic method utilizing a dilute H<sub>2</sub> gas (3%) and a Pd catalyst. Dehydrogenation proceeds spontaneously in air due to the chemical potential.

### Structures of the samples

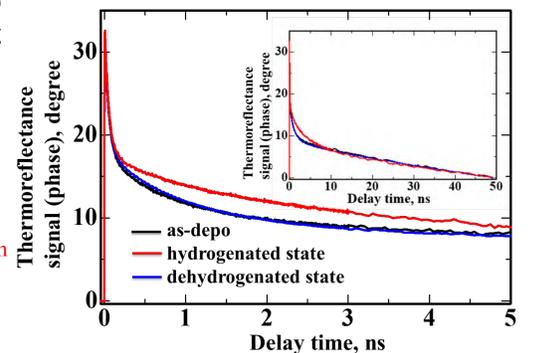


## 3. Heat diffusion in each states

### In-situ rear-heating/rear-detection (RR) type picosecond pulsed light heating thermoreflectance measurement



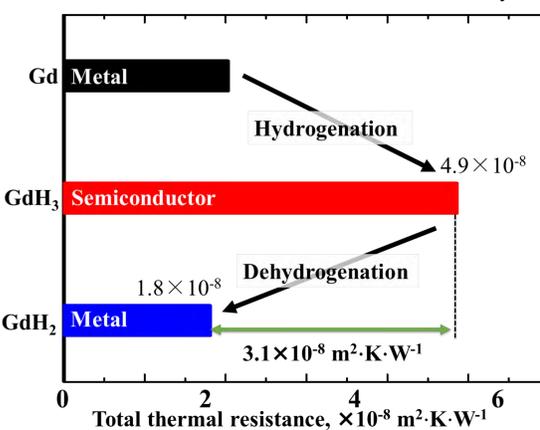
### Thermoreflectance signals(phase)



Obvious changes in temperature decays are observed between the hydrogenation and dehydrogenation reactions.

## 4. Total thermal resistance

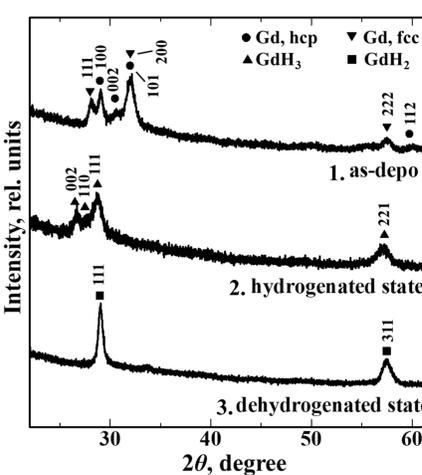
Total thermal resistance means sum of all boundary thermal resistances and thermal resistances of each layer.



The total thermal resistance shows large at dehydrogenated states while low at hydrogenated state as anticipated.

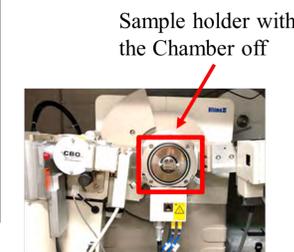
## 5. Crystal structure changes in XRD and TEM

### In-situ XRD(2θ)

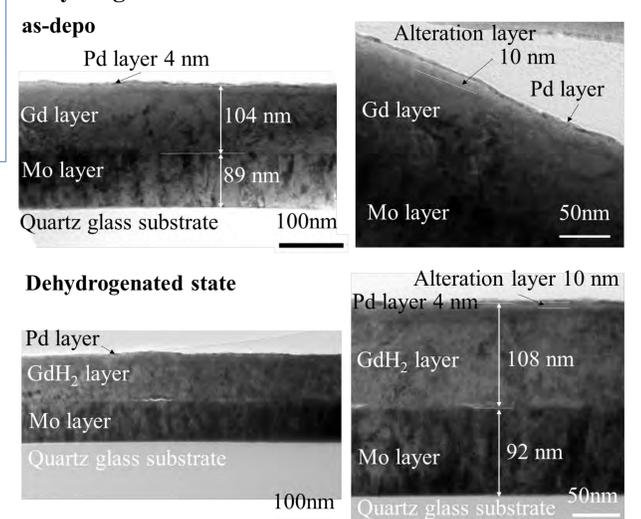


XRD patterns show changes in crystal structures with the hydro-/dehydrogenation reactions.

- ### Measurement procedure
1. Atmospheric condition.
  2. After 60 min from Ar + H<sub>2</sub> (3%) gas replacement
  3. After 60 min from air replacement



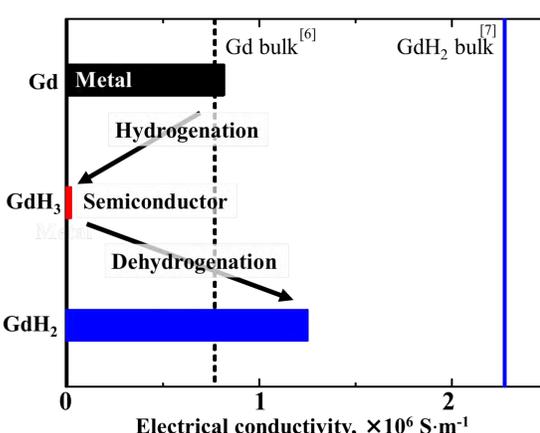
### TEM study : Film structure at as-depo. and dehydrogenated state



The alteration layer exists under the Pd layer, whose thickness does not change through the hydro-/dehydrogenation reactions.

## 6. Electrical conductivity changes

### Electrical conductivity obtained by Van der Paw method with the synthetic resistance model of parallel circuits



Note: For the electrical conductivity calculation, Gd layer thickness is corrected based on the volume expansion accompanied with hydro-/dehydrogenation reactions as follows.

	Gd	GdH <sub>2</sub>	GdH <sub>3</sub>
Reported film thickness change	Reference	+ 4.2%	+ 7.4%
Film thickness of Gd layer, nm	112	117	120

### Estimated free electron's contribution with Wiedemann-Franz Law

	Hydrogenated state	Dehydrogenated state
thermal conductivity, W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	0.3	9.1

**Comparing hydrogenated state with dehydrogenated state,** Increase in the total thermal resistance at hydrogenated state is considered to come from the lower thermal conductivity due to decrease in electrical conductivity.

## 6. Summary and References

### Thermophysical properties

The total thermal resistance of hydrogenated state is found to be 3.1 × 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>·K·W<sup>-1</sup> larger than that of the dehydrogenated state.

### Crystal structures

The crystal changes from Gd to GdH<sub>3</sub> and then to GdH<sub>2</sub> are observed.

### Electrical properties

Based upon WFL, free electron's contribution to the thermal conductivity for the dehydrogenated state (GdH<sub>2</sub>) is estimated to be 9.1 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, while that of the hydrogenated state (GdH<sub>3</sub>) is small.

### Future works

- Measure heat capacitances of Gd, GdH<sub>2</sub> and GdH<sub>3</sub>.
- Calculate the thermal conductivity in each state.
- Further investigation on the Gd deposition conditions to maximize the changes in thermal conductivity.

[1] G. Wehmeyer et al., Appl. Phys. Rev., Vol. 4, (2017), 041304., [2] Hinako Kizuka et al, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 053201, [3] K. Yoshimura, J. Vac. Soc. Jpn., Vol. 57, No. 3, (2014), pp. 84-90., [4] Adachi Ginya, [KIDORUINOKAGAKU], KAGAKUDOJIN (1990)., [5] R. Inaba et al., Proc. of the 42nd Japan Symp. on Thermophys. Prop., Sapporo (2021), B315. [6] R. V. Colvin et al., Phys. Rev., Vol. 120, No. 3, (1960), pp. 741-745., [7] J. P. Burger et al., J. Less-Common Met., Vol. 103, (1984), pp. 381-388.

### "Thermal conductivity switching in Pd-catalyzed Gd and GdH<sub>2</sub> films upon gasochromic hydrogenation and dehydrogenation",

Riko Hirata, Yuichiro Yamashita, Takashi Yagi, Makoto Kashiwagi, Satoshi Takeya, Yuki Oguchi, Fabio Iesari, Toshihiro Okajima, Naoyuki Taketoshi and Yuzo Shigesato,

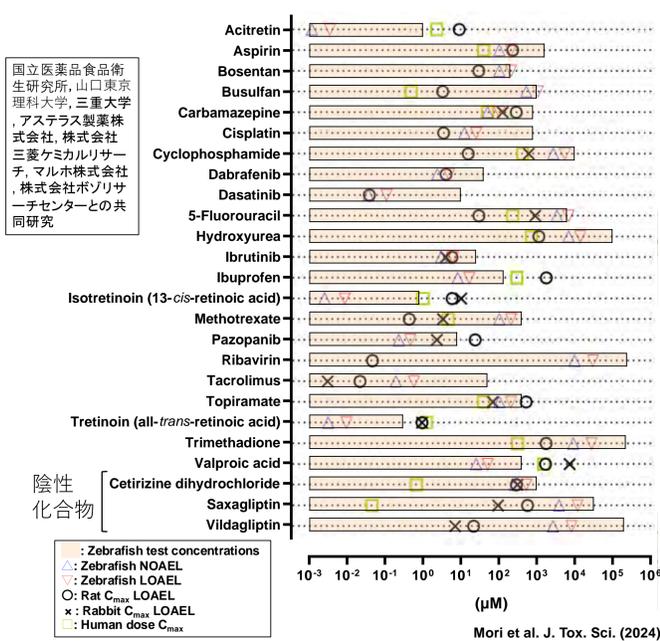
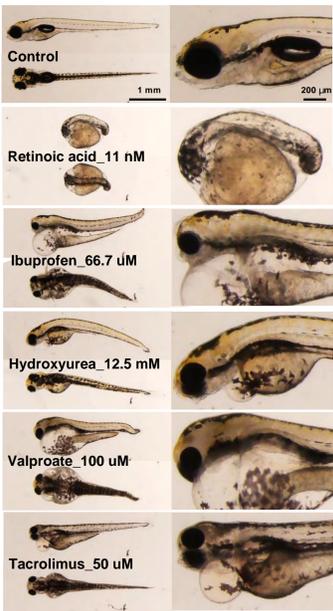
International Journal of Thermophysics (2024). <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03322-y> or <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10765-023-03322-y.pdf>.

# 動物の高次生体機能

理工学部化学・生命科学科 平田普三

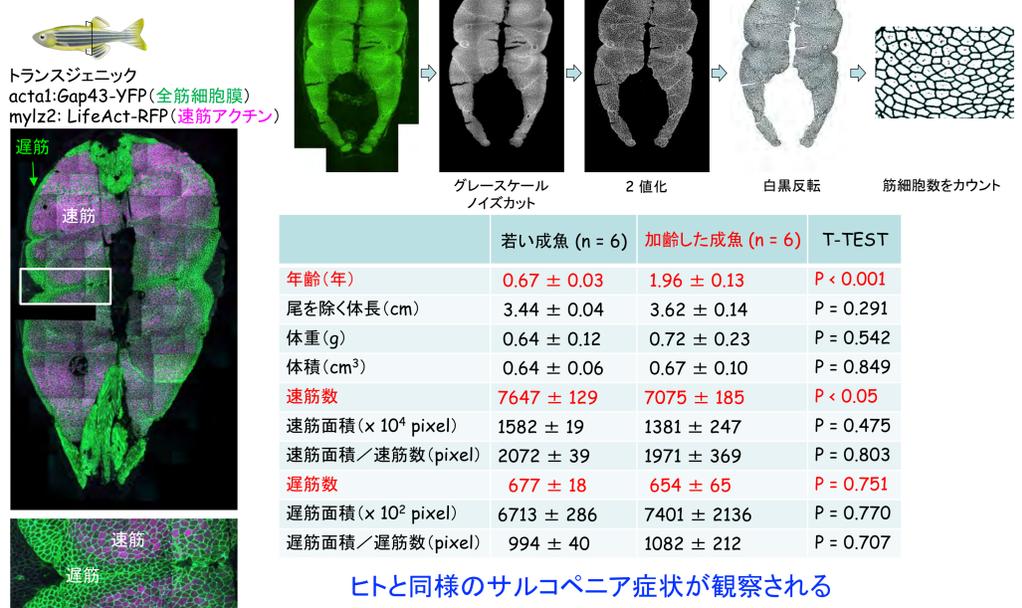
生物は知覚、記憶、学習、情動、判断といった高次機能を持ちあわせています。これを可能にするのは神経系です。では、神経系はどのように形成され、これらの機能を発揮するのでしょうか。私たちはゼブラフィッシュという熱帯魚をモデルとして、神経系による高次機能の解明を進めています。ゼブラフィッシュを用いた行動実験から、たった1つの化学反応がシナプス（神経細胞間の接続部分）におけるタンパク質動態を変化させて、動物の行動変化を引き起こし、これが環境適応を可能にすることを明らかにしました。また、ゲノム編集技術CRISPRを用いて、さまざまな高次機能障害の魚を作り、病態発症のメカニズムを解明してきました。脳が過剰興奮することでてんかん発作を発症する魚を作製し、その症状を軽減する化合物のスクリーニングから、てんかんを改善する薬の創造も行っています。これらの脳科学研究を通して、ヒトが健康で豊かな生活を送れるよう貢献してまいります。

## 毒性試験でのゼブラフィッシュの使用

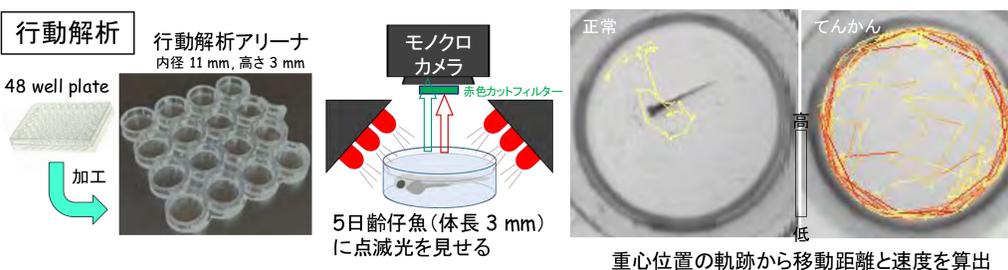


## 魚をモデルとしたサルコペニア

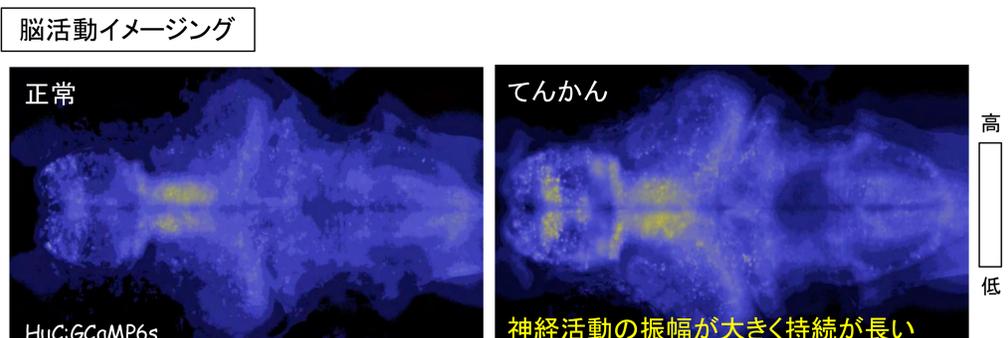
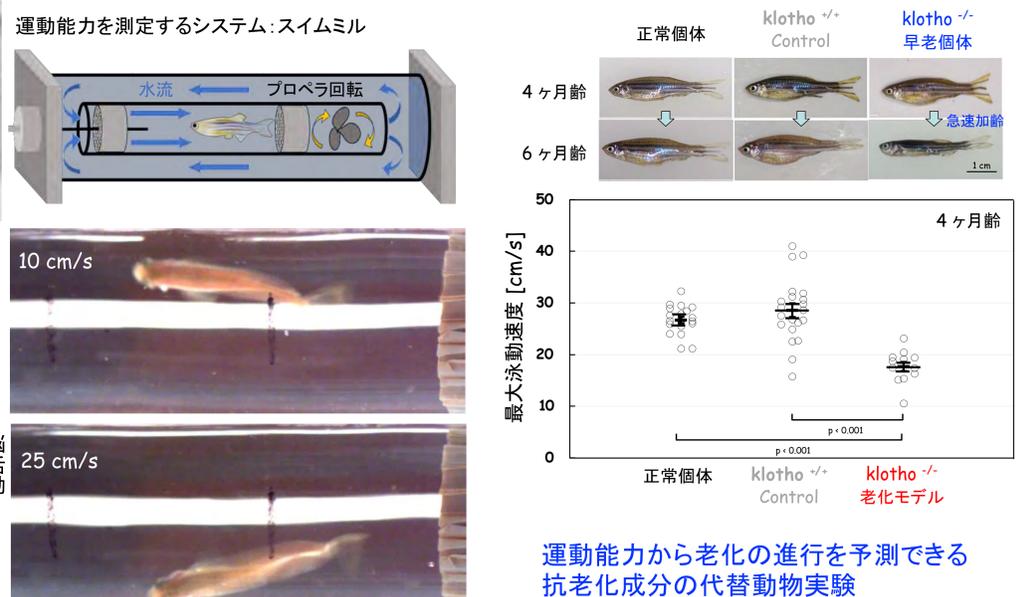
筋量を定量化するシステム



## 魚モデルを用いたてんかんの定量評価

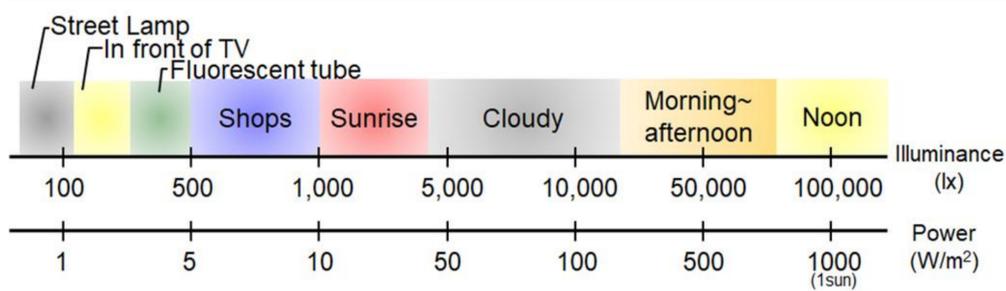
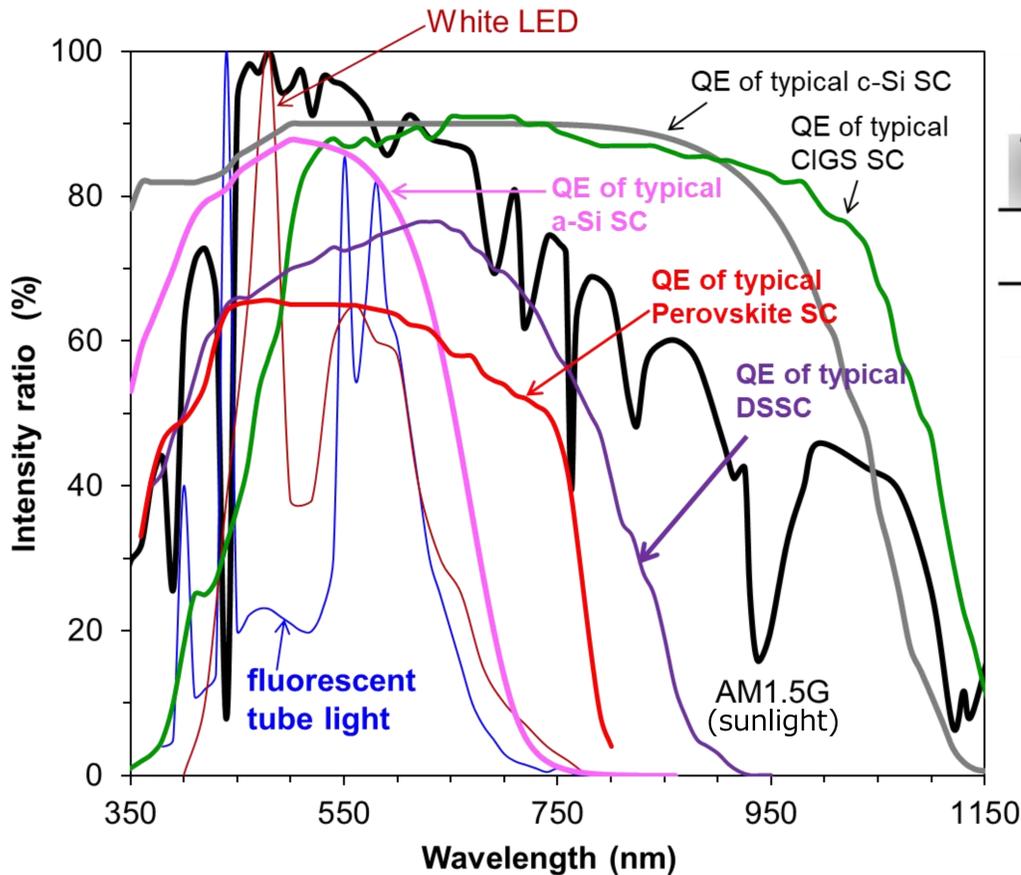


## 加齢に伴う運動能力の低下

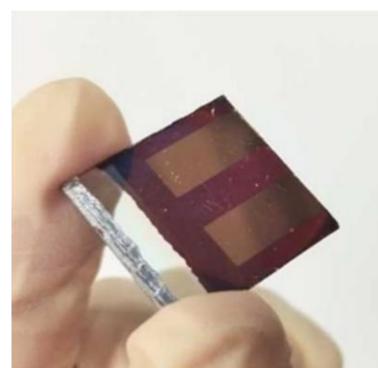


# 屋内環境用高効率ペロブスカイト太陽電池の開発

理工学部電気電子工学科 石河 泰明・來福 至



Flexible aSi solar cell (on PET), Efficiency ~6%



Perovskite solar cell (on glass) Efficiency ~30%

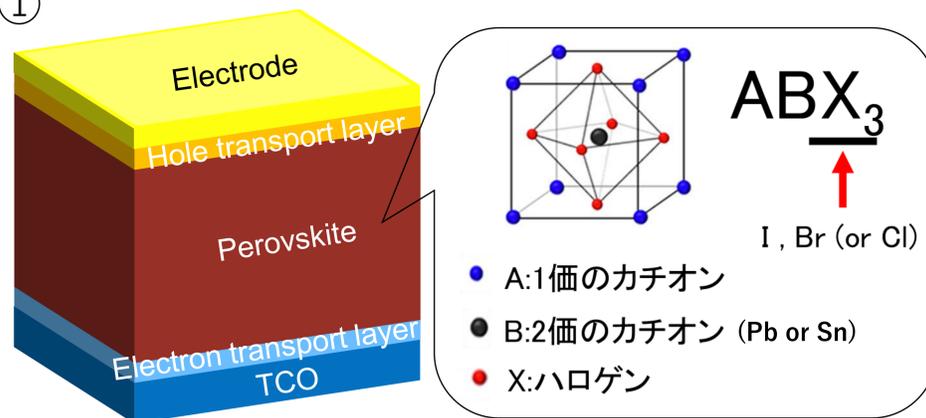
\*c-Si SC: crystalline Si solar cell, a-Si: amorphous Si, CIGS: CuInGa(Se,S), DSSC: Dye Sensitized Solar Cell,

- ◆ 屋内用光電変換素子(太陽電池)としてアモルファスSiが利用されているが、変換効率はあまり高くない。
- ◆ 現在屋外で利用されている結晶Si系や化合物半導体系は、低照度環境に適していない。
- ◆ 屋内環境で高い変換効率が実現可能なペロブスカイト太陽電池がIoTデバイス用電源として期待されている。

## 【実施内容の概要】

- ① 屋内光スペクトルの光電変換に適した光吸収層の開発
- ② 低照度環境下でも効果的にキャリアを輸送する電子輸送層および正孔輸送層の開発
- ③ 屋内環境における素子特性安定性評価

①



ペロブスカイト太陽電池の構造概要図

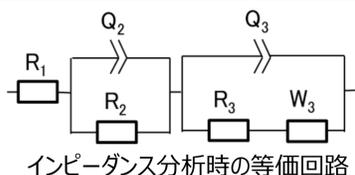


70% ← → 20% Br量  
1.91 eV ← → 1.60 eV  $E_g$

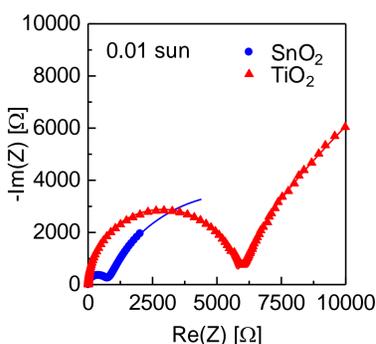
ペロブスカイト材料の組成変調によるバンドギャップ制御

TCO:透明導電膜、 $E_g$ : バンドギャップ

②

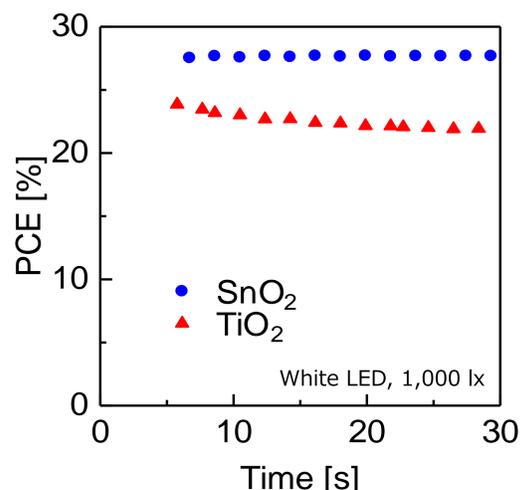


インピーダンス分析時の等価回路



ナイキストプロットによる抵抗分析

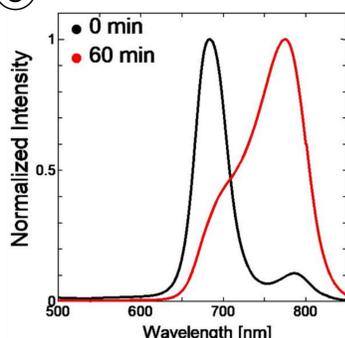
低照度環境における抵抗成分分析



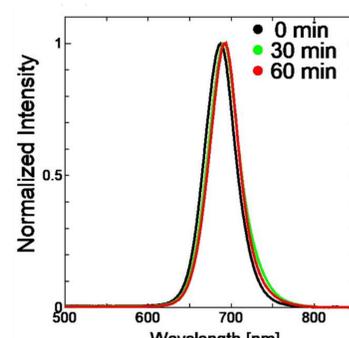
最大出力点追尾分析

低照度環境において電子輸送層材料物性が素子特性に与える影響

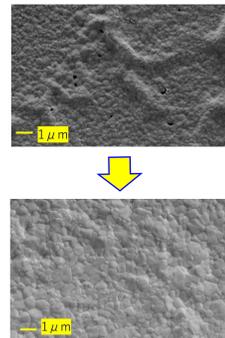
③



安定性改良前のPLスペクトル (1万lxの白色光照射前後)



安定性改良後のPLスペクトル (1万lxの白色光照射前後)



作製条件改良後の膜表面SEM像

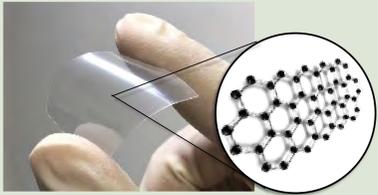
屋内光用に $E_g$ を調整したペロブスカイト膜の安定性および作製条件最適化

# 先端素子材料工学研究室 次世代エレクトロニクスデバイスの創成を目指して

## 理工学部電気電子工学科 黄晋二

### グラフェン

厚さ原子1層分の2次元シート炭素材料



高可視光透過率 (97.7%)

メタルフリー

フレキシブル性

制御可能な電気特性

高キャリア移動度

原子1層分の厚さ

グラフェンの  
透明導電膜としての  
デバイス応用

### カーボンナノチューブ (CNT)

電気伝導率が高い

熱伝導率が高い

機械的に強い

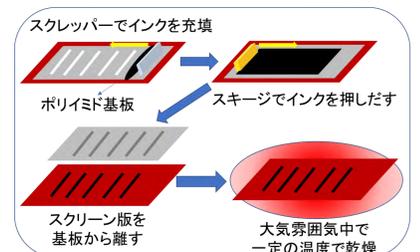
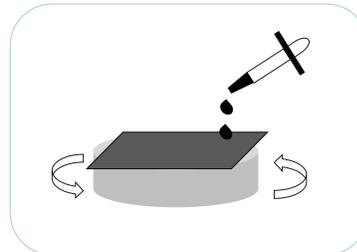
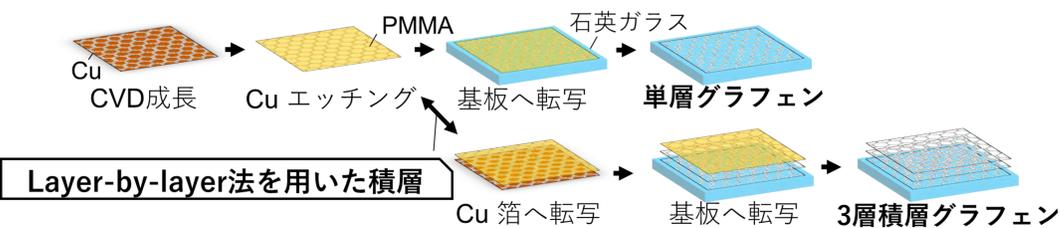
フレキシブル

ナノカーボンインクの  
プリントデバイス

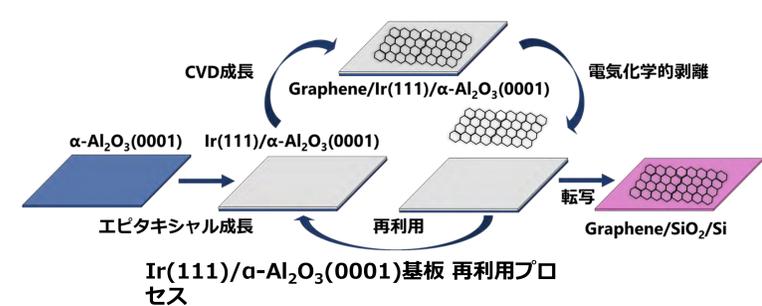
## 炭素材料を用いた高性能なデバイスの実現を目指す

### グラフェンの化学気相成長法 (CVD法) 膜を作製する

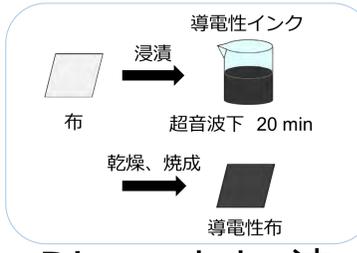
### プリントエレクトロニクス



### Ir薄膜上へのグラフェン成長



Ir成膜用MBE装置



### 高周波デバイスへの応用

### デバイスに応用する

### ヒーターへの応用



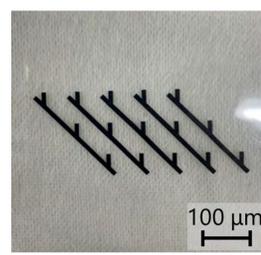
光学的に透明な  
グラフェンアンテナ<sup>[1]</sup>



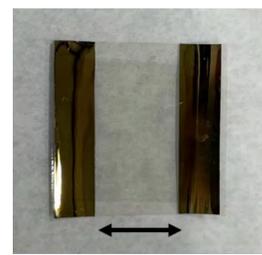
湾曲可能な  
CNTアンテナ<sup>[2]</sup>



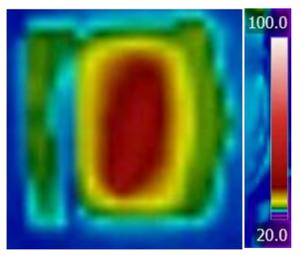
導電布による  
電波シールド<sup>[3, 4]</sup>



CNTを用いた  
単層円偏光板



透明グラフェンヒーター



[1] S. Kosuga, et al., AIP Adv., **11**, 0037907 (2021).

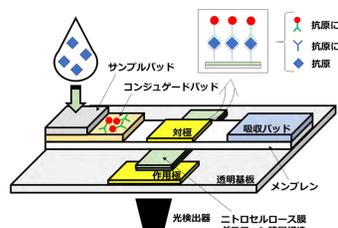
[2] S. Kuromatsu et al., Eng. Res. Express, **6**, 045367 (2024).

[3] Y. Horita et al., Cellulose, **30**, 1971-1980 (2023).

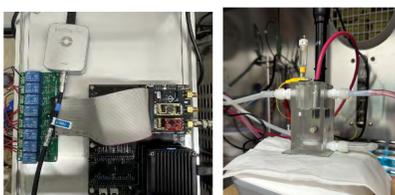
[4] Y. Horita et al., Jpn. J. Appl. Phys., **63**, 04SP01 (2024).

### センサへの応用

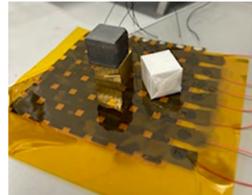
### 光学デバイスへの応用



電気化学発光  
免疫分析センサ



機械学習を利用した  
残留塩素センサ



静電容量式  
圧力センサ



超薄型調光フィルム

この他にもたくさんの研究があります！  
詳しい研究内容については黄研究室HPに！



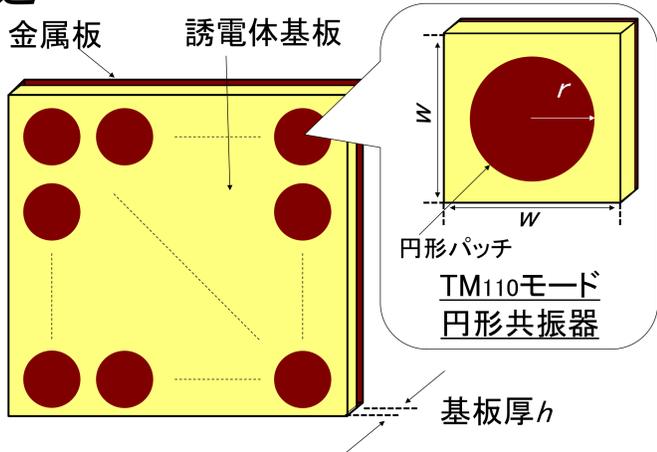
# 高周波ノイズの低減に関する研究開発

理工学部電気電子工学科 須賀良介

パッチ配列電波吸収体の任意の偏波及び入射角度におけるSパラメータ推定  
**4つの入射角度**におけるSパラメータを用いた  
**任意の偏波及び入射角度**におけるSパラメータの推定

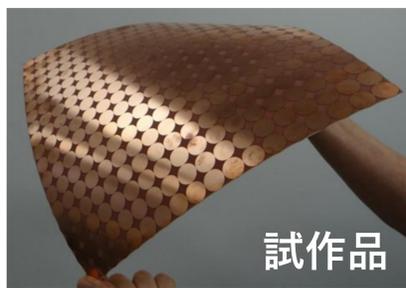
## パッチ配列電波吸収体

構造

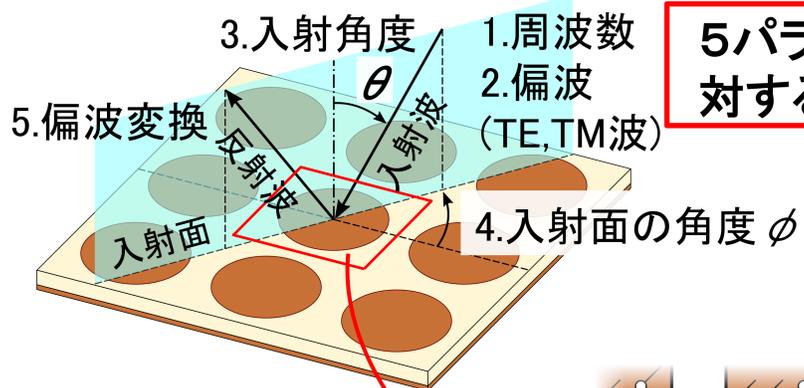


特徴

- ・軽量
- ・簡易構造
- ・フレキシブル



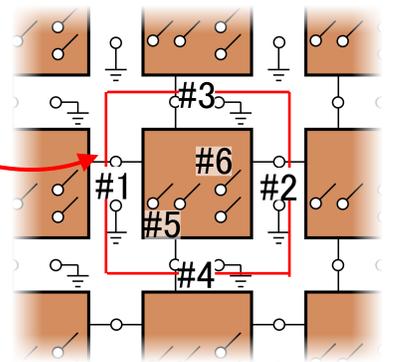
## 電波吸収体の評価パラメータ



5パラメータ全てに  
対する評価は困難

電波吸収体の  
インピーダンス行列を  
回路モデルから導出

Port #1-#4  
隣接パッチとの結合  
Port #5,#6  
自由空間との入出力



## 電波吸収体のSパラメータモデル

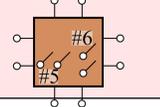
$$\begin{bmatrix} S_{MM} & S_{ME} \\ S_{EM} & S_{EE} \end{bmatrix} = \sqrt{Z'_0} [Z' - Z'_0] [Z' + Z'_0]^{-1} \sqrt{Z'_0}$$

\* $S_{MM}, S_{EE}$ : TM, TE波の反射係数  
 $S_{ME}, S_{EM}$ : 偏波変換係数

自由空間の特性インピーダンス行列

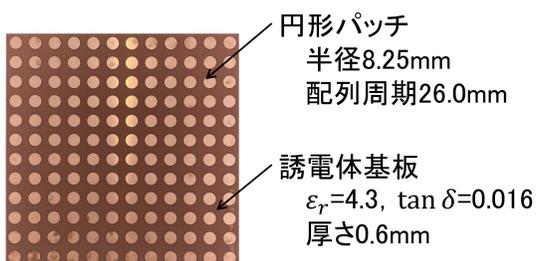
$$\begin{bmatrix} 120\pi\cos\theta & 0 \\ 0 & 120\pi/\cos\theta \end{bmatrix}$$

電波吸収体のインピーダンス行列( $\theta, \phi$ の関数)



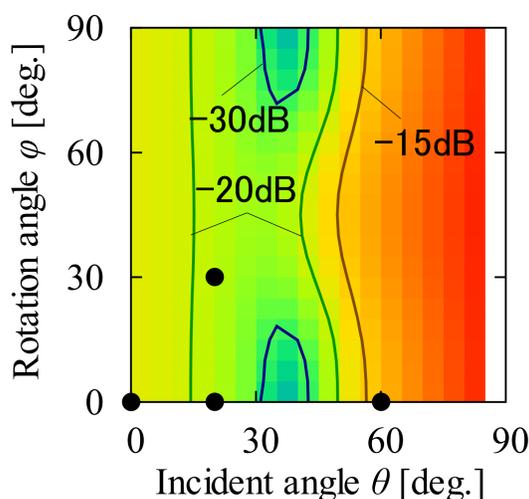
4つの入射角度における  
Sパラメータから算出可能

## $S_{EE}$ の推定



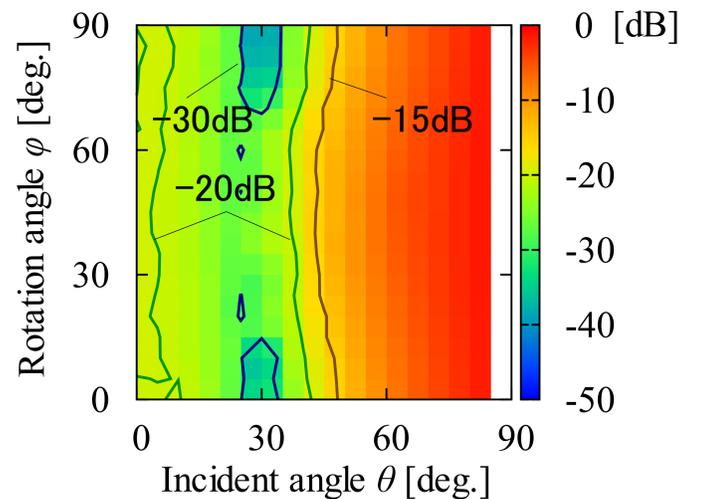
評価する電波吸収体

動作周波数: 5GHz  
 偏波: TE波  
 整合角度:  $\theta = 30\text{deg.}$



提案手法による推定  
(5.10GHz)

4条件(●)における測定結果から  
全ての $\theta, \phi$ および偏波依存性を推定可能



電磁界解析による全条件解析  
(5.06GHz)

全 $\theta, \phi$ の組合せ(306 points)を解析

# 高速3D造形のマルチモーダルセンシングと ロボットモーションコントロール

理工学部 機械創造工学科 知技能ロボティクス研究室 田崎良佑  
石川慎一(博士後期課程)

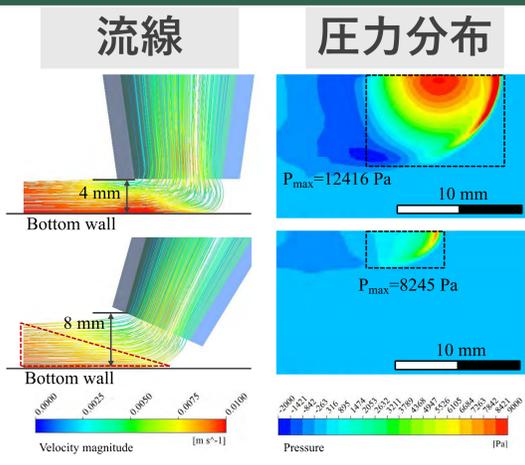
## 1. はじめに



鋳造やパテ塗りなどの液体材料を塗布する生産工程は、熟練技能者の高度なスキルによって実現されている

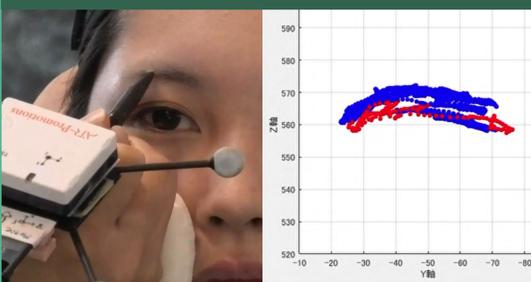
本研究ではマルチモーダルセンシング技術を応用したロボットモーションの制御によって、液体材料を扱う精密加工システムの高度な自動化技術を達成する

### CFDシミュレーション



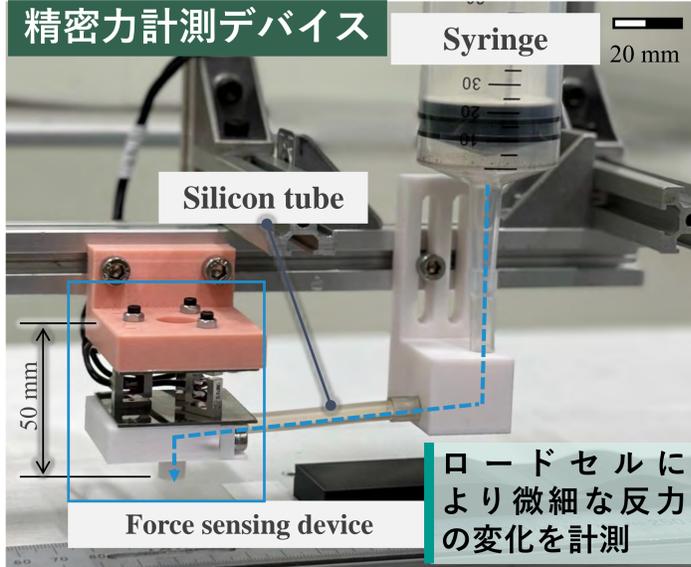
精密な計算流体力学解析により、流動や圧力変動の挙動を観察し、ノズルの運動や材料特性が造形プロセスに与える影響を解明する

### 熟練技能者の動作解析



3Dモーションキャプチャや、力覚センサデバイスを用いて、技能者の経験・感覚で成り立つ巧みな手技動作を数値化する

## 2. 3D造形プロセス中の精密力計測

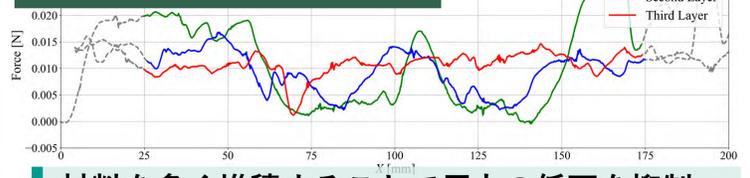


ロードセルにより微細な反力の変化を計測

### 可変ノズルの送り速度による平滑化制御



### 積層動作中の反力応答



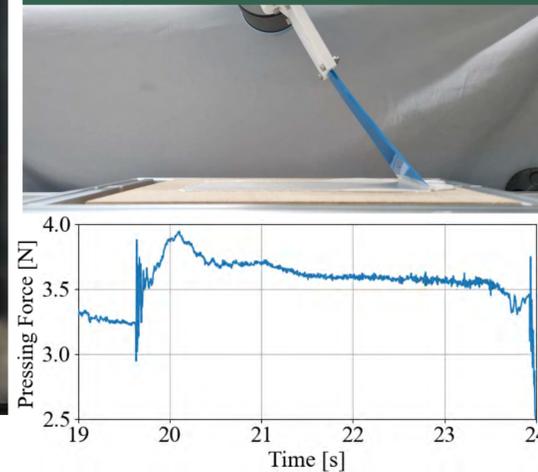
## 3. パテ塗り工程の自動化に向けた技能解析

### 技能者の動作計測

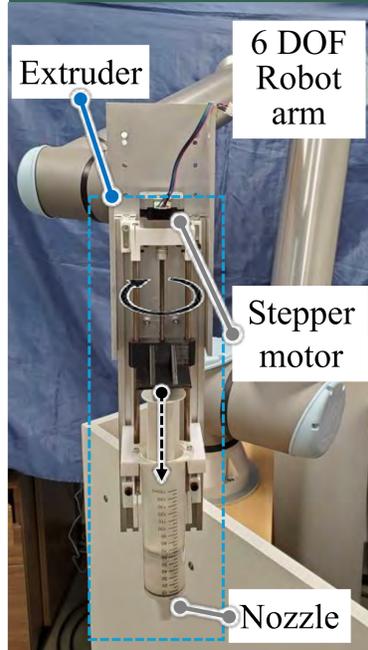


曲げセンサにより押付けに伴うハケの変形を計測

### ロボットによる塗布動作制御

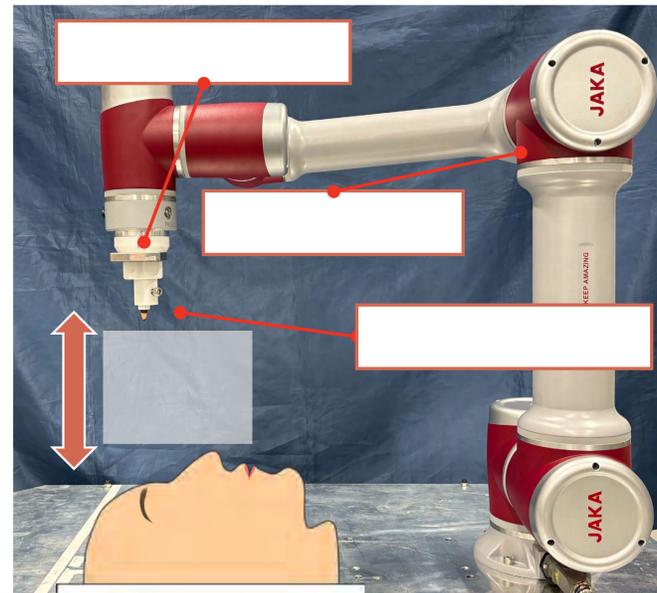


### 材料供給システム

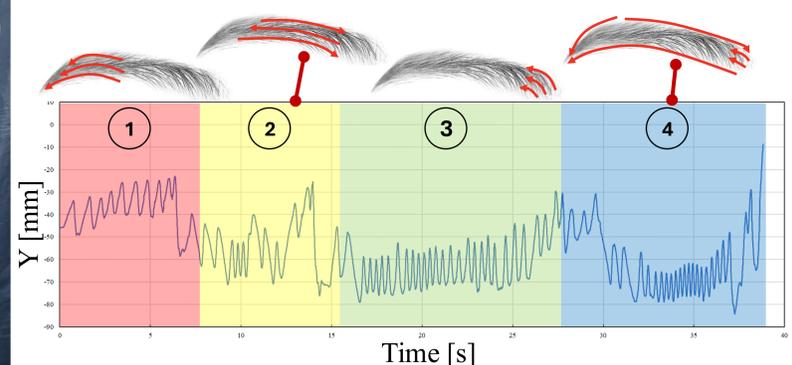


- 画像処理と力計測により技能者の作業手順と力加減を解析
- ロボットにより押付け力を伴う材料の塗布動作を再現
- 材料供給システムと統合した一連作業の自動化を目指す

## 4. メイクアップ工程における技能者の塗布動作解析



### 熟練技能者の動作工程



- 計測情報を基に動作工程を4つに分類
- 円弧近似を用いて動作軌跡を生成し、押付け力制御により柔軟面に眉を描く

## 5. まとめと今後の展望

- モーションキャプチャや数値計算により技能者の動作や流体の挙動を解析
- 繊細な感覚に基づく液体操り動作をロボットに実装
- 技能者の高精度かつ多様な動作を精密計測とリアルタイム制御により実現