

# 自己組織化エレクトレットと MEMSの集積化技術

立命館大学 理工学部 機械工学科  
大学院理工学研究科 機械システム専攻  
准教授 山根 大輔

2024年2月6日

# 本日の発表内容

## ● 新技術の概要

荷電処理不要で真空蒸着形成可能な自己組織化エレクトレットをMEMSへ集積化するための世界初の半導体プロセス技術

## ● 新技術の特徴

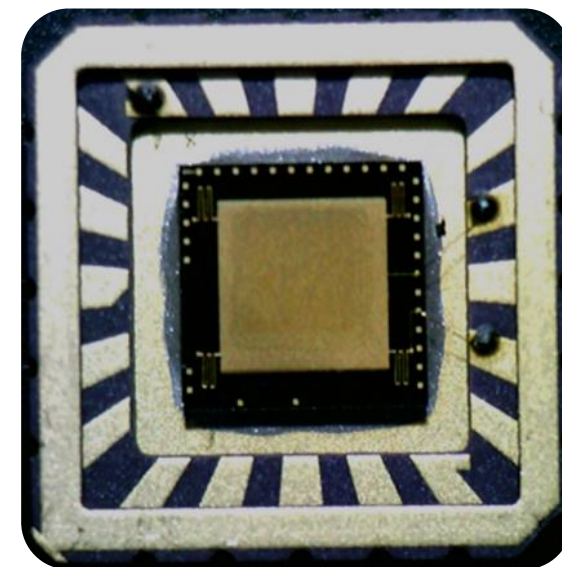
MEMS素子（あるいは集積回路上へ製造したMEMS素子）完成後、エレクトレットをMEMS内に形成可能

## ● 想定用途

MEMSのエナジーハーベスタ、センサ、アクチュエータの性能向上、小型化などに期待

## ● 実用化に向けて

産業用プロセスを用いたデバイス試作などを検討中



# 従来技術とその問題点

従来のエレクトレット素子製造手法では、荷電処理（高温処理、高電圧処理、X線処理などのいずれか／複数組み合わせ）が必要であり、

- **MEMS／LSIとワンチップ化が困難**
- **MEMS／LSIの構造、材料へ制約**
- **非半導体プロセスが必要（量産化に制約）**

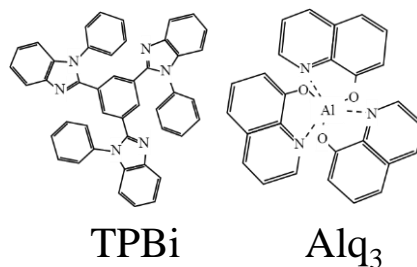
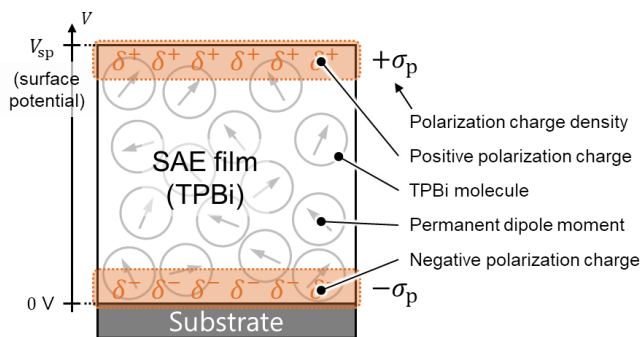
が問題であった。

# 新技術の特徴・従来技術との比較①

- 従来技術の問題点であった「荷電処理」を行わず、エレクトレットを半導体プロセスでMEMS内に形成することに成功した。
- 従来はMEMS/LSIとエレクトレットのワンチップ集積化が困難であったが、本技術で可能となった。
- 本技術の適用により、エレクトレットを用いたMEMS素子のさらなる小型化・量産化が期待される。

# 新技術の特徴・従来技術との比較②

	従来技術	本技術
	<p>エネルギーハーベスタ   回路   センサ</p>	<p>SAE</p>
エレクトレット	CYTOP, SiO <sub>2</sub> , etc.	<b>SAE:</b> Self Assembled Electret 自己組織化エレクトレット[1]
表面電荷密度 (mC/m <sup>2</sup> ), 表面電位 V <sub>e</sub> (V)	CYTOP: ~ 2 mC/m <sup>2</sup> , 約 100~2000V SiO <sub>2</sub> : ~10 mC/m <sup>2</sup> , 約 100~300V	1.7 mC/m <sup>2</sup> , 200 V (現時点のトップデータ) V <sub>e</sub> はSAE膜厚に比例
LSIとモノリシック集積化	不可 or 困難 高電圧 (数百~数千ボルト) / 高温 (数百℃) / X線処理の エレクトレット荷電処理	😊可能 荷電処理不要 (真空蒸着で成膜)
製造プロセス	エレクトレット形成のための専用装置 ・専用プロセスが必要	😊室温、 半導体プロセス

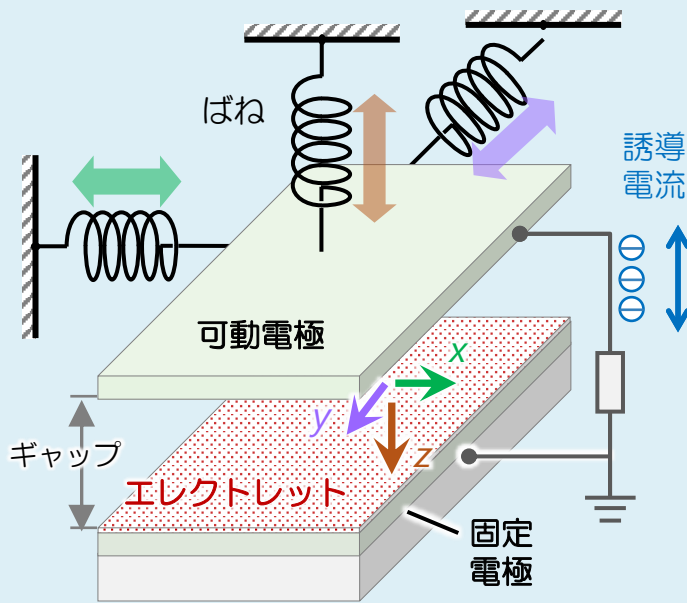


エレクトレット: V<sub>e</sub> ↑ → 発電量 ↑

群馬大学の田中有弥 准教授  
と共同研究中

# 新技術の特徴・従来技術との比較③

## エレクトレット素子 (振動発電素子の例)



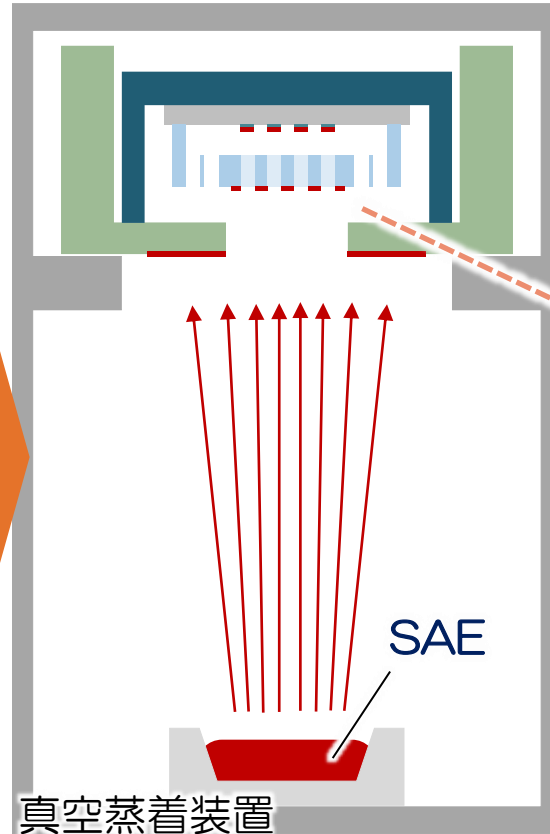
⊗ SAEを利用したMEMS素子の報告例は無かった

可動電極の下に  
SAEを形成できなかった

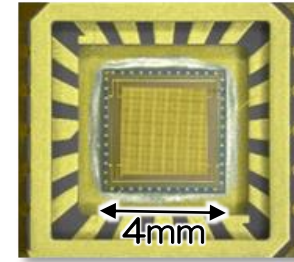
⇒その後のMEMS工程で  
エレクトレット機能が消失

## 本技術

MEMSスルーホールを  
介したSAE膜形成



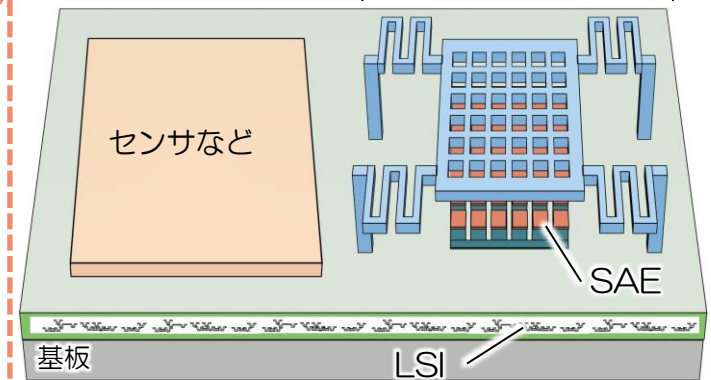
## 発電素子の例



**MEMS内にSAE形成  
後の表面電位、発電  
性能を実験的に  
確認済[2,3]**

D. Yamane et al., Appl. Phys. Lett. **119**, 254102 (2021)  
D. Yamane et al., Sens. Mater. **35**, 1985 (2023)

MEMSセンサ/エネルギー  
ハーベスタ/アクチュエータ

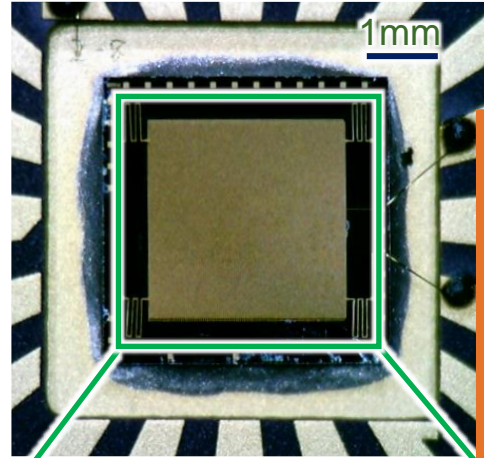
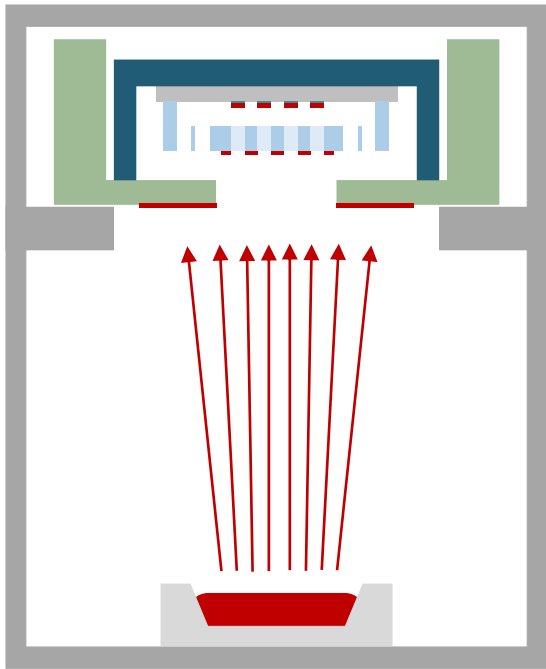
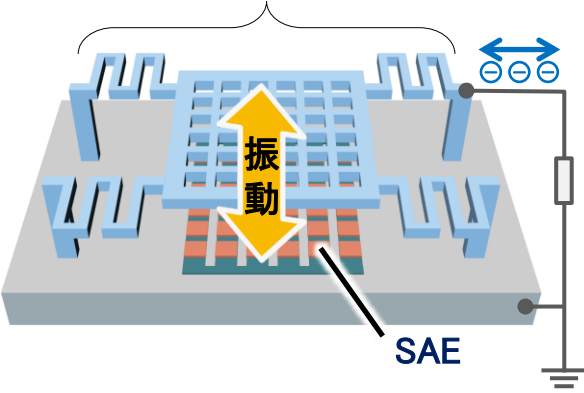


エレクトレット集積型  
MEMS/LSI素子

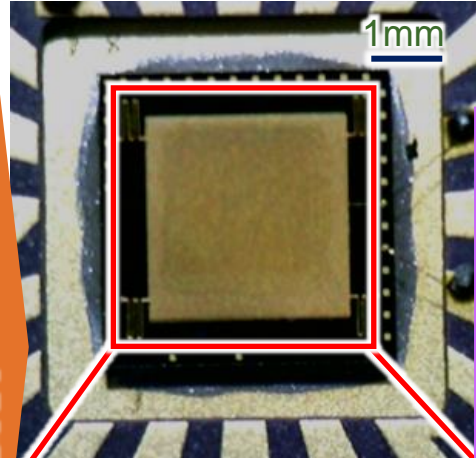
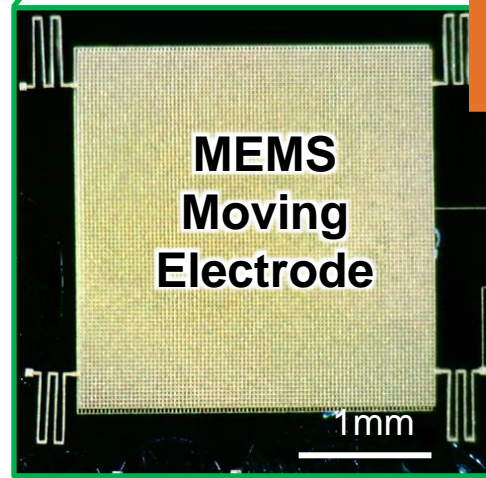
- MEMS/LSI製造後にMEMS内にエレクトレット形成可能
- 荷電処理不要のためMEMS/LSIの設計制約小
- 半導体プロセスのためワンチップ化・量産化に有利

# 新技術の実施例①

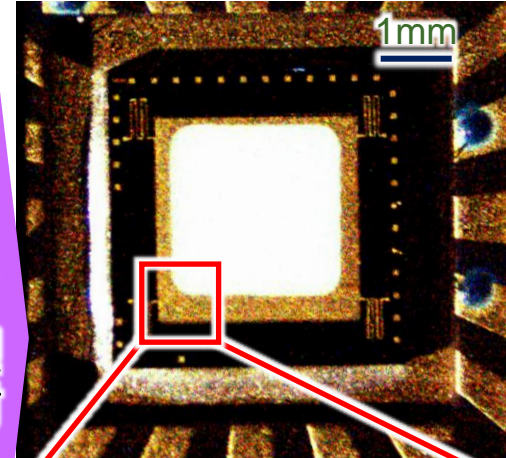
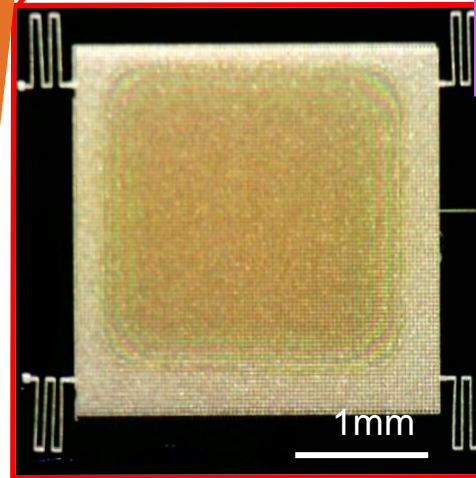
SAE-MEMS振動発電素子



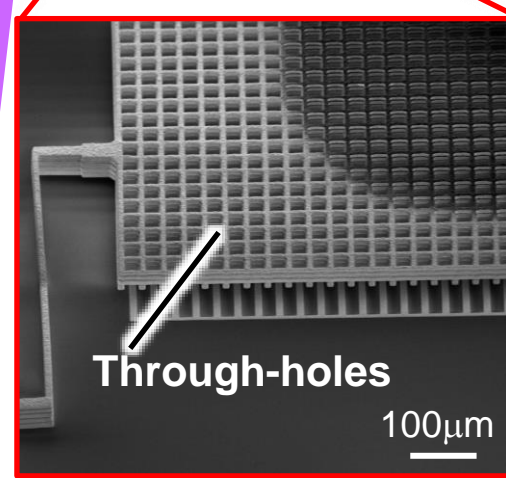
SAE成膜



UV照射

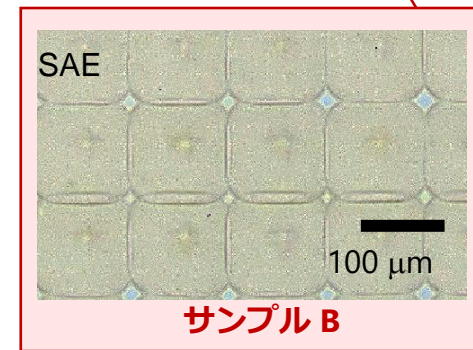
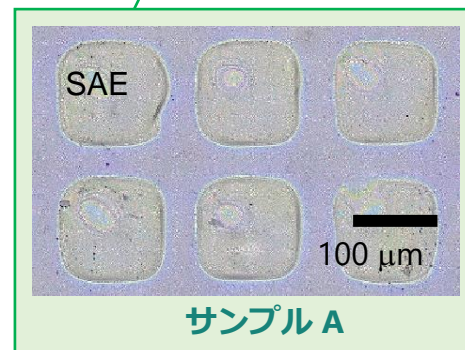
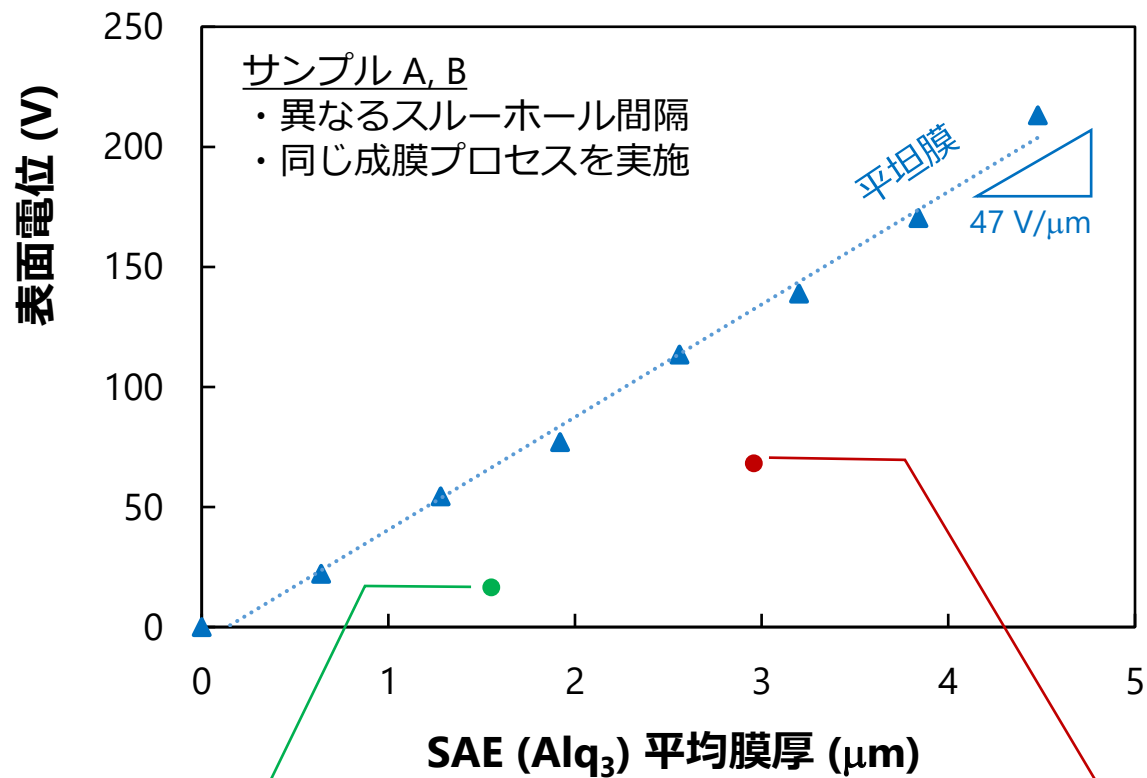
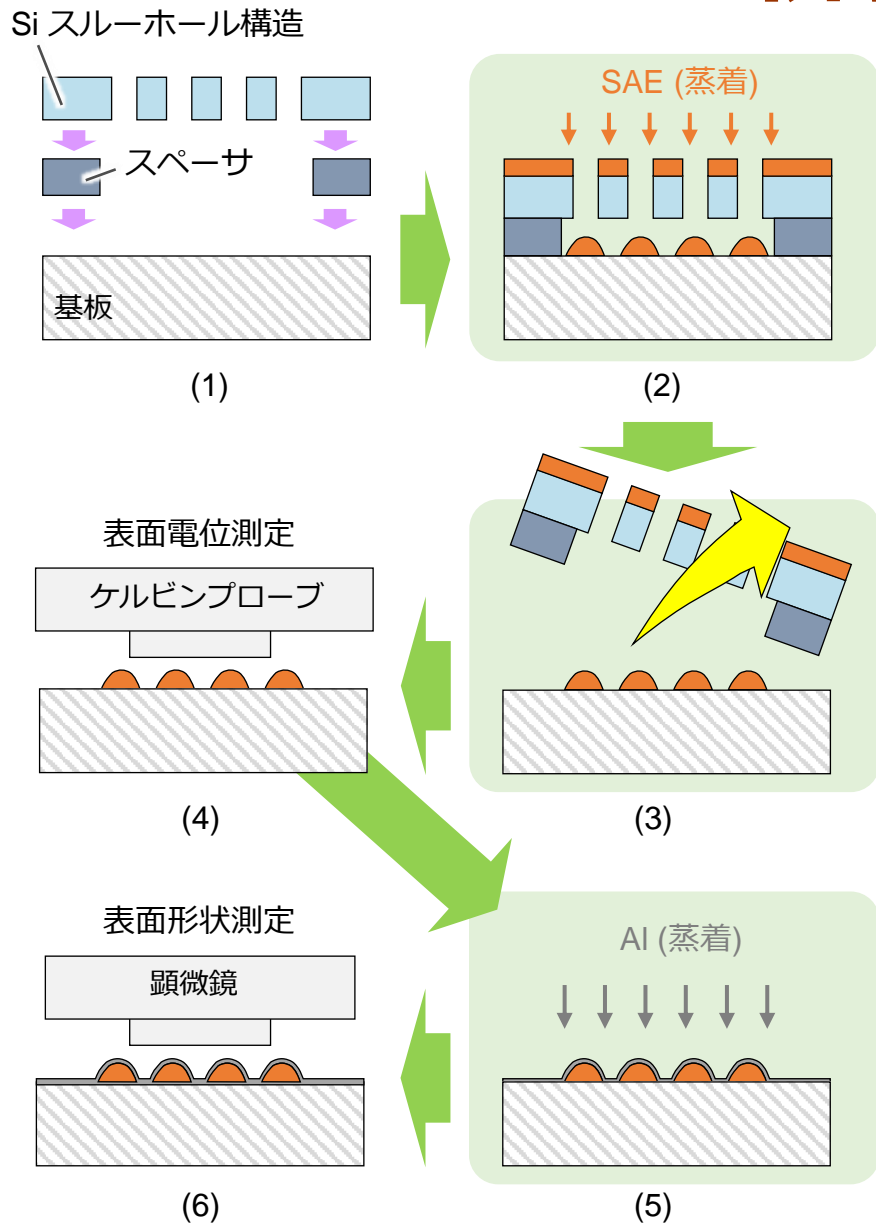


SAEはUV照射で  
蛍光発生



MEMS振動子内にSAE成膜し、SAE-MEMS振動発電を実証

# 新技術の実施例②



## マイクロパターンSAEの形状・表面電位の実測例



# 想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、実際の半導体製造プロセスに適用することで量産化のメリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、MEMS/LSIとエレクトレットをモノリシック集積することで、小型化や高性能化（MEMS精密設計、寄生素子削減が可能なため）の効果が得られると期待される。
- また、達成されたエレクトレットMEMS構造に着目すると、エナジーハーベスタだけでなくセンサやアクチュエータにも適用可能である。

# 実用化に向けた課題

- 現在、SAE-MEMS素子について、MEMS内SAEの表面電位を実験的に確認し、エナジーハーベスタの実証まで達成済み。  
しかし、産業用プロセスへの適用が未到達である。
- 今後、様々なSAE材料について実験データを取得し、産業用プロセスに適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、SAE表面電位の信頼性評価および信頼性向上技術開発も実施する。

## 企業への期待

- 未解決の産業用プロセスへの適用については、産学連携による共同研究・開発により克服できると考えている。
- MEMS製造プロセス（MEMSファウンダリ）を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、半導体関連企業、IoTセンサ用途開発企業、エナジーハーベスタ利用を考えている企業に、本技術の導入を期待したい。

# 企業への貢献、PRポイント

- 本技術は半導体プロセスであるため、エレクトレットMEMS素子の量産化、機能集積化に興味のある企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験（例：信頼性評価）を行うことで、デバイス実装方法なども検討可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等。

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 微細素子の製造方法  
及び微細素子
- 出願番号 : 特願2020-132954
- 出願人 : 学校法人立命館,  
国立大学法人群馬大学
- 発明者 : 山根 大輔、田中 有弥

# 産学連携の経歴

- 2022年10月-2025年3月 実施中  
JST研究成果展開事業  
研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）  
産学共同（育成型）  
代表：立命館大学 山根 大輔  
共同研究者：群馬大学 田中 有弥

# お問い合わせ先

立命館大学

研究部BKCRリサーチオフィス

T E L 077-561-2802

F A X 077-561-2811

e-mail [liaisonb@st.ritsumei.ac.jp](mailto:liaisonb@st.ritsumei.ac.jp)