

ナノ・マイクロスケールにおける 熱計測および利活用技術と材料開発

准教授 廣谷 潤

京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻



1. ナノ・マイクロスケールの熱伝導計測手法

- 熱伝導率計測手法の概要
- サーモリフレクタンス法における低熱伝導率計測精度の改善

2. 熱を使ったリザーバーコンピューティング

- 概要説明と実デバイスへの適応可能性について

3. ナノ材料の電気特性・導電機構の変調

- 開発した原理を応用した高感度湿度センサの開発

1. ナノ・マイクロスケールの熱伝導計測手法

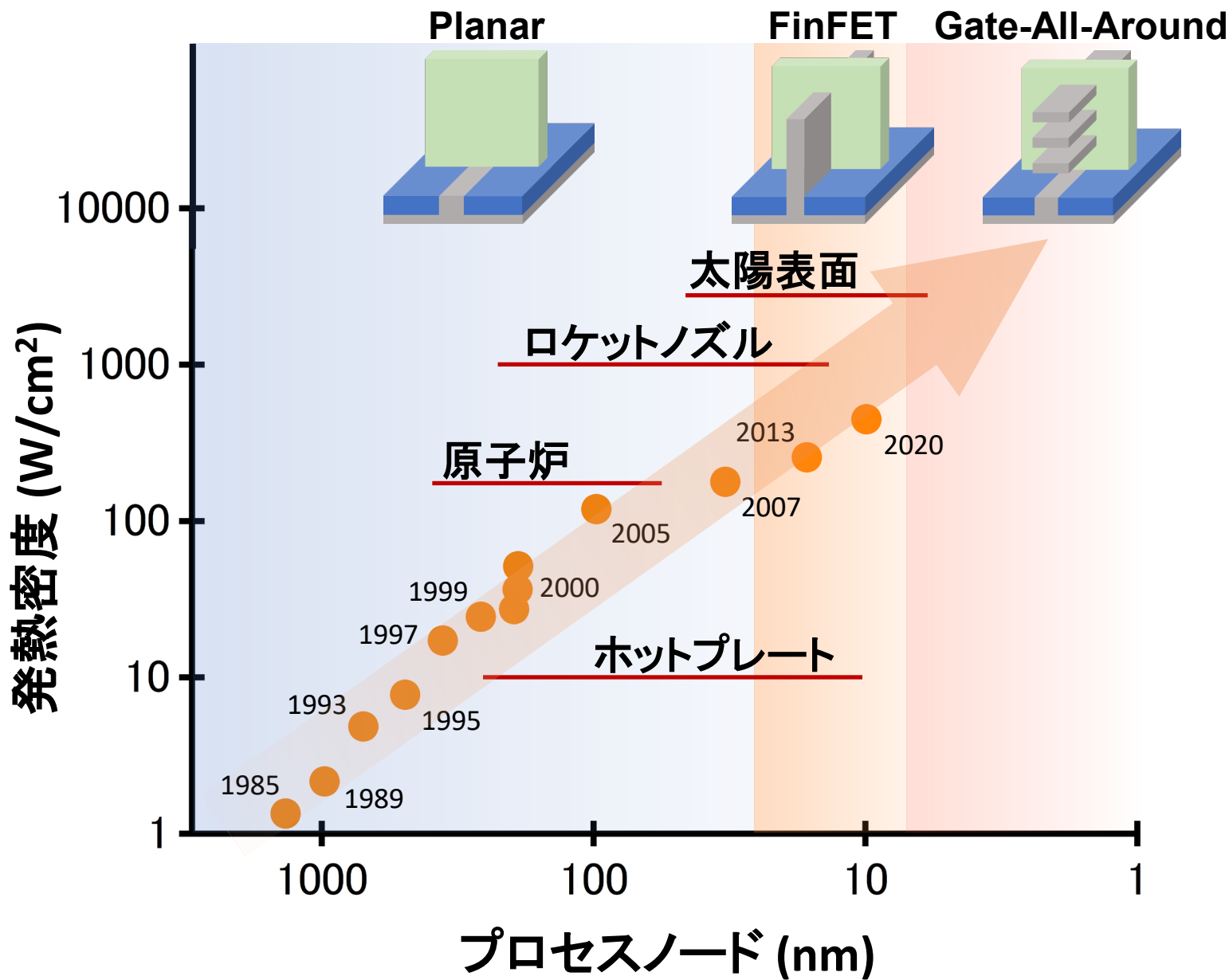
- 熱伝導率計測手法の概要
- サーモリフレクタンス法における低熱伝導率計測精度の改善

2. 熱を使ったリザーバーコンピューティング

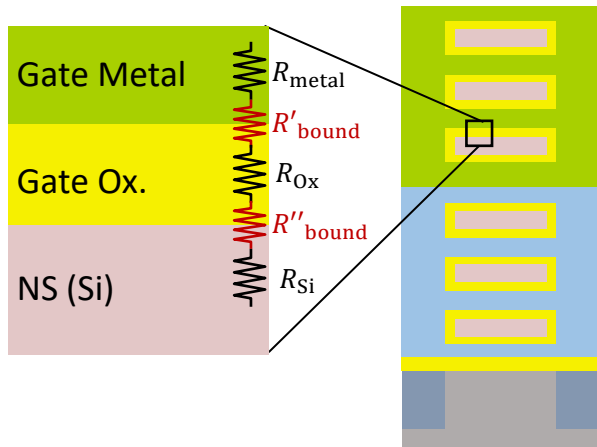
- 概要説明と実デバイスへの適応可能性について

3. ナノ材料の電気特性・導電機構の変調

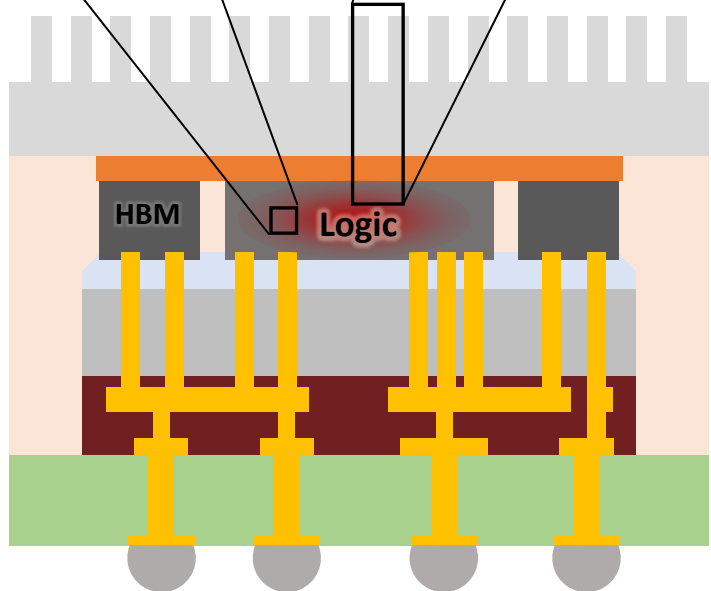
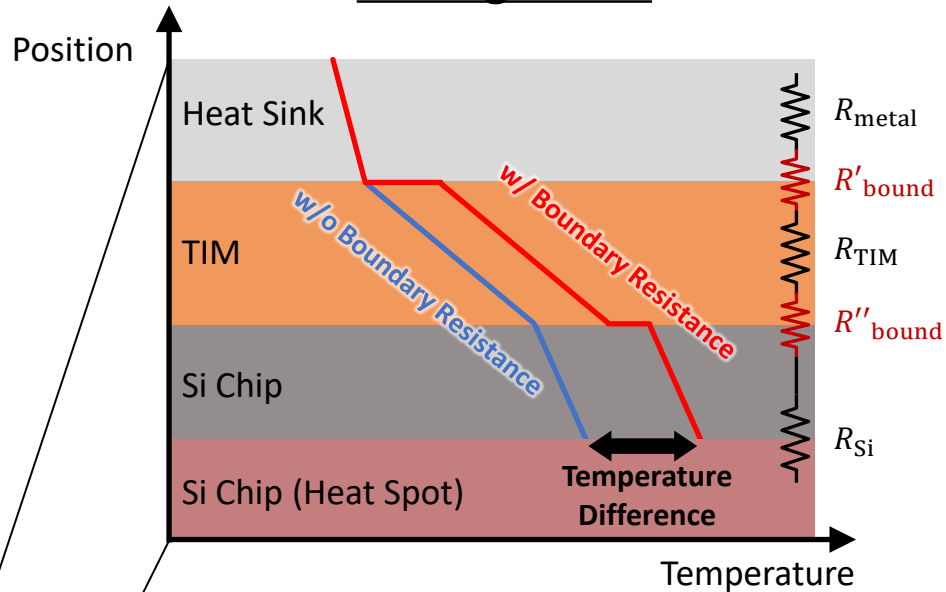
- 開発した原理を応用した高感度湿度センサの開発

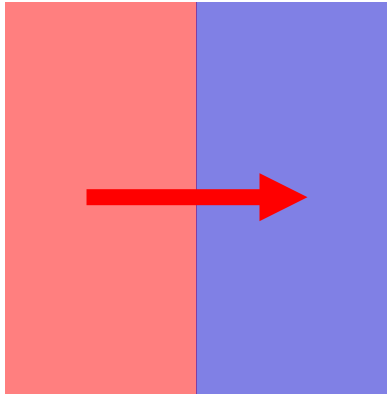


Transistor level



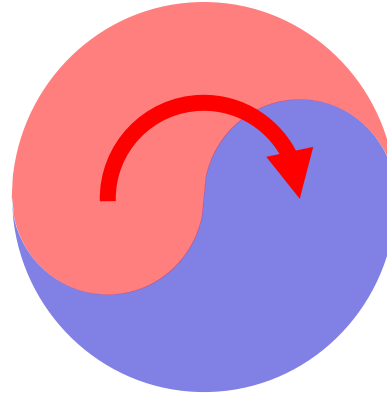
Package level





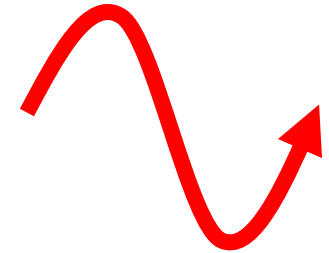
Conduction

伝導



Convection

対流



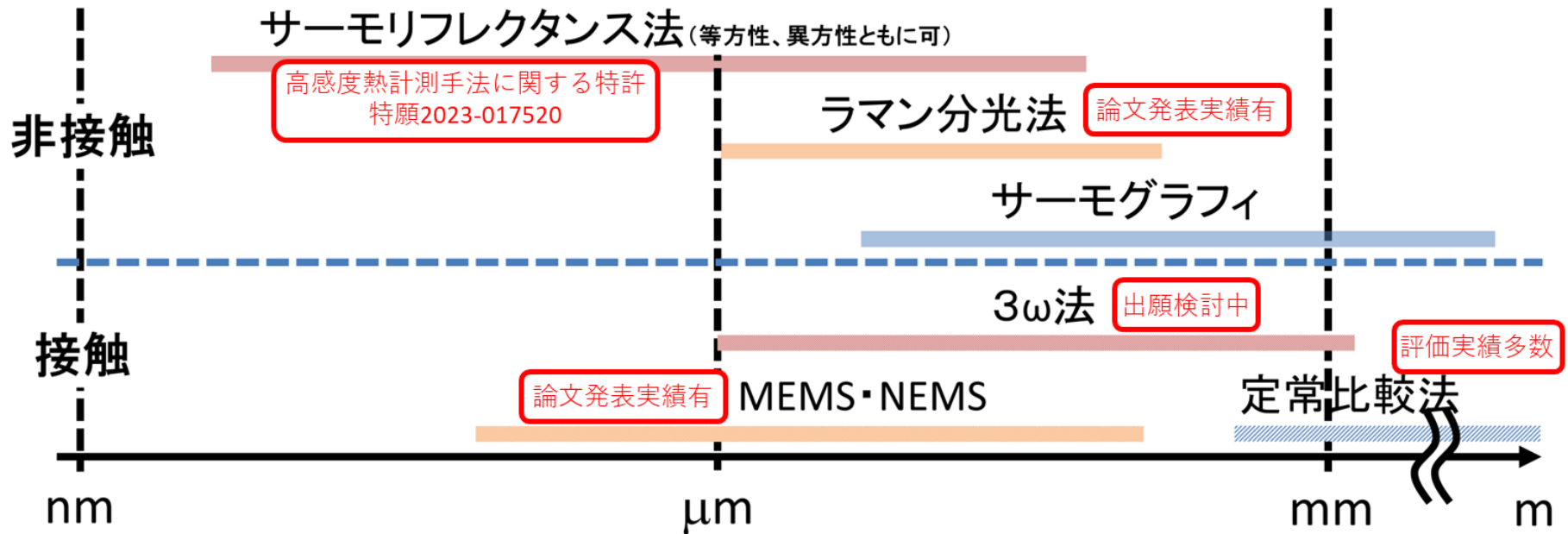
Radiation

放射
(輻射)



今日の主な内容(伝導, 伝導+対流)

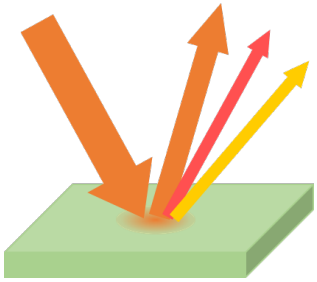
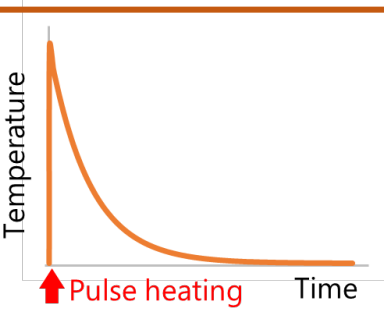
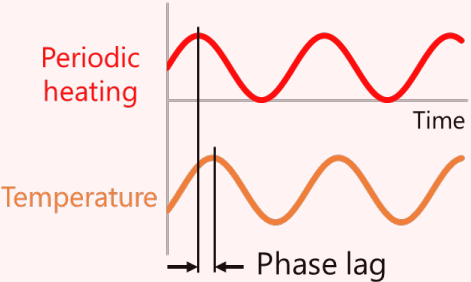
現有する熱伝導計測技術一覧



我々の強み

- ✓ 世の中に現存する熱計測手法のほぼすべての技術・解析スキルを有している
- ✓ 産学連携をすでに複数社と実施。大学(スピントロニクス、バイオ)からの熱解析依頼多数。
- ✓ 熱計測・AI熱解析に関する技術を所有(特願2022-109129, 特願2023-017520)

近くて便利な熱のコンビニエンスストアのような存在

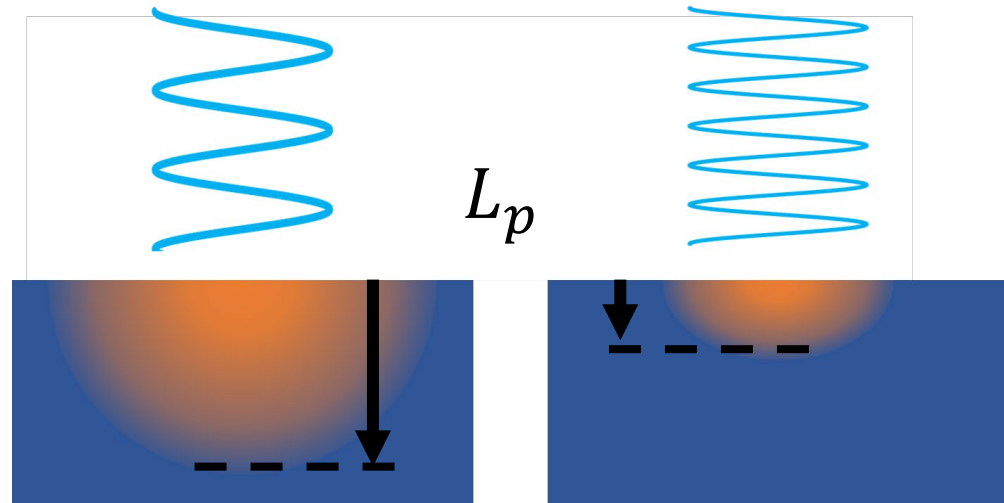
	Raman Thermometry	Time-Domain Thermoreflectance (TDTR)	Frequency-Domain Thermoreflectance (FDTR)
			
Heating	Steady	Pulse	Periodic
Pros	<ul style="list-style-type: none"> • Other information (Crystallinity, Composition, ...) can be obtained • Pre-treatment is not required 	<ul style="list-style-type: none"> • High accuracy • High time resolution 	<ul style="list-style-type: none"> • Simple & Low-cost measurement system • High accuracy • Nanoscale heat transfer phenomena can be observed
Cons	Low accuracy	<ul style="list-style-type: none"> • Complicated & Expensive measurement system • Pre-treatment is required 	Pre-treatment is required

周波数領域サーモリフレクタンス(FDTR)は
コスト、計測精度、ハイスループットなどの多くの点でメリットがある

Heating frequency

Low

High



Thermal penetration depth L_p

Long

Short

$$L_p = \sqrt{\frac{k}{c\pi f}}$$

k : Thermal conductivity [W/(m·K)]

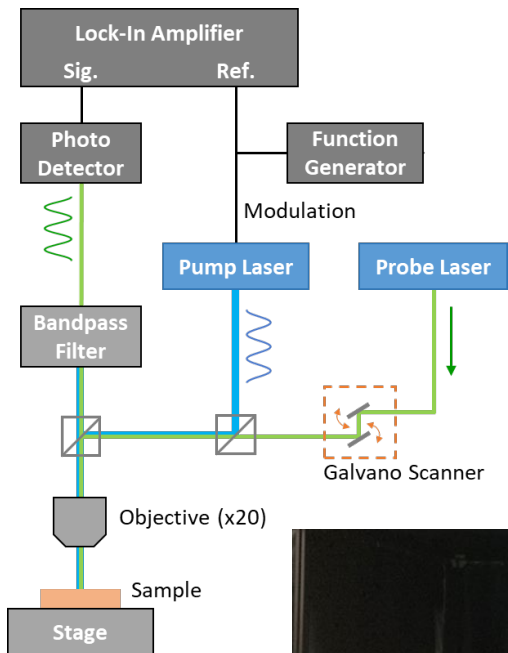
c : Specific heat [J/(m³·K)]

f : Heating frequency [Hz]

Ex. SiO₂
100 kHz → 1.3 μm
100 MHz → 40 nm

熱浸透深さは加熱周波数を変調することで制御可能

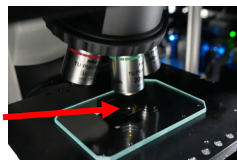
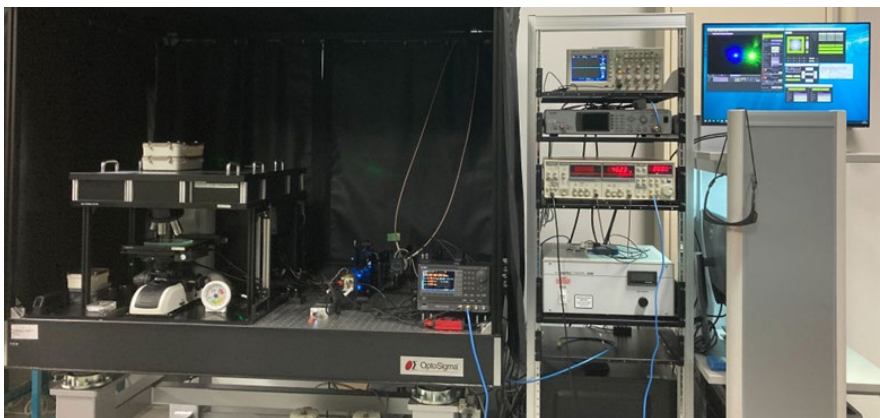
FDTR system



Characteristics

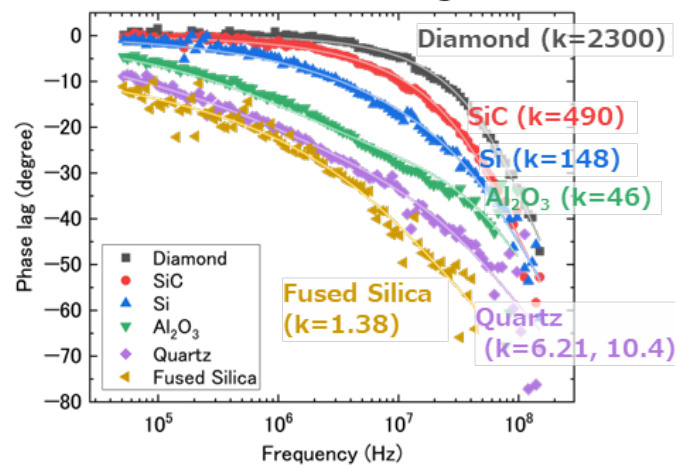
- High spatial resolution with 1.2 μm spot radius
- Movable laser spot without laser spot distortion due to 4f optical system and Galvano scanner
- Wide bandwidth of ~ 150 MHz due to RF noise subtraction and improvement in optical system

Generally, ~ 50 MHz



Measured sample

Measured FDTR signal



k: thermal conductivity
[W/(m·K)]

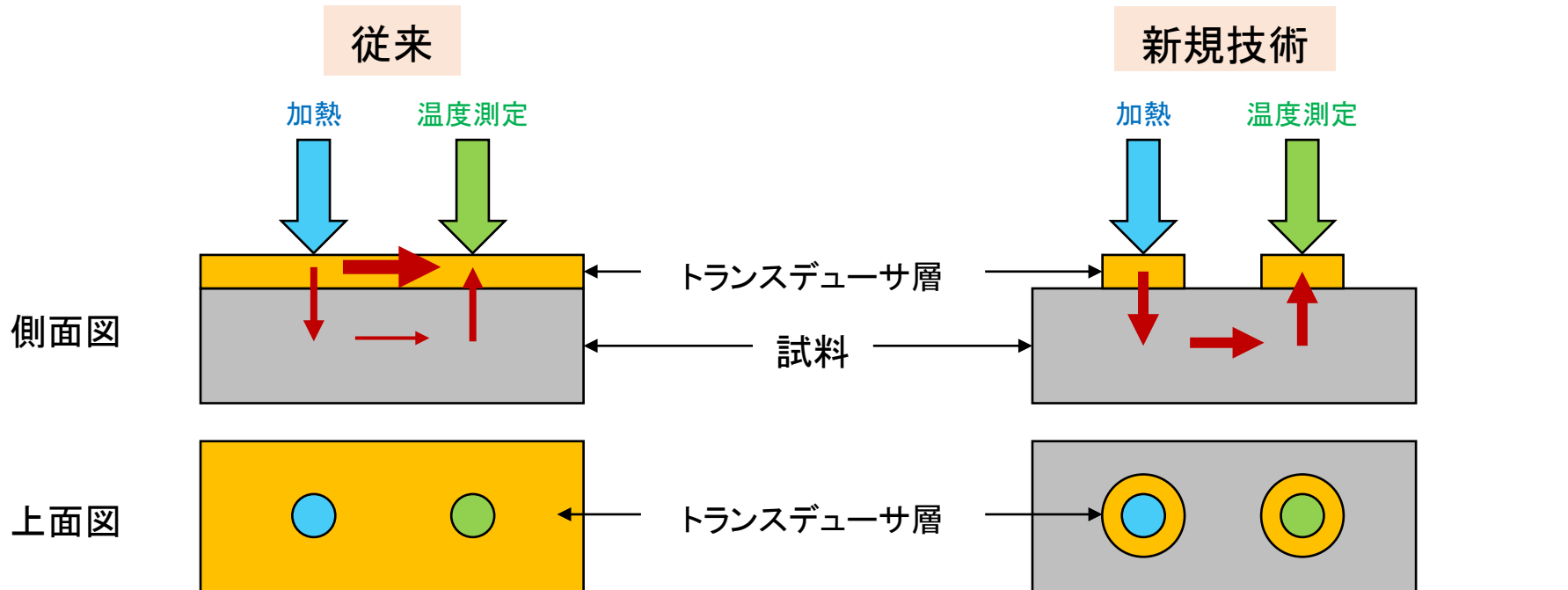
トランスデューサ層をパターニングする



トランスデューサ層内の伝熱の影響を最小限に



- 試料の熱物性値への感度向上
- 低熱伝導率材料の測定が可能に
- 等方性材料の測定結果の信頼性向上



全面にトランスデューサ層が存在

加熱点・測定点のみにトランスデューサ層が存在

1. ナノ・マイクロスケールの熱伝導計測手法

- 熱伝導率計測手法の概要
- サーモリフレクタンス法における低熱伝導率計測精度の改善

2. 熱を使ったリザーバーコンピューティング

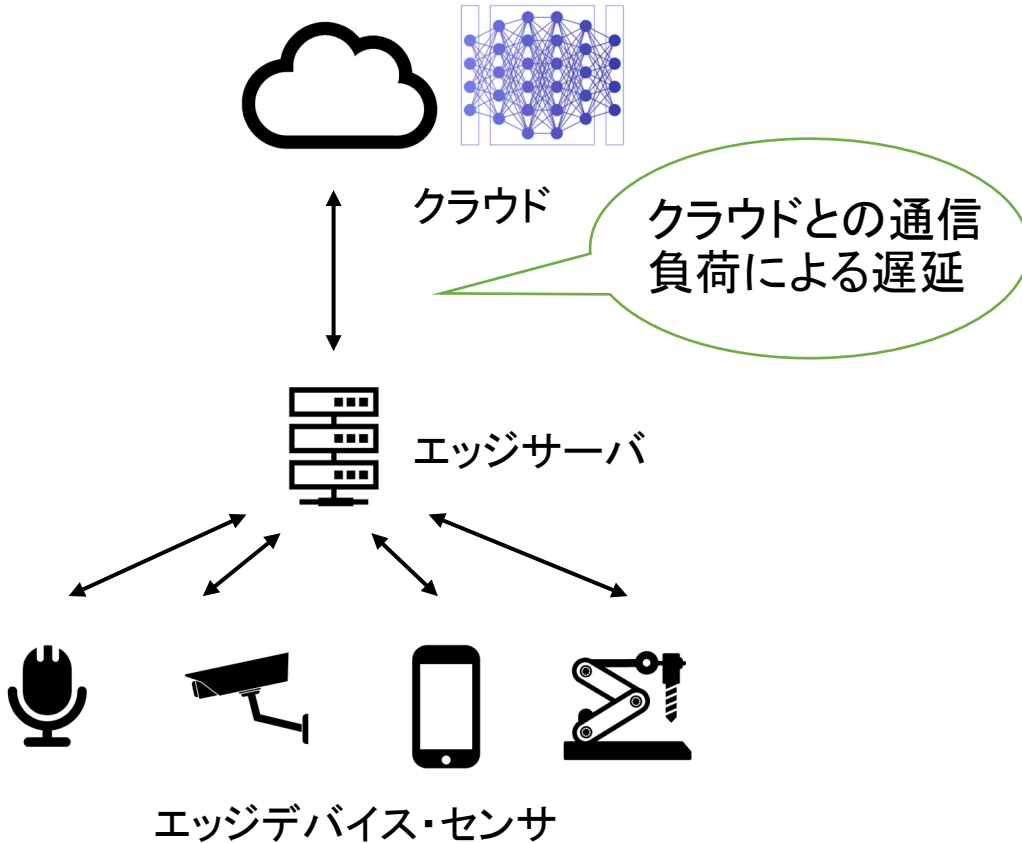
- 概要説明と実デバイスへの適応可能性について

3. ナノ材料の電気特性・導電機構の変調

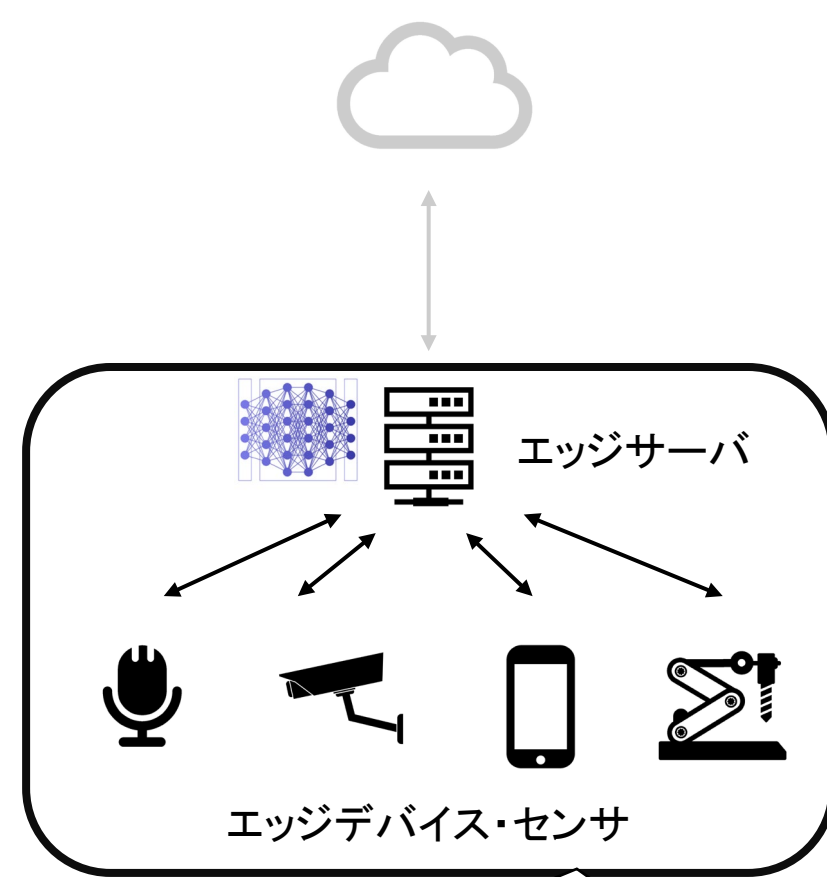
- 開発した原理を応用した高感度湿度センサの開発

IoTの普及に伴い、消費電力の増加や計算負荷が問題に

クラウドコンピューティング

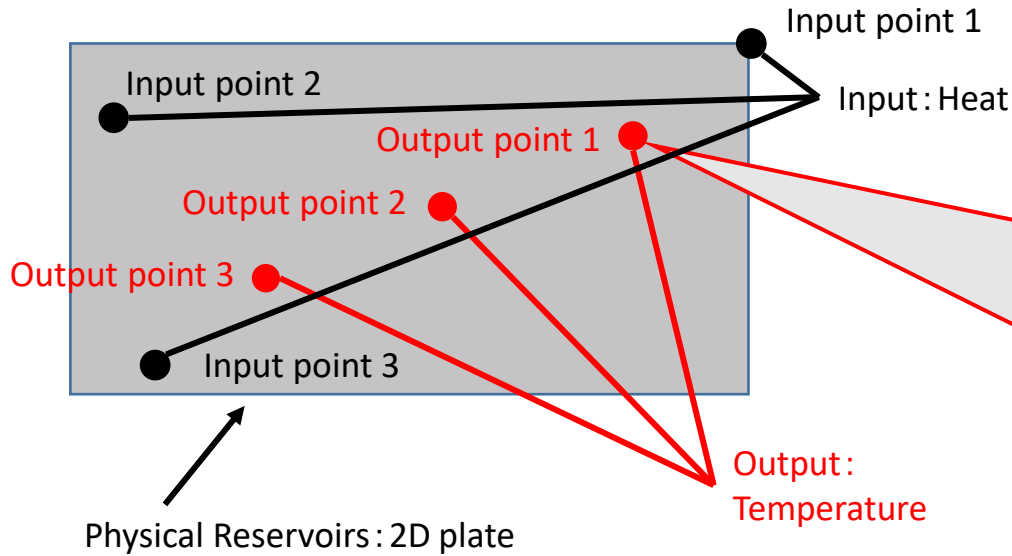


エッジコンピューティング

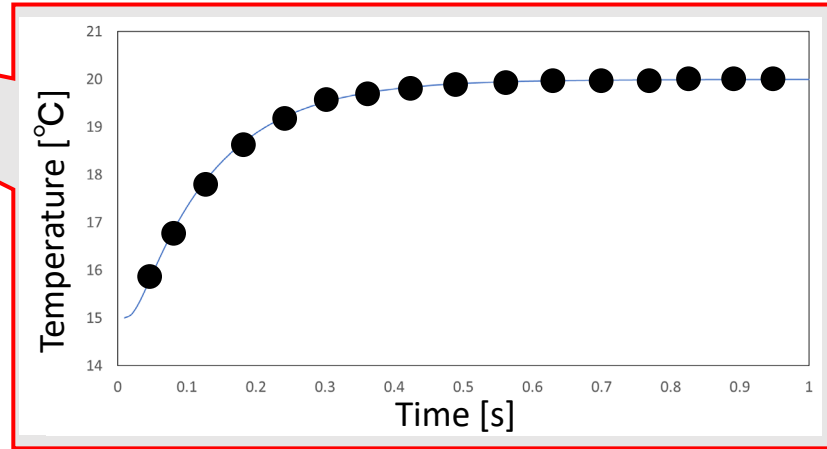


リザーバーコンピューティング(RC)

エッジコンピューティングにより低消費電力かつ、リアルタイムのデータ処理が可能



Discrete values can be obtained by the temperature profile in each output point.



物理リザーバーが満たすべき3つの要素

記憶保持性

✓ 熱が材料を伝わることで記憶は保持される。

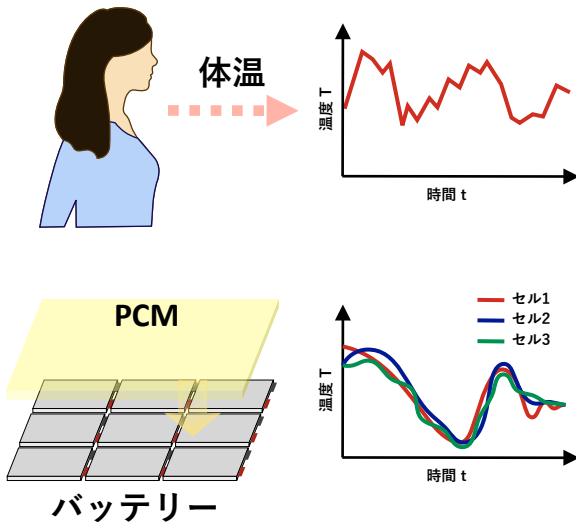
非線形性

✓ 相変化材料、
✓ 熱伝導率の非線形な温度依存性など

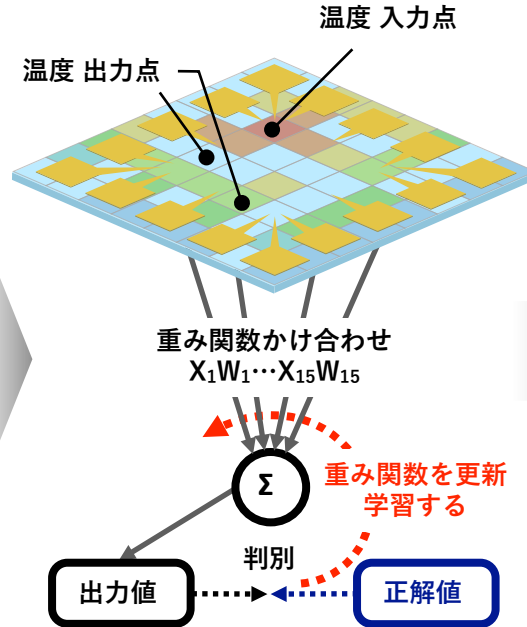
高次元性

✓ 任意の熱入力点、
温度測定点を設定できる

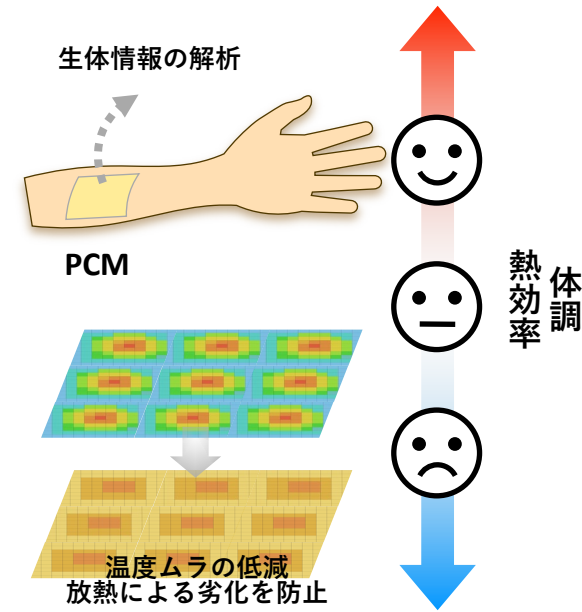
熱・温度情報の取得



リザーバー性能評価



デバイス診断・性能向上



診断結果をフィードバック
人体の健康維持増進やデバイスの性能向上に繋げる

これまでに1次元または2次元の熱伝導シミュレーションにより
物理リザーバーとして機能することまで確認済み(詳細は別途相談)

1. ナノ・マイクロスケールの熱伝導計測手法

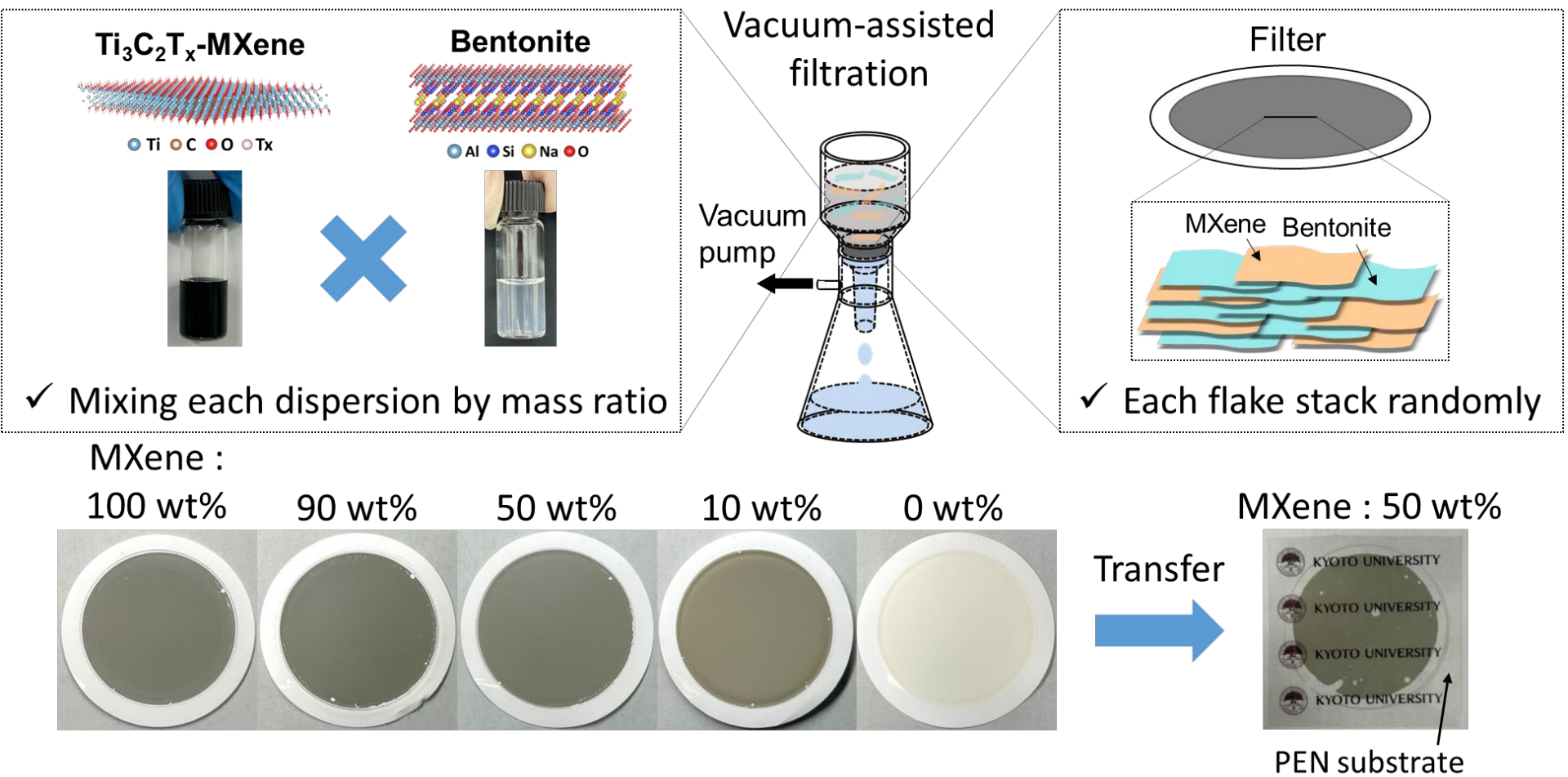
- 熱伝導率計測手法の概要
- サーモリフレクタンス法における低熱伝導率計測精度の改善

2. 熱を使ったリザーバーコンピューティング

- 概要説明と実デバイスへの適応可能性について

3. ナノ材料の電気特性・導電機構の変調

- 開発した原理を応用した高感度湿度センサの開発

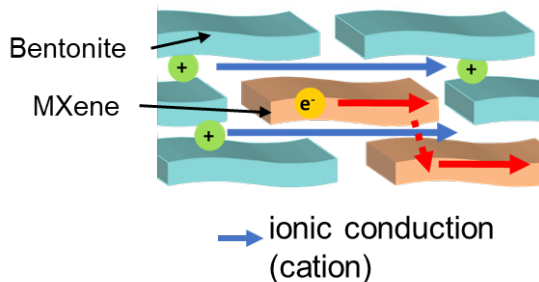


簡単なナノ材料混合薄膜作製プロセスを考案。任意の基板への転写が可能

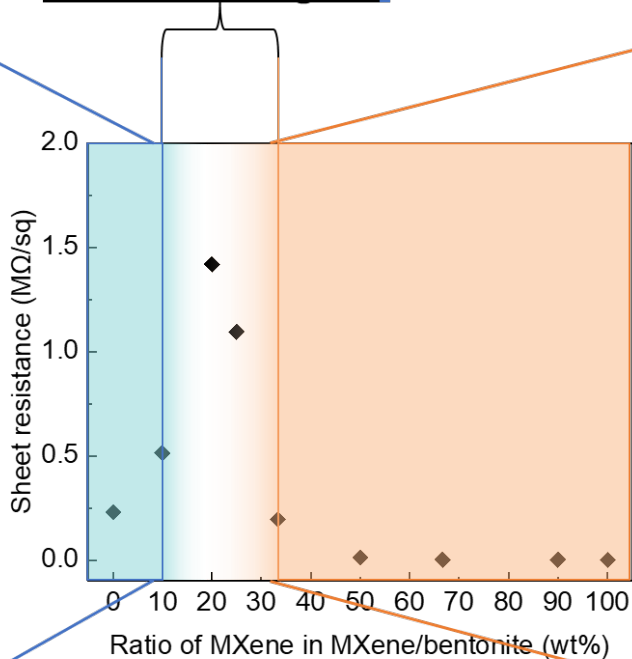
III. Transition region : mixture of **ionic** and **electronic** conduction

I. Bentonite rich

Sheet resistance increases as MXene increases

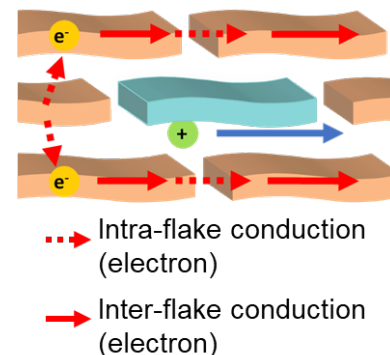


Ionic conduction derived from bentonite is dominant



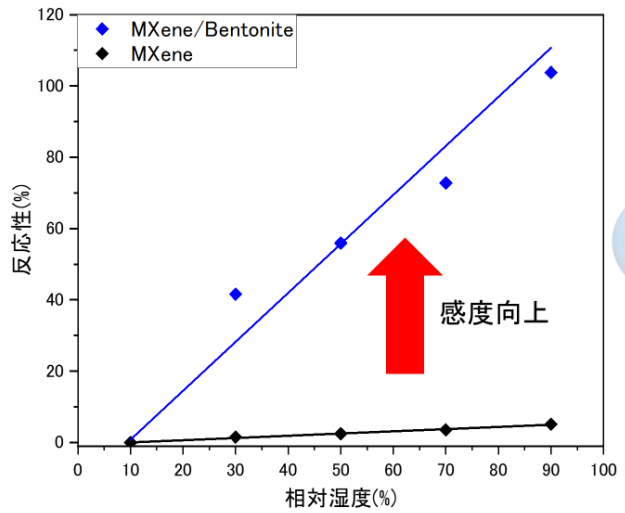
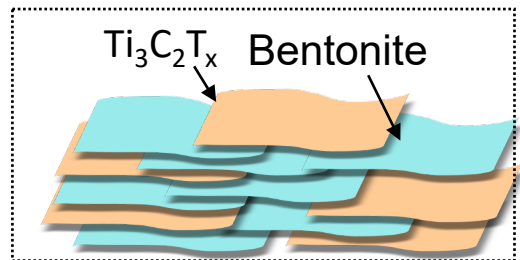
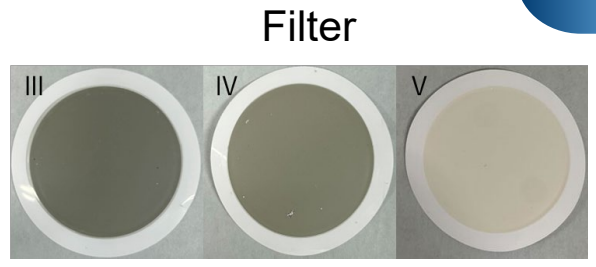
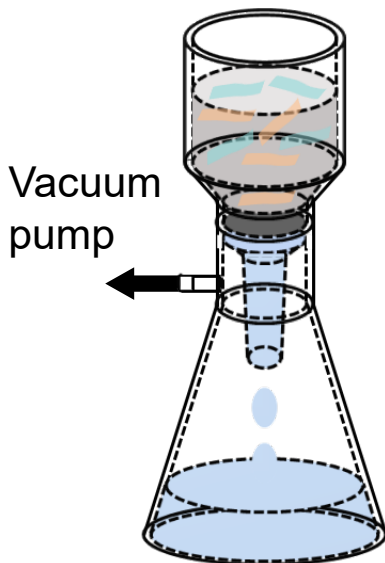
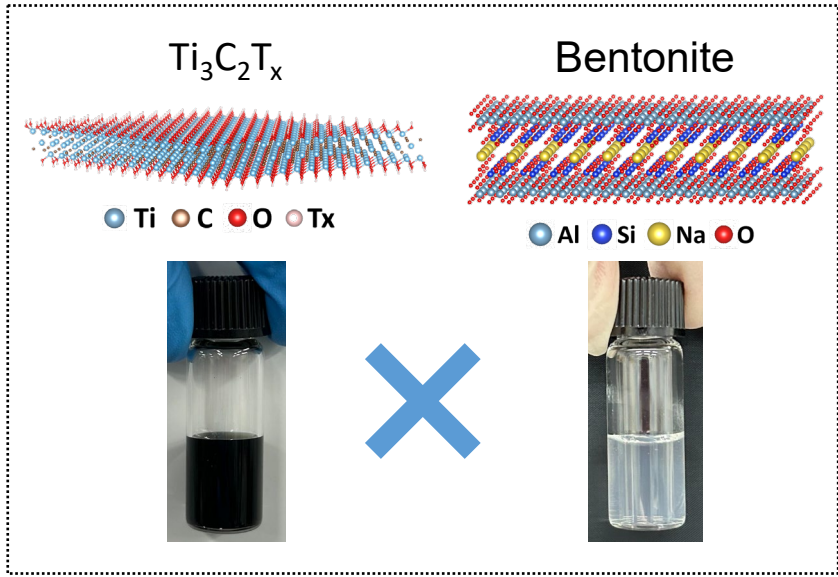
II. MXene rich

Sheet resistance decreases as MXene increases

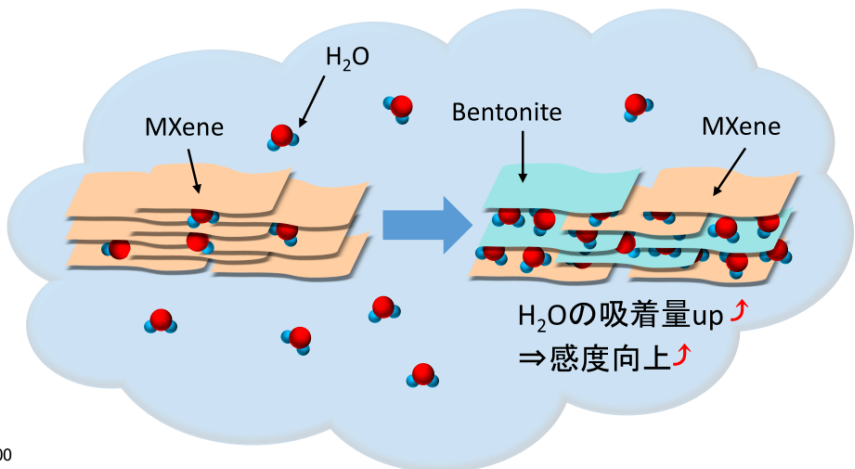


Electronic conduction derived from MXene is dominant

導電機構の異なる2次元ナノ材料を混ぜ合わせることにより、混合比率により導電性・導電機構が異なることを発見した。任意の材料へ応用可能。



$$\text{※反応性}(\%) = \frac{R - R_{10\%}}{R_{10\%}} \times 100$$



2次元材料の組み合わせによる感度の向上を確認

1. ナノ・マイクロスケールの熱伝導計測手法

- 熱伝導率計測手法の概要
- サーモリフレクタンス法における低熱伝導率計測精度の改善

PCT/JP2024/003319 2024年2月1日出願(基礎出願2023年2月8日)「測定試料、熱物性値測定装置、及び、熱物性値測定方法熱測定」

2. 熱を使ったリザバーコンピューティング

- 概要説明と実デバイスへの適応可能性について

特願2022-109129 2022年7月6日出願「情報処理装置、デバイス、コンピュータプログラム及び情報処理方法リザバーコンピューティング」

3. ナノ材料の電気特性・導電機構の変調

- 開発した原理を応用した高感度湿度センサの開発

特願2024-016219 2024年2月6日出願「導電率および導電機構制御手法」

ありがとうございました

本件に関する問い合わせ先

京都大学 成長戦略本部 イノベーション領域

E-mail: ip-eng@saci.kyoto-u.ac.jp