

応答挙動に基づくシングルチャンネル ガスセンシング材料の開発

東北大学 多元物質科学研究所
環境無機材料化学研究分野
教授 殷 澍

2025年7月3日



東北大学多元物質科学研究所

環境無機材料化学研究分野 殷研究室

<https://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/yin/>

TOPページ

Members

Research (～ 2016.3)

Research (2016.4～)

Photo Gallery

OB& OG

Mixed Anion

その他

■■■■Cover Art of Papers■■■■



殷 澍 教授
Prof.
Dr. Shu YIN



長谷川 拓哉 准教授
Assoc. Prof.
Dr. Takuya HASEGAWA



大川 采久 助教
Assist. Prof.
Ayahisa OKAWA



薛 羿貝 助教
Assist. Prof.
Dr. Yibei XUE



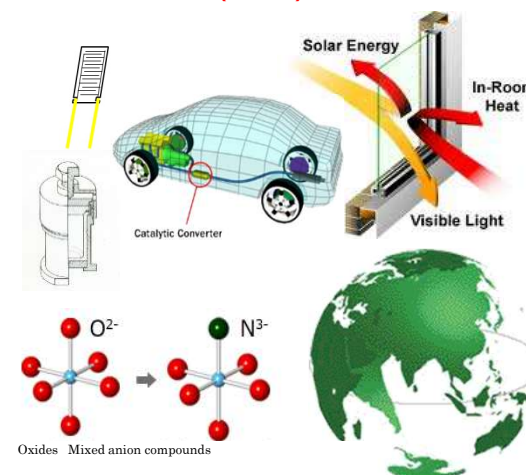
苗 磊 助教
Assist. Prof.
Dr. Lei MIAO

専門分野・キーワード:

環境調和材料／ソフトケミカルプロセス／
セラミックスの形態制御／環境応答機能

目指す方向:

- 環境応答機能に関する研究
- 持続可能な開発目標(SDGs)を意識したエコマテリアル開発



メンバー	教員	5
	秘書	1
	客員研究員	1
	大学院生	
	博士課程後期	6 (5)
	博士課程前期	4 (0)
	学部4年生	2
	合計	19 (5)
		(留学生)

キーワード:

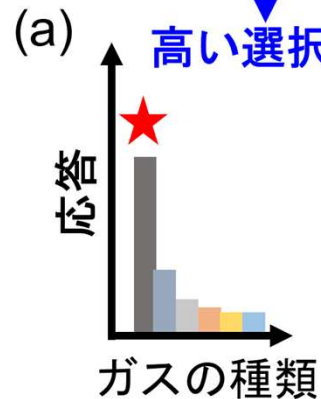
- ①プロセスデザイン
 - 溶液プロセス
 - 水熱反応
 - ソルボサーマル反応 など
- ②環境応答機能性発現
 - ガスセンサー
 - 長波長応答光触媒
 - 紫外線遮蔽・赤外線遮蔽
 - 新規無機パール顔料 など

コンセプト：「応答—挙動選択性」

シングルチャンネルマルチガス識別センサー材料の開発

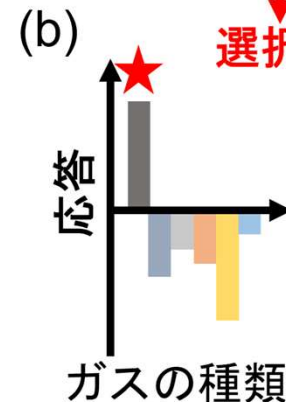
従来：高い応答値

高い選択性



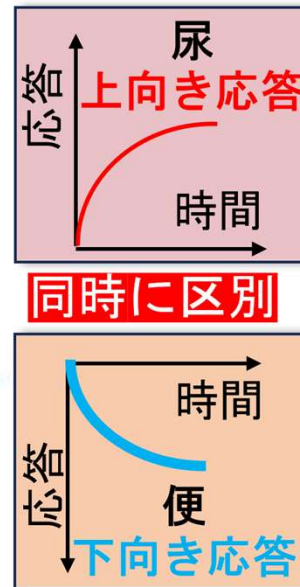
本研究：応答挙動

選択性



(c)

応用



模式図

(a)従来型のガス「応答—強度選択性」
(シングルチャンネル=シングルガス検出)

(b)新しいガス「応答—挙動選択性」の定義
(シングルチャンネル=マルチガス検出)

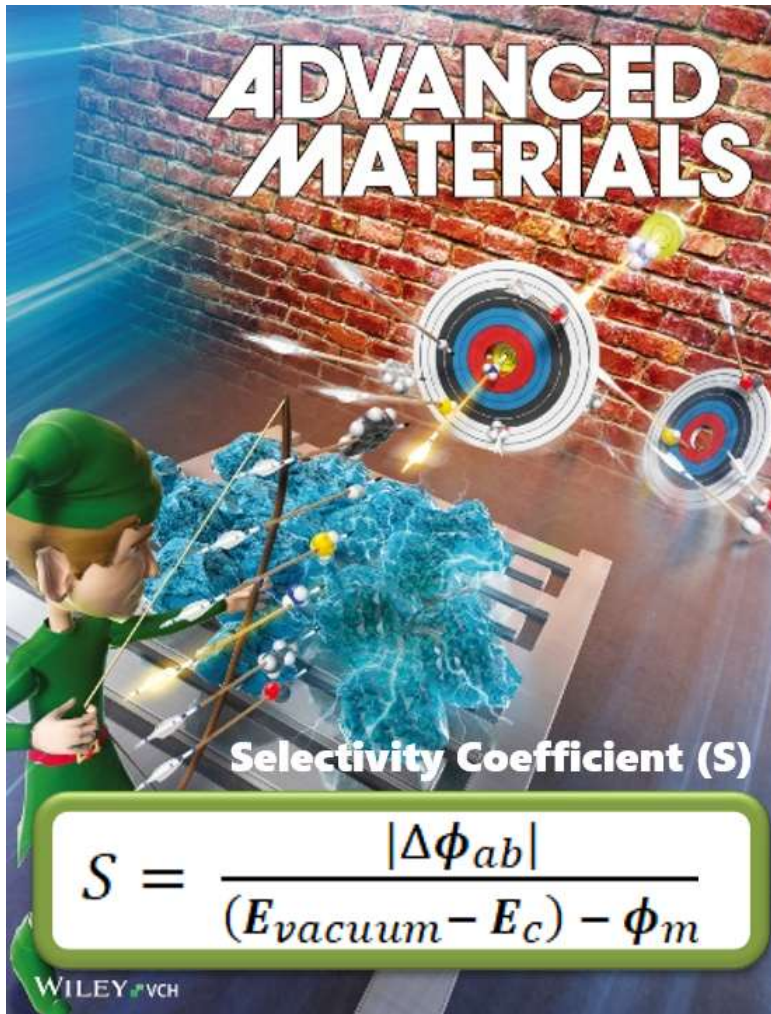
(c)「応答挙動—選択性」の応用実装イメージ
(便と尿を単一材料でシングルチャンネルにより識別できるスマートおむつ等)

新技術の概要

ガスセンシングに基づく新しい「応答—挙動選択性」概念を提唱する。

本技術では、単斜相VO₂(M1)相材料を使用し、元素ドーピングなどによる電子構造の制御を通じて、混合ガス中のアンモニア(NH₃)や硫化水素(H₂S)などの目標ガスを迅速かつ高精度に識別でき、ヘルスケアなどの分野での利用が期待される。

コンセプト：ガス選択性の新しい定義「**応答挙動—選択性**」を提案



ガスセンサー「応答挙動-選択性」イメージ
及び 第一原理計算による選択性予測

●イメージ: センサー材料は、上向きの応答挙動を通じて、まるで黄色矢のように目標ガス(的)を正確に捉えることができる。

●選択性係数(S)の定義:

材料の仕事関数変化:

電子親和エネルギー:

電極の仕事関数:

$$\Delta\phi_{ab}$$

$$\chi_s = (E_{vacuum} - E_c) + E_F^s$$

$$\phi_m$$

● $S > 1$: 「正方向(上向き)応答」

$S < 1$: 「逆方向(下向き)応答」

S.YIN* et al.,

Adv. Mater., **37**, 2413023, (2025). DOI:10.1002/adma.202413023

Adv. Mater., **37**, 202570065, (2025). DOI: 10.1002/adma.202570065 (表紙).

ACS Sensors, **10**, 526-536, (2025). DOI: 10.1021/acssensors.4c03006

3大学発共同プレスリリース（2件）

【2024.12.25】

真逆な応答挙動？ ガス検知選択性の新しい定義を提案

— ヘルスケア分野への展開も視野に、排便と排尿を区別できるおむつも試作 —

Adv. Mater., **37**, 2413023, (2025). DOI:10.1002/adma.202413023
Adv. Mater., **37**, 202570065, (2025). DOI: 10.1002/adma.202570056 (表紙).

【発表のポイント】

- 混合ガス中の特定ガスを、より直感的に検出することを可能とする 革新的な「ガス検知選択性」のコンセプト を提唱し、異常なセンシング 挙動の予測手法を提案・検証しました。
- 「おむつ」のようなウェアラブルヘルスケアデバイスへ応用可能であり、フレキシブルで異物感がなく、室温で作動し、小型化を実現でき、かつ、高感度で異なる 排泄物の同時計測・アラートが実現 できます。

日本経済新聞 (2024.12.25)
日本の研究.com (2024.12.25)
日刊工業新聞 (2025.1.1)
ケムネット東京 (2025.1.7)

【2025. 1.16】

センシング材料のガス応答パターンを 逆転させることに成功

— 元素ドーピングでガスセンシングの挙動を制御できることを発見 —

ACS Sensors, **10**, 526-536, (2025). DOI: 10.1021/acssensors.4c03006

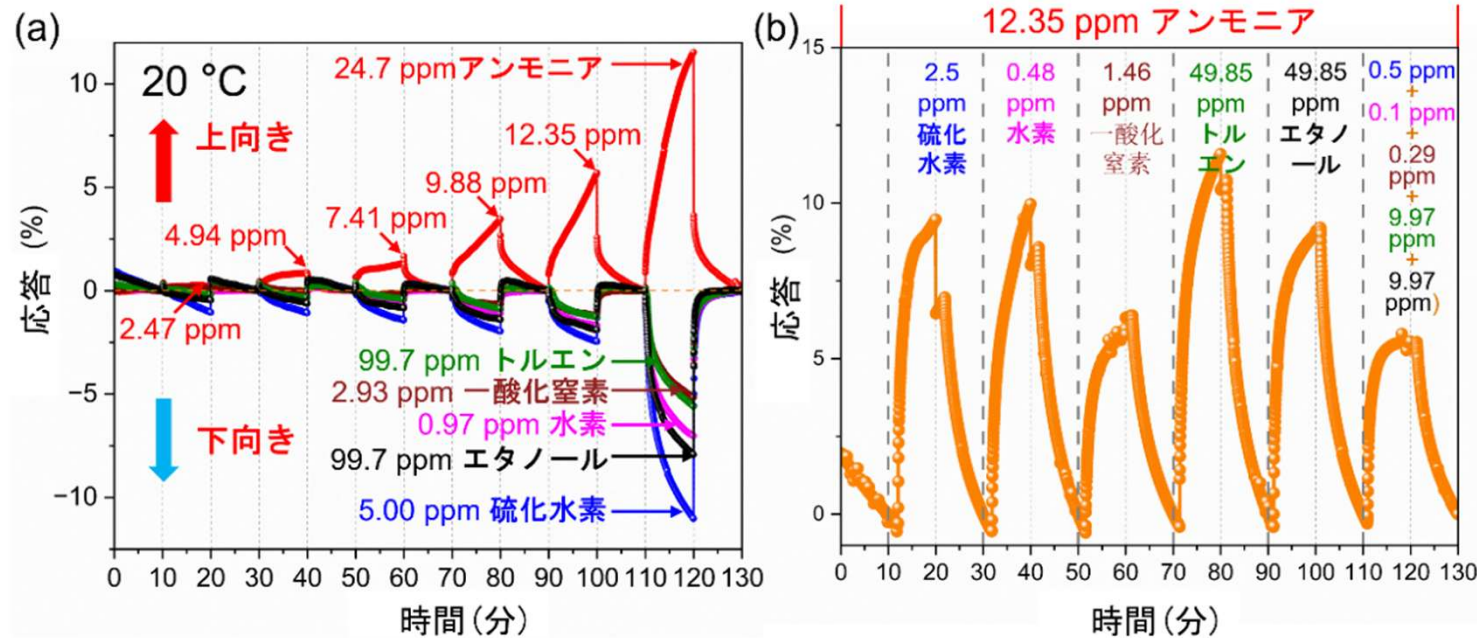
【発表のポイント】

- 理論計算により、センサーに用いる材料がガスに応答するパターン （センシング挙動）を予測 することに成功しました。
- 材料に不純物となる元素を添加すること （元素ドーピング）により、ガス応答パターンを精密制御 し、逆転させることに成功しました。
- ガスセンシング挙動によって「ガス応答選択性」を判定できる 学術コンセプトを提案 し、その 有効性を実証 しました。さまざまな材料におけるさらなるガスセンシング 選択性制御が可能 であることが明らかになりました。

日本経済新聞 (2025.1.16)
日本の研究.com (2025.1.16)

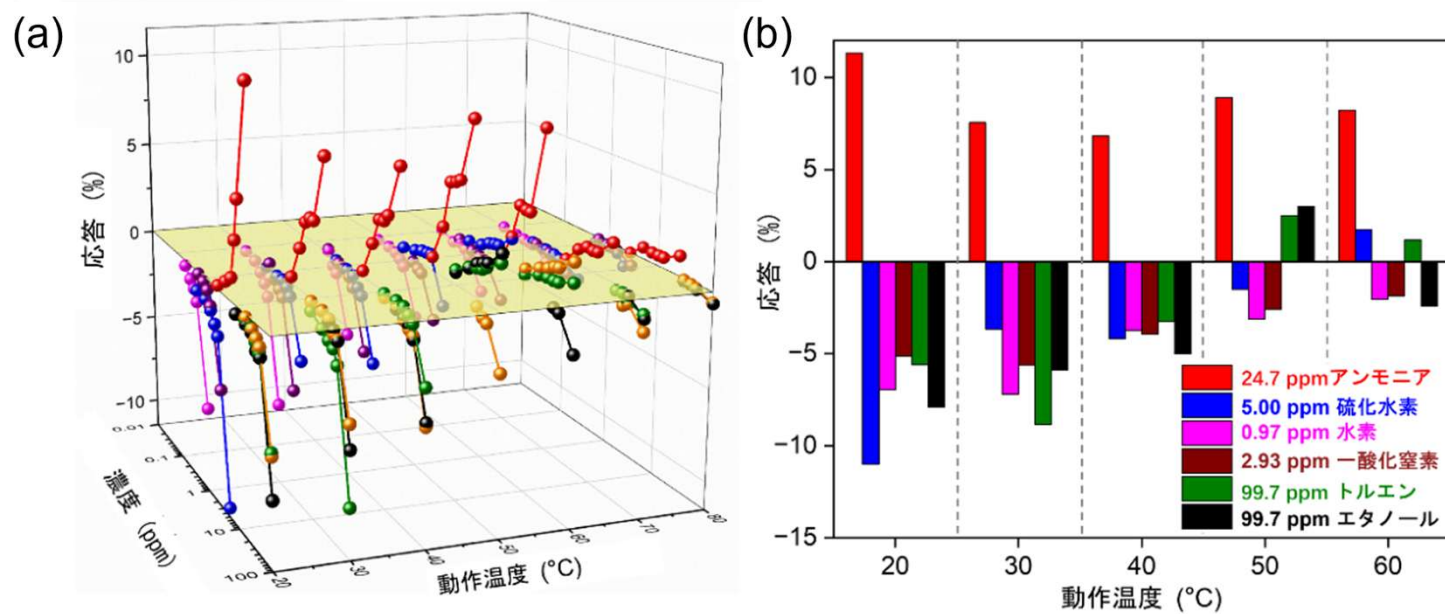
実証データ：

「応答挙動—選択性」によるNH₃の選択的検出→ 単一物質/シングルチャンネルにおけるマルチガスを検出



図、二酸化バナジウムVO₂ (M1) のガス応答特性 (アンモニア(NH₃)は「上向き」応答挙動、他の同種性質を持つガスは「下向き」応答挙動を示した)。(a)20°Cにおけるさまざまなガス応答、(b)混合ガス中でのアンモニア(NH₃)ガスの選択的検出。

実証データ：温度作動温度による「応答—挙動選択性」の制御



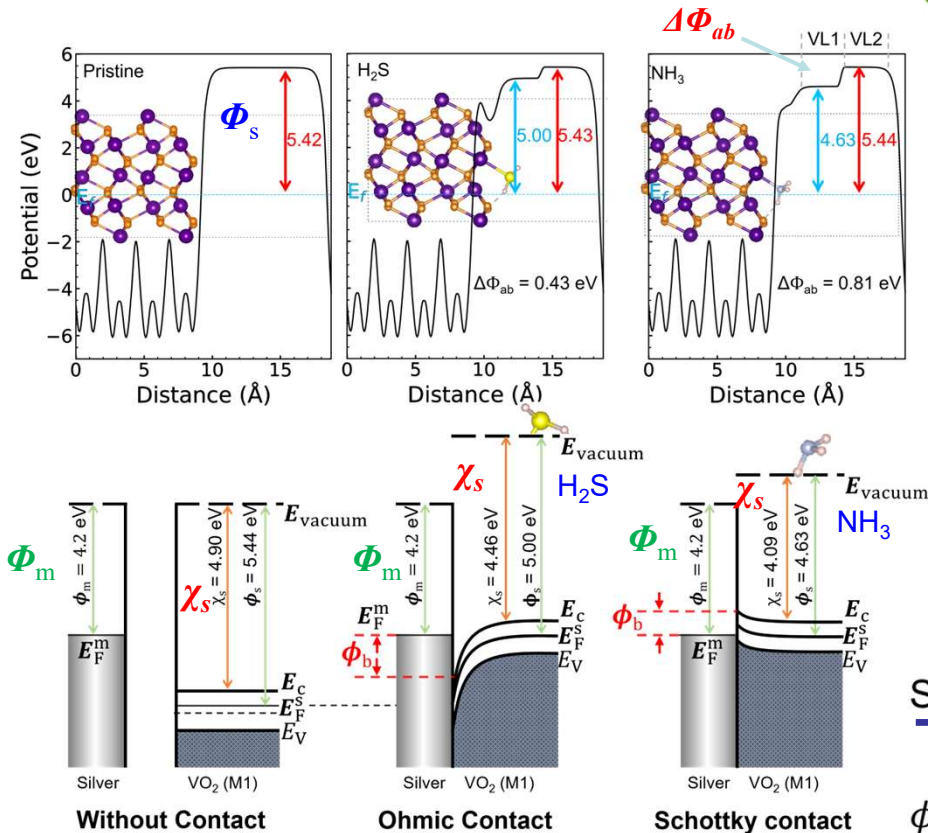
図、二酸化バナジウムVO₂ (M1) のガス応答特性。(a),(b)さまざまなガス応答挙動の動作温度依存性。

「応答—挙動選択性」のメカニズム

「ガス選択性係数」

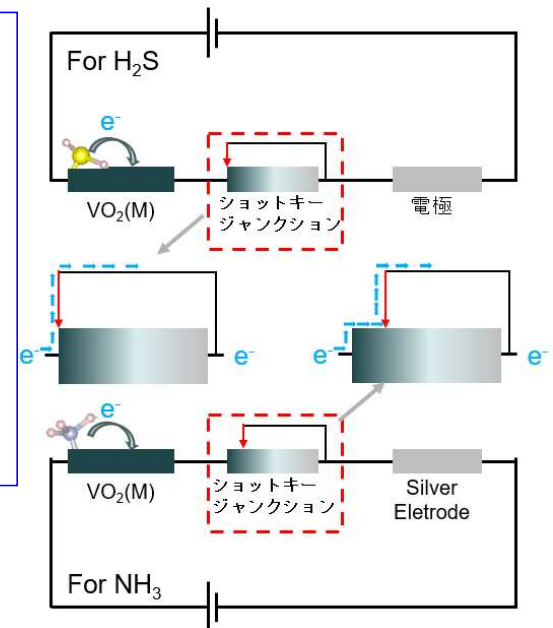
$$S = \frac{|\Delta\phi_{ab}|}{(E_{vacuum} - E_c) - \phi_m} = \frac{|\Delta\phi_{ab}|}{E_F^S - \phi_b}$$

$S > 1$: 「正方向(上向き)応答」
 $S < 1$: 「逆方向(下向き)応答」



ϕ_b ショットキー障壁
 ϕ_m 電極の仕事関数(4.2eV)
 χ_s 半導体の電子親和エネルギー
 $\chi_s = (E_{vacuum} - E_C) + E_F^S$
 ϕ_s 半導体の仕事関数
 $\phi_s (=E_{vacuum})$

E_{vacuum} 真空準位
 E_C 伝導帯エネルギー準位
 E_F^S 半導体フェルミ準位
 E_V 価電子帯エネルギー準位



吸着前後の仕事関数の違い($|\Delta\phi_{ab}|$)

$$\Delta\phi_{ab} = \phi_{s(a)} - \phi_{s(b)}$$

Schottky Barrier (ϕ_b)

$$\phi_b = \phi_m - \chi_s$$

$\phi_b < 0$ Ohmic contact

$\phi_b > 0$ Schottky Contact

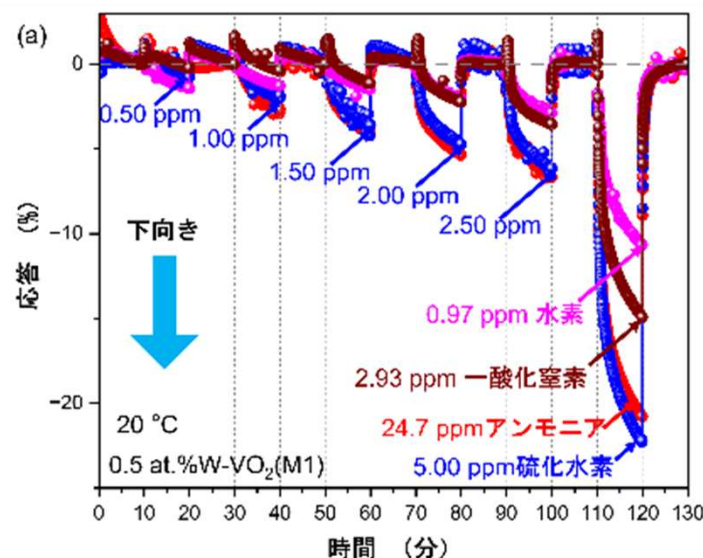
H₂S

NH₃

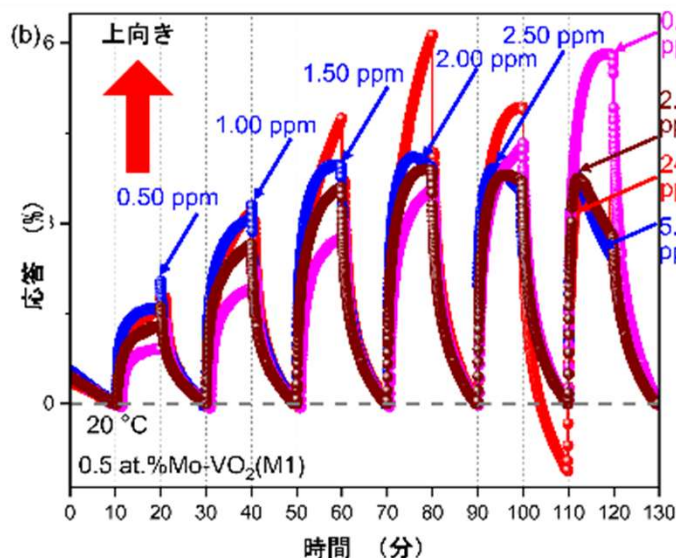
抵抗の増加、 $S > 1$

アンモニア吸着により、VO₂(M1)相表面の電子親和性を低下させ、金属電極間にショットキーを形成される。

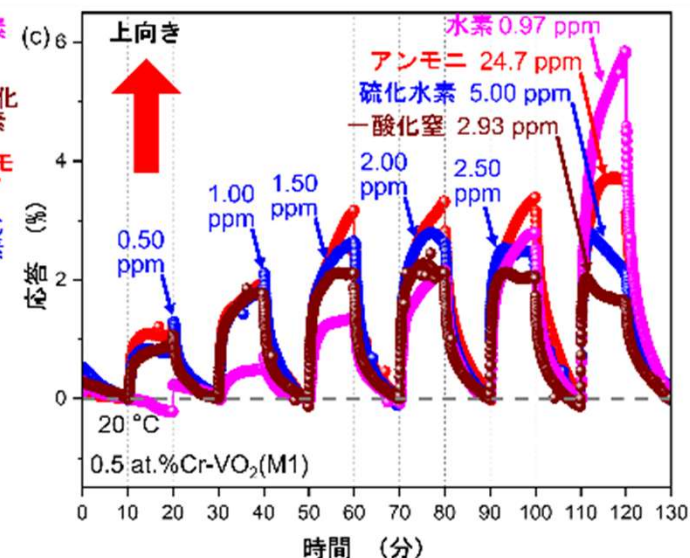
実証データ：元素ドーピングによるガスセンシング「応答—挙動選択性」の制御（応答パターンの逆転）



Wドーピング：
「下向き応答パターン」



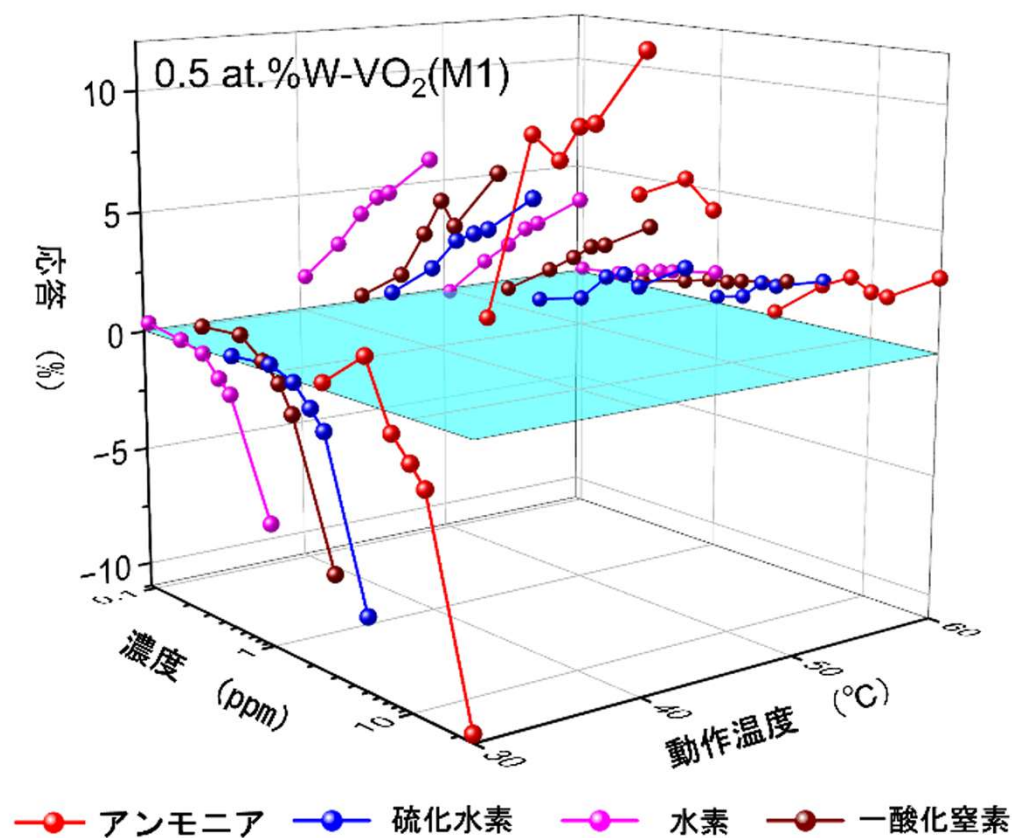
Moドーピング：
「上向き応答パターン」



Crドーピング：
「上向き応答パターン」

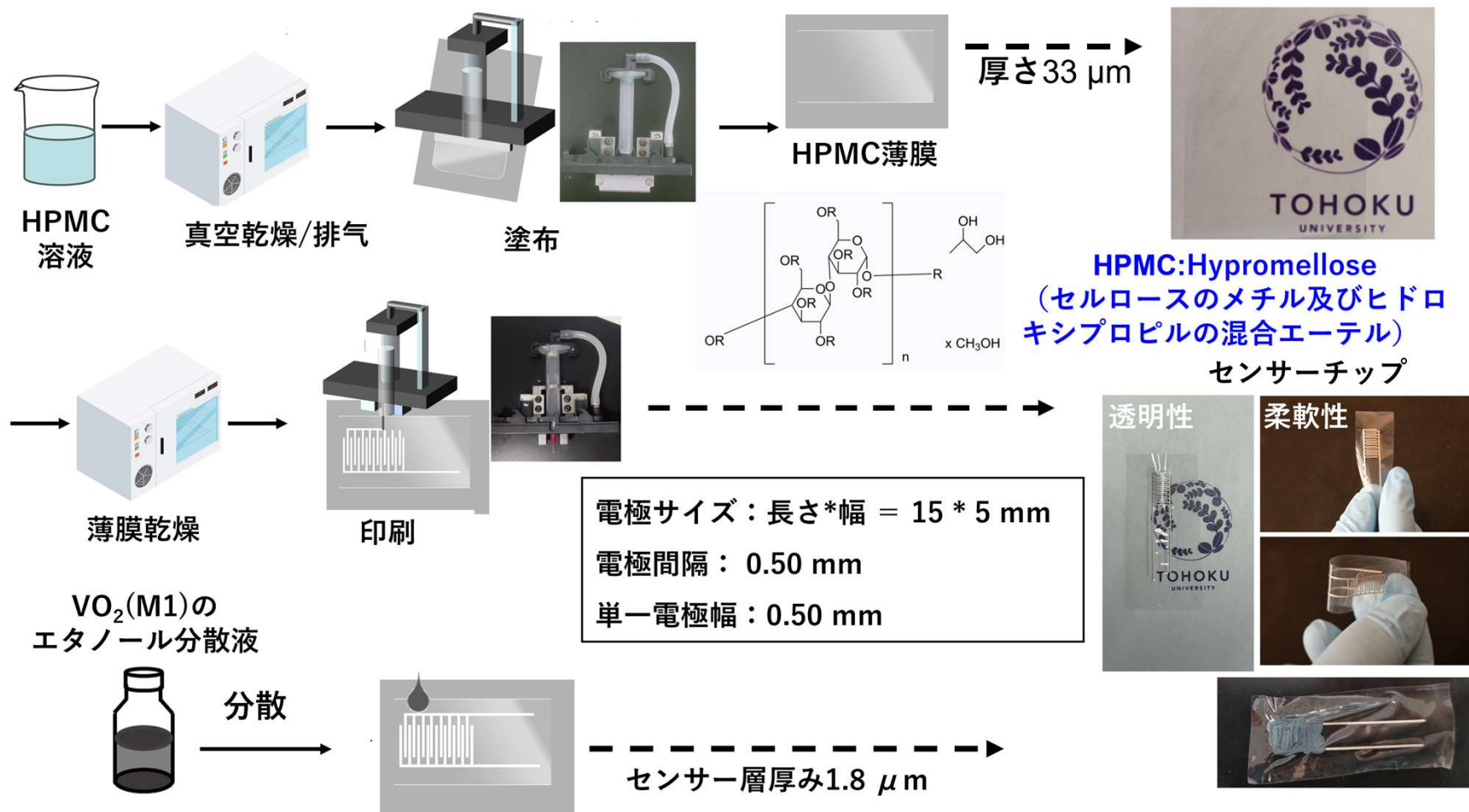
図、(a) W、(b) Mo、(c) CrでドーピングしたVO₂ (M1) におけるガスのセンシング挙動
(ガス応答濃度依存を有し、W-ドーピング：「逆方向（下向き）応答」、Mo/Cr-ドーピング：「正方向上向き）応答」)。

実証データ：温度作動温度による「応答—挙動選択性」の制御



図、温度の変化によって、0.5at.%WドーピングしたVO₂のガスセンシング挙動が逆転することが分かった。

(試作) 実証データー：フレキシブルセンサーチップの製作が可能



ガスセンシングにおける排泄物アラームの基本的ロジック

交換！

アラーム信号の種類

おむつの状態

Response = R_1 ↑

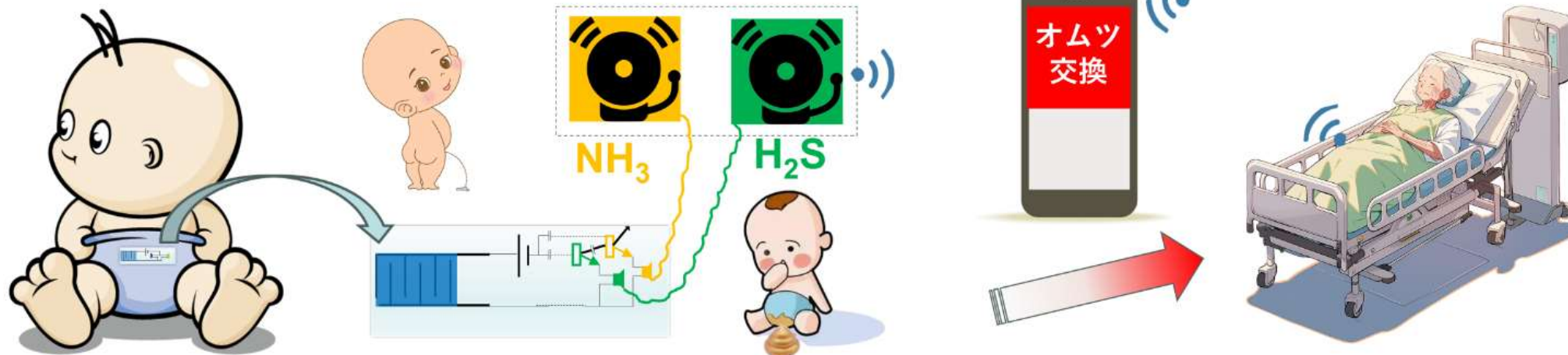
① 尿液満杯による交換

Response = R_2 ↓

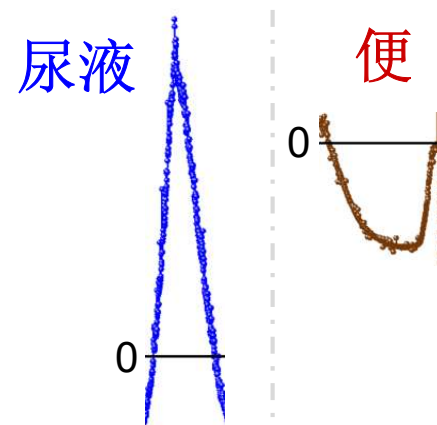
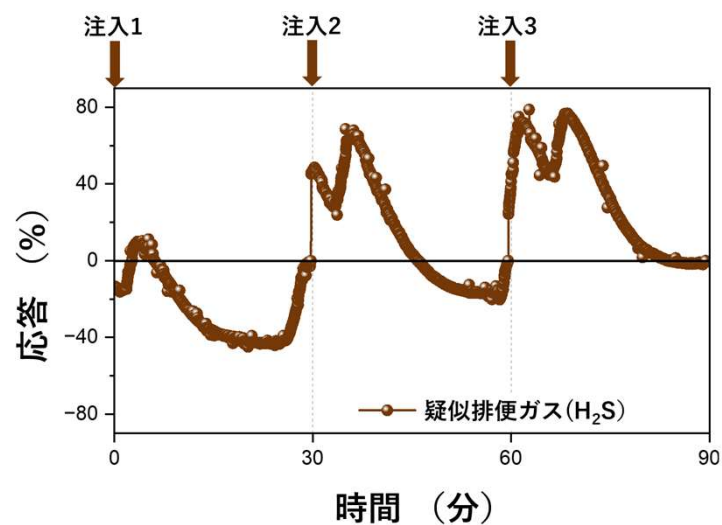
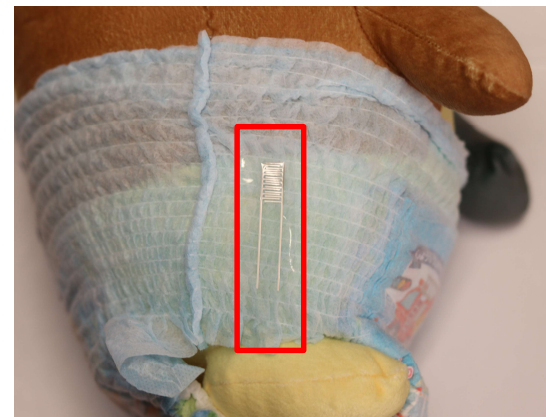
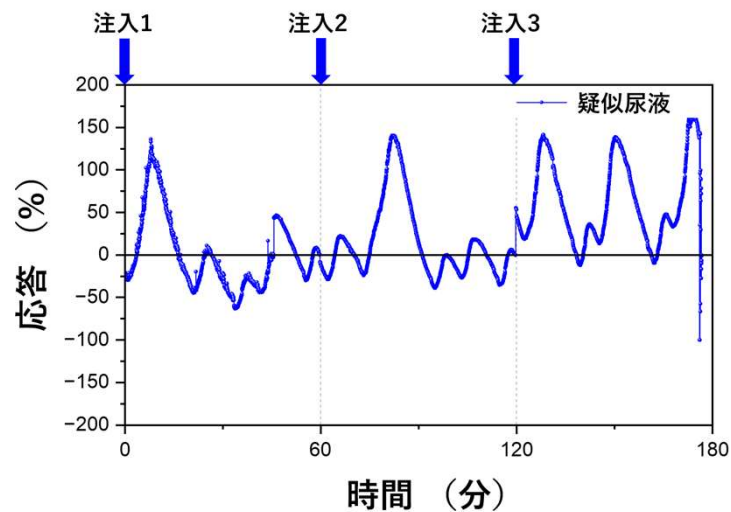
② 糞便の排泄による交換

データ
信号アラーム

フレキシブルおむつセンサーチップ



(試作) 実証データー：ベビーおむつ(外側)における排便と排尿の検出



尿液と便におけるシグナルの顕著な差

従来技術とその問題点

- 従来の半導体型ガスセンサー、「応答－強度選択性」によるガスを識別する方法であるため、同性質ガスにおける干渉を受けやすい。
- シングルチャンネルによるシングルガスを検出するため、多成分ガスの検出は多チャンネルが必要で、小型化は課題。
- おむつ環境における便・尿の多成分ガスの同時検出は難しい。

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、センシングにおける「ガス選択性」を再定義し、「**応答一挙動選択性**」概念を提唱し、従来にない**優れた「ガス選択性」**を実現した。
- 従来の「**応答一強度選択性**」依存型センシングを超え、「**正方向(上向き) 応答**」と「**逆方向(下向き) 応答**」といった特異な「**応答一挙動選択性**」に基づき、**混合ガス中の特定成分を迅速かつ信頼性高く識別することができる。**
- 従来はガスセンサーにおける「**シングルチャンネル=シングルガス計測**」概念を覆し、「**シングルチャンネル=マルチガス計測**」を実現し、デバイスの小型化に貢献できる。

新技術の特徴・従来技術との比較(2)

- ガスセンサーは室温作動可能であり、加熱電源部を省くことによるデバイスの小型化へ貢献できる。
- センサーチップのフレキシブル化が可能であり、ウェアラブルな薄型デバイスの構築に向いている。
- 新しいオムツセンサーとして利用可能であり、便と尿の同時計測が可能である。
- 様々なヘルスケアデバイスへの応用が期待できる。

想定される用途

- 「便」と「尿」を単一チャンネルで識別できるおむつセンサー：
老人の介護・ベビーケアなど
- VOCガスセンサー：
呼気による健康リスクを検出
- ヘルスケアシステム：
尿液量・代謝モニタリング
- においセンサー：
電子鼻(E-Nose)
- など

実用化に向けた課題

- 現在、シングルチャンネルでマルチガスを検出できる材料開発済み。しかし、電子シグナルの効率的取得や伝達、デバイスの小型化は課題が残る。
- 今後、電源供給方式の検討・キャパシターによる薄型化の検証、データーのワイレス伝達に関する検討を行っていく。
- 実用化に向けて、デバイスの小型化やデーター伝達の効率化できるよう技術を確立する必要もあり。

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組み
基礎研究	・「応答一挙動選択性」概念を発売し、材料設計が完了	
現在	・センシング原理を解明し、材料合成プロセスを確立した	材料のサンプル提供の実現
1年後	・「応答一挙動選択性」の更なる展開(物質群拡張・創製) ・小型デバイスの構築	JST A-STEP産学共同ステージI(育成フェーズ)事業へ応募し研究資金獲得
2年後	・便と尿を同時に検出できるおむつセンサーなどの ヘルスケアデバイスの構築と機能評価 ・フレキシブル化を実現 (材料選別と機能の最適化を実現)	評価基礎データの提供 デバイスサンプル提供の実現
5年後	・市場投入可能なセンシング技術を確立	おむつセンサー、VOCセンサー、ホルムアルデヒドセンサーの構築と実用化。

企業への期待

- 未解決の「小型化デバイスの構築及びシグナルの高効率的取得」については、MEMSの技術により克服できると考えている。
- デバイスやMEMSの更なる薄型化及びモノのインターネット(IoT)利用した電子シグナルの効率的伝達の技術を持つ企業との共同研究を希望。
- また、半導体を開発中の企業、医療介護やIoT分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術はガスセンサーにおける新しいセンシング方式や戦略を提案するものであり、共同研究を行うことでより企業に貢献できると考えている。
- シングルチャンネルでマルチガス計測により、デバイスの小型化が期待できる。
- 必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 導入にあたっての技術指導等を行うことが可能。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 半導体式ガスセンサー、おむつ、ガス検知方法、尿及び／又は便の検知方法、おむつ交換時期の決定方法、並びにガス応答性材料
- 出願番号 : 特願2024-191987
- 出願人 : 東北大学
- 発明者 : 殷 澍、苗 磊、薛 羿貝、
大川 采久、長谷川 拓哉

お問い合わせ先

東北大学 産学連携機構 ワンストップ窓口

問い合わせフォーム:

<https://www.rpip.tohoku.ac.jp/jp/aboutus/form/>

TEL: 022-795-5275

E-mail: sangaku-suishin@grp.tohoku.ac.jp