

# 無機二次元材料で実現する 高耐久・高性能センサ

北海道大学  
応用化学部門

大学院工学研究院  
無機材料化学分野  
教授 島田 敏宏

2025年10月16日

## 分子認識センサ

- ・ 医療や農業、環境などの幅広い分野での活躍が期待  
(例:ヘルスケア、食品管理、環境モニタリング)

分子認識材料の性能が向上 ➡

- ・ 検出の精密性が向上
- ・ より安全で安心して生活できる社会の実現

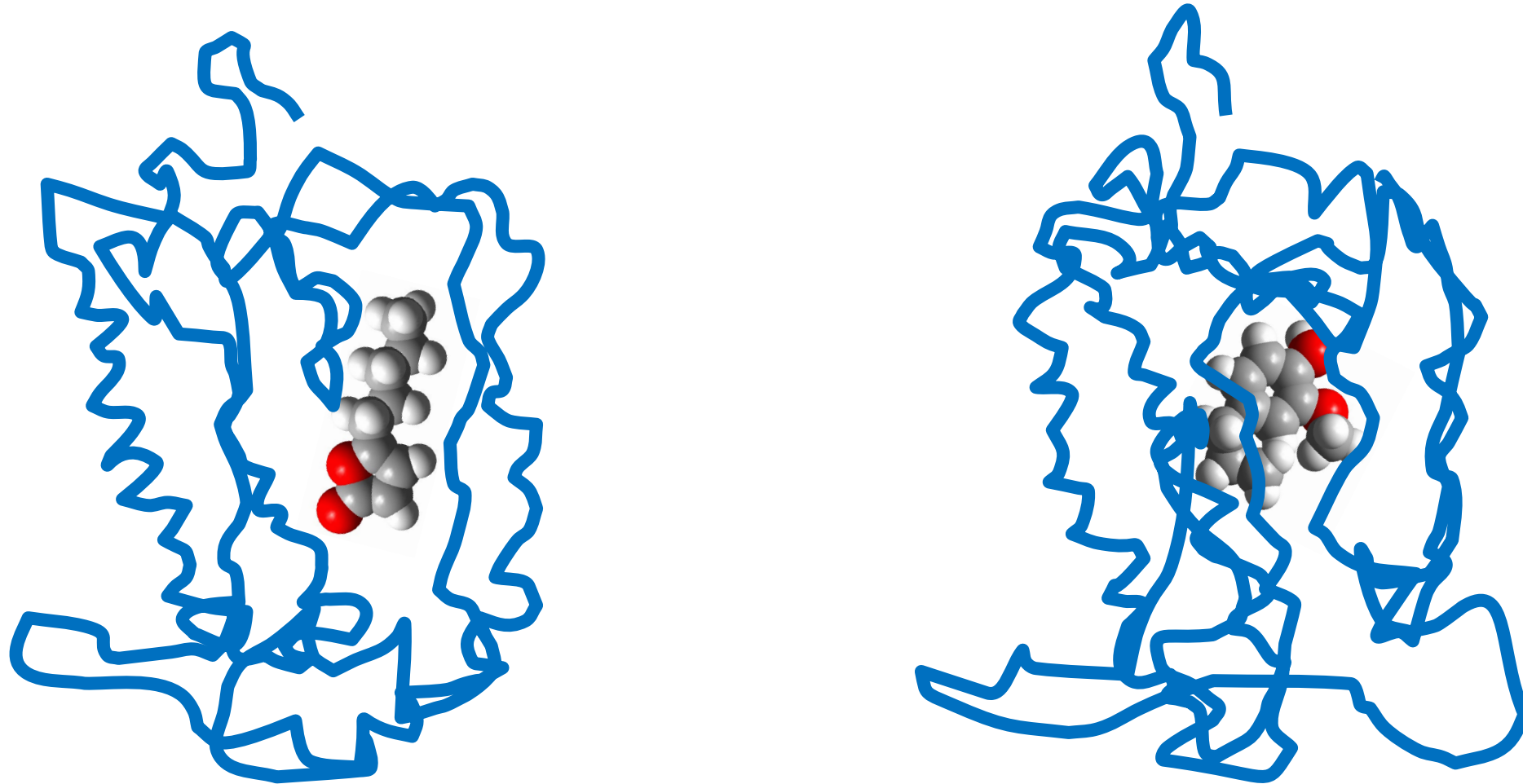
### 医療診断応用

- ・ 血液検査
  - 抗原抗体反応による認識
  - 高価な機材・試薬を要する
- ・ 呼気検査
  - 犬などを使用して有効性の確認の段階

### 日常生活・産業応用

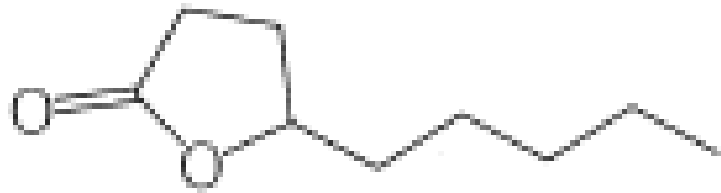
- ・ 匂い検出
- ・ VOC検出
  - 高価なため普及していない

# 生体の匂いセンサー 鍵と鍵穴の適合



人間は200～300種類、犬は1000種類のタンパク質センサーがある<sup>3</sup>

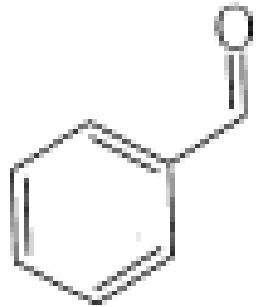
# 分子構造のわずかな違いで匂いが変わる



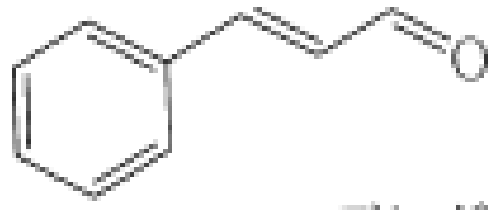
coconut



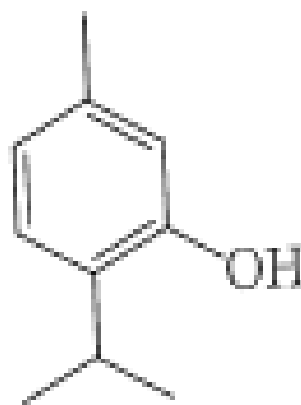
peach



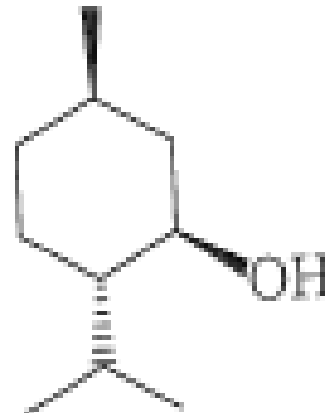
almond



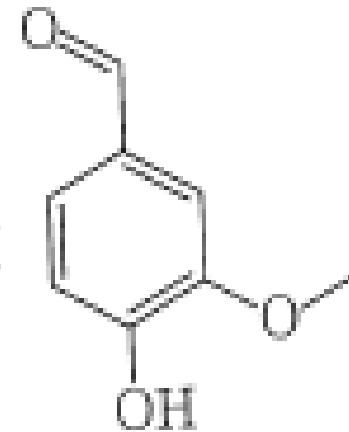
cynammon



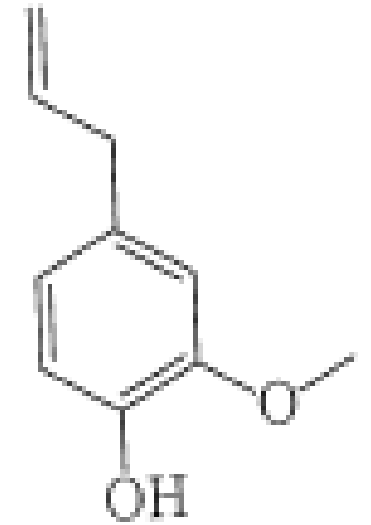
thime



mint



vanilla



clove (丁子)

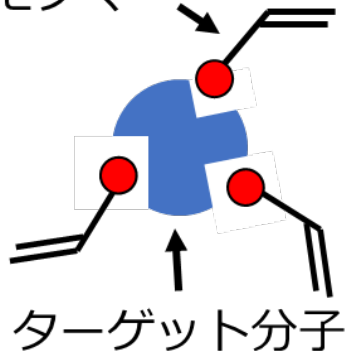
## 従来技術

「人工鼻」 標的分子を取り込んでから脱離させる方法が必要  
→300°C程度に加熱したい

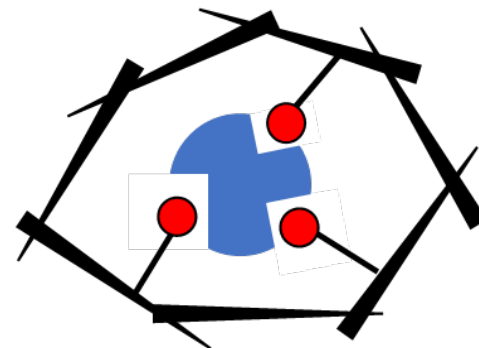
|                 |     |      |     |          |
|-----------------|-----|------|-----|----------|
| ・生物を使う(アリの触覚など) | 感度○ | 多様性○ | 高温× | 1日しか使えない |
| ・高分子薄膜の膨張+ピエゾ抵抗 | 感度△ | 多様性○ | 高温× |          |
| ・ZnOナノワイヤ       | 感度△ | 多様性△ | 高温○ |          |
| ・高分子インプリント      | 感度○ | 多様性○ | 高温× |          |

### 高分子インプリントの手法

機能性モノマー



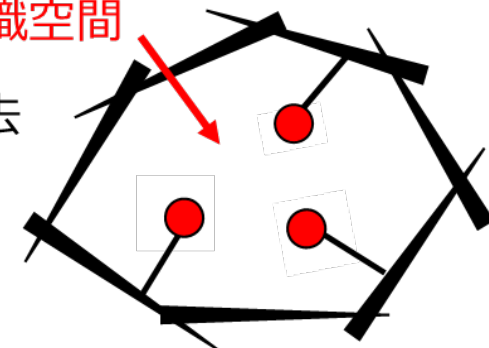
ラジカル重合



ターゲット分子除去

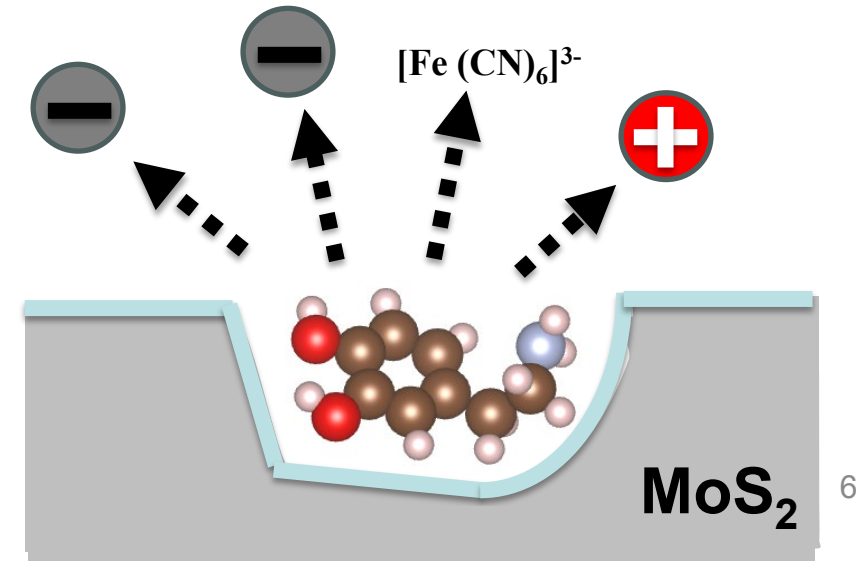
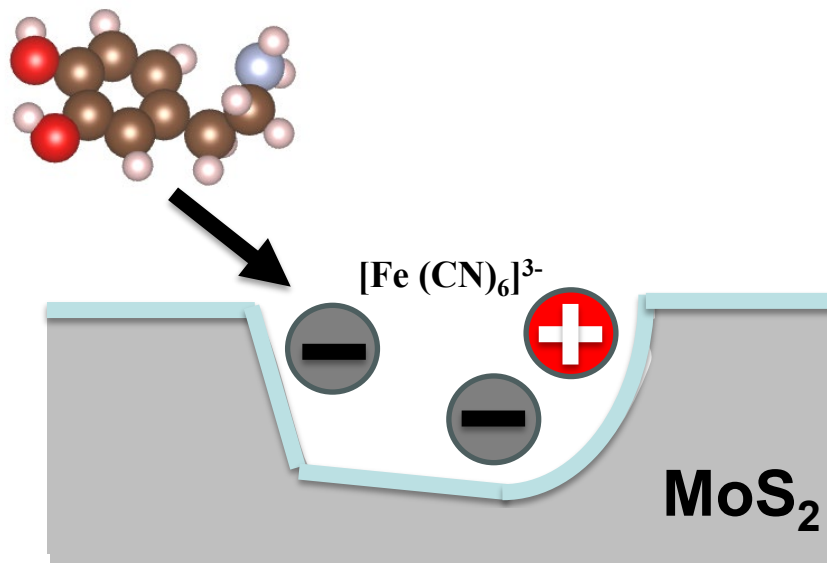


分子認識空間

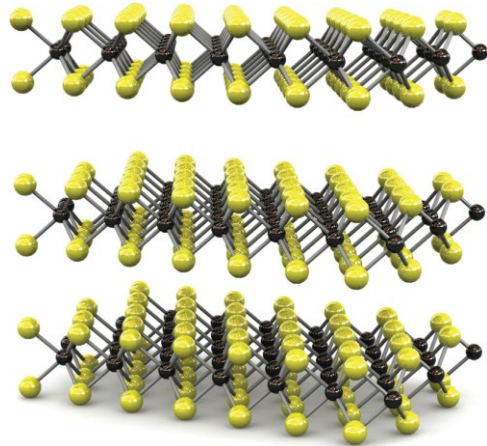


# 我々のアイデア

- 分子インプリント法 検出する分子で鋳型を作り、分子認識  
電界重合高分子によるセンサーや、分子選択性のある触媒の開発
  - 高分子鋳型は溶液中での検出はできるが、耐久性がない
  - 無機触媒 ( $\text{SiO}_2 + \alpha$ , 3次元) はうまくいっていない
- 無機二次元材料による分子鋳型をつくれなにか？

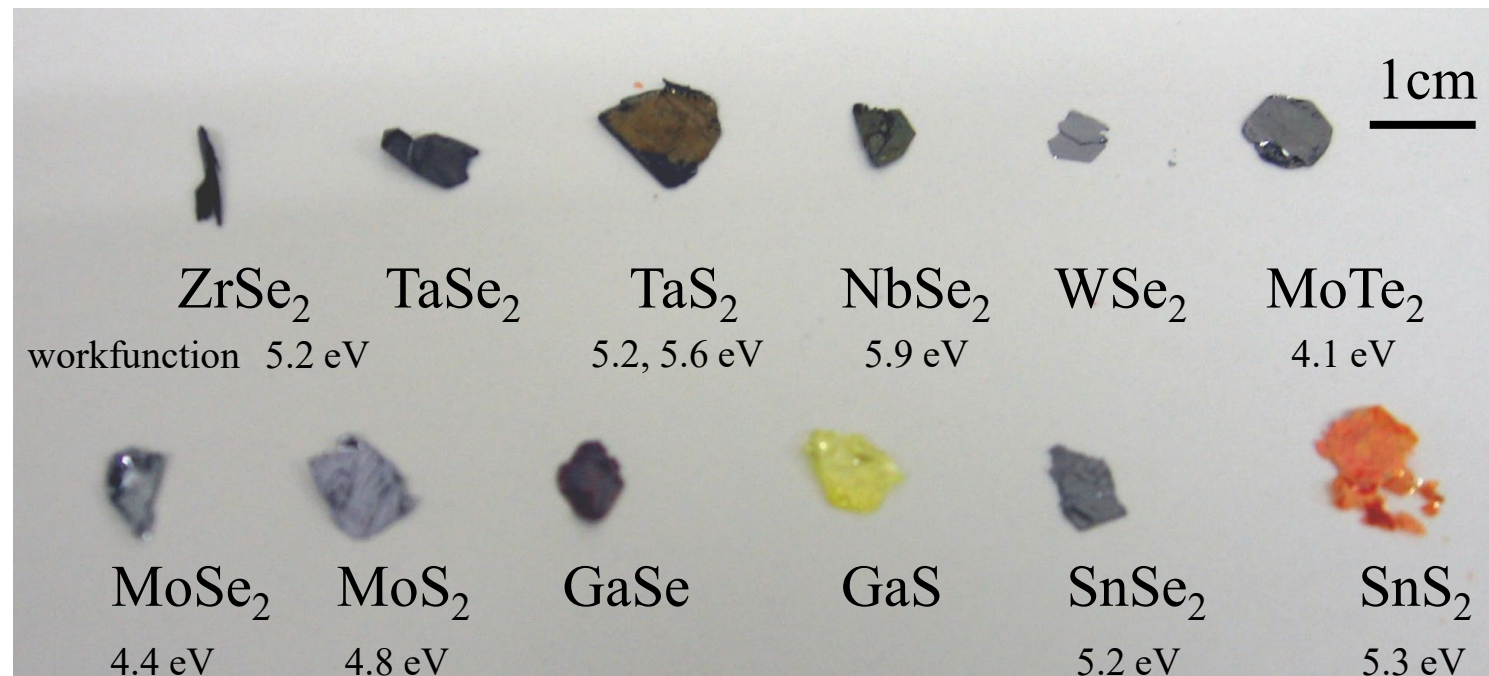


# カルコゲナイド系層状物質



● S  
● Mo

- 表面に切れた化学結合がない
- 機械的に軟らかい
- 金属原子とカルコゲン元素(S, Se, Te)の組み合わせで多くの物質がある
- 多様な物性(半導体～金属)



## 試料合成

[2]

原料をオートクレーブに封入

MoS<sub>2</sub>の原料

- 20 mL DI water
- (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> : 350 mg
- CSN<sub>2</sub>H<sub>4</sub> : 647 mg

ターゲット分子

- C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub> (Toluene): 0.65 mmol

加熱 : 180°C, 24h

試料を取り出した後、洗浄・乾燥

## 試料の解析・評価

構造解析

- XRD
- Raman
- TEM

センシング性能評価

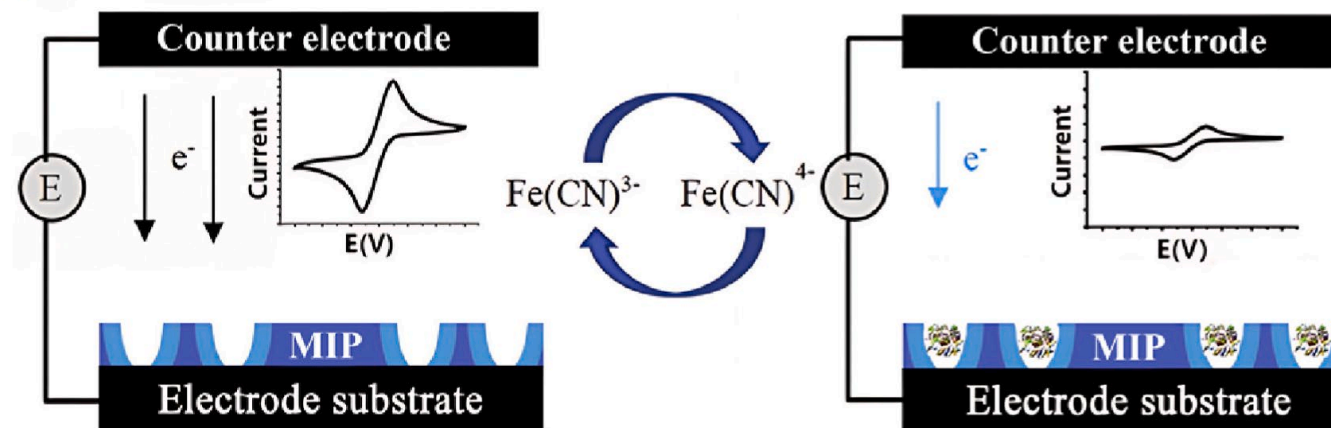
- CV測定

センシング手法

: voltammetric sensor

voltammetric sensor の原理

[3]



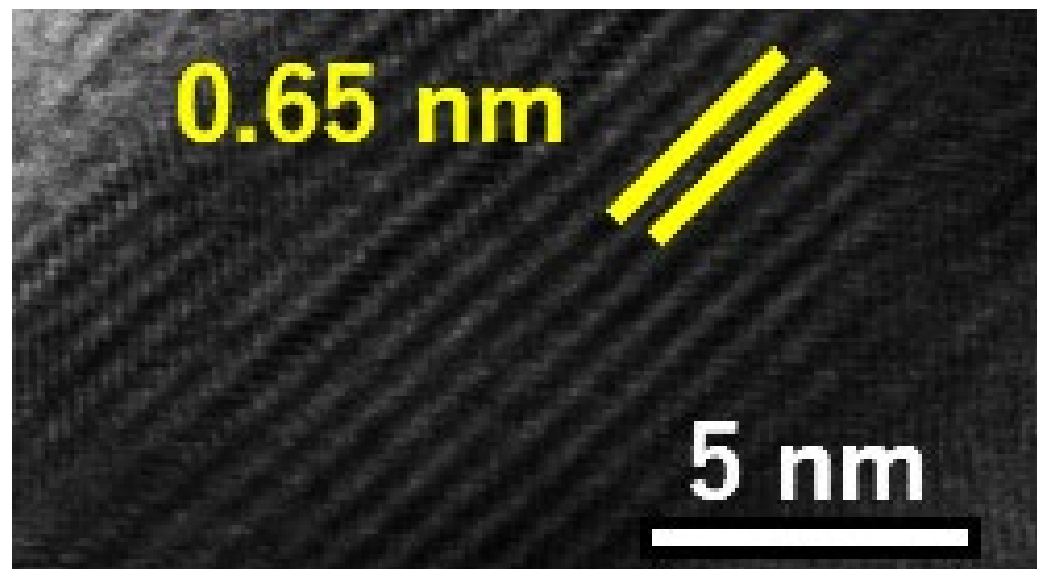
[2] I S Waskito, *et al.*, *Mater. Sci. Eng.* 546 042048 (2019)

[3] Yixuan Li, *et al.*, *Biosens. Bioelectron.* 249 116018 (2024)



# 実験結果：構造解析 - TEM

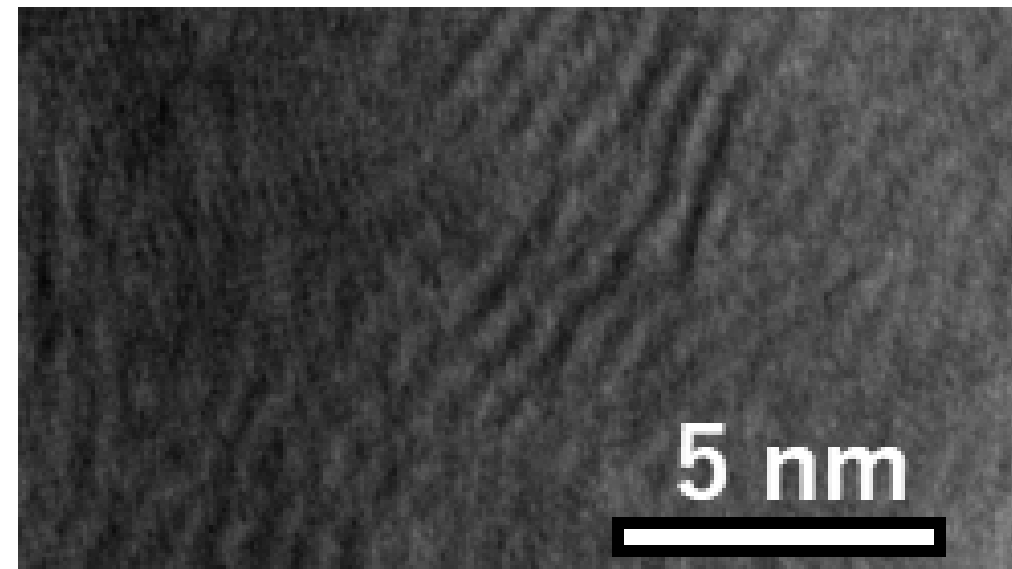
(a)  $\text{MoS}_2$



規則的な層状構造

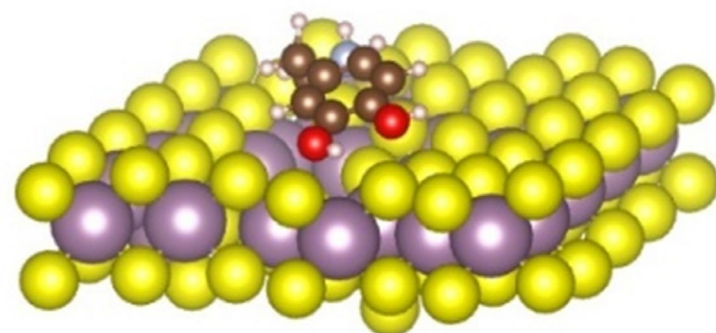
- 0.65 nm の格子間隔 =  $\text{MoS}_2$  の層間隔

(b)  $\text{MoS}_2$  + Toluene



凹凸の層状構造

- 鑄型形成の影響である可能性

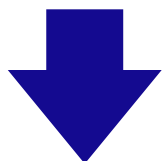


## 第一原理計算の結果

- 分子が $\text{MoS}_2$ に食い込むことで、鑄型が形成される
- 凹凸な構造は鑄型形成を示唆する

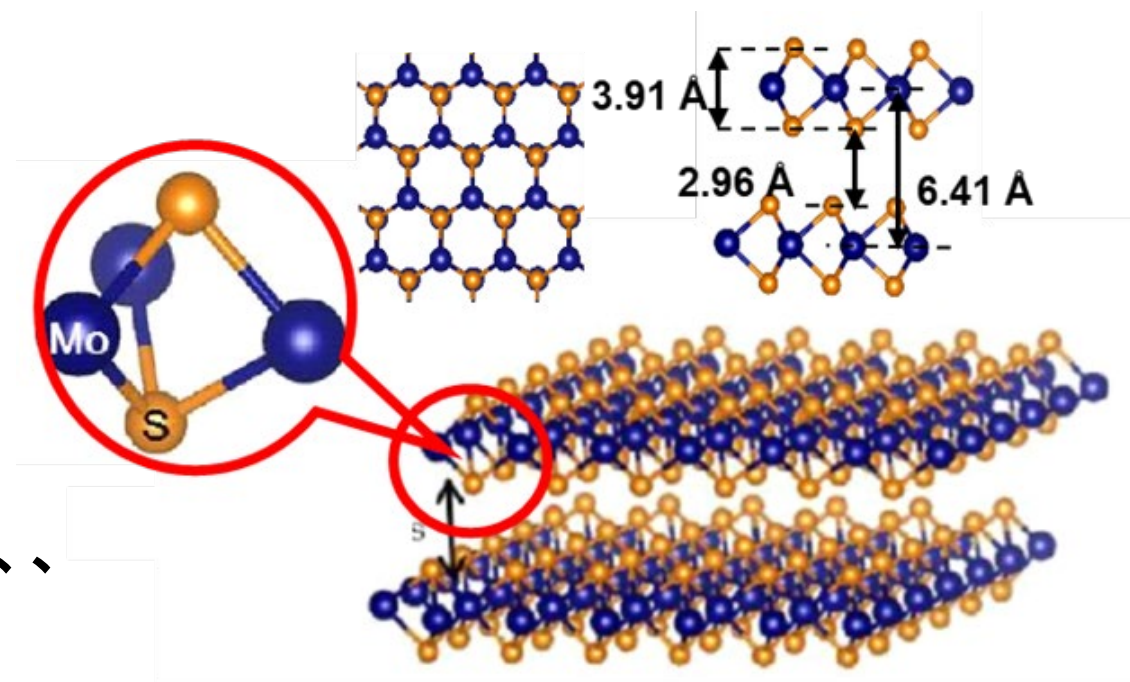
## 使用する無機材料: MoS<sub>2</sub>

- 遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)に属する
- 高い移動度
- ダングリングボンドを持たない
- 優れた機械的強度と柔軟性を持つ層状物質



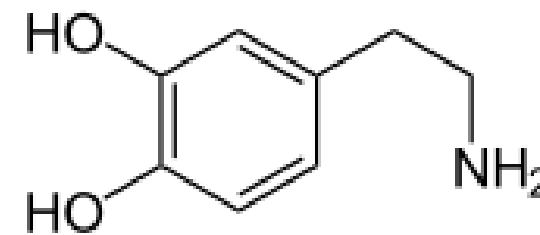
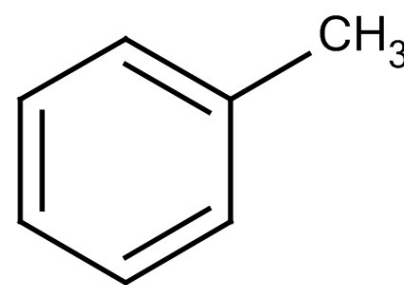
一般的に無機材料は堅牢で、  
鋳型の導入は困難だと考えられるが、..

**鋳型を形成が可能であると期待できる**



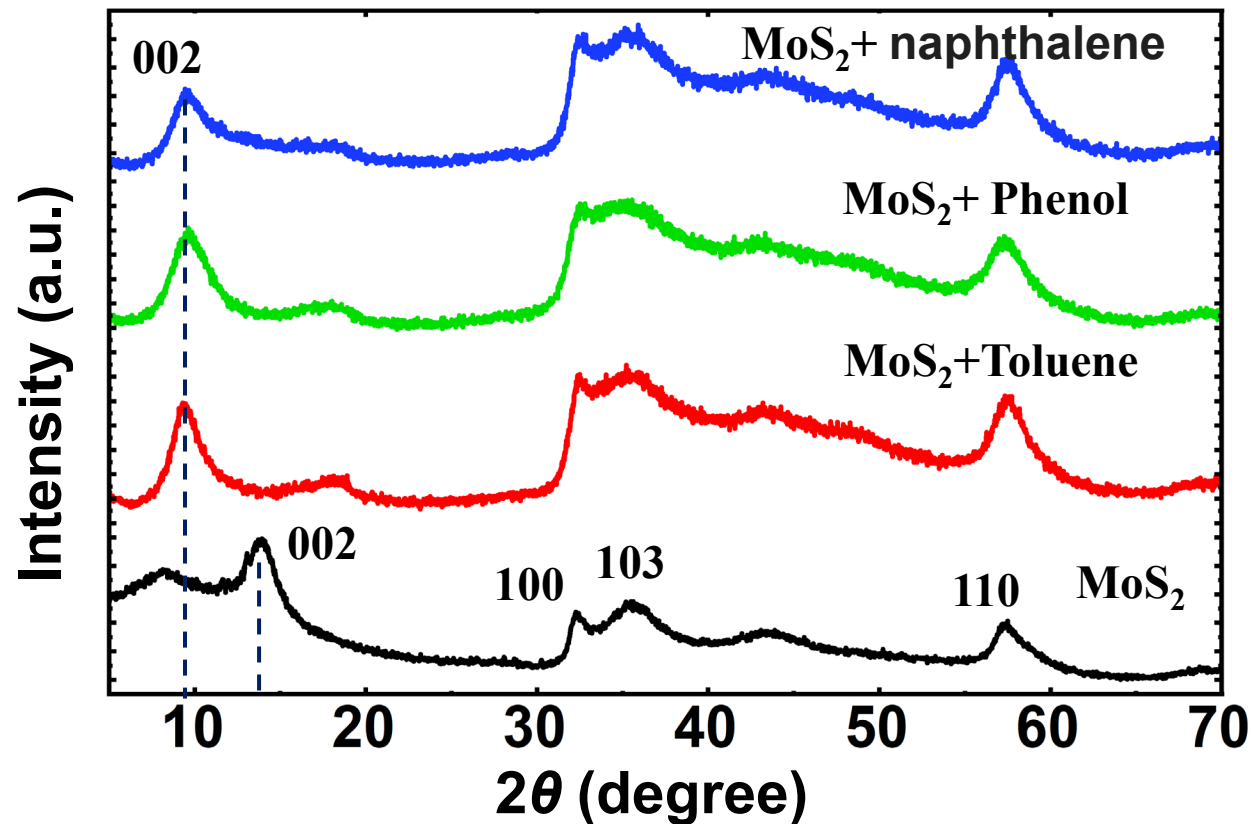
## ターゲット分子: トルエン, ドーパミン

- トルエン...揮発性有機化合物(VOC)の一種
- ドーパミン...精神機能にもかかわる生理活性物質



# 実験結果：XRD, Raman

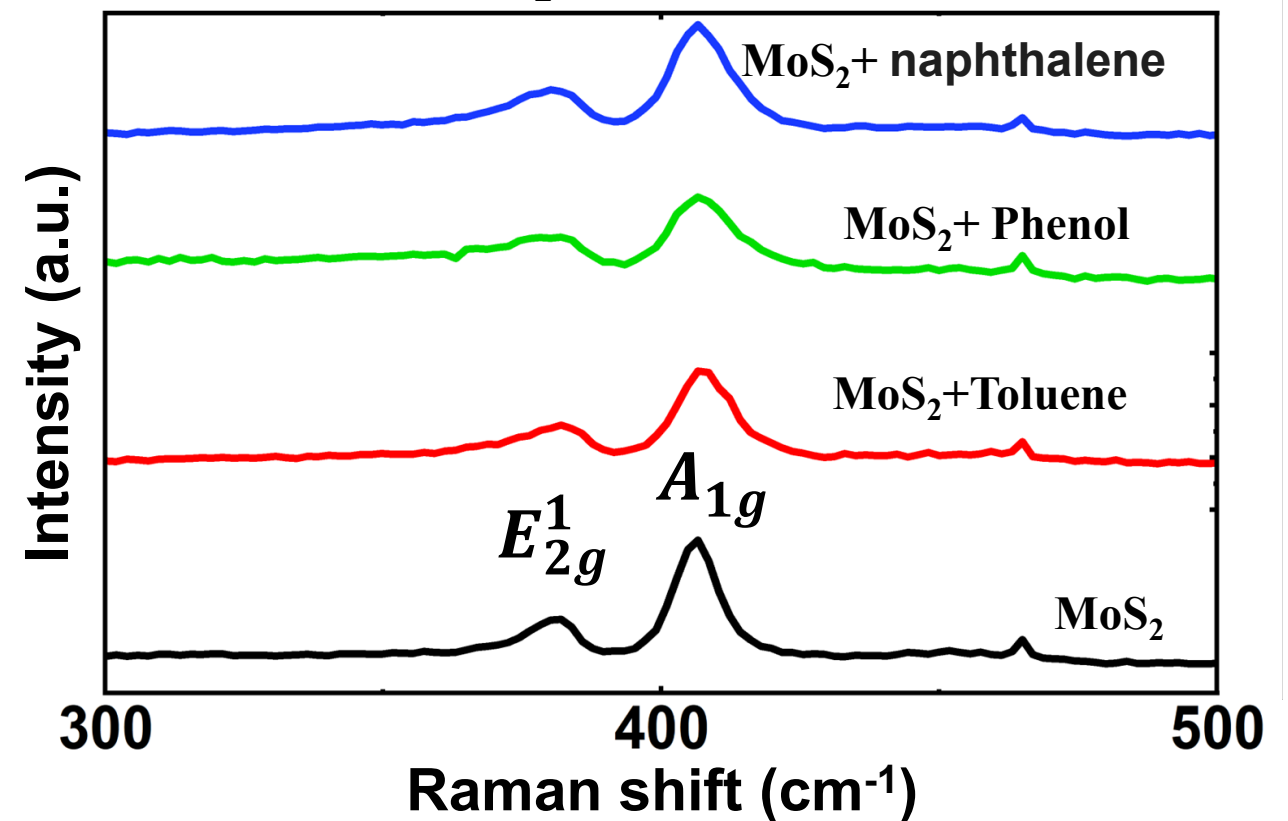
XRD: MoS<sub>2</sub> + ターゲット分子



- ターゲット分子を加えた試料はいずれも (002)面のピークが低角側にずれている

鋳型形成による層間距離の増大の可能性  
6.41 nm → 9.32 nm

Raman: MoS<sub>2</sub> + ターゲット分子



- ターゲット分子を加えた試料全てで MoS<sub>2</sub>の合成を確認

トルエンに限らず、幅広い分子の検出に応用  
可能である可能性を示す

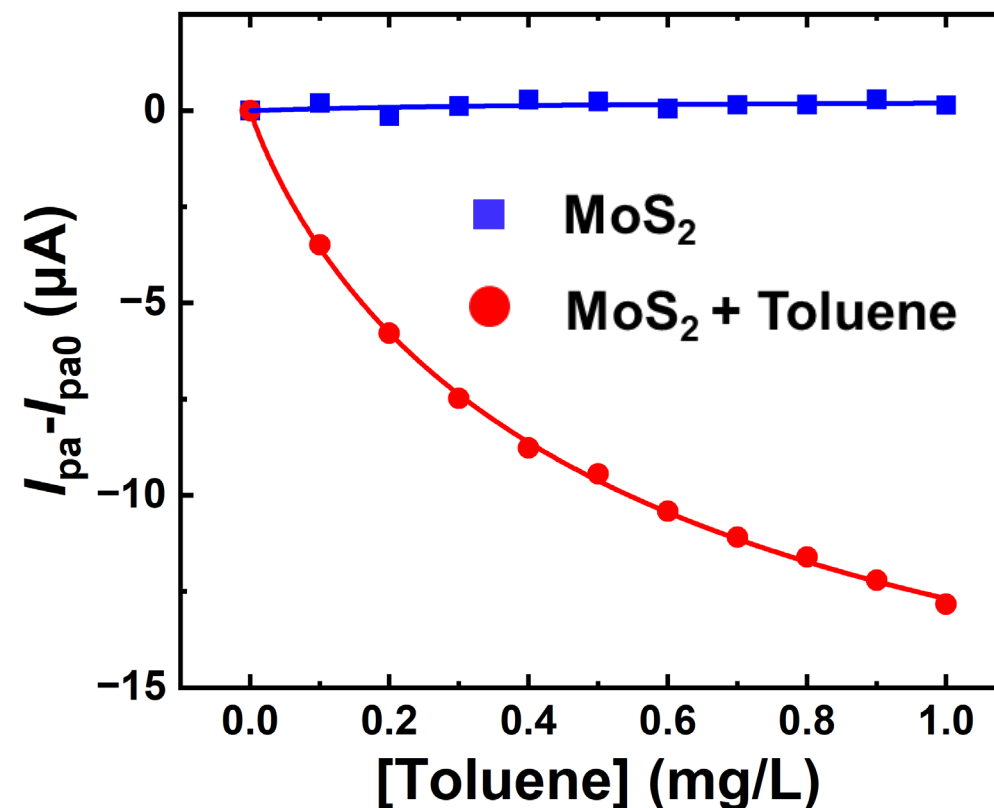
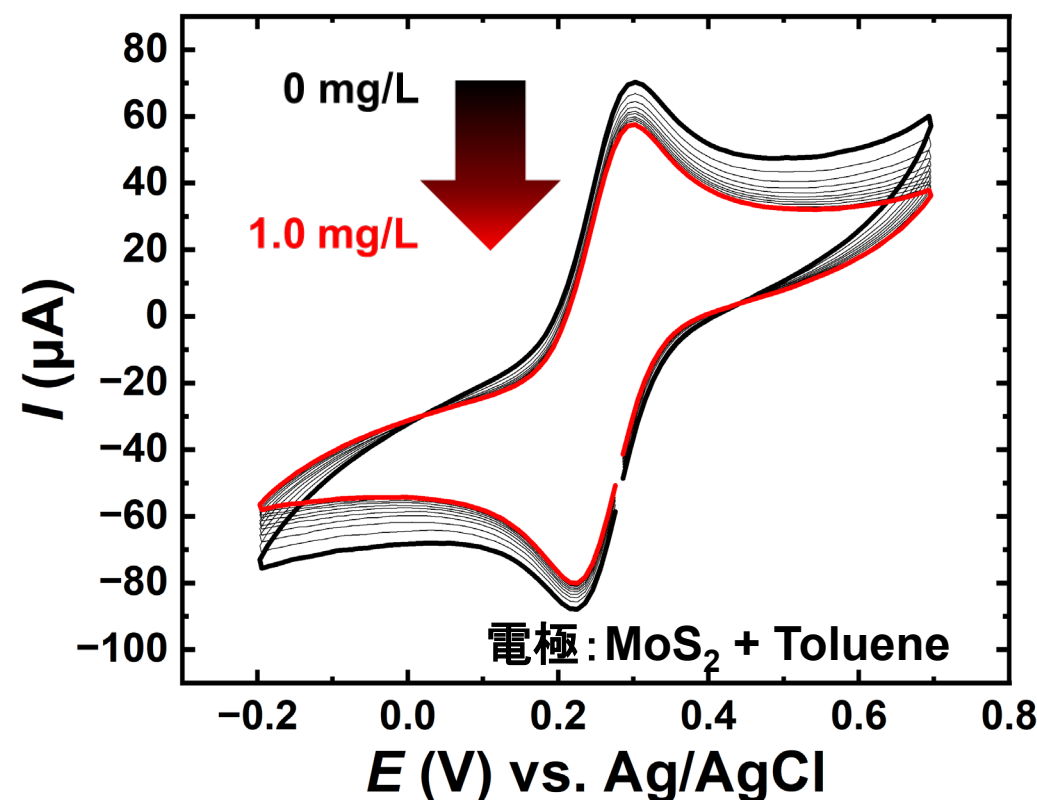
# 実験結果：性能評価 – CV測定

トルエン濃度を段階的に変化したときのCV測定結果

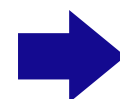
電極：試料でコーティングしたGC電極

$K_3[Fe(CN)_6]$  の酸化還元反応

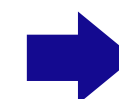
溶液：5mM  $K_3[Fe(CN)_6]$ , 1M NaCl, 0~1.0 mg/L Toluene により生じる電流を測定



$MoS_2$  + Toluene 電極でのみ  
トルエン濃度増加によるピーク電流の低下



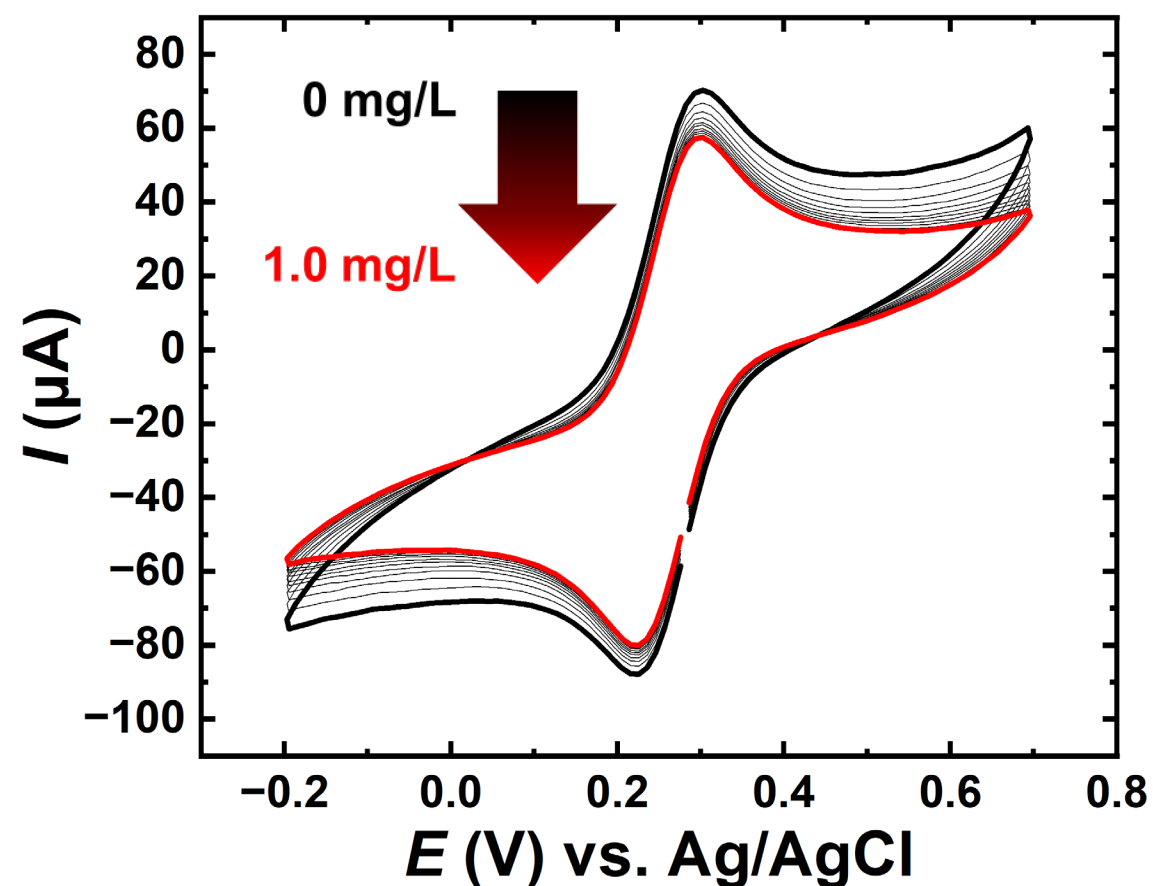
鋳型へのトルエン吸着により  
電流の流れを阻害したため



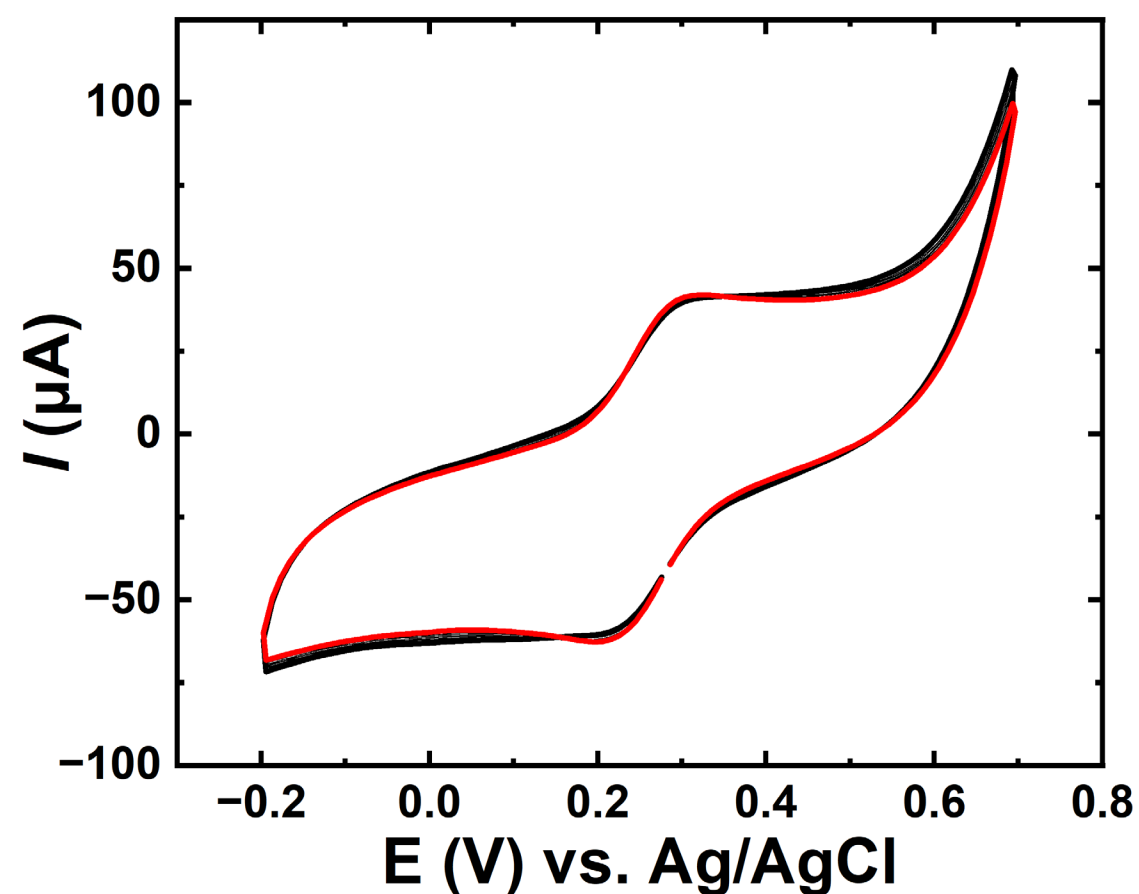
鋳型の形成  
を示す

# 鑄型の有無での比較

電極 :  $\text{MoS}_2$  + Toluene コーティング



電極 :  $\text{MoS}_2$  コーティング

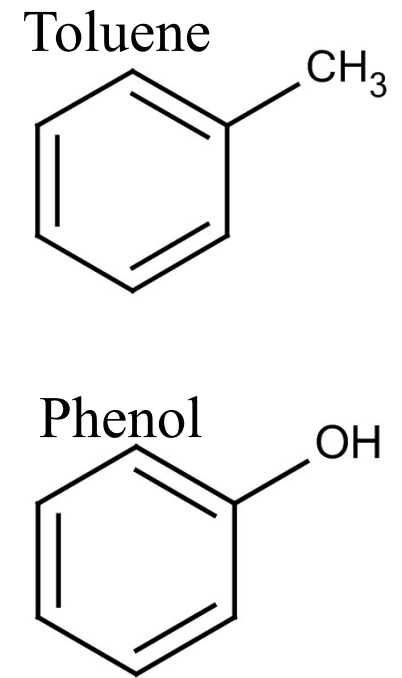
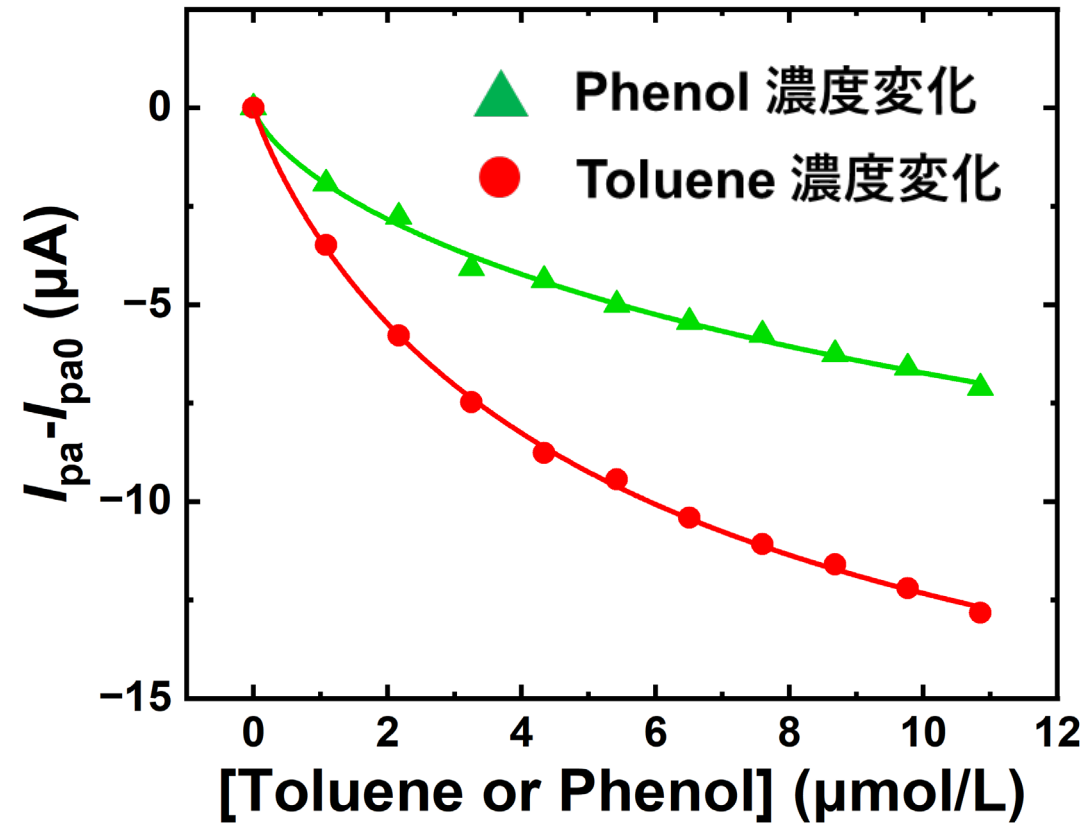
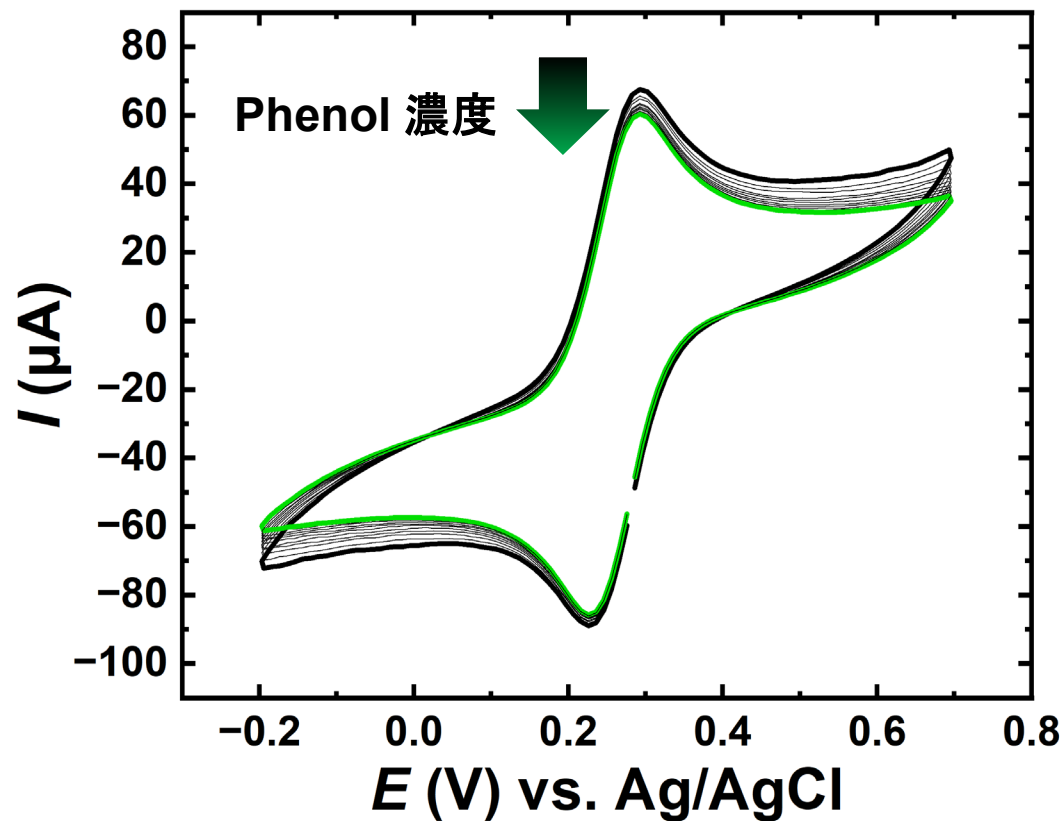


トルエン濃度によらずほぼ一定

# トルエン類似のフェノールへの応答

電極:  $\text{MoS}_2$  + Toluene でコーティングしたGC電極

溶液: 5mM  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ , 1M NaCl, 0~10.9  $\mu\text{mol/L}$  Toluene or **Phenol**

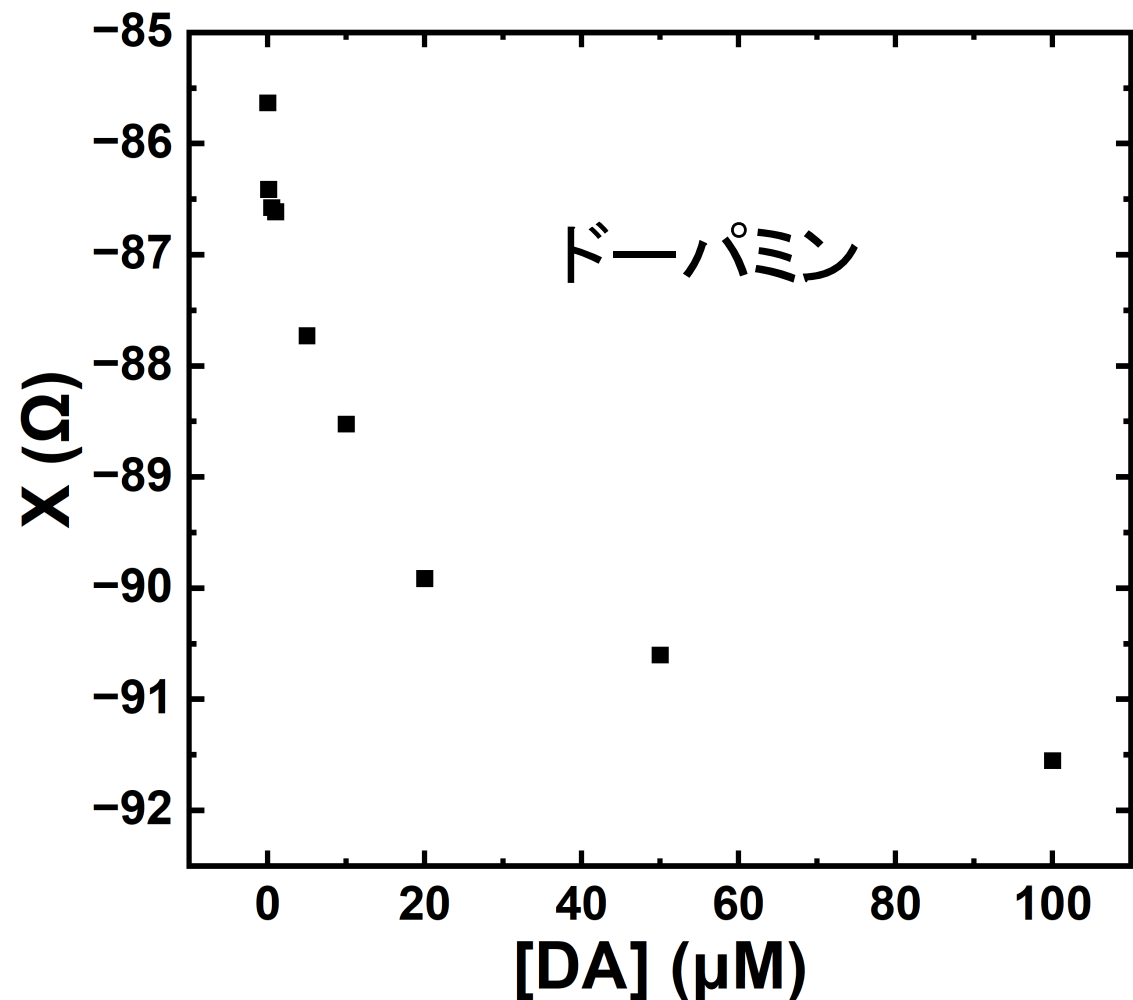


- 電流低下は生じたが、緩やか

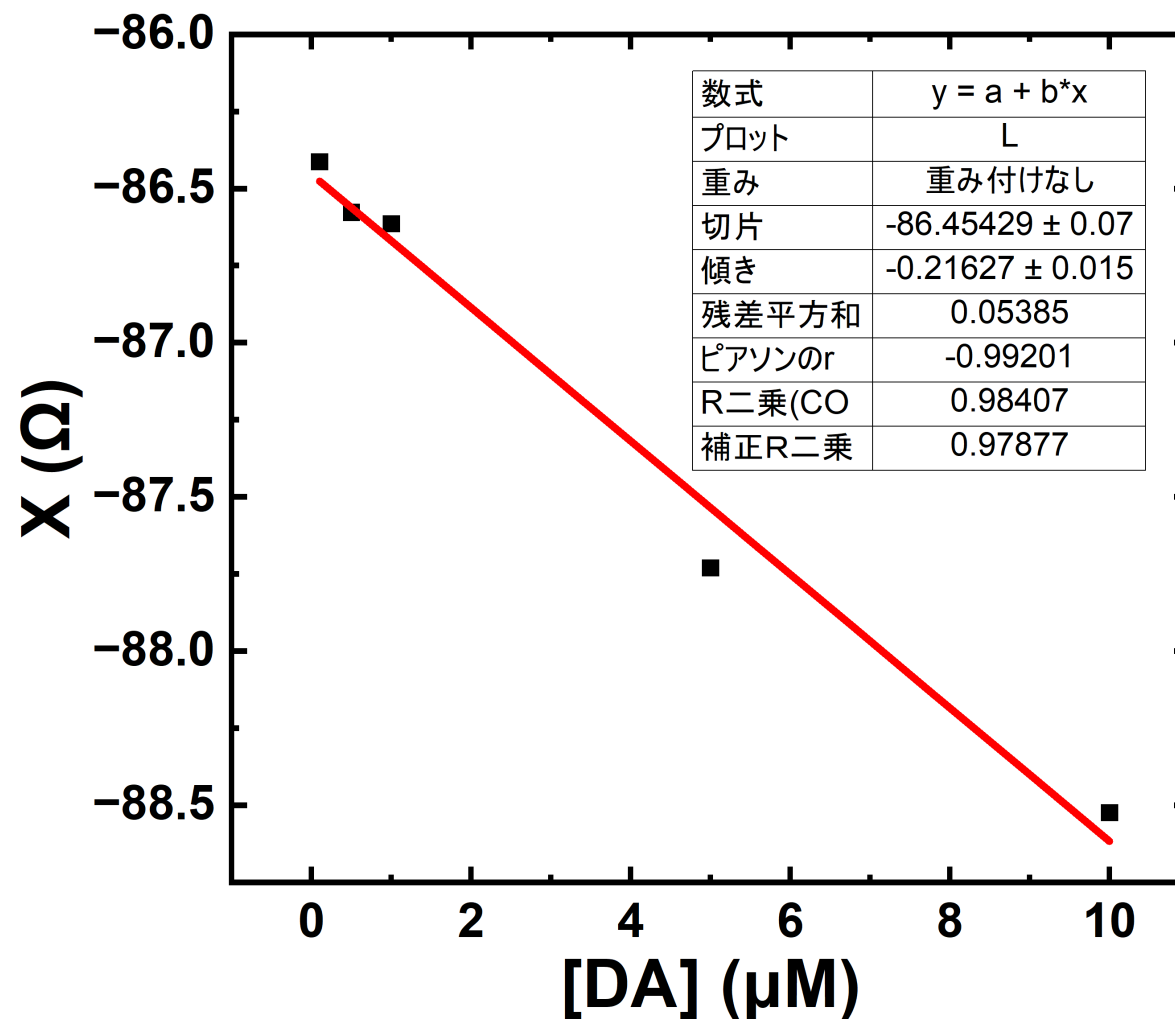
合成したトルエン鑄型 $\text{MoS}_2$ がトルエンに対する選択性を有していることが示された。→機械学習も使えそう。



# インピーダンス測定(電気二重層に敏感)



$$\text{LoD} = \frac{3\sigma}{S} = \frac{3 \times 0.09949}{0.21627} = 1.38 \mu\text{M}$$



先行研究の性能(MIPを用いたDAセンサ)  
LoD : 0.1 μM 直線範囲 : 0.3~30 μM

## 実用化に向けた課題

- 現在、液相中のドーパミンについて、 $1\mu\text{M}$ の桁の濃度まで安定した検出が行えることを確認。ただし、血液診断にはさらに20倍の感度向上が必要。鋳型の最適化、粉体への安定した電氣的接触法の開発、専用電子回路の製作を行う。
- 「人工鼻」には加熱リセット機能が必要だが、現在は $250^{\circ}\text{C}$ 程度。さらなる熱安定性の向上が望ましい。母物質の探索を行う。



## 新技術の特徴・従来技術との比較

「人工鼻」 標的分子を取り込んでから脱離させる方法が必要  
→300°C程度に加熱したい

|                 |     |      |          |
|-----------------|-----|------|----------|
| ・生物を使う(アリの触覚など) | 感度○ | 多様性○ | 高温×      |
|                 |     |      | 1日しか使えない |
| ・高分子薄膜の膨張+ピエゾ抵抗 | 感度△ | 多様性○ | 高温×      |
| ・ZnOナノワイヤ       | 感度△ | 多様性△ | 高温○      |
| ・高分子インプリント      | 感度○ | 多様性○ | 高温×      |
| ・無機二次元物質インプリント  | 感度○ | 多様性○ | 高温○      |

## 想定される用途

- 「人工鼻」と言える感度をもつものは濃縮器付のガスクロマトグラフィ＋質量分析計を用いたものがあるが、大型で高価。本技術は処理系を入れても手のひらサイズ以下で非常に安価になる。
- 高い選択性により血液・尿などを対象とする医療診断用途も期待。

# 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について記載                         |
|------|---|---|
| 基礎研究 | ・コンセプト実証が完了   |   |
| 現在   | ・液相中の安定した測定、再現性の確認  | 液相デモンストレーション実施                          |
| 1年後  | ・感度向上<br>・耐熱性の向上<br>・気相中の分子検出を実現                          | JSTのA-STEP事業へ応募                         |
| 2年後  | ・濃縮機能を導入して安定した<br>気相分子検出を実現<br>・機械学習の導入により「人工鼻」<br>システム構築 | デモンストレーション実施<br>評価基礎データの提供<br>サンプル提供が実現 |
| 3年後  | ・システムとしてのプロトタイプ製作   | 匂い検出システムの実証                             |

## 企業への期待

- 未解決の感度と耐熱性の向上については、母材料であるカルコゲナイド系層状物質の探索・混晶化により克服できると考えている。
- センサー実装の技術と販路を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、医療診断や匂い検出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

- 本技術は特異的分子検出センサーとして有望。
- 本技術の導入にあたり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。
- 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 : 分子検出センサー
- 出願番号 : 特願2025-127272
- 出願人 : 国立大学法人北海道大学
- 発明者 : 島田 敏宏、和泉 廣樹、伊瀬 亘

## 産学連携の経歴

- ありません

# お問い合わせ先

**北海道大学 産学・地域協働推進機構**  
**産学・地域協働推進機構 ワンストップ窓口**

**<https://www.mcip.hokudai.ac.jp/about/onestop.html>**