2026年 堀場雅夫賞 受賞研究

電解・蓄電デバイスの電極–電解液統合設計を叶えるオペランド分光法の開発

片山 祐 ｜ 大阪大学 産業科学研究所 准教授

SANKEN THE UNIVERSITY OF OSAKA

01 測る：界面だけを選んで見る

見えなかった「界面」を可視化して、設計する。

作動中の電極–電解液界面を、分子レベルで可視化するオペランド分光法

電解液：厚さ 数 cm

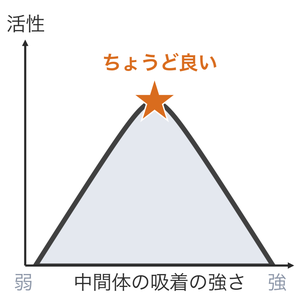
界面：厚さ 約10 nm

電極：厚さ 数 mm

- ① **赤外光** 分子振動を捉え、金属電極の信号は除外
- ② **全反射（ATR）** 表面 約0.5 μm だけを検出
- ③ **表面増強** 界面の信号を 100–1000 倍に増幅

02 なぜ「界面」か

反応中間体は、電極とも電解液とも相互作用している

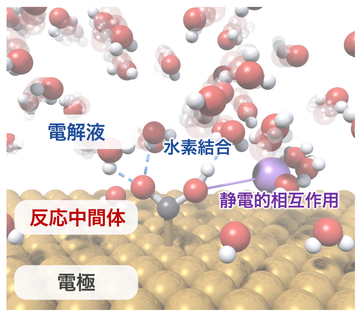


1 「ちょうど良い」吸着の実現

- 弱すぎ 反応しない
- 強すぎ 離れない



電極材料の設計により吸着強度を調整してきた

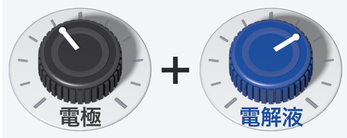


2 電解液との相互作用

- 電極 共有結合（化学吸着）
- 電解液 非共有結合
  水素結合・カチオン・溶媒和

電解液側はランダムで動的な「ブラックボックス」だった

3 電解液のつまみも回す



- 電極 元素・構造・電子状態
- 電解液 水の構造・カチオン種・濃度

界面が見えて初めて回せる

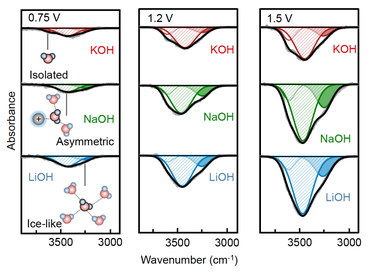
電極と電解液を一体で設計する

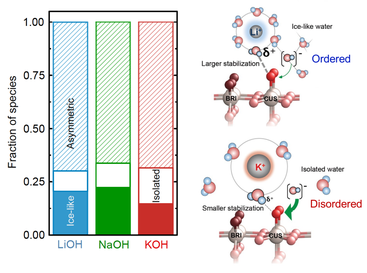
03 可視化する：C・N・H・O＋蓄電

同じ手法で、多様な反応の界面で起きていることを直接観測

水電解（酸素発生）

カチオンが界面の水の「秩序」を変え、反応の速さを左右する



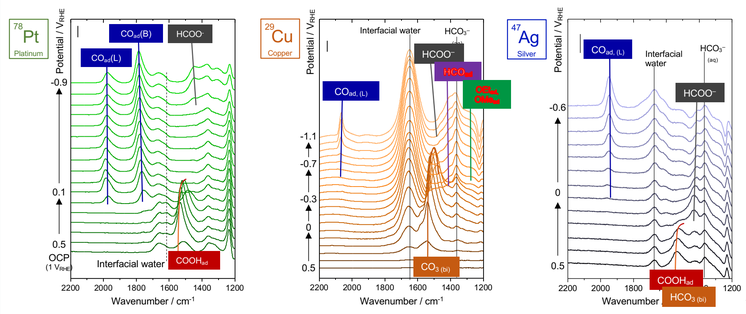


1. **Li^+** 界面の水が秩序化（氷状）
2. **K^+** 界面の水が無秩序化
3. **カチオンが形成する水構造** 水の水素結合ネットワーク構造が中間体の安定性を左右

R. R. Rao, Y. Katayama *et al.*, ***Nat. Catal.*** 3, 516 (2020)／***J. Phys. Chem. C*** 125, 8195 (2021)

CO_2資源化

金属ごとに中間体の結合が異なり、生成物が決まる

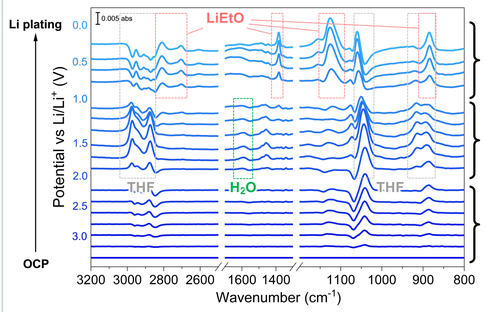


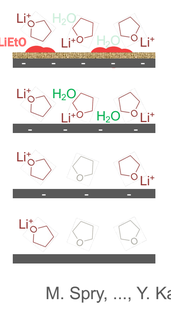
1. **Pt → H_2** CO が強く吸着し、触媒が被毒
2. **Cu → 炭化水素・アルコール** C–C 結合が進む
3. **Ag → CO** CO が弱く吸着し、脱離

Y. Katayama *et al.*, ***J. Phys. Chem. C*** 123, 5951 (2019)

アンモニア合成（Li媒介）

微量の水存在下でも窒素からアンモニアを合成できる



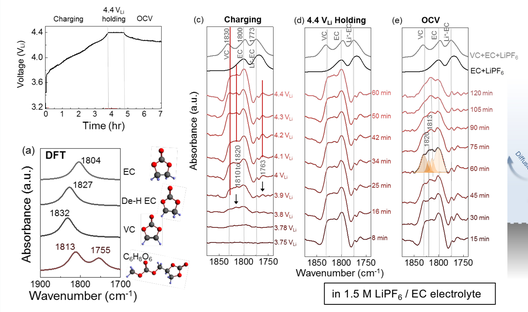


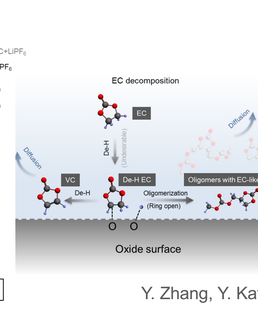
1. **最適量の水** 効率が最大となる水分量が存在
2. **水でSEI形成機構が変わる** LiOH と LiEtO が同時に生成
3. **水でSEI形態が変わる** Li_2O 主体の部分多孔質 SEI に

M. Spry, ..., Y. Katayama, ***Energy Environ. Sci.*** 18, 8414 (2025)

リチウムイオン電池（正極）

高電位で電解液（EC）が正極表面で脱水素化し、表面に残る





1. **脱水素化** 高電位で EC が正極表面と反応
2. **生成物** VC・オリゴマー（開環）
3. **固体・液体生成物の分離** 液体生成物はオペランドだからこそ特定できた

Y. Zhang, Y. Katayama *et al.*, ***Energy Environ. Sci.*** 13, 183 (2020)

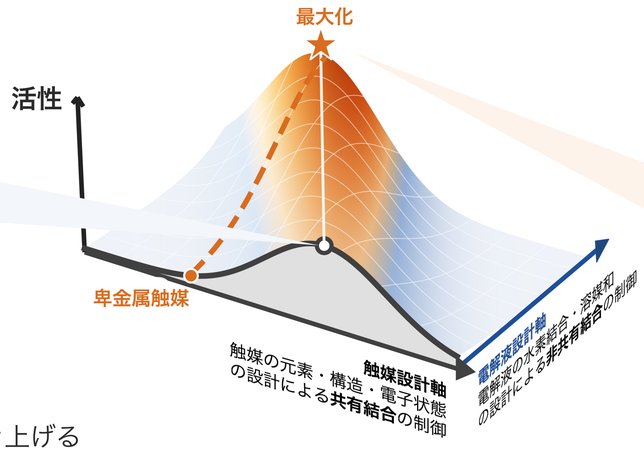
04 2つのつまみで限界を突破する

1つの制御軸から2つの制御軸へ — 電極 × 電解液で、より高い最適を目指す

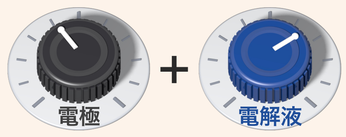
これまで 電極のつまみ 1つ



電極材料だけで吸着を調整
→ **山の頂上が「限界」**



これから 電極 ＋ 電解液のつまみ 2つ



★ 電解液でも中間体を制御
→ **より高い最適へ**

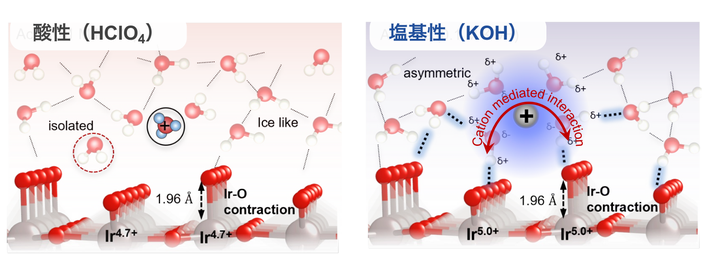
---- 卑金属触媒でも高活性へ

05 設計する

電解液のつまみで、水電解の活性と耐久性を引き上げる

活性：電解液で中間体の安定性を制御

塩基性では、カチオンを介した水素結合網が *O を不安定化



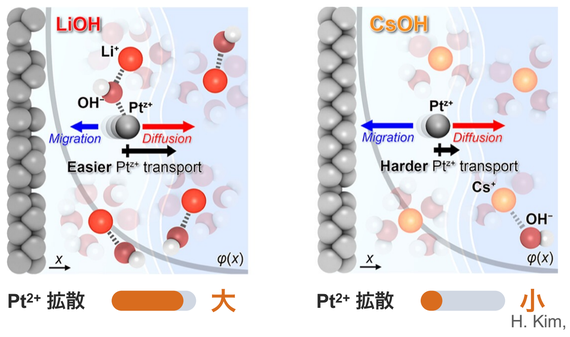
不安定化 小 ｜ 不安定化 大

1. **酸性** 水素結合網が形成されにくい
2. **塩基性** カチオン経由の水素結合網が形成
3. **結果** カチオン経由の水素結合網を介すことで塩基性では*O 同士の反発が強まり不安定化

C. Liang, Y. Katayama *et al.*, ***J. Am. Chem. Soc.*** 146, 8928 (2024)

耐久性：Pt の溶出・拡散を抑制

カチオン種で電気二重層を制御し、Pt イオンの拡散を抑える



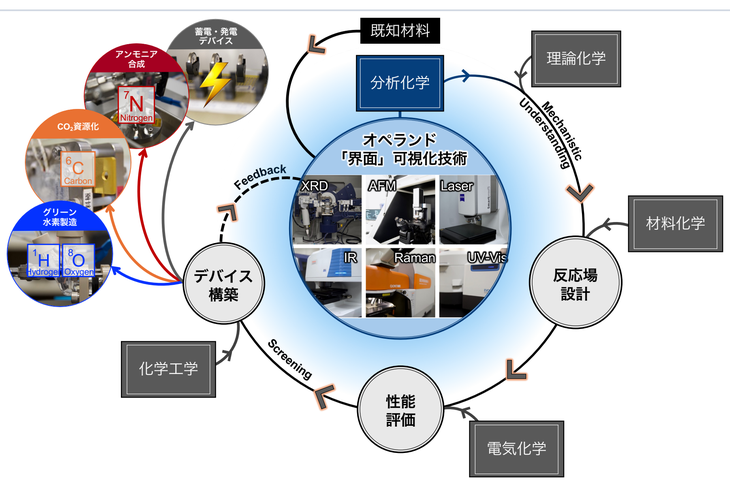
Pt^{2+} 拡散 大 ｜ Pt^{2+} 拡散 小

1. **LiOH** 拡散＞集積となり、Pt^{2+}が電極から拡散しやすい
2. **CsOH** 拡散＝集積となり、 Pt^{2+}の正味の拡散を抑制
3. **結果** Cs^+電解液系ではPt の損失を抑え、耐久性が向上

H. Kim, ..., Y. Katayama *et al.*, ***J. Am. Chem. Soc.*** 147, 4667 (2025)

06 まとめ：「測る」から「設計する」へ

メカニズム駆動型の研究サイクル



界面を見て、理解し、設計する — このサイクルで持続可能なエネルギー社会に貢献

本研究のポイント

1. **起点** オペランド「界面」可視化から、理解→設計→評価→デバイスへ
2. **統合設計** 電極（共有結合）× 電解液（非共有結合）
3. **展開** 水電解・CO_2資源化・アンモニア合成・蓄電池

今後の展望

1. **一般化** デバイス共通の「界面設計指針」へ
2. **社会実装** 企業との共同研究で、材料評価・劣化解析に活用
3. **基盤化** 研究開発の現場で使える界面解析の基盤へ

研究支援

ASPIRE ／ 日本学術振興会 ／ 科研費 KAKENHI ／ NEDO ／ JST ／ 環境省 Ministry of the Environment

大阪大学 産業科学研究所 片山 祐 ｜ yuktym@sanken.osaka-u.ac.jp