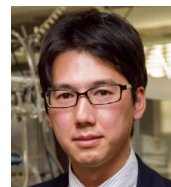


三相界面の理解と制御に基づく 高効率CO₂電解系の開発

基礎工学研究科 附属太陽エネルギー化学研究センター

准教授 神谷 和秀

<https://researchmap.jp/kamiya0908>


研究の概要

電気化学的CO₂還元反応は、常温常圧下で進行することから、次世代のCO₂資源化技術として大きな注目を集めている。高電流密度でのガス状CO₂電解を実現するためには、触媒・電解質・CO₂ガスから成る三相界面における反応過程の解明と、その設計指針の確立が重要である。我々は、このガス状CO₂電解の反応場である三相界面を対象に、マルチスケルかつマルチモーダルな解析を行った。その結果、触媒層内の粒子間空隙が電解電流密度を、また電解質中のカチオンサイズが生成物選択性を支配する重要な因子であることを明らかにした。

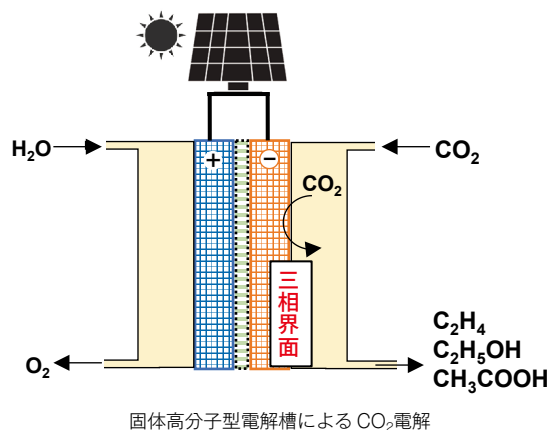
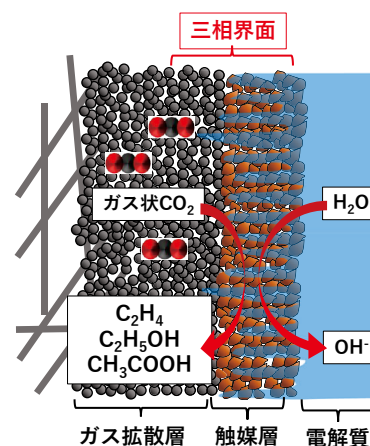
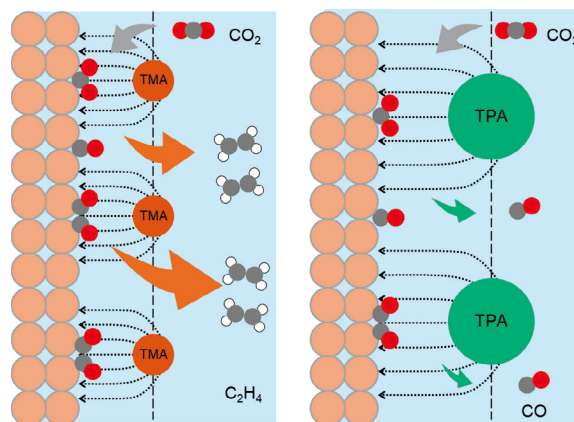
研究の背景と結果

高効率なCO₂の資源化技術の開発は炭素循環型社会構築に向けて極めて重要である。特に電気化学的手法によるCO₂還元反応（CO₂電解還元）は、クリーンかつ常温常圧で進行することから大きな注目を集めている。従来のCO₂電解は液体電解質にCO₂ガスをバブリングすることで得られる溶存CO₂を基質に用い、液浸型の電極によって評価されてきた。しかし、溶存CO₂の電解は、反応速度がCO₂の溶解度および溶液中での拡散に制限をうけるため、電流密度は数mAcm⁻²程度にとどまっていた。この制約を克服するため、近年はガス拡散電極が導入されている。ガス拡散電極を用いることで、ガス状CO₂をそのまま触媒近傍に供給することで、高電流密度での電解が実現できる。一方で、ガス状CO₂電解の反応場は、触媒・電解質・CO₂ガスから構成される複雑な三相界面であり、この界面における詳細な反応過程や高性能化に向けた設計指針はまだまだ十分に明らかになっていない。

我々は、三相界面で進行する物理化学現象を、実験および計算の両面からマルチスケルかつマルチモーダルなアプローチで解析し、その高活性化を目指してきた。まず、複数の電極における各種物理的・化学的パラメータとCO₂電解時の電流密度との相関解析を行い、電流密度を支配する要因の解明を試みた。その結果、触媒層内の粒子間空隙サイズが三相界面の面積、ひいては電解電流密度を決定する重要な因子であることを明らかにした。さらに、触媒表面に形成される電気二重層の構造にも着目した。有機カチオンを含む水溶液を電解質に用いたCO₂電解実験と、有限要素法による表面電場の数値解析を組み合わせた結果、水和半径の小さいカチオンによって形成される電気二重層内ではより強い電場が生じ、エチレンやエタノールなどのC₂以上の生成物が効率的に得られることを見いだした。

研究の意義と将来展望

CO₂電解に関する研究は、国内外で広く進められている。しかし、多くの研究は、原子レベルでの新規触媒の開発、分子レベルでの反応設計、あるいは化学工学的観点からのシステム設計に主眼を置いている。本研究では、それらの中間スケールに位置する反応場、すなわち三相界面の設計に着目した。実際、この界面を精密に設計することで、従来から知られる材料のみを用いて、世界最高水準の電解電流密度とC₂以上の生成物選択性を達成した。今後は、三相界面設計を材料設計およびシステム設計と融合させることで、CO₂電解システム全体の高性能化と社会実装への展開が期待される。

固体高分子型電解槽によるCO₂電解ガス状CO₂電解における三相界面

カチオンサイズによる電気二重層内電場強度の差

特許	特許第7641381号、特開2024-113569
論文	Kurihara, Ryo; Nakanishi, Shuji; Kamiya, Kazuhide et al. Alkali-cation-free electrochemical CO ₂ reduction to multicarbon products in aqueous electrolytes containing tetraalkylammonium cations. <i>EES Catalysis</i> . 2025, 3, 1055–1061. doi: 10.1039/D5EY00141B Inoue, Asato; Nakanishi, Shuji; Kamiya, Kazuhide et al. Small interparticle spacing in catalyst layers forms an expansive triple-phase interface for boosting the current density of CO ₂ -to-C ₂₊ conversion. <i>Small</i> . 2025, 21(23), e2500693. doi: 10.1002/smll.202500693
参考URL	https://rcsec.osaka-u.ac.jp/nakanishilab
キーワード	CO ₂ 電解、カーボンニュートラル、三相界面、固体高分子型電解槽、人工光合成