大阪大学 THE UNIVERSITY OF OSAKA
JST
Press Release
研究成果
2026年10月28日
分野：工学系
キーワード：炭素電極、炭素腐食、界面水、水素結合ネットワーク、塩素製造、電気化学、SDGs

電極表面の“水のつながり”が炭素電極の劣化を左右することを解明

―水の構造を整えて、安価な炭素電極を長持ちさせる新たな設計指針―

【研究成果のポイント】

- 電気化学デバイスに用いられる炭素電極について、電極表面の水分子どうしのつながり（水素結合ネットワーク※1）が乱れるほど、炭素電極の酸化による劣化（炭素腐食※2）が加速することを発見
- これまで炭素電極の劣化対策は炭素材料そのものの改良が中心だったが、電極表面の「水の構造」を整えるという新たなアプローチで劣化の抑制が可能に
- 水電解によるグリーン水素製造や塩素製造、燃料電池など、カーボンニュートラル社会を支える電気化学デバイスの長寿命化・低コスト化への応用に期待

❖ 概要

大阪大学産業科学研究所の片山祐准教授らの研究グループは、韓国・浦項工科大学校（POSTECH）、ソウル大学校、ドイツ・デュースブルク＝エッセン大学などの研究グループと共同で、炭素電極が高いプラスの電位のもとで酸化されて劣化する「炭素腐食」の速さが、電極表面にある水分子どうしのつながり方（水素結合ネットワーク）によって左右され、そのつながりが乱れるほど腐食が速く進むことを、反応中の電極表面を直接観察することで明らかにしました（図1）。

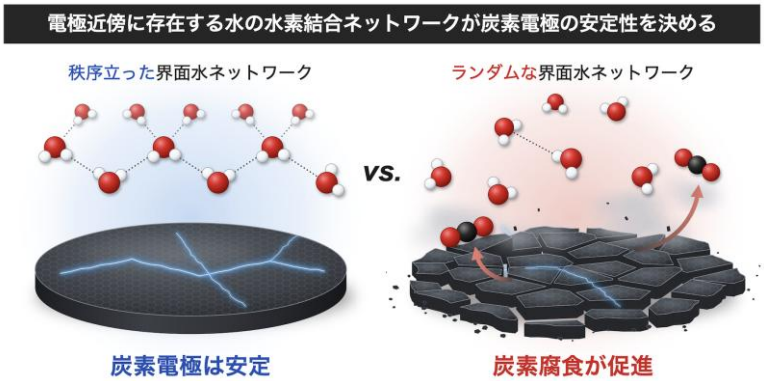

図 1：電極表面の水の構造と炭素腐食の関係。水分子どうしがしっかりつながった（秩序立った）界面水のもとでは炭素表面が安定に保たれる（左）のに対し、つながりが乱れた界面水のもとでは炭素腐食が加速する（右）。

これまで炭素電極の劣化を抑えるためには、炭素材料の結晶性を高めたり表面を化学的に修飾したりといった「材料側」の改良が主に行われてきました。一方、炭素腐食で炭素と反応する相手である「水」が、どのような状態のときに反応しやすいのかについては解明されていませんでした。

本成果では、反応が進行している最中の電極表面をリアルタイムで観察する「オペランド計測※3」を組み合わせることで、水素結合ネットワークが途切れた「弱く結びついた水」が炭素腐食に優先的に関わっていることを示しました。さらに、電極を覆う高分子材料「アイオノマー※4」を選ぶことで電極表面の水の構造を整え、炭素腐食を抑えることにも成功しました。これにより、水電解による水素製造や塩素製造、燃料電

池など、カーボンニュートラル社会を支える電気化学デバイスの長寿命化・低コスト化が期待されます。

本研究成果は、ドイツ化学会誌『Angewandte Chemie International Edition』に、10 月 24 日(土)(現地時間)に公開されました。

【片山 祐 准教授のコメント】
電気化学反応の主役は電極だと考えられがちですが、電極のすぐそばにある「水」もまた、反応を左右する重要なプレーヤーです。本研究では、目に見えないほど薄い電極表面の水の“並び方”を捉え、それが電極の寿命に大きく影響することを示しました。国際共同研究チームの力を結集して得られた成果です。電極材料だけでなく“電極のまわりの環境”を設計するという考え方が、持続可能なエネルギー社会の実現に貢献することを期待しています。

❖ 研究の背景

炭素材料は、電気をよく通し、安価で加工しやすいことから、燃料電池や水電解装置など、さまざまな電気化学デバイスの電極や、触媒を支える土台(担体)、部材として広く使われています。しかし、水を分解して酸素をつくる反応や、塩化物イオンから塩素をつくる反応のように、電極に高いプラスの電位がかかる条件では、炭素が水と反応して二酸化炭素(CO_2)に変わってしまう炭素腐食が起こります。炭素腐食が進むと、電極の構造が壊れて電気が流れにくくなったり、炭素の上に載せた触媒が失われたりして、デバイスの性能が低下してしまいます。そのため、高価で希少な貴金属材料の代わりに炭素を使おうとしても、耐久性が大きな課題となっていました。

これまでの対策は、炭素の結晶性を高める、欠陥を減らす、表面を修飾するなど、炭素材料そのものの改良が中心でした。一方、炭素腐食のもう一つの反応相手である「水」については、近年、電極表面の水の構造が触媒反応に影響することが指摘されはじめていたものの、炭素腐食との関係はほとんど調べられていませんでした。

❖ 研究の内容

研究グループはまず、代表的な炭素材料であるカーボンブラックを電極として用い、反応で発生する CO_2 を質量分析で検出する手法(微分電気化学質量分析:DEMS)と、電極表面の水分子の状態を赤外光で調べる手法(表面増強赤外吸収分光:SEIRAS)により、炭素腐食が起こっている最中の電極表面を観察しました。その結果、炭素腐食が始まると電極表面の水が消費されること、そして特に水素結合ネットワークが途切れた「弱く結びついた水」が優先的に減少することがわかりました。さらに、電解液に塩(過塩素酸ナトリウム)を加えて水素結合ネットワークを意図的に乱したところ、乱れが大きいほど CO_2 の発生量、すなわち炭素腐食の速さが増加し、両者の間に直線的な相関があることを見いだしました。これは、「水素結合ネットワークの乱れ具合」が炭素電極の安定性を表す指標になることを示しています。

この知見に基づき、研究グループは、電極を覆うアイオノマーによって電極表面の水の構造を整える手法を考案しました。一般的に使われるアイオノマー「Nafion(ナフィオン)」の代わりに「Sustainion(サステニオン)」を用いると、電極表面の水がより強く結びついた状態となり、炭素腐食による CO_2 の発生が約 51%抑制されました。

さらに、実際の触媒反応での有効性を確かめるため、炭素ナノチューブの上に白金を原子 1 個ずつ固定した「単原子触媒※5」を用い、塩化物イオンから塩素をつくる反応(塩素発生反応)で検証しました。500 回の繰り返し試験の後、Nafion を用いた電極では反応の電流が 61%低下したのに対し、Sustainion を用いた電極では 30%の低下にとどまりました。ただし、Sustainion 単独では初期の活性が低くなると

いう課題がありました。そこで、電気化学測定と理論計算から、その原因が電極表面の電荷のたまり方の違いにあることを示したうえで、2 種類のアイオノマーを混ぜて用いる手法を開発しました。その結果、Nafion と同等の高い初期活性を保ちつつ、劣化を 19%に抑えることに成功しました。

❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

本研究成果は、炭素電極の耐久性を「炭素材料そのもの」ではなく「電極表面の水の構造」という新たな切り口から向上できる可能性を示したものです。アイオノマーは燃料電池や水電解装置の電極づくりにすでに広く使われている材料であり、その選び方・組み合わせ方を工夫することで電極の長寿命化につながる可能性がある点で、今後の実用化に向けた展開も期待されます。

今後、本研究で得られた「界面の水の構造を制御する」という設計指針を、これまでに最適化されてきた電極材料と組み合わせることで、高価で希少な貴金属の使用量を減らしつつ、高い性能と耐久性を兼ね備えた電気化学デバイスの実現が期待されます。これにより、水電解によるグリーン水素製造や、水の消毒や化学工業に欠かせない塩素の製造、燃料電池など、カーボンニュートラル社会を支える技術の普及に貢献することが期待されます。

❖ 特記事項

本研究成果は、2026 年 10 月 24 日（土）（現地時間）にドイツ化学会誌『Angewandte Chemie International Edition』（オンライン）に掲載されました。

タイトル：“Interfacial Water-Networks Regulate the Anodic Stability of Carbon Electrodes”

著者名：Junsic Cho, David Hernández-Castillo, Jinjong Kim, Tomohiko Utsunomiya, Haesol Kim, Taejung Lim, Young Yong Kim, Hyo Sang Jeon, Hyung-Suk Oh, Yu Katayama*, Sang Hoon Joo*, Kai S. Exner*, and Chang Hyuck Choi*（*責任著者）

DOI：https://doi.org/10.1002/anie.8140389

なお、本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP25K01880）、科学技術振興機構（JST）先端国際共同研究推進事業（ASPIRE）（JPMJAP2422）、同 次世代研究者挑戦的研究プログラム（SPRING）（JPMJSP2138）、環境再生保全機構（ERCA）環境研究総合推進費（JPMEERF20243RA1）の一環として行われました。

❖ 用語説明

※1 水素結合ネットワーク

水分子どうしは、水素原子を介して互いに引き合う「水素結合」によって網目のようにつながっている。このつながり全体を水素結合ネットワークと呼ぶ。溶けているイオンや、電極・高分子などの表面の影響を受けて、強く整った状態にも、途切れて乱れた状態にもなる。

※2 炭素腐食

炭素材料が、高いプラスの電位のもとで水と反応して二酸化炭素（CO_2）に変化し、失われていく現象（$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H^+ + 4e^-$）。燃料電池や水電解装置などで、電極構造の破壊や触媒の脱落を引き起こす主要な劣化要因の一つ。

※3 オペランド計測

電極の表面でまさに反応が進行している時に、実際に何が起こっているのかをリアルタイムで調べる計測手法。「オペランド」は「作動中の」という意味。本研究では、反応で生じるガスを質量分析で検出する手法と、電極表面の水分子の状態を赤外光で調べる手法を用いている。

※4 アイオノマー

イオンを運ぶ性質をもつ高分子材料。燃料電池や水電解装置などでは、触媒の粉末を電極に固定する「のり」として、また電極内でイオンを運ぶ通り道として広く使われている。代表例として、陽イオン（プラスのイオン）を通す「Nafion」や、陰イオン（マイナスのイオン）を通す「Sustainion」がある。

※5 単原子触媒

金属を粒子ではなく、原子 1 個ずつばらばらの状態で担体（本研究では炭素ナノチューブ）の上に固定した触媒。貴金属を無駄なく使えるため、使用量の削減につながると期待されている。

❖ **SDGs 目標**

❖ **参考 URL**

片山 祐 准教授 研究者総覧 URL
https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/bd89296a2d26f50d.html

片山 祐 准教授 個人 HP
https://sites.google.com/view/electrocatalysislab/home

❖ **本件に関する問い合わせ先**

<広報に関するお問い合わせ>
大阪大学 産業科学研究所 広報室
TEL:06-6879-8524
E-mail:press@sanken.osaka-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課
TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432
E-mail:jstkoho@jst.go.jp

<JST 事業に関するお問い合わせ>
科学技術振興機構 国際部 先端国際共同研究推進室 ASPIRE グループ
山田 浩貴(やまだ ひろたか)
TEL:03-6261-1994　　FAX:03-5214-7379
E-mail:aspire@jst.go.jp