

令和8年9月4日

各報道機関文教担当記者 様

燃料電池触媒インクは「混ぜる前」が重要 —白金触媒の初期凝集状態がその後の分散と触媒利用性に影響—

金沢大学理工研究域機械工学系のマディハ・ミスカン博士研究員、辻口拓也教授、東京大学大学院工学系研究科の田中暉久助教、長藤圭介教授、株式会社堀場製作所開発本部の櫻本啓二郎らの共同研究グループは、固体高分子形燃料電池（PEFC）（※1）の触媒インクにおいて、アイオノマーを加える前の白金担持カーボン（Pt/C）の凝集状態が、その後の分散挙動と白金触媒の電気化学的利用性に大きく影響することを明らかにしました。

燃料電池の電極は、Pt/C 触媒（※2）、アイオノマー（※3）、溶媒などからなる「触媒インク」を塗布・乾燥して作製されます。これまで、溶媒組成やアイオノマー量、混合・分散条件の最適化が広く研究されてきましたが、触媒インクを作製する前の Pt/C 触媒の凝集状態そのものが、その後のインク形成にどのような影響を与えるかは十分に明らかになっていませんでした。本研究では、Pt/C 触媒をあらかじめ水中で異なる時間プレミキシングすることで、アイオノマー添加前の凝集状態を意図的に変化させ、その後の触媒インク形成過程を粒子径分布、レオロジー特性（※4）、SEM-EDX 分析（※5）、電気化学測定により系統的に評価しました。その結果、適度なプレミキシングによって小さく比較的均一な Pt/C 凝集状態を形成すると、その後の分散が進みやすくなり、高い電気化学的表面積（ECSA）（※6）が得られることが分かりました。一方、過度なプレミキシングでは Pt/C 触媒が再凝集し、その後長時間分散しても崩れにくい凝集構造が残り、Pt の電気化学的利用性が低下することが示されました。

これらの知見は、燃料電池触媒インクの製造において、単に「どのように混ぜるか」だけでなく、「混ぜ始める前に触媒をどのような状態にしておくか」を制御することが重要であることを示しています。今後、高性能かつ再現性の高い燃料電池電極の製造プロセス設計への活用が期待されます。

本研究成果は、2026 年 8 月 13 日に国際学術誌『*Chemical Engineering Journal*』のオンライン版に掲載されました。

【研究の背景】

固体高分子形燃料電池 (PEFC) は、水素と酸素の電気化学反応によって発電する高効率なエネルギー変換デバイスであり、自動車や定置用電源などへの利用が進められています。PEFC の性能を左右する重要な構成要素の一つが触媒層です。触媒層は一般に、白金ナノ粒子をカーボン担体上に担持 (カーボン表面に白金ナノ粒子を微細に分散・固定) した Pt/C 触媒、プロトンを伝導するアイオノマー、溶媒などを混合した「触媒インク」を塗布・乾燥して作製されます。そのため、触媒インク中で Pt/C 触媒がどのように分散し、どのような微細構造を形成するかは、白金触媒を有効に利用する上で重要です。

これまで触媒インクについては、溶媒組成、アイオノマー量、触媒濃度、分散方法、分散時間などが与える影響について数多く研究されてきました。一方、アイオノマーを添加する前の Pt/C 触媒がどのような凝集状態にあるかという「初期状態」の影響が、その後の分散挙動や触媒性能に与える影響については十分に検討されていませんでした。そこで本研究では、Pt/C 触媒の初期凝集状態をプレミキシングによって制御し、その違いがその後の触媒インク形成過程および白金 (Pt) の電気化学的利用性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としました。

【研究成果の概要】

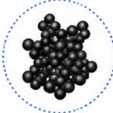
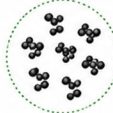
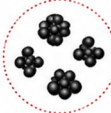
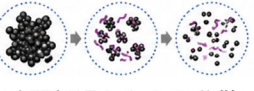
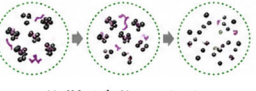
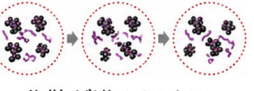
本研究グループは、Pt/C 触媒の初期凝集状態の違いを調べるため、水中でのプレミキシング条件を変え、①プレミキシングなし、②短時間プレミキシング、③長時間プレミキシングの3条件を設定しました。その後、アイオノマーとエタノールを加えて触媒インクを調製し、さらに混合時間を変化させながら、粒子径分布 (PSD)、レオロジー特性、SEM-EDX 分析、およびサイクリックボルタンメトリーによる電気化学的表面積 (ECSA) を評価しました。プレミキシングを行わない Pt/C 触媒では、初期状態に大きな凝集体 (※7) が存在し、その後の混合時間を長くすることで徐々に小さく均一な凝集状態へ変化しました。それに伴って ECSA も増加し、Pt の電気化学的利用性の向上が確認されました。これに対して、短時間のプレミキシングでは、アイオノマー添加前の段階で Pt/C 触媒を小さく比較的均一な凝集状態にすることができ、その後の分散が進みやすくなりました。この条件では、混合時間 1 時間において本研究で最も高い ECSA ($64.42 \text{ m}^2 \text{ gPt}^{-1}$) が得られました。一方、長時間プレミキシングすると、粒子径分布が再び広がる「再凝集」が生じました。この状態から触媒インクを作製すると、3 時間の混合後も比較的大きな凝集構造が残存しました。粒子径分布、レオロジー特性、SEM-EDX 分析、および電気化学測定の結果を総合すると、こうした崩れにくい凝集構造によって Pt/C 触媒表面へのアクセスが制限され、結果として Pt の電気化学的利用性が低下したと考えられます。

以上から、Pt/C 触媒の初期凝集状態は、その後の触媒インクの分散過程と Pt 利用性を決める重要な因子であり、適切なプレミキシングによって制御できることが明らかになりました。

【今後の展開】

本研究で得られた知見は、金沢大学、東京大学、株式会社堀場製作所が NEDO 事業として共同開発を進める、燃料電池触媒インクの混合分散プロセスを自動・自律的に最適化するシステム「混合分散 ROPES (Robotic Objective Process Exploration System)」の開発にもつながる成果です。今回、アイオノマー添加前の Pt/C 触媒の初期凝集状態が、その後の分散挙動や Pt の電気化学的利用性を左右する重要な因子であることが明らかになりました。今後は、このような混合・分散メカニズムに関する知見と、粒子径分布やレオロジー特性などの計測データを組み合わせることで、混合分散 ROPES における探索条件や評価指標の高度化につなげます。さらに、混合・分散条件を自動・自律的に探索する技術の確立を通じて、燃料電池触媒層の生産技術開発の効率化と高度化、さらには燃料電池の普及拡大への貢献を目指します。

本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）2025 年度～2029 年度「水素利用拡大に向けた共通基盤強化のための研究開発事業／次世代燃料電池・水電解の要素技術開発／燃料電池生産技術のためのプロセスインフォマティクス」（JPNP25002）の委託業務として実施されました。

	プレミキシングなし (NPM)	短時間プレミキシング (SPM)	長時間プレミキシング (LPM)
プレミキシング後の Pt/C初期状態	 大きな 凝集体	 小さく 均一な 凝集体	 再凝集により 大き目の 凝集体
メインミキシングでの 触媒の状況	 時間経過とともに分散	 分散が進みやすい	 分散が進みにくい
Ptの電気化学的 利用性	低  中	 高	低 

 Pt/C触媒粒子
  Pt/C凝集体（アグリゲート・アグロメレート）
  アイオノマー

図1 プレミキシングによる Pt/C 初期凝集状態の制御と、その後の触媒インク形成および Pt の電気化学的利用性への影響（模式図）。

適度なプレミキシングにより Pt/C 触媒を小さく比較的均一な初期凝集状態とすることで、その後の分散が進みやすくなり、高い Pt 利用性が得られることを示しています。

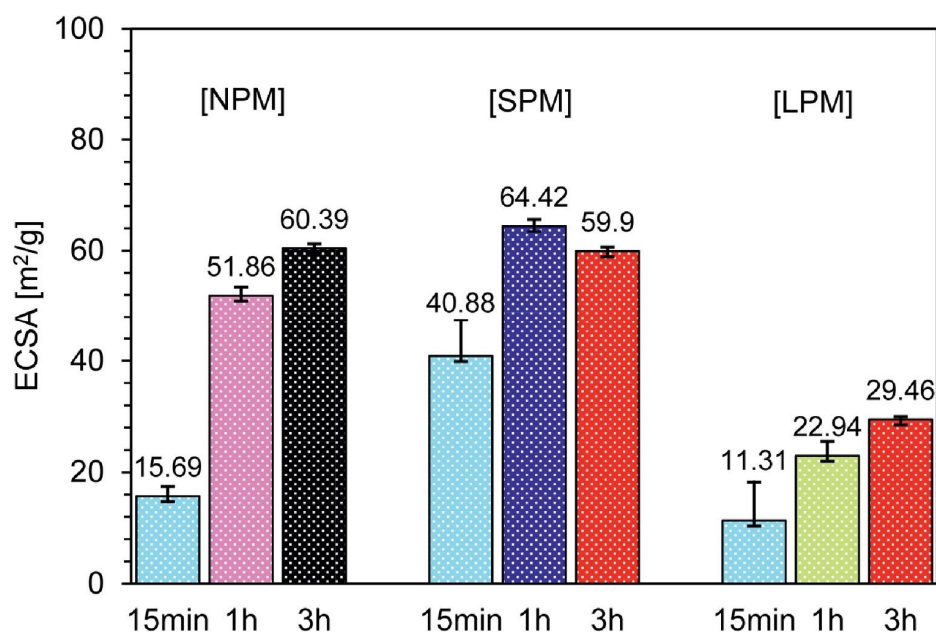


図2 プレミキシング条件および主混合時間による Pt の電気化学的 surface 積 (ECSA) の変化。

短時間プレミキシング (SPM) と 1 時間の主混合を組み合わせた条件で最大値を示しました。Reprinted from *Chemical Engineering Journal*, Miskan M. et al., “Role of initial Pt/C aggregate state in PEFC catalyst ink microstructure formation”, © 2026, with permission from Elsevier. (本図は Elsevier より許可を得て転載しています。)

【掲載論文】

雑誌名 : *Chemical Engineering Journal*

論文名 : Role of initial Pt/C aggregate state in PEFC catalyst ink microstructure formation
(固体高分子形燃料電池触媒インクの微細構造形成における Pt/C 初期凝集状態の役割)

著者名 : Madihah Miskan, Akihisa Tanaka, Keijiro Sakuramoto, Keisuke Nagato, Takuya Tsujiguchi

(マディハ・ミスカン、田中暉久、櫻本啓二郎、長藤圭介、辻口拓也)

掲載日時 : 2026 年 8 月 13 日にオンライン版に掲載

DOI : 10.1016/j.cej.2026.180577

【用語解説】

※1 固体高分子形燃料電池 (PEFC)

水素と酸素の電気化学反応によって発電する燃料電池の一種。比較的低温で作動し、高い発電効率を持つことから、自動車や定置用電源などへの応用が進められている。

※2 Pt/C 触媒

ナノサイズの白金 (Pt) 粒子をカーボン (C) 担体上に担持 (カーボン表面に白金ナノ粒子を微細に分散・固定) した触媒。PEFC の電極反応を促進するために広く用いられる。

※3 アイオノマー

イオンを伝導する機能を持つ高分子材料。本研究の触媒インクでは、Pt/C 触媒の周囲に存在し、触媒層内のプロトン伝導などを担う。

※4 レオロジー特性

液体やインクが「どのくらい流れやすいか」「どの程度構造を保とうとするか」を示す性質。本研究では、粘度や弾性的な性質を測定することで、触媒粒子同士のつながり方やインク内部の構造変化を評価した。

※5 SEM-EDX 分析

走査型電子顕微鏡 (SEM) で試料表面の微細構造を観察し、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) によって、どの元素がどの程度存在するかを調べる分析手法。本研究では、触媒層中の Pt や F の元素組成を評価し、触媒やアイオノマーの状態を考察するために用いた。

※6 電気化学的表面積 (ECSA)

電気化学反応に実際に利用できる白金表面積を示す指標。値が大きいほど、より多くの白金表面が電気化学反応に利用可能であることを意味し、触媒利用効率の評価に用いられる。

※7 凝集体 (aggregate/agglomerate)

複数の触媒粒子が集まって形成される粒子集合体。本研究では、比較的小さな Pt/C 粒子クラスターを aggregate、それらがさらに集まって形成された大きな構造を agglomerate として区別している。

【本件に関するお問い合わせ先】

■研究内容に関すること

金沢大学理工研究域機械工学系 教授

辻口 拓也（つじぐち たくや）

TEL : 076-264-6473

E-mail : tsujiguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

■広報担当

金沢大学理工系事務部総務課総務係

多賀 曜子（たが ようこ）

TEL : 076-234-6826

E-mail : s-somu@adm.kanazawa-u.ac.jp