

報道機関 各位

熊本大学

粘土鉱物から生まれた！中低温領域で機能する
プロトン伝導性ナノシート積層型固体電解質
～次世代中低温燃料電池の固体電解質に新たな可能性～

(ポイント)

- 天然の粘土鉱物からナノシート^{*1}を抽出し、精密な積層プロセスにより柔軟かつ成形性に優れた無機ナノシート積層膜の作製に成功しました。
- 得られた積層膜は、相対湿度100%下において $2.3 \times 10^{-3} \text{ S/cm @ } 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $6.2 \times 10^{-3} \text{ S/cm @ } 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $8.7 \times 10^{-3} \text{ S/cm @ } 140 \text{ }^\circ\text{C}$ のプロトン伝導性^{*2}を示しました。
- 同膜はプロトン伝導性に加え、 H_2 ガスに対して高分子固体電解質よりも高いバリア性を示し、電解質膜として要求されるガス分離性と化学的安定性を両立していました。
- 同膜を固体電解質^{*3}として適用した燃料電池では、 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (相対湿度100%)において最大 260 mW/cm^2 程度の出力を達成し、 $-10 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$ の広い温度範囲での作動も確認されました。

(概要説明)

熊本大学産業ナノマテリアル研究所の畠山一翔助教と伊田進太郎教授らの研究グループは、天然の粘土鉱物からナノシートを抽出し、精密に積層させることで燃料電池用の新規固体電解質の開発に成功しました。無機材料を固体電解質とした燃料電池は家庭用電源として実用化まで至っています。しかし、未だに作動温度は $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上と高く、市販されている車体などへの搭載は $80 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ で定常動作する高分子固体電解質を使用した燃料電池が主流となっています。次世代燃料電池搭載車両では $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上での作動も求められています。一方で高分子固体電解質は、中温動作時の水素クロスオーバー（水素が漏れ出て発電効率が低下する現象）が同程度の膜厚のセラミックス電解質と比べて大きいことやフッ素使用による環境負荷の指摘もあり、これらを一度に解決できる新規材料探索が次世代燃料電池の課題でもあります。今回、粘土鉱物から抽出した無機ナノシートを積層させた新たな無機固体電解質膜の開発に成功しました。開発した膜は、中低温領域（氷点下～ $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下）でプロトン伝導性と水素バリア性、化学的安定性を高いレベルで両立していることがわかりました。この膜を固体電解質とした燃料電池は、 $-10 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$ の広い温度範囲で作動し、 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (相対湿度100%)において最大 264 mW/cm^2 の

出力密度を達成しました。

本研究成果は令和7年5月16日に英国王立化学会が発行する科学雑誌「Journal of Materials Chemistry A」にオンライン掲載されました。

なお、本研究は防衛装備庁安全保障技術研究推進制度、科学技術振興機構先端国際共同研究推進事業（ASPIRE）、日本学術振興会科学研究費助成事業（研究課題/領域番号：23H00314）の援助を受けて行われました。

（説明）

（研究背景）

燃料電池は、二酸化炭素の排出なしに、水素と酸素から高効率に電気エネルギーを作ることができる、次世代の電源として期待されています。固体電解質の種類により、固体高分子形燃料電池（PEFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）などに分類され、それぞれの長所に応じて研究が進んできました。両者とも車載用の燃料電池としての研究開発が長年実施されていますが、SOFC搭載車両の場合はさらなる動作温度の低温化、PEFC搭載車両では動作温度の高温化が次世代の車載用燃料電池として求められています。例えば、Nafion^{*4}に代表されるパーフルオロカーボン^{*5}材料を主に使用するPEFC搭載車両では105℃での安定動作が「NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ—FCV・HDV用燃料電池ロードマップ（解説書）—2025年2月」で次世代燃料電池の2030年頃の開発目標として設定されています。一方で高分子固体電解質は、2030年以降の定常動作温度の目標と想定される120～150℃といった中温動作時の水素クロスオーバーが、同程度の膜厚のセラミックス電解質と比べて大きいことや、プロトン伝導性の低下など高分子材料の構造に由来する根本的な課題もあります。高分子固体電解と同程度の温度領域で機能する無機固体電解質が開発できれば、高分子固体電解質の課題を解決でき、さらにこれまでに開発してきたPEFC搭載車両の燃料電池システムの多くがそのまま適用できる可能性もあるため、燃料電池搭載車両の性能向上がいち早く達成できるかもしれません。

（具体的な成果）

天然の粘土鉱物であるモンモリロナイト^{*6}から単層のナノシートのみを抽出し、精密に積層させることで無機ナノシートの積層膜を作製しました。作製した膜は、機械的強度を補強するためのバインダーなどは一切使用しておらず、シリコン、アルミニウム、マグネシウムを主成分とする100%無機物質から成る膜となります。写真（図1右）から、無機ナノシート積層膜は高い柔軟性を持つことがわかります。単層のナノシートのみを積み重ねて膜化することで、無機材料であるにもかかわらず柔軟性を持つ膜の作製に成功しました。高い成形性も持ち合わせており、滴下乾燥、吸引ろ過、スピコートなどの手法により、膜厚や形状、面積を制御した膜を容易に作製することができます。原料となるモンモリロナイトなどの粘土鉱床は世界各地に存在し、日本国内にもみることができ、原材料費用を安く抑えることができる可能性もあります。開発した無機ナノシート積層膜は、-20～140℃の広い温度範囲でプロトン伝導性を示し、140℃（相対湿度100%）で 8.7×10^{-3} S/cmのプ

ロトン伝導性を示しました (図2(a))。同時に、Nafionの100倍以上優れた水素ガスバリア特性を示し (図2(b))、水素および酸素の暴露下で2週間以上安定であることも確認しました。これらの結果は、無機ナノシート積層膜が、固体電解質膜として要求されるプロトン伝導性、水素ガスバリア性、化学的安定性を両立していることを示しています。実際に、無機ナノシート積層膜を固体電解質として使用した燃料電池の性能評価を行いました。結果として、90 °C (相対湿度100%) で264 mW/cm²の出力密度を得ることができました (図3)。これは、無機ナノシート積層膜の柔軟性と高いガスバリア特性、化学的安定性により、2.5 μmという薄さでも、電極の短絡および水素リークなしで燃料電池に組み込めたためです。さらにこの燃料電池は、-10~140 °Cと広い温度範囲で作動することも確認しました (図4)。氷点下以下や100 °C以上の中温領域の燃料電池動作は電解質の性能のみではなく、電極や動作条件も重要な制御因子であるため、現時点はその出力は不十分ですが、膜構造の更なる改善により出力向上を見込めると期待して継続研究を進めています。

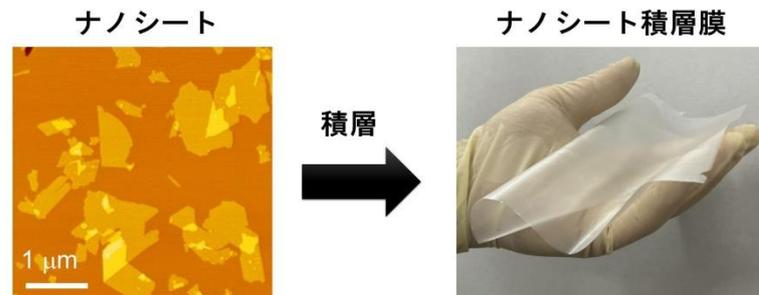


図1 ナノシートの原子間力顕微鏡像 (左) とナノシートを積層して作製した無機ナノシート積層膜の写真 (右)

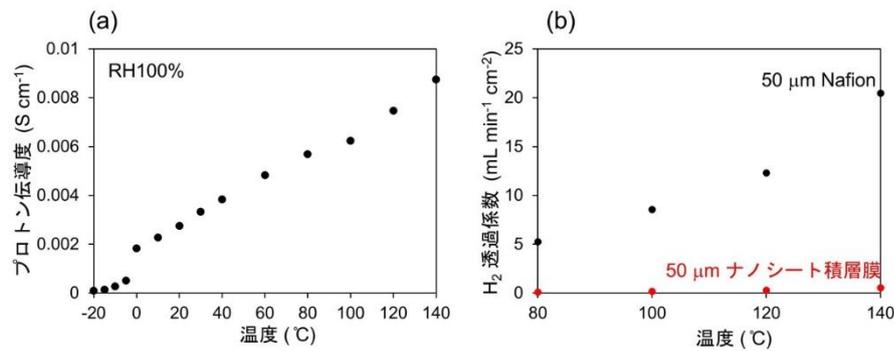


図2 (a)相対湿度100%下での無機ナノシート積層膜の-20~140 °Cにおけるプロトン伝導度。(b)無機ナノシート積層膜およびNafionの80~140 °Cにおける水素ガス透過係数。

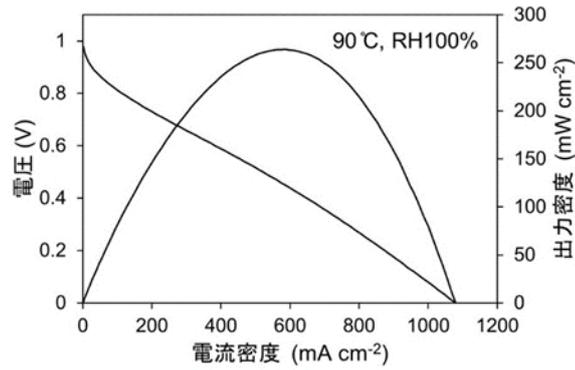


図3 無機ナノシート積層膜を固体電解質とした燃料電池の90 °C（相対湿度100%）における評価結果。

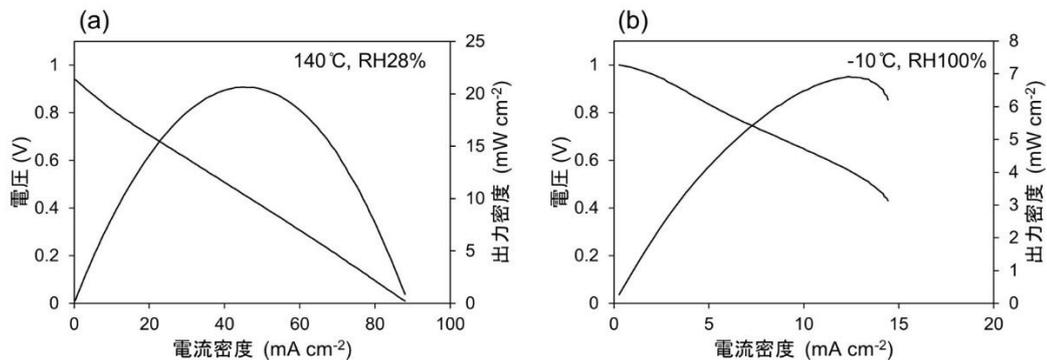


図4 無機ナノシート積層膜を固体電解質とした燃料電池の(a)140 °C（相対湿度28%）および(b)-10 °C（相対湿度100%）における評価結果

（今後の展開）

今回開発した固体電解質は優れた特性を持つことに加え、天然粘土鉱物由来の材料であり、低環境負荷かつ経済的にもすぐれた材料となりえます。そのため、開発した膜を用いた燃料電池開発を進めていくことで、持続可能な人類の発展に大きく貢献できます。

[用語説明]

* 1 ナノシート

原子スケール(1 nm 程度)の厚さを持つ2次元物質のこと。3次元の材料では得られないユニークな物性を示す。例として2010年にノーベル賞を受賞したグラフェンが有名である。

* 2 プロトン伝導性

プロトン（水素イオン、 H^+ ）を伝導させる性質のこと。高いプロトン伝導性を持つ物質をプロトン伝導体という。

* 3 固体電解質

イオンを伝導する性質を持つ固体のこと。通常の固体は原子やイオンが固定されており動くことができないが、固体電解質の場合は電圧印加によりイオンを伝導させることができる。燃料電池の固体電解質ではプロトンまたは酸化物イオン（ O^{2-} ）が伝導する。

* 4 Nafion

最も有名な高分子プロトン伝導体。パーフルオロカーボンの主鎖にスルホン

基が末端についた側鎖がついた構造を持つ。

*5 パーフルオロカーボン

炭化水素の水素原子がすべてフッ素に置き換わった構造を持つ有機物の総称。高い化学的、熱的安定性を持つ。

*6 モンモリロナイト

ケイ素、アルミニウム、マグネシウム、鉄などから成るケイ酸塩鉱物の1種で、世界各地で算出することができる。日本では山形県、宮城県、新潟県、島根県、岡山県、群馬県などで産出されている。

(論文情報)

論文名 : Low-temperature fuel cells using proton-conducting silicate solid electrolyte

著者 : Kazuto Hatakeyama,* Tatsuki Tsugawa, Haruki Watanabe, Kanako Oka, Sho Kinoshita, Keisuke Awaya, Michio Koinuma, and Shintaro Ida*

掲載誌 : Journal of Materials Chemistry A

doi.org/10.1039/D5TA02486B

URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ta/d5ta02486b>

【お問い合わせ先】

熊本大学産業ナノマテリアル研究所

担当 : 伊田 進太郎 教授

電話 : 096-342-3658

e-mail : ida-s@kumamoto-u.ac.jp