



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 7 年 3 月 5 日

岡山大学

星和電機株式会社

次世代アルミニウムイオン電池革命！ 安全・低コスト・高容量を実現する正極炭素材料の設計指針を提案

◆発表のポイント

- ・比表面積⁽¹⁾・平均細孔径・全細孔容積が異なる多孔質炭素（PC: Porous Carbon）⁽²⁾を正極⁽³⁾とするアルミニウムイオン電池で、平均細孔径の制御により放電容量が向上する可能性を示しました。
- ・高い放電容量を実現するため、従来の比表面積重視の設計とは異なり、最適な細孔径を維持しつつ比表面積を増やす新たな設計視点を提案しました。

岡山大学大学院環境生命自然科学研究科（工）の陳逸楓 大学院生、同大学学術研究院環境生命自然科学学域の鈴木弘朗 研究准教授、西川亘 助教、林靖彦 教授等は、星和電機株式会社の梅澤成之 博士（同大大学院自然科学研究科博士後期課程修了）と共同で、多孔質炭素の平均細孔径制御とアルミニウムイオンの吸脱着反応によって、安定に充放電できる高容量のアルミニウムイオン電池（AIB: Aluminum Ion Battery）に必要な正極 PC 材料の細孔物性の同定に成功しました。

今回の研究成果は、2025 年 2 月 12 日に英国王立化学会（Royal Society of Chemistry）の学術雑誌「*Journal of Materials Chemistry A*」に掲載（First published）されました。

リチウムイオン電池（LIB: Lithium Ion Battery）は幅広く活用されていますが、資源問題、環境問題、安全性などの課題を抱えており、LIB に代わる次世代電池技術の開発競争が加熱しています。本研究グループは、資源が豊富で、低コスト、安全性が高く、高速充電が可能で高い理論容量が期待されるため、金属負極にアルミニウムを用いた電池（AIB）の研究開発を実施しています。AIB の正極材料の候補として、資源が豊富で、低い製造コストという両方の条件を満たす多孔質炭素 PC の利用に注目していますが、一方で PC を用いた AIB は放電容量が低いという課題を抱えています。そこで、異なる細孔物性（比表面積・平均細孔径・全細孔容積）を有する PC を正極として使用することで、平均細孔径が放電容量に大きく影響することを明らかにしました。最適な平均細孔径と大きな比表面積をもつ PC を選択することで、AIB の放電容量を増大させることが可能となりました。この研究成果から、高容量の AIB 実現に向け、従来の比表面積重視の設計とは異なる新たな視点を取り入れた電極設計の知見を提供しました。



PRESS RELEASE

◆研究者からのひとこと

本研究は、多孔質炭素正極の設計指針となり得る成果で、次世代高容量アルミニウムイオン電池の実現に寄与します。今後も持続可能なエネルギー社会の実現に向けて、安全・安心の蓄電デバイスの研究を進めていきます。(陳)

2 価金属イオン電池の開発が加速する一方で、3 価金属イオン電池の研究は未だ大きな壁に直面しています。今回、数々の困難を乗り越えた革新的な成果は、学生の発想と挑戦から生まれたものです。今後、水系および固体電解質を用いたアルミニウムイオン電池 (AIB) の実現を目指し、国際共同開発を視野に入れたポストリチウムイオン電池の研究を牽引する研究開発拠点を築いていきます。(林)



陳逸楓 大学院生



林靖彦 教授

■発表内容

<現状>

携帯電子機器、エネルギー貯蔵システム、電気自動車の急速な発展に伴い、二次電池⁽⁴⁾の需要が増加しています。現在、リチウムイオン電池 (LIB) が広く活用されていますが、資源の安定確保、環境負荷、安全性、コストといった課題を抱えており、次世代の二次電池技術 (ポストリチウムイオン電池) の開発が加速しています。その中でも、多価カチオンを利用した電池の研究が盛んに行われています。多価カチオン電池⁽⁵⁾は、安価で豊富な資源を利用でき、水系電解液を使用できるため、高い安全性を有しています。さらに、高いエネルギー密度を実現できる可能性があり、持続可能で環境負荷の少ない二次電池として期待されています。

日本では、マグネシウム、カルシウム、亜鉛などの 1 価や 2 価の金属イオンを活用した次世代電池の基礎研究が進められています。その中で、本研究グループは 3 価のアルミニウムイオンに注目しています。アルミニウムは、多価カチオンの中でも資源量が豊富でコストが低く、体積あたりの容量に優れています。さらに、金属 1 原子が酸化・還元反応する際に 3 つの電子の移動を伴うため、1 電子反応の LIB に比べ、高容量が期待されます。

しかし、アルミニウムイオン電池 (AIB) の開発は、主に正極材料の電気化学的性能によって制約されており、実用化の可能性を大きく制限しています。そのため、高い放電容量と優れたサイクル安定性を持つ正極材料の設計・合成が、AIB 研究の重要な課題となっています。

AIB に使用される正極材料には、炭素材料、金属酸化物、遷移金属カルコゲナイド、有機金属構造体⁽⁶⁾などがあります。この中でも、炭素は軽元素であり、資源が豊富で、また構造が多用であり、様々な物性を発現する。そのため、炭素材料は AIB の正極材料として注目されており、優れた電気化学的性能を示しています。炭素系正極材料には、黒鉛、グラフェン、カーボンナノチューブ (CNT : Carbon Nanotube)⁽⁷⁾、多孔質炭素 (PC) などがあり、特に PC は、その多孔性や多様な形態、合成の容易さから AIB の正極材料の候補として注目されており、PC 正極の性能向上には、形態や構造の調整など、材料特性を最適化する戦略が必要です。



PRESS RELEASE

<研究成果の内容>

異なる比表面積・平均細孔径・全細孔容積を持つ多孔質炭素（PC1～PC7）を用意し（表 1）、それを正極として、図 1 に示すような AIB セルを作製しました。

図 2a は、電流密度 0.10 A/g における PC1～PC7 の充放電の回数の 10 サイクル目の放電容量と、それぞれの細孔特性との関係を示しています。10 サイクル目の放電容量は、PC1～PC7 でそれぞれ 44.48、9.48、103.66、137.81、70.79、118.81、128.79 mAh/g でした。比表面積、平均細孔径、および放電容量の関係进行分析した結果、これらの細孔特性が放電容量に複雑に影響し、相互に関連していることが分かりました。一般に、比表面積が大きいほど吸着サイトが多くなり、吸着効率が向上すると考えられます。しかし、実験結果はこの仮定と一致しませんでした。具体的には、PC1 と PC2 の平均細孔径はどちらも 1.09 nm ですが、比表面積が 1616 m²/g（PC1）から 2266 m²/g（PC2）に増加すると、放電容量は 44.48 mAh/g から 9.48 mAh/g に減少しました。これは、細孔が小さすぎて AlCl₄⁻イオンを十分に吸着できないことを示唆しています。一方、平均細孔径が 2.60 nm（PC3）に増加すると、放電容量は 103.66 mAh/g まで向上し、AlCl₄⁻イオンの吸着が可能であることが示されています。

比表面積が 2514 m²/g（PC3）から 3299 m²/g（PC4）に増加すると、放電容量も 103.66 mAh/g から 137.81 mAh/g に増加しました。このことから、適切な細孔径が確保されていれば、比表面積の増加が放電容量の向上につながるということが分かります。しかし、平均細孔径が 19.6 nm（PC5）まで増加すると、放電容量は 70.79 mAh/g に減少しました。比表面積の減少を考慮すると、大きな細孔径は約 2 nm の細孔よりも効率的にイオン吸着を促す可能性があることが示唆されます。

さらに最適な細孔径を調べるために、平均細孔径が 8.45 nm の PC6 を用いたところ、放電容量は 118.81 mAh/g まで増加しました。一方、平均細孔径を 4.43 nm（PC7）まで小さくすると、比表面積は 1500 m²/g と小さいにもかかわらず、放電容量は 128.79 mAh/g に達しました。また、平均細孔径が 4 nm を超える場合、放電容量は比表面積に概ね比例する傾向が見られました。

今回の結果から、細孔径が 2～4 nm の多孔質炭素は、比表面積が大きく、優れた電気化学特性を示しました。最適な細孔径（約 2 nm）を維持しつつ、比表面積が最大である PC4 が最も高い放電容量を示し、高速充放電が可能（図 2b）であり、繰り返し特性にも優れています（図 2c）。従って、AIB の放電容量を向上させるには、PC 材料の平均細孔径と比表面積の制御が不可欠です。現在、PC 材料の比表面積・平均細孔径・全細孔容積を精密に制御する革新技术を開発中で、次世代炭素材料の創成を加速し、AIB の社会実装を 2030 年代中に実現することを目指しています。

PRESS RELEASE

<社会的な意義>

PC は、高い比表面積と独特な細孔構造を持つため、エネルギー貯蔵分野で注目されています。特に、AIB の正極材料として PC を応用することは、持続可能で低コストなエネルギーシステムの実現に貢献するものです。

従来のリチウムイオン電池（LIB）の電極材料に使用されるレアメタル（リチウム、コバルト）と比較して、AIB はアルミニウムの豊富な資源量（リチウムの約 4500 倍）と高い安全性（不可燃性）を備えており、環境負荷を低減しつつ経済的なメリットを提供します。さらに、PC を活用することで電極の高容量化、エネルギー効率の向上や長寿命化が期待され、次世代の再生可能エネルギー社会を支える重要な要素となるでしょう。

今回の研究は、脱炭素社会の実現やエネルギー格差の解消に貢献し、持続可能な未来への道を切り開く重要なステップとなります。災害発生時や計画停電等における公共インフラや産業エリアにおいて、システムダウンの回避や照明用の蓄電池として展開できるよう、アルミニウムイオン電池の実用化に向け、引き続き研究を進めてまいります。

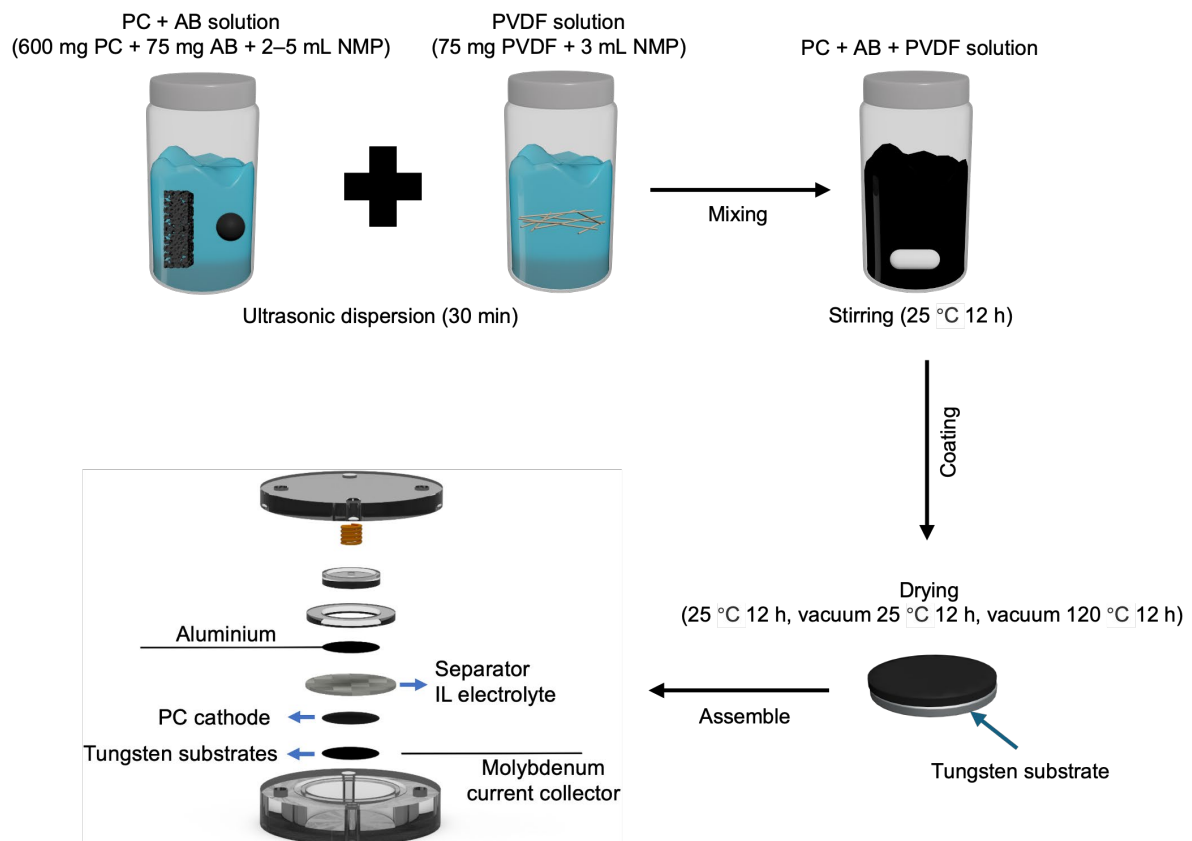


図 1 PC 正極の作製とアルミニウムイオン電池（AIB）セルの作製と構造。

PRESS RELEASE

表 1 PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7 の比表面積と細孔構造特性

多孔質炭素	比表面積 (m ² /g)	平均細孔径 (nm)	全細孔容積(cm ³ /g)
PC1	1616	1.09	0.76
PC2	2266	1.09	1.00
PC3	2514	2.60	1.41
PC4	3299	2.48	1.71
PC5	709	19.6	2.59
PC6	1031	8.45	2.34
PC7	1500	4.43	1.95

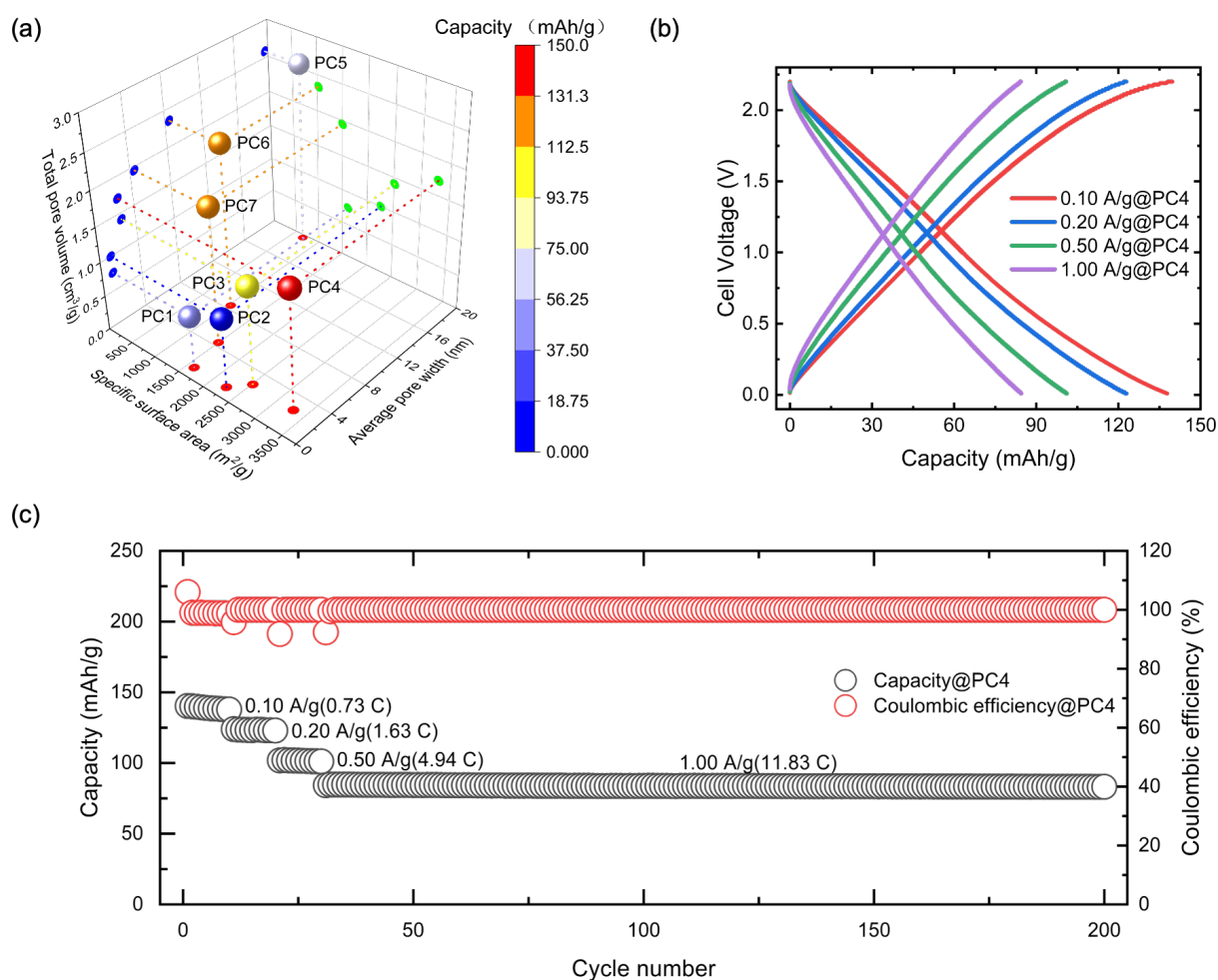


図 2 (a) 正極活物質として PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7 を用いた AIB の電流密度 0.10 A/g における放電容量と細孔特性。(b) 正極活物質として PC4 を用いた AIB の異なる電流密度における定電流充放電曲線。(c) 正極活物質として PC4 を用いた AIB の繰り返し特性、クーロン効率⁽⁸⁾とCレート⁽⁹⁾。



PRESS RELEASE

■論文情報

論文名 : Enhanced capacity of aluminum-ion batteries by adjusting the average pore size of the porous carbon cathode

掲載紙 : *Journal of Materials Chemistry A*

著者 : Yifeng Chen*, Hiroo Suzuki, Shu Fukumoto, Chiyu Nakano, Takeshi Nishikawa, Shigeyuki Umezawa, and Yasuhiko Hayashi*

DOI : 10.1039/D4TA08671F

URL : <https://doi.org/10.1039/D4TA08671F>

■研究資金

筆頭著者の陳逸楓は、JST SPRING（JPMJSP2126）の支援を受けて本研究を実施しました。

■補足・用語説明

1. 比表面積 : 幾何学的な面積ではなく、ガス吸着測定によって算出された、物質の単位重量あたりの面積です。
2. 多孔質炭素 : 炭素材料の一種で、多数の細孔（ポア）を持つ構造を特徴とします。一般的に、高い比表面積、優れた吸着性能、化学的安定性を有しています。細孔の大きさによって、マクロ孔 (>50 nm)、メソ孔 (2 - 50 nm)、ミクロ孔 (< 2 nm) に分類されます。
3. 正極 : 充電時に電子を放出し（酸化反応）、放電時にはその逆の反応（還元反応）をする電極です。
4. 二次電池 : 充電することで繰り返し利用できる電池です。
5. 多価カチオン電池 : 電極で金属 1 原子が酸化還元反応する際に伴う電子の数が複数あること。例えば、2 価のマグネシウムイオン電池 (Mg^{2+}) や亜鉛イオン電池 (Zn^{2+})、なら 2 電子反応、3 価のアルミニウムイオン電池 (Al^{3+}) は 3 電子反応します。
6. 有機金属構造体 : 金属イオンまたは金属クラスターと有機配位子が結合して形成される多孔性の結晶材料です。有機金属構造体は、高い比表面積、規則的な細孔構造、化学的・熱的安定性を持ち、多くの分野で応用されています。
7. カーボンナノチューブ : 円筒構造をもつナノスケールの炭素材料です。円筒の直径はおおよそ 1 nm から 50 nm で、電気伝導性や機械的強度に優れています。
8. クーロン効率 : 充電時に充電された容量に対する放電時の放電容量の比率を百分率で表した値です。この数値が高いほど、充電された電気量を無駄なく放電で利用できます。
9. C レート : 充放電速度を表します。満充電した電池を 1 時間で完全放電させるのに必要な電流値を 1 C と定義した値です。電池の急速充電の可能性や大出力用途に適しているかどうかを判断する目安となる重要なパラメーターです。



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



PRESS RELEASE

＜お問い合わせ＞

岡山大学学術研究院 環境生命自然科学学域

教授 林 靖彦

（電話番号）086-251-8230

（FAX）086-251-8230（林）



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



岡山大学は持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています。