

電極の空隙制御でリチウム空気電池の出力電流が 10 倍に

～超軽量 & 大容量バッテリー開発を加速、ドローンの抜本的長時間飛行化の実現へ大きな一歩～

NIMS は、成蹊大学との共同研究により、次世代型電池として注目されているリチウム空気電池の高出力化に成功しました。カーボンナノチューブからなる高空隙な電極開発により、出力電流が 10 倍向上しました。本研究で開発したリチウム空気電池は、リチウムイオン電池と比べてエネルギー密度が極めて高いだけでなく、出力特性も大幅に向上されます。これにより小型ドローンのホバリングに必要な電力を供給できるようになり、航続時間の大幅な向上が期待されます。この研究成果は、2 月 9 日に Journal of Power Sources 誌のオンライン版に掲載されました。

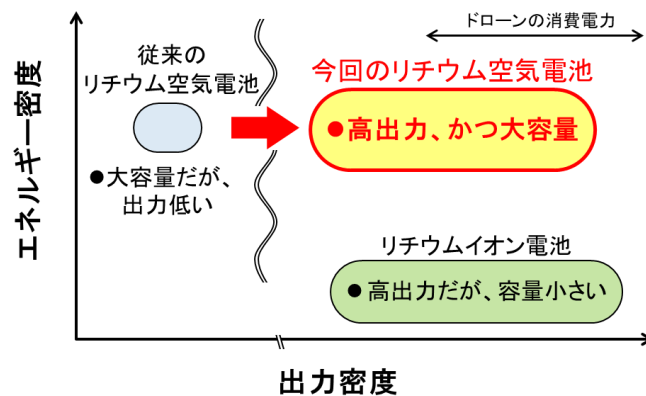
研究成果の概要

■ 従来の課題

リチウム空気電池は、リチウムと空気中の酸素を使って放電・充電する二次電池です。リチウムイオン電池と比べて 5-10 倍の高エネルギー密度化が可能で、電池の圧倒的な軽量化・大容量化を実現する蓄電技術として注目されています。しかしリチウム空気電池の電池反応は非常に遅く、極めて微弱な出力電流しか得られませんでした。リチウム空気電池に蓄電されている大きなエネルギーを活用するには、リチウム空気電池の抜本的な高出力化が必要とされていました。

■ 成果のポイント

今回、研究チームはリチウム空気電池の高出力化に必要な電極を開発しました。カーボンナノチューブを用いて電極を高空隙化することで、酸素の高効率吸収が可能となりました。さらにこの電極を酸素の拡散輸送に優れた電解液と組み合わせることで、従来に比べて 1 ケタ以上の出力電流向上に成功しました。このリチウム空気電池の重さあたりの出力密度を調べたところ、ドローンがホバリングに必要な電力を供給できることが分かりました。



電池のエネルギー密度と出力密度の関係

■ 将来展望

今後、この成果をもとにリチウム空気電池セルのスケールアップを図ることで、小型ドローンやマイクロロボットの電源として利用できる超軽量 & 大容量バッテリーの開発を目指していきます。

■ その他

- 本研究は、NIMS エネルギー・環境材料研究センター 二次電池材料グループの野村 晃敬 主任研究員、成蹊大学工学部の東 翔太 客員研究員(現所属：東京高専)、小沢 文智 助教、齋藤 守弘 教授からなる研究チームによって、JST A-STEP トライアウト(課題番号:JPMJTM22AQ)、科学研究費助成事業(24K08154) および NIMS 連携拠点推進制度の一環として行われました。

• 本研究成果は、2025年2月9日に Journal of Power Sources のオンライン版に掲載されました。

研究の背景

リチウム空気電池はリチウム (Li) と空気中の酸素(O_2)を使って発電し、充電して繰り返し使うことができる二次電池です。リチウムは最も軽い金属で、電池電極に用いることで高い電池電圧を得ることができます。また、酸素は空気中から取り込んで利用するため、電池に組み込んでおく必要がありません。このため非常に軽量かつ大容量な電池開発が可能で、現在のリチウムイオン電池⁽¹⁾と比べて約 10 倍の高いエネルギー密度⁽²⁾をもつリチウム空気電池が既に実証されています。

このようなリチウム空気電池の用途として有望視されているのがドローン⁽³⁾のような小型電動飛行体のバッテリーです。ドローンは人に代わって様々な場所や空間に移動して作業することができるため、小口荷物の運配送や空撮、測量、インフラ設備点検など、多岐にわたる産業分野で活用が進められています。しかし、電池で動かす小型ドローンは、一度の充電で飛行できる時間が 10-20 分程度に限られており、頻繁な充電とバッテリー交換が必要なため、その活用範囲は限定的です。ドローンの飛行時間を引き延ばすには、バッテリーのエネルギー密度の向上、すなわち電池の軽量・大容量化が必須です。しかし現在のリチウムイオン電池は、既にその性能限界近くまで開発つくされており、抜本的な飛行時間の伸長は困難でした。

リチウムイオン電池比で最大 10 倍程度の高エネルギー密度化が可能なりチウム空気電池バッテリーを開発できれば、数時間程度の連続飛行ができる小型ドローンが実現します。ところが従来のリチウム空気電池は、電池反応⁽⁴⁾が非常に遅いため、極めて微弱な出力電流しか取り出すことができませんでした。ドローンはモータープロペラを高速回転させて空中をホバリング⁽⁵⁾しながら飛行するため、その消費電力は非常に大きく、バッテリーには高い出力特性が要求されます。バッテリーのエネルギー密度がいくら向上しても、出力特性が低いままではドローンを飛行させることはできません。リチウム空気電池をドローン向けバッテリーへ展開するには、リチウム空気電池の出力特性向上が不可欠な課題となっていました。

研究内容と成果

リチウム空気電池の出力特性向上に向けて、まず研究チームはカーボン電極における電池反応の追跡を行いました。リチウム空気電池は、負極にリチウム金属、正極にカーボン電極を用い、セパレータを介してこれらの電極を重ねることで構成します(図 1 (左))。放電後のカーボン電極の酸素の分布を調べたところ(図 1 (右)の緑色部分)、電極の内部にはほとんど酸素が取り込まれておらず、反応が進んでいないことが分かりました。

そこで研究チームはカーボン電極の高空隙化に取り組みました。従来、リチウム空気電池向けのカーボン電極は、カーボンブラックのようなカーボン粉体をシート状に圧着させて作製されます。しかし、このようなカーボン電極は、カーボン粒子どうしが密に充填されているため、酸素ガスを吸収しづらく、非常にゆっくりとした放電反応しか進めることができませんでした。研究チームは繊維状のカーボンであるカーボンナノチューブ⁽⁶⁾に着目し、酸素を効率よく吸収できるような電極の構造形成に取り組みました。カーボンナノチューブの長さや太さといった材質の選択、カーボンナノチューブの分散や成膜方法を調節し、非常に空隙率の高い構造(空隙率 90%超)でありながら、優れた自立性と導電性を発揮するカーボン電極を開発しました。これにより、高効率な酸素ガス吸収と放電反応が可能となりました(図 1 (右))。

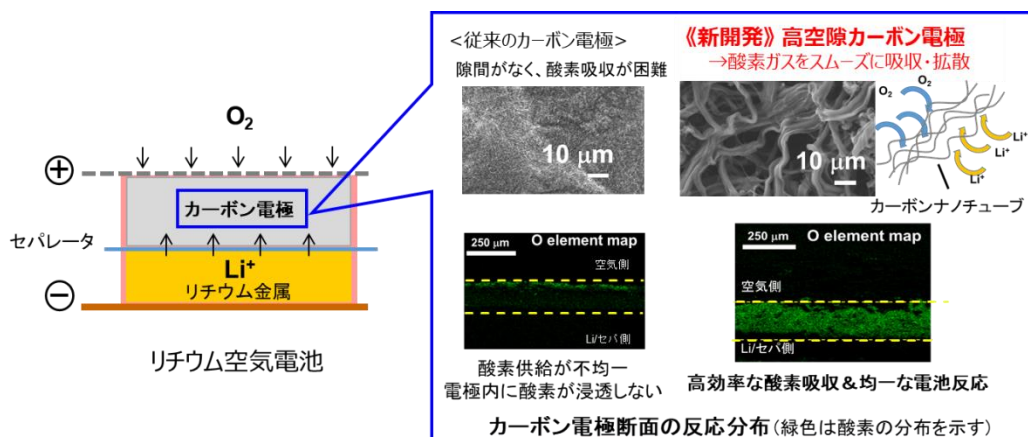


図 1 リチウム空気電池の構造(左)とカーボン電極(右)

次に研究チームは電池反応を加速する電解液の設計に取り組みました。電解液はリチウムイオンと酸素をカーボン電極の反応面へ運ぶ重要な役割を果たします。出力電流が大きくなるほど、リチウムイオンと酸素の迅速な輸送が求められます。リチウム空気電池の高い電池電圧と酸化ストレスに耐えるアミド溶媒⁽⁷⁾の電解液を用い、リチウム空気電池セルの内部抵抗を分析したところ、電解液中の酸素の拡散輸送にかかる抵抗が大きな抵抗成分となっていることを突き止めました。そこで酸素の拡散性を高めるべく、粘度の低いアミド溶媒をベースに電解液を設計することにより、セルの内部抵抗を抑え出力電流を大幅に増大させることに成功しました（図2）。

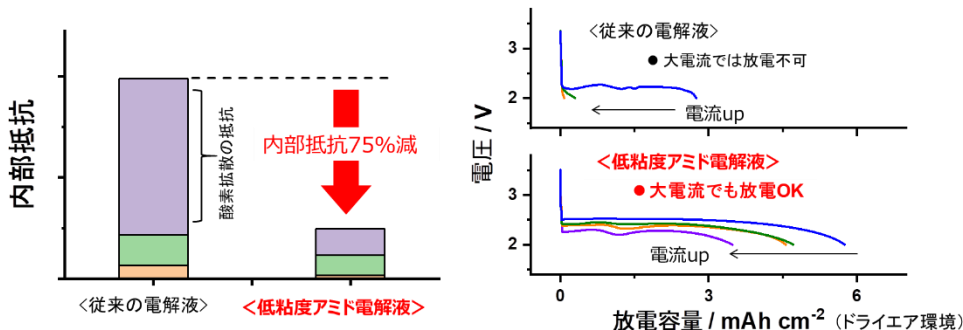


図2 リチウム空気電池セルの内部抵抗成分と電解液による放電特性の違い

さらに研究チームは開発した高空隙カーボン電極と低粘度アミド電解液を用い、リチウム空気電池の設計・試作を行いました。低粘度アミド電解液は揮発性が顕著なため、電解液の揮発を最小限に抑える電池構造が必要になります。研究チームはカーボン電極の上に薄いガス拡散層を設け、このガス拡散層の断面方向から酸素ガス交換を行う電池構造を採用しました。これにより、電解液の揮発を抑え長期間の電池試験を行えるようにしました（図3（左））。試作したリチウム空気電池の放充電サイクル試験を行ったところ、従来のリチウム空気電池と同じ高いエネルギー密度（ $\sim 500 \text{ Wh/kg}$ ）を達成しながら、出力密度⁽⁸⁾を10倍程度まで（ $\sim 500 \text{ W/kg}$ ）向上させることに成功しました。ドローンのホバリングには少なくとも $400\sim 500 \text{ W/kg}$ 程度の出力密度を発揮するバッテリーが必要です。今回のリチウム空気電池の高出力化の成功により、リチウム空気電池でもドローンホバリングに必要な電力を供給できることとなります（図3（右））。

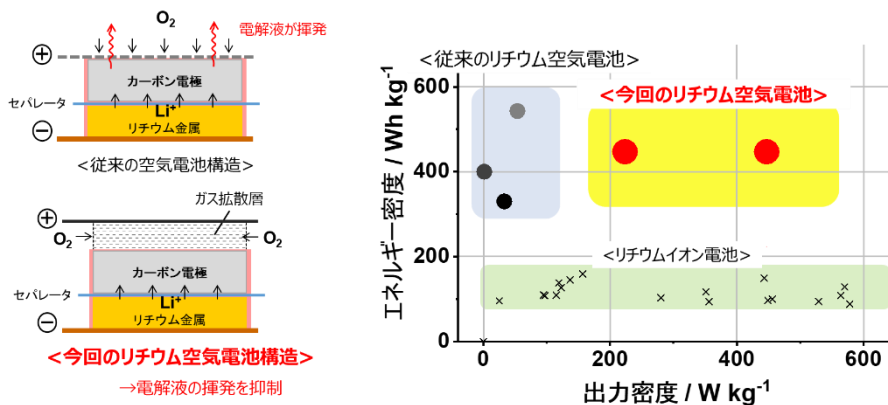


図3 開発したリチウム空気電池の構造（左）および電池エネルギー密度と出力密度の関係（右）

今後の展開

小型ドローンは一度に飛行できる時間が短く、移動距離や作業時間に大きな制約がある点がドローンの普及促進を困難にしています。高エネルギー密度で、ドローンも飛ばすことができるバッテリー開発により、飛行時間を抜本的に引き延ばすことができます。たとえば1時間程度の連続飛行により、離島や山間部への日常的な運配送や、緊急物資の輸送迅速化、トンネル・橋梁・送電線など様々なインフラ設備の点検・保守作業の大幅コストダウンなど、ドローンの一般普及が現実味を帯びてきます。

軽量・小型・大容量なバッテリーは、災害時に発生するがれきの内部や、火山、原子炉など、極限空間を探索・調査するマイクロロボットにも展開可能です。高エネルギー密度かつ高出力密度のリチウム空気電池バッテリーの開発を継続し、こうしたデバイスの駆動時間と信頼性向上に貢献してまいります。

■ 掲載論文

題目	Highly porous carbon nanotube air-electrode combined with low-viscosity amide-based electrolyte enabling high-power, high-energy lithium-air batteries
著者	Akihiro Nomura, Shota Azuma, Fumisato Ozawa, Morihiro Saito
雑誌	Journal of Power Sources
DOI	10.1016/j.jpowsour.2025.236426
掲載日時	2025年2月9日

■ 用語解説

(1) リチウムイオン電池

正極と負極の間をリチウムイオンが行き来して放電や充電を行う二次電池。現代の社会インフラを支える重要蓄電技術。スマホ、ノートパソコン、タブレット端末のほか、電気自動車、ドローンなどのバッテリー電源。

(2) エネルギー密度

電池の重さまたは体積当りに蓄えられるエネルギーの量。重量エネルギー密度が高いほど軽量かつ大容量。体積エネルギー密度が高いほど小型かつ大容量。リチウム空気電池はリチウムイオン電池と比べて重量エネルギー密度を 5-10 倍程度向上できる。体積エネルギー密度も数倍程度向上できる。

(3) ドローン

モータープロペラを高速回転させて揚力を得て飛行する小型無人飛行体。垂直方向に離着陸が可能。

(4) 電池反応

電池電極（負極と正極）の化学物質が酸化・還元反応することで、電池から電気エネルギーを取り出したり（放電）、または逆に電気エネルギーを加えて電池を充電する反応。

(5) ホバリング

空中で静止浮遊している状態。

(6) カーボンナノチューブ

カーボン（炭素）だけで構成されるナノスケールのチューブ（筒）状の材料。太さ、長さなどにより性質が異なる。

(7) アミド溶媒

アミド結合を構造に含む分子からなる有機溶媒。

(8) 出力密度

電池の重さまたは体積当たりどれくらいのパワー（仕事率）を引き出せるかを示す指標。電池の出力密度が高いほど、軽くて小さな電池であってもパワフルな力で大きなモノをうごかすことができる。エネルギー密度と出力密度は（出力密度）×（放電時間）＝（エネルギー密度）という関係にある。

本件に関するお問い合わせ先

研究内容について	野村晃敬 NIMS 二次電池材料グループ・主任研究員 E-mail: NOMURA.Akihiro@nims.go.jp TEL: 029-860-4977 URL: https://www.nims.go.jp/nims-green/group/rbm_grp.html
	齋藤守弘 成蹊大学 理工学部・教授 E-mail: mosaito@st.seikei.ac.jp TEL: 0422-37-3750

	URL https://acserv.st.seikei.ac.jp/saitolab/
報道・広報について	NIMS 国際・広報部門 広報室 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
	成蹊学園 企画室 広報グループ 〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町 3-3-1 E-mail: koho@jim.seikei.ac.jp TEL: 0422-37-3517, FAX: 0422-37-3704

NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、国内で唯一、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。世界を構成する様々な「物質」。その中で私たちの生活を支えているのが「材料」です。その材料も、大きくは有機・高分子材料、無機材料に分類でき、無機材料はさらに金属材料とセラミックス材料とに分けられます。石器時代から産業革命を経て現代まで、人類の発展はこの材料の進歩とともにありましたが、近年では、地球規模の環境や資源問題の解決手段のひとつとしても注目が高まっています。NIMS はその物質・材料に関する研究に特化した国立研究開発法人として、「材料で、世界を変える」をテーマに、未来を拓く物質・材料の研究に日々取り組んでいます。

【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所！ <https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html>

NIMS ビジョン <https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision>