

2026年4月7日

報道機関 各位

## 体温から電気を取り出す、世界最高性能の有機熱電材料を実現 充電不要な人体装着型センサー用電源素子の普及へ前進

### 【本研究のポイント】

- ・フラレン分子と三酸化モリブデンナノクラスターから成る新奇ナノ複合体を創製。
- ・巨大熱電効果を利用することで、導電率  $\sigma$  に対して熱伝導率  $\kappa$  が増加しない低  $\sigma$  領域でパワーファクター<sup>注1)</sup>を最大化することに成功。
- ・有機熱電材料としては世界最高の性能指数  $zT = 0.81$  を実現。

### 【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科の中谷 真人 准教授、尾上 順 教授らの研究グループは、名古屋大学未来材料・システム研究所の小川 智史 准教授および電源開発株式会社の西井 俊明 上席研究員(兼名古屋大学工学研究科招聘教員)と共同で、フラレン分子と金属酸化物ナノクラスターを複合化することで、有機熱電材料において世界最高の熱電性能指数が発現することを発見しました。

体温を電気に変える熱電素子は、超スマート社会の人体装着型センサー用電源としての利用が期待されています。熱電素子を人体に密着させ体温から電力を得るためには、柔らかく軽量で高性能な有機熱電材料が必要不可欠です。熱電材料は、材料の電気伝導率  $\sigma$ 、ゼーベック係数  $\alpha$ 、絶対温度  $T$ 、熱伝導率  $\kappa$  を用いて、無次元性能指数  $zT = \sigma \alpha^2 T / \kappa$  で性能が評価され、実用化の目安である  $zT > 1$  を実現するために、 $\sigma$  と  $\alpha$  を増加させ、 $\kappa$  を抑制するさまざまな提案がなされてきました。しかしながら、「 $\sigma$  と  $\alpha$  のトレードオフの関係」および「 $\sigma$  と  $\kappa$  の比例関係」の物理法則により、 $zT = 0.5$  を超える有機熱電材料の創製が非常に困難でした。これに対し、本研究グループは、フラレン膜に酸化モリブデンナノクラスターをドーピングすることで  $zT = 0.81$  とこれまでの有機熱電材料として世界最高性能を有することを見出しました。

本研究成果は2026年3月26日付にて国際科学雑誌「Scientific Reports」オンライン版に掲載されました。本研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業(課題番号: JP18H01826、JP20H02463、JP23K26401)及び電源開発共同研究助成の支援のもとで行われたものです。

## 【研究背景と内容】

ヒトの肌に密着させ体温を電気に変える熱電素子(図 1 左下)を装着型センサー用の電源として実用化するためには、「高性能」で「柔軟」かつ「軽量」な熱電材料の開発が必須です。現在、室温付近で利用可能な熱電材料としては、無機半導体( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  系材料など)が実用化されていますが、その多くは硬くて脆く、有害な元素を含むため、身の回りにはあまり普及していません。熱電材料の性能は無次元性能指数  $zT$  ( $zT = \sigma S^2 T / \kappa$ : 導電率  $\sigma$ 、ゼーベック係数  $\alpha$ 、絶対温度  $T$ 、熱伝導率  $\kappa$ )により評価され、実用化( $zT > 1$ )には、 $\sigma$ と $\alpha$ を共に増加させ、かつ $\kappa$ を抑制することが必要です。柔軟な熱電材料は、主に炭素ナノチューブや高分子材料を中心に研究開発されてきましたが、これら既存材料では「 $\sigma$ と $\alpha$ のトレードオフ関係」および「 $\sigma$ と $\kappa$ の比例関係」により $zT = 0.5$ を超えることが非常に困難でした(図 2 左)。

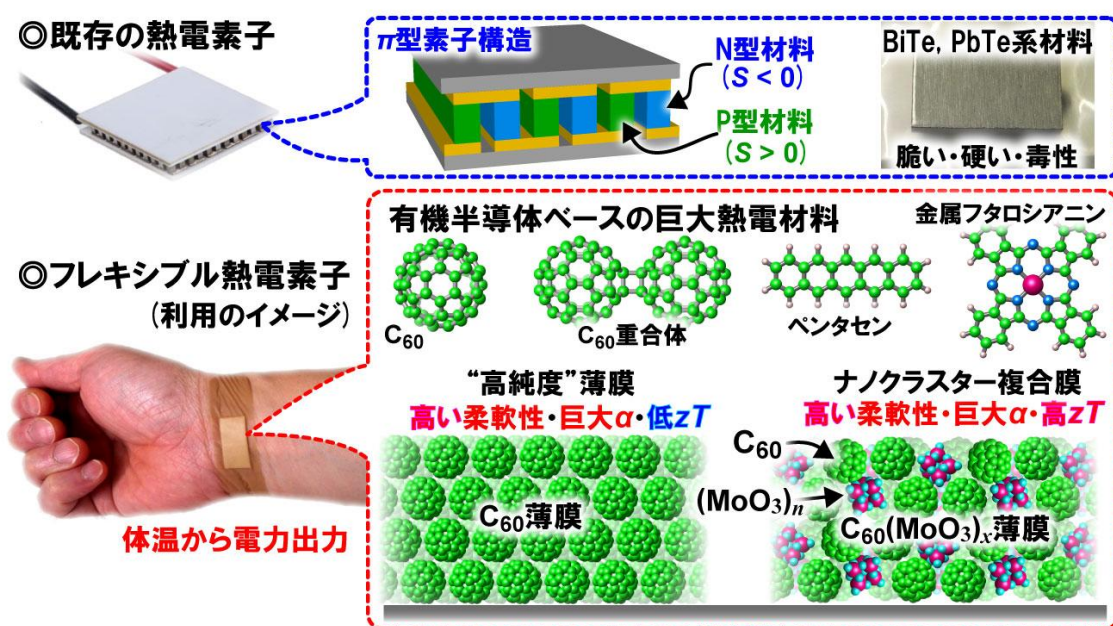


図 1. 既存の無機材料および有機半導体ベースの熱電素子

一方、フラーレン( $\text{C}_{60}$ )分子やポルフィリン誘導体等から成る有機半導体は、柔らかく、既存材料の100~1000倍の非常に大きな $\alpha$ 値を示すこと(巨大熱電効果<sup>[1,2]</sup>)に加え、 $\kappa$ が既存材料の10分の1程度であることから、高性能熱電材料の候補として注目されてきました。しかしながら、有機半導体の $\sigma$ は極めて低い(既存材料の100万~1000万分の1以下)ため、室温における $zT$  ( $zT < 0.01$ )は実用化には程遠いものでした。また、実用的な熱電素子は、N型材料( $\alpha < 0$ )とP型材料( $\alpha > 0$ )を直列接続した $\pi$ 型構造から構成されます(図 1 上)。既存の無機半導体では不純物原子をドーピングすることで $\sigma$ の向上およびN型/P型特性の制御が可能です。一方、有機半導体では、ドーパント(不純物原子や金属錯体など)の候補が少なく、ドーピングによって巨大熱電効果が失われてしまうことも高性能化(高い $zT$ )を困難にしている大きな要因でした。このように、これまで有機半導体では熱電特性の制御性が低く、巨大熱電効果を利用した熱電素子は実現していませんでした。

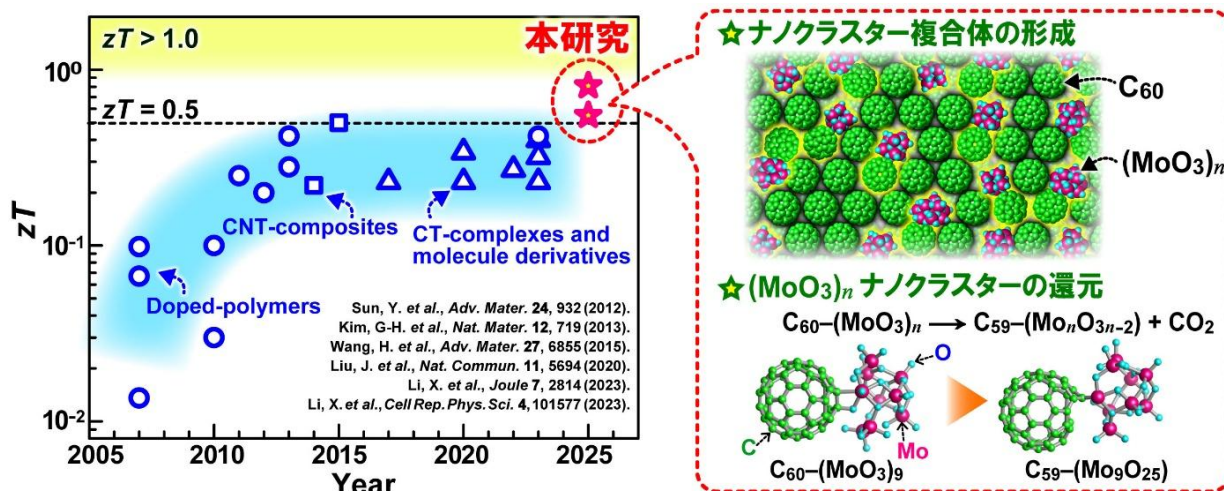


図 2. 有機熱電材料の  $zT$  の発展(左)と本研究で開発した熱電材料(右)

本研究では、 $C_{60}$  と  $MoO_3$  の真空共蒸着によって組成比  $x = MoO_3/C_{60}$  が精密制御された  $C_{60}(MoO_3)_x$  複合膜を作製し(図 2 右)、 $x$  に対する  $\alpha$  と  $\sigma$  を真空一貫で評価したところ、非常に大きな  $\alpha$  (36 mV/K) を保持しながら  $C_{60}$  薄膜に比べて  $\sigma$  が 1000 倍まで向上すること(図 3a)、さらに P 型特性が発現すること、をそれぞれ見出しました。これは、 $MoO_3$  が  $C_{60}$  膜中でナノクラスターを形成し  $C_{60}$  への正孔ドーパントとして機能していることに起因します<sup>[3]</sup>。図 3b(緑○)に示すように、 $C_{60}(MoO_3)_x$  薄膜は、巨大熱電効果の発現によって、既存材料よりも 3~4 桁低い低  $\sigma$  領域( $10^{-4} \sim 10^{-2}$  S/cm)でパワーファクター( $PF = \sigma \alpha^2$ )が最大値をとります。この領域では、 $\sigma$  とともに  $\kappa$  が増加しないことが理論予測されています。 $MoO_3$  のドーパ量が非常に少ないことから  $C_{60}$  単結晶の熱伝導率  $\kappa$  の値で  $C_{60}(MoO_3)_x$  複合膜の  $zT$  を算出すると、 $zT = 0.14$  と推定されます(図 3b 右軸)。この値は  $C_{60}$  薄膜の値に比べて約 100 倍の値であり、他の有機熱電材料と比べても大きな値です。

また、 $C_{60}(MoO_3)_x$  薄膜の加熱処理による  $\sigma$  と  $\alpha$  の変化を調べたところ、約  $100^\circ\text{C}$  までの加熱では、組成  $x$  に関わらず熱電特性はほぼ一定であることから、 $C_{60}(MoO_3)_x$  薄膜は室温駆動の素子材料として優れた熱的安定性を有することが分かりました。さらに、 $x = 0.05$  および  $x = 0.09$  の複合膜をやや高温( $110 \sim 180^\circ\text{C}$ )で加熱すると、 $PF$  の値が急激に増加しました(図 3b の赤☆および青☆)。 $PF$  の増加は低  $\sigma$  領域において起きることから、 $C_{60}(MoO_3)_{0.05}$  複合膜の  $zT$  は 0.81 と推定されます。この値はこれまで報告されている有機熱電材料としては最も高い値です。

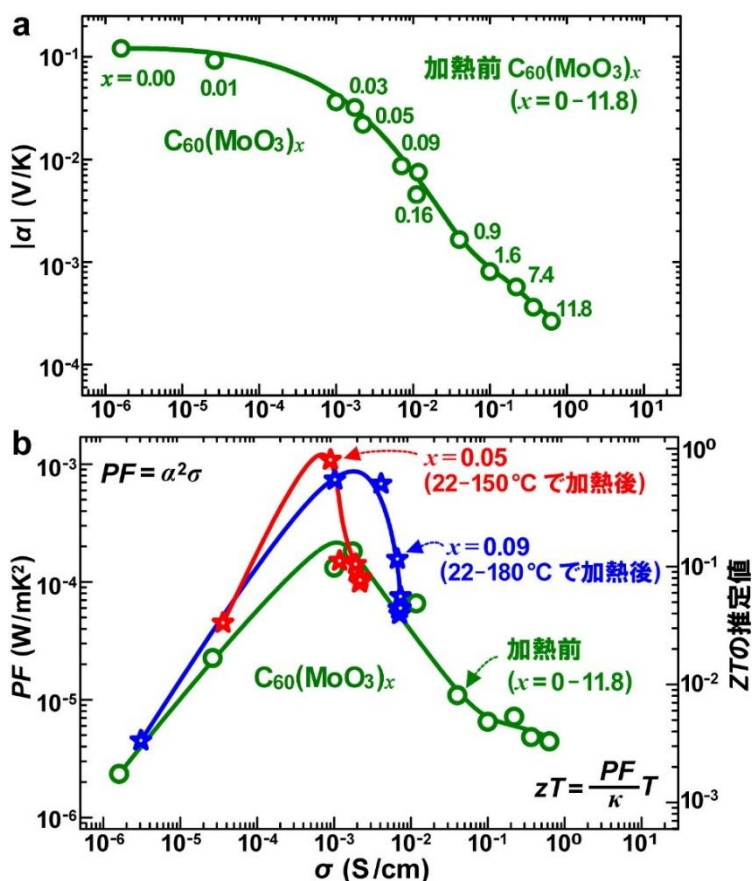


図 3.  $C_{60}(MoO_3)_x$ 膜の(a)  $|\alpha| - \sigma$  特性および(b)  $PF - \sigma$  特性.(b)の右軸は  $zT$ の推定値

### 【成果の意義】

本研究では、 $C_{60}$ と $(MoO_3)_n$ ナノクラスターを複合化させることで、有機半導体のみに発現する巨大熱電効果を保持しつつキャリアドーピングすることにより 0.5 を超える高い熱電性能指数を得ることに世界で初めて成功しました。これまで、既存材料では高  $\sigma$  領域 ( $\sigma > 10$  S/cm)で  $PF$ を最大化することで熱電特性を制御してきましたが、この場合、「 $\sigma$ と $\kappa$ の比例関係」によって  $zT$ 向上が抑制されることが有機熱電材料の発展を阻んできました。これに対して、本研究では、 $C_{60}(MoO_3)_x$ に発現する巨大熱電効果を利用することで、 $\sigma$ とともに $\kappa$ が比例しない低  $\sigma$  領域( $10^{-4} \sim 10^{-2}$  S/cm)で  $PF$ を最大化し、有機熱電材料としては世界最高値の  $zT = 0.81$  を実現することに成功しました。本研究のアプローチは、有機熱電材料の研究開発において、 $zT = 0.5$  の壁の先にある未踏領域へ踏み出すための新たな材料設計指針となることが期待されます。

また、 $C_{60}(MoO_3)_x$ はサイズ 1 ナノメートル前後の 2 種類のナノクラスター材料から構成される複合体と見なすことができます。このナノクラスター複合体は、ナノクラスター間の弱い共有結合や少量の電荷移動を介して固体が構成されることから、分子結晶と共有結晶の中間に位置する新物質群として知られています<sup>[4]</sup>。本研究では  $C_{60}$ と $(MoO_3)_n$ から成るナノクラスター複合体が  $zT = 0.81$  を示す高性能 P 型熱電材料として振る舞うことを示しました。これまで、 $(MoO_3)_n$ 以外にも数多の金属酸化物ナノクラスターの作製と物性が報告されています。これら種々の金属酸化物ナノクラスターを  $C_{60}$ や有機半導体

と複合化させることで、炭素ナノチューブや高分子ベースの有機熱電材料よりもはるかに高性能( $zT > 1 \sim 1.5$ )かつ極めて高い物性制御性( $\alpha$ 、 $\sigma$ 、P型/N型など)を有する“新たな熱電材料群”の創製が期待できます。

以上のように、「熱電材料の高性能化に関する新たな指針」とそれに基づく「新たな柔らかい高性能熱電材料群の存在」が本研究によって指し示されました。

## 【参考文献】

- [1] H. Kojima, *et al.*, *Mater. Chem. Front.* **2**, 1276–1283 (2018).
- [2] M. Nakamura, *et al.*, *Faraday Discuss.* **250**, 361–376 (2024).
- [3] M. Nakaya, *et al.*, *J. Chem. Phys.* **158**, 054701 (2023).
- [4] S. A. Claridge, *et al.*, *ACS Nano* **3**, 244–255 (2009).

## 【用語説明】

注 1) パワーファクター:

ゼーベック係数 $\alpha$ の二乗と電気伝導率 $\sigma$ の積( $\alpha^2 \sigma$ )で表され、単位温度差あたりの発電電力の大きさに関する指標として用いられる。

## 【論文情報】

雑誌名: Scientific Reports

論文タイトル: Novel strategy for boosting thermoelectric performance of organic materials with low electrical conductivity

著者: Masato Nakaya,<sup>1</sup> Shun Yamamoto,<sup>1</sup> Satoshi Ogawa,<sup>2</sup> Toshiaki Nishii,<sup>1,3</sup> Jun Onoe<sup>1</sup>

DOI: 10.1038/s41598-026-44966-8

URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-026-44966-8>

雑誌名: Carbon

論文タイトル: High-performance and anomalous thermoelectric properties of organic-inorganic nanocomposites consisting of fullerene molecules and molybdenum trioxide nanoclusters

著者: Masato Nakaya,<sup>1</sup> Shun Yamamoto,<sup>1</sup> Takuya Kawai,<sup>1</sup> Jun Onoe<sup>1</sup>

DOI: 10.1016/j.carbon.2025.120374

※著者所属

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科、<sup>2</sup> 名古屋大学未来材料・システム研究所、<sup>3</sup> 電源開発株式会社



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。  
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

