

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02463

研究課題名(和文)炭素-金属酸化物ナノクラスター集積固体の創製と高性能熱電材料への応用

研究課題名(英文)Formation and application of nanocluster-assembled materials composed of carbon- and metal-oxide-nanoclusters

研究代表者

中谷 真人(Nakaya, Masato)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30725156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：C60薄膜は既存の無機熱電材料に比べ数100倍の大きなゼーベック係数を示すため、次世代フレキシブル熱電材料として期待されているが、実用化には出力因子の向上とP型/N型特性の制御が必須である。本研究では、真空共蒸着法によってC60と三酸化モリブデンナノクラスターからなるナノクラスター集積固体薄膜が形成できること、および、この複合薄膜がC60薄膜に比べて約100倍大きな出力因子と高い熱的安定性を示す高性能フレキシブル熱電材料として機能することを世界に先駆けて発見した。この複合薄膜はP型特性を示すが、加熱処理によってN型特性が発現するため、実用的な型熱電素子の主構成要素としての有用性も示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素ナノクラスター(C60)と三酸化モリブデンナノクラスターから構成されるナノクラスター集積固体薄膜の開発に世界で初めて成功した。このナノクラスター固体は、主構成要素であるC60薄膜と同等の巨大ゼーベック係数を示しつつ1000倍大きな導電性を有するのでC60薄膜に比べて約100倍大きな出力因子を示すことが明らかになった。この複合薄膜では、組成比や加熱処理温度を調整することでゼーベック係数、導電率およびP型/N型特性を制御可能であるので実用的な型熱電変換素子への応用にも適しており、近未来のIoT社会を支える人体装着型ワイヤレス電源の実現に資することが期待される。

研究成果の概要(英文)：High performance flexible thermoelectric (TE) conversion devices have been expected to be power sources for enormous number of wearable sensors for future internet-of-things (IoT). Although the fullerene C60 film is one of candidates of novel flexible TE materials because of its giant Seebeck coefficient ($S > 100$ mV/K) at room temperature, improvement of its very low electrical conductivity ($< 10^{-6}$ / cm) is required for practical use. However, it is generally difficult to realize TE materials exhibiting large values of both S and σ simultaneously owing to the trade-off relationship between them in conventional materials.

In this research project, it has been demonstrated for the first time that the novel high performance TE thin film was created by assembly from C60 molecules and molybdenum trioxide nanoclusters. This nanocluster-assembled thin film exhibited excellent thermoelectric power factor that is 100 times larger than that of C60 film.

研究分野：ナノサイエンス、ナノ計測、ナノ物質科学、環境発電

キーワード：エネルギーハーベスティング 熱電変換 ゼーベック効果 ナノクラスター フラーレン 金属酸化物

1. 研究開始当初の背景

人間の体温を電力変換する熱電素子は、モノのインターネットを構成する人体装着型センサーのワイヤレス電源として利用価値が高い。“人体装着型熱電素子”を実現するためには、高性能で低生体負荷の熱電材料が必要である。熱電材料の性能は、導電率 σ 、ゼーベック係数 S 、温度 T 、熱伝導率 κ を用いて、無次元性能指数 $ZT = \sigma S^2 T / \kappa$ として評価され、既存の無機材料 (BiTe 系材料等) では、「 σ と S のトレードオフ」や「 σ と κ の比例関係」が ZT の向上 ($ZT > 2.5$) を阻んできた^[1]。一方、フラーレン (C_{60}) や金属フタロシアニンに代表される高純度有機半導体薄膜は、既往材料に比べ、小さな κ (無機熱電材料の約 10^{-1} 倍) と非常に大きな S (無機熱電材料の $10^2 \sim 10^3$ 倍) を示すことが報告されており^[2,3]、人体装着型熱電素子への応用が期待されている。一方、これら有機薄膜の σ は非常に小さいため、十分な大きさの出力因子 $PF = \sigma S^2$ が得られないことが弱点である。固体材料の σ の向上には、不純物原子をドーピングすることでキャリア密度を増加させることが一般的だが、有機半導体へ不純物原子をドーピングすると、 S 値の著しい低下 (σ と S のトレードオフ) が発生するので、本質的な解決にはならない。

一方、直径が約 1 nm のナノクラスター同士を配位子やファン・デル・ワールス力、弱い共有結合や僅かな電荷移動などの相互作用を介して集積すると、個々のナノクラスターの性質を反映しつつ複合体としての特性・機能が発現することが理論的に示されている^[4,5]。このようなナノクラスター固体は共有結晶と分子結晶の中間に位置する新材料系として捉えることができる。即ち、 C_{60} と適切なナノクラスター物質をナノクラスター固体として複合化させると、 C_{60} 薄膜の大きな S と小さな κ を保持しつつ、 C_{60} 薄膜よりも大きな σ をもつ新奇な高性能熱電材料群を創製できる可能性があるものの、これまでこのような材料系は実現していない。

2. 研究の目的

本研究では、 C_{60} と金属酸化物ナノクラスターからなるナノクラスター固体群の創製および高性能熱電材料として応用するための指針を得ることを目的とした。この目的を達成するために、真空共蒸着法によって C_{60} と金属酸化物からなる複合薄膜を形成し、その構造、 C_{60} - 金属酸化物間の相互作用、複合薄膜の電気伝導特性および熱電特性を詳しく調べた。特に金属酸化物ナノクラスターの組成やサイズ n 、 C_{60} との相互作用を因子とした熱電物性 (S , σ , N 型 / P 型特性) の制御法に関して研究を進めた。

3. 研究の方法

本研究では、金属酸化物として三酸化モリブデン (MoO_3) を真空中で加熱昇華させ、 C_{60} と共蒸着することで複合薄膜を形成した。 MoO_3 の蒸着には自作の抵抗加熱型蒸着機構を使用した。複合膜薄膜の σ および S は同一真空装置内に設置された計測機構を用いて真空一貫で評価した。 σ は四探針計測法で評価し、 S は独自に開発したマイクロスケール熱電計測法によって評価した。このマイクロスケール熱電計測法では、分子薄膜上に形成したマイクロギャップ電極間へ温度差 ΔT ($5 \sim 6$ K) を与えたときの熱起電力 ΔV を計測することで、 $S = -\Delta V / \Delta T$ をマイクロスケールで評価できる。 $C_{60}(MoO_3)_x$ 複合薄膜中における MoO_3 の組成 x は X 線光電子分光 (XPS) によって C_{60} 由来の $C1s$ ピークと MoO_3 由来の $Mo3d$ ピークの面積比に相対感度因子を考慮することで算出した。また、 C_{60} 薄膜上での MoO_3 の吸着構造、凝集構造および C_{60} - MoO_3 間の相互作用を調べるために、 C_{60} 薄膜上に MoO_3 を真空蒸着し走査トンネル顕微鏡およびトンネル分光 (STM / STS) で評価を行い、DFT 計算の結果と比較した。

4. 研究成果

(1) $C_{60}(MoO_3)_x$ 複合薄膜の熱電特性

C_{60} と MoO_3 を互いの供給量比を様々に変化させて雲母基板上へ真空共蒸着することで $C_{60}(MoO_3)_x$ 複合薄膜を形成し、 σ および S を測定した (図 1)。図 1 の横軸は各複合膜の XPS 測定から得られた C_{60} に対する MoO_3 の組成比 x である。 C_{60} 薄膜 ($x = 0$) の σ は非常に小さい値 ($1.6 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) を示すが、 MoO_3 組成の増加に対して著しく増加し $x = 11.8$ の複合膜では C_{60} 薄膜に比べ 10^5 倍以上の大きな σ を示した。さらに、 x に対する S の変化を系統的に調べたところ [図 1(b)] C_{60} 薄膜は大きな負の S 値 (-121 mVK^{-1}) を示すが、 x を僅かに

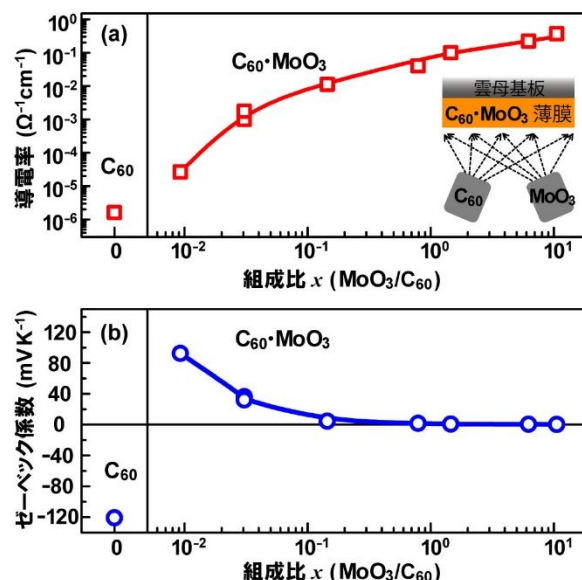


図 1. 真空共蒸着法で作製した $C_{60}(MoO_3)_x$ 複合膜の組成比 x に対する (a) σ および (b) S

増加させると大きな正の値 (+93 mVK⁻¹) に反転した。x の増加に対して S の絶対値は減少するものの、0.01 < x < 11.8 の組成比領域において複合膜は常に正の S 値を示した。これは、C₆₀(MoO₃)_x 複合膜は正孔がキャリアとして振舞う P 型熱電材料であり、MoO₃ が正孔ドープトとして機能していることを示す。

図 2 中の で示したデータは C₆₀(MoO₃)_x 複合膜 (0 < x < 11.8) の導電率とゼーベック係数の絶対値の関係 (|S| - σ 特性) を示している。青点線は等出力因子線 (PF = S²σ) を示している。大変興味深いことに C₆₀(MoO₃)_x 薄膜では、C₆₀ 薄膜の大きな |S| をある程度保持しながら σ が約 1000 倍増加することで、C₆₀ 薄膜に比べて出力因子が最大で約 100 倍まで向上した。得られた出力因子の最大値 (1.8 × 10⁻⁴ V²K⁻²Ω⁻¹m⁻¹) は高純度有機半導体や高分子、炭素ナノチューブや有機無機複合材料などの各種フレキシブル材料の報告値^[3,6-11]と比べても大きな値であることから、C₆₀(MoO₃)_x 複合膜はフレキシブル熱電材料として大変有望であることを示している。

一方、同じ C₆₀ ベースの複合材料でも、カリウム原子をドープした K_xC₆₀ 薄膜では全く異なる

|S| - σ 特性を示す。K_xC₆₀ 薄膜では、K 組成 x を増加させると σ は増加するものの、|S| が激減することで C₆₀ 薄膜よりも出力因子が減少した (図 2 中の)。炭酸セシウムとの複合膜 C₆₀(Cs₂CO₃)_x でもほぼ同様の |S| - σ 特性が得られた。図 2 中の緑で示した領域は、既存理論から予想される電子もしくは正孔ドープされた C₆₀ 薄膜の |S| - σ 特性である。K_xC₆₀ 薄膜では理論予測にほぼ従うが、一方の C₆₀(MoO₃)_x 薄膜は理論予測と全く異なる変化を示しており、これは C₆₀(MoO₃)_x が既存理論では説明できない新奇な熱電材料であることを強く示唆する。

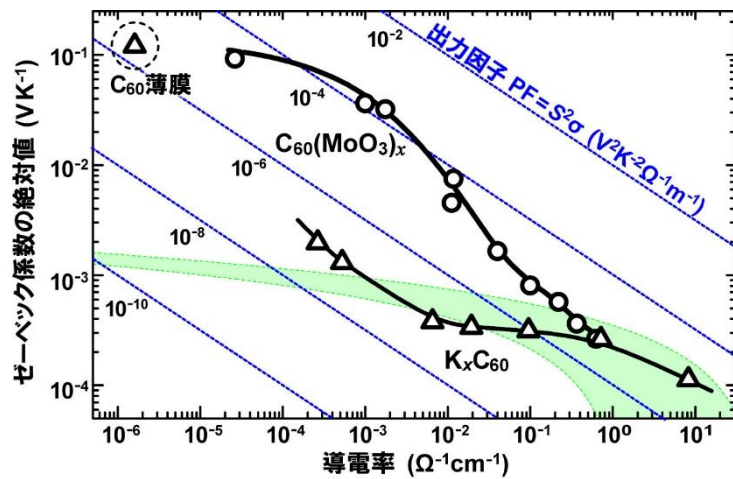


図 2. C₆₀(MoO₃)_x および K_xC₆₀ 複合膜の |S| - σ 特性

(2) C₆₀ - MoO₃ 間相互作用分子スケール評価

C₆₀(MoO₃)_x 薄膜に発現した熱電特性を解明するために、C₆₀ と MoO₃ の相互作用を XPS、STM / STS、および DFT 計算によって調べた。

図 3(a) および 3(b) は、それぞれ C₆₀ および C₆₀(MoO₃)_{7.4} 薄膜の C1s 領域での高分解能 XPS スペクトルである。共に 285 eV 付近に高強度ピークが観測され、これは C₆₀ に由来する C1s ピーク

である。一方、C₆₀(MoO₃)_{7.4} 複合薄膜では高結合エネルギー側に新たなピーク N が現れた [図 3(b)]。各組成比 x における C₆₀ 由来ピークとピーク N の面積比 (S_N/S_{C60}) を調べたところ [図 3(c)] S_N/S_{C60} は組成比 x に対して正の相関を示しており、さらに、x の増加と共にピーク N のエネルギー位置はより高結合エネルギー側へシフトする傾向を示した。これは、ピーク N の起源が MoO₃ から C₆₀ への正孔ドープに由来することを示唆しており、C₆₀(MoO₃)_x 複合薄膜が P 型特性を示したこともよく一致する。ここで、もし MoO₃ 単量体が C₆₀ 単分子と相互作用することでピーク N が出現したのならば、面積比 S_N/S_{C60} は組成比 x = MoO₃/C₆₀ と同程度の値 [図 3(c) 中の点線] を示すはずであるが、実際には S_N/S_{C60} は x に対して常に 0.1 ~ 0.05 倍の大きさをとる。これは、MoO₃ が、C₆₀ 薄膜中に多量体 (MoO₃)_n として埋め込まれ、C₆₀ と相互作用していることを示しており [図 3(d)]、即ち C₆₀(MoO₃)_x 複合膜が C₆₀ および (MoO₃)_n の二種類のナノクラスターから構成されたナノクラスター

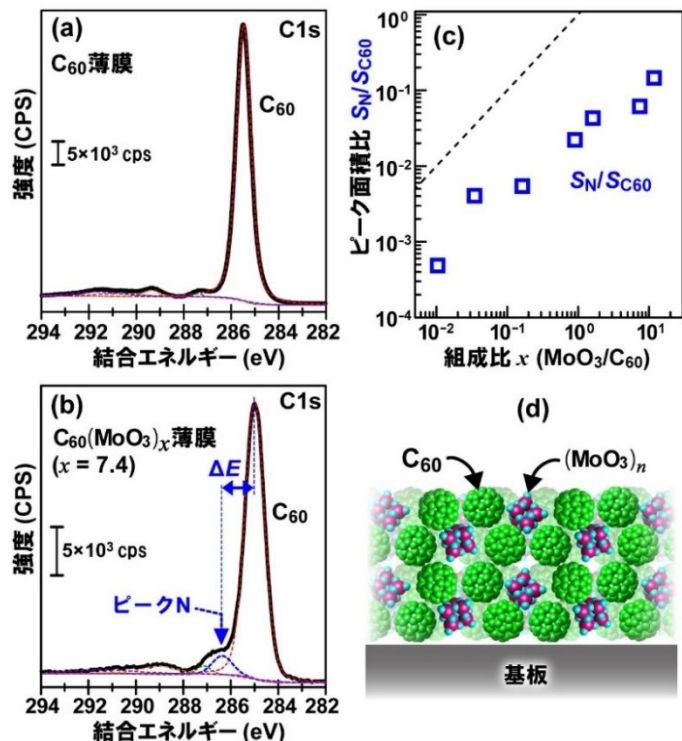


図 3. (a) C₆₀ 薄膜および (b) C₆₀(MoO₃)_x 複合膜の XPS スペクトル。 (c) C1s ピークの面積比 (S_N/S_{C60})。 (d) C₆₀(MoO₃)_x 膜の構造モデル。

—集積固体であることを示唆する。

次に C_{60} と MoO_3 の相互作用を STM / STS によって分子スケール空間分解能で調べた。超高真空中で加熱清浄した Si(111) 基板上へ Ag 原子を 1 ML 蒸着することで不活性な Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}R30^\circ$ -Ag 表面を作製した後、2.5 ML の C_{60} を真空蒸着することで厚さ 2~3 分子層の C_{60} 薄膜を形成した。 C_{60} 超薄膜上へ MoO_3 を真空蒸着し、室温および超高真空下で STM / STS 測定した。

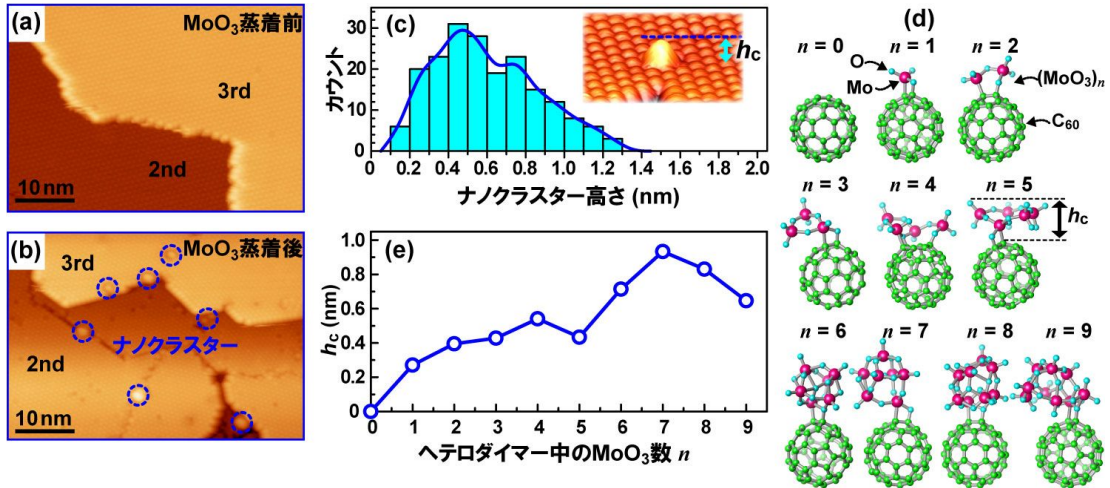


図 4. MoO_3 を蒸着する (a) 前と (b) 後に測定した C_{60} 薄膜の STM 像。(c) ナノクラスターの高さのヒストグラム。(d) DFT 算によって検討した $C_{60} - (MoO_3)_n$ ヘテロダイマーの構造モデル。(e) ヘテロダイマー中の $(MoO_3)_n$ の理論的なサイズ (h_c)

図 4(a) および 4(b) はそれぞれ MoO_3 を蒸着する前および後に測定した C_{60} 薄膜の STM 像である。蒸着前後を比較すると、 MoO_3 蒸着後にはテラス上やステップエッジへナノクラスターが形成されている。クラスター密度は MoO_3 蒸着量と共に増加するため、ナノクラスターは MoO_3 由来の構造体であると考えられる。クラスター高さ h_c を STM で測定し統計的に調べたところ [図 4(c)] h_c は 0.4 nm と 0.7 nm にピークを持つブロードな分布を示した。ここで、真空中において MoO_3 は単量体 MoO_3 および多量体 $(MoO_3)_n$ ($n = 2\sim 9$) として昇華することが知られているため [12,13]、 C_{60} が MoO_3 および多量体 $(MoO_3)_n$ と化学結合したヘテロダイマー [図 4(d)] を第一原理計算で構造最適化したところ、 h_c は複合体中の $(MoO_3)_n$ のサイズと良く対応することが分かった [図 4(e)] 即ち、STM 観察されたナノクラスターは MoO_3 多量体であると考えられる。

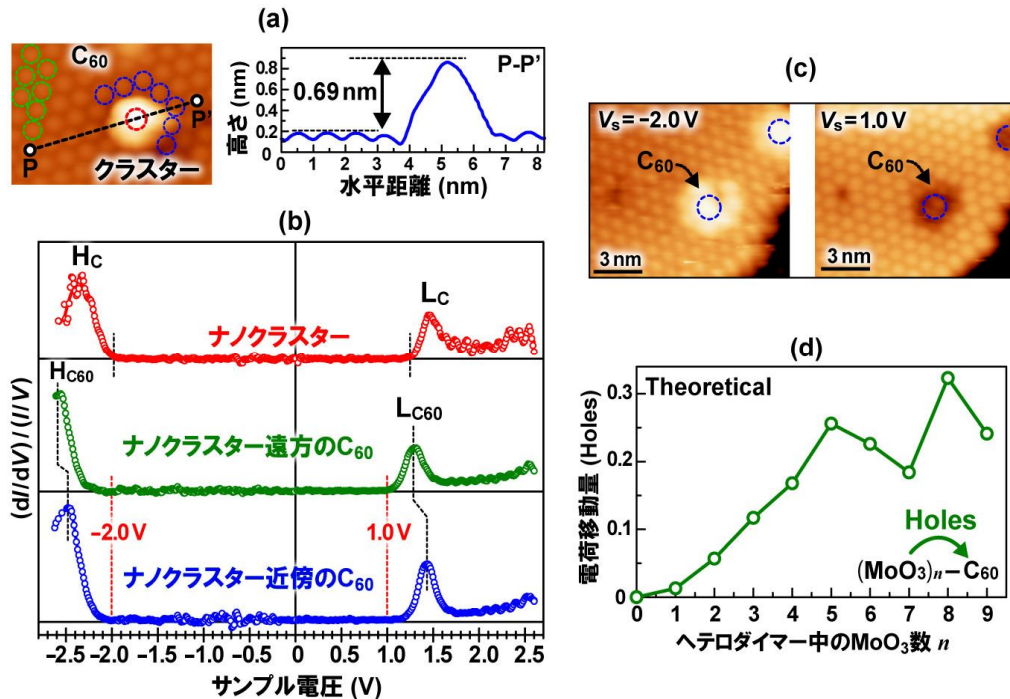


図 5. (a) STS 測定したナノクラスターおよび C_{60} の STM 像と断面プロファイル。(b) ナノクラスター上 (赤線)、ナノクラスターから遠方の C_{60} (緑線)、およびナノクラスター近傍の C_{60} (青線) 上で測定した STS スペクトル。(c) 同一ナノクラスターを $V_s = -2.0$ V (左) および $V_s = 1.0$ V (右) で観察した STM 像。(d) $C_{60} - (MoO_3)_n$ ヘテロダイマー中での $(MoO_3)_n$ から C_{60} への電荷 (正孔) 移動量。

図 5(b)は、 $h_c = 0.69$ nm のナノクラスター（赤線）ナノクラスターから遠方の C_{60} （緑線）およびナノクラスター近傍の C_{60} （青線）上で測定した STS スペクトルである。 $h_c = 0.69$ nm はヘテロダイマー中の $(MoO_3)_6$ と $(MoO_3)_9$ の理論サイズに近い値である [図 4(e)]。ナノクラスターの STS スペクトル [図 5(b)の赤線] では 3.2 eV のエネルギーギャップ（点線間のエネルギー）が観測され、この値は C_{60} と結合した $(MoO_3)_6$ と $(MoO_3)_9$ の HOMO-LUMO ギャップ（各々 3.61 eV および 2.92 eV）と良い一致を示し^[14]、逆に孤立した $(MoO_3)_6$ [6.93 eV] と $(MoO_3)_9$ [4.11 eV] とは対応しない^[14]。即ち、 C_{60} 薄膜上に形成された $(MoO_3)_n$ ナノクラスターは直下の C_{60} 分子と化学結合していると考えられる。さらに、ナノクラスター近傍の C_{60} [図 5(b)青線] では遠方の C_{60} [図 5(b)緑線] と比べて HOMO および LUMO 準位が共に高エネルギー側へシフトしている。これは $(MoO_3)_n$ ナノクラスターから近傍の C_{60} へ正孔ドープが起きていることを示しており、 $C_{60}(MoO_3)_x$ 複合膜が P 型特性を発現したと良く対応する。ここで、ナノクラスター近傍 C_{60} の HOMO / LUMO のエネルギーシフトが微小 (0.1~0.2 eV) であることは、 C_{60} への正孔ドープ量が極めて少量であることを示している。さらにサンプル電圧を様々に変化させて取得した STM 像 [図 5(c)] より、正孔ドープが $(MoO_3)_n$ ナノクラスターから第二近接 C_{60} までの極めて局所的な領域で起きていることを示唆される。以上の結果より、 $(MoO_3)_n$ ナノクラスターは C_{60} 薄膜に対して正孔ドープメントとして機能するものの、そのドープメント活性度は非常に低いことが分かった。この原因を調べるために、 $C_{60} - (MoO_3)_n$ ヘテロダイマー ($n = 2 \sim 9$) の各分子軌道のエネルギーおよび空間分布を DFT 計算したところ、HOMO および LUMO はそれぞれ C_{60} および $(MoO_3)_n$ に局在することが分かった^[14]。即ち、 $(MoO_3)_n$ から C_{60} への正孔ドープには大きな HOMO-LUMO ギャップを介した電荷移動型遷移過程を経る必要があり、このため室温では $(MoO_3)_n$ ナノクラスターから C_{60} への正孔ドープ量が小さいと考えられる。

ここで、Kojima らは、巨大 S を示す有機半導体薄膜では σ の活性化エネルギーが大きくなることを指摘しており^[3]、一般に低活性度のドープメントからキャリアドープする場合も σ の活性化エネルギーが大きくなること考慮すると、 $C_{60}(MoO_3)_x$ 複合膜の巨大 S の起源は $(MoO_3)_n$ ナノクラスターと C_{60} の相互作用にあると考えられる。なお、同じ C_{60} ベースの複合体である K_xC_{60} では室温において K 原子から近接 C_{60} へ 1 個の電子がドープされるため、K は高活性度の電子ドープメントとして機能することが知られている^[15]。このような K_xC_{60} では K 組成の増加に対して S が激減したこと [図 2 の] を考慮すると、有機半導体薄膜の巨大 S を保持しつつ σ を向上させるためには、ドープメント活性度の低い物質との複合化が必要であると考えられ、この一つの方法論としてナノクラスター集積固体の形成が有用であるといえる。

(3) $C_{60}(MoO_3)_x$ 薄膜の熱的安定性および P 型 / N 型特性の制御性

$C_{60}(MoO_3)_x$ 薄膜の熱的安定性についても詳しく調べた。 $x = 0.16$ の条件で作製した $C_{60}(MoO_3)_x$ 薄膜を真空中でアニール処理したときの S と σ の変化を調べたところ、 $C_{60}(MoO_3)_{0.16}$ 薄膜の S と σ は 100°C のアニール処理によってもほぼ保持された。同様の熱的安定性を $x = 0.03$ の複合膜も示した。さらに、 $x = 11.8$ の高 MoO_3 組成の複合膜では、 S と σ は 250 °C のアニール処理でも安定に保持されることが分かった。 $C_{60}(MoO_3)_x$ 薄膜は、室温において体温と外気温の温度差から発電する人体装着型熱電素子への応用を想定しており、この目的に対して十分な熱的安定性を有するといえる。さらに大変興味深いことに、130 °C でアニール処理した $C_{60}(MoO_3)_{0.16}$ 薄膜では S の極性が正から負に変化した。この複合膜の σ は C_{60} 薄膜に比べて 1000 倍ほど大きな値を保持しており、この結果、 C_{60} 薄膜に比べ約 150 倍大な出力因子 ($3.5 \times 10^{-4} \text{ V}^2 \text{ K}^{-2} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$) を示す N 型材料が実現した。このような N 型特性の発現は $C_{60}(MoO_3)_{0.03}$ および $C_{60}(MoO_3)_{11.8}$ の複合膜を加熱処理したときにも確認された。 C_{60} と MoO_3 の複合化と加熱処理によって P 型 / N 型特性が自在に制御できることは、 π 型熱電素子へ応用する上で大きな利点であると考えられる。

< 引用文献 >

- [1] 梶川武信 監修、熱電変換技術ハンドブック、エヌ・ティー・エス、2008.
- [2] H. Kojima *et al.*, *Appl. Phys. Express* **8**, 121301(2015).
- [3] H. Kojima, *et al.*, *Mater. Chem. Front.* **2**, 1276–1283(2018).
- [4] S. Claridge *et al.*, *ACS Nano* **3**, 244(2009).
- [5] H. Cantera-López *et al.*, *Phys. Rev. B* **83**, 075434(2011).
- [6] O. Bubnova *et al.*, *Nat. Mater.*, **10**, 429(2011).
- [7] Y. Sun *et al.*, *Adv. Mater.*, **24**, 932(2012).
- [8] Y. Nonoguchi *et al.*, *Sci. Reports*, **3**, 3344(2013).
- [9] K. Suemori, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 153902(2013).
- [10] Y. Nakai *et al.*, *Appl. Phys. Exp.*, **7**, 025103(2014).
- [11] C. Cho *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1502168(2016).
- [12] N. Doudin *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **118**, e2017703118(2021).
- [13] Z. Li *et al.*, *J. Phys. Chem. C* **118**, 4869(2014).
- [14] M. Nakaya *et al.*, *J. Chem. Phys.* **158**, 054701(2023).
- [15] J. Y. Kim *et al.*, *Nano. Lett* **16**, 4203 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Shibuta, K. Yamamoto, T. Ohta, T. Inoue, K. Mizoguchi, M. Nakaya, T. Eguchi, A. Nakajima	4. 巻 15
2. 論文標題 Confined Hot Electron Relaxation at the Molecular Heterointerface of the Size-Selected Plasmonic Noble Metal Nanocluster and Layered C60	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 1199-1209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.0c08248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawano Shin-ichiro, Nakaya Masato, Saitow Masaaki, Ishiguro Atsuki, Yanai Takeshi, Onoe Jun, Tanaka Kentaro	4. 巻 144
2. 論文標題 Thermally Stable Array of Discrete C60s on a Two-Dimensional Crystalline Adlayer of Macrocycles both in Vacuo and under Ambient Pressure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 6749 ~ 6758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.1c13610	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kato Masahiro, Yoshizawa Hayato, Nakaya Masato, Kitagawa Yasutaka, Okamoto Koichi, Yamada Tomoaki, Yoshino Masahito, Tanaka Kentaro, Onoe Jun	4. 巻 12
2. 論文標題 Unraveling the reasons behind lead phthalocyanine acting as a good absorber for near-infrared sensitive devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-12990-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Izumi Tatsuma, Nakaya Masato, Onoe Jun	4. 巻 801
2. 論文標題 Kinetic study of photopolymerization and depolymerization in C60 films using in situ Fourier-transform infrared spectroscopy for development of C60-based thermoelectric materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 139744 ~ 139744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2022.139744	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakaya Masato, Kawai Takuya, Watanabe Shinta, Onoe Jun	4. 巻 158
2. 論文標題 Micro-/macroscopic and density functional studies of the interactions between molybdenum trioxide and C60 molecule	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 054701 ~ 054701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0134207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 和泉竜馬、中谷真人、尾上 順
2. 発表標題 電子線誘起C60重合薄膜の構造および電子構造の分子スケール評価
3. 学会等名 第22回日本表面真空学会中部支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和泉竜馬、中谷真人、尾上 順
2. 発表標題 走査トンネル顕微鏡法/分光法による電子線誘起C60重合体の分子スケール評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中谷 真人、河野 慎一郎、田中 健太郎、尾上 順
2. 発表標題 マクロ環状分子の自己組織化周期ナノ空間を利用した孤立C60分子の二次元配列化
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉沢 駿人、中谷 真人、岡本 晃一、尾上 順
2. 発表標題 金属フタロシアニン/C60積層膜界面における励起子ダイナミクスと電荷分離
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中谷真人
2. 発表標題 フラーレンを用いた柔軟な高性能熱電材料の開発
3. 学会等名 第1回 軽量・柔軟エレクトロニクス材料研究会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和泉竜馬, 中谷真人, 尾上 順
2. 発表標題 C60薄膜の光重合および熱解重合過程における速度論的解析
3. 学会等名 ナノ学会第20回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuma Izumi, Masato Nakaya, Jun Onoe
2. 発表標題 Kinetic study of photopolymerization and thermal-depolymerization in C60 films
3. 学会等名 The 62nd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和泉竜馬, 中谷真人, 尾上 順
2. 発表標題 高性能熱電材料の開発に向けた C60 光重合生成物の反応速度論的解析
3. 学会等名 第53回日本原子力学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中谷真人, 和泉竜馬, 渡邊真太, 尾上 順
2. 発表標題 マイクロギャップ電極を用いたフラーレンC60薄膜の熱電物性評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中谷真人, 河合拓哉, 和泉竜馬, 渡邊真太, 尾上 順
2. 発表標題 C60と酸化モリブデンの複合化による新奇フレキシブル熱電材料の創製
3. 学会等名 ナノ学会第19 回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和泉竜馬, 渡邊真太, 中谷真人, 尾上 順
2. 発表標題 フレキシブル 型熱電素子の実現に向けたC60・Cs ₂ C0 ₃ 複合薄膜の作製
3. 学会等名 ナノ学会第19 回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中谷真人、河合拓哉、渡邊真太、尾上 順
2. 発表標題 C60・モリブデン酸化物複合体の熱電・電気伝導特性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Izumi, S. Watanabe, M. Nakaya, J. Onoe
2. 発表標題 Formation of highly conductive N-type thermoelectric material by co-deposition of fullerene and cesium carbonate
3. 学会等名 The 60th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yoshizawa, M. Kato, M. Nakaya, J. Onoe
2. 発表標題 Control of optical absorption property of PbPc donor film for development of full-spectra organic photovoltaic cells
3. 学会等名 The 60th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Nakaya, S. Watanabe, J. Onoe
2. 発表標題 Formation of high-performance P-type thermoelectric materials composed of fullerene molecules and molybdenum oxide nanoclusters
3. 学会等名 The 60th Anniversary Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和泉竜馬、中谷真人、尾上 順
2. 発表標題 フラレンと炭酸セシウムの共蒸着による高導電性N型熱電材料の創製
3. 学会等名 日本原子力学会中部支部 第52回研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中谷真人，河合拓哉，渡邊真太，尾上 順
2. 発表標題 C60 とモリブデン酸化物の複合化による P 型熱電材料の創製
3. 学会等名 ナノ学会第 18 回大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関