

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04333

研究課題名(和文) CNT/タンパク質接合による熱・キャリア輸送独立制御と断熱性熱電変換素子の創出

研究課題名(英文) Independent control of heat/charge transport using CNT/protein junctions and its application to thermally insulating thermoelectric generators

研究代表者

中村 雅一 (Nakamura, Masakazu)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：80332568

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,110,000円

研究成果の概要(和文)：エナジーハーベスティング技術のひとつとして、フレキシブル熱電変換素子を目指した研究が世界中で盛んになっている。代表者らは、カーボンナノチューブ(CNT)の単繊維間にDpsと呼ばれる半導体コアを内包させ得る球殻状タンパク質による分子接合を挿入した新概念のフレキシブル熱電材料を研究している。本研究では、これまでの研究を発展させ、CNT原料と分散法の最適化、Dps分子接合の電気伝導特性評価、糸状試料の熱電特性および熱伝導率評価法の開発などを行い、Dps/CNT複合材料紡糸の熱電性能を向上させた。最終的に断熱性の布状熱電変換素子とそれを用いた可搬性の高いデモデバイスの作製までを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モノのインターネット(IoT)やウェアラブルエレクトロニクスなどで使われる孤立小規模電子回路の電源として、環境の未利用エネルギーから発電するエナジーハーベスティング素子の必要性が増している。それに伴い温度差によって発電する熱電変換素子にも注目が集まり、フレキシブル熱電変換素子を目指した研究が世界中で盛んになっている。本研究の成果は、着るだけで発電する服など、低温・低容量な熱源に対して良好な熱的接触が得られない場合でも十分な内外温度差を得て発電する断熱性フレキシブル熱電変換素子の実現に大きく寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：As one of the energy harvesting technologies, research for flexible thermoelectric generators is gaining momentum around the world. The PI of this project has been studying a new concept of flexible thermoelectric materials in which molecular junctions of spherical proteins, called Dps, that can encapsulate semiconductor cores are inserted between single fibers of carbon nanotubes (CNTs). In this study, we have extended the previous studies, optimized the CNT materials and dispersion method of them, evaluated the electrical conduction properties of Dps molecular junctions, developed techniques for measuring the thermoelectric properties and thermal conductivity of wire-like samples, and improved the thermoelectric performance of Dps/CNT composite yarn. Finally, we fabricated an adiabatic fabric-type thermoelectric generator and a portable demonstration device using it.

研究分野：有機系熱電材料、有機エレクトロニクス

キーワード：熱電変換 ハイブリッド材料 カーボンナノチューブ タンパク質 熱・キャリア輸送制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

モノのインターネット(IoT)やウェアラブルエレクトロニクスなどの孤立小規模電子回路の電源として、エナジーハーベスティング素子の必要性が増している。それに伴い熱電変換素子にも注目が集まり、フレキシブル熱電変換素子を目指した有機系熱電材料の研究が世界中で盛んになっている。代表者は、それまでに行ってきた有機系熱電材料の広範囲探索的研究によって、従来の熱電材料研究の常套手段では有機系熱電材料において十分な性能が得られないという結論に達し、その限界を超える可能性を有する材料群に着目して研究を進めていた。本研究は、その一つである「不均一系材料における異相直列接続構造」の研究を本格化するためのものである。ここでいう「不均一系材料」とは、金属的な低ゼーベック係数(α)・高導電率(σ)・高熱伝導率(κ)物質相 A と、半導体的な高 α 低 σ 低 κ 物質相 B が電流経路に対して直列的に接続された材料である。比較的高い性能が報告されていた CNT 複合材料においても、CNT 単繊維接合部が偶然に物質層 B の役割を果たしていると考えられる。

代表者は、そのような偶然に頼る代わりに、物質相 A として CNT を、B として CNT に選択的に吸着する能力を付与し、さらに半導体粒子を内包させたかご状タンパク質 {C-Dps、図 1 (a)} を用い、制御されたナノ構造によって熱流と電流を独立制御することを試みた。水溶液中で C-Dps を CNT に吸着させ、それを凝集させることで図 1 (b) のような接合構造が自己組織的に形成される。片方の CNT から熱流を与えると、柔らかいタンパク質シェルとの界面で CNT フォノンが反射され、接合部に大きな温度差が生じる。一方、シェルは電子のトンネル効果が期待できる程度に薄く、内包された半導体コアの状態密度関数がエネルギーフィルターとなり、電子あるいは正孔が選択的に高温側から低温側へ透過する。すなわち、接合部に熱電材料として理想的な”Phonon Blocking and Electron Transmitting”構造が自発的に形成されると期待される[1]。予備的な実験によって、この単分子接合を組み込むことで、CNT 凝集体の κ が大きく低減されることを確認していた。

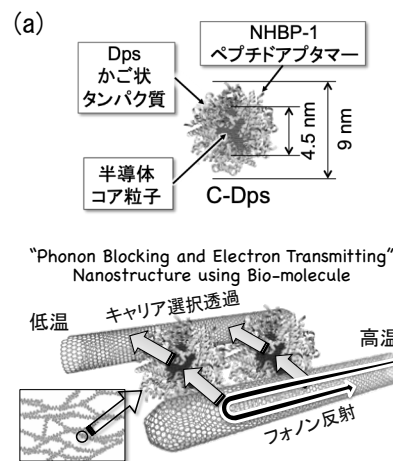


図 1. (a) C-Dps タンパク質の構造、および、(b) CNT 単繊維間を橋渡しする単分子接合による熱・電荷独立輸送機能

2. 研究の目的

本研究は、開始時まで代表者らが基本コンセプトを実証した、「半導体粒子内包かご状タンパク質分子(C-Dps)を接合部に有する低熱伝導率カーボンナノチューブ(CNT)複合熱電材料」および「p/n ドーピングされた CNT 複合材料紡績糸による布状熱電変換素子作製法」を発展・統合させ、低温・低容量な熱源に対して良好な熱的接触が得られない場合でも十分な内外温度差を得て発電する断熱性フレキシブル熱電変換素子を実現することを最終的な目的とする。

3. 研究の方法

研究の進行に従って以下の研究項目を適宜実施しながら、C-Dps/CNT 複合材料紡績糸の高性能化と布状熱電変換素子の構造の改良を行った。最終年度には、それまでに得られた結果を総合し、断熱性フレキシブル熱電変換素子の動作実証を行った。

(1) 十分な長さや強度を有する C-Dps/CNT 複合材料紡績糸の作製法

これまでは C-Dps 吸着 CNT において長尺の紡績糸が作製困難であった。これについて、分散液作製法などを工夫し、改善を行なった。

(2) CNT 原料と分散法の最適化

(1)の過程で重要なファクターであることが判明した CNT 原料の 1 次分散法について、それによる熱電特性への影響を有望と思われる CNT 原料ごとに行い、最終的に用いる原料と分散方法を選別した。

(3) C-Dps 分子接合のキャリア透過関数評価

接合部の熱電特性に影響する C-Dps 接合部のキャリア透過関数を調べるため、Dps を電極ナノギャップにブリッジさせた単分子素子、あるいは、金属上の Dps 単分子膜に液体金属電極を接触させた単分子膜素子を作製し、 I - V 特性を評価した。

(4) C-Dps/CNT 複合材料紡糸の熱電特性および熱伝導率評価

糸状試料に最適化した熱電特性評価装置の設計・製作を行い、CNT 紡績糸のゼーベック係数と導電率を大気中および真空中で迅速に評価できるようにした。また、糸状試料の長手方向熱伝導率測定について、同じ装置を用いて 3ω 法による測定を行うための計測回路やプログラムを作製し、測定の信頼性を高めるための必要条件を調べた。さらに、この装置を用い、C-Dps 紡績糸の熱伝導率および C-Dps 接合による熱伝導抑制効果を調べた。

(5) 布状熱電変換素子とそれを用いたデモデバイスの作製

研究の締めくくりとして、布状熱電変換素子を作製し、実使用環境でのデモンストレーションを行うためのマイコンモジュールなどを設計・製作した。

4. 研究成果

(1) 十分な長さや強度を有する C-Dps/CNT 複合材料紡績糸の作製法

安定した紡糸を行うためにも、より熱電性能を向上させるためにも、CNT への C-Dps 吸着料を精密に評価することが重要である。これまで、TEM 観察によって単位長さあたりの吸着 C-Dps 分子数を求めていたが、より定量性の高い評価法として、吸光度法とタンパク質量を組み合わせる方法を確立した。

CNT 原料に対して 5 倍量の C-Dps とリン酸 Buffer を加え、超音波印加することで C-Dps/CNT 複合体を形成させた。その後、未吸着 C-Dps と Buffer を取り除く精製を行い、C-Dps/CNT 複合体分散液を調整した。得られた分散液の一部を濃硫酸で希釈し、超音波印加により溶解させ吸光度を測定することで、あらかじめ求めた検量線から CNT 濃度を決定した。一方、タンパク質量定量については、分散液の一部を Tris-HCl Buffer に希釈し、超音波印加と超遠心分離を行うことで C-Dps/CNT 複合体から C-Dps を遊離させ、Bradford 法により C-Dps 濃度を決定した。得られた CNT 濃度と C-Dps 濃度から C-Dps /CNT 重量比を算出した。この方法によって、従来の TEM 観察による方法で被覆率 50% 程度の複合体と判断された試料の C-Dps /CNT 重量比を求めたところ、約 120 wt% に相当することが確認された。

同様に定量された複数種の分散液から紡糸を行い、C-Dps/CNT 重量比が紡糸性に及ぼす影響を調べたところ、C-Dps/CNT 重量比が 100 wt% を超える場合に分散性が良好となり、紡糸の連続性が向上することが確認された (図 2)。これらの実験では、CNT 分散液を作製するために本来必須である分散剤を加えていない。このことから、C-Dps が分散剤としての十分な能力を発揮しているものと考えられる。

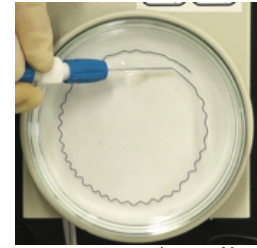


図 2. C-Dps/CNT 複合体分散液からの小規模ウェットスピニング

(2) CNT 原料と分散法の最適化

複雑に絡み合った CNT 原料を最終的に均一な紡績糸にするためには、サイズの大きい凝集状態など分散ムラを極力なくす必要があり、そのためには原料の 1 次分散が重要である。これに影響する因子としては、イオン液体による分散手順、添加する分散剤、2 次分散に向けたイオン液体の除去法、Dps 吸着条件、過剰 Dps の除去法などがある。これまでに高い性能が得られている 2 種の CNT 原料、および、これまでに試みられた 4 種の CNT 1 次分散法について、最終年度の総括として全ての組み合わせを用いて CNT 紡績糸を作製し、そのパワーファクターを評価した。

合計 8 種の紡績糸について、直径、ゼーベック係数、導電率、パワーファクター(PF)を測定した結果をまとめて、図 3 に示す。この系統的な実験の結果、eDIPS 法で合成された CNT 原料 1 と分散剤を添加したイオン液体中で圧搾攪拌した後、遠心分離などで不純物を取り除く 1 次分散法 D の組み合わせによって、最も高いパワーファクターが得られることが確認された。CNT 濃度が同じであっても分散法によって糸の直径が異なり、直径が小さいほど導電率が高い傾向を示すことから、1 次分散法が紡績糸の密度に影響を与えていると推測される。

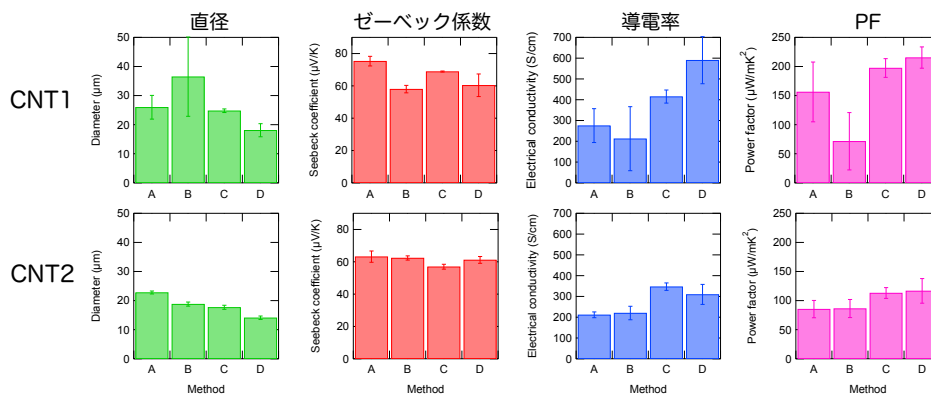


図 3. 2 種の CNT 原料および 4 種の 1 次分散方法によって作製された CNT 紡績糸の特性比較

(3) C-Dps 分子接合のキャリア透過関数評価

C-Dps 分子接合における電子の透過スペクトルは、接合部のコンダクタンスだけでなくゼーベック係数も左右することから、熱電特性を向上させる上で重要である。そこで、これを評価するため、まずは連携研究者である真島豊教授 (東京工業大学) の協力のもと、Au ナノギャップを用いた単分子接合素子の I-V 特性を測定した。あらかじめ形成された Au ナノギャップに Au バインディングペプチドアプタマーを付与した Dps を吸着させた。溶液中の Dps 濃度、pH、ブロッキング剤濃度などを最適化した結果、Au ナノギャップ基板を一定時間浸漬することで高頻度に単分子接合素子が形成できるようになった。図 4 (a) に、多数の単分子接合素子に対して室温で行った I-V 測定結果から、それを電圧で微分して求まる微分コンダクタンスカーブを示す。これは、接合の透過関数の特徴を強く表すものである。多数の素子から得られた微分コンダクタン

スカープは、電圧の極性を適宜反転させると一方の立ち上がり電圧を全てそろえることができたが、もう一方は図に示されるように 0.3 V 程度の幅を有している。立ち上がりがそろっている側は、タンパク質シェルを絶縁層として電極からコア粒子（この実験ではコバルト酸化物）の電子準位に量子トンネル効果によってキャリア注入された結果、そろっていない側は、何らかの分布に幅を持つエネルギー準位にキャリアが注入された結果ではないかと推測される。

さらに詳しく解析するためには、低温でのクーロンブロック特性を得る必要があったが、Dps が低温で変性するためその測定が困難であることが判った。そこで、より狭い範囲の温度依存性から、キャリア輸送過程を議論する重要なパラメータの一つである伝導の活性化エネルギーを求めるために、 I - V 特性の再現性や S/N 比が高いマクロ電極による単分子膜接合素子の評価を行うことにした。

海外研究協力者である Christian Nijhuis 教授（シンガポール国立大）の協力のもと、金基板上に、リンカー分子の単分子膜を形成し、その上に C-Dps の単分子膜を形成した。さらにその上に GaIn 液体金属電極を接触させ、 I - V 特性を測定した。その結果、コンダクタンスに、コバルト酸化物コア > 鉄酸化物コア > コアなしという差が観測され、コア粒子がキャリア輸送に寄与していることを示す結果が得られた。さらに、鉄酸化物コアを有する C-Dps 単分子膜接合素子において I - V 特性の温度依存性を測定したところ、図 4 (b) に示されるように活性化エネルギーが電圧に対して非対称となった。この測定の場合は、外部印加電圧は下の金電極側のフェルミエネルギーをより大きく変調させることから、液体金属電極に正の電圧を印加した際には金電極から電子がトンネル注入されることによる電流が、負の電圧を印加した際には正孔のホッピング電流がより支配的であると考えられる。光電子分光や光学吸収などから求めた Dps とコア粒子のエネルギー準位位置などをもとにして、実験結果を説明するエネルギーダイアグラムを描いたものを図 4 (c) に示す。研究の初期では両極性ともトンネル電流が支配的であると予想していたが、予想に反して金電極からタンパク質の価電子準位への正孔注入とタンパク質分子内ホッピング伝導が電流に寄与していることが強く示唆される結果である。従って、コア粒子による熱電特性のチューニングは容易ではないことが予想されることから、今後の研究では他の手法によってゼーベック係数の極性やパワーファクターの最大化を図ることが優先されると判断した。

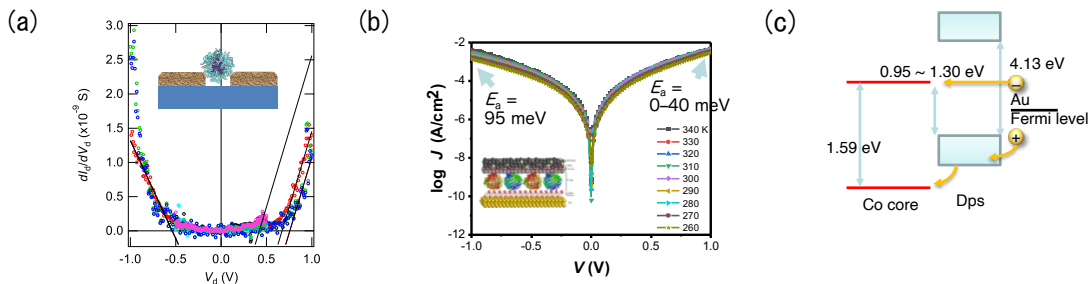


図 4. Dps 分子接合を通じた I - V 特性：(a) 単分子接合素子および (b) 単分子膜接合素子の測定結果、ならびに、(c) 現時点で推定される電子準位のエネルギーダイアグラム

(4) C-Dps/CNT 複合材料糸の熱電特性および熱伝導率評価

本研究で経常的に作製される CNT 紡績糸は、直径 10~50 μ m の極めて細い単糸であるが、そのような試料の熱電特性や熱伝導率をルーチン的に測定するための装置は市販されていなかった。そこで、本研究を始めるにあたり、まず糸状試料に最適化した熱電特性評価装置の設計・製作を行い、CNT 紡績糸のゼーベック係数と導電率を大気中および真空中で迅速に評価できるようにした。また、糸状試料の長手方向熱伝導率測定について、熱電特性測定と同じ装置を用いて電気的に直接熱伝導率を測定することができる 3ω 法[2]について、測定手法の開発を行った。

図 5 (a) に、熱電特性測定のための温度勾配試料ホルダと電極配置の模式図を示す。 ΔT 用ヒーターによって強制的に温度勾配を付与したトッププレートに、入手容易な絶縁性基板としては比較的熱伝導率が高いサファイア基板を貼り付け、その上に金メッキされた無酸素銅の電極ブロックが 6 つ固定されている。紡績糸を導電性ペーストで直線上に並んだ 4 電極に固定し、四端子法によって抵抗を求めて導電率を計算する。また、温度勾配を変化させながら電圧電極間に生じる熱起電力を測定し、同等の位置にある温度測定用電極間の温度差から dV/dT を求めることでゼーベック係数を得る。

熱伝導率については、同じ装置と基板を用い、電流電極から交流電流を印加し、電圧電極間に生じる交流電圧の 3 倍周波数成分 (3ω 電圧) を測定することによって解析する (図 5 (b))。様々な近似のための必要条件を満たしていることを確認した上で、 3ω 電圧の周波数依存性が、

$$V_{3\omega} \approx \frac{4I^3 LRR'}{1.01\pi^4 kS} \left[\frac{1}{\sqrt{1+(2\omega\gamma)^2}} + 0.01 \right] \quad (1)$$

という式で表されることを利用して熱伝導率を求める[2] (図 5 (c))。計測回路やプログラムを作製し、測定の信頼性を高めるための文献に指摘されている事項以外の必要条件を調べた。その結果、高めの熱伝導率を与える傾向があるものの、試料間の比較には十分使えることを確認した。

この装置を用い、C-Dps 紡績糸の熱伝導率および C-Dps 接合による抑制効果を調べた結果、CNT 紡績糸の長手方向という熱伝導率を抑制するには不利な条件においても、C-Dps 分子接合

を形成することで熱伝導率が 1/2~1/10 程度に抑制されていることが確認された。

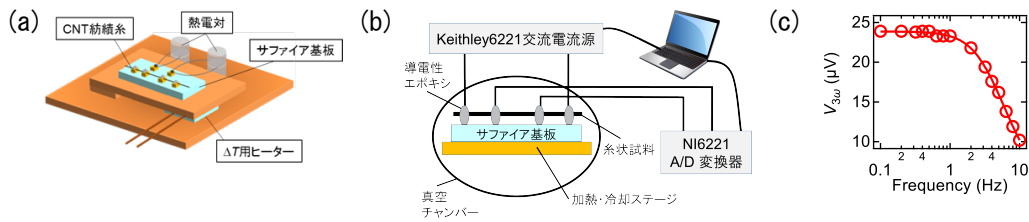


図 5. CNT 紡績糸用に開発された熱電特性および熱伝導率評価装置：

- (a) 熱電特性を評価するための温度傾斜試料ホルダおよび電極と試料の配置、
 (b) 3ω法によって熱伝導率を評価するための計測回路、および、(c) 熱伝導率の測定例

(5) 布状熱電変換素子の作製とそれを用いたデモデバイスの作製

研究の初期において作製された布状熱電変換素子の構造は、CNT 紡績糸に縞状にドーピングを施したものを布に波縫いする構造であった[3]。しかし、それでは 1 カ所の断線で直列につながったエリアが全て働かなくなるため、素子の歩留まりや耐久性の点で不利である。そこで、断線耐性の高い新たなデバイス構造として、図 6 (a) のような編み込み構造を考案し、実際に素子を作製した。この構造であれば、図 6 (b) のように発電部の 1 カ所が断線しても出力電力に大きな損失を与えない。この構造の断線耐性を定量的に示すために、図 6 (b) の構造の等価回路において、0~50%の切断確率を与えて発電部をランダムに切断したときの出力電力の統計平均をモンテカルロシミュレーションによって求めた。結果を、図 6 (c) に示す。発電部が 30%もの高確率で切断されても、約 40%の出力が残存することが期待される。

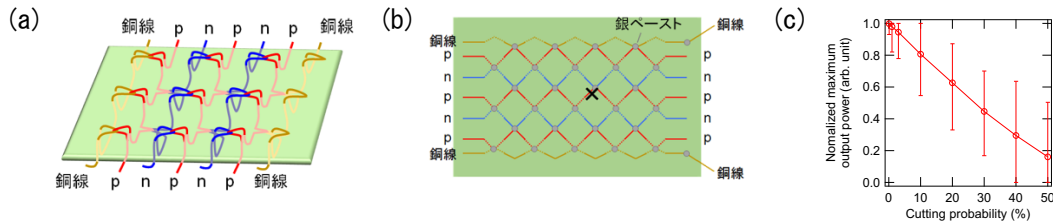


図 6. 編みこみ型布状熱電変換素子：(a) 構造概略図、(b) 配線図、および、

- (c) (b) の素子における切断確率に対する出力変化のモンテカルロシミュレーション結果

研究の最終段階において、今後布状熱電変換素子の用途を開拓するため、また研究のアウトリーチ活動などで用いるために、マイコンボードを用いてスマートフォンや PC と Bluetooth 接続して動作を表示させるためのデモデバイスを作製した。Adafruit 社の Feather 32u4 Bluefruit LE をベースに、同社のプロトボードである FeatherWing にアナログ増幅回路、電源ソケット、スイッチを実装した (図 7 (a) および (b))。これらを二階建て構造として組み合わせ、プログラムを書き込むことでデモデバイスを作製した。図 7 (c) に示されるように、Adafruit 社が提供している Bluetooth 接続用アプリケーションをスマートフォンにインストールすることによって、簡単に熱電モジュール出力 (表裏温度差) をスマートフォン上で見せることができる。

なお、これを作製した効果として、熱電モジュールから 5~10 cm 程度離れたところに手をかざしても十分な電圧が生じることが明らかになった。これは、素子の断熱性が十分高いことから、熱源との密着が得られない場合でも、輻射熱流によって発電を行うことができることを示している。また、高感度なフレキシブルサーモパイルとしての熱センサ応用も期待される。

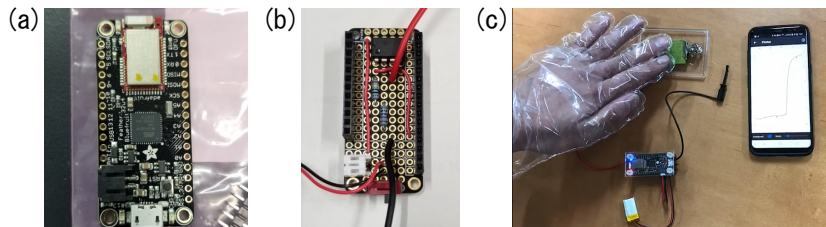


図 7. 布状熱電素子のデモ用デバイス：(a) Adafruit Feather 32u4 Bluefruit LE、
 (b) 増幅回路実装済みプロトボード、および、(c) デモの様子

〈引用文献〉

[1] M. Ito, N. Okamoto, R. Abe, H. Kojima, R. Matsubara, I. Yamashita, and M. Nakamura, *Appl. Phys. Express* **7**, 065102 (2014).
 [2] L. Lu, W. Yi, and D. L. Zhang, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 2996 (2001).
 [3] M. Ito, T. Koizumi, H. Kojima, T. Saito, and M. Nakamura, *J. Mater. Chem. A* **5**, 12068 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中村雅一, 小島広孝	4. 巻 63
2. 論文標題 フレキシブル熱電変換デバイスのための有機系熱電材料の探索	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 239-244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.63.239	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 中村雅一, 小島広孝	4. 巻 46
2. 論文標題 「やわらかい」熱電材料 - 有機分子による熱およびキャリア輸送制御 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 熱測定	6. 最初と最後の頁 69-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ito Mitsuhiro, Koizumi Takuya, Kojima Hiroataka, Saito Takeshi, Nakamura Masakazu	4. 巻 5
2. 論文標題 From materials to device design of a thermoelectric fabric for wearable energy harvesters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Mater. Chem. A	6. 最初と最後の頁 12068-12072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7TA00304H	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 上沼睦典, 浦岡行治, 中村雅一, 野々口斐之, 清水洋, 河合壯	4. 巻 88
2. 論文標題 NAISTナノテクプラットフォームにおけるホットトピックス~ナノ構造熱電変換材料の新潮流~	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 金属	6. 最初と最後の頁 118-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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29件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 関本祐紀, 阿部竜, 山本貴洋, 鄭敏喆, 小島広孝, 辨天宏明, 中村雅一
2. 発表標題 3 法および光交流法を用いたカーボンナノチューブ/ポリマー複合紡績系の熱伝導率測定
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本貴洋, 関本祐紀, 阿部竜, 岡本尚文, 鄭敏喆, 小島広孝, 辨天宏明, 中村雅一
2. 発表標題 CNT紡績系の熱伝導率におけるポリマー添加と延伸の効果
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西岡虎太郎, 阿部竜, 小島広孝, 岡本尚文, 関本祐紀, Min-Cherl Jung, 辨天宏明, 山下一郎, 中村雅一
2. 発表標題 CNT/C-Dps複合材料の低熱伝導率化に向けたCNTの化学的指紋情報の測定
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小保方秀, 岡本尚文, 関本祐紀, 鄭敏喆, 小島広孝, 辨天宏明, 山下一郎, 中村雅一
2. 発表標題 カーボンナノチューブ紡績系の熱電特性および機械的特性に対する原料分散方法の影響
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村雅一
2. 発表標題 フレキシブル熱電変換デバイスのための有機系熱電材料の探索
3. 学会等名 2019日本表面真空学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関本祐紀、中村雅一、M. Chen、Paddy K. L. Chan
2. 発表標題 3 法を用いた多層膜の熱伝導率測定および界面熱抵抗評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Obokata, N. Okamoto, Y. Sekimoto, M.-C. Jung, H. Kojima, H. Benten, I. Yamashita, M. Nakamura
2. 発表標題 Influence of Materials Dispersion Method on the Thermoelectric Property of Carbon Nanotube Yarns
3. 学会等名 10th International Conference on Molecular Electronics & Bioelectronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nakamura, T. Koizumi, H. Hamabe, N. Okamoto, H. Kojima, M.-C. Jung, H. Benten, I. Yamashita
2. 発表標題 CNT-Based Thermoelectric Fabric for Wearable Energy Harvesters: Device and Material Design for Durability and Low Thermal Conductance
3. 学会等名 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土江宏典, 岡本尚文, 関本祐紀, 阿部竜, 鄭敏喆, 小島広孝, 辨天宏明, 中村雅一
2. 発表標題 発泡エラストマーを用いたフレキシブル熱電変換素子の開発
3. 学会等名 応用物理学会関西支部平成30年度第3回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nakamura
2. 発表標題 Control of Heat and Charge Transport in Carbon-Nanotube-Based Thermoelectric Materials Using Bionanoparticles
3. 学会等名 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村雅一
2. 発表標題 私たちの生活に溶け込む環境発電
3. 学会等名 第8回CSJ化学フェスタ(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本 祐紀, 鄭 敏喆, 小島 広孝, 辨天 宏明, 中村 雅一
2. 発表標題 カーボンナノチューブ/ポリマー複合紡績系の熱伝導率に対する組成および構造の影響
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nakamura, M. Ito, T. Koizumi, H. Kojima, T. Saito
2. 発表標題 From Materials to Device Design of a Thermoelectric Fabric for Wearable Energy Harvesters
3. 学会等名 2018 MRS Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nakamura, M. Ito, T. Koizumi, H. Kojima, T. Saito
2. 発表標題 From Materials to Device Design of a Thermoelectric Fabric for Wearable Energy Harvesters
3. 学会等名 2018 MRS Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本祐紀、岩堀健治、鄭敏喆、小島広孝、辨天宏明、中村雅一
2. 発表標題 分子接合によるカーボンナノチューブ凝集体の熱伝導率制御の可能性
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱邊景大、岡本尚文、関本祐紀、阿部竜、鄭敏喆、小島広孝、辨天宏明、山下一郎、中村雅一
2. 発表標題 バイオナノ接合により熱電特性制御されたカーボンナノチューブ紡績糸の作製
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村雅一
2. 発表標題 フレキシブルエネルギーハーベスターのための有機系熱電材料入門
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村雅一
2. 発表標題 フレキシブル熱電変換デバイスのための有機材料探索 ~有機物ならではの機能の探求から~
3. 学会等名 高分子学会有機エレクトロニクス研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakamura, M. Ito, T. Koizumi, H. Kojima, and I. Yamashita
2. 発表標題 Structural and materials design of thermoelectric fabrics using carbon nanotubes for wearable energy harvesters
3. 学会等名 9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE9)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Sekimoto, M. Ito, T. Koizumi, N. Okamoto, M.-C. Jung, H. Kojima, H. Benten, and M. Nakamura
2. 発表標題 Thermal conductivity measurements of carbon-nanotube threads using the 3omega method
3. 学会等名 9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE9)（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Hamabe, N. Okamoto, Y. Sekimoto, M.-C. Jung, H. Kojima, H. Benten, I. Yamashita, M. Nakamura
2. 発表標題 Fabrication of carbon nanotube/cage-shaped protein composite threads for thermoelectric applications
3. 学会等名 9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Nakamura, M. Ito, T. Koizumi, H. Kojima, T. Sato, and I. Yamashita
2. 発表標題 Integrated Materials to Structural Design of Thermoelectric Fabrics using Carbon Nanotubes for Wearable Energy Harvester
3. 学会等名 9th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村雅一
2. 発表標題 「やわらかい」熱電材料 - 有機分子による熱およびキャリア輸送制御 -
3. 学会等名 第53回熱測定ワークショップ 「ナノ粒子、ナノ構造体の熱測定」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Ito, N. Okamoto, R. Abe, H. Kojima, I. Yamashita, M. Nakamura
2. 発表標題 Independent Control of Phonon and Carrier Transports in Carbon Nanotube with Biomolecular Junctions for Improving Thermoelectric Performance
3. 学会等名 GIST-NCTU-NAIST (GNN) International Joint Symposium 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小泉拓也, 伊藤光洋, 阿部竜, 小島広孝, 中村雅一
2. 発表標題 型構造を編み込んだ布状熱電変換素子の作成
3. 学会等名 電子情報通信学会 有機エレクトロニクス研究専門委員会「有機エレクトロニクスデバイス・材料に関する研究討論会」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Ito, N. Okamoto, R. Abe, H. Kojima, T. Sato, I. Yamashita, and M. Nakamura
2. 発表標題 Independent Control of Phonon and Carrier Transports in Carbon Nanotube Solids with Biomolecular Junctions for Improving Thermoelectric Performance
3. 学会等名 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小泉拓也, 伊藤光洋, 阿部竜, 小島広孝, 中村雅一
2. 発表標題 紡糸およびドーピング法改良による布状熱電変換素子の高出力化
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村雅一
2. 発表標題 熱電材料設計の基礎とフレキシブル熱電変換素子
3. 学会等名 第63回CVD研究会「第27回夏季セミナー」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Koizumi, M. Ito, R. Abe, H. Kojima, T. Saito, and M. Nakamura
2. 発表標題 Fabrication of Carbon-Nanotube Yarns with Striped Doping for Fabric-Type Thermoelectric Generators
3. 学会等名 9th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計9件

1. 著者名 中村雅一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 9
3. 書名 カーボンナノチューブの表面処理・分散技術と複合化事例：第6章 第5節 カーボンナノチューブ紡績糸を利用したフレキシブル熱電素子の開発	

1. 著者名 中村雅一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 8
3. 書名 スマートテキスタイルの開発と応用：カーボンナノチューブ紡績糸を用いた布状熱電変換素子	

1. 著者名 小島広孝, 中村雅一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 11
3. 書名 サーマルデバイス 新素材・新技術による熱の高度制御と高効率利用：第7章 第8節 フレキシブル環境発電を目指した有機熱電材料	

1. 著者名 中村雅一	4. 発行年 2017年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 9
3. 書名 フレキシブル熱電変換材料の開発と応用：第 I 編第 2 章フレキシブル熱電変換技術に関わる基礎原理と材料開発指針	

1. 著者名 中村雅一	4. 発行年 2017年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 6
3. 書名 フレキシブル熱電変換材料の開発と応用：第 編第 1 章フレキシブル熱電変換素子に向けた有機熱電材料の広範囲探索	

1. 著者名 中村雅一	4. 発行年 2017年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 5
3. 書名 フレキシブル熱電変換材料の開発と応用：第 編第 8 章タンパク質単分子接合を用いたカーボンナノチューブ熱電材料の高性能化	

1. 著者名 中村雅一, 伊藤光洋	4. 発行年 2017年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 9
3. 書名 フレキシブル熱電変換材料の開発と応用：第 編第 4 章カーボンナノチューブ紡績糸を用いた布状熱電変換素子	

1. 著者名 関本祐紀, 中村雅一	4. 発行年 2017年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 7
3. 書名 フレキシブル熱電変換材料の開発と応用: 第 編第7章3 法による糸状試料の熱伝導率評価	

1. 著者名 中村雅一	4. 発行年 2016年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 10
3. 書名 IoTを指向するバイオセンシング・デバイス技術	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 型熱電変換素子のセル直列構造を有する機能性素子とその作製方法	発明者 中村雅一, 伊藤光洋, 小泉拓也	権利者 奈良先端科学技 術大学院大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2016-173221	出願年 2016年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

有機固体素子科学研究室 研究の具体例 http://mswebs.naist.jp/LABS/greendevicere/research/example.html

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
研究分担者	小島 広孝 (Kojima Hirotaka) (70713634)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教 (14603)	
研究分担者	山下 一郎 (Yamashita Ichiro) (30379565)	大阪大学・工学研究科 ・特任教授 (14401)	
研究分担者	西山 靖浩 (Nishiyama Yasuhiro) (00581430)	奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教 (14603)	
連携研究者	真島 豊 (Majima Yutaka) (40293071)	東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授 (12608)	