

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17448

研究課題名(和文) 低密度機能性自立膜の創製とエネルギー変換素子応用

研究課題名(英文) Low-density functional freestanding films towards energy conversion devices

研究代表者

生野 孝 (Ikuno, Takashi)

東京理科大学・基礎工学部電子応用工学科・准教授

研究者番号：60466331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：環境に捨てられている室温～150℃の低温排熱エネルギーを電力に変換する技術の実現が期待されている。研究代表者は、熱から機械エネルギーに変換する熱機関を介し電気エネルギーに変換する技術に着目し、低い温度差でも動作する熱機関の創製と、機械・電気エネルギー変換機構の上記熱機関への組み込みによる新たな熱・電気変換素子の実現を目的とした。

カーボンナノチューブからなる低密度機能性自立膜を用いた超軽量かつ集積可能な熱機関を創製し、室温との温度差が5℃でも伸縮動作を繰り返すことを見出した。さらに、本熱機関に摩擦発電機能を付与したところ、発電量は小さかったものの、熱の一部を電気に変換することが確認できた。

研究成果の概要(英文)：Harvesting large amounts of low-temperature wasted heat is an important subject aimed at development of micro power sources, sensors, and actuators for wireless-sensor network devices, although it has been rarely claimed owing to the second law of thermodynamics. Thermoelectric energy harvesters composed of heat engines (HEs), which turn thermal gradients into mechanical energy, and mechanical-to-electric (M-to-E) transducers have recently received attentions because their output voltages are higher than those of the Seebeck devices. In this study, we proposed and realized a novel diaphragm-like HE based on carbon nanotubes (CNTs). Our HE exhibited a continuous bending-stretching motion on a hot plate even below the temperature of 100 °C in an environment at room temperature. In addition, we combined a M-to-E transducer with the HE for electric output. Although the generated power is tiny, we confirmed that a part of thermal energy was converted to electrical energy.

研究分野：ナノ電子材料，エネルギー変換素子

キーワード：ナノカーボン 熱機関 再生可能エネルギー 低温排熱回収

1. 研究開始当初の背景

工場、家庭、そして人体から環境へ捨てられている 150 以下の低温エネルギーは膨大だが、そのエネルギーの有効利用技術は十分確立しているとはいえない。排熱から利用価値の高い電力へと変換する技術の実現が期待されており、変換技術として、(1)ゼーベック効果を用いた熱電変換と、(2)熱から機械エネルギーに変換する熱機関を介した電気エネルギーへの変換技術、が挙げられる。前者は材料やプロセスの研究開発が盛んに行われている。一方、後者は、エネルギー変換プロセスが一つ多いため変換効率は落ちるものの、ゼーベック効果を用いた熱電変換素子に比べて高電圧出力が可能のため、近年注目を集めている。

後者に用いられる熱機関は、スターリングエンジン、熱音響機関、形状記憶合金熱機関などが挙げられ(図1)、これらは体積が大きく、重いという課題がある。したがって、将来的に熱機関を集積化することを考えると、熱機関の省サイズ、軽量化、動作温度の低減が必要である。また、熱機関から効率的に電気を取り出す技術の開発も重要である。

代表的な熱→機械変換技術(熱機関)



課題: 体積が大きく、重い

図1 従来の熱機関 (Percy et al. "Thermal Energy Harvesting for Application at MEMS Scale", Springer (2014))

2. 研究の目的

本研究では、集積可能な省サイズかつ軽量、そして 100 以下で低温動作する熱機関を新たに提案・創製することを第1の目的とした。さらに、熱機関で生じた機械エネルギーを電気エネルギーへ変換する機構を、熱機関に付与することを第2の目的とした。

3. 研究の方法

本研究で提案した熱機関は、軽量の低密度自立膜と異種材料とを積層したバイモルフ(バイメタル)であり、質量が小さいことから熱容量が小さいことが特徴である。つまり、環境温度に敏感なバイモルフといえる。



図2 本研究で提案する熱機関の動作概略図

図2のアーチ状構造は、短冊状バイモルフを横から見た図である。バイモルフは2つの

材料の熱膨張係数の違いから、環境温度に依存してその曲率半径を変化させる。本研究のバイモルフは、熱容量が小さいため、熱源上のバイモルフがひとたび湾曲すると、熱源に近い下部温度は保持しながら、上部が急冷されるため、上部の曲率半径が大きくなる。したがって、湾曲バイモルフの最大高さが低下する。次の瞬間、バイモルフの上部が熱源に近づくためバイモルフの温度が上昇し、曲率半径が小さくなる。上記の動作を繰り返すことで伸縮動作を繰り返すと考えた。当然のことながら、このような過渡変化は長時間経過すると収束するため、外乱の存在は必須であると予想した。

作製したバイモルフの概略図を図3(a)に示す。多層カーボンナノチューブ(MWNT)から構成されたシート状自立膜の表面に、Ni 薄膜を蒸着した。二層構造の厚さは約 10 μm である。このバイモルフは、図3(b)の手順で作製した。まず、直径 20~30 nm の ZnO 微粒子を堆積した。次に、スプレー法により MWNT 膜(厚さ約 5 μm)を作製し、次いでスパッタ法により Ni 薄膜(膜厚約 100 nm)を堆積した。最後に希塩酸に浸漬し ZnO 薄膜を除去した。

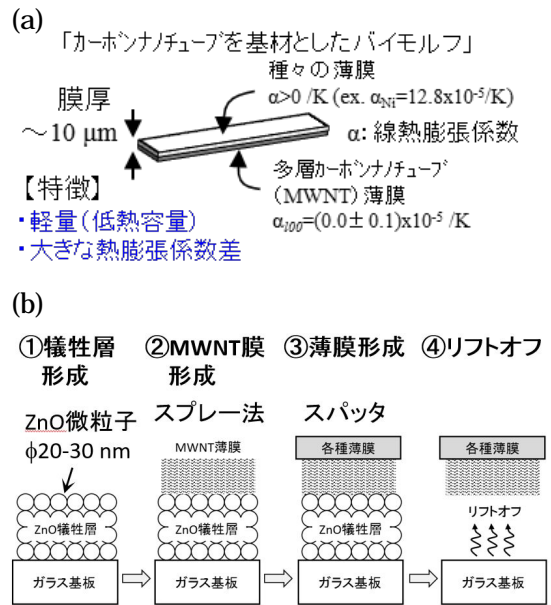


図3 (a)本研究で作製したバイモルフの模式図,(b)バイモルフの作製手順

作製したバイモルフは、超高速レーザー変位計を用い、熱源上の動作を観測した。

4. 研究成果

4.1 熱機関動作の確認

前述したバイモルフを縦 12 mm, 横 3 mm に成形し, 平坦な熱源上に設置した. このときの室温は 27 である. 熱源温度が 100 のとき, 湾曲バイモルフの最大高さの変化が 0.1 mm 以上と大きく伸縮し (図 4(a)), 継続的に伸縮動作を繰り返すことを確認した. このとき, 動作の周期性は観測されなかった. 熱源温度が 40 でも伸縮運動を繰り返し, 人間の体温に近い 36 においても同様の動作を示し, さらに, 室温 +5 の 32 でも微小な伸縮動作を観測することができた. 一方, 図 4(b)に示すように, MWNT 自立膜のみ (バイモルフではない) の場合は, 熱源温度が 120 にも関わらず伸縮動作しないことがわかった.

以上のように, 軽量自立膜から構成される短冊状バイモルフは熱源上で継続的に伸縮動作するというコンセプトを実証することができた. 本素子は, これまでに報告のない新しい熱機関である.

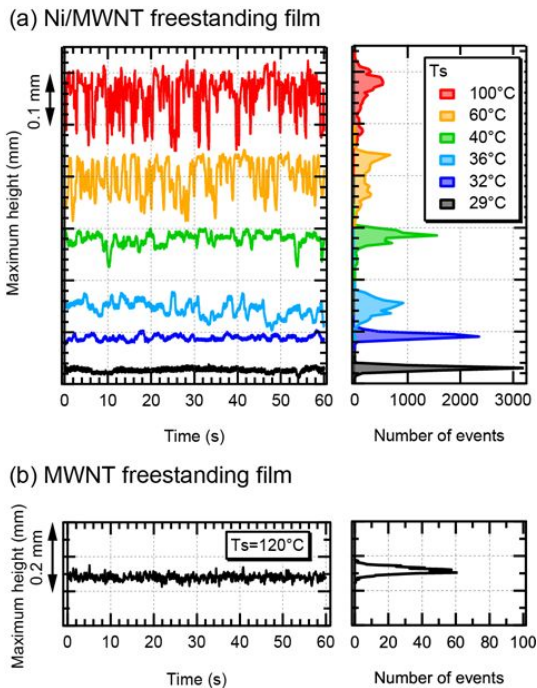


図 4 (a)平坦熱源上における Ni/MWNT の形状の時間変化, (b) MWNT 自立膜の形状の時間変化

次に, 緩和時間近似モデルに基づき, 本動作のシミュレーションを行った. 質量やヤング率で決まる時定数 τ_f と熱容量や熱伝導率などで決まる時定数 τ_T を変化させたときの形状変化を調べたところ, 各時定数が同程度でかつ相対的に小さい場合, 伸縮運動することが明らかになった. ただし, 熱源表面の空間温度分布の時間変化が無い場合は, 運動が収束することがわかった.

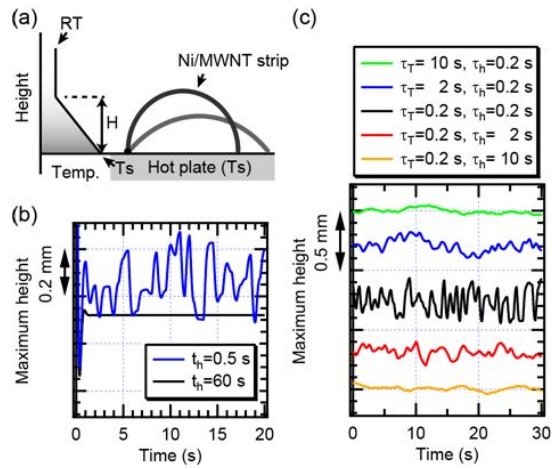


図 5 シミュレーション結果

4.2 バイモルフの形状変化の時間応答

さらに, 加熱による形状変化の時間応答を実験的に調べた. 図 6(a)に示すように, レーザ照射による形状変化を調べた. レーザ照射の際, 初期の熱応答時間は約 2 ms であることがわかった (図 6(b)). さらに, 0.2 Hz のパルスレーザーにより, バイモルフがレーザーに追従して形状変化することを明らかにした.

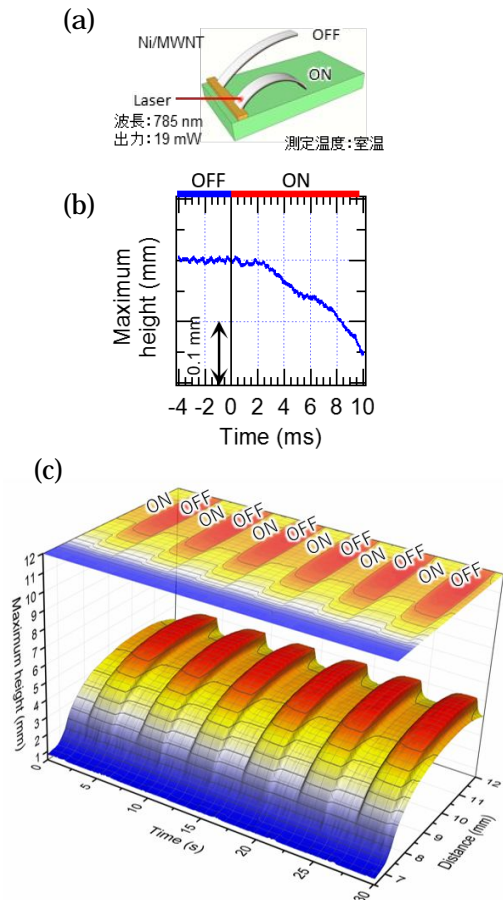


図 6 パルスレーザー照射によるバイモルフの形状変化

4.3 機械 電気エネルギー変換機能の付与
 本研究で開発した熱機関に、機械 電気エネルギー変換機能を付与した。熱源上に設置した短冊状の MWNT 自立膜 (Ni 薄膜と積層化) は継続的に伸縮動作を示し、機械運動する自立膜の一部を金属電極と動的接触させることにより、外部回路への電力出力を確認できた。これは、MWNT と金属の仕事関数差を駆動力にした界面電荷分離が発電原理であると考えられる。一方で、熱源温度 150 で出力電力が最大 30 μ W と微小なため、今後は高出力化技術の開発が必要である。

さらに、MWNT 軽量自立膜表面に化合物太陽電池薄膜を形成し、可視光による光電変換を確認した。また、短冊状に成形した本積層自立膜を熱源上に設置したところ、熱機関動作を示した。つまり、本自立膜は、(1)太陽光スペクトルの赤外光領域 (通常の太陽電池の透過損失領域) による熱 (赤外光) 機械電気変換と、(2)可視光領域による光 電気変換、の両立が可能な高出力エネルギー変換素子のビルディングブロックとして期待できる。

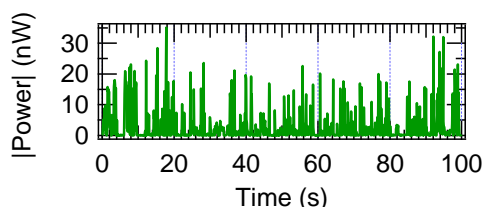
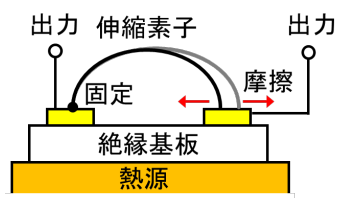


図 7 本研究で得られた熱 機械 電気変換素子の概略図と出力

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

T. Ikuno, T. Fukano, K. Higuchi, and Y. Takeda, "Bimorph micro heat engines based on carbon nanotube freestanding films", Appl. Phys. Exp. 8(2015)115101.

〔学会発表〕(計 1 件)

T. Ikuno, T. Fukano, and K. Higuchi, "Ultralight Heat Engines Based on Carbon Nanotube Free-Standing Films", Material Research Society 2015 Spring Meeting.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rs.tus.ac.jp/tikuno>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

生野 孝 (IKUNO, Takashi)

東京理科大学・基礎工学部電子応用工学科・准教授

研究者番号：60466331

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()