

# お湯と水の温度差を利用したクリーンなエネルギー変換技術

宇部工業高等専門学校 機械工学科 5 年 機械材料実験室  
重村和也（代表者）、勝谷一基、末廣健治

## 1. はじめに

我々は現在、安全なエネルギーの安定確保や温室効果ガス排出削減など緊急対応が求められる課題に直面している。その一方で、国内産業界からは 27 万[Tcal/年]という膨大な熱エネルギーが排ガスや排温水として廃棄されている。特にこの排熱エネルギーの中でも温度が低い 200 [°C]以下の排ガスや排温水の占める割合が高く、これら低位排熱エネルギーの年間総量は約 20 万[Tcal/年]にも達している<sup>(1)</sup>。仮にこの排熱量の 5%を回収できたと仮定すると、100 [MW]を超える発電量に相当し、エネルギー問題の改善に貢献することができる<sup>(2)</sup>。これらの低位な排熱エネルギーについては様々な方面から回収技術が検討されているが、未解決の課題も多数存在するのが現状である。例えば、この熱エネルギーは温水プールや農産物生産に必要とされる熱の供給源として活用されているが、この技術は排熱源である工場などの近郊でしか利用できず、エネルギーを“輸送する”あるいは“蓄える”ことが難しい。その他にはこの熱エネルギーによってアンモニアなどの低沸点媒体を加熱・蒸発させ、その蒸気でタービンを回すというバイナリー発電への適用も行われている。この形式では熱エネルギーを電気エネルギーという形に変換するため、エネルギーの“輸送”あるいは“蓄エネルギー”が可能であるが、高額で大型な装置が必要であるため小規模な工場への設置は難しい。したがって、熱エネルギーを電気エネルギーなどに効率よく変換することができ、小規模な工場や排熱源にも対応できるエネルギー変換技術の開発が求められている。

本実験では形状記憶合金（Shape Memory Alloy, SMA）という機能性材料を使用して、100[°C]以下の低位熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できる新技術（SMA 熱機関）の開発に取り組む。本実験で目標とするのは、“クリーンで持続可能なエネルギー変換技術”の開発であり、以下 3 点を満足する新技術の開発を目指す。

- (1) 現在は有効に利用できていない低位未利用熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できること。
- (2) “水を流すだけで駆動する SMA 熱機関”であること。
- (3) 温室効果ガスを排出せず、低騒音であること。

本レポートにおいて、まず第 2 章では SMA を利用したエネルギー変換の原理、既に提案されている先行技術、本実験で提案する新しい熱機関の駆動原理について述べる。次に第 3 章では実験方法を説明する。次に第 4 章では、作製した SMA 熱機関の性能を評価する。特に供給する温水の温度に着目し、温水温度によって SMA 熱機関の出力がどのように変化するのかを明らかにする。また、今後の展望について述べる。最後に第 5 章にまとめを述べる。

## 2. SMAによるエネルギー変換

### 2.1 SMAを用いたエネルギー変換の原理

図1はSMAを用いたエネルギー変換の原理を示している<sup>(3)</sup>。図1(b)に示すように、SMAは常温においては軟質の状態にあり、外部から負荷 $W$  [N]を加えると $\Delta l$  [m]だけ変形する。これをある温度まで加熱すると硬質の状態に変化し、図1(c)に示すように形状回復が生じる。このようにしてSMAに加熱と冷却を繰り返し与えることで、機械的仕事(エネルギー) $W \cdot \Delta l$  [Nm]を得ることができる。

また、最も一般的なSMAはチタン(Ti)とニッケル(Ni)の合金であるが、このTi-Ni SMAにおいて形状回復が生じる温度(軟質の状態から硬質の状態に変化する温度。この温度をオーステナイト変態温度よぶ。以下 $A_f$ )は60から80°C程度であり、これを40°C以下程度まで冷却すると再び軟質な状態(この温度をマルテンサイト変態温度とよぶ。以下 $M_s$ )に戻る。この加熱・冷却という熱サイクルによる形状回復は $10^7$ 回以上の繰返しも可能である。また、Ti-Ni SMAは強度、靱性、耐食性などの諸性質にも優れる。したがって、Ti-Ni SMAが本実験で目的とする低位熱エネルギーの有効利用を実現するために好適であり、実験にはこれを使用する。

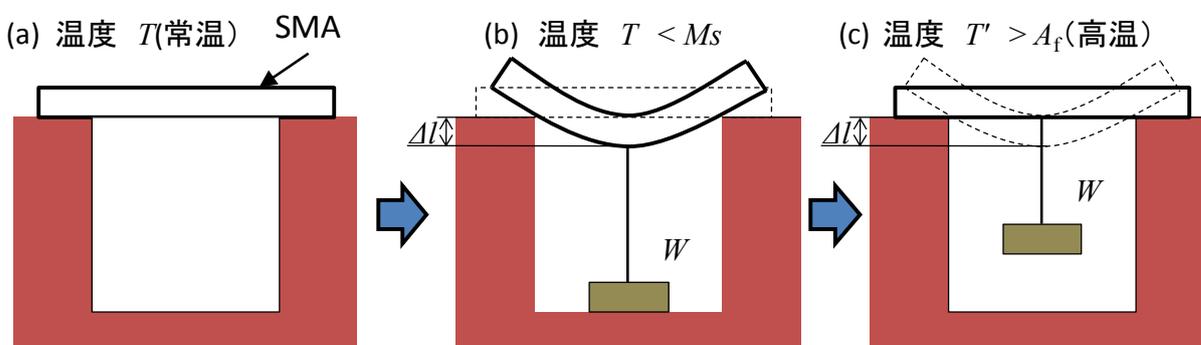


図1 SMAを用いたエネルギー変換の原理

### 2.2 オフセットクランク SMA熱機関

図2は、これまでに提案されているSMA熱機関の一例であり、オフセットクランク機構とよばれるものである<sup>(3)</sup>。この機構は複数のSMAコイルばねと回転軸A、回転可能なピボットBおよびリングからなる。SMAコイルばねが温水に入ると収縮し、中心軸のずれを利用した回転モーメントでリングが回転する。収縮したSMAコイルばねは大気中に持ち上げられ、冷却されるとともにリングの回転によって伸ばされる。温水中で形状回復するSMAコイルばねの収縮力は大気中のSMAコイルばねを伸ばすのに必要な力より大きいので、リングは連続して回転する。このような機構を利用することで、熱エネルギーを機械的エネルギーに変換することができる。

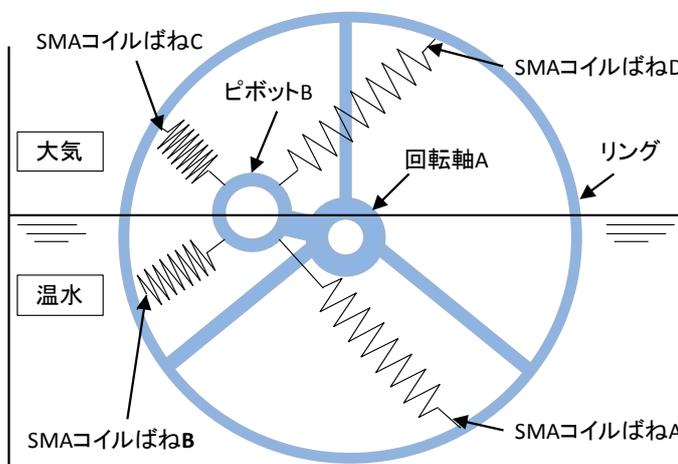


図2 オフセットクランク型SMA熱機関

### 2.3 改良型オフセットクランク SMA 熱機関

前節に示したオフセットクランク機構の課題は、SMA コイルばねの冷却方法にある。すなわち、図 2 の状態を例に考えると、SMA コイルばね A の収縮によって時計回り方向の回転力が生み出されるが、SMA コイルばね C が  $40[^\circ\text{C}] (M_s)$  以下に冷却されていない場合コイルばね C の収縮力も依然として高く、リングの回転を妨げる。

図 3 は本実験で提案・作製する改良型オフセットクランク機構の模式図である。図 3 に示すように横向きオフセットクランク機構の上方にノズル A と B が配置され、これらノズルは回転軸 A と連結されている。また、リングは固定されており、ノズル A, B には温水と常温水がそれぞれ供給される。まず、図 3(a) に示すように、ノズル A から供給された温水により SMA コイルばね A が加熱され、収縮力と回転モーメントが生じ、回転軸 A は左回りに回転する。同時に、ノズル B から供給された常温水によりコイルばね B は強制的に冷却され軟質な状態となり、SMA コイルばね A の収縮を妨げることなく、スムーズに回転を生み出す。さらに、ノズル A, B は回転軸 A と連結されているため、SMA コイルばねの収縮によって生じた回転によって両ノズルも回転し、次の SMA コイルばね (図 3(b) における SMA コイルばね D と A) の加熱と冷却を行う。

図 3 に示すモデルではリングを固定し軸と両ノズルが回転する機構となっているが、反対に軸とノズルを固定し、リングが回転する機構とすることも可能である。本実験では、後者を採用し、改良型オフセットクランク SMA 熱機関の作製および性能評価を行う。

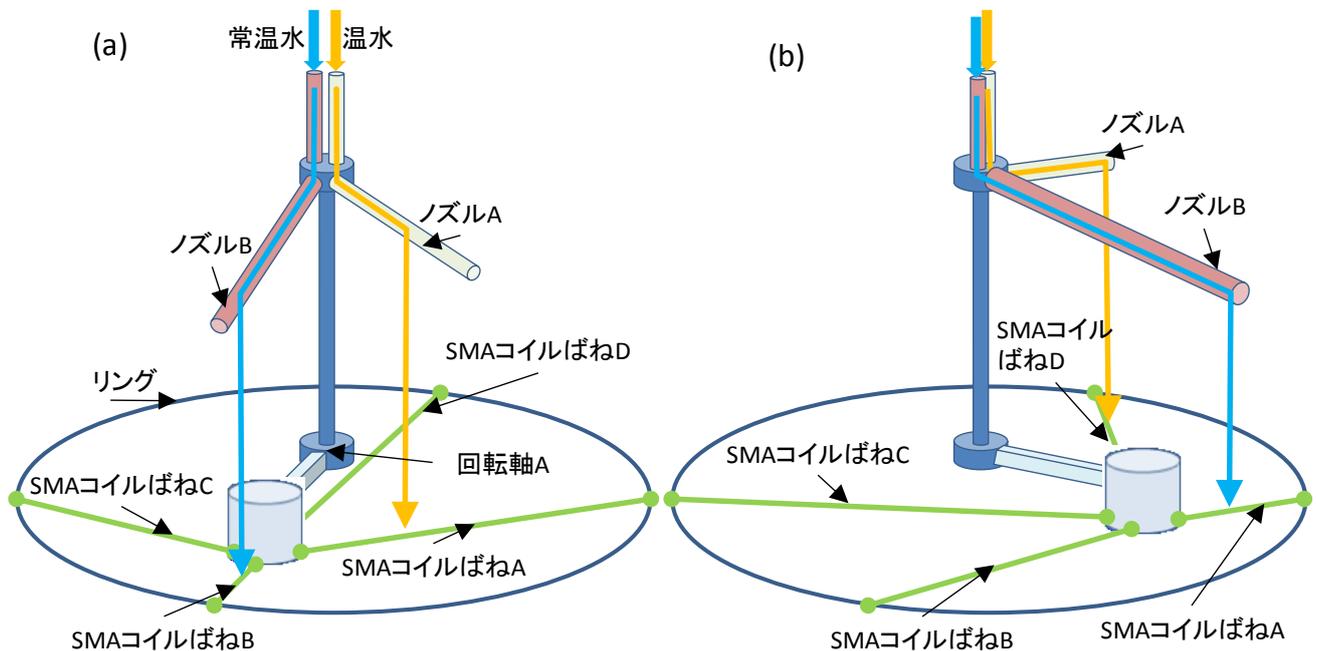


図 3 改良型オフセットクランク SMA 熱機関の作動原理

### 3. 実験方法

#### 3.1 材料

材料は市販の Ti-Ni SMA 線材（株式会社ニラコ）である。線径は 0.7mm のものを使用した。この材料の  $A_f$  は 77 [°C]、 $M_s$  は 55 [°C] である。

※ここに示す  $A_f$  は形状回復が終了する温度であり、本材料において形状回復が始まる温度  $A_s$  は 53 [°C] である。

#### 3.2 形状記憶熱処理（SMA コイルばねの作製）

Ti-Ni SMA 線材を用いて SMA コイルばねを作製した。ここで、形状をコイルばねとするのは、形状回復可能な駆動範囲を拡大させるためである。具体的には、Ti-Ni SMA 線材に引張負荷を加えた場合に、 $A_f$  点以上まで加熱することで完全に元の形に回復できる伸び量の限界は 8% 程度であるが、Ti-Ni SMA コイルばねでは、その限界が 50% を超すことも容易である。

SMA は、目的とする（記憶させたい）形状に材料を成形し、これを加熱・急冷することで形状記憶を施すことができる。本実験では、コイルばね形状に成形・拘束した Ti-Ni SMA 線材を 500°C で 30 分加熱し、水冷処理を施すことで Ti-Ni SMA コイルばねを作製した。コイルばねの形状として内径 5.7 [mm]、外径 7.1mm、巻き数 20 回とした。

#### 3.3 オフセットクランク熱機関の作製

図 3 で説明したオフセットクランク機構 SMA 熱機関を作製した。リング（フライホイール）直径は 120 [mm] としアルミニウム板で作製した。また、回転軸の軸受としてボールベアリングを使用し、コイルばねの本数を 6 本として熱機関を作製した。図 4 は試作したオフセットクランク SMA 熱機関であり、接地部面積は 100×60[mm] 程度である。さらに、作製した熱機関のリング部には直径 50 [mm] のプーリーを設置した。このプーリーに重りを吊るし、熱機関に負荷トルクを与える機構となっている。また、熱機関の回転速度は赤外線式デジタルタコメータ（RM-2000）を用いて測定した。

#### 3.4 温水・常温水供給装置の作製

図 5 に本実験で作製した改良型オフセットクランク SMA 熱機関の外観図を示す。この装置のうち、温水・常温水供給装置は温度コントローラー（ログサーモ DGL0100, 八光電機）と水投げ込みヒーター（SWA1510, 八光電機）、温水と常温水のタンク、バルブ、供給管、シャワーヘッドからなる。この装置を用いて所定の温度の温水と常温水を準備し、前節で述べたオフセットクランク SMA 熱機関の SMA コイルばねの加熱と冷却を行った。なお実験に使用した DGL0100 と SWA1510 は八光電機株式会社から提供して頂いた。

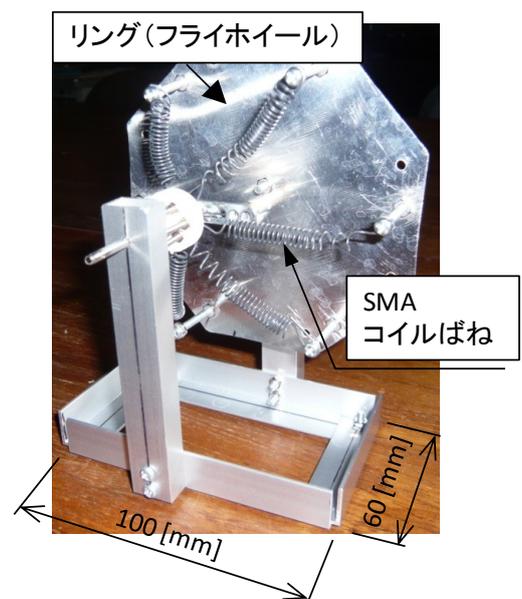
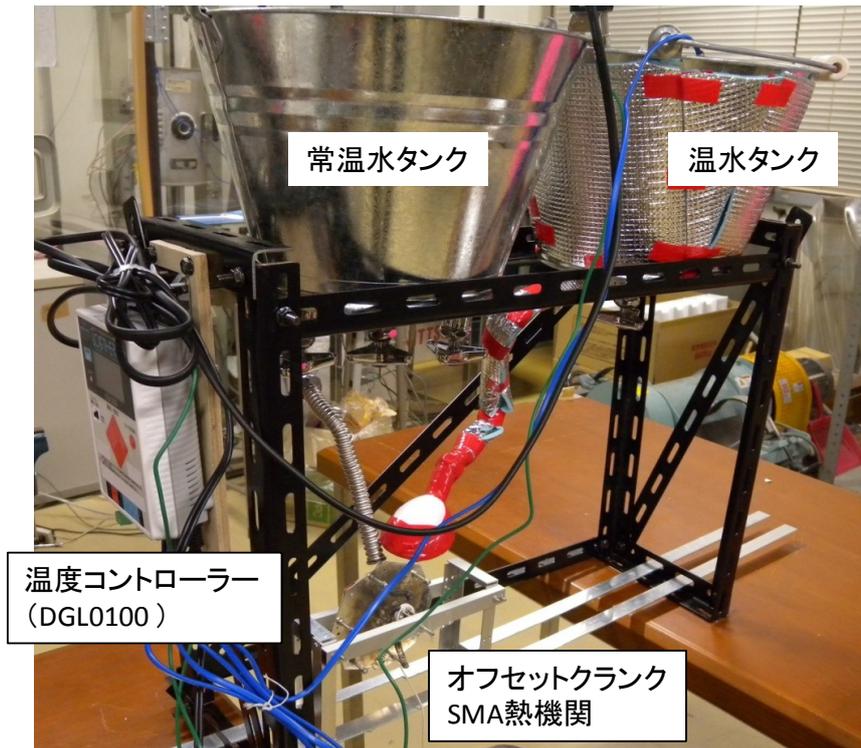


図 4 オフセットクランク SMA 熱機関  
(6 本の SMA コイルばねを使用)

(a)



(b)

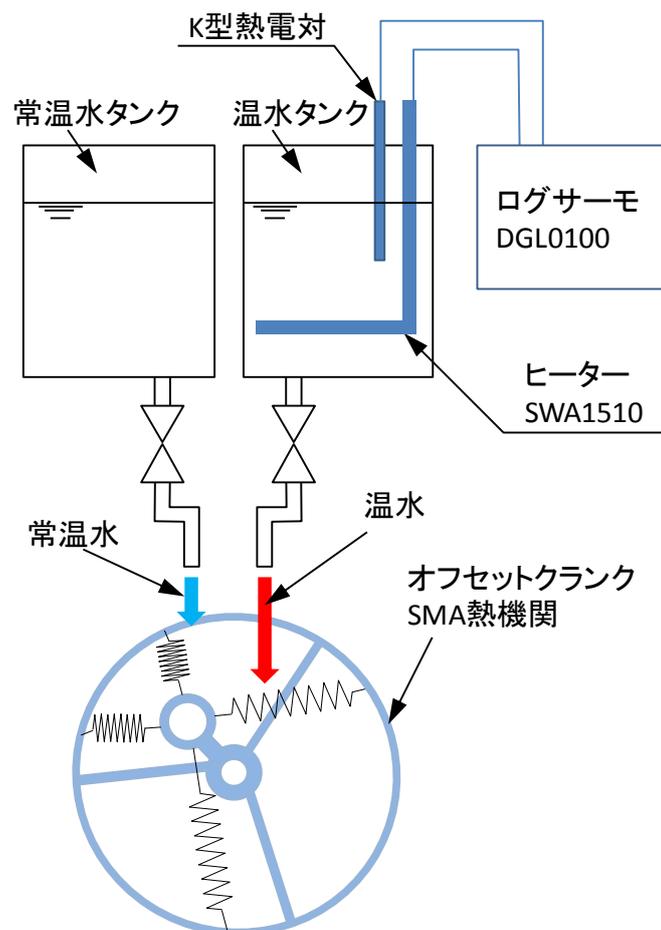


図5 作製した改良型オフセットクランク SMA 熱機関 (a)装置外観図, (b)装置の構成

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 改良型オフセットクランク熱機関の駆動実験（動画）

動画1は、80[°C]の温水と常温水を供給した場合の改良型オフセットクランク機構 SMA 熱機関の駆動の様子である。動画に示すように、まず画面右側の給水管とシャワーヘッドを介して 80[°C]の温水だけを供給し、熱機関の右側に配置した SMA コイルばねを加熱した。これによって加熱された SMA コイルばねは収縮し、また SMA 熱機関は反時計回りの回転運動を開始するが、温水だけを供給した場合、この回転は直ぐに停止する。その後、左側の給水管から常温水を供給し、収縮した状態の SMA コイルばねを冷却すると、SMA 熱機関はスムーズかつ継続して反時計回りの回転運動をすることが分かる。また、この SMA 熱機関が駆動する際、聞こえるのは水が流れる音のみであり、低騒音で駆動していることが分かる。

温水だけを供給した場合、わずかに反時計回りの回転運動をした後、直ぐに回転運動が停止した理由としては、SMA コイルばね全体が加熱された状態に達しており、温水が直接当たっている SMA コイルばねから生み出される収縮力がそれ以外の SMA コイルばねの収縮力によって打ち消されているためと考えられる。このように SMA コイルばねの加熱だけではなく冷却も適宜行わなければ、スムーズな回転が得られないということが、2.3 節でも述べた SMA 熱機関の改善点である。一方で、常温水を供給することでスムーズな回転運動が生じることが確認されたことから、本実験で提案した改良型オフセットクランク SMA 熱機関においては従来の熱機関の課題を解決できていることが分かる。

以上の駆動実験から、本実験で提案した改良型オフセットクランク SMA 熱機関によって、温水と常温水を供給することで熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できることを確認した。また、従来のオフセットクランク機構の問題点を解決できることも確認した。

## 4.2 回転速度と温水温度の関係

図6は、供給する温水の温度を75[°C]から90[°C]まで変化させたときの改良型オフセットクランク SMA 熱機関のリング部の回転数  $n$  [rpm]を示している。この図に示すように温水の温度が高くなるほど回転数も単調に増加しており、両値はほぼ線径関係にあることが分かる。このように温水温度が高くなるほど回転速度が高くなる理由は、温度が高い方が Ti-Ni SMA コイルばねの加熱速度が高くなり、 $A_f$ 点（形状回復が生じる温度）まで加熱されるまでの時間が短くなるためである。

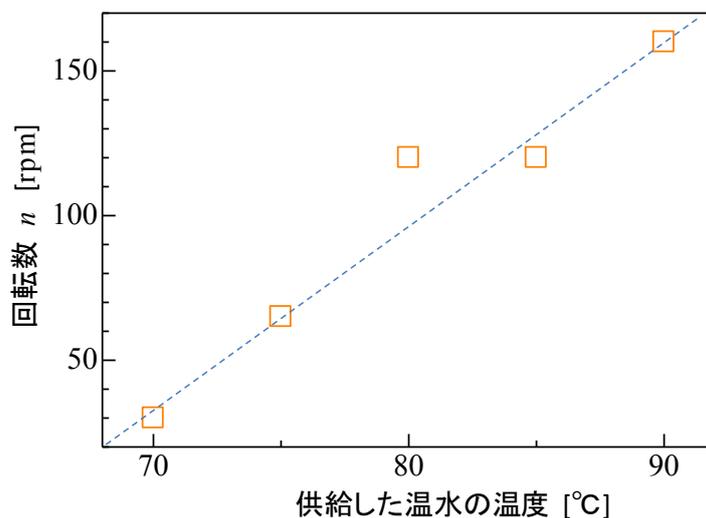


図6 供給する温水温度と改良型オフセットクランク SMA 熱機関の回転数の関係

## 4.3 熱機関のトルクと温水温度の関係

図7は改良型オフセットクランク熱機関に種々の負荷トルク  $T$  を与えた状態で温水(70[°C]から90[°C])と常温水を供給し、リングの回転数  $n$  を測定した結果である。図に示すようにいずれの温水温度下においても負荷トルクが増大するほど回転速度は低下する。また、同一の負荷トルク下においては温水温度が高いほど回転速度が高くなることが分かる。

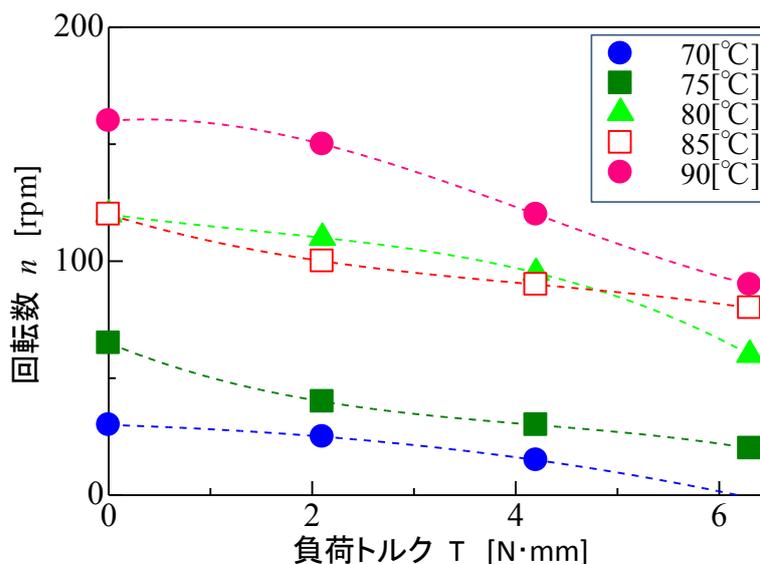


図7 改良型オフセットクランク SMA 熱機関における負荷トルクと回転数の関係  
(供給する温水温度の影響)

#### 4.4 熱機関の出力と温水温度の関係

図7は図6に示した回転速度と負荷トルクの関係より求めた各条件下での改良型オフセットクランク熱機関の出力 $P$ を示している。ここで出力 $P$ は以下の式を用いて導出した。

$$P = \frac{2\pi T n}{t} \quad (1)$$

ここで、 $T$ は負荷トルク、 $n$ は回転数、 $t$ は時間である。図7に示すようにいずれの温水温度下においてもある回転速度で出力は最大値をとることが分かる。また、その最大値は温水温度が高いほど高くなること分かる。

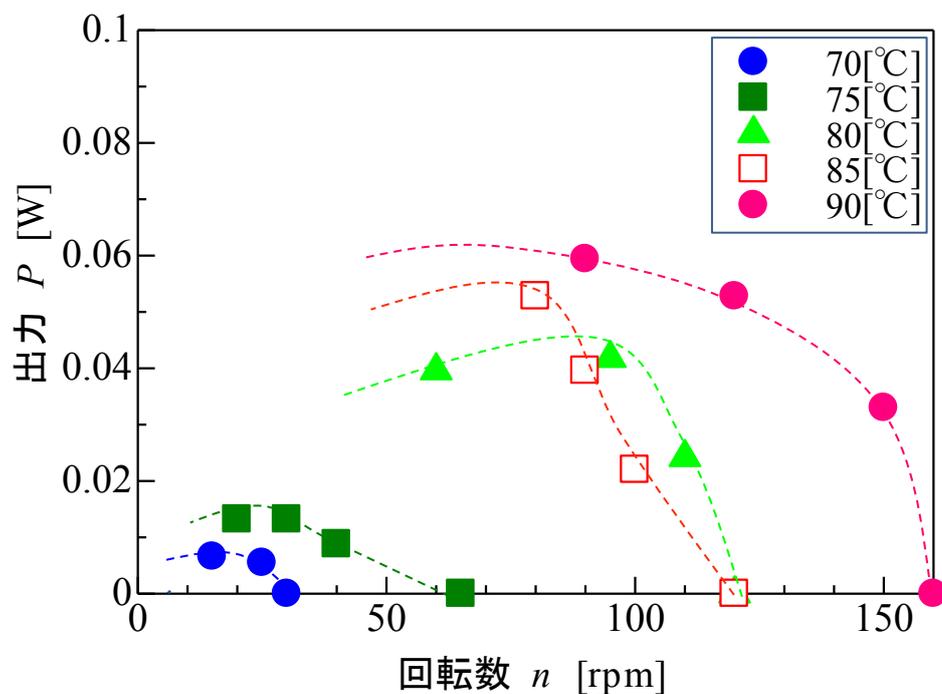


図8 改良型オフセットクランク SMA 熱機関における回転数と出力の関係  
(供給する温水温度の影響)

#### 4.5 改良型オフセットクランク SMA 熱機関の可能性と今後の展望

まず、本実験より得られた改良型オフセットクランク SMA 熱機関の出力  $P$  を“エネルギー密度”という観点から検証する。“エネルギー密度”とは単位密度当たりでどれくらい発電できるかを示す数値である。一例として、報告されている種々の発電方式のエネルギー密度（発電施設単位面積当たりの出力）を見ると、原子力発電で  $1.7 \times 10^6$  [kW/km<sup>2</sup>], 太陽光発電で  $1.7 \times 10^4$  [kW/km<sup>2</sup>], 風力発電で  $4.7 \times 10^3$  [kW/km<sup>2</sup>] 程度とある<sup>(4)</sup>。一方で、本研究で作製した改良型オフセットクランク SMA 熱機関においては、得られた最大出力が 0.06[W], 接地部面積が  $120 \times 50$  [mm<sup>2</sup>] 程度であることから、そのエネルギー密度は  $1.0 \times 10^4$  [kW/km<sup>2</sup>] であり、太陽光発電や風力発電に匹敵するエネルギー密度を有する可能性が示された。

次に、既に開発されている SMA 熱機関との比較を行う。本実験で提案した SMA 熱機関がその他の SMA 熱機関と比べて優位な点は、「温水と常温水の供給方式が簡単であること」にある。すなわち、上述したように SMA 熱機関をスムーズに駆動させるためには、如何にして SMA 素子の加熱・冷却を行うのが重要である。図 1 を用いて説明すれば、図 1(c)から(b)の状態に戻るために、自然冷却に任せては応答性が低く、応答性を向上させるためには SMA 素子を冷却するための機構を追加する必要がある。これまでも温水と常温水を用いて加熱と冷却を施し、スムーズな駆動を可能にした SMA 熱機関は開発されているが、そのほとんどはバルブと制御回路、外部電源等を用いて温水と常温水の供給を制御するものである。この形式では水の供給に電気エネルギーを使用してしまうため、総合的なエネルギー回収効率を低下させることになる。一方で、改良型オフセットクランク SMA 熱機関は、温水、常温水いずれも何ら制御する必要なく流すだけでエネルギー変換ができ、エネルギー回収効率の向上が期待できる。

次に、改良型オフセットクランク SMA 熱機関の改善点について述べる。改善点は、“出力の向上”であり、その手段として以下の方法が挙げられる。まず 1 点目として、温水と常温水を供給する位置をより厳密に制御し、ピンポイントで加熱や冷却をしたい SMA コイルばねだけに水を供給できる装置にする必要がある。また 2 点目として、本実験においては冷却に用いた水の温度に関しては全く検討していないため、これを検討する必要がある。SMA コイルばねの温度が下がり過ぎても再加熱に余計なエネルギーを要するため、温水と冷却用の水の両者に着目した駆動実験を行い、最適な温度条件を見いだす必要がある。3 点目として SMA コイルばねの形状を検討する必要がある。すなわち SMA コイルばねから生み出される力はコイルばね形状や巻き数、線径等によって変化するため、これらを検証し、より高い出力が得られる熱機関を作製する必要がある。

最後に、更なる展開として改良型オフセットクランク熱機関と水力発電を組み合わせたハイブリッド型エネルギー回収システムの開発を考えている。具体的には、改良型オフセットクランク SMA 熱機関の下部に水力発電装置とタービンを配置する。SMA を駆動させるために使用した温水と常温水をそのままタービンに送り、熱エネルギーだけでなく水が持つ位置エネルギーも併せて回収するというシステムである。このシステムの実現によってエネルギー回収効率の飛躍的な向上が期待できる。

## 5. まとめ

本実験ではチタンとニッケルからなる形状記憶合金（Shape Memory Alloy, SMA）という機能性材料を使用して、100℃以下の低位熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できる新技術（SMA 熱機関）の開発に取り組んだ。開発する SMA 熱機関が“クリーンで持続可能なエネルギー変換技術”であるために、以下3点を達成目標として実験を行った。

- (1) 現在は有効に利用できていない低位未利用熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できること。
  - (2) “水を流すだけで駆動する SMA 熱機関”であること。
  - (3) 温室効果ガスを排出せず、低騒音であること。
- 得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 温水と常温水を流すだけで、この温水が持つ熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できることを確認した。また、本実験で提案した改良型オフセットクランク SMA 熱機関は、従来型のオフセットクランク SMA 熱機関よりもスムーズにエネルギー変換ができる。さらに、この SMA 熱機関は極めて静かに駆動する。
- (2) 本実験で作製した改良型オフセットクランク SMA 熱機関は供給する温水の温度によって出力が変化することが分かった。
- (3) 作製した改良型オフセットクランク SMA 熱機関は太陽光発電や風力発電に匹敵するエネルギー密度を有しており、実用化できる可能性が示された。

## 謝辞

本実験を遂行するに当たり、株式会社八光、株式会社八光電機からご支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。また、実験に協力して頂いた研究室の皆様にお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 一般財団法人 省エネルギーセンター資料, <http://www.eccj.or.jp/index.html>.
- (2) 井上修行, 他 5 名, “排熱発電装置の開発（作動媒体及び膨張タービンの検討）”, エバラ時報, No.211, pp.11-20, 2006.
- (3) W.S.Ginell, et.al., “Nitinol Heat Engines”, MECHANICAL ENGINEERING, pp.28-33, 1979.
- (4) 東北電力 HP, <http://www.tohoku-epco.co.jp/>.