

## 形状記憶合金熱エンジンの研究

— 出力特性試験と開発の課題 —

戸伏壽昭・岩永弘之・大橋義夫・木村君男

## Research on Shape Memory Alloy Heat Engine

— Experiments on Output Power Characteristics  
and Problems in Development —

Hisaaki TOBUSHI, Hiroyuki IWANAGA,  
Yoshio OHASHI and Kimio KIMURA

In order to develop the shape memory alloy heat engine, basic output power characteristics of three types of heat engines are investigated. As a shape memory alloy, the Ti-Ni alloy wire with an outer diameter 0.75 mm is used. The heat engines employed were the twin crank engine, offset crank engine and simple pulley engine. The results are summarized as follows: (1) The output power of engines increases with the hot water temperature, (2) The range of rotational speed where the output power is maximized is wide, (3) Specific output power is 1-3 W/g, (4) The maximum output power increases with the number of wire loops of shape memory alloy. Problems in development of the shape memory alloy heat engine are fatigue strength, welding and corrosion resistance of the material as well as efficiency and mechanism of the engine.

### 1. 緒言

形状記憶合金(Shape Memory Alloy, 以下 SMA という)は, 低温では小さな外力により変形させることができ, 高温では大きな回復力を伴い記憶形状に戻る。この性質を利用する SMA 熱エンジンは, 低位熱エネルギーを機械的エネルギーに変換できることや, クリーンエンジンであることなどから米国を中心に研究が行われてきた<sup>1)</sup>。これまでに開発された熱エンジンはその機構からオフセットクランク式, 斜板式, タービン式, フィールド式に分けられる<sup>2)3)</sup>。日本では本間がタービン式<sup>4)</sup>, 西川が斜板式熱エンジン<sup>5)</sup>を研究してきた。低位熱エネルギー資源の有効利用の点や大出力エンジンの可能性の点<sup>6)</sup>から, SMA 熱エンジンの実用化への期待は大きい。

本研究ではツインクランク式, オフセットクランク式およびシンプルプーリー式熱エンジンについて, 出力特性の基礎実験を行い<sup>7)8)</sup>, その特性に影響を与える因子の影響を検討した。また, SMA 熱エン

ジンを開発するための課題についても検討した。

### 2. 実験方法

#### 2・1 試料および実験条件

実験に用いた SMA 熱エンジンはツインクランク式<sup>7)</sup>, オフセットクランク式<sup>2)</sup>およびシンプルプーリー式エンジン<sup>9)</sup>である。各エンジン共に, 高温部には湯の入った恒温槽を用い, 低温部は大気中であり, 扇風機で送風して冷却効果を高めた。SMA 素子は, 線径0.75mm の Ti-Ni 合金(古河電気工業株式会社製)であり, ツインクランク式エンジンに用いた材料の  $A_f$  点は  $41^\circ\text{C}$  で, 他の物は  $44^\circ\text{C}$  である。各エンジンの円盤やプーリー等にはアルミニウム合金を用い, 各回転部分にはベアリングを使用した。室温は  $12\sim 15^\circ\text{C}$  であった。トルクはプロニー動力計により, 回転数は光学式タコメータにより測定した。

#### 2・2 ツインクランク式エンジン

ツインクランク式エンジンの機構の概略を図1に

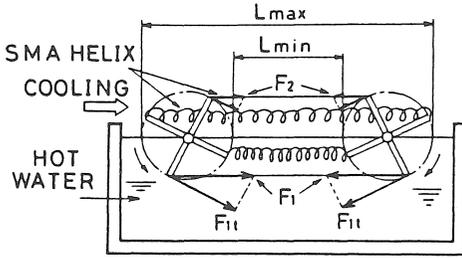


図1 ツインクランク式エンジンの機構

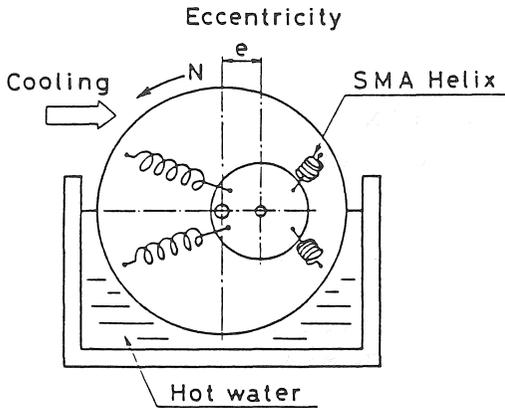


図2 オフセットクランク式エンジンの機構

示す。左右の2本のクランク軸に設けた各クランクをSMAコイル素子で連結してある。各クランク軸には $60^\circ$ 間隔に6本のクランクが配置されている。SMAコイルは、最小クランク間距離 $L_{min}$ より短い長さ $L_0$ に形状記憶させている。最大と最小のクランク間距離は、 $L_{max}=245\text{mm}$ 、 $L_{min}=85\text{mm}$ である。湯中のSMAコイルは形状記憶効果により、回復力 $F_1$ で収縮し、その接線方向成分 $F_{1t}$ はクランクを回転させる力となる。 $F_{1t}$ は大気中のコイルの収縮力 $F_2$ より大きい。この $F_1$ と $F_2$ との差から、湯中において各クランクが互いに近づく方向の回転運動が生じる。

### 2・3 オフセットクランク式エンジン

オフセットクランク式エンジンの機構の概略を図2に示す。SMA素子には、SMAコイルを密着状態で形状記憶処理して用いた。形状記憶効果(Shape Memory Effect, 以下SMEという)により湯中のSMAコイルを記憶形状の密着状態に戻そうとする収縮力が発生する。この力の接線方向成分により円盤は矢印の方向に回転する。SMAコイルの有効径、

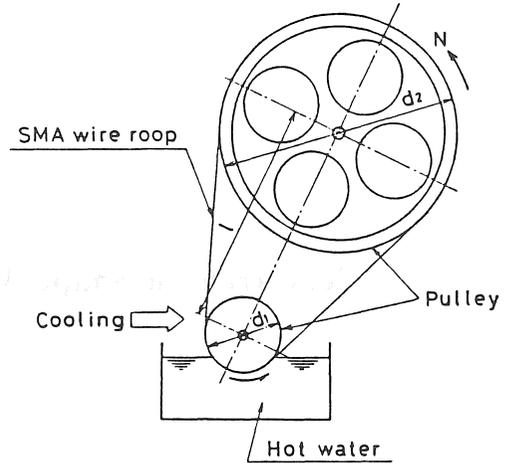


図3 シンプルプーリー式エンジンの機構

密着時の長さ、運転時の最大長さ、最小長さを $D$ 、 $L_0$ 、 $L_{max}$ 、 $L_{min}$ で示す。SMAコイルは二つの円盤の円周上を6等分した各点を結んである。その各節点にはSMAコイルに曲げモーメントが生じないようにミニチュアベアリングを用いた。このSMAコイルで連結される二つの円盤の偏心量 $e$ は $35\text{mm}$ である。空気中での冷却効果を高めるために、大円盤には孔を5個設けた。これらの孔の形状は三日月形で、湯中での流体抵抗が小さくなるようにした。

### 2・4 シンプルプーリー式エンジン

シンプルプーリー式エンジンの機構の概略を図3に示す。SMA素子にはSMAワイヤを直線に形状記憶処理し、抵抗溶接によりループにして用いた<sup>10)</sup>。

SMEにより湯中のSMAワイヤを記憶形状の直線に戻そうとする力が発生する。この力の接線方向成分によりプーリーは回転し、SMAワイヤは矢印の方向に運動する。SMAワイヤループの巻掛けにより運動する二つのプーリーの外径およびその軸間距離を $d_1$ 、 $d_2$ 、 $l$ で示す。

## 3. 実験結果および考察

### 3・1 トルクと回転速度の関係

図4はツインクランク式エンジンのコイル巻数40についての結果である。一定トルクで湯温を徐々に下げて実験を行い、負荷の値を変えてこれを繰返した。その結果に基づいて湯温ごとにまとめたものである。なお、横軸の切片の値は無負荷時の回転速度である。トルクと回転速度の関係は反比例を示した。

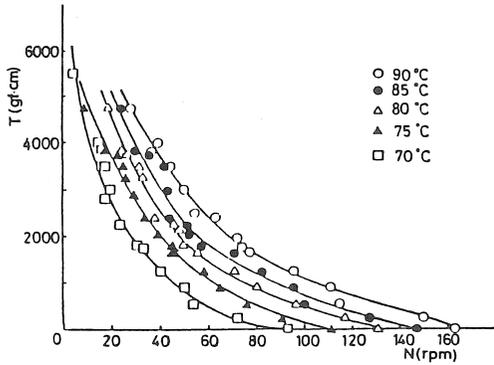


図4 トルクと回転速度の関係 (Twin Crank)

これは回転速度が低くなると、高速時に比べてSMA コイルの空気中での冷却時間が長くなるために、 $F_2$ が小さくなり、 $F_1$ と $F_2$ との差が大きくなることによると考えられる。本間の熱エンジンは水冷式で、その関係は直線的であり<sup>4)</sup>、西川の空冷式のもの本本研究と同様の傾向である<sup>5)</sup>。また、湯温が高いほどトルクと回転速度は大きくなる。各エンジンのトルクと回転速度の値を比較すると、ツインクランク式とオフセットクランク式エンジンではトルクが大きく、回転速度が小さいのに対して、シンプルプーリー式エンジンではトルクが小さく、回転速度が大きい。

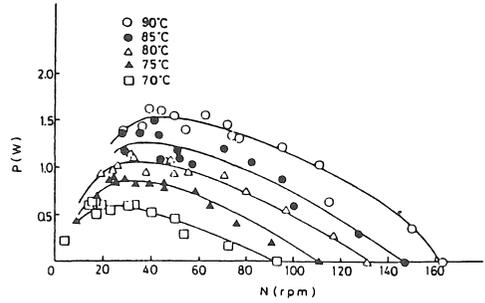
3・2 出力と回転速度の関係

図5(a)はツインクランク式、(b)はオフセットクランク式、(c)はシンプルプーリー式エンジンの出力と回転速度の関係を示す。共通にみられる傾向としては、緩やかな山形を示し、最大出力の出る回転速度が、湯温の上昇に伴い高回転速度側にずれる傾向を示す。また、湯温が高いほど、大きな出力が得られる。これはSMEにより生じる回復力が湯温とともに大きくなるためである。

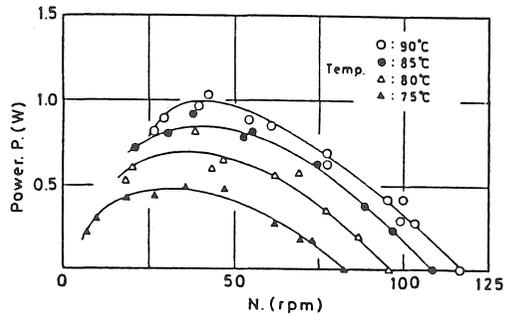
シンプルプーリー式エンジンの出力と回転速度は、湯温が低くなると急に小さくなる。この理由は、このエンジンではSMA ワイヤループの湯中に浸される部分が少なく、回転速度が大きいために、湯温が低くなるとSMA 素子は十分には暖められず、したがってSMEによる回復力の発生が小さくなるためと考えられる。

3・3 最大出力と湯温の関係

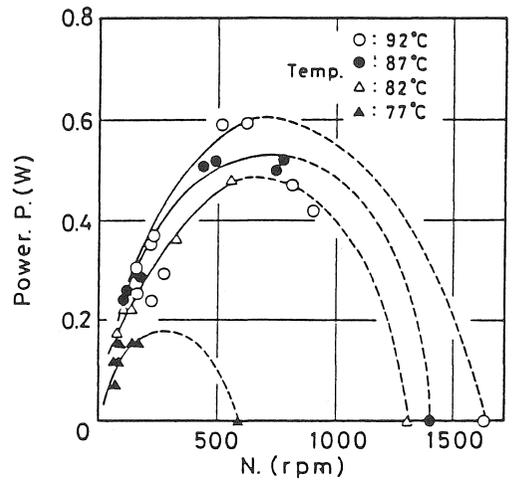
図6はツインクランク式エンジンについての最大出力と湯温の関係を示す。最大出力 $P_{max}$ は湯温約



(a) Twin Crank



(b) Offset Crank



(c) Simple Pulley

図5 出力と回転速度との関係

85℃まで直線的に増加し、85℃以上では増加割合は減少する。これは次の理由により生じる。すなわち、エンジンの出力は $F_1$ と $F_2$ との差で生じ、 $P_{max}$ は湯温が高いほど高速回転側に位置するので、湯温が高くなるとSMA コイルの冷却が遅くなり、 $F_1$ と $F_2$ との差が湯温に比例しては大きくなるため $P_{max}$ の増加割合は減少する。

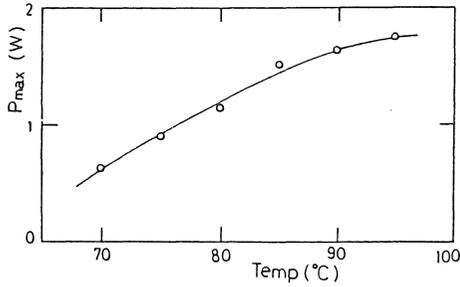


図6 最大出力と湯温の関係 (Twin Crank)

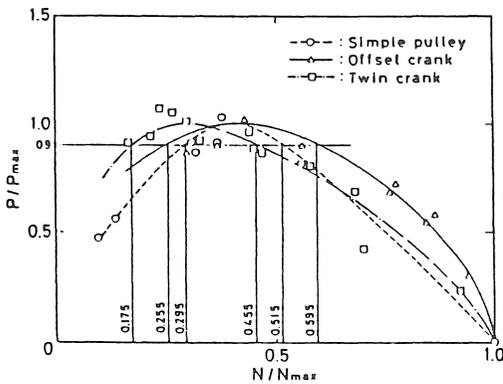


図7 各種熱エンジンの出力特性

このことはエンジンの大出力化を考える場合の一つの課題となる。出力はSMAコイルの線材の径が大きいほど大きい。この線径が大きい場合、高速回転下ではコイルの線材の表面付近のみ加熱・冷却によるマルテンサイト変態と逆変態の繰返しを受けるのに対して、中心部付近はこれを受けず、材料内部での不均一変形を繰返すため、SMEの低下が生じる。この繰返し熱サイクルの下でのSMEの低下は材料学的にSMAの応用分野で最大の課題の一つであり、高サイクルを受けるエンジンにおいては最大出力化との関連において特に重要である。

また、高速回転下で $F_2$ を小さくするためには、SMAコイルの冷却機構としては熱伝達の点からは空冷式より水冷式のほうが適することになる。

3・4 各種熱エンジンの出力特性の比較

図7は各種熱エンジンの出力特性の違いについて示したものである。図7では、出力および回転速度をおおのこの最大値で除し、無次元化してある。図7から、シンプルプーリー式エンジンの結果が少し上がった山形の曲線になるが、三者ともほぼ似た曲

表1 各種熱エンジンの比出力

Temp.: 90°C

Engine Type	Twin Crank		Offset Crank		Simple Pulley 5wires
	D=7.0 n=40	D=5.7 n=14	D=7.0 n=10	D=10.2 n=5	
Maximum Power.(W)	1.62	1.02	0.74	0.56	0.65
Mass of SMA.(g)	1.54	0.44	0.39	0.28	0.58
Power Density.(W/g)	1.08	2.35	1.96	1.96	1.08

D : Mean spring diameter. (mm)  
n : Number of turns

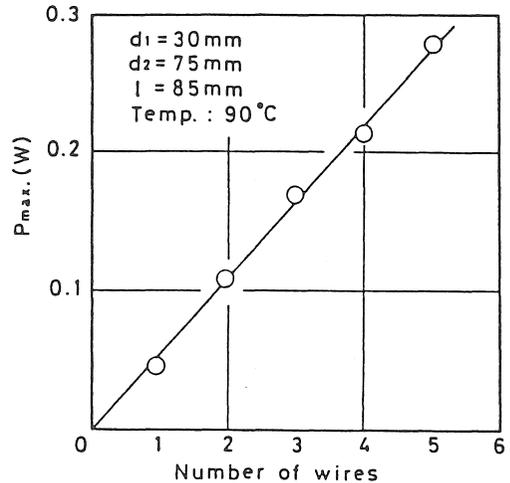


図8 SMAワイヤ並列掛けによる出力への影響 (Simple Pulley)

線となる。いずれのエンジンも最大出力の90%以上の出力が得られる回転速度の範囲が大きいことから、定出力エンジンに適していると思われる。

表1は各種熱エンジンの比出力 (SMA素子の単位質量当たりの出力) を示したものである。これから、これらのタイプのSMA熱エンジンの比出力は1~3 W/gと考えられる。なお、オフセットクランク式エンジンの比出力は他のエンジンの約2倍となっている。これは、オフセットクランク式エンジンでは湯中での流体抵抗が少ないことと、大円盤がフライホイールの役目を果たし、回転運動が滑らかに行われる機構になっているためと考えられる。

3・5 SMAワイヤ並列掛けによる出力への影響

シンプルプーリー式エンジンの結果を図8に示す。図8はSMAワイヤループを1~5本まで並列に掛けた場合の最大出力について示したものである。これより、実験結果はほぼ直線で表され、ワイヤループの並列掛けによる最大出力の加算性が認め

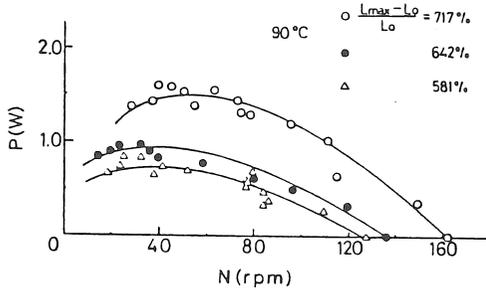


図9 コイル素子の変形量による出力への影響 (Twin Crank)

られる<sup>9)</sup>。

### 3・6 コイル素子の変形量による出力への影響

ツインクランク式エンジンの湯温90°Cでの密着コイル巻数40, 44, 48についての結果を図9に示す。密着長さ $L_0$ はそれぞれ30, 33, 36mmである。変形量は $(L_{max}-L_0)/L_0$ で表す。全般に、変形量が異なっても出力特性の曲線はほぼ同じ傾向を示すと考えられる。変形量が大きいくほど、大きな出力が得られ、最大出力を得る回転速度は高速回転側に位置する傾向がある。しかし、SMAコイルの疲労特性としては、変形量が大きいくほど繰返し寿命が短い。これはエンジンを開発するための材料学的な今後の課題である。

### 3・7 各種熱エンジンの機構の比較

各種熱エンジンの利点と欠点を比較すると、まづシンプルプーリー式エンジンでは回転速度が大きく、トルクが小さい。回転速度が大きいくのは、SMAワイヤループが二つのプーリーの周りを移動するのみで、湯中における抵抗が小さく、運動が非常に滑らかであることによる。トルクが小さいのは、SMAワイヤループが湯中に浸る時間が短いことと、ワイヤとプーリーの間で十分な摩擦効果が得られないためである。

クランク式エンジンでは一定間隔にクランクが配置される。このため、クランクの本数が少ない場合には、滑らかな運動が得難い。しかし、オフセットクランク式エンジンの大円盤はフライホールの役割を果たし、滑らかな運動が得られる。

ツインクランク式エンジンでは、SMAコイルがクランクと共に湯中を出入りするので、湯をかき回したり、跳ね上げたりするために、流体の抵抗が特に大きい。ツインクランク式およびオフセットク

ランク式エンジンでのSMA素子はコイルであるので、湯中での流体抵抗が大きい。また、コイルの軸力はワイヤ自体に生じ得る力と比較すると非常に小さくなるので、SMEにより生じる回復力を有効に利用できない。

いずれのエンジンについても、冷却は大気中であり、冷却効果の点からは水冷式に比べて劣る。

## 4. SMA熱エンジンの開発の課題

3章の検討に基づき、SMA熱エンジンの開発のための主な課題を挙げると、つぎの点が考えられる。

### (1) SMEの繰返し特性

3・6節でも検討したように、SMA素子の変形が大きいほど出力は大きくなる。しかし、一般の金属材料と同様に、変形が大きくなるとSMAの破断繰返し数は小さくなる<sup>11)</sup>。また、繰返し変形により応力誘起マルテンサイト変態の降伏応力および変態ひずみ範囲は減少し、変態温度は上昇する<sup>12)</sup>。したがって、SMEの温度依存性およびSMEの繰返し特性を明確にするとともに、SMAの疲労強度の向上を図る必要がある。また、疲労強度にはばらつきがあるので、特に均一な性質を得るための生産技術の確立が必要である。

### (2) SMAの接合

シンプルプーリー式エンジンでは、SMAワイヤを直線に形状記憶処理し、これを抵抗溶接で接合し、ループにして用いた。熱エンジンの実験温度でのTi-Ni合金ワイヤの単軸引張りでの降伏応力は、200~400MPaの範囲内にあるので、このレベルの応力をSMA素子から取り出せれば熱エンジンの大出力化が可能となる<sup>6)</sup>。したがって、SMAの接合法の確立と、接合部の強度およびSMEとその繰返し特性を明確にする必要がある。

### (3) SMAの耐食性

Ti-Ni合金は耐食性の強い材料であるが、本研究の繰返し出力特性試験中に、腐食によると考えられる破断が観察された。SMA熱エンジンの開発において対象となる熱源によっては耐食性が問題になる可能性もある。したがって、材料の腐食特性についての研究が必要である。

### (4) 熱効率

SMA素子自体の変態に伴う熱効率は熱エンジンの実用化に際して最も重要な課題の一つである。この熱効率は3~6%とされており<sup>3)</sup>、効率の向上の

ため、材料の開発と、より有効な熱・力学サイクルを検討する必要がある。

#### (5) エンジンの応用

SMA 熱エンジンの応用としては各種の未使用の低位熱エネルギー資源の有効利用が第一に考えられるが、その場合に熱源として何を対象にするかによってエンジンの機構が異なってくる。また、熱エンジンをどこで何に使用するかによっても熱エンジンの機構は異なってくるので、エンジンの適用の対象を絞って検討する必要がある。

### 5. 結言

3種類の SMA 熱エンジンの出力特性の基礎実験で次の点が明らかになった。(1)トルクと回転速度の関係は反比例である。また、最大出力は湯温が高いほど大きい。(2)最大出力が得られる回転速度の範囲は大きい。(3) SMA 素子の単位質量当たりの比出力は1~3 W/gである。(4) SMA ワイヤループの並列掛けによる最大出力には加算則が成立する。

また、SMA 熱エンジンの開発の課題としては SME の繰返し特性、SMA の接合、耐食性、熱効率、エンジンの機構等が認められた。

終わりに、本研究を行うに当り実験に関して協力を得た当時の卒研生諸君に感謝する。また、東海学術奨励会研究助成金、日東学術振興財団研究補助金および文部省科学研究費補助金一般研究(C)の補助を受けたことを記し謝意を表す。

### 参考文献

- 1) Goldstein, D. M. and McNamara, L. J., Proc. Nitinol Heat Eng. Conf., NSWCM, 79 (441), 1-1, 1978.
- 2) Ginell, W. S., ほか2名, Mech. Eng., 101 (5), 28, 1979.
- 3) 田中, 日本金属学会会報, 24(1), 75, 1985.
- 4) 本間, ほか5名, 東北大学選鉱製錬研究所報告, 37(2), 213, 1981.
- 5) 西川, ほか3名, 第27回自動制御連合講演会講演論文集, 217, 1984.
- 6) Tobushi, H. and Cahoon, J. R., Trans. CSME, 9 (3), 137, 1985.
- 7) 岩永, ほか2名, 日本機械学会論文集A, 54, 177, 1988.
- 8) 戸伏, ほか3名, 日本機械学会論文集A, 55, 165, 1989.
- 9) Mach. Des., 55 (12), 52, 1983.
- 10) 勝野, ほか3名, 日本機械学会講演概要集, 870-12, 36, 1987.
- 11) Melton, K. N. and Mercier, O., Acta Met., 27, 137, 1979.
- 12) 稲葉, ほか2名, 日本機械学会論文集A, 55, 628, 1989.

(受理 平成元年1月25日)