形状記憶合金熱エンジンの出力特性*

(斜板式熱エンジンについて)

戸 伏 壽 昭^{*1}, 木 村 君 男^{*1}J. R. Cahoon^{*2}, 沢 田 隆 之^{*3}Output Power Characteristics of Solid State Engine
using Shape Memory Alloy
(Tilt Plate Heat Engine)Hisaaki TOBUSHI, Kimio KIMURA,
J. R. Cahoon and Takayuki SAWADA

In order to investigate the output power characteristics of the tilt plate heat engine using the shape memory alloy, a small heat engine model was constructed. The influence of the tilt plate angle, the heating phase angle, the heating angle, the hot water temperature, the wind velocity and the deflection of the shape memory alloy helical spring on the output power of the engine was discussed experimentally. The main results obtained are summarized as follows. (1) The maximum output power is obtained at the heating phase angle of about half of the heating angle. (2) If the hot water temperature is not high, the maximum output power is obtained at the heating angle of about 60°. (3) The maximum output power is obtained at the hot water temperature which is higher than the A_s point of the spring by about 20 K. (4) While the output power increases proportionally to the tilt plate angle, the maximum output power takes an almost constant value at the tilt plate angle of above 60°. (5) While the output power increases with increase in the wind velocity, the increasing rate of the maximum output power decreases at wind velocity above 2 m/s. (6) The maximum output power is obtained at the unit elongation of the spring of about 250%.

Key Words: Inelasticity, Nonferrous Metal, Shape Memory Alloy, Solid State Engine, Output Power, Tilt Plate Engine

1. 緒 言

オイルショック以降、エネルギー危機および環境保全が世界的な重要課題となっており、これらの対策法として、自然エネルギーの積極的な利用と省エネルギー化の促進が望まれている。これらを推進する一方法として注目されているものに形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, 以下 SMA) 熱エンジンがある⁽¹⁾。SMA 熱エンジンでは、地熱、太陽熱ならびに工場や発電所の温排水などの低位熱エネルギーを機械または電気エネルギーに変換することができ、また無公害のエネルギー変換装置としてその開発が期待されている^{(2)~(4)}。

SMA 熱エンジンでは、材料の相変態に基づいて発生する回復力を利用して出力を取出す。著者らも SMA 熱エンジンの研究として、種々の熱エンジンの基本的な出力特性を検討している^{(5)~(7)}。

斜板式 SMA 熱エンジンでは、斜板角や加熱位相角などを変えることにより、トルクや回転速度を自由に

設定でき、逆回転も可能である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。斜板式熱エンジンは、このような制御性の観点からその開発が注目されている。

本研究では、斜板式熱エンジンについて小形のモデルを試作し、斜板角、加熱位相角、湯温、風速、および SMA コイルの巻数が異なる場合の実験を行い、これらの因子の出力特性に対する影響を検討した。

2. 斜板式熱エンジンの原理

斜板式熱エンジンの構造と作動原理を図 1 に示す。斜板式熱エンジンでは、2 枚の円板が垂直に対してそれぞれ $\beta/2$ だけ傾いた斜板となっており、両円板の円周は SMA コイルで連結されている。

図 1 に示すように、両円板の円周について加熱角 α の部分が高温部に位置する。したがって、この部分を連結する SMA コイルのみが高温部に浸される。また、この加熱角の中心は、SMA コイルが最も伸ばされる位置から加熱位相角 ϕ だけ偏心している。

SMA コイルの変形では、合金線材は主にねじりを受け、線材の横断面内でのひずみは表面部分では大きく、内部では小さい。このために、線材の表面部分はマルテンサイト変態と逆変態を受け、内部は弾性域にある⁽¹⁰⁾。斜板式熱エンジンでは低温部において SMA コ

* 原稿受付 平成 3 年 9 月 19 日。

^{*1} 正員、愛知工業大学 (〒470-03 豊田市八草町八千草 1247)。^{*2} University of Manitoba (Winnipeg, Manitoba, R3T 2N2, Canada)。^{*3} 学生員、愛知工業大学大学院。

イルは伸びる。高温部においては、SMA コイルの変形が拘束されているために、コイルには逆変態により回復力が発生する⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。この収縮力の円周方向成分により円板は回転する。

3. 実験方法

供試材は古河電気工業(株)製の TiNi 形状記憶合金線材であり、外径は 0.75 mm である。これを形状記憶熱処理 (673 K で 20 分間保持した後、炉冷) によりコイルにした。SMA コイルのピッチは 2.2 mm、有効径は 8.25 mm、 A_f 点は約 323 K である。

本研究では高温部には恒温の湯槽を用い、低温部は空气中にあり、扇風機の送風で強制冷却した。

試作した小形エンジンの円板の直径は 210 mm、円板の中心からコイル接続点までの距離 $R=100$ mm、円板の中心距離 $L_0=170$ mm とした。使用したコイルの数は 12 本であり、各円板の円周上を 12 等分 (中心角 30°) する点を結んだ。コイルの両端の円板上への接続点には二つのフックを用い、コイルに曲げモーメントが加わらないようにした。

実験では、加熱角 α を 30° と 60° 、斜板角 β を $10^\circ \sim 80^\circ$ 、加熱位相角 ϕ を $10^\circ \sim 50^\circ$ 、加熱温度 T を

333~353 K、風速 V を 0.6~4.0 m/s およびコイル巻数 n を 14~30 に種々に変えて実験を行った。これらの各因子を一定に保った条件下での実験手順としては、トルクを順次増加させ、各トルクに対応する回転数を測定し、出力と回転数の関係を求めた。また各実験は 2 回ずつ行い、平均値をとった。

なお、回転数、トルクおよびコイル近傍の風速は非接触の回転計、プロニ-動力計および風速計によりそれぞれ測定した。

4. 実験結果および考察

本研究では実験手順で示したとおり、 $\alpha, \phi, \beta, T, V$ および n を種々に変えた非常に多くの数の実験を行った。ここでは代表的な結果についてのみ示し、出力特性に関して検討する。

4.1 出力に対する加熱条件の影響 本節では、 $V=1.0$ m/s および $n=30$ 巻の場合について検討する。

4.1.1 トルクと回転速度の関係 $\alpha=60^\circ, \phi=40^\circ, \beta=30^\circ$ で湯温 T が異なる場合について得られたトルク Q と回転速度 N の関係を図 2 に示す。

図 2 から、 $Q-N$ 関係は全体的に一定のバンドの範囲内にあり、右下がりの曲線で反比例の関係になることがわかる。このように、 $Q-N$ 曲線が右下がりになるのは、他の種類の熱エンジンの場合と同じ傾向である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また、全体的に T が高いほど曲線の傾きは大きく、他方 T が低いほど曲線の傾きは小さい。すなわち、 T が高い時には低回転の高トルクエンジンに、また、 T が低い時には低トルクの高回転エンジンに適している。これらの傾向は、 $Q-N$ 関係が SMA コイルの高温時と低温時の収縮力の差で規定されること、コイルの回復力が温度の上昇とともに大きくなることおよび低温ではコイルの冷却が十分に行われることにより

図 1 斜板式熱エンジンの基本構造と作動原理

図 2 種々の湯温 T におけるトルクと回転速度の関係

現れるものと考えられる。

4・1・2 出力と回転速度の関係 図2の場合と同じ条件で得られた出力 P と回転速度 N の関係を図3に示す。

図3から、 P - N 関係は上に凸の曲線になることがわかる。このように P - N 曲線が上に凸になるのは、他の種類の熱エンジンの場合と同じ傾向である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

最大出力は $T=343\sim 348\text{ K}$ で得られる。また、最大出力が得られるときの回転速度は、 T が低いほど高回転側に位置する。これは、 T が低いほど低温部において SMA コイルがよく冷却されるためであると考えられる。

4・1・3 最大出力と加熱角の関係 $\beta=30^\circ$, $\phi=40^\circ$ および $\beta=20^\circ$, $\phi=30^\circ$ で T が異なる場合の最大出力 $P_{\max}$ と加熱角 α の関係を図4に示す。

図4から、全体的には $\alpha=30^\circ$ の場合より $\alpha=60^\circ$ の場合の方が $P_{\max}$ は大きいことがわかる。これは、SMA コイルが高温部に長時間浸され、回復力が大きくなることによる。

他方、 β が大きく、 T が高い場合には、 $\alpha=60^\circ$ の場合のほうが $\alpha=30^\circ$ の場合より $P_{\max}$ は小さい。これは

図3 種々の湯温 T における出力と回転速度の関係

図4 種々の湯温 T における最大出力と加熱角の関係

次のように考えられる。 β が大きいほど $P_{\max}$ に対応する回転速度は大きい(図7参照)。また T が高く、 α が大きい場合には、低温部において SMA コイルは十分に冷却されない。これらのために $P_{\max}$ は低下する。また、全体的にこの傾向があるために、 T が高いほど $P_{\max}$ - α 曲線の傾きは小さい。

4・1・4 最大出力と加熱位相角の関係 $\alpha=60^\circ$, $\beta=10^\circ$ および 30° で T が異なる場合の最大出力 $P_{\max}$ と加熱位相角 ϕ の関係を図5に示す。

図5から、 α が小さい場合には $P_{\max}$ の値は小さく、 $P_{\max}$ の T および ϕ への依存性は小さく、ほぼ一定値をとることがわかる。 β が大きい場合には $P_{\max}$ の値も大きくなり、 $P_{\max}$ は T および ϕ に依存して変化する。 ϕ が約 25° において $P_{\max}$ は最大値をとる。この理由は次のように考えられる。SMA コイルの収縮力はコイルのたわみが最大のとき最大となる。 $\phi=0^\circ$ の場合には正確な回転が得られない。 $\phi > \alpha/2$ では高温部のコイルの長さは最大たわみの時より短く、回復力は小さく、対応して $P_{\max}$ は小さくなる。したがって、大きな $P_{\max}$ を得るためには ϕ は $\alpha/2$ より若干小さい値が適当である。この結果は、西川らの実験結果⁽⁹⁾ と同じ傾向を示す。

4・1・5 最大出力と湯温の関係 $\alpha=60^\circ$, $\beta=10^\circ$ および 30° で ϕ が異なる場合の最大出力 $P_{\max}$ と湯温 T の関係を図6に示す。

図6から、 β が小さい場合には $P_{\max}$ の値は小さく、 $P_{\max}$ の T および ϕ への依存性は小さく、 $P_{\max}$ はほぼ一定値をとることがわかる。 β が大きい場合には $P_{\max}$ の値は大きくなり、 T が $340\sim 345\text{ K}$ ($A_s+20\text{ K}$) において $P_{\max}$ は最大値をとる。この理由は次のように考えられる。SMA コイルの収縮力は T が高いほど大きい。一方、SMA コイルの有効な回復力は高温と低温における収縮力の差で定まる。 β が大きいほど $P_{\max}$ に対

図5 種々の湯温 T における最大出力と加熱位相角の関係

応する回転速度は大きく(図7参照), 低温部での冷却時間が短くなる。このために, T が高い場合にはコイルの冷却が十分でなく, 出力は上がらない。したがって, 最大出力を与える適当な湯温が存在する。他方, このことは斜板式熱エンジンでは加熱方法とともに冷却方法が重要であることを意味する。

4・2 出力に対する斜板角の影響 $\alpha=60^\circ$, $\phi=30^\circ$, $T=343\text{ K}$, $n=30$ 巻, $V=2.5\text{ m/s}$ で斜板角 β が異なる場合の実験で得られた出力 P と回転数 N の関係を図7に, 最大出力 $P_{\max}$ と斜板角 β の関係を図8に示す。

図7から, P - N 関係は上に凸の曲線になることがわかる。 β が大きくなると P - N 曲線は全体に上方および右側に移動する。これらの性質は β の小さい範囲で大きく変化し, β が大きくなるとほぼ飽和する傾向にある。

図8から, $P_{\max}$ は β に比例して増加し, $\beta \geq 60^\circ$ では $P_{\max}$ の増加割合は小さくなることがわかる。 $P_{\max}$ が β の増加とともに大きくなるのは, β の増加に伴いコイルのたわみが大きくなり, これに応じてコイルの回復力が増加するためである。

コイルのたわみ δ は $2R \sin(\beta/2)$ である。コイルの軸力が δ に比例すると考えると, 正弦関数の性質より β が大きくなると軸力の増加割合は小さくなる。また, SMA コイルの荷重-たわみ関係から, たわみが大きくなると荷重の増加割合は小さくなる⁽¹⁰⁾。この場合, $\beta=60^\circ$ での合金線材の表面での相当ひずみは約0.9%であり(4・4節参照), $\beta > 60^\circ$ では線材内でマルテンサイト変態が生じるようになる。この二つの効果により, β が大きくなるとコイルの軸力の増加割合は減少する。したがって, β が大きくなると $P_{\max}$ の増加割合は減少するものと考えられる。

4・3 出力に対する風速の影響 $\alpha=60^\circ$, $\phi=30^\circ$, $\beta=60^\circ$, $T=348\text{ K}$, $n=30$ 巻で風速 V が異なる場合の実験で得られた出力 P と回転数 N の関係を図9に, 最大出力 $P_{\max}$ と風速 V の関係を図10に示す。

図9から, P - N 関係は上に凸の曲線になり, V が大きくなると P - N 曲線は全体に上方および右側に移動することがわかる。 P - N 曲線は V が小さい範囲では大きく変化し, V が大きくなるとほぼ同じ形を示すようになる。

図10から, $P_{\max}$ は V に比例して増加するが, V が

図6 種々の加熱位相角 ϕ における最大出力と湯温の関係

図8 最大出力と斜板角の関係

図7 種々の斜板角 β における出力と回転速度の関係

図9 種々の風速 V における出力と回転速度の関係

大きくなると $P_{\max}$ の増加割合は小さくなることがわかる。SMA 熱エンジンの出力は高温部と低温部における SMA コイルの軸力の差で定まる有効な回復力に基づいて得られる。このコイルの有効な回復力を熱伝達の点から考察すると次のようになる。高温部でのコイルは温水中に浸されるため、一定の高温時の軸力が得られる。これに対して、低温部でのコイルは空気中に戻るため、低温時の軸力はコイルと空気の熱授受量の大きさを表す熱伝達率に依存する。円柱を横切る空気の流れについては、熱伝達率は V の増加とともに大きくなるが、その増加割合は V の増加とともに小さくなる⁽¹²⁾。したがって、 V が大きくなると低温部での温度の降下割合は小さくなり、軸力の低下割合は小さくなる。このために、 V が大きくなると有効な回復力の増加は小さくなり、出力の増加は少なくなるものと考えられる。

4.4 出力に対するコイルのたわみの影響 $\alpha=60^\circ$, $\phi=30^\circ$, $\beta=60^\circ$, $T=348\text{ K}$, $V=2.5\text{ m/s}$ で巻数 n が異なる場合の実験で得られた出力 P と回転数 N の関係を図 11 に、最大出力 $P_{\max}$ とコイルの単位伸び δ の関係を図 12 に示す。ここで、コイルの単位伸び δ

は、コイルの軸方向の最初の長さ L_0 と最大たわみが与えられたときの長さ $L_{\max}$ によって $\delta=(L_{\max}-L_0)/L_0$ で定めてある。実験は 12 本のコイルの巻数 n を 30 巻から 2 巻ずつ少なくし、各巻数のもとで行った。この場合の n , δ およびコイル表面での最大せん断ひずみ γ の値を表 1 に示す。

図 11 からわかるように、 P - N 関係は上に凸の曲線になり、 n が少なくなると P - N 曲線は上方に移動する。

図 12 から、 $P_{\max}$ は δ の増加とともに大きくなり、 δ が約 250% で $P_{\max}$ は最大値約 2.1 W を示し、その後 δ の増加とともに徐々に小さくなることわかる。

SMA 熱エンジンの出力は高温部と低温部における SMA コイルの軸力の差に基づいて生じる。SMA コイルの荷重-たわみ関係によれば、たわみが大きくなると荷重の増加割合は小さくなる⁽¹⁰⁾。また、最大ひずみあるいは残留ひずみが一定のもとで加熱・冷却を繰返した場合、回復応力はマルテンサイト変態の開始ひずみ約 1% の近傍の最大ひずみで最大値をとり、最大ひずみの増加とともに減少する⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。 $\delta=250\%$ の場合、SMA コイル表面での最大ひずみは相当ひずみ $\gamma/\sqrt{3}$

図 10 最大出力と風速の関係

表 1 n , δ および γ の値

Number of active coils n (turns)	Unit elongation δ (%)	Maximum shear strain γ (%)
14	374	4.44
16	329	3.78
18	291	3.25
20	258	2.84
22	230	2.49
24	200	2.19
26	176	1.93
28	153	1.70
30	141	1.54

図 11 種々のコイル巻数 n における出力と回転速度の関係

図 12 最大出力とコイルの単位伸びとの関係

では約1.5%である。これらのことから、 $P_{\max}$ はある一定の δ で最大値をとるものと考えられる。

4・5 斜板式熱エンジンの利点と開発の課題 本研究を通じて確認された斜板式熱エンジンの利点と開発の課題は次のとおりである。

4・5・1 利点 加熱角、斜板角および加熱位相角を変えることにより加熱域およびSMAコイルのたわみを容易に設定できるので、従来提案されている熱エンジンに比べてトルクや回転速度の制御が容易である⁽⁸⁾。また、狭いスペースに比較的多くのコイルを取付けることができるので、熱エンジンの小形化および高出力化に適している。

4・5・2 開発の課題 (1) 斜板が高速回転するとSMAコイルは湯をはね上げるため、温水中での粘性抵抗によるエネルギー損失が大きい。(2) 低温部では送風による強制冷却を行わないと大きな出力が得られない。(3) SMAコイルの両端は斜板の円周と連結する必要がある。この部分には応力集中が生じるため、コイルが破断しやすい。(4) 高サイクルで使用する場合、SMAコイルは疲労で破断する⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

5. 結 言

斜板式形状記憶合金熱エンジンの出力特性の研究として、高温部に温水を用い、低温部を空気中とした小形熱エンジンを試作し、斜板角、風速、コイルのたわみなどが異なる場合の実験を行った。得られた主な結果は次のようになる。

(1) 加熱角の半分より若干小さい加熱位相角で最大出力が得られる。

(2) 湯温が高くない場合には、約60°の加熱角で最大出力が得られる。

(3) SMAコイルの A_f 点より約20 K高い湯温

で最大出力が得られる。

(4) 最大出力は斜板角に比例して増加するが、60°以上の斜板角ではほぼ一定になる。

(5) 最大出力は風速の増加とともに大きくなるが、2 m/s以上の風速ではその増加割合は小さくなる。

(6) SMAコイルの単位伸びが250%で最大出力が得られる。

終わりに、本研究を行うに当たり、実験に協力された当時の愛知工業大学の学生諸君、多大のご支援をいただいた大橋義夫教授並びに岩永弘之助教授に深く感謝する。また、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。

文 献

- (1) 田中, 機誌, **93**-855(1990), 119.
- (2) Ginell, W. S., McNichols, J. L., Jr. and Cory, J. S., *Mech. Eng.*, **101**-5(1979), 28.
- (3) Banks, R. (Perkins, J.編), *Shape Memory Effects in Alloys* (1975), 537, Plenum.
- (4) 田中, 日本金属学会会報, **24**-1(1985), 75.
- (5) Tobushi, H. and Cahoon, J. R., *Trans. CSME*, **9**-3 (1985), 137.
- (6) 岩永・戸伏・伊藤, 機論, **54**-497, A(1988), 177.
- (7) 戸伏・木村・岩永・Cahoon, J. R., 機論, **55**-509, A(1989), 165.
- (8) 西川・渡辺, 工業材料, **31**-1(1983), 74.
- (9) Nishikawa, M., Kodera, M., Okata, I., Yamauchi, K. and Watanabe, K., *Proc. Inter. Conf. Martensitic Transformations*, (1986), 1041, Jpn. Inst. Metals.
- (10) 戸伏・田中, 機論, **56**-521, A(1990), 140.
- (11) 田中・戸伏・岩永, 材料, **37**-414(1988), 267.
- (12) 泉, 工業熱力学, (1965), 206, 朝倉書店.
- (13) 戸伏・大橋・斎田・堀, 機論, **57**-534, A(1991), 392.
- (14) 戸伏・大橋・斎田・堀, 機論, **57**-533, A(1991), 115.
- (15) 宮崎, 材料, **39**-445(1990), 1329.
- (16) 戸伏・大橋・堀・山本, 文献(14)の121ページ.