形状記憶合金エンジンの高出力化に関する研究*

佐藤 義久^{*1}, 吉嶺 和哉^{*2}
森本 浩紀^{*2}, 藤田 秀紀^{*3}Study on the High Output Characteristics
of the Shape Memory Alloy EngineYoshihisa SATO^{*4}, Kazuya YOSHIMINE,
Hiroki MORIMOTO and Hideki FUJITA^{*4} Department of Electrical and Electronic Engineering, Daido University,
10-3 Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya-shi, Aichi, 457-8530 Japan

The purpose of this research is to clarify the requirements for the high output power SMA engine. The main results obtained by this research are as follows. In order to increase the output power of the SMA engine, it is necessary to make the radius of the high temperature wheel as small as possible, while the minimum value of this radius is restricted by the distortion of the SMA belt. On one hand, the output power of the SMA engine distinctly depends on the radius of the high temperature wheel and the diameter of the SMA belt. On the other hand, it slightly depends on the radius of the low temperature wheel and the length of the SMA belt. Thus, we experimentally verified that the output power of the SMA engine distinctly depends on the radius of the high temperature wheel and the diameter of the SMA belt.

Key Words: Shape Memory Alloy, SMA Engine, Energy Conversion, Thermal Efficiency

1. 緒 言

形状記憶合金(SMA: Shape Memory Alloy)は常温で変形させても加熱すると元の形状に戻る性質がある。SMAの形状記憶効果を利用した単純プリー型SMAエンジンに関してはW.S.Ginell, 戸伏, 岩永等によって基礎的な研究がなされている^{(1), (2), (3)}。著者等はSMAエンジンを用いて, 火力発電所から排出されるボイラ排ガス, 蒸気タービン排熱, 工場排熱あるいはガス給湯器の排熱等の未利用熱エネルギーを有効活用する研究を行っている。低温の未利用熱エネルギーを有効活用する新発電システムの開発を目標に, 単純プリー型SMAエンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$ [sec⁻¹], 出力 $P_{\max}$ [W]をSMAベルトの形状・寸法, SMAベルトの高温域のヤング率 E_1 および低温域のヤング率 E_2 , SMAエンジ

ンの高温輪の半径 r および低温輪の半径 R のみから予測可能な理論式を導出し, さらに大型SMA実験装置を設計・製作し, SMAエンジンの回転角速度 ω [sec⁻¹]とトルク T [N・m]を同時測定することで理論の妥当性を実験的に検証した^{(4), (5), (6)}。本研究は提唱した理論式を用いてシミュレーションを行うことにより, 高出力化の方向性を見定め, その妥当性を実験的に検証することを目的としている。SMAエンジンは数10℃~数100℃の温度範囲の排熱に適用可能であるが, 一般的なTi-Ni成分の形状記憶合金の変態温度が100℃程度であること, 200℃以上の温度領域では熱電素子, 400℃以上では通常の蒸気タービン発電も可能であることより, 本論文で対象とする温度領域は100℃程度以下の比較的低温の未利用熱エネルギーと考えている。本装置の適用例として100万kW火力発電所のタービン排熱を想定すると, SMAエンジンの入り口温度(高温輪の温度)は100℃以下, 出口温度(低温輪の自然空冷温度)は40℃程度であるから, 実用的な熱効率は数%程度と考えられる。したがって, 本論文で対象とするSMAエンジンの装置規模は出力5万kW以下を想定している。

* 原稿受付 2009年12月28日。

^{*1} 正員, 大同大学工学部(☎457-8530 名古屋市南区滝春町10-3)。^{*2} 大同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻。^{*3} 中部電力(株)電力技術研究所(☎459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山20-1)。

E-mail: satoy@daido-it.ac.jp

2. 主な記号

R	: 低温輪の半径[cm]
r	: 高温輪の半径[cm]
d	: SMA ベルトの直径[mm]
E_1	: SMA ベルトの高温域のヤング率[GPa]
E_2	: SMA ベルトの低温域のヤング率[GPa]
M	: SMA ベルトの曲げモーメント[N・m]
M_h	: 高温輪の回転モーメント[N・m]
t	: SMA ベルトの温度[°C]
ω_1	: 高温輪の回転角速度[sec ⁻¹]
ω	: 低温輪の回転角速度[sec ⁻¹]
P	: SMA エンジンの出力[W]
J_1	: 高温輪の慣性モーメント[kg・m ²]
J_2	: 低温輪の慣性モーメント[kg・m ²]
L	: SMA ベルトの長さ[m]
T	: 出力輪(低温輪)のトルク[N・m]
n	: SMA ベルトの周回数
MPP	: Maximum Power Point (最大出力点)

Fig. 1 The symbols of experiment equipment

3. 研究の背景・目的

SMA ベルトは図1に示すように、点1で高温輪に接して曲げられ(ひずみ ϵ_1 , ヤング率 E_2)、お湯に浸かり加熱されながら回転し、点2で変態温度に達し(ひずみ ϵ_1 , ヤング率 E_1)、真っ直ぐになろうとし、曲げモーメント M を発生する。その後、SMA ベルトは引き戻され、曲げモーメント M' を発生させる。この曲げモーメントの差 $M-M'$ がSMA エンジンの回転モーメント M_h となる。これを繰り返す、SMA ベルトは振動しながら回転し続けるのではないかと考え、我々はSMA エンジンの無負荷時の最大回転角速度 $\omega_{\max}$ [sec⁻¹]、および最大出力 $P_{\max}$ [W]を予測する理論式をSMA エンジンの外形的な諸量($d, r, R, L, J_1, J_2, E_1, E_2$)のみから導いた(4), (5), (6)。本研究の目的は導出した理論式に基づくシミュレーションを行い、SMA エンジンの高出力化の方向性を明らかにすると共に、シミュレーションで明らかにした高出力化条件を反映させた実験装置を用いてSMA ベルトの直径 d を変化させた場合の回転角速度 $\omega_{\max}$ 、出力 $P_{\max}$ の実験値を求め、シミュレーションより求めた $\omega_{\max}-d$ 曲線および $P_{\max}-d$ 曲線と比較検討することにより、高出力化の方向性の妥当性を実験的に検証することである。

シミュレーションを行い、SMA エンジンの高出力化の方向性を明らかにすると共に、シミュレーションで明らかにした高出力化条件を反映させた実験装置を用いてSMA ベルトの直径 d を変化させた場合の回転角速度 $\omega_{\max}$ 、出力 $P_{\max}$ の実験値を求め、シミュレーションより求めた $\omega_{\max}-d$ 曲線および $P_{\max}-d$ 曲線と比較検討することにより、高出力化の方向性の妥当性を実験的に検証することである。

4. SMA エンジンの高出力化

4.1 高出力化の方向性 我々は前報までにSMA エンジンの最大回転角速度 $\omega_{\max}$ [sec⁻¹]、最大出力 $P_{\max}$ [W]を次式のとおき導出した。

$$\omega_{\max} = \left(\frac{n\pi d^4 L r^2 \left(\frac{E_1 - E_2}{r^2} - \frac{2E_2}{R^2} \right)}{64(J_1 R^2 + J_2 r^2)} \right)^{\frac{1}{2}} [\text{sec}^{-1}], n=2, 3 \quad (1)$$

$$P_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{2} \cdot \frac{\pi d^4 R (E_1 - E_2)}{128 r^2} [\text{W}] \quad (2)$$

SMA エンジンを高出力化するためには、式(1), (2)を詳細に検討することにより、以下の方向性がわかる。

- (1) SMA ベルトの直径 d を太くする。
- (2) 高温輪の半径 r を小さくする。
- (3) 低温輪の半径 R を大きくする。
- (4) SMA ベルトの長さ L を長くする。
- (5) 慣性モーメント J_1, J_2 を小さくする。
(車輪を肉抜きする等軽くする)
- (6) ヤング率の差 $E_1 - E_2$ を大きくする。
($E_1 \rightarrow$ 大きく, $E_2 \rightarrow$ 小さく)

上記(1)~(6)の方法でSMA エンジンの外形諸量($d, r, R, L, J_1, J_2, E_1, E_2$)を最適化すれば、最大回転角速度 $\omega_{\max}$ および最大出力 $P_{\max}$ が大きくなり、SMA エンジンを高出力化することができる。

4.2 シミュレーションによる検討 理論式(1), (2)に基づき、最大回転角速度 $\omega_{\max}$ および最大出力 $P_{\max}$ の最適化、SMA エンジンの高出力化の方向性がわかったので、SMA エンジンの外形的な諸量($d, r, R, L, J_1, J_2, E_1, E_2$)がSMA エンジンの高出力化にどのように作用するかシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図2~図15に示す。先ず回転角速度 $\omega_{\max}-d$ 、出力 $P_{\max}-d$ の関係を示す。

図2, 図3より、SMA エンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$ 、出力 $P_{\max}$ は、SMA ベルトの直径 d に非常に強く依存す

Fig. 2 Relation between $\omega_{\max}$ and d Fig. 3 Relation between $P_{\max}$ and d Fig. 4 Relation between $\omega_{\max}$ and r Fig. 5 Relation between $P_{\max}$ and r

ることがわかる。図2, 図3より明らかなように, 回転角速度 $\omega_{\max}$ はSMAベルトの直径 d の2乗に比例し, 出力 $P_{\max}$ はSMAベルトの直径 d の6乗に比例して増大することがわかる。本シミュレーション結果よりSMAエンジンの高出力化の為にSMAベルトの直径 d を太くすればよいことがわかるが, 現在入手可能なTi-Ni系SMAベルトの最大直径は2mmである。したがって, これ以降のシミュレーションでは現時点での現実的な最大値 $d=2\text{mm}$ とする。

図4, 図5より, SMAエンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$, 出力 $P_{\max}$ は高温輪の半径 r に強く依存し, SMAエンジンの高出力化の為に高温輪の半径 r を小さくした方がよいことがわかる。しかし, 高温輪の半径 r には下限値がある。SMAベルトのひずみを1.5%程度以下にする必要があり, $\varepsilon=d/2r < 1.5\%$ (必要条件) より, 高温輪の半径 r は6.7cm以上とする必要がある。

図6, 図7より, 低温輪の半径 $R > 20\text{cm}$ において, SMAエンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$ は低温輪の半径 R にほぼ逆比例し, SMAエンジンの出力 $P_{\max}$ は低温輪の半径 R にはあまり依存せず, 低温輪の半径 R を20cmから40cmに2倍にしても出力は15%程度しか変化しないことがわかった。また, 図7から低温輪の半径 $R \leq 20\text{cm}$ では出力 $P_{\max}$ が急減することが明らかになった。したがって, 低温輪の半径 R は従来から実験装置に使

Fig. 6 Relation between $\omega_{\max}$ and R Fig. 7 Relation between $P_{\max}$ and R

Fig. 8 Relation between $\omega_{\max}$ and L Fig. 9 Relation between $P_{\max}$ and L

用してきた市販の26インチ自転車の車輪を用いることとし、以降のシミュレーションでは $R=31\text{cm}$ とする。また図8、図9より、SMAエンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$ 、出力 $P_{\max}$ はSMAベルトの長さ L に対して単調増加するが、それほど強く依存しないことがわかった。したがって、以降のシミュレーションでは、SMAベルトの長さ L は実験室の天井高さより実験装置の高さが制限される最大長さとして $L=5.75\text{m}$ とする。

高出力化の(5)番目の方法として慣性モーメント J_1 、 J_2 を小さくすれば良いことが推測される。具体的には高温輪および低温輪を肉抜きすると同時に、軽い材料を選べばよいことがわかる。そこで、車輪の材質としてFRP(比重1.6)、アルミニウムAl(比重2.7)、鉄Fe(比重7.8)、銅Cu(比重8.9)の4種類を考え、高温輪の比重をパラメータとして、低温輪の材料密度を変化させた場合のSMAエンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$ 、出力 $P_{\max}$ がどのように変化するかシミュレーションを行った。図10、図11に示すシミュレーション結果から明らかなように、高温輪の材質を一番軽いFRP(比重1.6)から一番重い銅Cu(比重8.9)まで変化させても回転角速度 $\omega_{\max}$ 、出力 $P_{\max}$ は最大でも10%程度しか変化しない。一方、図10、図11の横軸、すなわち低温輪の材質を一番重い銅Cu(比重8.9)から一番軽いFRP(比重1.6)まで変化させると、回転角速度 $\omega_{\max}$ および出力 $P_{\max}$ は2倍以上増加す

Fig. 10 Relation between $\omega_{\max}$ and ρ_L Fig. 11 Relation between $P_{\max}$ and ρ_L

ることがわかった。直径の小さい高温輪を軽くしても高出力化にはあまり寄与しないこと、および高温輪は熱湯に浸けることを考慮して、今後、一番軽い金属製、すなわちアルミニウム製とすることにする。一方、低温輪はアルミニウム製あるいはFRP製の車輪とすれば、出力は2倍になることがわかったが、現時点では入手しやすい鉄あるいはステンレス製の自転車の車輪とし、将来的にはアルミニウム製あるいはFRP製の車輪に取り換える方針とする。

図12～図15より、SMAエンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$ 、出力 $P_{\max}$ はSMAベルトのヤング率の高温時と低温時の差 E_1-E_2 を大きくした方がよいことがわかる。高温時のヤング率 E_1 が80GPaから120GPaに1.5倍になれば出力 $P_{\max}$ は3倍になることがわかる(図13参照)。一方、低温時のヤング率 E_2 が40GPaから20GPaに半減すると、出力 $P_{\max}$ は2倍になることがわかる(図15参照)。以上のシミュレーションの結果、SMAエンジンの高出力化の為にSMAベルトのヤング率の差 E_1-E_2 を大きくすればよいことが確認できた。しかし、SMAベルトのヤング率の差 E_1-E_2 はSMAベルトの製造方法に強く依存し簡単には変えられない物性値である。したがって、以降の高出力化の検討では、SMAベルトのヤング率は $E_1=80\text{GPa}$ 、 $E_2=40\text{GPa}$ に固定して検討を進めることとする。

Fig. 12 Relation between ω_{max} and E_1 Fig. 13 Relation between P_{max} and E_1 Fig. 14 Relation between ω_{max} and E_2 Fig. 15 Relation between P_{max} and E_2

以上, シミュレーションの結果, SMA エンジンの高出力化の為に, SMA ベルトの直径 d を太くすることが最も有効であることがわかった. そこで, SMA ベルトの直径 d に着目した実験を行い, シミュレーション結果の妥当性を検証する.

5. SMA ベルトの太さに関する実験

5.1 予備実験(高温輪の半径 r の最適化) 導出した理論式に基づいたシミュレーション結果より, 高温輪の半径 r は SMA ベルトのひずみにより制約される最小半径が存在すると考えられることから, 最大回転角速度 ω_{max} が得られる最適な高温輪の半径 r を決定する実験を行った. 低温輪の半径を $R=31\text{cm}$ と固定し, 高温輪の半径を $r=5\text{cm}$, 7.5cm , 10cm , 12.5cm , 15cm と変化させ回転角速度実験を行った. 図 16 から明らかなように, 高温輪の半径 $r=10\text{cm}$ のとき, 最大回転角速度 ω_{max} の最大値が得られた. 図 4, 図 5 に示すシミュレーション結果より明らかなように, 高温輪の半径 r を減少させると, SMA エンジンの回転角速度 ω_{max} , 出力 P_{max} は急激に増大し, SMA エンジンの高出力化に極めて有効であることがわかる. しかし, 高温輪の半径 r に関しては前述のように SMA ベルトのひずみ ε から制約される下限値がある. SMA ベルトの弾性限界より, ひずみ $\varepsilon=d/2r < 1.5\%$ の条件を満たす必要があり, 高温輪の半径 r は $r > 6.7\text{cm}$ でなければならない. さらに, SMA ベルトが高温輪に上手く巻き付き, 高温輪を効率良く蹴る為には, 図 17 に示す実験結果から明らかなとおり, 高温輪の半径 r を $r > 7.5\text{cm}$ とする必要がある. 以上の制約条件および図 16 に示す予備実験の結果を満たす高温輪の半径 r の最適値を $r=10\text{cm}$ と決定した. これを基に大型実験装置を設計・製作した.

Fig. 16 Relation between ω_{max} and r

Fig. 17 Relation between r and curvature radius of SMA belt ($d=2\text{mm}$)

5.2 実験装置 シミュレーション結果および予備実験の結果より, SMA ベルトの長さを $L=5.75\text{m}$, 低温輪の半径 $R=31\text{cm}$, 高温輪の半径 $r=10\text{cm}$ と固定し, SMA ベルトの直径を $d=1.2\text{mm}$, 1.5mm , 2mm と変化させた場合の回転角速度 $\omega_{\max}$ と出力 $P_{\max}$ の関係を実験的に調べた. 大型実験装置全体の構成および寸法を図 18 に, 完成写真を図 19 に示す.

5.3 実験条件 SMA ベルトの直径 d を変化した場合の SMA エンジンの出力特性実験 (回転角速度 $\omega_{\max}$, 出力 $P_{\max}$) における実験条件として, SMA ベルトの直径 d を変化した場合の点 2 および点 3 の温度とヤング率の関係を図 20 に示す. 図 20 に示す測定結果から明かなように, SMA ベルトが高温輪に接触する点 2 の温度 t_2 と低温輪に接触する点 3 の温度 t_3 に関しては, $t_2 \gg t_3$ が成立しており, また点 2 におけるヤング率は高温域のヤング率 $E_1=80\text{GPa}$, 点 3 におけるヤング率は低温域のヤング率 $E_2=40\text{GPa}$ の条件を満たしている.

5.4 回転角速度 $\omega_{\max}$ に関する実験結果 SMA ベルトの直径を $d=1.2\text{mm}$, 1.5mm , 2mm に変化させ, 無負荷状態でそれぞれ回転角速度の測定を行う. SMA エンジンの回転角速度 $\omega_{\max}$ は非接触光学式回転数計 (ライン精機株式会社, TM-5010) で測定した. 実験結果を図 22 に示す. SMA ベルトの直径 $d=1.2\text{mm}$ のとき 6.53sec^{-1} , $d=1.5\text{mm}$ のとき 7.21sec^{-1} , $d=2\text{mm}$ のとき 15.5sec^{-1} の回転角速度が得られた.

5.5 最大出力 $P_{\max}$ に関する実験結果 SMA ベルトの直径を $d=1.2\text{mm}$, 1.5mm , 2mm に変化させ, 回転角速度 ω とトルク T を測定することにより出力 $P_{\max}$ を求める. トルク T はトルク変換器 (KYOWA 製: TP-20KCE), 動ひずみ計 (KYOWA 製: DPM-601), オシロスコープによって測定する. ト

ルク変換器の負荷側にヒステリシスブレーキ (小倉クラッチ製: HB-10) を取り付け, ヒステリシスブレーキの励磁電流を変化させることにより, 負荷の大きさを任意に制御し SMA エンジンのトルクを測定した (図 21 参照). 実験結果を図 23 に示す. SMA ベルトの直径 $d=1.2\text{mm}$ のとき 0.17W , $d=1.5\text{mm}$ のとき 0.25W , $d=2\text{mm}$ のとき 1.38W の出力が得られた.

Fig. 18 Conceptual figure of high power experiment equipment

Fig. 19 Photograph of the assembled experiment equipment

Fig. 20 Relation between Young's modulus and temperature

Fig. 21 Detailed drawing of torque measurement

Fig. 22 Relation between ω_{max} and d Fig. 23 Relation between P_{max} and d

6. 考 察

6.1 最大回転角速度 ω_{max} に関する考察 最大回転角速度 ω_{max} の実験値は図 22 に示すとおり、傾向は理論値とほぼ一致しているが、絶対値は理論値の 2 倍である。実験値と理論値の乖離についてはさらなる検討が必要である。

6.2 最大出力 P_{max} に関する考察 最大出力 P_{max} の実験値は図 23 に示すとおり、傾向は理論値とよく一致しており、絶対値は $d=1.2\text{mm}$ ではほぼ一致、 $d=1.5\text{mm}$ および $d=2\text{mm}$ では理論値の 70% となっており、理論値とよく一致している。傾向、絶対値ともに理論と実験はよく一致しており、理論式(2)が SMA エンジンの最大出力の予測に十分使えることがわかった。

7. 結 言

本研究で得られた主な成果を以下にまとめて示す。

- (1) SMA エンジンの無負荷回転角速度 ω_{max} 、最大出力 P_{max} を予測する理論式を用いてシミュレーションを行い、高出力化の方向性を見出すことができた。
- (2) SMA エンジンの出力は、SMA ベルトの直径 d に強く依存し(直径の 6 乗に比例)、SMA ベルトの直径を製作可能な最大値($d=2\text{mm}$)まで太くすることにより高出力化が達成できることがわかった。
- (3) SMA エンジンの出力は、高温輪の半径 r に強く依存し、高温輪の半径 r を小さくするほど高い出力が得られることが分かった。しかし、高温輪の半径 r には下限値があり、その下限値は SMA ベルトのひずみ $\varepsilon=d/2r < 1.5\%$ (必要条件)で決定されることがわかった。
- (4) SMA エンジンの出力は、低温輪の半径 R および SMA ベルトの長さ L にはあまり依存しないことがわかった。
- (5) シミュレーションで明らかにした SMA エンジンの高出力化の方向性を実験的に検証するため、SMA ベルトの直径 d を変化させた回転角速度実験を行った結果、実験値と理論値の傾向はシミュレーション結果と比較的よく一致した。しかし、絶対値は理論値の約 2 倍となり、さらに検討が必要であることがわかった。
- (6) SMA ベルトの直径 d を変化させた場合の SMA エンジンの出力実験を行った結果、実験値は傾向および絶対値ともにシミュレーション結果と非常に良く一致し、理論式およびシミュレーション結果の妥当性を間接的に実証することができた。

以上のとおり、シミュレーションおよび実験により、SMA エンジンの高出力化の方向性を明確にすることができ、SMA エンジンを用いた新発電システムの実用化に貢献することができた。

謝 辞

本研究の一部は(財)熱・電気エネルギー技術財団からの研究助成金で行なわれました。また形状記憶合金線材は大同特殊鋼㈱から提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- (1) W.S.Ginell, J.L.McNichols,Jr., and J.S.Cory, Nitinol Heat Engines for low-grade thermal energy conversion, *Mechanical Engineering*.Vol.101, No.5, (1979) , pp.26-33
 - (2) H.Tobushi, J.R.Cahoon, Mechanical Analysis of a Solar-Powered Solid State Engine, *Transactions of the Canadian Society of Mechanical Engineers*, Vol.9, No.3, (1985) , pp.137-141
 - (3) H.Iwanaga, H.Tobushi, and H.Ito, Basic Research on the Output Power Characteristic of Shape Memory Alloy Heat Engine (1 st Report) , *transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, SeriesA*, Vol.54, No.497, (1987) , pp.177-180
 - (4) Y.Sato, N.Yoshida, Y.Tanabe and H.Fujita, Study on the Output Power Characteristic of a Shape Memory Alloy Engine , *transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, SeriesB*, Vol.72, No.717, (2006-5), pp.227-233.
 - (5) Y.Sato and Y.Tanabe, Study on the Output Power Characteristic of a Shape Memory Alloy Engine(2nd Report), *transaction of Japan Society of Mechanical Engineers , SeriesB*, Vol.73, No.734, (2007-10), pp.166-172.
 - (6) Y.Sato,M.Kobayashi,Y.Kobayashi and M.Suzuki, Study on the Output Power Characteristics of the Shape Memory AlloyEngine(3rdReport), *transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, SeriesB*, Vol.74, No.741, (2008-5),pp.162-168.
-