形状記憶合金を用いたレシプロタイプエンジンの出力特性*

佐久間 俊雄^{*1}, 岩田 宇一^{*1}, 荒井 正行^{*1}Output Power Characteristics of Reciprocating Heat Engine
Using Shape Memory Alloy

Toshio SAKUMA, Uichi IWATA and Masayuki ARAI

In order to develop the utilization technology in which unexploited energy is retrieved and transformed into power, we have proposed a heat engine incorporating shape memory alloy wires. In this work, the output power characteristics are investigated experimentally from the viewpoints of maximization of the output power, stabilization of the power during operation and the amount of work to failure. Experiments are conducted at various heating and cooling temperatures, velocities of heating and cooling water and wire diameters. As a result, it is clarified that the output power increases with increases in both the heating temperature and the velocity of heating water. The output power also increases with decreasing cooling temperature. However, the velocity of cooling water at which the output power is maximum varies with the cooling temperature. Furthermore, the amount of work to failure does not always increase with increasing fatigue life and becomes maximum under the operating conditions at which the output power becomes maximum.

Key Words: Waste Heat Recovery, Energy Conversion, Power Plant, Shape Memory Alloy, Reciprocating Engine, Ti-Ni-Cu Alloy Wire, Recovery Work, Deformation Work, Stress Amplitude, Size Effect

1. 緒 言

各種の熱機関から出る低温排熱は、ほとんどが未利用のまま捨てられている。このような低温の未利用エネルギーを回収して有効に再利用することは、エネルギー資源の有効利用等のうえからも有意義である。

著者らは、低温度かつ低温度差で作動する形状記憶合金をエネルギー変換素子とする往復動形の熱エンジンを提案している⁽¹⁾。提案したエンジンは、合金を逆変態温度以上に加熱したときの形状回復に伴うひずみエネルギーと、変態温度以下に冷却されているときの変形ひずみエネルギーとの差を利用するものであり、低温排熱から動力回収しようとするものである。

熱エンジンの設計では、加熱・冷却温度、加熱・冷却水の供給量、合金の寸法やひずみ量等の最適化を図る必要がある。ところが形状記憶合金は、変態、逆変態の繰返し回数 N の増加とともに回復応力は低下し、非回復ひずみが増加するため⁽²⁾⁽³⁾、利用できる合金のひずみエネルギーが回数 N とともに変化することになる。したがって、このような特性変化を把握しておくことが、熱エンジンの外部負荷や変形ひずみ量等の

基本仕様を決定するうえで重要である。またエンジンの保守等の観点から、運転条件に対する合金の疲労寿命を把握しておくことが重要である。TiNi合金^{(4)~(6)}やCu合金⁽⁷⁾等に対する疲労寿命がひずみ振幅、塑性ひずみや応力等との関係で調べられており、ひずみ量や応力が大きくなるほど寿命は低下する。したがってエンジンの最適化を図るためには、形状記憶合金の特性変化や疲労寿命を考慮した検討が必要である。

本報は、高出力化、出力の安定性等を図る観点から、エンジンの出力特性について実験および数値解析により検討したものである。このために、出力に及ぼす加熱・冷却温度、供給水量および合金の寸法(直径)の影響について検討した。また、繰返し回数 N に対するひずみエネルギー(仕事量)の変化を調べるとともに、合金に加わる応力振幅に対する疲労寿命を調べ、合金が破断に至るまでに行う生涯仕事量を考慮した運転条件について検討した。

2. 実験および数値解析方法

2・1 実験方法 エンジンは、形状記憶合金を内蔵した一対の加熱・冷却を交互に行う熱交換器、負荷変化を与えるオイルシリンダ、形状記憶合金の変位を測定する変位計、引張力を測定するロードセルおよび

* 原稿受付 1996年3月21日

^{*1} 正員、(財)電力中央研究所(〒201 狛江市岩戸北2-11-1)。

ひずみゲージ、温水・冷水供給系統より構成されている⁽¹⁾。実験に供した形状記憶合金の組成は Ti-41.4 at%Ni-8.5 at%Cu、変態温度は $M_s=323\text{ K}$ 、 $M_f=319\text{ K}$ 、 $A_s=333\text{ K}$ および $A_f=335\text{ K}$ である。また寸法は、長さ $L=1\text{ m}$ 、直径 $D=1.5, 2\text{ mm}$ および 3 mm である。

実験は、各熱変換器(SUS 304、内径 10.7 mm)内にそれぞれ 1 本の形状記憶合金を装着し、加熱時の回復力と冷却時の変形力との差をレバーを介してオイルシリンダの負荷により仕事をさせる方法で行った。図 1 に加熱、冷却を繰返したときに合金に加わる引張応力およびひずみの時間変化を模式的に示す。また、図 1 に実験条件である温水温度 T_H 、温水流速 V_H 、冷水温度 T_C 、冷水流速 V_C 、最小ひずみ ϵ_1 および最大ひずみ ϵ_2 の範囲を示す。

2・2 数値解析方法 合金が変態、逆変態するまでに要する加熱、冷却時間を推定するため、加熱・冷却温度および温・冷水流速に対する合金の温度変化を有限要素法により非定常熱伝導解析を行って求めた。解析対象は、直径 $D=3\text{ mm}$ 、長さ $L=1\text{ m}$ の TiNiCu 合金とし、メッシュ分割は 8 節点、軸対称要素であり、要素数 500 および節点数 1711 である。

解析条件は、時間 $t=0$ において合金全体が一定温度 T_s であるとし、温水および冷水は $x=0$ より流入し、 $x=L$ で流出する。また局所熱伝達率 Nu_x は、合金の長さ x を代表長さとする次式⁽⁸⁾を用いた。

$$Nu_x = 0.332 \sqrt{Re_x} Pr^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

ここで流路を形成するパイプ等への熱損失は無視した。水の物性値は、水温と合金表面温度との平均温度における値とし、合金の物性は密度 $6.4 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ 、比熱 $0.5\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、熱伝導率 $10\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ とした。

Fig. 1 Schematic diagrams of variations of stress and strain with time

3. エンジンの出力特性

温水が流入して合金の温度が逆変態開始温度(A_s 点)以上になると形状が回復し、このとき発生する回復力により冷却側の合金を変形させる。回復力は、 A_s 点以上になると発生し、逆変態終了温度(A_f 点)になるまで一様に増加する。したがって、合金の一部でも A_s 点以上になると形状回復が開始する。また変形力は、合金の温度が変態開始温度(M_s 点)以下になると低下し、変態終了温度(M_f 点)となるまで一様に低下する。このためエンジンのサイクル周期が速くなると、合金の加熱あるいは冷却が十分行われなくなり、回復力の低下あるいは変形力が増大することとなる。

図 2 は、初期温度 T_s の合金を温度 T_H で加熱した場合について、加熱時間と合金の中心部の温度が A_s 点以上になる位置 x/L との関係を数値解析により求めた結果である。例えば加熱時間が 2 s の場合では、温水流速 $V_H=1.4\text{ m/s}$ で加熱すると、 $x/L=0\sim 0.42$ の範囲では A_s 点以上になり、この間では合金は母相(P 相)に逆変態して形状回復し、回復力が発生するが、

Fig. 2 Relationship between the heating time and the inverse transformed length x/L for various velocities of heating water V_H

Fig. 3 Relationship between the heating time required to the inverse transformation temperature A_s and the velocity of heating water V_H for various heating temperatures T_H

$x/L=0.42\sim 1$ の範囲では A_s 点以下であり、形状回復は起こらずマルテンサイト相(M相)の状態にある。また、 V_H が小さくなれば母相に逆変態する部分が小さくなり、回復力も低下する。したがって、合金全体が母相となるためにはかなりの加熱時間が必要となる。図3は、各加熱温度 T_H に対し、合金全体が母相となるまでの時間と温水流速 V_H との関係を数値解析により求めた結果である。 T_H および V_H が小さくな

Fig. 4 Relationship between the cooling time and the transformed length x/L for various velocity of cooling water V_c

Fig. 5 Relationship between the cooling time required to the transformation temperature M_s and the velocity of cooling water V_c for various initial temperatures T_s

Fig. 6 Variations of works W_R , W_{av} and W_D , stress amplitude $\Delta\sigma$ and output power P with period τ of engine

ると、合金全体が逆変態するまでの時間が長くなることがわかる。

合金の温度 T_s が A_f 点以上の状態から冷却する場合にも十分な冷却時間が必要となる。図4は M_s 点以下になる位置 x/L を数値解析により求めた結果である。冷水流速 V_c が小さくあるいは冷却時間が短いと母相の部分が大きくなるため、変形力が大きくなり、変形に要する仕事量が増大することになる。また、合金全体が M_s 点以下になるまでに要する冷却時間と V_c との関係は図5に示すようになる。

このように回復力や変形力は加熱速度や冷却速度に依存するため、エンジンの往復運動の周期や仕事量は加熱・冷却条件に大きく影響されることになる。

図6は、単位長さの合金が形状回復時に行う仕事量 W_R 、変形に要する仕事量 W_D 、利用可能な仕事量 $W_{av}(=W_R - W_D)$ 、引張応力の振幅 $\Delta\sigma$ およびエンジン出力 P の変化を周期 τ との関係で示したものである。1サイクルの周期 τ の増加に伴い、加熱時には合金の母相の割合が増加するため $\Delta\sigma$ および W_R が増加し、また冷却時の M 相が増加するため W_D は低下する。このため、 W_{av} は周期 τ の増大とともに一様に増加するが、仕事率である出力 P が最大となる周期 τ が存在する。そこで以下では、エンジン出力に及ぼす諸因子の影響について考察する。

4. 出力に及ぼす諸因子の影響

4.1 加熱温度・流速の影響 図7は、 $D=3\text{ mm}$ 、 $T_c=293\text{ K}$ 、 $V_H=1.0\text{ m/s}$ 、 $V_c=0.6\text{ m/s}$ の条件における加熱温度 T_H と合金単位長さ当たりの最大出力 P_{max} との関係を示したものである。また出力が最大となるときに回復仕事量 W_R 、変形仕事量 W_D 、応力振幅 $\Delta\sigma$ および周期 τ も同時に示してある。加熱温度 T_H が高くなるとともに A_s 点以上になるまでの時間

Fig. 7 Variations of maximum output power P_{max} , works W_R and W_D , stress amplitude $\Delta\sigma$ and period τ with heating temperature T_H

は短くなり、また回復力が増大するため応力振幅 $\Delta\sigma$ も増大する。このため、回復仕事量 W_R は T_H の増加とともに増大する。一方、変形仕事量 W_D は小さく、また T_H に対する変化はほとんどない。したがって、 T_H が高くなるとともに仕事量 W_{av} は増加し、かつ周期 τ が短くなるため、最大出力 P_{max} は、加熱温度 T_H が高くなるとともに増大する。

加熱によって合金の一部が A_s 点以上になると形状回復が始まるが、回復力は温度上昇とともに増大し、 A_f 点で最大となる。このため、合金の温度上昇速度が速いほど周期 τ は短く、大きな回復力を利用できる。図8は、最大出力 P_{max} 、最大出力時の仕事量 W_R 、 W_D 、応力振幅 $\Delta\sigma$ および周期 τ と温水流速 V_H との関係を示したものである。流速 V_H が大きいほど熱伝達率が大きくなるため、合金が A_s 点以上に達するまでの時間が短くなるとともに回復力が増大して応力振幅 $\Delta\sigma$ も増大する。したがって、流速 V_H の増加とともに仕事量 W_R が増大する。

周期 τ が短くなると冷却側の合金が M_s 点以下にならない部分が増加して変形力が増大し、応力振幅 $\Delta\sigma$ の増加割合は小さくなるが、変形仕事量 W_D は小さく、最大出力 P_{max} は流速 V_H の増加とともに増大する。

4.2 冷却温度・流速の影響 エンジン出力を増大させるためには、冷却側の合金の変形仕事量を低下させる必要がある。ところが合金の変形力は、合金の温度が M 相開始温度 M_s 以下にならないと低下しない。したがって、エンジン出力を増大させるためには、合金の冷却速度を高める必要がある。

図9は、 $D=1.5$ mm、 $T_H=363$ K および $V_H=1.4$ m/s における合金単位長さ当たりの最大出力 P_{max} と冷水流速 V_C との関係を示したものである。また図9には、出力が最大となる場合の仕事量 W_R 、 W_D 、応力振幅 $\Delta\sigma$ および周期 τ と V_C との関係も示してある。

Fig. 8 Variations of maximum output power P_{max} , works W_R and W_D , stress amplitude $\Delta\sigma$ and period τ with velocity of heating water V_H

流速 V_C が小さいと、 M 相に変態しない部分が多いため変形力は大きくなる。このため、変形仕事量 W_D は大きく、周期 τ も長くなる。しかし、周期 τ が長くなると加熱側の合金温度も十分高くなるために回復力は大きくなり、応力振幅 $\Delta\sigma$ および回復仕事量 W_R は大きくなる。流速 V_C が大きくなると M_s 点以下となる部分が増加するため、仕事量 W_D は減少し、周期 τ は短くなる。周期 τ が短くなると回復力も低下するため、応力振幅 $\Delta\sigma$ および仕事量 W_R も同様に低下する。さらに流速 V_C が増すと ($V_C > 0.6$ m/s)、合金温度が低くなるために A_s 点以上となるまでに要する加熱時間が長くなり、周期 τ は逆に徐々に増加する。その結果、出力 P_{max} が増大となる冷水流速 V_C が存在することになる。

出力が最大となる冷水流速 V_C は冷水温度 T_C により異なる。図10は、各冷水温度 T_C に対する出力 P_{max} と冷水流速 V_C との関係を示したものである。 $T_C=293$ K および 303 K では約 $V_C=0.6$ m/s で最大となるが、 T_C が 313 K 以上では、冷水流速を増大させて冷却速度を高める必要があるため、高流速側で最大となる。また図10から明らかなように冷水温度

Fig. 9 Variations of maximum output power P_{max} , works W_R and W_D , stress amplitude $\Delta\sigma$ and period τ with velocity of cooling water V_C

Fig. 10 Variations of maximum output power P_{max} with the velocity V_C of cooling water for various cooling temperatures T_C

T_c が低いほど出力は大きくなる。

4・3 寸法効果 エンジン出力は、加熱および冷却速度の影響を受け、出力を増大させるためには加熱および冷却速度を大きくすることが有効であることを述べた。したがって、合金の寸法を小さくして熱容量を小さくすれば、 A_s 点以上の温度および M_s 点以下の温度に短時間で到達することになり、同一の長さでは直径 D が小さいほど大きな出力が得られる。

図 11 は、直径 D に対する出力 $P_{\max}$ 、仕事量 W_{av} および応力振幅 $\Delta\sigma$ と周期 τ との関係を示したものである。直径 D が小さいほど合金が変態、逆変態する応答速度が速くなるために、同一の周期 τ に対する応力振幅 $\Delta\sigma$ は D が小さいほど大きくなる。また仕事量 W_{av} は、合金の断面積に比例して大きくなるはずであるが、この関係は周期 τ が十分大きくならないと達成しない。このため最大出力は、 $D=1.5\text{ mm}$ の場合では断面積が小さいため $D=2\text{ mm}$ および 3 mm に比べて小さいが、 $D=2\text{ mm}$ および 3 mm の出力はほとんど変わらない。そこで単位断面積・長さ当たりの出力で比較した結果を図 12 に示す。温水流速 V_H によら

Fig. 11 Influence of the diameter of shape memory alloy wire on the output power P , available work W_{av} and stress amplitude $\Delta\sigma$ with period τ

Fig. 12 Influence of the diameter of shape memory alloy wire on the maximum output power per unit cross sectional area and length

ず直径 D が小さいほど出力は増大する。したがって、エンジンに使用する合金の総重量を一定とした場合には、直径 D の小さいワイヤを多数使用することが出力増大に有効である。

5. 繰返し特性とエネルギー変換量

5・1 出力の繰返し特性 4章までの検討では、出力に及ぼす加熱・冷却温度、温・冷水流速および合金の直径の影響について考察した。しかし、エンジン仕様の最適化を図るためには、エンジンを長時間連続運転した場合に安定した出力が得られることが重要である。そこで、エンジンを連続運転させて、合金が破断に至るまでに行う仕事量 W_{av} の変化を調べた。

図 13 は、各加熱温度 T_H に対する仕事量比 W_{av}^* と繰返し回数 N との関係を示したものである。ここで、仕事量比 W_{av}^* は $N=20$ における W_{av} で基準化したものであり、 $N=20$ における加熱温度 T_H に対する出力 P は、 $T_H=343, 353\text{ K}$ および 363 K に対してそれぞれ $P=0.19, 0.54\text{ W}$ および 0.63 W である。 $T_H=343\text{ K}$ と加熱温度が低い場合の W_{av}^* の変化は、 $N=10^3$ 回程度まではわずかに低下し、その後変形仕事量 W_D の低下とともに W_{av}^* が増加するが、繰返しによる回復力の低下に伴い W_{av}^* が低下し、破断に至る。 $T_H=353\text{ K}$ の場合についても W_{av}^* の低下量は増すが繰返しによる変化は同様となる。これに対し、 $T_H=363\text{ K}$ の場合には数十回で W_{av}^* が約 60% にまで大きく低下する。しかし、その後の変化はほとんどなく破断に至る。したがって、加熱温度 T_H が低いほど一定した出力が得られ、また変態、逆変態の繰返しによる疲労寿命も長くなるが、出力は小さい。

同一の加熱温度でも 1 サイクルの周期の長さにより繰返し特性が異なる。図 14 は、各周期 τ に対する W_{av}^* と N との関係を示したものである。ここで、 $\tau=$

Fig. 13 Variations of available work ratio W_{av}^* with the number of cycles N for various heating temperatures T_H

Fig. 14 Variations of available work ratio W_{av}^* with the number of cycles N for various periods τ at constant heating-cooling conditions

Fig. 15 Variations of total output work to failure W_T , output power P and number of cycles to failure N_f with the stress amplitude $\Delta\sigma$

8.1, 3.8 s および 1.8 s に対する出力 P はそれぞれ $P=0.46, 0.99 \text{ W}$ および 0.63 W である。周期 $\tau=1.8 \text{ s}$ と短い場合には繰返し初期で W_{av}^* が大きく低下するが、周期が長くなると N に対する大きな変化はなく、ほぼ一様に低下して破断に至る。また、周期が長くなるほど疲労寿命は短くなり、図 6 にも示したように応力振幅も大きくなる。

このように繰返し変化に対する出力の安定性という観点から考えると、加熱温度 T_H を低くしたほうが安定した出力が得られ、かつ疲労寿命も長い、出力は小さい。一方、 T_H を高くすると大きな出力が得られるが、疲労寿命は短く、かつ安定した出力を得るためには適切な運転周期とする必要がある。

5.2 エネルギー変換量 形状記憶合金は、温度条件等のエンジンの運転条件により疲労寿命が異なり、加熱温度を高くすれば出力の増大は図れるが、合金に加わる応力が大きくなるために疲労寿命は短くなる。そこで、形状記憶合金が破断に至るまでに外部に供給し得る生涯仕事量の観点から、エンジンの運転条

件について考察した。

図 15 は、合金が破断に至るまでに行う生涯仕事量 W_T 、出力 P および疲労寿命 N_f と合金に加わる応力振幅 $\Delta\sigma$ との関係を示したものである。疲労寿命 N_f は、応力振幅 $\Delta\sigma$ が大きくなるに伴い短くなる。しかし、生涯仕事量 W_T は、応力振幅 $\Delta\sigma$ の変化に対して極大値をもち、 $\Delta\sigma=150 \text{ MPa}$ 近傍で最大となる。また、応力振幅 $\Delta\sigma$ に対する出力 P の変化は、生涯仕事量 W_T と同様に極大値をもつ変化をし、出力 P が最大となる応力振幅 $\Delta\sigma$ もほぼ一致する。

6. 結 言

形状記憶合金を用いた往復動形エンジンの高出力化、出力の安定性等の最適化を図る観点から、エンジンの出力特性を調べた結果、以下の結論を得た。

(1) エンジン出力は、合金の温度を逆変態開始温度以上までに昇温させる加熱速度に依存し、加熱温度が高く、温水流速が大きいほど出力は増大する。また、合金の変形力が小さいほど出力が増大するため、冷却温度は低いほど出力は増大するが、冷水流速は冷水温度に応じた最適値が存在する。

(2) エンジンに使用する合金を直径 D のワイヤとする場合には、ワイヤ 1 本当たりの出力は小さいが、直径 D が小さいほど変態・逆変態の応答速度が速く、単位断面積当たりの出力は大きい。したがって、使用する合金の総重量に対する出力は、直径 D の小さいワイヤを多数本使用するほうが出力を増大できる。

(3) 合金が保有するエネルギー変換能力を最大限に利用する運転条件は、疲労寿命は短くなるが、合金が破断に至るまでに行う生涯仕事量を最大にすることであり、エンジン出力が最大となる運転条件で生涯仕事量は最大となる。

文 献

- (1) 佐久間俊雄・岩田宇一、機論、62-597, B(1996), 2086-2091.
- (2) 戸伏壽昭・岩永弘之・稲葉明俊・川口稔、機論、55-515, A(1989), 1663-1668.
- (3) 戸伏壽昭・岩永弘之・田中喜久昭・堀達哉・沢田隆之、機論、57-543, A(1991), 2747-2752.
- (4) Melton, K. N. and Mercier, O., *Mater. Sci. Engg.*, 40(1979), 81-86.
- (5) McNichols, Jr., J. L., Brookes, P. C. and Cory, J. S., *J. Appl. Phys.*, 52(1981), 7442-7447.
- (6) Miyazaki, S., Sugaya, Y. and Otuka, K., *Proc. MRS Int. Mtg. Adv. Mater.*, 9(1989), 251-256.
- (7) Sakamoto, H. and Shimizu, K., *Trans. JIM*, 27(1986), 601-606.
- (8) 甲藤好郎、伝熱概論、(1973), 64-66, 養賢堂。