

形状記憶材料を用いた熱エンジンの試作

薬師寺 祐太郎¹・高倉 健輔²・青木 照子²

¹東芝エレベータ, ²制御情報工学科

近年, 自動車の排気ガスや工場の排煙による大気汚染が問題とされている. ガソリンを使用する自動車エンジンの炭化水素や窒素酸化物が大気汚染の原因となっており, 環境にやさしい電気自動車やディーゼルエンジンの開発が進んでいる. 本研究では, ガソリンの代わりに熱エネルギーを使用する熱エンジンを製作することを目標とする. 熱エンジンには新しい機能材料として注目されている形状記憶合金(SMA)を使う. SMAはインテリジェント材料であり, 形状記憶効果や超弾性などの性質を持ち, 相変態以上に加熱すると記憶している元の形状に戻る. そのとき大きな形状回復力が発生する. 形状回復力は, SMAに5~6%の予ひずみを付与して相変態温度以上に加熱したとき最も大きくなり, 数百MPaの大きな力を発生する. この力を効率よくエンジンを駆動させる力にするための基礎的な検討を行い, 熱エンジン試作を行ったので報告する.

キーワード: 形状記憶合金, 形状記憶効果, 形状回復力, 予ひずみ, 熱エンジン

1 緒言

新しい機能材料として注目されている材料の一つに, 形状記憶合金(SMA)がある. SMAはインテリジェント材料の一つであり, 形状記憶効果(SME)や超弾性(SE)などの性質をもつものである. 近年, この性質を活かした, アクチュエータとしてSMAの応用が期待されており, 多くの研究報告がある. 特に, SMAをアクチュエータとして利用した研究には, リハビリテーション用SMAアクチュエータの開発^{(1),(2)}, ロボット用アクチュエータの試作報告⁽³⁾, さらに, SMA熱エンジンに関する報告^{(4)~(6)}などがある.

SMAは, その形状を変形させても, 相変態温度以上に加熱するとSMEにより元の形状に戻る. この時に発生する力を形状回復力という. SMAの形状回復力は, 5~6%の予ひずみを付与して逆変態温度以上に加熱したときに最も大きくなり⁽⁷⁾, 数百MPaの大きな力を発生する. SMAは形状回復後に, 冷却すると, また軟らかくなり, 形状を簡単に変形することが出来る. このSMAの特性を利用するために, SMAの加熱と冷却を繰り返して, 熱エンジンを動作させる. 排気ガスを排出しない, 環境にやさしいクリーンな熱エンジンを試作したので報告する.

2 熱エンジンの原理

エネルギー問題と地球温暖化問題は, 人類にとって最も

重要な問題である. 化石燃料をエネルギー源とする問題は, 燃料がいつかは枯渇するということである. また, エネルギー化する過程の二酸化炭素排出も, 現在社会で大きな問題となっている.

SMAは形状記憶効果により, 非常に大きな形状回復応力を発生する. この回復応力発生に排温水, 地熱あるいは太陽熱などの低位熱エネルギーを利用するSMA熱エンジンの開発が期待されている. 1973年にアメリカで世界初のBanksエンジンが発表され, その後アメリカを中心に世界中で, 多数の小型熱エンジンが開発されたが, これらは出力が非常に小さく, 実用化には至っていない. 現在, この熱エンジンが注目されているのは, これまで捨てられていた低位エネルギーを有効に利用すること, および, 無騒音で無公害のクリーンな熱エンジンとなることからである.

形状記憶熱処理によって形状を記憶させたSMAは, 形状記憶効果を利用すると, 温度に対して, 可逆的に繰り返して動作するアクチュエータを作ることができる.

図-1にSMAが熱エネルギーを機械的エネルギーに変換する原理を示す. ①は, マルテンサイト変態終了温度(M_f)以下で W_1 によって変形したSMAに重り W_2 を負荷する. これを A_f 以上に加熱すると②に示すように, SMAは変位 h だけ縮む. このとき熱エネルギーは $W_2 \times h$ の仕事をしたことになる. つまり, 熱エネルギーが機械的エネルギーに変換されたことになる. ここで, W_2 を外し, 冷却すると③のようにSMAは W_1 によって, 再び変形される. もう一度, ④で示すように W_2 を負荷する. この工程を冷却

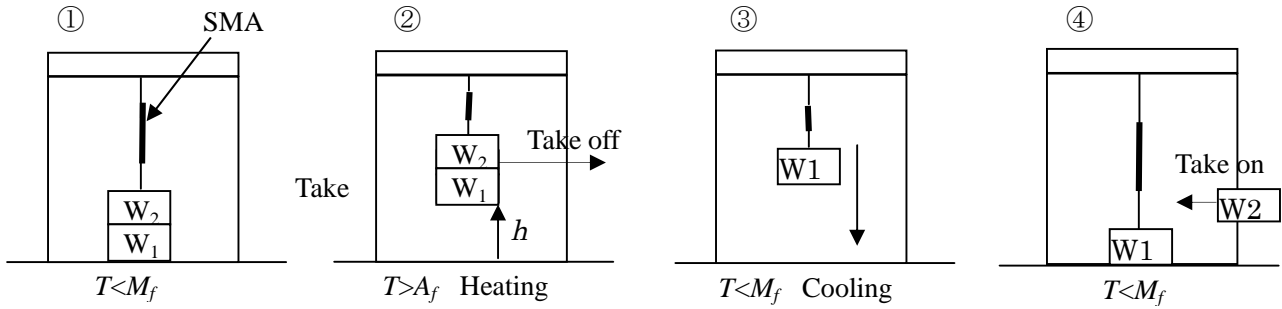


図-1 熱エンジンの動作原理

と加熱の1サイクルとして繰り返すと、各サイクルの $W_2 \times h$ の仕事量でエンジンが動作する。

3 熱エンジンの製作

(1) 第一次試作熱エンジン

図-2に示すように、SMAファイバをSMAホルダー(A)とSMA引掛けホルダーとの間にセットする。SMAホルダー(A)の引掛けピンの位置(半径 r)は、SMAホルダーが回転して、引掛けピンが上死点($\theta = 180^\circ$)に至ったとき予ひずみが約6%付与されるように決める。

初期長 $L_0 = 1\text{m}$ の直線状に記憶させたSMAファイバの片側を引掛けピンに引掛け、もう一方の片側をSMA引掛けホルダーに固定する。通電加熱すると予ひずみに比例した形状回復力が発生して、シンクロベルトで連結されたフライホイール(B)に回転エネルギーを蓄える。このような機構をSMAホルダー(A)の両側に180度隔ててセットし(A)の回転エネルギーを交互にフライホイール(B)に蓄えて連続回転させる。

(2) 駆動トルクの計算

図-2のようにSMAホルダー(A)の r に対してSMAの初期長 L_0 が十分長いのでSMAの方向は図のように台座と平行であると仮定すると、予ひずみ量 δ は式(1)で表わせる。

$$\delta = \Delta L / L_0 = r(1 - \cos \theta) / L_0 \quad (1)$$

形状回復力 F は予ひずみ量 $\delta \leq 6\%$ なら予ひずみ量と比例関係があるとみなすことが出来るので形状回復力は

式(2)となる。

$$F = k\delta = kr(1 - \cos \theta) / L_0 \quad (2)$$

一方、回転トルク T は、形状回復力 F のSMAホルダーの接線方向成分 $F \sin \theta$ とSMAホルダーの半径 r の積であるので式(3)となる。

$$\begin{aligned} T &= rF \sin \theta = r \sin \theta \cdot kr(1 - \cos \theta) / L_0 \\ &= kr^2 \sin \theta (1 - \cos \theta) / L_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)を整理して、新しく定数を K とおくとトルク T は式(4)となる。

$$T = K(\sin \theta - 0.5 \sin 2\theta) \quad (4)$$

図-3に、形状回復力比例量 K とトルク比例量 T の変化を示す。形状回復力比例量を式(5)に、トルク比例量を式(6)で求めた。

$$K = 1 - \cos \theta \quad (5)$$

$$T = \sin \theta - (\sin 2\theta) / 2 \quad (6)$$

トルク比例量は、 180° までのプラス側は、SMAホルダーの引き戻し方向であり、 180° から 360° までが回転トルク形成角度範囲である。図-3で明らかなように、形状回復力最大点ではトルクはゼロである。形状回復力が約1/4低下すると最大トルク点は約 240° である。したがって効率的でないが上死点である 180° から 240° の回転角度範囲のみ通電加熱し、回転トルクを発生させ、残りの回転角度範囲はSMAを冷却する。

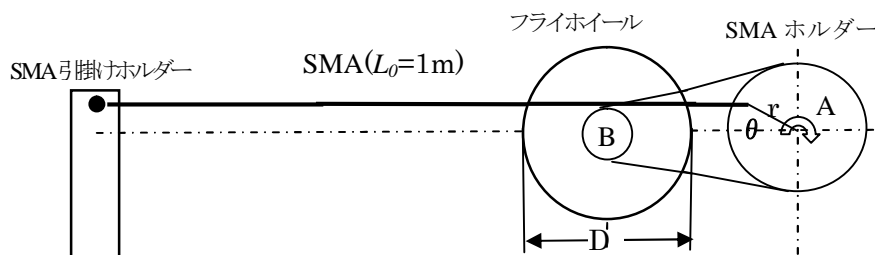


図-2 熱エンジン第一試作機構図

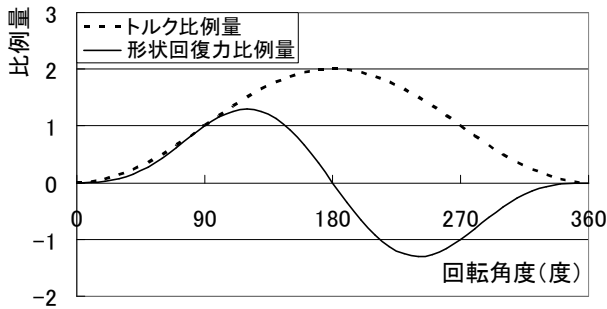


図-3 形状回復力比例量とトルク比例量の変化

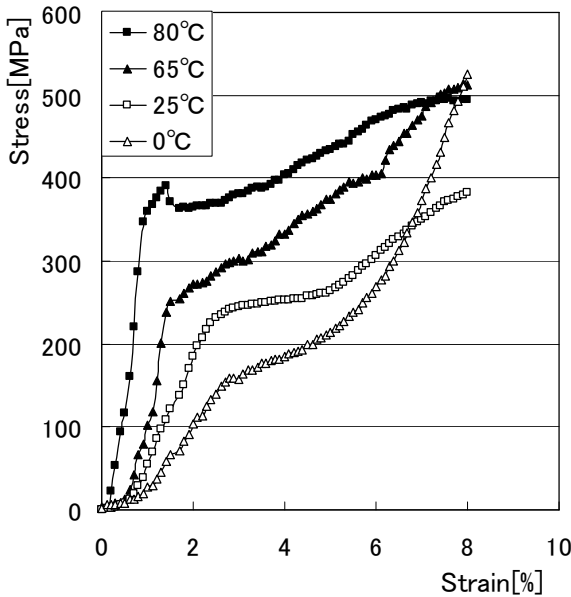


図-4 SMAの引張特性(φ0.4mm)

(3) 駆動条件の最適化検討

図-4は、φ0.4mm SMAの引張り特性と温度の関係を示す。本研究で使用したSMAの相変態温度はオーステナイト開始温度 $A_s=309K$ 、オーステナイト終温度 $A_f=328K$ 、マルテンサイト開始温度 $M_s=269K$ 、マルテンサイト終温度 $M_f=225K$ でありマルテンサイト相と母相間にはかなり大きな温度差がある。したがって、加熱による母相への逆変態と冷却によるマルテンサイト相への変態の間にはかなり大きな温度ヒステリシスがある。

表1 形状回復力発生時間と復帰時間(室温20°C)

線径 [mm]	通電電流 [A]	収縮時間 [s]	復帰時間 [s]	ストローク [mm]	300MPa 荷重 [Kg]
0.2	0.6	1.6	4.0	7	0.96
0.4	2.5	3.0	30.0	55	3.8

図-5は、予ひずみと通電加熱により発生する形状回復力および電気抵抗値の関係を示す。図-5の initial は、通電直後の値を示し、final は長時間通電後の値を表す。

図-5から、予ひずみが約6%で形状回復力は最大となることが分かる。図-4から分かるように常温でひずみ6%を形成するためには約300MPaの引張応力状態を形成する必要がある。すなわち図-3において最大予ひずみ $\delta_{max}=6\%$ とするためには $\delta = 2r/L_0 \times 100[\%]$ となる。したがって、

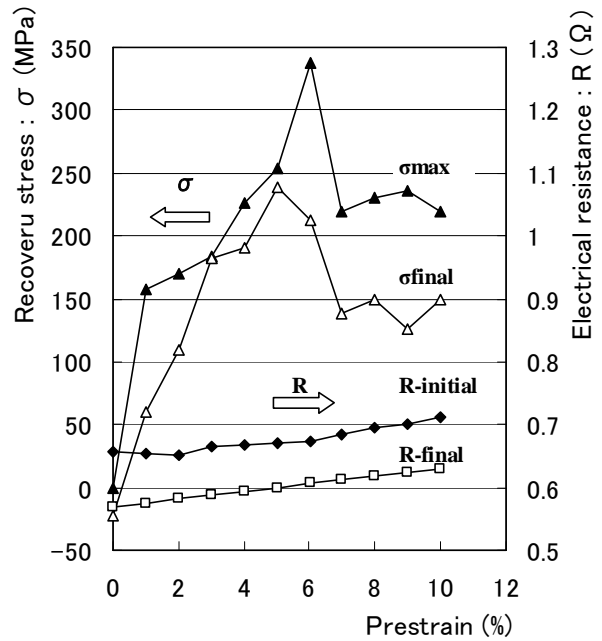


図-5 予ひずみと形状回復力 & 電気抵抗

$r=R-30mm$ 位置をSMAのホルダー位置とし、標準の通電加熱電流の2.5~3.0Aで駆動した。しかし、図-3に示す通電条件にした場合、次の通電までの時間が短く通電加熱されたSMAが大気中では十分に冷却されず、機械的特性の高い母相状態のまま予ひずみ加わることになる。そのため、フライホイールが回転方向と逆の方向に引き戻されてしまい、連続回転を実現できなかった。また、6%の予ひずみ量はかなり大きな負荷となり、少ない予ひずみ量を検討する必要があることが分かった。

そこでSMAの片端を支持し、もう片側に予ひずみ約6%を発生させるために約300MPaの応力となる重りを吊り下

げ, SMA に標準的な電流を流して形状回復力が形成され, SMA が縮む時間と, 電流を切って, 元に戻る時間を測定

した. その結果を表 1 に示す. この結果から冷却時間の短い $\phi 0.2\text{mm}$ の SMA が使用に適していることを示している.

形状回復力が大きくても $\phi 0.4\text{mm}$ SMA はすばやい繰り返し動作は困難であることを示している. さらに, フライホイールは慣性モーメントが大きいほど発生した形状回復力を回転エネルギーとして蓄え, 連続回転を助けると考えていたが, 過大な慣性モーメントでは大きな回転開始のための駆動力を必要とすることから, 形状回復力値に適合したフライホイールの慣性モーメントを選定する必要があることがわかった.

以上の検討により, 選定した最適化条件は以下のとおりである.

- (1) 最大予ひずみ: 4%
- (2) 適用 SMA: 直径 0.2mm (相変態温度は 0.4mm 品同等)
- (3) 通電電流: 0.5~0.6A
- (4) 通電時間: 上死点から約 60° の範囲
- (5) フライホイール効果: $GD^2 \approx 397 \text{ (Kg} \cdot \text{cm}^2)$
- (6) 増速比: 4.5 (SMA ホルダーに対するフライホイールの増速)

上記条件により光センサーによる通電加熱角度の検出と通電加熱による連続回転を得ることが出来た. ただし, 図-3 で明らかのように, 本熱エンジンの駆動条件は最大形状回復力発生点 (最大予ひずみ点) で駆動トルクがゼロであり非常に効率が悪い構造となっているので次の改良を提案する.

(4) 第二次試作熱エンジンの提案

ここで, 提案する第二次試作熱エンジンは, 第一次試作熱エンジンの欠点である形状回復力のロスを防止するために, 図-7 のように引張コイルバネで SMA に常時予ひずみを与えられるようする. SMA ホルダーをプリー状とし, SMA ホルダーの軸にはフライホイールのワンウェイクラッチを介して, 形状回復力を発生させたときのみ一方に駆動力がフライホイールに伝達できるようにする. SMA ファイバは, 第一次試作と同様に 0.2mm のものを使用し,

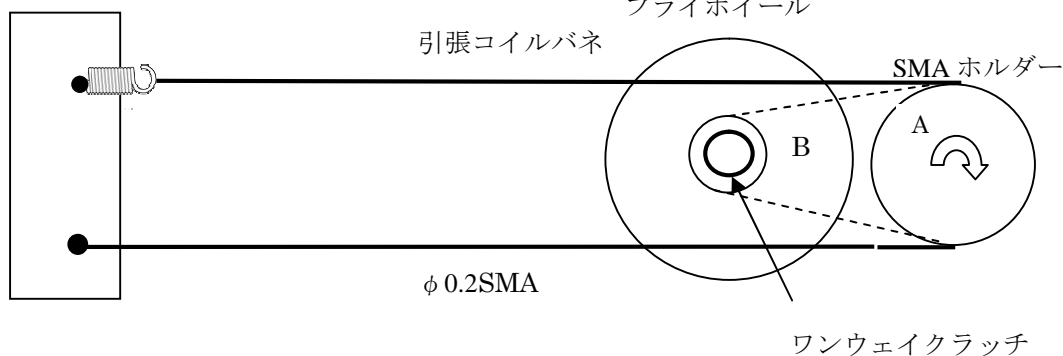


図-7 第二次熱エンジン機構

通電電流も同様とする.

図-6 には使用するコイルのバネの引っ張り特性を示す.

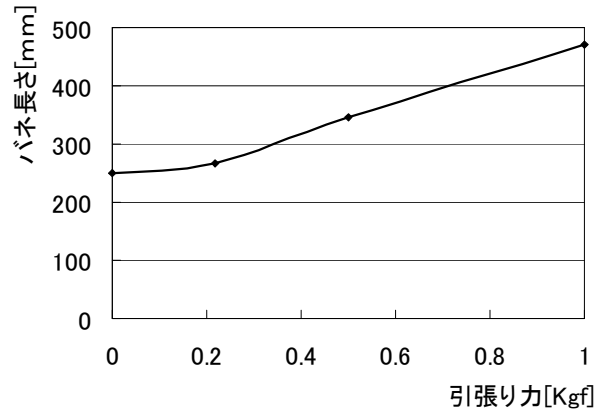


図-6 コイルばねの引張特性

自由長 250mm で設定し, 450mm にする. 引張力は約 1Kgf で SMA に約 300MPa の引張応力が発生する. SMA の予ひずみは駆動状態では大きく変わらず, 引張応力はほぼ一定であるので, 駆動トルクは SMA ホルダーの回転によってほとんど変動しない.

図-7 に示すように第一次試作熱エンジン同様, 第二次熱エンジンも両側に 2 本の SMA を独立して駆動させる. そのために, 交互にタイミングよく通電する適切なシーケンスが必要である. なお, 形状回復力によって発生する回転トルクは第一次試作より大幅に増大するものと予想されるので, 新規に大型のフライホイール ($GD^2 = 594 \times 2 = 1187 \text{Kg} \cdot \text{cm}^2$) を製作する必要がある.

4. 結論

SMA を用いた熱エンジンの試作をおこない, 以下の結論を得ることができた.

- (1) 第一次熱エンジンの試作を行い, 光センサーを利用して連続運転させることができた.
- (2) SMA の形状回復力を連続回転させる機械エネルギーとして取り出すための基

として取り出すための基

本的な条件を設定することができた。

(3) 繰り返して形状回復力を利用するためには、マルチサ

イト相変態温度と逆変態温度に近いほどよいことが分かった。

- (4) 提案する第二次熱エンジンの試作において、引張コイルバネを利用すれば、常にSMAの予ひずみによって、効果的に回転トルクを得ることができることが分かった。
- (5) 通電加熱ではなく、温泉や太陽熱などの自然熱エネルギーから、効率的に機械エネルギーに変換する方法を検討していくことができれば、低位熱エネルギーを有効に利用した、無騒音で無公害のクリーンな熱エンジンの製作が可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 宮崎敦夫, 峯村章, 湯浅憲豊, 中里裕一: 小型リハビリテーション機器のためのマイクロアクチュエータの開発, 日本機械学会福祉工学シンポジウム講演論文集(2006), pp218-219
- 2) 遠藤美幸, 小川明, 加藤明雄, 中里裕一, 坂田悍教, 竹田悠二: SMA アクチュエータを用いた指リハビリ装置の開発～第一報機構構造に試作検討～: 日本機械学会福祉工学シンポジウム講演論文集(2005), pp31-32
- 3) 内田憲男, 三田俊裕: 形状記憶合金をアクチュエータとする8足走行ロボット, 精密工学会誌, Vol.73, No.1,(2007), pp156-160
- 4) 岩永弘之, 戸伏壽昭, 伊藤広道: 形状記憶合金熱エンジンの出力特性の基礎研究(第一報), 日本機械学会論文集(A編), 54巻, 497号, (1988), pp177-180
- 5) 戸伏壽昭, 木村君男, 岩永弘之, J.R.Cahoon: 形状記憶合金熱エンジンの出力特性(第2報), 日本機械学会論文集(A編), 55巻, 509号, (1989), pp165-169
- 6) 本間敏夫, 清水謙一, 鈴木雄一編: 形状記憶合金の応用と開発, エス・ディ・シー社, (1988), pp279-301
- 7) 山下恵太郎: TiNiファイバ強化知的複合材料の形状記憶回復力による機械的特性の向上, 埼玉工業学学位論文