

シンプルプーリー型SMAエンジンの出力評価および実機的设计・製作 種 健・寺田 圭佑*・佐々木 徹**・内田 武・浜野 浩幹***

Evaluation for Output Power of Simple-Pulley-Type SMA-Engine and Design Fabrication of Actual Equipment

Takeshi TANE, Keisuke TERADA, Toru SASAKI, Takeshi UCHIDA and Hiroki HAMANO

Abstract

The output power for shape memory alloy heat engine (hereinafter called SMA-engine) is evaluated by repeated experiments in this study. Many types of SMA-engine are existing, however, only Simple-Pulley-Type SMA-engine is a subject for our study. Shape memory treatment with rectilinear is made for the wire, which is consist of Ni-Ti alloy. Shape recovery temperature of this alloy is about 65 °C. Length and diameter of this Ni-Ti wire are about 450mm and 0.8mm, respectively. The relation between load torque / output power and rotation number of SMA-engine is clarified with some additional concrete data. From these results, when the load torque is 2.30 N·mm, rotational number of SMA-engine is measured 94.0 rpm. So maximum output 22.6 mW is obtained under these conditions. Finally, SMA-engine-powered car is made as an educational material for students belong to elementary school or junior high school.

Keywords : Shape Memory Alloy, SMA-Engine, Simple-Pulley-Type, Output Power, Actual Equipment

1. 緒言

形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, 以下, SMAと略す) は, 外力による塑性変形 (10%ひずみ程度) を受けても形状回復温度以上に加熱することにより, 元の記憶形状に回復する合金の総称である。

形状記憶合金に関する研究は, 1950年代にイリノイ大学の ReadらがAu-Cd合金の単結晶を開発した際に, 形状記憶特性を偶然発見したことに始まる⁽¹⁾。

1960年代には, 米海軍研究所 (Naval Ordnance Laboratory) のBuehlerらがNi-Ti合金の多結晶体に形状記憶特性が見られることを発見した⁽²⁾。この合金は, 両元素の元素記号と研究所の頭文字を取って, 『NITINOL』と名付けられた。

その後も, 鉄系, 非鉄系を問わず多くの形状記憶合金が開発されており, 2016年には, 東北大学の須藤らが形状記憶特性を有するマグネシウム合金を開発した⁽³⁾。この合金は比重がNi-Ti合金の約1/3と小さく, 航空・宇宙分野をはじめ, 軽量化が望まれる工業製品への適用が期待されている。

現在, これらの形状記憶合金の中でも, 医療, 住宅関連設備, 家電製品, 車輛, 航空・宇宙機器にいたるまで, 多くの分野に幅広い応用がなされているのがNi-Ti合金である。

たとえば, 床下換気口, 混合水栓, 炊飯器の調圧口, 新幹線駆動装置の自動油量調整ユニットなどのセンサ・アクチュエータとして用いられている⁽⁴⁾。この理由は, 形状回復時の復元力が大きいこと, 繰り返し使用が可能であること, 耐食性に優れることなどによる。また, 形状回復温度以上の環境における超弾性材料としての利用には, 眼鏡フレーム, 歯列矯正ワイヤなどが挙げられる。

一方, 合金の形状記憶特性を利用して, 熱エネルギーから機械エネルギーを取り出すことを目的とした形状記憶合金熱エンジン (以下, SMAエンジンと呼ぶ) についても研究されている。

SMAエンジンには様々な種類があり, たとえば, ツインクランク型, オフセットクランク型, シンプルプーリー型などでは, エンジン開発と並行して, 出力評価 (トルク-回転数, 出力-回転数の関係評価) が試みられている⁽⁵⁾。また, シンプルプーリー型については, エンジン装置の寸法などから出力を予測する試みも進められている⁽⁶⁾。

このように, SMAエンジンに関する研究が進められる背景には, 現状, 工場などから未利用のまま捨てられている100°C程度の低位熱エネルギーの有効活用がある。

石油資源枯渇などのエネルギー問題, CO₂排出による地球温暖化などの環境問題を受け, 一部ではこのSMAエンジンを利用して発電への応用を目指した取り組みも見られる⁽⁷⁾。

そこで本研究では, 構造の比較的簡単なシンプルプーリー型のSMAエンジンを製作するとともに, 自作した出力評価装置を用いて, このエンジンの出力評価を行った。また, 評価出力に基づいて, このエンジンを搭載した車, 『SMAエンジンカー』の設計・製作を行った。

このSMAエンジンカーは, 授業における教材の1つとして利用するほか, 本校1,2年生を対象としたコース紹介, オープンキャンパス, 公開講座等において活用し, 機械工学への興味・関心を高めてもらうためのデバイスとして使用する。

2. 予備試験

運転中のSMAエンジンに負荷した抵抗トルクを $T(\text{N}\cdot\text{m})$, このときのエンジン回転数を $N(\text{rpm})$ とする (抵抗トルクの増加に伴って, エンジン回転数は減少する)。このとき, エンジン出力 $P(\text{W})$ は, 次式で評価できる。

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \quad (1)$$

したがって, SMAエンジンの出力評価にあたっては, ①抵抗トルクの負荷方法, ②回転数の測定方法, 以上2項目を検討する必要がある。

そこで, シンプルプーリー型SMAエンジンを動力源に持つ教材として, 図1に示す『マジック風車』に着目し, この教材の

* 熊本大学工学部機械システム工学科学生

** 長岡工業高等専門学校機械工学科

*** 松江工業高等専門学校名誉教授



図1 マジック風車



図2 予備試験装置



図3 デジタル回転計

SMAエンジンを対象として、出力評価方法を検討するための予備試験を行った。

2.1 教材の概要

図1に示すマジック風車は、軸間 $H = 85\text{mm}$ で設置された上下2つのプーリー（明緑色部分、直径 $D = 35\text{mm}$ ）に対し、あらかじめ直線形状を記憶させたNi-Ti合金線（長さ $L = 230\text{mm}$ 、直径 $\phi = 0.30\text{mm}$ 、形状回復温度 $A_f = 65^\circ\text{C}$ ）をループにして掛けたシンプルプーリー型SMAエンジンを動力源としている。

下部プーリーを熱源（形状回復温度以上）であるお湯に浸し、上部プーリー（風車）を手動で回転させると、これらのプーリーに掛けられた合金線も同時に回転するため、合金線には、①お湯に浸る際の加熱、②お湯から出た後の気中冷却、以上2つの熱サイクルが生じる。

加熱の際、合金線には浸漬部が記憶形状である直線に戻るうとするために形状回復力が生まれる。したがって、入湯前後で合金線には張力差が生じ、下部プーリーを連続的に回転させるトルクとして作用するため、上部プーリーと同軸に接続された風車を連続的に回転させることができる。

2.2 抵抗トルクの負荷方法

抵抗トルク T の負荷方法には、プロニーブレーキを用いる方法がある⁶⁾。しかしながら、これまでの事例に比べると、図1のSMAエンジンに用いられているNi-Ti合金線の径が細く、エンジン出力が小さいと考えられることから、連続的かつ安定的な抵抗トルクの負荷が困難であると思われる。

また、より簡便な方法で抵抗トルクを負荷することが、SMAエンジンの正確な出力評価に繋がると考えられる。

そこで、本研究では錘をぶら下げた糸をSMAエンジンに接続したプーリー（以下、錘巻取りプーリーと呼ぶ）によって巻き取ることによって、抵抗トルクを負荷することにした。

そのため、図1の風車を取り外し、代わりに、エンジンの上下部プーリーと同じものを錘巻取りプーリーとして取り付けた。この予備試験装置を図2に示す。錘には、発泡スチロールを用い、抵抗トルク T ($\text{N} \cdot \text{m}$) を次式で評価する。

$$T = \frac{mgD}{2}. \quad (2)$$

ここに、 m は錘の質量 (kg)、 D は錘巻取りプーリーの直径 (m) (今回は $D = 35\text{mm}$)、 g ($= 9.81\text{m/sec}^2$) は重力加速度である。

2.3 回転数の測定方法

SMAエンジンの回転数については、図2のSMAエンジン、

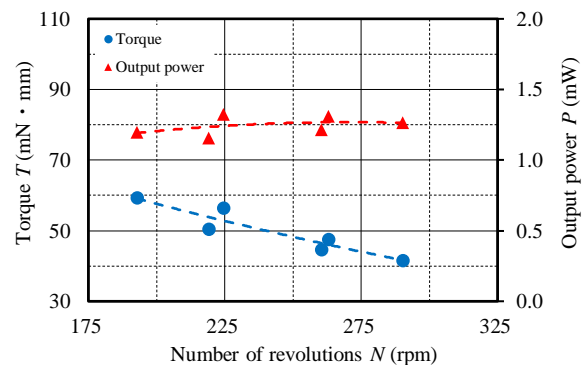


図4 マジック風車の出力特性曲線

錘巻取りプーリーと同軸にある上部プーリーの回転数 (rpm) を、図3に示すLED式ポータブルデジタル回転計 (testo460) によって測定した。

この回転計では、最大回転数モード、最小回転数モードなどの測定が可能である。ただし、本研究ではSMAエンジンの出力 P の過大評価を防ぐ観点から、最小回転数モードによる測定を行った。

具体的には、同一の抵抗トルク T の下で5回、上部プーリーの回転数を測定、最大、最小回転数を除いた3回転数の平均を求め、出力 P はその平均回転数 N から、後述の式(3)によって評価する。

2.4 予備試験結果

式(2)を式(1)に代入すると、SMAエンジンの出力は次式によって評価することができる。

$$P = \frac{\pi g m N D}{60}. \quad (3)$$

図4は、図2に示す発泡スチロール製の錘の質量 m を変えながら、横軸にSMAエンジン上部プーリーの平均回転数 N 、左縦軸に式(2)の抵抗トルク T 、右縦軸に式(3)のエンジン出力 P をプロットした出力特性曲線 ($T-N$ 線図 (●)、 $P-N$ 線図 (▲)) である。

なお、同一トルクでありながら回転数にばらつきが大きく、エンジンが駆動しない場合も見られるなど、エンジン性能が安定していないことが分かった。

これは、マジック風車の構造が簡素であること、例えば、プーリーに軸受が配置されておらず、プーリーの固定条件を一定にできないこと、固定軸が緩みやすく、上下部プーリーの軸間 H が一定しないこと、当初より、SMAエンジンの上下部プーリーが

歪んでおり、平面内回転をしていないこと、など多くの要因が影響していると考えられる。

しかし、 $P-N$ 線図に対して近似曲線を挿入すると、出力ー回転数の関係は、戸伏らの試験結果⁹⁾と同様に、上に凸の曲線で表されることが明らかとなり、定性的には妥当な結果と考えられる。

また、 $T-N$ 線図についても近似曲線を挿入すると、抵抗トルク T (錘の質量 m)が増すにつれ、回転数が低下する傾向が確認できる。これも、戸伏らの傾向に一致している。

3. シンプルプーリ型SMAエンジンの、出力評価装置の製作

第2章の結果に基づいて、実機搭載を見据え製作するシンプルプーリ型SMAエンジンについては、①マジック風車のSMAエンジンに比べ、高出力であること、②SMAエンジンを安定的に運転させるために、玉軸受などを用いて精密な構造とすること、などの理由から、第2章の方法で出力評価が可能と判断し、シンプルプーリ型SMAエンジンならびに出力評価装置の製作を行った。

3.1 シンプルプーリ型SMAエンジンの製作

実機搭載用のシンプルプーリ型SMAエンジンの駆動源としては、図1のマジック風車のものよりも太く長い、直径 $\phi=0.800$ mm、長さ $L=450$ mm、形状回復温度 $A_f=65^\circ\text{C}$ のNi-Ti合金線をループにして用いる。

このNi-Ti合金線には、あらかじめ直線形状の記憶処理が施されており、図5に示すように、その両端のスポット溶接によりループ化する。ループ溶接部の写真を図6に示す。

当初、上部プーリおよび下部プーリには、回転抵抗 (プー



図5 スポット溶接の様子

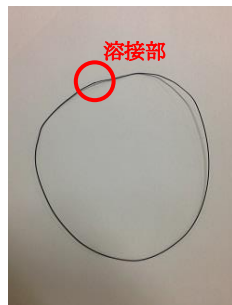
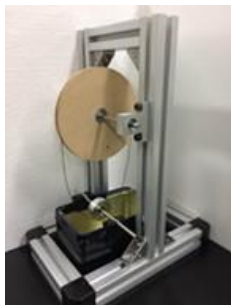


図6 溶接後の合金線



(a) 紙製プーリ



(b) プラスチック製プーリ

図7 シンプルプーリ型SMAエンジンとエンジン構成する上部プーリ

リの慣性モーメント)低減の観点から直径30.0 mmの玉軸受付のアルミプーリを使用して組み立てたが、Ni-Ti合金線のプーリへの接触が不十分で動力伝達が十分に行われず、SMAエンジン駆動には至らなかった。

そこで、上部プーリについては、図7(a)に示すように、直径100 mmの紙材の両面に直径120 mmの紙材を貼り合わせ、内部に玉軸受を配したプーリを自作して用いたところ、Ni-Ti合金線とプーリが十分に接触して摩擦抵抗が大きくなり、安定した回転運動を得ることができた。

しかし、プーリ軽量化の観点から紙材を選定したものの、熱源であるお湯の水蒸気、Ni-Ti合金線の巻き上げるお湯が上部プーリに浸透、膨張して重くなり、長時間、安定的な運転を維持することが困難であることが分かった。

防水スプレーの吹付けによる効果も得られなかったことから、最終的には上部プーリを図7(b)に示すプラスチック製に変更した。なお、SMAエンジンの上下部プーリ軸間距離は、 $H=90.0$ mmとしている。

3.2 出力評価装置の製作

図7(b)に示すシンプルプーリ型SMAエンジンの出力評価を行うための試験装置を製作した。図7(b)の左上方から、SMAエンジンを撮影した写真を図8に示す。



図8 出力評価装置

図8の左下に見える白い物体は紙コップ(質量2.47 g)であり、この中に錘として1円玉を投入して試験を行う。紙コップは、裁縫用の黒糸でエンジン上部プーリに取り付けられた錘巻取りプーリ(今回は $D=45.0$ mm)に接続されており、SMAエンジン駆動とともに巻き取られて、SMAエンジンの抵抗トルク T として作用する。この抵抗トルクは、式(2)によって評価するものである。

紙コップと錘巻取りプーリの間には、円滑に巻き取りを行うためのガイドプーリが設置されている。また、試験結果は熱源の影響を強く受けるため、図7(b)の下部に見えるように、湯温を管理するためのヒータを設置できるスペースを設けた構造としている。

4. 製作したシンプルプーリ型SMAエンジンの出力評価

図8の装置を用いて、第3.1節で製作したシンプルプーリ型SMAエンジンの出力評価試験を行った。熱源であるお湯の温度は、ヒータによって常に 80°C となるよう管理されている。

そして、第2章の予備試験方法に準じて、式(2)によって抵抗トルク T を評価する。実験の進行に伴って、錘の1円硬貨を1

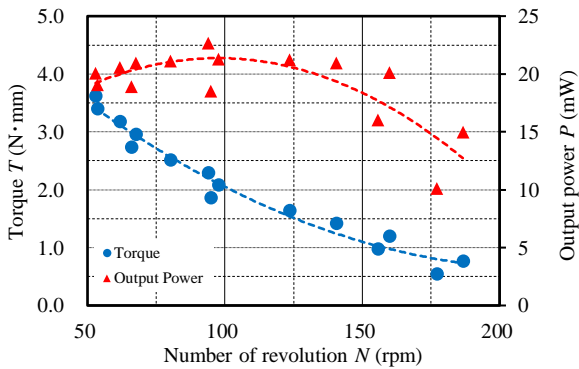


図9 SMA エンジンの出力特性曲線

枚ずつ追加，エンジンへの抵抗トルク T を増してゆく．1円硬貨1枚 (1.00 g) による抵抗トルクの増分 ΔT は，式(2)より以下の通りである．

$$\Delta T = \frac{\Delta mgD}{2} = \frac{1.0 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 45}{2} = 0.22 (\text{N} \cdot \text{mm}) \quad (4)$$

SMA エンジンの運転が安定したことを確認して，1つの抵抗トルク T に対し最小回転数を5回測定，この5回の測定値の最大，最小回転数を除いた3つの回転数の平均値 N を，式(3)の出力評価に供した．

その結果，図7(b)のシンプルプリー型SMAエンジンにより，最大質量 $m_{\max} = 16.5$ g (紙コップ質量込，抵抗トルク換算 $M_{\max} = 3.62$ N·mm) の錘の巻き取りが可能であることが分かった．図9に，このエンジンの出力特性曲線として， $T-N$ 線図 (●) および $P-N$ 線図 (▲) を示す．

はじめに $T-N$ 線図より，図4と同様に抵抗トルクが大きくなるにつれエンジン回転数が小さくなっていることが分かる．この傾向を詳細に検討するために，図10には， $T-N$ 線図の2次近似曲線を青破線で示してある．

この曲線の相関係数は $r = 0.986$ であり，抵抗トルク T と回転数 N の間に高い相関性があることを示している．これは，図4の相関係数 $r = 0.934$ を上回っていることから，製作したエンジンのトルク，回転数の関係を小さくばらつきで評価することができた．

その理由としては，マジック風車のSMAエンジンに比べて高出力のSMAエンジンを実験対象としていることに加え，玉軸受などの使用により，エンジン運転時の性能が安定したことなどが考えられる．

続いて $P-N$ 線図について見てみると，図4と同様に上に凸の曲線になっていることが分かった．これは，戸伏ら⁶⁾の結果と同様な傾向を示すもので，製作したエンジンの最大出力として，平均回転数 $N = 94.0$ rpmにおいて， $P_{\max} = 22.6$ mWを得ることができた．このときの抵抗トルク $T = 2.30$ N·mmである．

$P-N$ 線図については，2次近似曲線を赤破線で追加している．その近似曲線の相関係数は $r = 0.802$ と高い相関を示している．図4の相関係数が $r = 0.448$ であったことを考慮すると，製作したエンジンの出力と回転数の関係を定量的に明らかにすることができたと考えている．

なお，戸伏ら⁶⁾の $P-N$ 線図においては，無負荷回転数を除き，最大出力以降 (図9における平均回転数 $N > 100$ rpmの領域に対応) の実験データがほとんど得られていない．それに対し

て，本研究では最大出力後の低抵抗トルク域においても，実験結果を得ることができており，シンプルプリー型SMAエンジンの出力評価をより広いSMAエンジンの回転数範囲で行うことができたと考える．

ただし， $N > 100$ rpmを超える領域では，出力のばらつきが大きくなっており，逆に， $N < 50$ rpmの範囲の出力特性を評価できていない．

これらの問題は，例えば，錘を0.10 g単位で負荷するなど，試験方法の見直しを行うことで改善が期待でき，今後詳細な検討を行う予定としている．

5. 実機的设计・製作

コース分けを控えた本校1, 2年生，本校を進学先の1つとして考えている中学生や小学生，地域社会の方々に対し，機械材料【形状記憶合金や鉄鋼材料，アルミニウム材料，プラスチックなど】，機械要素【軸，棒，プリー，歯車，軸受，ねじ，ボルト，ナット，ワッシャなど】，設計，加工【動力伝達機構，軸，棒，軸受台など】，部品の組立など，ものづくりに関わる機械工学に興味・関心を寄せてもらうために，図9の出力特性を示す図7(b)のシンプルプリー型SMAエンジンを搭載した実機的设计・製作を行った．

実機としては，興味・関心の引きやすさを念頭に，シンプルプリー型SMAエンジンを動力源とする四輪車，『SMAエンジンカー』を選定した．タイヤ，基板，プリーおよび歯車等には既製部品を使用した．

このSMAエンジンカーの要求性能 (設計諸元) を以下の通り設定する．

設計速度	$v_d = 0.033$ m/sec. (= 2.00 m/min.)
加速度	$a_d = 0.167$ m/sec ² .
車体質量	$M_d = 0.600$ kg
車体寸法	W150 × D200 × H220
動力源	シンプルプリー型SMAエンジン
有効出力	$P_e = 19.0$ mW (有効出力時回転数 $N_e = 133$ rpm)
駆動方式	前輪駆動
動力伝達	プリー-バルト機構，歯車機構
走路勾配	$\theta = 0^\circ$

車体質量および車体寸法については，SMAエンジンおよび既製部品のそれらを考慮して定めた．以下，SMAエンジンカーの設計・製作例を示す．

5.1 SMAエンジンカーの設計

SMAエンジンから駆動輪軸に動力を伝える際に用いる動力伝達機構の減速比を i とする．このとき，駆動輪軸に作用する回転トルク T_{ire} [N·m] は以下の式で評価できる．

$$T_{\text{ire}} = iT_e = \frac{60P_e}{2\pi N_e} i \quad (5)$$

ここに， P_e [W] は有効出力， N_e [rpm] は有効出力時回転数である．

式(5)のトルク $T_{\text{ire}} = T_R$ のとき，SMAエンジンカーが走行する．ここに， T_R [N·m] は走行抵抗 R [N] によるトルクであり，次式によって求められる．

$$T_R = \frac{RD_{tire}}{2} \quad (6)$$

D_{tire} (= 55.0 mm) はSMAエンジンカーに用いるタイヤの直径である。

式(5)および式(6)より、走行抵抗は以下のように表せる。

$$R = \frac{6OP_e}{\pi D_{tire} N_e} i \quad (7)$$

この走行抵抗は、SMAエンジンカーが加速しながら坂道を走行する際に、タイヤ接地面に走行方向逆向きに作用する各種抵抗の和で表される。

$$R = R_r + R_a + R_g + R_{ac} \quad (8)$$

ここに、 R_r [N] はタイヤの転がり抵抗、 R_a [N] は空気抵抗、 R_g [N] は勾配抵抗、 R_{ac} [N] は加速抵抗であり、次式によって評価する⁽⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} R_r &= \mu M g, & R_a &= \frac{\rho}{2} C_d A v^2, \\ R_g &= M g \sin \theta, & R_{ac} &= (1 + \sigma) M a. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

μ (= 0.050) は転がり抵抗係数、 M は車体質量 [kg]、 ρ (= 1.300 kg/m³) は空気密度、 C_d (= 1.000) は空気抵抗係数、 A (= $WH = 0.150 \times 0.220 = 0.033$ m²) はSMAエンジンカーの前面面積、 σ (= 0.700) は回転部分相当質量係数である。

転がり抵抗係数 μ については、内圧を高めないタイプのタイヤで変形しやすいこと、また、動力伝達時の損失の問題から、大きめの値を設定した。また、前面面積 A については、車体寸法から推定したが、実際に空気抵抗を受ける面積はこれよりはるかに小さく、設計上、安全側を考慮して定めた。

これらの係数および冒頭の要求性能を式(9)に代入すると、空気抵抗 R_a [N]、勾配抵抗 R_g [N] は以下のようになり、SMAエンジンカーの設計では無視できる。

$$\left. \begin{aligned} R_a &= \frac{1.300}{2} \times 1.000 \times 0.033 \times 0.033^2 \approx 0.000N, \\ R_g &= 0.600 \times 9.81 \times \sin 0 = 0.000N. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

したがって、式(9)および式(10)を式(6)に代入して、走行抵抗 R [N] を次式で評価できる。

$$R = R_r + R_{ac} = \mu M g + (1 + \sigma) M a \quad (11)$$

ゆえに、走行抵抗によるトルク T_R [N・m] は、式(11)を式(6)に代入することによって、以下のように決定できる。

$$T_R = T_r + T_{ac} = \frac{D_{tire}}{2} \{ \mu M g + (1 + \sigma) M a \} \quad (12)$$

ここに、 T_r [N・m] はタイヤの転がり抵抗トルク、 T_{ac} [N・m] は加速抵抗トルクである。

以上を踏まえ、SMAエンジン駆動輪軸間の動力伝達機構について、詳細検討を行う。

設計速度に関する検討

有効出力時のSMAエンジンカーの走行速度を v とすると、 $P_e = Rv$ である。この式に式(7)を代入すると、速度 v と減速比 i の関係が以下のように表される。

$$v = \frac{\pi D_{tire} N_e}{60} \frac{1}{i} \quad (13)$$

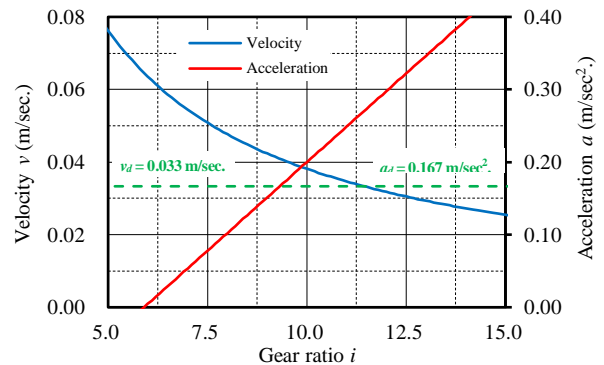


図10 動力伝達機構の減速比 i および SMA エンジンカーの速度 v 、加速度 a の関係

設計加速度に関する検討

式(12)と式(5)を等しく置き、SMAエンジンカーの加速度 a および減速比 i の関係を求めると、次式が得られる。

$$a = \frac{1}{(1 + \sigma)M} \left(\frac{6OP_e}{\pi D_{tire} N_e} i - \mu M g \right) \quad (14)$$

図10は、動力伝達機構の減速比 i を変化させながら、式(13)によってSMAエンジンカーの速度 v 、式(14)によって加速度 a を求め、それぞれ左縦軸(青実線)、右縦軸(赤実線)を用いてグラフにしたものである。

各々の式から明らかなように、減速比 i に対し、速度 v は反比例、加速度 a は比例の関係にある。図10には、設計速度 v_d 、設計加速度 a_d を示している。これらを1本の緑破線で表せるように、左右両縦軸が調整されている。

この図は、減速比 $i < 5.90$ では加速度 $a < 0$ となるために、SMAエンジンカーが走行できないことを示している。また、減速比 $i < 11.5$ において速度 $v > v_d$ となること、減速比 $i > 9.31$ において加速度 $a > a_d$ となることを示している。

つまり、当初の設計速度、設計加速度をともに満たすのは、減速比が $9.31 < i < 11.5$ の範囲にある場合のみである。

そこで、SMAエンジン駆動輪軸間の動力伝達は、減速比 $i = 0.444 \times 23.0 = 10.2$ のプリーベルト機構および2段歯車機構により行うものとした。詳細は以下のとおりである。

プリーベルト機構

プリー径	出力軸側	45 mm
	入力軸側	20 mm
減速比		0.444
ベルト		輪ゴム

2段歯車機構

歯車諸元	駆動側	歯数10, モジュール0.5
	被動側	歯数48, モジュール0.5
減速比		23.0 (2段合計)

5.2 SMAエンジンカーの製作

第5.1節の検討に基づいて製作したSMAエンジンカーを図11に示す。本機の車体質量は $M = 0.568$ kg $< M_d$ (= 0.600 kg) となり、冒頭の要求性能を満たすことができた。

既製品以外で設計・加工した部品としては、シンプルプリー型SMAエンジンを支持するためのトラス斜部材(図11)があ



図11 SMAエンジンカー

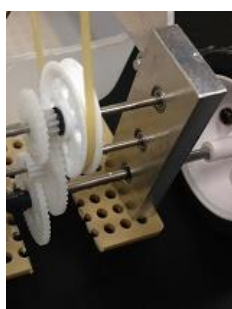


図12 2段歯車機構

る。これらの部材にはアルミ合金を選定，車輪軸側を玉軸受，SMAエンジン上部プーリのおねじ軸を，ナット，ワッシャ，スプリングワッシャによって支持した。

また，SMAエンジンの下部プーリを固定するために，先のトラス斜部材間にアルミ合金製の水平材を取り付け，この水平材に下部プーリ軸を固定した。

図12は，取り付けられた2段歯車機構を示している。SMAエンジンからの動力は，最上段の入力軸側プーリに輪ゴムで伝えられ，その後，2段歯車機構を経て，最下段の駆動輪軸に伝達される。なお，これら3軸の軸受台は，基板の裏側からM3ねじで固定されている。

5.3 SMAエンジンカーの試験走行

図11の基板の上に設置された容器に湯温80℃のお湯を入れ，試験走行を行ったところ，安定して走行する様子が確認された。走行速度を測定したところ， $v=0.043$ m/sec. (=2.560 m/min.) となり，当初の設計速度 $v_d=0.033$ m/sec. (=2.000 m/min.) を達成することができた。

6. 結言

本研究では，形状記憶合金の中で最も普及しているNi-Ti合金の線材（直径0.800 mm，長さ450 mm，形状回復温度65℃）を利用し，シンプルプーリ型のSMAエンジン（軸間 $H=90.0$ mm）を製作した。

そして，製作したSMAエンジンの出力評価を行うとともに，このSMAエンジンを搭載した実機として，SMAエンジンカーを選定，設計・製作を行った。得られた結論を以下に示す。

シンプルプーリ型SMAエンジンの出力特性について

- ・抵抗トルクが大きくなるにつれ，SMAエンジン回転数は小さくなる。

- ・抵抗トルクの最大値は3.62 N・mmである。
- ・出力は，SMAエンジン回転数に対し，上に凸の曲線分布を示す。
- ・出力の最大値は22.6 mW（抵抗トルク2.30 N・mm，エンジン回転数94.0 rpm）である。
- ・本研究で導入した抵抗トルクの負荷方法により，最大出力後の低抵抗トルク域についても，シンプルプーリ型SMAエンジンの出力評価を行うことができた。
- ・抵抗トルクの負荷を0.220 N・mm（負荷質量1.00 g）単位としたため，高抵抗トルク域の出力評価が不十分である。また，低抵抗トルク域についてもばらつきが見られる。
- ・抵抗トルクの負荷を0.022 N・mm（負荷質量0.100 g）単位として，今後詳細な検討を行う。

実機の設計・製作について

- ・設計速度0.033 m/sec. (=2.00 m/min.) に対し，走行速度0.043 m/sec. (=2.56 m/min.) を得ることができた。
- ・設計時車体質量0.600 kgに対し，実質量0.568 kgと軽量化を図ることができた。このことが，上記の走行性能向上の要因の1つと考えられる。
- ・授業やオープンキャンパス等において活用する。

参考文献

- (1) 本間敏夫，記憶材料の応用，鐵と鋼，67-1，pp.47-53，1981.
- (2) Buehler, W. J., Cross, W. B., 55-nitinol-unique wire alloy with a memory, WIRE J, 2-6, pp.41-49, 1969.
- (3) Ogawa, Y., Ando, D., Sutou, Y., Koike, J., A lightweight shape-memory magnesium alloy, Science, 353-6297, pp. 368-370, 2016.
- (4) 戸伏壽昭，田中喜久昭，堀川宏，松本實，形状記憶材料とその応用，コロナ社，pp.112-127，2004.
- (5) 戸伏壽昭，木村君夫，岩永弘之，Cahoon, J. R., 形状記憶合金熱エンジンの出力特性の基礎研究（第2報），日本機械学会論文集（A編），55-509，pp.165-169，1989.
- (6) 佐藤義久，森本浩紀，吉嶺和哉，松川達哉，形状記憶合金エンジンの出力特性に関する研究（第4報），日本機械学会論文集（B編），76-771，pp.1893-1900，2010.
- (7) 佐藤義久，吉田尚嗣，田辺幸典，藤田秀紀，大岩徳雄，形状記憶合金を用いた新発電システムの発電特性に関する研究，電気学会論文誌 B, 126-11, pp.1157-1163, 2006.
- (8) 村野昭人，鈴木武，コンテナヤードにおけるヤードトレーラーの燃料消費推計モデルの構築，国土交通省国土技術政策総合研究所資料，173，pp.1-37，2004.

(2016年11月7日 受理)