

研究ノート

形状記憶合金を使った乗用カー

An Automobile Driven by Using Shape Memory Alloy

金田 嗣教*¹ (正員), 山崎 勝翁*¹

Tsugunori KANADA (Mem.), Katsuou YAMASAKI

This is a report on the trial production of a new type engine car which is driven by the shape recovery force of shape memory alloy (SMA). NiTi wire, the most conventional and useful material in SMAs, sold in the market was used for the main part of the mechanical. Such a trial production as this is very unique and has been presented for the first time in the world as far as it is concerned. The car is composed mainly of a large pulley and a small one and a bundle of SMA wire. The unmanned car, named SMAC 1, can run slowly with almost the same speed as of a foot passenger.

Keywords: shape memory alloy car, wire, pulley, heat engine, torque, revolution, hot vapor.

1 はじめに

形状記憶合金(SMA)の魅力的な利用法としてはエネルギー材料への応用であろう。その1つの形態として形状記憶合金熱エンジンがあり、これは一般的に、大小のプーリに、直線記憶させたワイヤやベルト状の形状記憶合金を架け、小プーリを加熱、大プーリを冷却すると、小プーリに発生した形状回復力が駆動力となり、両プーリを回転させるものである。駆動力を増加させるための様々な工夫が各企業、法人、個人より特許出願され、公報化されている[1]。

ここで形状記憶合金ワイヤの形状回復力を利用して試作した車、形状記憶合金カーの報告をする。この類の試作は知る限り内外においてまだその例を見ない。SMA と Car No.1 を合わせて SMAC1 号と名づけた。

2 形状記憶合金熱エンジンの原理

本試作で採用した形状記憶合金熱エンジンの動作図を Fig. 1 に示す。小プーリの右上、右下のそれぞれの矢印位置での加熱で同じ印の矢印方向へ回転する。詳しくは熱力学的に説明される[2]。この回転の原理を簡単に説明する。回転運動を得るのにたとえば、タービンのブレードに流体を噴出するとその反動力で回転するが、この場合形状記憶合金をブレードの代わりとし、U 字形状から直線に復帰するときのけり出し力が反動力となり回転するものである[3]。同じ原理で直線記憶でなく、コイル状に

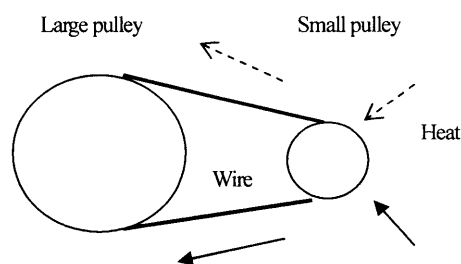


Fig. 1 Drive motion of a SMA heat engine.

記憶させたものでも回転可能である[4]。

3 これまでの経過とデモンストレーション機

完成した最初の試作機は、片手に乗るほどの小型であり、ワイヤは直径 0.5mm を使用し、これに高温蒸気を小プーリの斜め下から当てるか、高温水に直接、円周の一部を触れさせて回転させた。大小のプーリの直径比はある文献[5] を参考に何通りか組み合わせて 1 番速度の速い 3:2 とし、60mm と 40mm の直径を持つアルミ製を使った。しかし、この比は後述のようなスケールの大きな実機を作成するには参考とならなかった。

大プーリを風で冷却するか、冷水をかけると回転速度は増加した。

しかし、この小型機はワイヤ寿命が短く、4~5時間連続回転させるとワイヤのつなぎ目から数 10mm の箇所破断するという欠陥があった。出力は 3 つの白いプラスチックギアを介して取り出せる。その写真を Fig. 2 に示す。

連絡先: 金田 嗣教, 〒870-0152 大分市牧 1666, 大分工業高等専門学校 制御情報工学科,
e-mail: kanada@oita-ct.ac.jp

*¹ 大分工業高等専門学校

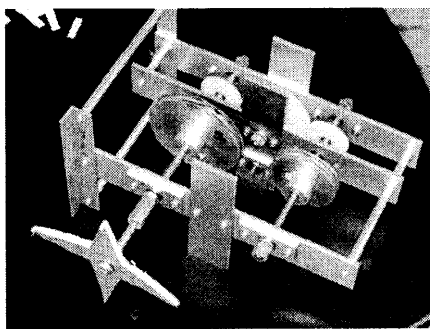


Fig. 2 Compact SMA heat engine. Power is taken out from 3 white gears (top, middle).

機構を説明するために既存の材料を使って、できるだけ簡単にコンパクトなデモ機を作成した。Fig. 3に示す。スチール椅子のスタンドや自転車の部品を使い、必要部分のみ加工した。加熱は電気ポットの蒸気を使用していたが屋外のデモでは不便であり、アルコールランプに換え、さらに三角フラスコと合わせてそれらをスタンドの軸から支えるようにして全体をコンパクト化した。加熱位置はスチール製フレキシブルパイプの中にビニールパイプを通し、正回転用、逆回転用の2箇所蒸気噴射ノズルをそれぞれ固定した。

正回転、逆回転の切換は丸型フラスコのゴム栓につけた3方向コックの切換で行う。正回転でオルゴールを鳴らし、逆転すれば鳴らない。このコックはガラス製であるが耐熱、耐久性の面から、SMAC1号ではフッ素樹脂製に変えた。立体反射板で回転の動作を視覚的に強調している。

屋外のデモでは小プーリ側を透明アクリルで囲んで風除けとし、アルコールランプの炎が消えないようにする。

実際のデモでは静止状態、すなわち水の沸騰する前から演示し、蒸気発生に伴ってゆっくり回転し始める、この瞬間が見る者を感動させるようである。これはSMAC1号でも同様である。

全体の仕様とパーツ、市販の形状記憶合金ワイヤの仕様は以下のとおりである。

<全体の仕様およびパーツ>

形状記憶合金ワイヤ：直径1.0mmのループ2回巻き、小プーリ：アルミ製で直径70mm 厚さ8.0mm、大プーリ：自転車のリム利用、直径520mm、両プーリの車軸間隔：800mm~1000mm 可変、300cc 丸型フラスコ、アルコールランプ、3方向コック、スチール製フレキシブルパイプ、ビニールパイプ、オルゴール、立体反射板2枚、支持スタンド2個。

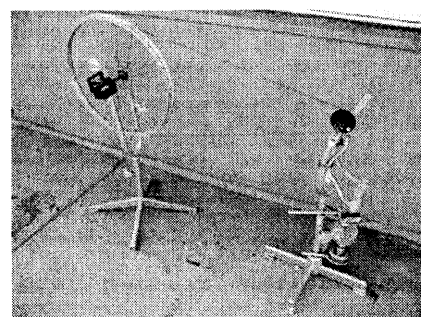


Fig. 3 Demonstration for the shape memory alloy heat engine. Large pulley has music box and reflective sheets (left).

<形状記憶合金ワイヤの仕様[6]>

K.K ニラコ製直線記憶線、密度： $\sim 6.5\text{g/cm}^3$ 、融点：1250~1280°C、化学成分：Ni 54~56%, Ti Balance、電気固有抵抗： $50\sim 100 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ (マルテンサイト)、 $80\sim 100 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ (母相)、変態点 (形状回復温度)：60°C

ワイヤ直径を小型機の0.5mmから1.0mmに変えたことで寿命は飛躍的に延び、これまでまだ、破断を経験していない。形状回復温度は60°C以上であるが100°Cに近い方が回復速度すなわち回転速度も速い。そのため、できるだけ噴射ノズル口をワイヤに近づけた方がよい。

小プーリの最高回転数はワイヤが1本の時、1000rpm以上を実現した。小プーリの直径が小さいとその形に強制的に変形させられたワイヤの形状変形が大きく、そのため、形状回復力が大きくなるが反面、半径が小なるためトルクが小さくなる。

また、両プーリ間が長く空冷が十分であるため、水冷部を必要とせず、全体が簡素化され、車への搭載が可能となる。

4 エンジンの出力特性

エンジンの性能を調べるために、大小プーリを含むエンジン部分のみ、室内に支持具を作成して固定し、エンジンの出力状態を調べた。測定の様子をFig. 4に示す。まず、形状記憶合金ワイヤの本数を4本ずつ増加させて小プーリの回転数を光反射型回転計で測定し、Fig. 5のような結果が得られた。図のように予想に反して本数が増加すると回転数は減少した。この説明として、1本のワイヤの形状回復速度は加熱温度によってのみ決まるので、隣接するワイヤ間の伝導拡散で熱を互いに奪い合っており、よってワイヤが1本のときに最高速度となる。

次にワイヤの本数を同様に増加させてトルクの変化を測定した。これはモータの無負荷トルク測定と異なり、

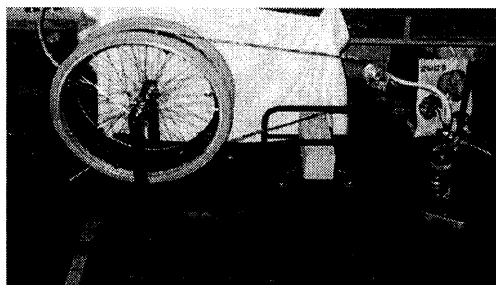


Fig. 4 Measurement of SMA engine output. Two wheel shafts are fixed on the support.

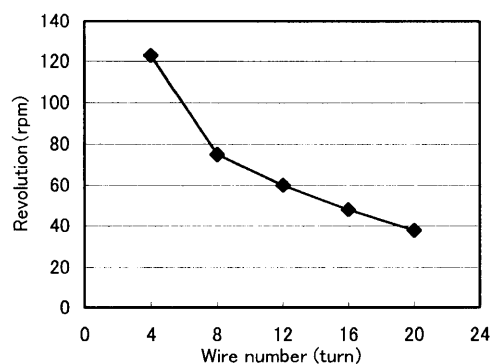


Fig. 5 Wire number vs. revolution.

この熱エンジンは原理上、負荷である大プーリを常に駆動せねばならないことから、直接、回転する大プーリの円周接線方向で、ばねばかりのフックを定常回転時にかけて測定した。回転半径 0.25m、ばねばかりの目盛り値から求めたトルク値を Fig. 6 に示す。本数が増加するとトルクがほぼ比例して増加することから、最終的に乗用の車を目指すにはワイヤ本数を増加すればよいことがわかる。

ワイヤが密着して小プーリに帯状に巻かれており、一様に蒸気を当てて加熱の効率化をはかるため、幅 1mm のスリットを長さ方向に入れた管状噴射ノズルを作成し、同様にトルクの変化を測定した。Fig. 7 にその結果を示す。スリットノズルの方が中間のトルクは少し増加していることがわかる。スリットノズルを Fig. 8 に示す。

5 SMAC1号

出力を調べた熱エンジンをアルミ角パイプで構成する 1755×310mm の車体のフレームに搭載した。駆動輪はプラスチック製手すりを持つ車椅子用車輪を 2 本、手すりを向かい合わせてその間を厚さ 1mm、幅 120mm の銅板 4 枚でつないだ。後輪は手すりのない車椅子用車輪を 2 本採用した。いずれも車椅子の車輪は片持ち支持だが車

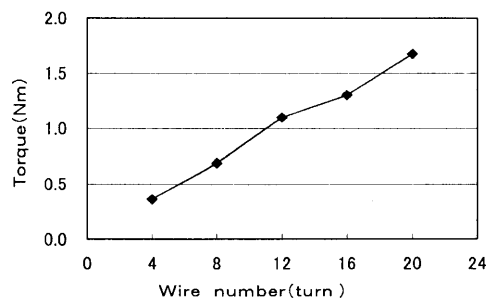


Fig. 6 Wire number vs. torque.

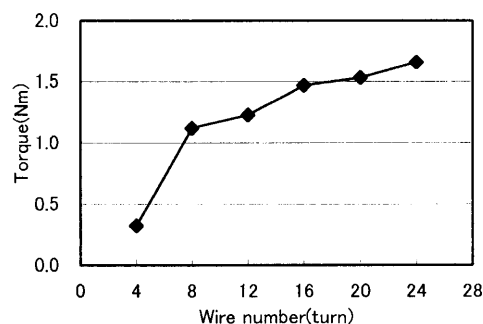


Fig. 7 Wire number vs. torque (slit type)

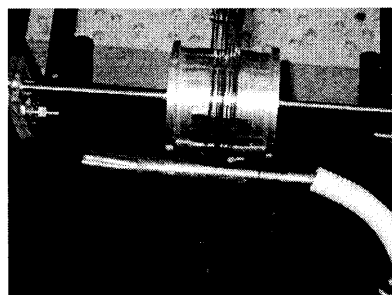


Fig. 8 Slit type nozzle and small pulley. The nozzle jets vapor widely on the wire.

軸が自転車に比べ太く、車体全重量が 100kg 以上となっても充分支持できることが確認されている。銅板は空冷の効率化のため、多数の穴を開けた。全体の構造を Fig. 9 に示す。加熱は底部に携帯ガスコンロを設置し、その上に水を少量入れた 1000cc 三角フラスコを置いた。3 方向コック (アズワン社製) はフッ素樹脂製の耐熱型である。

ワイヤは 120m 用意し、1 本、2.68m のループを 44 本作成した。これを 4 本ずつ集合したものを 1 組として互いに重ならないように架けた。ワイヤの束は幅が 44mm なのでアクリルで扇形のノズルを作り、パイプの先端に取り付けて均一に蒸気がかかるようにした。蒸気が散逸

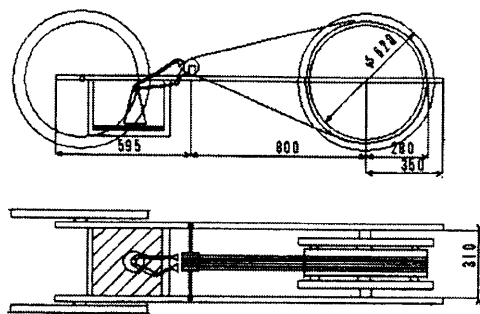


Fig. 9 Side and top view of SMAC No.1. The body is composed mainly of 4 wheels of wheelchair and aluminum frame.

せず効率よく使えるよう、ワイヤ束の両端に 20mm の高さの壁になるアクリル円板を糸巻きの縁状になるように設置した。20 本のワイヤを架けた SMAC 1 号の写真を Fig. 10 に示す。

コンクリートの上での走行速度は前進、後退とも人がゆっくり歩く位である。速度は 20 本でも 44 本でもほとんど変わらないがトルクは本数が多い方が明らかに大きくなった。現在、体重 50kg 以下の者なら乗ってゆっくり動く状態である。

6 おわりに

SMA を使った自走車を試作した。蒸気ノズルの効率よいワイヤへの噴射とノズル位置の調整がトルクを上げるためのカギとなる。試作過程では、細部について色々アイデアが要求されたが一つずつクリアして進めていった。特に、駆動輪にプラスチック手すりつき車椅子の車輪と銅板を使うというアイデアはピッタリと決まった感じがする。スチールのフレキシブルパイプで加熱位置を決定することで微妙な調整が可能になった。

また、車の全長で制約されるが、ワイヤループの長さ、すなわち大小のプリー軸間の長さの、トルクと回転数に与える影響を調べるのが次の課題となる。単純にその長さが長ければ冷却が充分となり、形状回復力も増加するはずである。

この試作は完成までの色々な加工作業を含み、その過程がものづくりの面白さを若者に体験させ得るであろう。

過去の研究[5]では米国から特別に取り寄せたワイヤ材

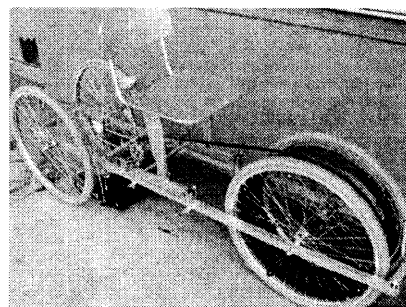


Fig. 10 Final completion of SMAC No.1. The car has a driver seat on the frame.

料ニチノールを細線加工、熱処理して実験に供している。時代とはいえ、最適な直線記憶線がすぐ望むだけ購入できたことは大変ありがたかった。

熱エンジンの熱効率は 4 - 5%といわれるが本研究では 0.01%であった。決してよいとはいえないが最近のエネルギー問題から、回収排熱、太陽熱、地熱、海洋などの自然エネルギーの利用が注目されている。Ni と Ti の成分比調整により、形状回復温度は下げ得るのでこれらの低温熱源の利用の場合、SMA 熱エンジンの利用もまた道がある。

現在、この原理を利用して次のステップとして発電機への応用に着手している。一般に発電所では、蒸気圧でタービンの羽根車を回すがその使用されない温度そのものでも発電できるならば蒸気圧、温度の同時利用での発電の可能性が生まれる。

(2005 年 2 月 22 日受付)

参考文献

- [1] 特許公報パトリス調査表 37 件 キーワード (形状*記憶*回転*プリー+プリー*方向*逆*速度*制御) 2001.
- [2] 田中喜久昭, 戸伏壽昭, 宮崎修一, 固体エンジンの作動原理, 形状記憶合金の機械的性質, 養賢堂, pp.116-120, 1993.
- [3] 井口信洋, 固相ヒートエンジン, 形状記憶合金の話, アグネ, pp.142-143, 1988.
- [4] 井口信洋, 固相ヒートエンジン, 形状記憶合金の話, アグネ, pp.147-148, 1988.
- [5] 本間敏夫, 弥津信彦, Nitinol heat engine 用 NiTi コイルの形状記憶処理に関する研究, 東北大学選鉱製錬研究所報告, 第 34 巻, 第 2 号, pp.105-114, 1978.
- [6] Shape memory alloy, KK ニラコ, 研究用基礎材料カタログ, No.27, pp.91, 2000.