

形状記憶合金テープにより駆動する回転アクチュエータ Rotary Actuator Driven by Shape-Memory Alloy Tape

武田 亘平[†], 戸伏 壽昭^{††}, 宮本 浩司^{†††}
Kohei Takeda[†], Hisaaki Tobushi^{††}, Kouji Miyamoto^{†††}

Abstract In order to develop novel shape memory actuators, the torsional deformation of a shape memory alloy (SMA) tape and the actuator models driven by the tape were investigated. The results obtained can be summarized as follows. In the SMA tape subjected to torsion, the martensitic transformation appears along the edge of the tape due to elongation of the edge of the tape and grows to the central part. The fatigue life in both the pulsating torsion and alternating torsion is expressed by the unified relationship of the dissipated work in each cycle. Based on the two-way motion of an opening and closing door model and a lifting and lowering basket model driven by two kinds of SMA tape, it is confirmed that the two-way rotary driving actuator with a small and simple mechanism can be developed by using torsion of the SMA-tape.

1. 緒言

近年、感知・判断・駆動などの機能を有するインテリジェント材料が世界的に注目されている。インテリジェント材料の研究を活発化させた主な材料の一つが形状記憶合金 (shape memory alloy, 以下 SMA) である¹⁾²⁾。SMA の主な機能特性は形状記憶効果 (shape memory effect, 以下 SME) と超弾性 (superelasticity, 以下 SE) である。これらの特性を有するために、SMA はアクチュエータ、熱エンジン、ロボットなどの駆動素子として使われている。SME および SE はマルテンサイト変態 (martensitic transformation, 以下 MT) に基づいて現れる。

SME と SE の変形特性は温度と応力に依存して現れる。最近の研究において、TiNi SMA パイプのねじり変形を応用し、航空機の飛行性能を向上するために回転翼のねじりが検討されている³⁾⁴⁾。SMA 素子の熱応答性能の点から、実用においては細い線材と薄い板材が多く使用されている。SMA テープを実用する場合、単に両端を挟むだけでねじり変形を得ることができる。SE の特性を利用すれば、トーションバーと類似なエネルギー貯蔵の機能を応用することができる。このように SMA テープのねじり特性を

利用すれば、単純で小型のアクチュエータが開発できる。このため、著者らは SMA テープの基本的なねじり変形特性を調べた⁵⁾⁶⁾。

本研究においては、SMA テープにより駆動する回転アクチュエータを開発するために、TiNi SMA テープのねじり変形および疲労特性を調べた。また SMA テープにより駆動する開閉ドアモデルおよび昇降バスケットモデルを提案する。

2. SMA テープのねじり変形および疲労特性

2.1 実験方法

2.1.1 供試材および試験片

実験に使用した材料は厚さ $t = 0.25$ mm で幅 $w = 5$ mm の Ti-50.18at%Ni SMA テープであった。試験片は長さ $L = 60$ mm の一様形状であり、平面を形状記憶熱処理した。試験片の標点距離は $l = 40$ mm であった。DSC 試験で求めた変態温度は $M_s = 304$ K, $M_f = 266$ K, $A_s = 319$ K, $A_f = 359$ K であった。

[†]愛知工業大学 大学院 (豊田市)

^{††}愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

^{†††}中菱エンジニアリング株式会社 (名古屋市)

2.1.2 実験手順

SMA テープのねじりに関する以下の実験を行った。ねじり試験において軸方向（試験片の長手方向）の変位が生じない様に両端の位置は一定に保った。

(1) ねじり試験

室温でねじり試験を行い、ねじり変形特性を調べると共に試験片表面の温度分布を赤外線サーモグラフィにより測定した。また、負荷・除荷により片振りと両振りのねじり試験を行った。

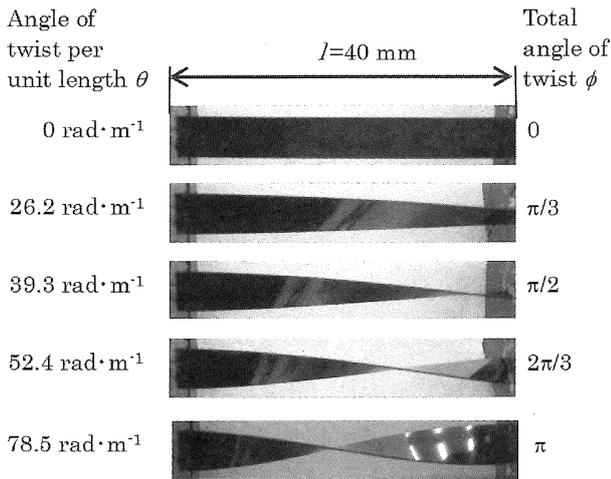


Fig. 1 Photographs of twisted SMA tape at each angle of twist

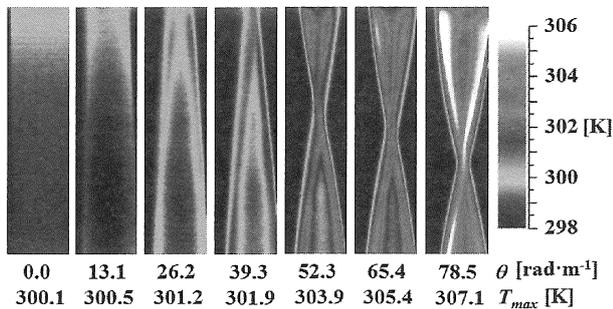
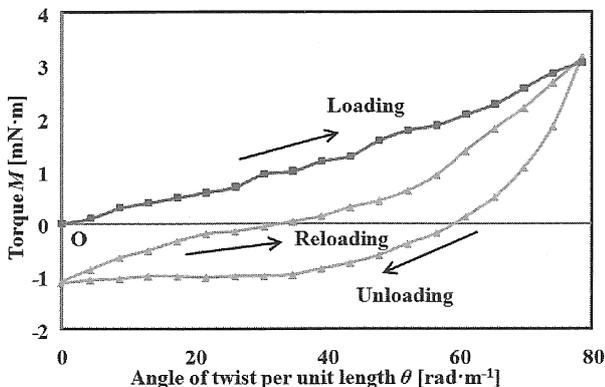


Fig. 2 Thermograms showing temperature distribution on the surface of the SMA tape appeared due to the phase transformation under torsion



(a) Pulsating torsion

(2) ねじり疲労試験

室温で一定のねじれ角に関する片振りと両振りのねじり疲労試験を行った。繰返し速度は $f = 600$ cpm (10 Hz) であった。

2.2 実験結果および考察

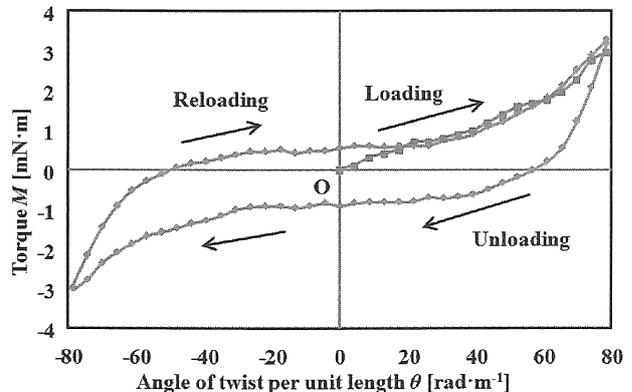
2.2.1 ねじり変形状態

各ねじれ角における SMA テープのねじり変形特性の写真を図 1 に示す。図 1 において、左側が固定端で、右側がねじり駆動端である。SMA テープの上面と下面が交差する点は単位長さ当りの比ねじれ角 $\theta = 39.8 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$ (全ねじれ角 $\phi = \pi/2$) で駆動端から現われ、 $\theta = 78.5 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$ ($\phi = \pi$) で試験片の中央に達する。両端の軸方向の位置は一定に保ったので、試験片の両縁はねじりにより伸びる。したがって、両縁に沿って引張応力が生じるので、応力状態は単純せん断と異なり、複雑な分布になる。

2.2.2 サーモグラフィによるマルテンサイト変態の観察

SMA の熱・力学特性は MT と逆変態により現れる。MT と逆変態に基づいてそれぞれ発熱と吸熱反応が生じる。DSC 試験では、これらの反応に基づく熱量の変化を測定して変態温度を定める。応力誘起 MT による SE の場合、負荷と除荷過程においてそれぞれ温度上昇と降下が生じる。したがって、材料の表面の温度を測定することにより MT の発生と成長を解析することができる。材料の全表面の温度分布を測定する赤外線サーモグラフィはこの目的に適用できる。このように SMA の MT に関する挙動はサーモグラフィを用いることにより解析できる⁷⁾。

赤外線サーモグラフィにより得られたねじり変形中の各ねじれ角における SMA テープ表面の温度分布を図 2 に示す。図 2 において、上側はねじり部を示し、下側は固定部を示す。試験片表面の最大温度 T_{max} はテープの縁に沿って



(b) Alternating torsion

Fig. 3 Relationship between torque M and angle of twist per unit length θ obtained by the pulsating and alternating torsion tests for maximum angle $\theta_m = 78.5 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$

生じ、この部分で発熱の MT が現われ、試験片の中央部に向かって進展する。テープの縁に沿って現れる温度上昇は、比ねじれ角 $\theta_m = 26.2 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ で開始する。この比ねじれ角はテープの縁の伸びひずみ 0.3% に対応しており、MT の開始条件と一致する。試験片の最高温度はテープの縁に沿って現われ、高温度領域はねじれ角の増加に伴い中央部に向かって伝播する。したがって、MT はテープ縁に沿う伸びに基づいて優先的に成長する。

2.2.3 ねじり変形特性

最大比ねじれ角 $\theta = 78.5 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ の片振りねじりと両振りねじり試験で得られたトルク M と比ねじれ角 θ との関係をそれぞれ図 3 (a) と (b) に示す。片振りねじりの場合、 $M - \theta$ 曲線は最初の負荷過程についてはほぼ直線で表される。除荷過程においては、曲線の初期の傾きは大きく、その後は水平になる。再負荷過程においては、初期の曲線は最初の負荷曲線とほぼ平行であり、その後の曲線の傾きは大きくなる。両振りねじりの場合、最初のねじり方向に対して逆方向のねじりが与えられた。逆方向の負荷と除荷曲線は、初期の領域を除けば最初の負荷と除荷曲線とほぼ類似している。すなわち、最初と逆方向の負荷曲線は、原点に関してほぼ対称である。逆方向の負荷過程において、除荷曲線の初期の傾きは大きく、その後は水平になる。片振りと両振りにおいて、再負荷曲線の終了点は最初の除荷開始点とほぼ一致し、回帰点記憶を示す。

図 3 に示したねじりの $M - \theta$ 曲線のヒステリシスループで囲まれる面積は、単位長さ当りの散逸仕事 W_d を表す。散逸仕事 W_d は、最大ねじれ角 θ_m に比例して増加する。片振りねじりにおける W_d の値は、片振りねじりに比べて 3.5 倍大きい。片振りと両振りねじりの両方において、 θ_m がある一定の値より小さい場合 W_d は非常に小さい。

2.2.4 ねじり疲労特性

ねじり疲労試験により得られた最大比ねじれ角 θ_m と破断繰返し数 N_f との関係を図 4 に示す。破断繰返し数 N_f は最大比ねじれ角 θ_m が増加すると減少する。この関係は両対数グラフ上で直線で近似される。したがって、疲労寿命曲線は、TiNi SMA ワイヤの曲げ疲労寿命曲線と類似な方程式で表される。この関係は次式で表される。

$$\theta_m \cdot N_f^\beta = \alpha \tag{1}$$

ここで α と β はそれぞれ $N_f = 1$ での θ_m と $\log \theta_m - \log N_f$ 曲線の傾きを表す。片振りねじりについて $\beta = 0.1$ 、 $\alpha = 265 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ および両振りねじりについて $\beta = 0.13$ 、 $\alpha = 310 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ を用いた式 (1) による計算結果を図 4 に実線で示す。図か

らわかるように、疲労寿命曲線は実線の計算結果と良く一致する。両振りねじりと片振りねじりの疲労寿命を比較すると、両振りねじりにおける破断繰返し数 N_f は片振りねじりにおける N_f より 1/5 小さい。

各サイクルにおける散逸仕事 W_d と破断繰返し数 N_f との関係を図 5 に示す。片振りねじりと両振りねじりにおける関係はほぼ同じ線上に位置する。したがって、片振りねじりと両振りねじりにおける両方の疲労寿命は、統一された関係で表される。 W_d と N_f の関係は次のべき関数で表される。

$$W_d \cdot N_f^\lambda = \mu \tag{2}$$

ここで μ と λ はそれぞれ $N_f = 1$ での W_d と $\log W_d - \log N_f$ 曲線の傾きを表す。 $\lambda = 0.382$ と $\mu = 9 \text{ J/m}$ について式 (2) による計算結果を図 5 に実線で示す。図からわかるように、全体的な傾向は実線で近似できる。疲労限度に対応する散逸仕事は 0.04~0.05 J/m である。各サイクルにおける散逸仕事 W_d が 0.04~0.05 J/m より小さい場合には、疲労損傷が小さく、結果として疲労寿命が長くなる。

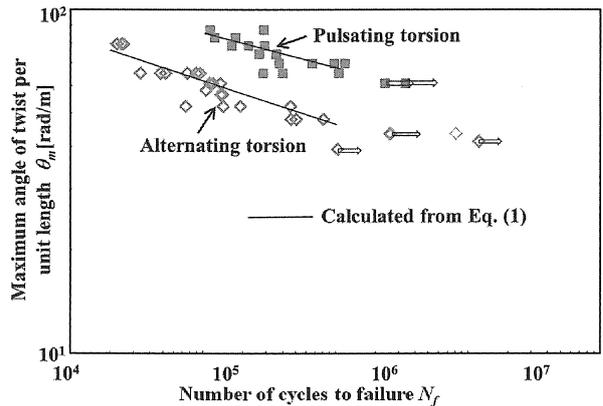


Fig. 4 Relationship between maximum angle of twist per unit length and number of cycles to failure

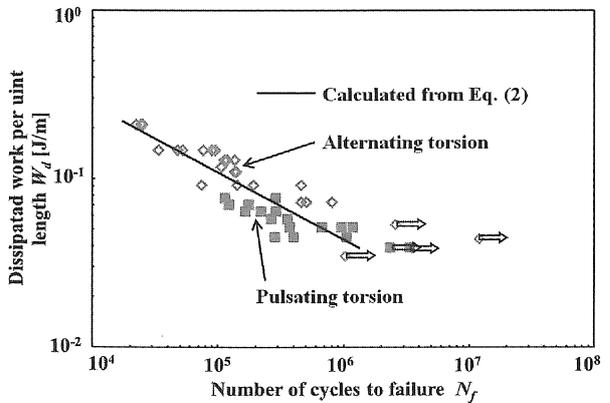


Fig. 5 Relationship between dissipated work per unit length and number of cycles to failure

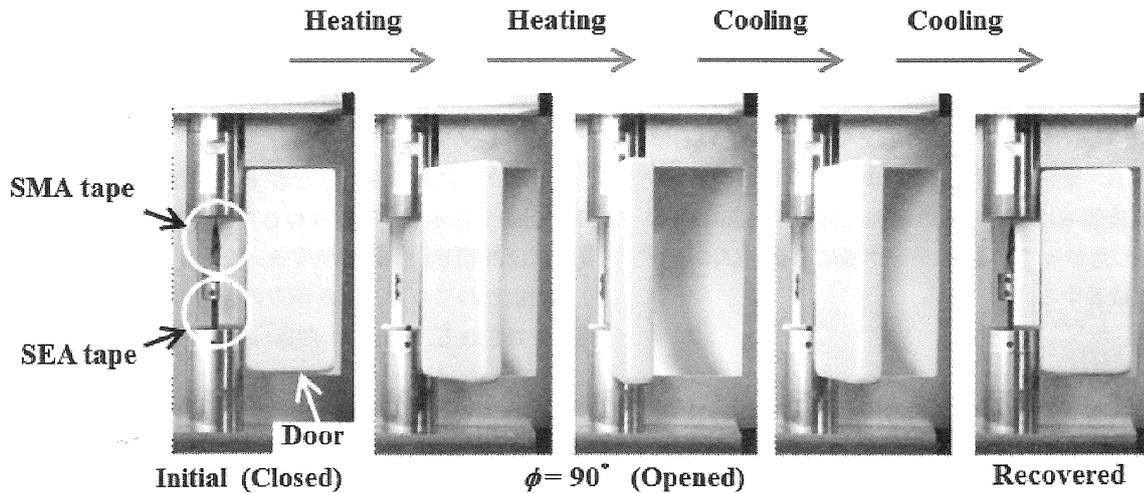


Fig. 6 Photographs of two-way rotary movement of a door driven by SMA tape and SEA tape during heating and cooling

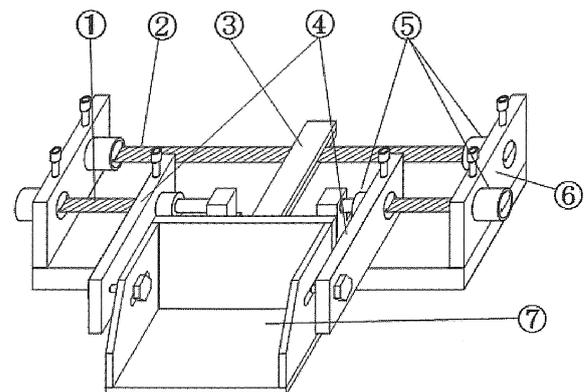
3. 開閉ドアモデル

SMA テープをねじり, 一定のねじり角に保持して加熱すると回復トルクが現れる. したがって, SMA テープに室温で SE を示す超弾性合金 (superelastic alloy, 以下 SEA) テープをバイアス素子として組合せれば, 2 方向回転アクチュエータが開発できる. SMA テープと SEA テープの軸を同一直線上に配置した新しい回転アクチュエータのモデルを提案する.

SMA テープと SEA テープを用いた開閉ドアモデルの回転運動の写真を図 6 に示す. SMA テープはねじり試験で用いた試験片と同じであり, 室温 RT での加熱冷却で SME を示す. SEA テープは室温で SE を示し, 厚さ $t = 0.25 \text{ mm}$ で幅 $w = 2.5 \text{ mm}$ の TiNi SEA テープであり, 平面を形状記憶熱処理した. RT の初期状態において, SEA テープは平面で取付け, SMA テープは全ねじれ角 $\phi = \pi/2$ で取付けた. SMA テープは通電によりジュール熱で加熱した. 図 6 からわかるように, RT において SEA テープのトルク M_{SEA} は SMA テープのトルク M_{SMA} より大きいので, 初期状態ではドアは閉じている. SMA テープを加熱すると回復トルクが現れ, トルクの関係が $M_{SMA} > M_{SEA}$ に変化するので, SMA テープは平面を回帰し, このためにドアは開く. その後に通電を止め, SMA テープが冷却されるとトルクの関係は再び $M_{SMA} < M_{SEA}$ に変化する. この結果, SEA は平面を回復するため, ドアは閉じる. したがって, SME と SE を示す 2 種類の SMA テープを用いることにより, 小型で単純な機構の 2 方向回転駆動素子が開発できる.

4. 昇降バスケットモデル

SMA テープと SEA テープの軸を平行に配置した新しい回転アクチュエータモデルを提案する. 加熱冷却で SMA テープにより駆動する昇降バスケットモデルの構造とモデルの 2 方向運動の写真をそれぞれ図 7 と図 8 に示す. このモデルでは, SME を示す SMA テープと RT で SE を示す SEA テープを使用した. SMA テープはねじり試験に用いた試験片と同じ TiNi SMA である. SEA テープは開閉ドアモデルに用いたものと同じ厚さ $t = 0.25 \text{ mm}$, 幅 $w = 2.5 \text{ mm}$ の TiNi



① SMA tape, ② SEA tape, ③ Center bar
④ Arm, ⑤ Grip, ⑥ Side body, ⑦ Basket

Fig. 7 Structure of the actuator for lifting and lowering a basket driven by SMA tape and SE tape

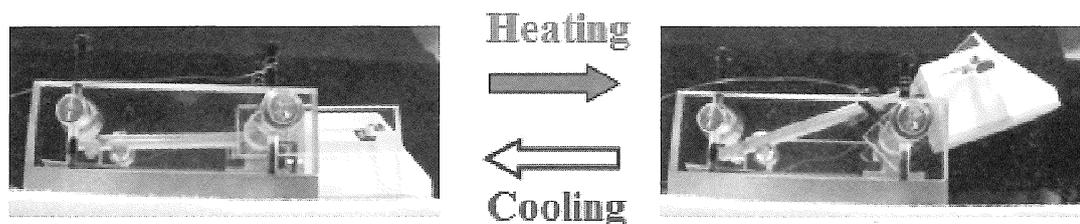


Fig. 8 Photographs of two-way motion for lifting and lowering a basket

SEA である。初期状態において、SEA テープは平面で取付け、SMA テープは全ねじれ角 $\phi = \pi/2$ で取付けた。SMA テープは通電によるジュール熱で加熱した。バスケットは初期状態では水平である。SMA テープを加熱すると回復トルクが現れるため、バスケットは持ち上げられる。通電を止めると SMA テープは冷却され、SEA テープが平面形状を回復するため、バスケットは下げられる。このように、SMA テープのねじりを駆動源として用いれば、小型で単純な機構の 2 方向回転アクチュエータが開発できる。

5. 結言

TiNi SMA テープのねじり変形特性と疲労寿命特性を明らかにすると共に、SMA テープのねじりにより駆動する新しい回転アクチュエータモデルを提案した。得られた主要な結果は次の通りである。

(1) 軸方向の位置を固定した SMA テープのねじり変形において、MT はテープの縁から発生し、中央に向かって進展する。両振りねじりと片振りねじりの疲労寿命特性は、各サイクルにおける散逸仕事のべき関数で統一的に表される。

(2) SMA テープと SEA テープを組合せた開閉ドアモデルと昇降バスケットモデルを示した。SMA テープのねじりを駆動源として利用すれば、小型で単純な機構の 2 方向回転アクチュエータが開発できる。

文献

- 1) Funakubo H. ed., 1987, Shape Memory Alloys, Gordon and Breach Science, New York.
- 2) Otsuka K. and Wayman C. M., 1998, Shape Memory Materials, Cambridge University Press, Cambridge.
- 3) Mabe J. H., Calkins F. T. and Ruggeri R. T., 2007, Full-scale Flight Tests of Aircraft Morphing Structures using SMA Actuators, Proc. of SPIE, 6525-65251C, 1-12.
- 4) Mabe J. H., Ruggeri R. T., Rosenzweig E. and Yu C. J., 2004, Nitinol Performance Characterization and Rotary Actuator Design, Proc. of SPIE, 5388, 95-109.
- 5) Tobushi H., Pieczyska E. A., Nowacki W. K., Sakuragi T. and Sugimoto Y., 2009, Torsional Deformation and Rotary Driving Characteristics of SMA Thin Strip, Arch. Mech., 61, 3-4, 241-257.
- 6) Tobushi H., Sakuragi T. and Sugimoto Y., 2008, Deformation and Rotary Driving Characteristics of a Shape-Memory Alloy Thin Strip Element, Mater. Trans., 49, 1, 151-157.
- 7) Pieczyska E. A., Gadaj S. P., Nowacki W. K. and Tobushi H., 2006, Phase-Transformation Fronts Evolution for Stress- and Strain-Controlled Tension Tests in TiNi Shape Memory Alloy, Exp. Mech., 46, 531-542.