

ねじり負荷を受ける形状記憶合金薄帯板の変形特性 Deformation Properties of Shape-Memory Alloy Thin Strip Subjected to Torsional Loading

戸伏壽昭[†], 櫻木稔巳^{††}, 杉本義樹^{††}
H. Tobushi[†], T. Sakuragi^{††} and Y. Sugimoto^{††}

Abstract If a shape-memory alloy (SMA) thin strip is applied to the elements subjected to torsion, a rotary driving element with a simple mechanism can be developed. In order to develop the rotary driving elements with SMA thin strip, the torsion test, the recovery torque test and the torsional fatigue test were carried out for TiNi SMA thin strip. The basic characteristics for torsion of SMA thin strip were obtained. Torque increases in proportion to torsional angle and temperature. Recovery torque increases in proportion to torsional angle and temperature. Fatigue life decreases in proportion to torsional angle. The fatigue life of the heat-treated material is longer than that of the as-received material. The fatigue limit of torsional angle of the heat-treated material is almost the same as that of the as-received material.

1. 緒言

近年、機能材料について単一の機能だけでなく、検知機能、判断機能、実行機能などを有する材料として、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性化させた主な材料の一つは形状記憶合金(shape memory alloy, 以下 SMA)である¹⁾⁴⁾。SMAには、形状記憶効果(shape memory effect, 以下 SME)や超弾性(superelasticity, 以下 SE)といった特性があり、これらの特性を利用した熱エンジンやアクチュエータ等の駆動素子に应用されている。実用化されている SMA の中で TiNi 合金は結晶粒径が小さく、疲労損傷が生じにくいために、疲労強度が高く、最も多く使用されている。SMA で現れる SME や SE はマルテンサイト変態(martensitic transformation, 以下 M 変態)に基づいて生じる。SME と SE の変形特性は温度及び応力に著しく依存する。SMA が応用される場合の形態としては、熱応答性能の関係から細い線材や薄い板材の形状で利用される事が多い。負荷形態としては、引張・圧縮・曲げの他、ねじりが挙げられる。TiNi SMA 円管のねじり変形を利用して航空機の翼を制御し、飛行性能を向上させる研究が行われている⁵⁾。実用されている SMA 薄帯板の場合、両端を挟むだけで容易にねじり変形を与えることができる。又、超弾性特性を利用すれば、トーションバーと類似のエネルギー貯蔵機能を高性能で発揮することが可能である。このように、SMA 薄帯板に関するねじり

特性を用いれば、単純な機構の小型アクチュエータが開発可能である。

本研究では、TiNi SMA 薄帯板を種々の温度下において負荷・除荷のねじり試験を行うことでねじり変形特性を明らかにする。また、TiNi SMA 薄帯板をねじりを伴う駆動素子として使用する場合、回復トルク特性および疲労特性を明らかにすることが重要である。このため、薄帯板のねじりにおける回復トルク特性を明らかにし、さらにねじり疲労特性についても検討する。また、SMA 薄帯板によるドア開閉モデルの動作確認を行う。

2. 実験方法

2.1 供試材及び試験片

供試材は古河電気工業株式会社製の TiNi SMA 薄帯板(NT-M2)であり、板厚は 0.25mm、板幅は 5mm であった。試験片は一様平面形状で長さ $L=60\text{mm}$ であり、両端の治具のつかみ部の長さは 10mm で、標点間距離は $l=40\text{mm}$ とした。また、供試材に平面形状を再記憶させるため、電気炉を用いて熱処理を行った。熱処理の手順としては納入材を平面状に固定し、2 時間で炉内を 673 K まで加熱し、その後 673 K で 1 時間保持した後炉冷した。実験は納入材と熱処理材の両方について行った。

[†]愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

^{††}愛知工業大学 大学院 (豊田市)

2.2 実験装置

ねじり試験とねじり疲労試験を行うために以下に示す2種類の実験装置を使用した。

(1) **ねじり試験装置** ねじり試験装置の概要を Fig.1 に示す。試験片①をつかみ具②で固定し、試験機にセットする。片側の軸にはトルクゲージ③が取り付けられており、トルクゲージをねじることにより、試験片にねじり変形を与えると同時にトルクを測定する。この場合、軸方向の変位が生じないように両端の軸方向の位置は一定に保たれる。ねじれ角については、中心軸に取り付けてある角度調整針④と試験機上板に固定されている角度測定板⑤を用いて調整する。試験雰囲気は水中で、試験温度は温度コントローラと熱電対を用いて水温を調整した。水温と試験片の温度は等しいと仮定した。

(2) **ねじり疲労試験装置** ねじり疲労試験装置を Fig.2 に示す。この装置は、モーター①の回転運動をねじれ角調整板②に伝え、クランク機構③を用いて回転運動を往復運動に変換する。往復運動をラック④に伝え、ピニオンギア⑤を用いて再び往復運動を回転運動に変換する。ピニオンギアに繋がっているねじり軸⑥に試験片⑦を取り付けることにより、試験片にねじり変形を与えることが出来る。このように、ピニオンギア側のねじり軸を主運動側、反対側を固定側とした、片側ねじりの機構である。ねじりを与える場合、軸方向の変位が生じないように両端の軸方向の位置は一定に保たれる。所定のねじれ角で交互に回転するので、ねじれ角を振幅とする両振りの疲労試験が行われる。繰返し数は光学式センサー⑨とカウンター⑩を用いて測定する。回転数の調整には、スピードコントローラ⑪を用いる。またカット回路⑧により、試験片が破断した際、モーターは自動停止する。

2.3 実験方法

以下に、ねじり試験、回復トルク試験、ねじり疲労試験の実験手順を示す。

(1) **ねじり試験** まず、試験片をつかみ具に取り付け、ねじり軸に固定する。ねじり軸にトルクゲージを取り付け、所定の比ねじれ角 θ (全ねじれ角 ϕ) までトルクゲージをねじることにより、試験片に負荷を与える。ねじれ角と同時にねじりに必要なトルクを測定する。ねじり変形特性試験では負荷が最大比ねじれ角に達した後、トルクが0になるまで除荷する。この一連の負荷・除荷過程においてトルクの変化を各ねじれ角について測定する。実験条件として、試験温度は $T=RT$, 333, 343, 353 K とした。試験雰囲気は、 $T=RT$ については空気中であり、 $T=333, 343, 353$ K については水中であった。比ねじれ角の測定間隔は $\Delta\theta=375$ $^{\circ}/m$ (全ねじれ角測定間

隔 $\Delta\phi=12.5$ $^{\circ}$) で、最大比ねじれ角は $\theta_{max}=4500$ $^{\circ}/m$ (最大全ねじれ角 $\phi_{max}=180$ $^{\circ}$) とした。

(2) **回復トルク試験** 回復トルク特性試験では最初に室温において所定の比ねじれ角 θ (全ねじれ角 ϕ) まで試験片をねじり、この時のトルクを測定し、その全ねじれ角を保持する。その後、全ねじれ角を保持したまま所定の温度の水中に入れ、加熱時におけるトルクの測定を行う。その温度におけるトルクと室温時のトルクとの差を、有効回復トルクとして定める。試験片をねじり時の試験温度は $T=RT$ 、加熱温度

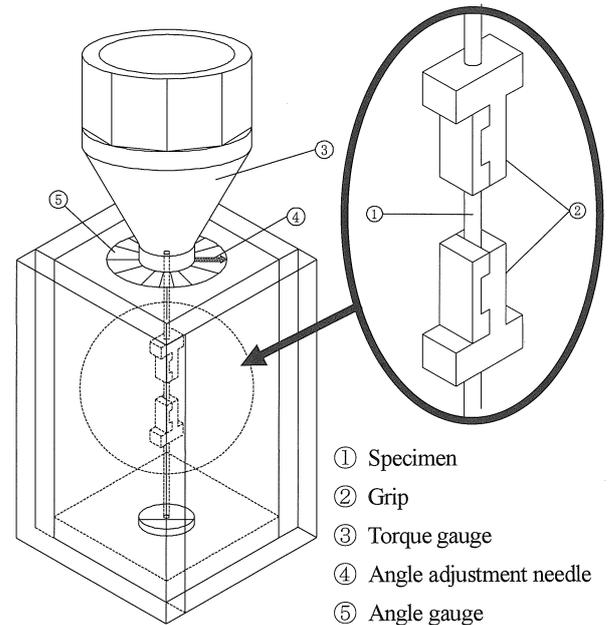


Fig.1 Experimental apparatus for torsion test

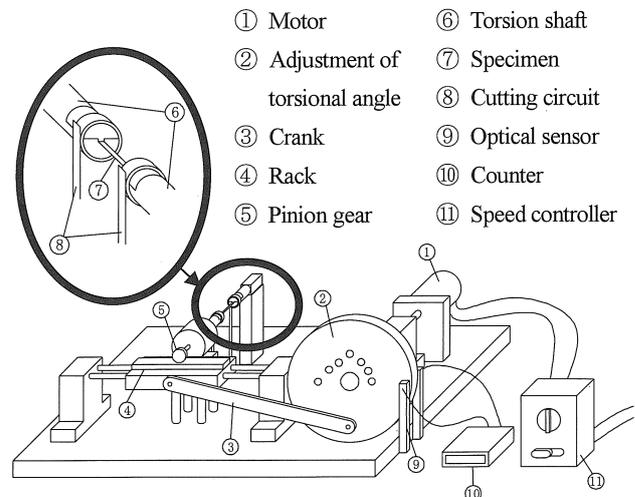


Fig.2 Experimental apparatus for torsional fatigue test

は $T=333, 343, 353$ K とした。試験雰囲気は、負荷過程については空気中であり、加熱過程については水中であった。回復トルクを測定する比ねじれ角は $\theta=2250, 3000, 3750, 4500$ $^{\circ}/m$ (全ねじれ角 $\phi=90, 120, 150, 180$ $^{\circ}$) とした。

(3) **ねじり疲労試験** 実験手順として、まずねじれ角調整板により、ねじれ角を調整する。試験片をつかみ具に取り付け、所定の比ねじれ角を振幅として繰返しねじりを与え、破断繰返し数を測定する。試験温度は $T=RT$ 、試験雰囲気は空気中であった。繰返し速度は 450 cpm で、比ねじれ角振幅 θ_a は $2000\sim 3750$ $^{\circ}/m$ (全ねじれ角振幅 $\phi_a=80\sim 150$ $^{\circ}$) とした。なお、両振りのねじり疲労試験であるので、ねじれ角比は $R_{\theta}=\theta_{min}/\theta_{max}=1$ である。疲労限度を求める為に最大の繰返し数は 10^6 回以上とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 引っ張り変形特性

熱処理材の各試験温度 T での引張試験結果を Fig.3 に示す。Fig.3 の S_M, F_M, S_A, F_A はそれぞれ変態応力を求めるための M 変態の開始点及び終了点と、逆変態の開始点及び終了点を示す。

Fig.3 において負荷過程では、353 K 及び 363 K ではひずみ 1 % 付近でオーバーシュートが現れる。この点で M 変態が開始する。その後、M 変態に伴う上部応力水平段が現れる。除荷過程では、ひずみ 6 % 付近で逆変態が開始する。その後、逆変態に伴う下部応力水平段が現れ、ひずみ 0.8 % から 1.7 % の間で逆変態が終了する。333 K では除荷後に 4.5 % の残留ひずみが見られる。この残留ひずみは無負荷の下での加熱で消滅し、SME が確認される。

各温度の応力-ひずみ曲線の比較からわかるように、温度上

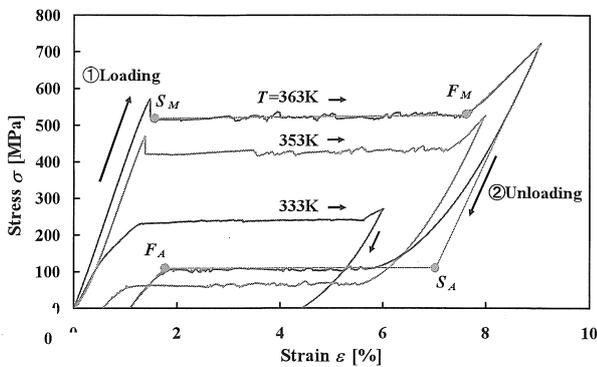
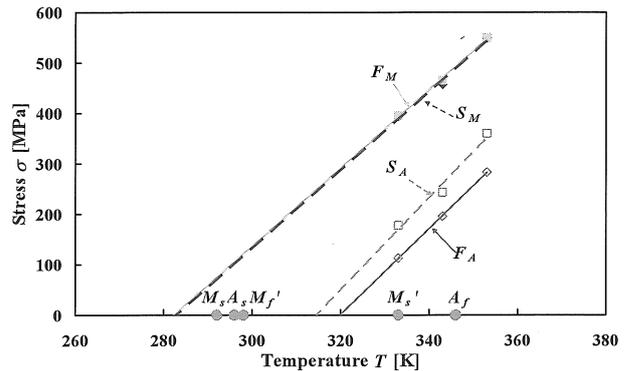


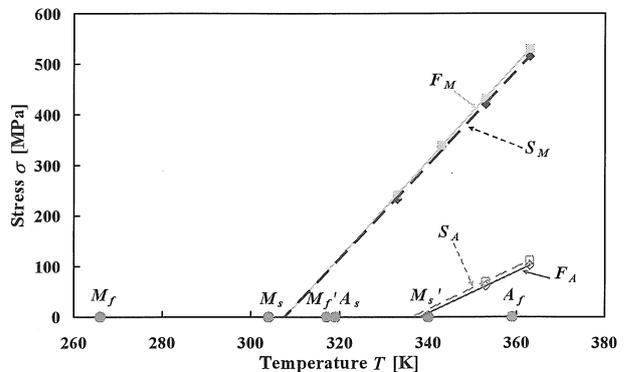
Fig.3 Stress-strain curves of heat-treated material

昇につれて、相変態に伴う上部および下部水平段の応力レベルは上昇する。また、M 変態が終了するひずみは温度に比例して増加する。

引張試験結果に基づく変態応力から求めた変態線と DSC 試験により求めた変態点の試験結果を Fig.4 に示す。Fig.4 において、同じ温度における M 変態及び逆変態の応力は熱処理材のほうが低い。これは薄帯板を成形するときに導入された高密度の転位が熱処理によって緩和され、応力誘起 M 変態が容易に生じることによると考えられる。また、引張試験結果から求めた変態線による無応力下での変態温度(横軸との切片)と DSC 試験により求めた変態点が大きく異なる。これは次の理由により生じる。引張試験では、引張応力により生じる 45 $^{\circ}$ 方向の最大せん断応力に伴うバリエーションが優先的に生成し、その方向の応力誘起 M 変態が生じる。これに対し、DSC 試験では 24 通りのバリエーションが生成し、無応力下での加熱・冷却に伴い等方的に多方向のバリエーションが生成する温度誘起 M 変態が生じる。このため両試験で求めた変態点に差異が生じていると推察される。



(a) As-received material



(b) Heat-treated material

Fig.4 Transformation lines obtained by tension test and transformation temperatures obtained by DSC test

3.2 ねじりにおける変形状態

ねじり試験の負荷形態について、ねじり方法や固定方法などの条件によって負荷形態が変化する。本研究の条件は、片側ねじり、軸方向には両端固定とした。Fig.5 にねじり負荷を受ける変形状態の写真を示す。写真は左側を固定部、右側を主運動部とした。

Fig.5 から分かるように、SMA 薄帯板にねじり負荷を与えていくと、比ねじれ角 $\theta=2250\text{ }^\circ/\text{m}$ (全ねじれ角 $\phi=90\text{ }^\circ$) で上下側面が反転した交差部分が主運動側に現れる。さらに負荷を与えていくと、交差部分は主運動側から進展していき、比ねじれ角 $\theta=4500\text{ }^\circ/\text{m}$ ($\phi=180\text{ }^\circ$) で試験片の中心位置に到達する。無負荷と比ねじれ角 $\theta=4500\text{ }^\circ/\text{m}$ ($\phi=180\text{ }^\circ$) を比べると、軸方向に関して両側固定であるために、ねじることにより薄帯板の両側縁には伸びが生じ、引張り応力が作用する。すなわち、単純せん断状態ではなくなる。

3.3 トルク-ねじれ角関係

熱処理材のねじり試験結果を Fig.6 に示す。

Fig.6(a)のトルク-ねじれ角関係において、比ねじれ角 θ の増加に伴いトルク M も増加する。また室温では SME を示すため、除荷後に大きな比ねじれ角が残留する。 $T=333\text{ K}$ では、通常の SE より、除荷後の比ねじれ角が大きく残留する。これは、試験温度 T が $A_s < T < A_f$ であり、逆変態が完全に終了しない部分超弾性のため、比ねじれ角が通常の SE より大きく

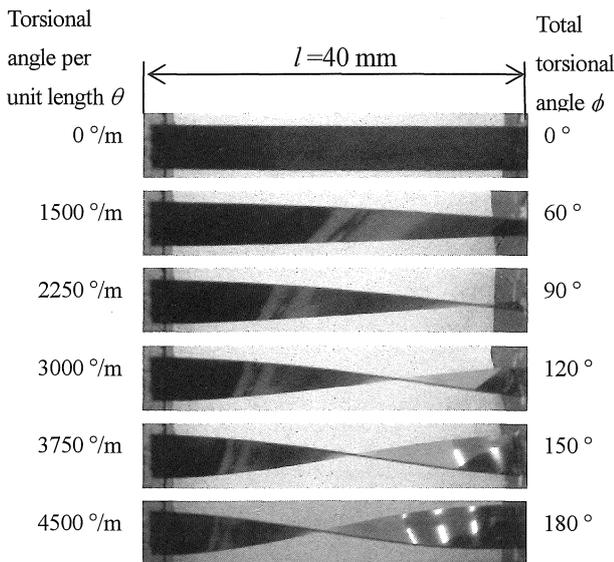


Fig.5 Photograph of twisted SMA thin strip at each torsional angle

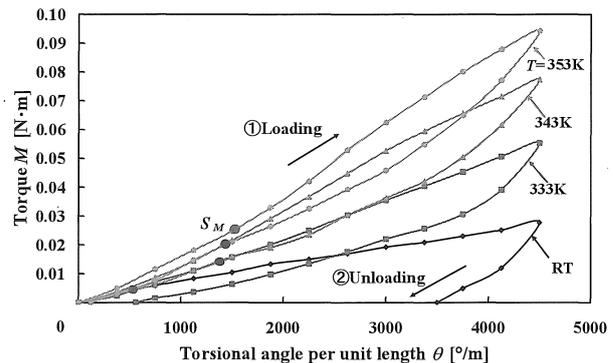
残留する。 $T=343\text{ K}$ 以上では、除荷後の比ねじれ角はほぼ回復し、残留しない。

Fig.6(b)のトルク-温度関係においても、比ねじれ角 θ が増加する程、温度上昇に伴うトルクの増加する割合が大きくなる傾向にある。また $T > A_s$ では同じ比ねじれ角において、温度 T とトルク M は比例関係にある。この関係は次式で表される。

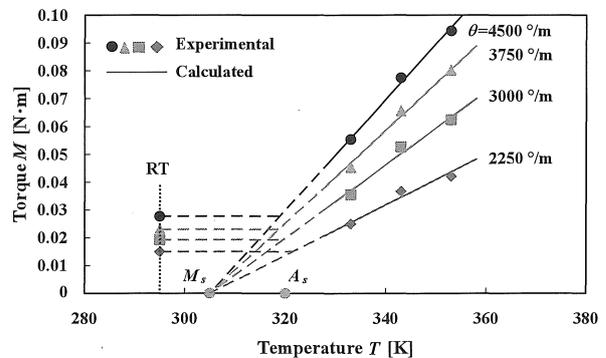
$$M = a(T - M_s) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M_s は無応力下でのマルテンサイト変態の開始温度を表す。Fig.4(b)のマルテンサイト開始点から $M_s=305\text{ K}$ である。

トルク-比ねじれ角曲線では、除荷過程の下の面積は単位長さ当たりの蓄えられるひずみエネルギーを表す。温度上昇に伴い、除荷過程のトルクのレベルが上昇し、このために蓄えられるひずみエネルギーも大幅に増加する。したがって、トーションバーと同様なひずみエネルギー貯蔵性能は超弾性域の高温で高い。さらに、負荷過程と除荷過程のトルク-ねじれ角曲線で囲まれた面積は、非回復の特性を表す散逸仕事となる。散逸仕事量は、温度上昇を伴っても余り変化せず、SME と SE の温度域で特性が異なる。



(a) Relationship between torque and torsional angle per unit length



(b) Relationship between torque and temperature

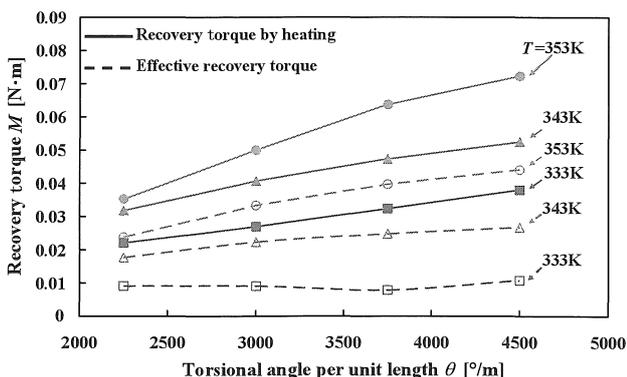
Fig.6 Results of torsional test for heat-treated material

ミーゼスの降伏理論による M 変態開始点の推算について、引張試験結果の M 変態開始応力の値から、ミーゼス降伏理論を用いてねじりの変態応力を求め、薄帯板に関する弾性論の関係式から M 変態開始トルクを算出し、ねじり試験から得られたトルクと一致した点を M 変態開始点 S_M とし、Fig.6(a)に丸印で示した。Fig.6(a)からわかるように、M 変態開始後にトルクの上昇割合が増加する。

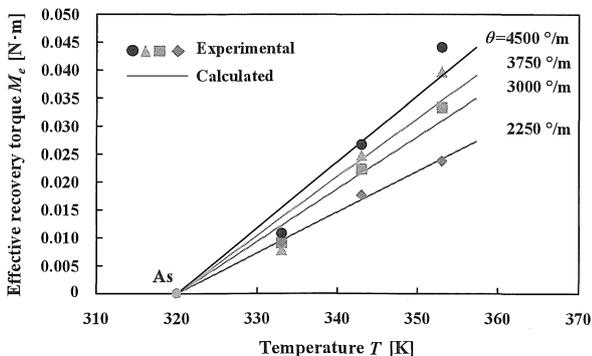
3. 4 回復トルク特性

熱処理材の回復トルク試験で得られた実験結果を Fig.7 に示す。Fig.7 に示す回復トルクは各温度において発生したトルクであり、有効回復トルクは各温度で発生したトルクと室温で同じねじれ角を与えたときのトルクとの差である。

Fig.7 において、比ねじれ角が大きくなるのに伴い取り出せる回復トルクは上昇する。また、同じ比ねじれ角 θ において、温度上昇に伴い取り出せる回復トルクも上昇する。Fig.7(b)に示した有効回復トルク M_e は温度 T に比例して増加する。この関係は次式で近似される。



(a) Relationship between recovery torque and torsional angle per unit length



(b) Relationship between effective recovery torque and temperature

Fig.7 Recovery torque for heat-treated material

$$M_e = b(T - A_s) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 A_s は無応力下での逆変態の開始温度を表す。Fig.4(b)の逆変態開始点から、 $A_s=320$ K がある。

3. 5 ねじり疲労特性

ねじり疲労試験で得られた納入材と熱処理材の疲労寿命曲線を Fig.8 に示す。疲労寿命曲線は比ねじれ角振幅 θ_a と破断繰返し数 N_f の関係を両対数グラフで表している。

Fig.8 からわかるように、比ねじれ角振幅 θ_a が増加するほど破断繰返し数 N_f は減少する。この関係は両対数グラフで表すと直線で近似される。したがって、疲労寿命曲線は Manson-Coffin 則と類似な次式で表される。

$$\theta_a \cdot N_f^\beta = \alpha \dots \dots \dots (3)$$

納入材と熱処理材の疲労寿命を比較すると、熱処理材の方が、同じ比ねじれ角振幅 θ_a を与えた際の破断繰返し数 N_f が多く、疲労寿命が長い。低サイクル疲労域において熱処理材の方が疲労寿命が長くなった理由としては、熱処理を施したことにより、薄帯材の成形時に発生した高密度の転位による M 変態応力が緩和され、同じねじれ角振幅を与える際に発生する応力が減少し、疲労損傷が小さくなったためであると推察される。疲労寿命曲線が水平になる疲労限度の比ねじれ角は $\theta=2200$ °/m である。この疲労限度の比ねじれ角に関しては、納入材と熱処理材であまり差がない。

3. 6 ドア開閉モデルの動作確認

SMA 薄帯板を利用したドア開閉モデルの加熱による動作確認の写真を Fig.9 に示す。Fig.9 から分かるように、低温で与えたドアの回転角 $\phi=90^\circ$ が加熱によって $\phi=0^\circ$ になる。この

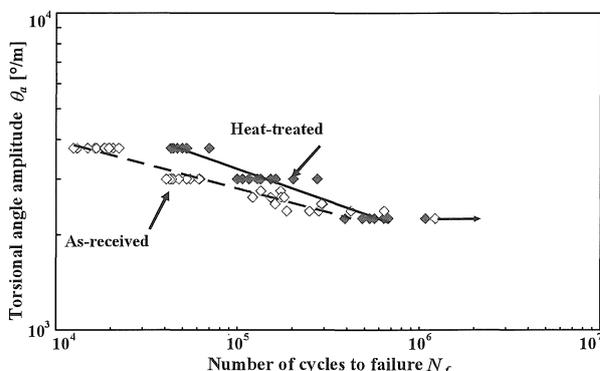


Fig.8 Fatigue life curves of SMA thin strip for torsion

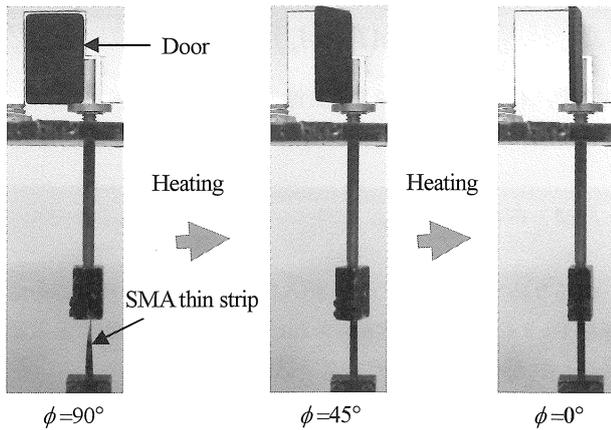


Fig.9 Rotary movement of a door driven by SMA thin strip during heating

ように SMA 薄帯板を用いれば小型で単純な機構の回転駆動素子が開発できる。なお、このモデルでは一方向にしか動作しないが、バイアス素子と組み合わせることにより二方向性を示す駆動素子として応用が可能である。このためには、バイアス素子と組み合わせた場合の機械的特性を調査・検討する必要がある。

4. 結言

本研究では、TiNi SMA 薄帯板素子の回転駆動特性を明らかにすることを目的とし、SMA 薄帯板のトルクとねじれ角の関係、回復トルクの温度依存特性、ねじり疲労特性を調査・検討した。以下に本研究より得られた結果を示す。

- (1) ねじり試験により、比ねじれ角の増加に伴いトルクは増加し、同じ比ねじれ角において温度上昇に伴いトルクは増加すること、 $T > A_s$ では同じ比ねじれ角において、温度とトルクは比例関係にあること、比ねじれ角が増加する程、温度上昇に伴うトルクの増加割合は大きく

なること、ミーゼス降伏理論から M 変態開始点を推算した結果、熱処理材では M 変態開始点後にトルクの上昇割合は増加することを確認した。

- (2) 回復トルク試験により、比ねじれ角が増加すると、回復トルクが増加し、同じ比ねじれ角において温度上昇に伴い回復トルクも増加すること、 $T > A_s$ では同じ比ねじれ角において温度と回復トルクは比例関係にあること、比ねじり角が増加する程、温度上昇に伴う回復トルクの増加割合は大きくなることを確認した。
- (3) ねじり疲労試験により、比ねじれ角振幅が増加するほど破断繰返し数は減少すること、低サイクル疲労域においては同じ比ねじれ角振幅では熱処理材の方が納入材より破断繰返し数は増加すること、熱処理を施すことによる疲労限度に対する影響には明瞭な効果が現れないことを確認した。
- (4) ドア開閉モデルの動作確認により、SMA 薄帯板を用いれば小型で単純な機構の回転駆動素子が開発できることを示した。

参考文献

- 1) 船久保熙康編, 形状記憶合金, 産業図書 (1984).
- 2) 田中・戸伏・宮崎, 形状記憶合金の機械的性質, 養賢堂 (1993).
- 3) 戸伏・田中・堀川・松本, 形状記憶材料とその応用, コロナ社 (2004).
- 4) 宮崎・佐久間・渋谷, 形状記憶合金の応用展開, シーエムシー出版 (2006).
- 5) Mabe, J. H., Ruggeri, R. T., Rosenzweig, E. and Yu, C. J., NiTiNol performance characterization and rotary actuator design, *Smart Struct. Mater. 2004, Proc. SPIE*, **5388**, 95-109, (2004).