TiNi 形状記憶合金線材の応力誘起マルテンサイト変態による
変形特性*戸伏 寿昭^{*1}, 高田 和 幸^{*2}, 奥村 佳代^{*3}Deformation Behavior Due to Stress-Induced Martensitic Transformation
in TiNi Shape-Memory Alloy WiresHisaaki TOBUSHI^{*4}, Kazuyuki TAKATA and Kayo OKUMURA^{*4} Aichi Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
1247 Yachigusa, Yagusa-cho, Toyota-shi, Aichi, 470-0392 Japan

The behavior of the interface between a parent phase and a martensitic phase and the lateral to longitudinal strain ratio due to the stress-induced martensitic transformation (SIMT) were investigated in the both regions of superelasticity (SE) and shape memory effect (SME) in TiNi shape-memory alloy wires through the tensile test. The interface which appears due to SIMT during the loading process and its reverse transformation during unloading starts at both ends of a wire in the gripping parts and thereafter propagates towards the central part. When the two interfaces meet, SIMT completes. The behavior of SIMT under cyclic SE deformation does not change during cycling. The behavior of SIMT in the region of SE is similar to that in the region of SME. The lateral to longitudinal strain ratio due to SIMT and its reverse transformation is 0.43~0.46. Poisson's ratio in a parent phase, a rhombohedral phase and a martensitic phase is 0.33~0.34.

Key Words: Shape Memory Alloy, Titanium-Nickel Alloy, Stress-Induced Martensitic Transformation, Poisson's Ratio, Superelasticity, Shape Memory Effect, Interface

1. 緒 言

形状記憶合金 (shape memory alloy, 以下 SMA) では約 6% のひずみが増熱により回復する形状記憶効果 (shape memory effect, 以下 SME) と除荷より回復する超弾性 (superelasticity, 以下 SE) が現れる^{(1)~(4)}。いずれの場合にも負荷過程において応力誘起マルテンサイト変態 (stress-induced martensitic transformation, 以下 SIMT) によりひずみが生じ、加熱または除荷で生じる逆変態によりひずみは消滅する。

SIMT においては応力の作用で生じたマルテンサイト (martensite, 以下 M) 相と母相の界面が移動することが観察されている^{(5)~(8)}。SMA 素子を合理的に設計するためには、SMA の変形特性を表す構成モデルが必要である。SMA の構成モデルをつくるためには、上述の界面の挙動を正しく把握しておくことが不可欠である。また、SMA に生じる回復応力をロボットやアクチュエータの駆動素子として応用する場合には、駆動素子は繰返し作動する

ので、SMA の繰返し変形特性は特に重要である⁽⁹⁾。

SMA の中で TiNi SMA は疲労寿命が長く、耐食性に優れているので最も多く実用されている。また応答速度を向上させるために、薄膜や細線が用いられている。SMA はインテリジェント材料としての応用が注目されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。この場合、SMA は単体として、あるいは他の材料と組合せて使用される。SMA の機能をより有効に利用するために複合材料への応用も注目されている⁽¹²⁾。複合材料として応用する場合には母材と繊維の界面の適合性が重要であり、SIMT により生じるひずみは大きいので縦ひずみに対する横ひずみの大きさが重要になる。このような目的から前報⁽¹³⁾においては TiNi SMA 線材について SME が現れる領域で SIMT による M 相と母相の界面の挙動および縦ひずみに対応する横ひずみの大きさを調べた。

本研究においては、TiNi SMA の線材についての単軸引張試験を行い、試験片の全伸びひずみ、局所伸びひずみおよび局所横ひずみの変化を調べた。実験結果に基づき、SIMT に伴う M 相と母相の界面が進展および縮退すること、およびこの界面の移動に伴い局所的な縦横ひずみ比が変化し、その値は 0.43~0.46 になることを明らかにした。

* 原稿受付 2000 年 10 月 19 日。

^{*1} 正員、愛知工業大学工学部(☎ 470-0392 豊田市八草町八千草 1247)。^{*2} 准員、(株)エラストミックス(☎ 104 0033 東京都中央区新川 1-17-25)。^{*3} 学生員、愛知工業大学大学院。

E-mail: tobushi@me.aitech.ac.jp

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材は2種類あり、いずれも直径0.75mmのTiNi SMA線材であった。試験片の逆変態終了温度 A_f は約273Kと323Kであった。実験は室温で行ったので、SE試験には $A_f=273K$ の試験片を用い、SME試験には $A_f=323K$ の試験片を用いた。

2.2 実験装置 引張試験にはSMA特性試験装置⁽¹⁴⁾を用いた。試験片と試験部の状態を図1に示す。図1に示すように試験片に $l=20\text{mm}$ 間隔で11本の標線を設け、10等分した標線間を上から順に①～⑩と定めた。直径は①～⑩の標線間でマイクロメータにより測定した。標線間距離は、試験片をデジタルカメラで撮影し、パソコンのディスプレイ上で拡大して計った。全伸びは試験機のクロスヘッドの変位により測定した。

2.3 実験手順 試験温度は室温とし、超弾性挙動を調べるSE試験と形状記憶効果の現れる領域での挙動を調べるSME試験の2種類の実験を行った。負荷・除荷における全伸びひずみ速度は0.5%/minとした。所定の全伸びでクロスヘッドを停止し、①～⑩の標線間距離と直径を測定した。最大ひずみはSE試験では7%、SME試験では10%とした。SE試験では除荷後に再負荷し、繰返し変形の効果を調べた。

Fig. 1 Set up of testing part

3. 実験結果および考察

実験結果の処理において、応力およびひずみはそれぞれ公称応力および公称ひずみで整理した。実験結果を示す図中の記号①～⑩は図1で示した標線間位置①～⑩を表す。

3.1 超弾性変形におけるSIMT挙動

3.1.1 応力-ひずみ曲線 SE試験で得られた応力-ひずみ曲線を図2に示す。横軸のひずみは全軸ひずみ $\Delta L/L$ を表す。全軸ひずみはチャック間距離 L に対応するクロスヘッドの変位量 ΔL の割合を表す。図2からわかるように、負荷・除荷で大きなヒステリシスループを描く。負荷過程においてひずみ1.5%の点 M_S でSIMTが開始し、ひずみ6.3%の点 M_F でSIMTは終了する。除荷過程においては点 A_S で逆変態が開始し、点 A_F で終了する。ヒステリシスループの囲む面積と除荷曲線の下面積は、それぞれ単位体積当りの散逸仕事 W_D と回復可能なひずみエネルギー E_r を表す⁽¹⁵⁾。図2からわかるように負荷でのSIMT応力と除荷での逆変態応力の差は約300MPaである。常用金属の弾性変形に比べて W_D と E_r の値は非常に大きい。したがって、TiNi SMAのSE変形はエネルギーの吸収および貯蔵の両方の機能に優れていることがわかる。以下の節においては、SIMTの進展過程およびそれに伴う縦横ひずみ比の変化を検討する。

3.1.2 局所軸ひずみと全軸ひずみの関係 SE試験によって得られた局所軸ひずみ $\Delta l/l$ と累積全軸ひずみ $\Sigma \Delta L/L$ との関係を図3に示す。ここで局所軸ひずみは図1で示した①～⑩の標線距離 l に対する変化量 Δl の割合を示す。累積全軸ひずみ $\Sigma \Delta L/L$ は負荷と除荷における全軸ひずみの変化量の絶対値の総和を表している。図3には同時に応力-ひずみ曲線を実線で描いてある。応力-ひずみ曲線の除荷曲線は、図2で示した除荷曲線を最大ひずみ7%の位置に関して対称に折り返している。図3からわかるように、全軸ひずみ $\Sigma \Delta L/L = 1.5\%$ において試験片の一端①の位置で局所軸ひずみ $\Delta l/l$ の著しい変化が起こり、 $\Sigma \Delta L/L = 2.0\%$ において他端⑩の位置で $\Delta l/l$ は約4.5%

Fig. 2 Stress-strain curve in the SE test

増加する。その後、 $\Delta l/l$ の変化は試験片の両端の位置から順次中心へと移っていく。 $\Sigma \Delta L/L = 6.0\%$ において中心部⑤の位置で $\Delta l/l$ は急増する。⑤の位置で $\Delta l/l$ が急増した後、 $\Sigma \Delta L/L = 6.3\%$ で応力水平段は終了し、M相の弾性域に入り応力-ひずみ曲線は立ってくる。 $\Delta l/l$ の変化の量は①～⑩の位置ともほぼ同じ大きさである。除荷過程では逆変態の始まる $\Sigma \Delta L/L = 9\%$ 付近において試験片の両端①の位置と⑩の位置で $\Delta l/l$ は約4%減少する。負荷時と同様に順番に変化が進む。逆変態の終了点 $\Sigma \Delta L/L = 12.5\%$ において⑧の位置で $\Delta l/l$ が減少する。

3・1・3 局所横ひずみと全軸ひずみの関係 SE試験によって得られた局所横ひずみ $-\Delta d/d$ と累積全軸ひずみ $\Sigma \Delta L/L$ との関係を図4に示す。図4には応力-ひずみ曲線を実線で同時に描いてある。

図4からわかるように、 $\Sigma \Delta L/L = 2\%$ で試験片の両端部①と⑩の位置から $-\Delta d/d$ が約2%急に増加する。著しい変化を起こす位置は順番に試験片の中心へと移っていく。いずれの位置でも $-\Delta d/d$ は同じ増加割合を示す。SIMTの終了点 M_F である $\Sigma \Delta L/L = 6.3\%$ で試験片の中央部⑤の位置で $-\Delta d/d$ の変化は終了し、M相の弾性域に入る。 $-\Delta d/d$ の値は各標線間位置に関して急激に増加した後、点 M_F に達するまで一定値を保ったまま変化しない。除荷過程では逆変態の始まる $\Sigma \Delta L/L = 9\%$ 付近で試験片の一端①の位置において $-\Delta d/d$ が約2%減少する。そして $\Sigma \Delta L/L = 10\%$ で他端⑩の位置において $-\Delta d/d$ は減少する。 $-\Delta d/d$ の変化は順番に続く。逆変態の終了点 A_F である $\Sigma \Delta L/L = 12.5\%$ において⑧の位置で $-\Delta d/d$ は減少する。

3・1・4 M変態および逆変態の進展過程 図2～4で観察されたように、SIMTによる局所軸ひずみ $\Delta l/l$ および局所横ひずみ $-\Delta d/d$ は負荷過程においては階段状に増加し、除荷過程においては減少する。このような両者の階段状の変化は試験片の端で発生し、順次中央部に進展していく。本節では両者の挙動に基づき、SIMTにより母相（オーステナイト相、A相）から生成されたM相と母相の界面の移動を検討し、SIMTの進展過程を考察する。図5は負荷および除荷過程においてSIMTと逆変態により $\Delta l/l$ と $-\Delta d/d$ の階段状の変化の生じた標線間の位置と累積全軸ひずみ $\Sigma \Delta L/L$ との関係を表している。局所軸ひずみにより観察された関係を○、局所横ひずみによる関係を●で示している。

図5からわかるように、 $\Delta l/l$ および $-\Delta d/d$ の階段状の変化は共に試験片の両端①および⑩で発生し、順番に試験片の中央部に進展する。TiNi SMA線材のSE引張試験において伸び計を用いる場合にはSIMTの開始点 M_S においてオーバーシュートが現れ、その後ピーク応力より低い応力の水平段でSIMTは進展する⁽¹⁶⁾。これに対して、伸び計を用いず、クロスヘッドの変位で制御する場合に

は、チャック部で若干のすべりが生じるために開始点 M_S においてオーバーシュートは現れず、除荷後に大きな残留ひずみが現れる⁽¹⁷⁾。これらのことから、SIMTの開始点 M_S においてはM相の核を形成するためには、M相と母相の界面が移動するのに要するよりも大きな応力が必要であることがわかる。このことは軟鋼の降伏応力現象と同じである。すなわち、降伏は上降伏点で開始し、降伏段においてリュースダース帯は伝播する。一様な断面形状の線材を引張る場合、チャック部において応力集中が生じ、

Fig.3 Relationship between local axial strain and accumulated total axial strain in the SE test

Fig.4 Relationship between local lateral strain and accumulated total axial strain in the SE test

Fig. 5 Relationship between gauge position where $\Delta l/l$ and $-\Delta d/d$ increased or decreased stepwise and accumulated total axial strain in the SE test

応力が高くなる。したがって、M 相の核はチャック部で形成される。その後これが進展するものと考えられる。このために両端の①と⑩の位置から $\Delta l/l$ および $-\Delta d/d$ の急変は現れ、順番に伝播する。また、ほぼ同じ伸びで $\Delta l/l$ の変化と $-\Delta d/d$ の変化は生じている。このように界面が両端から進展して中央部で合体して、SIMT は終了する。

また、逆変態においても同様に①と⑩から母相の核形成が始まり、中央部へと界面が進展していく。応力集中が起こるチャック部では応力は断面に一樣に分布せず、線材の中心部は平均の応力よりも低くなる。このため除荷過程においてチャック部の中心部分では平均応力に比べて応力が低く、この部分で母相の核が形成されると考えられる。このことは、伸び計を用いた引張試験の負荷過程において点 M_S でオーバーシュートが現れるのと同様に、除荷過程の逆変態開始点 A_S でアンダーシュートが現れる⁽¹⁶⁾ ことに対応している。

次に、上述の SIMT の挙動を図 6 に模式的に示す。図 6 では、SMA 線材を上下方向に引張った SE 試験において生成相（マルテンサイト相、M）と母相（オーステナイト相、A）の変化および伸びと直径の変化を示している。負荷の初期においては SIMT の開始点 M_S までは母相の弾性変形である。点 M_S を越えると両端から SIMT により生成された M 相が現れ、SIMT の生じた部分は大きく伸び、直径は減少する。SIMT の終了点 M_F を越えると M 相の弾性変形になる。除荷過程において逆変態の開始点 A_S を越えると両端から母相が現れ、この部分は大きく縮み、直径は増加する。逆変態の終了点 A_F を越えると母相の弾性変形になる。このような引張変形において SIMT により生成される M 相と母相の界面の移動は、軟鋼での降伏段におけるリュウダース帯の挙動、Cu 系 SMA 単結晶での光学顕微鏡による観察結果⁽⁵⁾ および TiNi SMA の局所伸びと温度変化による観察結果⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾ と類似している。SMA の構成式を考える場合に上述の界面の挙動は重要であり、そ

の挙動を反映させる必要がある。図 5 の関係はほぼ直線で表されるので、SIMT の進展が M 相の体積分率で規定される場合には⁽¹⁸⁾、M 相の体積分率は変態ひずみに比例する。尚、SMA の多軸応力下での界面は非常に複雑であり⁽¹⁹⁾⁻⁽²¹⁾、今後の研究の発展が期待されている。

3.1.5 再負荷での SIMT 挙動 図 2 の応力-ひずみ曲線で示した SE の引張試験の除荷後に再負荷を行った。再負荷試験により得られた局所軸ひずみ $\Delta l/l$ と累積ひずみ $\Sigma \Delta l/l$ との関係を図 7 に、局所横ひずみ $-\Delta d/d$ と累積ひずみ $\Sigma \Delta l/l$ との関係を図 8 に示す。両図には負荷・除

Fig.7 Relationship between local axial strain and accumulated total axial strain at the second cycle in the cyclic SE test

Fig.8 Relationship between local lateral strain and accumulated total axial strain at the second cycle in the cyclic SE test

Fig. 6 Deformation pattern due to SIMT during loading and unloading in the SE test, A: austenitic phase, M: martensitic phase

Fig.9 Relationship between gauge position where $\Delta l/l$ and $-\Delta d/d$ increased or decreased stepwise and accumulated total axial strain at the second cycle in the cyclic SE test

荷により得られた応力-ひずみ曲線を実線で示す。両図からわかるように、負荷過程および除荷過程の両方において $\Delta l/l$ および $-\Delta d/d$ の大きな変化は試験片の両端①および⑩から始まり、中央部に順番に移動して終了する。これらの挙動は図 3 および図 4 で観察された最初の負荷・除荷による挙動と同様の傾向を示す。

$\Delta l/l$ および $-\Delta d/d$ が急変した標線間の位置と累積全軸ひずみ $\Sigma \Delta L/L$ との関係を図 9 に示す。図 9 において、 $\Delta l/l$ についての関係を○で、 $-\Delta d/d$ の関係を●で示す。図からわかるように、母相と M 相との界面は負荷および除荷の両過程において試験片の両端から開始し、中央部へ進展する。両端から進展する 2 つの界面が合体して SIMT およびその逆変態は終了する。

最初の負荷による SIMT 挙動と再負荷による SIMT 挙動はほぼ同様の傾向を示す。したがって、SE の繰返し変形を受ける場合、最初の SIMT 挙動がわかれば後続の挙動は推定できるものと考えられる。

3.2 形状記憶効果の現れる領域での SIMT 挙動

3.2.1 応力-ひずみ曲線 SME 試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 10 に示す。横軸のひずみは全軸ひずみ $\Delta L/L$ を表す。SME 試験に用いた試験片は負荷・除荷を行った室温では菱面体晶 (rhombohedral phase, 以下 R 相) である⁽²²⁾。この状態で引張ると R 相兄弟晶は軸力に対して優先方位となる兄弟晶へ再配列し、伸びが生じる。この伸びは負荷過程の初期に現れる。図 10 において RP で示すように 60MPa の降伏応力の下で生じている 1% のひずみがこの再配列によるものである。その後、点 M_S で SIMT が開始し、250MPa の応力で伸びが生じ、6.5% の全軸ひずみで SIMT は終了する (点 M_F)。点 M_F を越えると M 相の弾性変形が生じ、このために応力-ひずみ曲線の傾きは大きくなる。除荷後には 7.5% のひずみが残留する。この残留ひずみは無応力下で加熱すると消滅する。この現象が SME である。

3.2.2 局所軸ひずみと全軸ひずみの関係 SME 試験によって得られた局所軸ひずみ $\Delta l/l$ と累積全縦ひずみ $\Sigma \Delta L/L$ との関係を図 11 に示す。 $\Sigma \Delta L/L$ が 0 から 10% ま

Fig. 10 Stress-strain curve in the SME test

では負荷過程であり、10%以降は除荷過程である。図 11 には応力-ひずみ曲線を実線で表してある。 $\Delta l/l$ は試験片の標線位置①~⑩におけるそれぞれの標点距離の変化量の割合を示している。SIMT の進展に伴い $\Sigma \Delta L/L=2\%$ で一端の①の位置から $\Delta l/l$ の大きい変化が現れる。 $\Delta l/l$ の変化は①から順番に試験片の中央部に進展する。その進展過程において他端⑩の位置でも $\Delta l/l$ は変化する。 $\Delta l/l$ の増加量は①~⑩のいずれの位置でも約 5% である。 $\Delta l/l$ は各位置で急増した後、SIMT の終了点 M_F まではほぼ一定値をとる。点 M_F を越えた M 相の弾性域では $\Delta l/l$ はほぼ一様に増加する。除荷過程において $\Delta l/l$ は徐々に減少する。この変化割合は点 M_F から除荷開始点までの増加割合に比較して若干小さい。

3.2.3 局所横ひずみと全軸ひずみの関係 SME 試験によって得られた局所横ひずみ $-\Delta d/d$ と累積全軸ひずみ $\Sigma \Delta L/L$ との関係を図 12 に示す。 $-\Delta d/d$ は試験片の①~⑩のそれぞれの直径の変化割合を示している。実線は応力-ひずみ曲線を表している。

図 12 からわかるように、SIMT の開始点 M_S である $\Sigma \Delta L/L=1.5\%$ までは全ての場所で徐々に $-\Delta d/d$ が増加する。その後、SIMT が進展していく過程で一端①の位置において約 2.5% の $-\Delta d/d$ の増加が急に現れる。他の標線位

Fig. 11 Relationship between local axial strain and accumulated total axial strain in the SME test

Fig. 12 Relationship between local lateral strain and accumulated total axial strain in the SME test

Fig. 13 Relationship between gauge position where $\Delta l/l$ and $-\Delta d/d$ increased stepwise and total axial strain in the SME test

置では $\Sigma \Delta L/L$ が 1.5%を越えると $-\Delta d/d$ はほとんど変化しなくなる。続いて③と⑤の位置で $-\Delta d/d$ は順番に急増加する。いずれの位置においてもその増加量はほぼ同じである。SIMT の進展途中である $\Sigma \Delta L/L = 5\%$ で試験片の他端⑩の位置からも $-\Delta d/d$ の変化が起こる。SIMT の進展中は①～⑩のいずれの位置においても $-\Delta d/d$ は一度増加したら SIMT の終了点 M_F までほとんど変化しない。点 M_F を越えた M 相の弾性域にはいると $-\Delta d/d$ は①～⑩の全ての位置において徐々に増加していく。 $\Sigma \Delta L/L$ が 10%を越えた除荷過程では①～⑩のいずれの位置においても $-\Delta d/d$ は減少し、除荷後にひずみは残留する。

3.2.4 SIMT の進展過程 図 13 は SIMT の生じた標線間の位置と全軸ひずみ $\Delta L/L$ との関係を表している。局所軸ひずみにより観察された関係を○、局所横ひずみによる関係を●で示している。

図 13 からわかるように、位置①から SIMT が始まり、中央の方向に SIMT が進展する。 $\Delta L/L = 4\%$ で、位置⑩においても SIMT が生じ、位置⑧で SIMT は終了する。

SIMT は SE 試験の場合と同様に試験片の両端から生じる。これは、試験片のチャック部において応力集中が存在し、その応力集中で生じる高応力の影響によって両端において M 相の核が形成されることによる。さらに変形の進行と共に SIMT により生成される M 相と母相の界面が進展し、両端から進展してきた界面が合体して SIMT は終了する。

3.3 縦横ひずみ比 単軸引張変形における縦ひずみに対する横ひずみの比は、弾性変形の範囲内では一定値をとり、ポアソン比として知られている。ここでは軸ひずみ増分 $\Delta \epsilon$ に対応する横ひずみ増分 $\Delta \epsilon'$ の割合 $\nu = |\Delta \epsilon' / \Delta \epsilon|$ を縦横ひずみ比と定義する。これは弾性変形に関してはポアソン比と一致する。以下に SIMT での ν の値を考察する。

ν の値は各標線での局所軸ひずみの増加に対応する局

所横ひずみの増分の割合の平均値で求めた。まず、SIMT に伴う ν の値を示す。SE 試験において最初の負荷 (図 3 と図 4) と再負荷 (図 7 と図 8) による ν は同じ値を示し、0.43 である。除荷過程の逆変態に伴う ν は 0.46 である。SME 試験の負荷 (図 11 と図 12) による ν は 0.45 である。このように SIMT に伴う ν は体積変化が生じない場合の 0.5 に近い。これは SIMT に伴う変形が双晶のせん断変形により現れることに基づいている。

次に、弾性変形に伴う ν を示す。SE 試験の負荷過程において点 M_S までの母相の弾性変形による ν は 0.34 である。M 相の弾性変形は SE 試験の除荷過程において点 A_S までの区間および SME 試験の除荷過程において現れ、 ν は 0.33 である。R 相の弾性変形、その再配列に伴う変形および再配列した R 相の弾性変形によるひずみはいずれも小さく、高精度で各々の ν を求めることは難しい。このために、SME 試験の負荷過程において点 M_S までのこれらの変形の平均値として求めた ν は 0.34 である。このように SMA の弾性変形に伴う ν は一般の金属のポアソン比に近いことがわかる。

4. 結 言

TiNi SMA 線材の引張試験行い、SE および SME の領域における SIMT に伴う界面の挙動および縦横ひずみ比を検討した。得られた結果の要点は次の通りである。

- (1) SE 変形に関して、負荷での SIMT と除荷での逆変態で現れる母相と M 相の界面は線材の両端のチャック部で発生し、中央部に向かって進展する。2 つの界面が合体して SIMT および逆変態は終了する。
- (2) SE 繰返し変形による SIMT 挙動は繰返して変化せず、ほぼ同じ挙動を示す。
- (3) SE および SME の領域において生じる SIMT 挙動はほぼ同じ特性を示す。
- (4) SIMT とその逆変態に伴う縦横ひずみ比は 0.43～0.46 である。
- (5) 母相、R 相および M 相でのポアソン比は 0.33～0.34 である。

終りに、超弾性の実験を行うに当り SMA 線材は名古屋大学工学研究科の松崎雄嗣教授よりご提供いただいたことを記し、感謝の意を表す。また、文部省科学研究費補助金一般研究(C)の補助を受けたことを記し、謝意を表す。

参考文献

- (1) 舟久保照康, 形状記憶合金, (1984), 産業図書.
- (2) 形状記憶合金用途開発委員会編, 形状記憶合金とその使い方, (1987), 日刊工業.

- (3) 鈴木雄一, 実用形状記憶合金, (1987), 工業調査会.
- (4) 田中喜久昭・戸伏壽昭・宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質, (1993), 養賢堂.
- (5) 文献(1)のページ 35.
- (6) Leo, P. H., Shield, T. W. and Bruno, O. P., *Acta Metall. Mater.*, 41-8 (1993), 2477-2485.
- (7) Shaw, J. A. and Kyriakides, S., *J. Mech. Phys. Solids*, 43-8 (1995), 1243-1281.
- (8) Gadaj, S. P., Nowacki, W. N. and Tobushi, H., *Arch. Mech.*, 51-6 (1999), 649-663.
- (9) Tobushi, H., Iwanaga, H., Tanaka, K., Hori, T. and Sawada, T., *Continuum Mech. Thermodyn.*, 3 (1991), 79-93.
- (10) 日本機学会編, 知的複合材料と知的適応構造物, (1996), 20, 養賢堂.
- (11) 谷順二編, インテリジェント材料・流体システム, (1999), 73, コロナ社.
- (12) 河井昌道・小川久雄・Baburaj, V., 古賀達蔵, *機論*, 64-620, A (1998), 1096-1103.
- (13) 蜂須賀孝・戸伏壽昭・橋本隆弘・占野栄朗, *機論*, 64-628, A (1998), 2970-2974.
- (14) 戸伏壽昭・田中喜久昭・木村君男・堀達哉・沢田隆之, *機論*, 57-543, A (1991), 2753-2759.
- (15) Miyazaki, S., Imai, T. and Otsuka, K., *Metall. Trans. A*, 17A (1986), 115-120.
- (16) 占野栄朗・戸伏壽昭・高田和幸, Gadaj, S. P. and Nowacki, W. K., *機論*, 66-643, A (2000), 496-501.
- (17) 林萍華・戸伏壽昭・田中喜久昭・服部丈晴・機論, 60-576, A (1994), 1837-1842.
- (18) 田中喜久昭・佐藤善雄, *機論*, 53-491, A (1987), 1368-1373.
- (19) 徳田正孝・ペトロ・シットネル, *材料*, 45-5 (1996), 527-536.
- (20) 田中喜久昭, *機誌*, 102-963 (1999), 72-75.
- (21) Raniecki, B., Miyazaki, S., Tanaka, K., Dietrich, L. and LExcellent, C., *Arch. Mech.*, 51-6 (1999), 745-784.
- (22) 林萍華・戸伏壽昭・田中喜久昭・伊貝亮, *機論*, 60-575, A (1994), 1660-1667.