ひずみおよび温度の変動を受ける TiNi 形状記憶合金の変形特性*

伊 貝 亮^{*1}, 戸 伏 壽 昭^{*2}, 山 田 真 也^{*3}
蜂 須 賀 孝^{*3}, 田 中 喜 久 昭^{*4}Deformation Properties of TiNi Shape Memory Alloy
Subjected to Variations in Strain and TemperatureAkira IKAI, Hisaaki TOBUSHI, Shinya YAMADA,
Takashi HACHISUKA and Kikuaki TANAKA

The subloop behavior of TiNi shape memory alloy subjected to variations in strain and temperature was investigated experimentally through various kinds of loading-unloading and heating-cooling processes. The results are summarized as follows. (1) During the thermomechanical cycling, the martensitic transformation (MT) stress decreases but the MT temperature increases with increasing the number of cycles. In the case of variations in strain and temperature during the loading-unloading and heating-cooling processes, if strain is in the MT region, the MT stress and the MT temperature are almost constant not depending on strain. (2) If the material is used after the mechanical training of 20 cycles in practical applications, the MT stress and the MT temperature can be treated as almost constant.

Key Words: Shape Memory Alloy, Titanium-Nickel Alloy, Shape Memory Effect, Pseudoelasticity, Martensitic Transformation, Subloop, Internal Loop

1. 緒 言

形状記憶合金(shape memory alloy, 以下 SMA)では, 温度および応力に依存して形状記憶効果と超弾性(あるいは変態擬弾性)が現れる^{(1)~(3)}. これらの現象はおもにマルテンサイト変態(martensitic transformation, 以下 M 変態)に基づいて現れる. この場合, 約 6%の変態ひずみが加熱あるいは除荷により回復する. このために常用金属では不可能な種々の応用が行われている. SMA の中では, 疲労特性および耐食性の点から TiNi SMA が最も多く実用化されている⁽⁴⁾. TiNi SMA では, M 変態のほかに菱面体晶変態(rhombohedral phase transformation, 以下 R 相変態)が生じる^{(5)~(7)}. R 相変態は 1%以下のひずみ範囲で生じる.

SMA の実用においては温度, ひずみおよび応力は種々に変動する. 材料の変態温度, 変態ひずみおよび変態応力はそれぞれ記憶素子の作動開始と終了の温度, 作動ストロークおよび作動力を規定する. したが

って, 記憶素子の作動特性を明確にするためには, 材料の変態特性の履歴依存性を明らかにする必要がある. すなわち, SMA 素子の信頼性を評価し, 設計する上で材料の応力-ひずみ-温度関係は重要である.

このような視点からひずみあるいは温度が変動する場合の相変態に伴う変形挙動が注目されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾. ひずみあるいは温度が相変態の終了域で変動する場合は完全ループ(perfect loop あるいは full loop)と呼ばれる. 一方, 相変態の進行途中において温度あるいはひずみが変動する場合はサブループ(subloop)あるいは内部ループ(internal loop)と呼ばれる. 例えば, 銅系 SMA の単結晶のサブループ挙動においては, M 変態の開始点と逆変態の開始点を結んだ線上で変態は開始する⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾. また, 鉄系 SMA においては M 変態の開始条件はひずみおよび温度の履歴に依存して変化する^{(12)~(14)}. これに対して, TiNi SMA の超弾性のサブループ挙動においては, 変態応力は M 変態を受けた回数に依存して減少するが, 変動するひずみには依存しない⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾. このように, サブループ挙動を規定する変態特性は材料により異なり, 複雑である.

上述のように SMA のサブループ特性は履歴に依存して変化する. したがって, SMA 素子の実用において, 例えば温度が種々に変動する場合には記憶素子の

* 1995 年 3 月 14 日 日本機械学会東海支部第 44 期総会講演会において講演, 原稿受付 1995 年 9 月 7 日.

^{*1} 准員, リンナイ(株) (☎ 454 名古屋市中川区福住町 2-26).

^{*2} 正員, 愛知工業大学 (☎ 470-03 豊田市八草町八千草 1247).

^{*3} 学生員, 愛知工業大学大学院.

^{*4} 正員, 東京都立科学技術大学 (☎ 191 日野市旭が丘 6-6).

作動特性は複雑に変動することになる。このことは、SMA の変形特性が明確になれば記憶素子の作動特性を制御することが可能であることを意味する。このような視点から明かなように、SMA の応用において SMA のサブループ挙動の把握は重要である。

本研究においては、TiNi SMA に関して温度およびひずみが変動する場合の変形挙動を実験的に調べた。すなわち、超弾性および形状記憶効果に関して、種々の負荷・除荷および加熱・冷却試験を行い、温度およびひずみが変動する場合のサブループ挙動を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材は古河電気工業(株)製の外径 0.75 mm の Ti-55.4 wt.%Ni SMA 線材であった。この線材について形状記憶熱処理として 673 K で 1 時間保持し、その後炉冷により、直線形状を記憶させ、試験片とした。試験片は一樣な直径の線材であった。試験片の A_f 点は約 323 K であった。

2.2 実験装置 実験装置は(株)島津製作所製の SMA 特性試験装置であった⁽¹⁷⁾。この実験装置は引張試験装置と加熱・冷却装置とから構成されていた。試験片の加熱は加熱した圧縮空気を、冷却は液化炭酸ガスを吹付けて行った。この場合、温風および液化炭酸ガスはチャンバ内を対流し、試験片には直接当らなかった。温度は外径 0.1 mm の熱電対を試験片に貼付けて測定した。変位は標点距離 20 mm のひずみゲージ式伸び計で測定した。

2.3 実験方法 応力、ひずみおよび温度が変化する実験として、次の 3 種類の負荷・除荷および加熱・冷却試験を行った。

(1) 一定温度での負荷・除荷試験

本試験においては超弾性の現れる A_f 点以上の一定

温度においてひずみを種々に変動させた。実験としては、次の 3 種類を行った。(i) M 変態および逆変態の完了する完全ループについて、一定の最大ひずみに関して負荷・除荷を繰返した。(ii) 最初に M 変態の終了するひずみまで負荷し、続いてある一定のひずみまで除荷し、その後に再負荷するサブループ試験を行った。(iii) ある一定のサイクル数の力学的トレーニングを完全ループに関して実施した後、ひずみ変動幅が徐々に増加および減少するサブループ試験を行った。

(2) 一定応力下での加熱・冷却試験

最初に、 A_s 点以下の温度で、ある一定のひずみまで引張った。引続き、そのときの応力を一定に保ったまま加熱および冷却のサブループ試験を行った。実験としては、次の 2 種類を行った。(i) 加熱過程においてある一定のひずみまで回復させ、その後に冷却した。(ii) 加熱後の冷却過程においてある一定のひずみに達するまで冷却し、その後に再加熱に続き再冷却した。

(3) 負荷・除荷および加熱・冷却試験

最初に形状記憶効果の現れる A_s 点以下の温度で M 変態終了域のひずみまで負荷し、除荷した。続いて無負荷のもとで加熱し、冷却した。このサーモメカニカル負荷を繰返し与えた。実験としては、次の 2 種類を行った。(i) A_f 点以上の温度まで加熱し、冷却する完全ループを一定の最大ひずみに関して繰返した。(ii) 負荷で与えるひずみを徐々に小さくし、加熱で回復するひずみを徐々に大きくするサブループ試験を行った。

なお、(1)～(3)の試験において、負荷・除荷のひずみ速度は 0.4%/min とし、加熱・冷却速度は約 8 K/min とした。

3. 実験結果および考察

3.1 ひずみ変動を受ける場合の超弾性挙動

3.1.1 完全ループでの繰返し変形特性 試験温度 353 K で最大ひずみ 8% までの負荷・除荷を 20 回繰返した場合の応力-ひずみ曲線を図 1 に示す。図 1 中の N は繰返し数、 M_s および M_f は M 変態の開始点および終了点、 A_s は逆変態の開始点を表す。図 1 の応力-ひずみ曲線から M 変態の完全ループに関する基本的な繰返し変形特性がわかる。すなわち、まず負荷過程において生じる M 変態に伴う降伏応力は降伏段階(点 M_s から点 M_f)ではほぼ一定値をとる。このときの降伏応力 σ_M は繰返し数の増加とともに減少する。また、除荷後に残留する非回復ひずみ ε_p は繰返し数の増加とともに大きくなる。繰返しに伴う σ_M と ε_p の変化割

Fig. 1 Stress-strain curves in the case of cyclic loading and an loading with perfect loop

合は繰返し初期に大きく、 N の増加とともに小さくなる。この現象は繰返し変形により母相と M 相の界面には転位が発生し、その転位の蓄積に基づき ε_p が現れ、また転位に基づく内部応力の作用により σ_M が減少する⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。一方、除荷時の逆変態に伴う降伏応力 σ_A は繰返し数の増加とともに減少するが、その減少量は σ_M の減少量に比べて小さい。

負荷時の M 変態開始点 M_s では、 σ_M より大きな応力が過渡的に現れる。このオーバーシュートは軟鋼の上降伏点およびリュードス帯⁽²⁰⁾ の伝ばと同様に、M 変態の進展に必要な応力 σ_M に比較して、M 相の核生成にはより大きな応力が必要であることを意味している。 M_s 点における応力のオーバーシュート量は、繰返し数の増加とともに小さくなる。一方、除荷時の逆変態開始点 A_s では、 σ_A より小さな応力が過渡的に現れる。 A_s における逆変態応力のアンダシュート量は繰返し数の増加とともに小さくなるが、その減少量は M_s 点におけるオーバーシュートの減少量に比べて小さい。

3・1・2 再負荷でのサブループ挙動 温度 353 K で最大ひずみ $\varepsilon_m=8\%$ を与えた後に、ひずみ ε_u まで部分除荷し、 ε_u の点から ε_m まで再負荷し、その後に完全除荷した場合の応力-ひずみ曲線を図 2 に示す。図 2 中に各試験における ε_u の値を示す。図 2 からわかるように、再負荷での M 変態の降伏応力 σ_M は $N=1$ での σ_M より約 70 MPa 低い。この減少量は図 1 で観察された σ_M の $N=1$ から $N=2$ での減少量とほぼ一致する。いずれの場合についても再負荷での σ_M は ε_u に依存せず、ほぼ一致する。 ε_u が部分除荷で逆変態の進行途中にある場合には、再負荷での M 変態の開始点ではオーバーシュートは現れない。この現象は次の理由により生じる。M 変態および逆変態の降伏域では、軟鋼のリュードス帯と同様に、M 相と母相の界面が移動する⁽²¹⁾。すなわち、逆変態過程では母相の領域が拡大し、M 相の領域が減少する。 ε_u の点では、 ε_u に対応する体積分率の M 相が存在する。したがって、この点から再負荷した場合には新たに M 相の核を生成する必要はなく、オーバーシュートは現れない。一方、完全除荷をした場合には、再負荷での M_s 点においてオーバーシュートが現れる。

3・1・3 力学的トレーニング後のサブループ挙動 温度 353 K で最大ひずみ 8% までの負荷・除荷を 20 回繰返した後(図 1 に示した 20 回の力学的トレーニングを施した後)に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ増加させた場合の応力-ひずみ曲線を図 3(a) に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ減少させた場合の関係を図 3(b) に示す。また、同じ条件で 100 回の力学的トレーニングを施した後に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ増加させた場合の応力-ひずみ曲線を図 4(a) に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ減少させた場合の関係を図 4(b) に示す。図 3 および図 4 において、繰返し数 N は各サイクルにおける最大ひずみの位置に付記した。

3・1・3 力学的トレーニング後のサブループ挙動

温度 353 K で最大ひずみ 8% までの負荷・除荷を 20 回繰返した後(図 1 に示した 20 回の力学的トレーニングを施した後)に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ増加させた場合の応力-ひずみ曲線を図 3(a) に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ減少させた場合の関係を図 3(b) に示す。また、同じ条件で 100 回の力学的トレーニングを施した後に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ増加させた場合の応力-ひずみ曲線を図 4(a) に、ひずみ変動幅を 0.5% ずつ減少させた場合の関係を図 4(b) に示す。図 3 および図 4 において、繰返し数 N は各サイクルにおける最大ひずみの位置に付記した。

図 3 と図 4 の比較から、M 変態の降伏応力 σ_M は 20 回の力学的トレーニングを施した場合より 100 回の場

(a) Increase in width of strain variation

(b) Decrease in width of strain variation

Fig. 2 Stress-strain curves in the case of reloading from strain ε_u

Fig. 3 Stress-strain curves after mechanical training with 20 cycles

合のほうが約 20 MPa 低い、逆変態の降伏応力 σ_A は 20 回の場合と 100 回の場合ではほぼ一致することがわかる。図 3 および図 4 に示したいずれの場合においても、 σ_M は再負荷開始ひずみにほとんど依存せず、ほぼ一定である。同様に、 σ_A も除荷開始ひずみに依存せず、ほぼ一定である。 σ_A について詳細に観察すると、除荷開始ひずみ(最大ひずみ)が M 変態の終了点 M_f を越える場合には、逆変態開始点 A_s でアンダシュートが現れる。アンダシュートの大きさは、100 サイクルの力学的トレーニングを施した場合には小さい。また、除荷開始ひずみが点 M_f より小さく、M 変態域にある場合には、 σ_A はアンダシュートの現れる場合に比べて少し高い。これは、TiNi SMA の超弾性挙動において最大ひずみが点 M_f を越える場合には、最大ひずみの増加に伴いアンダシュートが大きくなり、 σ_A が低くなる現象に対応する⁽¹⁶⁾。

以上のように、ひずみが M 変態域内で変化する超弾性挙動に関して、 σ_M および σ_A は再負荷あるいは除荷開始ひずみに依存せず、ほぼ一定であることから、SMA の実用においては約 20 回の力学的トレーニングを施して使用すれば、超弾性素子の設計において変

態応力 σ_M および σ_A を一定として取り扱うことができる。なお、これらの特性は、銅系 SMA のサブループ挙動が変動ひずみに強く依存する点⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾と異なる。

3.2 一定応力下で温度変動を受ける場合のひずみの挙動

3.2.1 加熱途中で冷却した場合のサブループ挙動

温度 293 K で最大ひずみ $\varepsilon_m = 6\%$ まで負荷し、その後にこの点の応力 σ_m を一定に保持して、ひずみが ε_h になるまで加熱し、その後に冷却した。

この試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 5 (a) に、ひずみ-温度曲線を図 5 (b) に示す。この実験で用いた試験片は 523 K の形状記憶熱処理を施した。このために⁽²²⁾、その他の試験に用いた 473 K の形状記憶熱処理を施した試験片と比較して、M 変態ひずみが少し大きい。

図 5 (a) からわかるように、負荷過程の初期において約 50 MPa の応力で R 相変態に伴う降伏が生じ、その後に M 変態に伴う降伏が約 270 MPa の応力で生じ、約 6% のひずみで M 変態は終了する。M 変態の終了ひずみが最大ひずみ ε_m に近いために、各試験で一定に保った応力 σ_m は 260~300 MPa の範囲にある。

(a) Increase in width of strain variation

(b) Decrease in width of strain variation

Fig. 4 Stress-strain curves after mechanical training with 100 cycles

(a) Stress-strain curves

(b) Strain-temperature curves

Fig. 5 Subloop behaviour in the case of cooling during the heating process under constant stress

図 5(b) のひずみ-温度曲線からわかるように、最初の加熱過程においては約 345 K の温度 T_A で逆変態が生じる。冷却過程においては約 300 K の温度 T_M で M 変態が生じる。約 5 K のバラツキはあるが、 T_M は冷却開始ひずみ ε_h に依存せず、ほぼ一定値をとる。なお、 ε_h が 0.5% の場合には、冷却過程において 330 K の近傍で R 相変態によりひずみが若干増加する。

3・2・2 冷却途中で再加熱した場合のサブループ挙動 温度 293 K で最大ひずみ $\varepsilon_m=6\%$ まで負荷し、その後にこの点の応力 σ_m を一定に保持して、373 K まで加熱し、さらにひずみが ε_c になるまで冷却し、その後に再加熱した。この試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 6(a) に、ひずみ-温度曲線を図 6(b) に示す。

図 6(a) の応力-ひずみ曲線からわかるように、最初の負荷過程において M 変態に伴う降伏段は約 5.3% のひずみで終了する。このために、一定に保った応力 σ_m は点 M_f を超えた応力上昇域にあり、330~360 MPa の範囲にある。

図 6(b) のひずみ-温度曲線からわかるように、最初の加熱過程においては約 360 K の温度でひずみが回復する。この逆変態温度は再加熱の際の逆変態温度

$T_A=353$ K より高い。これは次の理由により生じる。超弾性の負荷・除荷において最大ひずみが M 変態終了後の応力上昇域にあると逆変態応力は最大ひずみに比例して低くなる⁽¹⁶⁾。変態応力と変態温度の関係は応力-温度平面の変態線で規定される⁽²³⁾。変態応力が低下することは変態温度が上昇することに対応する。したがって、6% の最大ひずみは M 変態の終了域にあるので、逆変態温度は高くなる。

次に、冷却過程においては、ひずみは二段階で増加する。すなわち、冷却の初期においては約 335 K の近傍の温度で R 相変態によりひずみが若干増加する。その後に約 305 K の温度で M 変態によりひずみが増加する。ひずみが ε_c まで増加した後に再加熱した場合、約 353 K の温度 T_A で逆変態が生じ、ひずみは減少する。 T_A は ε_c に依存せず、ほぼ一定である。なお、 ε_c が 1% の場合には M 変態が生じないので、再加熱および再冷却においては R 相変態とその逆変態のみが生じる。

一定応力下で加熱・冷却を受ける場合、銅系 SMA のサブループ挙動では点 M_s と点 A_s を結んだ線上で変態が開始する⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。したがって、TiNi SMA のサブループ挙動は銅系 SMA のそれと異なる。

3・3 ひずみおよび温度変動を受ける場合の形状記憶特性

3・3・1 完全ループでの繰返し変形挙動 負荷・除荷および加熱・冷却の繰返し試験で得られた応力-ひずみ-温度関係を図 7 に示す。実験では、温度 303 K で最大ひずみ 8% まで負荷し、その後に除荷し、引続き無負荷のもとで 373 K まで加熱し、その後に冷却した。この負荷・除荷と加熱・冷却の過程を 20 回繰返した。図中の N は繰返し数を表す。

図 7 の応力-ひずみ関係からわかるように、 $N=1$ で負荷過程の初期において約 50 MPa の応力 σ_R で R 相変態による降伏が生じ、その後に約 320 MPa の応力 σ_M で M 変態による降伏が開始し、約 5.5% のひずみで M 変態は終了する。繰返し数の増加とともに R 相変態による降伏は現れなくなり、 σ_M は低下する。繰返しに伴う σ_M の低下割合は N の増加とともに小さくなる。

一方、図 7 のひずみ-温度関係からわかるように、 $N=1$ の加熱過程において約 325 K の温度 T_A で M 変態の逆変態により M 相から R 相になり、ひずみが約 0.5% まで減少する。その後に 325~330 K の温度 T_{RA} において R 相変態の逆変態により R 相から母相になり、ひずみが消滅する。その後の冷却過程においては、330~320 K の温度 T_{AR} で母相から R 相への R 相変

Fig. 6 Subloop behaviour in the case of reheating during the cooling process under constant stress

態により、約 0.3% のひずみが生じる。この最後の冷却過程において生じるひずみは 2 方向性ひずみ ε_t である⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾。繰返し数の増加とともに、 T_A は上昇し、 ε_t は大きくなる。繰返しに伴う T_A および ε_t の変化割合は、 N の増加とともに小さくなる。

N の増加とともに σ_M が低下し、 T_A が上昇する現象は、応力-温度平面で表される変態線が繰返し数の増加とともに低応力方向および高温度方向に移動する⁽²⁶⁾ ことに対応して現れる。

3・3・2 ひずみ変動に伴うサブグループ挙動 図 7 に示した負荷・除荷と加熱・冷却により変態が終了する完全ループを力学的トレーニングとして 20 回繰返し後に、同様のサーモメカニカル経路においてひずみ変動幅が 0.5% ずつ減少するサブグループ試験を行った。このサブグループ試験により得られた応力-ひずみ-温度関係を図 8 に示す。図 8 において、繰返し数 N は各サイクルにおける最大ひずみの位置に付記した。

図 8 の応力-ひずみ曲線からわかるように、M 変態に伴う降伏応力 σ_M は再負荷の繰返し数の増加とともに徐々に減少する。しかし、 σ_M の減少量は小さく、鉄系 SMA における σ_M の再負荷ひずみへの複雑な依存性^{(12)~(14)} と異なる。また、M 変態の開始点 M_s は再負荷ひずみの増加とともに明りょうでなくなる。

一方、図 8 のひずみ-温度曲線からわかるように、M 変態の逆変態によりひずみの回復する温度 T_A は、負

荷過程において与える最大ひずみが小さくなると低下する。この現象の生じる理由は次のように説明できる。一定温度下での負荷・除荷に伴う超弾性現象において、最大ひずみ ε_m が M 変態の終了点 M_f を越えて応力の上昇域になると、逆変態応力 σ_A は ε_m に比例して著しく低下する⁽¹⁶⁾。このことは、応力-温度平面上の逆変態線が ε_m に比例して高温度側に移行することを意味する⁽²⁶⁾。このように変態線が ε_m に依存して移動するのは、 ε_m が点 M_f を越えると最大応力は ε_m に比例して非常に大きくなり、このために負荷過程において生じる転位も多くなり、大きな内部応力が発生する⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ ことによる。図 8 からわかるように、負荷過程において与える最大ひずみはほとんど点 M_f を越えており、したがって最大ひずみが大きいほど T_A は高い。

3・4 M 変態に伴うサブグループ挙動 3・3 節までに検討した TiNi SMA のサブグループ挙動に関する M 変態の開始と終了の条件を、SMA 素子を設計し、利用する立場から考慮すべき点としてまとめると、以下のようになる。

(1) ひずみあるいは温度が M 変態域内で変動する場合には、ある一定の応力あるいは温度で M 変態と逆変態は開始および終了する。この点は、銅系 SMA および鉄系 SMA では M 変態の開始条件がひずみあ

Fig. 7 Stress-strain-temperature curves in the case of cyclic loading unloading and heating-cooling with perfect loop

Fig. 8 Stress-strain-temperature curves in the case of thermomechanical loading with decrease in width of strain variation after mechanical training with 20 cycles

るいは温度に依存することと異なる。したがって、TiNi SMA 素子の設計においては、素子の作動特性は単純な形で規定される。

(2) ひずみあるいは温度が M 変態の終了域で変動する場合には、M 変態域内で変動する場合に比較して M 変態応力は低下し、M 変態温度は上昇する。このことは、SMA 素子の作動特性がひずみあるいは温度に依存して変化することを表す。したがって、SMA の実用においてはひずみおよび温度の変動量に注意する必要がある。

(3) サーモメカニカル負荷を繰返し受ける場合、初期のサイクルにおいて M 変態応力は低下し、M 変態温度は上昇する。しかし、一定のサイクルを過ぎるとこれらの変化量は小さくなる。したがって、SMA 素子の実用において一定の作動特性を得るためには、約 20 回の力学的トレーニングを施して使用する必要がある。

4. 結 言

TiNi SMA に関して種々の負荷・除荷および加熱・冷却によりひずみおよび温度が変動する場合のサブグループ挙動を実験的に調べた。得られた結果の要点は次のとおりである。

(1) 繰返しサーモメカニカル負荷を受ける場合、繰返し数の増加に伴い M 変態応力は低下し、M 変態温度は上昇する。負荷・除荷および加熱・冷却の過程においてひずみあるいは温度が変動する場合、ひずみが M 変態域内にあれば、M 変態および逆変態を生じる応力および温度はひずみに依存せず、ほぼ一定である。

(2) 約 20 回の力学的トレーニングを施して実用すれば、M 変態応力および M 変態温度はほぼ一定として取り扱うことができる。

終わりに、本研究を行うに当たり実験に協力された愛知工業大学の学生諸君とご高配をいただいた木村君男教授ならびに岩永弘之教授に感謝する。また、文部省科学研究費補助金一般研究(C)および池谷科学技術振興財団研究助成金の補助を受けたことを記し謝意を

表す。

文 献

- (1) 舟久保康編, 形状記憶合金, (1984), 24, 産業図書.
- (2) 鈴木雄一, 実用形状記憶合金, (1987), 4, 工業調査会.
- (3) 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), 30, 養賢堂.
- (4) 宮崎修一, 材料, 39-445 (1990), 1329-1339.
- (5) Miyazaki, S. and Otsuka, K., *Phil. Mag.*, A, **50** 3 (1984), 393-408.
- (6) Miyazaki, S. and Otsuka, K., *Met. Trans.*, A, **17** (1986), 53-63.
- (7) Miyazaki, S., Kimura, S. and Otsuka, K., *Phil. Mag.*, A, **57** 3 (1988), 467-478.
- (8) Tanaka, K., Nishimura, F. and Tobushi, H., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **5** (1994), 487-493.
- (9) Tanaka, K., Nishimura, F., Hayashi, T., Tobushi, H. and Lexcellent, C., *Mech. Mater.*, **19** (1995), 281-292.
- (10) Huo, Y. and Müller, I., *Continuum Mech. Thermodyn.*, **5** (1993), 163-204.
- (11) Huo, Y. and Müller, I., *Shape Memory Materials '94*, (1994), 79, Inter. Academic Pub.
- (12) Tanaka, K., Hayashi, T., Aida, Y. and Tobushi, H., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **4** (1993), 567-573.
- (13) Tanaka, K., Hayashi, T., Nishimura, F. and Tobushi, H., *J. Mater. Eng. Performance*, **3** 1 (1994), 135-143.
- (14) Tanaka, K., Nishimura, F. and Tobushi, H., *J. de Physique IV*, C2 (1995), 477-482.
- (15) 戸伏壽昭・田中喜久昭・堀達哉・沢田隆之・服部丈晴, 機論, **58** 549, A (1992), 694-698.
- (16) 林萍華・戸伏壽昭・田中喜久昭・服部丈晴・牧田昌之, 機論, **50** 574, A (1994), 1390-1396.
- (17) 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.
- (18) Miyazaki, S., Imai, T., Igo, Y. and Otsuka, K., *Met. Trans.*, A, **17** (1986), 115-120.
- (19) Miyazaki, S. (Duerig, T. W., Melton, K. N., Stöckel, D. and Wagman, C. M. 編), *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, (1990), 394, Butterworth Heinemann.
- (20) 日本金属学会編, 新版転位論 その金属学への応用, (1971), 127, 丸善.
- (21) 文献(1)の35ページ.
- (22) 戸伏壽昭・岩永弘之・稲葉明俊・川口稔, 機論, **55** 515, A (1989), 1663-1668.
- (23) 林萍華・戸伏壽昭・田中喜久昭・伊貝亮, 機論, **50** 575, A (1994), 1660-1667.
- (24) 武沢和義・佐藤進一, 日本金属学会会報, **24** 1 (1985), 9-12.
- (25) 伊貝亮・戸伏壽昭・林萍華・山田真也, 機論, **61** 592, A (1995), 2629-2635.
- (26) 戸伏壽昭・田中喜久昭・堀達哉・沢田隆之・服部丈晴, 機論, **58** 552, A (1992), 1411-1416.