TiNi 形状記憶合金の変形挙動

(一定温度下および一定応力下での繰返し特性)[†]戸 伏 壽 昭* 木 村 君 男** 田 中 喜 久 昭***
堀 達 哉**** 沢 田 隆 之****Deformation Behavior of TiNi Shape Memory Alloys
(Cyclic Characteristics under Constant
Temperature and Constant Stress)

by

Hisaaki TOBUSHI*, Kimio KIMURA**, Kikuaki TANAKA***
Tatsuya HORI**** and Takayuki SAWADA****

Cyclic loading-unloading experiments at constant temperature and cyclic heating-cooling experiments under constant stress were carried out on TiNi shape memory alloys, and the cyclic characteristics of deformation behavior were discussed. The results are summarized as follows.

(1) The transformation lines on the stress-temperature plane moves toward the lower stress region and the higher temperature region under cyclic deformation.

(2) The transformation stress and the transformation temperature vary significantly in the early thermomechanical cycles, but take almost the constant values after a certain number of cycles.

(3) There is a similarity of cyclic behavior between the stress-strain curve at constant temperature and the temperature-strain curve under constant stress.

Key words : Shape memory alloy, Cyclic deformation, Stress-strain-temperature relation, Transformation line, Thermomechanical cycle

1 緒 言

形状記憶合金の応用において、形状記憶合金素子を用いる場合には、合金素子は繰返し変形を受ける。このために、形状記憶合金素子の信頼性を評価する上で、その繰返し特性が重要な問題になる。このような目的に対して、形状記憶合金の繰返し変形特性の研究が行われている。著者らもこれまでに材料の基本的な変形特性および応力-ひずみ関係の繰返し特性を調べ、形状記憶熱処理温度、加熱・冷却の環境温度、応力振幅およびひずみ振幅などが、応力誘起マルテンサイト (Stress-Induced Martensite, 以下 SIM) 変態および逆変態の開始と終了の条件の繰返し特性に著しい影響を及ぼすことを確かめた。さらに、合金素子の使用状態¹⁸⁾に合わせて、ひずみ一定下での回復応力および応力一定下での回復ひずみの繰返し特性を調べた。^{19)~21)}

本研究では、熱・力学サイクル下での TiNi 形状記憶合金の繰返し変形特性の研究の目的の中で、特に

SIM 変態および逆変態の開始と終了の条件、ならびに回復変形の繰返し特性およびその利用条件を、一定温度下での負荷・除荷の繰返し試験および一定応力下での加熱・冷却の繰返し試験の結果に基づいて検討する。

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 Ti-55.3 wt% Ni (Ti-50.2 at% Ni) 形状記憶合金線材である。この線材を直線に形状記憶熱処理したものを試験片とした。形状記憶熱処理では、673K で、20 分間保持した後、炉冷した。示差走査熱量計 (DSC) による試験片の変態温度の測定値は $M_s=243\text{K}$, $M_f=199\text{K}$, $A_s=292\text{K}$, $A_f=331\text{K}$ である。試験片の外径は 0.75 mm で、標点距離は 20 mm である。

2・2 実験装置

実験装置は、前報¹⁴⁾に示した通り、引張試験機および加熱・冷却装置より構成される。軸力、変位および温

† 原稿受理 平成 2 年 11 月 5 日 Received Nov. 5, 1990

* 正 会 員 愛知工業大学 豊田市八草町八千草, Aichi Institute of Technology, Yachigusa, Yagusa-cho, Toyota

** 愛知工業大学 豊田市八草町八千草, Aichi Institute of Technology, Yachigusa, Yagusa-cho, Toyota

*** 正 会 員 東京都立科学技術大学 日野市旭が丘, Tokyo Metropolitan Institute of Technology, Asahigaoka, Hino

**** 愛知工業大学大学院 豊田市八草町八千草, Graduate Student, Aichi Institute of Technology, Yachigusa, Yagusa-cho, Toyota

度はロードセル、伸び計および熱電対により、それぞれ検出する。試験片の加熱と冷却は、熱風と冷風を吹付けて行う。

2・3 実験手順

(1) 一定温度下での負荷・除荷の繰返し試験

本実験では A_f 点以上の温度での変態擬弾性挙動の繰返し特性を調べる。すなわち、一定の温度 T の下で最大ひずみ ε_m まで負荷し、続いて除荷する過程を 1 サイクルとして、これを 100 回繰返した。 T の値は 333, 353 および 373K とした。負荷および除荷過程でのひずみ速度は 2%/min とした。また、 ε_m は 1, 2, 3, 4, 6 および 8% とした。

(2) 一定応力下での加熱・冷却の繰返し試験

本実験では、まず除荷により逆変態の現れない温度 T_1 で、初期ひずみ ε_0 まで負荷する。この最初の負荷過程においては SIM 変態が生じる。続いて、その時の応力 σ_0 を一定に保ったまま A_f 点以上の温度 T_2 まで加熱すると、ひずみは逆変態により一定の割合だけ回復する。さらに、一定の応力 σ_0 の下で T_1 まで冷却すると、ひずみは SIM 変態により再び増加する。このように、 σ_0 一定の下での加熱と冷却を 100 回繰返し、回復変形の繰返し特性を調べた。 ε_0 は 1, 2, 4, 5, 6 および 7% とした。 T_1 は 293K とし、 T_2 は 333, 353, 373, 393 および 413K とした。加熱と冷却の速度は約 1.5 K/s とした。

3 実験結果および考察

3・1 一定温度下での繰返し変形挙動

3・1・1 応力-ひずみ関係 一定温度下での負荷・除荷の繰返し試験で得られた応力-ひずみ曲線の一例を Fig. 1 に示す。図中の N は繰返し数を表す。 $N=1$ における負荷時の応力-ひずみ曲線からわかるように、最大ひずみ $\varepsilon_m=6\%$ は SIM 変態の終了点近傍にあり、

$\varepsilon_m=8\%$ は SIM 変態終了後のマルテンサイト相での加工硬化域にある。また、一定に保つ温度 T は A_f 点以上であるので、応力-ひずみ曲線は変態擬弾性によるヒステリシスループを描く。SIM 変態および逆変態の開始および終了の応力を、それぞれ σ_{Ms} , σ_{Mf} , σ_{As} , σ_{Af} で表す。

Fig. 1 からわかるように、温度 T が高いほど各変態は大きい応力で生じる。

また、各実験で観察される繰返し特性としては、次の項目が挙げられる。(1) SIM 変態と逆変態の開始と終了の応力は、 N の増加と共に低下するので、ヒステリシスループの位置は縦軸の負の方向に移動する。

(2) 繰返しによる SIM 変態応力の低下量は、逆変態応力の低下量より大きい。(3) 各サイクルの終了点で現れる非回復ひずみ ε_p は N の増加と共に増加する。したがって、応力-ひずみ曲線は N の増加と共に横軸の正の方向に移動する。(4) 同じ T については、 ε_m が大きいほど ε_p は大きい。また、 $\varepsilon_m=6\%$ で $T=333\text{K}$ の場合には N の増加と共に、逆変態の完了しない部分変態擬弾性が現れるようになる。(5) 各項目で観察される現象は、繰返しの初期で大きく変化し、その変化割合は N の増加と共に小さくなる。

3・1・2 変態の開始線および終了線 SIM 変態および逆変態の開始および終了の条件は、応力-温度平面における各変態の開始線および終了線で規定される。^{11)~13)} SIM 変態の開始線と終了線は

$$\sigma_{Ms} = c_M(T - M_s) \quad (1)$$

$$\sigma_{Mf} = c_M(T - M_s) - 2 \ln 10 / b_M \quad (2)$$

となり、逆変態の開始線と終了線は

$$\sigma_{As} = c_A(T - A_s) \quad (3)$$

$$\sigma_{Af} = c_A(T - A_s) - 2 \ln 10 / b_A \quad (4)$$

となる。ここで、 M_s と A_s は各変態の開始線が温度

Fig. 1. Effect of cyclic loading at constant temperature on stress-strain curve.

(a) $\varepsilon_m=6\%$ and $T=333\text{K}$, (b) $\varepsilon_m=8\%$ and $T=353\text{K}$, (c) $\varepsilon_m=8\%$ and $T=373\text{K}$.

Fig. 2. Stress-temperature relationship at $N=1$ and 100 stress-cycles at constant temperature: $\epsilon_m=8\%$.

軸と交わる値であり、無応力下でのマルテンサイト変態と逆変態の開始温度を表す。なお、この交点の値と DSC で測定した M_s と A_s の値とは完全には一致しない。これは、DSC で測定する場合には無応力下であるために種々の方向のマルテンサイトの兄弟晶が生じるのに対して、応力の作用下では特定方位のマルテンサイト晶が主に生じることによるものと考えられる。係数 c_M , b_M , c_A および b_A は材料定数である。

最大ひずみ $\epsilon_m=8\%$ の場合について、繰返し数 $N=1$ と 100 における各変態の開始線と終了線を Fig. 2 に示す。Fig. 2 では、一定温度 T の各実験で得られた各変態の開始と終了の応力を各種の記号で示し、変態線はこれらの点を $N=1$ では実線で、 $N=100$ では破線で結んである。この場合、各変態の開始と終了の応力は、応力-ひずみ曲線の弾性域、変態域および加工硬化域をそれぞれ直線で近似し、各 2 直線の交点として定めてある。

Fig. 2 から、全体的に $N=100$ の場合には、両変態線の位置は、縦軸の負の方向に移動していることがわかる。このことは、一定温度下で繰返し変形を受ける場合には両変態が低い応力で生じることを意味している。また、 $N=1$ と 100 での変態線の位置の移動を比較すると、SIM 変態の変化量の方が逆変態の場合より大きい。

3・2 一定応力下での繰返し変形挙動

3・2・1 応力-ひずみ関係 一定応力下での加熱・冷却の繰返し試験で得られた応力-ひずみ曲線の一例を Fig. 3 に示す。初期ひずみ $\epsilon_0=1\%$ と 2% については加熱温度 $T_2=373\text{K}$ の場合、 $\epsilon_0=6\%$ と 7% については $T_2=413\text{K}$ の場合の結果をまとめて示してある。この図では各 ϵ_0 について、一定応力下で熱サイクルを受けた場合のひずみの変化は横軸上に重ねて示されている。図中には、 $N=1$ と 100 における高温時ひずみ ϵ_2 と低温時ひずみ ϵ_1 が示されている。また、図中には一定温度 373K における最大ひずみ 8% の引張試

Fig. 3. Stress-strain relationship under constant stress: $T_2=373\text{K}$ for $\epsilon_0=1\%$ and 2% , $T_2=413\text{K}$ for $\epsilon_0=6\%$ and 7% .

験により得られた応力-ひずみ曲線を破線で示してある。

温度 T_1 での最初の負荷時の曲線からわかるように、 $\epsilon_0=1\%$ はその応力が SIM 変態の開始点の近傍にあり、 $\epsilon_0=2\%$ は SIM 変態域にあり、 $\epsilon_0=6\%$ および 7% は SIM 変態の完了後の加工硬化域にある。

Fig. 3 から、SIM 変態開始前の $\epsilon_0=1\%$ の場合には、 T_1 から T_2 までの加熱により減少するひずみ $\Delta\epsilon=\epsilon_1-\epsilon_2$ (=回復ひずみ ϵ_r) は小さいことがわかる。また、 ϵ_r は $N=1$ と 100 の場合で、ほぼ同じ値をとる。この場合には、Rhombohedral Phase (以下、R 相) 変態によるひずみが加熱による逆変態で回復している。

$\epsilon_0=2\sim7\%$ の場合には、繰返しにより ϵ_1 , ϵ_2 および ϵ_r は大きく変化する。特に、 $\epsilon_0=2\%$ の場合に、 $N=100$ での ϵ_1 は約 5% となり、 T_1 での SIM 変態の終了ひずみ ϵ_{Mf} にほぼ等しくなる。

このように、熱サイクルで変態ひずみは大きく変化するので、応用において回復変形を利用する場合には、この繰返し特性を正しく理解しておく必要がある。

3・2・2 ひずみ-温度関係 各サイクル中でのひずみの挙動を調べるために、各初期ひずみ ϵ_0 および加熱温度 T_2 について、代表の繰返し数におけるひずみと温度の関係を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 の右上に挿入した図 (a) と (b) において、各サイクル中のひずみの挙動を模式的に示す。 $N=1$ の場合には、温度 T_1 での初期ひずみ ϵ_0 に続き、加熱過程においては逆変態によりひずみは減少し、冷却過程においては SIM 変態によりひずみは再び ϵ_1 まで増加し、ヒステリシスループを描く。なお、冷却過程においては、約 $320\sim330\text{K}$ の温度域で R 相変態による小さなひずみの増加が現れる。ここでは SIM 変態についてのみ考察する。

各実験で観察される現象としては、次の項目が挙げ

Fig. 4. Effect of thermal cycling under constant stress on strain-temperature relationship.

られる。(1) $T_2 > A_f$ であっても、 T_2 がある温度以上でないと逆変態によるひずみの回復は現れない。(2) N の増加に伴い、SIM 変態と逆変態の開始と終了の温度は上昇し、ヒステリシスループの位置は横軸の正の方向に移動する。このために、繰返し変形で逆変態が生じ難くなり、 T_2 が充分に高くない場合には、ヒステリシスループは消滅する。(3) 繰返しに伴う変態温度の上昇については、SIM 変態温度の上昇の方が、逆変態温度の上昇より大きい。これは、変形の進行過程で SIM 変態が生じ、回復過程で逆変態が生じるために、SIM 変態の方が転位がより多く発生することによるものと考えられる。この場合、各変態の開始と終了の温度は繰返しで不明確になる。(4) SIM 変態と逆変態の開始と終了のひずみは N の増加に伴い大きくなり、ヒステリシスループの位置は縦軸の正の方向に移動する。(5) 各項目で観察される現象は繰返しの初期で大きく変化し、その変化割合は N の増加と共に小さくなる。これは、各現象の発生原因である転位の増加割合が繰返し数の増加と共に減少することによるものと考えられる。

3・2・3 変態温度の繰返し挙動 変態温度と繰返し数との関係を、初期ひずみ $\epsilon_0 = 5\%$ で加熱温度 T_2

$= 413\text{K}$ の場合について Fig. 5 に示す。図において、SIM 変態および逆変態の開始および終了の温度は、それぞれ T_{Ms} 、 T_{Mf} 、 T_{As} および T_{Af} で示してある。Fig. 5 からわかるように、いずれの変態温度も繰返しの初期の約 20 サイクルまでに大きく上昇し、その後はほぼ一定値をとる傾向にある。したがって、形状記憶合金を応用する場合には、使用前にあらかじめ一定のトレーニングを施して利用すると、繰返しに対して安定した機械的性質を得ることができる。

一方、Fig. 5 からわかるように、繰返しに伴う変態温度の上昇については、SIM 変態温度の上昇の方が逆変態温度のそれより大きい。また、各変態の開始と

Fig. 5. Effect of thermal cycling under constant stress on transformation temperature.

Fig. 6. Dependence of transformation temperature at $N=1$ and 100 on heating temperature.

Fig. 7. Dependence of transformation temperature at $N=1$ and 100 on initial strain.

終了の温度の差は、繰返し数と共に若干大きくなる。その差異は、SIM 変態の場合の方が若干大きい。

つぎに、各変態の開始温度 T_{Ms} および T_{As} と T_2 との関係、 $\epsilon_0=4\%$ の場合について Fig. 6 に示す。図では、繰返し数 $N=1$ と 100 における値を示してある。Fig. 6 から、 $N=100$ の変態温度は T_2 が高いほど若干上昇するが、その上昇量はあまり小さくなく、変態開始温度の T_2 への依存性は小さいことがわかる。

同様に、各変態の開始温度 T_{Ms} および T_{As} と初期ひずみ ϵ_0 との関係、 $T_2=413\text{K}$ の場合について Fig. 7 に示す。図から、 ϵ_0 が 4% と 5% の場合には、各変態の開始温度はほぼ同じ値を示すことがわかる。これ

Fig. 8. Stress-temperature relationship at $N=1$ and 100 thermal cycles under constant stress: $T_2=413\text{K}$.

は、Fig. 3 の応力-ひずみ曲線からわかるように、 $\epsilon_0=4\%$ と 5% は共に SIM 変態域にあり、両者の応力値がほぼ同じであり、対応して変態温度もほぼ同じ値をとるためであると考えられる。一方、 $\epsilon_0=6\%$ の場合には各変態温度は高くなる。これは、 $\epsilon_0=6\%$ が SIM 変態終了後のマルテンサイト相の硬化域にあるため、応力が高く、したがって式 (1) と式 (3) からわかるように変態温度も高くなるためである。

3・2・4 変態の開始線および終了線 ここでは、3・1・2 項で検討したのと同様に、初期ひずみ $\epsilon_0=4$ 、6 および 7% で加熱温度 $T_2=413\text{K}$ の場合について、繰返し数 $N=1$ と 100 における各変態の開始線と終了線を Fig. 8 に示す。図では、一定応力の各実験で得られた各変態の開始と終了の温度を各種の記号で示し、変態線はこれらの点を $N=1$ では実線で、 $N=100$ では破線で結んである。Fig. 8 から、全体的に $N=100$ の場合には、両変態線の位置は、横軸の正の方向に移動していることがわかる。また、各変態の開始線と終了線の間隔で定まる変態領域の幅は、 $N=1$ に比して

Fig. 9. Schematic stress-strain relationship at constant temperature, and schematic temperature-strain relationship under constant stress.

$N=100$ の場合の方が大きい。

3・3 応力-ひずみ曲線と温度-ひずみ曲線の相似性

Fig. 1 と Fig. 4 で検討した各実験での SIM 変態と逆変態の繰返し挙動を比較するために、 $N=1$ と 100 における一定温度下での応力-ひずみ曲線と一定応力下での温度-ひずみ曲線を模式的に Fig. 9 に示す。

Fig. 9 (a) と (b) の比較から、両方の曲線の繰返し挙動には次のような共通点が認められる。(1) 各曲線のヒステリシスループで囲まれる面積は、いずれの図においても $N=1$ の場合に比較して $N=100$ の場合の方が小さい。(2) N が増加するとヒステリシスループの位置は、縦軸については下の方に、横軸については右の方向に移動する。(3) このヒステリシスループの縦軸の下の方への移動の大きさを SIM 変態と逆変態で比較すると、SIM 変態での移動量の方が大きい。(4) N が大きくなると各変態の開始点が明瞭でなくなる。

以上の項目 (1)~(4) のように、一定温度下での応力-ひずみ曲線と一定応力下での温度-ひずみ曲線の繰返し挙動には相似性が認められる。

3・4 繰返し回復変形の利用条件

前節までの検討で確かめたように、繰返し変形を受ける場合、変態応力は減少し、変態温度は上昇する。この場合の SIM 変態と逆変態の開始線と終了線を模式的に Fig. 10 に示す。図では、第 1 サイクルの変態線を実線で、第 N サイクルの変態線を破線で示してある。この図に基づいて各変態の発生および利用の条件を検討すると、次のようになる。

(1) 一定温度下での回復ひずみの利用

温度 $T_1 (< A_s)$ で点 A まで負荷すると SIM 変態が生じ、点 B まで除荷すると変態ひずみは残留する。この場合、無応力下で A_f 点以上まで加熱すると残留ひずみは消滅する。この現象は形状記憶効果として知られている。

Fig. 10. Schematic stress-temperature relationship at 1st and Nth cycles.

また、温度 $T_2 (> A_f)$ で点 C まで負荷すると SIM 変態が生じ、点 D まで除荷すると逆変態によりひずみは回復する。これは変態擬弾性として知られている現象である。この場合、負荷・除荷を繰返すと変態線は高温側に移動する。このために、 σ_{A_f} 線が点 D の右側に移動すると、逆変態は完了せず、変態ひずみの一部が残留する部分変態擬弾性を示すようになる。さらに σ_{A_s} 線が点 D の右側まで移動すると、逆変態は生じなくなる。したがって、逆変態を完了させるためには、温度 T_2 は使用回数 N における $\sigma_{A_f}(N)$ 線より高温側に設定する必要がある。

(2) 一定応力下での回復ひずみの利用

温度 T_1 で点 A まで負荷すると、SIM 変態が生じる。このときの応力 σ_a を一定に保って T_2 まで加熱する場合、 $T_2 > A_f$ であっても点 E の状態では逆変態は現れない。また、点 F の状態では熱サイクルの初期で逆変態が現れていても、 σ_{A_s} 線が点 F の右側まで移動すると逆変態は現れなくなる。Fig. 5 で検討したように、変態温度は繰返して上昇して一定値に飽和する。したがって、 σ_a 一定の下では点 G の温度をこの飽和温度以上に設定すれば、逆変態は繰返しに対して常に完了する。

温度 T_1 で点 H まで負荷すると、SIM 変態は終了し、マルテンサイト相の硬化域に入る。このときの応力 σ_h を一定に保ち、繰返して逆変態を完了させるためには点 I まで加熱する必要がある。

(3) 非回復ひずみの発生

形状記憶効果および変態擬弾性が現れるためには、応力および温度は一定の範囲内にある必要があり、その範囲は応力-温度平面での限界域で規定される²⁷⁾。このような各変態の発生限界の範囲内であっても、繰返し変形を与える場合には、応力が高いと非回復ひずみ ε_p が漸増する。 ε_p が増加すると、応用においては形状記憶素子の動作ストロークが変化することになるので、この点も考慮に入れて素子の設計をする必要がある。

4 結 言

TiNi 形状記憶合金について、応力誘起マルテンサイト変態と逆変態の開始と終了の条件および回復ひずみの利用条件を検討した結果、次のことが確かめられた。

(1) 応力誘起マルテンサイト変態および逆変態の開始と終了の条件を規定する応力-温度平面での変態線は、繰返し変形により、低応力側および高温度側に移動する。

(2) 熱・力学サイクルを受ける場合の変態応力と変態温度は、繰返しの初期に大きく変化し、その後のサイクルではほぼ一定値をとる。

(3) 一定温度下での応力-ひずみ曲線と一定応力下での温度-ひずみ曲線の繰返し挙動には相似性がある。

(4) 応力が高い場合には, 繰返し変形により非回復ひずみが漸増する。回復変形を繰返し利用する場合には変態応力, 変態温度および非回復ひずみの繰返し特性を把握して, 素子を設計する必要がある。

終りに, 本研究を行うに当たり実験に協力された当時の愛知工業大学の学生諸君, 多大のご支援を賜った大橋義夫教授ならびに岩永弘之助教授に深く感謝する。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。

(平成2年9月12日 第34回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 鈴木雄一, 舟久保照康編, “形状記憶合金”, p. 143 (1984) 産業図書
- 2) 鈴木雄一, “実用形状記憶合金”, p. 89 (1987) 工業調査会
- 3) K. Otsuka and K. Shimizu, *Int. Metals Reviews*, **31**, 93 (1986).
- 4) S. Miyazaki and K. Otsuka, *ISIJ Int.*, **29**, 353 (1989).
- 5) 宮崎修一, 坂本英和, *日本金属学会会報*, **24**, 33 (1985).
- 6) 宮崎修一, *材料*, **39**, 1329 (1990).
- 7) H. Tamura, Y. Suzuki and T. Todoroki, *Proc. Inter. Conf. on Martensitic Transformations*, p. 736 (1986).
- 8) S. Miyazaki, T. Imai, Y. Igo and K. Otsuka, *Met. Trans. A*, **17A**, 115 (1986).
- 9) G. B. Stachowiak and P. G. McCormick, *Acta Met.*, **36**, 291 (1988).
- 10) 宮崎修一, *材料科学*, **27**, 59 (1990).
- 11) 田中喜久昭, 佐藤善雄, *日本機械学会論文集*, **A-53**, 1368 (1987).
- 12) 田中喜久昭, 戸伏壽昭, 岩永弘之, *材料*, **37**, 267 (1988).
- 13) 田中喜久昭, F. D. Fischer, *材料*, **39**, 883 (1990).
- 14) 稲葉明俊, 木村君男, 岩永弘之, 戸伏壽昭, *日本機械学会論文集*, **A-55**, 628 (1989).
- 15) 川口 稔, 大橋義夫, 戸伏壽昭, *日本機械学会論文集*, **A-56**, 150 (1990).
- 16) 戸伏壽昭, 岩永弘之, 稲葉明俊, 川口 稔, *日本機械学会論文集*, **A-55**, 1663 (1989).
- 17) 戸伏壽昭, 大橋義夫, 川口 稔, *材料*, **39**, 1242 (1990).
- 18) T. W. Duering and K. N. Melton, *MRS Int'l. Mtg. on Adv. Mats.*, **9**, 581 (1989) Materials Research Society
- 19) 戸伏壽昭, 大橋義夫, 斎田治男, 堀 達哉, *日本機械学会論文集*, **A-57**, 115 (1991).
- 20) 戸伏壽昭, 大橋義夫, 斎田治男, 堀 達哉, *日本機械学会論文集*, **A-57**, 109 (1991).
- 21) 戸伏壽昭, 岩永弘之, 田中喜久昭, 堀 達哉, 沢田隆之, *日本機械学会論文集*, **A-57**, 651 (1991).
- 22) 三浦 精, *材料*, **37**, 735 (1987).
- 23) S. Miyazaki and K. Otsuka, *Philos. Mag.*, **A, 50**, 393 (1984).
- 24) S. Miyazaki and K. Otsuka, *Metal. Trans. A*, **17**, 53 (1986).
- 25) 宮崎修一, 大塚和弘, *エネルギー・資源*, **4**, 367 (1983).
- 26) 戸伏壽昭, 大橋義夫, 堀 達哉, 山本英雄, *日本機械学会論文集*, **A-57**, 121 (1991).
- 27) 清水謙一, 唯木次男, *文献1*), p. 36.