

## 207 TiNi 合金の二方向形状記憶特性に関する実験的研究

## Experimental Research on Two-way Shape Memory property of TiNi Shape Memory Alloy

○学 安岡賢二 (三重大・院) 正 徳田正孝 (三重大・工)

正 稲葉忠司 (三重大・工) 正 北村一浩 (長野高専)

Kenji YASUOKA, Masataka TOKUDA, Tadashi INABA, Kazuhiro KITAMURA

Department of Mechanical Engineering, Mie University, 1577, Kurimamachiya, Tsu, 514-8507, Japan

The two-way shape memory effect is expected as unique mechanical property for new engineering applications of shape memory alloys such as micro actuators. The two-way shape memory effect occurs by giving internal stress field to shape memory alloys. The mechanical loading training is the method to give internal stress field. The mechanism of the two-way shape memory behavior have not been understood yet. In this study, the two-way shape memory behavior obtained by the mechanical loading training was investigated experimentally. The obtained results are presented and discussed in this paper.

**Key Words:** Shape Memory Alloy, Two-way Shape Memory Effect, Mechanical Loading Training, Internal Stress Field, Residual Strain

## 1. 緒 言

近年, 知的材料に関する研究が盛んに行われている。その中でも, 最も注目されている形状記憶合金は, その優れた特性から, すでに様々な分野で産業応用されている。その一つとして, アクチュエータへの応用が挙げられるが, それらのほとんどが外部からの負荷により二方向性を取り出している<sup>1)</sup>。しかし, 二方向形状記憶効果を利用すれば, 外部応力を必要としないため, より複雑で小型のアクチュエータを可能にすることができると考えられる。二方向形状記憶挙動の発現の要因は, トレーニングと呼ばれる繰返し熱・力学的負荷によって与えられる内部応力とされてきた。これまで, 様々な二方向挙動に関する研究が行われてきたが, 未だ, そのメカニズムは解明されていない。

以上のような背景から著者らは, 力学的負荷によって得られる興味深い様々な二方向挙動について研究を試みている<sup>2)</sup><sup>3)</sup>。ここで, 著者らの研究によって, トレーニングの際, 負荷を繰返し与えた場合と, 負荷を1サイクルのみ与えた場合の二方向挙動を比較すると, ほとんど差がみられないことがわかっている<sup>4)</sup>。本稿では, 熱による膨張や収縮の影響を受けないねじり方向に着目し, TiNi 形状記憶合金にねじり負荷を与え, それが二方向挙動に与える影響について考察した。

## 2. 試験片

試験片には, 燃焼合成法で作製したTiNi形状記憶合金を使用した。試験片の組成はTi-50.9at%Ni であり, 形状は外径7mm, 内径5mm, 壁厚1mm, 長さ100mmの薄肉円管状である。形状記憶熱処理として, アルゴンガス中に, 540°Cで10分間保持し, 後に水中急冷した。

熱処理後, DSC (示差走査熱量計) によって測定した各変態温度は $M_s'=29^\circ\text{C}$ ,  $M_f'=-15^\circ\text{C}$ ,  $M_s=-25^\circ\text{C}$ ,  $M_f=-57^\circ\text{C}$ ,  $A_s=9^\circ\text{C}$ ,  $A_f=39^\circ\text{C}$ である。ここで $M'$ はR相変態,  $M$ はマルテンサイト変態,  $A$ はオーステナイト変態, また添字,  $s$ は開始温度,  $f$ は終了温度を意味する。それゆえ, 本試験片は40°C以上の温度雰囲気中で超弾性挙動を示し,  $-60^\circ\text{C}$ 以下において結晶はすべてマルテンサイト相となる。

## 3. 実験装置および実験方法

ねじり負荷は, 島津製作所製複合負荷試験機オートグラフ AG-10TC を用いて行い, ひずみの測定には, ひずみゲージを使用した。本実験では, マルテンサイト相に限界以上の変形を与えるという代表的なトレーニング方法を導入し, 形状記憶挙動を示す温度雰囲気 ( $-10^\circ\text{C}$ ) において, 最大ねじり応力  $\sqrt{3}\tau=200, 400, 600\text{MPa}$  のねじり負荷を与えた。

次に, 二方向ひずみの計測は, 試験片を温度制御装置に設置し, 無応力下にて行った。Fig.1 に温度制御装置の外観を示す。測定手順として, まず試験片を  $A_f$  温度以上の  $60^\circ\text{C}$  まで加熱し, そこから約  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  で  $M_f$  温度以下の  $-110^\circ\text{C}$  まで冷却した。その後,  $60^\circ\text{C}$  まで約  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  で加熱し, この間における試験片のせん断ひずみ ( $1/\sqrt{3})\gamma$  を測定した。

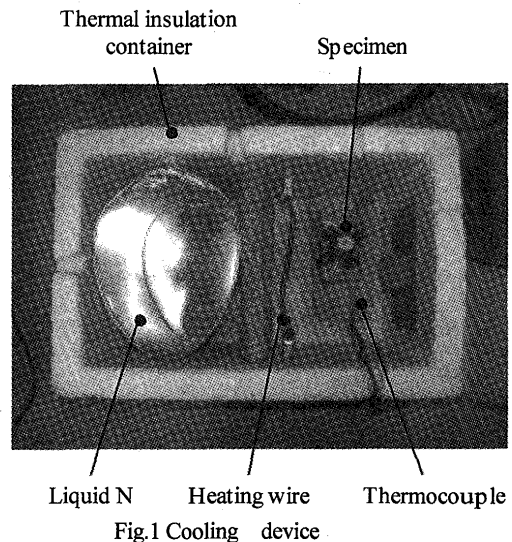


Fig.1 Cooling device

## 4. 実験結果および考察

本研究では, 形状記憶挙動を示す温度雰囲気 ( $-10^\circ\text{C}$ ) で, 試験片にねじり負荷を与え, その前後での二方向ひずみを計測することにより, ねじり負荷が二方向ひずみに与える影響について考察した。

Fig.2 にねじり負荷を与えた際の応力-ひずみ関係を示す。①, ②, ③は, それぞれ最大ねじり応力を 200, 400, 600MPa

とした場合で、一つの試験片に対して①→②→③の順で負荷を与えた。除荷後に $A_f$  温度以上まで加熱すると、それぞれ 0.12, 0.29, 0.75%の残留ひずみが発生した。塑性域まで負荷を与えた③については、転位による残留ひずみと考えられるが、①, ②に関しては形状記憶合金の特性上、完全に形状が回復するはずであったが、若干の残留ひずみが発生するという結果が得られた。

Fig.3 にトレーニング前およびトレーニング後の試験片における二方向ひずみと温度の関係を示す。トレーニング前の試験片では二方向挙動は見られなかった。①では、冷却過程において、まず $20^{\circ}\text{C}$ 付近でR相変態によるひずみが発生し、さらに冷却することにより、 $-20^{\circ}\text{C}$ 付近でM相変態によるひずみの増加が見られた。その後の加熱過程においては、逆変態開始温度まで、ひずみは一定に保たれ、逆変態終了温度でひずみが元に戻るという挙動が見られた。②についても同じような挙動が見られたが、①とは異なり $30^{\circ}\text{C}$ 付近と $-10^{\circ}\text{C}$ 付近でひずみの増加が観察された。このように、①, ②, ③共に、二方向ひずみの増加に伴い、 $M_s$  温度、 $R_s$  温度が上昇している。①, ②では、冷却過程においてR相変態とM相変態の二段階変態がはっきりと観察されたが、③に関しては、そのようなはっきりとした二段階変態が観察されなかった。これは $M_s$  温度の上昇に伴い、M相変態領域がR相変態領域を吸収したと考えられる。さらに、最大負荷応力の増加に伴い二方向ひずみの増加が見られた。これは内部応力が増加したと考えられ、内部応力とは逆変態の際に転位などの不可逆欠陥や残留マルテンサイトが変態を妨げる際の反力であることから、本実験において発生した残留ひずみに着目した。

Fig.4に残留ひずみと最大二方向ひずみの関係を示す。ここで、二方向ひずみがほぼ安定した約 $-80^{\circ}\text{C}$ におけるひずみを最大二方向ひずみと定義した。Fig.4より、残留ひずみの発生によって急激に二方向ひずみが増加している。その後、残留ひずみの増加に伴い二方向ひずみがゆるやかに増加するという傾向がみられた。このことから、残留ひずみと二方向ひずみの関係性が示唆されたといえる。

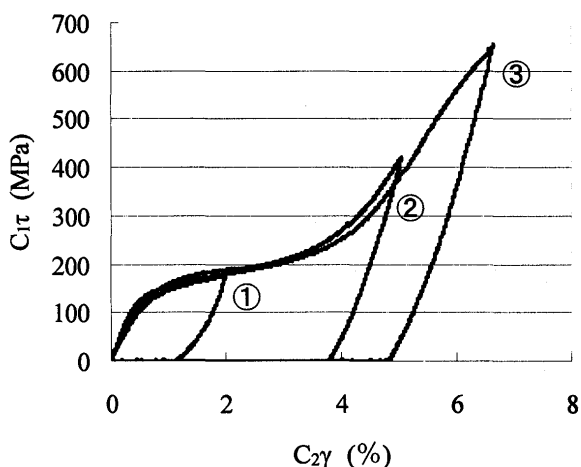


Fig.2 Stress-strain curves

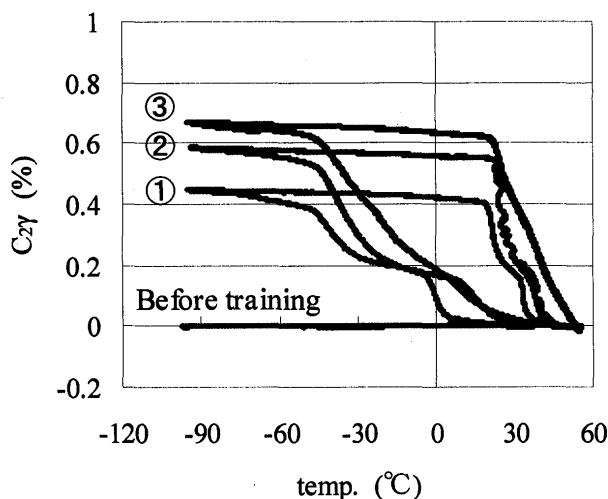


Fig.3 Two-way shape memory behavior

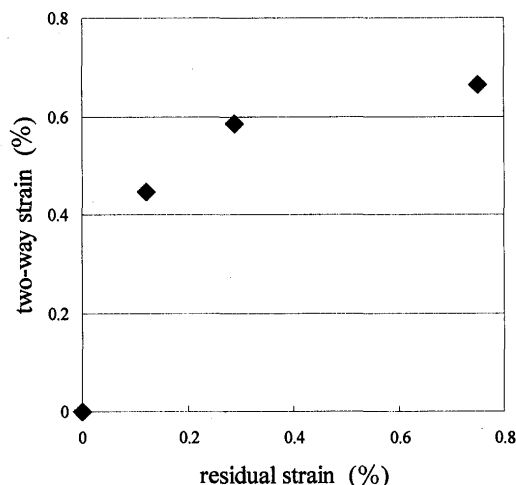


Fig.4 Relationship between two-way strain and residual strain

#### 4. 結 言

実験結果より、残留ひずみと二方向ひずみの関係性が示唆された。このことから、残留ひずみによって二方向挙動を制御できるものと考えられる。さらに多くの負荷条件に対して実験を進めることにより、その二方向挙動のメカニズムの解明、または工学応用の幅を広げることにも貢献できるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 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, 養賢堂, 1993, 45-46.
- 2) M. TOKUDA, et al., J. of Intel. Mat. Syst. and Str., Vol. 12(4) (2001), 289-294.
- 3) T. INABA, et al., Key Engineering Materials, Vols. 233-236 (2003), 553-558.
- 4) 加藤智広, 徳田正孝, 稲葉忠司, 三重大学平成 16 年度修士論文集 (2005), 53-56