

鉄系形状記憶合金の負荷条件に対する変形挙動

Deformation Properties of Fe-based Shape Memory Alloy for Loading Conditions

吉川 高正¹⁾, 岡山 幸弘¹⁾, 成澤 麻人¹⁾, 稲葉 忠司¹⁾

Takamasa Yoshikawa¹⁾, Yukihiro Okayama¹⁾, Asato Narusawa¹⁾, Tadashi Inaba¹⁾

Keywords: Fe-based shape memory alloy, Martensitic transformation, Plastic deformation

1 緒 言

形状記憶合金とは、負荷による変形のうち除荷後に残留した変形を加熱することで元の状態に戻すことのできる形状記憶特性を有する合金である。形状記憶合金は、金属材料としての実用的強度を備えるとともに、形状記憶挙動によって得られる回復力が数百 MPa に及ぶため、新しい駆動素子への応用が期待されている¹⁾²⁾。

形状記憶特性が発現する合金として Ti-Ni 系、鉄系、銅系などが確認されてきた。特に Ti-Ni 系形状記憶合金は、形状記憶特性のみならず、機械的特性や生体適合性に優れるため、機械・電気産業から医療機器産業にわたる幅広い実用化がなされている。しかしながら、Ti-Ni 系形状記憶合金は難加工性材料であるため、製品の成形は鋳造に依存する。鋳造成形においては組成元素の比重や融点の差による重力偏析のため、製品の部位によって組成比に差が生じうる。Ti-Ni 系形状記憶合金の組成比率に対する変態温度の感度は極めて高いため、製品部位によって形状記憶特性に差が生じやすい。以上の点から、実用化されている Ti-Ni 系形状記憶合金製部品は小型で単純な形状に制限されている。

一方、鉄系形状記憶合金は形状記憶特性では Ti-Ni 系形状記憶合金に及ばないものの、素材自体が安価であり、鉄鋼やステンレス鋼の大量生産設備を利用して生産できる工程も多いため、コストを Ti-Ni 系形状記憶合金よりも遥かに低く抑えることが可能である。また良好な加工性を有するため、自由な形状の製品を製造することが容易である。そのため、鉄系形状記憶合金は Ti-Ni 系形状記憶合金では実現困難であった大型構造用材料としての応用が期待され、実用化の検討が進んでいる。現在実用化を目指した鉄系形状記憶合金としては、形状記憶特性の向上、加工性や耐食性の改善、変態温度の調整を目的として組成開発が進められてきた Fe-28Mn-6Si-5Cr(mass%)合金が

主流となっている³⁾。

ところで、一般に材料が構造用材料として実用化される時、その材料は単軸負荷だけではなく、多軸の複雑な負荷条件下におかれることを考慮しなければならない。鉄系形状記憶合金の機能を活かした製品設計や塑性加工成形を実現するためには、多軸負荷条件下における力学特性・形状記憶特性の解明が重要である⁴⁾⁵⁾。そのためには構成方程式の構築を視野に据えた基礎的な力学特性の解明が必要不可欠である。

以上から本研究では Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金に着目し、各種単純負荷条件下における基礎的な力学特性について実験的に解明することを目的とした。そこで、負荷条件として単軸引張り、単軸圧縮、単純ねじり変形を与え、変形の後、除荷し加熱する一連のプロセスにより、本材料の形状記憶特性と塑性変形にかかわる負荷条件の影響を確認した。

2 実験方法

本研究で用いた Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金(淡路マテリア製)の合金組成を表 1 に示す。

本材料に形状記憶熱処理を施したのち、切削加工によって図 1 に示す形状に成型したものを力学試験片とした。試験片は単軸引張、単軸圧縮に加え単純ねじり試験を行うため、25mm の標線間部は外径 7mm、内径 5mm の中空丸棒形状であり、試験機への固定のため両端に M12 のねじ部が施されている。

形状記憶熱処理として、昇温速度 10°C/min で 950°C まで加熱したのち 30 分間保持し、その後氷水で急冷した。形状記憶熱処理後の材料の変態温度を示差走査熱量計(DSC-50: 島津製作所製)で確認した。示差走査熱量計測は、形状記憶熱処理後の材料を少量切り出した試験片によって行った。試片を十分冷却して試料をマルテンサイト変態させたのち、185°C まで加熱することで逆変態温

1) 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 Dept. Mechanical Engineering, Mie Univ. Graduate Sch. Eng.

度を計測した。逆変態温度計測後、 -60°C まで冷却することでマルテンサイト変態温度を確認した。示差走査熱量計測の結果(図2)から、本材料はマルテンサイト変態開始温度 $M_s=15.5^{\circ}\text{C}$ 、マルテンサイト変態終了温度 $M_f=-14.7^{\circ}\text{C}$ 、逆変態開始温度 $A_s=126.2^{\circ}\text{C}$ 、逆変態終了温度 $A_f=155.6^{\circ}\text{C}$ であることが確認された。

Tab. 1 Alloy composition of specimen.

Fe	Mn	Si	Cr	others
60.8	28.2	6.1	4.8	0.1

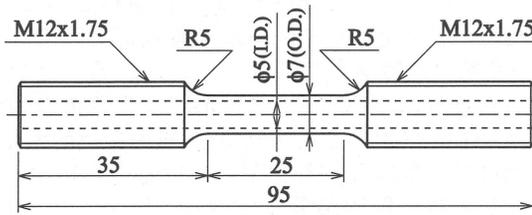


Fig. 1 Shape of specimen.

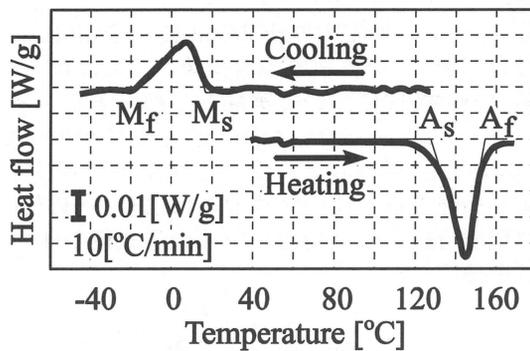


Fig. 2 Temperature of phase transformation of Fe-28Mn-6Si-5Cr shape memory alloy by DSC.

本研究では、形状記憶特性を調査するために、負荷によってマルテンサイト変態を生じ、加熱によって逆変態を生じさせる必要がある。このため、形状記憶熱処理を施した材料を力学試験片に加工したのち、 A_f 点よりも十分に高い 300°C まで加熱し、これを室温(22°C)に冷却した試験片によって以下の力学試験を行った。すなわち、力学試験開始前において材料は母相の状態である。

力学試験の手順は以下の通りである。

室温において所定の von Mises の相当ひずみに達するまでクロスヘッド速度一定で単純負荷を加えたのち、荷重 0 N まで除荷した。本研究では基礎的な応力円を得ることを一つの目標とするため、負荷は単軸引張り、単軸圧縮および単純ねじりとした。次いで力学試験機付帯の高温炉を用いて 250°C まで加熱し、形状回復させた。加熱時は荷重を 0 N になるように試験機を微動制御し

た。さらに室温まで炉冷し、ひずみの変化を確認した。

力学試験は環境制御型複合負荷試験機オートグラフ(AG-10TC: 島津製作所製)によって行った。本試験機は軸方向駆動のクロスヘッドとともに試験片にねじり負荷を加える機構を備えており、多軸負荷条件による材料の力学特性を計測できるとともに、付帯した電気炉によって材料の環境温度を変化させることができる。

また、ひずみ計測は高温用箔ひずみゲージ(KFU: 共和電業製)を用い、負荷を施す常温から材料が形状回復挙動を示す高温での変形を精度よく計測した。

3 実験結果および考察

図3に単軸引張試験における応力-ひずみ・温度-ひずみ関係を示す。図の横軸はひずみ(%)であり、図中ひずみ軸を境に上側が応力-ひずみ関係を示し、下側に形状回復過程における温度-ひずみ関係を示す。すなわち、応力-ひずみ関係において縦軸は応力[MPa]であり、温度-ひずみ関係において縦軸は試験片温度[$^{\circ}\text{C}$]である。なお、温度軸は下方方向を正としてある。

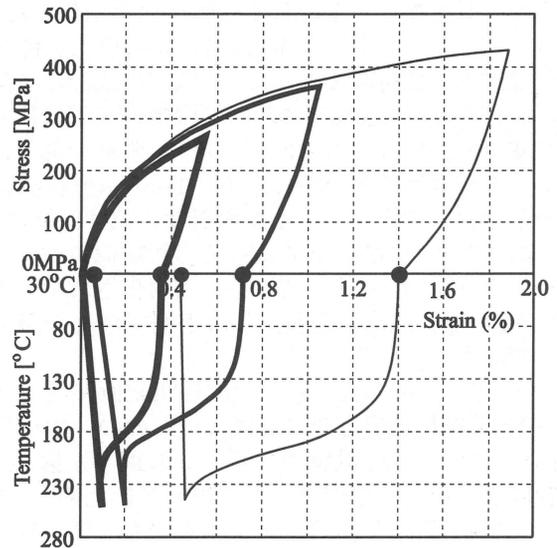


Fig. 3 Stress-strain curves and temperature-strain curves of Fe-28Mn-6Si-5Cr shape memory alloy.

図3には、常温でひずみ0.5%、1.0%、2.0%に達するまで負荷を加え、除荷後、加熱による形状回復を行った試験が併記されている。いずれの試験についても常温の負荷過程では、初めにひずみと応力が線形に増加したのち、ひずみに対する応力の増分が緩やかになり、所定のひずみ量に達するまで応力が増大することが確認された。

また、加熱過程において除荷後残留したひずみは 130°C 付近から減少し始め、200°C を超えると熱膨張による直線に漸近した。

常温での負荷—除荷過程で残留したひずみと、加熱—冷却後に残留したひずみの差は形状回復ひずみであり、加熱—冷却後に残留し、もはや形状回復しないひずみは負荷過程で生じた塑性ひずみであると考えられる。

付与した変形によって到達した応力値が低い試験片は加熱過程によって形状が完全に回復し、加熱—冷却後に塑性ひずみは認められなかった。一方、負荷過程で大きな応力を付与された試験片は形状回復ひずみが増大するとともに塑性ひずみも大きくなることが確認された。以上の傾向は単軸圧縮、単純ねじり試験においても同様に認められた。

そこで、与えた変形によって到達した応力に対して、形状回復ひずみおよび塑性ひずみの関係を整理した(図 4)。図 4 において横軸は付与した相当ひずみのときに到達した相当応力 [MPa] であり、縦軸は相当ひずみ (%) である。それぞれ (a) 単軸引張負荷、(b) 単軸圧縮負荷、(c) 単純ねじり負荷について、形状回復ひずみと塑性ひずみを併記した。今回調査したおよそ 400 MPa までの応力において、形状回復ひずみと塑性ひずみはいずれの負荷条件に対しても、付与された応力に対してほぼ線形に増大していた。また、単軸引張および単軸圧縮試験(図 4(a), (b))において顕著であるが、塑性ひずみの発生は形状回復ひずみよりも高い応力で生じることが確認された。

すなわち、本研究で用いた Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金は、負荷によって最初に形状回復をもたらす応力誘起マルテンサイト変態が生じ、さらに大きな負荷が加わると塑性変形が生じ始めることが分かる。また、およそ 400 MPa までの負荷に対して形状回復ひずみと塑性ひずみはともに併存して増大していくことが確認された。

図 3 における応力—ひずみ関係において、負荷過程初期の線形的な領域では、除荷のみでひずみが回復するため、弾性変形域であると考えられる。図 4 において塑性ひずみよりも先に形状回復ひずみが発現することから、本材料の応力—ひずみ関係において弾性限は形状回復をもたらす応力誘起マルテンサイト変態が開始する応力を与えるものと考えられる。Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金の応力—ひずみ関係は緩やかな曲線を描き、弾性限が明瞭でない。そこで弾性限は 0.02% 耐力から求めた。すなわち、本材料の応力誘起マルテンサイト変態開始応力は 0.02% 耐力をもとに推定することができる。

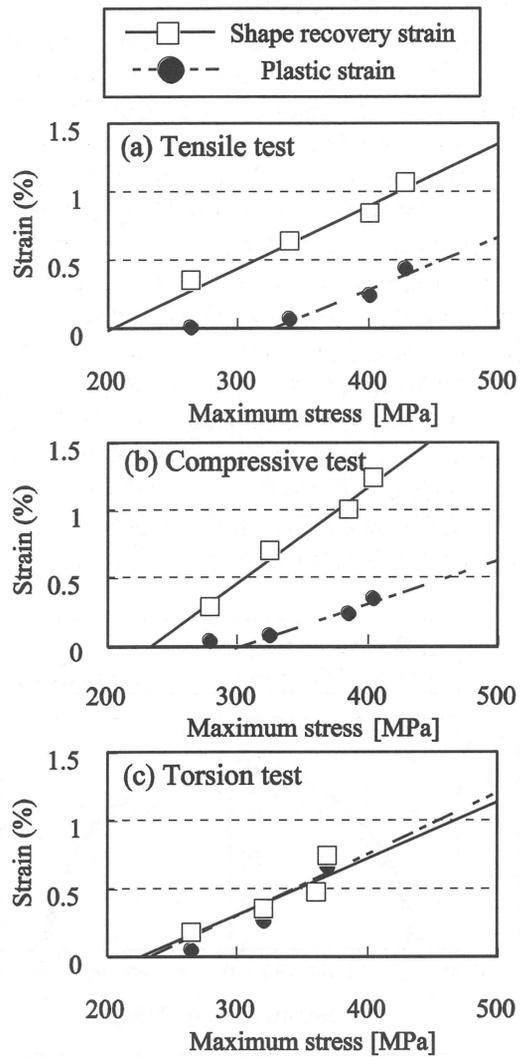


Fig. 4 Shape recovery strain and plastic strain of Fe-28Mn-6Si-5Cr shape memory alloy with loading stress on (a) tensile, (b) compressive and (c) torsion test.

一方、図 4 から、形状回復できない塑性ひずみが発生する塑性開始応力を推定することができる。すなわち、図 4 において線形的に変化する塑性ひずみ—負荷応力関係の近似直線が応力軸と交差する点は、塑性ひずみが発生し始める応力を示していると考えられる。

そこで、単軸引張、単軸圧縮および単純ねじり試験における応力—ひずみ関係から推定された応力誘起マルテンサイト変態開始応力および図 4 の塑性ひずみ—負荷応力関係から得られた塑性開始応力を応力平面に示した(図 5)。

図 5 において (a) は応力誘起マルテンサイト変態開始応力の応力円であり、(b) は塑性変形が開始する応力円、すなわち降伏曲面を示す。それぞれ横軸は垂直応力、縦軸はせん断応力である。せ

せん断応力は von Mises の相当応力で示してある。また、図 5 には□および●によって示された実験結果とともに、単軸引張負荷を基準に得られた von Mises および Tresca の応力円を併記してある。

図 5 から、Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金について、0.02%耐力から推定される応力誘起マルテンサイト変態開始応力は単軸引張、単軸圧縮およびせん断負荷についてほとんど等しい値を示しており、von Mises の応力円によく合致していることが分かる。一方、図 4 の塑性ひずみ-負荷応力関係から推定された降伏応力に関しては、単軸引張と単軸圧縮負荷でほぼ等しい値を示すのに対してせん断応力が低く、Tresca の応力円によく合致することが確認された。以上の結果は Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金の応力誘起マルテンサイト変態と塑性変形の開始を左右するメカニズムを示唆するものであると考えられる。

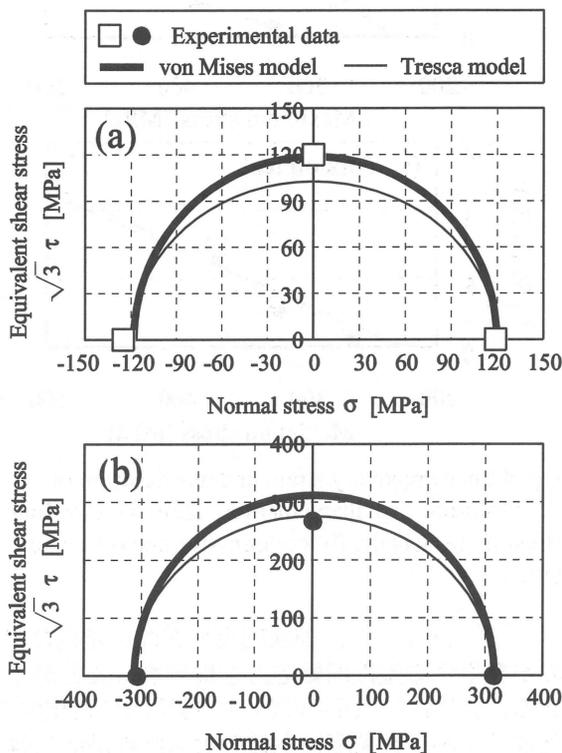


Fig.5 (a) Martensitic transformation stress surface and (b) yield surface of Fe-28Mn-6Si-5Cr shape memory alloy.

4 結 言

大型機械構造用材料への応用が期待される Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金の多軸負荷条件下における降伏曲面および構成方程式の構築を視野に据え、基礎的な各種単純試験における形状回復および塑性変形に関する力学特性を調査した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金は負荷によって弾性限を越えると、まず応力誘起マルテンサイト変態が生じ、その後、負荷の増大で塑性ひずみが発生する。
- 2) Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金に塑性ひずみが発生し始めたのち、本研究で調査された応力範囲(およそ 400MPa まで)において形状回復をもたらす変態ひずみと塑性ひずみはともに併存し、負荷された応力とともに線形的に増大する。
- 3) Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金の応力誘起マルテンサイト変態が開始する応力は、垂直応力およびせん断の相当応力においてほぼ等しく、せん断ひずみエネルギーが閾値を越えることによって変形メカニズムが変化する von Mises の理論によく合致する。
- 4) Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金の塑性変形が開始する応力は、引張と圧縮の垂直応力においてほぼ等しく、せん断の相当応力は垂直応力よりも若干低く現れる。実験結果は、塑性変形を生じる転位のすべりが、せん断応力の閾値を越えることで発現すると説明する Tresca の降伏条件によく合致する。

以上の結果は Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金の実用化において不可欠となる多軸負荷条件下の変形挙動を解明する上で基礎となる重要な知見である。今後、複合負荷条件とともに、より大きな変形に対する形状回復ひずみおよび塑性ひずみの相関を調査することで、Fe-28Mn-6Si-5Cr 形状記憶合金の機能を活かした適切な設計に対する指針を提示できるものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたって、(独)科学技術振興機構 平成 21 年度シーズ発掘試験研究(課題番号 08-130)からの支援を受けた。謝してここに記す。

参 考 文 献

- 1) 船久保熙康編. 形状記憶合金, 産業図書, 1984.
- 2) 田中喜久昭, 戸伏壽昭, 他. 形状記憶合金の機械的性質. 養賢堂, 1993.
- 3) 淡路マテリア株式会社. Fe-Mn-Si 系形状記憶合金の特性と応用, 淡路マテリア株式会社 HP, <http://www.awaji-m.jp/r-and-d/about.html#alloy>.
- 4) 直井久, 丸山忠克. 鉄系形状記憶合金の変形特性, 塑性と加工, 45:697-701, 2004.
- 5) 和田学, 他. FeMnSi 基形状記憶合金薄板の二軸引張変形に対する形状回復特性, 塑性と加工, 47:865-869, 2006.