

変態塑性材料の構成式評価に関する研究

東京都立科学技術大学 航空宇宙システム工学科

教授 田中喜久昭

(平成3年度研究開発助成 AF-91005)

1. 研究の背景

変態を伴う工学過程に関する連続体力学的研究は、熱処理、連続鋳造、鋼板の制御冷却などを中心にして、主として機械工学、金属学の分野で急速に発達してきた。力学、熱力学、金属学因子が複雑に相互作用し合う領域において、たとえ定性的にでも材料中に発生する巨視的変形（応力、ひずみ、温度、変態量など）を評価することが、高強度、高じん性材料の精製に大いに貢献したからである。

その研究過程で、変態過程にある材料が示す変態/変形挙動の連続体力学的記述、特に材料の微視的構造と巨視的挙動の関連を明らかにすることが、有効な材料設計を実行するうえから特に重要であることが認識された。必要な巨視的挙動を実現するために材料が備えなければならない微視的構造の推定、それを実現するための製造プロセス設計なども、これらの研究活動の延長上にある。

さて本研究は、構造材料としての使用を前提として開発された鉄基形状記憶合金に注目し、熱・力学的負荷の下での巨視的変形/変態挙動を明らかにすることを目的とした。ここでは単軸応力の下での繰り返し挙動及び不完全変態の効果に考察を限ったが、多軸応力下での挙動を記述するための構成式系を整備すること、それを用いて大型形状記憶合金素子設計手法を確立すること、更には必要な巨視的挙動を実現するための材料設計を実現することが将来の目標である。

2. 研究成果の概要

鉄基形状記憶合金 (Fe-Cr-Ni-Mn-Si 多結晶合金) を試料として、熱・力学的負荷の下での同合金の単軸変形/変態挙動を実験的、理論的に明らかにすることを本研究の目的とした。

「鉄基形状記憶合金の繰り返し熱・力学的負荷の下での挙動評価」

鉄基形状記憶合金試験片（直径6mm、標点距離20mm）には、引張荷重と熱負荷を任意に組合せ負荷できるようにした。熱負荷は、高周波誘導加熱による。変位は、差動変圧器を用いて測定した。すべての実験プログラムはパーソナルコンピュータによって制御された。以下得られた成果について説明する。

(1) トレーニング

熱・力学的負荷の下で安定な反応を示すことが形状記憶合金素子として要望されるが、そのためには事前のトレーニングが必要である。本合金では、(室温での4%負荷除荷+873Kまでの加熱冷却)を1サイクルとして、4サイクルのトレーニングを行うことによって、ほぼ完全な形状回復を期待できることが明らかとなった。

(2) 変態線

マルテンサイト変態開始、終了線及び逆変態開始、終了線を、温度-応力平面で決定した。これらは、勾配2.17MPa/Kをもつ直線となった。逆変態領域の幅は約180Kであり、TiNi合金に比べて大変広い。このことは、本合金が等温擬弾性変形をしないことと直接関連している。また、繰り返し変形/変態を進行させるためには、等温負荷除荷+等応力加熱冷却という負荷パターンによらなければならないこともわかった。

変態線は、予負荷に強く依存することが確認された。予負荷によるマルテンサイト変態が、後続の逆変態に及ぼす影響を特に詳細に調べた。これは、繰り返し負荷の際に変態が終了しない場合の挙動（サブループの記述という観点から多くの力学、金属学研究者が追求している）を説明するための基礎的材料データとなる。

(3) ヒステリシス

繰り返し負荷の下での応力-ひずみヒステリシス、温度-ひずみヒステリシスを調べた。これらのヒステリシスは、繰り返しの進行と共にそれぞれ低応力/高ひずみ側、高温度/高ひずみ側に移動する。ただしTiNi合金の場合とは異なり、本合金の場合にはヒステリシスループは定ループに収束しない。

これらの成果は、論文 [1-4] として学術雑誌に投稿された。

「形状記憶合金の変形/変態解析（繰り返し熱・力学的負荷及び不完全変態の効果）」

ヒステリシスの負荷サイクル依存性及び不完全変態の及ぼす効果を考慮した形状記憶合金の変形/変態解析理論体系を確立した。負荷サイクル依存性を導入するためには、繰り返し変態によって材料内部に累積する微視的応力及び

微視的ひずみを内部変数として考慮した。更に、以後の繰り返し変態には関与せずに増加するマルテンサイト量を第3の内部変数として用いた。これらの物理量は、本研究で行った実験によって、繰り返し負荷中の変化量を推定できる。

不完全変態を考慮するためには、予負荷による変態線の移動を考慮した。理論は現象論的なものであるが、導入した変態線の移動は、マルテンサイト変態の熱力学で重要な役割を果たす変態駆動力と密接な関連が有することを明らかにした。

理論をもとに、等温負荷除荷、等応力加熱負荷、熱・力学的負荷などの種々の負荷状態での形状記憶合金の変形／変態に関するシミュレーションを行い、実験結果と比較することによって理論の妥当性を確認した。

これらの成果は論文 [4] としてまとめられた。

3. 本助成金による研究成果（投稿中及び準備中論文リスト）

1. Tanaka,K., Hayashi,T., Aida,Y. and Tobushi,H., Thermomechanical behavior of a Fe - Cr - Ni - Mn - Si polycrystalline shape memory alloy, J.

Intelligent Material Systems Structures (1992) to be submitted.

2. Tanaka,K., Hayashi,T., Nishimura,F. and Tobushi,H., Hysteretic behavior in an Fe - Cr - Ni - Mn - Si polycrystalline shape memory alloy during thermomechanical cyclic loading, J. Materials Engng Performance (1993) to be submitted.

3. Tanaka,K., Hayashi,T., Fischer,F.D. and Buchmayr,B., Transformation lines in an Fe - Cr - Ni - Mn - Si polycrystalline shape memory, Z. Metallkde (1993) to be submitted.

4. Tanaka,K., Nishimura,F., Hayashi,T., Tobushi,H. and Lexcellent,Ch., Phenomenological analysis on subloops and cyclic behavior in shape memory alloys under mechanical and/or thermal loads, Mech. Materials (1993) in preparation.