



形状記憶合金のアクチュエータへの応用に関する基礎的研究 : Ti-Ni合金線の熱機械試験

豊田, 浄彦
奥村, 雅彦

(Citation)

神戸大学農学部研究報告, 17(1):91-95

(Issue Date)

1986

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/00225592>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00225592>



形状記憶合金のアクチュエータへの応用に関する基礎的研究*

— Ti-Ni合金線の熱機械試験 —

豊田 浄彦**・奥村 雅彦***

(昭和60年8月10日受理)

A BASIC STUDY ON APPLICATION OF SMA TO ACTUATOR

— A Thermomechanical Test of Ti-Ni Wire —

Kiyohiko TOYODA and Masahiko OKUMURA

Abstract

In order to reveal the most suitable operating condition of actuator as an application of Ti-Ni alloy, the thermomechanical test was done, in which a specimen was Ti-Ni wire with the diameter of 1 mm.

The range of tensile strain, in which Ti-Ni wire could show the perfect shape recovery, and recovery force have been investigated and the following observations could be made:

- (1) A specimen subjected to tensile strain under 4% showed perfect shape recovery without slip deformation.
- (2) A specimen upon pre-loading of tensile strain with 1% had A_f with 60 to 70°C and recovery stress with 150 to 200 MPa. Under pre-loading of tensile strain with 2%, a specimen showed recovery stress with 300 to 500 MPa at 100°C ($<A_f$).
- (3) Under pre-loading of tensile strain with 1%, a specimen with heat treatment for 1 hour had smaller thermal hysteresis of recovery stress and recovery stress than with heat treatment for 4 hours. However, a specimen subjected to pre-loading of tensile strain with 2 to 5 %, didn't show the distinct effect of the heat treatment time on recovery stress and thermal hysteresis.

1. 諸言

最近、機能材料として幾つかの新素材が注目を浴びている。Ti-Ni合金に代表される形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, 以下、SMAと呼ぶ。) もその一つであり、現在、用途開発に関する研究が医学、工学の分野で進められている。特に、三輪ら¹⁾はSMAの形状記憶効果 (Shape Memory Effect) を応用したSMEマニピュレータを試作した。彼らは Ti-Ni合金線を変

形拘束下で通電加熱し、その際に発生する形状回復力を駆動力として利用した。このようにSMAをアクチュエータ、すなわち、動作素子として利用することにより、同マニピュレータは従来の電気、油圧式のものに比べ、(1) パワーウェイト比に優れ、(2) 生物の動作に似た柔軟な動作が可能であり、さらに、(3) 構造・機構が単純であるなどの特徴を持つ。

また、これらの特徴から農業分野への応用も期待される²⁾。軽量で移動性に優れ、狭小な空間でも柔軟な動作が可能となり、戸外や高所での作物の管理、傷付き易い果実の柔らかな保持や作物の繁茂した温室内の薬剤散布等に適したマニピュレータが開発可能と思われる。

SMAは加熱時の逆変態 (低温相のマルテンサイト相

* 農業機械学会第43回総会

(昭和59年4月、東京農大) にて一部講演

** 農産機械学研究室

*** 現在、積水化学工業

から高温相の母相への相変化)に伴い、形状記憶効果を示し、母相で記憶した形状を回復する。低温相のSMAを変形し、拘束状態で加熱を行うと、母相での形状に戻ろうとする力が発生する。前述の様に、同マニピュレータではこの力を駆動力として利用する。SMAについては金属学の分野で材料学的な研究が進められているが、最近も全方位形状記憶効果³⁾等の新たな現象が見出され、現在もお研究の進展が期待されている。

材料としての問題はアクチュエータとしての利用面にも関係する。形状を記憶するための熱処理条件が発生力や繰り返し動作における記憶の劣化(耐久性)にどのように影響するか等、不明な点も多く、応用装置設計のためには、SMAの熱機械的特性を調べるという基礎的段階から着手しなければならないのが現状である。

そこで、本研究では Ti-Ni 合金の適切な使用条件を明らかにすることを目的に Ti-Ni 合金線の熱機械試験を行い、形状回復の可能な引張ひずみ(全伸び)の範囲と形状回復力について調べる。

熱機械試験では、次の実験 I 及び II を行う。

実験 I では Ti-Ni 合金線に加える引張ひずみと加熱による形状回復との関係を調べ、すべり変形を生じることなく形状回復の可能な引張ひずみの範囲を求める。

一般に、Ti-Ni 合金に約 7~8% 以上の変形を与え

るとすべり変形が生じ、完全な形状回復は困難とされている⁴⁾。また、すべり変形を生じ始める応力の値は同合金の組成及び熱処理条件によって大きく変化するとされている⁵⁾。形状回復の可能な引張ひずみや応力の範囲を明らかにすることは、アクチュエータとしての使用条件を知る上で必要である。

実験 II は形状回復力と温度との関係を明らかにする。アクチュエータとしては、変形拘束下で加熱した際に生じる形状回復力を利用するため、予め与えた引張ひずみ(以下、予ひずみと呼ぶ。)と加熱温度の形状回復力に及ぼす影響を把握する必要がある。

2. 実験方法及び装置

試料は原子比約 1 : 1、線径 1 mm の Ti-Ni 合金線 (A_f 点 62°C 、古河特殊金属工業製) をマッフル炉で熱処理 ($500^\circ\text{C}-1\text{hr}$ 又は $500^\circ\text{C}-4\text{hr}$) した後、供試した。

なお、線径 0.5 mm (A_f 点 63°C) の試料を補足的に供試したが、両試料の A_f 点はほぼ一致することから、同一の試料と見なしてよいものと思われる。

試料の正確な組成や線引きまでの加工処理等については素材供給メーカー側の事情から明らかでないが、ここでは、一般的に入手可能な試料と考えた。

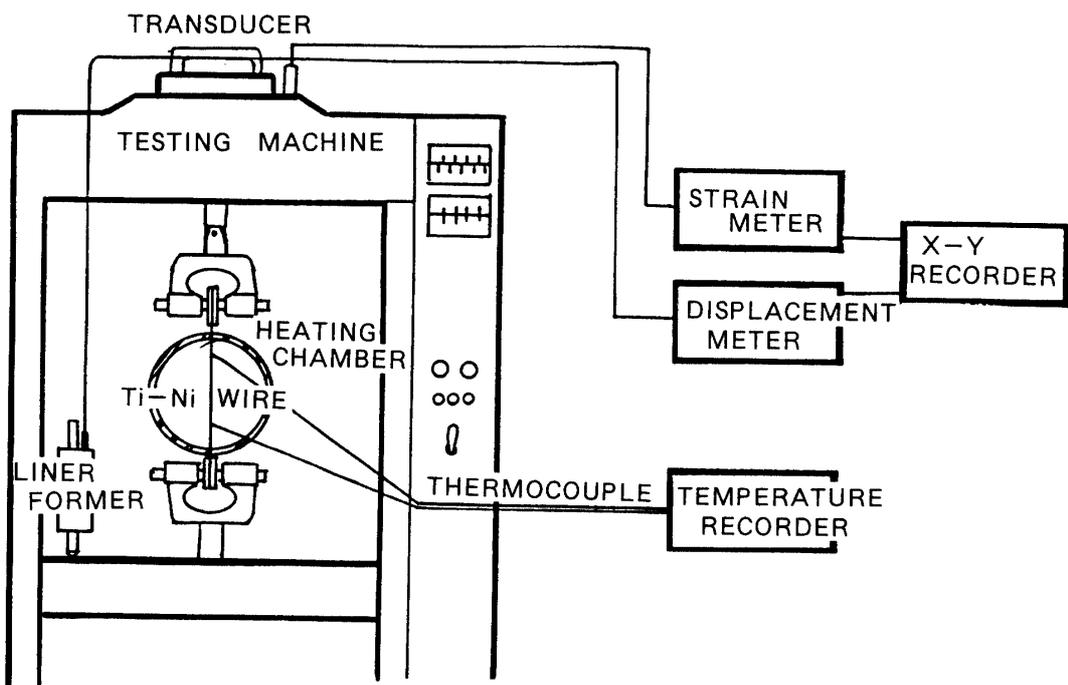


Fig. 1 Schematic diagram of tensile test

Ti-Ni 合金線の引張試験に際しては金属材料試験方法 (JIS Z-2201, 2241) を参考にした。万能型引張試験機 (テンシロン UTM-4-100, 東洋ボールドウィン製) の载荷部に Ti-Ni 合金線を取り付け, 荷重変換器 (100JF-1 F, 共和製) と動ひずみ計 (DPM-E, 共和製) により合金線の応力を, 変位計 (MODEL6023, Shinko Electric Corp.) によりひずみ (伸び) を各測定し, X-Yレコーダに記録した。試料温度の調節のためにアクリル樹脂製の透明円筒容器にヒータとファンを備えた加熱チャンバーを試作, 供試した。試料温度は線径 0.1mm の銅-コンスタンタン熱電対を試料の二か所に取り付け, 小型多点温度データ記録システム (サーモダック III, 江藤電気製) により測定

した。標点距離 15cm, 引張速度は 2.7%/min とした。実験装置の構成を Fig. 1 に示す。

実験 I では次の方法によった。最初に試料を 1% まで引張変形し, ひずみと応力を測定する。次に除荷した状態で加熱により形状を回復させる。この操作を引張ひずみ 1% から 7% まで増加しながら繰り返し, 応力-ひずみ曲線 (SS 曲線) を求める。

実験 II では引張変形した後に拘束し, 加熱により生じる形状回復力と温度との関係を求める。さらに, 実験 I と同様に, 加熱による形状回復と载荷するひずみの増加を繰り返し, 測定を行う。

3. 結果及び考察

実験 I の引張ひずみと応力との関係を Fig. 2 に示す。

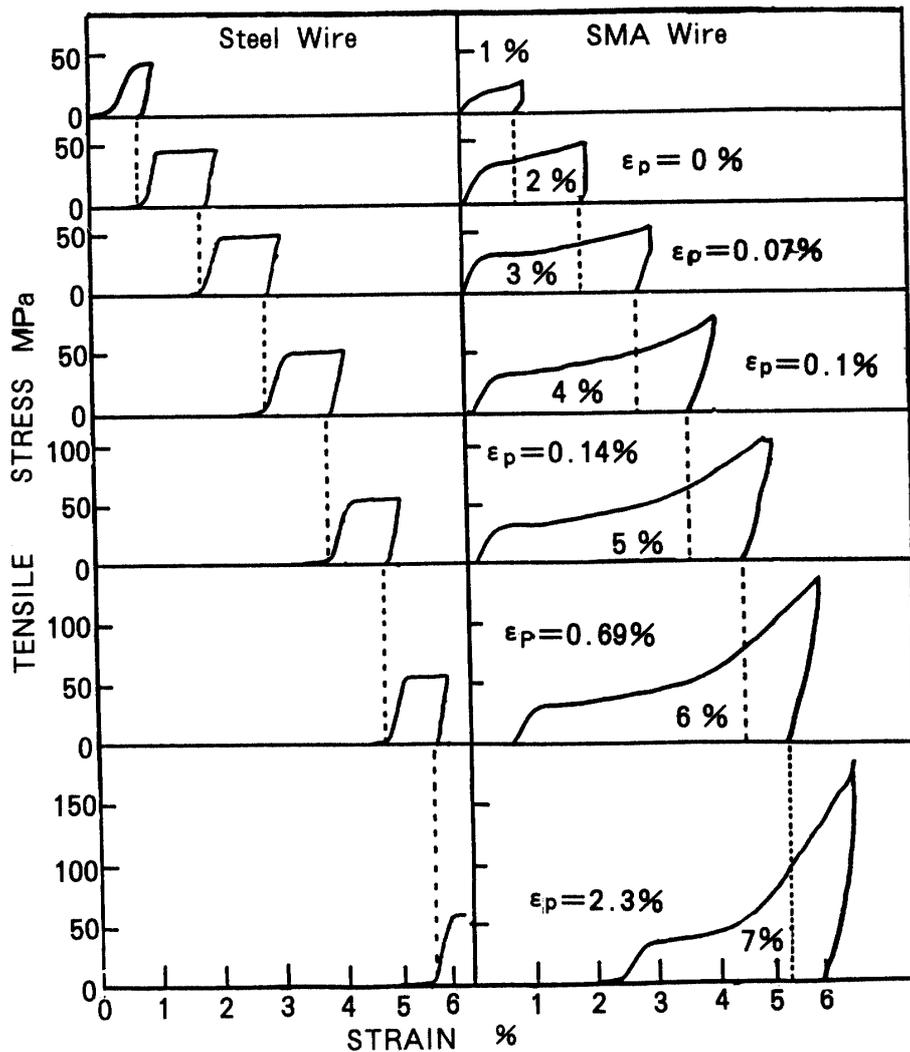


Fig. 2 Stress-strain curves of Ti-Ni wire and steel wire deformed at 292 K.

対照区として軟鋼の針金を供試し、その結果を併せて示す。針金では1%の引張りひずみを与える過程で降伏値が現れ、それ以後の変形はすべり変形となることが図より分かる。軟鋼には形状記憶効果がないため、当然ながら、除荷、加熱後も形状は回復せず、次の変形の際に、SS曲線上に残留ひずみが現れる。

一方、Ti-Ni合金線では加熱により前回変形時のひずみが解消され、形状が回復される。しかし、形状回復の可能なひずみにも限界があり、図中、引張りひずみが4%になると、残留ひずみ(ϵ_p)は0.14%となり、5%では0.69%に達する。測定上の誤差を考慮して、残留ひずみ0.2%をすべり変形が無視できなくなる目安とすれば、Fig. 2から形状回復可能な引張りひずみは4%以下と考えられる。

次に、記憶のための熱処理条件を変えた数種の試料について、残留ひずみと引張りひずみとの関係を調べ、その結果をFig. 3に示す。本間ら⁶⁾によれば、試料の組成は本実験とは異なるが、数種の温度で加熱保持時間を変え、大気中で直線形状を記憶させた場合、500°C - 4 hrの熱処理条件が最も高い形状回復率を示すという。そこで、より短時間の場合の1 hrと4 hrの場合について調べた。図中残留ひずみと引張りひずみとの関係は主に加熱保持時間により異なるが、全体として残留ひずみが0.2%より大きくなる時の引張りひずみは約4%であり、形状回復可能な引張りひずみの限界は約4%とすることが妥当と考えられる。また、これらの試料を用いたアクチュエータの使用条件として変形量を4%以下とすべきことになる。

一方、残留ひずみと応力との関係について調べた結果から、残留ひずみが生じ始める応力の値は110~170 MPaに分布し、主に加熱保持時間により変化すること

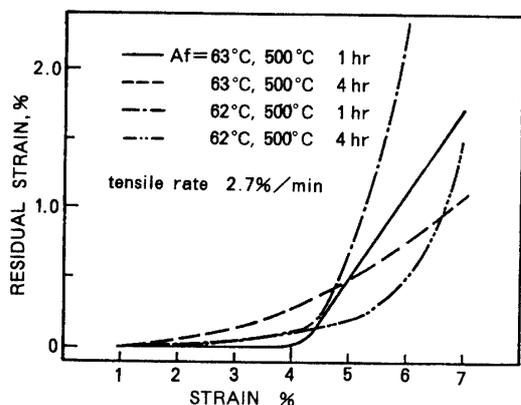


Fig. 3 Relation between residual strain and total tensile strain in a specimen deformed at 293 K.

が確認された。

実験ⅡではTi-Ni合金線に予ひずみを与えた状態で加熱、冷却、そして、除荷後の加熱による形状回復の操作を繰り返し、この間の温度と形状回復力との関係(加熱曲線及び冷却曲線)を調べた。予ひずみを1~5%とした場合の加熱曲線の例をFig. 4に示す。ただし、図では形状回復力を応力として示した。

予ひずみ1%の場合、温度の上昇に伴い、回復応力は増加し、約70°Cで飽和状態に達する。予ひずみ2%以上の場合、100°Cでも回復応力は飽和せず増加傾向にあり、その回復応力は300~500 MPaの範囲にある。試料の線径が1 mmであることから発生力は25~38 kgf程度に相当し、アクチュエータとしては30 kgf前後の力が利用できることになる。

次に予ひずみ1%と4%の場合の加熱・冷却曲線をFig. 5に示す。図中、 A_s は逆変態開始温度、 A_f は逆変態終了温度、 M_s はマルテンサイト変態開始温度、 M_f はマルテンサイト変態終了温度を表わす。Fig. 5では予ひずみが1%の場合、温度32°C付近で逆変態が始まり、70°C付近で A_f 点に達して逆変態が終了する。更に100°Cまで加熱を続けても発生応力は増加せず、

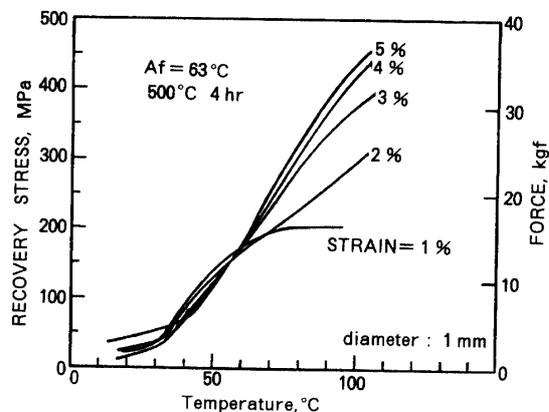


Fig. 4 Relation between recovery stress and temperature in a specimen treated at 773 K for 4 hr.

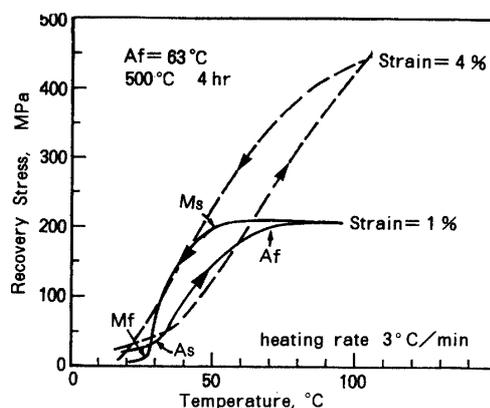


Fig. 5 Relation between recovery stress and temperature in a specimen treated at 773 K for 4 hr.

逆に冷却すると、加熱曲線に対して低温側へ遷移した経路をへて発生応力は低下し、ヒステリシスループが形成される。この温度ヒステリシスはアクチュエータの制御精度や動作速度に関係する。一般的にはこの温度ヒステリシスの小さいことがアクチュエータの動作特性上、好ましい。

熱処理における加熱保持時間を1hrとした場合の結果を Fig. 6 に示す、予ひずみ1%では加熱保持時間4hr に比べて温度ヒステリシスは小さくなる。しかし、発生応力も50MPa程度低下する。また、予ひずみ4%の場合では加熱・冷却曲線は温度ヒステリシスを示し、加熱保持時間4hr の Fig. 5 の曲線と類似する。予

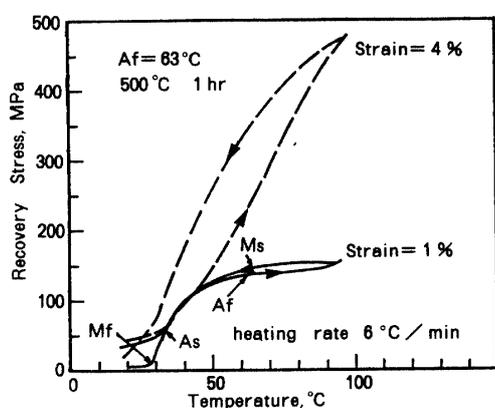


Fig. 6 Relation between recovery stress and temperature in a specimen treated at 773 K for 1 hr

ひずみが4%と比較的大きい場合では加熱保持時間の違いに関係なく、同程度の大きさの温度ヒステリシスの出現が認められた。

4. 摘要

Ti-Ni合金をアクチュエータとして使用する際の諸条件を明らかにするために線径1mmの同合金線(Af点63°C)を用い、熱機械試験を実施した。形状回復可能な引張りひずみの範囲と形状回復力について調べ、以下の知見を得た。

- 1) 完全な形状回復が可能で、すべり変形を生じない引張りひずみは本供試材料の場合、約4%以下である。
- 2) 予ひずみを1%とした場合、60~70°C付近でA_r点に達し、その時の形状回復応力は150~200MPaとなる。一方、予ひずみが2~5%の場合、100°C(<A_r点)で形状回復応力は300~450MPaとなる。
- 3) 予ひずみが1%の場合、加熱保持時間1hrの方が4hrの場合に比べ、形状回復応力の温度ヒステリシスは小さく、形状回復応力も小さい。一方、予ひずみが2~5%の範囲では、加熱保持時間の違いによる形状回復応力及び温度ヒステリシスへの影響は顕著でない。

参考文献

- 1) 三輪敬之：システムと制御，29(5)，pp.303-310，1985
- 2) 豊田浄彦：農業施設，15(3)，pp.33-35，1985.
- 3) 本間敏夫：日経メカニカル，No.143，pp.129-135，1983. 6. 20
- 4) S. Miyazaki et. al: Scripta METALLURGICA (15)，pp.287-292，1981
- 5) 大塚和弘：形状記憶合金の用途開発をめざして予稿集，p.1-6，大阪科学技術センター，1981
- 6) 本間敏夫ほか：東北大学選鉱精練研究所報告，37(2)，pp.213-222，1981