〔技術報告〕

形状記憶合金を用いた アクチュエータの冷却法と特性

橋 本 稔* 佐 藤 公 子* 満 田 顕**
奥 井 勝*** 康 吉 雄****

形状記憶合金を用いたアクチュエータの応答を改善する冷却の一方式が提案された。この方式のアルミニウム製のヒートシンクを用いることによって、形状記憶合金の冷却速度が著しく増加することが示されている。またこのアクチュエータの性能及び制御法について検討を行った。

1. はじめに

形状記憶合金¹⁾ (以下 SMA と略す) は、材料内部で熱エネルギーが力学的エネルギーに変換する機能材料で、変形を与えても一般に数 10 K 温度を上げれば熱弾性型マルテンサイトの逆変態により、完全に元の形に復帰することができる。Ti-Ni 形状記憶合金を用いれば、元の形に戻るときに、500 MPa もの大きな力と 10% 近い変位を得ることができる。さらに材料自身が伸縮するので筋肉に似た特性を有するアクチュエータになると考えられる。これをロボットに利用すれば、ロボットの大幅な軽量化と人間に近い動きの実現が期待され、いくつかの研究が行われてきた²⁻⁵⁾。Ti-Ni 合金がニクロム線と同程度の電気抵抗を有することから、これらの研究は直接通電により Ti-Ni 線を加熱し、その通電量を制御することにより、加熱温度を調整するという方法がとられている。けれども、本アクチュエータが可逆的に駆動されるためには冷却せねばならず、自然放冷では太い Ti-Ni 線になると冷却速度が遅くなるため、もっぱら線径 $\phi 0.2$ mm 程度の線材が使われてきた^{2,3)}。このような細い線材では出力が小さいために、これらを何本か並列に張って使うなどの方法もとられている^{4,5)}。しかし、この方法だと機構が複雑になるという問題があり、太い線材をそのまま使用できれば、ロボットのアクチュエータとしてきわめて有効であると考えられる。例えば、線径 $\phi 1.0$ mm の線材は、その断面積から計算すると、 $\phi 0.2$ mm の 25 倍もの回復力を出すことができる (Fig.1)。

また、線材の冷却速度は、その表面積 (放熱面積) と体積 (熱容量) の比で決まるものと考えられる。Fig.1 に示すように、 $\phi 0.2$ mm 近傍ではその値が線径により著しく変化するが、 $\phi 1.0$ mm 程度になると線径が変わってもあまり変化しない。つまり、 $\phi 1.0$ mm の線材の冷却特性は、それ以上太いものについてもほぼ共通するものと考えられる。そこで本論文では、 $\phi 1.0$ mm 程度の Ti-Ni 線について、いくつかの冷却法による冷却特性を明らかにすると共に、ヒートシンクによる冷却法を提案する。

2. ヒートシンクによる冷却法

Ti-Ni 線の冷却速度を改善することは、SMA アクチュエータの応答性を向上させる上で最も重要な課題であ

Fig.1 Sectional area-Diameter, Surface area/Volume-Diameter curves for wire

原稿受付 1986 年 1 月 28 日

* 電気通信大学短期大学部 ** マックス株式会社

*** (株)アマダ **** 富士電機株式会社

Fig. 2 Experimental system for the measurement of the cooling rate

る。これまで、Ti-Ni 線の強制冷却法としては、送風冷却法^{4,5,6)}、温水と冷水の流動制御による方法⁷⁾などが提案されている。しかしこれらの方法は、送風ファン、コンプレッサなどの装置や、それらを駆動させるためのエネルギー源を必要とし、軽量で小型であるという SMA アクチュエータの大きな特徴が失われる可能性がある。これに対して、ここで提案するヒートシンクによる方法は、特にそのための装置やエネルギー源を必要とせず、ロボット本体の構造物をヒートシンクとして利用することにより、その軽量小型性はほとんど失われない。即ち、構造物とアクチュエータが一体となった、生体の骨一筋肉系によく似た系を構成することができる。

ヒートシンクによる Ti-Ni 線の冷却効果を測定するために、Fig. 2 に示す実験装置を用いた。Ti-Ni 線は $\phi 0.8 \text{ mm}$ で、その温度測定は $\phi 25 \mu\text{m}$ の極細 CA 熱電対を Ti-Ni 線とヒートシンクにスポット溶接して行った。ヒートシンク材にはアルミニウムを用いた。Ti-Ni 線は通電により加熱されるので、ヒートシンクと Ti-Ni

Fig. 3 Section of the aluminum heat sink

線の間を、Fig. 3 のように放熱用シリコンゴムシートと放熱用シリコングリースを用いて、電気的絶縁を保ちながら放熱を行った。尚、シリコングリースは、Ti-Ni 線の伸縮時に周囲との潤滑の役割もはたしている。

Fig. 4 には 333 K からの種々の冷却方法による冷却曲線が示してある。自然放冷、送風、水冷の場合と比較して、ヒートシンクの冷却効果がきわめてよいことがわかる。自然放冷の場合の冷却速度が 0.7 deg/s であるのに対して、ヒートシンクを用いると 21 deg/s と 30 倍の冷却速度になる。ここでの冷却速度は、立ち下がり時間でその間の温度変化を割ることにより求めた。立ち下がり時間は、応答が定常値の 10% から 90% になるまでの時間を用いた。 $\phi 0.2 \text{ mm}$ の Ti-Ni 線の場合には、 0.1 m/s の送風冷却で十分冷却効果があることが報告されている⁶⁾が、 $\phi 0.8 \text{ mm}$ の場合 1.0 m/s の送風でもあまり冷却速度が改善されない。また 2.0 m/s まで風速を変えたが、 1.0 m/s 以上では風速を変えてもほとんど冷却速度には変化がなかった。つまり、 $\phi 0.8 \text{ mm}$ 程度の太い Ti-Ni 線に対しては、送風冷却によりある程度冷却速度が改善されるものの、十分な冷却速度を得ることができず、ヒートシンクや水による冷却が必要であると考えられる。

一方冷却速度が大きいと、逆に加熱効率は低下するものと考えられ、その加熱効率を測定した結果が Fig. 5 である。これは 3 A の一定パルス電流を 2 秒間流した時の加熱冷却曲線を示したもので、それぞれの加熱時の温度曲線を比較することにより、その相対的な加熱効率を知ることができる。これより、ヒートシンクを用いると、空冷に比べて著しく加熱効率が低下することがわかる。このことは、 $\phi 0.2 \text{ mm}$ 程度の細い線材を空冷する場合でも、同程度の冷却速度を得ようとするならば、効率は同じように低くなるものに考えられ、これらの方法で冷却速度を上げるためには、効率の低下は止むを得ないものと思われる。

Fig. 4 Cooling curves of $\phi 0.8 \text{ mm}$ Ti-Ni wire in various cases of the cooling method

Fig. 5 Temperature changes of Ti-Ni wire in case of the constant input power

次に、ヒートシンクの設計法について検討する。ヒートシンクの設計は、熱サイクルの温度範囲と Ti-Ni 線の熱容量に基づいて、必要とする冷却効果を得られるヒートシンクの放熱面積及び熱容量を求めることである。一般に熱サイクルは、マルテンサイト変態終了温度 (M_f) とその逆変態終了温度 (A_f) との間で繰り返される。応答性を向上させる上で重要なことは、Ti-Ni 線の温度がこの温度範囲を越えないようにすることである。加熱時に温度を A_f より高くすると冷却速度が減少し、逆に冷却時に M_f より下がりすぎると加熱時の応答にむだな時間が生ずる。それゆえ、ヒートシンクの温度は M_f 点直下で一定になることが望ましい。一般にアクチュエータとして使われる Ti-Ni 線の変態点は、その冷却効果が高めるために比較的高温のものが用いられる。例えば、本研究で用いたものは、 M_f が 310 K で A_f が 358 K である。

ヒートシンクの放熱面積はヒートシンクの温度を決め、ヒートシンクの熱容量はその温度の安定性を決めるものと考えられる。しかし、その定量的な関係は、Ti-Ni 線とヒートシンクの間に放熱用シートやグリースがあるため、複雑で理論的に解析しにくい。そこで、ここでは実験的に、ヒートシンクの熱容量及び放熱面積の効果を検

Fig. 7 Temperature changes of Ti-Ni wire and heat sink in case of the constant current (4 A)

Fig. 6 Cooling curves of Ti-Ni wire with various heat sinks

討した。

Fig. 6 に、種々の断面形状 (10 mm×10 mm, 20 mm×20 mm, 30 mm×30 mm) を持つヒートシンクによる冷却効果の相違を示した。測定は Fig. 2 に示された方法で行った。ヒートシンクの断面形状が小さいほどヒートシンクの温度が上昇するため、平衡になる温度は上昇するが、冷却速度はあまり悪くなっていない。次に、長時間一定パルス電流 (4 A) を流した時の Ti-Ni 線とヒートシンクの温度変化を測定した (Fig. 7)。熱容量及び放熱面積が小さいものほど、Ti-Ni 線、ヒートシンク共に温度上昇が激しい。しかし、ここで電流を止めると、どのヒートシンクの場合も Ti-Ni 線はヒートシンクの温度付近まで急速に冷却された。そして、Ti-Ni 線の温度はヒートシンクの形状により大きく異なるものの、

Fig. 8 Temperature changes of heat sink when the temperature of Ti-Ni wire is maintained at 353 K

Fig. 9 Schematic representation of the heat sink with fin and ventilation

Ti-Ni 線とヒートシンクの温度差はあまり変わらない。Ti-Ni 線の温度を 353 K で一定になるように温度制御した場合、ヒートシンクの温度の時間変化を Fig. 8 に示してある。定常温度に達するまでの時間はヒートシンクの形状により異なるが、その定常温度はあまり変わらない。10 mm×10 mm の断面形状のもののヒートシンクの定常温度は 310 K 程度で、Ti-Ni 線との温度差は 40 deg 程度であった。また、実際の使用時には、Ti-Ni 線は 353 K で一定に保持されるのではなく、加熱冷却を繰り返すことを考えると、ヒートシンクの温度上昇はさらにおさえられるものと思う。

以上の実験から、 $\phi 0.8$ mm の Ti-Ni 線に対して、断面 10 mm×10 mm のヒートシンクでも比較的良好な冷却効果が得られ、この場合のヒートシンクの放熱面積と Ti-Ni 線の熱容量（体積）の比は、80 mm⁻¹ 程度となることがわかった。

次に、実際に Ti-Ni 線を用いたアクチュエータを作動させるには、更に冷却効果が良いことが望ましいので、

Fig. 11 Temperature changes of heat sink with fin when the temperature of Ti-Ni wire is maintained at 353 K

Fig. 10 Temperature changes of Ti-Ni wire and heat sink with fin in case of the constant current (4 A)

10 mm×10 mm のヒートシンクにフィンを取り付け、それを送風により冷却するという方法 (Fig. 9) の実験を行った。Fig. 7 の実験と同じ条件で通電した結果が Fig. 10 に示してある。この方法を用いることにより、ヒートシンクの温度上昇が抑制され、よい冷却効果を得ることができた。本条件の場合には、2 m/s 程度の送風でヒートシンクの温度上昇が殆んど無くなっていることがわかる。以上は一定電流を流した場合であるが、 A_f 点よりやや低い 353 K に Ti-Ni 線の温度を保った場合のヒートシンクの温度変化を測定した結果が、Fig. 11 である。送風することにより、長時間の使用に対しても、ヒートシンクの温度は 310 K 程度で安定することがわかった。しかしながら、フィンをつけて送風を行うことは、アクチュエータの小型化・軽量化を目的とする場合には問題が残る。

3. ヒートシンクを用いたアクチュエータの特性と制御法

SMA アクチュエータの特性を測定し、制御法を検討するために、Fig. 12 に示す 1 関節の SMA アクチュエータを試作した。これは、Ti-Ni 線、バイアスバネ、プーリ、ヒートシンクから構成されている。バイアスバネ

Fig. 12 Structure of the SMA actuator

Fig. 13 Step responses of angle at heating (a) and cooling (b)

は、冷却時に Ti-Ni 線を元の形状に変形させるためのものである。Ti-Ni 線は $\phi 0.8 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$ を用い、圧着端子でステンレス線につながれ、その端がリンクに固定されている。プーリの有効直径は 8 mm である。ヒートシンクはアルミニウム製の本体に接続され、本体が放熱の役割を果たすようになっている。Ti-Ni 線を加熱するためのパルス電流は、波高値 15 A、周波数 200 Hz である。一定電流を Ti-Ni 線に流して加熱・冷却を行うと、通電量により Fig. 13 のように関節角度は変化する。

Fig. 15 Comparison of the responses between the feedback control and the constant electric current for various object angles

Fig. 14 Flow chart for the control of the SMA actuator

る。これより通電量により到達角度が変わることがわかるが、到達角度が小さくなるにつれ、その角度に達するまでの時間が長くなっている。例えば、デューティー比（パルス周期に対するパルス ON 時間の割合）0.53 のときは、8 deg 回転するのに 10 s 程度もかかっている。これでは、ロボットのアクチュエータとしては応答が遅いので、マイクロコンピュータにより Fig. 14 のようなフィードバック制御を行った。回転角はポテンシオメータにより測定される。Fig. 14 のフローチャートは、目標

Fig. 16 Static torque-angle-duty ratio curve. The positive and negative values of torques denote those of torques generated at the heating and the cooling, respectively

角が一つ前のそれよりも大きい場合の制御法を示している。立ち上がり時間を短くするために、目標値に達するまでは大きなデューティ比 (D1) の電流を流す。目標角に達したところでオン・オフ制御を行う。その時に流す電流のデューティ比 D3 は D1 より小さなものとする。D1 および D3 の値は、系統的な実験により Fig. 14 内に示す値に決めた。目標角が一つ前のそれより小さい場合は D1 がゼロとなり D2 と D3 が入れ替えられる。この制御法は応答速度を上げるために、目標角に達するまでは最大または最小のデューティ比 (D) を用いるところに特徴がある。この方法でさまざまな目標角に制御した場合の応答曲線を Fig. 15 に示した。目標角が 25 deg の場合の立ち上がり時間は約 0.4 s で、制御精度もきわめて良いことがわかる。けれども簡単な制御法なので、目標角によっては小さなオーバーシエートも存在する。

SMA アクチュエータの発生トルクは、その角度とデューティ比によって Fig. 16 のように変化する。トルクがその角度によって変わることから、本アクチュエータが筋肉のようなソフトな特性を有していることがわかる。トルクの向きによってその特性が大きく異なるのは、バイアスパネを用いているためである。負のトルクの大きさは、Ti-Ni 線が冷却され、バイアスパネによってトルクが発生するため、パネの強さに依存する。したがって、バイアスパネを用いた SMA アクチュエータをロボットに応用しようとする場合、その応答や出力の異方性を

を十分考慮して設計する必要がある。

4. お わ り に

Ti-Ni 線を用いたアクチュエータの応答速度改善の一方策として、ヒートシンクを用いた冷却法を提案し、その有効性を示すと共に、ヒートシンク設計法について考察した。そして、それを用いた SMA アクチュエータを試作し、その特性を調べ制御法を検討した。その結果、SMA アクチュエータにはヒートシンクを用いることはきわめて有効であるが、これをロボットに応用する場合には、バイアスパネの代りに Ti-Ni 線を用いた差動式アクチュエータを用いた方が、応答や出力の異方性が改善されると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 例えば, C. M. Wayman, "Shape Memory Effects in Alloys" ed. J. Perkins, pp. 1-28 Plenum Press, 1975
- 2) 栗林, "形状記憶合金を用いた位置制御", システムと制御, Vol.27, No.9, pp. 589-597, 1983
- 3) 本間, 三輪, 井口, "形状記憶効果によるマイクロマニピュレータ", 精密機械, Vol.50, No.2, pp. 377-382, 1984
- 4) 野中, 本間, 井口, "形状記憶合金を利用したマニピュレータの開発", 日本ロボット学会第1回学術講演会予稿集, pp. 211-212, 1983
- 5) 細田, 藤江, 小島, "形状記憶合金を応用した3本指ロボットハンド", 同上, pp. 213-214, 1983
- 6) 本間, 野中, "形状記憶アクチュエータの冷却法と動作速度", 同上, pp. 211-212, 1983
- 7) 本間, 野中, "温流体回路で動作する形状記憶アクチュエータシステム", 同上, pp. 163-164, 1983

橋本 稔
(Minoru HASHIMOTO)

昭和 55 年東京大学大学院金属材料学専攻修士課程修了, 昭和 57 年同大学院博士課程中退, 同年電気通信大学短期大学部通信工学科通信機械コース (現, 電子工学科電子機械工学コース) 助手, 現在に至る。

昭和 58 年工学博士,

形状記憶合金, 水素吸蔵合金などの機能材料のロボットへの応用技術に関する研究に従事。

計測自動制御学会, 日本金属学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

満田 顕 (Ken MITSUDA)

昭和 59 年電気通信大学電気通信学部機械工学第二学科卒業, 同年マックス株式会社開発部入社, 現在に至る

康 吉雄 (Yoshio KŌ)

昭和 60 年電気通信大学電気通信学部機械工学第二学科卒業, 同年富士電機入社, 現在に至る。(日本ロボット学会正会員)

佐藤 公子 (Kimiko SATŌ)

昭和 22 年津田塾専門学校 (理津田塾大学) 物理化学科卒業, 昭和 22 年より昭和 43 年まで東京工業大学金属工学科に勤務, 昭和 43 年電気通信大学短期大学部助教授, 昭和 47 年 同大同大学部教授, 電子工学科電子機械工学コース所属, 金属材料の熱処

理および加工の研究に携わっていたが, 最近機能材料のロボットへの応用に関する研究を始める。昭和 37 年工学博士, 日本金属学会, 日本鉄鋼協会会員。(日本ロボット学会正会員)

奥井 勝 (Masaru OKUI)

昭和 59 年電気通信大学電気通信学部機械工学科卒業, 同年株式会社アマダ技術本部塑性開発部入社, 現在に至る。

(日本ロボット学会正会員)

Cooling Method and Characteristics of an Actuator with a Shape Memory Alloy*

Minoru HASHIMOTO**

Kimiko SATŌ**

Ken MITSUDA***

Masaru OKUI****

Yoshio KŌ*****

ABSTRACT

A method of cooling which improves the response of the actuator using a Ti-Ni shape memory alloy is proposed. It is shown that the cooling rate of the shape memory alloy increases remarkably by the use of the aluminum heat sink. The characteristics of the new actuator are described.

Key words : Shape memory alloy, Cooling Method, Ti-Ni alloy, Heat sink, Actuator

* Received January 28, 1986

** The Univ. of Electro-Communications, Junior Technical College.

*** AMADA Co., LTD.

**** MAX Co., LTD.

***** FUJI Electric Co., LTD.