

# 金属系人工筋肉バイオメタルファイバーの 温度特性に関する研究

竹本 幸平<sup>1</sup>・田中 雄大<sup>2</sup>・青木 照子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>電気電子情報専攻・<sup>2</sup>制御情報工学

形状記憶合金(SMA)を原料にしたバイオメタルファイバー(BMF)は、新材料として注目されている。SMAに比べて、形状的に安定しており、加熱や通電で筋肉のように収縮し、冷却すると元の長さに戻る特性を持っている。長さ方向にのみ収縮運動する繊維状の人工筋肉型アクチュエータである。本研究では、細くて、運動ひずみの大きいBMFを電氣的に制御する障害者支援機器用アクチュエータの開発を目的としている。そのために、BMFの加熱や通電による温度特性を調べる。恒温槽内で、BMFの通電、非通電加熱実験を行い、BMFの変位量、抵抗、温度などを測定し、電流値と抵抗、温度と変位の関係を求めた。その結果、アクチュエータとしてBMFの能力を最大限に取り出すためには、BMFに適正負荷をかけ、発熱量を考慮して通電加熱する必要があることが分かった。

**キーワード:** バイオメタル(BMF)、形状記憶合金(SMA)、アクチュエータ、人工筋肉

## 1. 緒言

近年、知的材料として注目されている形状記憶合金(Shape Memory Alloy: SMA)を用いたアクチュエータに関する様々な研究<sup>1,2,3</sup>が盛んに行われている。特に、ロボット開発における人工筋肉としての使用には目を見張るものがある。SMAは多結晶であるため、最大限の変位を引き出すためには、焼きなましをして結晶を大きくする必要がある。しかし、結晶の大きさや方向が一定でないため、組織的に不安定であり、繰り返し動作に問題がある。このSMAを改良し、高度な異方性を持つ、繰り返し動作に強い、優れた性能を発揮する新素材として、金属系人工筋肉バイオメタルファイバ(BioMetal Fiber: BMF)が開発<sup>4</sup>された。BMFは、Ti-Ni系形状記憶合金を原料とした、筋肉のように自分で緊張収縮、弛緩伸張する繊維状のアクチュエータである。一般的なSMAは異なり、2方向性形状記憶効果(Shape Memory Effect: SME)が大きいので、室温でも安定した動作をする。BMFは、室温でナイロン糸のようにしなやかであるが、電流を流すと強い力で収縮しピアノ線のようにびんと張る。このBMFの特性<sup>5,6</sup>を利用した小型の様々な製品が試作・販売されている。

本研究では、恒温槽を用いて、BMFの引張試験を通電、非通電において行い、BMFの変位量、抵抗や温度を測定し、電流値と抵抗、温度と変位の関係などを調べた。その

結果、BMFの温度特性から、通電加熱によるSMEを利用したアクチュエータ開発の可能性を検討した。

## 2. バイオメタルBMF

本研究で使用のBMFは、トキ・コーポレーション(株)製である。線径が細く、 $50\mu$ 、 $75\mu$ 、 $100\mu$  および  $150\mu$  mのものが市販されている。線径が細いので加熱後の冷却は非常に冷めやすく応答性がよい。 $\phi 0.5\text{mm}$ のシャープペンシルの芯と比較したものを図-1に示す。

BMFは、運動方向(引張り方向)に特化して組織化された構造を持つ。通電すれば収縮し、通電を停止すれば伸張する。このように2方向性形状記憶効果により、低温時と高温時に引張り方向に特化して運動ひずみを取り出すことができる。繰り返し動作に対して寸法的に非常に安定性がよく、100万回の繰り返し動作でも長さはほとんど変化しない。同様に、繰り返し動作による運動ひずみの減少もほとんどなく、破断までの動作寿命が長い。BMFは一般のSMAと比較して多くの優れた特性を有しているが、大きなものを動かす場合には適さない。

BMFはミリ・アクチュエータやマイクロ・アクチュエータへの応用が有効である。BMFの単位面積当たりの発生力は大きい、大きいものを動かす場合には、線径が

細いために寸法効果が小さく、性能的な利点がない。大きな力を出すことは、荷重を均等にし、応答性を確保して、BMFを複数本用いれば可能である。

### 3. 実験方法

#### (1) 試験片

BMFは、トキコーポレーション(株)製の線径150 $\mu$ m、試験片部長さを200mmとし、引張試験時のスリップ防止のため、両端を圧着端子で固定した(図-2)。

#### (2) 実験装置

本実験は、実験温度を制御するためにヤマト科学(株)の恒温槽、送風定温恒温器DK63内で行う。図-3は、恒温槽内の実験装置である。引張り試験機にBMFを設置し、BMF下端圧着端子に負荷をかけるための錘をのせるための受け皿(図-4)をS字フックで吊るした。受け皿は、バランスを取るために、4点に穴を開け、同じ長さの糸を通して、S字フックに引っ掛けた。

BMFへの通電は、直流安定化電源装置PW18(KENWOOD製)を用い、恒温槽外からリード線(青線)を接続した。抵抗値を測定する際も同様の方法でBMFの両端にリード線を接続して測定した。抵抗値はリード線の抵抗値0.8 $\Omega$ を測定値から引いた値とした。恒温槽内の試験片周辺温度を測定するために、熱電対を試験片の周りに設置し測定した。

#### (3) 実験手順



図-1 BMF

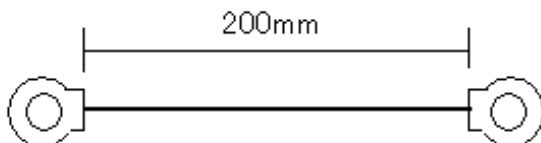


図-2 BMF 試験片

#### a) 非通電引張り試験

非通電時のBMFの温度特性を調べる。BMFの温度と変位量および抵抗値を測定する。

BMFは、引張り試験機の金属シャフトに引っ掛けて吊るす。BMFに適正可動負荷100MPaの応力がかかるように錘を受け皿に載せた。BMFは通電せず、恒温槽の温度を上昇させることによってBMFを加熱し動作させた。BMF周辺の雰囲気温度をBMF温度として測定した。恒温槽内温度は、室温から上昇させた。室温から323Kまでは、BMFにほとんど変化が見られなかったため10K刻みで温度を上昇させた。323Kから373Kまでは5K刻みで上昇させた。恒温槽内の温度が一定になってから5分後に、抵抗値と変位量を測定し、次の温度に上昇させた。温度上昇中に抵抗値や変位量に大きな変化が現れた場合は、その時点での温度と抵抗値および変位量を測定した。

一度測定したら恒温槽の扉を開け、時間を置いて試験

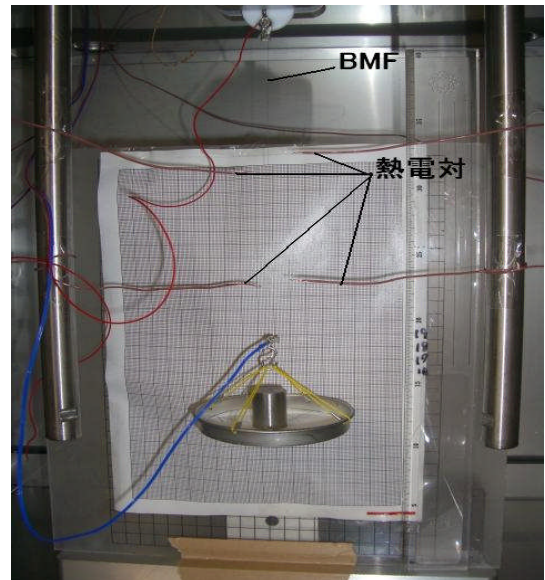


図-3 恒温槽内の引張実験装置

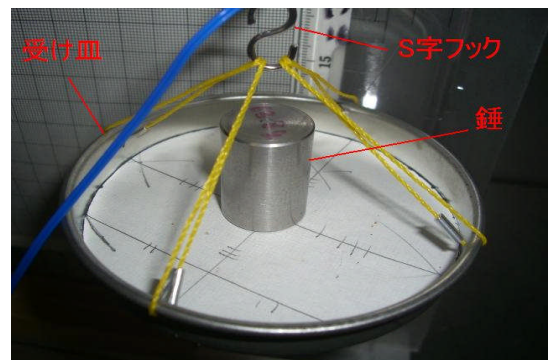


図-4 BMF 負荷装置

片を冷まし、炉内温度が室温になったことを確認して再び実験を開始した。

b) 通電引張り試験

BMFの通電電流値と抵抗値の関係を調べる。非通電引張り試験と同様に恒温槽内の引張り試験機にBMFを吊るし、BMFに負荷をかけ、図-5に示すように定電流電源装置によりBMFを通電加熱してBMFを動作させた。引張り試験機の金属シャフトと受け皿のS字フックのBMFとの接触部分はポリイミド絶縁テープを巻いて絶縁した。通電電流値は0.2A, 0.25A, 0.3Aとし、通電時間を計測しながら通電し、デジタル電圧計の値を動画で撮影し、測定した。電圧値は試験終了後動画から読み取った。通電電流値と電圧値から経過時間ごとの抵抗値を算出した。実験は槽内の温度を室温一定にして行った。

c) 無負荷通電加熱試験

無負荷状態のBMFの通電電流値と抵抗値の関係を調べる。恒温槽内にBMFを設置し、無負荷状態で、定電流電源装置を用いて通電加熱し抵抗値を測定する。通電電流値0.2A, 0.25A, 0.3Aを通電した。恒温槽に絶縁した板を敷き、その上にBMFを設置した。槽内温度は室温一定とした。

4. 実験結果と考察

(1) 非通電引張り試験

恒温槽の温度を変化させ、BMFの温度とその温度における変位量と抵抗値を測定し、BMFの変位量の温度特性と抵抗の温度特性を求めた。BMFそのものの温度を測ることが困難なため、熱電対で測定したBMF周辺の雰囲気温度をBMF温度とした。また、適正負荷を確認するために、50MPa, 65MPa, 80MPa, 95MPa, および120MPaの5段階の応力を負荷して実験を行った。

a) 変位量の温度特性

図-6は95MPaの場合の変位量の温度特性である。図から分かるように、加熱時は、341K付近で収縮を開始(As')し、352K付近で収縮を終了(Af')している。さらに、冷却時は、弛緩伸張は346K付近で始まり(Ms'), 弛緩伸張の終了(Mf')は335K付近である。図からも確認できるように、加熱後の冷却において、ヒステリシス現象が表れているが収縮と弛緩伸張のいずれにおいても、10K以内で大きな変化が起きていることが分かる。その変化を示す最大収縮量は4.77%であった。

図-7は、50MPa, 95MPa, 120MPaの場合の変位量の温度特性を示す。図から分かるように、3つの場合を比較すると、最大変位量は95MPaの場合4.77%で一番大きい

値を示した。50MPaの場合は3.29%, 120MPaの場合は3.63%であった。これは、50MPaの場合、応力が小さいのでひずみも小さく、BMFの機能を十分引き出すには応力が不足しているものと考えられる。120MPaの場合は応力が大きすぎてBMFの性能が損なわれたものと考えられる。

As', Af', Ms' および Mf' は50MPaと95MPaはほぼ同じ値を示しているが、120MPaの場合は、95MPaの場合のおよそ10K大きい値を示した。これは、120MPaの場合、過重応力であることが考えられ、そのために、温度に対する反応が遅くなったのではないかと推察する。

図-8は、応力と最大変位量の関係を示している。50MPa~120MPaの場合、最大変位量は3.3%~4.5%であった。

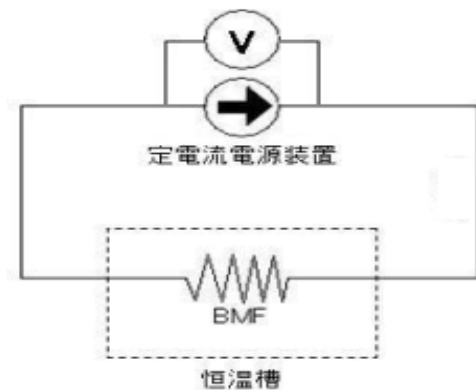


図-5 BMFの通電装置

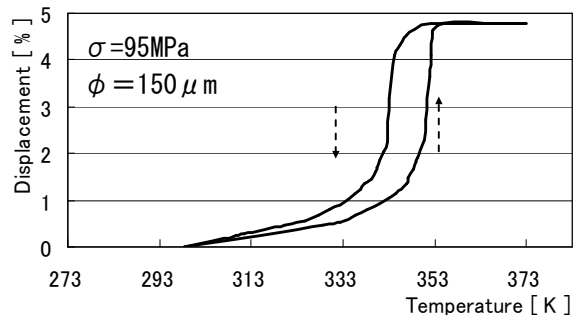


図-6 変位量の温度特性(σ=95MPa)

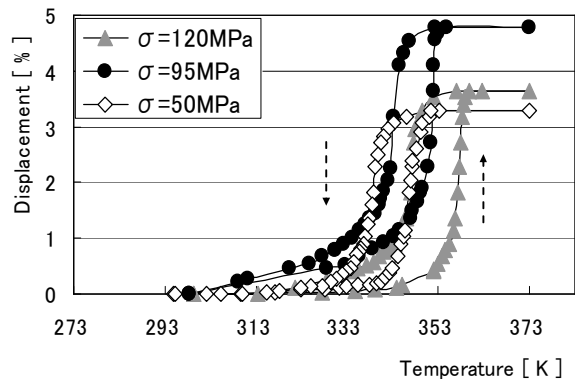


図-7 変位量の温度特性 (負荷応力による比較)

95MPa の場合に変位量が最大となった。50MPa から95MPa までは、応力が大きくなると変位量は大きくなった。しかし、120MPa の場合は、変位量が95MPa の場合より小さい値を示した。このことから、 $\phi 150\mu\text{m}$  の BMF の最適負荷応力は95 MPa 程度であると考えられる。

b) 抵抗の温度特性

図-9 は、95MPa における抵抗の温度特性である。抵抗値は単位長さ(1mm)あたりの値で示した。

抵抗値は温度を上昇させると、341K(As') 付近で減少し始め、352K(Af') で最も小さい値を示した。次に、温度を下降させると、346K(Ms') 付近で抵抗値が上昇し始め、335K(Mf') 付近で元の抵抗値に戻った。抵抗の温度特性は、変位量の温度特性と逆の傾向を示すことがわかった。

BMF の変位量が小さいところでは抵抗値が大きくなり、変位量が大きくなると、抵抗値が小さくなる。これは、BMF が弛緩伸張すると、BMF の断面積が小さくなるので、単位面積あたりの抵抗値が大きくなり、逆に、BMF が収縮すると、BMF の断面積が大きくなるので、単位面積あたりの抵抗値が小さくなるためと考えられる。

図-10 に、負荷応力(50 MPa, 95MPa, 120 MPa)が変化した場合の抵抗の温度特性を示す。図からどの応力においても同様の傾向が確認できた。ただし、120MPa の場合ヒステリシスが大きいことが分かる。図-11 に、95MPa の場合の変位量と抵抗値の関係を示す。この図から、BMF の変位量と抵抗値は、直線的減少関数を示すことが分かった。

(2) 通電引張り試験

恒温槽内で引張り試験を行った。BMF に適正負荷応力95 MPa を負荷し、定電流電源装置を用いて通電加熱した。通電時間と抵抗値を測定し、通電加熱による応答性を調べた。

図-12 に、通電電流値ごとの通電加熱時間と抵抗値の関係を示す。図からわかるように、0.2A の定電流値で通電加熱開始後、徐々に抵抗値が減少し、9.2 秒経過後、抵抗値は0.053 $\Omega$  付近でほぼ一定となった。このことから、通電を開始してから約9秒で BMF の変形が終了することが分かる。通電電流値が0.25A と0.3A の場合、応答速度は極めて速く、1.3~1.4秒で抵抗値は0.046~0.047 $\Omega$  で安定し、抵抗値が一定になるまでの時間に大きな差はなかった。0.2A の場合より0.25A および0.3A の場合のほうが、応答性がよく、しかも大きな変位量を得ることができていることが分かった。0.1A の場合、BMF は全く動作しなかった。これは、通電による熱量が小さすぎて、BMF が収縮する温度約341K に達しなかったためと考えられる。

BMF を通電してアクチュエータとして使用するには、

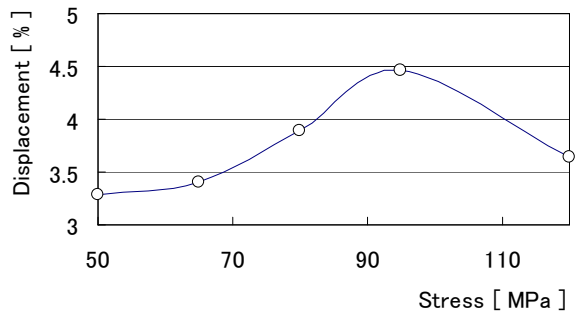


図-8 負荷応力と最大変位量

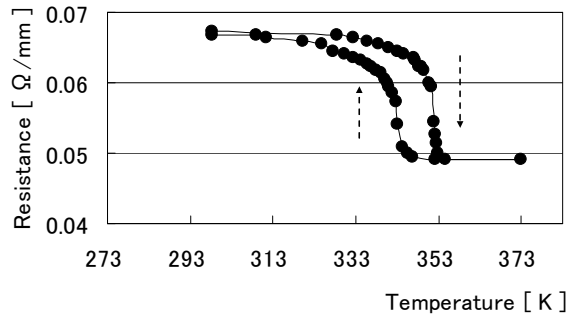


図-9 抵抗の温度特性 ( $\sigma = 95\text{MPa}$ )

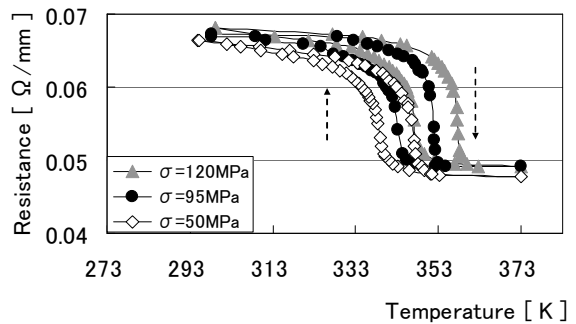


図-10 抵抗の温度特性 (負荷応力による比較)

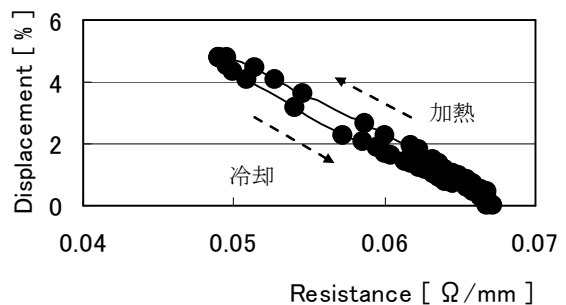


図-11 抵抗値と変位量の関係( $\sigma = 95\text{MPa}$ )

通電電流値は0.2Aよりも0.25Aあるいは0.3Aのほうが、変位量が大きく応答性もよいので適している。0.25Aと0.3Aでは抵抗値に大きな違いがないので、加熱を防ぐためは0.25Aの方が適していると考えられる。

(3) 無負荷通電加熱実験

無負荷状態のBMFを、0.2A、0.25A、0.3Aの定電流値で通電加熱した場合の通電時間と抵抗値を測定する。無負荷の状態で加熱し最も収縮したとき、そのBMFの最大可動範囲が分かる。これによって、負荷をかけたBMFを加熱によって最大可動範囲まで動作させているかどうか分かる。

図-13に、無負荷時の通電時間と抵抗値の関係を示す。0.2Aの場合、0.25Aおよび0.3Aと比較して、抵抗値の変化が小さい。0.25Aと0.3Aでは、抵抗値の変化が大きく、その値に大きな違いは見られない。この傾向は通電引張試験の結果(図-12)とほぼ同じである。負荷がかかっている状態で、通電前の抵抗が小さいことがわかる。

図-14~16に、適正負荷応力95MPaを負荷した場合の通電時間と抵抗値の関係を通電電流値ごとに比較したものを示す。通電電流値に関わらず、無負荷状態の方が通電開始時の抵抗が小さく、抵抗値の変化は緩やかになっている。しかし図から分かるように、加熱して安定した

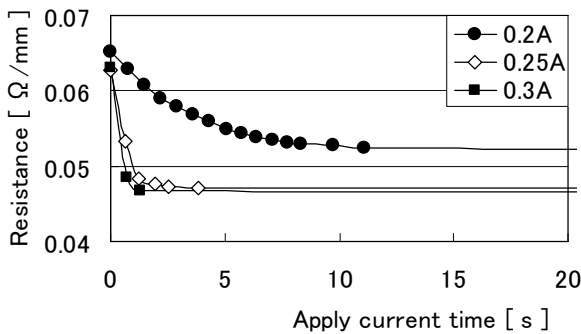


図-12 通電時間と抵抗値の関係 (σ=95MPa)

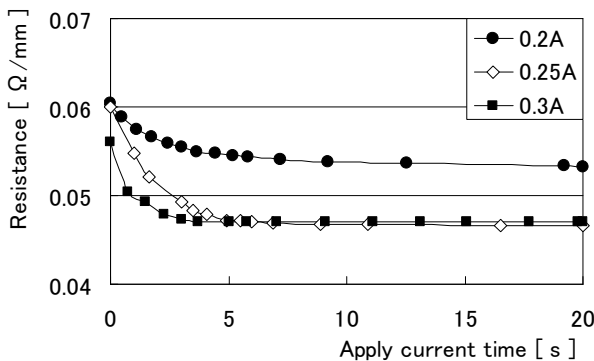


図-13 無負荷時の通電時間と抵抗値の関係

ときの抵抗値は、若干のずれはあるがほぼ同じ値を示している。これより、負荷95MPaをかけた状態では、そのBMFの限界まで収縮できていることが分かる。また、図の傾向から、負荷をかけた方が、動作の応答性も良いことが分かった。

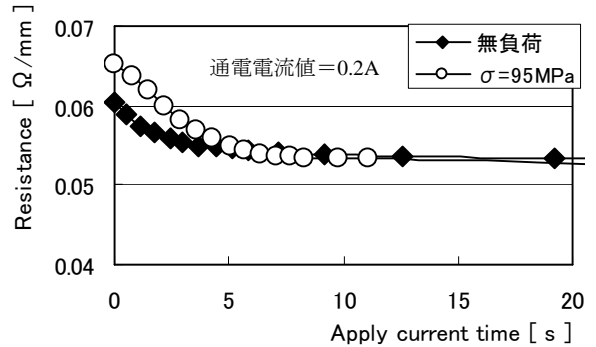


図-14 0.2Aの場合の通電時間と抵抗の関係 (無負荷時とσ=95MPaの比較)

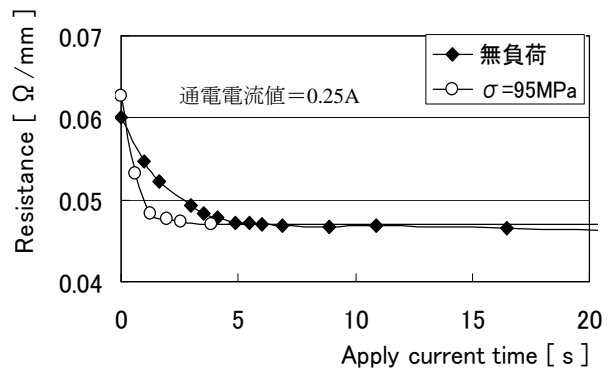


図-15 0.25Aの場合の通電時間と抵抗の関係 (無負荷時とσ=95MPaの比較)

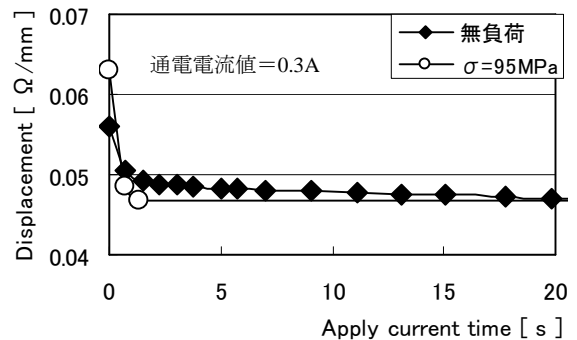


図-16 0.3Aの場合の通電時間と抵抗の関係 (無負荷時とσ=95MPaの比較)

## 5. 結言

金属系人工筋肉バイオメタルファイバ BMF の温度特性を調べた。その結果得られた主な結果を次に示す。

- (1) BMF は加熱時に約 341K(As')で収縮を開始し、約 352K(Af')で収縮を終了する。冷却時は弛緩伸張が 346K(Ms')で始まり、335K(Mf')で終了する。
- (2) BMF を通電加熱し収縮した後、通電を停止して冷却していくと、変位量においても抵抗値においても温度特性にヒステリシス現象が現れ、変位量と抵抗値はほぼ逆の関係にあることが分かった。
- (3) 適正負荷(95MPa)をかけて、加熱・冷却した場合、収縮・弛緩伸張の応答性は、ほぼ無負荷時と同じ特性を示し、非常に応答性がよいことが分かった。
- (4) アクチュエータとして BMF の能力を最大限に取り出すためには、BMF に適正負荷をかけ、発熱量を考慮して通電加熱する必要があることが分かった。

## 参考文献

- 1) 岡田直樹 中尾友宣：『形状記憶材料（SMP, SMA & SMC）の形状回復力』大分工業高等専門学校制御情報工学科平成19年度卒業研究
- 2) 宮崎敦夫, 峯村章, 湯浅憲豊, 中里裕一：小型リハビリテーション機器のマイクロ SMA アクチュエータの開発, 日本機械学会福祉工学シンポジウム講演論文集 2006, pp218-219(2006)
- 3) 宮崎修一, 友澤方成, プエンコンセホ ピオ, 金熙榮：形状記憶合金薄膜を用いたマイクロアクチュエータと関連技術, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集(1), pp181-182(2007)
- 4) トキコーポレーション(株), <http://www.toki.co.jp/Index.html>
- 5) 本間大：「機能異方性形状記憶合金の開発と応用」にまつわる話, 精密工学会誌 Vol.75, No.6, pp699-701(2009)
- 6) 前田剛, 渡邊健司：作りたい 動かしたい 身近に楽しむロボットの製作(7)新しい機能材料 “バイオメタル” とロボット, 新電気,(11), (755), pp104-108(2004)