

歯科矯正用 NiTi 超弾性アーチワイヤの CNC 加熱曲げに関する応用研究

東京医科歯科大学 医歯学総合研究科、先端材料評価学分野
助教 中村英雄
(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009016)

キーワード：歯科矯正，アーチワイヤ，超弾性材料，NiTi（ニチノール），曲げ加工

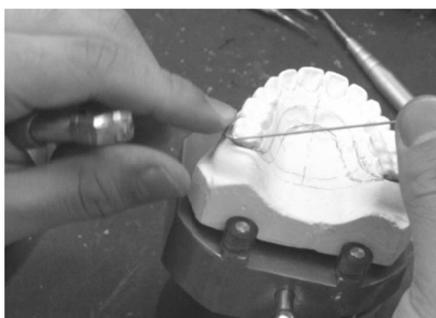
1. 研究の目的と背景

近年の歯科医療の高度化および予防歯科の発展に伴う歯羅漢率は減少している。しかし食文化の変化により硬い物を食べる機会が減少したため、顎骨は小さくなり、歯牙の幅は顎骨の変化に追いつけず、その結果として歯列異常（歯並びが悪いこと）が問題になっており、歯科矯正の需要が増加している¹⁾。

ステンレス鋼製矯正ワイヤなどを用いた矯正治療においては図 1(a)のような特殊なループ構造を用いて矯正力を制御していたが²⁾、それらは同図(b)のような手作業により製作されていた。



(a) 矯正（ループ）ワイヤの例



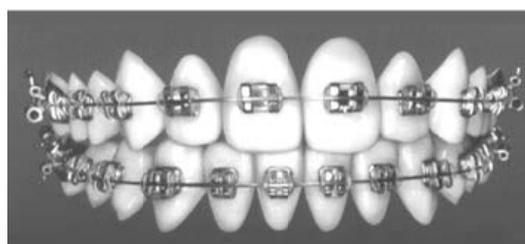
(b) 矯正ワイヤの手加工

図 1 矯正ワイヤを用いる歯列矯正

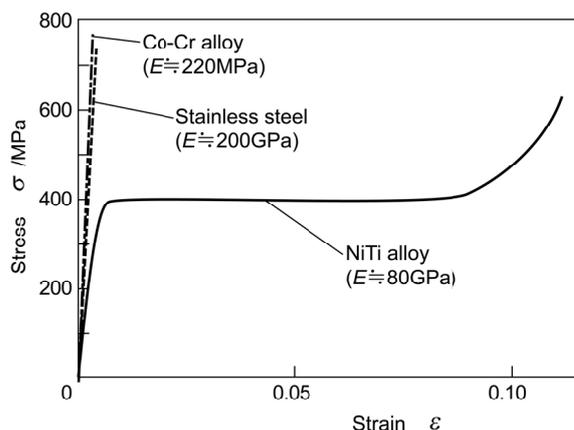
一方、現在の歯科矯正臨床においては、従来金属よりも弾性係数が小さくかつ弾性ひずみが多い超弾性材料^{2),3)}が広く利用されており、図 2(a)のようにそれをブラケットで固定して用いられている。とくに、TiNi 合金は優れた機能安定性、耐腐食性および生体適合性を有する。図 2(b)は、その変形特性を従来用いられていたコバルトクロム合金やステンレス鋼と比較して示したものであるが、小さな一定の矯正力を歯に与えることができる。しかし、TiNi 合金は手加工が非常に困難で予め

馬蹄形に成形された製品を利用することが多い。歯科医が患者様の口腔内を目視し、チェアサイドで形状修正を行う場合には同図(c)のようなスポット溶接電源に類似したパルス通電加熱機器を用いて手作業で屈曲し、試適を繰り返しながら行っている。しかし、通電加熱により処理したワイヤは初期材料と剛性が異なる感じがあるなどの疑問が残されていた。

本研究では、その自動化を目指して歯科矯正用 NiTi 合金ワイヤの通電加熱成形に関する基礎的検討を行った。



(a) 超弾性型 NiTi 矯正ワイヤを用いる歯列矯正⁴⁾



(b) 超弾性型 NiTi の変形特性の概要⁴⁾



(c) パルス通電による NiTi 超弾性矯正ワイヤの形状修正⁴⁾

図 2 超弾性型 NiTi 矯正ワイヤを用いる歯列矯正

2. 実験方法

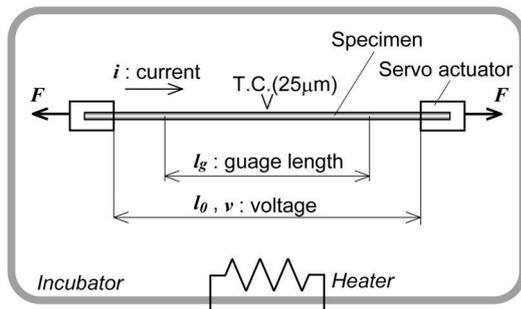
実験には、直径 0.406mm (0.16 インチ) の円形断面の超弾性型 NiTi ワイヤ (SENTALLOY-Medium, TOMY International Inc.)⁵⁾ に対して、500°C (60min) で直線記憶熱処理済みのものを用いた。この材料は口腔内の温度 37°C で最適な超弾性特性を示すように設計されている。諸元を表 1 に示す。

NiTi ワイヤの通電・引張試験および通電曲げ試験の概要と実験条件をそれぞれ図 3, 4 および表 1, 2 に示す。通電加熱電源は、定電流電源を使用し、通電制御にはパソコンで制御された SSR を用いた。電流値は回路に直列に接続された無誘導型の 0.1Ω シャント抵抗を用いた。また、通電加熱時のワイヤ表面の温度測定には、素線直径 25μm の K 型熱電対を用いた。

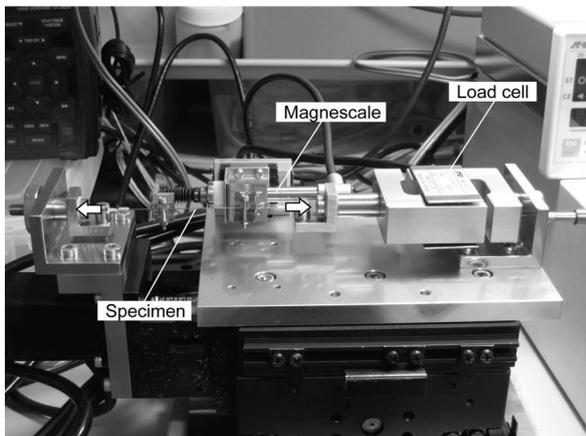
通電・引張試験においては装置を保温器内で 37°C に保温して行った。ひずみ速度は、約 7×10^{-4} /s である。

表 1 試験片

NiTi round wire	SENTALLOY-Medium TOMY International Inc.
Diameter: d	0.406 mm (0.16 inch)
Length: ℓ	180 mm (original)
Heat treatment	Straight, 500 °C (60 min)



(a) 通電・引張試験の概要



(b) 通電・引張試験の概観

図 3 NiTi ワイヤの通電・引張試験

通電曲げ試験においては、長さ 30mm の素材を Z テーブルおよび XYθ テーブルに固定したジグ (銅電極) でクランプし、所定の座標および角度に設定後、パルス通電加熱処理した。

3. 実験結果

3.1 超弾性型 NiTi ワイヤの変形特性

図 5 は、負荷・除荷の繰り返しを与えた場合の応力-ひずみ曲線である。同図(a)~(c)は、除荷開始ひずみをそれぞれ 2.0, 6.0, および 8.0 と変化させた場合の結果である。

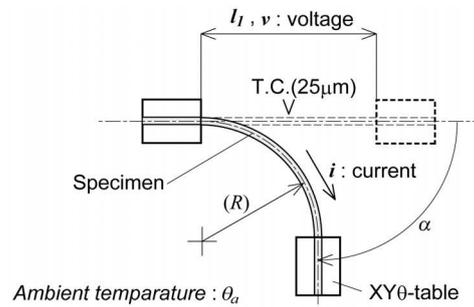
応力-ひずみ曲線のヒステリシスループ、繰り返し変形による変態降伏応力の低下と非回復ひずみの増大などの典型的な超弾性挙動を示している。

表 2 実験条件 (通電・引張試験)

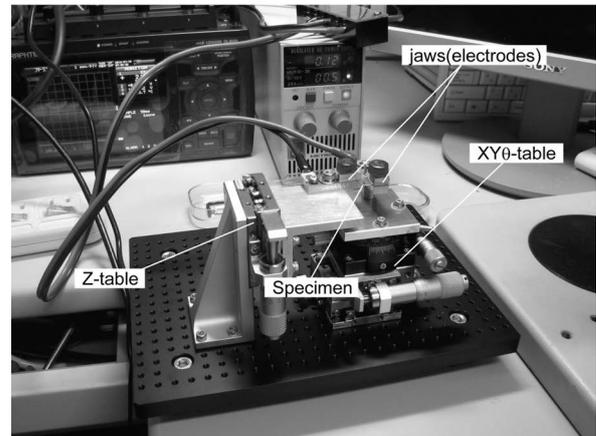
Temperature of specimen: T_w	37 ± 0.5 °C
Strain rate:	7×10^{-4} s ⁻¹
Current: i	0 - 6 A
Pulse width: T	1 - 100 s

表 3 実験条件 (通電曲げ試験)

Ambient temperature: T_a	23 ± 1.0 °C
Current: i	0 - 6 A
Pulse width: T	1 - 100 s

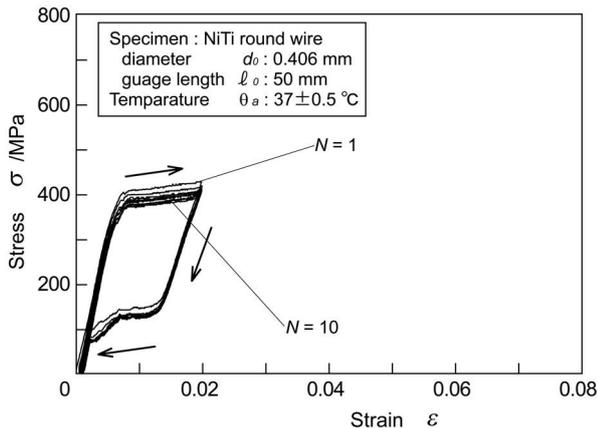


(a) 通電曲げ試験の概要

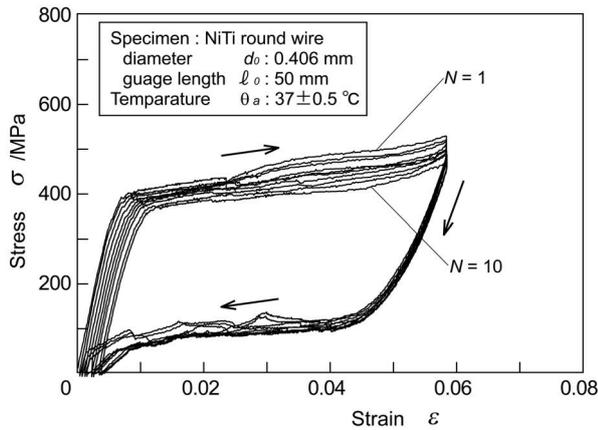


(b) 通電曲げ試験の概観

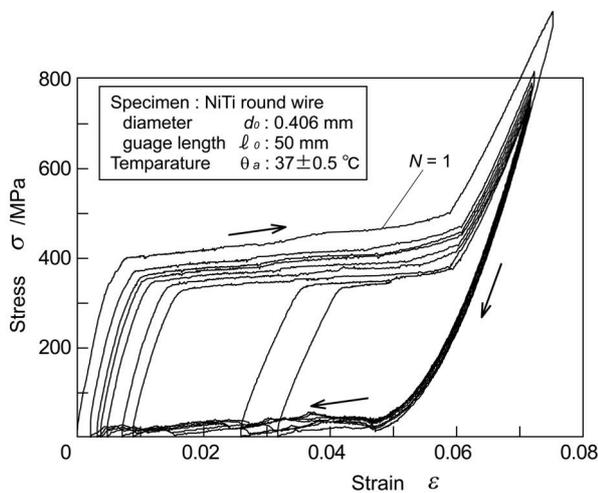
図 4 NiTi ワイヤの通電曲げ試験の概要



(a) $\varepsilon_l = 2\%$



(b) $\varepsilon_l = 6\%$



(b) $\varepsilon_l = 8\%$

図5 超弾性型 NiTi ワイヤの変形特性

3.2 超弾性型 NiTi ワイヤの通電加熱曲げ

NiTi 合金製細線は、最終段階では冷間引抜きされて 400-500°C で、10-60 min で(形状記憶)熱処理される。その熱処理には通常、雰囲気炉が用いられ、その温度と時間は製品の特性に大きな影響を及ぼす⁶⁾。一方、NiTi 合金の加熱に

通電加熱を利用する試みが、SMA アクチュエータ駆動におけるひずみ回復動作において多く利用されている^{3), 4)}。また、極細線の冷間引抜き後の熱処理に利用する試みが報告されているが^{7), 8)}、形状記憶済みの材料に対する形状修正への適用に関する報告はほとんどない。

図6は、 $l_l=10\text{mm}$ の長さの素材ワイヤにパルス通電したときの電流と素材中央の温度の変化である。定電流電源を使用しているために電流はステップ変化をしている。一方、温度は時間遅れをとまって上昇し、約5sで最高温度の約520°Cに達する。

図7は、パルス幅を $T=10\text{s}$ に固定して、電流を変化させた場合の素材中央の最高温度である。白丸が10mmの長さの素材ワイヤに通電した場合で、黒丸が70mmの長さの素材ワイヤに通電した場合である。 $l_l=10\text{mm}$ の場合には70mmの場合よりも到達温度が低いが、4.5Aで約520°Cに達する。

図8は、図4の手順に従って $l_l=10\text{mm}$ の長さの素材ワイヤを90°に曲げた状態でパルス通電により形状記憶処理を試みた結果である。また、図9は、通電時のワイヤの温度分布であり、ジグに近傍では温度の低下が発生する。 $i=4.5\text{A}$ ($T=10\text{s}$)では、素材中央部の温度は520°Cに達する。

TiNi 合金ワイヤの通電曲げ成形では、ひずみ回復とスプリングバックにより戻りが生じる。残留曲げ角 α_r は、通電パルス幅 T の増大とともに目標角度 90° に近づくが、 $T=10\text{s}$ 以上では改善がみられず、約+10° のずれが残る。電流値の増大によっても目標角度に近づくが、 $i=4.5\text{A}$ と $i=5.5\text{A}$ では差異がなく、 $i=4.5\text{A}$ の条件で形状記憶処理が完了している。しかし、図7のように短い素材ワイヤの両端を電極で固定している場合には、両端部での温度が不十分である可能性がある。また、後述のように、形状記憶処理がなされ回復ひずみがゼロとなっても、弾性回復が生じるために、ヤング率が相対的に小さい NiTi 合金では、大きなスプリングバックが発生する。

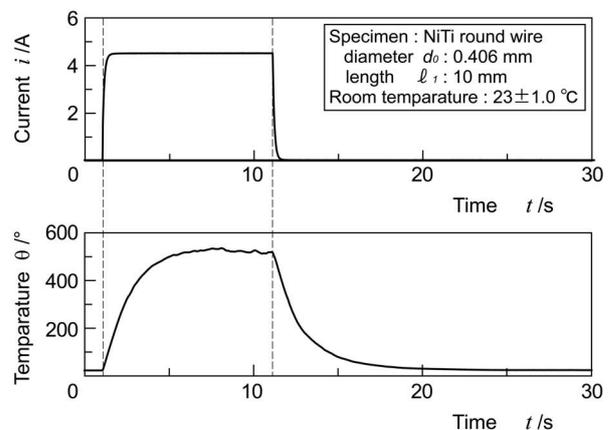


図6 通電加熱時の超弾性型 NiTi ワイヤの温度変化

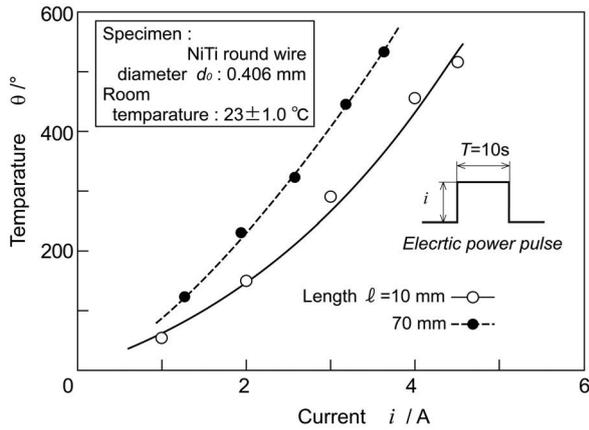
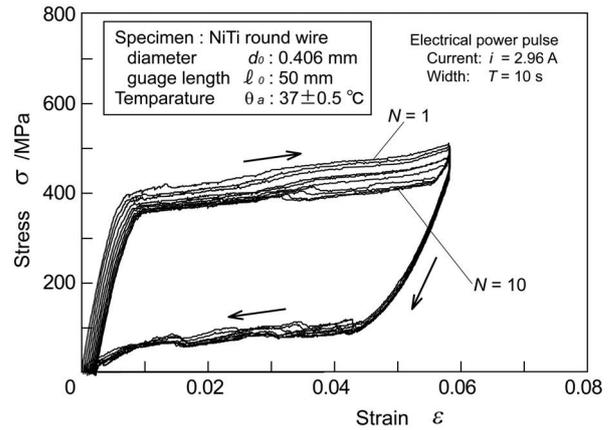


図7 通電加熱により得られる超弾性型 NiTi ワイヤの温度



(a) $i = 2.96 \text{ A}$

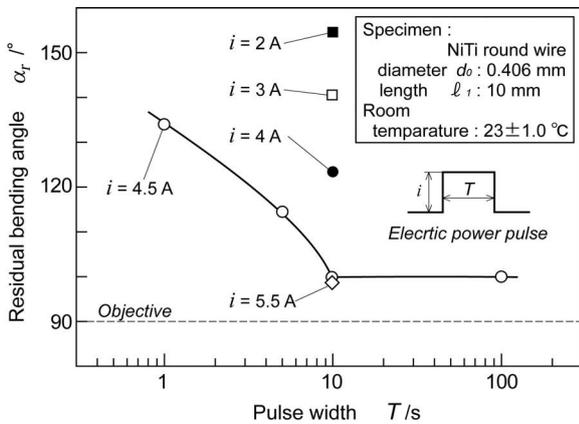
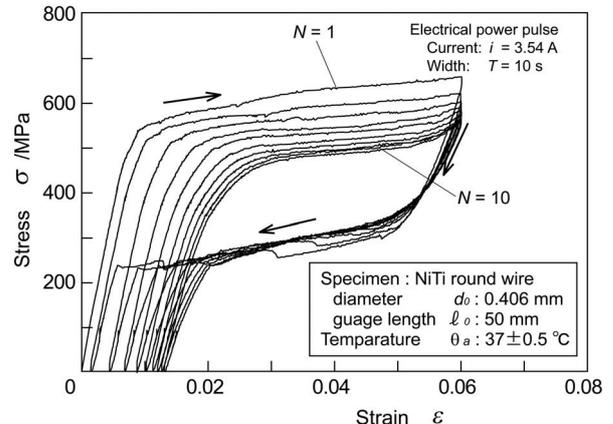


図8 超弾性型 NiTi ワイヤの通電曲げ



(b) $i = 3.54 \text{ A}$

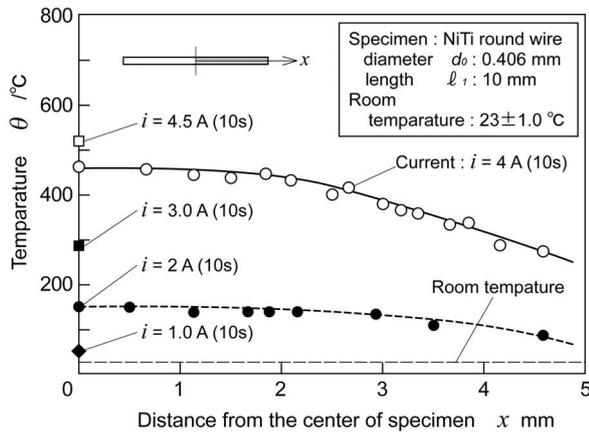
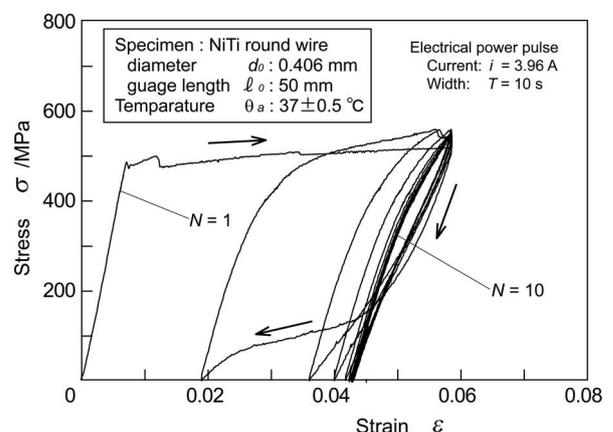


図9 通電中の超弾性型 NiTi ワイヤの温度分布



(c) $i = 3.96 \text{ A}$

図10 通電加熱後の超弾性型 NiTi ワイヤの変形特性

3.3 通電加熱された超弾性型 NiTi ワイヤの特性

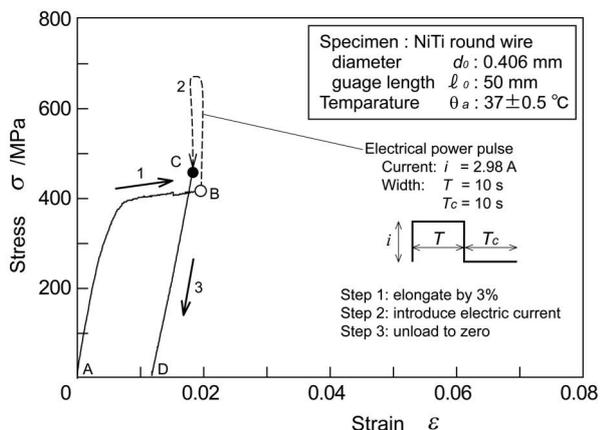
一例として、直形状の記憶処理では、わずかな引張応力 (20–100 MPa) を加えた状態で熱処理が行われる⁹⁾。一方、比較的複雑な形状の場合には型形状に拘束された状態 (予ひずみを与えられた状態) で熱処理される。

図10は、1.58MPaの引張応力下で3.96A($T=10\text{s}$)のパルス通電加熱処理したワイヤの繰り返し変形特性であるが、

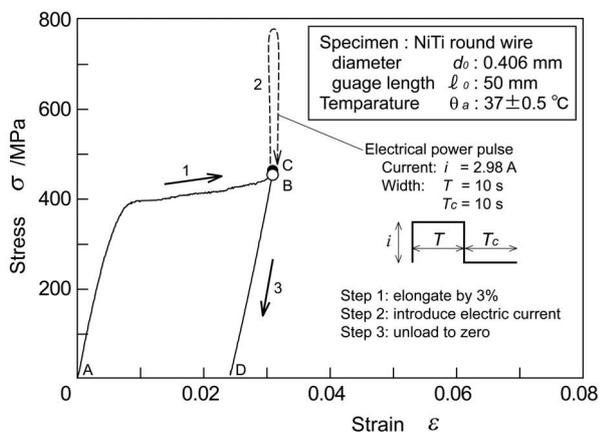
$i=2.96\text{A}$ では図5の初期特性とほぼ同じであるが、 $i=3.54\text{A}$ では、変態降伏応力がかなり増大するとともに、非回復ひずみの低下もおおきくなる。さらに $i=3.96\text{A}$ では大きく異なる挙動を示し、数回の繰り返し負荷で超弾性挙動を示さなくなる。

一方、図11は、2、および3%の予ひずみを与えた状態で2.98A($T=10\text{s}$)のパルス通電した場合のワイヤの挙動である。B点でのパルス通電による急速な温度上昇により3%保持応力の2倍近い回復力が発生し、10sの冷却後C点に達しておお

よその形状記憶処理が完了するが、その後の除荷により弾性回復が発生する。



(a) $\varepsilon_l = 2\%$



(b) $\varepsilon_l = 3\%$

図 11 予ひずみを与えた超弾性型 NiTi ワイヤの通電過程

4. まとめ

歯科矯正用の超弾性型 NiTi アーチワイヤの通電加熱曲げの自動化を目指して、基礎的検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 歯科矯正に用いられる直径 0.4mm の円形断面線材では、長さ 10~70mm の素材を 4~5A 程度の通電によりワイヤ中央部を熱処理に必要な 500°C 程度まで約 5s で昇温できる。
- 通電加熱において、素材ワイヤのジグ(電極)近傍では、それを介した熱伝導のために温度の低下が生じて中央部に最高値をもつ分布を形成する。また、素材が短いと中央部の最高温度が低くなる。
- 長さ 10mm の素材ワイヤの通電加熱曲げでは、4.5A で 10s の通電で 520°C 程度に加熱することにより、変態ひずみ分は緩和されて記憶処理が完了するが、弾性回復分は緩和されず、90° の曲げに対して約 10° のスプリングバックが発生する。
- 1.58MPa の引張応力下条件でパルス通電加熱により 500°C

程度で熱処理を行うと、変態応力の増大や回復ひずみの減少・消失などの変形特性の変化が生じる。

- 予ひずみを与えた超弾性型 NiTi ワイヤに 10s 通電加熱すると、温度上昇時に保持力の 2 倍近い回復力を発生し、冷却後予ひずみ保持応力が若干大きい応力が残留する。その後、除荷すると変態ひずみの回復はないが、弾性ひずみが回復する。

以上のように、適切な電流値で 10s 程度の通電加熱することにより、形状記憶処理は達成できるが、スプリングバックは非常に大きく、また、処理後の変形特性が大きく変化するために、加工の自動化に当たってはこれらをどのように制御するかが大きな課題となる。

謝辞

本研究を行うにあたり、(財)天田金属加工機械技術振興財団より研究助成を賜りましたことをここに付記し、深く謝辞を表します。

また、工場の震災復興の多忙の中で試験材料を準備頂いた(株)トミーインターナショナルに感謝致します。

参考文献

- 相馬, 飯田, 山本, 葛西, 後藤: 歯科矯正学 第 5 版, 医歯薬出版株式会社, (2008).
- たとえば, 佐藤 編: MEAW を用いた矯正治療, (株)第一歯科出版, (2001).
- D.C. Lagoudas: Shape memory alloys: Modeling and engineering applications, Springer US, (2008).
- 田中, 戸伏, 宮崎: 形状記憶合金の機械的特性, 養賢堂, (1994).
- トミー(株), 歯列矯正器具,
<http://www.tomyinc.co.jp/wwwroot/products.html>
- TOMY International: SENTALLOY,
<http://www.tomy-ortho.co.jp/products/sentalloy.html>
- Otsuka K, Ren X.: Prog Mater Sci, **50**, (2005), 511.
- B. Malard, J. Pilch, P. Sittner, R. Delville, C. Curfs: Acta Materialia, **59**- 4, (2011), 1542.
- Patent applications PV2009-279, PCT/CZ2010/000058.
- Pelton AR, DiCello J, Miyazaki S.: Minim Invas Ther Allied Technol, **9**, (2009), 107.