

TiNi 形状記憶合金マイクログリッパの設計と特性評価

水谷 勝己¹, 大政 光史¹, 堀端 章², 徳川 裕介³

要旨

本研究は、超小型工場であるマイクロファクトリーで用いられることを想定した TiNi 形状記憶合金マイクログリッパの開発に関するものである。そのマイクログリッパは、構造部と駆動部を同一の材料で一体的に構成して小型化をはかったもので、変位方向変換ユニットと変位駆動用のユニットからなる。直径 0.5mm 程度のピンを把持することを想定して、使用した合金の変形と変態特性の測定、有限要素法を援用した設計、試作とその特性評価を行い、外形寸法 (11mm×5mm×0.5mm)、通電による把持のための開閉量 (0.2mm/0.25mm の初期変位量に対して)、把持の剛性 (30N)、方向変換変位拡大比 (1.3) などを求めるとともに両ユニットの剛性のバランスなどグリッパの開発のために留意すべき点を抽出した。

1. 緒論

近年、医療関連や情報端末などの機器において小型化が急速に進められている。これらに代表される小型の機器やその部品に対しては、通常サイズの製造設備ではなく、机上に設置できる設備による超小型工場 (マイクロファクトリー) で製造するという概念が提案され、具現化のための研究開発が進められている⁽¹⁾。種々の製造工程のうち組み立てはこのマイクロファクトリーにおいても不可欠であり、そのための効果的なマニピュレータの開発が望まれる。

橋本と東本は組み立ての基本動作として、軸と穴のはめ合わせ、圧入、挿入と固定、圧着や接着などをあげている⁽²⁾。いずれの場合においても、対象物をつかむ、離すという 2 つの方向性を持つ動作を伴い、把持具 (グリッパ) を必要とする。グリッパは構造部と駆動部からなるが、マイクログリッパとしては、駆動部に圧電アクチュエータを用いたもの^{(3), (4)}や形状記憶合金アクチュエータを用いたもの^{(5)~(10)}が報告されている。このうち圧電アクチュエータは速い応答の利点があるものの構造部と駆動部をそれぞれ設ける必要があるため小型化に問題がある。一方、形状記憶合金はそれ自体が構造体でもあるため効率的な小型化が可能であると考えられる。

そこで、本研究では、形状記憶合金を用いることとし、直径 0.5mm 程度のピンを把持するマイクログリッパの設計と試作、さらには特性評価を行い、グリッパの開発のために考慮すべき点を抽出することにした。

2. 引張試験

本研究では形状記憶合金として大同特殊製鋼製の NiTi 合金を用いる (商品名 KIOKALLOY, 54~56%が Ti で残りが Ni)。この材料は帯状 (幅 5.8mm, 厚さ 0.5mm) に圧延されており、所定形状への加工と熱処理等を経てグリッパに仕上げる。グリッパとして適切な機構、構造を決定する上で、形状記憶合金の構造体および駆動体としての変形特性や変態特性を知る必要があるが、これらは加工や熱処理条件によって変わるものであるため、実際に使用するものに対して求めておく必要がある。そのため、引張試験を行い、

原稿受付 2005 年 6 月 16 日

本研究は近畿大学生物理工学部戦略的研究 No.02-III-2, 2003 の助成を受けた。

1. Department of Mechanical Engineering and Biomimetics, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan

2. Department of Biotechnological Science, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan

3. Graduate student of Department of Mechanical Engineering, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan

応力-ひずみの関係を試験片の種々の加熱状態において測定することとした。

2. 1 試験片

入手したNiTi合金をワイヤ放電加工により図1(a)の形状に加工し、熱処理(500°C, 2時間保持後水焼入れ)によってマルテンサイト相にし、試験片とした。この熱処理温度はマルテンサイト相からオーステナイト相への変態温度に影響するもので、その変態温度を室温より少し高く(40°C程度)することから設定している。

本試験片は小さく、掴み部の変位をもとにひずみを求める方法では誤差が大きくなる。そのため図1(b)のように両面にひずみゲージを貼り、ひずみを測定することとした。

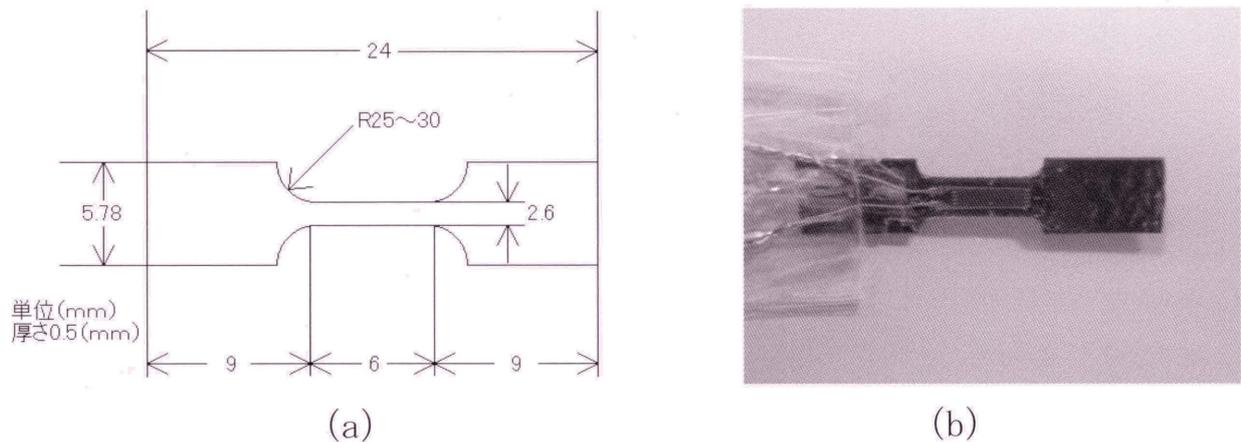


図1 NiTi形状記憶合金の引張試験片

2. 2 試験装置および方法

引張試験はオートグラフ(島津 AGS-H)を用いて行った。種々の装置構成を図2(a)に示す。試験中の荷重とひずみはオシロスコープを介してパソコンに入力され、時系列データまたは応力-ひずみ線図として表示される。試験片の加熱は図2(b)に示す通電加熱で行い、温度はサーモグラフィ(NEC 三栄 TH5104R, 拡大レンズ付)で測定した。

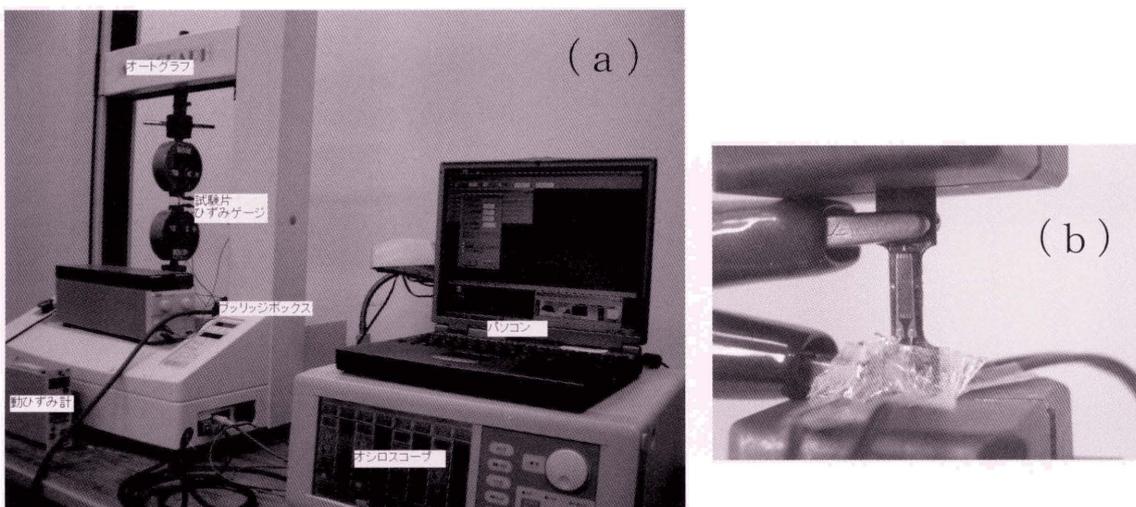


図2 引張試験の装置構成(a)と試験片の通電加熱(b)

2.3 試験結果

図3に試験片のオーステナイト相状態（図中に矢印を付けたもの）およびマルテンサイト相状態（矢印の無い他のすべて）の応力-ひずみ線図を示す。マルテンサイト状態においてはそれぞれ異なるある応力まで負荷した後、負荷を一定に保ち変態のための通電を行っている。オーステナイト相状態においては試験直前から通電を行った。

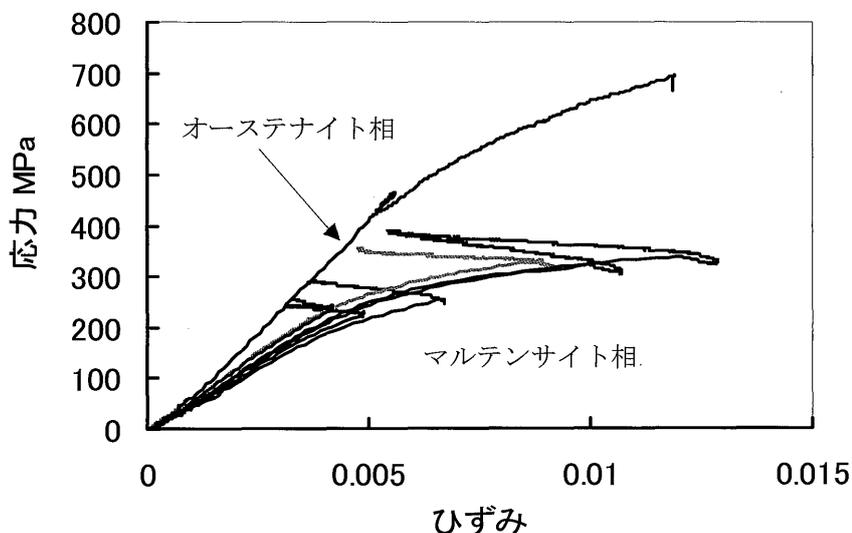


図3 NiTi合金の種々の状態における応力-ひずみ線図

図3から、いずれの相においても応力とひずみの関係が直線的である弾性域とそれを越えた非弾性域からなること、マルテンサイト相状態から変態させればほぼ同じ負荷状態におけるオーステナイト相のひずみに回復すること（ひずみの大ききなところではクリープの分だけのずれがある）がわかる。これらから求めた平均のヤング率および降伏応力は以下のごとくである。ここで、降伏応力は弾性域と非弾性域の近似直線の交点より求めている。

マルテンサイト相について、ヤング率 $E=49500\text{MPa}$ 、降伏応力 $\sigma_t=279\text{MPa}$

オーステナイト相について、ヤング率 $E=76500\text{MPa}$ 、降伏応力 $\sigma_t=589\text{MPa}$

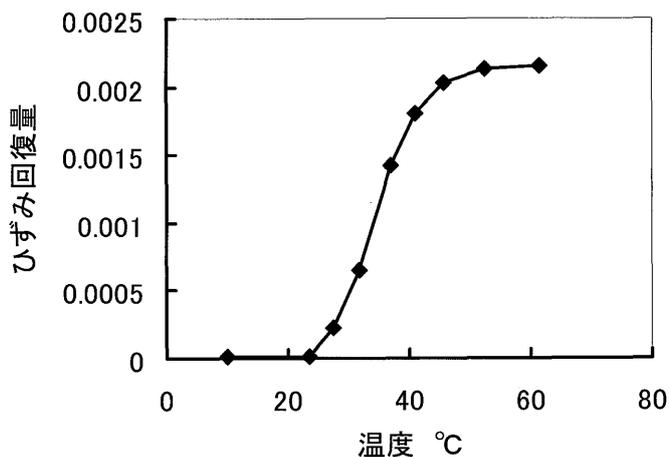


図4 試験片の通電によるひずみ回復

また、図4にはマルテンサイト相に対しての通电によるひずみ回復過程を、計測した温度との関係で示す。同図からオーステナイト相への変態開始温度 A_s は 23.4°C 、終了温度 A_f は 45.8°C であると推定される。

3. マイクログリッパの設計

グリッパの把持部の開閉機構として、アクチュエータ部分の駆動による長手方向（垂直方向）の変位を把持方向（水平方向）の変位に変換する機構を採用する。このことによってグリッパを細長い物とすることが出来る。そのような変換機構として Lee らの把持部とチューブから成る二体構造⁽⁶⁾、Kohl らの把持と駆動の一体構造⁽¹⁰⁾ など種々のものがあるが、本研究では構造の単純さとそれによる縮小化の容易さを考慮して一体構造のものとする。

3. 1 グリッパの機構・構造

Kohl らのものを参考にし、本研究で採用したグリッパの機構を図5に示す。

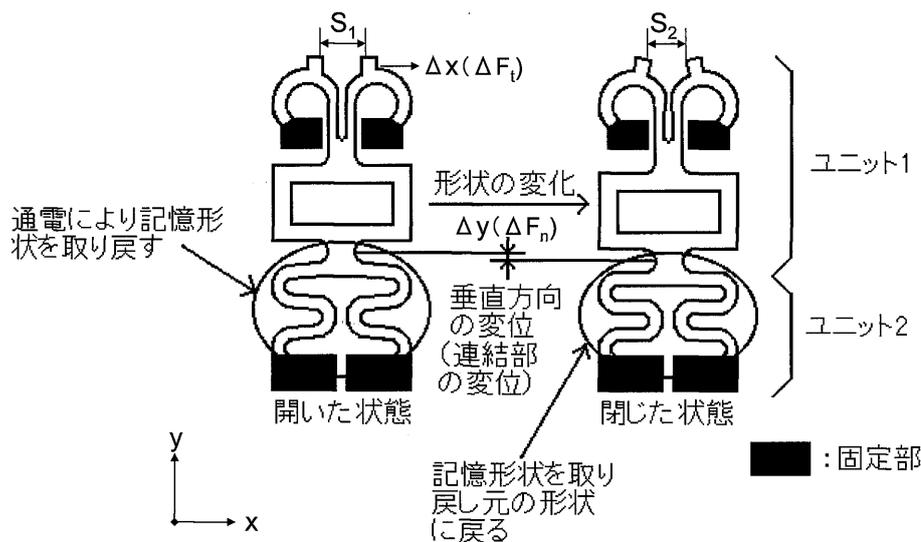


図5 採用したマイクログリッパ機構

それは変位方向変換用のユニット1および垂直方向変位駆動用のユニット2から成り、グリッパが開の状態（左図）では両ユニットともマルテンサイト相の状態に垂直方向に引張りの初期ひずみを与えられて固定されている。右図はグリッパが閉の状態を示したもので、通电加熱されたユニット2がオーステナイト相に変態するために収縮し、それによる垂直方向(y方向)変位はユニット1によって水平方向(x方向)の変位に変換されグリッパは閉じ、対象物があるときには把持する。また、ユニット2の通电加熱を止めれば開の状態に戻るのであるが、ユニット1の通电加熱を併用することによってより速く開かせることが出来る。連結部におけるユニット1の窓構造はユニット間の熱の伝達を防ぐためのものである。以上の動作を効果的に行わせるための構造上の重要な特性は以下のものである。

方向変換変位拡大比： $(S_1 - S_2) / \Delta y$ (ユニット1に対して)

垂直方向剛性： $\Delta F_n / \Delta y$ (ユニット1, ユニット2に対して)

把持剛性： $\Delta F_t / \Delta x$ (ユニット1に対して、把持の指は剛であるとしている)

ここで、 $S_1 - S_2$ は把持部の口閉じ変位、 ΔF_n はユニット1と2の連結部におけるy方向の強制変位(Δy)により生じる力、 ΔF_t は把持部のx方向の強制変位(Δx)によって生じる力である。

3. 2 有限要素法解析を援用したグリッパの設計

今、グリッパは直径 $0.5 \pm 0.005\text{mm}$ のピンを把持し、把持力は 1N 以上、開閉量は $100\ \mu\text{m}$ 以上であるとする。入手した帯状形状記憶合金の制約から、グリッパの最大幅は 5mm 、厚さ 0.5mm として上記の条件に合う形状・寸法を市販の有限要素法解析ソフト (AMP S) の援用により求めた。

解析は等方弾性体 (ヤング率: 49500MPa , ポアソン比: 0.3), 平面応力状態のもとで行っている。解析の一例を図 6 に示す。

図 6 はグリッパに初期変位量 $\Delta l = 300\ \mu\text{m}$ を与えたときの各部の変形および Mises の降伏条件に対する相当応力分布を示したものである。連結部の変位 Δy と把持部の変位 $S_1 - S_2$ から方向変換変位拡大比が、固定部に生じる y 方向の力と連結部変位との比としてユニット 1 の剛性が、固定部に生じる y 方向の力と変位差 (初期変位 - 連結部変位) の比としてユニット 2 の剛性が求められる。

まず、開閉量を大きく、すなわち、方向変換変位拡大比 ($S_1 - S_2$)

$/\Delta y$ を大きくすることを検討する。具体的には、図 7 において溝深さ h や円形部の角度 θ を変えて計算した。結果を表 1 および表 2 に示す。

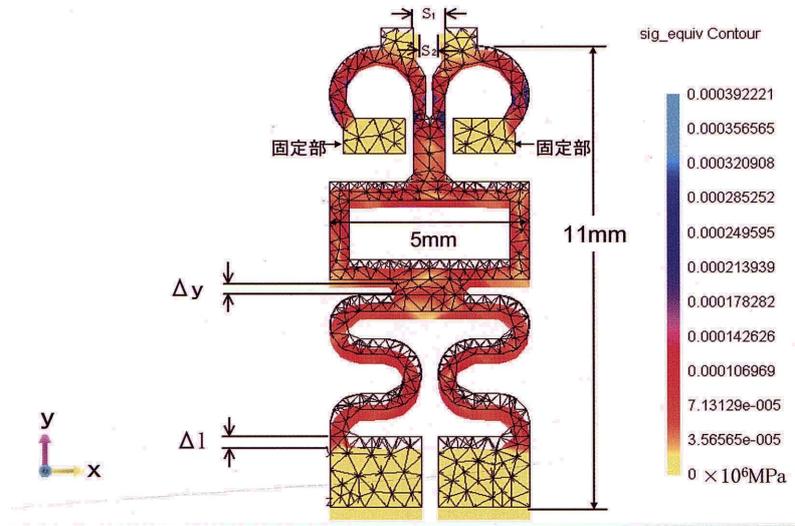


図 6 有限要素解析例

表 1 方向変換変位拡大比と θ ($h = 1.5\text{mm}$)

θ (deg.)	Δy (μm)	$s_1 - s_2$ (μm)	方向変換変位 拡大比
180	100	93	0.93
225	100	136	1.36
270	100	163	1.63

表 2 方向変換変位拡大比と h ($\theta = 22.5^\circ$)

h (mm)	Δy (μm)	$s_1 - s_2$ (μm)	方向変換変位 拡大比
0	100	107	1.07
0.5	100	121	1.21
1.0	100	132	1.32
1.5	100	136	1.36
2.55	100	132	1.32

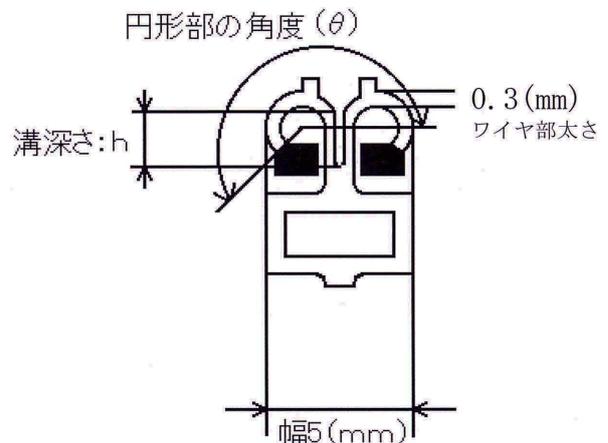


図 7 円形部の角度 θ および溝深さ h

これらから、 $h=1.5\text{mm}$ 、 $\theta=225^\circ$ とした (θ を大きくする方が大きな拡大比を得ることが出来るが、固定部分を設ける必要上この様にした)。この場合、変位拡大比 $(S_1-S_2) / \Delta y$ が 1.36 であるため $100\mu\text{m}$ 程度の Δy を与えれば設定開閉量を満たし、また、把持剛性 $\Delta F_t / \Delta x$ は 290N/mm と求められたので対象物把持開始後 $5\mu\text{m}$ の Δx を与えるようにすれば設定把持力を満たす。そして、ユニット 1 の垂直方向剛性 $\Delta F_n / \Delta y$ は 46.6N/mm と求められた。

ユニット 1 とのバランスからユニット 2 の垂直方向剛性は 45N/mm 程度であることが望ましい。ユニット 2 のワイヤ部の太さを変えて計算したところ、太さ 0.25mm のとき剛性 28.9N/mm 、 0.3mm のとき 48.1N/mm 、 0.4mm のとき 54.2N/mm が得られた。そのため、太さを 0.3mm とし、また、長さは $100\mu\text{m}$ 以上の Δy を与えられることを考慮し、設定条件を満たすグリッパ形状を定めた。設計図を図 8 に示す。

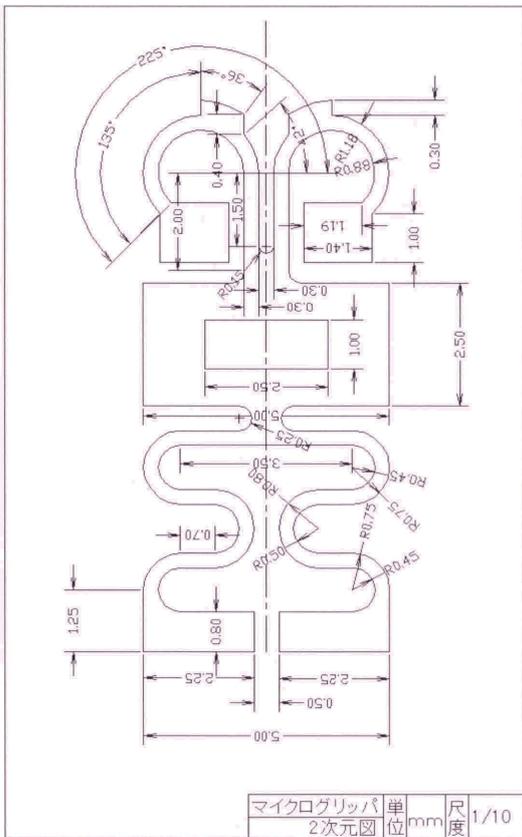


図 8 マイクログリッパ設計図

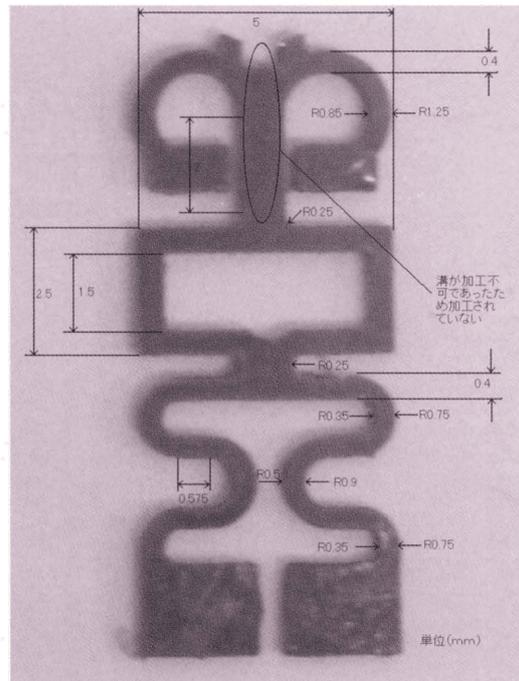


図 9 試作マイクログリッパ
(ユニット 1 の溝加工前の状態)

4. マイクログリッパの試作と特性評価

4. 1 試作グリッパ

大同特殊製鋼製の NiTi 合金の図 8 の形状・寸法への加工と熱処理 (500°C 、2 時間保持後水焼入れ) は和歌山県工業技術センターのワイヤ放電加工機 (ソディック製 A500WP) と熱処理炉 (HEAT ELECTRIC MFG. 製 ELEPOT SHTYPE) で行われた。その際、放電加工機の性能との関係で、ユニット 1 および 2 のワイヤ部の太さは 0.3mm から 0.4mm に変更する、ユニット 1 の溝加工は別途行う、こととした。作製されたものを図 9 に示す。溝部の加工については、後に微細放電加工機 (松下電器産業製 MG-ED72) により行った。測定した寸法をもとに解析したグリッパの方向変換変位拡大比は 1.28、ユニット 1 とユニット 2 の垂直方向剛性

比は0.54 : 1であった。

4. 2 特性評価の方法

マイクログリップの開閉動作のためには、垂直方向の引張り初期ひずみを与えてグリップを固定する必要がある。そのために作製した試験治具は図10に示すもので、ねじA, Bの調整によって初期ひずみ量が可変するようになっている。方向変換変位拡大比の測定は、この治具を工具顕微鏡（オリンパス製 MEASURING MICROSCOPE STM）下に置き、初期変位 $\Delta 1$ を与えて、連結部の垂直方向変位 Δy 、把持部の水平方向変位 (S_1-S_2) を測定することによって。また、通電加熱のためのユニット1および2への結線は図11のごとくで、通電によるグリップの開閉特性は、工具顕微鏡下で所定部の変位を測定することにより求めた。グリップの通電による温度分布の測定は図12のごとくである。

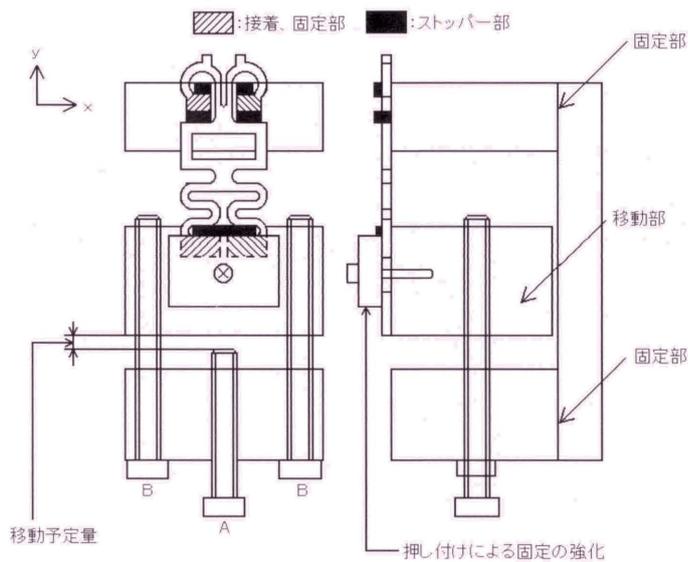


図10 試験治具

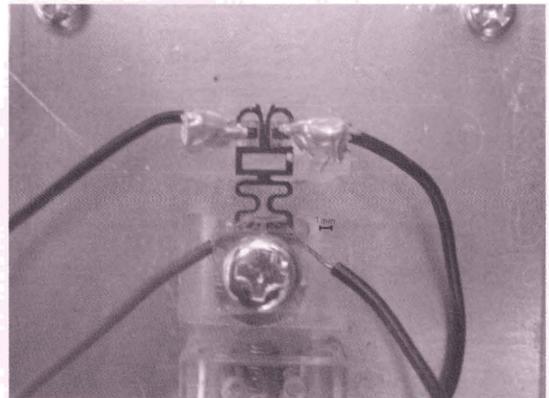


図11 グリップへの通電

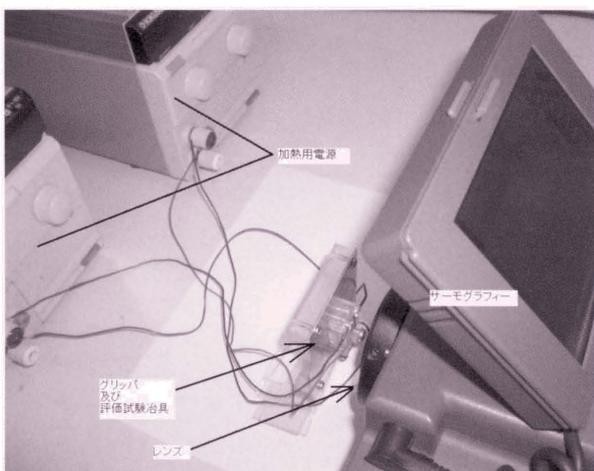


図12 グリップの温度分布計測

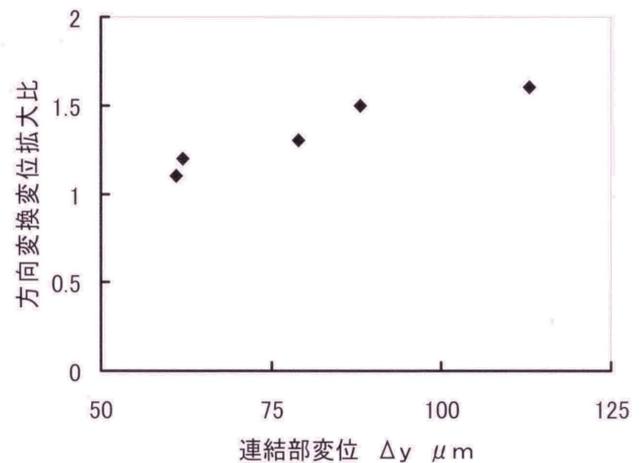


図13 グリップの方向変換変位拡大比測定結果

4. 3 評価結果と考察

試験治具のねじ調整によりグリッパに変位を与えたときの、方向変換変位拡大比と連結部の垂直方向変位 Δy との関係を図 1 3 に示す。方向変換変位拡大比は平均すれば 1.38 であり、解析の 1.28 に近い値になっている。また、方向変換変位拡大比は Δy の増加に伴い若干大きくなる傾向にあるが、それは図 6 の相当応力分布に見られるごとくユニット 1 の固定部から把持部にかけての領域、溝底部の領域で弾性域を超える部分の存在によるものと見られる。

また、ユニット 1 に通電加熱したときのグリッパの温度分布の一例を図 1 4 に、ユニット 2 に通電加熱したときの一例を図 1 5 に示す。温度は通電時間とともに上昇しやがては定常に至る。また、その状況は電流値によって変化する。ここでは定常状態を取り扱うものとし、室温 25°C のもとで、通電したユニットが変態終了温度 45.8°C を若干超えて定常になるときの電流値を求めた。ユニット 1 に対しては 0.8A、ユニッ

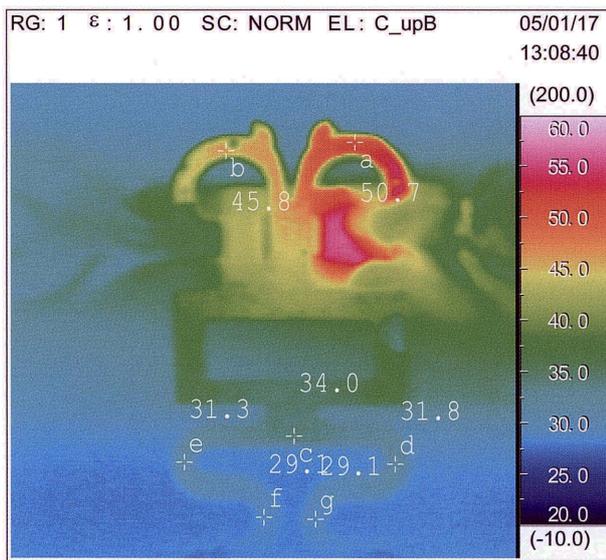


図 1 4 ユニット 1 の温度分布(定常状態)

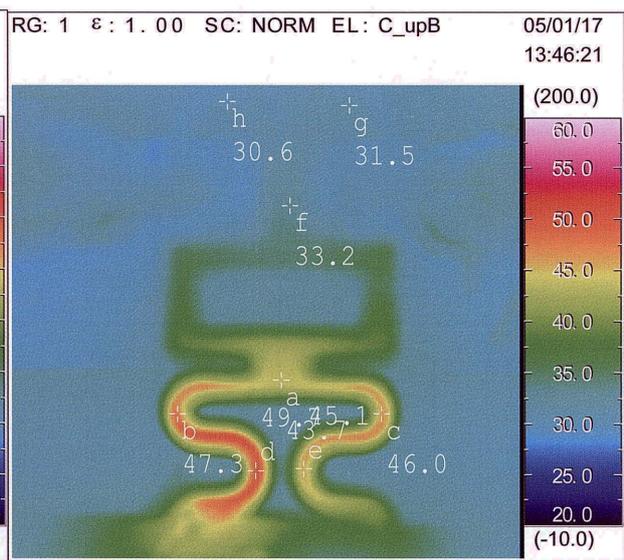


図 1 5 ユニット 2 の温度分布(定常状態)

ト 2 に対しては 0.9A でほぼ同じであった。そのときの温度分布は図 1 4 および図 1 5 であり、ユニット 1 の窓部の熱伝達の緩衝は十分ではない、左右に温度差が存在するなど改良すべき点が認められる。また、それらの状態に達するのに約 60 秒の時間を要した。従って、以下の把持部開閉特性は静特性として求めた。

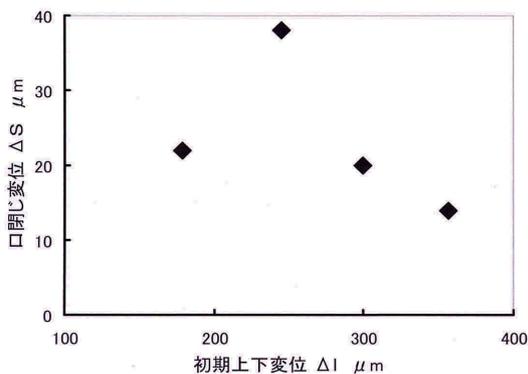


図 1 6 ユニット 1 の口閉じ変位 (ユニット 2 の通電による)

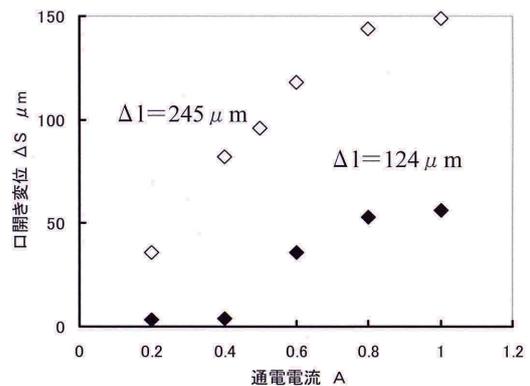


図 1 7 ユニット 1 の口閉じ変位 (ユニット 1 の通電による)

通電によるグリッパ把持部の開閉特性について、ユニット2に0.9Aの通電を行ったときの把持部の口閉じ変位 $S1-S2$ (ΔS と表記) とグリッパの初期変位量 Δl の関係を図16に示す。 Δl が大きくなれば、ユニット2の初期ひずみが大きく、従って変態による回復量も大きいため ΔS は大きくなるはずである。しかし、実測の ΔS は $38\mu\text{m}$ を示した後減少している。また、 ΔS の値も予想より小さい。これらの原因はユニット1の剛性が相対的に低いことによるもので、 Δl を与えた時の変形は主としてユニット1で生じ、しかもその一部は弾性域を超えていることの結果であろう(ユニット2がアクチュエータとしてあまり機能していない)。そのため逆に、ユニット1に通電して把持部を開かせた。図17に $\Delta l=0.25\text{mm}$, 0.125mm のときの口開き変位 ΔS と通電電流の関係を示す。これによると、 $0.8\text{A}\sim 1.0\text{A}$ で ΔS の上昇が飽和し、その値はほぼ Δl に比例している。以上の結果として、ユニット1と2のそれぞれを通電するときの合計の把持部開閉量としては約 $200\mu\text{m}$ ($\Delta l=0.25\text{mm}$ のとき) を得ることが出来、その範囲内で開閉量を調節することが可能である。また、把持力は、開閉量の半分を把持物の締め付けに使う場合で 30N 程度と計算される。

以上から得られた本グリッパの主な改善点は、①ユニット1とユニット2の剛性を同等か、口閉じの特性を重視する場合にはユニット1のほうを大きくすること、②ワイヤ部を局所的に大きな応力が生じない形状とすること、③開閉速度と開閉量を考慮した通電電流制御を導入することである。

5. 結論

変位方向変換用のユニットと変位駆動用のユニットの二つからなるNiTi合金マイクログリッパを、使用した合金の変形と変態特性の測定、有限要素法を援用した設計、試作とその特性評価に基づき検討した。得られた主な点は以下のごとくである。

- (1) 試作したグリッパ(外形寸法 $11\times 5\times 0.5\text{mm}$)の通電による把持部開閉量は 0.2mm (0.25mm の初期変位量を与えたとき)で、正常な状態の下では把持部開閉量は初期変位量に比例して増加した。
- (2) グリッパの変位方向変換拡大比は、弾性解析の1.3に対し実測では1.4であった。実測では、弾性を超える部分があり若干大きくなっているが、弾性解析は第一近似として有効である。
- (3) 通電加熱によるユニットの収縮を効果的に行わせるためには、両ユニットに均等な初期変位が生じている状態にすること、すなわち、両ユニットの長手方向剛性が同程度であるよう設計することが重要である。

謝 辞

本研究において、形状記憶合金の加工と熱処理は和歌山県工業技術センター花坂寿章氏の助力を得た。また、形状記憶合金は大同特殊製鋼株式会社から提供を受けた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 北原時雄(2005) マイクロファクトリーの将来, 2005年精密工学会春季大会シンポジウム資料, 69-74.
- (2) 橋本文雄, 東本暁美(1994) 自動生産システム(Iハードウェア編), pp.83-84, 共立出版.
- (3) 石川雄一, 小川博文(1994) 微小機械要素, 機械の研究 46, 2, 270-274.
- (4) M.C. Carrozza, et al. (1998) Manipulating Biological and Mechanical Micro-Objects Using LIGA-Microfabricated End-Effectors, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1811-1816.
- (5) Koji Ikuta (1990) Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2156-2161.

- (6) A. P. Lee, et al. (1996) A Practical Microgripper by Fine Alignment, Eutectic Bonding and SMA Actuation, *Sensors and Actuators A*, 54, 755-759.
- (7) Y. Bellouard, et al. (1997) A New Design of Shape Memory Alloy Microgripper Used in Micro Optics Assembly, *Proc. of the Second Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 245-250.
- (8) J. Hesselbach, et al. (1997) Shape Memory Alloys for Use in Miniature Grippers, *Proc. of the Second Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 251-256.
- (9) 和栗創一他 (2002) 二方向性形状記憶合金を用いたマイクロファクトリ用マイクログリッパの開発, *日本機械学会論文集 (C編)*, 68, 668, 1231-1238.
- (10) M. Kohl, et al. (2002) SMA Microgripper System, *Sensors and Actuators A*, 97, 646-652.

英文抄録

A Design of Shape Memory Alloy Microgripper and Characteristic Evaluation of the Prototype

Katsumi Mizutani, Mitsushi Omasa, Akira Horibata and Yusuke Tokugawa

This study describes a prototype TiNi shape memory alloy microgripper which could be used in an assembly process of a micro factory. The microgripper consists of two units, displacement direction-conversion unit and unit for the displacement drive, integrated with same material for miniaturization. Assuming to grip a pin of the about 0.5mm diameter, measuring the characteristics of the alloy on deformation and transformation, designing a microgripper using FEM, trial manufacturing and the characteristic evaluation of the gripper were carried out. As the results, the following were obtained: the outside dimensions of the gripper(11mm×5mm×0.5mm), the gripping stroke(0.2mm), the gripping force(30N), the displacement extension ratio by directions-conversion(1.3), the balance between units on stiffness (1:1).