

マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置の開発と特性評価

松尾 悠* 竹下 晋正*

Development and Evaluation of Magnetic Fluid Grinding Apparatus for Producing a Micro-Sized Tension Test Specimen

Yu MATSUO* and Kunimasa TAKESHITA*

(Received February 2, 2018)

The tension properties of micro-sized metallic materials and their joints are the most basic mechanical properties. Nevertheless the conventional JIS standard for tension test is not sufficient to evaluate them. Therefore, it is required to produce a micro-sized tension test specimen of high precision. Magnetic fluid grinding is considered suitable for this purpose because this method enables high precision grinding to a local region.

In this study, we developed a magnetic fluid grinding apparatus for micro-sized round tension test specimen, and evaluated the effect of the upper roller pressing load, the magnet moving speed and the specimen rotating speed. In addition, tension test was carried out using a micro-sized tension test specimen of Ti-Ni alloy produced under appropriate grinding conditions and resulting in the usefulness the magnetic fluid grinding apparatus developed.

Key Words : Tension Test, Micro-Sized Round Specimen, Removal Machining, Magnetic Fluid Grinding

1. 緒言

近年、マイクロマシンや医療関連微小器具等の発展は著しい。それに伴って製品を構成するマイクロサイズの金属材料や接合継手の機械的性質を評価する重要性が増してきている。とりわけ引張特性は最も基本となる機械的性質であるが、従来の JIS 規格引張試験ではマイクロサイズの部材を評価するには十分と言えず、マイクロサイズの金属材料を対象とした引張試験規格が必要とされている^[1]。これまでに、種々の金属材料に対してマイクロサイズ引張試験に関する研究がなされているものの、それらの研究では、主に薄板状試験片を使用しており^{[2][3]}、丸棒試験片を使用した研究は筆者の調査した範囲では行われていない。同一素材の板状試験片と丸棒試験片による引張試験を行った場合、くびれ挙動や断面応

力分布は断面形状に依存するため、引張特性は必ずしも一致しないことが報告されている^{[4][5]}。そのため、マイクロサイズの金属材料の引張特性評価に際しては、薄板状試験片のみならず丸棒試験片による引張試験も実施されることが望ましい。しかしながら、マイクロサイズの丸棒試験片の作製にあたって、従来の機械加工法では、加工対象物が小さすぎるため困難である。加えて、マイクロサイズの引張試験の場合には、試験片の表面粗さが引張試験結果に影響を及ぼすことが報告されている^[2]。したがって、マイクロサイズの丸棒引張試験片の作製に際しては、マイクロサイズの部材に適用でき、かつ母材の表面粗さを大きくすることがない、高精度なマイクロ加工方法が求められる。

ところで、製品の最終仕上げ工程や精密加工の研磨技術として磁性流体研磨が注目されている。磁性流体研磨とは、磁性流体中に混合した非磁性体である砥粒の受ける磁気排出力（磁気浮揚力）を利用した研磨法である^[6]。この研磨法は、従来のラッピングやポリシングのような砥粒が固体に支持された方法

* 大学院工学研究科機械工学専攻

* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

と違い、砥粒が液体により支持されている。そのため、支持剛性が小さく砥粒 1 個あたりに作用する加工圧が小さくなり、切り込み量が減少し、加工変質層が小さく高精度な表面研磨を行うことができる^{[7][8]}。また、磁性流体が磁場に感応する性質を利用し、磁場により磁性流体を制御することで、局所領域の研磨が可能となる^[9]。これらのことから、磁性流体研磨は、マイクロサイズの部材を対象とした、局所領域への高精度研磨加工が期待できると考えられる。

そこで、本研究では、マイクロサイズの丸棒型引張試験片を作製するための磁性流体研磨装置を開発し、上部ころ押付け荷重、磁石移動速度、試験片回転速度等の研磨条件が研磨特性に及ぼす影響を調査する。さらに、適切な研磨条件で作製したマイクロサイズ丸棒型引張試験片を用いた引張試験を行い、本作製法の有用性を示す。

2. 実験装置及び方法

2.1 マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置の開発

2.1.1 磁性流体研磨の原理

本研究では、第 1 章で述べたように、マイクロ引張試験片の作製に、磁性流体研磨を用いた。砥粒が流体に支持された流体研磨では、被研磨物の運動に抗する力が作用しないため、何らかの方法でこれを得る必要がある。本研究で適用する、磁性流体研磨では、被研磨物の運動に抗する力は、磁性流体の特性の一つである磁気排出力がこれにあたる。磁気排出力に関する模式図を Fig.1 に示す。磁性流体は高磁場側に引きつけられるため、磁性流体中の非磁性体は相対的に低磁場側に排出される。排出される非磁性体に作用する力が磁気排出力であり、これを利用した研磨法が磁性流体研磨である^{[6][10]}。磁性流体研磨では、非磁性体の砥粒を磁性流体中に分散させ、砥粒に作用する磁気排出力で研磨する。

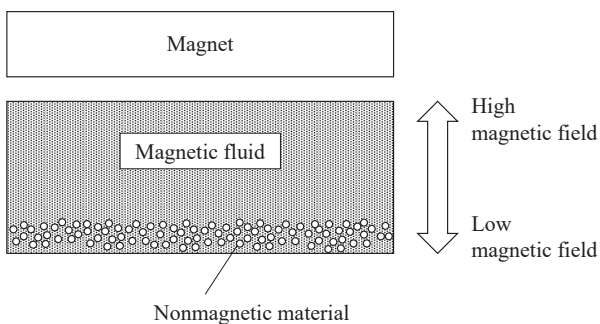


Fig.1 Schematic representation showing magnetic discharge force.

2.1.2 マイクロ引張試験片作製法

磁性流体研磨によるマイクロ引張試験作製法の概略図を Fig.2 に示す。(a)は正面図、(b)は断面図である。Fig.2 に示されるように、砥粒を混合した磁性流体を磁石で保持し、その中で試験片を回転させた。このとき、砥粒は鉛直下方向の磁気排出力を受ける。この磁気排出力が、試験片の回転運動に抗する力となり、試験片表面が研磨される。さらに、従来の磁性流体研磨に関する研究において、加工時に磁性流体に荷重を付加することで、研磨効率が增大するとの報告がなされている^{[8][11]}。そこで、本研究においても、加工時に磁性流体に荷重を付加することとした。また、通常サイズの JIS 規格引張試験片では、平行部を有するダンベル型に加工する必要があるが、マイクロ引張試験片でも同様である。しかしながら、前述した研磨法では、磁性流体を保持するための磁石が固定されていることから、局所研磨が行われる。そこで、本研究では、磁石を左右移動させることで平行部の加工を試みた。

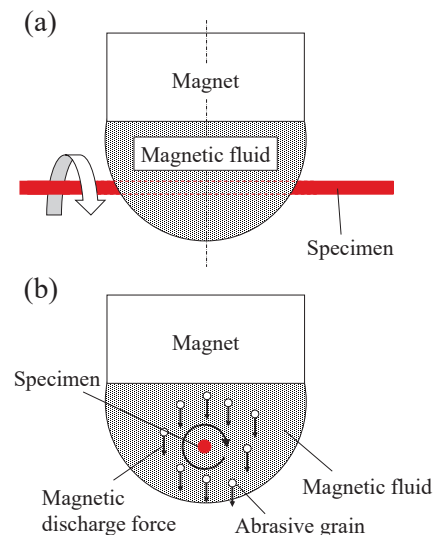


Fig.2 Schematic representation grinding showing a specimen subjected to magnetic fluid grinding, (a) Front view and (b) Sectional view.

2.1.3 マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置

前述したマイクロ引張試験片作製法を基に、マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置を開発した。Fig.3 に装置の外観を示す。試験片は、ピンバイスを用いてチャッキングした。試験片を回転させるため、ピンバイスを取り付けた軸を、プーリーとベルトを用いてモーターと連動させた。試験片の回転速度は、モーターコントローラを用いて変化させた。平行部を加工するため、電動スライダのステージ上に磁石ところを固定し、これらを試験片の軸方向に往復運動させた。その際のステージの移動速度は、電動ス

ライダ専用のドライバを用いて設定し、変化させた。Fig.4 に磁性流体を除いた加工領域周辺の画像を示す。Fig.4 に示されるように、本研究では加工圧力を増加させるため、試験片をころを用いて上下から挟み込み、研磨した。上部のころは磁石に取り付け、下部のころはテフロン板の溝に固定した。

上部のころの押付け荷重は、質量 M の磁石、上部のころ及び磁石固定用アルミブロックに対して、プーリーと吊り糸を用いて、他端に質量 m の重りを接続し、これを調節して付加した。このとき、上部のころの押付け荷重 F は、式(1)で表される。 g は重力加速度である。

$$F = Mg - mg \quad (1)$$

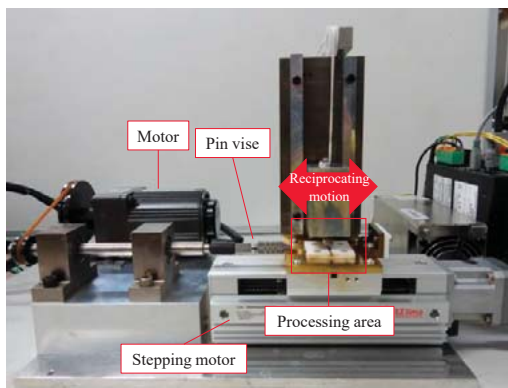


Fig.3 Appearance of a magnetic fluid grinding machine for producing a micro-sized tension test specimen.

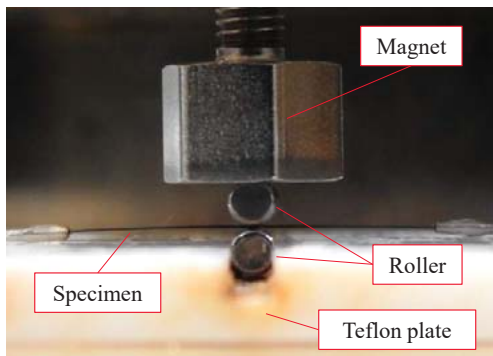


Fig.4 Appearance of enlarged processing area.

Note that magnetic fluid between upper and lower rollers is removed.

2.2 実験方法

実験条件を Table 1 に示す。マイクロ引張試験片に対する評価項目は、研磨部の表面粗さと直径減少量とした。表面粗さ \bar{R}_a は、平行部における試験片軸方向の長さ $140\mu\text{m}$ での R_a を任意の 3 箇所測定し、これらの値の平均値とした。直径減少量 ΔD は、平行部における任意の 7 箇所での直径減少量 ΔD を測定し、これらの値の平均値とした。

Table 1 Experimental conditions.

Magnetic fluid	W-40(Water based)
	Saturation magnetization:380G
	Density: $1.29 \times 10^3\text{kg/m}^3$
	Viscosity: $2.5 \times 10^{-2}\text{Pa} \cdot \text{s}$
Workpiece	Super plastic Ti-Ni alloy ($\phi 100\mu\text{m} \times 50\text{mm}$, $R_a: 0.10\mu\text{m}$)
Magnet	SmCo ₅ (Magnetic attraction:2.9N)
Roller	SUJ2($\phi 2\text{mm} \times 4.4\text{mm}$)
Abrasive grains	Diamond
	Grain size:1 μm
	Concentration:10mass%
Grinding time	3600s

2.3 実験パターン

本実験では、磁石移動速度、試験片回転速度、上部のころの押付け荷重の研磨条件が研磨特性に及ぼす影響を調査した。実験パターンを以下に示す。

- 試験片回転速度：600~1000rpm
(磁石移動速度 1.0mm/s, 上部のころの押付け荷重 $9.8 \times 10^{-2}\text{N}$ に固定)
- 上部のころの押付け荷重： 4.9×10^{-2} ~ $9.8 \times 10^{-1}\text{N}$
(磁石移動速度 1.0mm/s, 試験片回転速度 1000rpm に固定)
- 磁石移動速度：0.1~50mm/s
(試験片回転速度 1000rpm, 上部のころの押付け荷重 $9.8 \times 10^{-2}\text{N}$ に固定)

それぞれの実験パターン毎に、同一実験条件で 5 回の実験を実施した。

3. 実験結果及び考察

3.1 直径減少量に及ぼす影響

3.1.1 試験片回転速度

Fig.5(a)に直径減少量 ΔD と試験片回転速度の関係を示す。試験片回転速度 600~1400rpm の範囲では、直径減少量 ΔD は 5~7 μm 程度であり、試験片回転速度は直径減少量に影響を及ぼさないことがわかる。磁性流体研磨に利用される磁気排出力は、磁性流体と磁石の磁氣的性質や砥粒の体積には大きく依存するが^[1]、試験片回転速度にはほとんど影響を受けないと考えられる。磁気排出力以外の研磨に起因する力として、試験片回転速度に影響を受けると考えられる、粘性抵抗力が挙げられる。しかしながら、試験片回転速度 600~1400rpm の範囲では、磁気排出力による研磨が支配的であり、粘性抵抗力は、直径減少量に影響を及ぼさなかったと考えられる。

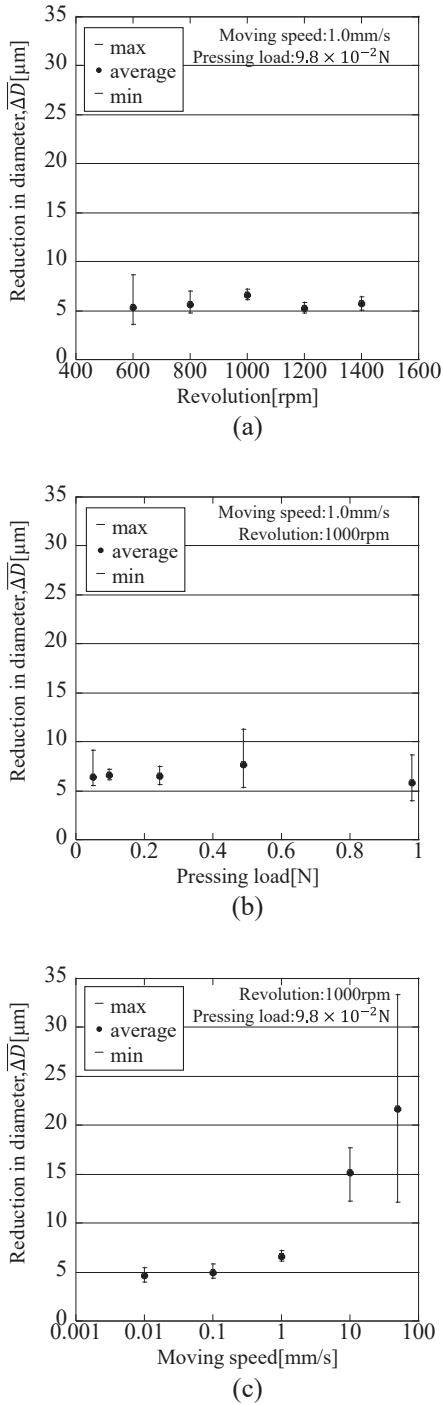


Fig.5 Variations of reduction in diameter with respect to (a)revolution, (b)pressing load and (c)moving speed.

3.1.2 上部ころ押付け荷重

Fig.5(b)に直径減少量 ΔD と上部ころ押付け荷重の関係を示す。上部ころ押付け荷重 $4.9 \times 10^{-2} \sim 9.8 \times 10^{-1}$ Nの範囲では、試験片回転速度の場合と同様に、直径減少量 ΔD は5~7 μm 程度であり、上部ころ押付け荷重は直径減少量に影響を及ぼさないことがわかる。Fig.6に研磨時の試験片表面近傍の模式図を示す。上部ころ押付け荷重は、ころと試験片が接近する位置

で磁性流体に作用する^[12]。したがって、Fig.6に示される(a)の砥粒には磁気排出力 F_M のみが作用し、(b)の砥粒には磁気排出力 F_M に加え上部ころ押付け荷重に起因した力 F_R が作用する。研磨加工を支配する因子は、加工圧力とすべり速度(砥粒と加工物の相対速度)である^[13]。(a)の砥粒に作用する磁気排出力 F_M は、法線方向と接線方向の力に分解でき、法線方向の成分である $F_M \sin \theta$ は加工圧力として作用し、接線方向の成分である $F_M \cos \theta$ はすべり速度を増加させる力として作用するため、研磨に有効な力として作用していると考えられる。しかしながら、(b)の砥粒に作用する磁気排出力 F_M と上部ころ押付け荷重 F_R に起因した力は、試験片表面で鉛直下方向に働くため、加工圧力としては作用するが、すべり速度を増加させる力としては作用せず、研磨に有効な力として作用していないと考えられる。したがって、上部ころ押付け荷重は、 $4.9 \times 10^{-2} \sim 9.8 \times 10^{-1}$ Nの範囲では、直径減少量に影響を及ぼさなかったと考えられる。

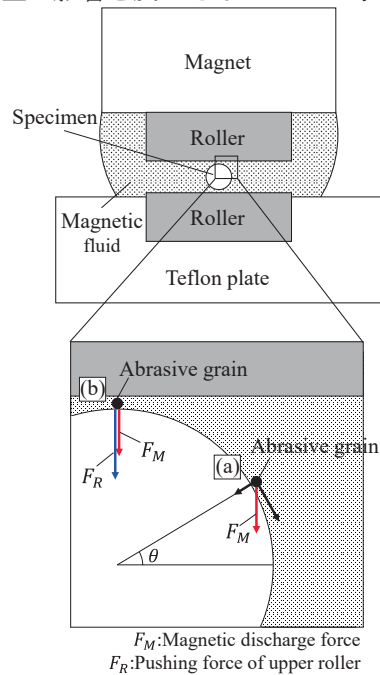


Fig.6 Schematic representation showing abrasive grains on the rotating surface of specimen during the magnetic fluid grinding.

3.1.3 磁石移動速度

Fig.5(c)に直径減少量 ΔD と磁石移動速度の関係を示す。磁石移動速度 1mm/s までは、直径減少量 ΔD は5 μm 程度であるが、磁石移動速度 1~50mm/s の間では、直径減少量 ΔD が大幅に増大していることがわかる。本研磨方法では、磁石を試験片軸方向に往復運動させている。そのため、磁性流体中の砥粒には、試験片周方向のすべり速度だけではなく、試験片軸方向のすべり速度も生じていると考えられる。その

ため、磁石移動速度の増大に伴い、試験片軸方向のすべり速度も増大する。その結果、磁石移動速度1~50mm/sの間で直径減少量 $\overline{\Delta D}$ が大幅に増大したと考えられる。

3.2 表面粗さに及ぼす影響

Fig.7(a)~(c)に各研磨条件が表面粗さ $\overline{R_a}$ に及ぼす影響を示す。

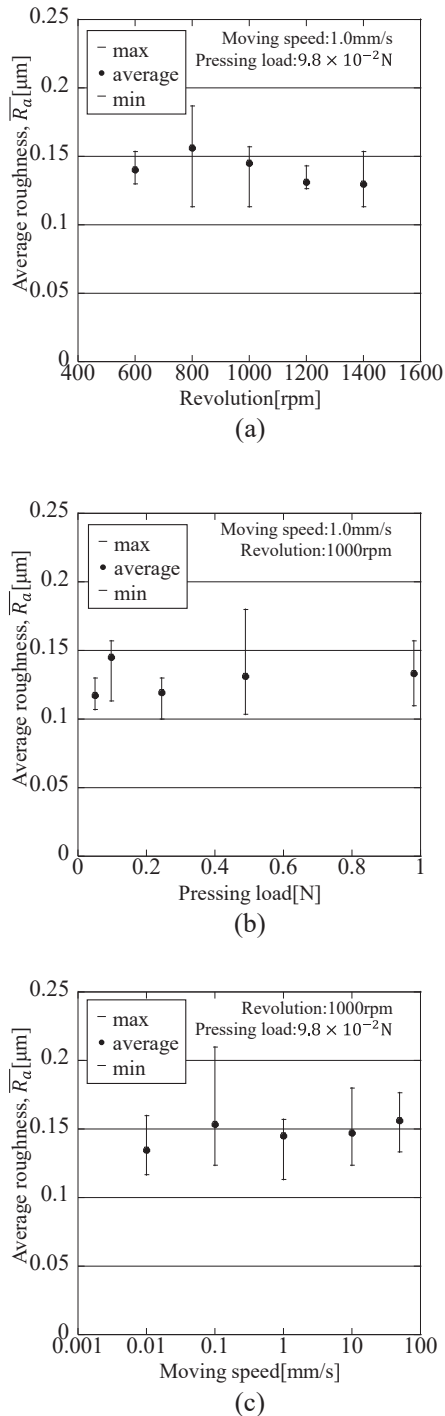


Fig.7 Variations of average roughness with respect to (a)revolution, (b)pressing load and (c)moving speed.

試験片回転速度 600~1400rpm, 上部押付け荷重 4.9×10^{-2} ~ 9.8×10^{-1} N, 磁石移動速度 0.1~50mm/s の範囲では、いずれの場合も $\overline{R_a}$ は 0.2 μm 以下であることがわかる。研磨前の試験片の表面粗さ(R_a :0.10 μm)と比較しても2倍以下であり、良好な表面粗さが得られた。

ところで、磁気排出力 F_M は、式(2)で表される^[7]。

$$F_M = V\{(\rho_0 - \rho)g - \overline{M}\nabla H\} \quad (2)$$

ここで、 V は砥粒の体積、 ρ_0 は砥粒の密度、 ρ は磁性流体の密度、 g は重力加速度、 \overline{M} は砥粒の位置における磁性流体の平均磁化、 ∇H は磁束勾配である。式(2)より、磁気勾配を一次元モデルで簡略化し、試験片周辺の磁気排出力 F_M を算出すると、 1.07×10^{-7} N程度となる。これは、非常に微小な力であることから、砥粒の試験片への押し込み深さが小さくなり、そのため良好な表面粗さが得られたと考えられる。

4. 引張試験

本マイクロ引張試験片作製法の有用性を示すため、本加工法で作製したマイクロ引張試験片を用いて、試験速度 2.5 $\mu\text{m/s}$, 標点間距離 1.028mm で引張試験を行った。マイクロ引張試験片には、比較的实验結果にばらつきが少なかった、試験片回転速度 1000rpm, 上部ころ押付け荷重 9.8×10^{-2} N, 磁石移動速度 1.0mm/s の研磨条件で作製した5本を用いた。Fig.8にマイクロ引張試験機を示す。引張荷重の測定には、ロードセルを使用した。引張応力は、引張荷重を試験片平行部での元断面積で除した値とし、ひずみは、標点間距離の変化を拡大撮影画像から計測し、その値を基に算出した。Fig.9に応力-ひずみ曲線の一例を示す。この例では、引張強さは1483MPa, 破断ひずみは19.4%であった。これらの値は、Table2に示す、Ti-Ni合金を取り扱う古河テクノマテリアルの技術資料^[14]と比較すると、データの範囲内であることがわかる。また、Fig.10に破断箇所の画像を示す。破断箇所は研磨部であり、ネッキングを呈した破断であることがわかる。

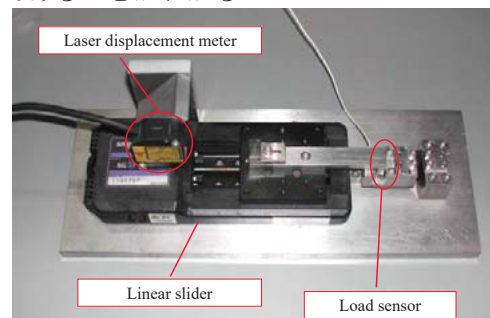


Fig.8 Appearance of a micro tension testing machine.

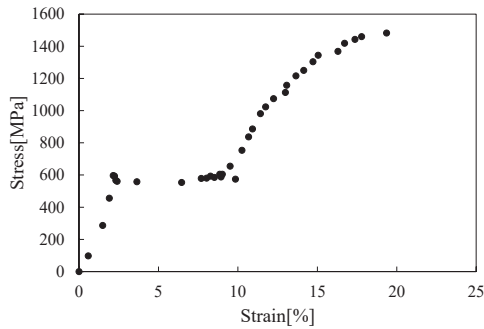


Fig.9 Typical stress-strain curve of a machined Ti-Ni alloy specimen.

Table 2 Mechanical property of Ti-Ni alloy.

Tensile strength [MPa]	1176~1960
Fracture strain [%]	~25



Fig.10 Photograph of a specimen after fracture.

5. 結 言

- (1) 磁性流体研磨を適用した，マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置を開発した．
- (2) 開発装置を用いて，Ti-Ni合金($\phi 100\mu\text{m}$)のマイクロ引張試験片を作製できた．
- (3) 平均表面粗さ $\overline{R_a}$ は， $0.2\mu\text{m}$ 以下であり，研磨前の $R_a(0.10\mu\text{m})$ の2倍程度であった．
- (4) 平行部でネッキングを呈する，引張試験を行うことができた．

参考文献

- [1] 三沢俊平：微小試験片材料評価技術の進歩，日本金属学会会報，第31巻(1992)，第11号，pp.1008-1009.
- [2] 鈴木茂和，木下博嗣：微小試験片による引張強度とひずみの評価，福島工業高等専門学校研究紀要，第56号(2015)，pp.13-17.
- [3] 箕島弘二，米田敬詞，米津明生，崎原雅之，黒田浩一：微小引張試験片を用いた局所機械的特性

評価法の開発と塑性加工材への適用，日本機械学会論文集(A編)，第76巻(2010)，第764号，pp.493-499.

- [4] 佐藤四郎：アルミニウム合金板状引張試験の形状が機械的性質に及ぼす影響(第3報)，軽金属，vol.20(1970)，pp.342-348.
- [5] 田川哲也：溶接接合教室 3-2 材料の機械的特性試験，溶接学会誌，vol.77(2008)，No.4，pp.304-311.
- [6] 山口博司：磁性流体，森北出版(2011)，pp.98-100.
- [7] 河田研治，谷泰弘：磁性流体を用いた磁気浮揚研磨法の研究(第1報)，精密工学誌，vol.53(1987)，No.6，pp.953-958.
- [8] 梅原徳次，加藤康司，渡辺純：磁性流体研磨の研究(第3報 浮子を用いた円筒面の研磨特性)，日本機械学会論文集(C編)，第55巻(1989)，第519号，pp.2879-2884.
- [9] 梅原徳次，加藤康司，水口信一，中村茂：磁性流体を用いた局所領域の微小研磨，精密工学誌，vol.60(1994)，No.11，pp.1606-1610.
- [10] 山口博司：磁性流体，森北出版(2011)，pp.110-111.
- [11] 河田研二，谷泰弘：磁性流体を用いた磁気浮揚研磨法の研究(第2報)，精密工学誌，vol.55(1989)，No.4，pp.691-696.
- [12] 日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック，養賢堂(2001)，p.34.
- [13] 梅原徳次：研磨技術とトライボロジー，表面技術，vol.49(1998)，No.9，pp.922-927.
- [14] 古河テクノマテリアル：技術資料「古川 NT 合金(形状記憶合金・超弾性合金)について」(1997)，NT合金の諸特性.