

平面磁気研磨における回転磁極の軸傾斜が 研磨性能と断面形状に及ぼす影響

村田修一^{*1}, 川久保英樹^{*2}

Influence of axis inclination of rotating magnetic poles
on polishing performance and cross-sectional shape in surface magnetic polishing

Shuichi MURATA and Hideki KAWAKUBO

磁気研磨法は磁場の特性を生かし、磁場から受ける磁気力を加工力として研磨を行う方法である。従来のフライス系の装置を用いた平面磁気研磨では、回転磁極は工作物平面に対して垂直に配置している。この場合、供給した磁性研磨材に攪拌作用が得られず目づまりを起こすことや、砥粒を効果的に活用できないことから、長時間安定した研磨性能を維持できない問題があった。そこで、本研究では、攪拌作用を得る方法として回転磁極の軸傾斜に注目し、軸傾斜が研磨特性に及ぼす影響について検討した。その結果、軸傾斜を与えることにより、長時間安定した研磨性能を得られることを明らかにした。さらに、軸傾斜を一方方向に固定せず、工作物の送り方向に応じて軸傾斜の方向を変えた研磨方法を検討し、軸傾斜を与えない場合の研磨では得られなかった底部が平坦な断面形状が得られることを示し、単純な研磨パスの設定により広範囲の研磨が可能になることを明らかにしたので報告する。

Key words : magnetic polishing, abrasive grain, polishing pressure, cross-sectional shape, surface roughness

1. 緒言

磁気研磨法は、磁場の特性を利用した研磨法であり、平面研磨や円筒物の研磨において、研磨量や表面粗さなどの研磨特性に関する基礎研究が行われ、研磨メカニズムが検証されてきた¹⁾²⁾。一方で、こういった基礎研究とともに、実用的な研究もなされている。例えば、粒子ブラシの柔軟性や磁気物体透過現象をいかし、クリーンパイプの内面研磨³⁾、金網の研磨⁴⁾、フレネルレンズの研磨などに対し磁気研磨の適用を試みた研究がある⁵⁾。

フライス系の研磨装置を用いた磁気研磨では、回転磁極と工作物の間にわずかな加工間隙を設け、その加工間隙に磁性研磨材を供給し、形成された粒子ブラシによって工作物を研磨する。しかし、一度粒子ブラシが形成されると粒子ブラシ内の粒子には循環運動が発生しないため、研磨に関与するのは粒子ブラシ先端の砥粒のみとなる。さらに、目づまりも起こりやすい。したがって、磁性研磨材を用いた場合、長時間安定した研磨性能を維持できない問題や磁極側の砥粒が研磨に関与せず非効率な側面があった。

こうした問題に対し、強磁性材のみで構成された粒子ブラシと研磨材スラリーを利用することで、研磨性能を維持する方法が提案されている⁶⁾⁷⁾。しかし、今回想定しているような簡易な研磨にはスラリー吐出装置や回収装置を必要としない従来

からの磁性研磨材を用いた方が、設備の面で簡略化できるといった優位な一面もあり、近年も磁性研磨材を利用した研究が行われている^{8)~10)}。また、磁性研磨材を用いた研究の中には、交流磁場を用いて粒子に上下方向の運動を与え攪拌を促すことで研磨性能の低下を防ぐ方策も提案されている⁹⁾。

著者らは、このような磁性研磨材を攪拌する方法として、回転磁極の軸傾斜に注目した。従来の研究では回転磁極は工作物平面に対して垂直に配置している。垂直に配置した回転磁極に軸傾斜を与えることで、粒子には工作物に対して垂直方向の速度ベクトルを与えることができる。その結果、粒子の攪拌作用により、砥粒の効率的な利用と長時間安定した研磨性能が期待できる。このように工具に軸傾斜を与えることは摩擦攪拌接合でも採用されており、軸傾斜を与えることによって接合部の塑性流動現象を促進していると考えられている¹¹⁾。また、著者らは、平面に設けた溝内研磨において、軸傾斜を与えることによって、従来よりも溝底面の表面粗さが向上するという有用な結果も得ている¹²⁾。このようななかで、平面磁気研磨においては、回転磁極に軸傾斜を与えた場合の研磨性能について不明な点が多い。

そこで、本研究では、一方方向に軸傾斜を与えた状態で平面磁気研磨を行い、研磨特性について検討を行った。その結果、回転磁極に軸傾斜を与えない場合に比べ、長時間安定した除去量と表面粗さが得られることを明らかにした。また、軸傾斜を一方方向に固定せず、工作物の送り方向に応じて軸傾斜の方向を変えた研磨方法を検討し、軸傾斜を与えない場合では得られなかった底部が平坦な断面形状が得られることを示した。この結果より、広範囲の研磨を行う場合、単純な

^{*1} 長野県産業労働部: 〒380-8570 長野県長野市大字南長野字幅下692-2

Department of Commerce, Industry and Labor, Nagano Prefecture

^{*2} 信州大学教育学部: 〒380-8544 長野県長野市西長野6-1
Faculty of Education, Shinshu University

〈学会受付日: 2018年10月22日〉

〈採録決定日: 2019年 1月27日〉

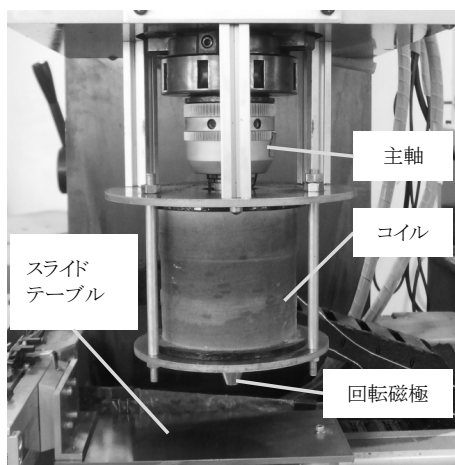


図1 研磨装置の概略図

表1 実験条件

| | | |
|-------|---|----------------------------------|
| 工作物 | 材質 | SUS304 |
| | 板厚 | 2mm |
| | 初期面粗さ | 1.5~2 μ mRz |
| 磁性研磨材 | 強磁性材 (ショットピーニング用鋼球: ϕ 100 μ m) | 4.8g |
| | 砥粒 (WA#3000) | 1.0g |
| | 油脂 (オレイン酸) | 0.25g |
| 研削液 | 水溶性 (ソリュブルタイプ) | 0.5ml/pass |
| 研磨条件 | 回転磁極 (SS400) | 外径 ϕ 20mm 先端 ϕ 10mm |
| | 磁極回転数 | 620 min^{-1} |
| | 起磁力 | 2.5 \times 3000A |
| | 加工間隙 | 3mm |
| | 回転磁極の軸傾斜 | 0, 5, 10, 15 $^{\circ}$ |
| | 工作物の送り方向 | x 軸, y 軸方向 |
| | 工作物の送り速度 | 20mm/min |
| | 工作物の送り量 | 40mm/pass |

研磨パスを設定することで広範囲の研磨が可能になることを明らかにしたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

図1に研磨装置の概略図を示す。研磨装置は、万能フライス盤の主軸部を改良し、主軸部に回転磁極を取付け周囲にコイルを配置している。コイルに励磁電流を与え、磁界を発生させる。このとき、回転磁極側がN極、スライドテーブル側がS極となる。また、工作物はスライドテーブルに固定し、スライドテーブルから送りを与える。

工作物と回転磁極先端の間には数mmの加工間隙を設け、その加工間隙に磁性研磨材を供給する。供給された磁性研磨材は、磁力線に沿って粒子ブラシを形成する。この状態で回転磁極を回転させることにより、粒子ブラシは回転磁極に

追従し回転運動を得るので、工作物との間に相対運動が生じ、工作物が研磨される。

2.2 実験条件

表1に実験条件を示す。本研究では、工作物にSUS304を用いた。また、磁性研磨材は、強磁性材、砥粒、油脂を単純混合したものを用い、混合割合は従来の研究結果から引用した¹³⁾。なお、油脂が研磨面を覆うと磁性研磨材が研磨面に固着しやすい状態になるため、それを防ぐため、研磨中は潤滑性と界面活性作用のある研削液を供給した。

図2に回転磁極の軸傾斜と座標系の設定について示す。本研究では、図2のように工作物平面上に回転磁極中心を原点とした直交座標系を設定し、回転磁極の軸傾斜 θ は、図2に示すようにx-z平面上において5, 10, 15 $^{\circ}$ を設定し、本文中では、例えば $\theta=15$ と表記する。なお、軸傾斜を与えない場合は $\theta=0$ とする。さらに、回転磁極の軸傾斜の方向と工作物の送り方向の関係について検討を行うため、x軸方向、y軸方向の2方向にそれぞれ送りを与えて研磨し、比較を行った。工作物の送り量は40mmとし、はじめに図2中の①方向に送り、これを1パスとし、次いで②方向に送ることで往復運動とし、研磨を行う。

図3に加工間隙の設定に関する概略図を示す。図3(b)に示すように、軸傾斜がある場合の加工間隙は、回転磁極が工作物と最も近い点で設定し、3mmとした。

2.3 総研磨量および表面粗さの測定について

本研究では、パス回数と総研磨量の関係を示すが、パス回数ごとに使用する工作物はすべて未加工のものとし、0パスから指定のパス回数まで連続で研磨し、そこで得られた重量の差を総研磨量と定義する。表面粗さの測定には表面粗さ測定機(ミツヨ SV-2100)を使用し、測定位置は図4のとおりに研磨部分の中央部3点とし、3点の平均値を測定値とした。

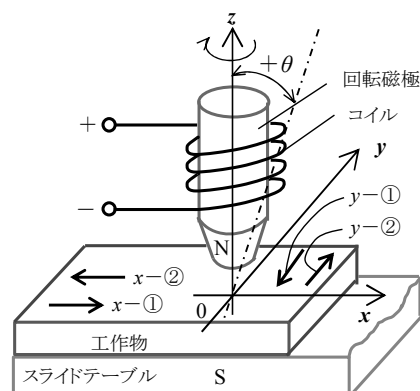
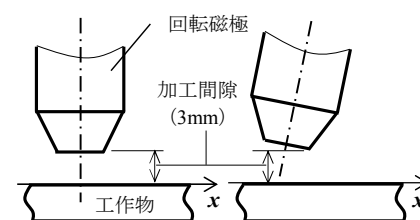


図2 回転磁極の軸傾斜と座標系の設定



(a) 軸傾斜のない場合 (b) 軸傾斜のある場合

図3 回転磁極と工作物の加工間隙の設定

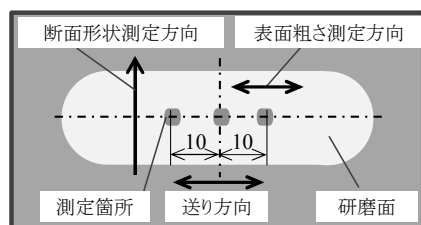
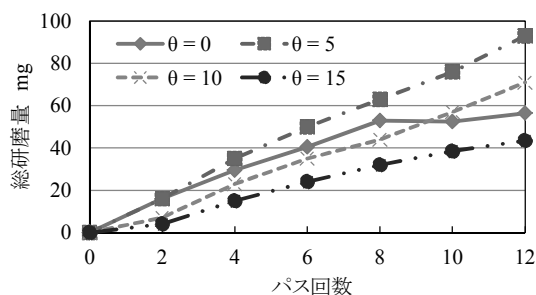
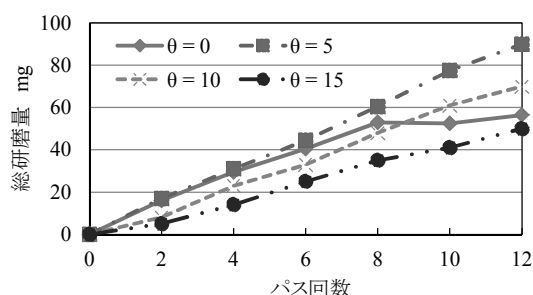


図4 表面粗さの測定位置



(a) 送り方向がx軸方向の場合



(b) 送り方向がy軸方向の場合

図5 パス回数と総研磨量の関係

なお、工作物の初期面粗さは、 $1.5 \sim 2 \mu\text{mRz}$ である。また、次章で述べる断面形状の測定方向については、図4のとおりとする。

3. 実験結果

3.1 回転磁極の軸傾斜と研磨性能について

図5に各回転磁極の軸傾斜におけるパス回数と総研磨量の関係を示す。図5より、 $\theta=0$ では、総研磨量は8パスまで一定の割合で増加しているものの、10パス以降では急激に研磨能率は低下し、総研磨量は変化しなくなる。これは、工作物に接触している砥粒の切れ刃が徐々に劣化することや粒子ブラシが目づまりを起こしていることが原因と考えられるが、主たる原因は、後者の目づまりにあると考えている。その理由は次のとおりである。

粒子ブラシには攪拌作用が働かないため、研磨時に発生した切りくずは粒子ブラシ外へ排出されないが、8パスまでに発生した切りくずは粒子ブラシの粒子間に収まるため、研磨能率に影響を及ぼさない。しかし、8パスを超えると粒子間の許容量を超え、切りくずが砥粒の切れ刃を覆い目づまり現象が急激に起き、急激に研磨能率が低下すると考えている。

一方で、回転磁極に軸傾斜がある場合、その角度や送り方向に関係なく、総研磨量は12パスまでほぼ一定の割合で

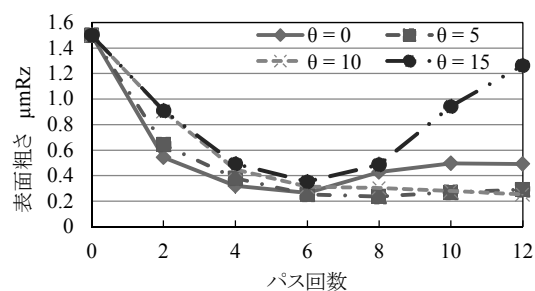
増加しており、 $\theta=0$ で見られたような急激な研磨能率の低下はみられない。このことから、回転磁極に軸傾斜を与えることによって、粒子ブラシの寿命を1.5倍以上延ばす効果があり、長時間安定した研磨能率を得られることがわかる。この理由は次のとおりである。

軸傾斜を与えることによって、加工間隙が一定でなくなるため、工作物との接触面において粒子ブラシ内の磁場の強さは同心円上で同一ではなくなり、研磨中の強磁性材の運動は不安定になる。このとき、強磁性材は弱い磁場から強い磁場へ移動し、この動きが活発に起こることによって、粒子ブラシ内で強磁性材の攪拌運動につながる。これによって、切りくずが研磨面から排出および粒子ブラシ内で攪拌され、目づまりを抑制し、長時間安定した研磨が可能になったと考えている。また、 $\theta=5$ の条件でも12パスまで安定した研磨能率が得られていることから、軸傾斜はわずかな角度で十分に磁性研磨材の攪拌効果が得られるといえる。

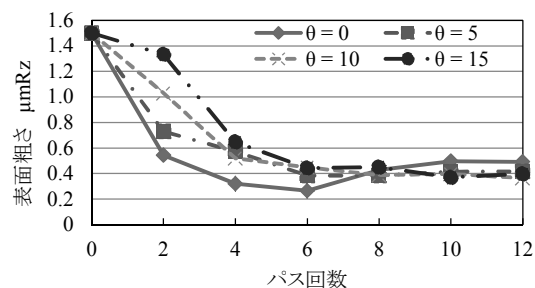
次に、図6に各回転磁極の軸傾斜におけるパス回数と表面粗さの関係を示す。図6より、 $\theta=0$ では、8パスから表面粗さの悪化がみられる。これは、図5の $\theta=0$ で研磨能率が低下した原因と同様で、砥粒の劣化や粒子ブラシの目づまりによって研磨性能が低下したことが原因であると考えられる。一方で、回転磁極に軸傾斜を与えた場合、送り方向がx軸方向で $\theta=15$ の場合を除いて、パス回数が増えると表面粗さの値は改善し、8パス以降はほぼ一定の値になる。このことから、回転磁極に軸傾斜を与えることによって、長時間安定した研磨が可能になるといえる。

次に、送り方向がx軸方向で $\theta=15$ の場合、8パス以降で表面粗さが悪化する現象については次のように考える。

図7に粒子ブラシの形状変化について、表2に磁極回転中に粒子ブラシが工作物と接触している面における、x軸方向、y軸方向の粒子ブラシの最大接触長さおよび図7中に示す加



(a) 送り方向がx軸方向の場合



(b) 送り方向がy軸方向の場合

図6 パス回数と表面粗さの関係

工間隙の最大値Aを示す。表2より、x軸方向では、軸傾斜が大きくなると加工間隙の最大値Aの増加と遠心力の影響から、工作物と接触している粒子ブラシの接触長さが減少し、非接触の部分も存在する(図7中のB部)。また、後述するとおり、 $\theta = 15$ では、加工間隙の影響を受け、加工間隙の大きい部位では、除去能力が低い(図7中のB部)。さらに、軸傾斜が大きくなると供給する研削液は粒子ブラシによって泡立てられ、パス回数が増えるに従って徐々に泡が発生する。泡の発生により、研削液の潤滑性と界面活性作用の効果が落ち、磁性研磨材が研磨面に固着しやすくなる。特に磁極中心部は研磨圧力が高く、相対速度も小さいため、一段と磁性研磨材が固着しやすい。一方で、粒子ブラシ外周部(図7中のC部)は相対速度も大きいため、磁性研磨材が固着しにくく、固着しても磁性研磨材の除去が可能になる。

このような状況のなかで、x-①方向の送りでは中心部で磁性研磨材が固着しても、その後粒子ブラシの外周部(図7中のC部)が通過することによって、固着した磁性研磨材を除去できる。一方で、x-②方向の送りでは、磁極中心部で磁性研磨材が固着すると、その後通過する外周部(図7中のB部)は、前述のとおり、固着した磁性研磨材を除去できない。8パス目になると、研削液の潤滑性と界面活性作用の効果も低下し、x-②方向でもあるため、磁性研磨材が固着する。実際に、10パス研磨した研磨面には図7に示すように中央部に磁性研磨材が固着している様子が見られた。固着した磁性研磨材に押付け圧力が作用することで、研磨面に圧痕が生じ、表面粗さが悪化したものと考えられる。

また、y軸方向送りの $\theta = 15$ の条件についても研削液の泡は発生したが、表面粗さは悪化しない。その理由としては、y-①、y-②方向どちらの場合についても、x-①方向の場合と同じように、磁極中心部で固着した磁性研磨材をその後通過する除去能力が高い外周部によって除去できるためと考える。

以上の結果より、回転磁極に軸傾斜を与えることによって、長時間安定した研磨が可能になる一方で、軸傾斜の角度が大きくなると、粒子ブラシの形状変化や過剰な攪拌作用に伴う研削液の泡化などの要因によって、表面粗さが悪化する点には注意する必要があることが明らかになった。なお、工作物の送り方向に関する考察については次章で行う。

3. 2 押付け圧力と研磨面の断面形状に関する考察

前節より、回転磁極に軸傾斜を与えることによって、研磨性能が長時間安定することが明らかになった。しかしながら、軸傾斜を与えることによって、軸傾斜がない場合と比較して研磨面の断面形状に変化がみられることが予測できる。そこで、各軸傾斜における研磨後の工作物について、研磨面の断面形状を測定した。なお、図6より8パス以降では一部の条件で表面粗さの悪化がみられるため、測定には6パス研磨した工作物を用いた。また、測定位置は、図4に示すように各軸の側から+側に向かって、中央部を測定した。

図8に断面形状を測定した結果を示す。なお、図8において、各条件の除去面積の比が図5の各条件の総研磨量の比と一致していない。これは、工作物に数 μm の反りが存在し、反りの方向および大きさも工作物によってばらつきがあること

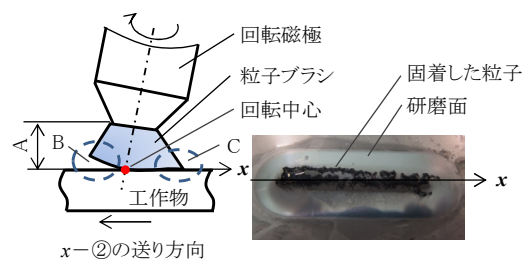
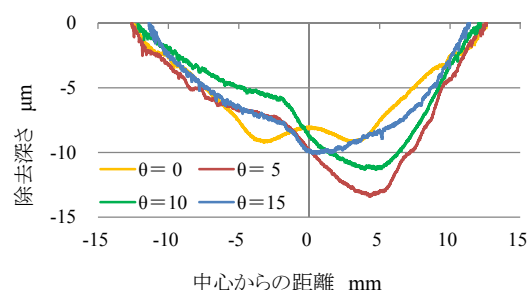


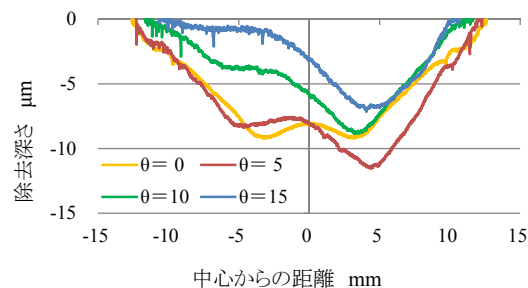
図7 粒子ブラシの形状と固着した粒子の様子
(研磨条件:x軸方向送り, $\theta = 15$, 10パス)

表2 粒子ブラシの接触長さ(最大値)と加工間隙(最大値) mm

| | 接触部の長さ(最大値) | | 加工間隙A (最大値) |
|---------------|-------------|------|----------------|
| | x軸方向 | y軸方向 | |
| $\theta = 0$ | 24 | 24 | 3.0 |
| $\theta = 5$ | 24 | 24 | 3.9 |
| $\theta = 10$ | 22 | 24 | 4.7 |
| $\theta = 15$ | 20 | 22 | 5.6 |



(a) 送り方向がx軸方向の場合



(b) 送り方向がy軸方向の場合

図8 各軸傾斜の6パスにおける断面形状の測定結果

が原因と考えられる。しかしながら、反りは数 μm であり、図8の除去深さの大きさと比較すると、反りが結果に及ぼす影響は少ないと考える。

図8に示すように、一般に、 $\theta = 0$ の場合、断面形状は中心を境に対称となる⁴⁾。一方で、軸傾斜がある場合、図8より、x軸、y軸方向送りの両条件とも断面形状は中心を境に非対称となっており、どの条件においても+側で除去深さが大きくなっている。さらに、y軸方向送りでは、x軸方向送りに比べて各条件で非対称性の程度が大きく、特にy軸方向送りで $\theta = 15$ の条件では一側で除去深さがほとんど得られていない。

そこで、軸傾斜がある場合、断面形状に非対称性が見られる要因について、プレストンの式を用いて考察した。なお、プレストンの式を用いた検討では、軸傾斜の影響を明確にする

ため、実験条件の中で最も角度が大きい $\theta=15$ で行った。

プレストンの式は、研磨による除去量を算出する場合に用いられ、(1)式で表すことができる¹⁴⁾。

$$M = kPVt \quad (1)$$

M : 除去量, k : 比例定数, P : その点での押付け圧力,
 V : その点での工具と工作物の相対速度,
 t : その点での加工時間

図9に圧力センサの概要と原点の設定について示す。はじめに、図9(a)のように工作物に圧力センサ(共和電業PS-2KC, センサ径 $\phi 6$, $r0.6$)を設置し、 x 軸、 y 軸上で原点からの距離 r における粒子ブラシからの押付け圧力 P を調べた。なお、軸傾斜を与える場合、回転磁極先端の回転中心と工作物平面上での回転中心は一致しないため、工作物平面上での回転中心を計算により求め、図9(b)のように原点を設定した。また、押付け圧力 P の測定の際は、磁性研磨材は強磁性材のみの構成とし、回転磁極は回転させた状態で測定を行った。

図10に x 軸、 y 軸上で原点からの距離 r における押付け圧力の測定結果を示す。なお、参考として $\theta=0$ の場合についても示したが、一般に、 $\theta=0$ の場合、押付け圧力の分布は原点を境に対称になる⁴⁾。しかし、図10より、いずれの条件においても押付け圧力の分布は原点を境に非対称となった。 x 軸上で押付け圧力の分布が非対称になる要因は、図9(b)に示すように x 軸上で加工間隙が一定でないことが挙げられる。これは、 $\theta=15$ の押付け圧力の最大値が、 $\theta=0$ の押付け圧力の最大値に対して2割程度減少している原因とも考える。進村らの研究²⁾や山口らの研究¹⁵⁾によれば、加工間隙が増えることによって、磁束密度や押付け圧力は低下することが報告されている。したがって、磁場の非対称性から押付け圧力が非対称になったといえる。

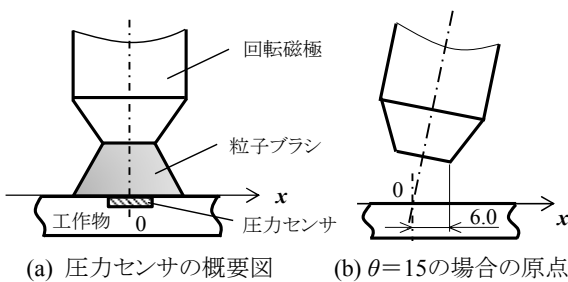


図9 圧力センサの概要と原点の設定について

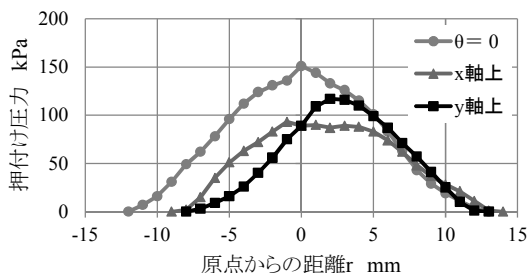


図10 各点の押付け圧力($\theta=15$ の場合)

また、加工間隙の最も狭い部位は x 軸方向の約5mmの位置であるが、押付け圧力のピークは2~3mmの位置にある。この理由については、次のように考える。今回用いた圧力センサの大きさは $\phi 6$ mmであり、2~3mmの位置では回転磁極先端の底面部がすべて圧力センサ上の領域に入っている。一方で、5mmの位置では、圧力センサ上の領域を回転磁極先端の側面部(円筒面側)が半分程度を占めており、側面部は底面部に比べて磁場が弱いため、2~3mmの位置に比べて押付け圧力が低下したものと考え¹⁵⁾。

次に、 y 軸上で押付け圧力の分布が非対称になった要因を考える。軸傾斜の方向は $x-z$ 平面上で設定しているため、 y 軸上では加工間隙は一定であり、磁場の観点から考えれば y 軸上の押付け圧力の分布は原点を境に対称となる。したがって、 y 軸上では磁場分布以外の要素すなわち粒子の運動が関与していると考えられる。そこで、粒子ブラシ中の粒子の速度ベクトルに着目した。

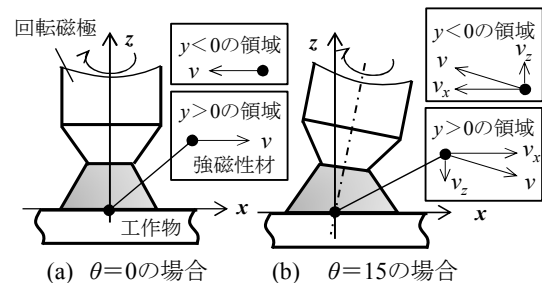


図11 粒子ブラシ中の粒子がもつ速度ベクトル

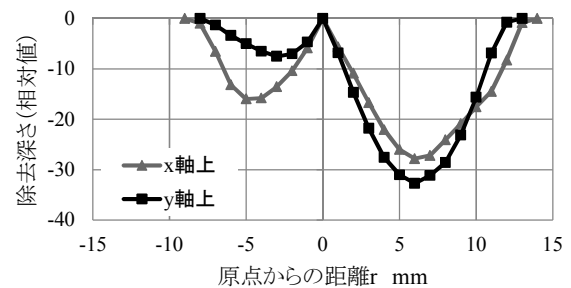


図12 プレストンの式より求めた除去深さ(相対値)

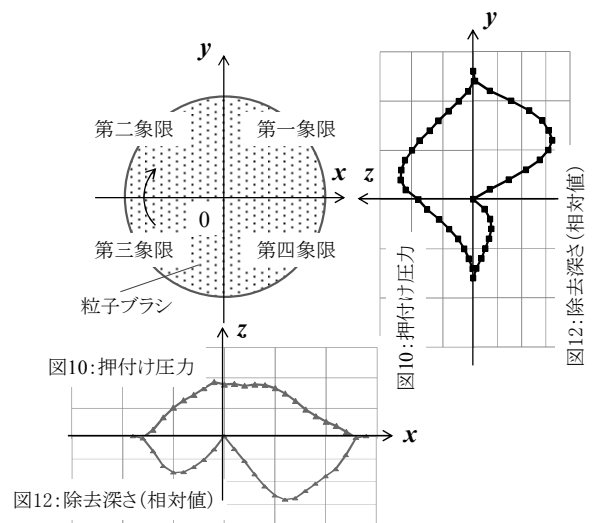


図13 押付け圧力と除去深さ(相対値)のまとめ

図11に $\theta=0$ および $\theta=15$ におけるy軸上の粒子がもつ速度ベクトルを示す。図11(b)より、 $\theta=15$ の場合、回転磁極の回転によってy軸上の粒子に発生する速度成分には、工作物に対して水平方向成分 v_x と鉛直方向成分 v_z がある。さらに、 v_z の向きは $y>0$ と $y<0$ の領域で逆となる。このことから、 $y>0$ では、 v_z は鉛直下向きとなり押付け圧力を高め、 $y<0$ では、 v_z は鉛直上向きとなり押付け圧力を弱める。このことは、図10の測定結果と一致する。したがって、y軸上では、粒子がもつ速度ベクトルの非対称性から押付け圧力が非対称になったといえる。

次に、相対速度 V を算出した。算出方法は、x-y平面上で図9(b)に示す原点からの距離 r および磁極回転数から算出した角速度の積から求めた。ただし、x軸上では軸傾斜を考慮し、 $r\cos 15^\circ$ と角速度の積とした。さらに、y軸上の相対速度については、図11(b)に示すとおり相対速度の V_x 成分を求め、プレストンの式に適用した。また、比例定数 k および加工時間 t は、すべての条件で同じと仮定して除去量(相対値)を算出し、除去深さ(相対値)として置き換えた。なお、今回の検討では、研磨に作用する砥粒の分布は研磨面内で一様とした。

図12に算出した除去深さ(相対値)を示す。また、図13に図10と図12の結果をまとめた概略図を示す。なお、相対速度については、原点に対して対称であるため図13では省略した。図13より、第一象限で押付け圧力と除去深さ(相対値)が最も大きいことが予測でき、第三象限で押付け圧力と除去深さ(相対値)が最も小さいことが予測できる。この結果は、図8で断面形状が非対称になり、さらに+側で除去深さが大きくなっているという結果と一致する。これらの結果から、軸傾斜を与えることによって断面形状が非対称になることは、避けられない現象であると実験的に示した。

以上の結果より、軸傾斜を与えることによって、時間経過による研磨能率の低下や研磨面の劣化を防ぐことができ、軸傾斜を与えない場合に比べて、粒子ブラシの寿命を1.5倍以上延ばす効果があることを明らかにした。一方で、研磨面の断面形状が非対称になり、条件によっては除去量がほとんど得られない箇所が生じる課題や、軸傾斜を大きくすることによって、粒子ブラシの形状変化や研削液の泡化が生じ、表面粗さの悪化につながる可能性があるという課題も明らかになった。

4. 断面形状の改善に向けた研磨方法の提案と検討

4.1 新たな研磨方法における断面形状の予測

断面形状の非対称性は、均一な除去深さを得られないことに加えて、広範囲の研磨を行う場合、研磨パスの設定を複雑にする。そこで、前章の結果をふまえ、断面形状の非対称性を解決するためにパス方法について検討を行った。

図8より、 $\theta>0$ 方向に軸傾斜を与え研磨を行った研磨面に対して、 $\theta<0$ 方向に同じ角度だけ軸傾斜を与え、同条件で研磨することで対称性をもった断面形状を得られることが予測できる。そこで、図8で測定した断面形状を各軸に線対称にして得られた断面形状を算出し、得られた断面形状と図8の断面形状を重ね合わせた。すなわち、工作物の同じ箇所を $\pm\theta$ の軸傾斜でそれぞれ6パス(合計12パス)研磨を行ったという想定で検討を行った。もしくは5軸加工機を用いれば、図7の考

察から6往復(12パス)のうち①方向の送りでは $+\theta$ の軸傾斜で研磨を行い、②方向の送りでは $-\theta$ の軸傾斜で研磨を行うという研磨方法も実現できる。

図14に重ね合わせて得られた断面形状および参考として $\theta=0$ で12パス研磨を行った断面形状の結果を示す。図14(a)より、送り方向がx軸方向の場合、 $\theta=5$ および $\theta=10$ では、対称性をもった底部が平坦な断面形状が得られる。一方で、図14(b)より、送り方向がy軸方向の場合、どの条件においても送り方向がx軸方向の場合に比べ、広範囲に底部が平坦な断面形状は得られない。また、図14からも明らかなように、一般に $\theta=0$ では断面形状は複雑な形状をしており、底部が平坦な断面形状は得られない。したがって、広範囲の研磨を行う場合、広範囲に均一な除去深さを得ようとする研磨パスの設定は複雑になる。しかし、図14(a)の $\theta=5$ および $\theta=10$ のように、底部が平坦な断面形状が得られれば、等ピッチの単純な研磨パスを設定することにより、広範囲に均一な除去深さを得ることができる。

4.2 新たな研磨方法における断面形状の検証

前節で提案した研磨法を用いることによって、対称性をもった底部が平坦な断面形状が得られる可能性について示した。また、図8において工作物の反りによるばらつきについて言及したが、反りは数 μm であり、図14で得られる除去深さの大きさと比較すると、反りによるばらつきが前節で提案した研磨法に及ぼす影響は小さく、提案した研磨法は有効であると考えられる。そこで、提案した研磨法を用いることによって、予測した断面形状が得られるか実験を行った。

実験条件は、工作物の送り方向はx軸方向とし、図6(a)の12パスにおいて最も表面粗さの値が向上した $\theta=10$ の軸傾斜とした。すなわち、 $\theta=10$ で6パス研磨し、その後 $\theta=-10$ として同じ箇所を6パス研磨し、合計12パス研磨を行ったあとの断面形状の確認を行った。

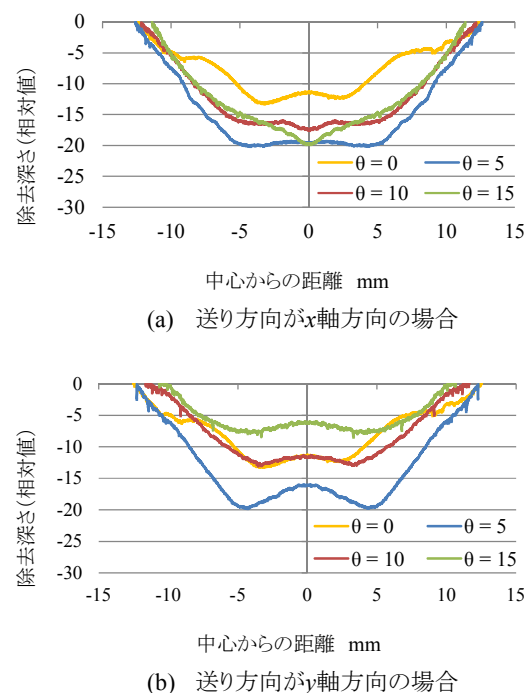
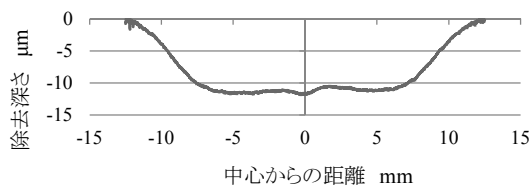
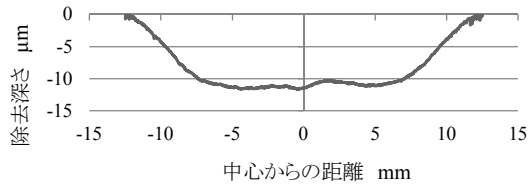


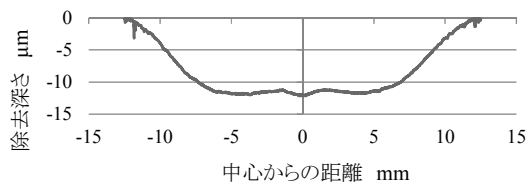
図14 重ね合わせによる断面形状の予測



(a) 測定箇所1



(b) 測定箇所2



(c) 測定箇所3

図15 研磨面の断面形状について($\theta=10$ の場合)

図15に研磨後の断面形状を示す。なお、断面形状は3か所を測定した。図15より、3か所における差異はほとんど見られず、断面形状は図14で予測した形状に近いものとなった。したがって、提案した研磨法を用いることによって、対称性をもった底部が平坦な断面形状が研磨面全体に得られることを確認できた。また、これらの結果から、 $\theta=15$ の場合を除き、 x 軸方向に工作物を送ることによって底部が平坦な断面形状が得られ、総研磨量や表面粗さといった研磨性能も図5、図6の結果から時間経過により低下しないため、工作物の送り方向は x 軸方向すなわち軸傾斜と同じ方向へ送ることが適当である。また、その場合の工作物の送り方向は、前述のとおり粒子ブラシの形状変化を考慮すると、工作物の任意の点を加工間隙の大きい方が最初に通過するよう設定するとよい。

5. 結 言

回転磁極に軸傾斜を与えた状態で平面研磨を行い、軸傾斜が研磨特性に及ぼす影響について検討を行った。また、送り方向に応じて軸傾斜の方向を変える研磨方法を提案し、検証実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 軸傾斜を与えることによって、その角度や送り方向に関係なく、時間経過による研磨能率の低下を防ぐことができ、軸傾斜を与えない場合に比べて、粒子ブラシの寿命を1.5倍以上延ばす効果がある。
- (2) 軸傾斜を与えることによって、粒子ブラシの寿命を延ばす効果があるため、時間経過による研磨面の劣化は見られず、表面粗さは一定の値まで向上し、収束する。一方で、軸傾斜の角度が大きくなると、粒子ブラシの形状変化や研削液の泡状化などの要因によって、表面粗さ

が悪化する可能性があるため、軸傾斜を大きくする場合は注意が必要である。

- (3) 工作物の送り方向に応じて軸傾斜の方向を変えることにより、軸傾斜の角度と送り方向の条件によっては、対称性をもった底部が平坦な断面形状を得られ、単純な研磨パスを設定することによって、広範囲な研磨を行える可能性について示した。
- (4) 工作物の送り方向は、断面形状を考慮すると、 x 軸方向すなわち軸傾斜と同じ方向へ送ることが適当である。また、その場合の工作物の送り方向は、粒子ブラシの形状変化を考慮すると、工作物の任意の点を加工間隙の大きい方が最初に通過するよう設定するとよい。

6. 参考文献

- 1) T.SHINMURA, K.TAKAZAWA and E. HATANO: Study on Magnetic-abrasive Finishing (1st Report) – On Process Principle and a Few Finishing Characteristics –, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 52, 5(1986) 851 (in Japanese).
- 2) T.SHINMURA, E.HATANO and K. TAKAZAWA: Development of Plane Magnetic-abrasive Finishing Apparatus and its Finishing Performance, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 52, 6(1986) 1080 (in Japanese).
- 3) T.SHINMURA and H.YAMAGUCHI: Study on a New Internal Finishing Process by Applying Magnetic Abrasive Machining (Internal Finishing of Stainless Steel Tubings and Clean Gas Bombs), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 59, 560(1993) 1261 (in Japanese).
- 4) H. KAWAKUBO, U. SATO and S. MURATA: Study on polishing performance of slurry discharge type magnetic polishing tool – Finishing characteristics of non-ferromagnetic materials –, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 58, 4(2014) 247 (in Japanese).
- 5) Y. WANG, Y. WU, and M. NOMURA: Feasibility study on surface finishing of miniature V-grooves with magnetic compound fluid slurry, Precision Engineering, 45(2016) 67.
- 6) M. ANZAI, T. SUDO, H. OTAKI and T. NAKAGAWA: Experiment of Magnetic Assisted Finishing using Slurry Abrasive, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 37, 1(1993) 51 (in Japanese).
- 7) H.KAWAKUBO, K. TSUCHIYA, U. SATOH, T. YAMAZAKI, K. MIKI, Y. TEZUKA: Surface magnetic polishing using spindle through type magnetic pole – Influence of particle brush on polishing characteristics –, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 46, 8(2002) 401 (in Japanese).
- 8) T. FURUKI, L. MA, T. HIROGAKI, E. AOYAMA and K. OGAWA: Fabrication of magic-mirror with magnetic polishing and end-milling on machining center, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 80, (2014)820 (in Japanese).
- 9) Y.ZOU: Study on the Ultra-precision Magnetic Abrasive Finishing Process using alternating magnetic field, Proceedings of Annual Fall Meeting of the Japan Society for Precision Engineering, (2016) 619 (in Japanese).
- 10) J. WU and Y. ZOU: Study on an ultra-precision plane magnetic abrasive finishing process by use of alternating magnetic field, Applied Mechanics and Materials, 395(2013)985.
- 11) H. TOKISUE and T. SHINODA: Applications of Friction Stir Welding into Light Metals, Journal of Japan Institute of Light Metals, 49, 6 (1999) 258 (in Japanese).
- 12) S.MURATA and H.KAWAKUBO: The Influence of the Rotating Magnetic Pole's Angle in a Narrow Groove Polishing, Proceedings of Annual Fall Meeting of the Japan Society for Precision Engineering, (2015) 589 (in Japanese).
- 13) H. KAWAKUBO, K. TSUCHIYA, Y. SUN, Y. TEZUKA, K. MIKI, T. YAMAZAKI, M. SATOH and T. SHINMURA: Study on the Characteristics of Simply Mixed Oil Bonded Magnetic Abrasives in Surface Polishing, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 44, 6(2000) 282 (in Japanese).
- 14) たとえば、精密加工実用便覧, (2000) 572.
- 15) H.YAMAGUCHI and T.SHINMURA: New Internal Finishing Process by Application of Magnetic Abrasive Machining(3rd Report, Effects of Finishing Pressure Distribution on Characteristics), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 61, 586(1995) 2605 (in Japanese).