

スラリー吐出式磁気研磨工具の研磨性能に関する研究 非磁性工作物の仕上げ特性

川久保英樹^{*1}, 佐藤運海^{*1}, 村田修一^{*2}

Study on polishing performance of slurry discharge type magnetic polishing tool
Finishing characteristics of non-ferromagnetic materials

Hideki KAWAKUBO, Unkai SATO and Shuichi MURATA

磁気研磨法は、曲面の仕上げや段差面のエッジ丸み付け加工に有効な加工法である。本研究では、磁気研磨法と NC 工作機械との連携による多品種・少量の仕上げ技術確立するため、マシニングセンタ用のスラリー吐出式磁気研磨工具を開発した。磁気研磨工具先端に形成された粒子ブラシ群へ、常に新しい砥粒が供給されると同時に、切りくずの排出が行われるため、目づまりが発生せず安定した磁気研磨を行うことができる。本報では、スラリー吐出式磁気研磨工具の磁石形状と配置、およびスラリー吐出量が研磨性能に及ぼす影響を実験的に検討した。さらに、長時間の平面研磨やエッジの丸み付け加工に適用し、スラリー吐出式磁気研磨工具の有用性を示した。

Key words: magnetic polishing, polishing tool, abrasive slurry, particle brush, polishing characteristics

1. 緒言

磁気研磨法は、フレキシブルに変形可能な粒子ブラシを利用するため、曲面の仕上げや段差面のエッジ丸み付け加工に有効な加工方法¹⁾であり、切削加工による曲面の表面仕上げ²⁾やバリ取り²⁾、溝内面の部分的な仕上げ³⁾などの報告がある。また、多品種・少量の仕上げ加工に磁気研磨を適用する場合、専用の磁気研磨装置ではなく、NC 工作機械などとの連携によって、汎用性を高める必要がある。これまでにも、マシニングセンタに磁気研磨工具を搭載して表面仕上げに適用した事例⁴⁾の報告がある。

ところで、磁性研磨材を用いた磁気研磨では、砥粒切れ刃の鈍化や、粒子ブラシ内への切りくず残留による目づまりから、研磨性能が低下するという問題がある。とくに、フライス系工作機械のように、磁極(粒子ブラシ)を回転させながら平面や曲面を磁気研磨する場合、粒子ブラシを形成する磁性研磨材粒子群は、ほとんど攪拌されることがない。そのため、加工面に接する粒子ブラシ先端部では、前述の砥粒切れ刃の鈍化や目づまりが発生しやすく、長時間の安定した研磨を行うことが困難である。この問題を解決するために、強磁性材粒子のみで形成された粒子ブラシとスラリーとを使用して磁気研磨する方法が提案されてきた⁵⁾。このような中で、著者らはスラリーを磁極先端から連続的に吐出するスピンドルスラリー式磁気研磨法における研磨特性を明らかにしてきた⁶⁾⁷⁾。

本研究の目的は、磁気研磨法と NC 工作機械との連携によ

る表面仕上げ技術の確立である。そのために、長時間研磨においても安定した研磨性能を有する磁気研磨工具の開発とその研磨メカニズムを明らかにする。本報では、スラリーが先端部から吐出するマシニングセンタ用のスラリー吐出式磁気研磨工具(以下、スラリー式磁気研磨工具と呼ぶ。)を提案し、非磁性工作物の表面仕上げ、エッジ丸み付けへ適用するため、非磁性工作物における研磨能力について詳細な検討を行った。そして、提案した磁気研磨工具を用いて長時間研磨を行い、良好な仕上げ面が得られること、および微細凹凸面のエッジ丸み付け加工への適用が可能であることを明らかにしたので報告する。

2. スラリー式磁気研磨工具

図 1 にスラリー式磁気研磨工具の概略図を示す。この磁気研磨工具は、フライス盤やマシニングセンタの主軸へコレットチャックを介して取り付けられる。工具先端部には、ネオジウム永久磁石が組み込まれており、強磁性材粒子を供給して粒子

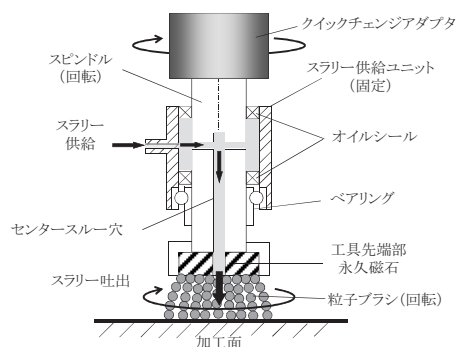
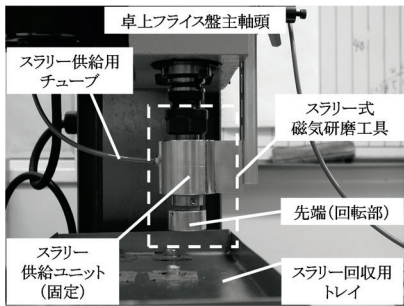


図 1 スラリー式磁気研磨工具の概略

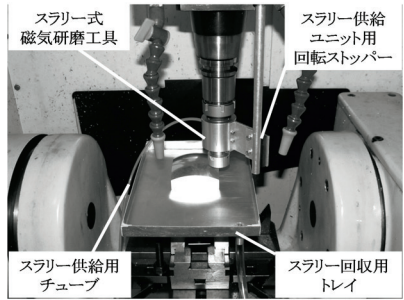
*1 信州大学教育学部: 〒380-8544 長野県長野市西長野 6-0
Faculty of Education, Shinshu University

*2 長野県工科短期大学校: 〒386-1211 長野県上田市下之郷 813-8
Nagano Prefectural Institute of Technology

〈学会受付日: 2013 年 9 月 27 日〉



(a) 卓上フライス盤



(b) マシニングセンタ

図2 工作機械への取り付け状態

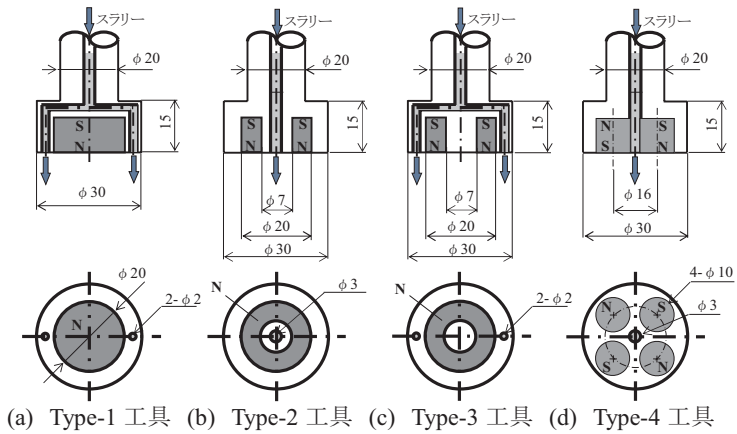


図3 スラリー式磁気研磨工具先端部の形状と寸法

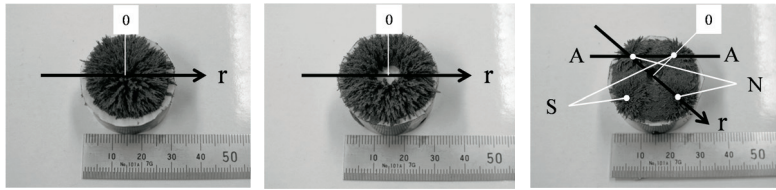


図4 粒子ブラシの形態(工具裏面より撮影)

ブラシを形成させる。永久磁石を使用していることから、磁場強度の制御はできないが、工具の小型化には有利である。

スラリーは、専用の供給用ユニットから回転部に設けられたセンタースルー穴を経由して、工具先端から吐出される。そして、回収用トレイからタンクへ戻り、循環供給される。図2にスラリー式磁気研磨工具を卓上フライス盤、およびマシニングセンタへ取り付けした状態を示す。回収用トレイ(SS400材、厚さ1mm)は、非磁性の取り付け治具により磁氣的に絶縁して、卓上フライス盤、およびマシニングセンタに設置した。工作物は、非磁性の治具を用いて回収用トレイ上に直接取り付ける。

図3にスラリー式磁気研磨工具先端部の形状と寸法を示す。それぞれType-1工具、Type-2工具、Type-3工具、Type-4工具と呼ぶこととする。Type-1工具は丸型の永久磁石(外径φ20mm×厚さ10mm)1個を配置しており、スラリーは外周部2箇所から吐出される。Type-2工具はリング型の永久磁石(外径φ20mm×内径φ7mm×厚さ10mm)1個を配置しており、スラリーは中心部から吐出される。Type-3工具はリング型磁石を配置し、スラリーは外周部2箇所から吐出される。Type-4工具は丸型磁石(外径φ10mm×厚さ10mm)4個をN-S-N-Sに配置しており、スラリーは中心部から吐出される。

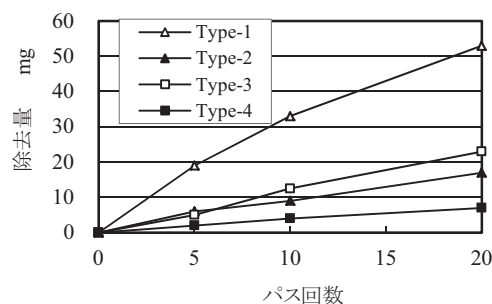
表1に実験条件を示す。試料は、非磁性のSUS304材である。強磁性材粒子には、市販のショットピーニング用鋼球や軸受用鋼球などが考えられるが、供試材として低コストである市販のショットピーニング用鋼球を使用した。研磨実験においては、工具の1回通過を1パスとして定義した。

図4に工具裏面から観察した粒子ブラシの形態を示す。予備実験の結果、Type-4工具の場合、4か所あるN-S磁石配置間へ強磁性材粒子が凝集して、見かけ上の粒子ブラシが小さくなり、加工面との接触面積が減少することが明らかにな

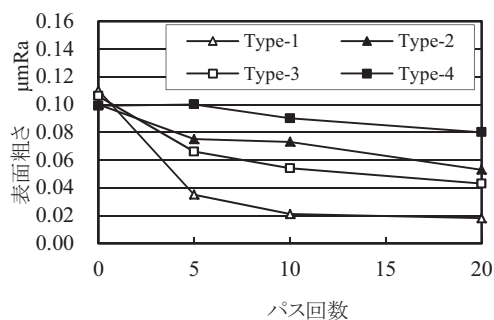
表1 実験条件	
試料	SUS304 No.2B, 厚さ:2mm 初期面粗さ:0.1μmRa (圧延方向に対して直角に測定)
回転数 送り速度 移動量 加工間隙	500 min ⁻¹ 30 mm/min 60 mm 3 mm
ネオジウム永久磁石	Type-1: φ20mm×10mm(0.4T) Type-2, Type-3: φ20mm×φ7mm×10mm(0.4T) Type-4: φ10mm×10mm(0.4T)
強磁性材粒子	ショットピーニング用鋼球: ピッカース硬さ700Hv以上, 1%C-steel 供給量:4.8 g(Type-1, Type-2, Type-3), 7.2 g(Type-4), (加工中の供給なし) 平均粒子径: φ175μm
研磨材スラリー	吐出量:25, 50 mL/min 砥粒:WA#8000, 砥粒濃度:5wt% 研磨液:界面活性系(X-IT MetLube), 水道水10倍希釈

った。そこで、見かけ上の粒子ブラシが、他の工具と同程度になるように、強磁性材の供給量を増やした。

スラリー吐出量は、加工中にスラリーが工作機械本体へ飛散することがない範囲で設定した。予備実験より、吐出量25mL/min以下では研磨ムラがみられた。これは、切りくずの排出が悪いこと、および前加工で硬化した表面を除去するのに必要な砥粒が不足しているためと推察される。また、既報⁶⁾と同様に、粒子ブラシのみでは表面の除去が困難であり、一定量以上の砥粒が必要であると考えられる。



(a) 除去量



(b) 表面粗さ

図5 磁気研磨工具の違いによるパス回数と除去量および表面粗さとの関係(スラリー吐出量: 50mL/min)

3. スラリー式磁気研磨工具の研磨特性

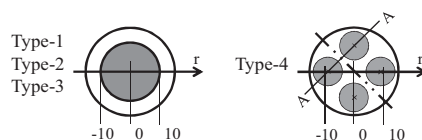
3.1 工具先端部の違いが研磨性能に及ぼす影響

図5に磁気研磨工具の違いによるパス回数と研磨性能との関係を示す。図5(a)は除去量、図5(b)は表面粗さである。パス回数に対する除去量は、Type-1 工具ではほぼ直線的に、他の工具では直線的に増加する。これは、砥粒が連続的に粒子ブラシ群へ供給されて研磨に関与し、それと同時に切りくずが良好に排出されて目づまりが抑制され、安定した研磨が行われたためである。とくに、Type-1 工具の除去能率が高い結果となった。

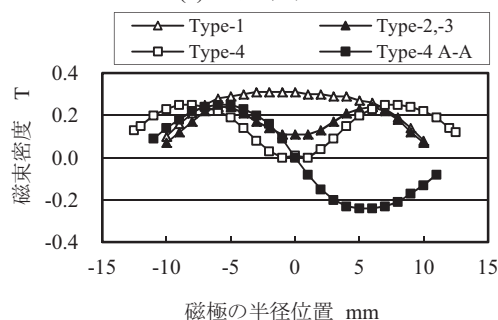
Type-2 工具と Type-3 工具とを比較すると、スラリーが中心部から吐出される Type-2 工具が、わずかに除去能率が低くなった。これは、工具送り方向を図4(b)の r 軸正方向とした場合、スラリーは中心部 $r=0$ の位置から吐出されるが、進行方向に位置する $r>0$ 側の粒子ブラシ群への供給が不安定になる。このため、除去能率がわずかに低くなったと考えられる。Type-4 工具は除去量が最も少なく、20 パス研磨後において、Type-1 工具の5 パス後の除去量の1/2以下であった。

図5(b)より、表面粗さはパス回数の増加に伴い徐々に向上する。とくに Type-1 工具では、5 パスまでに急激に向上し、10 パス以降はほぼ一定の表面粗さ($0.02\mu\text{mRa}$ 程度)となった。このときの表面粗さは、本実験条件における固有の到達粗さであり、強磁性材料粒子や砥粒の粒子径を変えることによって変化すると考えられる⁷⁾。また、既報⁷⁾において提案した2段階研磨法を用いることによって、更に表面粗さの向上が可能であると考えられる。Type-1 工具以外では、初期面が十分に除去されておらず、本実験条件固有の到達粗さまで向上していない。

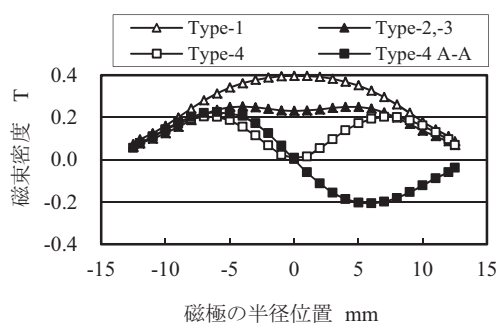
研磨性能の違いを明らかにするため、磁束密度と研磨圧



(a) 測定位置



(b) 磁束密度(先端から3mm離れた位置)



(c) 磁束密度(工作物: 卓上フライス盤に取り付け、加工間隙: 3mm)

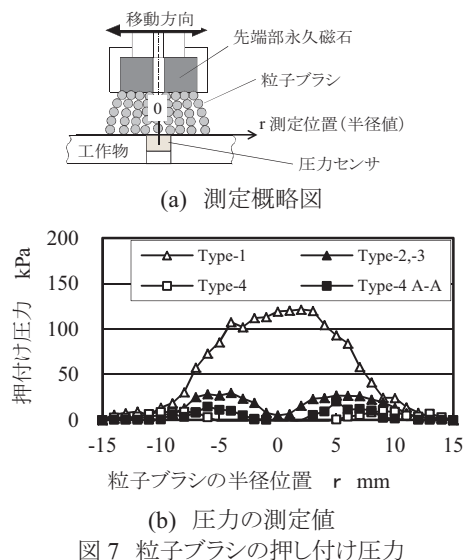
図6 スラリー式磁気研磨工具の磁束密度

力の測定を行った。図6に磁束密度の測定位置と測定値を示す。測定値は、磁石面に垂直方向の磁束密度である。

図6(b)は先端から3mm離れた位置の磁束密度である。Type-1 工具では、中心部が最大で0.31Tである。Type-2 工具、Type-3 工具では、半径位置 $r=6\text{mm}$ 付近が最大で0.25Tであり、 $|r| < 6\text{mm}$ の領域においては磁力線がリング内径部を通過して磁石裏面側へ向かうため、磁石面に垂直方向の測定値は小さくなる。Type-4 工具では、埋め込んだ4個の磁石の各中心位置において最大で0.25Tとなり、N-S磁石間(A-A断面)において閉磁気回路が形成されたため、垂直方向の測定値は小さくなる。

図6(c)は、工作物を卓上フライス盤に取り付けて、加工間隙3mmとしたときの加工面の磁束密度である。Type-1 工具では、磁束密度は中心部で最大値が0.4Tまで増加した。これは、工作物直下の回収用トレイ(磁性材)が磁化して吸引磁場が発生したためと考えられる。Type-2 工具、Type-3 工具は、最大値とそのときの半径位置には差がみられなかったが、中心部では吸引磁場の影響で磁束密度が増加している。Type-4 工具は、加工面での磁束密度に変化はみられなかった。非磁性工作物の表面磁気研磨では、磁束密度を高めるため、工作物の下部側に磁性体を設置するケースが多いが、Type-1 工具でその効果が大きく表れている。

次に、圧力センサ(NEC 三栄製 9E02-P16-500KPA, ϕ



6mm×厚さ 0.6mm)を試料に埋め込んで、粒子ブラシによる押し付け圧力分布を測定した。図 7 に押し付け圧力の測定概略図と測定結果を示す。なお、回転状態での測定は困難であることから、静止した状態で測定した。

押し付け圧力は Type-1 工具が最も大きく、他の工具との間に大きな差がみられた。これは、Type-1 工具では粒子ブラシが工具先端から放射状に形成されており、研磨面に対する法線方向の押し付け力が大きいためである。

Type-2 工具、Type-3 工具の場合、最大値は Type-1 工具の 1/4 程度であった。この事象は、次のように考えられる。最大磁束密度の半径位置、すなわち $r=6\text{mm}$ 付近を境にして、 $|r| < 6\text{mm}$ では中心部の磁束密度が増加しているものの、図 4(b)のように、粒子ブラシが少ない中心方向へ向かって倒れるように形成される。また、 $|r| > 6\text{mm}$ では、粒子ブラシは外周方向へ向かって倒れるように形成される。このため、法線方向の押し付け力が減少して圧力が小さくなる。

Type-4 工具の場合、4 か所の N-S 磁石間に閉磁気回路を形成することから、強磁性材粒子が凝集して、粒子ブラシは Type-1 工具のように放射状には形成されない。その結果、法線方向の押し付け力が極端に小さくなる。さらに、Type-4 工具は、先端部の閉磁気回路によって、他の工具と比較して強固な粒子ブラシを形成するため、粒子ブラシの特徴である柔軟性が低下する。これらのことから、磁石配置としては適していないといえる。

前記の図 5(a)において、Type-1 工具の除去能率がわずかに低下していくのは、次のように考えられる。Type-1 工具の粒子ブラシは、攪拌されないまま、他の工具よりも大きな押し付け圧力で加工に関与し、強磁性材粒子の表面が削られやすい状態になる。そして、強磁性材粒子の削り屑(磁性体)が粒子ブラシ内に残留して、目づまりの初期的な状態になるため、他と比較して、除去能力がわずかに低下したものと推察される。

以上より、粒子ブラシによる押し付け圧力が研磨性能に大きな影響を及ぼしており、Type-1 工具が最も研磨能率が高く、スラリー式磁気研磨工具に適していることが明らかになった。

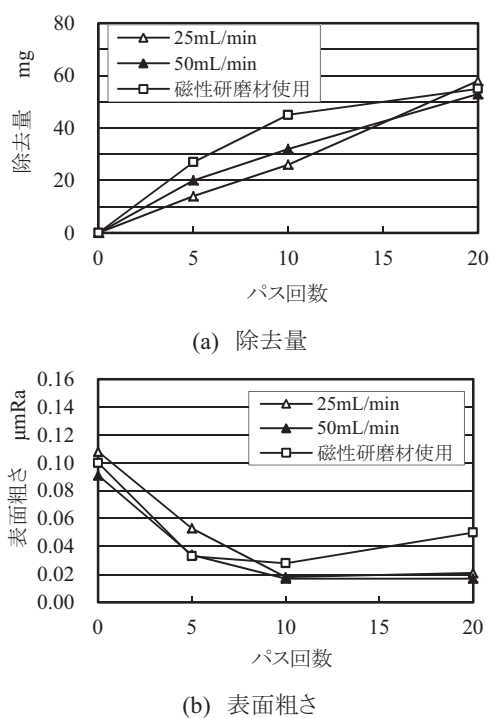


図 8 スラリー吐出量の違いによる磁気研磨工具パス回数と除去量および表面粗さとの関係 (Type-1 工具)

3.2 スラリー吐出量が研磨性能に及ぼす影響

図 8 にスラリー吐出量を変えたときのスラリー式磁気研磨工具のパス回数と、除去量および表面粗さとの関係を示す。ここでは、Type-1 工具を使用して実験を行った。比較のため、単純混合型磁性研磨材⁸⁾(ショットピーニング用鋼球 $\phi 175\mu\text{m}$: 4.8g, 砥粒 WA#8000: 1.0g, オレイン酸: 0.25g)を用いて、研磨液供給 0.8mL/min で研磨したときの結果を記載した。

単純混合型磁性研磨材を使用した場合、10 パスまでは除去能率が高いが、それ以降では除去能率が低下し、表面粗さが劣化する。これは、磁性研磨材中の砥粒切れ刃が鈍化したこと、および切りくずが粒子ブラシ内に残留して目づまりしたためである。10 パス以下で除去能率が高いのは、磁性研磨材中のオレイン酸の粘度がスラリーの粘度よりも高く、砥粒の保持能力が増加し、研磨能力が高くなったため⁹⁾と考えられる。それに対して、Type-1 工具で研磨した場合、スラリーが連続供給されるため、除去能率の低下はみられない。また、表面粗さは 10 パス以降で $0.02\mu\text{mRa}$ までに向上した。

スラリー吐出量については、両者に大きな差はみられなかった。これは、供給量 50mL/min の方が、砥粒供給は多くなるものの、実際に加工面に接触する強磁性材粒子数が一定になると仮定した場合、強磁性材粒子からの押し付け力を受けて研磨に関与する作用砥粒数もほぼ一定になるものと考えられる。その結果、砥粒供給と切り屑排出に必要な一定量以上のスラリー供給では除去能率は飽和し、仕上げ面は同等の表面粗さまで向上したと考えられる。

3.3 除去能力に関する考察

前節までの実験結果から、Type-1 工具の研磨性能が良好であることが明らかになった。しかしながら、外周部からのスラ

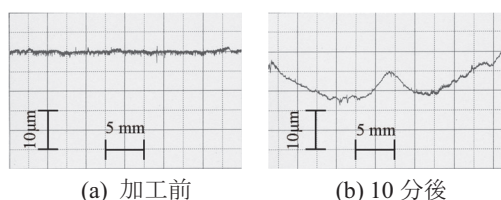


図9 送りを与えずに研磨したときの除去断面形状

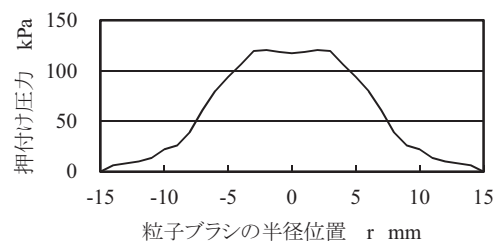


図10 回転軸対称に変換した圧力分布

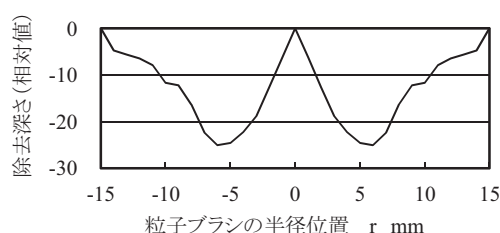


図11 プレストンの式に基づく除去断面形状

リー吐出であることに加え、遠心力の影響から、粒子ブラシ中心側へのスラリー流入が十分に行われているか不明である。そこで、Type-1 工具に送りは与えずに、粒子ブラシの回転のみによる研磨実験を行い、研磨面の除去断面形状について検討した。図9に研磨前後の除去断面形状を示す。

一般に、研磨による除去量は式(1)に示すプレストンの式¹⁰⁾に基づいて算出できるといわれている。

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

M : 除去量, k : 比例定数, P : その点での圧力,
 V : その点での工具と工作物の相対速度,
 t : その点での工具滞留時間

そこで、実験による除去断面形状と、プレストンの式に基づく除去断面形状とを比較した。ここでは、接触面に砥粒が均一に分布しているという前提で計算した。粒子ブラシによる相対速度 V は、 $V = r\omega$ (r : 回転半径, ω : 角速度) の関係により求められる。加工中の圧力 P は、直接測定できないため、図7中の Type-1 工具の測定値を回転軸対称の圧力分布に変換し、除去断面形状の計算に用いることにした。ここでは、同半径位置、すなわち r の正值と r の負値における測定値とを比較して、大きな方を $\pm r$ における押付け圧力とした。

図10に回転軸対称に変換した圧力分布図を示す。図11は、プレストンの式から算出した除去断面形状である。これは、各半径位置における除去量(相対値)を求めた後、材料の密

度で除して除去体積(相対値)とし、さらに除去体積を除去深さ(相対値)に置き換えたものである。図9と図11とを比較すると、 $r=6\text{mm}$ 付近で除去深さが最大となり、同様の傾向を示した。このことから、送りがなくても粒子ブラシの中心部へスラリーが流入して、研磨に関与していると考えられる。

また、中心部 $r=0\text{mm}$ では研磨速度 V がゼロとなるため、図11に示すように除去がゼロとして算出されるが、実際には、図9(b)のように、わずかに除去されていた。この事象は、加工面では粒子ブラシとの間にわずかな相対速度があり、スラリーが押付け圧力を受けながら流入して、表面を除去したためと考えられる。

$7\text{mm} < |r| < 14\text{mm}$ については、図9(b)の場合よりも図11の除去深さが少ない傾向がみられるが、遠心力により、研磨に関与する砥粒が外周側で多くなると考えた場合には、図9(b)の断面形状に近づくかと推察される。遠心力の影響については、今後、更に詳細な検討が必要であると考えている。

4. マシニングセンタと磁気研磨工具による研磨実験

4.1 平面研磨実験

Type-1 工具をマシニングセンタに取り付けて、平面研磨を行った。図12に表面粗さの測定位置9点(P1からP9)を示す。ここで、P5は工作物の中心点である。また、P1からP9は、ツールパス作成におけるプログラムの補間座標値として利用した。

図13に平面研磨におけるツールパスを示す。Pass-Aは、図13(a)の経路で10回研磨する(研磨時間: 約40分)。Pass-Bは、図13(b)のようにP3からP9まで移動し、その後同じ経路をP9からP3まで戻る研磨動作により5回研磨する(研磨時間: 約60分)。Pass-Cは、図13(c)のように、P6を開始点として、中心点P5に対する点対称位置のP4へ、そしてP4からY方向-5mmの点へ移動した後、P6からY方向+5mmの点へ移動するという経路を順次繰り返しながら、各補間座標位置を

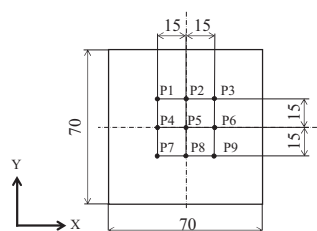


図12 工作物上の表面粗さの測定位置(補間座標位置)

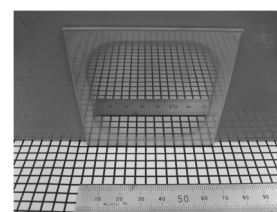


図14 研磨面の反射状態の一例(Pass-C)

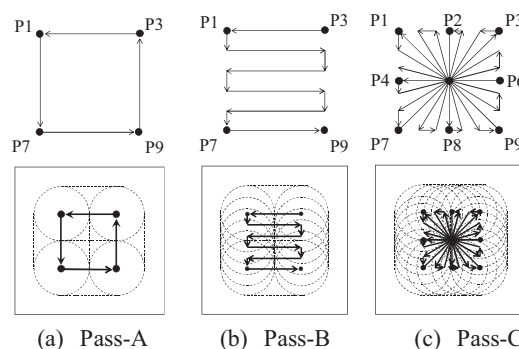
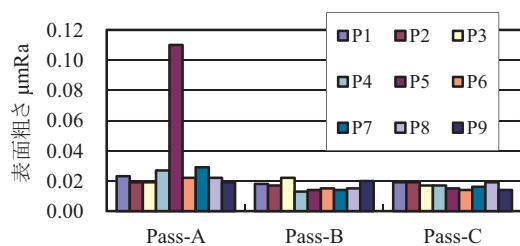
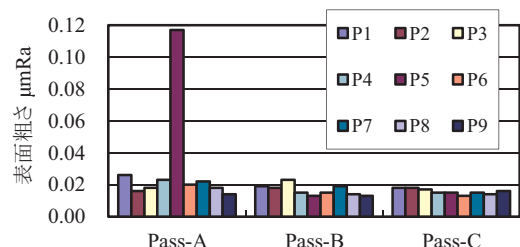


図13 平面研磨実験のツールパス



(a) 測定方向:X 軸方向



(b) 測定方向:Y 軸方向

図 15 平面研磨後の表面粗さ

10 回通過するように研磨する(研磨時間:約 150 分). スラリー吐出量 50mL/min であり, 他の研磨条件は表 1 と同様である.

図 14 に Pass-C による研磨面の反射状態を, 図 15 に P1 から P9 までの表面粗さを示す. 表面粗さは, X 軸方向, および Y 軸方向について測定したが, 表面粗さに違いはみられず, 同等に研磨されていた. Pass-A の P5 点(研磨領域の中心部)は, 粒子ブラシの外縁部のみが通過する位置であることから研磨が不十分であり, 表面粗さは向上していない. それ以外は, ほぼ一定の表面粗さに仕上げる事ができた.

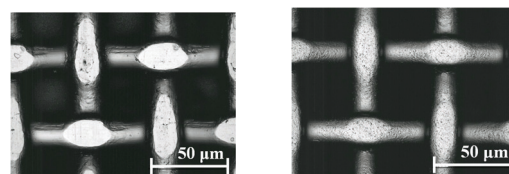
約 150 分間の連続研磨(Pass-C)においては, 粒子ブラシを形成する強磁性材粒子同士の接触や, 砥粒との接触によって強磁性材粒径が小さくなり, 除去能率がわずかであるが低下する⁹⁾と推察されるが, 目づまりによる仕上げ面の劣化はみられず安定した研磨が行われていた. 本研究では, 表面粗さの向上に主眼をおいて検討したが, 今後, 研磨面全体を均一な除去深さで研磨するためのツールパス¹¹⁾についてさらなる検討を予定している.

4. 2 微細金網エッジ部の丸み付けへの適用事例

SUS304 製の微細金網の仕上げ処理として, Type-1 工具を使用して 100mm×60mm の加工範囲について, 表面エッジの丸み付けを行った. ツールパスは前節の Pass-B と同様の送りによるものである. 図 16 に加工前後の写真を示す. 表 1 と異なる実験条件については図中に示した. なお, 粒子ブラシが金網の凹凸に倣って接触できるように, 強磁性材粒子はメッシュ間隔に近い平均粒径 55μm の市販のショットピーニング用鋼球を使用した. 微細金網は, 数十 μm と非常に薄く破れやすいが, 粒子ブラシの柔軟性と, スラリー式磁気研磨工具の安定した研磨性能によって, 加工範囲内において図 16 と同様に, エッジの丸み付け加工を実現することができた.

5. 結 言

長時間の連続研磨が可能なスラリー式磁気研磨工具を開発し, 卓上フライス盤やマシニングセンタへ取り付けて, 研磨



(a) 加工前

(b) 加工後

図 16 微細金網のエッジ丸み付け加工の事例(強磁性材粒子:平均粒径 ϕ 55μm, スラリー供給: 50mL/min, 回転数: 160min⁻¹, 送り 20mm/min)

能率や表面粗さ, スラリーの加工への関与などを実験的に検討した. 得られた結果は, 次のとおりである.

- (1) スラリー式磁気研磨工具を用いた場合, 磁性研磨材を使用した場合と比較して, 研磨能率の低下がみられず, 安定した磁気研磨を行うことができる. 仕上げ面は, 研磨条件に固有の表面粗さまで向上する.
- (2) 研磨面への法線方向押付け力が大きい丸型ネオジウム磁石を使用すると研磨能率が高くなる.
- (3) スラリー吐出穴が磁石外周部の配置であっても, スラリーは粒子ブラシの中心部まで流入して研磨に関与する.
- (4) スラリー吐出量は, 砥粒供給と切りくず排出に必要な一定量以上では除去能率が飽和し, 仕上げ面は同等の表面粗さに向上する.
- (5) スラリー式磁気研磨工具による約 150 分の連続研磨において, 目づまりによる研磨面の劣化はみられず, 一定の表面粗さに仕上げる事ができた.
- (6) 微細な凹凸を有する金網の 100mm×60mm の加工範囲において, エッジ部丸み付け加工への適用を可能にした.

6. 参考文献

- 1) T.SHINMURA: Study on Free Form Surface Finishing by Magnetic Abrasive Finishing Process (1st Report, Fundamental Experiments), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 53, 485(1986)202 (in Japanese).
- 2) 砥粒加工学会編:砥粒加工技術のすべて, 工業調査会, (2006)42.
- 3) H. KAWAKUBO, et al.: Magnetic Polishing for Ferromagnetic Materials using Simply Mixed Magnetic Abrasives – Proposal of Partial Polishing Method for R-Groove and It's Polishing Characteristics –, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 54,1(2010) 31 (in Japanese).
- 4) 安斎正博: 磁気研磨法の応用, 熱処理, 33, 6(1993)339.
- 5) M. ANZAI, et al.: Experiment of Magnetic Assisted Finishing using Slurry Abrasive, Journal of the Japan Society of Grinding Engineers, 37, 1(1993) 51 (in Japanese).
- 6) H. KAWAKUBO, et al.: 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).
- 7) H. KAWAKUBO, et al.: Influence of the Particle Brush on Magnetic Polishing Performance in Groove Bottom and Edge, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 47, 3(2003) 141 (in Japanese).
- 8) H. KAWAKUBO, et al.: 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).
- 9) H. KAWAKUBO, et al.: Influence of Added Oils in Simply Mixed Oil Bonded Magnetic Abrasives on Polishing Characteristics, Journal of the Japan Society of Grinding Engineers, 45, 3(2001)125 (in Japanese).
- 10) たとえば, 精密加工学会要論編集委員会著: 精密加工学会要論, 山海堂, (2003)88.
- 11) H. KAWAKUBO, et al.: Basic Research on Plane Magnetic Field Assisted Machining Method -Consideration for Removal Depth-, Proceedings of Annual Spring Meeting of the Japan Society for Precision Engineering (2009)875 (in Japanese).