

磁気研磨機構に関する力学的考察*

森 敏彦^{*1}, 広田 健治^{*1}
千田 進幸^{*1}, 川嶋 義人^{*2}

Research on Mechanics of Magnetic Abrasive Finishing

Toshihiko MORI^{*3}, Kenji HIROTA,
Shinkoh SENDA and Yoshihito KAWASHIMA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Magnetic abrasive finishing is one of the surface finishing methods, in which a workpiece is polished by special abrasives held in a magnetic field. Since these abrasives are not connected mechanically one another but only supported by magnetic force, they can change the position to fit the workpiece surface. Therefore, this process is applicable to curved surfaces or inside of tube, which cannot be finished with conventional processes. However, as regards finishing mechanism, behavior of abrasives during working has not been explained well. In order to clarify it, a new mechanism for this process based on energy principle was proposed and discussed in this paper. Apparatus for plane finishing was made and nonmagnetic stainless steel sheet was polished. Under the assumption that abrasives were arranged between magnetic poles in such a way that cohesive energy became minimum, movement of abrasives in contact with workpiece was explained by means of equilibrium of forces. Normal force, horizontal force and distribution of normal stress in the contact area were measured with specially designed jigs. They were increased with increasing current to the electric coil or the amount of supplied abrasives, due to increase in intensity of magnetic fields or cohesive density of abrasives, respectively. Mean surface roughness was measured and found to be improved from 0.1 μm to 0.04 μm after about 10 minutes working.

Key Words: Non-Traditional Machining, Abrasive Grain, Surface Roughness, Magnetic Abrasive Finishing, Magnetic Field, Finishing Mechanism

1. 緒 論

磁気研磨法は、磁力により磁性研磨材をブラシ状に保持し、その中に被加工物を挿入して相対運動を与えることにより研磨を行う表面仕上げ技術である。磁性研磨材は機械的に固定されていないため、被加工物に合わせて自由に形状を変えることができ、また、被加工物と磁極との間に若干の隙間が許されることから、曲面や凹凸面などの研磨も可能となる。このため、機械仕上げが困難な箇所への適用が期待されており、数々の研究事例が報告されている^①。また、近年では微細部品のバリ処理技術としても注目されている^②。

一方、研磨機構、特に研磨力となる水平力発生機構に関しては不明確な部分が残っていた。それは磁性

研磨材が存在しない磁界の水平方向勾配を水平力としていたからである。本研究では、研磨材粒子を入れることによる磁界の変化、ならびに研磨材粒子どうしの相互作用を考慮して研磨ブラシの形成機構を推論し、それをもとに研磨力発生、さらに研磨材粒子により被加工物表面の微小凹凸が除去される機構に関して力学的な観点から新たな解釈を提案した。本報では、その機構に関して、構造が単純で力学的条件が明解な平面研磨を取上げ検証を行う。具体的には垂直力、水平力、垂直応力分布、表面粗さの変化を測定し、得られた結果に対して新たに提案した研磨機構にもとづいて考察を加えた。

2. 加工原理

2-1 磁性研磨材 磁性研磨材は、磁化される性質と研磨する能力を備えた一種の複合砥粒であり、前者には強磁性体の鉄が、後者には硬質のアルミナ砥粒が用

* 原稿受付 2001年8月20日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 名古屋大学大学院。

E-mail: mori@mech.nagoya-u.ac.jp

いられている。また、近年ではセラミックや超硬材の研磨用に、アルミナの代わりにダイヤモンド砥粒を用いた磁性研磨材も開発されている。磁性研磨材は埋め込まれる砥粒粒子の径で区分されており、要求される研磨量や精度により選択される。本実験では市販品で砥粒径が $5\mu\text{m}$ のものを使用した。無作為に選んだ研磨粒子複数個を電子顕微鏡により観察した結果、粒子はいずれも球形ではなくアスペクト比 $0.6\sim 0.8$ の細長い形状をしていた。また、平均粒径は $70\sim 170\mu\text{m}$ にほぼ均等に分布していた。

2.2 磁気研磨法の概略 図1に円筒研磨の例を示す。磁極間に磁性研磨材を供給すると磁力線に沿って配列し研磨ブラシが形成される。その中へ被加工物を挿入すると、磁力により被加工物表面になじむように研磨材粒子が押しつけられる。この状態で被加工物に回転、振動、軸送り等の運動を与えることで、表面研磨や端部のバリの除去が可能である。本報では磁気研磨機構の解明を主眼としており、構造は単純とすることとし、磁極間に挿入した円板試料を回転させて平面研磨を行う方法とした。

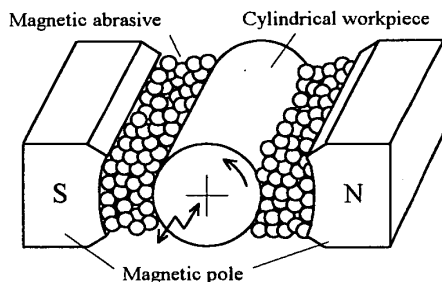


Fig.1 Outline of magnetic abrasive finishing process

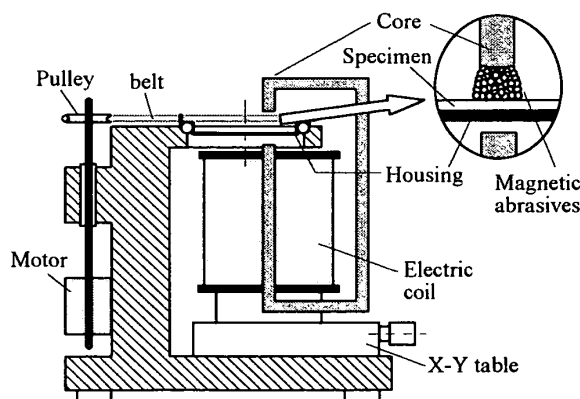


Fig.2 Schematics of apparatus for plane finishing

Table 1 Mechanical properties of tested material

Material	t(mm)	σ_B (MPa)	δ (%)	HV
SUS304	1.0	520	40	114

t: Thickness
 δ : Total elongation

σ_B : Tensile strength
HV: Vickers hardness

3. 実験方法

3.1 実験装置 図2に製作した平面研磨用の磁気研磨装置を示す。磁界分布に影響を与えないよう構造部材には非磁性材料を用いた。磁芯には透磁率および飽和磁束密度の高い純鉄(直径 10mm)を用い、その周囲に直径 1mm のエナメル線を 3000 回巻いて電磁石とした。なお、磁束密度を高めるために磁極を環状にして、磁極のギャップは 5mm 程度と小さくした。加工はこのギャップ間に図示のように磁性砥粒と被加工物を配置して行う。相対運動はモーターにより被加工物を回転させることで与える。また、偏心荷重により被加工物が傾かないように、被加工物は受け皿を介してスラスト軸受で保持する構造とした。

3.2 実験条件

3.2.1 被加工物 磁気研磨では、被加工物は磁性の有無によらず研磨可能であるが、本報では磁界分布への影響を極力排除するため非磁性のオーステナイト系ステンレス鋼板を用いた。Table 1に機械的性質を示す。初期粗さは平均粗さで $0.1\mu\text{m}$ である。

3.2.2 加工条件 研磨機構を考察する上で研磨材から被加工物に作用する力が重要であり、その影響因子としてブラシ内の粒子密度と磁束密度が考えられる。前者については研磨材供給量 w 、後者についてはコイルへの励磁電流 I を適宜変化させて研磨力への影響を調べた。被加工物の回転数は 250rpm で一定とした。このときの研磨部の周方向速度は 0.5m/s となる。また、加工は水溶性研削液を加えて湿式で行った。なお、電流 I は研磨可能な磁束密度 $0.4\sim 1.0\text{ T}$ 、速度は加工性と供回り現象抑制を考慮して決めた。

3.2.3 磁束密度 巻き数 N の電磁石に電流 I を与えた場合の磁束密度 B は(1)式で計算できる⁹⁾。

$$\left(\frac{L_a}{\mu_0} + \frac{L_i}{\mu_i}\right) \cdot B = N \cdot I \quad \dots(1)$$

ここで、 L_a および L_i はギャップ間隔および磁芯磁路長さで $L_a \ll L_i$ する。 μ_0 および μ_i は真空および鉄の透磁率である。上式に本実験条件の値を代入すると $B \approx 0.72I$ (T)となる。ただし、実際の磁束密度は漏れ等の影響により計算値よりやや小さくなる。

3.2.4 研磨力の測定 図3に示すジグにより被加工物に作用する力の測定を行った。垂直力については、全て非磁性材料で(a)のような吊り型ジグを製作した。板1にかかる研磨材からの押しつけ力は、吊り柱、板2を介してブリッジ上に置かれたロードセルに作用し、その出力により検出できる。

また、板1を(b)のような穴あき板と極上に静置し

たピンに代えることで穴以外の領域にかかる垂直力を測定できる。穴径の異なる板を用いて測定を行えば、それらの差からリング状の領域での平均面圧を計算でき、ブラシ内部の半径方向の面圧分布が得られる。

水平力については、(c)のように垂直力を負荷した状態で、作用させる接線力をロードセルにより検出し、モーメントの釣り合いからブラシ面にかかる水平力として計算できる。

4 実験結果および考察

4.1 研磨ブラシの形成機構

4.1.1 ブラシ形成エネルギー 磁性研磨材の研磨力は磁場のみから得る。その機構解明に先立ち、まずブラシの形成機構について検討する。実際の加工では研磨材を供給後に磁場を与えてブラシを形成するが、ここでは先に磁場を与え、そこに少量ずつ研磨材粒子を供給していくことで研磨ブラシ形成を考える。このとき、粒子は所要エネルギーが最少となるように配置されていくと仮定して以下に考察する。

(i) 最初の研磨材粒子は高磁場の磁極に引寄せられ、図 4(a)のようにそこから伸びるようにして 1 本のブラシが形成される。この際、各粒子を磁化するエネルギー e_1 が必要となる。 e_1 は磁極による磁界を H 、砥粒の磁化強さを I' として(2)式で表される。

(ii) 研磨材の量を増やしていくと図 4(b)のように同様のブラシが形成されるが、磁化されたブラシも新たに磁界を形成し、それらは互いに反撥しあふ。この

ときブラシ間の距離に反比例したエネルギー e_2 が必要となる。 e_2 はブラシ間の距離 r と係数 C を用いて(3)式で表される。

(iii) (ii)よりブラシは近接を妨げられてわん曲する。このときブラシ内には粒子間の磁気引力と釣合う張力が生じてブラシ長さが変化する。ブラシのわん曲にはこの仕事に相当するエネルギー e_3 が必要となる。 e_3 は磁力 T によりブラシ長さ l が真直の長さ l_0 からわん曲した安定な長さ l_1 まで変化すると(4)式で表される。

$$e_1 = \int_0^{l'} H dl' \quad (2) \quad e_2 = C \frac{1}{r} \quad (3) \quad e_3 = \int_{l_0}^{l_1} T dl \quad (4)$$

(i)~(iii)よりブラシ形成には 1 本当たり $e = e_1 + e_2 + e_3$ のエネルギーが必要となり、その総和 $E = \sum e$ がブラシ全体の形成エネルギーとなる。磁気ブラシは E が最小、すなわち $dE=0$ を満たし、エネルギー的に安定な状態として形成されていると考えられる。

4.1.2 研磨ブラシの構造 被加工物を透明アクリル板に置き換え、それを通して観察した結果を図 5 に示す。また、研磨材の量を増すにつれての研磨ブラシの形態変化を模式的に図 6 に示す。見られる特徴は以下である。

- (i) 当初ブラシ束断面は 1~3 粒子の径 d_{b0} よりなる。
- (ii) ブラシ中心部分ほどブラシ束間 λ_b は密となる。
- (iii) 研磨材の量 V を増すと、ブラシ束間がより密となると同時にブラシ全体半径 R_b が増す。
- (iv) さらに、研磨材の量を増すと、断面が数粒子よりなる径 d_{b1} のブラシ束が出現し始める。

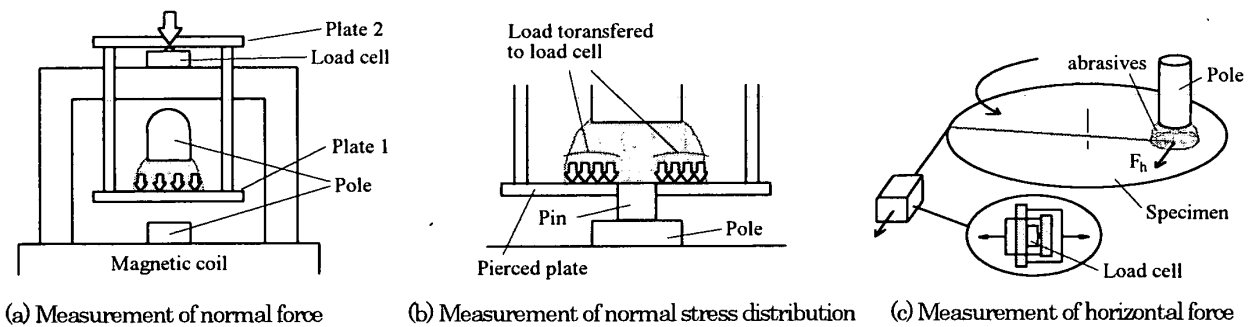


Fig.3 Schematics of force measurement methods

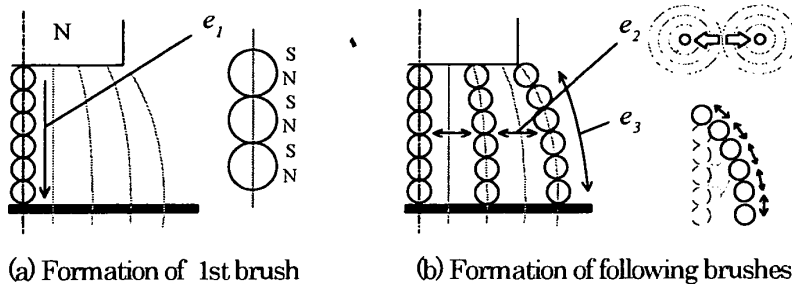


Fig.4 Formation mechanism of magnetic abrasive brush

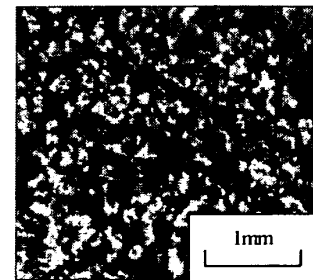


Fig.5 Distribution of abrasives in contact with specimen

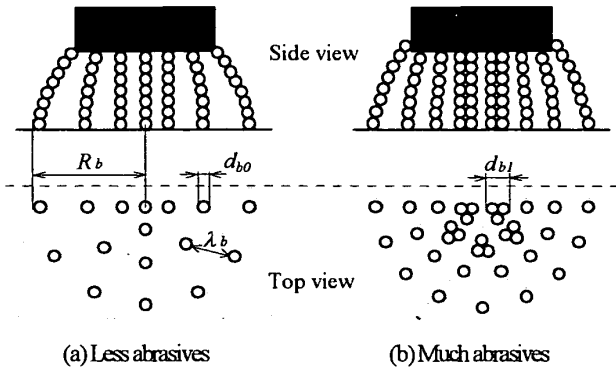


Fig.6 Difference in brush formation by the amount of supplied abrasives

(v) 今回の研磨材の量では、ブラシ束径が d_{b1} より大きくなることはなく、その個数が増えていく。
各幾何学量に関して、研磨材粒子の被加工物表面への投影面積を磁界の有無でそれぞれ求めて等値すると次式が成り立つ。

$$\frac{V}{h} = \frac{\pi d_b^2}{4} \cdot \frac{\pi R_b^2}{\bar{\lambda}_b^2} \quad \dots(5)$$

ここで、 h は極端と被加工物表面までの距離、 $\bar{\lambda}_b$ はブラシ束間 λ_b の平均値とする。傾向としては、 d_b 、 R_b が増加するとそれぞれ e_1 、 e_2 が増加し、 λ_b が減少すると e_2 が増加する。結局、研磨ブラシは V が増すにつれて E の増加が最小となるような形態をとる。なお、 d_b が頭打ちとなることは、磁化エネルギー e_2 は磁化体積増加 λ につれて急増することが推察される。

4.2 磁気研磨に関する力

4.2.1 材料変形からの観点 研磨現象を微視材料学的に見ると、図 7(c) に示すように研磨材粒子表面の砥粒が被加工物表面に押し込まれ、両者の水平方向の相対運動により被加工物表面の材料が逐次変形を受け、除去されている。向い角 θ の砥粒先端が h だけ押し込まれたときの垂直力 p_n および水平力 p_h の概略値は、すべり線場を援用して(6)式で予測される⁴⁾。ここで k は被加工物のせん断降伏応力である。1個の研磨材の中で押し込みを生じている砥粒数の平均を n とすれば、研磨材粒子あたりの研磨力は(7)式となる。さらに、これらに被加工物と接している粒子数を乗じれば、ブラシ全体での研磨力となる。

$$\left. \begin{aligned} p_n &= k\pi(1+\theta) \cdot \tan^2 \theta \cdot h^2 \\ p_h &= k\pi(1+\theta) \cdot \tan \theta \cdot h^2 \end{aligned} \right\} \dots(6)$$

$$f_n = n \cdot p_n, \quad f_h = n \cdot p_h \quad \dots(7)$$

4.2.2 磁場からの作用 次に、 f_n 、 f_h の作用源について考える。図 7(a) よりブラシ先端の粒子は、被加工物側が N 極となるように磁化されている。したがって、この粒子は S 極から引かれ、その引力が被加工物

表面への垂直力 f_n となる。また、図 7(b) よりこの粒子はブラシ内の隣接粒子からも逆向きに引かれる。いずれにしても、 f_n は機械的な負荷ではなく場からの力である。一方、 f_h は粒子の変位を、磁場および隣接粒子が拘束するため生じる。以下に詳細を述べる。

4.2.3 垂直力 被加工物が非磁性体の場合、研磨材粒子がブラシ状に凝集したものを比透磁率 μ_m の磁性体と考えれば、(8)式によりブラシ全体での垂直力 F_n が計算できる。

$$F_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) \cdot S \quad \dots(8)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率、 B は磁束密度、 S はブラシと被加工物の接触面積である。また、 μ_m は鉄の比透磁率 μ_i とブラシ中の鉄の容積率 V_i より近似的に(9)式で得られる。 V_i は、研磨材供給量 w 、ブラシ体積 V_{brush} 、鉄およびアルミナの密度 ρ_A 、 ρ_F および体積混合

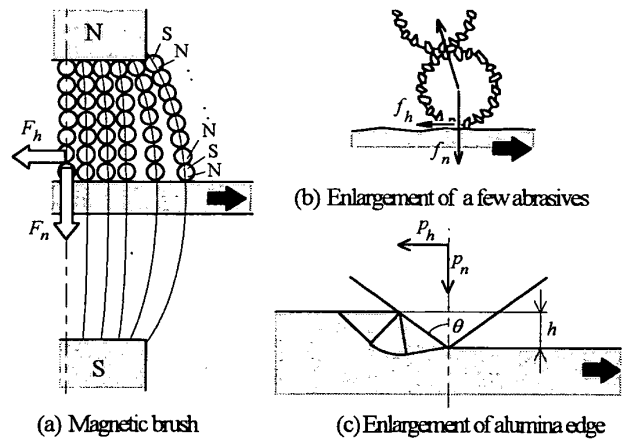
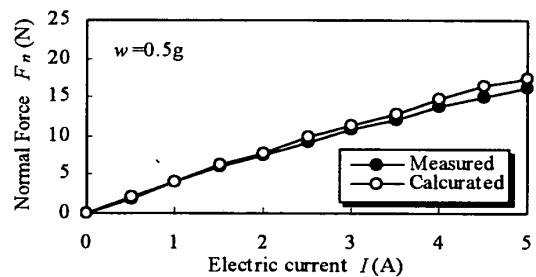
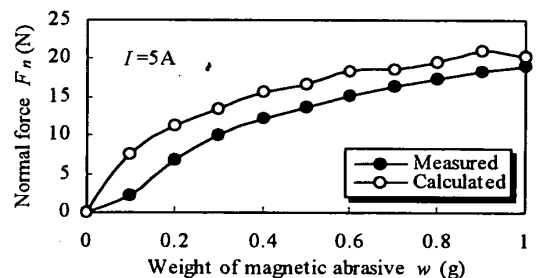


Fig.7 Schematics for generation of polishing force



(a) Dependence of electric current in magnetic coil



(b) Dependence of abrasive weight

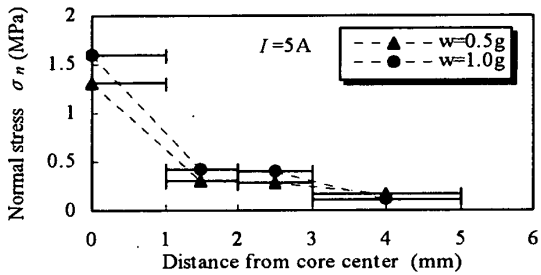
Fig.8 Change of normal force with polishing parameters

比 α_A, α_F ($\alpha_A + \alpha_F = 1$) から(10)式で計算され、ブラシ中の研磨材粒子の充填度合いを表す。

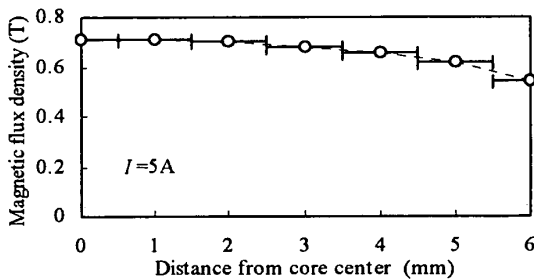
$$\mu_{rm} = \frac{2 + \mu'_i - 2(1 - \mu'_i)V_i}{2 + \mu'_i + 2(1 - \mu'_i)V_i} \quad \dots(9)$$

$$V_i = \frac{\alpha_F \cdot w}{V_{brush}(\alpha_A \cdot \rho_A + \alpha_F \cdot \rho_F)} \quad \dots(10)$$

図8にコイル電流 I および研磨材供給量 w を変えた場合の垂直力の変化を示す。 I, w を増すと垂直力は増加し、また、測定値は計算結果と比較的よく一致している。(a)については、電流増加により磁束密度 B が増加したためと考えられる。なお、計算では B はテスラメータによる測定値を使用した。磁束の漏れにより(1)式のように電流に対して線形とはならなかった。(b)については、 w の増加により(10)式の鉄の容積率 V_i が増加するためと考えられる。



(a)



(b)

Fig.9 Distribution of (a) normal stress and (b) magnetic flux density in the contact area

4.2.4 垂直応力分布 図3(b)のジグにより半径方向の垂直応力分布の測定を行った。図9にその結果を磁束密度の分布と併せて示す。(8)式より $F_n \propto B^2$ であるが、垂直応力分布は磁束密度分布とややずれており、 B^2 の変化だけでは説明できない。他の要因としてブラシ密度の分布が考えられる。すなわち、4.1.2で述べたように磁極中心ではクラスター形成が進んで粒子が密に詰まっており、磁化率が高くなり垂直力が大きくなったと考えられる。

4.2.5 水平力 磁界中に磁性粒子1個のみが入った場合、図10のように磁界の勾配に比例した力が作用する。従来の水平力発生メカニズムの解釈は、この力の水平分力としていた⁹⁾。しかし、この解釈では研磨方向に対して中心から片側半分までしか有効な水平力が発生していないことになる。この矛盾点に対し本報では以下のような水平力発生機構を考える。

前述のように研磨ブラシは常にエネルギー的に安定な状態を維持すると仮定すれば、図11(a)のように粒子の微小変位に対して常に釣り合い位置に戻そうとする力が働く。この力が水平力となる。

4.3 磁気研磨機構 場より作用する力により研磨が行われる機構を考える。図11(b)のようにブラシ先端の砥粒は垂直力により表面の凹凸に押しつけられ、微視的には図7(c)のように砥粒の押し込みが起きている。相対運動が生じると粒子は平衡点からずれ、場からの復元力 f_h が増す。砥粒押し込み部が山部であれば、この f_h で被加工物は切削除去される。一方、砥粒が谷部に押し込まれている場合には、復元力 f_h と被加工物からの反力 f_h が偶力を形成し、粒子は回転し始め凹凸の山を登り始める。粒子が山頂部分に達し、図11(c)のように山部のせん断抵抗が小さくなり、これが転動抵抗より小さくなった時点で山部分が切削除去される。

以上の推論から、ブラシ先端の粒子は表面の凹凸状態に応じて転動もしくは微小切削しながら平衡状態を保ち、被加工物と相対運動を続ける。このように、

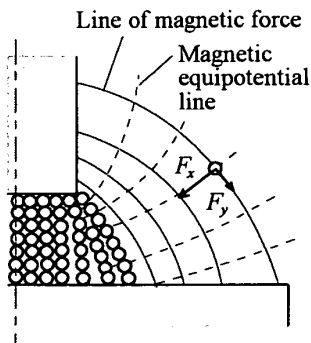


Fig.10 Forces acting on magnetic abrasives in magnetic field

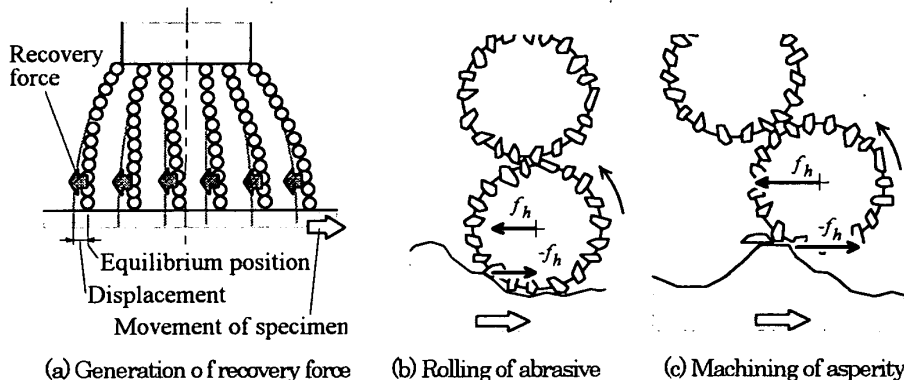


Fig.11 Polishing mechanism of magnetic abrasive finishing

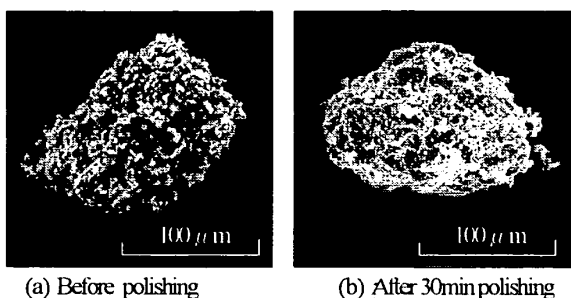


Fig. 12 Comparison of abrasives by SEM photographs

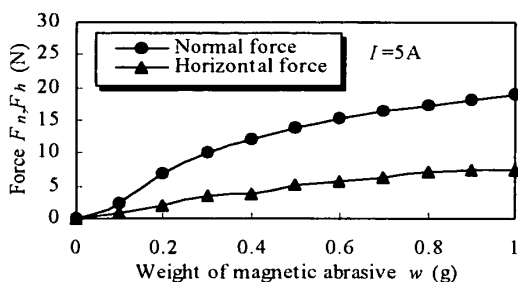
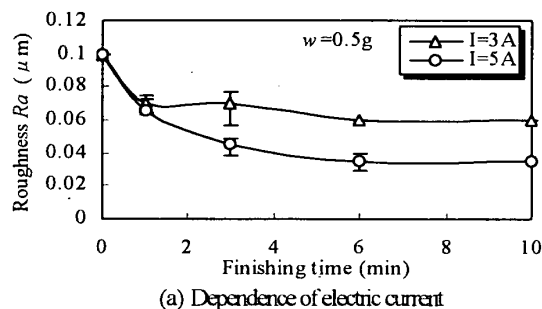
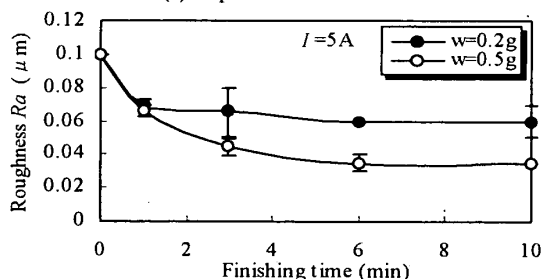


Fig. 13 Influence of weight of abrasives on horizontal force



(a) Dependence of electric current



(b) Dependence of weight of abrasives

Fig. 14 Change of surface roughness with finishing time

被加工物の表面幾何学を維持したまま力制御の研磨を行えるのが本加工法の特徴である。

図 12 に加工前後の研磨材粒子外観を示す。加工後の粒子は加工前に比べて丸くなっており、粒子が回転しながら研磨が行われていることを示唆している。

図 13 に研磨材供給量 w による水平力の変化を示す。比較のために垂直力も示したが、両者とも w の増加により増加している。また、水平力と垂直力の比は w によらず約 0.37 であった。両者の比が一定であることから、この増加は被加工物と接する粒子数の増加によると考えられる。すなわち、 w の増加により微小切削

を行う粒子数が増えたため、水平力が増加していくと考えられる。

4.4 表面粗さ 研磨量の指標として試料半径方向の算術平均粗さ Ra を測定した。図 14 に加工時間経過につれての Ra の変化を示す。(a) は研磨材供給量 w , (b) は電流 I による違いを表している。いずれも粗さは加工後 1 分で急激に減少し、それ以降は緩やかに減少してほぼ一定となった。また、加工条件に関しては電流や研磨材供給量が大きいほど、粗さの減少時期が延び、最終的な粗さも小さくなった。なお、これらは研磨力が大きくなる条件に対応している。

粗さの改善効果が飽和する要因として、研磨材粒子の摩耗のほか、研磨が進むほど鋭い凸部が減って切削抵抗が高くなることが考えられる。また、粗さの凸部を円錐近似した場合、円錐の下部に向かうほど同一研磨体積に対して研磨深さが小さくなることも粗さの変化を鈍化させる一因となる。

5. 結 言

磁気研磨機構に関して、非磁性材料の平面研磨を対象に力学的考察を行い、以下の結論を得た。

- (1) 研磨材粒子が凝集してブラシ状に整列する現象に関して、エネルギー原理に基づいた新たな機構を提案し、これにより磁極中心部分で粒子がクラスターを形成して高密度化する様子を解明した。
- (2) 発生する垂直力および垂直圧力分布を測定し、研磨材粒子が磁界から受ける力とブラシ内の研磨材の密度分布から考察を加えた。
- (3) (1), (2) より加工中の研磨材粒子の運動を推論し、磁気研磨において被加工物の表面幾何学を維持したまま研磨が行える機構を見いだした。
- (4) 研磨による粗さは、加工開始直後に急激に改善され、その後はほぼ一定となった。また、最終的な粗さは、研磨力が高くなる条件ほど小さくなった。

文 献

- (1) 波田野・進村, 精度設計と部品仕上げシステム技術, (1989), 433-460., (日経技術図書)
- (2) 安齋・中川・吉田, インライン磁気援用バリ取り機の開発, 型技術, 13-8, (1998), 150-151.
- (3) 遠藤, 電磁石の設計と応用, (1997), 17-36, (トリケップス)
- (4) 河合, 塑性加工学, (1988), 66-80, (朝倉書店)
- (5) 進村・高沢・波田野, 磁気研磨法の研究, 精密工学会誌, 52-5, (1986), 87-93.