

磁気研磨加工の高効率化

Improve the Efficiency of Magnetic Finishing

安 斎 正 博*・中 川 威 雄**

Masahiro ANZAI and Takeo NAKAGAWA

金型の最終仕上げの自動化に磁気研磨法を検討しているが、この研磨法の効率がいかに高くなるかは問題になる。磁気研磨法の効率を高めるには、他の加工法との複合化技術が効果的である。従来の磁気研磨法に電解研磨、化学研磨あるいは超音波加工などを複合化し、磁気研磨加工の効率アップを考えてみる。

1. はじめに

金型の最終仕上げの機械化・自動化は種々検討されておりかなりの成果が得られているものの、これと言った決定的なものは存在しておらず、また一部使用できたとしてもいろいろと解決すべき問題も多い。著者らは、この最終仕上げの自動化に磁気研磨法を適用するために、いくつかの研磨用砥粒を開発して、その基礎的な研磨特性について検討してきた^{1)~3)}。そして、表面粗さが $R_{max}30\mu\text{m}$ 程度以下の切削加工あるいは $R_{max}10\text{数}\mu\text{m}$ 程度の放電加工した金型材表面を $R_{max}0.2\mu\text{m}$ 程度の鏡面に仕上げることができるのを確認した。しかし、このレベルの表面粗さを得るには他の研磨加工と比べて長時間を要し、研磨性能すなわち単位時間当たりの除去量が少ないのが磁気研磨法の弱点であることがわかった。もちろん、現状での研磨効率で十分適用できるものも考えられるが、金型研磨の分野では、早く、安くが要求されており、高効率化は重要なテーマの一つである。

磁気研磨単独での研磨効率を高めるためには、加工圧すなわち磁束密度を上げる、研磨工具の回転数を上げそれに伴ってワークの送り速度を早くする、これまでに以上に切れ味のよい磁性砥粒を開発するなどが考えられる。しかし、磁束密度を上げるには、電磁石を大型化しなければならないが、現状でも10数kgあるので、これ以上大きくすると汎用の工作機械に取り付けることが困難となる。また、工具の回転数を上げるのにも遠心力の悪影響で上限がある。さらには、製造プロセスが単純で工業的に使用可能な程度に安価で現状の磁性砥粒よりも研磨効率の高い砥粒の開発もままならない。

では、どうすれば現状の研磨効率を上昇させることが

できるか？ それは、磁気研磨と他の研磨法との複合化技術が最も近道でかつ効果的な手法であろう。ここでは、従来の磁気研磨法の高効率化を目的として、①電解との複合研磨法の効果、②電解質溶液中での磁気研磨への効果、③超音波を付与した際の電解質溶液中での磁気研磨への効果についてそれぞれ検討した結果を解説する。

2. 磁気複合研磨法とその砥粒

磁気研磨装置の外観と電解磁気研磨法の原理図を Fig. 1 および Fig. 2 にそれぞれ示す。磁気研磨装置は、基本的には電磁石 ($\phi 20\text{mm}$ の鉄芯が研磨工具を兼ねる)、磁性砥粒 (磁石に吸引されかつワークを研磨することができる粉体) および砥粒に周速を付与する工作機械から構

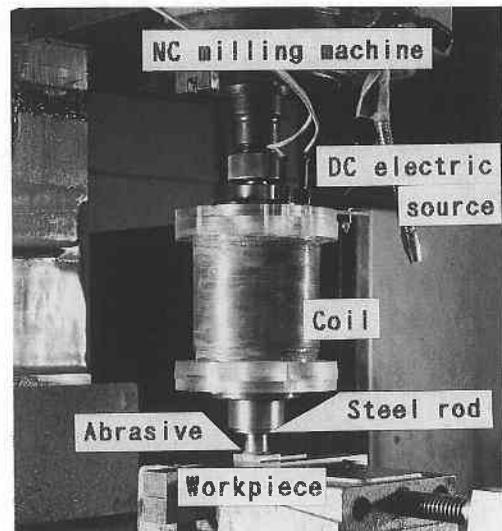


Fig. 1 External appearance of magnetic finishing apparatus using NC milling machine

* 東京大学生産技術研究所 第2部

** 東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

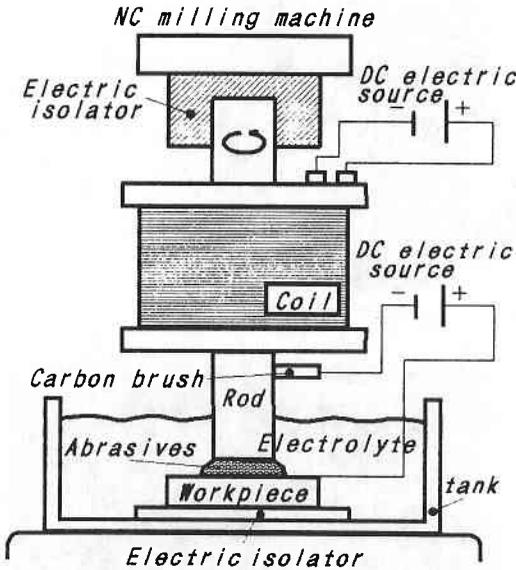


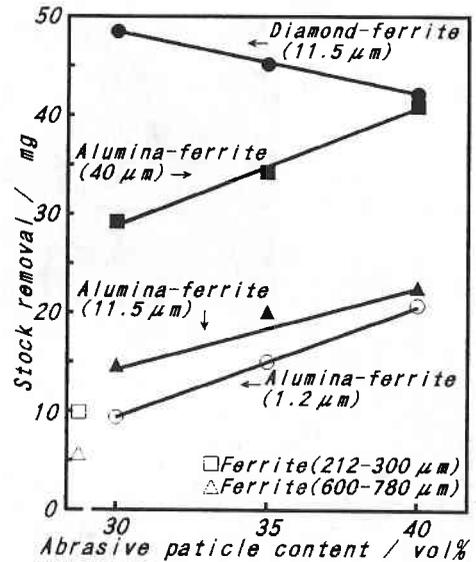
Fig. 2 Schematic illustration of magnetic electropolishing

成される。電磁石の代わりに永久磁石を使用することも可能であるし、どのような工作機械も使用できる汎用性がある。なお、本実験で使用した電磁石はφ1mmの樹脂被覆銅線を3500巻したもので、約3Aの電流で1.5T程度の磁束密度が得られる。電解磁気研磨では、上述した基本構成に電解質およびそれを入れる容器と電解用の電源が追加される。ここでの磁気研磨の役割は、電解研磨によって生成される不動態被膜を除去することによって電解効率を維持することと、その後の磁気研磨によって鏡面に仕上げることの2通りが考えられる。

電解質中の磁気研磨の構成は、基本構成に電解質とそれを入れる容器が加わるだけである。この研磨法ではワークと鉄芯間に電圧はかけていない。

磁気研磨と電解質中での磁気研磨では同一の砥粒を使用できるが、電解磁気研磨ではこれらと同じものを使用することができない。磁気研磨では、プラズマ粉末溶融法によって作製した鉄マトリックス中にNbCが分散した砥粒（PPM砥粒）を、電解磁気研磨では焼結法によって作製したフェライトマトリックス中にAl₂O₃が分散した砥粒をそれぞれ用いた^{4),5)}。これらのマトリックスの大きな違いは通電するか否かである。マトリックスが通電するようなPPM砥粒では電解に使用することができない。

これらの砥粒と装置を使用して研磨実験を行い、各パラメータが研磨量あるいは表面粗さに及ぼす効果を調査し、従来の磁気研磨法と比較検討した。



Finishing conditions

- Shape of rod top: flat-end with slit
- Grain size of abrasive: 600-780 μm
- Rotational speed of rod: 1000 rpm
- Magnetic flux density: 1.18 T
- Workpiece: 0.55% carbon steel
- Finishing gap: 1.4 mm
- Finishing time: 15 min

Fig. 3 The effect of abrasive particle content on the stock removal

3. 電解磁気研磨の効果

電解磁気研磨では、前述したようにフェライト-Al₂O₃系の砥粒を使用した。電解磁気研磨用の砥粒の電解を付与しない場合の基礎的な研磨特性を Fig. 3 に示すが、フェライト-ダイヤモンド系の方が得られる研磨量は多い⁶⁾。しかし、粒径40μmのAl₂O₃を40vol%含む砥粒ではダイヤモンドを使用した砥粒と大差ない研磨量が得られており、経済性、研磨特性から考慮してこの砥粒を電解磁気研磨では使用している。この砥粒の外観を Fig. 4 に示す。

Fig. 5 に図中の条件下でワークを固定して電解磁気研磨した際の電解電流値と研磨量および表面粗さの関係を示す⁷⁾。表面粗さは電解電流値の増加に伴い減少し、研磨量は増加する。単位時間の研磨量が一定であれば、ワークはR_{max}100μmに調整した切削面であるから、研磨量は直線的に増加し、表面粗さは指数関数的に減少すると思われるが、研磨量は飽和する傾向を示している。この実験では電解液を循環していないので、研磨量の低下は主に電解によって生成されたスラッジによる電解効

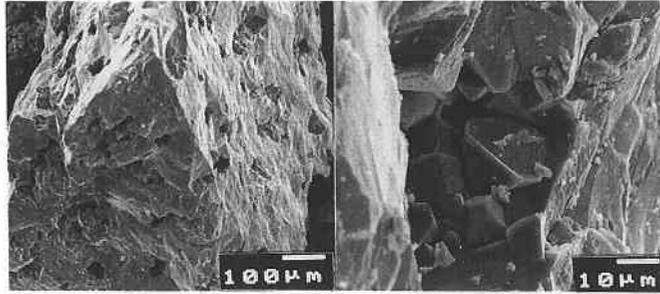
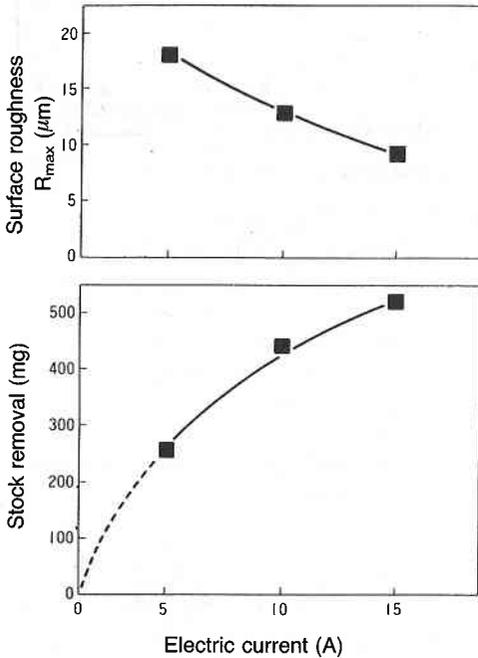


Fig. 4 SEM images of ferrite- Al_2O_3 magnetic abrasive which is made by sintering



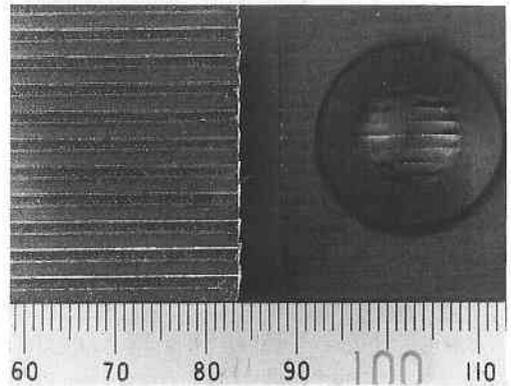
—Finishing conditions—

rotational speed of rod: 1000 rpm, finishing time: 10 min, abrasive: 40 vol% Al_2O_3 (40 μm)-ferrite, grain size of abrasive: 600–780 μm , abrasive weight: 1.5 g, magnetic flux density: 1.18 T, shape of rod: flat end ($\phi 20$, 0.45% C steel), workpiece: 0.55% C steel (surface roughness R_{\max} 100 μm), electrolyte: 40 wt% NaNO_3

Fig. 5 The effect of electric current on the stock removal and surface roughness

率の低下が原因と思われるが、電解の進行に伴う間隙の変化や不動態被膜の生成も影響していると考えられる。しかし、15A の条件での研磨量は、磁気研磨のみの約10倍の値が得られており、かなりの高効率化が達成されている。

Fig. 6 に15A で電解磁気研磨したワークの外観を示すが、 $R_{\max} 100\mu\text{m}$ の切削痕が除去されているのが確認できる。



—Finishing conditions—

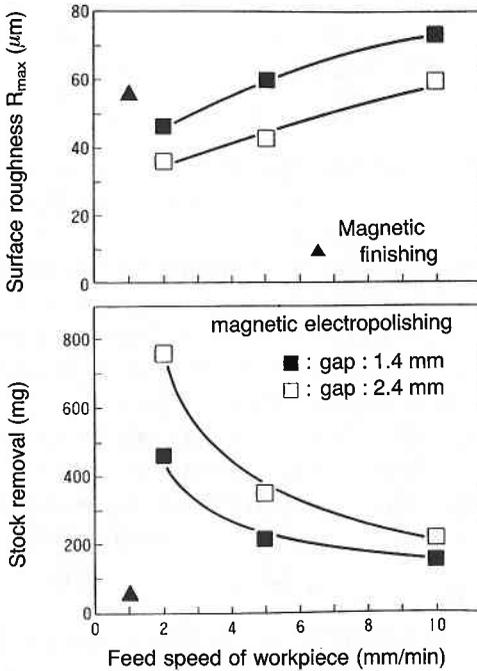
electric current: 15A, other conditions are based upon Fig. 5

Fig. 6 External appearance of workpieces
left: as milled, right: after finishing

Fig. 7 に図中の条件下で電解磁気研磨した際のワークの送り速度と研磨量および表面粗さの関係を示す⁸⁾。この場合の研磨条件は前述のワークを固定して研磨した際の最適な研磨条件によるものである。送り速度が速くなるのに伴って、単位時間・単位面積当たりの研磨量が減少するために表面粗さは悪くなっている。しかし、ほぼ同一の研磨条件下での磁気研磨のみの場合と比較すると、加工間隙：2.4mm で10倍の速さでワークを送って電解研磨しているにもかかわらず、同レベルの表面粗さが得られている。

Fig. 8 にワークを送って電解磁気研磨した場合の研磨前後のワークの外観を示す。磁気研磨のみでは、 $R_{\max} 100\mu\text{m}$ 程度の凹凸を除去することは不可能であったが、電解を付与することによって $R_{\max} 30\mu\text{m}$ 程度に研磨することができ、この程度の表面粗さだと、その後磁気研磨のみで鏡面に研磨することが可能である。

高速ミーリングの最近の進歩により、超高速で切削して表面粗さをあらかじめ小さくして、その後磁気研磨した方が時間的には有利かもしれないが、電解を磁気研磨に付与することによって大幅に磁気研磨の効率を上げる



—Finishing conditions (magnetic electropolishing)—
 rotational speed of rod: 1000 rpm, abrasive: 40 vol% Al_2O_3 ($40\mu m$)-ferrite, grain size of abrasive: 600–780 μm , abrasive weight: 1.5 g, magnetic flux density: 1.18 T, shape of rod: flat end ($\phi 20$, 0.45%C steel), workpiece: 0.55%C steel (surface roughness $R_{max} 100 \mu m$), electrolyte: 40 wt% $NaNO_3$, electric current: 15 A

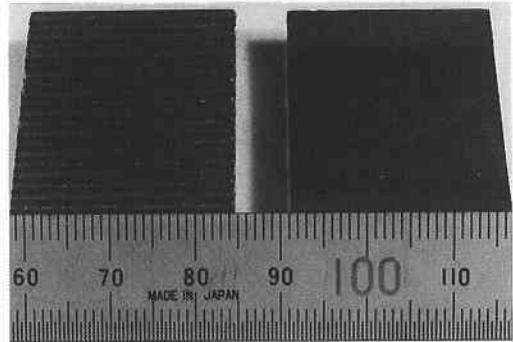
—Finishing conditions (magnetic finishing)—
 abrasive: 65 vol% NbC-Fe, gap: 1.4 mm, abrasive weight: 2.0 g, other conditions are the same as above

Fig. 7 The effect of feed speed of workpiece on the stock removal and surface roughness

ことができ、この方法は磁気研磨の高効率化の有力な方法の一つであることは確かである。

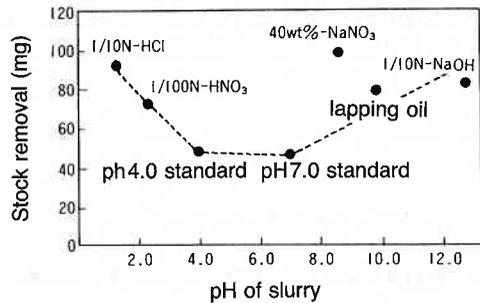
4. 電解質中での磁気研磨への電解質の効果

研磨材スラリーと鉄粉のコンパウンドを用いて、固体砥粒の場合と同様に研磨できることが確認されている⁹⁾。この研磨で重要なパラメータの一つに研磨材スラリーの pH の影響がある。Fig. 9 に図中の条件下で研磨した際の pH と研磨除去量の関係を示す¹⁰⁾。高酸性、高アルカリ側で中性のスラリーの場合に比して高い研磨量が得られている。特に電解磁気研磨で使用した $NaNO_3$ 溶液中で最も高い研磨量を示した。これを先の PPM 砥粒 (65% NbC-鉄) を用いて研磨した場合と比較すると、回転数: 1000rpm, 加工間隙: 1.4mm, 磁束密度:



—Finishing conditions—
 feed speed of workpiece: 2 mm/min, gap: 2.4 mm, other conditions are based upon Fig. 7

Fig. 8 External appearance of workpieces left: as milled ($R_{max} 100\mu m$), right: after finishing ($R_{max} 37\mu m$)

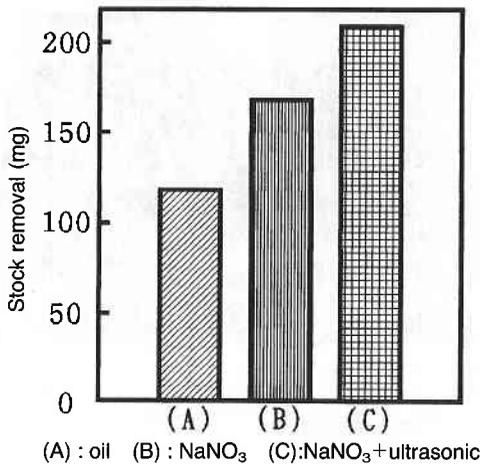


—Finishing conditions—
 rotational speed of rod: 1000 rpm, gap: 1.4 mm, abrasive: 15 vol% Al_2O_3 (sub- μm) + iron powder 2 g (75–106 μm), magnetic flux density: 1.18 T, shape of rod: flat end ($\phi 20$, 0.45%C steel), workpiece: 0.55%C steel, Finishing time: 15 min

Fig. 9 The effect of pH of slurry on the stock removal

1.24T, 砥粒径: 300–425 μm , 研磨時間: 15min, ワーク: S55C の条件下で、従来のオイル添加のみの研磨量は 110mg 程度であるのに対し、40wt% $NaNO_3$ 溶液中でのそれは 170mg 程度まで上昇する。これはメカノケミカル的な作用によるものと考えられ、特にこの溶液中で高い研磨量が得られるのは、 NO_3^- イオンと鉄との反応性が高いためであると思われる。いずれにせよ、このような電解質中での磁気研磨は従来のオイルを添加しただけの湿式法より高い研磨量が得られ、電解質の調製によってはさらに研磨効率の上昇が期待できる。

一方、スラリーを連続供給することによって、ワークをスラリー中に浸漬して研磨するよりも高い研磨量が得られることも確認されている¹¹⁾。スラリーを用いた磁気研磨の高効率化の実験はまだ日が浅いので、これから



—Finishing conditions—

rotational speed of rod: 1000 rpm, abrasive: 65 vol% NbC-Fe, abrasive weight: 2.0 g, gap: 1.4 mm, grain size of abrasive: 300–425 μm , magnetic flux density: 1.24 T, shape of rod: flat end ($\phi 20$, 0.45% C steel), workpiece: 0.55% C steel, electrolyte: 40 wt% NaNO₃, frequency: 10 KHz

Fig. 10 The effect of ultrasonic wave on stock removal

もいろいろと開発されるであろう。

5. 電解質中での磁気研磨への超音波付与の効果

前述したように、電解質中での磁気研磨は研磨効率を上昇させるのに有力な手段の一つである。ここでは、さらにその効率を上昇させる目的で溶液中に超音波発信機を置き、超音波付与の効果について言及する。

Fig. 10 に PPM 砥粒を用いて図中の条件下で研磨した際のオイル添加、NaNO₃ 溶液中での磁気研磨およびそれに超音波を付与した際のそれぞれの研磨量比較を示す¹²⁾。明らかに超音波を付与することにより研磨量が

増大し、オイル添加のみの約 2 倍の値が得られている。これは、超音波を付与することによって鉄と NO₃⁻イオンの化学的反応が促進されたものと考えられる。

6. おわりに

電解と複合研磨法の効果、電解質溶液中での磁気研磨への効果、超音波を付与した際の電解質溶液中での磁気研磨への効果について述べた。

電解との複合研磨によって磁気研磨のみの約 10 倍の効率アップが、電解質中での超音波付与によって約 2 倍の効率アップが確認された。いずれもまだ確立された技術ではなく、詳細を検討しなければならないが、磁気研磨の効率を上げる有力な手段であると言える。

簡易な方法で、従来の磁気研磨法の効率を 1～2 桁程度上げることができれば、この研磨法の従来のメリットを活かし、仕上研磨のみならず多方面への応用が期待できよう。

(1993年9月16日受理)

参考文献

- 1) たとえば安齋正博, 須藤 亨, 真崎浩一, 大滝久規, 中川威雄: 精密工学会誌, 57, 12 (1991) 129
- 2) 安齋正博, 須藤 亨, 中川威雄: 生産研究, 43, 11 (1991) 13
- 3) 安齋正博, 中川威雄: 機械と工具, 36, 3 (1992) 41
- 4) 安齋正博, 真崎浩一, 中川威雄: 砥粒加工学会誌, 33, 4 (1989) 33
- 5) 川島悦哉, 安齋正博, 大滝久規, 中川威雄: 1992年度精密工学会春季大会講演論文集 (1993) 795
- 6) 同上 796
- 7) 川島悦哉, 中川威雄, 安齋正博: 型技術, 8, 8 (1993) 20
- 8) 同上 21
- 9) 安齋正博, 須藤 亨, 大滝久規, 中川威雄: 砥粒加工学会誌, 37, 1 (1993) 51
- 10) 安齋正博, 川島悦哉, 中川威雄: 型技術, 8, 8 (1993) 22
- 11) 同上 23
- 12) 安齋正博, 川島悦哉, 中川威雄: 1993年度砥粒加工学会学術講演論文集 (1993) 196