磁気援用研磨に関する研究（第2報）*

——研磨量分布に与える磁場分布の影響——

鈴木浩文** 小寺 直** 松永博之** 黒部利次***

Study on Magnetic Field-Assisted Polishing (2nd Report)

—— Effect of Magnetic Field Distribution on Removal Distribution ——

Hirofumi SUZUKI, Sunao KODERA, Hiroyuki MATSUNAGA and Toshiji KUROBE

This paper describes the effect of the magnetic field distribution on the removal distribution of the workpiece surface in the magnetic field-assisted polishing method. In case of applying this method to the curved (aspheric) surface polishing, the next process is suitable. The designed shapes are first generated precisely by turning or grinding, and then the surfaces are finished only to improve the smoothness, with the previous form accuracy being maintained. Therefore, in order to carry out the uniform removal polishing using the magnetic field-assisted polishing, it is important to clarify the processing mechanism of this polishing method. In this report the relation between the distribution of magnetic field and the polishing pressure distribution was analyzed theoretically and experimentally using several shapes of magnetic poles in the polishing set-up. And, by polishing examination of the flat glass, the relations between the magnetic field distribution, polishing pressure distribution and polishing removal distribution were analyzed experimentally. As a result, the relations between the magnetic field distribution, polishing pressure distribution and polishing removal distribution were clarified.

Key words: magnetic field-assisted polishing, sealing of magnetic fluid, analysis of polishing pressure distribution, effect of magnetic flux density distribution on removal distribution

1. 結 言

近年、磁性流体を利用した画期的な磁気応用研磨法が数々考案されている^{1)~6)}。本研究は磁性流体封止方式の磁気援用研磨法により非球面形状を含む自由曲面の高精度加工の実現を目指している。前報⁶⁾では曲面对応の研磨装置を開発し、磁気援用研磨法の球面研磨への適用性について検討を行った。その結果、良好な加工面が得られ、その曲面研磨への適用の有効性が確認された。また、被加工物の形状精度を左右する加

工量分布は、磁極形状に大きく影響されることが明らかとなった。

一方、本磁気援用研磨法は次に示すような加工プロセスを用いて非球面形状の創成研磨を行うのが有効であると考えられる。すなわち、切削加工法や研削加工法により加工物を最終の目標精度の非球面形状に完全に加工した後、最後の行程の研磨加工法により表面粗さのみを向上させながら、形状精度を維持するように均等研磨するものである。したがって、このように均等研磨を行うためには、本研磨法における磁場分布と加工圧分布、そして研磨量分布との関係を定量的に把握しておく必要がある。そこで本報では、本研磨装置において磁極形状を変化させて磁場分布と加工圧分布の関係について理論的および実験的な検討を行った。さらに、磁極形状を同様に変化させて、平面形状のパ

* 原稿受付 平成5年4月13日

** 正 会 員 三菱電機(株) (尼崎市塚口本町8-1-1)

*** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

Fig.1 Schematic illustration of polishing setup

イレックスガラスを用いた加工実験を行い、磁場および加工圧の分布と、研磨量分布との関係について実験的な検討を行ったので報告する。

2. 加工原理

2.1 加工原理¹⁾

本磁気援用研磨法の加工原理を図1に示す。黄銅製の研磨盤⑩に同心円上に掘られた溝を磁性流体封止用ゴムシート⑨で覆い、ここに磁性流体①を注入し密封する。磁性流体は鉄やフェライトなどの強磁性体を液体中に分散させてコロイド状にしたもので、磁場に感応する性質を有する。そして、磁性流体が密封された溝の部分に上下両方向から電磁石ではさみ、上下の電磁石の極性が反対になるようにコイル②に直流電流を流すと、磁極③および支柱④に磁路が形成され、磁極間のギャップ部に磁束が集中する。これにより磁極間に存在する磁性流体は、柔軟な磁性流体封止用ゴムシート⑨およびその上に均一に張られた柔軟なポリシャ⑧を介して、ワーク⑤の曲面形状を有する被加工面を加圧する。このワークは上部磁極端にジグ⑥により取り付けられる。さらに研磨盤⑩およびワークを同一方向にかつ同一回転数 ω で回転させ、相対運動させることにより、ワークとポリシャの間に満たされた研磨剤

Fig.2 Analysis of polishing pressure distribution

⑦の作用で加工が行われる。

2.2 加工圧の解析

次に、本研磨装置において、磁性流体がポリシャを介してワークに作用する加工圧の算出法について述べる。図2に示すように、磁性流体界面に対して垂直方向に外部磁界 H_2 をかけたとき、磁性流体は重力 g に抗して盛り上がりようとし、加工圧 ΔP が生じる場合を考える。

一般に、磁性流体の流体力学的挙動を支配している Bernoulli の式は、次のように表される²⁾。

$$\left. \begin{aligned} P^* + \frac{\rho \cdot q^2}{2} + \rho gh - \int_0^H I dH &= \text{const.} \\ P^* &= P - \frac{I_n^2}{2\mu_0} \\ I_n &= I \cdot \vec{n} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 ρ は磁性流体の比重、 P は圧力、 q は流速、 h は高さ、 H は磁場の強さ、 I は磁性流体の磁化、 $\vec{n}$ は磁性流体界面の法線方向の単位ベクトルである。

次に、境界条件から、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} P_1^* &= P_0, \\ P_2^* &= P_2 - \frac{I_n^2}{2\mu_0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、 $q \doteq 0$ 、 $H_1 \doteq 0$ であり、式(1)、(2)から次式に示すような加工圧 ΔP が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_2 - P_0 \\ &= \rho g(h_1 - h_2) + \int_0^{H_2} I dH + \frac{I_n^2}{2\mu_0} \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、次の関係が成り立つ。

$$\frac{I_n^2}{2\mu_0} \ll \int_0^{H_2} I dH \quad (4)$$

また、 $h_1 \doteq h_2$ であり、式(3)、(4)より次式が得られる。

$$\Delta P \doteq \int_0^{H_2} I dH \quad (5)$$

なお、本実験では磁性流体として水ベースのもの（飽和磁化： $I_s = 0.031\text{T}$ ）を用いており、その磁化特性は磁場の強さ H が比較的小さな領域で飽和するため、近似的に次式のように表される。

$$\Delta P \doteq I_s \cdot H_2 \quad (6)$$

3. 実験装置および方法

3. 1 実験装置

実験装置の構成を図3に示す。上下の各電磁石のコイルは、線径1.2mmの銅線を10500回巻いたものであり、直流電流が供給される。これらの電磁石は効率化を図るため、磁極を支柱で支持し、環状の磁路を構成した。

Fig.3 Experimental configuration

Fig.4 Shapes of poles used in the experiment

磁極および支柱は構造上SS41を用い、磁化特性を向上させるため加工後焼きなましした。研磨盤は非磁性体の黄銅製で、半径150mmの所に幅30mm、深さ3mmの溝が掘られている。この溝には、磁性流体封止用のゴムシートおよびポリシャが張られた後、気泡の流入を防ぎながら側面の栓から磁性流体が流し込まれる。なお、ゴムシートは厚さ0.1mmのラテックスゴムを、ポリシャは厚さ0.4mmの発泡ポリウレタン製のパッド（R社製）を用いた。磁性流体は水ベースのフェリコロイドW-40（T社製）を用いた。その飽和磁化は0.031T(310G)であり、鉄などの強磁性体に比べてかなり小さいものである。

また、本研磨実験ではワークにパイレックスガラスを用いて検討を行った。ワークの寸法は直径40mm、厚さ3mmの大きさの平面形状である。これらのワークは、ポリシャと被加工面との相対運動を安定させるため、図3に示すように、エッジ部分が滑らかな曲面形状に

Fig.5 Distribution of measured magnetic flux density

Fig.6 Comparison between measured and calculated polishing pressure distribution

なった研磨用のジグに接着した後、上部磁極端に取り付けられる。磁極間のギャップ長は10mmで、被加工面の平面部が上部磁極端から4mmの位置になるように固定して実験を行った。

図4に本実験で用いた3種類の磁極の形状を示す。磁極1は先端形状が30°と尖ったもの、磁極2は平らなもの、磁極3は先端が凹型形状のものである。これは、一方の磁場分布をより均一に、その他を不均一にし、磁極の先端形状がワークの加工精度に与える影響を検討するためである。

3.2 磁場分布

初めに、これら3種類の形状の磁極を用いたときの研磨装置の磁場特性を図5に示す。各磁極形状を用いたときの、半径方向の位置Rにおいて垂直方向に通過

Table 1 Polishing condition

Abrasive Particle size Concentration pH	Colloidal silica 70 - 80 nm 40 wt% 9 - 10
Polisher Thickness	Forming polyurethane pad t = 0.4 mm
Magnetic fluid Saturation magnetization	Ferricolloid W-40 Bs = 0.031 T (310 G)
Rotational rate of disk Relative speed between workpiece and polisher	ω = 11 rpm v = 10 m/min

する磁束密度Bの分布を示している。電流Iは研磨条件と同一条件の1Aに固定した。磁束密度の値は、長さ2.5mm、幅1mmのゲルマニウムホール素子を有するガウスメータを用い、図3の研磨実験と同一の配置（上部磁極端から4mmの位置）になるように測定用ジグにより磁極の各半径位置Rに固定し、研磨盤を回転させないで静的に測定した。磁極先端の形状に対応して、磁束密度分布は磁極1では中心部に集中し、磁極2では比較的平らな、磁極3では凹形の分布となっている。

3.3. 加工圧分布

次に、同様の3種類の形状の磁極を用いたときの本研磨装置の加工圧の特性を図6に示す。各磁極形状を用いたときの、半径方向位置Rにおける加工圧Pの垂直成分の分布を示している。電流Iは研磨条件と同一条件の1Aである。これらの研磨加工圧の値は、直径6mm、厚さ2mmのひずみゲージ式圧力センサを用いて測定した。これらのセンサは磁場分布の測定と同様の測定用ジグを用いて、研磨盤を回転させないで静的に測定した。

また、実線は式(6)を用いて磁束密度分布Bの測定値から計算した加工圧分布である。測定値と計算値は比較的良く一致しているのがわかる。

3.4. 研磨条件および実験方法

研磨条件を表1に示す。研磨剤としては、粒径70~80nmのコロイダルシリカを用いた。研磨剤は被加工面とポリシャの間に安定して供給されるように、研磨盤上に十分に満たして実験を行った。研磨盤およびワークの回転数は11rpmで、ワークとポリシャの相対速度は10m/minである。なお、研磨盤およびワークは同一方向に、かつ同一回転数で回転する。したがって、被加工面とポリシャの相対速度は全域において等しくなり、相対速度の差による加工量分布への影響はないものと考えられる。また、このワークは図3に示すように、ジグ⑥を介して磁極に取り付けられ、ワークとポリシャの相対運動は安定して行われる。

Fig.7 Change in removal with polishing time for pyrex glass

Fig.8 Effect of polishing pressure on removal rate for pyrex glass

3. 5 研磨特性

次に、本研磨法におけるパイレックスガラスの基本的な加工特性を示す。図7は、平面サンプルを用いて研磨したときの、研磨時間 t に対する研磨量 δ の変化である。このサンプルはあらかじめ平面度 $1\mu\text{m}$ 、表面粗さ $0.01\mu\text{mRmax}$ 以下に研磨されたものである。磁極1を用いて電流 I を $0.25\sim 2\text{A}$ と変えることにより、研磨加工圧 P を $5.7\sim 21.8\text{kPa}$ [$58\sim 222\text{gf/cm}^2$]と変化した。いずれの加工圧においても時間の経過とともに線形的に加工されていくのがわかる。図7の結果から求めた、研磨加工圧 P に対する研磨除去速度 δ/t を図8に示す。これらの結果から、本研磨法においては研磨加工能率は、研磨時間および研磨加工圧に比例しており、加工特性が非常に安定しているのがわかる。

(a) Pole 1

(b) Pole 2

(c) Pole 3

Fig.9 Effect of pole shapes on deviation

4. 実験結果および考察

図4に示す3種類の形状の磁極を用いて加工したときの形状の変化を図9に示す。横軸 R はワークの中心から半径方向への位置で、縦軸は基準とする平面からの形状誤差量を表している。電流は 1A で研磨時間は 60min である。これらの形状の評価は、研磨前のワークの形状を測定し、基準となる両端部をマスキングして所定の条件で研磨を行った後、再びその形状を測定して重ね合わせて表示したものである。形状は、先端の曲率半径 $2\mu\text{m}$ のダイヤモンドスタイラスを有する接触形状測定機(Form-Talysurf)を用いて測定した。また、図9の形状の変化をもとに計算した研磨除去量分布の結果を図10に示す。磁極1、磁極2、そして磁極3を用いた結果を表示した。磁極1における研磨量分布は中心付近で最も大きく、半径方向に大きくなる

Fig.10 Measured polishing removal distribution

につれて減少しており、磁極3では凹形状になっている。一方、磁極2のものでは半径8mm付近から減少しているが、中央部は比較的均等に研磨されている。

さらに、研磨量分布と加工圧分布を比較したものを図11に示す。図中の曲線は図10の研磨量分布 $\delta(R)$ を中心部($R=0$ mm)における研磨量 $\delta_{R=0}$ で除し、無次元化して表示したものであり、丸印(●, ○, ○)も同様に磁場分布の実測値から計算した図6の加工圧分布 $P(R)$ を中心部の値 $P_{R=0}$ で除し、無次元化して表示したものである。研磨量の分布と加工圧の分布は比較的良く一致しており、このことは図8の研磨実験結果で示したように、研磨除去速度が加工圧に比例するという関係と矛盾することがなく、圧力分布が加工能率の分布にそのまま転写されており、磁場分布から研磨量分布が予測できることがわかる。

したがって、高い形状精度が要求されるような曲面加工に本研磨法を適用する場合には、均一な加工圧分布すなわち磁場分布が得られるような理想的な磁極の形状を、有限要素法などの数値解析法により最適設計して用いるプロセスが有効であるものと考えられる。

5. 結 言

旋削や研削などにより目標形状に前加工した被加工物の表面に、最終の仕上研磨を行うことを目的として、磁性流体封止方式の磁気援用研磨法について、磁場分布、加工圧分布、そして、研磨除去量分布の関係について、理論的および実験的に検討を行った。磁性流体に対する運動方程式を適用して、磁場分布の測定値から加工圧分布を求める計算式を誘導し、磁極形状を変

Fig.11 Comparison between polishing pressure distribution and removal distribution

えて加工圧の測定値と比較した結果、比較的良く一致することがわかった。さらに、平面形状のガラスサンプルを用いて研磨実験を行った結果、加工圧分布が研磨量の分布に転写されることが明らかとなり、そして研磨量分布は磁場分布から予測できることがわかった。したがって、本研磨法を用いて曲面形状の被加工物を加工する場合、初めに必要な加工圧分布が得られるような磁場分布を計算しておき、次にその磁場分布が得られるような磁極形状を最適設計するプロセスが、有効な手法になるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 黒部利次, 今中 治, 坂谷勝明: 電気泳動現象利用による表面研磨, 精密工学会誌, 52, 3(1986) 547.
- 2) 黒部利次, 示野和宏, 今中 治: 磁性流体利用の作用砥粒数制御研磨, 精密工学会誌, 54, 8(1988)1525.
- 3) 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), 精密工学会誌, 53, 6(1987)953.
- 4) 梅原徳次, 加藤康司: 磁性流体研磨の研究, 日本機械学会論文集, 54-503, C(1988)1599.
- 5) 黒部利次, 今中 治: 磁場を援用した圧力制御加工, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1985)623.
- 6) 鈴木浩文, 原 成一, 松永博之, 黒部利次: 磁気援用研磨に関する研究, 精密工学会誌, 55, 6(1989)93.
- 7) M.D.Cowley and R.E.Rosensweig: The Interfacial Stability of a Ferromagnetic Fluid, J.Fluid Mech., 30, 4(1967)671.