



# 磁気援用研磨に関する研究\*

— 球面形状への適用 —

鈴木浩文\*\* 小寺 直\*\* 原 成一\*\* 松永博之\*\* 黒部利次\*\*\*

Study on Magnetic Field-Assisted Polishing  
- Application to a Spherical Surface -

Hirofumi Suzuki, Sunao Kodera, Shigekazu Hara, Hiroyuki Matsunaga and Toshiji Kurobe

Recently, several types of new polishing methods using a magnetic fluid have been developed and fundamental studies have been carried out. This paper describes an application of the magnetic field-assisted polishing to a spherical surface. This method is devised on the basis of the electro-magnetic behavior of the magnetic fluid. As a polishing test material, single crystal  $\text{LiNbO}_3$  is examined. It is a man-made and hard-brittle material, and it is machined previously to a spherical surface 50mm in radius of curvature by diamond turning. The experimental results show that a surface roughness of  $0.01 \mu\text{m}$   $R_{\text{max}}$  can be easily obtained when colloidal silica is used as a polishing abrasive. And it is clarified that the magnetic field strength is closely related to the pressure and the removal rate. Therefore, in the case of finishing curved surfaces precisely, the magnetic field distribution must be uniform.

Key words: lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ), polishing of diamond-turned surface, spherical surface polishing, magnetic field-assisted polishing, sealing of magnetic fluid

## 1. 緒 言

近年、磁性流体を利用した新しい磁気応用研磨法が考案されている。それらの研磨法は大きく2種類に分類することができる。一つは、研磨剤である砥粒と磁性流体を混合したものをを用いて磁場を付加し、砥粒の磁気浮揚を利用する方式<sup>1)~3)</sup>であり、他は、研磨盤に密封した磁性流体に、磁場を付加して加工圧を得、研磨剤で加工する方式<sup>4)5)</sup>である。しかし、それらにおいて基礎的な検討は行われているが、いずれも平面研磨に関するものであり、実際に曲面研磨に適用された例は見られない。そこで本研究では後者、すなわち、磁性流体封止による研磨法に着目し、曲面对応の研磨装置を開発して球面研磨への適用を試みた。

研磨装置は既報の平面研磨用のもの<sup>4)5)</sup>とほぼ同様の構成であるが、曲面研磨を容易に行うため次のよう

に改良した。磁性流体封止用のゴムシートとポリシャを分離する構成にし、曲面形状の被加工物に適合しやすいうように薄くて柔軟なものを用いた。さらに電磁石の強力化および磁路の効率化により加工圧を増大させた。

本研磨法は、切削や研削などで曲面形状に創成した被加工物の表面の最終仕上げ加工に利用することを目的とするものである。そこで本実験では、硬質ぜい性材料のニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ )単結晶を、ダイヤモンド旋削により球面形状に創成したサンプルを対象とし、磁極形状を変化させ、形状精度および表面粗さなどについて検討した。その結果、球面形状への適用が可能であることが明らかとなったので、ここに報告する。

## 2. 加工原理

本磁気援用研磨法の加工原理を図1(a)に示す。黄銅製の研磨盤①に同心円上に掘られた溝を磁性流体封止用ゴムシート②で覆い、ここに磁性流体③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

\* 原稿受付 昭和63年9月3日。昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月12日)にて発表

\*\* 正会員 三菱電機(株) (尼崎市塚口本町八丁目1番1号)

\*\*\* 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

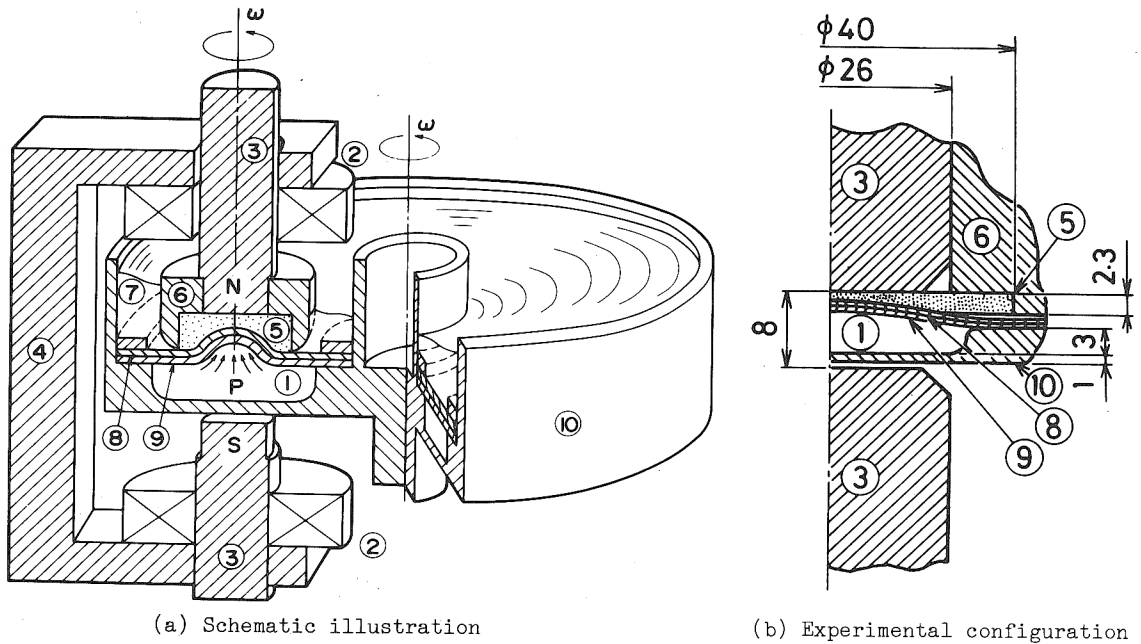


Fig.1 Polishing setup

1; magnetic fluid, 2; coil, 3; iron pole, 4; iron support, 5; workpiece  
6; jig, 7; polishing abrasive, 8; polisher, 9; rubber sheet, 10; brass disk

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ヤ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で回転させ、相対運動させることにより、ワークとポリシヤの間に満たされた研磨剤⑦の作用で加工が行われる。

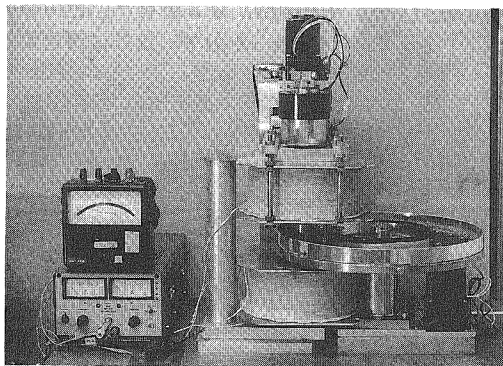


Fig.2 View of polishing setup

### 3. 実験装置および方法

図2に研磨装置の外観を示す。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。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ヤが張られた後、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、ポリシヤは厚さ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、硬質ぜい性材料のニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ )のYカット面について検討を行った。ワークは直径40mm、厚さ2.3mmの大きさの基板で、曲面研磨実験においては、被加工面をダイヤモンド旋削により曲率半径50mmの球面形状に創成したものをを用いた。これらのワークは、ポリシヤと被加工面との相対運動

を安定させるため、図1(a)に示すように、エッジ部分が滑らかな曲面形状に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8mmで、被加工面の平面部が上部磁極端から2.3mmの位置になるように固定した。

図3に本実験で用いた2種類の磁極の形状を示す。磁極1は先端形状が30°と尖ったもので、磁極2は平らなものである。これは、一方の磁場分布を不均一に、他方を均一にし、磁極の先端形状がワークの加工精度に及ぼす影響を検討するためである。次に、これら2種類の磁極を用いたときの、磁場および加工圧の特性を図4に示す。図4(a),(b)は電流Iに対する磁束密度Bおよび研磨加工圧Pの特性である。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、また、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。これらのセンサは図1(b)の研磨実験と同様の配置になるように測定用ジグを用いて固定し、磁極の中心部(R=0mm)において、研磨盤を回転させないで静的に測定した。いずれも電流の増加とともに上昇し、やがて飽和していく。一方、図4(c),(d)は電流を2Aに固定したときの磁極の半径方向の位置Rにおける磁束密度および研磨加工圧の分布である。測定方法は図4(a),(b)と同様である。磁束密度および加工圧の分布は磁極1では中心部に集中しているが、磁極2では比較的均一な分布になっている。

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した。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

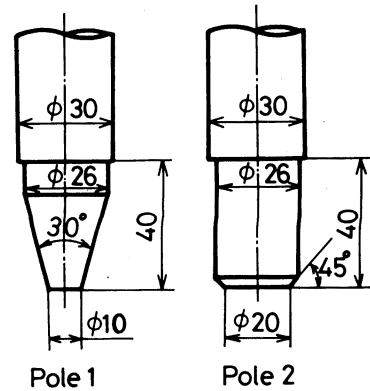


Fig.3 Shape of poles used in the experiment

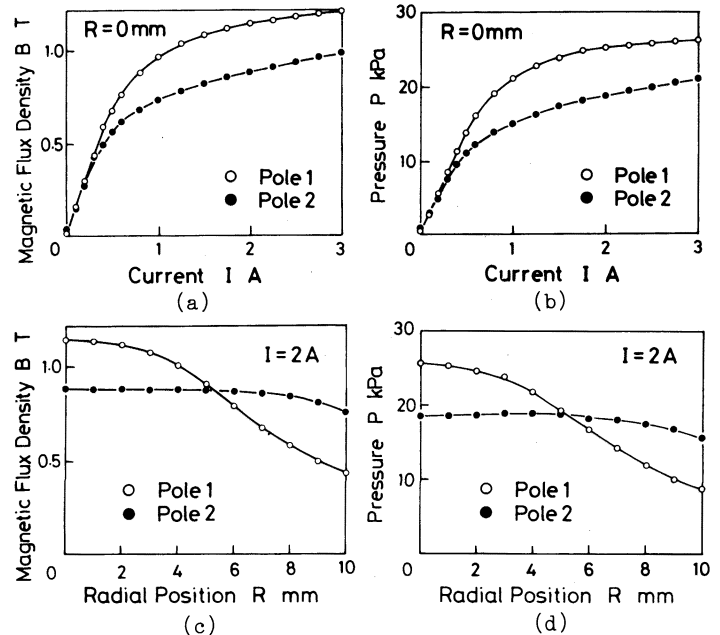


Fig.4 Characteristics of magnetic field and pressure  
 (a) Magnetic flux density in the center of poles  
 (b) Pressure in the center of poles  
 (c) Distribution of magnetic flux density  
 (d) Distribution of pressure

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	$\omega = 11$ rpm V = 10 m/min

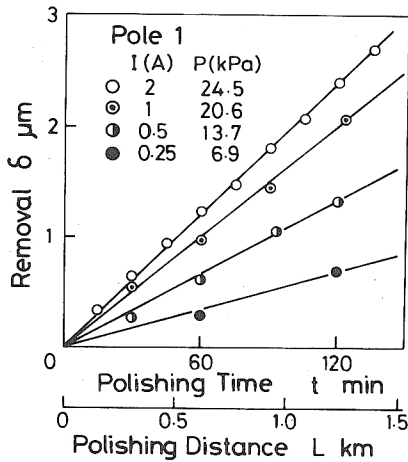


Fig. 5 Change of removal with polishing time for LiNbO<sub>3</sub>

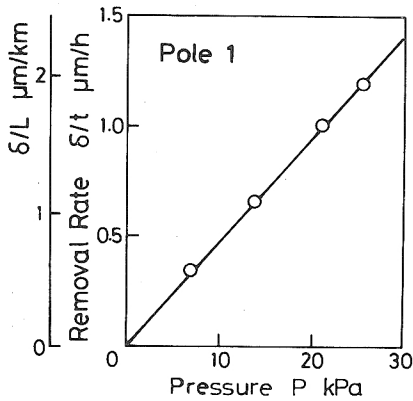


Fig. 6 Effect of polishing pressure on removal rate for LiNbO<sub>3</sub>

はないものと考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 平面研磨

はじめに、本研磨法におけるLiNbO<sub>3</sub>単結晶のYカット面の基本的な加工特性を示す。

図5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1μm、表面粗さ0.01μmRmaxに研磨されたものである。磁極1を用いて電流Iを0.25~2Aと変えることにより、研磨加工圧Pを6.9~24.5kPa {70~250gf/cm<sup>2</sup>}と変化させた。図中のLは研磨距離を表す。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5の結果か

Table 2 Cutting condition

Tool	Diamond bit of 300 μm radius
Depth of cut	3 μm
Feed rate	3 μm/rev

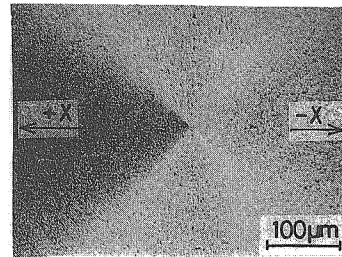


Fig. 7 Photograph of diamond-turned surface of LiNbO<sub>3</sub> workpiece

ら求めた、研磨加工圧Pに対する研磨除去速度δ/t (あるいはδ/L)を図6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(あるいは研磨距離)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。

次に、表面粗さの特性について検討を行う。ワークは、表2に示す条件でダイヤモンド旋削により平面形状に前加工したものをを用いた。その旋削面の中央部近傍のノルムスキー顕微鏡写真を図7に示す。回転中心から放射状に表面状態の異なった領域が観察される。LiNbO<sub>3</sub>単結晶は異方性の硬質ぜい性材料であり、その結晶構造は三方晶である。Yカット面で旋削すると、結晶方位の差により、+X方向には面の最も粗い領域(写真左部、表面粗さ0.15μmRmax)が生じ、-X方向に比較的良好な領域(写真右部、表面粗さ0.05μmRmax)が生じる<sup>6)</sup>。このワークを本研磨法で加工したときの表面粗さの変化を図8に示す。横軸は研磨時間tおよび研磨距離Lであり、縦軸は被加工面の表面粗さ(Rmax)である。また、それと同時に測定した研磨量δの変化もあわせて表示する。研磨条件は磁極1を使用し、電流Iは2A、加工圧Pは24.5kPa {250gf/cm<sup>2</sup>}である。これらの表面粗さは0.1μm×2.5μm角すいのスタイラスを用いて、半径方向に測定したものである。研磨の進行とともに表面粗さは良好になり、30min研磨後には研磨量δは0.6μmになり、+X方向および-X方向の全域において表面粗さは0.01μmRmaxに達している。

4.2 球面研磨

ワークは、LiNbO<sub>3</sub>単結晶のYカット面をダイヤモンド旋削により図9に示すような球面形状に創成したものをを用いた。旋削条件は表2に示す平面のものと同様である。なお、被加工面とポリシャの相對運動を円滑に行わせるために、ワーク中心部の曲率半径50mmの球

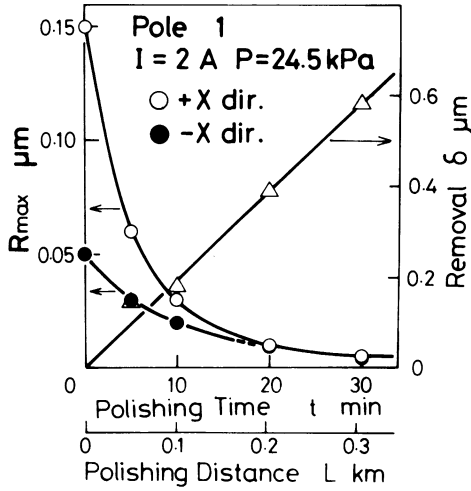


Fig.8 Change of surface roughness ( $R_{max}$ ) with polishing time

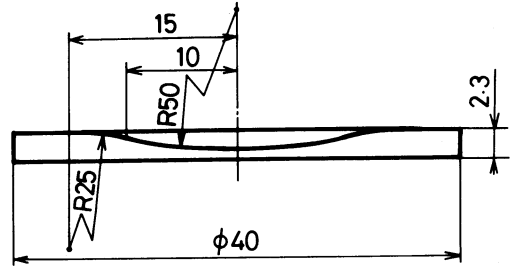
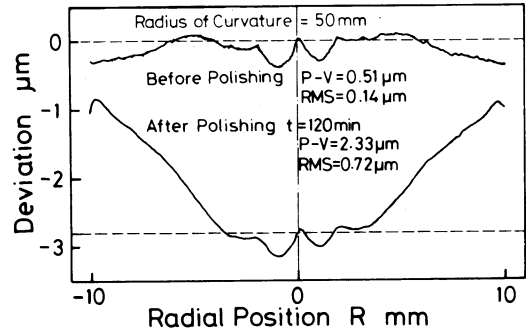
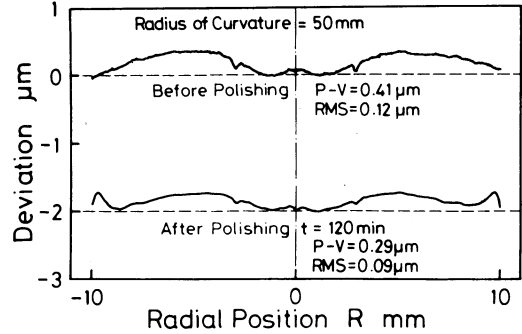


Fig.9 Shape of  $\text{LiNbO}_3$  workpiece



(a) Pole:1, Current  $I=2\text{A}$



(b) Pole:2, Current  $I=2\text{A}$

Fig.10 Effect of pole shapes on deviation from base sphere

面の領域と、平面の領域の間を、曲率半径25mmの凸面で継いだ。評価は中心部の球面の領域についてのみ検討を行った。このワークを研磨したときの形状精度の変化を図10に示す。研磨条件は表1に示す平面のものと同様であり、電流  $I$  は2Aに固定した。図10(a)は先端形状の尖った磁極1を用い、(b)は先端形状の平らな磁極2を用いて加工したものである。横軸  $R$  はワークの中心から半径方向への位置で、縦軸  $E$  は、基準とする曲率半径50mmの球からの形状誤差量を表している。これらの形状の評価は、研磨前のワークの形状を測定しておき、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、それらを重ね合わせて表示したものである。形状は、先端半径2 $\mu\text{m}$ のダイヤモンドスタイラスを有する接触式形状測定機(Form-Talysurf)を用いて測定した。磁極1では、研磨前の形状精度はP-V値で0.51 $\mu\text{m}$ であったが、120min研磨して中心部で2.8 $\mu\text{m}$ 除去した後2.33 $\mu\text{m}$ となり、大きな形状誤差が生じている。それに対して、磁極2では、研磨前の形状精度がP-V値で0.41 $\mu\text{m}$ であったが、120min研磨して中心部で2 $\mu\text{m}$ 除去した後も0.29 $\mu\text{m}$ であり、形状は比較的良好に維持されていることがわかる。

また、この形状精度の評価結果をもとに計算した研磨除去量の分布を図11に示す。横軸  $R$  はワークの半径方向の位置で、縦軸  $\delta$  は研磨除去量である。研磨時間は120minであり、磁極1を用いたものと磁極2を用いたものを表示した。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につれて減少している。一方、磁極2のものでは半径10mm付

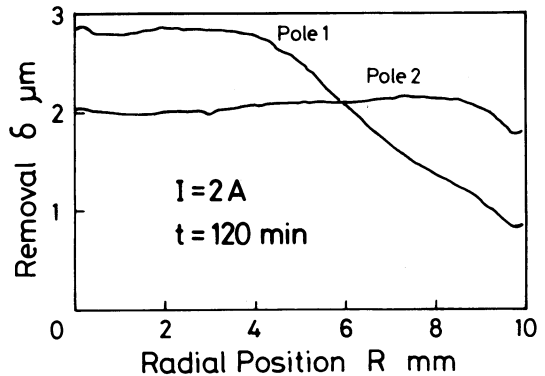


Fig.11 Distribution of removal

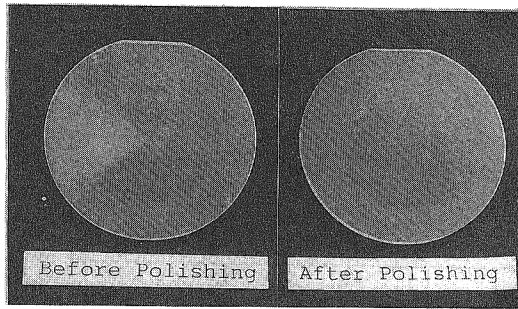


Fig.12 Photographs of workpieces before and after polishing by using pole 2

近でいくぶん減少しているが、比較的均等に研磨されている。これらを図4(c)の磁束密度および図4(d)の加工圧の分布の測定結果と比較すると、非常に類似した傾向にあることがわかる。これは平面研磨の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一致している。このワークの形状では、ポリシャの弾性変形に対する抵抗が小さく、圧力分布のみがワークの形状精度に大きく影響しているものと考えられる。

したがって、本研磨法を一般の曲面研磨に適用し、さらに形状精度が要求される場合、次のことを考慮しなければならない。均一な加工圧分布すなわち磁場分布が得られるような、理想的な形状の磁極形状を用いることにより、前加工により得られた形状精度の悪化を防ぐ必要がある。

図10(b)に示した、磁極2を用いて120min研磨したワークの写真を図12に示す。左図が旋削後のもので、右図は研磨後のものであり、鏡面が得られている。また、この研磨後のワークの表面粗さを、光学式非接触粗さ計を用いて測定した結果を図13に示す。球面形状のワークの研磨においても、表面粗さは全域で $0.01 \mu\text{mRmax}$ が得られている。

## 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、研磨装置を開発し、球面形状への適用を検討した。研磨装置は、曲面研磨に対応させるため、磁性流体封止用のゴムシートとポリシャを分離する構成にし、さらに、ゴムシートとポリシャに薄くて柔軟なものを採用した。そして、ニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ )単結晶のYカット面を旋削により曲率半径50mmの球面形状に前加工した

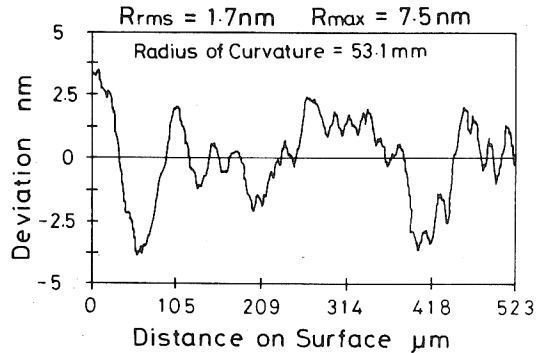


Fig.13 Surface profile of a workpiece after polishing by using pole 2 in Fig.12

ワークを対象とし、磁極形状を変化させて実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 本研磨装置による球面研磨への適用が可能である。研磨剤としてコロイダルシリカを用いた場合、球面形状においても $0.01 \mu\text{mRmax}$ の表面粗さが容易に得られ、従来の平面研磨と同レベルの鏡面が得られる。
- (2) 本研磨法では、除去速度は加工圧(磁束密度)に対して比例関係にある。
- (3) したがって、一般の曲面研磨において高い形状精度が要求される場合、均一な加工圧(磁場)分布が得られるような形状の磁極を用いる必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 今中 治, 黒部利次, 松島一晃: 磁性流体利用による砥粒加工, 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1981)774.
- 2) 黒部利次, 示野和宏, 今中 治: 作用砥粒数制御によるポリシング, 昭和59年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1984)777.
- 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) 黒部利次, 今中 治, 橋 進: 磁気利用による表面研磨, 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1981)431.
- 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) 小寺 直, 原 成一, 松永博之:  $\text{LiNbO}_3$  単結晶のダイヤモンド切削に関する研究, 昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(1986)375.