

研究論文

光学ガラスの超精密研削

河田圭一*1 佐藤 豊*1 水野和康*1

Ultra Precision Grinding of Optical Glass

Keiichi KAWADA, Yutaka SATO and Kazuyasu MIZUNO

機械的ツルーイングを施した微粒ダイヤモンド砥石を用いて、斜軸研削法によるガラスの超精密研削を試みた。砥石結合剤としてメタル、レジノイド、ビトリファイドの3種類を用い、主に仕上面精度と砥石摩耗について調べた。メタルボンド砥石およびレジノイド砥石を用いた場合には、切込みを $0.1\mu\text{m}$ より小さくすることで、延性モードによる研削が行われ、 60nmRzDIN 程度の仕上面粗さを得ることができた。これに対しビトリファイド砥石の場合は、切込みを $0.1\mu\text{m}$ より小さくしても延性モードにはならず仕上面粗さは向上しなかったため、ガラスの超精密研削には不適当であることがわかった。メタルボンド砥石およびレジノイド砥石では、切込みを $0.1\mu\text{m}$ から $0.05\mu\text{m}$ に小さくすることで、研削比が約3倍向上した。一方、ビトリファイド砥石の研削比は切込みに関係なく500程度と小さかった。

1. はじめに

最近では、デジタルカメラやDVDなどのデジタル機器の需要が高まり光学系ガラスレンズが多く使用されている。特に、特殊なレンズではポリシング工程の前処理としてガラスの超精密研削加工が行われており、ポリシング工程の時間短縮のために、研削加工の工程ではクラックのない仕上面が望まれている。難波ら¹⁾は超精密平面研削盤を用いて 0.2nmRa の研磨面と同等な仕上面が得られることを報告している。しかしながら、斜軸研削法による報告はあまりない。筆者らは、これまで機械的ツルーイングを施したCBN砥石およびダイヤモンド砥石を用い、金型材料であるSKS3や超硬合金を斜軸研削法で超精密研削し、結合剤の影響を調

べてきた^{2)、3)、4)、5)}。そこで、今回これまで進めてきた機械的ツルーイングを微粒ダイヤモンド小径砥石に施しガラスの超精密研削を試み、結合剤の種類による仕上面精度や砥石摩耗などについて調べた。

2. 実験方法

研削実験は図1に示すような超精密非球面加工機を用いて行った。油軸受を用いたX軸スライド、Z軸スライド、X軸スライド上に固定された回転テーブル(B軸)および空気軸受の主軸で構成される。この加工機はエアタービンで駆動する砥石軸が 45° 傾けられており、円筒型砥石のエッジ部分(作用面)で研削する方式になっている。このため、作用面に分布する砥粒数は少なく、作用面のツルーイング精度が仕上面粗さに大きく影響する。作用面のツルーイングは#325のメタルボンドダイヤモンド砥石で行った。ツルーイングにより、エッジ部分には $50\sim 70\mu\text{m}$ の幅を設けた。

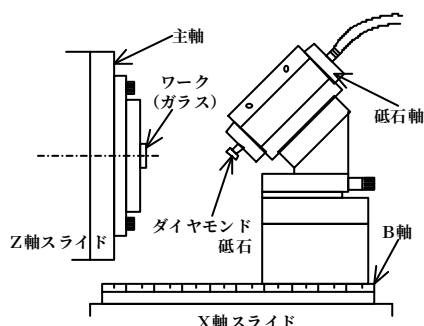


図1 超精密非球面加工機概略図

表1 研削条件

砥石	砥粒 粒度	ダイヤモンド #1000
	結合剤	メタル、ビトリファイド、レジノイド
加工 条件	主軸回転数	150 rpm
	砥石軸回転数	32000 rpm
	送り	$10\mu\text{m}/\text{rev}$
	切込み	$0.05, 0.1, 0.2\mu\text{m}$
	研削油	油性

*1機械電子部

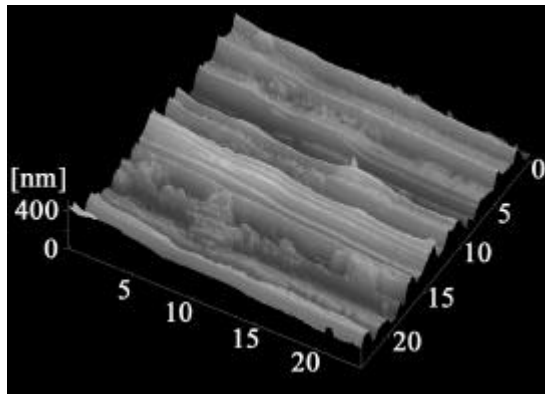


図2 脆性モード研削面
(平面研削、メタルボンド、切込み $1\mu\text{m}$)

そのときの作用面の面振れは、砥石回転数 32000rpm のとき、 $0.4\mu\text{m}$ 以下になるようにした。メタルボンドはツルーイングだけでは研削能力を持たないのでドレッシングを行った。被削材には光学ガラスによく用いられる BK7 を用いた。研削条件を表1に示す。

仕上面粗さの測定は触針式粗さ計を用いた。被削材の円周方向に8箇所測定し、その平均値を用いた。フィルターはガウシアンフィルターでカットオフ長さは 0.25mm とした。評価長さは5カットオフとした。ガラスが延性モードによる研削が行われているかどうかを判別するために、原子間力顕微鏡 (AFM) によって加工表面を観察した。

3. 実験結果及び考察

3.1 研削モードの判定

ガラスは脆性材料であるが、切込みを小さくすることで延性材料と同じような流れ形の切り屑になることが知られている。これを判別するために、ガラス仕上面の微小領域 ($20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$) を AFM により観察した。

#1000 のメタルボンドダイヤモンド砥石を用い、砥石周速 1500m/min 、テーブル速度 13m/min 、切込み $1\mu\text{m}$ で平面研削を行うと、明らかに脆性モードで加工が行われる。図2はこのときの仕上面を AFM により観察したものである。図から砥粒痕も見られるが、深さは 200nm 以上ある。左下部分には大きく破壊された部分があり、脆性モードであることが判断できる。

図3は、本実験の超精密研削により得られたガラス表面を観察した結果である。研削条件は、#1000 のメタルダイヤモンド砥石、切込み $0.05\mu\text{m}$ である。図2に比べ多数の砥粒痕から成り立っており、砥粒痕の深さも 100nm 以下である。これから本実験では延性モードによる研削が行われているものと判定できる。

3.2 仕上面粗さ

結合剤別に切込みが仕上面粗さに対して及ぼす影響

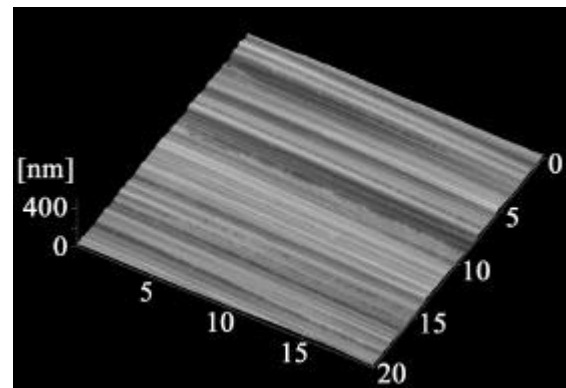
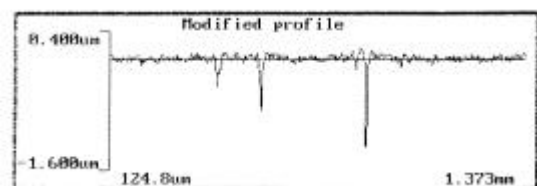
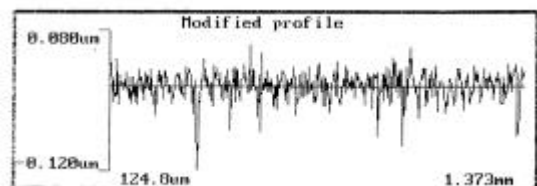


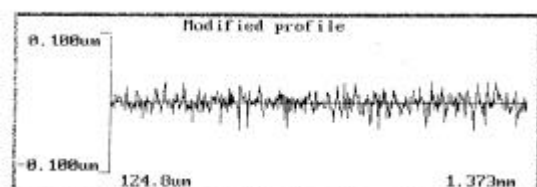
図3 延性モード研削面
(超精密研削、メタルボンド、切込み $0.05\mu\text{m}$)



(a) 切込み $0.2\mu\text{m}$



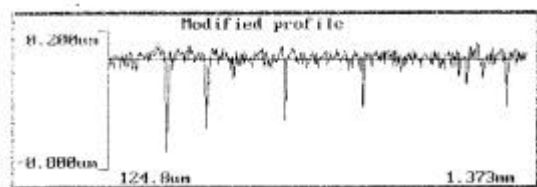
(b) 切込み $0.1\mu\text{m}$



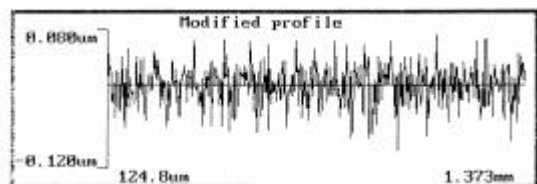
(c) 切込み $0.05\mu\text{m}$

図4 粗さ曲線 (メタルボンド)

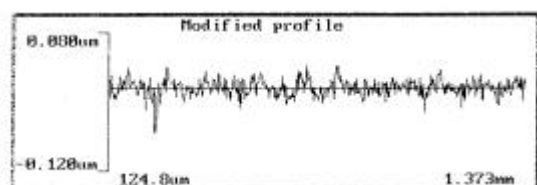
を調べた。図4は、メタルボンド砥石で加工を行った場合の粗さ曲線である。(a)、(b)、(c)は、それぞれ切込みが $0.2\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.05\mu\text{m}$ の加工結果である。仕上面粗さ $RzDIN$ は、それぞれ 579nm 、 124nm 、 64nm となった。(a)では 1000nm を越える深いき裂が見られる。このような深いき裂は、脆性的に破壊された部分と考えられる。切込みを $0.1\mu\text{m}$ に小さくした(b)では、仕上面粗さは向上しているものの、 100nm 程度のき裂が数か所存在している。切込みを $0.05\mu\text{m}$ まで小さくした(c)では均一な仕上面になっている。以上のことから、ガラスの研削において、切込みが仕上面粗さを決定する重要な要因であり、切込みの増大とともに加工



(a) 切込み 0.2 μm



(b) 切込み 0.1 μm



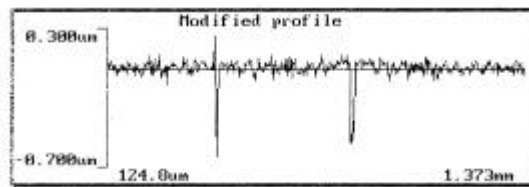
(c) 切込み 0.05 μm

図5 粗さ曲線(レジノイド)

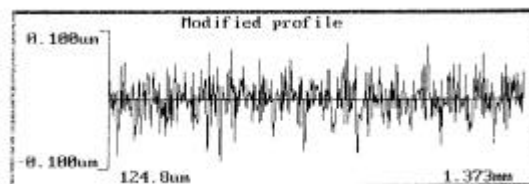
様式が延性モードから脆性モードに推移していくことがわかる。本研究の加工条件における延性モードの研削が可能な領域は、切込みが 0.1 μm より小さい場合で、そのとき得られる仕上面粗さは、Ra で 8nm、RzDIN で 60nm であった。

図5は、レジノイドボンド砥石で得られた結果である。レジノイドボンド砥石もメタルボンド砥石とほぼ同様の傾向を示した。切込み 0.05 μm では延性モードとみられる仕上面になり、メタルボンド砥石とほぼ同じ仕上面粗さが得られた。切込みが 0.1 μm と 0.2 μm では、深い溝の発生が認められるようになり、メタルボンドと同様に粗さパラメータの値は急増した。

ビトリファイド砥石は、前者2つと異なる結果を示した。ビトリファイド砥石による粗さ曲線を図6に示す。(a)に示す切込み 0.1 μm では、メタルやレジノイドに比べて、深いき裂が存在している。切込みを 0.05 μm にした(b)では、(a)に比べ仕上面粗さは向上するものの、メタル、レジノイドの約2倍の仕上面粗さである。このことから、ビトリファイド砥石はガラスの研削に不適当と考えられる。その原因として、ビトリファイド砥石の構造が、メタルボンドやレジノイドボンド砥石と異なることが考えられる。メタルボンド砥石およびレジノイドボンド砥石はマトリックス型の砥石で気孔を持たない。このため、ツルージングあるいはドレッシングによってダイヤモンド砥粒がボンド面



(a) 切込み 0.1 μm



(b) 切込み 0.05 μm

図6 粗さ曲線(ビトリファイド)

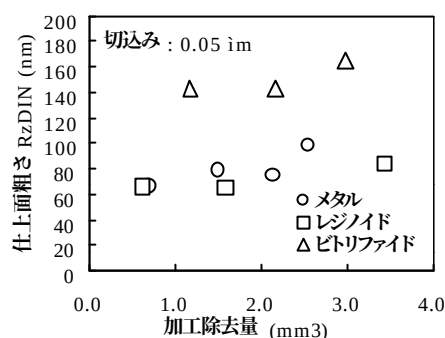


図7 仕上面粗さの推移

より突き出した状態になっている。一方、ビトリファイド砥石は、有気孔型の砥石であり、ツルージングのみで使用するため、結合剤と砥粒が同一面に存在する。そのため、結合剤(硬度の低い陶磁器質)部分も研削時にガラスと干渉するので、仕上面粗さを大きくしていると推定される。

研削の進行に伴う仕上面粗さの変化を求めた。図7に切込みが 0.05 μm の場合の結果を示す。図から、切込みが 0.05 μm と小さいにもかかわらず、いずれの結合剤についても少ない研削量で仕上面粗さが増加していることがわかる。このことから、ガラスの加工は、砥石作用面の精度が研削初期から悪化し、安定した研削を継続することが困難であると言える。

3.3 砥石摩耗

砥石摩耗は、研削の前後で砥石形状をカーボンプレートに転写して、砥石幅の増加量から摩耗量を算出した。幅の増加量は、触針式粗さ計で測定した。図8にその一例を示す。

砥石摩耗量と研削量から研削比を算出した結果を図9に示す。切込み 0.1 μm の場合、研削比はメタルボンド砥石が約1000、レジノイド砥石が約500であったが、



図8 砥石形状測定結果

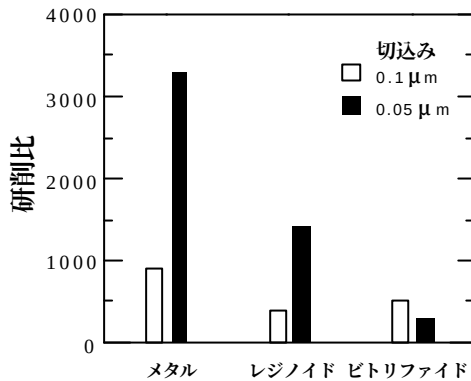


図9 結合剤ごとの研削比

3.4 メタルボンド砥石表面の観察

研削量の推移によって、メタルボンド砥石の研削作用面性状がどのように変化していくかを調べるために、触針式粗さ計を用いて砥石表面を三次元的に測定した。一例として、図10にドレッシング後の砥石表面の測定結果を示す。図の中でいくつも山のように突きだしているのがダイヤモンド砥粒である。砥粒の後方にはボンドテールが見られ、砥粒は結合剤により強固に保持されていることが確認できる。

図11に切込み 0.2 μmで加工したときの加工除去量に対する砥粒突き出し量の変化を示す。砥粒の突き出し量は、測定面内の10点平均法の高さを示す粗さパラメータ S_z として求めた。図から明らかなように、加工除去量が増えていくとともに砥粒突き出し量はほぼ比例して減少した。作用面の測定位置はすべて同じで、加工前に存在していた砥粒が 20mm³ 研削後も結合剤に保持されていることが確認できている。このことから砥石摩耗は、結合剤が切り屑により削り取られて砥粒が脱落する形態よりも、砥粒先端が摩耗する形態であることがわかった。

4. 結び

微粒ダイヤモンド小径砥石を用いてガラスを超精密

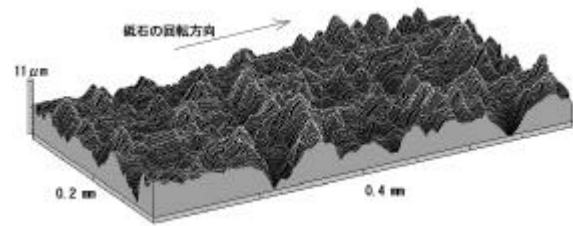


図10 ドレッシング後の砥石表面

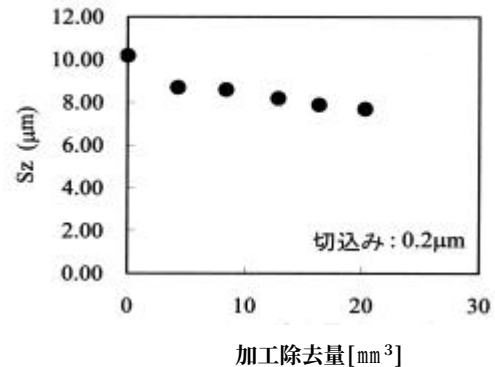


図11 砥粒突き出し量の変化

研削した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 結合材がメタルおよびレジノイドでは、切込みを 0.1 μm 以下にすることで延性モード研削になり、RzDIN で 60~70nm の仕上面が得られた。
- 2) 延性モードでは、脆性モードに比べ、研削比は大きくなる。
- 3) ビトリファイド砥石は仕上面、研削比の観点からガラスの研削に適していない。
- 4) メタルボンド砥石を用いたガラス研削における砥石摩耗は、砥粒の脱落ではなく、砥粒先端の摩耗という形態をとる。

文献

- 1) 難波、安部：1991 年度精密工学会春季大会講演論文集、47(1991)。
- 2) 佐藤、松原、中村：砥粒加工学会誌、41、10、382(1997)。
- 3) 佐藤、河田、松原、中村：砥粒加工学会誌、42、3、112(1998)。
- 4) 河田、佐藤、山本：愛知県工業技術センター研究報告、34、29(1998)。
- 5) 河田、佐藤、山本：愛知県工業技術センター研究報告、35、71(1999)。