

ダイヤモンド単粒によるガラスの超高速研削*

高橋正行** 上田修治** 黒部利次***

Ultra High Speed Grinding of the Glass with a Single Point Diamond

Masayuki TAKAHASHI, Shyuji UEDA and Toshiji KUROBE

Shear mode grinding has recently much attention for the machining of brittle material such as a glass, ceramics and silicon. This study presents the effects of a newly developed ultra high speed grinder, which can achieve speeds five times greater than conventional grinders. Scratching modes on a surface of glass ground with a single point diamond were observed in detail by scanning tunnel microscopy. It was found from the experiments that the grinding mode depends exceedingly upon the circulating speed of the disc. The depth of cut observed with STM was about 20-30% smaller than calculated one. Grinding mode changes due to the shape of stylus tip and the cut of depth is influenced by crossing of the scratches.

Key words: ultra high speed, single point diamond, shear mode grinding, magnetic bearing, glass, STM

1. はじめに

近年、OA や AV 機器には非球面形状や非対称面形状のレンズなどの光学素子が多く用いられてきている。それらの光学素子においては高精度な加工が要求されている¹⁾。しかし、複雑な形状の光学素子を高精度、高能率に製造するには、砥石の周速度を超高速にし、なおかつ延性モードの研削を実現することが重要であると考えられる²⁾³⁾。

砥石周速度が毎分 10 000 m を越える超高速研削は²⁾、生産性と品質を同時に満たす可能性のある加工法として注目され、最近各方面で研究が始められている⁴⁾⁵⁾。しかしながら、それらの研究の多くは金属材料を対象としており⁶⁾⁷⁾、ガラス等の硬ぜい材料についての研究は少ないようである⁸⁾。本研究は、ガラスレンズやミラー等を高能率で超精密に加工する方法の開発を目的としており、その第一歩として超高速研削の研削の加工メカニズムを把握することを意図している。そこで本報では、超高速単粒研削加工試験装置を新たに開発し、ダイヤモンドスタイラスを用いて光学ガラス (BK 7) に対して単粒研削実験を行った。実験後、研削条痕形状の観察を行い、臨界切込み深さや研削条痕周辺の盛上がり高さの測定を行った。その結果、光学ガラスの超高速研削について興味ある知見を得たので報告する。

2. 実験方法

2.1 磁気軸受スピンドル

磁気軸受は機械的な接触部が無いいため、摩耗が無く、高速回転が可能である。また高速回転時には、磁気的な結合の弱さから回転軸のアンバランス質量によって生じる振動が外部に伝わりにくい等の優れた特性を有している⁹⁾。

本研究では、磁気軸受の優れた特性を活用して、磁気軸受搭載の研削加工装置を製作した。表 1 に、装置に搭載した磁気軸受スピンドル (S 2 M 社製 B 15) の仕様を示す。

磁気軸受の動特性の測定は研削加工上重要である。そこで、インパルス加振法により¹⁰⁾、磁気軸受スピンドルの動特性 (イ

ナータンス) を評価した。具体的には、スピンドル単体の回転軸に加速度ピックアップを取り付け、インパルスハンマで軸を叩き加振した。それぞれの信号を FFT アナライザに入力することによって測定した。測定結果を図 1 に示す。図 1 の縦軸はイナータンスを示し横軸は周波数を表す。図 1 から、本スピンドルの共振点は 1.9 kHz にあることがわかる。研削実験は 300 Hz 以下で行っており、安定性の面からは問題は少ないと思われる。

2.2 高速回転円盤

超高速単粒研削実験は、回転円盤にダイヤモンド単粒を取り付けて行った。円盤周速度を毎分 10 000 m 以上の超高速にするため、回転円盤の形状を $\phi 260 \text{ mm} \times t 10 \text{ mm}$ の大型にした。円盤は高速回転時の遠心破壊が問題となるため、軽量で高剛性な構造の円盤にする必要があった。そこで、円盤は CFRP (Carbon fiber reinforced plastic) で作製した。

円盤に使用した CFRP の諸特性は、引張強さ 130 kgf/mm²、ヤング率 12 000 kgf/mm²、比重 1.8、熱膨張係数 1×10^{-6}

Table 1 Specification of magnetic bearing

Maximum speed	60 000 rpm
Theoretical output power	15 kW
Maximum load	30 kgf
Static stiffness	10 kgf/ μm (radial)
	10 kgf/ μm (axial)

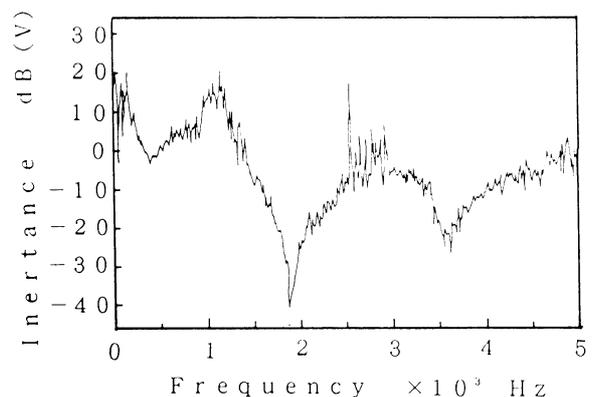


Fig. 1 Inertance of magnetic spindle

* 原稿受付 平成 6 年 1 月 5 日

** 正 会 員 松下電器産業(株) (門真市松葉町 2 番 7 号)

*** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

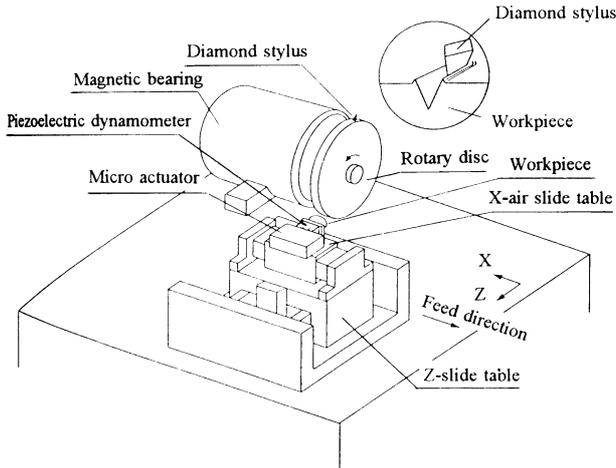


Fig. 2 Grinding setup with magnetic bearing

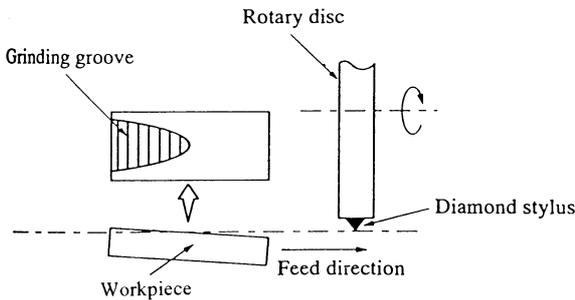


Fig. 3 Experimental method

℃, ポアソン比 0.3 である。

2.3 研削装置と供試材

単粒研削実験は図2に示す装置を用いて行った。研削装置は、高速回転円盤を搭載した磁気軸受スピンドル及び微小切込み機構を設置した構造となっている。微小切込み装置は、りん青銅製のダイヤフラムと圧電素子の駆動部から成っている。本装置は、高精度なエアスライドテーブルの上に設置される。研削は、制御装置を通して行われる。

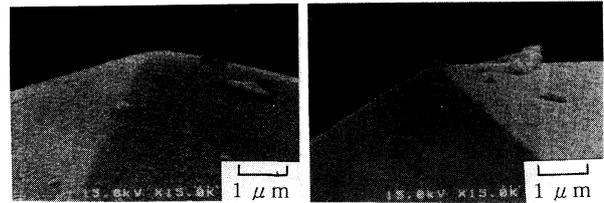
実験に際し、切込み深さの異なる研削条痕を幾条も試料面に適当な間隔を隔てて形成させるため、図3に示すように、試料表面を回転円盤の半径方向に垂直な方向からわずかに傾け(2~4 μm/φ16) 試料を取り付けた。被研削試料としては、光学ガラスのBK7を実験に供した。

工具となるダイヤモンドスタイラスにはピッカース王子(四角すい)を用いた。回転円盤への王子の取付けは、四角すいの縦が工具の運動方向と一致するようにした。実験に際し、ダイヤモンドスタイラスの先端形状が研削に及ぼす影響を及ぼすか知るために、先端半径が2 μmと0.5 μmの2種類の曲率半径の異なるスタイラスを使用した。しかし、主な実験は特に断らない限り先端半径2 μmのスタイラスを用いて行った。

図4に、実験に使用したスタイラスの先端形状のSEM写真を示す。表2に実験条件を示す。

2.4 条痕の測定法

研削試験終了後、研削条痕の状態を詳しく観察するため、試料をふっ化水素酸5%溶液に1分間浸し腐食した。腐食後、市水で表面を十分洗浄し、自然乾燥の後切込み深さの測定を行った。切込み深さの測定は、次に述べる二つの方法により行った。一つは、図5に示すように、得られた条痕についてその長さLを測定し、図中に記す式から切込み深さDの値を幾何学

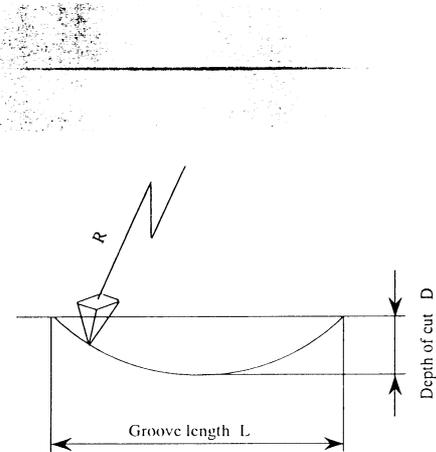


(a) r=2 μm (b) r=0.5 μm

Fig. 4 Tip roundness of stylus

Table 2 Experimental condition

Stylus	Pyramid diamond stylus (radius 2 & 0.5 μm)
Workpiece	Optical glass (BK 7)
Velocity	200-15 000 m/min
Disc radius	130 mm
Atmosphere	Dry



$$D = R - \sqrt{R^2 - L^2/4}$$

Fig. 5 Geometrical estimation of depth of cut

的に求める方法。もう一つの方法は、研削条痕をSTM(走査トンネル顕微鏡)により観察し切込み深さを直接求めるものである。

工具の切込み深さを増していくと、研削条痕にマイクロクラックが数多く見られるようになる。そのクラックの発生様態は砥石の周速度によっても異なる。研削条痕の創成が、ぜい性破壊主体によって営まれたのか延性破壊によってなされたのかは、クラックの発生状況を調べることで判断した。すなわち、研削条痕を光学顕微鏡で観察し、クラックが認められない場合を延性破壊によって条痕が創生されたとした。

単粒研削した場合、切込み深さが大きくなると、研削条痕の直下にクラックが観察される。すなわち一つの条痕の中で、延性破壊とぜい性破壊が混在した状態となる。これは、切込み深さが円弧状に変化する単粒研削特有の現象である。延性破壊は、切込み深さが最も大きい所でもクラックが観察されない場合をいう。

3. 実験結果および考察

3.1 工具刃先形状の影響

工具刃先の稜線の丸味が研削条痕の創成に及ぼす影響を及ぼすのか実験的検討を行った。研削後の条痕のSTM像を図6に示す。図6には、最も加工速度が遅い200 m/minの低速の

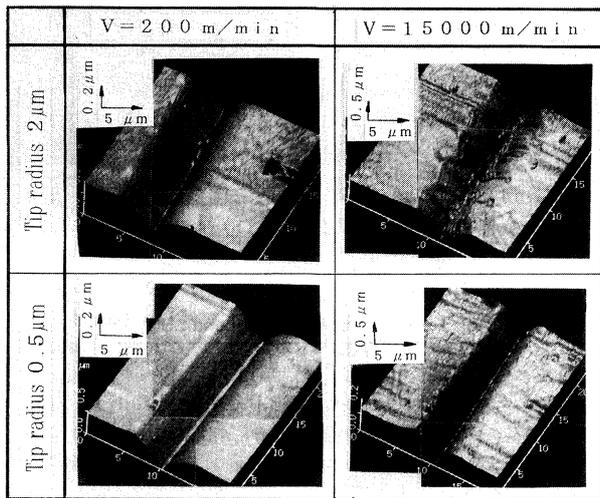


Fig. 6 STM micrographs of grinding groove

研削条痕のSTM像と15000 m/minの超高速領域の像を併載している。

図6から、低速領域では先端半径が2 μm、0.5 μmのいずれの場合も研削面は滑らかで深い条痕が創成されていることがわかる。一方、超高速領域での研削条痕の様相は低速のそれとはかなり異なる。工具先端半径が2 μmの場合には、研削条痕の側面に溶融によって生じたのではないかとと思われる波打ったような形状の激しい凹凸模様が観察される。凹凸模様のピッチは概略4 μmである。一方、先端半径が0.5 μmの場合には、2 μmの半径の場合と同様に研削条痕の側面に規則正しいピッチの細かい凹凸模様の波形が観察された。そのピッチは約2 μmである。

ダイヤモンドスタイラスを搭載した回転円盤を高速で回転させ加工物を研削する場合、ダイヤモンド単粒の運動に伴って切りくずが生成され排除されていく。その排除の様態は、切込み深さによって変わると考えられる。研削の際、スタイラス側面と加工物の摩擦により、工具の切削作用点では発熱が瞬時に起こり著しく高温となる¹¹⁾。

本実験に供したBK7ガラスは熱伝導率が金属材料に比して著しく悪い¹²⁾。そのため研削点においては研削作用は断熱的に営まれるものと思われる。すなわち、研削によって発生する熱は研削点に集中し、その研削している局所域においてガラスの軟化が起こり、工具の運動に伴って容易に流動をきたすと考えられる。

一方、研削の際には工具切れ刃先端領域には圧縮応力が発生する。しかし、これらの応力は摩擦による研削熱によって緩和される。図6に示す高速域の研削面が波打ったような研削面になったのは、圧縮応力の発生と研削熱による応力緩和の現象が工具直前の微小領域で、非常に短時間に交互に繰り返された結果生じたものと推察される。例えば、 $v=15000$ m/min、 $r=2$ μmの条件下では、約16 psごとに応力の集中と緩和が繰り返される。また凹凸模様の波形のピッチが工具先端形状(丸味)に影響されるのは、工具形状によって摩擦熱の大きさと圧縮応力の大きさが変化することが原因と考えられる。先端半径が2 μmと大きい場合には、いずれの量も大きくなり、それだけ波のピッチも大きくなったものと思われる。しかし、詳しくは研削温度の測定と研削点の応力場について解析を行う必要がある。

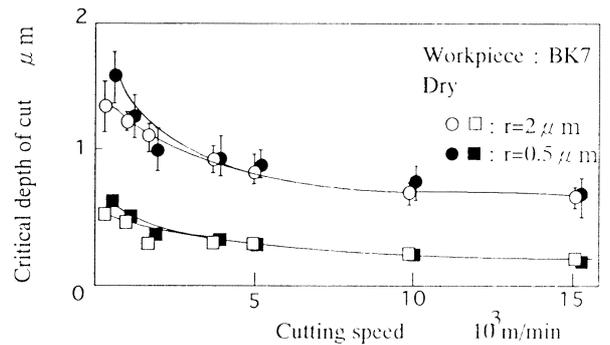


Fig. 7 Critical depth of cut

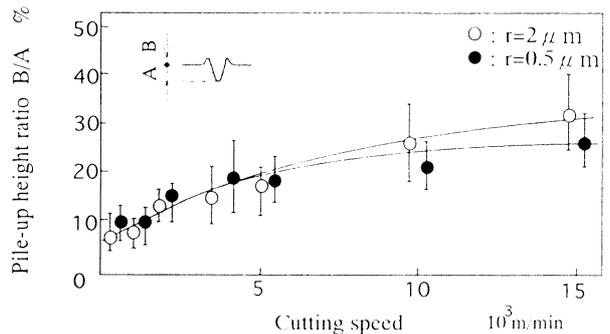


Fig. 8 Pile-up height ratio

3.2 臨界切込み深さ及び盛上がり量

研削現象がぜい性破壊から延性破壊に移行する遷移点を表す臨界切込み深さを図7に示す。図7に示す○印は、先述した幾何学的な計算によって求めた臨界切込み深さであり、□印は、研削条痕の中央部をSTMで測定して求めた値である。図7に記す○、□のデータは工具の先端半径 r が2 μmのものであり、一方、●、■は0.5 μmのものである。

図7から、臨界切込み深さは加工速度の上昇に伴い次第に減少することがわかる。しかし、加工速度が5000 m/minを越えるあたりから減少の割合は小さくなり、10000 m/min付近ではほぼ一定の値になることがわかる。図7から、いずれの速度領域においても実測して求めた臨界切込み深さの値は、計算から求めた値の20~30%となることがわかる。

臨界切込み深さに及ぼす工具先端半径の影響は、低速時においては比較的顕著であるが超高速の領域では明確でなくなる。これは次の理由によるものと考えられる。

先端半径の大きい工具の場合には、先端半径の小さい工具の場合と同じ切込み深さであっても除去体積が大きくなるため、加工に要するエネルギーも大きくなる。このため臨界切込み深さが小さくなることが予想される。しかし、先端丸味の大きいスタイラスの場合には、研削熱も大となり変形が容易になることが予想される。これらの2つの現象が影響しあい、結果として超高速領域で有意差が生じなかったものと考えられる。

次に、臨界切込み深さで研削した時の条痕周辺の盛上がり状態について観察した。図8に盛上がり比 B/A の測定結果を示す。盛上がり比は図中に示すように、研削条痕のSTM観察時に測定されるバルク表面からの盛上がり量 B を、臨界切込み深さの測定値 A で割った値である。同図から、盛上がり比は低速領域から高速領域にかけて次第に増加していく様子がわかる。5000 m/min以上の領域ではその増加の程度は先端丸味の大きい半径2 μmのスタイラスの方が0.5 μmの場合よりも大

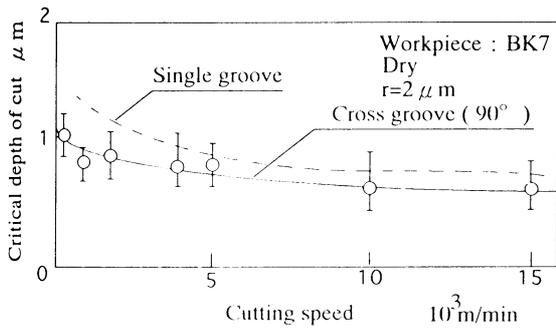
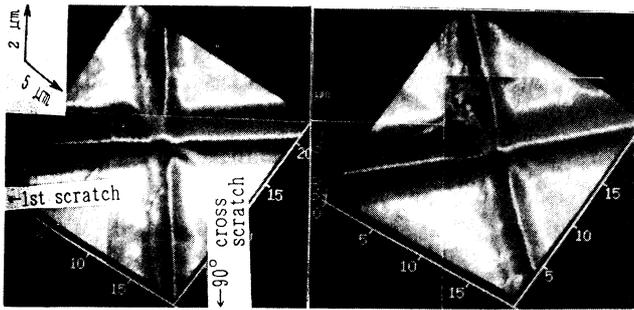


Fig. 9 Influence of cross scratch for critical depth of cut



(a) Before etching (b) After etching
V=15000 m/min, r=2 μm

Fig. 10 STM micrographs of cross grinding groove

きいことがわかる。盛上がりは、研削時に発生する摩擦熱のために加工物が軟化しそれがスタイラスによって側面に排除される結果生じたものと思われる。

3.3 条痕交差の影響

実際の研削を想定した場合、表面の創成のされ方は個々の砥粒による条痕が交差（相互干渉）しあうことで行われる。そこで、90°及び5°に条痕を超高速で交差させ、延性・ぜい性の臨界切込み深さが研削速度とともにどのように変わるか調べた。

測定結果を図9に示す。図9には、条痕を交差させない場合の結果も比較のため載せている。図9から加工速度が増すにつれ、いずれの条痕の場合も臨界切込み深さは次第に減少することがわかる。また条痕が独立の場合に比して条痕を90°に交差させた場合の方が臨界切込み深さが小さくなることわかる¹⁰⁾。

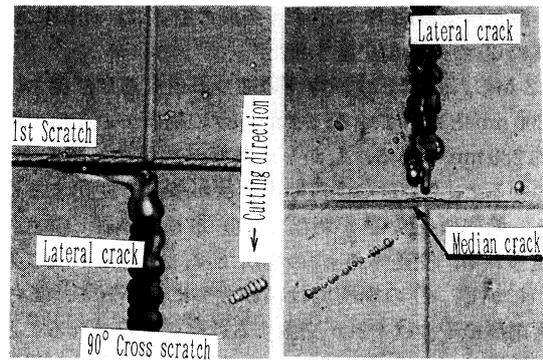
次に、90°に条痕を交差させた部位をSTMで観察した。観察結果を図10に示す。

一つ目の条痕（加工深さ200 nm：STM測定値）を施した後、15000 m/minの超高速で新たな条痕を交差させた。加工深さは90 nm（STM測定）である。図10(a)はエッチング前、図10(b)はエッチング後の交差部を表している。図10から、研削は延性モードで行われたことがわかる。

図10の(a),(b)両図を比較すると、交差部の切込み深さが腐食により25 nm程度大きくなっていること、交差部の形状が変化していないこと、マイクロクラックが観察されないことなどがわかる。さらに子細に見ると、超高速で研削した条痕の盛り上がり部が多く腐食されている様子が見られる。

盛り上がり部分は、流動の過程で変質及び残留応力を内包していると考えられ、腐食は他の部分よりも速く進行したと思われる。

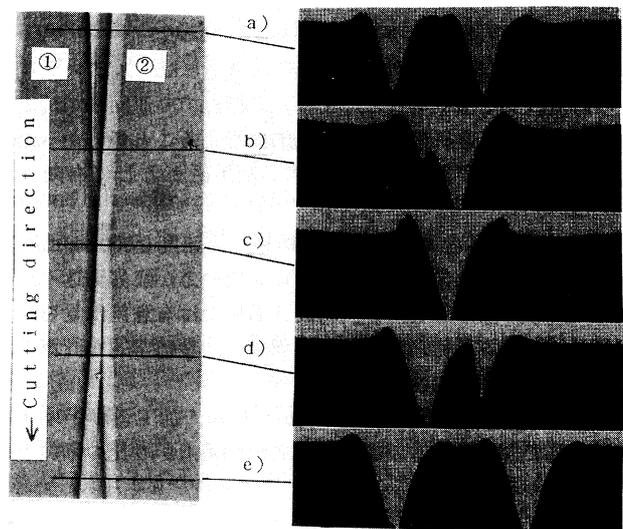
次に、同条件で加工した他の試験片の条痕の交差部の観察結



(a) (b)

V = 15000 m/min, r=2 μm

Fig. 11 Optical micrograph of cross grinding groove after etching



v=5000 m/min, r=2 μm

Fig. 12 STM micrographs of cross-sectional view of groove at five degree cross

果を述べる。腐食後クラックが生じた例を図11に示す。同図に示す写真は、一つ目の条痕に直角に超高速（15000 m/min）でもう一つの条痕を交差させた例を示している。研削は写真の上部の方向から下方に向かって行っている。

図11(a)は、一つ目の条痕を加工条痕が交差した以降にラテラルクラックと考えられる貝殻状のクラックを生じてぜい性破壊した例を示す。図11(b)は、一つ目の条痕を境にぜい性破壊モードから延性破壊モードに遷移した例を示す。一つ目の条痕の中央部にメジアンクラックが生じている様子が見られる。これらの現象は特異的でなくしばしば観察された。

延性モードで創成された研削条痕が腐食により図11(a),(b)のような破壊様態を示すのは、研削によって内部に蓄積されたひずみが腐食により解放されるためと考えられる。

ガラス等の硬ぜい材料では応力の解放の際、微視き裂の発生を伴う場合が多い¹³⁾。図11(a),(b)に示す写真は、研削によって生じた内部応力が腐食によって解放された結果生じたものと推察される。図11から、延性モード研削加工であっても、研削痕直下には残留応力が存在することがわかる。

次に、5°で交差させた条痕について述べる。実験は5000 m/minで行った。その後、試料を腐食し交差部をSTM観察

した。測定結果を図12に示す。条痕の交差は、同図に示す①の条痕に②の条痕を交差させた。

図12から、a)に示す断面では2つの条痕の加工深さはともに約200nmとなっている。また、e)の場所での条痕の断面深さは約280nmである。しかし、条痕が次第に接近してb)の場所になると、①、②の条痕断面形状が著しく変化することがわかる。最初の条痕①が新たな条痕②により押し潰される様子が見られる。交差するc)の場所では、完全に1つの条痕になる。しかし、d)の場所では再び2つに分かれる。このように、研削痕の干渉はそれが交差する近傍に限定されることがわかる。延性モード研削においては、このような現象が集積し、仕上げ面が得られるものと考えられる。

4. おわりに

ダイヤモンド単粒を用いて超高速研削実験を行った。研削試験は硬ぜい材料の一つである光学ガラス(BK7)について行った。実験の結果次のことが明らかとなった。

- (1) 超高速単粒モデル実験装置を開発した。スピンドルに磁気軸受を用いることにより、高剛性で高速回転が可能となり、超高速研削加工が効果的に行えることがわかった。また、CFRP製砥石は超高速研削用砥石として有効である。
- (2) 超高速単粒モデル実験の結果、周速度5000m/min以下の領域では先端半径の小さい単粒の方が臨界切込み深さが大きくなる。しかし、超高速領域では有意差は見られなかった。臨界切込み深さの実測値は、幾何学的な計算で求めた値の20~30%となった。
- (3) 単粒研削条痕周辺の盛上がり比は、加工速度が増すにつれて大きくなる。超高速領域では盛上がり比の増加がゆるやかとなる。

- (4) 条痕を交差させると、そこを起点にクラックが生じやすくなる。そのため臨界切込み深さは、単粒研削条痕が独立して存在するときより20~30%減少する。

参考文献

- 1) 上田修治, 中田邦夫: 電子部品・光学部品の超精密加工, 機械の研究, 41, 10 (1989) 1085.
- 2) 高橋正行, 上田修治, 黒部利次: 超高速研削に関する研究(第1報), 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 567.
- 3) M. Takahashi, S. Ueda and T. Kurobe: Ultra High Speed Grinding with a Single Point Diamond, Int. J. JSPE, 27, 2, (1993) 140.
- 4) E. Brinksmeier and E. Minke: High-Performance Surface Grinding (The Influence of Coolant on the Abrasive Process), Ann. CIRP, 42, 1, (1993) 367.
- 5) W. König and F. Ferlemann: CBN Grinding at Five Hundred M/S, Ind. Diamond Rev., 291, (1992) 72.
- 6) 高原基彰, 酒井安昭, 井上孝二, 鶴飼直行: ビトリファイドCBNホイールによる超高速研削(第2報), 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 567.
- 7) T. Tawakoli and S. Tawakoli: High-Efficiency Deep Grinding (HEDG) of Inconel and Other Materials, SME Conf. Proc., (1991) 67.
- 8) 柴田順二, 藤田 定: ガラスの単粒切削実験における加工クラックの挙動, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 507.
- 9) 電気学会編: 磁気浮上と磁気軸受, コロナ社, (1993).
- 10) 佐藤 彰: 磁気ヘッド用硬脆材料の加工損傷に関する研究, 博士論文, (1991).
- 11) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰: 研削加工と砥粒加工, 共立出版, (1984) 47.
- 12) 日本セラミックス協会編: セラミック工学ハンドブック, 技報堂出版, (1989).
- 13) 今中 治編: セラミックス加工ハンドブック, 日刊工業新聞社, (1987).
- 14) 森田 昇ほか: 単結晶シリコンの研削加工に関する研究(砥粒-被削材間の干渉作用と加工表面性状), 1991年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1991) 101.