シエアモード研削加工における研削代の評価*

—— ぜい性破壊痕の減少にともなう比研削エネルギーの変化 ——

今井 健一郎** 橋 本 洋***

Shear-mode Grinding Allowance to Remove Residual Damage Caused in Brittle-mode Grinding
- Change of Specific Grinding Energy with Decreasing Brittle Fractures -

Kenichiro Imai and Hiroshi Hashimoto

Shear-mode grinding can effectively be used to remove existing damage in surface ground in brittle-mode. This conclusion stems from observing the actual depth of cut and normal grinding force for each grinding pass as the initially damaged surface is being incrementally removed. When the specific grinding energy calculated by those values reaches the asymptotic values, the damaged layer has been removed. The total depth of material that must be removed in order that none of the initial damage remains is 6 times the maximum roughness of the initial surface. This result suggests that shear-mode grinding does not propagating subsurface damage left by brittle-mode grinding.

Key words : shear-mode grinding, actual depth of cut, damaged layer, specific grinding energy

1. 緒 言

硬ぜい材料の加工において、近年の精度ならびに生産性に対する高い要求レベルに対応するために、シエアモード研削加工（以下SMG加工）が注目されている。その理由は、この加工法が形状精度、生産性の向上、そして高品位化を同時に満足させる可能性を持っているからにほかならない。このことは、SMG加工がラッピング加工などの代替加工法の1つとして期待できることを意味する。

さて、SMG加工がその代替加工法として確立するためには、研削しろを正確に見積もることは重要な問題である。ここで、SMG加工がラッピングやポリシ加工に比べて、きわめて大きな研削抵抗をともなうことが懸念される。つまり、初期の前加工面に存在するクラックなどが、SMG加工によって進展するならば、代替加工法としての有用性が半減するからである。これまでに、前加工面をポリシ加工によって除去することでクラックの深さは定量的に明らかにされている¹⁾。しかしながら、実用的な観点からみたSMG加工における研削代の評価はあまりなされていない。

本研究ではこれまでに、メタルボンドダイヤモンドホイールによるBK7のSMG加工において、きわめて定常的な研削抵抗が得られることを明らかにした。このとき、ホイールの切削作用は研削量に依存することなく一定であり、その意味でドレッシングを必要としない^{2)~4)}。その結果として、比研削エネルギーが定量的に算出できる。本論文ではこの特長をいかしてSMG加工における研削代について調べている。すなわち、前加工面（ぜい性モード研削加工（BMG）面）がSMG加工によって除去されていく過程の比研削エネルギーの変化を調べれば、前述の定量的な比研削エネルギーに基づいてぜい性破壊痕の減少していく様子が観察されるであろう。このときの除去深さを、（1）初期の前加工面の最大粗さに基づいて示し、（2）ポリシ加工による仕上げ代と比較して、SMG加工における研

削代の定量的な評価を試みた。

2. 実験方法

実験はブランジ平面研削方式で行った。ホイールはストレートタイプのメタルボンドダイヤモンドホイールを用いた。その大きさは、直径100mm、幅4mmである。ホイールとワークの位置関係は図1のようになる。本実験では、粒度#400のホイールによるBMG加工（前加工）を行った後、#3000のホイールによるSMG加工（後加工）を行っている。

さて、#3000のホイールについては1つ重要な特長を記しておかなければいけない。このホイールは事前に適当な回数の加工実験を行うことで、定常的な研削抵抗が得られる状態、すなわち定常的な研削作用を発揮できる状態にあるということである。具体的には、カップ型のダイヤモンドホイール（#400）によるツルーイングの後、WAのスティック砥石（#500）でドレッシングを行い、その後、500mm³以上の加工を施した状態である。これまでに、本実験で測定された研削抵抗がホイールの切削作用の変化に依存しないことを確かめている³⁾。結果として定量的な比研削エネルギーを算出でき、このことが、本研究の大きな特長となっている。

被削材には一般的な光学ガラスとしてBK7を選んだ。試料は、図2のように階段状に加工され、各加工面は光学顕微鏡によって観察された。実質切込みの測定はフォームタリサーフにより行った。研削抵抗は法線研削抵抗(F_n)、接線研削抵抗(F_t)の2方向を、4軸水晶圧電動力計(キスラー社製、Type9273)で測定した。表面粗さの測定には触針式の表面粗さ計(ランクテラーホブソン社製のサートロニック3P、スタイラス半径5μm)を用いた。その他の加工条件については表1に示した通りとし、上述の条件に基づいて実験を行った。以下に実験手順を簡潔に記す。

- (1) #400、#3000のツルーイングを行い、両ホイールの作用面とワークとの接触角をそろえる。
- (2) #3000で定常的な研削抵抗が得られる状態になるまで、予備実験としてBK7のSMG加工を行う。
- (3) ホイールを#400に替えて、BK7のBMG加工を行う。

*原稿受付 平成8年11月18日

**学生会員 神奈川工科大学大学院（厚木市下荻野1030）

***正会員 神奈川工科大学

Fig.1 Schematic drawing of work and grinding wheel zone

Fig.2 The profile of specimen from brittle to shear-mode surface

Table 1 Grinding conditions.

Grinding Wheel	Metal bonded diamond wheel SD3000J75MB (4mm, ϕ 100)
Wheel Speed V	470 m/min (1500 rpm)
Work Speed v	150 mm/min
Depth of Cut t	2 μ m
Workpiece	BK7 Glass ($w3 \times l 50 \times t4$)
Grinding Fluid	AL-1 (Oil Based, Yushiro Co.)

Fig.3 Change in initial brittle surface with change in stock removal

- (4) 再び#3000で、図2のように試料を階段状に加工する。同時に研削抵抗の測定を行う。
- (5) #400ホイールによるBMG面の表面粗さを測定する。
- (6) 階段状試料の各加工面を光学顕微鏡で観察する。
- (7) 実質切込みを機上にてフォームタリサーフで測定する。
- (8) エッチングを行い、加工表面層に存在するピットなどの欠陥を顕在化させる。

3. 前加工面に残存するクラック層の除去プロセス

3.1 ぜい性モード面からシエアモード面への加工面の変化

研削加工面の変化を光学顕微鏡で観察し、累積切込みの増加にともなう研削加工面の変化を図3に示した。ここで、累積切込みは実質切込みを積算したものとする。なお、実質切込みについては次項において詳述している。

階段状に加工された各加工面には0から10の番号を付けた。ここで、(0)で示された前加工面について述べる。写真でみてみると、全面がBMG面となっている。そして、この

面の最大粗さを20点測定した結果、1.68～2.51 μ mで分布していた。

図3をみれば、累積切込みの増加にともなう、全面BMG面である前加工面がSMG面に加工されていくプロセスを容易に確認できるであろう。階段状の試料の各加工面を観察すると、(6)面以降ではほぼSMG面であることがわかった。このときの累積切込み深さは7.9 μ mであった。

3.2 実質切込みの変化

ここでは、初期の加工面にBMG面を有する場合の実質切込みの変化を明確に示すために、BMG面を有しない場合とを対比させた。研削回数の増加にともなう実質切込みの変化を、図4○印(BMG-SMG)と同図△印(SMG-SMG)に示す。前者の変化(○)をみれば、加工初期の段階において後者(△)と大きな違いをみせている。特に研削回数3回目まではその違いが顕著であり、加工面にぜい性破壊痕が多いとき、実質切込みは大きくなっている。さて、研削回数1回目の実質切込みが0.4 μ mとなっていたのは、いわゆるゼロ出しが難しかったことによるものである。これに対して、後者の変化(△)は、研削回数3回目までは前者に比べて小さい。特に、1回目は実質切込みがきわめて小さ

Fig.4 Change of normal grinding force

Fig.5 Change of actual depth of cut with decreasing brittle mode surface

かったために、測定不可とした（このとき次項で述べるように研削抵抗は生じている）。その後、実質切込みは研削回数の増加にともないゆっくり増加した後、研削回数7回目以降で設定切込みと等しくほぼ $2\mu\text{m}$ となっていることがわかった。ここで、加工初期にみられた増加傾向は、ワークとホイール間のコンプライアンスに起因する結果である²⁾。

両者を比較すると、研削回数4回目以降は、ほぼ同等の変化を示していることがわかる。そして、最終的にみられる定常的な過程は、本実験に用いたホイールの研削作用が定常的かつ良好であることを証明するものである。

3.3 研削抵抗および比研削エネルギーの変動

前項で述べた実質切込みの変化に対応した研削抵抗の変化を図5に示す。同図から、実質切込みが設定切込みに等しくなる時、研削抵抗が一定値になることは明らかである。さらに、この後も研削回数に依存することなく定常的な値で推移していることを確認している。この結果を基盤として、以下に加工面のぜい性破壊痕との関係を調べた。

ここでは、測定された研削抵抗値に前項の実質切込みの値を加味した値で評価することにする。そこで、3.2項で示した実質切込みを、法線(F_n)および接線(F_t)研削抵抗で割った値を、図6、7○印 (BMG-SMG)と同各図△印 (SMG-SMG)に示す。前項と同様、加工面にBMG面を有するときと有しないときの变化を対比して、それらの特長を述べる。

前加工面にぜい性破壊痕が存在するとき(○)は、小さな研削抵抗で比較的大きな実質切込みを得た後、研削回数の増加にともなう定常的な過程を示している。これに対して、前加工面がSMG面のとき(△)は、研削抵抗値に対して、実質切込みが

Fig.6 Change of normal grinding force F_n with decreasing brittle mode surface (actual depth of cut $[t] / [F_n]$) Fig.7 Change of tangential grinding force F_t with decreasing brittle mode surface (actual depth of cut $[t] / [F_t]$)

なり小さいことがわかる。その後は研削回数の増加にともなう定常的な過程を示している。

以上の実験結果を基に比研削エネルギーの変化を求める。比研削エネルギーが加工面のぜい性-延性遷移に大きく関係していることは、すでに砥粒単体の実験などで知られている⁵⁾。しかし、ここでは、より実用的な観点から実際のホイールを用いた実験値より比研削エネルギーを算出した。すなわち、上述の結果からホイールの研削作用の変化に依存しない定量的な値を以下の式より算出した。

$$\varepsilon = \frac{F_t \times V}{B \times v \times t} \text{ J/mm}^3$$

F_t は接線研削抵抗、 V はホイール周速度、 B は研削幅、 v はスライド速度、 t は実質切込みである。この比研削エネルギーの変化を図8に示した。そして、図に示したとおり、研削回数8回目以降は両者ともに約 $0.75 \times 10^6 \text{ J/mm}^3$ で定常的な値を示していることがわかる。同図と図3に示した研削加工面写真を比較すれば、前加工面(BMG面)がSMG加工によって除去されて、ぜい性からシエアモードへ移行する過程を、比研削エネルギーがよく表していることは明らかである。以上の結果、実際にホイールを用いた実験において、比研削エネルギーとBMG面との関係を示すことができた。

Fig.8 Change of specific grinding energy with decreasing brittle mode surface

a) Ground surface b) Etched surface

Fig.9 Etched surface of No.9

a) Ground surface b) Etched surface

Fig.10 Etched surface of No.10

4 研削代に関する一考察

4.1 SMG加工における研削代の定量化

前節までの結果をふまえて、ここでは具体的に研削しろを表すことにする。その前に、ある1つの疑いを解消する必要があると思われる。それは、表面的にはSMG面にみえても、その表面層の浅いところで、前加工面のクラックなどが残存しているのではないかと疑いである。そこで、エッチングによる評価を行った。エッチング液はふっ化水素 0.5 %、塩酸 1%の水溶液として15分間行い、このときエッチング深さは約 1 μm であった。

その結果、図3の(8)面以降の(9)面において、わずかではあるがピットが顕在化された(図9)。このときの累積切込みは 14.1 μm であった。ピットがなくなったのは、(10)面以降の加工面であった(図10)。このとき累積切込みは 16.2 μm である。なお、本実験で用いたホイールによる通常のBK7のSMG加工では、ピットなどが顕在化されないことを確認している。したがって、(9)面において顕在化されたピットは、前加工で生じたぜい性破壊痕であると考えられる。

以上の結果、SMG加工における研削しろは、前加工面で測

Fig.11 Profile of polished dimple

Fig.12 Depth of damage in brittle mode surface

定された最大粗さ R_{max} の最大値が 2.51 μm であったことから、この値に基づいて約6倍となる。この値は、前節までの比研削エネルギーの変化などにみられた結果からすれば、多少大きいものといえる。これは、加工表面層に存在するきわめて微細なピットなどの影響が、比研削エネルギーには反映されなかったことを示したものと見える。しかしながら、定性的には十分に加工面の状態をとらえているといえよう。

4.2 ポリシ加工における加工代との比較

本節では、前節で定量化されたSMG加工における研削代に付いて検討を加える。そのために、ポリウレタンパッドによるポリシ加工を行い、ぜい性破壊をともなった加工面の除去過程におけるピット数と加工深さの関係を調べた。このときの加工形状を図11に示す。加工面上を周辺部から中央に向かって光学顕微鏡(200倍)で観察しながら、残存するピット数を数えていくと、徐々にその数は減少していく。その結果、ピット数が除去深さの増加にともない指数関数的な減少傾向を示していることがわかった(図12)。このような方法で、初期の粗さが異なる3つの試料について、シエアモード面になるのに必要な除去深さを調べた。それぞれの試料の表面粗さとダメージの深さとの関係を図13に示す。図を見れば、両者の関係はほぼ比例関係にあるといえる。そして、ぜい性モード面をシエアモード面に仕上げるのに必要な除去深さは、初期の加工面の最大粗さの約4~5倍であった。この結果については、Paul Hedらが行ったポリシ加工による方法で、4~7倍¹⁾としていることからほぼ妥当であるといえよう。ここで重要なことは、前節までに行ってきたSMG加工が、ポリシ加工に比べてきわめて研削抵抗の大きな加工でありながら、前加工面の最大粗さの約6倍の深さを除去したとき、前加工面のクラック層が除去されたことである。この結果は、SMG加工が新たなクラックをほとんど生じさせることなく、前加工面に存在するクラックをさら

Fig.13 Roughness of brittle mode surface

に深くにまで進展させることの少ない加工であることを意味する。

以上の結果は、加工変質層の問題は残るものの、SMG加工がラッピング加工およびポリシ加工工程の一部を省略できる代替加工法として、きわめて有効であることを明確に示したといえる。

5. 結 論

本論文では、SMG加工における研削代を、実用的な観点から定量的に評価した。その結果、SMG加工はポリシ加工に比べてきわめて大きな抵抗をともなう加工でありながら、新たなクラックの発生ならびに初期の前加工面の存在するクラックの進展のきわめて少ない加工法であることが明らかとなった。結果として、SMG加工がラッピング加工の代替加工として有用であることを、実用的かつ具体的に示すことができた。以下に、ぜい性モードに加工されたBK7ガラスの前加工面がシエアモード研削加工によって除去されていく過程で得られた結果を述

べる。

- (1) 実測された実質切込み、および接線研削抵抗から、比研削エネルギーを算出した。その結果として、その値は、約 $0.75 \times 10^6 \text{ J/mm}^3$ という定常的な値を得た。本研究の特長でもあるこの定常的な値を基本とすることで、比研削エネルギーが加工面のぜい性からシエアモードへの変化を定性的によく表すことを明らかにした。すなわち、この値は加工開始初期の段階では小さな値を示し、その後シエアモード面になるにつれて先の定常的な値に収束した。
- (2) SMG加工においては、最大粗さが約 $2.5 \mu\text{m}$ の前加工面を除去するために、加工表面から約 $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の深さまで除去する必要があることを明らかにした。すなわち、研削しろは、初期の前加工面の最大粗さの約6倍となる。さらに、この値がポリシ加工による加工しろの深さとほぼ同等であることを示した。

参 考 文 献

- 1) P.P.Hed, D.F.Edwards and J.B.Davis : Subsurface Damage in Optical Materials : Origin Measurement and Removal, ASPE Spring Meeting, (1989).
- 2) 橋本 洋ほか：硬ぜい材料のシエアモード研削と表面性状，精密工学会誌，59, 3 (1993) 445.
- 3) K.Imai and H.Hashimoto : Change of Depth of Cut and Damage on Ground Surface in Shear Mode Grinding, ASPE Spring Meeting, Tucson, AZ April (1993) 58.
- 4) H.Hashimoto and K.Imai : Shear-mode Grinding Criteria of Zerodur and Pyrex glass, SPIE Proc., 6 (1995) 2576.
- 5) T.G.Bifano and S.C.Fawcett : Specific Grinding Energy as an In-process Control Variable for Ductile-regime Grinding, Prec. Eng., 13, 4 (1991) 256.