ガラスの延性形切りくず生成と切れ刃形体の効果*

柴田 順二^{*1}, 黛 政男^{*2}, 清水 毅^{*3}Ductile-regime Chip Formation of Glass and the Effect of the Shape
on the Cutting Edge with the Intent to Produce Flow-type Chips

Junji SHIBATA, Masao MAYUZUMI and Takeshi SHIMIZU

Here, we focused our attention on the relation between the shape of cutting edge and flow-type chip formation of glass. In order to clarify the relation between the two, scratch tests were conducted using a diamond cutting tool, a diamond grain and some diamond indenters of various shapes. As a result, the following conclusions were obtained; 1. The scratch load and the shape of cutting edge were the two most effective factors for generating flow-type glass chips. Furthermore, it was also observed that the corner radius of the cutting tool and surface texture of the cutting edge play an important role in the cutting action. 2. By observing microscopically, the flow-type chips were found to be a serrated chip. 3. Even when flow-type chips are generated, micro-crack damage in some instances may be found under the machined surface.

Key Words: Cutting, Chip, Grinding, Abrasive Grain, Glass, Brittle Material, Ductile-regime Machining, Crack, Ductile Chip

1. 緒 論

各種ファインセラミックスやSi単結晶に代表される付加価値の高い無機材料の機能を十分活用するには、その機械加工面は無じょう乱であることが望まれる。しかし、これらの無機材料は硬脆な材料特性を有する場合が多く、機械加工(主としてダイヤモンド研削、その他、ホーニングやラッピングなどの砥粒加工)に際してその加工面は、ダイヤモンド切れ刃との干渉によるクラックなどの損傷を受けやすい。そのためこれらの加工損傷を抑制し、製品の信頼性と品位を保証する加工技術の確立が長年の懸案となってきた。これまで生産現場では試行錯誤でこの問題に対応した結果、切れ刃との干渉(切り込み)深さをより小さく与えることによってこの加工損傷を抑制できるという技術的経験を得ており、この論理的根拠を延性形切りくずの生成にあるとする、比較的感覚的な理由で納得してきたといえる。しかし、今日、セラミックス等硬脆材料の延性形切りくずの実体が、必ずしも科学的に広く

容認されているわけではない。すなわち従来、この実務的加工技術が確立しつつあるのに対し、延性形切りくずの実体については間接的な議論にとどまり、その本質は意外にあいまいのままである。わずかにPuttick⁽¹⁾らが示したSi単結晶の切りくず写真が、延性形切りくずの具体的姿を提示した極めて数少ない実例の一つであり、この延性形切削の大きなよりどころとなっている。無機材料の降伏応力の評価、延性形切りくずの生成メカニズムと発生限界、支配因子といった延性形切りくずにかかわる、より具体的な追究が望まれる現況である。

本研究では、工作物にガラスを用い、その機械的材料特性と切れ刃の形体を実験因子とし、引っかき試験法によりこの延性形切りくずの生成について、実験的に検討した。切れ刃の形体としてダイヤモンドバイトのほか、曲率の異なる先端球状のダイヤモンド円すい圧子を主体に多彩な圧子の先端形体を取上げたのは、砥粒切れ刃による脆性材料の研削機構を模擬したかったためである。

2. 実験装置, 実験方法
および実験条件

2.1 実験装置と実験方法 実験には市販の荷重

* 原稿受付 1998年3月12日。

^{*1} 正員, 芝浦工業大学工学部(☎330-8570 大宮市深作307)。^{*2} (株)東京ダイヤモンド工具製作所(☎152-0031 東京都目黒区中根2-3-5)。^{*3} YKK(株)(☎938-0005 黒部市吉田200)。

形引っかかり試験機を用いている。引っかかり速度は 10 m/min に固定し、引っかかり荷重をガラス材質や引っかかり圧子の形体などに応じて、2~900 mN の範囲内で変化させた。引っかかり実験の途上、切れ刃のすくい面付近を実体顕微鏡と CRT 映像により直接観察し、切りくず発生の判定や切りくず形体の検討データとした。さらに、引っかかり条痕の横断面形状測定と表面 SEM 写真観察、および立体切れ刃による条痕については斜め切断によるその内部観察を通して、また面切れ刃のそれについてはその外観の観察によりクラックの有無とその形態などのデータも同時に収集した。

2.2 工作物 工作物材質として、硬度の異なる 3 種類(軟, 中, 硬)のガラスを供した。その表面はラッピング加工により、平滑に仕上げられている。これらの機械的材料特性は、表 1 にまとめて示している。無機材料の延性形切りくずを論じる際、一つのよりどころとなる材料特性が降伏応力である。従来、無機材料の降伏応力の評価では、硬度をその手掛かりにするのが一般である。しかし金属とは異なり、塑性流動特性の明確でない無機材料の降伏をダイヤモンド圧子と材料の接触面圧(硬度)で評価することの妥当性は議論のあるところである⁽²⁾。ここでは、微小変位形硬度計と先端球状ダイヤモンド圧子を用い、試供材料の“押し込み荷重-接触変形”特性カーブを測定し、このカーブがヘルツの弾性接触カーブから外れ始める点を塑性開始荷重と考え、降伏応力を推定し⁽³⁾、参考とした(表 1)。弾性係数やポアソン比は、超音波の伝ば速度より

Table 1 Mechanical characteristics of glass material used here

Characteristics Glass	Vickers hardness H_v	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Yield stress Y (GPa)
S F 6	350	51	0.25	0.8
B K 7	590	77	0.21	1.1
L A K 14	620	108	0.29	1.6

決定した。

2.3 引っかかり用ダイヤモンド切れ刃 実験に供

した引っかかり用ダイヤモンド切れ刃は、次の二つの形体に大別される；

① 立体切れ刃(Solid Type)：角すい圧子，円すい圧子，単粒ダイヤモンド

② 面切れ刃(Face Type)：ダイヤモンドバイト

この中、前者①は立体的形体(負のすくい角)を有する切れ刃であり、ダイヤモンドホイールの砥粒切れ刃を想定している。すなわち、無機材料の機械加工には、切れ刃との干渉深さ(切り込み)の小さい研削・研磨などの砥粒加工が用いられているのが一般であり、その砥材はダイヤモンドが主体となる。しかし、ダイヤモンド砥粒は単結晶とはいえ、その切れ刃形態は多様である。そこでここでは、種々の曲率を有する先端球状円すいダイヤモンド圧子に加えて、角すいダイヤモンド圧子と単粒ダイヤモンドなどを用いた。これらダイヤモンド圧子は真空高周波ろう付けにより、また単粒ダイヤモンドは電着によりシャンクの先端に固定している。一方、後者②は、切削方向に直交するすくい面とノーズ半径を有する単結晶ダイヤモンド切れ刃、いわゆるダイヤモンドバイトである。図 1 にはこれらの切れ刃の外観を、また表 2 には、そのおもな仕様を一覧している。

Table 2 Shape of cutting edges and their specifications

Diamond	Specifications of cutting edges
Circular cone indenter	Conical angle: 90° , Set-up angle: 90° Spherical tip radius 5, 10, 25, 100 μm
Pyramid indenter	Apex angle: 74° Set-up angle: 90°
Grain	Oblong shape grain, Set-up angle: 90° (Long diameter 1mm $\times$ Short diameter 0.5mm)
Cutting tool	Nose radius: 370 μm , Included angle: 78° , Corner radius of cutting edge: less than 80nm, Rake angle: 90°

Fig. 1 Appearance of cutting edges

Fig. 2 Shape of cutting edges and their action on chip formation (BK-7)

3. 実験結果とその考察

3・1 立体切れ刃による引っかかり ここでは、先端球状ダイヤモンド円すい圧子の曲率半径を変化させることで、粒度粒度の違いに対応させ、それに四角すいダイヤモンド圧子、単粒ダイヤモンドを加えて、引っかかり作用下での立体切れ刃形状による切りくず生成作用を観察した。

3・1・1 切りくず 本実験において、ガラスの切りくず生成を支配する主要な因子の一つとして取上げたのが、引っかかり荷重(切込み量に対応している)である。そこでまず、他の条件を固定してこの荷重を漸増させると、以下のような引っかかり作用の推移をたどることが予想どおり認められた；

①弾性滑り接触→②掘り起こし→③切れ刃背後部から粉状切りくずの排出→④破断片・むしれ形切りくず(多くの場合、側面より排出)→⑤流れ形切りくず→⑥母材の破壊

この挙動は、金属摩耗粉の生成とよく類似している⁽⁴⁾。図2は先端球状円すい切れ刃を例に取上げ、この切りくず生成パターンを引っかかり荷重について整理したものである。これら各パターン間の遷移荷重は、当然切れ刃の形体、引っかかり荷重、ガラス材質などによって大きく左右される。脆性材料を機械加工する立場からすれば、流れ形切りくず生成領域⑤が望ましいはずであり、この延性形切削への遷移荷重のできるだけ小さく、かつ⑥への遷移荷重のできるだけ大きい切れ刃形体を探ることが重要である。以下に、この観点から実験結果を考察する。

ガラスの機械的材料特性が、切りくず形成に極めて大きく影響するのは当然である。一般的には、硬度の柔らかいほど切りくずが生成しやすいと予想される

Fig. 3 Chip formation by circular cone indenter

が、本実験ではBK 7(Hv 582)がSF 6(Hv 353)に比べ、流れ形切りくずの生成がはるかに容易であるという逆の結果となった。また、切れ刃の材料への貫入のしやすさから判断すると、直感的にも先端曲率の鋭利な切れ刃が切りくず生成にとって好ましいはずであるが、現実には、むしろやや大きな先端曲率(図2では25 μm)辺りで流れ形の切りくず生成領域が広がっている。もちろん、曲率半径が100 μm のような大きな場合には、切りくずの生成はここでは全く見られない。本研究における光学的な目視観察の範囲では、立体切れ刃の場合、切れ刃前面で連続したガラスの延性形切りくずの生じるケースが極めてまれで、切りくずはむしろ切れ刃側面から排出される傾向が強い(図3)。これは、先端球状の切れ刃ではすくいが曲面で、かつ側方に傾いており、実質的に大きな負のすくい角となっていることに原因するものと想像できる。切り込み比(切り込み深さ/球状先端の曲率半径)もたかだか10%以下であり(図4)、それを越えると母材表面で

大きな脆性破壊を誘起する。表面的に脆性破壊を伴わない最大切込み深さが $1\mu\text{m}$ を越えることはまれで、一方、延性形切りくず生成を可能とする切れ刃の干渉深さの絶対値は、 $\text{sub-}\mu\text{m}$ のオーダーである。

角すいダイヤモンド圧子では、円すい球状圧子に比べた場合、予想に反し、延性形切りくずを生成しにくい結果となった(図2)。さらに、角すい面(Facet)をすくい面とした場合の方が、稜をすくい方向に選んだ場合よりも延性形切りくずの生成が必ずしも容易とはいえず、むしろ常識的予想とは逆の実験結果となった。これは本実験で用いた角すい圧子の先端が理想的に鋭利な角すい形状となっておらず、微少な先端が球状となっていたことによるためと考えている。

同様に、単粒ダイヤモンドとその曲率半径に相当する先端球状円すい圧子を比べた場合、前者のほうが延性形切削への遷移荷重の小さいという結果が得られたばかりではなく、少なくとも本実験に試供した立体切れ刃形体の中では、この単粒ダイヤモンドが延性形切りくず生成に十分適したものであった。このことから、切りくず生成にとってそのマクロな切れ刃形体もさることながら、切れ刃の微細な表面性状、あるいは材料と切れ刃間の親和性(接触面での摩擦の効果と予想する)が重要な影響因子となり得ることを示さして

いるものとする。

3・1・2 クラック 各種形体の切れ刃によるガラス面の引っかきでは、切りくず生成とは別に、刃先との干渉部およびその近傍においてクラックを誘起することが多い。この際、表面に現れるほどの大破壊は加工面としては論外で、表面からは観察できない、加工面の内部に発生した微小な潜在クラックがいわゆる製品の信頼性を損なう重大な加工損傷として、おもに硬脆材料の機械加工において問題となり、延性形切削加工を必要とする論拠となってきたことは先に述べたとおりである。立体切れ刃によるガラスの引っかきにおいて形成されるこの内部クラックには、いくつかの典型的な形態が存在する。本実験で観察された先端球状圧子によるこのクラックの形態を整理、分類したのが図5である。同図より各種曲率の球状圧子による引っかきで生じるクラックが、剛体球の押し込みにより誘起されるクラック形態とよく対応することがわかる。先端球状円すい圧子の曲率半径および引っかき荷重と切りくず生成パターンとの関係を示した図2に、ここで誘起されたこのクラック形態の分布を併せて表示してある。同図より、先端球状円すい圧子の引っかきによるクラック形態は、引っかき荷重によって変化しているのがわかる。クラック発生開始荷重は、曲率半径によって変動するが、最初に現れるのがメジアンクラックであり、先端曲率半径の小さい圧子では、わずかに $0.1\sim 0.2\text{N}$ で発生する。そして、その後ラテラルクラックと思しきクラックが現れ、その後、ラテラルクラックとメジアンクラックが重畳する傾向を示す。大きな曲率半径($100\mu\text{m}$)の先端球状円すい圧子では、かなりの部分で弾性接触状態となり、 1N を越える荷重に至った辺りで、ヘルツクラックと思しきクラック(弾性破壊)が現れる。この現象は、ガラスへの剛体球の押し込みにおけるヘルツクラックの解析結果とよく符合する⁽⁵⁾。なお、上記した内部クラックの特性はガ

Fig. 4 Scratch load and depth of cut (Scratch tests of SF 6 by diamond circular cone indenter)

Fig. 5 Classification of cracks induced by circular cone indenters

3・2・1 切りくず 図7には、すくい面付近における延性形切りくずの生成状況を示した一例である。

切りくずの発生状況を、引っかかり荷重とガラス材質に関して一覧したのが、図8である。同図からも明らかとなり、延性形切りくず生成にはガラスの種類（機械的材料特性）が大きくかかわっているのは当然で

Fig. 7 Formation of a flow-type chip

[illegible]

Fig. 8 Scratch load and action of chip formation (Diamond cutting tool)

あり、定性的には立体切れ刃の場合と同様、硬度の小さいほど延性形切りくずの生成は容易になっている。

なお、この切りくず生成状況は、実験の継続に伴う刃先の摩耗によって、かなり大きな影響を受けることが本実験の途上で確認された。このことは、ガラスの切りくず生成にとって、刃先縁曲率が大きな支配因子となっていることを示しているものと考えられる。例えば、引っかかり距離に対する切りくず生成挙動の変化を追跡すると、引っかかり距離が増えるに伴い、延性形切りくずの最も生成しやすい時期が現れ、その後再びその性能は低下する。このように延性形切りくずの生成挙動が経時変化するのは、刃先の摩耗、とりわけ切れ刃縁の曲率半径が変化することに負うものと思われる。ただし、刃先の摩耗状態は実験の前後にSEMにより観察されているが、定量的な摩耗の評価はここでは行っていない。

(a) A flow-type chip

(b) Backside of a chip (c) Outside of a chip

(d) Cross section of a chip

Fig. 9 Image of a flow-type chip (SF 6)

3・2・2 延性形切りくずの生成メカニズム 図9に示すようなダイヤモンドバイトによるガラスの延性形切りくず生成は、明らかにそのすくい面で形成されており、Puttickの提唱するDelamination機構ではない、いわゆる一般的な材料のせん断降伏破壊メカニズムに基づく切削現象と判定される。もしこのような現象をガラスの延性形切削とするならば、ある観察事例についていえば、その切削比の測定値 $\gamma_c=0.5$ より、せん断角 $\phi=30^\circ$ 程度と予想される。一方、切りくずをより詳細に観察すると(図9)、この切りくずの表面と裏面とでは、その性状が大きく異なることがわかる。すなわち、その表層では周期的な破壊が生じているのに対し、裏面は極めて平滑である。一方、この切りくずの横断面[図9(d)]は、典型的な鋸歯状切りくずであることを示していることから、ガラスの延性形切りくず生成機構は、せん断降伏というよりもむしろ脆性破壊形と考えるのが妥当のように見える。少なくとも本実験条件下では、Schinkerが示さしたとされる⁽⁶⁾ラメラ構造は観察できなかった。このようにラメラ構造の切りくずは、もっと微細な切り込み条件下

Fig. 10 Flow-type chip and scratch groove face (SF 6)

Fig. 11 Scratch load and depth of cut by diamond cutting tool (SF 6)

で生じ得ることが、可能性としては考えられる。

図 10 では、延性形切りくずが形成されたときの条痕面を観察できる。ガラスの流動の跡と思しき細かい擦過痕跡を示しており、ときには鋸歯状切りくずの凹凸ピッチに対応するマークが現れることもある。また、条痕の横断面形状も、バイトのノーズ半径を工作物面に転写していることがわかる(図 11)。ただし、この材料流動が果たして力学的塑性降伏なのか熱流動なのか現段階では不明である。3・2・1 項でも触れたように、延性形切りくず形成にとって実質切り込み深さの限界が $1\mu\text{m}$ 前後であること、あるいは最適な刃先縁曲率半径の存在することなどから、刃先接触近傍の応力特性によって、クラック発生と切りくずの生成が独立に現れているものと予想している。

4. 結 論

本研究では切れ刃の形体に着目し、この形体が延性形切りくず生成に及ぼす影響についてダイヤモンドバイトをはじめ、各種形体のダイヤモンド切れ刃による引っかかり実験(引っかかり速度: 10 mm/min)により検討し、延性形切りくず生成の挙動とそのメカニズムについても言及した。ここで得られた結論を要約すると、以下のとおりである。

(1) 切れ刃の形体は、ガラスの切りくず生成に大きな効果を有する。特に、面切れ刃は連続した延性形切りくずを容易に生成できるが、立体切れ刃の場合このタイプの切りくず生成可能領域は面切れ刃に比べ比較的狭い条件内に限られている。

(2) ガラスの延性形切りくず生成には、ガラスの硬度、引っかかり荷重(切り込み深さ)および刃先縁曲率半径や刃先の表面性状などが主たる影響因子となる。

(3) 本実験条件下においては、延性形切りくず生成のための切り込み限界深さは $1\mu\text{m}$ 程度以下である。

(4) ガラスの延性形切りくずは、鋸歯状切りくずである。

(5) 立体切れ刃によるガラス引っかかりにより生じる内部クラックの形態は、剛体球による静的押し込み時のクラック生成モデルによって、定性的に理解できる。

(6) クラックの発生と延性形切りくずの生成はそれぞれ異なるメカニズムによるものであり、両者の直接的なかわりではなく、それぞれ独立に挙動するものと考えられる。したがって、延性形切りくず生成は必ずしもクラックフリー切削を意味しない。

最後に本研究に対しご支援を賜った三菱重工業株式会社技術本部後藤崇之氏に心より御礼を申し上げる。

文 献

- (1) Puttick, K. E. and Franks, A., The Physics of Ductile-brittle Machining Transitions, Single-point Theory and Experiment, 精密工学会誌, **56**-5(1990), 788-792.
- (2) Bushby, A. J. and Swain, M. V., (Bradt, R., Brooks, C. and Routbort, J. 編), *Spherical Indentation as a Means for Investigating the Plastic Deformation of Ceramics, Plastic Deformation of Ceramics*, (1994), Plenum Publishing Co.
- (3) 柴田順二・ほか 3 名, Sub- μm オーダの押し込み試験による脆性材料の変形挙動の観察, 機論, **60**-569, C(1994), 308-313.
- (4) 橋内浩之・ほか 3 名, SME・トライボシステムによる摩耗の微視機構の研究, 機論, **57**-535, C(1991), 965-972.
- (5) Fujita, S. and Shibata, J., Behavior of Various Cracks Caused in the Machining of Glass with a Diamond Cone, *Int. J. JSPE*, **27**-2(1993), 138-139.
- (6) 橋本洋, 光学部品の精密加工技術とその動向, 日本機械学会誌, **91**-840(1988), 1180-1187.