硬ぜい材料の高温切削に関する研究*

永田 典雄** 森田 昇*** 吉田 嘉太郎***

Study on Hot Machining of Brittle Materials

Norio NAGATA, Noboru MORITA and Yoshitaro YOSHIDA

This paper describes the mechanism of brittle-ductile transition of monocrystal silicon at a high temperature and its feasibility for ductile mode cutting. The micro-cutting tests were carried out at various temperatures, and for various cutting speeds and depth of cut by using a newly developed cutting device. The critical depth of cut is closely related to the material temperature and cutting speed. When the material temperature is 973K at a cutting speed of 1mm/s, the critical depth of cut is about two times that at room temperature. The critical depth of cut decreases with increasing in cutting speed. The specific cutting force is nearly constant at various temperatures. The residual stress on the ductile-mode cutting surface is compressive about 200MPa.

Key words brittle-ductile transition, high temperature, crack generation, critical depth of cut, cutting speed, residual stress

1 緒 言

ガラス、半導体およびセラミックスなどの硬ぜい材料を加工する場合、常温での塑性変形能が著しく低いことに起因してクラックやチッピングが発生しやすい。このため硬ぜい材料の加工には加工単位の小さい研削、研磨などの砥粒加工が常用されているが、加工能率の向上や複雑形状加工への期待から、切削加工の適用が望まれる。また切削加工は、工具刃先の制御性に優れるため、加工精度の管理が比較的容易という利点を持つ。

硬ぜい材料に対して切削加工を適用した場合、材料のもろさに起因してぜい性破壊を主体とした加工が進行し、良好な加工面品位を得ることは容易ではない。しかし加工条件によっては、切削形態がぜい性破壊型から塑性流動型へと変化する(ぜい性 延性遷移: Brittle to Ductile Transition: BDT)ことが知られている^{1)~5)}。このぜい性 延性遷移現象は、材料温度が上昇するとともに生じやすくなると報告されている^{6)~8)}。この現象を積極的に利用した高温下での切削加工(以下、高温切削と呼ぶ)は、硬ぜい材料に対する、いわゆる延性モード加工技術として実現が期待される。

本論文では、硬ぜい材料の高温切削における加工現象の基礎的理解を目的とし、試作した高温切削装置による単結晶シリコンの加工実験を行い、被削材温度などの加工条件と切削形態の関連、切削力変動などの切削現象と加工面性状の相関について検討した。

2 実験装置および方法

図1は、試作した高温切削装置本体の外観図である。装置は、被削材加熱部、切削加工部、切削力測定部、切削痕観察部から構成されている。被削材加熱部は電気加熱炉、デジタルプログラム

温調器、レギュレータからなる。被削材の加熱手段としてはプラズマ加熱、高周波加熱およびレーザ加熱なども有効で、ごく短時間に局所領域を高温にすることができるという利点がある。しかし、これらの局所加熱手法では切削領域の温度測定と厳密な温度制御が容易ではなく、切削の基礎現象を扱うには不向きである。そこで本装置では温度制御が比較的容易である電気炉加熱を採用している。

図2は、アルミナセラミックス製電気加熱炉の構造図である。炉の中心に被削材固定用ホルダがあり、それを取り囲むように発熱体が設置されている。被削材はホルダに固定され、電気加熱炉内で目標温度まで加熱される。加熱温度範囲は常温から850℃である。被削材温度はホルダに取り付けられた白金 白金ロジウム熱電対で測定され、温調器のPID制御により目標値に対して±1℃の範囲で設定される。

加熱後、炉を切削方向(図中、X方向)に移動することにより、固定された工具で切削を行う。切削方式には、切削方向に対して被削材を傾斜させることで切込み深さが連続的に増加する、切込み漸増切削を採用している。切削時には、水晶圧電式3成分力センサ(Kistler社製:9117A)を用い、主分力(図中、X方向)と背分力(図中、Z方向)を測定した。

被削材には単結晶シリコンを用い、切削面はポリシング加工(Raで約5nm)が施された(100)面、切削方向は<110>方向とした。工具には単結晶ダイヤモンドバイト(刃先半径:0.4mm, すくい角:-20°)を用いた。装置の機構上、工具の加熱は困難であり行わなかった。すべての実験を通じて同一の工具を用いたが、顕微鏡観察の範囲では工具摩耗は認められなかった。切削条件は切削速度0.5~10mm/s, 被削材温度24~700℃である。各条件において3~5回の実験を行い、実切込み深さと切削力の測定値を平均し代表値とした。表1は、切削条件をまとめたものである。

切削痕の微細表面形状の3次元測定は、走査型レーザ顕微鏡

* 原稿受付 平成10年5月18日

** 学生会員 千葉大学大学院(千葉市稲毛区弥生町1-33)

*** 正会員 千葉大学工学部

Fig.1 High temperature machining system

Fig.2 Electric furnace

Table 1 Conditions for the cutting experiment

Workpiece	Single-crystal silicon : (100)
Tool	Single-crystal diamond tool (Rake angle : -20° , Clearance angle : 5° , Crystallographic orientation of rake face : (110), Edge direction : $\langle 100 \rangle$, Corner radius : 0.4mm)
Temperature	24, 300, 500, 600, 650, 700°C
Cutting speed	0.5, 1, 2, 5, 10mm/s

(レーザーテック社製:1LM21)で行った。また、切削痕の残留応力測定には顕微レーザーラマン分光法⁹⁾を用いた。これらの測定は、ともに常温で行った。

3. 加工条件に対する切削形態の変化

3.1 切削形態の被削材温度依存性

まず被削材温度の変化が、切削形態に与える影響について検討した。切削痕は、光学顕微鏡によりチップングの発生状況を確認することで、以下の3領域に分類した。

- ※ i) 延性加工領域；チップングが発生しない領域
- ※ ii) 遷移領域；チップングが所々に発生する領域
- ※ iii) ぜい性破壊領域；加工面全体がチップングで覆われる領域

図3は、24℃から700℃までの各被削材温度における代表的な切削痕の光学顕微鏡像である。切削速度は2mm/sである。図中の黒点は、切削開始点を示している。被削材温度によらず、切削痕

Fig.3 Typical cutting grooves generated at various temperatures (Cutting speed : 2mm/s)

Fig.4 Illustration of cutting groove

は切込み深さの増加(図中、右方向)にともなって、延性加工領域から遷移領域を経て、ぜい性破壊領域へと遷移する。しかし、被削材温度によって、その遷移過程が異なる。とくに、被削材温度600℃以上では、延性加工領域が長くなり遷移領域も切込み増加方向へ移動する。これは、単結晶シリコンが高温において延性的な破壊挙動を呈しやすいこと示している。すなわち、被削材の温度上昇により延性モード切削加工が促進されることを表している。

図4は、切削痕の中心線に沿った断面の模式図である。加工が進行すると切込み深さは徐々に増加し、ある切込み深さに達する

Fig.5 Relationship between temperature and critical depth of cut

とチッピングが発生し始め、ぜい性破壊領域から急激に切込み深さが増加する。ここで、延性加工領域と遷移領域の境界部付近をぜい性・延性遷移部（BDT部）と定義し、この部分における切込み深さを、臨界切込み深さ（Critical depth of cut: dc ）とする。図3のように、被削材温度の変化によってBDT部が切込み増加方向に移動することから、臨界切込み深さが被削材温度により変化することが予想される。

図5は、臨界切込み深さの被削材温度依存性である。切削速度によらず、被削材の温度上昇とともに dc は増加し、700℃における dc は24℃におけるその約2倍となる。これは、温度上昇により単結晶シリコンの塑性変形能が向上したことを意味している。単結晶シリコンの塑性変形が転位の移動に基づくこと^{6)~8)}から、転位移動が熱的に活性化され塑性変形能が向上した結果、臨界切込み深さが増加したと解釈できる。

3.2 切削形態の切削速度依存性

次に、切削速度の変化が切削痕形態に与える影響について検討した。図6と図7は、それぞれ被削材温度24℃と700℃の場合の各切削速度における代表的な切削痕の光学顕微鏡像である。両被削材温度において、切削速度変化による顕著な切削形態の変化、遷移過程の差異は確認されない。

図8は、臨界切込み深さの切削速度依存性である。被削材温度が24℃と300℃の場合には、切削速度の増加とともに dc は若干の減少傾向を示す。一方、被削材温度600℃、700℃においては切削速度2mm/sまでは dc はほぼ一定で、それ以降の切削速度に対して減少する傾向を示した。本来 dc は、切削速度に対して負の依存性を持つことが期待される⁷⁾。図中で切削速度の増加とともに dc が減少するのは、加工領域のひずみ速度が所定温度における転位の移動速度より大きくなり、塑性変形能が臨界点に達してぜい性破壊を起こしやすくなるためと推測される。一方、図中2mm/s以下の切削速度では工具と被削材との接触時間が比較的に長いため、切削点付近の被削材温度が設定値より大きく下回り、この結果 dc が減少して、ほぼ一定値になったものと解釈できる。

以上の結果から本実験条件の範囲では、単結晶シリコンの切削形態および臨界切込み深さは、被削材温度と切削速度に依存することがわかった。

4. 切削条件と切削力の関係

4.1 切削形態と切削力変動の対応

ぜい性・延性遷移をとる被削材の変形破壊挙動は、切削力変動波形に反映することが期待される。ここでは、切削痕と切削力変動波形を対応させ、切削形態と切削力変動の関係について検討

Fig.6 Typical cutting grooves generated at various cutting speed (Temperature: 24°C)

Fig.7 Typical cutting grooves generated at various cutting speed (Temperature: 700°C)

Fig.8 Relationship between cutting speed and critical depth of cut

した。図9と図10はそれぞれ、被削材温度24℃と700℃における切削痕とそれに対応した各切削分力（主分力: F_h 、背分力: F_v で表す）の変動波形である。切削速度は1mm/sである。切削力は、被削材温度によらず主分力、背分力ともにBDT部までは切込み深さの増加に対応して、ほぼ単調に増加する。一方BDT部以降では、

Fig.9 Cutting groove and waveforms at cutting speed of 1mm/s and at a temperature of 24°C

Fig.10 Cutting groove and waveforms at cutting speed of 1mm/s and at a temperature of 700°C

被削材の不安定な変形破壊挙動を反映して、波形が大きく乱れる。また延性加工領域では、主分力より背分力の方が常に大きくなっている。

以上から、延性モード切削を可能にする上限の切削分力が存在することがわかる。ここでは、BDT部における各切削分力をそれぞれ、臨界主分力 F_{hc} 、臨界背分力 F_{vc} とする。

4.2 臨界切削力およびBDT部での比切削分力

図11は、切削速度1mm/sにおける臨界切削力の被削材温度依存性である。 F_{hc} 、 F_{vc} ともに、被削材温度上昇にともない増加する。これは図5で示したように、被削材温度上昇により臨界切込み深さが大きくなるためである。

図12は、切削速度1mm/sの場合のBDT部における比切削分力の被削材温度依存性である。比切削分力は、臨界切込み深さと工具の幾何学的関係から得られる切削断面積と臨界切削力の関係から求めた。主分力および背分力の比切削分力は被削材温度によらずほぼ一定となった。この傾向は、他の切削速度においてもほぼ同様であった。このことは、温度上昇により単結晶シリコンの塑性変形能が向上するだけで、延性切削のメカニズム自体が温度に依存しないことを示唆している。

5. 切削痕の残留応力評価

被削材への切込み深さと加工面性状との相関を検討するために、顕微レーザーラマン分光法による切削痕の残留応力評価を行った。顕微レーザーラマン分光法ではレーザー光を試料に照射し、その散乱

Fig.11 Relationship between temperature and critical horizontal force: F_{hc} , critical vertical force: F_{vc}

Fig.12 Relationship between temperature and specific cutting force

光のスペクトルを解析することにより応力状態を評価することができる⁹⁾。今回は、被削材に用いた単結晶シリコンのポリシング面を基準とし、切削痕の残留応力を相対測定した。1測定点につき数回測定し、その平均値を代表値として、引張応力を正、圧縮応力を負として表した。

測定は、図10に示した被削材温度700°C、切削速度1mm/sの条件での切削痕の延性加工領域について行った。図13は、切削痕中心線に沿った方向の残留応力分布である。測定は、切込み開始点付近を測定開始点の原点として、切削方向に60 μm (臨界切込み深さ付近)、それと直角方向に40 μmの範囲で、10 μm間隔で格子状に行った。図より切削痕には、圧縮応力が残留していることがわかる。加工の進行、すなわち切込み深さの増加に伴って残留応力は大きくなり、-200MPa程度で収束する。また、ポリシング面にも小さい圧縮応力が残留しており、切削痕に近づくにつれ大きくなる。これは、工具の上滑り現象に起因していると考えられる。

図14は、切削開始点から60 μmの位置における切削方向に垂直方向の残留応力分布である。測定位置の原点は切削痕中心線上の点であり、図13の60 μmの位置に対応している。測定間隔は10 μmである。切削痕には150 ~ 200MPaの圧縮応力が残留しており、ポリシング面に至るとその大きさは急激に減少する。これらの結果から、延性加工領域には全体的に圧縮応力が残留していることがわかった。また、切削速度1mm/s、被削材温度24°Cの条件における切削痕の延性加工領域についても同様の測定を行った結果、延性加工領域には全体的に700°Cより大きい圧縮応力が

Fig.13 Residual stress distribution of cutting direction

Fig.14 Residual stress distribution of vertical direction to cutting direction

残留していることがわかった。

6. 結 言

硬ぜい材料の高温切削における切削現象の基礎的理解を目的として、試作した高温切削装置による単結晶シリコンの加工実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 切削形態は被削材温度と切削速度に依存し、とくに被削材温度が高くなるほど延性的な形態となる。この場合、臨界切込み深さは被削材温度に対して正の依存性をもつ。
- (2) ぜい性・延性遷移部における比切削分力は、被削材温度によらずほぼ一定である。
- (3) 延性加工領域には圧縮応力が残留しており、その大きさは切込み深さの増加とともに大きくなる。700℃における臨界切込み部分での圧縮応力は200MPa程度であった。

参 考 文 献

- 1) 島田尚一：脆性材料の機械加工における材料除去機構の制御、機械の研究, 49, 7 (1997) 15.

- 2) 杉田忠彰：セラミックスの機械加工, 養賢堂, (1985) 107.
- 3) セラミックス加工研究会：ファインセラミックスの精密加工, 工業調査会, (1990) 113.
- 4) 柴田隆行, 藤井章弘, 牧野英司, 池田正幸：超精密切削機構の原子論的アプローチ—すべり変形の制御—, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996) 741.
- 5) 関紀旺, 鈴木浩文, 厨川常元, 庄司克雄：単結晶Siのダイヤモンド切削に関する研究(第1報, 工具すくい角の影響), 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997) 166.
- 6) 前田康二, 藤田 忍, 西岡博之, 成田武憲：共有結合性結晶の脆性延性遷移, 日本金属学会会報, 29, 12 (1990) 999.
- 7) 吳東権, 森田 昇, 吉田嘉太郎：単結晶シリコンの研削加工に関する研究(第2報, 脆性-延性遷移における材料温度及び荷重負荷速度の影響), 日本機械学会論文集C, 58, 55 (1992) 3398.
- 8) 森田 昇, 吉田嘉太郎, 小林英治, 永田典雄：高温における単結晶シリコンの脆性-延性遷移と切削加工への応用, 日本機械学会論文集C, 64, 621 (1998) 1854.
- 9) 小林博文, 森田 昇, 吉田嘉太郎：顕微レーザーラマン分光法を用いた単結晶シリコンの残留応力評価, 砥粒加工学会誌, 38, 4 (1994) 205.

編 集 後 記

平成10年も年末を迎え、依然先の見えない景気の低迷が続いております。特に、製造分野でもこの影響は例外ではありません。このような厳しい状況の中、製造業の主幹をなす精密加工技術は、その技術を維持し、さまざまな技術的難関を乗り越えるような新しい加工技術を採用し、これに活路を見いださなければなりません。

製品の製造は、設計に始まり多くの加工工程を経て最終の仕上工程で完成します。生産性の向上、コストの軽減等は、一連の工程の中で短縮化、削減によって成就します。通常ひとつの加工技術でできる加工範囲は経験的にも制限されるので、常に新しい加工技術の導入が必要不可欠であります。

本特集では、そんな中で比較的広い範囲での応用が可能な放電加工を取り上げ、最近分かってきた新しい応用例とその可能性について執筆していただきました。例えば、電極材料の加工物への付着現象を逆に利用した表面の改質、着色仕上げや微細加工、さらに絶縁セラミックス、単結晶シリコン材質における放電加工、加工液を用いない気中放電加工、そして金型にみる実機のシステム化についてであります。

特に、放電加工による金型加工では、その仕上精度においても最近では研削加工と変わらない表面品位が可能となっており、研削加工か放電加工かという議論は技術の進歩とともにしばらく続く

のではないのでしょうか。材質についても従来では考えられなかったような導電性セラミックスの加工も現実のものとなっております。このように他の加工法に比べ、比較的新しい技術である放電加工は、発展途上にある技術と言え、近い将来、広く産業分野での応用が期待されます。読者の皆様方には、本特集が参考になれば幸いです。

最後にお忙しい中、本特集の趣旨をご理解いただき、ご寄稿下さいました著者各位に心より厚くお礼を申し上げます。(市川茂樹)

マルチメディアプロジェクト (ELP-7300) の寄贈について

この度、(株)セイコーエプソン殿から1998年度精密工学会技術賞*を受賞した「マルチメディアプロジェクト (ELP-7300)」1台を精密工学会へ寄贈していただきました。

パソコンとケーブルで接続して、パソコンデータをそのまま投影できる非常に明るいプロジェクトで、学会活動に有効に活用できるものです。第248回講習会で早速使わせていただきました。

(株)セイコーエプソン殿に厚く御礼申し上げます。

なお、講演会等にてご使用になりたい場合には学会事務局までご連絡下さい。

*本号目次後を参照下さい。