



硬ぜい材料のマイクロ切削における塑性変形型 材料除去の可能性*

杉田 忠 彰** 上田 完 次** 遠藤 勝 義**

Key words: microcutting, high speed cutting, brittle material, ceramics, material removal mechanism, plastic deformation

1. 緒 言

セラミックス等の硬ぜい材料の切削に関しては、これまでき裂伝播に基づく材料除去を中心に研究が行われてきた。しかし、き裂伝播型材料除去の場合、表面にき裂を残留し、良好な仕上面は得にくい。また、表面のき裂残留は強度にも悪影響を及ぼす。

そこで、本研究の目的は、セラミックスのような硬ぜい材料の切削において、塑性変形に基づく材料除去を生じさせ、良好な仕上面を得ることである。すなわち、高切削速度によって工作物の温度を上昇させ降伏応力の低下と破壊じん性値の上昇を図り、微小切込みによってき裂伝播を防ぐ、高速マイクロ切削を行う。

2. 塑性変形に基づく材料除去の可能性

セラミックスのような硬ぜい材料の切削において、連続型切りくずを生成する塑性変形型材料除去が起こる切削条件について考えてみる。

硬ぜい材料の切削に関する概念的アルゴリズムを図1に示す。まず、工作物、切削条件を入力として応力解析を行い、応力拡大係数 K と相当応力 σ_E を求める。同時に温度解析を行い、破壊じん性値 K_c と降伏応力 σ_Y の温度特性を考慮する。そして、 K と K_c 、 σ_E と σ_Y の大小関係から、図1のように不安定き裂伝播と塑性変形の二つの材料除去形態に分かれる。ここでは、塑性変形型を目的とするため、以下の二つの条件を満たさなければならない。

$$K < K_c(T) \quad (1)$$

$$\sigma_E \geq \sigma_Y(T) \quad (2)$$

ここに、 $K_c(T)$ 、 $\sigma_Y(T)$ は温度 T の関数であること

を示す。

このように、 K_c と σ_Y の温度特性を考慮し、工作物の温度上昇を促す高切削速度と、き裂伝播防止のための微小切込みという条件を満たす、いわゆる高速マイクロ切削を実現すれば、塑性変形型材料除去の可能性はある。

3. 弾性すべり接触モデルによる考察

高速マイクロ切削において、き裂が伝播せず、塑性変形が起こる切削条件を求める。そのために、図2のような円すい圧子と工作物の弾性すべり接触モデルで考察する。つまり、切込みと切削速度をパラメータに、それぞれ応力と温度分布を求め、塑性変形型材料除去が生じる臨界切削条件を図1のアルゴリズムに従って求める。具体的な計算は、圧子にダイヤモンド、

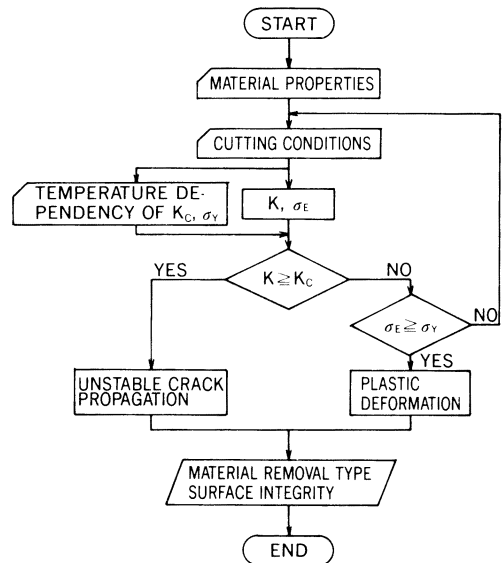


Fig. 1 Conceptual algorithm for material removal mechanism in brittle materials

* 原稿受付 昭和60年6月22日。昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和59年10月1日)にて発表

** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

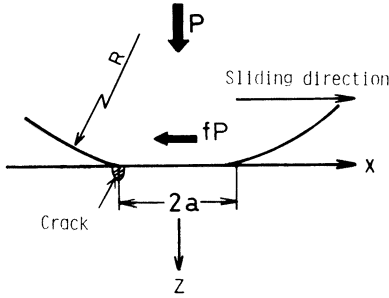


Fig. 2 Model of elastic sliding contact

工作物にガラスを選んで行った。

3.1 応力解析

図2に示すように、先端半径 R の円すい圧子が工作物に垂直荷重 P で弾性接触し、接線方向に摩擦力 fP (f は摩擦係数) を受けながらすべる。このとき、切削における切込みは圧子と工作物の近接量 d とし、 d が変化したときの応力分布の変化に注目する。接触円半径 a と近接量 d は、Hertzの接触理論から次式で示される。

$$a = (KPR)^{1/3} \tag{3}$$

$$d = \left(\frac{K^2 P^2}{R} \right)^{1/3} \tag{4}$$

ここに、 K は弾性定数である。

応力分布は、Hamiltonらの解析方法²⁾を用いて計算した。応力は $P_0 = 3P/2\pi a^2$ 、長さは a で無次元化した。そして、摩擦係数 f は、後に述べる実験結果を踏まえて0.4とした。図3には、き裂伝播について考察するために最大主応力 σ_1 の分布と最小主応力 σ_2 の方向を計算した結果を示す。図4には、塑性変形の臨界条件を求めるために相当応力分布を示す。特に、 σ_1 と σ_E の最大値が、どちらも接触後縁に発生することは重要である。なお、ここではガラスをモデルとしているため、ほとんど問題ないが、単結晶、多結晶材料を取り扱う場合、厳密には結晶の異方性、粒界の影響なども考慮した解析が必要である。

3.2 温度解析

K_c と σ_Y の温度依存性を考慮するため、切削速度すなわちすべり速度 v をパラメータに、Jaegerの移動熱源理論³⁾を用いて工作物内の温度分布を求めた。このとき、熱源 q は、弾性すべり接触モデルの接触面摩擦仕事とした。

$$q = \frac{fPv}{\pi a^2} \tag{5}$$

図5に $v = 1000$ m/min のときの温度分布を示す。最高温度は、接触円後縁に現れ、その値は v に比例する。

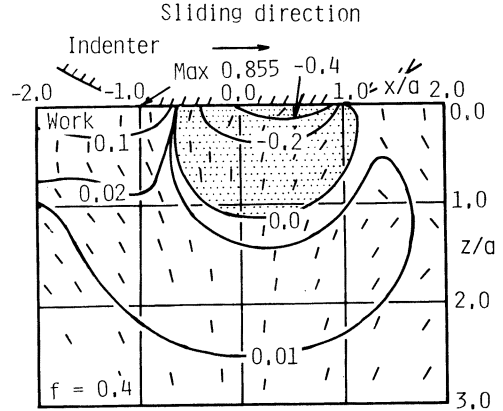


Fig. 3 Distribution of maximum principal stress σ_1 and direction of minimum principal stress σ_2

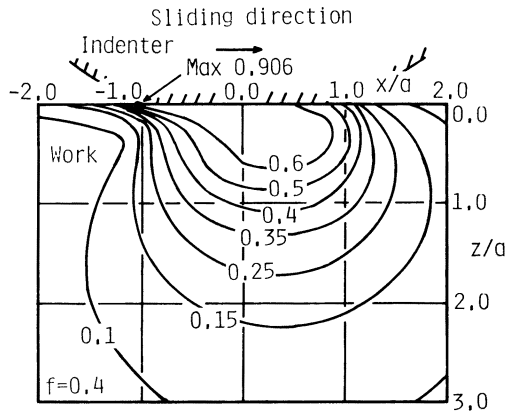


Fig. 4 Distribution of equivalent stress

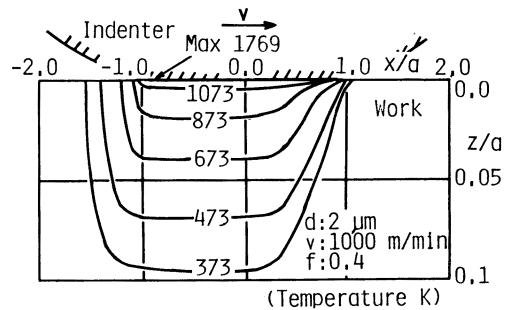


Fig. 5 Distribution of temperature

3.3 塑性変形に基づく材料除去が起こる条件

切削速度 v と切込み d をパラメータに、き裂伝播型、塑性変形型の材料除去が生じる臨界条件を求める。き裂伝播を論じるためには、工作物内にき裂の存在を仮定しなければならない。また、塑性変形を論じるためには、工作物のどこで最初に降伏が生じるかを把握しておかなければならない。3.1節と3.2節の結果から、き裂伝播に関係する σ_1 、塑性変形に関係する σ_E 、

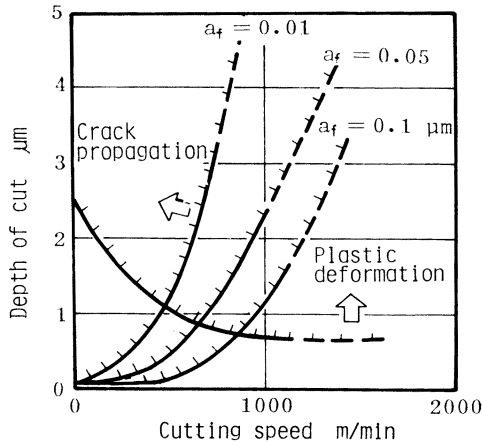


Fig. 6 Dependency of material removal type on cutting speed and depth of cut (analytical results)

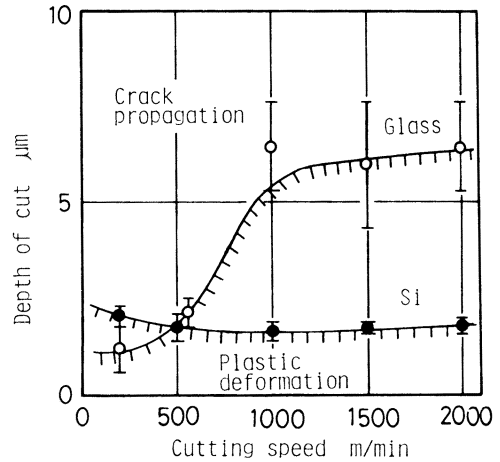


Fig. 7 Dependency of material removal type on cutting speed and depth of cut (experimental results)

また温度も接触円後縁で最大となることがわかる。そこで、接触円後縁での工作物の変形挙動から、き裂伝播型か塑性変形型かを判別する。

まず、き裂伝播型の臨界条件は、接触円後縁に長さ $2c$ 、深さ a_f の半楕円状表面き裂の存在を仮定し、モード I の破壊によって考える。このとき、応力拡大係数は、次式のように示される。

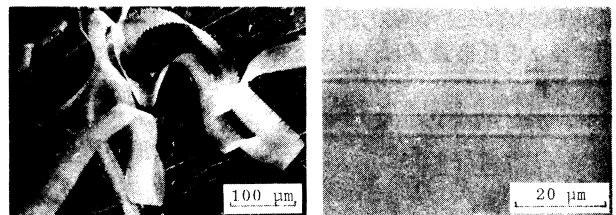
$$K_I = 1.1\sigma_1 \left(\frac{\pi a_f}{Q} \right)^{1/2} \quad (6)$$

ここに、 Q は $k=1-(a_f/c)$ を母数とする第 2 種完全楕円積分である。また、降伏は Mises の条件 $\sigma_E \geq \sigma_Y$ で判定する。そして、ガラスの K_{Ic} と σ_Y の温度依存性を考慮し、き裂伝播、塑性変形が起こる臨界条件を求めた。このとき σ_Y は、塑性変形の有無を知る目安となるビッカース硬度から算出した $(\sigma_Y(T) \approx 1.06HV(T))$ 。

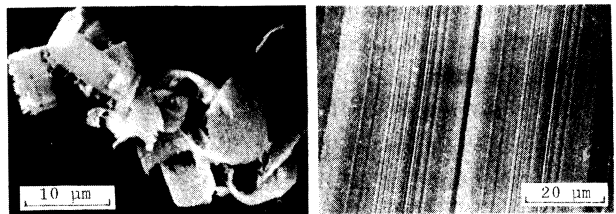
図 6 に、すべり速度すなわち切削速度 v と近接量すなわち切込み d をパラメータにした計算結果を示す。塑性変形型材料除去は、 $v=500$ m/min 付近から現れ、また d が小さい程き裂伝播は起こりにくい。このことにより、ガラスについては、500 m/min 以上の切削速度で $1 \mu\text{m}$ 以下の切込みにすれば、材料の温度上昇による K_{Ic} , σ_Y の変化が生じ、塑性変形に基づく材料除去の可能性が高くなることがわかる。

4. 実験結果および考察

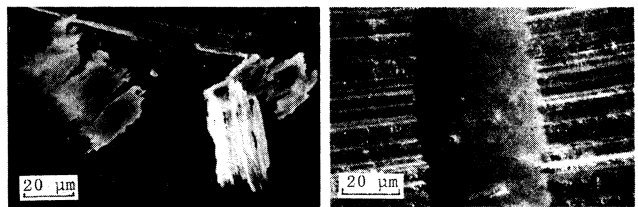
弾性すべり接触モデルで考察した臨界切削条件の妥



(a) $d : 3 \mu\text{m}$ (b) $d : 0.2 \mu\text{m}$
Fig. 8 Chip morphology and machined surface of glass
Cutting speed; 1 000 m/min, Rake angle; 0°



(a) $d : 1.5 \mu\text{m}$ (b) $d : 1.6 \mu\text{m}$
Fig. 9 Chip morphology and machined surface of Si
Cutting speed; 100 m/min, Rake angle; 0°



(a) $d : 6 \mu\text{m}$ (b) $d : 2.5 \mu\text{m}$
Fig. 10 Chip morphology and machined surface of partially stabilized ZrO_2
Cutting speed; 200 m/min, Rake angle; 0°

当性を明らかにするために、予備的実験としてダイヤモンド圧子によるガラスと Si 単結晶の切削を行った。

仕上面にき裂が残留するかどうかで、き裂伝播型か塑性変形型かを判別した。図7に切削速度と切込みをパラメータに実験した結果を示す。ガラスの場合、切削速度 500 m/min 付近から切込みを大きくしてもき裂は残留しない。これは、図6の $a_f = 0.01 \mu\text{m}$ の場合によく一致している。一方、Si の場合速度依存性はほとんどみられない。これは Si の熱伝導率がガラスより大きいことから、この切削速度範囲では K_{Ic} , σ_f の大きな変化が得られなかったからだと考えられる。

以上の結果を踏まえ、 $0.1 \mu\text{m}$ オーダで切込みが制御でき、3500 m/min までの切削速度が得られる、エアベアリング、エアスライドを用いた高速マイクロ切削装置を試作した。そして、刃先ノーズ半径 $100 \mu\text{m}$ 、すくい角 0° のダイヤモンド工具を用い、切削速度 200~400 m/min、切込み $1 \mu\text{m}$ 以下の条件で、ガラス、Si, ZrO_2 を切削した。その切りくずと仕上面の SEM 観察例を図8, 9, 10に示す。いずれもせん断変形によると思われる連続型切りくずが観察され、塑性変形型材料除去が起こっていると考えられる。また、仕上面粗さも $0.1 \mu\text{m}$ 以下であった。しかし、表面下に微小なき裂が残留しているかどうかは、さらに詳細な検討が必要である。

5. 結 言

硬ぜい材料の高速マイクロ切削の基本モデルとして弾性すべり接触モデルを提案し、応力、温度解析を行うことから、切削速度と切込みを中心に材料除去過程

について考察した。その結果、ガラスの場合、切削速度 500 m/min 以上、切込み $1 \mu\text{m}$ 以下で切削を行えば、塑性変形に基づく材料除去が可能であるということが計算から得られた。

そして、円すい圧子による切削を行った結果、ガラスの場合切削速度 500 m/min 以上では切込みを $6 \mu\text{m}$ まで大きくしても、き裂伝播による材料除去ではなく、塑性変形による材料除去が生じる可能性があることがわかった。また、高速マイクロ切削装置でガラス、Si, ZrO_2 を切削したところ、連続型切りくずが生成し、表面粗さ $0.1 \mu\text{m}$ 以下の良好な仕上面が得られた。

最後に、切削装置設計にあたり適切な指針を賜りました大阪大学工学部井川直哉教授に厚く御礼申し上げますとともに、切削装置作製にあたり御協力いただいた株式会社不二越に深く感謝します。また、本研究遂行にあたり御協力をいただいた大学院生岸本昭夫氏に心から感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 橋本知明, 上田完次, 遠藤勝義, 杉田忠彰: セラミックのマイクロ切削に関する研究(第3報)——焼結アルミナの切削中のき裂挙動, 昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1983) 499.
- 2) G. M. Hamilton & L. E. Goodman: The Stress Field Created by a Circular Sliding Contact, J. Appl. Mech., 33, (1966) 371.
- 3) J. C. Jaeger: Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts, Proc. Roy. Soc. New South Wales, 76, (1942) 203.

編 集 後 記

我々が日常生活を営み、また産業活動に従事するにあたって、様々の分野でいわゆる超精密切削加工技術の恩恵を蒙っている。よく知られている例として、古くは家庭用ビデオヘッドの加工に、また比較的最近ではコンピュータ用ハードディスク、レーザプリンタ用ポリゴン鏡の加工に超精密ダイヤモンド切削技術が応用されていることをあげることができる。超精密切削加工技術が導入されたことにより、製品の要となる高精度部品の加工コストが大幅に低下し、同時に生産性が飛躍的に向上した。例えば最新の自動化されたポリゴン鏡加工機は、1台で年間10万個のポリゴン鏡を加工する能力があるとされており、この数は我が国で現在生産されているレーザプリンタの年間生産台数である十数万という数に近い値である。

最近では超精密切削加工技術の応用は、従来の軟質金属を対象としたものから、プラスチックやガラス、さらには鋼をはじめとする種々の金属材料の加工へと広がりつつある。またこのような先端加工技術は新製品の開発、在来製品の画期的な性能向上やコストダウンに直結することが多く、一般に知られないところでの技術開発が進められているとも聞く。いずれにせよ超精密切削加工は実用面からの研究開発が先行しており、今後もその傾向は変わらない

と思われる。

しかし翻って切削現象という立場から眺めた場合、超精密切削には未知の部分が多く残されているように思われる。たとえば切削単位が小さくなることにより、見かけ上の比切削抵抗は通常の数倍にも達し、結晶の方向性が切削特性に大きな影響を及ぼす。超精密切削加工技術を今後より広く発展させていくためには、切削加工の限界はどこにあるのかということを念頭において、科学的な立場から切削現象の本質を探索することが重要であろうと考えられる。同様のことは超精密切削加工に直結した工作機械、工具、被削材、計測技術、加工環境についても言える。

最近における本会誌の特集号では、工作機械や工具、計測技術に関する話題は取り上げられているものの、超精密切削加工技術そのものが正面から取り上げられていない。そこで本特集号では異なる立場の方々に、超精密切削加工技術とその関連分野の見直しの上で、今後の展開について展望していただくと共に、具体的に最新技術の御紹介をいただいた。執筆者各位に厚く御礼申し上げる次第である。

なお、今回御紹介いただいた技術は、当該関連分野のすべてを網羅している訳ではなく、紙面の都合ならびに企業の御都合により、他の興味ある最新技術の御紹介ができなかったことを申し添えておく。

(森脇俊道)