研 究

セラミックス成形体の被削性に関する研究（第3報）—切削モデルの検討—

千徳 英一^{☆1}, 田中 大^{☆2}, 河端 裕^{☆3}

^{☆1} 金沢工業高等専門学校機械工学科, 〒921 金沢市久安2-270. ^{☆2} 金沢工業大学大学院, 〒921 石川県野々市扇が丘7-1. ^{☆3} 金沢工業大学機械工学科, 〒921 石川県野々市扇が丘7-1.

On the Machinability for Alumina-green Compact (Part 3rd) A Study of Cutting Model

Eiichi Sentoku^{☆1}, Hiroshi Tanaka^{☆2} and Hiroshi Kawabata^{☆2}

^{☆1} Mechanical Engineering, Kanazawa Technical College, 2-270 Hisayasu, Kanazawa 921. ^{☆2} Graduate School, Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgi-ga-oka Nonoichi, Ishikawa 921. ^{☆3} Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgi-ga-oka Nonoichi, Ishikawa 921.

Received December 6, 1996

SYNOPSIS

In recent years, many ceramics have been developed for the uses. Some ceramics for mechanical or electronic parts are required to be cut as the green compact. The cutting of the green compact is decreased cracks on the machined surface. The purpose of the paper is to clarify the mechanism at cutting of green compact. The cutting mechanism is investigated and discussed from the results of the fracture test by a new type testing machine and of the cutting test by a lathe. In the cutting test, the radius of cutting edge were varied from 0.8mm to 4mm. A fracture model is proposed from AE(Acoustic Emission) signal caused by fracture and SEM image of fracture surface. The main results obtained are as follows; (1) AE signal shows three stages of fracturing the green compact. (2) The fracture energy is from 4 J/m² to 7 J/m². (3) A fracture model is available to clarify the cutting mechanism. (4) The tool with large side cutting edge angle is able to cut a work at high efficiency and to elongate the tool life.

KEY WORDS

Alumina green compact, Fracture model, Cutting mechanism, The side cutting edge angle.

1. 緒言

ファインセラミックス¹⁾は、高強度、高耐熱性及び高耐食性などの特徴を持つ材料であるため、構造用材料や機械部品として魅力的な材料である。しかし、実際にセラミックスを用いた製品の設計を行おうとすると、強度の点において信頼性が十分ではない。また、機械加工においてもセラミックスは、脆性破壊しやすいという大きな問題がある。前報²⁾においては、高強度セラミックスの焼結体が得られると期待さ

れる粒子径 0.2 μ m のアルミナ微粉体のプレス成形体（以下、成形体と呼ぶ）の被削性について考察を行い、切削時の仕上げ面粗さと切削条件との関係を明らかにした。そこで本研究では、切削機構に密接な関係がある微小破壊機構³⁾について、圧子を工具とした押し込み破壊試験機を考案試作し、工具周囲の破壊について観察した。特に、その破壊時に発生する AE 信号⁴⁾や破壊痕から破壊モデル⁵⁾を考察し、切削機構に一考察を加えた。

2. 実験方法及び装置

2-1 セラミックス成形体の物理的特性

Table 1 は、本実験で調製使用したセラミックス成形体^{6,7)}の物理的性質を示す。成形体は、高純度(99.99%)で粒子径が $0.2\sim0.3\mu\text{m}$ のアルミナ微粉体に水とアクリル系結合剤 2.8 mass%とポリエチレンアルコール 1.0 mass%とステアリン酸 0.5 mass%を加え、ボールミル中で 16 時間混合して、スラリーとした。このスラリーをスプレイドライヤー装置で噴霧乾燥することにより顆粒径 $50\sim80\mu\text{m}$ の範囲で造粒を行った。また、成形体は、圧力 0.12 GPa でラバープレスを用いて製造した。成形体の硬度は、マイクロビッカース硬度計とショア硬度計の2種類で測定を行った。マイクロビッカース(HV)で測定したが、ばらつき範囲が大きく、平均 0.31 GPa であった。ショア硬度(HS)の値は、比較的安定した値を示し、平均 16 であった。

Photo.1 は、セラミックス成形体の破断面に金蒸着を施し、SEM で観察したものを示す。成形体中での顆粒径は、 $10\sim100\mu\text{m}$ であり、平均的に $50\sim80\mu\text{m}$ の範囲である。

Table 1 Physical properties of alumina-green compact.

Alumina [%]	99.99
Grain size [μm]	$0.2\sim0.3$
A granule size [μm]	$50\sim80$
Acrylic binder [mass%]	2.8
Polyethylene [mass%]	1.0
Stearic acid [mass%]	0.5
Vickers hardness HV [GPa]	0.31
Shore hardness HS	16

Photo. 1 SEM image of alumina-green compact.

2-2 微小破壊試験機

Fig. 1 は、試作した押し込み破壊試験機の概要を示す。押し込み破壊試験機の構造は、小型コンプレッサより圧縮空気を管内に貯め、弁の開放で圧縮空気がシリンダ内に入り込みピストンを上昇させ、試料台上の成形体に高速で圧子を押つけた。圧子は、この破壊挙動を切削条件に近づけるために超硬合金工具 K10 を用い、その形状を切削時と同様にすくい角 5° 、逃げ角 5° 、横切れ刃角 15° とした。このときに発生する AE 信号は、板バネの上に付けた AE センサによって検出した。試料に対する圧子の移動変位量は、差動トランスによって検知した。この2つの信号は、ウェーブメモリーに読み取り、出力は、オシロスコープやプロッタで行った。

Fig. 1 Equipment of fracture experiment.

2-3 切削加工

切削は、熱伝導率の高い超硬合金工具 K10 (住友電工製)を用いて、Table 2 の条件で乾式切削を行った。本切削は、直径 8mm の丸駒工具(RPGW)とノーズ半径 0.8mm の工具(SNGN)の切削性能について比較を行った。被削材である成形体に剛性が不足することから、

特殊なアダプタを用いて旋盤にチャッキングした。アダプタの構造は、成形体の破壊を防止するために被削材の周囲に硬質ゴムを巻き、その上から鋼製のC形の円筒形式のものとした。このアダプタを用いることで被削材である成形体の外周部に均等な面圧力が加わりチャッキング時の剛性が向上した。工具の摩耗は、工具顕微鏡（オリンパス製）で工具逃げ面摩耗幅 V_B を測定し、工具刃先の摩耗形態や被削材のクラック長さ、切り屑の観察に走査型電子顕微鏡（日立 S-2150）を用いた。また、被削材の加工仕上げ面粗さ R_{max} の測定には、触針型表面粗さ計（東京精密製、ハンディーサーフ）を使用した。

Table 2 Cutting conditions.

Cutting speed : V [m/min]	100	
Feed : f [mm/rev]	0.05 ~ 0.30	
Depth of cut : t [mm]	0.2	
Tool	K10	
Tool type	SNGN 120408	RPGW 0803MO
Nose radius [mm]	0.8	4.0
Rake angle [°]	-5	0

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 は、工具刃先を用いた場合の荷重と破壊に要するエネルギーの関係を示す。破壊に要するエネルギーは、圧子の荷重と圧子の進入距離より求めた。この値は、荷重に関係なく $4 \sim 7 \text{ J/m}^2$ となる。破壊に要するエネルギーは、焼結体のアルミナセラミックス⁴⁾の約 $1/10$ となった。

Fig. 2 Relation between load and fracture energy.

Fig. 3 は、成形体の微少破壊試験における圧子の変位と AE 信号の代表的なチャートを示す。圧子と試験片の接触後、荷重が増加し、最大約 9 N に達した。また、AE 信号は、接触後、 4.3 ms で 0.018 V 発生する。このときの荷重は、 2.1 N である。つぎに、ここから 2.5 ms 遅れて 0.078 V 、さらに 2.7 ms 遅れて 0.095 V 発生した。つまり AE 信号は 3 段階で発生し、大規模な破壊が 3 回起きて進行していることが分かる。これらの大きな AE 信号のところで、破壊に寄与するクラックが進行するものと推測される。なお、この AE 信号は、マシナブルセラミックスにおける破壊モデル⁵⁾とよく一致することも確認された。

Fig. 3 Time chart of load and AE signal.

Photo. 2 は、破壊痕の破断面の SEM 写真を示す。工具刃先の集中応力のためクラックの分岐は、3つのパターンに分かれる。圧子直下の(A)は、圧縮破壊が発生し、顆粒径の圧縮されている状態が分る。また、写真左側の(B)では、工具の圧子付近から成形体内部にかけて大きなクラック分岐することが分る。写真右側の(C)では、圧子付近では顆粒径の状態でもクラックが分岐し、成形体内部にかけて大きなクラック伝播となる。

Fig. 4 は、上記の AE 信号と SEM 写真より成形体の破壊過程モデルに対して一考察を行う。Process I は、B.R.Lawn⁸⁾が提唱したモデル図である。図中の+符号は圧縮応力場、-符号は引張り応力場を示す。これは、圧子に荷重が加わると圧子直下では圧縮応力場、その周囲に引張り応力場が発生する。Process II⁹⁾は、第1 AE 信号における状態を示し、引張応力場と圧縮応力場の境界からリングクラックが表皮から垂

直に成長する。その後、最小主応力に沿ってコーンクラックが斜め方向に進展するものである。Process IIIは、第2 AE 信号の状態を示し、多岐に分岐していたクラックがコーンクラック部から、表面エネルギーの小さい表皮に進展し、結果として破壊粉が生成される。Process IVは、第3 AE 信号の状態を示し、圧子の接触鉛直下にも分岐したクラックが集積し、大規模破壊が発生する。

Photo. 2 SEM microphotograph of fracture surface of alumina-green compact.

Fig. 4 Fracture model of crack propagation.

Fig. 5は、破壊試験による破壊モデル (a) と切削における2次元切削モデル (b)^{10,11)}を示す。Photo. 2から理解できるように大きな引張応力が発生すると直線的クラックの伝播が見られる。つまり押しつけ力が大きいと、当然、引張り応力場(+)も拡大することになる。つぎに、2次元切削モデルにおいても引張り応力場(+)が発生し、強度に関係するクラックが成形体表皮に残留する。そこで、高強度セラミックスの製作するためには、引張り応力場(+)の小さい切削

加工が重要となる。すなわち、(b)モデルの Fr (背分力または単位面積当たりの圧縮応力) が小さくなれば、当然、引張り応力場(+)が縮小されることになる。従って、高強度セラミックスの製作は、 Fr の小さい切削方式が有効と言える。

Fig. 5 The stress distribution of fracture model and orthogonal cutting model.

Fig. 6は、 Fr の異なる工具の刃先形状について示す。(a)は、横切れ刃角の大きい丸駒工具(RPGW083MO)を示す。この切削作用は、単位面積当たりの圧縮応力の小さい方式となり、実切り込み量 Δt が小さくなる。また、(b)は、普通工具(SNGN120408)を示し、総合的に背分力が小さくなるが、単位面積当たりの圧縮応力が大きくなり、表皮に大きなキズを残すことになる。

Fig. 6 The difference on the depth of real cut by tool shape.

Fig. 7は、付記の条件における送りと仕上げ面粗さの関係を示す。丸駒工具は、切削速度 V が100m/min、切込み量 t が0.2mmにおいて送り f が0.15mm/revのときに仕上げ面粗さは最も良好になり、そのばらつきも小さくなる。成形体の仕上げ面粗さは、成形体ができる限り小さく除去することによって向上させることができる。このことから、実切り込み量の小さい丸駒工具が良好な面粗さ($R_{max}=4.5\mu m$)を実現してい

る。また、送りを高い方あるいは低い方に变化させると、仕上げ面粗さのばらつきが大きくなる。これは、低い送りで軸とベアリング間のガタ(遊び)や成形体と工具の間に切屑が入り込むことにより、仕上げ面粗さが揺動するのではないかと考えられ、高い送りでは、当然、送りマークの影響によると考えられた。また、送りが 0.25 mm/rev で R_{max} の中間値は、 $8.0 \mu\text{m}$ 程度となる。この値は、普通工具の $f=0.15 \text{ mm/rev}$ の R_{max} 値にほぼ等しい。丸駒工具は、普通工具と比べて高能率加工が可能となる。

Fig. 8 は、工具の前逃げ面境界摩耗幅と切削距離との関係を示す。丸駒工具は、普通工具よりわずかに初期摩耗は大きくなるが、定常摩耗の傾きが小さいこ

Fig. 7 Relation between feed and surface roughness. $V=100 \text{ m/min}$, $t=0.2 \text{ mm}$, K10 vs. alumina-green compact.

Fig. 8 Relation between cutting length and width of flank wear. $V=100 \text{ m/min}$, $f=0.10 \text{ mm/rev}$, $t=0.2 \text{ mm}$, K10 vs. alumina-green compact.

とが分かる。よって、丸駒工具の工具寿命は長くなる。これは、丸駒工具は、実切込み量が減少し、単位面積当たりの背分力が小さいことに起因すると考えられた。

4. まとめ

アルミナ粉のプレス成形体の微小破壊実験と切削加工を試み、以下の結論が得られた。

- (1) 成形体の破壊に要するエネルギーは、 $4 \sim 7 \text{ J/m}^2$ である。この値は、焼結したアルミナセラミックスの約 $1/10$ であった。
- (2) 工具刃先における破壊実験の AE 信号は、3 段階で発生する。第 1 AE 信号はクラック発生、第 2 AE 信号は小規模破壊、第 3 AE 信号は、大規模破壊と考える。また、AE 信号と破壊痕から破壊モデルを提案した。
- (3) 成形体の破壊機構は、切削モデルを解明するための一旦となった。
- (4) 丸駒工具は、普通工具に比べて高能率切削が可能であり、工具寿命が長くなった。これは、単位面積当たりの背分力の小さいことに因子と考えられた。

文 献

- 1) 浜野健也：ファインセラミックスの基礎科学，朝倉書店(1992)4.
- 2) 千徳英一，田中 大，河端 裕：粉体および粉末冶金，43(1996)493.
- 3) 千徳英一，佐藤孝宏，藤村善雄：粉体および粉末冶金，36(1989)121.
- 4) 西田俊彦ほか：セラミックスの力学的評価，日刊工業新聞社(1986)63,87,169.
- 5) 千徳英一，中 勉：粉体および粉末冶金，40 (1993) 1238.
- 6) 田中 宏：日本セラミックス協会誌，102(1994)397.
- 7) 田中 宏：日本セラミックス協会誌，102(1994)1075.
- 8) B.R.Lawn: J. Appl. Phys, 39(1968)4828.
- 9) 上田完次：トライボロジスト，34(1989)82.
- 10) 杉田忠彰，上田完次：精密機械，51(1985)1940.
- 11) 水谷勝巳，田中芳雄：精密機械，49(1983)156.