ファインセラミックスの研削温度*

木村 知史^{*1}, 稲崎 一郎^{*2}

Grinding Temperature of Advanced Ceramics

Tomofumi KIMURA and Ichiro INASAKI

A new method which utilizes an infrared thermal monitor for measuring the grinding temperature was proposed. With the proposed method, surface grinding temperatures of SiC, Si₃N₄, ZrO₂ and Al₂O₃ were measured. The influence of grinding temperature on the material removal process was investigated through the SEM observation as well as the analysis of the ground surface profile. It has been confirmed that the elevated grinding temperature changes the material removal process from the brittle fracture mode to the ductile mode.

Key Words: Grinding, Advanced Ceramics, Grinding Temperature, Infrared Thermal Monitor, Power Consumption, Skew, Specific Grinding Energy

1. 緒 言

硬度、強度、耐熱性、耐食性、耐摩耗性などの点で優れた特性を有するファインセラミックスは、さまざまな分野で広く利用されつつある。その需要が広まるにつれ、より高精度かつ高品質であるセラミックス部品が要求されている。今日実用化されているファインセラミックスの代表的な機械加工法は、ダイヤモンド砥石による研削加工である。しかし研削加工されたセラミックス部品の機械的強度にはばらつきが大きく、また加工条件によっては強度の低下も著しいことが指摘されている⁽¹⁾。これは加工中に発生する微小き裂が原因であると考えられ、砥粒研削点における研削力の大きさを関連づけた検討も行われている⁽²⁾。しかし、このような研削力によってだけではなく、研削中に発生する熱応力によるき裂発生の可能性も考えられるが、この点に関してはこれまでにほとんど研究がなされていない。研削熱は、このようなき裂発生の原因のみならず、研削中のセラミックスの材料特性を変化させ、材料除去メカニズムにも影響を与えると考えられる。

さらに巨視的には、加工精度にも影響を持つであろう。これら研削熱の影響を議論するには、研削中の温度を測定する必要がある。

そこで本研究では、赤外線放射温度計を用いた新しい研削温度測定法を考案し、研削熱がファインセラミックス加工物表面に及ぼす影響、また研削メカニズムに及ぼす影響を検討した。

記 号

a_m : 平均作用砥粒断面積 μm^2

B : 研削幅 m

D : 砥石直径 m

c : 工作物比熱 J/(kg·K)

E : 比研削エネルギー J/m³

F_t : 接線研削抵抗 N

h : 切込み深さ m

K : 温度伝導率 m²/s

k : 工作物熱伝導率 J/(m·s·K)

l : 接触弧長さ m

n : 断面曲線の標本数

P : 研削動力 W

q : 研削時における単位時間単位面積当たりの発熱量 J

原稿受付 平成2年4月24日。

^{*1} 准員、慶應義塾大学大学院 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

^{*2} 正員、慶應義塾大学理工学部。

- $R_{\max}$: 最大高さ粗さ μm
 R_w : 工作物に流入する熱量の割合⁽³⁾
 V_g : 砥石周速度 m/s
 V_w : 工作物送り速度 m/s
 w : 平均砥粒間隔 m
 X_i : 離散化された断面曲線の標本値
 $\bar{X}_i$: 離散化された断面曲線の標本値の平均値
 α : ひずみ度
 θ_m : 研削面最高温度 K
 ρ : 工作物密度 kg/m^3
 σ : 断面曲線の標本値の標準偏差

2. 研削温度測定装置

研削熱が加工物仕上げ面に及ぼす影響を考える上で、研削温度を正確に知ることはきわめて重要である。しかし、研削加工は微細な砥粒が高速で加工物を切削するため、研削表面の正確な温度測定は非常に困難である。

一言で研削温度と言っても、いったいどの部分のどの瞬間における温度をさすのかという極めてあいまいである。一般には工作物に流入した研削熱による工作物平均温度、砥粒切刃と加工物の接触点における砥粒研削点温度、砥石と加工物の接触面における砥石研削点温度、切りくずが工作物から切り放される瞬間の切りくず平均温度の4種類の温度を考え、区別して用いる⁽⁴⁾。

表 1 赤外線放射温度計の仕様

Thermal monitor 1-3026 (VANZETTI SYSTEMS COMPANY)
Linearized range : 370°C ~ 1100°C
Accuracy : $\pm 1\%$ of full scale
Response time : 1 msec
Working distance : 33 mm
Spot diameter : 0.5 mm
Length of the optical fiber : 900 mm

図 1 考案した研削温度測定方法

本研究では砥石研削点温度を測定の対象とし、赤外線放射温度計を用いた研削温度の非接触測定を試みた。これは材料の変質や研削焼けなど、仕上げ面表面の熱損傷に最も関係があるのは、研削表面の温度だと考えたからである。実験装置を図1に示した。また実験に使用した赤外線放射温度計の仕様を表1に示した。

赤外線放射温度計は、物体が放出している赤外線を検出器に集め、温度に換算する温度計である。本装置ではカップ形の砥石にスリットを設け、このスリットを通し研削直後の加工物表面から放出される赤外線を検出可能にした。赤外線は光伝送用ファイバで拾われて検出器まで集められ、そこからケーブルで本体へ電圧変化として伝わる。実際に検出された波形例を図2に示した。スリットの幅は1 mm、長さは80 mmである。この長さであると、1回スリットが通過する間に、砥石の周速度を機械の設定速度である26.2 m/s（本研究の最高周速度は25.6 m/s）に設定した場合、3 msの間工作物からの赤外線放射を検出することができる。放射温度計の応答時間は1 msなので瞬間的な加工物表面温度の検出が可能である。

しかし、この方法にも問題点がある。すなわち研削液を使用すると赤外線の吸収が起こるので研削液を使用することができない、研削中はセラミックスの切りくずが大量にでて雰囲気か乱れる、測定するセラミックスの放射率を正確に知る必要がある、などが挙げられる。これらに対処するため本研究では、研削液を使用せず乾式で温度測定を行い、温度計のプリズム先端に空気を吹き付け、研削粉が付着することを阻止した。また、ヒータで加熱した試片の表面を熱電対と放射温度計で同時に測温し放射率を求めた。なお、表面粗さの影響については、 Si_3N_4 に対し0.08 μm (R_a) から

図 2 検出された研削温度の波形例

0.20 μm まで調べ、その影響は無視しうることを確認した。

3. 実験方法

本実験に利用したファインセラミックスは、現在最も使用頻度が高いと思われる4種類のセラミックス、窒化ケイ素、ジルコニア、炭化ケイ素、アルミナである。その機械的特性を表2に示した。

実験に使用した研削盤は岡本工作機械製作所製平面研削盤 PSG-52 AN である。テーブル駆動はクリープフィード研削が可能となっている。研削動力は VALENITE 社製 720-002/305 パワーモニタで測定した。なお、加工後の加工面粗さは触針式粗さ計 (MITUTOYO 社製サーフテスト 401 シリーズ 178) で測定した。

表3には実験条件を示した。本研究では切込み深さで 100 μm 以上、工作物速度 200 mm/min 以下の条件で研削を行うクリープフィード研削で実験を行った。クリープフィード研削を採用したのは近年広く用いられている加工法である、接触弧長さが長いこと研削温度の上昇が著しく表面損傷が発生しやすい、工作物速度が極めて遅いのでセラミックスの研削温度の変化の挙動をゆっくりと観察できる、また接触弧が長いこと測定領域が広くとれるなどの理由による。

表2 実験に使用したセラミックスの諸特性

	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Si ₃ N ₄	SiC
Vickers hardness (GPa)	16	13	15	25
Young's modulus (GPa)	344	216	294	431
Poisson's ratio	0.25	0.31	0.28	0.16
Fracture toughness (MNm ^{-3/2})	4.5	6-9	5-8	3-5
Density (kg/m ³)	3800	6100	3200	3200
Specific heat (J/kg K)	150	120	150	150
Thermal conductivity (J/ms K)	0.06	0.009	0.04	0.15

表3 実験条件

Grinding machine	Surface grinding machine OKAMOTO MACHINE TOOL WORKS, LTD. (PSG-52AN)
Power of main spindle	3.75 kW
Grinding types	Up and down cut creep-feed grinding
Grinding wheel	ASD170R100B56-3 MITSUBISHI METAL CORP. φ=300 mm B=10 mm
Workpiece	Al ₂ O ₃ ZrO ₂ Si ₃ N ₄ SiC
Wheel speed	15.2 ~ 25.6 m/s
Table speed	10 ~ 160 mm/min
Depth of cut	0.125 ~ 1 mm
Truing	Brake truer (C150M8V) φ=75 mm d=25 mm
Dressing	Abrasive dressing stick (C220G8V) 150x25x25 mm
Grinding fluid	Water miscible (Solution type) 40 : 1

4. 研削条件が研削温度に及ぼす影響

4.1 時間経過に伴う温度変化 図3に研削時間の経過に伴う研削温度、研削動力、実切込み量の変化の様子を示した。温度は砥石と工作物の接触弧内の最高温度を示している (図4参照)。

研削温度、研削動力はほぼ同じ挙動を示しており両者に密接な関係があることがわかる。研削温度、研削動力は砥石と工作物が接触し始めてから接触長さが一定になるまで上昇する。その後一度下がるのは、砥石の急激な温度上昇が結合剤を軟化させて砥粒の脱落をまねき、この自生発刃効果によって切れ味が良くなったためだと考えられる。さらに研削を続行すると砥石の切れ味が低下するために徐々に上昇して最終的に定常状態に達している。

切込み深さは、多大な研削熱による砥石および工作物の熱膨張によって、時間の経過に伴って次第に増大している。

4.2 接触弧内の温度分布 クリープフィード研削の場合、切込み量が大きいこと砥石と工作物の接触

図3 研削時間の経過に伴う研削動力、研削温度、実切込み深さの変化

図4 接触弧内の温度分布

弧の長さも大きくなっていく。例えば、切込み量 500 μm の場合接触弧の長さは 10 mm にもなる。したがって接触弧内のどの点の温度を測定するかによって研削

温度も違ってくる。そこで、赤外線放射温度計の先端部であるプリズム面を接触弧内のさまざまな点に向けて、それぞれの点での研削温度を測定した。結果を図 4 に示した。研削温度が最も高い場所は、ダウンカットの場合は接触角度の下から約 6 割の点、アップカットの場合は下から約 7 割の点であった。本研究では、温度が最高となる点を測定点と定めた。

4.3 種々のファインセラミックスの研削温度

図 5 に 4 種類のセラミックスの研削温度と研削動力を示した。研削温度は同一条件で研削した場合、窒化ケイ素が最も高く、ついで、ジルコニア、炭化ケイ素、アルミナの順になる。

窒化ケイ素は他の 3 種類に比べて研削温度が高い。窒化ケイ素は破壊強さや破壊靱性が大きく最も削りにくいために研削動力も高くなっている。一方ジルコニアは熱伝導率の値が他のセラミックスに比べて 1 けたもしくは 2 けた小さい値となっている。このために研削熱が工作物内部に伝わりにくく、研削温度が高くなると考えられる。

研削温度に関するこれまでの主要な成果は、移動熱源による温度上昇問題を解析した Jaeger の結果⁽⁵⁾をもとに求められてきた。この解析によると、砥石と工作物の接触面の最高温度 θ_m は以下に示す近似式によって与えられている⁽⁶⁾。

$$\theta_m = 1.128 \frac{R_w F t V_g}{JB(k\rho c V_w l)^{0.5}} \\ = 1.128 \frac{q l}{k L^{0.5}} \quad (1)$$

ここで L は無次元数であり、 $L = \rho c V_w l / (2K)$ である。式(1)は $L > 0.5$ の範囲で成立する。

図 6 は式(1)を変形し、縦軸に $\theta_m k / q l$ 、横軸に $(1/L)^{0.5}$ をとり、4 種類のセラミックスについて各種の実験結果をまとめたものである。各材料によって多少のばらつきはあるものの、結果は 1 本の直線に近似できると考えられる。これによって各材料の物性値と

図 5 各種セラミックスの研削動力および研削温度

図 6 $\theta_m k / q l$ と $(1/L)^{0.5}$ の関係

流入熱量がわかれば、研削温度を次式によって推定することが可能である。

$$\theta_m = \frac{q_l}{k} (8.64 L^{-0.5} - 2.20) \times 10^{-2} \dots\dots\dots (2)$$

5. 研削熱が加工表面性状に及ぼす影響

図7は4種類のセラミックスの乾式研削および湿式研削後の電子顕微鏡写真である。写真を見る限りでは、ジルコニアを除くセラミックスにおいて、湿式研削よりも乾式研削で加工された面のほうに、塑性流動の様相が顕著である。

(a) 窒化ケイ素 ($V_w: 23.0 \text{ m/s}$, $V_w: 30 \text{ mm/min}$, $h: 0.5 \text{ mm Down cut}$)

(b) ジルコニア ($V_w: 23.0 \text{ m/s}$, $V_w: 80 \text{ mm/min}$, $h: 0.8 \text{ mm Down cut}$)

(c) 炭化ケイ素 ($V_w: 23.0 \text{ m/s}$, $V_w: 80 \text{ mm/min}$, $h: 0.8 \text{ mm Down cut}$)

(d) アルミナ ($V_w: 23.0 \text{ m/s}$, $V_w: 80 \text{ mm/min}$, $h: 0.8 \text{ mm Down cut}$)

図7 研削加工表面のSEM写真

図8に各セラミックスの比研削エネルギーと平均作用砥粒断面積との関係を示した。平均作用砥粒断面積とは、砥粒一つが研削に関与する平均的な断面積をいい、次式で表される。

$$a_m = w^2 \frac{V_w}{V_g} (h/D)^{0.5} \dots\dots\dots (3)$$

窒化ケイ素、アルミナ、炭化ケイ素においては、湿式研削と乾式研削を比べると湿式研削のほうが比研削エネルギーが低くなっている。これは一つには研削液の潤滑効果によって研削抵抗が減少するためである。他の理由として、湿式研削における加工物温度の低下が、図7にみられるように、材料除去のメカニズムを微小脆性破壊が主体となったものにするためであると考えられる。

ジルコニアは図7において湿式研削と乾式研削の間で明確な差異が認められず、また図8に示した比研削エネルギーに関しては、他のセラミックスと違い湿式研削のほうがわずかながら高い値を示している。ジルコニアは破壊靱性値が非常に高いために、湿式研削においても塑性流動的除去によって研削が進行し、そのために両研削方式の間に顕著な差が現れなかったと考えられる。

次に定量的に加工表面の状態を評価するために、断面曲線のひずみ度を求めた。ひずみ度は、断面曲線の分布がどの程度ひずんでいるかを評価するもので、次式のように規格化して求められる。

$$\alpha = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} \dots\dots\dots (4)$$

したがって断面曲線が正規分布になっている場合、そのひずみ度は零となる。しかし断面曲線に谷部が多く存在する場合はひずみ度は負となる。したがって、加

図8 平均作用砥粒断面積と比研削エネルギーの関係

図9 研削方向の最大高さ粗さとひずみの関係

工表面に多くの微小脆性破壊部分が存在する場合は負の値を持つと予想される。すなわちひずみ度は加工表面性状を表す一つの指標となりうると考えられる。通常金属の研削加工後の断面曲線のひずみ度は、零に近い値を持つといわれている。

図9に、3種類のセラミックスについて研削方向の断面曲線の最大高さ粗さとひずみ度の関係を示した。窒化ケイ素の場合、乾式研削において最大高さ粗さは

小さく、ひずみ度は零に近い値を示しているが、湿式研削においてはひずみ度は負となっている。ジルコニアは、図7に示したように両研削方式の材料除去機構に差がないため、最大高さ粗さ、ひずみ度とも顕著な違いがみられない。またアルミナは、両研削方式において脆性破壊が主体となっているため、ひずみ度はいづれも負の領域に分布している。

図9に示したとおり、断面曲線のひずみ解析は、図7に示したSEM観察の結果と対応しており、材料除去メカニズムを検討する上で有用なパラメータであることがわかる。

6. 結 言

本研究では、ファインセラミックスの研削加工において、これまで困難とされてきた研削温度の測定を新しい方法によって試み、また研削時に発生する熱が工作物にどのような影響を及ぼすか、また研削機構にどのような影響を及ぼすかの検討を行った。得られた結果は以下のように要約される。

(1) 今回考案した研削温度測定方法によって、ファインセラミックスの研削温度を測定することが可能となった。この方法は光ファイバの特徴を活かして狭い場所からの赤外線を拾い、それを応答速度の速い赤外線放射温度計で測温するので、高速で変化する研削温度を測定するのに非常に有効である。

(2) 本実験においては窒化ケイ素が最も研削温度が高く、ついでジルコニア、炭化ケイ素、アルミナの順になった。これはそれぞれの材料が持つ破壊靱性値、熱伝導率、比熱に深く起因することが確認された。

(3) 乾式研削によって発生する多大な研削熱は、セラミックスの研削加工を脆性破壊モードから塑性流動的除去に変化させる。

本研究を遂行するにあたり、機器を提供下された(株)岡本工作機械製作所ならびに三菱金属(株)に感謝の意を表す。また本実験を遂行するにあたり、ご協力いただいた、慶応義塾大学理工学部生・国平ゆり氏、春本玲子氏に感謝する。

文 献

- (1) Kirchner, H. P. and Isaacson, E. D., *J. Am. Ceramic Soc.*, **16** (1981), 55.
- (2) 鄭・稲崎・松井, 機論, **53**-485, C (1987), 209.
- (3) 長谷川・奥山・今井, 精密機械, **50**-4 (1984), 679.
- (4) 高沢, 精密機械, **36**-1 (1970), 9.
- (5) Jaeger, J. C., *Proc. R. Soc. New South Wales*, **76** (1942), 203.
- (6) 小野, 研削仕上り, (1967), 43, 横書店.