

# 工具-加工物接触面温度の測定\*

上田 隆 司\*\* 佐藤 昌彦\*\*\* 杉田 忠彰\*\*

Measurement of Tool-Workpiece Interface Temperature by Two-Color Pyrometer

Takashi UEDA, Masahiko SATO and Tadaaki SUGITA

Temperature of interface between a cutting tool and a workpiece is measured using two-color pyrometer with a fused fiber coupler. A conical tool is used as the cutting tool which is made of translucent alumina sintered under HIP, and 0.55% carbon steel is used as a workpiece. The infrared rays radiated from the interface and transmitted through the conical tool are accepted by a fused fiber coupler and led to two infrared detectors of different spectral sensitivity. Temperature is obtained by calculating the ratio of the output voltage from these two detectors. The results obtained are as follows. The temperature increases very rapidly and reaches 1 000°C at about 40 μs after the beginning of cutting. The rate of increase of temperature is very great : about 10<sup>8</sup> °C/s at the cutting speed of 1 500 m/min. The temperature increases with the increase of cutting speed, but at a speed faster than 1 000 m/min its influence is small. The temperature shows a tendency to saturate about 1 300-1 400°C as the cutting speed increases.

**Key words:** tool-workpiece interface temperature, temperature measurement, two-color pyrometer, fused fiber coupler, optical fiber, infrared radiation pyrometer

## 1. 緒 言

機械加工において、切りくず生成の際に生じる熱は加工物や工具に様々な悪影響を及ぼす。このため、加工温度は熱損傷の予測や加工機構の解析に対して重要であり、これまで多くの研究が報告されている<sup>1)</sup>。一般に、加工温度は熱電対を利用した方法で測定されることが多いが、接触式測定法という性質上様々な制約がある。とくに切込み量が少ない微小加工においては測定領域が極めて小さくその適用がむずかしい。また、2色温度計で旋削における工具-切りくず接触面温度を測定した例もあるが<sup>2)</sup>、加工条件が明確ではなく、測定結果に対する評価がむずかしい。

著者らはこれまで微小加工領域で高速で変化する温度を非接触で測定する方法として、測定対象物から放射される赤外線を受光して光ファイバで受光して光電変換素子に導く、光ファイバ型赤外線放射温度計を開発してきた。そして、この温度計を研削直後の切れ刃温度の測定に適用し、多くの知見を得てきている<sup>3)4)</sup>。また、円すい形工具による微小切削を行い、加工後数msの温度を測定し、測定結果に熱解析解を適用することにより工具の冷却特性を求め、その特性より切削終了時の切れ刃温度を推定してきている<sup>5)</sup>。

そこで本研究では、工具が加工物に食いつく瞬間から定常状態にいたる間の工具-加工物接触面の温度の測定を試みた。工具には、透光性を有するアルミナで作った円すい形工具を用い、微小切削時、工具-加工物接触面から放射される赤外線のうち工具内を透過してきた赤外線を光ファイバで受光する。受光された赤外線は光カプラで2本の光ファイバに分岐し、分光感度特性の異なる2つの光電変換素子に導く。この2つの素子からの出力の比をとることにより、温度測定が可能となる。この光カプラ型温度計はこれまでの光ファイバ型温度計を改良したものであり、その有効性はすでにレーザー照射部の温度測定に

適用して、実証済みである<sup>6)</sup>。測定物の放射率の変化による影響を抑制できるだけでなく、工具-加工物接触領域のような複雑に入り組んでいる微小領域で高速で変化する温度（フラッシュ温度）が測定できるなどの特長を備えている。なお、本研究で用いる温度測定法は、摩擦摩耗試験における摩擦面などの微小領域の温度の測定などにもそのまま適用することができる。

## 2. 実験方法

### 2.1 切削工具

本研究で用いた円すい形工具の形状、および工具材料のHIP焼結アルミナの分光透過特性を図1に示す。図(a)にみるように、頂角120°、先端曲率100 μmであり、光ファイバを挿入するため工具底面より先端近傍0.8 mmの所まで直径0.5 mmの小孔があけてある。図(b)は厚み1.98 mmのアルミナの透過率であるが、厚み0.8 mmの材料に換算すると波長2 mmの赤外線では60%程度透過することになる。

### 2.2 実験装置

実験装置の基本構成を図2に示す。スピンドルに取り付けた円盤の外周に長さ6 mmの加工物を取り付ける。円すい形工具はピエゾ型動力形を介して微動駆動台に取り付けられており、

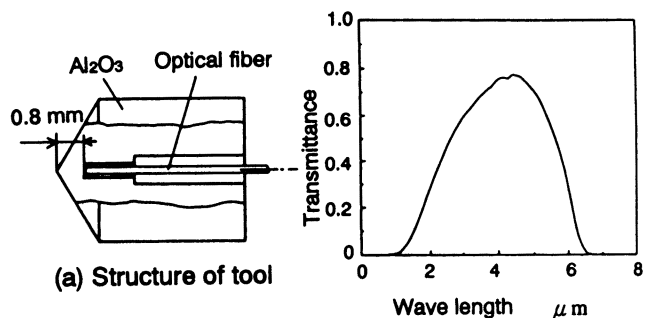


Fig. 1 Cutting tool

\* 原稿受付 平成7年1月25日

\*\* 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

\*\*\* 正 会 員 富山県立大学工学部 (富山県射水郡小杉町黒河5180)

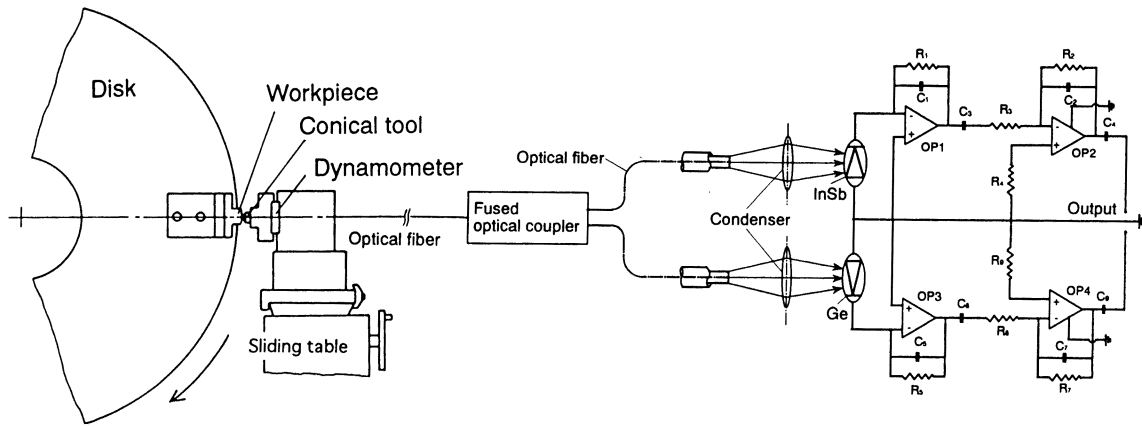


Fig. 2 Experimental set-up

Table 1 Cutting conditions

Cutting speed	$V_w=100-2\ 300$ m/min
Depth of cut	$a=30$ $\mu$ m
Work material;	S 55 C
Length;	6 mm
Conical tool	
Material;	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (sintered under HIP)
Conical angle;	120°
Nose radius;	100 $\mu$ m

円盤の回転面と垂直方向に一定速度で移動できる。円盤を所定の周速度で回転させ、工具に切込みを与えて一定速度で送ることによって切削を行う。加工物は円盤の外周に沿って前加工してあり、定切込み加工となる。スピンドルの回転速度は無段に調節できる。

実験条件を表1に示す。加工材料には鋼(S 55 C)を用いている。円すい形工具に30  $\mu$ mの切込みを与え、微小切削を行うとき、工具-加工物接触面から放射される赤外線のうち、円すい形工具を透過してきた赤外線を、工具底面にあけた小孔に挿入してある光ファイバによって受光し、溶着型光カプラによって2方向に分岐する。分岐された赤外線をGe, InSbによって電気信号に変換し、マイクロコンピュータで処理する。

### 2.3 温度計

#### 2.3.1 基本構造

温度計の基本構成を図2に示す。工具-加工物接触面から放射された赤外線のうち、工具内を透過してきた赤外線をコア径100  $\mu$ mの1本の光ファイバで受光し、融着型光カプラにより2本のファイバに分岐する。工具内の小孔の径が500  $\mu$ mと光ファイバ径145  $\mu$ mに比べてはるかに大きいため、その設定位置が変化すると測定精度に大きく影響してくる恐れがある。ところが、1本の光ファイバで赤外線エネルギーを受光し、そのエネルギーを光カプラによって2つに分岐する方法をとっているため、ファイバの設定位置によって生じる受光エネルギーの変化の測定精度への影響は除くことができる。

伝送された赤外線は集光レンズを介して2個の異なる分光感度特性をもつ光電変換素子へ導き、電気信号に変換した後増幅し、デジタルメモリーに記録してマイクロコンピュータにより解析する。

黒体の放射能を $J_\lambda(\lambda, T)$ 、工具材料(アルミナ)、光ファイバ、および集光レンズの分光透過率を $M(\lambda)$ 、 $F(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 、また、Ge, InSbの光電変換素子の分光感度特性を $D_1(\lambda)$ 、

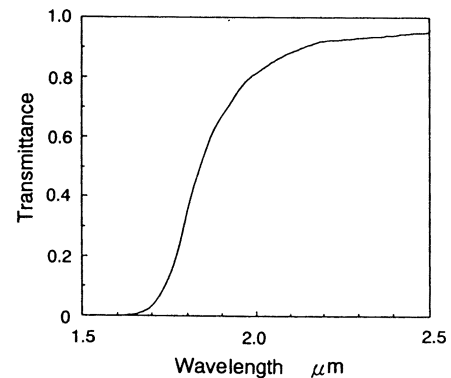


Fig. 3 Spectral transmittance of Ge filter

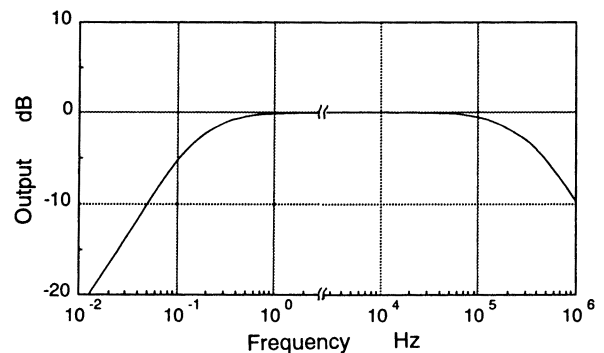


Fig. 4 Frequency characteristics of amplifier

$D_2(\lambda)$ とする。また、Ge-IRP, InSb-IRPそれぞれの測定可能な波長範囲を $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ,  $\lambda_3 \sim \lambda_4$ とし、これらの範囲が大きく異ならず、かつこの間で放射率が波長によらず一定とみなすことができるとすると、それぞれの素子からの出力 $A_1, A_2$ の比は次式で与えられる。

$$A = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_\lambda(\lambda, T) M(\lambda) F(\lambda) G(\lambda) D_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} J_\lambda(\lambda, T) M(\lambda) F(\lambda) G(\lambda) F_i(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

すなわち、放射率の影響を受けずに温度測定ができることになる。なお、 $F_i(\lambda)$ はGeフィルタの分光透過特性(図3)であり、InSb側に入れることによって、高温における温度計の感度を向上させている。

図4は温度計に使われている増幅回路の周波数特性である。ほぼ100 kHzまでフラットな特性をもっており、InSb, Geの

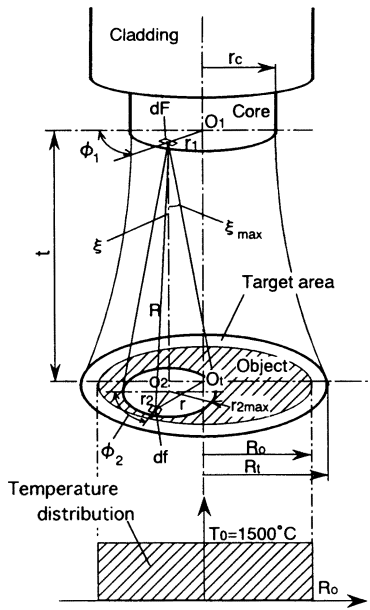


Fig. 5 Illustration of incidence face of optical fiber

応答速度が  $1 \mu\text{s}$  と十分高速であることから、2色温度計の周波数特性は図4で表されることになる。

### 2.3.2 均一な温度分布をもった領域への適用

均一温度にある測定対象領域が温度計の感温面より大きい場合、温度計の出力は測定距離に影響されず、一定の出力が得られることはこれまでの光ファイバ型温度計と同じである<sup>3)</sup>。そこでここでは、測定対象領域が感温面に比べてはるかに小さい場合について、温度計の出力を求めてみることにする。ところで、工具-工作物接触域のように温度測定領域が微小な場合、領域内の温度分布を無視し、一定温度とみなしてよい場合が多い。そこで、一例として、半径  $R_0 = 0.1 \text{ mm}$  の微小円形領域が  $T_0 = 1500^\circ\text{C}$  と均一状態にある場合を考えてみる。

図5にみるように、光ファイバの中心軸が測定対象面に垂直に設置され、ファイバの中心と測定対象領域の中心は、同一直線上にあるとする。すると、受光面が受光する全エネルギー  $E_\lambda$  は

$$E_\lambda = \iint_F \iint_f \frac{J_{\lambda n}(r, T) \cos^2 \xi}{R^2} df dF \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 $J_{\lambda n}(r, T)$  は測定領域の法線方向へのスペクトル強度であり、 $\xi$  は  $df$  と  $dF$  を結ぶ直線と対象面の法線との角度、また、 $dF = r_1 dr_1 d\phi_1$ 、 $df = r_2 dr_2 d\phi_2$  である。

温度計の受光するエネルギー  $E_\lambda$  を式(2)を用いて計算し、測定温度を求めた結果が図6である。光ファイバの特性値は表2の光カプラに用いたファイバの値を用いている。図にみるように、これまで使用してきた光ファイバ型の赤外線放射温度計(InSb-IRP)では測定距離  $t = t_c$  (感温面の大きさが熱源と同じになる距離) から受光エネルギー  $E_\lambda$  が減少し始め、測定温度に誤差が生じるようになり、 $t$  が大きくなるとともに急速に低下している。すなわち、温度計の感温面が熱源より小さい場合は温度測定が可能であるが、感温面が大きくなると測定できなくなる。これに対し、光カプラ型2色温度計ではInSbセルとGeセルの出力比をとることによって温度を求めるため、測定距離によって個々のセルの受光エネルギーが変化してもその出力比をとれば一定となり、測定距離にかかわらず  $1500^\circ\text{C}$  が得られている。したがって、温度が均一に分布している対象物

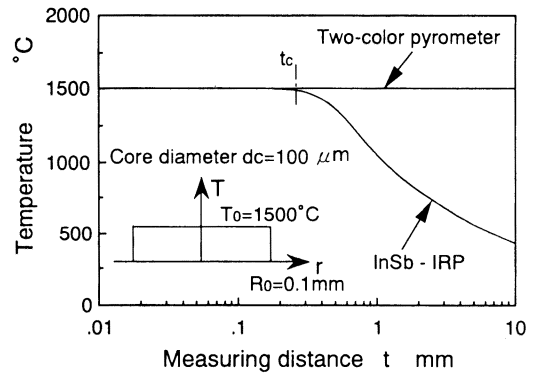


Fig. 6 Influence of measuring distance on temperature

Table 2 Characteristics of fused fiber coupler

Graded index type quartz fiber
Core diameter $d_c = 100 \mu\text{m}$
Cladding diameter $d_{ca} = 150 \mu\text{m}$
Refractive index of core (peak) $n_1 = 1.47$
Refractive index difference $\Delta = 1.9\%$
Numerical aperture $N_A = 0.29$
Focusing constant $g = 0.0039 \text{ 1}/\mu\text{m}$
Divided ratio; 1 : 1
Loss; 0.18 dB

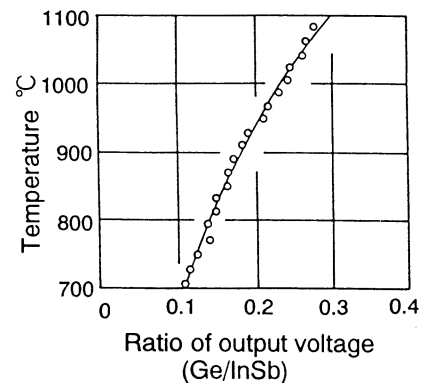


Fig. 7 Calibration curve

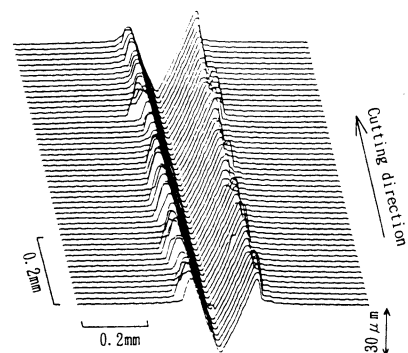


Fig. 8 Profile of cutting groove

に対して、対象領域の大きさや光ファイバの設定位置(測定距離)に関係なく温度測定が可能であることがわかる。すなわち、放射エネルギーが十分な場合、加熱する領域が小さいほどその領域内での温度分布を無視することができ、測定精度が上がることになる。

### 2.3.3 温度校正

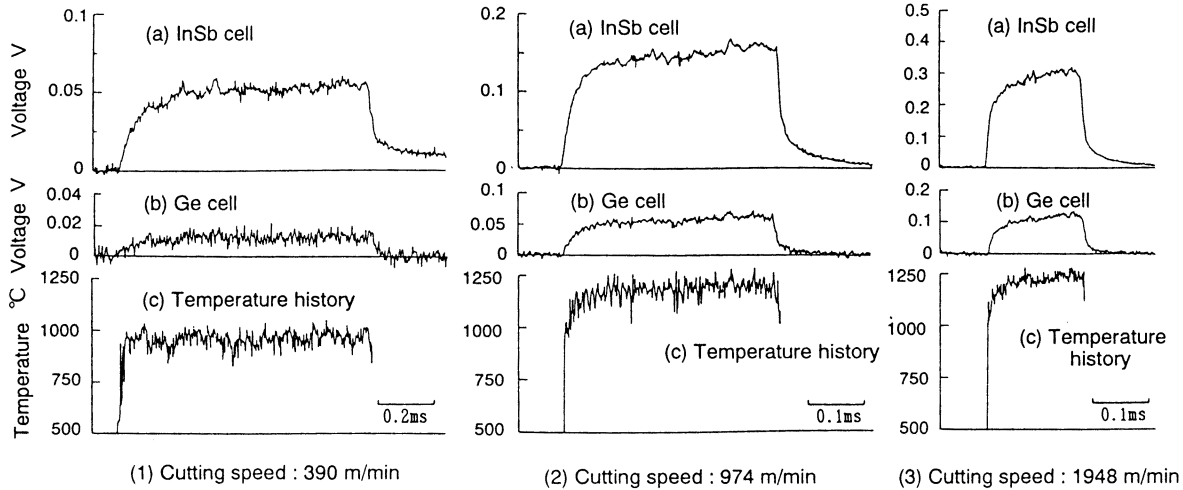


Fig. 9 Output wave

温度計の出力校正を図7に示す。校正には加工材料のS55C試片を電氣的に一定温度に加熱し、試片から輻射される赤外線を通じた工具を通して光ファイバで受光して検出することにより求めている。試片には裏側から測定面近傍にまで小孔があけてあり、白金-白金ロジウム熱電対を埋め込むことによって温度を監視している。図中の実線は式(1)を計算して得られる理論値であるが、測定結果と良い一致をみている。1100°C以上の温度校正には理論曲線を用いることにする。

### 3. 実験結果

図8は加工物表面に形成された切削条痕の断面形状を表面粗さ計で測定した結果である。円すい形工具によって正常に切りくずが生成されていることがわかる。

図9にInSb, Geセルの出力波形, およびこれらの波形の比をとることによって求めた温度波形を示す。切削速度を変化させており, (1)  $v=390$  m/min, (2)  $v=974$  m/min, (3)  $v=1948$  m/minの場合である。横軸が時間軸, 縦軸が出力電圧を表しており, Ge/InSbの比をとることによって温度に換算している。(c)の温度波形が工具-加工物接触面の温度変化を表している。

切削開始時における接触面温度の上昇は極めて急激であり, 図9(2)の場合, 切削開始後40 $\mu$ s(切削距離:0.65mm)において, 1100°Cまで上昇している。その後, 切削中の刃先温度はゆっくりと増加し, 1200°Cに達してほぼ定常状態となっている。図9(3)は切削速度が1948m/minの場合であるが, このときも切削開始後40 $\mu$ s(切削距離:1.3mm)においてすでに1200°Cにまで上昇しており, その後, 1250°Cの定常温度となっている。

図10は切削開始時における接触面温度の上昇速度を調べた結果である。図9において, 定常温度の80%の温度を求め, その温度に到達するに要する時間で除することにより求めている。図より, 温度上昇速度は,  $v=1500$  m/minでおよそ $10^8$  °C/sと極めて速いことがわかる。また, 切削速度が速くなると単位時間当たりの発熱量が増大することから, 上昇速度も大きくなり,  $v=2000$  m/minでは $10^8$  °C/sを越えている。

図11は切削速度を100~2300m/minまで変化させ, 切削速度が工具-加工物接触面温度に及ぼす影響を調べた結果である。温度としては定常温度をプロットしている。200m/minで750°C程度であったものが, 切削速度上昇とともに刃先温

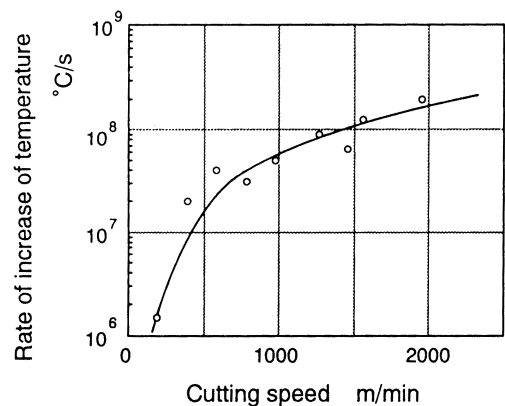


Fig. 10 Influence of cutting speed on increasing rate of temperature

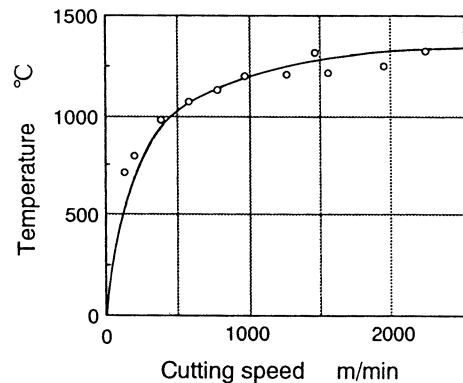


Fig. 11 Influence of cutting speed on temperature

度は高くなり, 1000 m/minで1200°Cに達している。しかし, 1000 m/min以上になるとその影響は小さくなり, 2000 m/min以上では1300~1400°Cに飽和する傾向を示している。

この測定結果は, 熱源となる工具-加工物接触面の温度が均一との仮定のもとに行った結果である。すなわち, この微小領域から輻射されるエネルギーの平均値を測定していることになる。ところが, 実際には微小な領域でも温度分布があり, 温度の分布状態に依存するが, この領域の最高温度は1500~1600°Cに達していると推定できる。この温度は, 工作物の鋼の融点に近い温度であり, 工具の冷却特性から工具刃先温度を推定した結果<sup>4)</sup>に極めて近い結果が得られていることになる。

#### 4. 結 言

円すい形工具により微小切削を行い、工具材料であるアルミナの有する透光性と、新しく開発した光カプラ型赤外線輻射温度計を組み合わせるにより、工具-加工物接触面の温度を測定し、その熱挙動について検討を加えた。得られた主な結果は次のようである。

- (1) 本研究で用いた温度測定装置は工具-加工物接触面温度のような微小領域の温度測定に極めて有効である。
- (2) 切削開始時における接触面温度の上昇は極めて急激であり、切削開始後 40  $\mu$ s で 1 000°C 以上に上昇している。
- (3) 温度上昇速度は非常に速く、切削速度 1 500 m/min の加工で 10<sup>8</sup> °C/s 程度である。
- (4) 接触面温度は切削速度の上昇とともに高くなるが、1 000 m/min 以上の速度になるとその影響は小さくなる。
- (5) 切削速度の上昇に伴い、接触面温度は 1 300~1 400°C

に飽和していく。

終わりに、円すい形工具の提供を受けた日本タングステン(株)に感謝します。

#### 参 考 文 献

- 1) 例えば, M. C. Shaw and A. Vyas : Heat-Affected Zones in Grinding Steel, Ann. CIRP, **43**, 1, (1994) 279.
- 2) J. P. Kottenstette : Measurement Tool-Chip Interface Temperatures, ASME, J. Eng. Ind., **108**, 5 (1986) 101.
- 3) T. Ueda, H. Tanaka, A. Torii and T. Sugita : Measurement of Grinding Temperature of Active Grain Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber, Ann. CIRP, **42**, 1, (1993) 405.
- 4) T. Ueda, A. Hosokawa and A. Yamamoto : Studies on Temperature of Abrasive Grain in Grinding - Application of Infrared Radiation Pyrometer, ASME, J. Eng. Ind., **107**, (1985) 127.
- 5) 上田隆司, 佐藤昌彦, 金田泰幸, 杉田忠彰 : 微小切削における切りくず生成温度 (第 1 報) ——光ファイバ型赤外線輻射温度計による刃先温度の測定, 精密工学会誌, **60**, 3 (1994) 383.
- 6) 上田隆司, 入山孝宏, 杉田忠彰 : レーザ照射部のフラッシュ温度測定——光カプラ型 2 色温度計の適用, 精密工学会誌, **61**, 2 (1995) 278.