

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—

上田隆司** 佐藤昌彦*** 金田泰幸† 杉田忠彰**

Chip Forming Temperature on Micro Cutting (1st Report)
—Measurement of Tool Tip Temperature by Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber—

Takashi UEDA, Masahiko SATO, Yasuyuki KANADA and Tadaaki SUGITA

A temperature at the tip of a conical cutting tool is measured immediately after micro chip forming using an infrared radiation pyrometer with an optical fiber. The fundamental structure of this pyrometer is that the infrared flux radiated from the tip of the conical cutting tool after cutting is accepted and transmitted to an infrared detector InSb by an optical fiber. The measurement accuracy when applying the pyrometer to the experiment is investigated theoretically. The temperature at the tip of the conical tool at various cooling times after cutting is measured using this pyrometer. A carbon steel and a tungsten are used as workpieces. A cooling characteristic of the tool is analyzed by heat transfer theory. Applying the theoretical results to the experimental results, the temperature of the tip of the conical tool just after cutting is estimated to be 1 500°C for carbon steel and 2 400°C for tungsten; 1 500°C is almost equal to the melting point of carbon steel.

Key words: micro chip forming, tool tip temperature, infrared radiation pyrometer, optical fiber, cooling characteristic, melting point

1. 緒 言

機械加工において、加工温度は材料表面における物理的性質や機械的性質に大きな影響を及ぼし、工具寿命や仕上面の品質を低下させる要因である。また、加工温度は切りくず生成の直接の結果であることから、切りくず生成機構を考える上では切削抵抗と並んで極めて重要な基本的要素である。しかしながら、切りくずの生成は微小な領域でしかも極めて短い時間に行われる特殊な状況にあるため、切りくず生成温度についてこれまで適当な測定手段がなく、詳細に検討した報告は少ない。

従来、加工温度の測定には、工具や工作物に熱電対を埋め込んだり、工具と工作物で熱電対を形成するなど、熱電対を利用した方法が広く用いられてきた。しかし熱電対は、高温接点の大きさに応答速度が変化すること、動いている物体の温度測定が困難であること、感温部が接触することで測定温度場が変化してしまうことなどの短所があるため、微小領域の温度測定に適用するのは難しい。これに対し、最近筆者らによって開発された光ファイバと光電変換素子を組み合わせた新しいタイプの赤外線輻射温度計は、コア径の小さな光ファイバを用いることにより、直径数十 μm の微小領域の温度を非接触で測定でき、しかも応答速度が極めて速いなど、数々の特長を備えている。この特長を活かしてこれまでに、研削砥粒温度の測定やファイナセラミックスの研削温度測定などに適用し、多くの知見を得ている¹⁾²⁾。

そこで本研究では、先端に丸みを持つ円すい形工具による微小切削をとりあげ、切りくずが生成されるとき温度について検討することにした。本論文では、まず光ファイバ型赤外線輻射温度計の測定精度について理論的に検討し、この切削過程に

適用したときの測定精度について調べている。次に、切削実験に本温度計を適用し、切削直後の工具刃先温度を空転時間を変化させて測定している。さらに、測定結果に伝熱理論を併用することにより、空転時間が工具刃先の温度低下に及ぼす冷却特性について調べ、切削時の工具刃先温度を推定している。

2. 実験方法

2.1 実験装置および実験条件

実験装置を図1に、実験条件を表1に示す。頂角120°、先端曲率半径100 μm の円すい形工具を縦軸エアスピンドルの外周部に取り付ける。スピンドルは無段変速で回転させることができる。工具材料には高温強度の大きな Si_3N_4 を用いている。

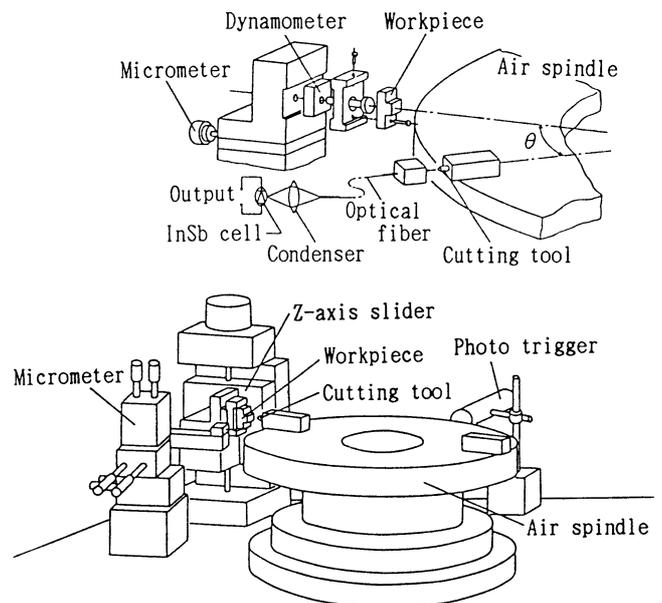


Fig. 1 Experimental arrangement

* 原稿受付 平成5年5月6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)
† 正会員 住友電工(株)(伊丹市昆陽北1-1-1)

Table 1 Experimental conditions

Cutting speed	1 347 m/min
Tool material	Si ₃ N ₄
Conical angle	120°
Work material	S 55 C, W
Depth of cut	30 μm

Table 2 Thermal properties of tool and work materials

	Si ₃ N ₄	S 55 C	W
Specific heat J/(kg·K)	8.00×10 ²	4.62×10 ²	1.32×10 ²
Thermal conductivity W/(m·K)	28.0	53.7	178.0
Density kg/m ³	3.23×10 ³	7.83×10 ³	1.94×10 ⁴
Thermal diffusivity m ² /s	1.08×10 ⁻⁵	1.65×10 ⁻⁵	6.95×10 ⁻⁵
Melting point °C	—	1 540	3 410

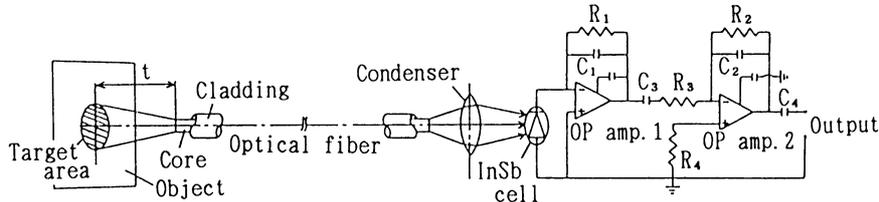


Fig. 2 Structure of I. R. P. using optical fiber system

被削材はZ軸スライダに取り付けてあり、垂直方向に一定速度で移動させることができる。微動装置によって被削材にあらかじめ切込みを与えておき、スライダを垂直方向に動かすことにより、切削を行うことができる。動力計（KISTLER Piezo Instrumentation）は被削材ホルダに固定されており、被削材に作用する切削抵抗の法線分力 F_n および接線分力 F_t が測定できる。温度測定用の光ファイバを、切削点から角 θ 離れたスピンドル外周部に設置しているファイバホルダに固定する。あらかじめ卓上読取望遠鏡により、光ファイバ受光面と工具先端との距離を 50 μm に、かつその中心軸が一致するように設置しておく。

切削点で高温に加熱された工具が光ファイバの感面を通過するとき、工具先端から放射される赤外線が光ファイバによって受光し、光電変換素子へ伝送して電気信号へ変換後、デジタルメモリーに記録する。サンプリング周波数は 2 MHz (0.5 μs/word) である。

本研究で測定される工具刃先温度は、工具が切削点から光ファイバまでの角 θ を進む時間だけ冷却された温度であるが、 θ を変化させて実験を行うことにより刃先温度の低下と冷却時間との関係を求めることができる。

実験に用いた工具 Si₃N₄ および被削材である炭素鋼 S 55 C, タングステン W の熱物性値を表 2 に示す。

2.2 温度測定方法

2.2.1 温度計の基本特性

本研究で使用する光ファイバ型赤外線放射温度計の基本構造を図 2 に示す。測定対象物から放射された赤外線は、光ファイバで受光・伝送され、集光レンズを介して光電変換素子に集光し電気信号に変換後、温度に換算される。このため温度計の基本的な性能は、主に光ファイバと光電変換素子の特性で決まる。光電変換素子として InSb を用いており、応答速度が 1 μs と高速であることから、作成した増幅回路の周波数特性により系全体の応答速度が決まり、約 5 μs となる。

この温度計を用いて温度 T の黒体から放射される赤外線エネルギーを測定したときに得られる出力、すなわち相対感度 A は、黒体の放射能を $J_\lambda(\lambda, T)$ 、光ファイバの分光透過率を $F(\lambda)$ 、集光レンズの分光透過率を $G(\lambda)$ 、光電変換素子の分光感度特性を $D(\lambda)$ とし、次式で与えられる。

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_0 J_\lambda(\lambda, T) \cdot F(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot D(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ただし、 β_0 は比例定数、 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ は測定可能な波長範囲である。

本研究ではより広範囲の温度を測定するため、石英光ファイバ（多モードステップ型、コア径 53 μm）、ふっ化物光ファイバ（多モードステップ型、コア径 49 μm）の 2 種類の光ファイバを用いている。石英光ファイバが $\lambda = 2 \mu\text{m}$ から伝送損失が大きくなるのに対し、ふっ化物光ファイバは 3.5 μm 程度の赤外線まで伝送できる²⁾。

式 (1) を石英光ファイバ、ふっ化物光ファイバについて計算した結果が図 3、図 4 である。波長 0.5 μm 以下では放射エネルギーが小さく無視できるので $\lambda_1 = 0.5 \mu\text{m}$ とおき、 λ_2 をパラメータとして計算している。長波長の赤外線を伝送できるふっ化物光ファイバの方がより低温まで測定できることがわかる。

図 5 に温度計の出力校正を示す。工具と同じ Si₃N₄ の試片を用い、電氣的に一定温度に加熱した試片から放射される赤外線

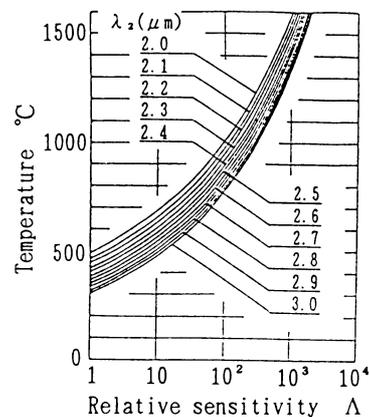


Fig. 3 Theoretical relative sensitivity of I. R. P. with quartz fiber

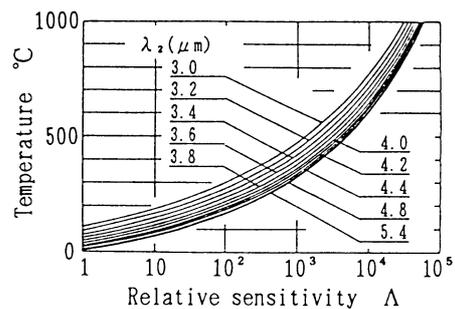


Fig. 4 Theoretical relative sensitivity of I. R. P. with fluoride glass fiber

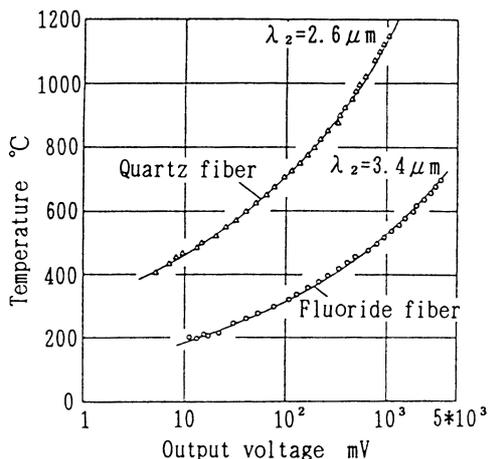


Fig. 5 Calibration curves of I. R. P.

を光ファイバで受光し、温度計の出力を記録する方法で求めている。図中の実線は、図3、図4の理論曲線を当てはめたもので、いずれも実験結果とよく一致している。図5からわかるように、石英光ファイバを約400°C以上の温度測定に、ふっ化物光ファイバを約200~600°Cの温度測定に使い分けることで、200°C以上の温度を精度よく測定できる。なお、1200°C以上の温度は図5に示す理論曲線を延長して求めている。

2.2.2 測定対象面が温度分布を有する場合の受光エネルギー
測定対象面が感温面よりも大きく、温度分布が一様な場合、すなわち面内の各点から均一に赤外線が放射されている場合には、光ファイバの設定位置や角度、測定対象面の形状は温度計の感度に影響しない⁴⁾。

ところで、切削後の工具先端の表面は当然温度分布を有しており、この温度分布が温度計の測定感度にどのように影響するのかを調べておく必要がある。そこで、中心温度が最高温度となる自乗温度分布をもった円形の測定対象物が温度計の感温面を通過するモデルを考え、このときに光ファイバが受光するエネルギーについて検討してみる。円すい形工具の先端は丸み(半径約100 μm)をもっており加熱されるのは刃先前面のみであるが、ここでは半径R_bの円形平面にモデル化して扱うことにする。

図6はその様子を示している。測定対象面と感温面とが重なった面S_{ob}内の微小面積dfから、立体角dΩで表されるコア内の微小面積dF'に単位時間に放射される波長範囲(λ-dλ/2~λ+dλ/2)のエネルギーde_λは、

$$de_{\lambda} = J_{\lambda n}(\lambda, T_r) \cdot d\lambda \cdot \cos \phi \cdot df \cdot d\Omega \quad (2)$$

ただし、J_{λn}(λ, T_r)はdfにおける法線方向のスペクトル強度

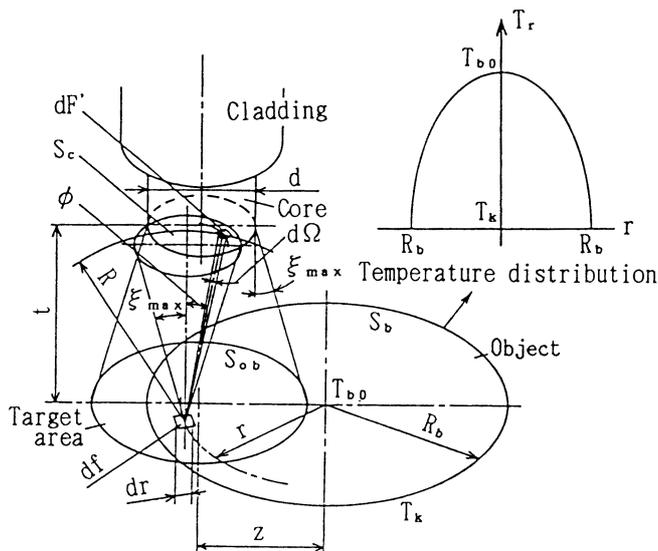


Fig. 6 Model to calculate the power received from heat source which has temperature distribution

であり、T_rはdfの位置での測定対象面の温度である。図6において、dΩ=dF'・cos φ/R²、df=2πr・drと表すことができ、

$$de_{\lambda} = 2\pi \cdot J_{\lambda n}(\lambda, T_r) \cdot d\lambda \cdot dF' \cdot \frac{r \cdot \cos^2 \phi}{R^2} \cdot dr \quad (3)$$

となる。

光ファイバが受光する全エネルギーEは、式(3)をdF'で積分し、さらにdfで積分すれば求めることができる。

$$E = \frac{C_0}{t^2} \int_{S_{ob}} \int_{S_c} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{\lambda n}(\lambda, T_r) \cdot r \cdot \frac{\cos^2 \phi}{R^2} \cdot d\lambda \cdot dF' \cdot dr \quad (4)$$

ただしλ₁, λ₂は光ファイバの赤外線透過波長で、ここでは石英光ファイバの場合を考え、λ₁=0.5 μm、λ₂=2.0 μmとした。C₀は定数。

具体例として、測定距離t=50 μm(感温面直径71.7 μm)、測定対象面の中心温度T_{b0}=1300 K、境界温度T_k=300 Kとし、その大きさを直径D_b=200 μm、500 μm、800 μmとした3通りの場合について、測定対象面が感温面を通過したときの光ファイバが受光するエネルギーの計算結果を図7(a)~(c)に示す。横軸は測定対象面と感温面の中心間距離であり、縦軸は測定対象面が1300 Kと一様な場合の最大受光エネルギーで正規化した値である。実線が測定対象面の温度が自乗分布を有する場合であり、温度分布が一様な場合の結果(破線)と比較している。(a)~(c)いずれの場合も、温度分布を有する場合、

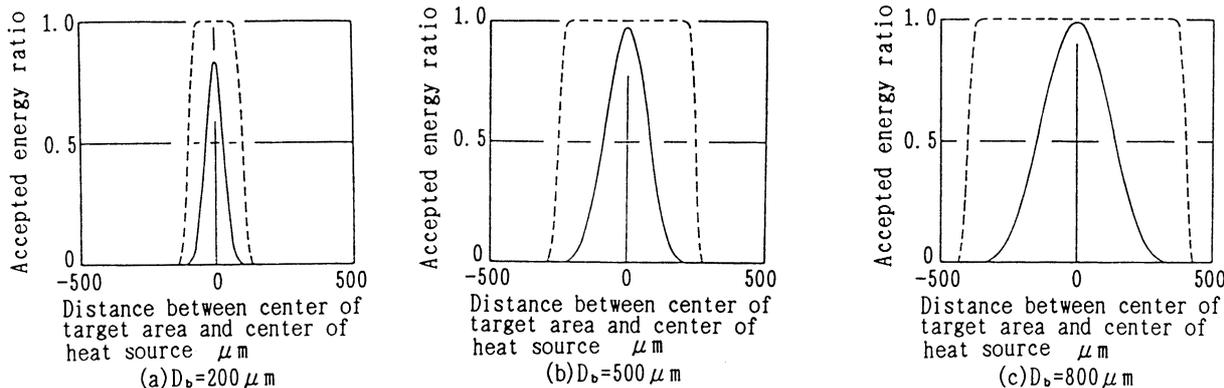


Fig. 7 Variation of total acceptable energy

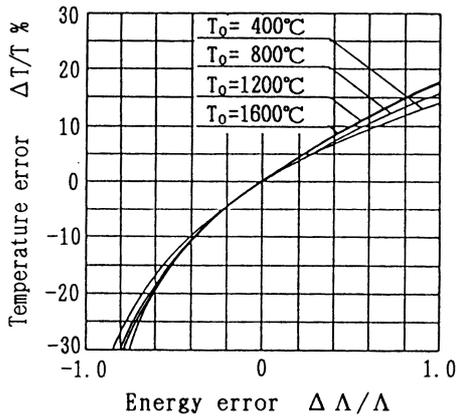


Fig. 8 Relation between errors of accepted energy and measured temperature

パルス幅は減少してしまうが、パルス高さの減少は小さく、熱源の直径が (a) 200 μm のもので 83.4%, (b) 500 μm のもので 97.1%, (c) 800 μm のもので 98.8% の出力が得られている。

そこで、得られた受光エネルギーの誤差が、温度に換算してどの程度の誤差になるのかを図3を用いて調べた結果を図8に示す。図中の T_0 は、測定対象物の温度を示し、横軸が0のときはその温度に等しい出力が得られることを示している。図8より、受光エネルギーに20%の損失 ($\Delta\Lambda/\Lambda = -0.2$) が生じて実際に得られる出力が真の出力の80%のときでも、その温度誤差 ($\Delta T/T$) はいずれの T_0 に対しても高々-5%程度であることがわかる。図8は石英光ファイバを用いた場合であるが、ふっ化物光ファイバを用いた場合でも同様、受光エネルギーの誤差が温度誤差に及ぼす影響は小さい。

したがって、本研究で測定される刃先温度の値は、高々5%以内の誤差でその最高温度を示していると考えてよいことがわかる。

3. 加熱・冷却特性の解析

切削点での工具刃先温度を推定するために、刃先温度の冷却特性を求める必要がある。切削時間が非常に短いことから、工具刃先は加工物との接触部とその近傍の層のみが高温となり、刃先中心部の温度変化を考える場合には、熱の流れを一次元として扱っても誤差は小さい。すなわち加熱される領域の大きさに比べて温度変化を扱う深さ方向の領域が小さいことから、工具を一次元半無限体として扱うことにする。

加熱過程を考えて、工具表面を $X=0$ にとり、工具先端面から流入する熱量が切削の間一定であると仮定すると、切削時間 t_h 後の工具内の温度分布は、次式で与えられる。

$$T(x, t_h) - T_i = \frac{q_a \xi}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x}{\xi}\right)^2\right\} - \frac{x}{\xi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\xi}\right) \right] \quad (5)$$

ただし、 $\xi = 2\sqrt{\alpha t_h}$ 、 q_a : 単位面積あたりの工具への流入熱量、 α : 温度伝導率、 k : 熱伝導率。

次に冷却過程を考えると、切削後、工具刃先は、流速 V 、温度 T_i の外気にさらされるため、工具表面の熱は工具端面から外気への熱伝達、内部への熱伝導によって冷却される。従って、空転時における工具刃先の冷却過程は、式(5)を初期条件とし、境界条件を

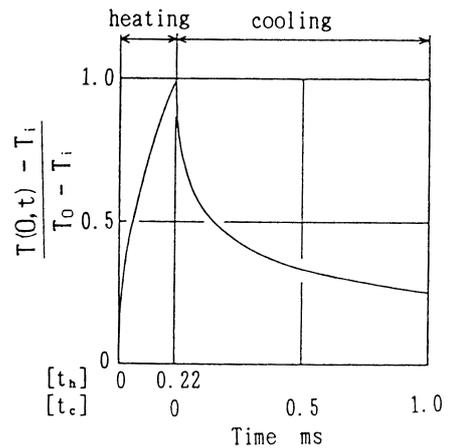


Fig. 9 Characteristics of heating and cooling on surface temperature of cutting tool tip

$$hA(T_i - T) = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad x=0 \quad (6)$$

として解けばよいことになる。ただし h は対流熱伝達係数。ところで、式(5)で表される初期条件は複雑すぎて適用できないため、次式で近似する。

$$T(x, 0) - T_i = (T_0 - T_i) \cdot \exp\left(-\frac{x}{\eta}\right) \quad (7)$$

この式で、 T_0 と T_i は、それぞれ、 $X=0$ 、 $X=\infty$ における初期温度であり、 η は初期温度分布を決定する定数である。これらの初期条件、境界条件を満たす熱伝導方程式の解は、冷却時間を t_c (切削終了時を $t_c=0$ とする) として、次式で与えられる¹⁾。ただし、 $\xi = h/k$ 、 $\gamma = \alpha t_c$ とする。

$$\begin{aligned} & \frac{T(x, t_c) - T_i}{T_0 - T_i} \\ &= \exp\left(-\frac{x}{\eta} + \frac{\gamma}{\eta^2}\right) - \left(\xi + \frac{1}{\eta}\right) \\ & \times \left[\frac{1}{2} \cdot \exp\left(\frac{\gamma}{\eta^2}\right) \cdot \left\{ \frac{1}{\xi + \frac{1}{\eta}} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\eta}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\gamma}} - \frac{\sqrt{\gamma}}{\eta}\right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{\xi - \frac{1}{\eta}} \cdot \exp\left(\frac{x}{\eta}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\gamma}} + \frac{\sqrt{\gamma}}{\eta}\right) \right\} \right. \\ & \left. - \frac{\eta}{\xi^2 - \frac{1}{\eta^2}} \cdot \exp(\xi x + \xi^2 \gamma) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\gamma}} + \xi \sqrt{\gamma}\right) \right] \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)は切削終了後の工具先端内部の温度分布の時間的变化を表しており、工具刃先表面温度の冷却特性は、式(8)において $x=0$ とすればよい。

式(5)、(8)を計算した結果を図9に示す。切削時間すなわち加熱時間 t_h は、測定結果において法線分力 F_n が働いている時間から、 $t_h = 0.22$ ms とした。式(8)を計算するためには対流熱伝達係数 h の値が必要であるが、この値を正確に決定するのは困難である。そこでここでは、工具ホルダ端面を正方形の平板と考え、そこにスピンドル周速に等しい流速の温度20°Cの空気が流れると仮定して求め、 $h = 92.5$ W/m²K とした。しかし、この値を1/2~2倍に変化して式(8)を計算してもその値にほとんど変化がないため、空転時における工具表面温度の冷却は、主として工具内部への熱伝導によってなされるといえる。図9より、切削の進行とともに工具先端の表面温度は上昇

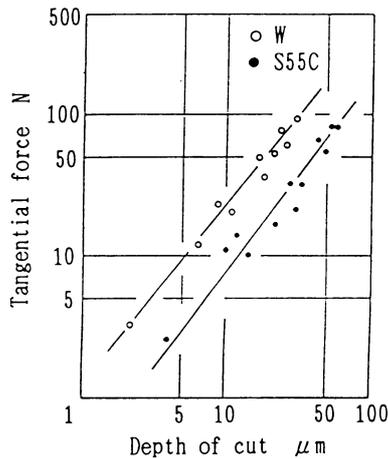


Fig. 10 Relation between tangential force and depth of cut

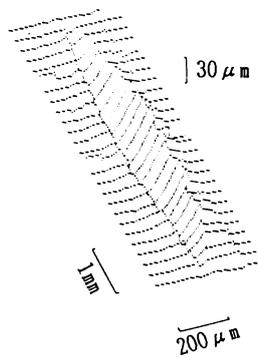


Fig. 11 Profile of cut groove (Depth of cut is 30 μm)

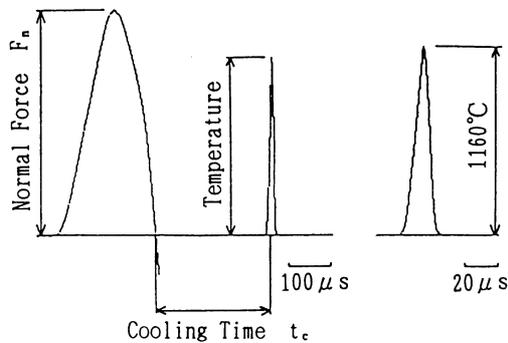


Fig. 12 Typical output wave of temperature

し、切削後は極めて急激に冷却され、わずか $t_c=0.15$ ms で $1/2$ の温度にまで低下することがわかる。

4. 実験結果および検討

4.1 切りくず生成状態

図 10 は、切込みに対する接線分力 F_t である。炭素鋼 S55C、タングステン W いずれの場合も両対数グラフ上で直線関係があることがわかる。また、図 11 は切削条痕を表面粗さ計を用いて測定した結果である。これらの結果より、円すい形工具が正常に切りくずを生成していることがわかる。

4.2 工具刃先温度

工具刃先温度の測定波形の代表例を図 12 に示す。パルス状の波形が得られ、パルス高さが温度、パルス幅が熱源の大きさを表している。冷却時間 t_c は、法線分力 F_n が 0 となる点を切削終了点とし、温度出力のピークが現れるまでの時間とした。

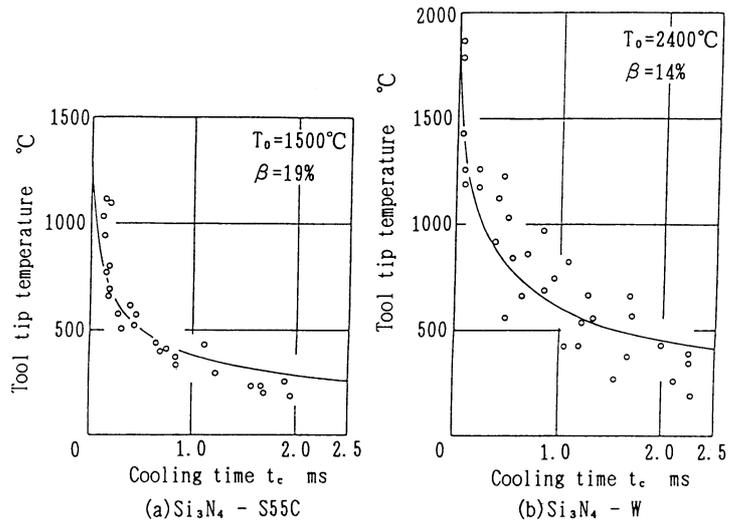


Fig. 13 Change of tool tip temperature after cutting

図 13 (a), (b) に、冷却時間と刃先温度の関係を示す。冷却時間の単位は ms である。プロットは実際に測定された温度であり、実線は式 (8) を切削終了時の温度 T_0 をパラメータとして計算した中で、実験データに最もよく合うものである。実際に測定された温度のうち最も高かったのは、S55C を被削材とした場合で 1150°C 、W を被削材とした場合で 1900°C である。切削後の工具刃先温度の冷却は極めて速く、切削後 1 ms で 500°C 程度まで低下している。求めた冷却曲線から切削終了時の刃先温度 T_0 を推定したところ、S55C では $T_0=1500^\circ\text{C}$ と被削材の融点に近い温度に達しており、W でも 2400°C と極めて高い温度に達している。切削時間 t_n が 0.22 ms であることから、工具刃先は極めて短時間で加熱されることがわかる。特に W を被削材とした場合には、工具材料である Si_3N_4 の分解温度 (N_2 中で 1840°C) を越えており、工具にとって極めて過酷な状態になっているといえる。

図中の β は工具への熱分配率であり、先の温度 T_0 を式 (5) に代入して工具への流入熱量 q_a を求め、 F_t から求まる全発生熱量で割ることによって求めている。W の方が S55C より熱伝導率が大きいため、熱が被削材へ流れやすく、その結果、工具への熱分配率は小さくなっている。なお、工具や被削材の熱物性が熱分配率に及ぼす影響については次報で詳細に述べる。

5. 結 言

円すい形工具を用いて微小切削を行い、切りくず生成直後の工具先端温度を光ファイバ型赤外線放射温度計で測定した。その結果、刃先温度は短時間の切削で高温に達するが、切削終了後、空転中に極めて速く冷却される。伝熱理論を併用することにより、工具先端温度の冷却特性を調べ、切りくず生成時の工具刃先温度を推定した結果、S55C を被削材とした場合で 1500°C 、W の場合で 2400°C となった。

参 考 文 献

- 1) 上田隆司, 細川 晃, 山本 明: 平面研削における砥粒切れ刃の熱挙動, 精密機械, 51, 9 (1985) 1732.
- 2) 上田隆司, 山田啓司, 杉田忠彰: ふっ化物光ファイバを用いた赤外線放射温度計による常圧焼結 Si_3N_4 の研削温度測定, 精密工学会誌, 56, 8 (1990) 1452.
- 3) 上田隆司, 金田泰幸, 佐藤昌彦, 杉田忠彰: 光ファイバ型赤外線放射温度計による加工温度の測定 (温度計の特性), 日本機械学会論文集, 58, 545, C (1992) 302.