



微小切削における切りくず生成温度 (第2報)*

—熱分配率への切削速度・材料物性の影響—

上田 隆 司** 佐藤 昌彦*** 杉田 忠彰**

Chip Forming Temperature on Micro Cutting (2nd Report)

— Influence of Cutting Speed and Material Properties on Thermal Partition Coefficient —

Takashi UEDA, Masahiko SATO and Tadaaki SUGITA

The influence of cutting speed, and thermal properties of the work material and the tool material on the thermal partition coefficient is investigated theoretically and experimentally. The temperature at the top of a conical tool is measured immediately after micro chip forming using an infrared radiation pyrometer with an optical fiber. A carbon steel, a titanium, a molybdenum and a tungsten are used as work materials, and a silicon nitride Si₃N₄, a zirconia ZrO₂ and a diamond are used as tool materials. The cutting temperature increases in proportion to the 1/2 power of cutting speed and saturates to the melting point of work material. The fraction of heat conducted into the cutting tool is independent on the cutting speed, and it becomes larger as the thermal conductivity of workpiece is smaller or that of tool material is larger. In the diamond tool which has the highest thermal conductivity, its thermal partition coefficient is the highest, but the tool tip temperature is the lowest.

Key words: micro cutting, cutting temperature, infrared radiation pyrometer, optical fiber, thermal partition coefficient, diamond tool, melting point

1. 緒 言

機械加工の際に発生する加工熱は、工具や加工物に流入して温度上昇を引き起こし、工具寿命の低下や仕上面品質の劣化など悪影響を招くことが多い。このため、加工温度を測定することは熱損傷の予測や切削機構に及ぼす熱の影響を論じるために重要であり、これまでも多くの研究がなされている¹⁾、しかし切込み量の小さな微小切削においては、切りくずの生成が微小な領域でしかも高い切削速度で行われる特殊な状況下にあるため、加工温度の測定が難しく、詳細に検討した報告は少ない。

前報²⁾では、光ファイバと赤外線検出素子を組み合わせた温度計の諸特性を調べるとともに、円すい形工具による微小切削実験を行い、切削後の工具刃先温度を測定して冷却特性を求めることにより切削点での切れ刃温度を推定できることを示した。

本報では、前報と同様の方法によって実験を行い、切削速度、被削材材質、工具材質が切れ刃温度、熱分配率に及ぼす影響について検討した。

2. 基 礎 理 論

2.1 切れ刃の加熱・冷却過程

前報で述べたように、本研究では切削後の刃先温度の冷却特性から切削点での切れ刃温度を推定しているため、切削後の刃先温度の冷却過程を理論的に求める必要がある。切削直後の工具内温度分布は、工具を1次元半無限体とみなし、工具表面 $x=0$ から流入する熱量が切削時間 t_h の間一定であると仮定すると、次式で与えられる。

$$T(x, t_h) - T_i = \frac{\beta q_a \xi}{k_1} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x}{\xi}\right)^2\right\} - \frac{x}{\xi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\xi}\right) \right] \quad (1)$$

ただし、 $\xi = 2\sqrt{\alpha_1 t_h}$ 、 q_a : 単位面積当たりの発熱量、 β : 発生した熱の工具への分配率、 α_1 : 工具の温度伝導率、 k_1 : 工具の熱伝導率。

切削後の空転時において、工具表面から流入した熱は、外気への熱伝達、内部への熱伝導によって広がり、刃先温度は低下する。冷却時間 t_c における刃先温度は式(1)を初期条件、対流熱伝達を境界条件として熱伝導方程式を解くと次式で与えられる³⁾。

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

ただし、 $\zeta = h/k_1$ 、 $\gamma = \alpha_1 t_h$ 、 h は熱伝達率、 η は熱伝導方程式を解くために $t_c = 0$ における工具内温度分布を

$$T(x, 0) - T_i = (T_0 - T_i) \cdot \exp\left(-\frac{x}{\eta}\right) \quad (3)$$

と近似したときに用いる比例定数、 T_0 は $t_c = 0$ での $x=0$ における温度、 T_i は $t_c = 0$ での $x=\infty$ における温度。

式(2)で表される刃先温度の冷却特性と実験結果から、切削点における切れ刃温度 T_0 を推定する。

2.2 熱定数の温度変化について

2.1 節では、工具の熱物性値が温度によらず一定であると仮定して刃先の加熱・冷却過程の解析を行ったが、実際には熱物性値は温度によって変化する。そこで、温度による工具の熱物

* 原稿受付 平成7年6月30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)

Table 1 Thermal properties of Si₃N₄ used in FEM analysis

$$k \text{ (W/m}\cdot\text{K}^{-1}\text{)} = 0.399 \times 10^{-5} T^2 - 0.185 \times 10^{-1} T + 0.332 \times 10^2$$

$$c \text{ (J/kg}\cdot\text{K}^{-1}\text{)} = -0.324 \times 10^{-3} T^2 + 0.964 T + 0.536 \times 10^3$$

k; Thermal conductivity, *c*; Specific heat, *T*; Temperature K

Table 2 Thermal properties of tools and workpieces

	Si ₃ N ₄	ZrO ₂	Diamond	Ti	S 55 C	Mo	W
Specific heat cal/kg·K ⁻¹	190.5	114.3	124.0	124.3	110.0	59.1	31.5
Thermal conductivity W/m·K ⁻¹	28.0	3.0	900	21.9	53.7	138.0	178.0
Density kg/m ³	3.23 × 10 ³	5.56 × 10 ³	3.52 × 10 ³	4.50 × 10 ³	7.83 × 10 ³	1.02 × 10 ⁴	1.94 × 10 ⁴
Thermal diffusivity m ² /s	1.08 × 10 ⁻⁵	1.12 × 10 ⁻⁶	4.92 × 10 ⁻⁴	9.31 × 10 ⁻⁶	1.65 × 10 ⁻⁵	5.44 × 10 ⁻⁵	6.95 × 10 ⁻⁵
Melting point °C				1 668	1 538	2 620	3 410

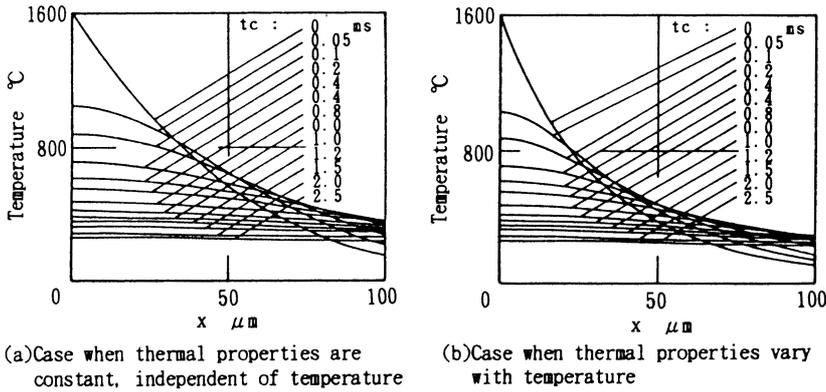


Fig. 1 Temperature distribution in cutting tool

性値の変化を考慮した場合の刃先の加熱・冷却過程を有限要素法を用いて計算し、2.1節で求めた解析解と比較検討した。計算に用いた工具材質はSi₃N₄であり、温度による変化を考慮した場合の熱物性値を表1に、温度によらず一定とした場合の熱物性値を表2に示す。図1は冷却時間の経過に伴う工具内部の温度分布の変化を表したものであり、切削によって加熱される切れ刃の温度が1600°Cまで上昇すると仮定している。工具に加えた熱量は、熱物性値が温度によらず一定とした場合が8.0 × 10⁸ W/m²、変化する場合が7.2 × 10⁸ W/m²であり、熱物性値の変化を考慮する場合の方が流入熱量が少ない。また、図1(b)より、熱物性値が変化するとした場合の方が工具内部の温度勾配は急である。

図2は工具表面(x=0)における温度の冷却特性を比較したものである。工具表面の温度変化に関しては、熱物性値の変化を考慮した場合としない場合との間に、大きな違いがないことが分かる。したがって、切削点の切れ刃温度を推定するために用いる式(2)においては、熱物性値の変化の影響は小さい。

2.3 工具への熱分配率

切りくずの生成によって発生した熱の分配率についてはこれまでにも多くの解析が行われているが、本研究では図3のような、半無限体(被削材)の上を、熱源を伴った半無限体(工具)が移動するような最も単純なモデルを考えて工具への熱分配率を求める。被削材の温度上昇を考えると、z < 0の半無限体上を、単位面積当たりの発熱量がq_a、1辺2lの正方形熱源が表面z=0上を速度vで移動していることになるから、熱源が時刻tにおいて原点に達したときの半無限体内の点(x, y, z)の温度は、次式で与えられる⁴⁾。

$$T_2 = \frac{(1-\beta)q_a\alpha_2}{4k_2(\pi\alpha_2)^{3/2}} \int_0^t \frac{dt'}{(t-t')^{3/2}} \int_{-1}^1 dx' \int_{-1}^1 dy'$$

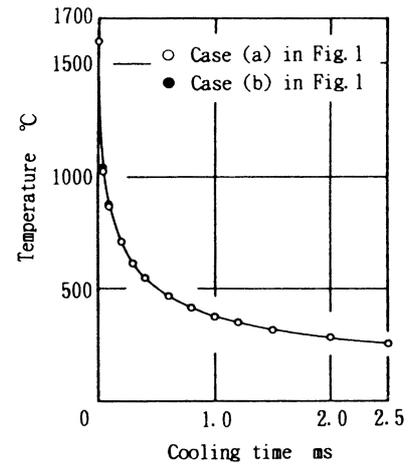


Fig. 2 Influence of thermal properties on cooling characteristics of tool tip

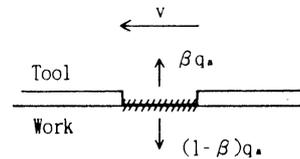


Fig. 3 Moving heat source model

$$\times \exp\left[-\frac{\{x-x'+v(t-t')\}^2 + (y-y')^2 + z^2}{4\alpha_2(t-t')}\right] \quad (4)$$

ただし、k₂:被削材の熱伝導率、α₂:被削材の温度伝導率。また工具の温度上昇を考える場合には、熱源が静止しているため式(4)でv=0とし、1-βをβとして与えられる。工具への熱分配率は、加工物と工具との接触面の平均温度が等しいとして求める。すなわち被削材側の接触面平均温度 T_{2a}は、

$$T_{2a} = (1-\beta) \frac{q_a\alpha_2^{3/2}}{2\sqrt{\pi}k_2l^2} \int_0^t \sqrt{t-t'} dt' \times \left\{ \Phi\left(\frac{2l+v(t-t')}{2\sqrt{\alpha_2}\sqrt{t-t'}}\right) + \Phi\left(\frac{|-2l+v(t-t')|}{2\sqrt{\alpha_2}\sqrt{t-t'}}\right) - 2\Phi\left(\frac{v(t-t')}{2\sqrt{\alpha_2}\sqrt{t-t'}}\right) \right\} \cdot \Phi\left(\frac{l}{\sqrt{\alpha_2}\sqrt{t-t'}}\right) = (1-\beta)I_w \quad (5)$$

ただし、

$$\Phi(\omega) = \omega \cdot \text{erf}(\omega) - \frac{1}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\omega^2) \quad (6)$$

であり、工具側の接触面平均温度 T_{1a}は

$$T_{1a} = \beta \frac{q_a\alpha_1^{3/2}}{\sqrt{\pi}k_1l^2} \int_0^t \sqrt{t-t'} dt' \left\{ \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_1}\sqrt{t-t'}}\right) \right\}^2$$

Table 3 Cutting conditions

Work material	S 55 C, Ti, Mo, W
Tool material	Si ₃ N ₄ , ZrO ₂ , Diamond
Conical angle	120°
Cutting speed	103.6-1 347 m/min
Depth of cut	30 μm

$$= \beta I_t \tag{7}$$

であるから、

$$\beta = \frac{I_w}{I_t + I_w} \tag{8}$$

となる。

3. 実験装置・実験条件

実験装置は前報²⁾と同様である。縦軸のエアスピンドルに取り付けたアルミニウム製の円盤の外縁部に円すい形工具を固定し、上下方向に移動可能な送りテーブルに被削材を取り付けて切削を行っている。動力計は、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、接線分力が測定できる。また、温度測定用の光ファイバを光ファイバホルダに固定し、切削点から角θ離れた円盤の外周部に設置する。光ファイバの受光面と工具先端との距離を50 μmとし、その中心軸が一致するように設置する。切削点で高温に加熱された工具が光ファイバの感温面を通過するとき、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である。θを変えて刃先温度の測定を行うことにより、切削後の刃先の冷却特性を求めることができる。

実験条件を表3に示す。

4. 実験結果および検討

工具にはSi₃N₄, ZrO₂, ダイヤモンドでできた円すい形工具（頂角120°，先端曲率半径100 μm），被削材には炭素鋼（S 55 C），チタン（Ti），モリブデン（Mo），タングステン（W）を用いて実験を行った。

4.1 切削速度の影響

4.1.1 比切削エネルギー

切削速度、切込みaが比切削エネルギーk_sに及ぼす影響を調べた。一例として工具にSi₃N₄，被削材にTiを用いたときの切込みと比切削エネルギーの関係を図4に示す。比切削エネルギーは、切削に要したエネルギーを切りくず除去体積で除して求めた値であり、除去体積は被削材上の切削痕のプロフィールから求めた。図4より、切削速度による比切削エネルギーの

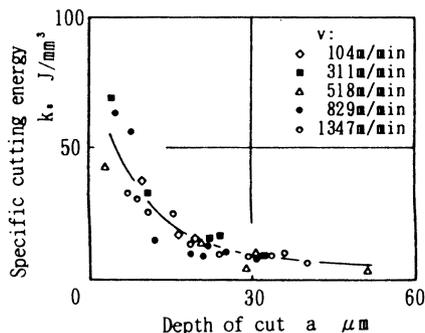


Fig. 4 Relation between specific cutting energy and depth of cut at various cutting speeds

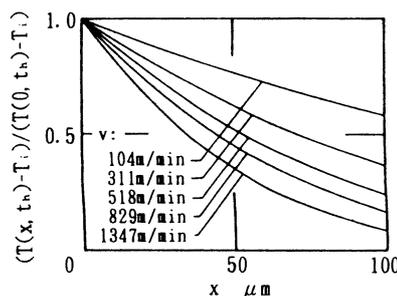


Fig. 5 Temperature distribution in tool just after cutting at various cutting speeds

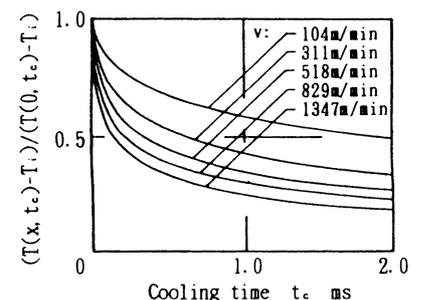


Fig. 6 Cooling characteristics of tool tip at various cutting speeds

変化は小さいことが分かる。他の材料についても同様の傾向を示すことから、計算に用いる切削抵抗は、k_s-a 線図から求めることにする。

4.1.2 冷却過程への影響

本節では、2章に示した解析により、各切削速度でのSi₃N₄工具の刃先温度の冷却特性を求める。切込みが一定の場合には、切削距離が等しいことから、切削速度によって工具刃先の加熱時間が変化する。式(1)より求めた切削直後の工具内温度分布を図5に示す。刃先の加熱時間は切削抵抗の法線分力が作用している時間とした。図より、切削速度が大きいくほど切削時間が短いため、工具内部の温度勾配は急になることがわかる。図6は、各切削速度における工具表面温度の冷却特性である。切削速度が大きいくほど工具表面温度の冷却が速くなっている。切削直後の工具内部の温度勾配が急であり、冷却時における工具内部への熱伝導が速くなるためである。

4.1.3 刃先温度と冷却特性

Si₃N₄工具でTiを切削速度518 m/min, 1 347 m/minで切削した場合の刃先温度と冷却時間の関係を図7(a), (b)に示す。図中のプロットは測定結果であり、実線は式(2)を切削点での切れ刃温度T₀をパラメータとして計算したもので、実験値とよく合うものである。式(2)の冷却特性と実験結果がよく一致していることが分かる。

各切削速度と切削点での切れ刃温度の関係を調べた結果を図8に示す。図中のプロットは実験結果であり、実線は以下の式(10)から求めたものである。

式(1)においてx=0とおくと

$$T_0 - T_i = \frac{2\beta q_a \sqrt{\alpha_1 t_h}}{k_1 \sqrt{\pi}} \tag{9}$$

であり、この式を切削エネルギーU，平均接触面積A，切削長さL，切削速度vを用いて変形すると、

$$T_0 - T_i = \frac{2\beta U \sqrt{\alpha_1}}{k_1 A \sqrt{\pi} \sqrt{L}} \cdot \sqrt{v} \tag{10}$$

となる。図中の実線は、√vの係数2βU√α₁/(k₁A√π√L)が切削速度によらず一定であるとし、β=0.31（図9に示す実験値の平均値），U=0.076 J，A=1.51×10⁻⁷ m²，L=0.005 mとして求めたものである。図より両者はよく一致しており、切削点での切れ刃温度T₀は切削速度の0.5乗にほぼ比例して上昇している。

4.1.4 工具への熱分配率

式(1)でx=0において

$$\beta = \frac{k_1 \sqrt{\pi} (T_0 - T_i)}{2q_a \sqrt{\alpha_1 t_h}} \tag{11}$$

と変形すれば、実験により求めた切削点での温度T₀から工具

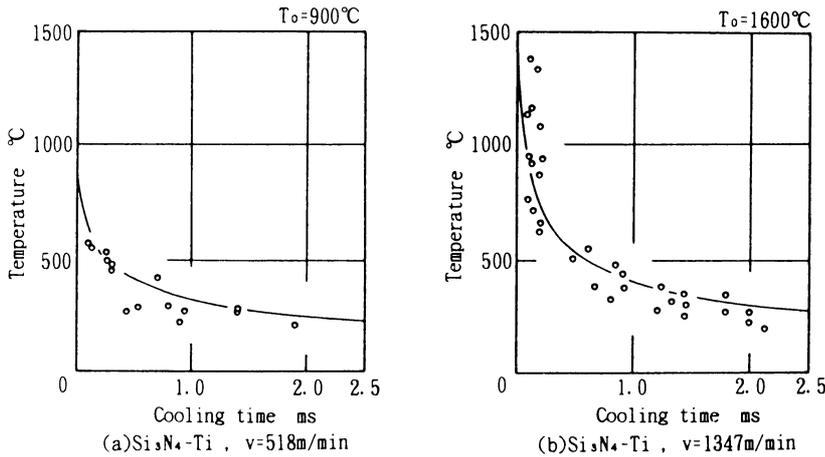


Fig. 7 Tool tip temperature after cutting

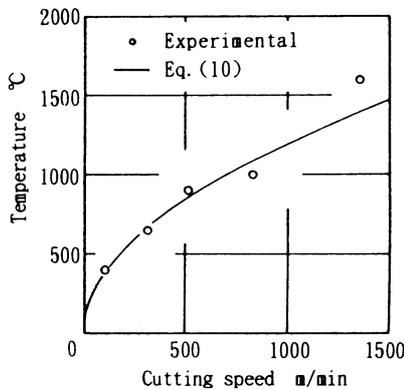


Fig. 8 Influence of cutting speed on temperature of tool tip
Cutting tool: Si₃N₄, Work material: Ti

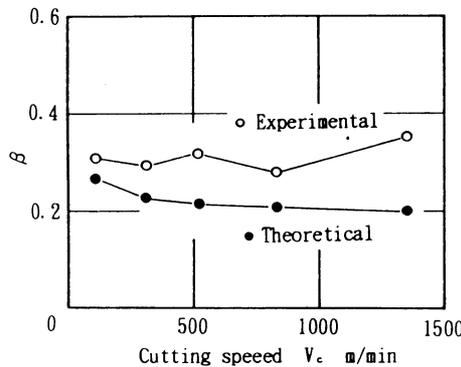


Fig. 9 Influence of cutting speed on thermal partition coefficient of tool

Table 4 Cutting temperature and thermal partition coefficient β , Tool: Si₃N₄

Workpiece	S 55 C	Ti	Mo	W
T_0 °C	1500	1600	1800	2400
β	0.19	0.36	0.31	0.14

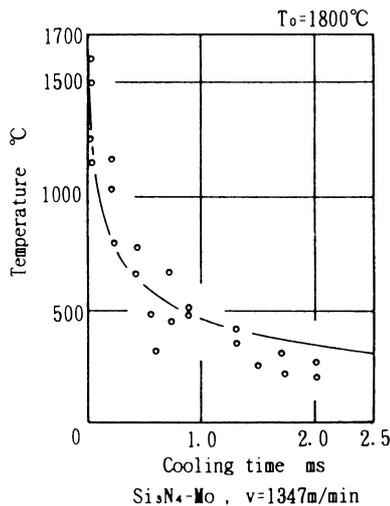


Fig. 10 Tool tip temperature after cutting

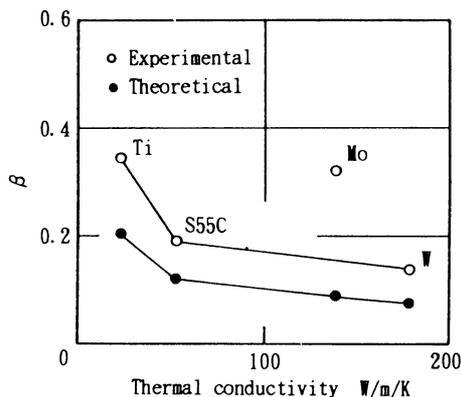


Fig. 11 Influence of thermal conductivity of work material on thermal partition coefficient β of tool

への熱分配率を求めることができる。Tiを被削材とした場合のSi₃N₄工具への熱分配率と切削速度との関係を図9に示す。これより工具への熱分配率は、実験値、計算値ともに切削速度によらずほぼ一定であるといえる。

4.2 被削材材質の影響

被削材としてS 55 C, Ti, Mo, Wを用いて切削実験を行い、

それぞれの被削材における切削温度、熱分配率について調べた。工具はSi₃N₄を用いている。

4.2.1 刃先温度と冷却曲線

一例として、Moを被削材、Si₃N₄を工具とした場合の刃先温度の測定結果を図10に示す。測定された刃先温度のうち最も高かったのは1590°Cであり、切削後の刃先温度は切削後1.0 msで500°C程度まで低下している。これらの実験結果に式(2)を適用することにより、切削点での切れ刃温度が1800°Cであると推定できる。他の被削材に対しても同様にして求めた結果を表4に示す。切りくず生成時における切削点の切れ刃温度は、Wで最も高く、Mo, Ti, S 55 Cの順に低くなっている。この順は被削材の融点と関連があり、融点の低いTi, S 55 Cの場合には融点に近い温度まで上昇している。

4.2.2 熱分配率

被削材の熱伝導率がSi₃N₄工具への熱分配率に及ぼす影響を図11に示す。切削速度が1347 m/minの場合であり、理論値は式(8)より求めている。理論値に比べて実験値の方が少し大きくなっているが、両者の傾向はよく合っており、被削材の熱伝導率が大きくなるほど工具への熱の分配率は小さくなっている。Moがこれらの傾向とはずれているが、刃先温度が高い割には切削抵抗が小さく測定されたためである。

4.3 工具材質の影響

工具にSi₃N₄, ZrO₂, ダイヤモンドを用い、被削材にS 55 Cを用いて切削実験を行った。切削速度は1347 m/min, 切込みは30 μ mである。

4.3.1 冷却過程への影響

式(1)によって計算した各工具における切削直後の工具内温度分布を図12に示す。Si₃N₄に比べてZrO₂は温度伝導率が小さいため、表面の温度勾配は急である。また、ダイヤモンドは温度伝導率が大きいため、工具内部まで熱が伝導していることが分かる。ところが、式(2)で得られる切削後の工具表面温度の冷却特性は、図13に示すように工具材質による差が小さい。これは、温度伝導率が大きい場合には工具表面温度の冷却は速いが、大きな熱伝導率のために切削時の熱流入量が大きく、工具内の温度勾配が緩やかになり、結果として冷却が遅くなるためと考えられる。逆に、温度伝導率が小さい場合には冷却は遅いと考えられるが、熱伝導率が小さいために工具の表層部のみが加熱されて温度勾配が急になり、結果的に冷却は速くなる。これらの要因により、ZrO₂, Si₃N₄, ダイヤモンドの工具表面温度の冷却特性にはほとんど差が生じないものと考えられる。

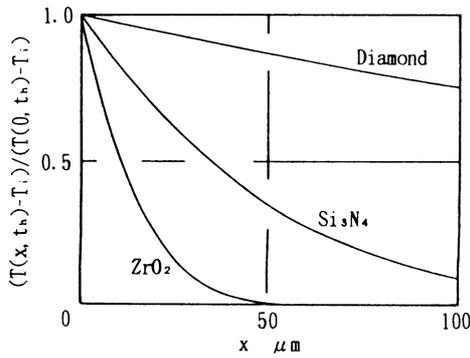


Fig. 12 Comparison of temperature distribution in tool just after cutting

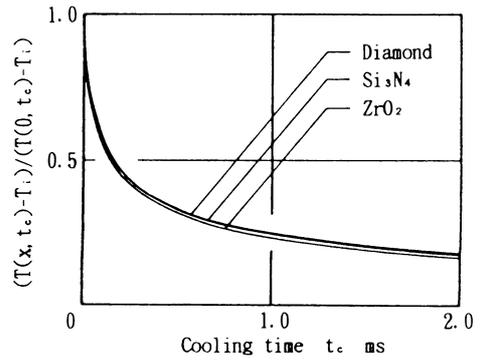


Fig. 13 Cooling characteristics of tool tip

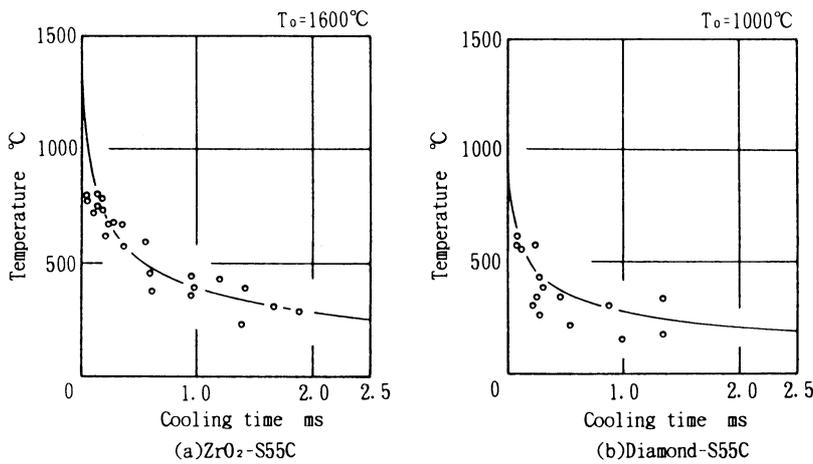


Fig. 14 Tool tip temperature after cutting

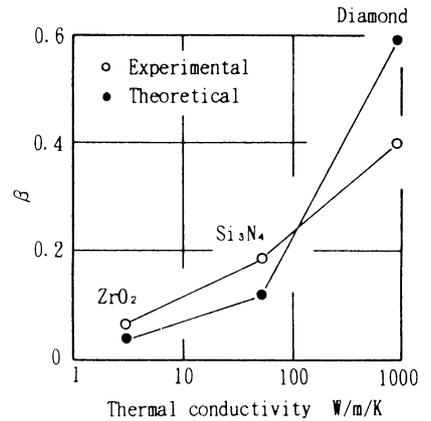


Fig. 15 Influence of thermal conductivity of tool material on thermal partition coefficient β of tool

4.3.2 刃先温度の測定と工具への熱分配率

ZrO₂, ダイヤモンド工具によって S 55 C を切削した場合の刃先温度の測定結果を図 14 (a), (b) に示す。

式 (2) を用いて推定した切削終了時の刃先温度 T_0 は、ダイヤモンドで $T_0=1000^\circ\text{C}$ 、ZrO₂ で $T_0=1600^\circ\text{C}$ と熱伝導率の大きいダイヤモンドではかになくなっていく。これらの結果をもとに工具への熱の分配率を求めた結果が図 15 および表 5 である。理論値は式 (8) で計算している。図 15 より、理論値と実験値がよくあっていることが分かる。また、工具材の熱伝導率の影響が大きく、熱伝導率の大きいダイヤモンド工具を用いた場合は ZrO₂ 工具の約 6 倍となっている。これは、熱伝導率の大きなダイヤモンド工具を用いた場合、切削点で発生した熱の多くがダイヤモンドへ流入するもの、伝導によって工具内部へ拡散するため刃先温度の上昇は小さく、このため、さらに大量の熱が工具側に流入する結果になると考えられる。ところが ZrO₂ の場合では、熱伝導率が小さいために切削点で発生した熱が ZrO₂ へ流入しにくく、さらに工具内部へ拡散しにくい。このため、少量の熱量で刃先温度が上昇すると考えられる。

5. 結 言

本研究では円すい形工具を用いて微小切削実験を行い、切削直後の工具刃先温度の冷却特性を測定することにより、切削点における工具刃先温度を求めた。切削速度、被削材、工具材質を変えて切削実験を行い、それらが切れ刃温度や工具への熱分配率に及ぼす影響について検討した結果、得られた結論を以下に示す。

(1) 切削速度を 100~1350 m/min の範囲で変化させて切

Table 5 Cutting temperature and thermal partition coefficient β , Workpiece : S 55 C

Tool	ZrO ₂	Si ₃ N ₄	Diamond
T_0 °C	1600	1500	1000
β	0.062	0.19	0.43

削点での切れ刃温度を求めた結果、切れ刃温度は切削速度の 0.5 乗にほぼ比例して上昇する。

- (2) S 55 C, Ti, Mo, W と融点の異なる被削材に対して切れ刃温度を求めた結果、融点の高い材料ほど高温となり、S 55 C, Ti では被削材の融点に近い温度まで上昇している。
- (3) 工具への熱分配率は切削速度によらずほぼ一定である。
- (4) 工具への熱分配率は、被削材の熱伝導率が小さいほど、工具の熱伝導率が大きいほど大きい。
- (5) 工具材質としてダイヤモンドを用いた場合、工具への熱分配率は大きい、切削点での温度上昇は小さい。

参 考 文 献

- 1) J. P. Kottenstette : Measuring Tool-Chip Interface Temperatures. Trans. ASME, J. Eng. Ind., 108, (1986) 101.
- 2) 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放射温度計による刃先温度の測定, 精密工学会誌, 60, 3 (1994) 383.
- 3) 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.
- 4) J. C. Jaeger : Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts, Proc. Roy. Soc. New South Wales, 76, (1942) 203.