

Measurement of Tool-Chip Interface Temperature in Turning Using Two-Color Pyrometer

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/37003

旋削加工における工具-切りくず接触面温度の測定*

Mahfudz Al Huda^{*1}, 山田 啓司^{*2}, 上田 隆司^{*2}

Measurement of Tool-Chip Interface Temperature in Turning Using Two-Color Pyrometer

Mahfudz Al Huda, Keiji YAMADA and Takashi UEDA

The temperature of interface between a cutting tool and a chip in dry and wet turning is measured using two-color pyrometer with a fused fiber coupler. A translucent Alumina sintered under HIP (Hot Isostatic Pressing) is used as the cutting tool, and 0.45% carbon steel (S45C) is used as a workpiece. The water soluble fluid (Sunlight TC-800) is used as the cutting fluid, and is introduced onto the rake surface of the tool with a nozzle (diameter: 5 mm). The infrared rays radiated and transmitted through the translucent tool are accepted by an optical fiber, and separated to two optical fibers at fused fiber coupler. Each fiber leads the infrared ray, respectively, to two infrared detectors of different spectral sensitivity. Temperature is obtained by calculating the ratio of the output voltage from these two detectors. The result obtained are as follows: (1) The technique developed is suitable for measuring the interface temperature between a cutting tool and a chip. (2) The interface temperature is highly affected by the cutting speed, and the temperature increases very rapidly with the increase of cutting speed. (3) The interface temperature reduced 30°C in the wet cutting. Finally, the temperature distributions on the cutting tool and the work material are analyzed by using a finite element method (FEM). Good agreement is obtained between the analytical results and the experimental ones.

Key Words: Cutting Tool, Cutting Temperature, Cutting Fluid, Finite Element Method, Temperature Measurement, Tool-Chip Interface Temperature, Two-Color Pyrometer, Infrared Radiation Pyrometer, Wet Cutting

1. 緒 論

旋削加工において、切削中になされる仕事はせん断面におけるせん断変形、工具と切りくずおよび加工物との摩擦によりほとんど熱に変換される。この熱は工具、切りくずおよび加工物の温度上昇をもたらす。特に工具刃先の温度上昇は工具寿命にとって非常に重要であり、工具材料を軟化させて磨耗を急速に進行させる。すくい面温度が数十°C上昇するだけで工具寿命が大幅に低下する場合があるといわれている⁽¹⁾。また、工具刃先温度の上昇は加工物仕上げ面性状に大きな影響を及ぼし、表面層に引張りの残留応力を生じさせる原因になり、仕上げ面精度および材料の疲労強度の低下を引き起こす⁽²⁾。このため、最良な切削加工を行うには切削温度に関して十分な知識をもっていることが重要であり、これまでも多くの研究がなされている⁽³⁾。

加工温度の測定には、比較的簡単に測定できるとい

う点から、熱電対が広く用いられてきた。Shore⁽⁴⁾とHerbert⁽⁵⁾は工具-切りくず接触面温度を測定するため工具-加工物熱電対法を開発し、この方法を用いて北川ら⁽⁶⁾が工具-切りくず界面上の局部温度の測定に成功した。しかし熱電対法は、工具-切りくず接触面のような高速で動いている物体の温度測定では正確な温度校正がむずかしいこと、急速な温度変化に対して応答速度が遅いことなどの短所がある。

Müller-Hummelらは⁽⁷⁾、ダイヤモンドの透光性を利用して、工具すくい面から放射される赤外線を取り出し、サーモグラフで計測して工具すくい面上の温度分布を求めている。しかし、CVDによるダイヤモンド薄膜コーティングチップの場合など限られた状態にしか用いることができない。また、正確な絶対温度を求めるのがむずかしい。

これに対して、最近著者らが開発した光カプラと二つの赤外線検出素子を組合せた光カプラ型2色温度計は、コア径の小さな光ファイバを用いることによって複雑に入り組んでいる箇所からも容易に赤外線を導き出すことができ、測定対象物に小さな穴をあければ内部の温度測定も可能であり、応答速度が極めて速く、また2色温度計にすることで測定対象物の輻射率の影

* 原稿受付 1998年10月9日。

^{*1} 正員, 金沢大学大学院 (☎ 920-8667 金沢市小立野 2-40-20)。

^{*2} 正員, 金沢大学工学部。

E-mail: ueda@kenroku.kanazawa-u.ac.jp

響を抑制することができるなど数々の特長を備えている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

そこで、本研究では、NC旋盤を用いて旋削を行い、アルミナ工具の透光性を利用して旋削加工における工具-切りくず接触面の温度を光カプラ型2色温度計を用いて測定する方法を検討してみた。また、切削条件を変えることにより、条件の温度への影響を調べるとともに、加工液を工具すくい面上に供給することにより、加工液の切削温度への影響についても調べてみた。さらに、有限要素法による解析結果と実験結果を比較して測定精度を検討してみた。

2. 実験方法と解析方法

2.1 実験装置と実験条件 実験装置の概略を図1に示す。実験は高速精密CNC旋盤を用いて3次元切削を行った。実験条件を表1に示す。工具-切りくず接触面の温度を測定するため、透光性を有するHIP焼結したアルミナ工具(Al_2O_3)を用いて焼鈍した炭素鋼S45Cを加工している。アルミナ工具の詳細図およびその分光透過率を図2に示す。アルミナ工具には温度計測用の光ファイバを挿入するための小穴(直径約0.6 mm)が底面から工具表面下(表面からの距離は1 mm)まであけられている。この小孔に光ファイバを挿入し、受光面が小孔の底面に接する位置で固定し

た。切削中に高温となった工具-切りくず接触面から輻射され工具の中を透過してきた赤外線を受光することにより温度測定を行った。工具表面から光ファイバの受光面までの距離が1 mmとなることから、工具すくい面での光ファイバの感温領域は直径約0.35 mmとなる。図3に示すように、工具-切りくず接触面の最高温度が光ファイバの感温領域内に入るように光ファイバを工具刃先から設置した。

湿式切削は図1に示すように、ノズル(直径5 mm)を用いて工具すくい面上に加工液を供給することによって行った。ノズルと工具すくい面との角度は 30° 、加工液の流量は5.40 l/minとした。加工液として水溶性のサンライト TC-800(日本グリース株)を50倍に希釈して用いた。

切削抵抗はバイトのシャンクに抵抗線歪計を取付けることにより主分力 F_p および送り分力 F_f を測定した。

2.2 温度計測法

2.2.1 温度計 温度計の基本構造を図4に示す。測定対象物から輻射された赤外線を受光し、光カプラによって2本の光ファイバに分岐した後、集光レンズを介して分光感度特性の異なる二つの光電変換素子GeとInSbへ伝送する。測定信号は電気信号に変換され、フィルタによって高周波数ノイズをカットし、デジタルメモリにいったん記録した後、マイクロコンピュータで

Table 1 Experimental conditions

Tool material	: ALUMINA (Al_2O_3)
Rake angle, α	: -5°
Clearance angle, ϕ	: 5°
Nose radius, r_n	: 0.4 mm
Work material	: annealed 0.45% carbon steel (S45C) (250HV1, 210HV1)
Cutting conditions:	
Cutting speed, V	: 100 - 300 m/min
Depth of cut, d	: 0.6 - 1.0 mm
Feed rate, f	: 0.2 mm/rev
Coolant	: dry and wet
Cutting fluid	: water soluble W2-1 (1:50 in water) (Sunlight TC-800)
Temperature	: $20^\circ C$
Flow rate	: 5.40 l/min
Nozzle angle	: 30°
Nozzle diameter	: 5 mm

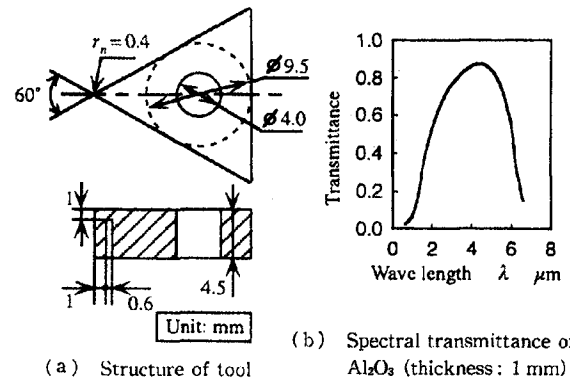


Fig. 2 Alumina cutting tool

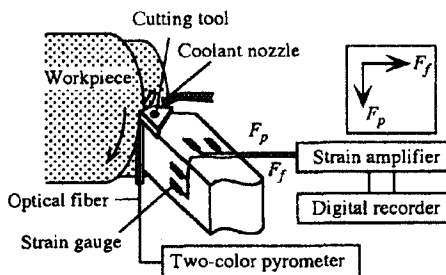


Fig. 1 Schematic illustration of experimental set-up

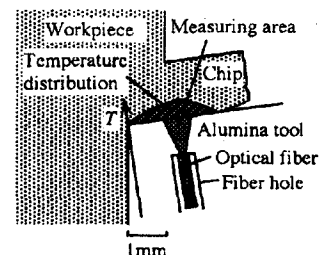


Fig. 3 Illustration of optical fiber setting

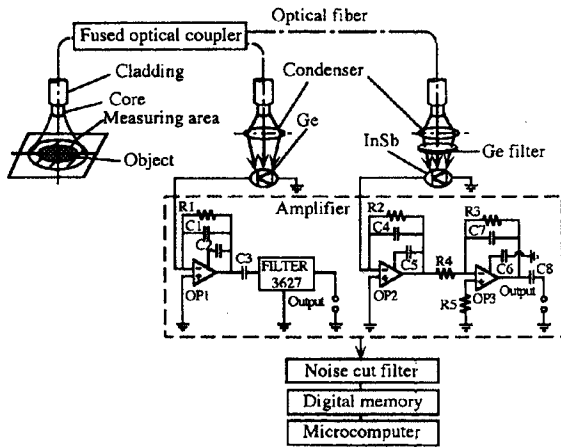


Fig. 4 System of two-color pyrometer

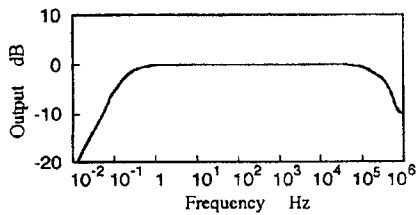


Fig. 5 Frequency characteristics of amplifier

処理される。それぞれの素子の分光感度特性が異なるため、二つの素子の出力比をとることにより温度に換算することができる。Ge素子は比較的短波長の赤外線に対して高感度をもち、InSb素子は長波長に対して高感度をもつ。このため、InSb素子側にGeフィルタを配置して赤外線の短波長領域をカットし、Ge素子との出力の差を大きくすることにより高温における

$$A = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_1 J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \beta_2 \varepsilon(\lambda) J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) H(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

ただし、 β_1 および β_2 は種々の損失に依存する係数、 $J_\lambda(\lambda, T)$ は黒体の放射能、 $F(\lambda)$ 、 $G(\lambda)$ 、 $H(\lambda)$ はそれぞれ光ファイバ、集光レンズ、およびGeフィルタの分光透過率、 $D_1(\lambda)$ 、 $D_2(\lambda)$ はGeおよびInSb素子の分光感度、 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ は各素子の測定可能な波長範囲であり、それぞれの特徴がわかれば数値計算を行うことにより A を求めることができる。

温度校正実験は切削に使用した加工物 S 45 C を試料として行った。熱電対を埋め込んだ試料を電氣的に一定温度に加熱し、そのとき試料から放射される赤外線を光ファイバで受光している。二つの素子からの出力比と温度との関係を図6に示す。図6中の実線は式(1)より求めた温度計の相対感度 A である。両者はよく一致しており、十分な精度が得られていることがわかる。

2・2・3 受光エネルギー 光カプラ形2色温度計は、赤外線波長に対して高感度領域が異なる二つ光電変換素子の出力電圧の比をとることによって温度に換算する。このため、均一な温度分布をもつ測定対象に対して、測定対象領域が光ファイバの感面より小さい場合でも正確に温度測定が可能となる特長をもっている⁽¹⁰⁾。しかしながら、本実験で測定対象となる工具-切りくず接触面は温度分布をもっていると考えられるため、温度分布を有する測定対象領域に対する温度計の出力を理論的に検討してみた。

Table 2 Characteristics of the optical fiber

Graded index type of quartz fiber	
Core diameter, d_c	: 100 μm
Cladding diameter, d_{cl}	: 150 μm
Refractive index of core (peak), n_1	: 1.47
Refractive index difference, Δ	: 1.95 %
Numerical aperture, N_A	: 0.29
Focusing constant, g	: 0.00395 $1/\mu\text{m}$

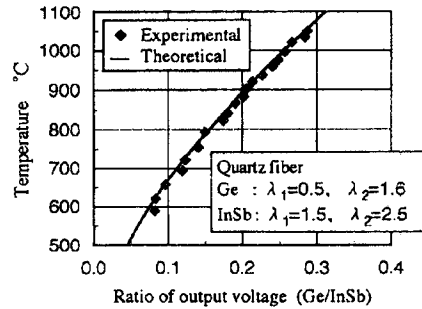


Fig. 6 Calibration curve of two-color pyrometer

温度計の感度を向上させている。

表2に本温度計で使用した光ファイバの特性値を示す。グレーデッド形石英ファイバを使用して、波長0.5~2.5 μm の赤外線を伝送しており、500°C以上の温度測定に適用できる。

図5は光電変換素子の増幅回路の周波数特性である。約100 kHzの入力まで損失のない応答性を示しており、本研究への適用には十分であることがわかる。

2・2・2 温度校正 温度計の相対感度 A は次式で与えられる。

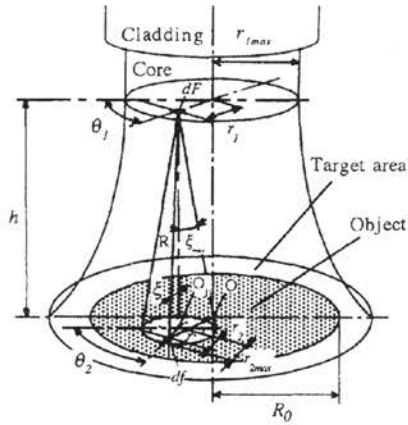


Fig. 7 Illustration of energy accepted at incidence face of optical fiber

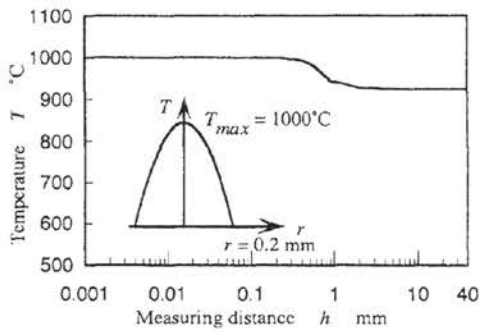


Fig. 8 Influence of measuring distance on measured temperature when the object has 4th power temperature distribution

光ファイバの受光状態を図7に示す。ここで、測定対象物を円形とし、グレーテッド形光ファイバの中心軸は測定対象面に垂直に設置され、光ファイバの中心と測定対象面の中心は同一線上にあるとする。このとき、光ファイバの受光面が受光する全エネルギー E_A は次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

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

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、 df および dF はそれぞれ測定対象面および光ファイバの受光面上の微小領域、 r は測定対象領域の中心 O から df までの距離、 ξ は df から dF を結ぶ直線と対象面の法線との角度、 R は df から dF までの距離である。このとき、 $dF = r_1 dr_1 d\theta_1$ 、 $df = r_2 dr_2 d\theta_2$ となる。 r_2 の最大値 r_{2max} は dF が受光する輻射線を放射する対象面内の円形領域の半径であり、 $r_{2max} = h \cdot \tan \xi_{max}$ で与えられる。ここで、 h は測定距離、 $2\xi_{max}$ は受光角である。

ここで、具体例について考えてみる。測定対象領域が中心で最高温度が 1000°C 、半径 0.2 mm の円周上

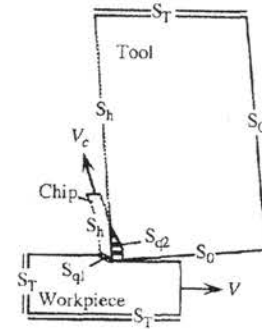


Fig. 9 Problem regions and some boundary conditions

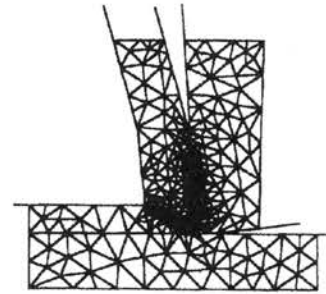


Fig. 10 Typical element mesh of the problem region

で 20°C となる四乗分布をしている場合について、温度計の受光エネルギーを式(2)を用いて計算し、測定温度を求めてみた。その結果を図8に示す。測定距離 h が小さいとき、ほぼ最高温度と同じ 1000°C が得られるが、測定距離が大きくなるとともに低下し、測定距離 $h=1\text{ mm}$ のとき、測定温度は約 942°C となる。さらに測定距離が大きくなると測定温度は低下し、最終的に約 925°C に収束している。すなわち、測定対象領域の温度分布がわかれば、図8に相当する図を計算で求めることができ、この図を用いることによって2色温度計の測定結果から精度よく最高温度を推定することができる。

2.3 有限要素法による解析

工具-切りくず接触面上の温度分布を求めるため、有限要素法による解析を行った。解析に使用したモデルを図9に示す。解析は鋭利工具による二次元定常切削を対象とする。熱はせん断面 S_{q1} におけるせん断変形および工具すくい面 S_{q2} における摩擦によって発生し、工具内では熱伝達のみによって、被削材と切りくず内では熱伝導と熱伝達によって伝わるものとする⁽¹³⁾。このような温度場に対する定常熱伝導問題の支配方程式は次式で与えられる。

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho C \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_1 = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 K は熱伝導率、 T は絶対温度、 ρ は密度、 C は比熱、 v_x, v_y はそれぞれ速度の x, y 成分、 q_1 はせん断面 S_{q1} での熱源強さである。このとき、式(3)に対する境界条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{(i)} \quad T &= T_s && \text{on } S_f \\ \text{(ii)} \quad -K \frac{\partial T}{\partial n} &= 0 && \text{on } S_o \\ \text{(iii)} \quad -K \frac{\partial T}{\partial n} &= q_2 && \text{on } S_{q2} \\ \text{(iv)} \quad -K \frac{\partial T}{\partial n} &= h(T - T_0) && \text{on } S_h \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

ここで、 T_s は規定温度(室温)、 n は境界上で外向法線、 q_2 は工具-切りくず接触面 S_{q2} の熱流束、 h は熱伝達係数、 T_0 は周囲温度である。定式化は Tay らと同様である⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

熱の発生はそれぞれ次式で与えられる。

$$q_1 = \tau_s V_s / J \dots\dots\dots (5)$$

$$q_2 = \tau_t V_c / J \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 τ_s はせん断面のせん断応力、 τ_t はすくい面の摩擦応力、 V_s はせん断速度、 V_c は切りくず流出速度、 J は熱の仕事当量(1 Nm/J)である。 q_1 と q_2 は測定値を式(5)、(6)に代入して求め、せん断面では一様分布とし、すくい面では Li ら⁽¹⁶⁾の応力分布モデル(図9)を採用した。

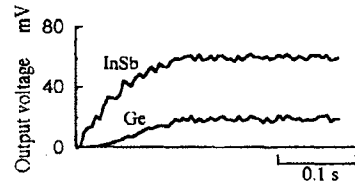
デローニー三角形自動分割法⁽¹⁷⁾で作成した工具刃先付近の要素分割を図10に示す。全体の要素数は

Table 3 Experimental data used in calculation

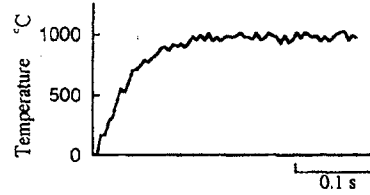
Tool material	: Alumina (Al ₂ O ₃)
Work material	: S45C
Tool-chip contact length, a	: 0.8 mm
Cutting ratio, r_c	: 0.57
Rake angle, α	: -5°
Shear angle, ϕ	: 28.47°
Heat-transfer coefficient, h	: 10 ⁴ , 10 ⁵ , 21000 W/m ² K
Cutting conditions:	
Cutting speed, V	: 100 - 300 m/min
Depth of cut, d	: 0.6 - 1.0 mm
Feed rate, f	: 0.2 mm/rev.
Coolant	: dry and wet

Table 4 Thermal properties of tool and workpiece

Al ₂ O ₃ ⁽¹¹⁾	K W/mK	$4.255 \times 10^4 \times T^{-1.217}$ ($0 < T \leq 1500$)
	C J/kgK	$3.24 \times 10^{-12} \times T^3 - 1.35 \times 10^{-8} \times T^2 + 2.12 \times 10^{-5} \times T^2 - 1.61 \times 10^{-2} \times T^2 + 6.59 \times T - 147.26$ ($0 < T \leq 1500$)
	ρ kg/m ³	3.98×10^3
S45C ⁽¹²⁾	K W/mK	$-1.44 \times 10^{-5} \times T^2 - 1.70 \times 10^3 \times T + 59.63$ ($0 < T \leq 1050$) $2.10 \times 10^3 \times T + 2.167$ ($1050 < T \leq 1500$)
	C J/kgK	$3.88 \times 10^{-9} \times T^2 - 2.51 \times 10^{-3} \times T + 446.36$ ($0 < T \leq 950$) $16.24 \times T - 14659$ ($950 < T \leq 1000$) $-19.16 \times T + 20741$ ($1000 < T \leq 1050$) $-0.75 \times T + 1410.5$ ($1050 < T \leq 1500$)
	ρ kg/m ³	7.844×10^3



(a) Output waves from cells



(b) Temperature history

Fig. 11 A sample of output wave from the pyrometer ($V=200$ m/min, $d=0.8$ mm)

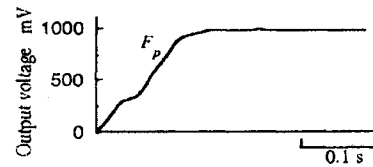


Fig. 12 A sample of output wave from the strain gauge (Principal force F_p , $V=200$ m/min, $d=0.8$ mm)

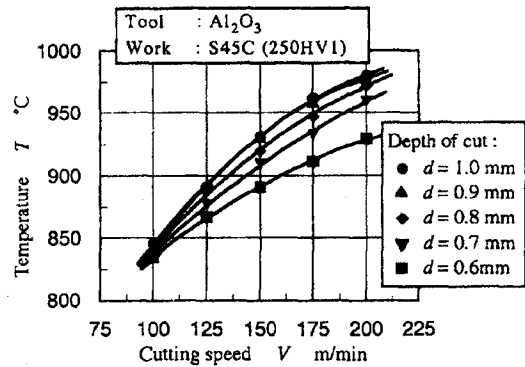


Fig. 13 Influence of cutting speed on the interface temperature

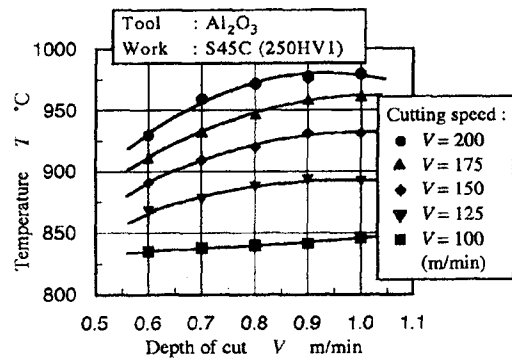


Fig. 14 Influence of depth of cut on the interface temperature

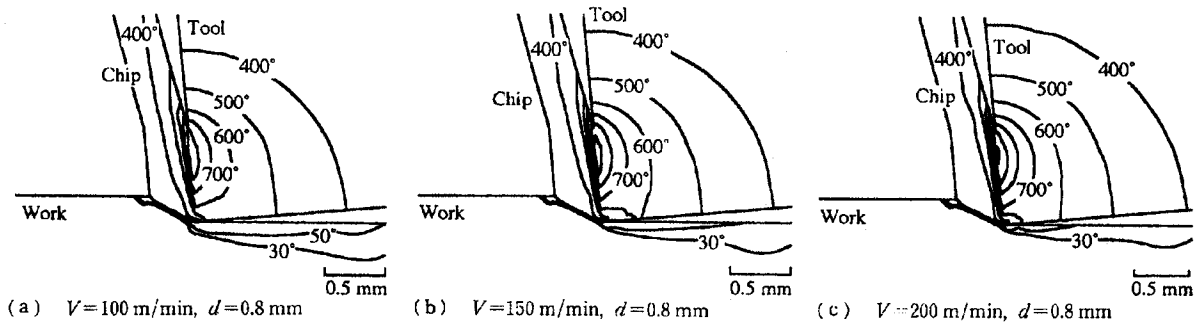


Fig. 15 Isothermal lines for several cutting speeds (dry cutting)

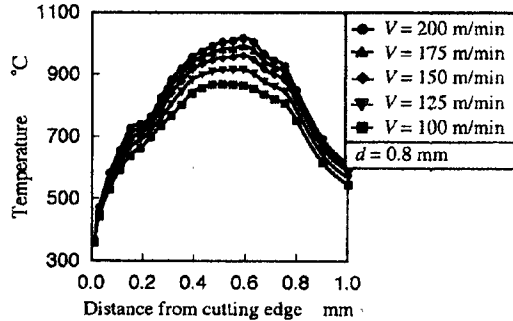


Fig. 16 Temperature distributions on the rake face for several cutting speeds (dry cutting)

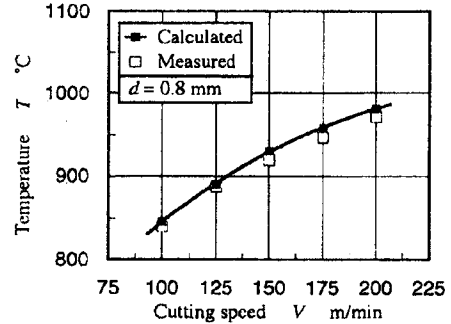


Fig. 18 Comparison of calculation result with experimental values

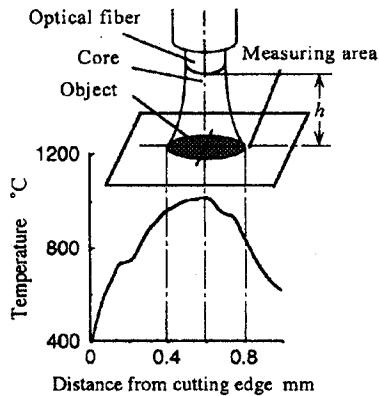


Fig. 17 Illustration of energy accepted by the fiber when the rake face has temperature distribution.

961, 節点数は529である。その他の解析条件を表3に示す。被削材, 工具の熱物性値は温度依存性を考慮しており, 使用した値を表4に示す。

3. 実験結果と解析結果

3・1 加工条件の影響 図11に温度計のGe, InSb素子からの出力波形例, 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。また抵抗線歪計からの出力を図12に示す。横軸が時間経過を表している。工具-切りくず接触面の温度は切削開始時から急激に上昇しており, 切削開始後125ms(測

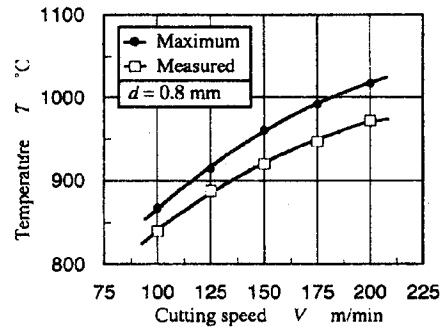


Fig. 19 Comparison of calculation result with experimental values

定距離: 0.42 m)において970°Cにまで上昇し, その後, 定常状態となっている。本研究では, この定常温度を測定温度とした。

切削速度および切込みが工具-切りくず接触面の温度に及ぼす影響を調べた結果を図13と14に示す。図13より切削速度は接触面の温度に大きな影響を及ぼし, 高速になるにしたがって温度が上昇していく。切込みが0.8 mm, 切削速度が100 m/minの場合, 温度は840°Cであるが, 切削速度が200 m/minまで増加すると温度が970°Cに達している。これに対し, 図14より切込みが接触面の温度に及ぼす影響は小さく, 切込みの増加に対して温度は大きくは上昇していない。

3・2 有限要素法の解析結果 図15に解析から得られた工具刃先付近での温度分布を示す。工具すくい

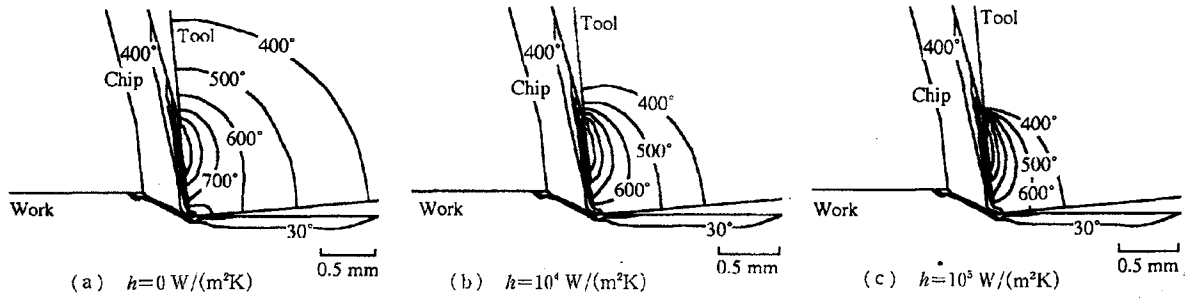


Fig. 20 Isothermal lines for 0, 10^4 , 10^5 W/(m²K) of heat-transfer coefficient ($V=250$ m/min, $d=0.8$ mm)

面の温度はせん断面の温度に比して非常に高く、温度上昇は工具すくい面に集中することがわかる。また、切削速度の増加についてすくい面の温度分布が全体的に高くなっている。

図 16 に切削速度が異なる場合の工具すくい面上の温度分布を示す。この図より切込み $d=0.8$ mm に対して、工具すくい面上の最高温度は刃先先端から約 0.6 mm 付近に存在することがわかる。この図 16 の結果を用いて、図 17 に示すように、光ファイバの受光面が受光する全エネルギーを式(2)から計算し、光カプラ型 2 色温度計による測定温度を理論的に求めた。その結果を実験結果と比較したものを図 18 に示す。図 18 より、解析値と実験値がよく一致しており、図 16 に示す有限要素法の解析解が妥当であるものと考えられる。そこで、図 16 の計算結果より最高温度を求め、実験による測定温度と比較した結果を図 19 に示す。実験値は最高温度の約 96% となっており、最高温度に近い値が測定されることがわかる。

3.3 加工液の影響 加工液の影響を調べるため、熱伝達係数が 0 (乾式)、 10^4 、 10^5 W/m²K の 3 とおりに変化させ、刃先付近での温度分布を計算した結果を図 20 に示す。またその時のすくい面上の温度分布を図 21 に示す。熱伝達係数が大きくなると、工具刃先付近の温度は減少し、高温領域が小さくなることがわかる。しかし、すくい面上の温度分布はあまり減少しておらず、熱伝達係数が最も大きい 10^5 W/m²K の場合でも、乾式に比べて最高温度が 10°C 程度しか低下しない。したがって、工具-接触面温度に対する加工液の冷却効果は小さいことが予想できる。

図 22 は湿式切削における工具-切りくず接触面の温度測定結果であり、図 22 中の実線は解析より得られた値である。ただし、加工液が表面に斜めに衝突するときの熱伝達係数は Li らの式より⁽¹⁶⁾、 $21\,000$ W/m²K とした。加工液を供給した効果は小さく、乾式の場合に比して工具-切りくず接触面の温度は 30°C 程度しか低下しない。通常の供給の仕方では、加工液が工具-

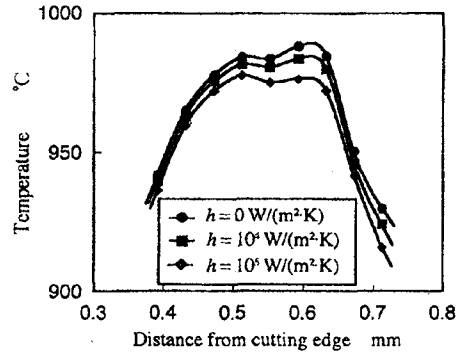


Fig. 21 Influence of convective heat-transfer coefficient

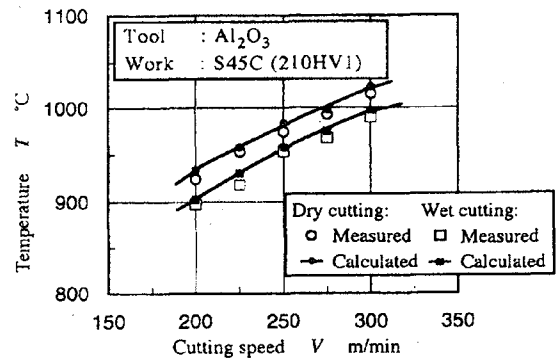


Fig. 22 Influence of cutting fluid on the interface temperature

切りくず接触領域に入っていけないためと考えられ、今後供給方法を工夫する必要がある。一方、計算結果は実験結果とよく合っており、有限要素法の解析が妥当であったと考えることができる。

4. 結 言

アルミナ工具の透光性を利用して旋削加工における工具-切りくず接触面の温度を光カプラ型 2 色温度計を用いて測定する方法について検討した。加工液を工具すくい面上に供給することにより、加工液の切削温度への影響についても調べた。また、有限要素法による解析結果と実験結果を比較して測定精度を検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 本温度測定法により、乾式・湿式切削におけ

る工具-切りくず接触面温度を計測することができる。

(2) 切削速度の影響は大きく、切り込みが0.8 mmの場合、100 m/minで840°Cであったものが、200 m/minでは970°Cにも達する。

(3) 測定した温度は有限要素法の解析結果から求めた温度とよく一致している。

(4) 有限要素法の解析結果の温度分布を用いて測定領域内の最高温度を温度計による測定結果から精度よく推測することができる。

(5) 通常の供給方法では、湿式切削における工具-切りくず接触面温度は乾式の場合に比して約30°Cしか低くならない。

文 献

- (1) 例えば Koenig, M., *Machining Science and Application, Theory and Practice for Operation and Development of Machining Processes*, (1966), 61, Pergamon Press, Oxford.
- (2) 例えば 杉田忠彰・上田完次・稲村豊四郎, 基礎切削加工学(1990), 139, 共立出版.
- (3) 例えば Chow, J. G. and Wright, P. K., On-Line Estimation of Tool/Chip Interface Temperature for Turning Operation, *ASME J. Eng. Industry*, Vol. 110 (1988), 56.
- (4) Shore, H., Thermoelectric Measurement of Cutting Tool Temperature, *J. Washington Academy Science*, Vol. 15 (1925), 85.
- (5) Herbert, E. G., The Measurement of Cutting Temperature, *Proc. Institute Mech. Eng.*, Vol. 1, (1926), 289.
- (6) Kitagawa, T., Shirakashi, T. and Usui, E., Experimental Measurement of Temperature Distribution in Tool-Chip Interface, *Bull. JSPE*, 9-3 (1975), 83.
- (7) Muller-Hummel, P. and Lahres, M., Temperature Measurement on Diamond-Coated Tools during Machining, *Ind. Diamond Rev.*, 55-265 (1995), 78.
- (8) 佐藤昌彦・上田隆司・西田昌弘, 単結晶ダイヤモンド二次元切削における工具すくい面温度の測定, 精密工学会誌, 64-6(1998), 892.
- (9) Mahfudz AL HUDA・山田啓司・上田隆司, CBN 工具における高硬度鋼の旋削温度測定, 精密工学会誌, 64-11(1998), 1664.
- (10) 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, 精密工学会誌, 61-2(1995), 278.
- (11) Metals and Ceramics Information Center, Engineering Property Data on Selected Ceramics Volume III, Single Oxides, *MCICReport*, (1987), 5.4.1-1.
- (12) 李用成・平元一之・佐田登志夫, 定常切削における切削温度の解析と測定, 精密機械, 44-12 (1978), 12.
- (13) Shaw, M. C., *Metal Cutting Principle*, (1984), 280, Oxford Press, New York.
- (14) Tay, A. O., Stevenson, M. G. and de Vahl Davis, G., Using the Finite Element Method to Determine Temperature Distributions in Orthogonal Machining, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 188 (1974), 627.
- (15) Tay, A. O., Stevenson, M. G., de Vahl Davis, G. and Oxley, P. L. B., A Numerical Method for Calculating Temperature Distributions in Machining, from Force and Shear Angle Measurement, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 16 (1976), 335.
- (16) Li, X., Kopalinsky, B. E. and Oxley, P. L. B., A Numerical Method for Determining Temperature Distributions in Machining with Coolant. Part 1: Modelling the Process, *Proc. Inst. Mech. Eng., Series B*, Vol. 209 (1995), 33.
- (17) 谷口健男, FEMのための要素自動分割-デローニー三角分割法の利用, (1992), 28, 森北出版.