

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*

佐藤昌彦** 上田隆司*** 西田昌弘†

Measurement of Tool Face Temperature in Orthogonal Diamond Cutting

Masahiko SATO, Takashi UEDA and Masahiro NISITA

Tool face temperature of single crystal diamond in high precision orthogonal cutting of aluminum and copper is measured using two-color pyrometer with an optical fiber. The infrared rays radiated from the chip-tool interface and transmitted through the diamond tool are accepted by an optical fiber and led to two-color detectors of different spectral sensitivity. Temperature distribution on the tool face is analyzed by employing finite element method and calculated results are applied to the estimation of the maximum temperature on the tool face. The results obtained are as follows; (1)The technique developed is suitable for measuring the tool face temperature in single crystal diamond cutting. (2)Output wave of temperature was clearly recorded. The tool face temperature measured is approximately 190°C for Al and approximately 220°C for Cu when cutting speed was about 620m/min. (3)The temperature increases with the increase of cutting speed. (4)The temperature on the tool face measured is in good agreement with that calculated.

Key words : diamond cutting, tool face temperature, temperature measurement, optical fiber, two color pyrometer, finite element method

1. 緒 言

ダイヤモンド工具は、高硬度かつ工具刃先が極めて鋭利で被削材との凝着性も小さいことから、電子機器、光学機器などの構成部品の加工や、光沢が要求される宝飾品の仕上げ加工など、特に高い精度や優れた仕上げ面品位が要求される加工に対して主に使用されている。このような製品の加工において、工作物の温度上昇による寸法誤差を予測、抑制することは製品の精度や品質を高めるためにも重要であり、また、工具の温度上昇は工具摩耗を促進し、仕上げ面品位の低下あるいは工具費用の増大の原因となるため、熱的影響について検討することは極めて重要である。

このような種々の切削現象に及ぼす切削熱の影響を考察する場合、切削温度を明らかにすることが必要とされる。しかしながら、ダイヤモンド工具による切削の場合には、切込みが微小であること、ダイヤモンドが電気絶縁体であるために熱起電力が生じないこと、高硬度かつぜい性であるために熱電対を埋め込むことができないことなどから、一般に適用される熱電対法で切削温度を測定することは極めて困難である。岩田ら¹⁾は被削材に熱電対を埋め込むことによりダイヤモンド切削における被削材の温度上昇を測定し、Morganら²⁾はダイヤモンド円すい工具に熱電対をテープで固定して工具全体の温度上昇を測定しているが、基本的な切削温度と考えられるすくい面温度の測定はほとんど行われていない。

そこで本研究では、赤外線に対する透過率が大きいというダイヤモンドの特性を利用し、切削中に工具-切りくず接触面から放射されて工具内を透過してきた赤外線を工具裏面から検出する方法により、ダイヤモンド切削における工具すくい面温度の測定を行った。

温度計には、1本の光ファイバと2つの赤外線検出素子を組み合わせた2色温度計を新たに作成し使用した。2つの赤外線検出素子は2層化されており、光路を分岐する必要がなく簡便な取扱

いが可能となっている。

また、切削時における工具すくい面は温度分布を有しており、測定した結果は温度分布の影響を含んだものとなる。そこで、すくい面上の温度分布を有限要素法によって計算し、計算結果と測定結果からすくい面上の最高温度を求めている。

2. 実験方法

実験装置の概略を図1に、実験条件を表1に示す。工具は1a型の天然単結晶ダイヤモンド、被削材は純アルミニウムおよび無酸素銅であり、切削は温度解析のモデル化を容易にするために二次元切削とした。ダイヤモンドの形状は幅4mm、長さ2mm、厚さ1mmである。切削幅は1mmである。切削速度を変化させて実験を行った。

図1に示すように、工具シャンクにはダイヤモンドチップを取り付けてあり、光ファイバを挿入するための細い溝がシャンク裏面からダイヤモンド裏面まで貫通して削ってある。ダイヤモンド工具のすくい面温度は、図2に示すように長波長の赤外線に対しても透過率が大きいというダイヤモンドの特性³⁾を利用して測定する。すなわち、切削中に工具-切りくず接触面における切りくず表面から放射された赤外線は、図1のようにダイヤモンド内を透過し、シャンクに挿入した光ファイバで受光される。受光された赤外線は光ファイバ内を伝送され、レンズを介して赤外線検出素子に集光、電気信号に変換、温度に換算される。

また、ダイヤモンドの屈折率が $n=2.42$ と大きいため、仕上げ面からの放射光は光ファイバへの入射角がすべて受光角よりも大きくなり、クラッドに抜けるため伝送されない。

光ファイバにはコア径が約300 μm 、受光角 $2\xi=48^\circ$ のTe系カルコゲナイドガラス光ファイバを使用した。屈折率がコア全面で一様なステップ型であり、その分光透過率を図3に示す。光通信で広く使用されている石英光ファイバが波長約2 μm までの赤外線しか伝送できないのに対し、カルコゲナイドガラス光ファイバは波長約15 μm までの赤外線を伝送できる。

使用したレンズの材質はBaF₂である。図4に分光透過率を示す。

赤外線検出素子にはInSb素子とMCT(HgCeTe)素子の2種類を用い、2色温度計を構成した。赤外線の入力に対し、InSb素子は

* 原稿受付 平成9年11月4日

** 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 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

† 学生会員 金沢大学大学院 (現、(株)北陸電力; 富山市牛島町15-1)

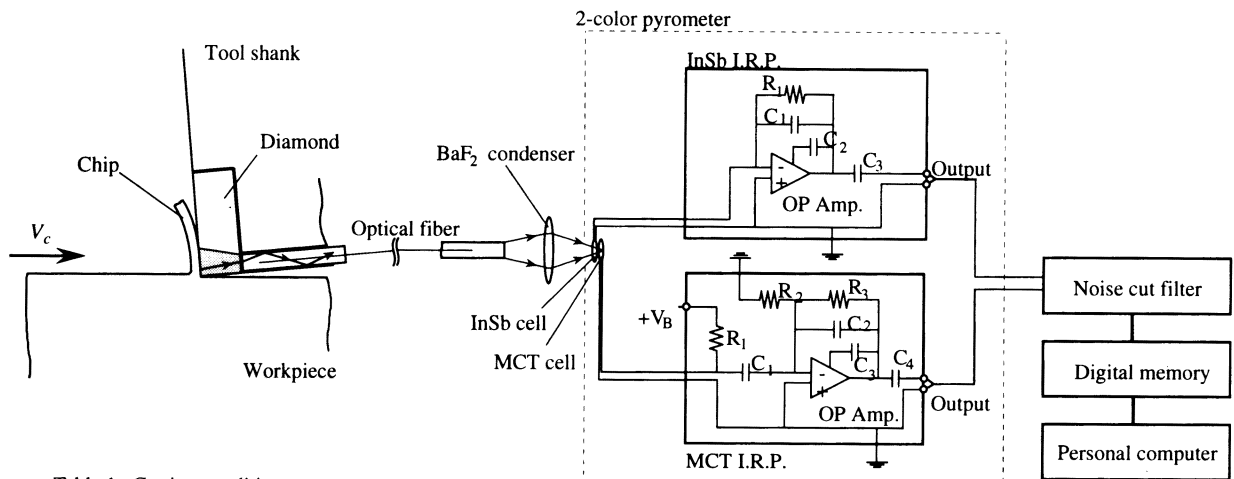


Fig.1 Experimental set-up

Table 1 Cutting conditions

Cutting tool	Single crystal diamond
Rake angle	- 5°
Clearance angle	5°
Workpiece	Aluminum, Copper
Depth of cut	10μm
Width of cut	1mm
Cutting speed	400 - 900m/min
Dry cutting	

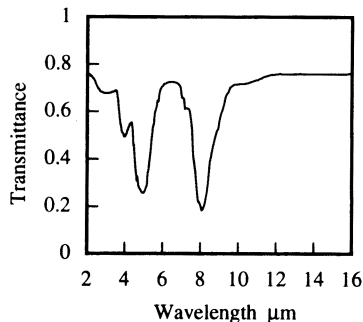


Fig.2 Spectral transmittance of diamond (Thickness : 1mm)

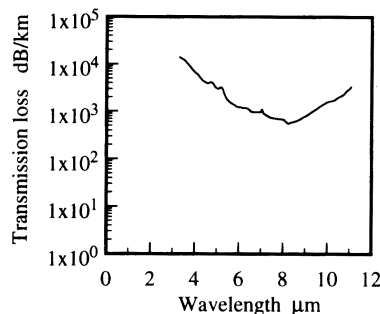


Fig.3 Spectral transmission loss of chalcogenide fiber

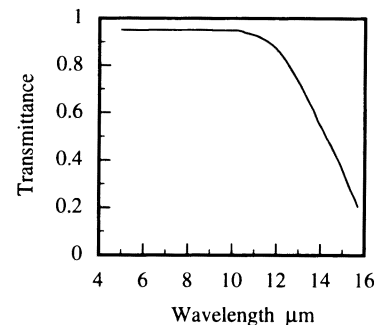


Fig.4 Spectral transmittance of BaF₂ condenser

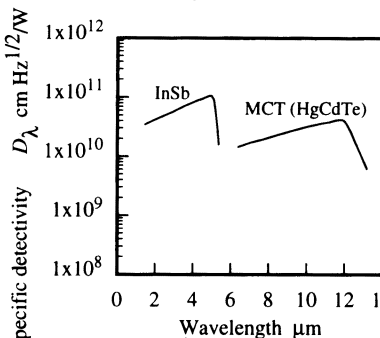


Fig.5 Spectral sensitivity of photocell

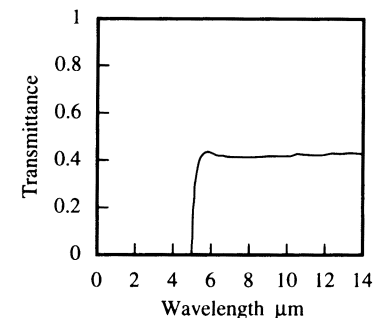


Fig.6 Spectral transmittance of InSb (Thickness : 0.2mm)

光起電力型、MCT素子は抵抗減少型である。それぞれの素子の分光感度特性を図5に示す。本温度計は、図1に示すように、1層目にInSb素子を、2層目にMCT素子を配した2層構造となっている。5μm以下の短波長域の赤外線は1層目のInSb素子で電気信号に変換し、5μm以上の長波長域の赤外線は図6のようにInSb素子を透過するため、2層目のMCT素子によって電気信号に変換することが可能となる。2層構造とすることにより、従来の2色温度計のように光路を分岐する必要がなく、簡便な取扱いが可能となる。それぞれの素子に対する増幅回路は図1のとおりである。これらの回路は約100kHzの入力まで損失のない応答性を示し、各素子の応答速度が1μsと高速であることから、本温度計の周波数応答特性はこれらの増幅回路によって決定される。本研究への適用には十分速い。

温度計からの出力信号は、フィルタによって高周波ノイズをカットし、デジタルメモリに保存後、パーソナルコンピュータで解析する。同時に切削抵抗の2分力を圧電型動力計 (Kistler Instrument) によって測定し、デジタルメモリに保存する。

3. 2色温度計の出力校正と諸特性

3.1 相対感度および出力校正

温度計の相対感度 Λ は、InSbの相対感度を Λ_1 、MCTの相対感度を Λ_2 とすると、次式で与えられる。

$$\Lambda = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) J(\lambda, T) T(\lambda) F(\lambda) C(\lambda) D_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \epsilon(\lambda) J(\lambda, T) T(\lambda) F(\lambda) C(\lambda) I(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

ただし、 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ はInSb温度計の検出波長域、 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ はMCT温度計の検出波長域、 $\epsilon(\lambda)$ は測定対象の輻射率、 $J(\lambda, T)$ は黒体の輻射能、 $T(\lambda)$ は工具の透過率、 $F(\lambda)$ は光ファイバの透過率、 $C(\lambda)$ は集光レンズの透過率、 $I(\lambda)$ はInSbの透過率、 $D_1(\lambda)$ はInSb素子の分光感度特性、 $D_2(\lambda)$ はMCT素子の分光感度特性である。

温度計の出力校正は、被削材を試片として用いて電気的に一定温度に加熱し、試片から輻射

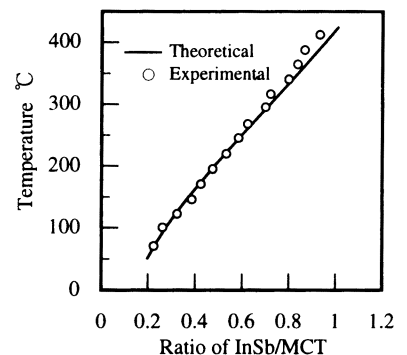


Fig.7 Calibration curve of InSb/MCT pyrometer

される赤外線を受光することにより温度計の出力との関係性を求めた。図7にアルミニウムに対する温度校正の結果を示す。横軸はInSb/MCTの出力比、縦軸は温度である。プロットは実験値であり、図中の実線は式(1)を計算したもので、両者はよく一致している。

3.2 温度分布を有する対象面に対する特性

2色温度計は、2つの異なる波長域に対する温度計の出力比を求めることによって温度を決定することから、均一な温度の測定対象に対しては、測定対象が感温面より小さくなる場合にも測定対象の大きさによらない温度測定が可能である。ところが一般には、測定対象が温度分布を有する場合が多い。そこで、温度分布を有する測定対象に対する温度計の出力について検討した。

図8は、任意の温度分布を有する測定対象に対してステップ型光ファイバが垂直に設置されている場合を示している。感温面内に微小要素 df を考える。 df から輻射され、光ファイバによって受光される赤外線のうち、 df から立体角 $d\Omega$ で表わされるコア内の微小要素 dF によって受光される波長範囲 $\lambda-d\lambda/2 \sim \lambda+d\lambda/2$ のエネルギー de_λ は、

$$de_\lambda = J(\lambda, T) d\lambda \cos\phi df d\Omega \tag{2}$$

で表される。ただし、 $d\Omega = \cos\phi dF / R^2$ である。式(2)をコア内で積分すれば、光ファイバが受光する df からの輻射エネルギー e_λ が求まり、さらに e_λ を df について感温面内で積分すれば、任意の温度分布を有している測定対象に対する光ファイバの受光エネルギー E_λ が求まる。

$$E_\lambda = \int_{S_o} \int_{S_c} J(\lambda, T) d\lambda \frac{\cos^2\phi}{R^2} dF df \tag{3}$$

したがって、均一な温度の対象に対する温度計の特性と、温度分布を有する場合の温度計の特性をそれぞれ計算し比較することにより、測定温度に含まれる測定対象面の温度分布の影響を求めることができる。

計算結果を図9(a),(b)に示す。測定対象面は円形とし、感温面と中心が一致しているとした。同図(a)は測定対象面の温度が200℃と均一な場合で、同図(b)は測定対象面の温度が中心を200℃として半径方向に2乗分布となっている場合である。横軸は測定対象面直径 D_o と感温面直径 D_t との比 D_o/D_t であり、縦軸は出力温度である。2色温度計の場合とInSb素子1つを用いた温度計の場合を比較している。

図9(a)より、均一な温度の面に対しては、2色温度計では測定対象が感温面より小さな場合でも対象としている面の温度を正確に測定できているのに対し、InSb温度計では測定対象が小さくなるにつれて対象としている温度よりも低く温度を測定することが

分かる。従って、測定対象が小さい場合には2色温度計は有効であることが分かる。

また、図9(b)より、温度分布を有する測定対象に対しては、均一な温度の測定面に対する場合と異なり最高温度を指示することはない。しかしながら2色温度計の場合、測定温度は測定対象面の大きさによってわずかに異なるものの、最高温度の約80~90%の出力が得られることが分かる。特に、測定対象面の直径が感温面の直径の1/5以下と非常に小さな場合でも最高温度の約80%の指示を得ている。この割合は温度分布の形状で異なる。このため、測定結果から最高温度を推定するためには熱源の大きさや温度分布の形状を明らかにしなければならない。

一方、InSb温度計の場合には、測定対象が小さくなると出力される温度も減少する。平均温度よりは高い温度を示すものの、熱源の最高温度を測定することは困難となる。

4. 実験結果

図10に切削速度が518m/minの場合のアルミニウムに対する測定波形を示す。同図(a)は切削抵抗の主分力と背分力である。切削中の抵抗の変化は少なく、安定した切削が行われている。また、切りくず厚さから求めたせん断角は約15.5°である。図より主分力が約12.4N、背分力が約8.1Nであり、2次元切削モデルからせん断面のせん断応力を求めると約260MPaとなる。

InSb温度計およびMCT温度計の出力は同図(b)であり、明りような測定波形が得られている。両者の比を求め、先の校正曲線から換算した温度波形が同図(c)である。図より、工具すくい面温度は切削の開始に伴って直ちに増加し、短時間ではほぼ一定の温度になっていることが分かる。図より、定常的な部分の温度を求めると約171℃となる。

また、図11(a),(b)は切削速度が933m/minの場合の切削抵抗の波形と、InSb温度計およびMCT温度計の出力から求めたすくい面温度の波形である。518m/minの場合に比べて切削抵抗はやや減少しているが、単位時間当たりの発熱量が増加するため、すくい面温度は高くなっている。定常的な部分の温度は約214℃である。

図12(a),(b)は切削速度が726m/minにおける被削材を銅とした場合の波形であり、切削抵抗の変動に比べると温度の変化は小さく、定常的な部分の温度は約214℃である。

図13は、それぞれの被削材に対する切削速度と切削抵抗の関係であり、速度が増加するにつれて切削抵抗は減少する。

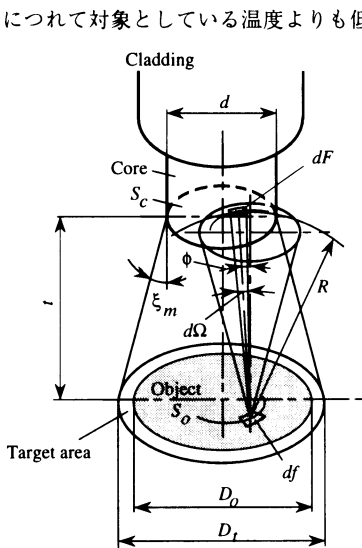


Fig.8 Illustration of incidence face of optical fiber

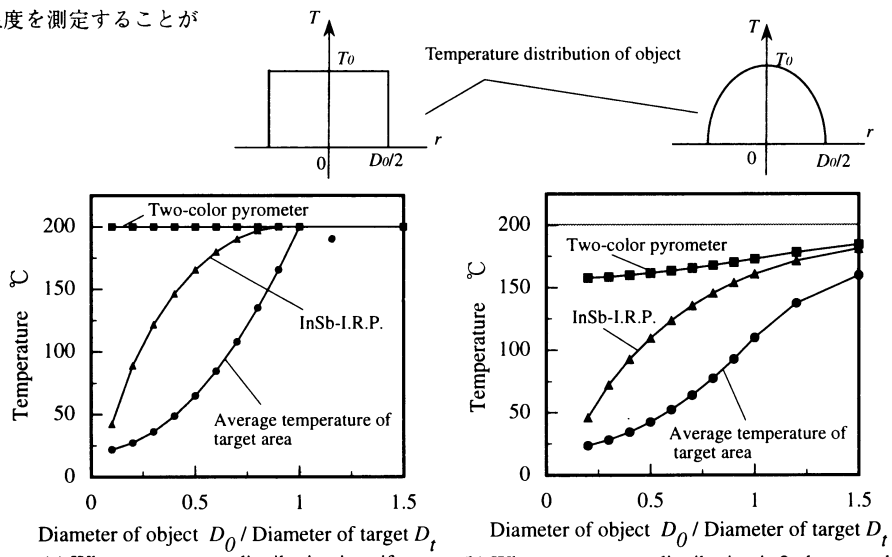
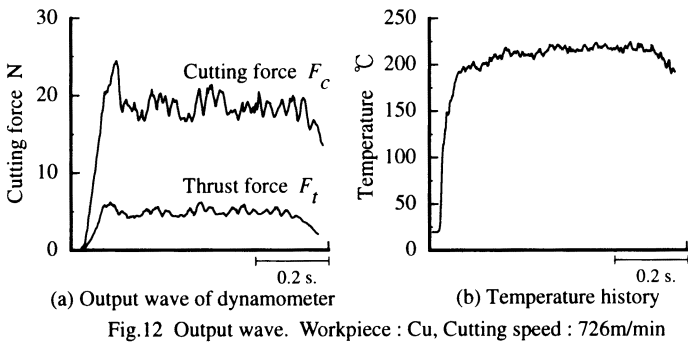
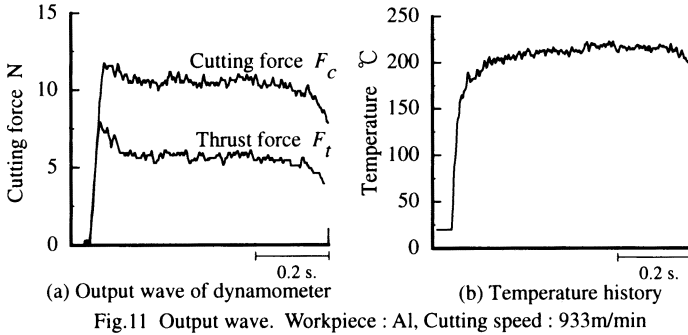
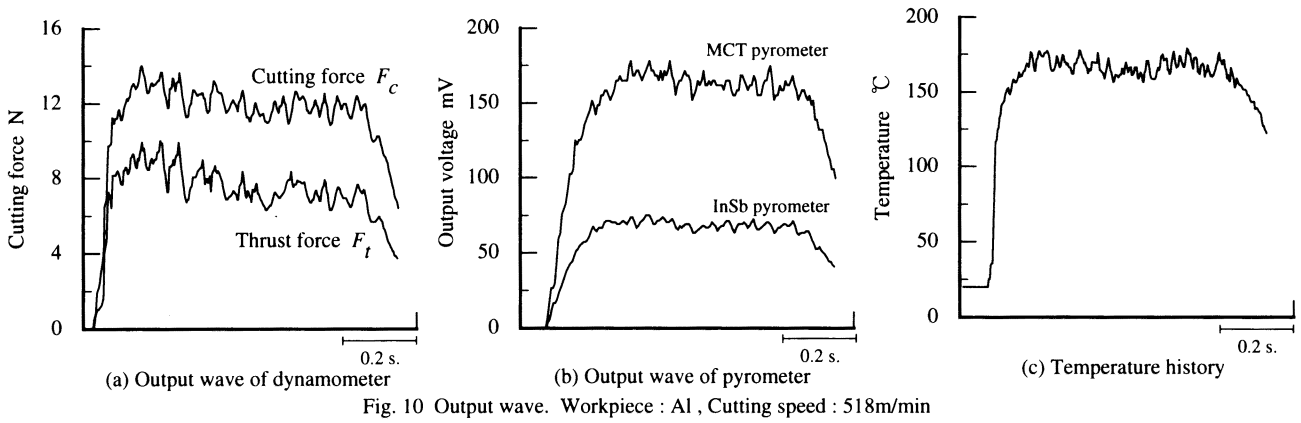


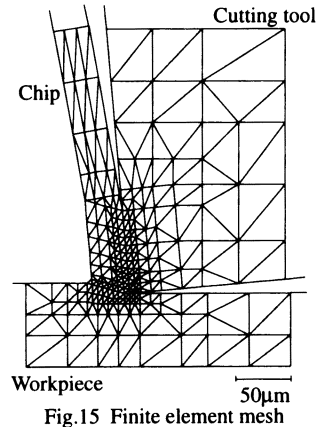
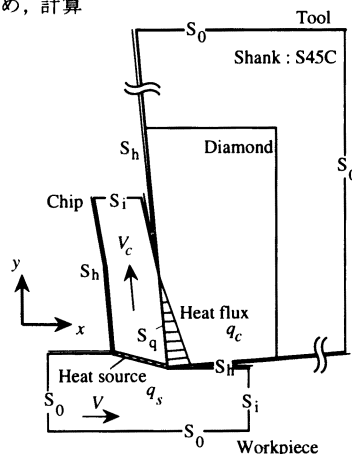
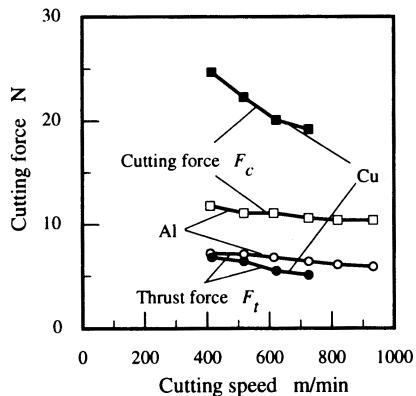
Fig.9 Variation of measured temperature with the ratio of D_o/D_t



5. 有限要素法による解析と実験結果の検討

温度計の感温面は直径約630 μ mの円形であり、工具-切りくずの接触長さに比べて大きい。また、切削時における工具すくい面は温度分布を有しており、測定した結果は温度分布の影響を含んだものとなる。

3節に示したように、2色温度計を構成していることから温度分布の影響は小さく、最高温度に近い温度を測定していると考えられるが、すくい面上の温度分布を有限要素法によって求め、計算結果と測定結果からすくい面上の最高温度を推定した。



解析は2次元モデルとした。解析モデルを図14に示す。ダイヤモンドはS45C製のシャンクに取り付けてあり、ダイヤモンドの寸法は1mm \times 2mm、シャンクの寸法は10mm \times 20mmである。

熱伝導方程式は

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho c \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_s = 0 \quad (4)$$

であり、境界条件は

$$T = T_0 \quad |S_0 \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q_c \quad |S_q \quad (6)$$

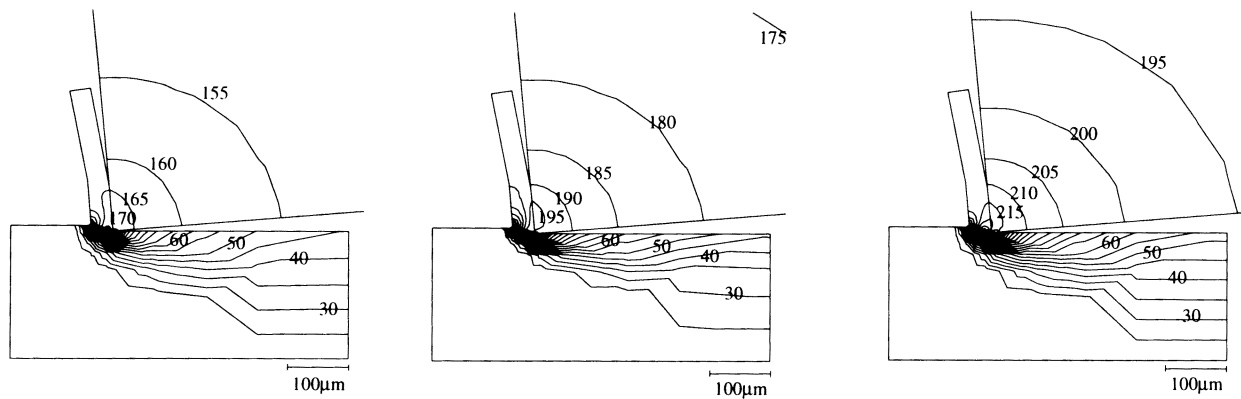
$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad |S_h \quad (7)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad |S_i \quad (8)$$

となる。ただし、 T は温度、 k は熱伝導率、 ρ は密度、 c は比熱、 v_x 、 v_y は速度の x 、 y 成分、 q_s はせん断面での発熱量、 n は境界面の法線、 q_c はすくい面での熱流束である。定式化はChildsら⁴⁾、前川ら⁵⁾と同様である。対流熱伝達係数 h は切削速度によらず100W/m²Kとし、固定温度 T_0 は20 $^{\circ}$ C、工具と切りくずの接触長さは切込みの8倍である80 μ mとした。 q_s および q_c は測定した切削抵抗値から求めた。工具刃先付近の要素分割を図15に示す。全体の要素数は575、節点数は330である。

使用した被削材、工具の熱物性値の温度依存性を考慮して計算した。使用した値を表2に示す。

得られた温度分布を図16に示す。同図(a)は、被削材がアルミニウム、切削速度が518m/minの場合である。等温線の間隔は5 $^{\circ}$ Cである。計算の結果は、すくい面上の平均温度が約175 $^{\circ}$ C、最高温度が約178 $^{\circ}$ Cであり、実験結果と近い値が得られていることが分かる。図17に計算で得られたすくい面上の温度分布を示す。刃



(a) Workpiece : Al, Cutting speed : 518m/min (b) Workpiece : Al, Cutting speed : 933m/min (c) Workpiece : Cu, Cutting speed : 726m/min

Fig. 16 Temperature distribution in tool and workpiece

Table 2 Thermal properties of tool and workpieces

	k W/mK	c J/kgK	ρ kg/m ³
Al ⁶⁾	$-8.67 \times 10^{-5} T^2 + 1.40 \times 10^{-2} T + 2.37 \times 10^2$	$1.00 \times 10^{-4} T^2 + 4.15 \times 10^{-1} T + 8.94 \times 10^2$	2.70×10^3
Cu ⁶⁾	$-2.00 \times 10^{-5} T^2 - 4.29 \times 10^{-2} T + 3.99 \times 10^2$	$-4.00 \times 10^{-5} T^2 + 1.44 \times 10^{-1} T + 3.82 \times 10^2$	8.96×10^3
Diamond ⁷⁾	$6.19 \times 10^{-3} T^2 - 3.53 T + 9.96 \times 10^2$	$-3.09 \times 10^{-3} T^2 + 3.86 T + 4.13 \times 10^2$	3.52×10^3
S45C ⁸⁾	$8.50 \times 10^{-6} T^2 - 2.19 \times 10^{-2} T + 5.25 \times 10^1$	$1.35 \times 10^{-4} T^2 + 3.21 \times 10^{-1} T + 4.49 \times 10^2$	7.83×10^3

k : Thermal conductivity, c : Specific heat, ρ : Density, T : Temperature °C ($0 \leq T \leq 250$)

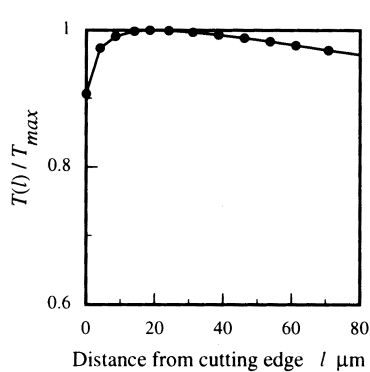


Fig. 17 Temperature distribution on rake face
Workpiece : Al, Cutting speed : 518m/min

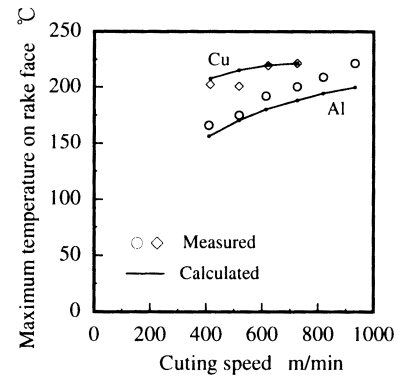


Fig. 18 Variation of maximum temperature on rake face with cutting speed

先から約20µmの位置の温度が最も高く、その温度 T_{max} を1とおいている。工具の熱伝導率が大いことから温度分布の勾配は小さいことが分かる。

ところで、測定温度は工具-切りくず接触面における切りくず表面から放射される平均的な放射エネルギーを温度に換算したものであり、先に述べたように温度分布の影響を含んでいる。そこで図17のような温度分布を有する面を本温度計で測定したときに、測定値171°Cが得られるための T_{max} を式(3)から求めると175°Cとなる*。すなわち、測定温度と最高温度の差はわずか4°Cであることが分かる。

図16(b)はアルミニウムを被削材とし、切削速度が933m/minの場合の温度分布を計算した結果である。計算から得られたすくい面の平均温度は約195°C、最高温度は約200°Cである。518m/minの場合よりも温度は高いが、分布の形状の違いは少ない。また、同図(c)は銅を726m/minで切削した場合であるが、アルミニウムの場合に比べて被削材内部の温度上昇が大いことが分かる。

すべての測定結果に対して温度分布の影響を考慮し、切削速度とすくい面上の最高温度の関係を求めた結果を図18に示す。プロットは測定値から求めた値、実線は有限要素解析値である。両者が、被削材、切削速度においてよく一致していることが分かる。

6. 結 言

赤外線に対するダイヤモンドの透光性を利用し、単結晶ダイヤモンド切削における工具すくい面温度の測定を行った。温度計には、1本の光ファイバと、2つの赤外線検出素子を2層化した素

* 計算においては、すくい面から離れた切りくずからの放射もダイヤモンドの反射率を0として考慮した。

子を組み合わせた温度計を作製し使用した。また、有限要素法によって求めたすくい面の温度分布と測定結果からすくい面上の最高温度を推定した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 感温面よりも微小な測定対象に対し、2色温度計は、測定対象の温度分布が均一であればその大きさによらない温度測定を行うことができる。温度分布を有する場合でも、測定対象の大きさの影響は小さく、最高温度の80~90%の出力を得る。
- (2) ダイヤモンド工具のすくい面温度は、例えば620m/minにおいて、アルミニウムを被削材とした場合で約190°C、銅を被削材とした場合で約220°Cである。
- (3) 切削速度の増加に伴いすくい面温度は上昇する。
- (4) 測定したすくい面温度と有限要素解析から求めたすくい面温度はよく一致する。

参 考 文 献

- 1) 岩田一明, 森脇俊道, 奥田孝一: 銅の超精密ダイヤモンド切削における切削温度の解析, 精密工学会誌, 53, 8, (1987) 1253.
- 2) J.E.Morgan and J.A.Scott: Temperature Measurement when Diamond Grinding Ceramics, Ind. Diamond Rev., 62-2, (1992) 65
- 3) 工藤恵栄: 分光の基礎と方法, オーム社, (1985) 270.
- 4) T.H.C.Childs, K.Maekawa and P.Maulik: Effects of Coolant on Temperature Distribution in Metal Machining, Mater. Sci. Technol., 4-11, (1988) 1006.
- 5) 前川克廣, 仲野義博, 北川武場: 切削熱挙動の有限要素解析(第1報, 熱物性値が切削温度に及ぼす影響), 日本機械学会論文集, 62-596, C (1996) 1587.
- 6) 相原利雄: 伝熱工学, 裳華房, (1994) 266.
- 7) Y.S.Touloukian and C.Y.Ho: Thermophysical Properties of Matter, Master Index to Materials and Properties, (1979).
- 8) E.G.Loewen and M.C.Shaw: On the Analysis of Cutting-Tool Temperatures, Trans. ASME, Vol.76, (1954) 217.