微小切削におけるダイヤモンド工具刃先温度の熱放射計測*

佐藤 昌彦** 宮崎 和智*** 田中 久隆**

Radiational Thermometry of Diamond Tool Tip Temperature in Micro Cutting

Masahiko SATO, Kazutomo MIYAZAKI and Hisataka TANAKA

A diamond tool tip temperature in a micro cutting was measured by a two color pyrometer with an optical fiber. The use of the fiber facilitates the acceptance of infrared rays radiated from a very small cutting area. The independence of a two color pyrometer from a size of an object was experimentally confirmed. In the cutting experiment, a conical, single crystal diamond and a sintered aluminum were used as cutting tools, and a titanium and a tungsten carbide were used as workpieces. The tool has a small hole and the fiber was inserted into the hole. During the cutting, the fiber accepts the infrared rays radiated from the tool-chip interface and transmitted through the cutting tool. The diamond tool tip temperature in titanium cutting is 300°C when the depth of cut is 2μm and 600°C at 45μm. Compared with the cutting with aluminum tool, the diamond tool tip temperature is much lower than the aluminum tool tip temperature. In the cutting of tungsten carbide, the diamond tool tip temperature is over 1000°C when the depth of cut is 1μm. The tool is worn with cutting and the tool tip temperature increases with the tool wear.

Key words: diamond tool, cutting temperature, measurement, radiational thermometry, tool wear

1. 緒 言

ダイヤモンド工具は刃先が鋭利で高硬度であることから、精密な機械部品や硬脆材料の機械加工などに対して切削工具や研削砥石などとして広く使用されている。特に近年では、チタンやステンレス鋼などの機能性の高い金属材料に対する高精度な加工の要求の高まりとともに、従来は適用が困難とされたこれらの材料へのダイヤモンド工具の適用が試みられている^{1)~7)}。

ところで、機械加工では切りくずの生成に伴って熱が発生し、工具摩耗の促進や被削材の熱膨張による加工精度の低下など、様々な悪影響を生じることが知られている⁸⁾。このような諸影響について検討を進め、工具寿命や加工精度、仕上げ面品位を高めていくためには、加工温度を明らかにする必要がある。

一般に加工温度の測定には、工具-被削材間の熱起電力を測定する方法や、工具や被削材に熱電対を埋め込む方法が適用される⁹⁾が、ダイヤモンド工具の場合にはダイヤモンドが電気絶縁体であることや、高硬度であるために工具に熱電対を埋め込むことが難しいことなどから、熱起電力を利用したこれらの方法の適用は困難であるといえる。

Morganら¹⁰⁾は、ダイヤモンド工具の側面に熱電対薄膜を取り付けてセラミックスを単粒研削した際の温度を測定し、予測値と実験値とのよい一致を示しているが、測定されたのはダイヤモンド側面の温度であり、切削速度も0.78m/sと低い。

Chandrasekarら¹¹⁾は、ダイヤモンドの単粒砥粒を用いた実験において、切りくず生成直後の空転時における砥粒切れ刃の温度を熱放射温度計により測定し、切削後の切れ刃温度の冷却特性から外挿して砥粒研削点の温度を推定しているが、切りくず生成点の温度を直接測定しているものではない。

これらの研究はいずれも、ダイヤモンド工具を研削砥粒モデルとして単粒研削を行った際の切削点での切れ刃温度の測定を試みたものであるが、切削が高速で微小な領域で行われる場合には、

加工点の温度を直接測定する適当な方法がないのが現状である。

ところでダイヤモンドは赤外線に対して透光性を有していることから、この性質を利用して^{12)~15)}切削中の工具刃先温度を測定することができる。すなわち、切削中に加工熱によって温度が上昇した工具-切りくず接触面からは、その温度に応じた熱放射があり、その放射光はダイヤモンド工具内を透過する。この透過してきた熱放射をダイヤモンド工具裏面から検出することにより、切削中の工具刃先温度を求めることができる。また、この方法は非接触であるため微小な切削領域の温度場に影響を与えることもない。

本研究では、工具として円すい形状のダイヤモンドを使用し、微小切削時における切削点での刃先温度を、切削点から工具を透過してくる熱放射を検出することにより測定した。温度計には光ファイバと熱放射2色温度計とを組み合わせたものを使用した。光ファイバを使用することにより刃先からの放射の受光を容易に行うことができる。工具として単結晶ダイヤモンドと焼結アルミナを、被削材として純チタンと超硬を使用し、工具材種と被削材種、切込み、切削速度、切削距離が刃先温度に及ぼす影響について検討した。

2. 実験装置

2.1 実験方法

実験装置を図1に示す。実験は旋盤を用いて行った。主軸に取り付けた円盤に被削材を取り付け、刃物台に工具を取り付ける。円盤の直径は約300mmであり、被削材から180°離れた位置にバランスを取り付けてある。工具と被削材との間にあらかじめ所定の切込みを与えておき、主軸を回転させた後に刃物台に横送りかけることにより切削を行う。被削材は20mm×20mmの形状としたため、切削は定切込みの断続切削となる。切込みに比べて工具の送り量を大きくとり、切削条痕同士が重ならないようにした。

工具は、頂角120°、先端に約100μmの曲率を有する円すい形状であり、単結晶ダイヤモンド(1a型)と焼結アルミナの2種類を使用した。図2にそれぞれの工具形状の概略を示す。ダイヤモンド工具には、工具裏面からダイヤモンド底面まで直径1mm

* 原稿受付 平成19年3月1日

** 正 会 員 鳥取大学工学部(鳥取市湖山町南4-101)

*** 鳥取大学大学院工学研究科(現、マイクロンジャパン(株); 兵庫県西脇市平野町302-2)

Fig.1 Experimental set-up

Fig.2 Cutting tool

Fig.3 Spectral transmittance of cutting tool

Fig.4 Detail of cutting point

の穴が開けてある。アルミナ工具には工具裏面から刃先近傍約1mmの位置まで直径1mmの穴が開けてある。それぞれの工具の分光透過率を図3に示す。

工具刃先温度の測定には、光ファイバとInAs/InSb複合素子とを組み合わせた熱放射2色温度計を使用した。2色温度計とは、異なる2つの波長域の放射強度の比が温度によって決まることを利用した温度計¹⁶⁾である。

Table 1 Experimental conditions

Cutting tool	Diamond (Type Ia)
	Al ₂ O ₃
Workpiece	Titanium
	Tungsten carbide
Cutting speed	12.1 - 24.3 m/s
Depth of cut	0.3 - 45 μm
Cutting length	20 mm (for titanium)
	12.7 mm (for tungsten carbide)
Cutting fluid	None

Fig.5 Fundamental structure of pyrometer

Fig.6 Frequency characteristics of amplifier

工具に開けた穴に細管を挿入し、その細管に光ファイバを、端面が工具底面に接触する位置まで挿入して固定する。ダイヤモンド工具とアルミナ工具はともに、赤外線透過する性質を有しているため、切削によって高温となった工具-切りくず接触面から放射された赤外線は工具内部を透過し、図4の刃先詳細図に示すように、工具に挿入した光ファイバによって受光される。受光された赤外線はファイバ内を全反射しながら伝送され、InAs/InSb素子へと導かれて電気信号に変換、温度に換算される。

切削条件を表1に示す。切削速度を12.1m/s～24.3m/s、切込みを0.3μm～45μmとして実験を行った。被削材形状は、Tiが20mm×20mm、超硬が12.7mm×12.7mmであるため、1回の切削長さはTiを被削材とした場合で20mm、超硬を被削材とした場合で12.7mmとなる。工具の頂角が120°、先端の曲率半径が100μmであることから、幾何学的には切込みが13.4μm以下の切込みでは工具先端曲率部のみでの切削となる。

2.2 温度計

温度計の概略を図5に示す。InAs/InSb素子は、InAs素子とInSb素子とが2層構造となっており、2μm～3μmの短波長域をInAs素子が、InAs素子を透過した3μm～5.5μmの長波長域の赤外線をInAs素子の下にあるInSb素子が検出し、電気信号に変換する。2層構造としていることにより、半透明鏡¹⁷⁾や2本の光ファイバ¹³⁾によって光路を分岐する必要がなく、簡便な取扱いが可能となる。これら両者の素子の出力比を求め、測定対象の温度に換算する。比から温度に換算することにより、測定対象が温度計の測定領域よりも小さく、大きさが不明確な場合でも、

Fig.7 Calibration curve of pyrometer

測定対象の大きさによらない温度測定を行うことができる¹⁶⁾。

光ファイバはコア径 195 μm 、クラッド径 225 μm 、外径 340 μm 、長さ 1.5m の AlF_3 系フッ化物ガラスファイバを使用した。フッ化物ガラスファイバは約 0.5 μm ~ 4 μm までの赤外線を送送する性質を有している。波長が 2 μm の赤外線に対する伝送損失は約 0.015dB/m である。集光レンズは CaF_2 であり 10 μm 程度までの赤外線に対し、約 0.9 の透過率を有している。また、温度計の増幅回路は、図 6 に示すように約 100kHz まで損失のない特性を有しており、本研究で使用するには十分な特性といえる。

2.3 温度校正

温度計の出力校正は、被削材を試片として一定温度に加熱し、試片表面から放射される赤外線を工具を通して光ファイバで受光することにより求めた。

図 7 に Ti に対する校正曲線を示す。図 (a) はダイヤモンド工具を使用した場合のものであり、図 (b) はアルミナ工具を使用した場合のものである。図中のプロットは実験値であり、実線は温度計の相対感度¹⁵⁾を理論的に計算したものである。

温度校正実験においては、ダイヤモンド工具の場合で約 700 $^{\circ}\text{C}$ 、アルミナ工具の場合で約 1000 $^{\circ}\text{C}$ までしか行わなかったため、それ以上の温度については、図中の理論曲線を延長し、外挿することにより求めることとした。

3. 測定対象の面積と温度計出力との関係

前節で述べたように、2 色温度計は異なる 2 つの波長域の放射強度の比を温度に換算することから、測定対象が温度計の測定領域よりも小さく、受光エネルギーが減少する場合でも、測定対象の大きさによらない温度測定を行うことができる。このことを実験的に確かめてみた。

図 8 に実験の概略を示す。一定温度に加熱した熱源と、幅の異なるスリットを加工した板を用意する。熱源と光ファイバとの間にスリット板を図のように入れ、一定速度 V_s で図中の矢印方向にスリット板を送る。温度計の測定面の直径 D は、 $D = d_s + 2t \tan \xi$ で与えられる。ただし、 d_s は光ファイバのコア径、 t は測定距離、 ξ は光ファイバの受光角である。スリットの幅がこれよりも小さな場合

Fig.8 Experimental set-up for measurement of radiation energy from small object

Fig.9 Effects of slit width on output of pyrometer

には、図中に示すように温度計の測定領域に対する熱源の幅が小さくなる。このため異なる幅のスリットを何本か設けることにより、大きさの異なる熱源に対する温度計の出力を測定することができる。

図 9 に実験結果を示す。横軸はスリット幅であり、縦軸はそのときの温度計の出力である。InAs 温度計、InSb 温度計の出力と、2 色温度計の出力とを比較している。図中の点線は、スリットの幅が温度計の測定面の直径と等しくなる大きさであり、本実験では、 $d_s = 430\mu\text{m}$ 、 $t = 2\text{mm}$ 、 $\xi = 12.24^{\circ}$ であるため、 $D = 1.3\text{mm}$ となる。点線より左側では温度計の測定面の大きさに比べて測定対象が小さくなる。図 (a) より、スリット幅が測定面より大きい場合には InAs 温度計、InSb 温度計の出力は熱源の温度 (460 $^{\circ}\text{C}$) を正しく示しているが、スリット幅が測定面よりも小さくなると受光エネルギーが減少し、温度計が示す温度も低くなってしまっている。このような場合でも、測定対象の面積を正確に求めることができれば温度を補正することができるが、実際の加工で加工点の面積を正しく求めることは難しい。一方で図 (b) の場合では、2 つの素子の出力比から温度を求めていることから、比を求める過程で測定対象の大きさの影響は消去され、測定対象が小さくなった場合でも温度計が示す温度は一定であることが分かる。これより、測定対象の大きさが温度計の測定面よりも小さな場合でも、出力比から温度に換算することにより、測定対象の大きさを求めなくても温度に換算できることが確かめられた。

4. 実験結果

4.1 被削材を Ti とした場合

4.1.1 切込みの影響

工具としてダイヤモンド、被削材として純 Ti を使用し、切込みを 2 ~ 45 μm と変化させて実験を行った。切削速度は 18.2m/s である。図 10 に切込みが 2 μm の場合の測定波形例を示す。この場合、工具先端曲率半径 100 μm に比べて切込みが 2 μm と非

Fig.10 Output signals (Cutting tool : Diamond, Workpiece : Ti, Depth of cut : $2\mu\text{m}$, Cutting speed : 18.2m/s)

Fig.11 Variation of tool tip temperature with depth of cut (Cutting tool : Diamond, Workpiece : Ti, Cutting speed : 18.2m/s)

常に小さいことから、切削は工具先端曲率部のみで行われていることとなる。

図 (i) は InAs 素子、InSb 素子からの出力波形であり、切り込みは $2\mu\text{m}$ と小さいが、切削の開始に伴って工具-切りくず接触面からの熱放射を検出できている。図 (ii) は図 (i) の波形の比をとり、図 7 の校正曲線を用いて温度に換算した波形である。切削中の温度に多少の変動幅があるが、温度は約 300°C となっている。

ところで一般に測定対象は温度分布を有する場合が多いが、放射温度計の特性から、測定される温度は測定面内の平均温度ではなく最高温度に近い温度となる¹⁸⁾。図において素子からの出力の変動は、切りくずの生成や盛り上がりなどによって温度計の視野内における高温部の面積の変化による影響が大きいと考えられる。

図 11 は切込みと工具刃先温度との関係である。刃先温度は、切込みが $2\mu\text{m}$ の場合で約 300°C 、 $36\mu\text{m}$ の場合で約 600°C となっており、刃先温度は切込みの影響を受け、切込みの増加とともに上昇している。

4.1.2 切削速度および工具材種の影響

切込みを $20\mu\text{m}$ 、被削材を Ti とし、工具としてダイヤモンドとアルミナを使用した場合の工具刃先温度の違いを調べた。切削速度を $12.1 \sim 24.3\text{m/s}$ と変化させて実験を行っている。切削速度が 24.3m/s の場合の測定波形例を図 12 に示す。先と同様、InAs 素子、InSb 素子からの出力比を求めることにより温度に換算する。

図 (a)、図 (b) より、ダイヤモンド工具、アルミナ工具いずれの場合でも切削開始後の早い段階で工具刃先温度はほぼ定常的な温度まで達している。切削開始からの温度上昇の速さはダイヤモンド工具の方がわずかに緩やかである。切削中の温度は、ダイヤ

Fig.12 Output signals (Workpiece : Ti, Depth of cut : $20\mu\text{m}$, Cutting speed : 24.3m/s)

Fig.12 Output signals (Workpiece : Ti, Depth of cut : $20\mu\text{m}$, Cutting speed : 24.3m/s)

Fig.13 Variation of tool tip temperature with cutting speed (Workpiece : Ti, Depth of cut : $20\mu\text{m}$)

モンド工具の場合で約 500°C 、アルミナ工具の場合で約 1200°C となっている。また、素子からの波形において、ダイヤモンド工具を使用した場合の出力に比べてアルミナ工具を使用した場合の方が温度計の出力電圧が高いのは、アルミナ工具の場合の方が温度が高いためであるが、ダイヤモンド工具の場合にはダイヤモンド底部まで空けた穴底の大きさが小さく、アルミナ工具に比べて視野が小さいことも原因として考えられる。

図 13 は切削速度と工具刃先温度との関係である。切削速度の増加とともに工具刃先温度も上昇している。また、ダイヤモンド工具の刃先温度の方が、アルミナ工具の刃先温度よりも約 300°C 程度低い。これは、ダイヤモンド工具の場合には工具の熱伝導率が大きいため刃先で生じた熱がすくい面を通して工具側へ伝導していく¹⁹⁾ためと考えられる。

4.2 被削材を超硬とした場合

4.2.1 切込みの影響

工具としてダイヤモンド、被削材として超硬を使用し、切込みを $0.3 \sim 2\mu\text{m}$ と変化させて実験を行った。超硬は切削工具として広

Fig. 14 Output signals (Workpiece : Tungsten carbide, Depth of cut : $1\mu\text{m}$, Cutting speed : 18.2m/s)

Fig. 15 Variation of tool tip temperature with depth of cut (Cutting tool : Diamond, Workpiece : Tungsten carbide, Cutting speed : 18.2m/s)

Fig. 16 SEM photographs of cutting groove (Workpiece : Tungsten carbide, Cutting speed : 18.2m/s)

Fig. 17 Variation of tool tip temperature with cutting speed (Workpiece : Tungsten carbide : Depth of cut : $2\mu\text{m}$)

く使用されているK10を用いた。切削速度は 18.2m/s である。図14に切込みが $1\mu\text{m}$ の場合の出力波形例を示す。図より、超硬を切削した場合のダイヤモンド工具の刃先温度は 1000°C を越えており、極めて高い温度に達していることが分かる。図15は切込みと工具刃先温度との関係である。刃先温度は切込みの増加とともに高くなり、切込みが $0.3\mu\text{m}$ と極めて小さな場合で約 800°C 、

Fig. 18 Measurement of tool wear

(a) Variation of tool tip temperature with cutting length

(b) Variation of tool wear with cutting length

(c) SEM photographs of tool tip (L : Cutting length)

Fig. 19 Variation of tool tip temperature and tool wear with cutting length and SEM photographs of tool tip (Workpiece : Tungsten carbide, Depth of cut : $1\mu\text{m}$, Cutting speed : 18.2m/s)

$2\mu\text{m}$ の場合でも 1200°C まで達しており、切込みの影響を大きく受けるといえる。

被削材表面に残された切削条痕の観察例を図16に示す。図(a)は切込み d が $0.3\mu\text{m}$ 、図(b)は切込み d が $2\mu\text{m}$ の場合である。

4.2.2 切削速度の影響

切込みを $2\mu\text{m}$ とし、切削速度と工具刃先温度との関係を調べた結果を図17に示す。切削速度の増加とともに刃先温度は上昇している。

4.2.3 切削距離の影響

通常、切削の進行とともに工具刃先は摩耗していく。また、工具刃先は前節で示したように極めて高い温度まで達しており、熱的な負荷は極めて大きい。そこで、被削材を超硬とした際の切削

距離と工具摩耗、工具刃先温度との関係について調べた。切削速度は 18.2m/s、切込みは 1 μ m とした。被削材の寸法は先と同様で、切削長さは 12.7mm であり、1 つの被削材に対する切削回数は約 60 回であることから、1 度の実験での切削距離は約 0.76m となる。1 度の実験ごとに被削材を新しいものと交換し、その都度所定の切込みを与えた。工具摩耗は、図 18 に示すように、新品時の工具形状と摩耗した工具形状とを重ね合わせて比較することにより、刃先後退量を工具摩耗として測定した。

図 19 に結果を示す。図 (a) に切削の進行に伴う工具刃先温度の変化を示す。図より、値にばらつきはあるが、切削距離が長くなるにつれて工具刃先温度は上昇しており、切削距離が 16.5m における刃先温度は切削初期に比べて約 200℃高くなっている。このときの工具刃先形状を観察し、刃先後退量を工具摩耗として表したものを図 (b) に示す。図より、切削とともに工具刃先は摩耗しており、切削距離が 16.5m での刃先摩耗は約 6.7 μ m となっている。また、図 (c) は、図 (a)、図 (b) における各点 (L1) ~ (L3) における刃先の観察例であり、刃先が徐々に摩耗していく様子が分かる。このような工具摩耗は発熱量を増加させて温度上昇を招き、工具摩耗をさらに促すものと考えられる。

本報では工具摩耗と工具刃先温度との関係について一つの被削材に対して一つの切削条件でのみ調べたため、ダイヤモンド工具の摩耗に及ぼす刃先温度や切削時間の詳細な影響については不明確であるが、本手法は種々の被削材に対するダイヤモンド工具の熱的な親和性による摩耗特性を明らかにするために有効であると考えられる。

4. 結 言

ダイヤモンドを工具として切込みが 0.3 ~ 45 μ m の微小切削実験を行い、熱放射温度計を用いてチタンおよび超硬切削時の工具刃先温度を測定した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 測定対象が温度計の測定領域よりも小さな場合でも、2 色温度計は測定対象の大きさの影響を受けない。
- (2) 切り込みの増加に伴い刃先温度は上昇する。例えばチタンの切削においてダイヤモンド工具刃先温度は切込み 2 μ m で約 300℃、40 μ m で約 600℃であった。
- (3) ダイヤモンド工具の刃先温度はアルミナ工具の刃先温度に比べて数百度低い。
- (4) 超硬の切削においてダイヤモンド工具刃先の温度は切込みが 1 μ m で 1000℃を越える高温となる。

- (5) 切削の進行とともに工具刃先は摩耗し、それに伴い刃先温度も上昇する。

謝 辞

本研究の一部は、平成 17 年度文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 16760095) の交付を受け、行ったものです。

参 考 文 献

- 1) 森脇俊道, 社本英二, 井上健二: ステンレス鋼の超精密超音波振動切削加工の研究, 精密工学会誌, **57**,11 (1991) 1983.
- 2) 白杵年, 鳴瀧則彦, 山根八洲男: Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr の旋削加工, 精密工学会誌, **61**,7 (1995) 1001.
- 3) 田中善衛, 菅野幹男, 小関隆博, 金田亮: 工業用純チタンの超精密鏡面研削加工, 精密工学会誌, **69**,3 (2003) 380.
- 4) S.Shimada, H.Tanaka, M.Higuchi, T.Yamaguchi, S.Honda and K.Obata: Thermo-Chemical Wear Mechanism of Diamond Tool in Machining of Ferrous Metals, Annals of the CIRP, **53**,1 (2004) 57.
- 5) 篠崎烈, 安井平司, 坂本重彦: ダイヤモンドバイトによるチタン合金の超精密切削の試み, 精密工学会誌, **72**,12 (2006) 1505.
- 6) 根津憲太郎, 宋詠燦, 森脇俊道, 柴坂敏郎: 断続切削による鉄系材料加工における単結晶ダイヤモンド工具の摩耗抑制, 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2005) 1279.
- 7) 中野貴之, 峠睦, 渡邊純二: PCD 工具による焼入れ鋼の切削に関する研究, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2005) 1169.
- 8) R.Snoeys, M.Maris and J.Peters: Thermally induced damage in grinding, Annals of the CIRP, **27**,2 (1978) 571.
- 9) 精密工学会: 新版精密工作便覧, コロナ社 (1992)27.
- 10) J.E.Morgan and J.A.Scott: Temperature Measurement when Diamond Grinding Ceramics, Ind. Diamond Rev., **62**,2 (1992) 65.
- 11) S.Chandrasekar, T.N.Farris and B.Bhushan: Grinding Temperatures for Magnetic Ceramics and Steel, ASME J.of Tribology, **112** (1990) 535.
- 12) 曾田範宗訳: 固体の摩擦と潤滑, 丸善 (1961) 38.
- 13) S.Suzuki and F.E.Kennedy: The Detection of Flash Temperatures in a Sliding Contact by the Method of Tribo-Induced Thermoluminescence, ASME J.of Tribology, **113** (1991) 120.
- 14) 上田隆司, 佐藤昌彦, 杉田忠彰: 工具 - 加工物接触面温度の測定, 精密工学会誌, **61**,10 (1995) 1448.
- 15) 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.
- 16) 計測自動制御学会温度計測部会編: 新編温度計測, コロナ社 (1992)225.
- 17) J.P.Kottenstette: Measuring Tool-Chip Interface Temperatures, ASME J.of Engineering for Industry, **108** (1986) 101.
- 18) Takashi Ueda, Masahiko Sato and Kazuo Nakayama: Cooling Characteristics of Cutting Grain in Grinding, Annals of the CIRP, **45**,1 (1996) 293.
- 19) 前川克廣, 仲野義博, 北川武揚: 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 (C 編), **62**,596(1996)1587.