



ファイバ連結型熱放射温度計によるバインダレス cBN エンドミル加工温度の測定*

佐藤昌彦** 上田隆司*** 田中久隆**

Measurement of Binder-Less cBN Tool Tip Temperature in End-Milling using Thermal Radiation Pyrometer Connected by Rotary Fiber Coupler

Masahiko SATO, Takashi UEDA and Hisataka TANAKA

The temperature on the rake face of a binder-less cBN tool tip in end-milling was measured using a fiber-optic two-color pyrometer. The radiation of the interface between the tool tip and the chip is transmitted through the binder-less cBN and accepted by the optical fiber located behind the tool tip. The radiation accepted is transmitted to a two-color detector, which consists of a InAs and InSb detector, through a rotary fiber coupler. The coupler makes it possible to transmit the radiation outside the milling machine. The fundamental transmission characteristics of the coupler was investigated theoretically and experimentally. This method was found to be very practical to measure the tool tip temperature in end-milling. The results obtained are as follows. The rake face temperature in the up-milling of 0.55% carbon steel ranged from 480 degrees centigrade to 560 degrees centigrade for the cutting speeds of 2.2 m/s to 4.4 m/s. The cutting temperature increases with the increase of cutting speed. The temperature in down-milling is higher a little than that in the up-milling.

Key words: tool tip temperature, end-milling, binder-less cBN, two-color pyrometer

1. 緒 言

cBN 工具は高硬度で高温強度に優れ、鉄系材料との親和性が低いことなどから、焼入鋼や鋳鉄、耐熱合金などのエンドミル加工にも広く使用されている。

ところで切りくずの生成によって発生した熱は、工具や工作物の温度を上昇させ、工具摩耗の促進や加工面変質層の生成など、悪影響を及ぼすことが多い。このような加工熱が及ぼす諸影響について検討する場合、加工温度を明らかにすることが必要となる。このため、エンドミル加工における切削温度に関しても、これまでもいくつかの研究がなされている。例えば、切りくず生成中に工具と被削材との間で発生する熱起電力を測定する方法¹⁾や、被削材に細い穴を開けておき、エンドミルが穴を通過する際に逃げ面からの熱放射を検出する方法²⁾、切削直後のエンドミル工具逃げ面温度から切削点温度を推定する方法³⁾、数値解析によってエンドミル工具の温度分布を求める方法⁴⁾などにより、数多くの知見が得られている。

ところが、cBN を工具としたエンドミル加工の温度測定では、cBN が電気絶縁体であることから熱起電力を利用した方法の適用は難しく、放射温度計を利用した場合でも切削直後の温度となることから、工具摩耗や熱損傷などに大きな影響を及ぼし、切削温度の中で最も基本的な温度と考えられる工具-切りくず接触面温度の測定はほとんど行われていないのが現状である。これは、エンドミル加工における切りくずの生成が、旋削の場合⁵⁾と異なり、微小な領域で高速で断続的に行われていることも測定を困難にしている一因であると考えられる。エンドミル加工の断続的な切削抵抗の測定に関しては、刃先に貼ったひずみゲージからの出力を AD 変換後に外部へ光転送して測定する方法が池崎ら⁶⁾により示されてい

るが、温度測定に関しては、高応答性の温度センサを高速で回転している工具に設置することは難しい。

ところで、一般的な cBN 工具はコバルトやセラミックスなどを焼結助剤として焼結しているが、最近では助剤を用いないいわゆるバインダレスの cBN 工具も開発、検討⁷⁾され、広く使用されている。これは、助剤を使用していないことから被削材との間での化学反応が生じにくく、また cBN 含有量が多いことから高硬度で耐摩耗性に優れるという特長を持つが、同時に、助剤を用いていないことから赤外線を透過するという性質を有している。

本研究ではこの性質を利用し、加工中に工具と切りくずとの接触面から放射された赤外線を cBN チップ裏面から受光し、回転型光ファイバカプラを介して工作機械の外部の熱放射温度計に受光した光を伝送する方法によって、エンドミル加工中の cBN 工具-切りくず接触面温度の測定を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を図 1 に示す。エンドミルは 1 枚刃であり、チップとしてコーナー部にバインダレス cBN をろう付けしたスローアウェイタイプのものを使用した。被削材は炭素鋼 S55C である。チップには、図 2 にその位置関係を示すように、温度測定用の光ファイバを挿入するための細い穴がチップ裏面から cBN 底面まで開けてあり、シャンク部にも光ファイバを通すための細い溝が削ってある。切りくずの生成によって工具-切りくず接触面温度は上昇するが、バインダレス cBN は、図 3 に透過率を示すように赤外線を透過する性質を有しているため、切削温度の上昇によって工具と切りくずとの接触面から放射された赤外線は cBN 内を透過し、cBN 裏面まで挿入した光ファイバ-1 によって受光、コア内を伝送される。この光ファイバ-1 を赤外線放射温度計に接続できれば温度を測定することが可能となるが、光ファイバ-1 はエンドミルに固定されているため、このまま接続したのでは

* 原稿受付 平成 17 年 3 月 14 日

** 正 会 員 鳥取大学工学部 (鳥取市湖山町南 4-101)

*** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

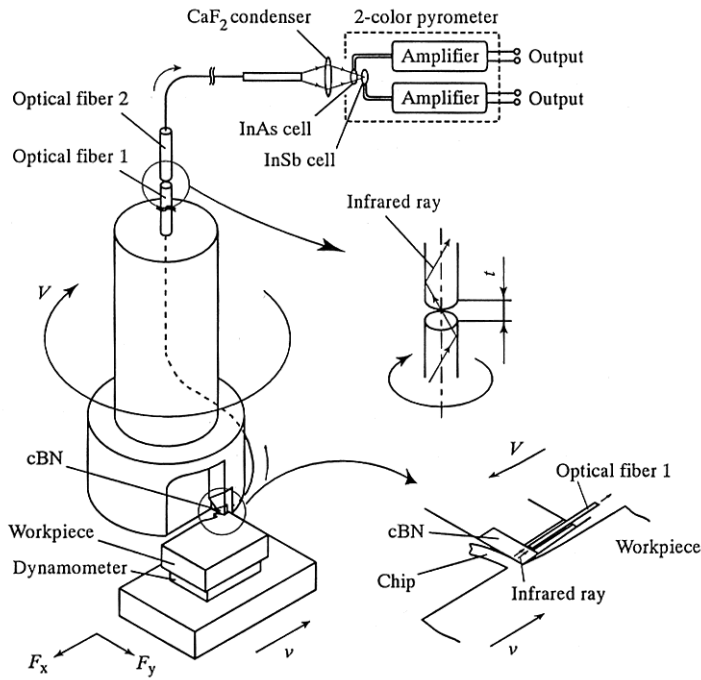


Fig.1 Experimental set-up

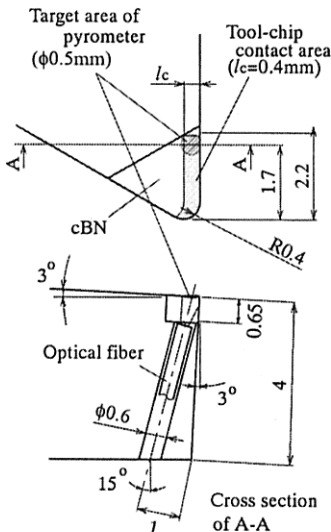


Fig.2 Detail of the tool tip and target area of pyrometer

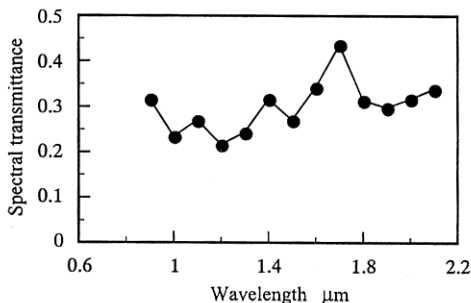


Fig.3 Spectral transmittance of binder-less cBN used in this experiment (0.6mm thickness)

回転とともにファイバがねじれて折損してしまい、赤外線を送ることができない。そこで、図1に示すように、光ファイバ-1から距離*l*だけ離れた箇所に別の光ファイバ-2を設置し、回転している光ファイバ-1からの放射光を固定した光ファイバ-2によって再受光することにより、回転体から

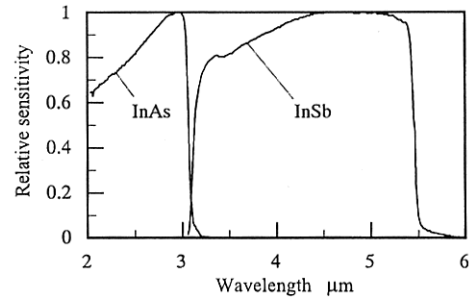


Fig.4 Relative spectral sensitivity of InAs photocell and InSb photocell

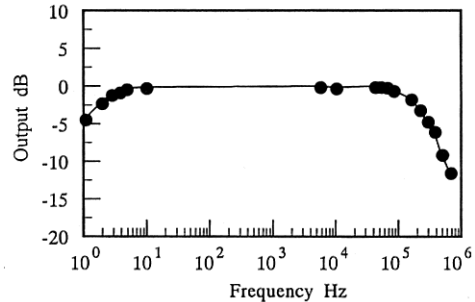


Fig.5 Frequency characteristics of the amplifier

の光伝送を可能とした。

光ファイバには、AlF₃系フッ化物ガラス光ファイバを使用した。コア径/クラッド径は、回転側の光ファイバ-1が195μm/215μm、受光側の光ファイバ-2が430μm/477μmであり、受光側の方が少し大きい。開口数NAはともに0.22であり(受光角 $2\zeta_{max} = 25.4^\circ$)、コア内部の屈折率が一般的なステップ型ファイバである。約0.5μmから4μmまでの赤外線を送り、波長が約2μmの赤外線に対する伝送損失は約0.015dB/mである。使用した集光レンズの材質はCaF₂であり、波長約0.5μmから8μmまでの赤外線に対する透過率は約0.9である。

赤外線検出素子にはInAs素子とInSb素子の2種類を使用し、2色温度計を構成している。ともに、赤外線が入射すると起電力を生じる光起電力型の素子であり、応答速度は1μsである。SN比向上のため、素子を液体窒素温度に冷却している。

それぞれの素子の分光感度特性を図4に示す。これらの素子は、図1中の温度計概略部に示すように、表層にInAsを、下層にInSbを配した2層構造となっている。2層素子に入射した赤外線のうち、3μm以下の短波長域の赤外線は表層のInAs素子で電気信号に変換され、3μm以上の長波長域の赤外線はInAsを透過し、下層のInSb素子で電気信号に変換される。検出波長域の異なるこれらの素子の出力比が温度によって決まる性質を利用し、温度に換算する。2層素子を用いることにより、光路の分岐が不要で簡便な取扱いが可能となっている。

これらの素子の増幅回路の矩形波入力に対する周波数応答特性を図5に示す。約100kHzまで損失のない応答性を示しており、各素子の応答速度が1μsであることから、温度計全体の周波数応答特性は同図によって与えられる。

被削材は水晶圧電型の切削動力計に取り付けてあり、チャージアンプを介して切削抵抗を測定する。

動力計と温度計からの出力は、データレコーダに記録したのち、パーソナルコンピュータで解析する。

2.2 光ファイバ連結部での損失

本温度計では、図1に示すように2本の光ファイバを連結

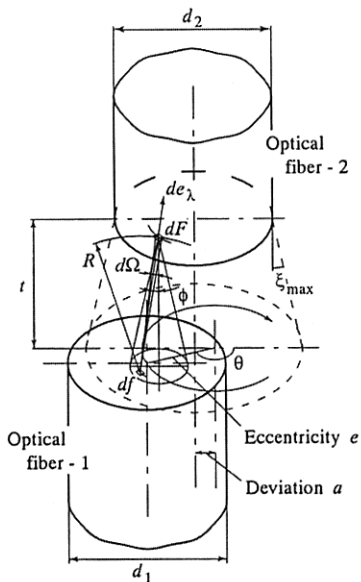


Fig.6 Model for energy transmission between fibers

させて回転体からの光伝送を行っている。このとき、回転している光ファイバ-1の回転中心軸と固定している光ファイバ-2の中心軸とが完全に一致している場合には連結部における光伝送は理想的に行われるが、実際には、光ファイバ-1と光ファイバ-2との中心軸を完全に一致させることは難しく、軸がずれることが多い。また、光ファイバ-1の中心軸とその回転軸とを一致させることも難しく、軸が振れて回転することも多い。このような場合には、両ファイバ間の軸のずれと、光ファイバ-1の回転軸の振れによって、伝送されるエネルギーが回転のたびに変動することが考えられる。そこで、これらの影響について解析的に調べてみた。

図6に連結部における両ファイバ間の光エネルギーの伝送モデルを示す。回転しているファイバ-1の出射端面から距離 t だけ離して、ファイバ-2を設置し固定した場合を示している。このとき、固定した光ファイバ-2の中心軸に対して回転している光ファイバ-1の回転中心軸が a だけずれており、光ファイバ-1の中心軸はその回転中心軸から e だけ振れているものとする。

光ファイバ-1内に微小面積 df を考える。 df から放射され、光ファイバ-2に受光される赤外線のうち、 df から立体角 $d\Omega$ で表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

$$de_\lambda = J_{\lambda n} d\lambda \cos\phi df d\Omega \quad (1)$$

で表される⁸⁾。ただし $J_{\lambda n}$ は面の法線方向のスペクトル強度であり、また、 $d\Omega = (dF \cos\phi) / R^2$ である。式(1)を df に関

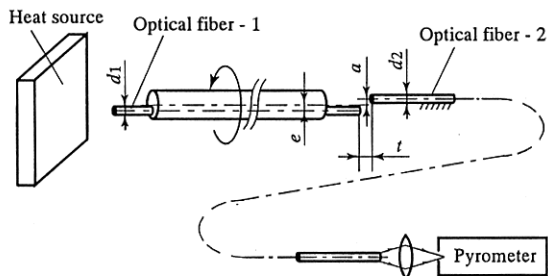


Fig.8 Experimental apparatus for measuring the transmission energy between fibers

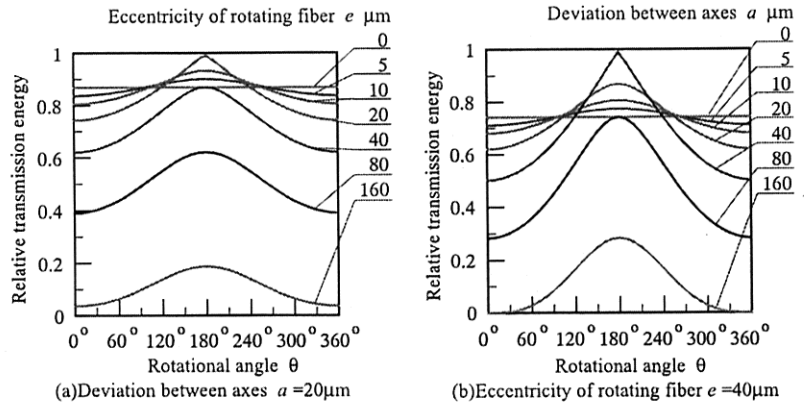


Fig.7 Influence of the deviation between axes and the eccentricity of rotating fiber on the transmission energy between fibers ($d_1=200\mu\text{m}$, $d_2=200\mu\text{m}$, $\xi_{\text{max}}=12.7^\circ$, $t=5\mu\text{m}$.)

して積分すれば、 dF が受光する放射エネルギー e_λ が求まり、さらに e_λ を dF に関してコア内で積分すれば、ファイバ-1からファイバ-2に伝送されるエネルギー E_λ が求まる。

光ファイバ間の軸ずれと軸振れが出力に及ぼす影響の計算結果を図7に示す。図(a)は軸ずれを $20\mu\text{m}$ として軸振れをパラメータとした場合、図(b)は軸振れを $40\mu\text{m}$ として軸ずれをパラメータとした場合の計算結果である。計算に使用したファイバのコア径は $200\mu\text{m}$ であるため、設定した $20\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$ はそれぞれその1割, 2割に相当している。横軸はファイバ-1の回転軸まわりの回転角で、 360° で1回転していることを表している。縦軸は相対的な伝送エネルギーで、軸ずれと軸振れが全くない場合の伝送エネルギーを1としている。図から分かるように、ファイバに軸ずれ, 軸振れがある場合には、ファイバの回転に伴って伝送エネルギーが変動しており、例えば図(a)では、軸振れが $40\mu\text{m}$ の場合、相対受光エネルギーは0.6から0.8の間を周期的に変動する。

以上のように、両ファイバ間に軸ずれや軸振れがあると、出力には変動が生じる。このため温度測定においては、それが温度変化による変動なのかファイバ間のずれによる変動なのかを区別する必要があるが、2色温度計の場合には、軸ずれや軸振れによる伝送エネルギーの変動は2つの素子で全く等しいため、両者の出力比を取った場合にはその影響は相殺されることとなり、軸ずれや軸振れの影響を受けないといえる。

このことを実験的に確かめてみた。図8は実験の概略である。丸棒を用意し、その中心軸から e だけずれた位置に開けた穴に光ファイバ-1を挿入し、ファイバ-1の端面から距離 t だけ離れた位置に光ファイバ-2を、光ファイバ-1を挿入

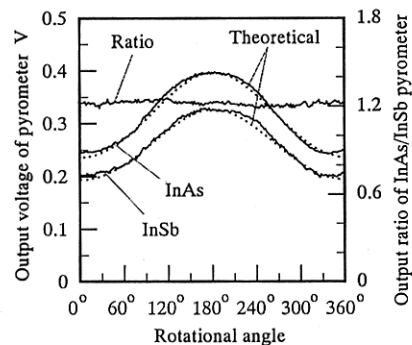


Fig.9 Variation of transmission energy with rotational angle of the fiber ($d_1=195\mu\text{m}$, $d_2=430\mu\text{m}$, $\xi_{\text{max}}=12.7^\circ$, $a=90\mu\text{m}$, $e=80\mu\text{m}$, $t=635\mu\text{m}$.)

した丸棒の中心軸から a だけずらして設置する。すなわち、丸棒を回転させると、ファイバ-2の中心軸と a だけずれた軸の周りを、ファイバ-1が e だけ振れて回転することとなる。このとき、一定温度に加熱した熱源からの熱放射を丸棒を回転させた状態で光ファイバ-1で受光し、ファイバ-2で再受光したときの温度計の出力を測定した。

図9に測定結果を示す。丸棒の回転数は1100rpmである。横軸に丸棒の回転角度を、縦軸にそのときのInAs温度計とInSb温度計の出力とその比を示す。図中の実線は実験値、破線は先に示した式(1)を用いて数値計算した値であり、両者はよく一致している。両ファイバの軸間がずれていることから、出力には1回転を周期とした変動が生じていることが分かる。しかしながら、その比においてはこれらの変動はキャンセルされ、温度計の出力変動によらずほぼ一定の値が得られている。すなわち、比を取ることで、ファイバ軸間のずれや振れの影響を受けない温度測定が可能であることが確かめられた。

2.3 軸ずれと軸振れの関係

次に、軸ずれと軸振れとの関係について考える。図10は、2つの光ファイバの端面を同一平面に投影したものであり、両ファイバ間の位置関係を示している。同図(a)は、軸ずれが u 、軸振れが v の場合で、同図(b)は逆に、軸ずれが v 、軸振れが u の場合である。また、両図とも、ファイバ-1が、ファイバ-1の回転中心とファイバ-2の中心を結ぶ線から角 θ だけ回転した状態を表している。

回転中心を O_a, O_b とおくと、 $\triangle P_a O_a Q_a$ と $\triangle P_b O_b Q_b$ は2辺と間の角が等しいことにより合同である。従って、図(a)、図(b)において、ファイバ間の中心距離 $P_a Q_a$ と $P_b Q_b$ は等しいことになる。すなわち、軸ずれが u 、軸振れが v の場合と、逆に軸ずれが v 、軸振れが u の場合とでは、伝送エネルギーの変動が全く等しい。このことは、一定出力の光源に対して伝送エネルギーの変動があった場合、それが軸のずれによるものなのか軸の振れによるものなのか区別ができないことを示し、また、両ファイバ間の軸ずれや軸振れを調整する場合には、どちらを調整しても等しく改善されることがいえる。

3. 実験結果

3.1 実験条件

実際の実験は、精密旋盤を使用して行っている。すなわち、エンドミルを主軸チャックに、被削材を刃物台に取り付けており、主軸を回転させた後に、刃物台に送りかけることにより加工を行った。

被削材には炭素鋼 S55C を使用した。エンドミル1回転あたりの被削材の送りは0.2mm、エンドミルの軸方向の切込みは2mm、半径方向の切込みは3mmである。切削速度は2.2m/s ~ 4.4m/s であり、アップカット及びダウンカットで実験を行った。工具のすくい角は -3° 、逃げ角は 3° であり、エンドミルの直径は52mmである。エンドミル1回転あたりの送り量を一定としていることから、最大切り厚さ t_m や切削長さ l は切削速度によらず一定であり、アップカットの場合で $t_m = 0.093\text{mm}$ 、 $l = 12.87\text{mm}$ 、ダウンカットの場合で $t_m = 0.093\text{mm}$ 、 $l = 12.36\text{mm}$ である⁹⁾。

被削材は圧電型動力計に取り付けてあり、切削抵抗の主分力 F_x 、背分力 F_y を測定する。

実験条件と工具に開けた穴の位置関係から、本研究で

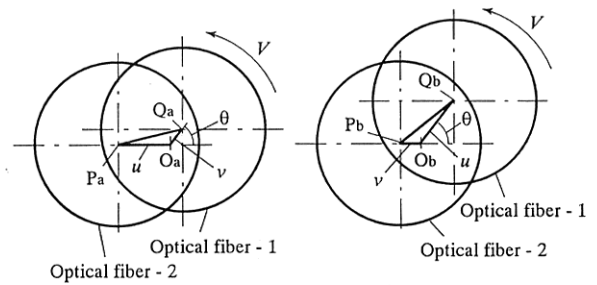


Fig.10 Positional relationship between the projected planes of incident faces of the fibers

は図2に示すように、工具-切りくず接触域における被削材自由面に近い、直径約0.5mmの斜線の領域の温度を測定していることになる。また、図2の工具-切りくず接触領域は、接触長さ l_c を、最大切込みのときの理論接触長さの2倍¹⁰⁾として求めた値を図示している。放射温度計の特性から、測定温度は測定領域内からの平均放射エネルギーを温度に換算した値であり、測定領域内の平均温度よりは、最高温度に関連した値となる¹¹⁾。

3.2 温度校正

温度計の出力校正は、一定温度に加熱した被削材試片から放射される赤外線を経由して光ファイバで受光し、

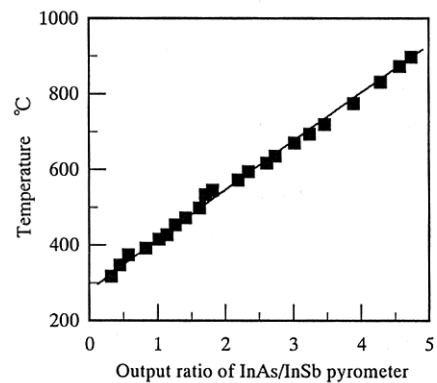


Fig.11 Calibration curve of pyrometer

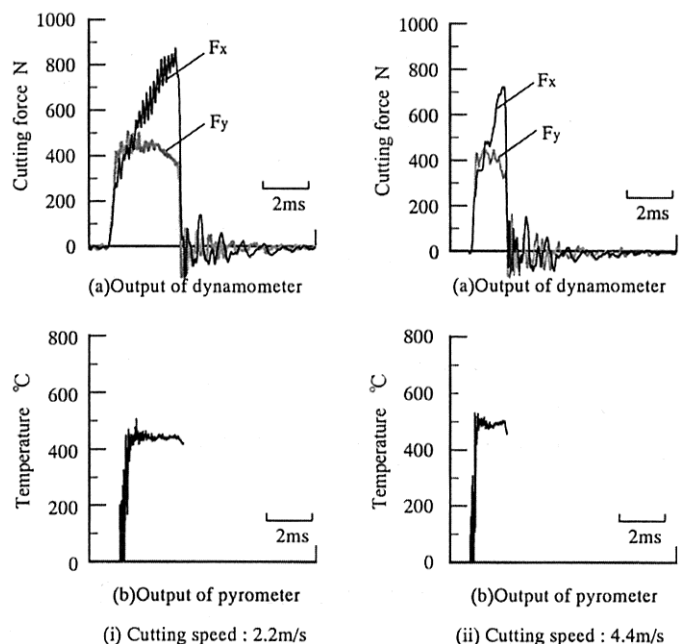


Fig.12 Output waves in up-milling

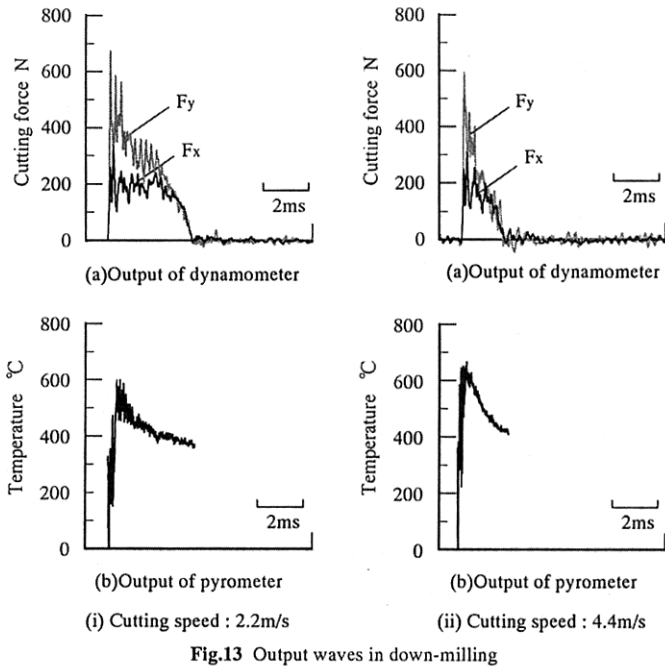


Fig.13 Output waves in down-milling

温度計に伝送して出力電圧を記録した。図 11 に温度計の出力比と試片温度との関係を示す。図より、温度計の出力比と温度とは 1 対 1 の関係にあり、出力比から温度に換算できることが分かる。

3.3 測定結果

測定波形例を図 12, 図 13 に示す。図 12 はアップカット、図 13 はダウンカットの場合である。また、それぞれの図において、(i) は切削速度が 2.2m/s, (ii) は切削速度が 4.4 m/s の場合を示し、(a) は切削動力計の出力、(b) は各赤外線検出素子からの出力信号の比を求め、図 11 の校正曲線から温度に換算した波形である。

これらの図より、例えば (i) の $v=2.2\text{m/s}$ の場合では、切削中の工具刃先温度はアップカットの場合で約 450°C, ダウンカットの場合で約 520°C まで達している。アップカットの場合は切削中の刃先温度はほぼ一定の値であるが、ダウンカットの場合は切削初期が最も高く、切削中は測定温度が下がる傾向にある。

図 14 に切削速度と刃先温度との関係を示す。切削速度の増加とともに刃先温度も上昇するが、切削速度が 2 倍になった場合の刃先温度の増加は約 1.2 倍と、上昇の割合は小さい。また、ダウンカットの場合の方がアップカットの場合よりも刃先温度の最大値は約 80°C 高い傾向にある。

4. 結 言

本研究では、赤外線を透過するというバインダレス cBN 工具の性質を利用し、エンドミル加工中に工具と切りくずとの接触面から放射された赤外線を cBN チップ裏面から受光し、回転型光ファイバカプラを介して工作機械の外部へ伝送する方法によって、加工中の cBN 工具-切りくず接触面温度の測定を行った。得られた結論を以下に示す。

- (1) 回転型光ファイバカプラにおいて、伝送、受光側のファイバ間に軸ずれや軸振れがあるとファイバの回転を周期として出力に変動が生じる。

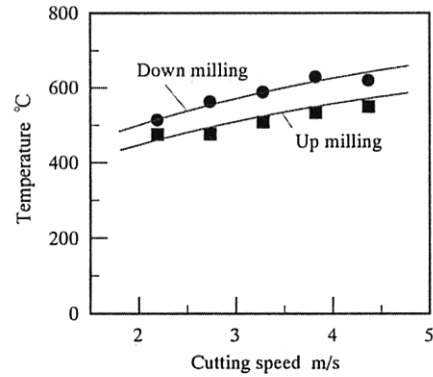


Fig.14 Variation of tool tip temperature with cutting speed

- (2) 2色温度計を使用することにより、カプラ部のファイバ間の軸ずれや軸振れによる伝送エネルギーの変動の影響は相殺され、軸ずれや軸振れの影響を受けない温度測定が可能である。
- (3) カプラ部における軸ずれと軸振れが伝送エネルギーの変動に与える影響は等しく、区別できない。
- (4) 例えば $v=2.2\text{m/s}$ の場合、切削中のバインダレス cBN 工具刃先温度はアップカットの場合で約 450°C, ダウンカットの場合で約 520°C であった。
- (5) 切削速度の増加とともに刃先温度も上昇するが、切削速度の増加の割合に比べて刃先温度の上昇の割合は小さい。
- (6) ダウンカットの場合の方がアップカットの場合よりも切削中の刃先温度の最大値は高い傾向にある。

謝 辞

cBN 工具の提供を受けました住友電工ハードメタル株式会社に感謝致します。また、本研究の一部は高橋産業経済研究財団平成 16 年度研究助成を受けたものであり、ここに感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 奥島啓式, 星鉄太郎: 正面フライス削りにおける工具-切りくず接触面温度の測定, 日本機械学会誌 (第 3 部), 32, 238 (1966-6) 990.
- 2) 武藤学, 森田昇, 吉田嘉太郎: 高硬度金属材料の高速エンドミル加工に関する研究 (第 1 報) - 一切削抵抗・工具切れ刃温度同時測定装置の開発 -, 精密工学会誌, 64, 11 (1998) 674.
- 3) 細川晃, 小田健作, 山田啓司, 上田隆司: 断続切削における工具逃げ面温度, 精密工学会誌, 66, 11 (2000) 1786.
- 4) 帯川利之, 篠塚淳, 末吉靖弘: エンドミル切削の有限要素解析, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2003) 524.
- 5) Bernhard Mueller, Ulrich Renz, Stefan Hopper and Fritz Klocke: Radiation Thermometry at a High-Speed Turning Process, ASME J. Manuf. Sci. Eng., 126 (2004) 488.
- 6) 池崎八生, 竹内芳美, 坂本正史: 光伝送を使用した回転工具の切削抵抗測定: 精密工学会誌, 48, 12 (1982) 1639.
- 7) 新谷一博, 高井一輝, 角谷均: バインダレス cBN 工具を用いた高速切削環境における刃先温度監視システムの構築, 精密工学会誌, 70, 1 (2004) 123.
- 8) 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輻射温度計による加工温度の測定 (温度計の特性), 日本機械学会誌 (C 編), 54, 545 (1992) 302.
- 9) M. C. Shaw: Metal Cutting Principles, Oxford Univ. Press (1984) 454.
- 10) 中山一雄: 切削加工論, コロナ社 (1978) 54.
- 11) Takashi Ueda, Masahiko Sato and Kazuo Nakayama: Cooling Characteristics of Cutting Grain in Grinding, Annals of the CIRP, 45, 1 (1996) 293.