

小径ボールエンドミルによる高速ミーリングに関する研究*

—工具逃げ面における温度分布の測定—

細川 晃** 周 智鹏*** 山田啓司** 上田隆司**

Studies on High-Speed Milling with Small Ball End Mill
—Temperature Distribution on Flank Face of Cutting Tool—

Akira HOSOKAWA, Zhipeng ZHOU, Keiji YAMADA and Takashi UEDA

A new three-color infrared radiation pyrometer using an optical fiber is developed for measuring cutting temperature in high speed machining by small ball end mill. The high speed air spindle unit is adopted to the ordinary milling machine so that the maximum spindle revolution of 40000 rpm is attainable. The ball radius of the carbide cutter is 3 mm and the side cutting of carbon steel with ballnose is executed without cutting fluid. Cutting temperature distribution along the ball-nosed cutting-edge is measured. The influences of spindle rotational speed, radial depth of cut and feed per tooth on the temperature distribution at the flank face are examined. The maximum temperature of peripheral cutting edge about 700°C is obtained even at the rotation angle of 180° after cutting, and it drops along the ballnose toward the ball tip. Relatively large temperature gradient arises along the ball cutting-edge at higher spindle revolution because cutting speed depends on the local tool radius. Depth of cut and feed per tooth, at the same time, affect the overall temperature at the ball cutting edges. The cooling characteristics in air cutting reveals that the temperature difference during one cycle of intermittent cutting increases as spindle speed decreases. The relationship between the peripheral cutting speed and the tool temperature varies from tool shank to ball tip because the interactions between cutting edge and workpiece change along the ballnose.

Key words: ball end mill, high speed milling, cutting temperature, three-color pyrometer, flank face

1. 緒 言

近年、IT 関連機器を中心とした加工部品の集積化・小型化にともなって、小径エンドミルやドリルなどの小型工具を用いた高精度加工技術が注目されている。特に、小径ボールエンドミルによる金型の自由曲面加工に対する要求は急速に高まっており、その高精度化、高速化に関する研究が精力的に行われている^{1)~3)}。周知のごとく、ボールエンドミルは円弧状の切れ刃を利用して自由な曲面形状を生成することを特徴としているため、工具の経路によって工具と工作物の干涉状態が変化し、加工面の創成機構や加工精度が大きく影響を受ける。すなわち、加工時の工具切れ刃の位置によって切削速度や切り込みなどが異なるため切れ刃に大きな温度分布が生じ、それに起因した偏った工具摩耗が生じることが考えられる。金型などの難削材を加工する場合には大きな切削抵抗と相まって特に問題となる。小径に限ったことではないが、これまで、ボールエンドミル加工に関しては、切れ刃の切り取り形状や仕上げ面の幾何学的な解析⁴⁾⁵⁾、切削抵抗や主軸系の動特性⁶⁾⁷⁾あるいは超高速化による工具摩耗に関する詳細な研究⁸⁾などがみられるが、工具切れ刃温度に関する研究はみあたらない。この理由としては、ボールエンドミル加工では平均的な温度ではなく接触部にわたる温度分布が重要であり、その測定が極めて困難なことが挙げられる。

著者らはこれまで、光ファイバを用いた2色温度によって

エンドミル加工における工具逃げ面温度の測定を行い、工具温度と逃げ面摩耗に密接な関係があることを明らかにしてきた⁹⁾。そこで本研究では、非接触で測定できる本温度計の特徴を活かしてボールエンドミルのボール刃から外周刃にいたる逃げ面の温度分布を測定し、加工時における切れ刃の負荷状態を評価した。その目的は、工具損耗形態に密接に関連する温度を把握することで、工具損耗を抑制するための工具姿勢と経路を決定する基礎データを得ることにある。また、ボールエンドミルでは工具軸心のボール刃先端部から外周部に沿って温度が広範囲に分布すると予想されることから、より低温から測定可能な3色温度計を新たに考案し製作した。

2. 実験方法

2.1 光ファイバ型3色温度計

図1に示すように、光ファイバ型3色温度計は測定対象面からふく射される赤外線を1本の光ファイバで受光し、3色

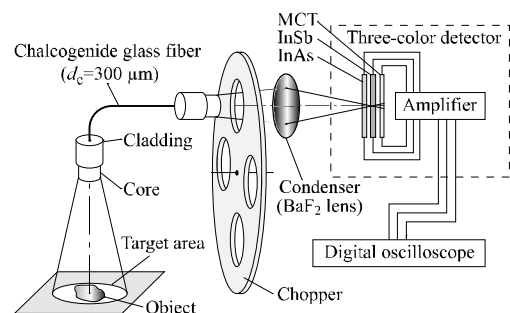


Fig.1 Structure of three-color pyrometer with optical fiber

* 原稿受付 平成16年3月24日

** 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

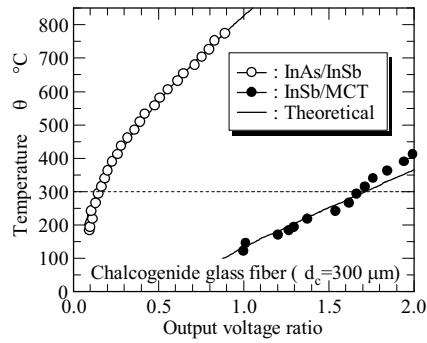


Fig.2 Calibration curves of three-color pyrometer

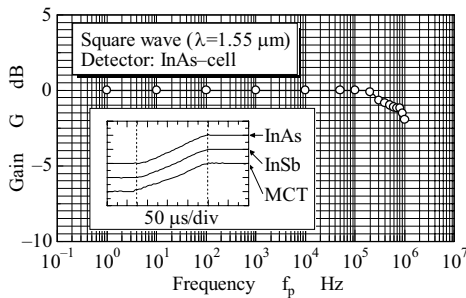


Fig.3 Frequency characteristics of three-color pyrometer

素子に送る構造になっている。3色素子とは感度波長域の異なる3つの光電素子を積層構造にしたもので、従来型のInAs(カットオフ3 μm)とInSb(カットオフ5.5 μm)からなる2色素子に⁹⁾、より長波長域に感度を有するMCT(HgCdTe光導電素子:カットオフ14 μm)を付け加えたものである。すなわち、高温域の測定はInAs/InSb-2色温度計として、InAsが反応しない低温域ではInSb/MCT-2色温度計として使用する。

図2に本温度計の校正曲線を示す。図の実線は素子の分光感度等より算出した理論曲線であり、実験値とよく一致していることがわかる。図にみるように、InSb/MCT-2色温度計はおよそ100°C、InAs/InSb-2色温度計はおよそ200°C以上に感度を有している。尤も、この結果は図1に示す感温面すべてが一様に表示温度になっている場合であり、測定対象物が感温面に比較して小さい場合には測定可能最低温度は上昇する。ただし、その場合でも校正曲線自体は変化しない⁹⁾。

図3は温度計にパルス状のレーザ光(λ=1.55 μm)を入射して求めたInAs-温度計の周波数特性であるが、およそ500 kHz(1 dB減衰)まではほぼフラットな特性を有していることがわかる。また、図中の波形はメカニカルチョップによって矩形波状にエネルギーを入射したときの3つの素子の出力波形である。すべての素子でほぼ同程度の立ち上がり特性をもっており、本温度計は実験に十分対応できることが確認できる。

2.2 実験装置

本研究では汎用のフライス盤主軸に高速エアスピンドルユニット(欄ナカニシ:HES-NT50S)を取り付け、超硬ソリッドエンドミル(φ6mm, 2枚刃)で炭素鋼S45Cを切削した。最高主軸回転数は40000 rpmである。実験装置および切削温度測定方法を図4に示す。図に示すように、常に片側のボール刃と外周刃の一部が工作物と接触するような側面加工(乾式, アップカット)を行い、切削温度を測定する。実験条件とボールエンドミルの仕様を表1に示す。

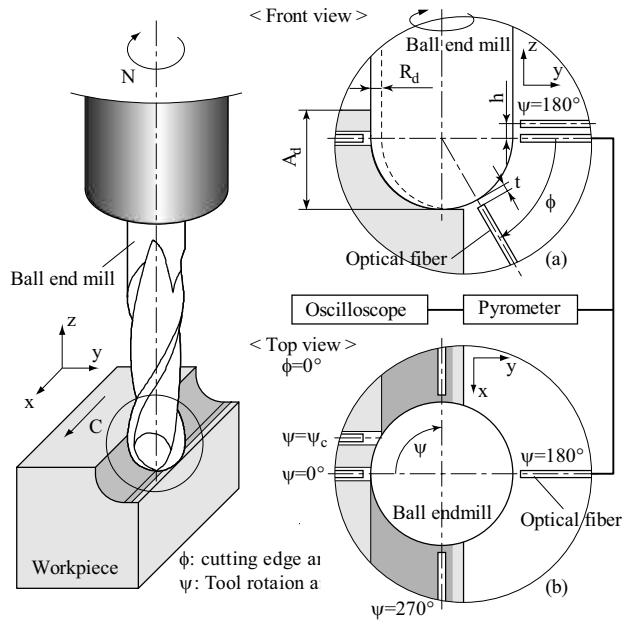



Fig.4 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Tool		Solid carbide ball end mill (2-Flute) Ball radius R = 3 mm Helix angle β = 25°
Workpiece		Carbon steel (JIS S45C)
Spindle speed	N	25000 – 40000 rpm
Feed per tooth	f	0.01 – 0.02 mm/tooth
Radial depth of cut	Rd	0.1 – 0.3 mm
Axial depth of cut	Ad	3.5 mm
Cutting style		Up-cut without coolant

2.3 温度計測

本研究では回転中の工具逃げ面からふく射される赤外線を利用し、加工時における工具温度を測定している。前述したように、ボールエンドミルでは工具と工作物の干渉状態が接触域で変化するため、工具温度も接触域で大きく異なることが考えられる。そこで、本実験では、図4(a)に示すように、ボールエンドミルの外周刃からボール刃にそってファイバを配置し(ファイバ設置角/切れ刃角度φ=0°, 30°, 60°, 75°)、工作物と接触する部分の温度分布を測定した。なお、ファイバ設置の制約上、温度分布を測定できるのは切削点からψ=180°回転した後の逃げ面温度である。そのため、図4(b)に示すように、工具の食いつき点をψ=0°とし、ψ=90°, 180°および270°回転した位置における工具逃げ面温度も測定した。これは切れ刃角度φ=0°における工具の冷却特性を測定することになるが、その冷却特性よりφ=0°以外のボール刃の切削点の温度を推定することができる(ボール刃の部分は場所によって周速度が異なるが、後述するように冷却速度に大きな差はない)。表2に温度測定に使用した光ファイバの特性値と温度測定条件を示す。

3. 実験結果

3.1 温度計の出力波形

図5(a)は温度計の出力波形の一例を示したものである。使用したボールエンドミルは2枚刃であるため、各切れ刃から

Table 2 Conditions of temperature measurement

Characteristics of optical fiber	
Core material	Chalcogenide glass
Core diameter	$d_c = 300 \mu\text{m}$
Numerical aperture	NA = 0.4
Acceptance angle	$2\xi_m = 47.2^\circ$
Setting location of fiber (q.v. Fig.4)	
$\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ($\psi = 180^\circ$)	
$\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ($\phi = 0^\circ$)	
$t = 0.5 \text{ mm}$	
$h = 0, 0.25 \text{ mm}$	

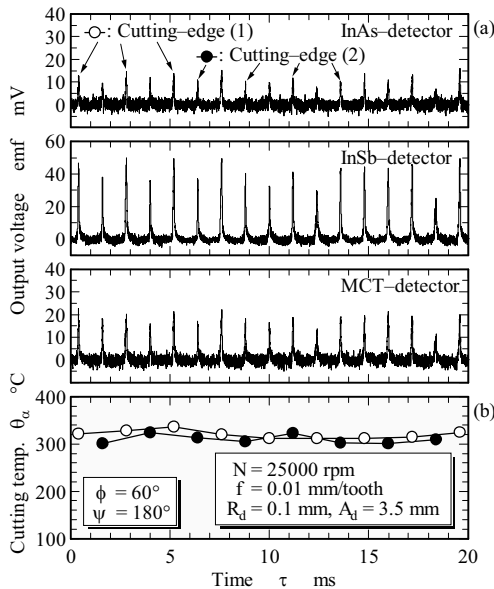


Fig.5 Typical output profiles of three-color pyrometer and temperature histories of two cutting edges

の出力が交互にでていることになる。温度が比較的低いため InAs 素子の出力は小さいが、切削パルス毎の温度を明確にとらえていることがわかる。工具逃げ面温度は各パルスのピーク電圧の比から求めることができる。同図(b)は InSb 素子と MCT 素子の出力より求めた両切れ刃の温度履歴の一部である。この場合、2枚刃の各切れ刃(○, ●)間で大きな温度差はみられず、安定した切削が行われていることがわかる。ただし、単発的には温度が上下している。また、ボールエンドミルのわずかな軸心のずれや振れ回りあるいは工具の偏摩耗などがある場合には両刃で温度が大きく異なる。次節以降に示す実験結果は2枚の切れ刃の温度差が小さい場合のみ採用し、連続した20パルス(各切れ刃からそれぞれ10パルス)の温度の平均値を当該切削条件の工具逃げ面温度としている。

3.2 ボール刃逃げ面における温度分布

図6に主軸回転数Nを変化させたときの温度分布の変化を示す。データは $\psi = 180^\circ$ 回転した時の温度であるため切削点ではこれより高温であるが、温度分布自体には大きな変化はないものと考えられる。図にみるように、外周刃の部分で最も温度が高く、ボール刃部分では中心に向かって温度が低下している。 $\phi = 0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲でみると、 $N = 25000 \text{ rpm}$ では $310^\circ\text{C} \sim 415^\circ\text{C}$ とおよそ 100°C 、 $N = 40000 \text{ rpm}$ では $510^\circ\text{C} \sim 680^\circ\text{C}$ とおよそ 170°C の温度差が生じている。これは、ボール刃部では切削点の半径が大きくなるにしたがって切削速度が増加するためと考えられる。なお、 $\phi = 75^\circ$ 以上のボール刃先端部

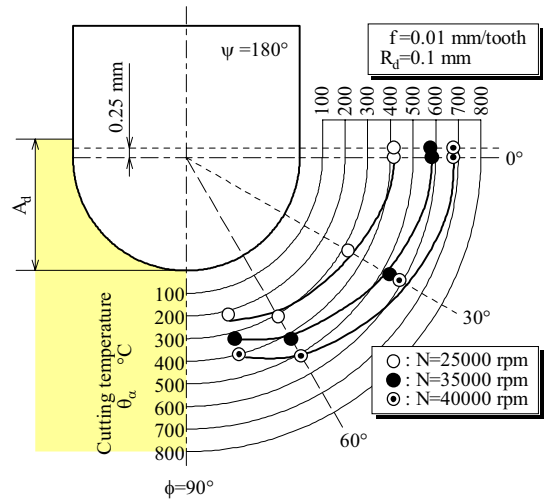


Fig.6 Variations of cutting temperature distribution with spindle rotational speed

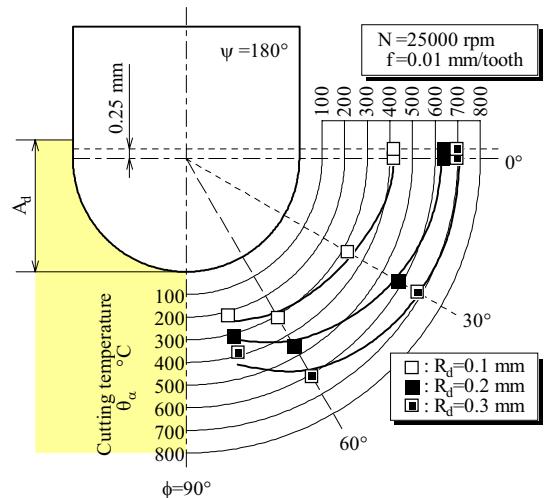


Fig.7 Variations of cutting temperature distribution with radial depth of cut

に近い部分では摩擦やバニシ作用が顕著になるとともに、連続切削に近い状態になるため、温度分布曲線が大きく変化することが考えられる。

また、主軸回転数Nの増加にともなう工具逃げ面温度の上昇度をみると、 $\phi = 60^\circ$ では約 200°C なのに対し、 $\phi = 0^\circ$ および外周刃では約 265°C とNの影響が大きいことがわかる。

図7は半径切り込み R_d を変化させたときの温度分布の変化を示したものである。当然のことながら、外周刃に近づくにしたがって高温になっている。しかしながら、図6と比較して特徴的なことは、ボール刃全体にわたって温度が上昇していることである。 R_d の変化幅 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ に対し、 $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ でそれぞれ $279^\circ\text{C} (415^\circ\text{C} \sim 694^\circ\text{C})$ 、 $355^\circ\text{C} (323^\circ\text{C} \sim 678^\circ\text{C})$ 、 $297^\circ\text{C} (311^\circ\text{C} \sim 608^\circ\text{C})$ と $\phi = 60^\circ$ においても比較的大きく上昇している。これは、 $\phi = 0 \sim 60^\circ$ の範囲ではボール刃に沿った半径方向切り込みがそれほど変わらないため、 R_d の増加がそのまま温度上昇に反映したと一因と考えられる。

図8は1刃あたり送りfの影響を示したものであるが、fの影響もボール刃全体にわたっているが、Nや R_d に比べ、それほど大きくないことがわかる。これは本実験では1刃あたり送り自体が小さく、実際の切り取り形状が大きく変化しな

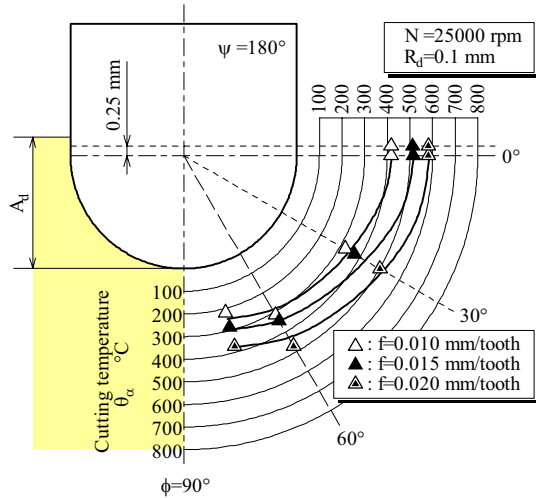


Fig. 8 Variations of cutting temperature distribution with feed per tooth

かったためと考えられる。

以上の結果より、ボール刃逃げ面に生じる温度差は高速回転においてより大きくなるものと考えられ、今後、ボール刃先端部を含めた温度分布特性を詳細に検討する必要がある。

3.3 断続切削時における温度履歴

断続切削における工具の加熱-冷却特性を調べるため、ファイバの設定角度 ψ を変化させて測定した。ただし、ファイバの設定の制約より、測定した温度は $\phi = 0^\circ$ の温度である。

図9は主軸回転数 N を変化させたときの工具逃げ面の冷却曲線である。アップカットであるため、 $\psi = 0^\circ$ で切削を開始し、 $\psi = \psi_c (\approx 14.8^\circ)$:幾何学的に計算)にて切削が終了、その後 $\psi = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ と空転しながら冷却される。次の3.4節で詳しく検討しているが、図中の実線は、逃げ面温度 θ_α と冷却時間 τ の関係から近似的に $\theta_\alpha(\tau) - \theta_r = (\theta_i - \theta_r) \cdot \exp(-a\tau)$ なる曲線をあてはめた後、 ψ との関係で描画したものである。図よりわかるように、 $N=25000$ rpmでは360~660°C、 $N=35000$ rpmでは590~850°C、 $N=40000$ rpmでは740~910°C程度の温度変化になっている。すなわち、主軸回転数が増加するしたがって全体的に工具の温度は上昇して切削点では900°C以上にも達するが、断続切削過程における温度変化幅は300°C、260°C、170°Cと逆に小さくなることから、靱性が比較的大きいが耐熱性に限界がある工具では、逃げ面摩擦が促進されるために高速切削化が難しいことが推察される。一方、靱性が劣る工具では温度変化が大きい低切削速度域での熱衝撃によるチッピングの誘発が問題となる。

なお、図9における $\psi = 180^\circ$ の温度は図5の $\phi = 0^\circ$ の温度より高くなっているが、これは連続した切削実験によって工具摩耗が少なからず進行したためである。工具逃げ面温度(到達最高温度および温度変動幅)が工具損耗に及ぼす影響については、今後の検討課題である。

図10、図11はそれぞれ半径切り込み R_d および1刃あたり送り f を変化させたときの実験結果であり、実線は図9と同様の方法で描いたものである。なお、図10において $\psi = 270^\circ$ の温度(■, □)が高くでているが、これは工具摩耗の影響で上昇したものと考えている。そのため、 $\psi = \psi_c \sim 180^\circ$ のデータを重視して近似冷却曲線を算出している。図にみるように、 R_d および f を変化させても空転時にはほとんど影響しないため、加熱-冷却特性に大きな変化は生じていない。

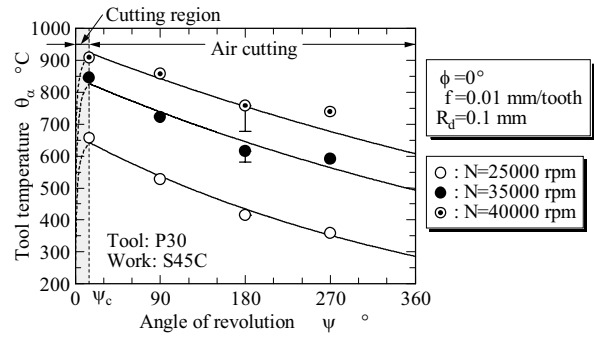


Fig. 9 Change of tool flank temperature during one cycle of intermittent cutting process as a parameter of spindle speed

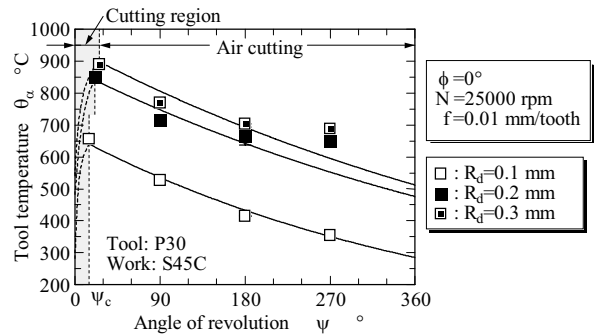


Fig. 10 Change of tool flank temperature during one cycle of intermittent cutting process as a parameter of radial depth of cut

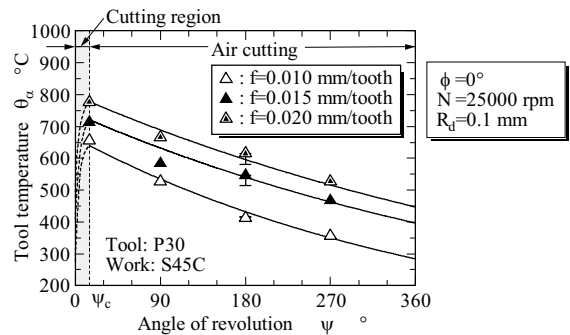


Fig. 11 Change of tool flank temperature during one cycle of intermittent cutting process as a parameter of feed per tooth

3.4 切削点におけるボール刃の温度特性

ボールエンドミル加工で最も興味があるのはボール刃の切削点における温度特性である。しかしながら、図4(a)に示すように、切削点における温度を測定するためには工作物に測定孔をあける必要があり、 $\phi = 0^\circ$ 以外の $30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ では難しい(半径方向切り込み R_d を与えた1パス切削毎に測定切れ刃角度もずれる)。そこで、図6と逃げ面温度の冷却特性から切削点の温度を推定することにした。

図12は図9の結果を冷却時間 τ との関係で示したものである。図にみるように、工具は主として内部への熱伝導によって冷却されるため、主軸回転数(周速度)によって冷却速度に顕著な差はみられないことがわかる。ここでは、これら3つの冷却特性(●, ●, ○)に対し、 $\theta_\alpha(\tau) - \theta_r = (\theta_i - \theta_r) \cdot \exp(-a\tau)$ の近似曲線をあてはめている。ここに、 θ_r は室温、 θ_i は初期温度、 $a (> 0)$ は係数である。冷却特性がまったく同じであれば係数 a は一致するはずであるが、図12の結果では若干異なっ

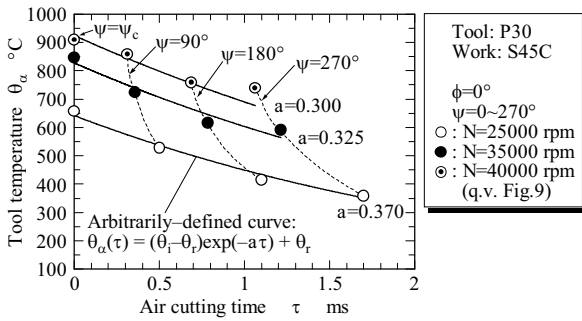


Fig.12 Cooling characteristics of tool flank temperature

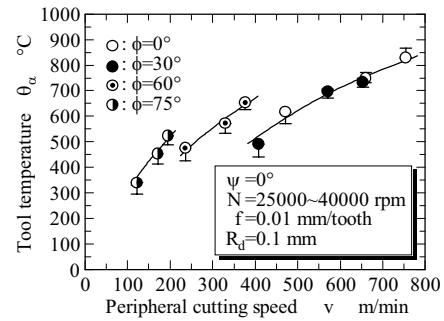


Fig.14 Relation between of tool flank temperature and cutting speed

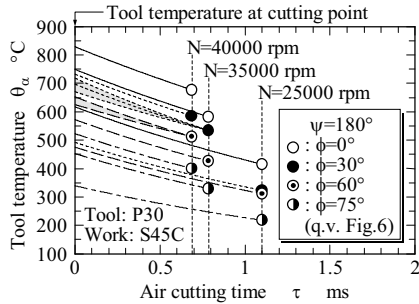


Fig.13 Estimation of tool flank temperature at cutting point

しており、それぞれ $a = 0.30, 0.325, 0.37$ となった。なお、この曲線は理論的な解析によって得られた式ではないが、著者らのこれまでの実験により、空転時における切れ刃逃げ面の冷却特性は比較的直線に近いこのような曲線で近似できる結果を得ている⁹⁾。この曲線を図6の結果に適用して切削点の温度を推定した。

図13は $\psi = 180^\circ$ の測定温度に図12から推定した冷却曲線をあてはめたもので、各曲線とy軸との交点($\tau = 0$)を切削点におけるボール刃の温度とした。当然ながら、あてはめる曲線によって切削点における温度が変化してしまう。そこで、近似曲線の係数 a が $0.30 \sim 0.37$ の範囲をハッチングで示し、誤差範囲をわかるようにした(図が煩雑になるため、一部の結果にのみ描画している)。

図14は切削点におけるボール刃逃げ面の温度を切削速度との関係で示したもので、誤差範囲をエラーバー“ I ”で表示している。誤差は最大で 50°C 程度になる場合もあるが、逃げ面温度と切削速度の関係に大きな変化は生じないことが確認できる。図にみるように、工具逃げ面温度は切削速度との関係で一元的に表されることがわかる。ここで詳細に検討すると、誤差を考慮しても外周刃に近い $\phi = 0^\circ$ と 30° ではほぼ一つの曲線上にのっている。これは、この部分ではほぼ正常に切りくずを生成する安定した切削が行われ、両者(○, ●)で切削機構に大きな違いがないことがうかがえる。

一方、 $\phi = 60^\circ, 75^\circ$ と ϕ が大きくなるにしたがって同一切削速度における工具温度が高くなっていることがわかる。また、切削速度の増加による温度上昇勾配も大きくなっており、外周刃近傍とは明らかに切れ刃の作用状態が異なっていることが推察される。すなわち、ボール刃先端部に近づくにしたがって切りくずを生成しない摩擦やパニシ作用に消費されるエネルギーが増加し、工具に流入する熱量が増加するため工具の温度が上昇するものと考えられる。切削速度自体がそれほど大きくないため極端な温度上昇は測定されていない

が、数十万回転レベルの超高速回転加工などでは考慮する必要がある。

以上のように、ボール刃全体が工作物と干渉するような側面加工では、ボール刃の位置によって切れ刃の作用状態が変化し、それが工具の温度上昇ひいては工具摩耗に影響すると考えられる。今後、多軸マシニングセンタによる自由曲面加工などでは、この点を考慮した工具姿勢や工具経路の決定などが必要と思われる。

4. 結 言

より低温域からの温度測定が可能な InAs/InSb/MCT-3色温度計を新たに製作し、小径ボールエンドミルによる高速側面加工におけるボール刃逃げ面の温度分布を測定した。以下に、本研究で得られた結果を示す。

- (1) 感度波長域の異なる3つの光電素子(InAs/InSb/MCT)を積層構造にした3色温度計は、 $100^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ の低温域では InSb/MCT-2色温度計、 300°C 以上の高温域では InAs/InSb-2色温度計として使用することによって、より広範囲の温度測定が可能になる。
- (2) ボール刃と外周刃の一部が工作物と干渉する側面加工では、外周刃の部分が最も温度が高く、ボール刃部分では中心にむかって温度が低下する。炭素鋼S45Cの乾式切削ではその差は 300°C 以上になる。
- (3) 主軸回転数 N の増加にともなうボール刃逃げ面温度の上昇は、外周刃に近づくにしたがってより顕著になる。一方、半径切り込み R_d や1刃あたり送り f の増加によってボール刃全体にわたって温度が上昇する。
- (4) 主軸回転数が増加するにしたがって全体的に工具の温度は上昇して切削点では 900°C 以上にも達するが、断続切削過程における温度変化幅は主軸回転数が低下するほど大きくなる。
- (5) ボール刃逃げ面温度は、主軸回転数と切削点の半径によって決まる切削速度が上昇するほど高くなる傾向があるが、その関係は一元的に表されない。すなわち、切れ刃角度 ϕ が 30° 以下の外周刃に近い部分では、安定した切りくずが生成されるため一つの曲線上にのるが、摩擦やパニシ作用が主体になるボール刃先端部では異なった曲線になる。後者では切削速度の増加にともなう温度上昇勾配が大きい。

謝 辞

3色温度計を製作するにあたり、浜松ホトニクス株式会社にご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高橋一郎, 安斎正博, 吉田拓未, 松岡甫篁, 中川威雄: 鋳鉄の高速ミーリング—cBN 工具による正面フライスとボールエンドミル加工—, 1996 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1996) 23.
- 2) 今泉英明, 齊藤益生, 夏目 実, 浜武恭生: 超硬エンドミルにおける高速・高効率加工対策事例, 日本機械学会第 4 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 02-25 (2002) 67.
- 3) 芦 毅, 竹内芳美, 三ッ森 学, 高橋一郎, 加瀬 究, 安斎正博: 高速ミーリング用ボールエンドミルの創成とその切削特性, 精密工学会誌, **68**, 3 (2002) 451.
- 4) M. Hao, 浅尾晃通, 寺井久宣, 水垣善夫: 球面のボールエンドミル加工における加工面創成機構の理論解析, 精密工学会誌, **65**, 10 (1999) 1476.
- 5) 寺井久宣, M. Hao, 吉川浩一, 水垣善夫: 多軸ボールエンドミル加工における切取り厚さの理論解析, 日本機械学会論文集(C編), **67**, 654 (2001) 553.
- 6) 笠原和夫, 広田明彦, 笹井洋介: ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測 (第 1 報) —球体部の切れ刃形状と切削模型—, 精密工学会誌, **69**, 3 (2003) 396.
- 7) 宮口孝司, 嶽岡悦雄, 樹田正美, 岩部洋育: 小径ボールエンドミルを用いた高回転ミーリングにおける動的切削力, 精密工学会誌, **67**, 3 (2001) 450.
- 8) 高橋一郎, 安斎正博, 中川威雄: 10 万回転超高速ミーリングにおける超硬小径ボールエンドミルの摩耗特性, 精密工学会誌, **65**, 6 (1999) 867.
- 9) 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—高速エンドミル加工に関する研究 (第 1 報) —, 精密工学会誌, **66**, 11 (2000) 1786.