

cBN工具によるハードミリング*

— 高速エンドミル加工に関する研究 (第2報) —

細川 晃** 岡田将人*** 北川修介† 田中隆太郎** 上田隆司**

Hardmilling with cBN Tools
— Studies on High Speed Endmilling (2nd Report) —

Akira HOSOKAWA, Masato OKADA, Syusuke KITAGAWA, Ryutaro TANAKA and Takashi UEDA

The cutting performance of cBN tools for high-speed end milling of hardened steel is investigated. The cutting characteristics are evaluated by tool temperature at the flank face, cutting force, chip geometry and surface roughness at the change of cutting speed v and workpiece hardness. The temperature of cutting tool is measured using a two-color pyrometer with an optical fiber. The tool flank temperature θ_a increases with the increase of cutting speed and workpiece hardness, and reaches approximately 850°C at $v=600$ m/min and HRC60. In particular, the workpiece hardness has great influence on the tool flank temperature. On the other hand, the principal cutting forces does not change so much with workpiece hardness. Based on the chip geometry measured, the most likely explanation for these phenomena is that chip formation process changes with workpiece hardness. As the workpiece hardness increases, the cutting actions become stable so that the surface roughness decreases. In the case of the low cBN content tool, tool flank temperature increases by 20~50°C or more than high content one, because of the low thermal conductivity.

Key words : hard milling, cBN tool, hardened steel, tool temperature, cutting force, two-color pyrometer

1. 緒 言

近年、金型や自動車部品などに用いられる焼入れ鋼、鋳鉄、高硬度難削材などを対象とした機械加工の高速・高能率化への要求の高まりとともに、切削工具に対してより過酷な条件下での耐久性が求められている。しかしながら、切削速度の高速化は必然的に切削温度の上昇を招き、工具摩耗の促進、加工精度の低下、仕上げ面性状の劣化など多くの悪影響を及ぼす。さらに現在では、切削油剤が自然環境や作業環境に及ぼす影響を考慮して、切削液を使用しない乾式あるいはMQL加工などのセミドライ切削への移行が不可欠となっており、工具の耐熱性への要求をより厳しくしている。

cBN工具は高硬度で高温強度が大きく、耐摩耗性、耐熱性、耐腐食性に優れた性能を持つ工具である。また、鉄系材料との親和性が低く、焼入れ鋼などの高硬度難削材の加工を、乾式で粗加工から仕上げ加工まで実施できるため、加工時間、工程の短縮が期待できることから広く用いられてきている^{1)~3)}。

本研究では、焼入れ鋼の高速エンドミル加工へのcBN工具の有効性について、主として耐熱性の観点から検討することを目的とし、工作物硬さや切削速度が工具逃げ面温度、切削抵抗および切りくず形態に及ぼす影響を明らかにしている。また、主としてcBN含有量の異なる2種類の工具を用い、工具の諸特性が工具逃げ面温度および切削抵抗に及ぼす影響について言及するとともに、切削条件と仕上げ面あらさとの関係についても検討を加えたので報告する。

* 原稿受付 平成18年5月2日
** 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科 (石川県金沢市角間町)
*** 正会員 福井工業高等専門学校 (福井県鯖江市下司町)
† 学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科 (現, 日本特殊陶業㈱; 愛知県小牧市大字岩崎 2808)

2. 実験方法

2.1 光ファイバ型2色温度計

工具逃げ面の温度測定には、前報と同様、光ファイバ型2色温度計を用いた⁴⁾。温度計の構造を図1に示す。本温度計を用い、切削時に工具逃げ面からふく射される赤外線を受光し、赤外線検出素子に伝送することで回転体の過渡的な温度を測定する。赤外線検出素子には、分光感度波長域がそれぞれ0.5~3 μmおよび3~5.6 μmと異なるInSb素子およびInAs素子を用いた。いずれの素子も、赤外線が入射することにより起電力を生じる光起電力型素子であり、両素子を同一光軸上で積層構造に一体化したものを温度計に搭載している。前報で報告したとおり⁴⁾、本温度計は両素子の出力比から温度を求めるため、その測定感度は測定対象物のふく射率に依存しない特徴をもっている。

図2は光ファイバにレーザーダイオード(λ=1.55 μm)による矩形波を直接入力して得られた温度計の応答特性である。図に

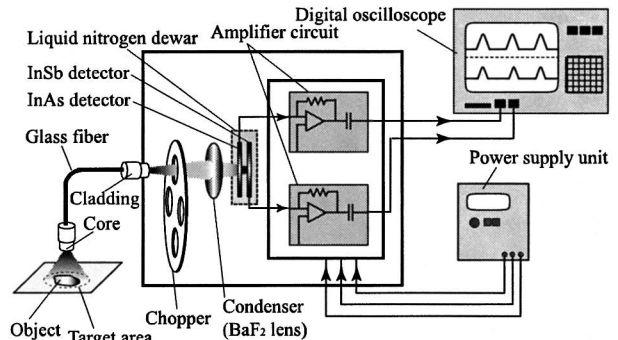


Fig.1 Structure of two-color pyrometer with an optical fiber

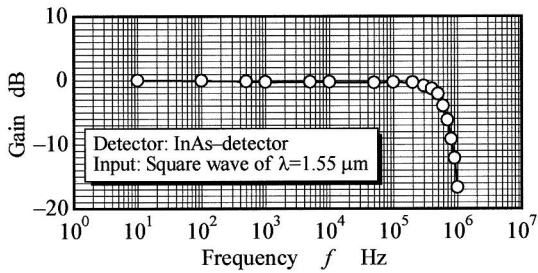


Fig.2 Frequency characteristics of InAs-pyrometer

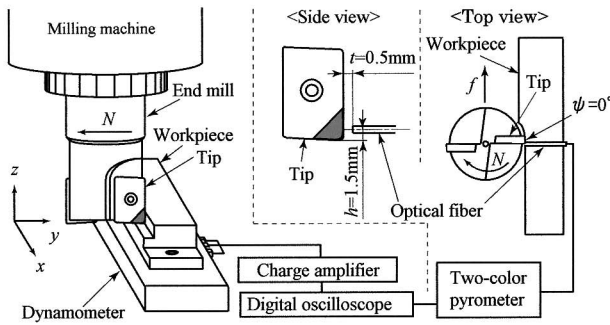


Fig.3 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Cutting tool	Throw-away type end mill Diameter $D = 25$ mm Axial rake $\gamma_a = +7^\circ$, Radial rake $\gamma_r = -4^\circ$ Tip geometry: N.L. = -15°
Workpiece	Carbon steel: JIS S55C (20HRC, 40HRC, 50HRC, 60HRC)
Cutting speed	$v = 100, 200, 400, 600$ m/min
Feed per tooth	$f = 0.05$ mm/tooth
Radial depth of cut	$R_d = 0.2$ mm
Axial depth of cut	$A_d = 3$ mm
Cutting style	Down-cut without coolant

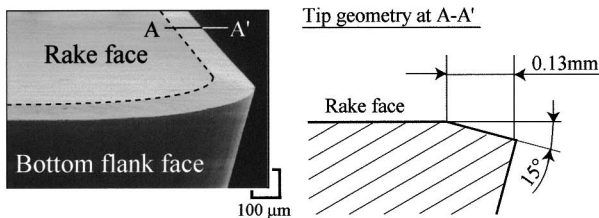


Fig.4 Form of cutting edge

みるように、およそ400 kHzまで減衰のない安定した出力が得られており、高速切削中の工具温度を計測するのに十分な応答速度を有していることがわかる。

2.2 実験方法

図3に実験装置の概略を、表1に主な実験条件を示す。実験は、(株)森精機製作所製立形マシニングセンタ(CV-500A, 最高主軸回転数12000 rpm)に、スローアウェイ型エンドミルを取り付けて、炭素鋼S55Cの乾式側面加工を行い、切削抵抗と工具逃げ面温度をインプロセスで測定した。切削抵抗の測定には、圧電センサを組み込んだ3軸切削動力計を用い、チャージアンプを介してストレージスコープに出力波形を記録した。なお、インパルスハンマを用いたFFT解析により、動力計の応答速度は工作物を付けた状態で3分力とも3kHz程度はあることを確認している。工具逃げ面温度の測定は工作物にあけた貫通穴(φ1.1 mm)に光ファイバ(コア径300 μm)を挿入し、切削

Table 2 Physical properties of cBN tools

	cBN-(1)	cBN-(2)
cBN content	80 ~ 90	50 ~ 60
Binder	Co	TiN
Hardness	3900 ~ 4200	3200 ~ 3400
Thermal conductivity k W/(m·K) (@ 20 / 500 / 750 / 900°C)	75.7 / 93.1 / 87.3 / 82.6	37.7 / 50.4 / 50.9 / 52.4
Thermal diffusivity $\alpha \times 10^{-6}$ m ² /s (@ 20 / 500 / 750 / 900°C)	30.2 / 16.2 / 13.7 / 12.5	14.6 / 10.1 / 9.4 / 8.9

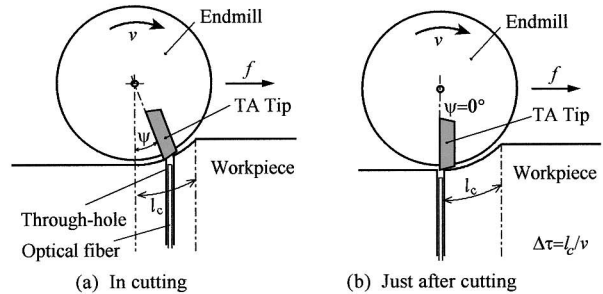


Fig.5 Model of output pulses of pyrometer during cutting

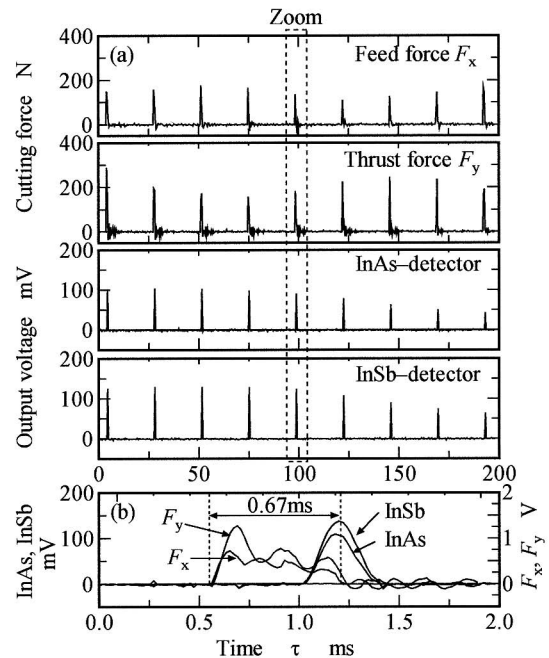


Fig.6 Typical output profiles of two-color pyrometer

時の工具逃げ面温度を測定した。

工具には、cBN含有量および結合剤が異なる2種類のcBN工具:cBN-(1), cBN-(2):を選んだ。前者は主として鋳鉄、後者が焼入れ鋼に適しているとされている。

図4に工具刃先のSEM写真と模式図を、表2にそれぞれのcBN工具の主な特性値を示す。工具は母材である超硬K20種の先端にろう付けによってcBNチップが取り付けられており、図中の破線を境界として、それぞれ刃先周辺にネガランド-15度、ネガランド幅0.13 mmにチャンファ処理されている。そのため、本実験は負のすくい角を有する工具により切削が行われることになる。また、表にみるように、cBN含有量や結合剤によってこれらの工具は機械的および熱的特性が異なっている。

工作物は、硬さの異なる4種類の炭素鋼S55Cを使用した。それぞれ、未熱処理の生材(20HRC)、高周波焼入れによる焼入れ・焼戻し材(40HRC, 50HRC)および焼入れ材(60HRC)である。

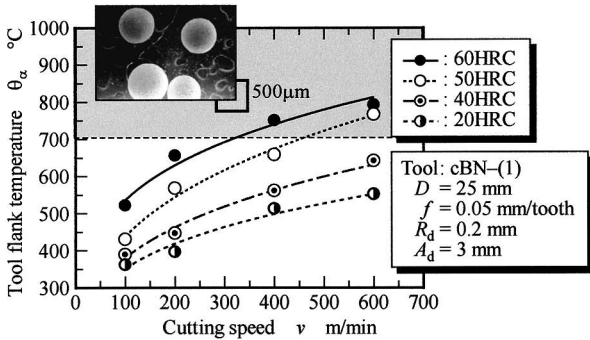


Fig. 7 Relationship between cutting speed and tool flank temperature in the case of cBN-(1)

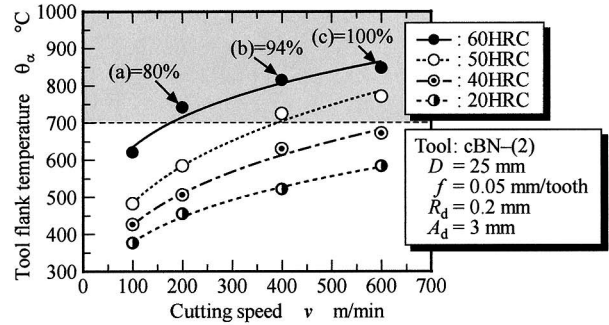


Fig. 9 Relationship between cutting speed and tool flank temperature in the case of cBN-(2)

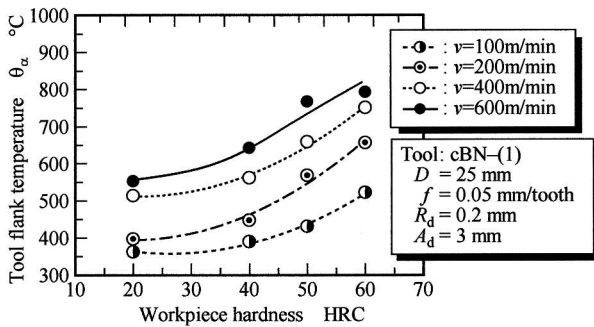


Fig. 8 Relationship between workpiece hardness and tool temperature in the case of cBN-(1)

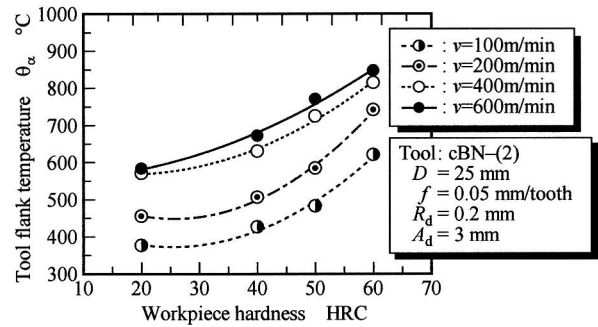


Fig. 10 Relationship between workpiece hardness and tool temperature in the case of cBN-(2)

3. 実験結果および考察

3.1 温度測定波形

図5に示すように、本実験ではファイバを工作物にあげた貫通穴に挿入して穴上部を通過する工具逃げ面の温度を測定するため、切削終了点(切れ刃角度 $\psi=0^\circ$)における温度を同定するためには注意を要する。すなわち、貫通穴(ファイバ)は工具の送りとともに接触弧(図5の l_c)内を右から左に移動することになり、本実験の場合 $l_c=2.24\text{ mm}$ 、 $f=0.05\text{ mm/tooth}$ であるから、 $l_c/f \approx 44$ 回の切削パルスが l_c 内で観測される。図5(a)は切削途中の温度測定状態であり、図5(b)が切削終了点における温度測定状態になる。本研究では、切削の開始によって観測される切削抵抗パルスの立ち上がりから、工具が接触長さ l_c だけ通過する時間だけ遅れて記録される温度パルスを測定している。

図6は、切削終了点付近における温度計および切削動力計の出力波形の一例を示したものである。図6(a)より、切削パルスごとの過渡的な切削抵抗と工具温度の電気信号がパルスの出力されているのがわかる。図6(b)は、切削終了点の出力波形を拡大したものである。図より、切削抵抗の立ち上がる時点より0.67 ms遅れて温度パルスが出力されている。この場合の実験条件(切削速度 $v=200\text{ m/min}$)では、 $l_c/v=0.67\text{ ms}$ と理論的に求められ、図の温度パルスが切削終了点における温度パルスと同定することができる。工具逃げ面温度は温度計からの各パルスのピーク値の比より求め、切削終了点およびその前後4パルスの計5パルスの出力の平均を工具逃げ面温度とした。なお、切削終了点の前後4パルス程度では、工具温度および切削抵抗に大きな影響がないことを確認している。

3.2 工具逃げ面温度

図7に硬さの異なる鋼材をcBN-(1)を用いて切削したときの切削速度 v と工具逃げ面温度 θ_α の関係を示す。いずれの工作

物硬さにおいても、 v の増加とともに θ_α が上昇しており、100~600 m/minの範囲において、その差は、200~300°C程度となっている。本実験では、1刃当たりの送り $f(=0.05\text{ mm})$ が一定であることから、この温度変化は、 v の増加によって単位時間あたりに工具に流入するエネルギーが増加したことに起因すると考えられる。

図8は図7の結果について、工作物硬さHRCと工具逃げ面温度 θ_α の関係で示したものである。硬さの増加とともに θ_α が上昇しており、その増加傾向は切削速度の影響よりも大きいことがうかがえる。ここで、40HRCと60HRCを比較すると、 $v=100\text{ m/min}$ で約390°Cと520°C、 $v=600\text{ m/min}$ で約650°Cと800°Cと、その差は150°C程度にもなる。

図9はcBN-(2)を用いて切削したときの切削速度 v と工具逃げ面温度 θ_α の関係である。図7と比較すると、50HRCの場合、 $v=100\text{ m/min}$ で50°C、 $v=600\text{ m/min}$ で20°C程度の温度が上昇しているのがわかる。これは、cBN-(2)はcBN-(1)に比べてcBNの含有量が少なく、熱伝導率が小さいためと考えられる。また、表2に示すように、両工具の熱伝導率 k と熱拡散率 α を25°C~950°Cの範囲で測定したところ、温度の上昇にともない両工具の k と α の差が小さくなっており、これが切削速度の増加にともない両者の温度差が小さくなった要因と考えている。このように、工具の熱特性は工具温度に大きな影響を及ぼすことがわかる。一般にcBN含有量が増加すると硬度は増すがチッピングが生じ易く断続切削には適さないとされているが、本実験ではそのような現象は確認されなかった。

図10は図9の結果について、工作物硬さHRCと工具逃げ面温度 θ_α の関係で示したものである。図8と同様に40HRCと60HRCの硬さを比較すると、 $v=100\text{ m/min}$ で約430°Cと620°C、 $v=600\text{ m/min}$ で約680°Cと860°Cと、その差は180°C~190°Cであり、cBN-(1)の場合より工作物硬さの増加による工具逃げ面

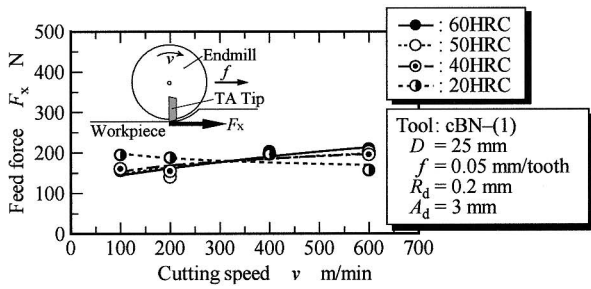


Fig.11 Relationship between cutting speed and feed force

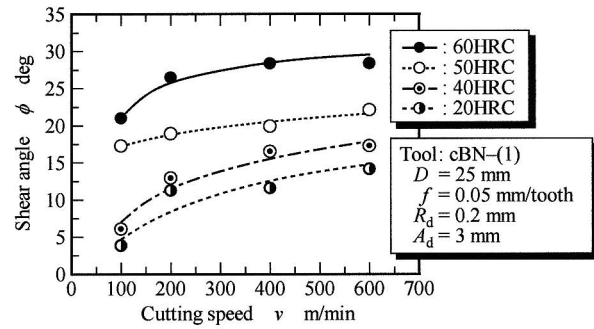


Fig.14 Relationship between cutting speed and simplified shear angle

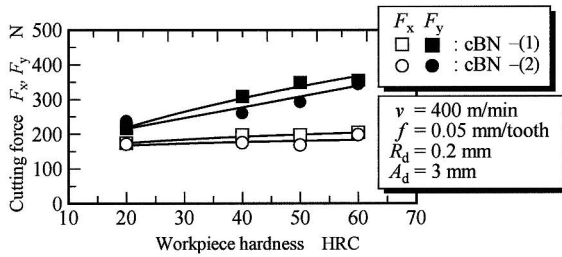


Fig.12 Influence of workpiece hardness on cutting force for two types of cBN tools

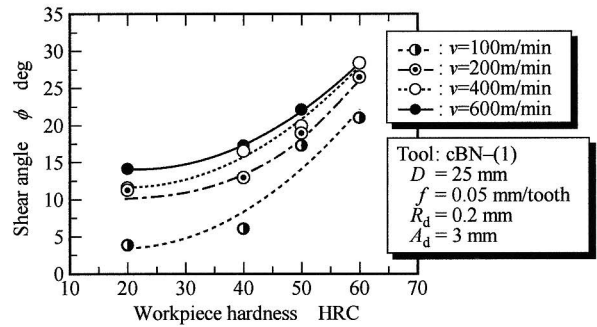


Fig.15 Relationship between workpiece hardness and simplified shear angle

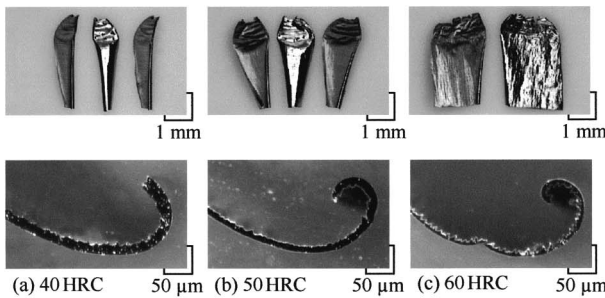


Fig.13 Change of chip morphology with workpiece hardness

温度の上昇の割合が大きくなっていることがわかる。

ところで、切削温度が700°C以上になると、切りくずの中に溶融型のものが観察される。図7のSEM写真はその一部を示したものであるが、すべて球形で大きさもほぼそろっている。これは、高速度カメラによる観察により、高温になった切りくずが飛散中に酸化熱によって溶融したものと考えている。ところで、図9中の(a)~(c)は、全切りくずに対する溶融型切りくずの重量%を示したものである。工具温度の上昇とともに溶融型切りくずが増加し、工具温度が850°C程度にも達する(c)の場合、すべての切りくずが溶融してしまう。このことから、切削中の工具、特に、cBN-(2)は過酷な熱環境にあり、工具の耐熱性が要求されることが認識できる。なお、図7および図9において溶融型切りくずが観察された領域を網掛けで示している。

3.3 切削抵抗

図11にcBN-(1)を用いた場合の切削速度 v と送り分力 F_x の関係を示す。いずれの硬さにおいても、150~200 Nと50 N程度の変化幅で推移しており、 F_x があまり v の影響を受けていないことがわかる。また、工作物の硬さが上昇しても、切削抵抗はあまり増加していない。この結果からすると、図7に示した工具逃げ面温度の上昇傾向を切削抵抗すなわち切削熱の増加からは説明できない。旋削加工では工作物硬さの増加により切削抵抗が増加していることから⁵⁾、この要因としては、現時点では明確ではないが、後述するように、工作物の硬度が増加してもcBN

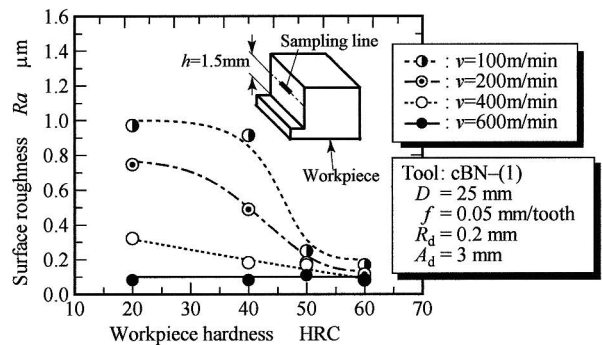


Fig.16 Relationship between workpiece hardness and surface roughness

工具に顕著な摩耗はなく比較的鋭利な切れ刃を維持していることや、工作物硬さの増加にともない切りくずの生成形態が変化して工作物と工具切れ刃の接触面積が減少し、単位時間・単位面積あたりの流入熱量が増加したのではないかと考えている。

図12は $v=400$ m/minで切削を行ったときの工作物硬さHRCと切削抵抗の関係をcBN-(1)とcBN-(2)で比較して示したものである。図にみるように、背分力 F_y はcBN-(1)がわずかに大きくなっているものの、送り分力 F_x は両工具であり差は認められない。実験より両工具ともに顕著な摩耗が認められなかったため、切れ刃形状にほとんど違いがないと考えられることから、切削点温度が高いcBN-(2)では材料の変形抵抗が減少して被削性がよくなったためと推察される。

3.4 切りくず形態

前節より、工作物の硬さが上昇しても切削抵抗があまり変化しない理由を考察するため、ここでは、工作物硬さが切りくず厚さおよびせん断角に及ぼす影響について検討する。前述したとおり、工具逃げ面温度が700°Cを超える切削条件(図7および図9参照)では切りくずが溶融し、排出時の形状を保った切りくず採取が困難になる。そこで、切りくず形態の観察におい

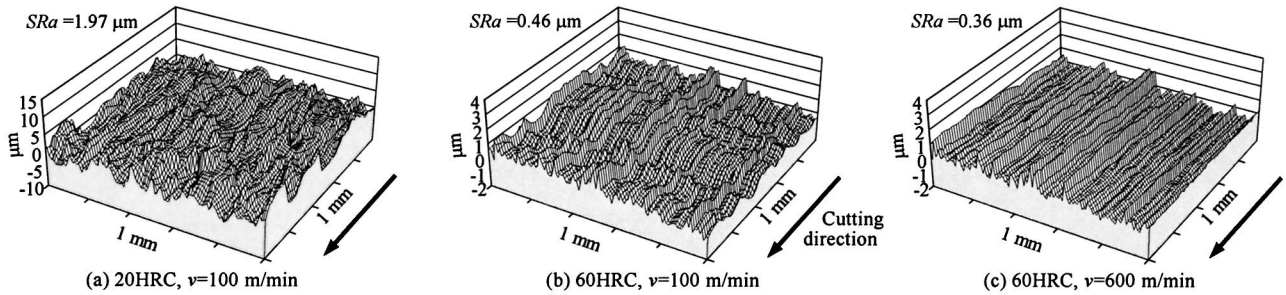


Fig.17 3D profiles of workpiece surface

では窒素雰囲気中で切削実験を行った。なお、窒素雰囲気中においても、工具温度および切削抵抗は大気中の場合と変化がないことを実験的に確認しており、切りくずの生成形態には雰囲気は影響しないと考えられる。

図13にcBN-(1), $v=600$ m/min, 工作物硬さ40~60HRCにおける切りくず表面と断面の拡大写真を示す。図より、工作物硬さの増加にともなって切りくず長さが増加し、厚さが減少していることがわかる。切りくずの重量測定を行ったところ、写真のものに限らずいずれの切りくずも重量に顕著な差はなく、工具の逃げなどによる切削体積の変化はないことを確認している。この結果より、硬さの増加にともない、切りくずの厚さ方向の材料が長さ方向に流動していると考えられる。

ここで、切りくずの断面形状に着目すると、40HRCの場合が流れ型の切りくずであるのに対し、60HRCでは、切りくず表面に凹凸が確認できる鋸刃型切りくずに近い形態になっている。工作物硬度が切りくず形態に及ぼす影響については、旋削加工においていくつか同様の報告がされており、工作物硬さの増加とともに材料の延性が低下し、材料がもろく作用するためと考えられる^{6,7)}。ただし、HRC60においても旋削加工でみられるような切削抵抗の明確な低下は観測されておらず、完全に切りくず形態が変化していないと言える。

図14に切削速度 v とせん断角 ϕ の関係を、図15に工作物硬さとせん断角 ϕ の関係を示す。なお、エンドミルの場合、切り取り厚さが切削の進行とともに変化する過渡的切削過程であるため、せん断角 ϕ を一意的に求めることは難しい。そこで、ここでは平均切りくず厚さから2次元切削モデルにより簡易的に求めている。すなわち、せん断角 ϕ は、すくい角 γ 、切削比を r_c とすると式(1)により理論的に求めた。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{r_c \cos \gamma}{1 - r_c \sin \gamma} \right) \quad (1)$$

ここに、切削比 r_c は、一刃当たりの最大切り取り厚さを h 、切りくず厚さを h_c とすると $r_c=h/h_c$ により得られる値である。図より v 、硬さのいずれの増加についても、 ϕ が増加していることがわかる。しかし、その増加割合は工作物硬さの影響が顕著であり、計算上最大15°程度の差が生じている。 v および硬さの増加によって ϕ が大きくなる要因としては、工具すくい面温度の増加により工具すくい面と切りくずとの摩擦抵抗が減少したことなどが考えられる。

以上の結果を総合すると、工作物硬さの増加によって切りくず生成状態が変化し、それによるせん断角の増加と工作物硬さによる難削性が相まって、切削抵抗にあまり変化が生じなかったであろう。

3.5 仕上げ面あらさ

あらさ測定は、送り方向の2次元仕上げ面あらさおよび3次

元仕上げ面あらさを測定した。

図16に工作物硬さHRCと仕上げ面あらさ R_a の関係を示す。 $v=100$ m/minにおいて、20HRCでは $R_a=0.97$ μm 、40HRCでは $R_a=0.91$ μm であるのに対して、50HRCでは $R_a=0.25$ μm 、60HRCでは $R_a=0.17$ μm 程度と仕上げ面あらさが急激に小さくなる。このことから、低切削速度においてはcBN工具は高硬度材料ほど優れた切れ味を発揮するといえる。一方、 $v=600$ m/minでは R_a は工作物硬さによらず $R_a=0.08$ μm 程度であり、高切削速度では工作物硬さが仕上げ面あらさに及ぼす影響は小さいことがわかる。なお、図に示すように、2次元仕上げ面あらさ測定箇所は、工作物長手方向の中央付近で、外周刃の切れ刃先端より $h=1.5$ mmの部分で切削された仕上げ面である。

図17は仕上げ面の3次元形状を工作物硬さと切削速度で比較したものである。図より、工作物硬さが低い場合に不均一な凹凸がみられるが、工作物硬さが高く切削速度が高速になると切削が安定し良好な仕上げ面が得られることがわかる。測定箇所は2次元あらさと同じ部分で、1mm四方の範囲で測定した。

4. 結 言

2種類のcBN工具を用いて焼入れ鋼のハードミリングを行い、切削速度や工作物硬さおよび工具の熱特性が工具逃げ面温度、切削抵抗、切りくず形態ならびに仕上げ面性状に及ぼす影響について検討した。以下にその結果をまとめる。

- (1) 切削速度、工作物硬さが増加すると工具逃げ面温度 θ_a は上昇し、特に工作物硬さの影響が大きい。また、 θ_a が700°C以上になると溶融型切りくずが観測され、850°C程度になるとほぼ100%溶融する。
- (2) cBN含有量が少ないと熱伝導率が小さくなり、工具逃げ面温度が上昇する。また、cBNが80~90%程度の高含有率においてもチッピングは生じず、焼入れ鋼の断続切削が可能である。
- (3) 工作物硬さが増加すると切りくずがやや鋸刃型に近い形態を呈するが、旋削加工のように切削抵抗は低下しない。また、切削速度および工作物硬さが増加すると切りくず厚さが減少し、せん断角が大きくなる。
- (4) 切削速度と工作物硬さが増加すると仕上げ面性状が顕著に良好となり、高硬度材の高速切削に対してcBN工具が非常に効果的であるといえる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、マシニングセンタの無償貸与をいただいている株式会社森精機製作所ならびに切削工具のご提供をいただいた住友電工ハードメタル株式会社に深謝する。

参 考 文 献

- 1) 久木野暁, 黒田善弘, 後藤光弘:cBN焼結体工具を用いた難削材切削加工の最新技術動向について, 砥粒加工学会誌, 47, 1 (2003), 3.
- 2) 新谷一博: 鋳鉄材料の高速加工におけるcBN工具の有効性, 砥粒加工学会誌, 47, 1 (2003), 8.
- 3) 安斎正博, 高橋一郎:cBNボールエンドミルによる焼入れ鋼の高速ミリング, 砥粒加工学会誌, 47, 1 (2003), 16.
- 4) 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.
- 5) 榎本眞三, 加藤正倫:種々の硬さのクロムモリブデン鋼の旋削におけるcBN切削工具の切削特性, 精密工学会誌, 55, 6 (1989), 1079.
- 6) N.Narutaki, Y.Yamane: Tool Wear and Cutting Temperature of cBN Tools in machining of Hardened Steels, Annals of the CIRP, 28, 1 (1979), 23.
- 7) S.Y.Luo, Y.S.Liao, Y.Y.Tsai: Wear Characteristics in Turning High Hardness Alloy Steel by Ceramic and cBN Tools, J. Materials Proceeding Technology, 88 (1999), 114.