

[研究論文]

小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工における工具寿命 — 加工方法と工具材種の影響 —

岩部 洋育^{*1}, 遠藤 尚^{*2}, 中元 一雄^{*3}

Tool Life of Small Size Ball End Mill for High Speed Milling of Hardened Steel — Influence of Machining Method and Tool Material —

Hiroyasu IWABE, Hisashi ENDO and Kazuo NAKAMOTO

Abstract – In this paper, the flank wear and the surface roughness of a machined surface are investigated by high speed milling of hardened steel on a small size ball end mill using a high speed milling machine. And also an investigation will be carried out on the influence of a tool life on the minimum quality lubrication (MQL) method. The main results are as follows. (1) The flank wear of the cutting edge increases in proportion to the cutting length, and the flank wear shape gradually brings the shape of the actual cutting length close. (2) It is shown that the long tool life is obtained by the conditions of the step down pick feed and the down milling with MQL method to the end point of each milling process. (3) The surface roughness increases in proportion to the cutting length. But using the same cooling method described in (2), the small surface roughness of 1.4 μ m is obtained till 3800m of cutting length. (4) The flank wear rate of CBN tool is very small as about one thirtieth compared with that of the carbide tool, and the surface roughness of 1.5 μ m is obtained till 47.0km of cutting length. So, under the cutting conditions, the effectiveness of the CBN tool for high speed milling of hardened steel is verified.

Key words : Ball End Mill, High Speed Milling, Hardened Steel, Tool Life, Surface Roughness, Flank Wear, Minimum Quality Lubrication, CBN Tool

1. 緒 論

近年, 高い主軸回転数と送り速度を実現した高速加工機や超硬コーティング工具等の開発によって, 高硬度な金型を直彫り加工することが可能になった. その結果, 従来の放電加工に比べて, 加工工数及びコストの削減や納期の短縮も可能となっている. しかし, その工具として多用される小径ボールエンドミルの工具寿命に関する研究^{1), 2)}

は少なく, 不明な点が多いのが現状である.

そこで本研究では高速加工機を用いて小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工を行い, 工具寿命の判定に用いられる逃げ面摩耗幅と仕上げ面粗さに及ぼす冷却方法および加工法の影響について検討した. また, 最近開発された CBN 工具についてもその切削特性と工具寿命に及ぼす効果を比較検討した.

2. 実験条件および方法

実験には最高主軸回転数毎分 4 万回転が可能な立型マシニングセンタ (ソディック, MC430L) を用いた. 工具は主に直径 3mm, 2 枚刃, (TiAl)N コーティングの超硬ソリッドボールエンドミルである. 工具の突出し長さは $L_t=20$ mm とし, 切れ刃部での振れは 2μ m 以下で主軸に取り付けている.

*1 新潟大学大学院自然科学研究科
(〒950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050)
Graduate School of Science and Technology,
Niigata University
*2 三菱自動車工業(株)(〒108-0014 港区港南
2-16-4) Mitsubishi Mortor Co.,Ltd.
*3 (株)ソディック (〒224-8522 横浜市都筑区仲町台
3-12-1) Sodick Co.,Ltd.

工作物はプリハードン鋼 (HPM1, HRC38~42, 70×70×150mm) を用い, 図1に示すようにバイスにテーブル面に対して $\alpha=30^\circ$ の傾斜面となるように固定し, X軸方向の送りによって加工を行っている. 表1は切削条件を示しており, ピックフィード P_f は傾斜面の下方に与えるステップダウンおよび上方に与えるステップアップを用いた. なお, 切削方式は上向き切削, 下向き切削に加えてそれらを交互に繰り返す往復切削についても行った. 冷却はミストで行い, 切削開始または終了点方向に与える入口または出口冷却とした. また, ステップダウン, 下向き切削の条件において, 工具形状の等しいCBN工具による実験を行い, 超硬工具との比較も行った.

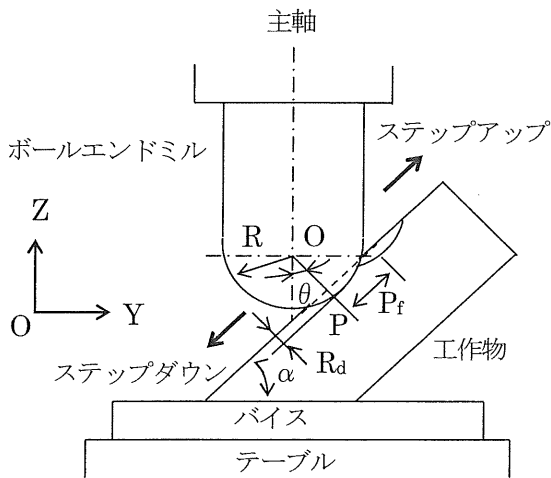


図1 実験方法

工具摩耗は, 切削距離 $L=210\text{m}$ 毎にテーブル上に設置したデジタルマイクロスコープ(キーエンス, VH-6300)を用い, 工具先端部の映像(図2参照)を記録し, 切れ刃に沿った逃げ面摩耗幅を測定した. なお, 工具摩耗の測定前に図1と同様に固定した工作物を, 傾斜面に沿って幅 2.5mm 加工し, 工具摩耗の進行に伴って変化する加工面の粗さを工作物上に残した. 仕上げ面粗さの測定は, 切削実験の後に上記加工面を触針式の粗さ計(東京精密, SURFCOM)を用いて送り方向に行った.

3. 実験結果および考察

3・1 摩耗形状と逃げ面摩耗幅

(1) 摩耗形状と実切削長さ

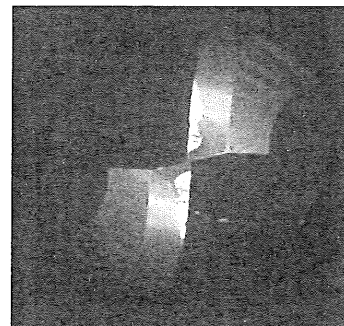
図2は切れ刃の先端部における摩耗した切れ

表1 切削条件

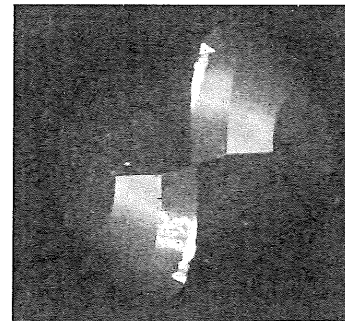
傾斜角	$\alpha = 30^\circ$
ピックフィード	$P_f = 0.050 \text{ mm}$
切り込み	$R_d = 0.150 \text{ mm}$
主軸回転数	$N = 37000 \text{ min}^{-1}$
送り	$S_z = 0.050 \text{ mm/tooth}$
切削方式	上向き切削, 下向き切削, 往復切削
クーラント	ミスト (0.04 cc/min)

刃の写真であり, (a)図がステップダウン, (b)図がステップアップの場合である. 刃先の写真より, 切れ刃の位置によって白く見える逃げ面摩耗幅が異なっており, 後述する逃げ面摩耗幅については, 図1に示した工具中心Oを原点とし, 先端からの角度 θ で切れ刃位置を定めた. また, 2枚の写真からピックフィードによっても摩耗する位置が異なることも分かる.

図3は横軸に図1で示した角度 θ , 縦軸に逃



(a) ステップダウン



(b) ステップアップ

図2 切れ刃の位置の定義と逃げ面摩耗の様子

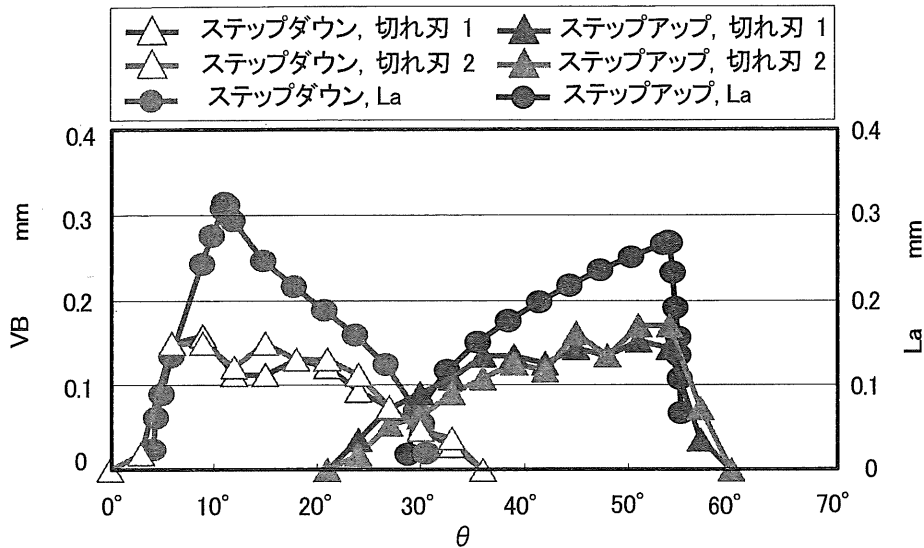
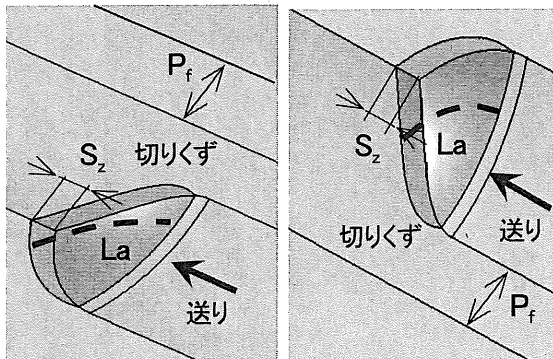


図3 摩耗形状と実切削長さ

逃げ面摩耗幅をとって図2の結果を示している。図よりステップアップでは $\theta=20^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で、ステップダウンでは $\theta=5^\circ \sim 35^\circ$ の範囲で逃げ面が摩耗している。しかし、それぞれ2枚の切れ刃による差は平均値が $2, 6 \mu\text{m}$ と小さい。これは工具の取り付け時の振れが $2 \mu\text{m}$ 以下と小さかったためと考えられる。ピックフィードにより摩耗する位置および形状に大きな差が見られるが、その理由について次に考える。

図4は3次元CADを用いて描いた切りくずの形状モデルと任意の切れ刃点が切りくずを通過する経路を破線で示している。この破線の長さを実切削長さ L_a と呼ぶことにする。切りくずの形状はステップダウン((a)図)では下面方向に引き伸ばされ、ステップアップでは上面方向に引き



(a) ステップダウン (b) ステップアップ

図4 切りくず形状モデルと実切削長さ

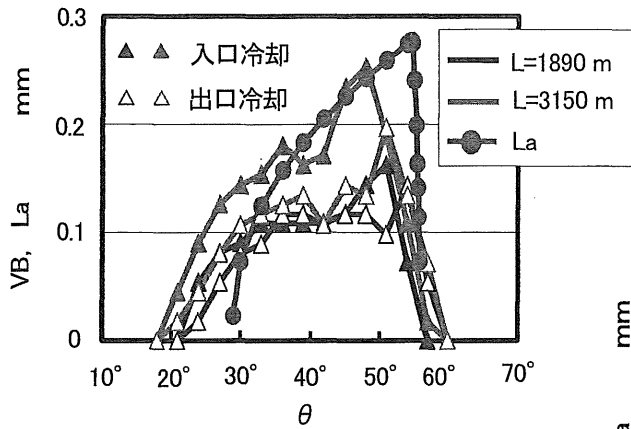
伸ばされる形状になり、両者で大きく異なる。そのため、 L_a も切りくず形状の変化の影響を受け、切れ刃の位置で変化することになる。図3にはその変化を併記しているが、逃げ面摩耗の生じる位置および形状が実切削長さ L_a の変化とよく対応していることが分かる。

(2) 冷却方法による比較

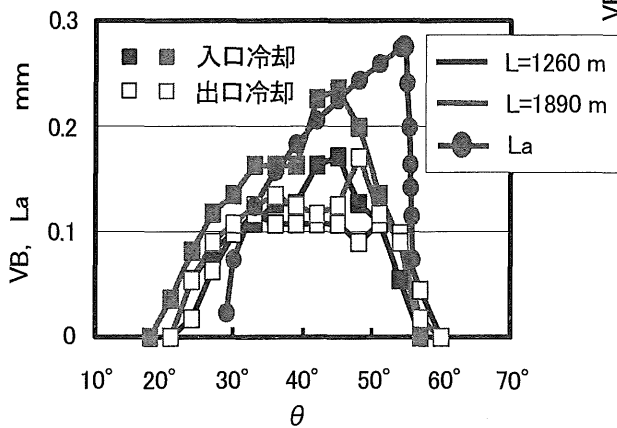
図5は図3と同様の座標軸を用い、冷却方向による逃げ面摩耗幅を比較したもので、(a)図が下向き切削、(b)図が上向き切削、(c)図が往復切削の場合である。図より切削距離 L が増加するにつれてどの切削方式においても逃げ面摩耗幅は増加するが、冷却方法を図6に示す入口方向より与える場合に比べて出口方向より与える場合が小さい。この理由は後者が1回の切削が終了するたびに切れ刃にミストを与えることになり、その後切削を開始するまでの間に刃先が効果的に冷却されるためと考えられ、笹原らの報告とも一致している³⁾。また、図中には実切削長さ L_a も併記しているが、どの切削方式においても摩耗形状は L_a の形状に近づくことが分かる。

(3) 切削方式による比較

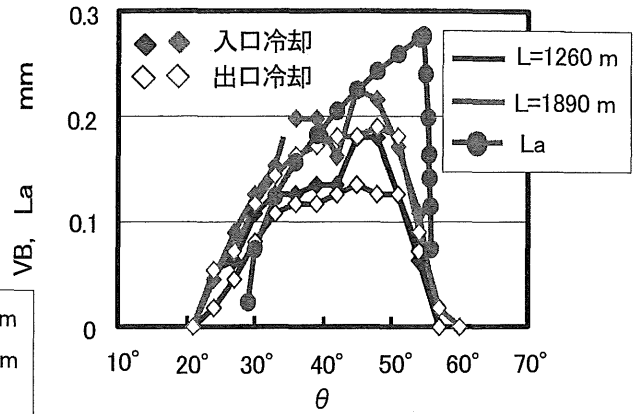
図7は図3と同様の座標軸を用い、切削方式による逃げ面摩耗幅を示したもので、最も逃げ面摩耗の進行が遅いステップダウン、出口冷却の条件で比較している。図より切削距離 L の増加につれて逃げ面摩耗幅は増加するが、上向き切削および



(a) 下向き切削



(b) 上向き切削



(c) 往復切削

図5 冷却方法が逃げ面摩耗に及ぼす影響

往復切削の条件が下向き切削に比べて摩耗幅が大きい。この理由は上向き切削の場合、切入みが零の状態から開始することになり、切削開始近傍で逃げ面のすべりが生じるためと考えられる。なお、往復切削は上向き切削と下向き切削が交互に繰り返されるため、上向き切削の影響を強く受けて逃げ面摩耗幅が大きくなったと考えられる。

また、図5と比較すると上向き切削、L=1890mの条件で、ステップアップでは $VB_{max}=0.23\text{mm}$ に

対してステップダウンでは 0.20mm となっており、上向き切削でもステップダウンの条件で工具が

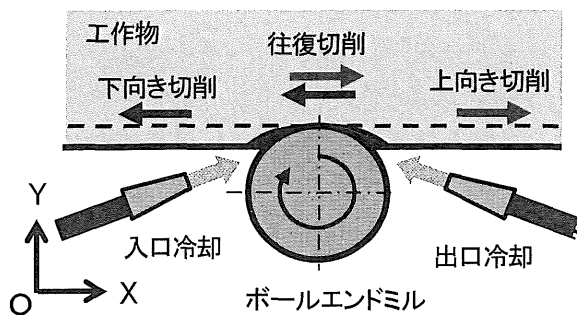


図6 冷却方法

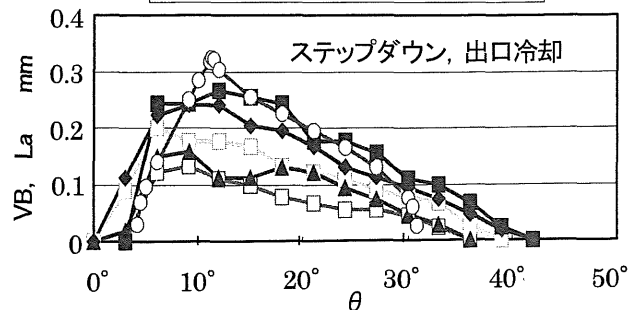


図7 摩耗形状と実切削長さ

長寿命となっている。なお、図7においても図3と同様に切削の進行につれて摩耗形状はLaの形状に近づいている。

3・2 最大逃げ面摩耗幅と仕上面粗さ

図8は横軸に切削距離をとり、切削方式による最大逃げ面摩耗幅VBmaxの変化を示したもので、図中の矢印↑、↓はそれぞれステップダウン、ステップアップを意味している。図よりピックフィードによらず下向き切削が上向き切削および往復切削に比べて最大逃げ面摩耗幅が小さいことが分かる。この理由は、前述したように上向き切削では切削の開始近傍で切削のたびに逃げ面にすべりを生じ、摩耗が増加するためである。また、往復切削も切削の半分が上向き切削であり、同様の理由で逃げ面摩耗幅は増大するが、すべりが生じる回数は半減しても図7では上向き切削と往復切削に

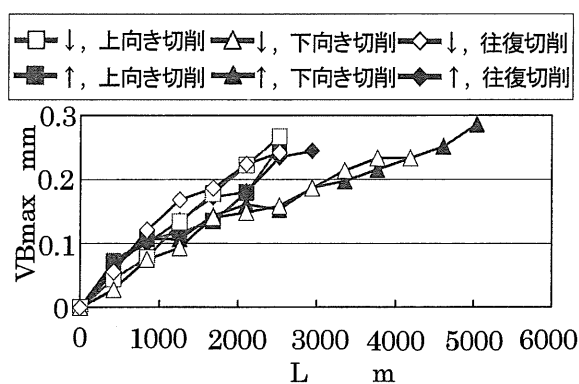


図8 切削距離と最大逃げ面摩耗幅の関係

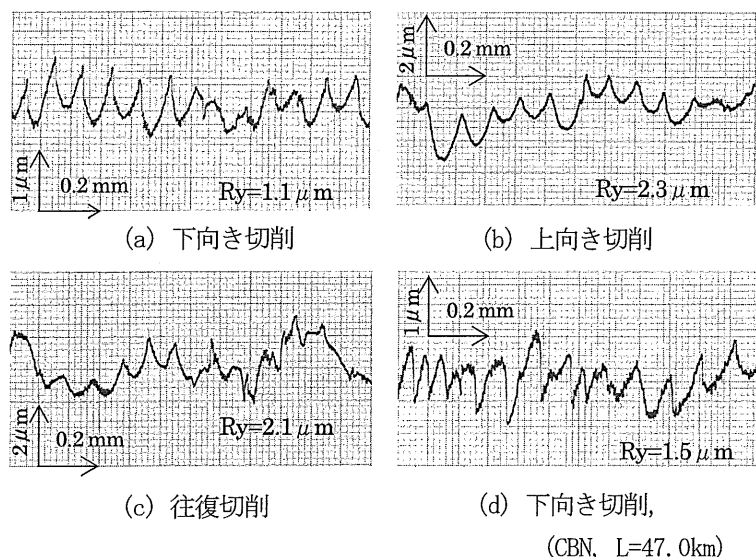


図9 加工面の粗さ曲線 (L=2520m, ステップダウン)

大きな差は認められず、今後の検討課題と考えている。

また、ピックフィードによる最大逃げ面摩耗幅に大きな変化は見られず、上向き切削および往復切削では切削距離 L=1890mまではステップダウンでややVBmaxが増加する傾向が見られるもののL=2520mではステップアップとの差がなくなっている。一方、下向き切削ではL=4000m以上でもピックフィードによる差が見られていない。

図9は切削方式による仕上げ面の粗さ曲線(カットオフ値:0.8mm)をステップダウン、L=2520mの条件で比較しており、(d)図は後述するCBN工具(L=47.0km)の結果である。(a)図の下向き切削においては、ツールマークが安定しており、最大高さはRy=1.1μmと最も小さく、良好な仕上げ面が得られている。一方、(b)図の上向き切削ではツールマークの変動が大きくなっており、(c)の往復切削ではツールマークの乱れが増大し、ともに最大高さはRy=2.1~2.3μmと大きい。

図10は図8と同様の座標軸を用い、最大高さRyの切削距離Lによる変化を比較したものである。図よりピックフィードによらず下向き切削では切削距離L=4000m付近まで最大高さRy=2.0μm程度の良好な仕上げ面を得ている。また、往復切削は上向き切削の影響が強くと表れたために同程度の粗さであったと考えられる。なお、全ての切削方式においてステップダウンの最大高さが小さくなる傾向にあるが、この理由は加工面を創生する切れ刃位置における逃げ面摩耗幅が小さいためである。

3・3 CBN工具による切削特性

図11はステップダウン、下向き切削により超硬工具とCBN工具の切削特性を検討したもので、(a)図が最大逃げ面摩耗幅VBmaxを、(b)図が最大高さRyを比較している。(a)図よりCBN工具の摩耗進行が非常に小さく、VBmax=0.2mmに達するまでの切削距離は超硬工具がL=1260mであるのに対し、CBN工具がL=47.0kmと長く、後者が前者の30倍以上の工具寿命を示している。

一方(b)図に示す最大高さを比較しても、超硬工具において切削距離が

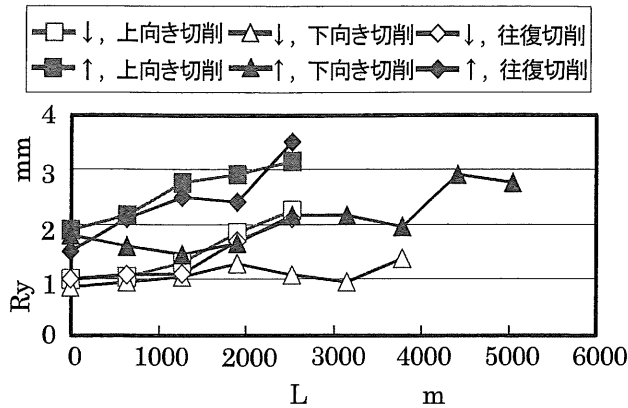
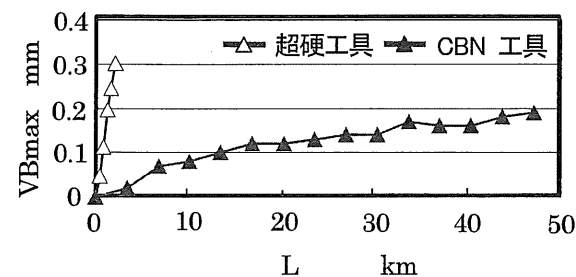
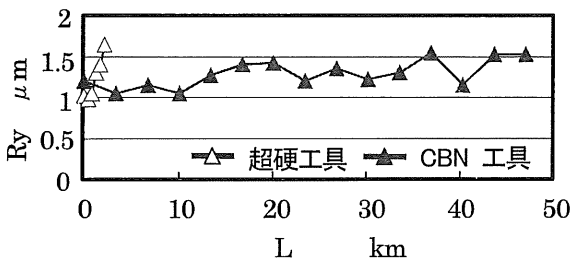


図10 切削距離と最大逃げ面粗さ



(a) 最大逃げ面摩耗幅



(b) 最大高さ

図11 CBN工具と超硬工具の比較

L=2100mで $Ry=1.7\mu\text{m}$ であったのに対し、CBN工具では切削を終了したL=47.0kmにおいても $Ry=1.5\mu\text{m}$ と非常に小さい値となっている。また、粗さ曲線も図9(d)に示すように切削終了時点まで大きな乱れもなく良好な仕上げ面が得られている。この理由は多くの報告^{4),5),6)}で示されているように、CBN焼結体の硬度が超合金に比べて2倍以上と高く耐摩耗性が向上したことに加えて、断続切削にもかかわらず、切削条件が仕上げ条件に近い小さな切り込みと送りを用いたため、チッピングの発生が抑制されたためと考えられる。ただし、図11は1回の実験結果にすぎず、今後実験データを蓄積することが必要であるが、高硬度材の高速加工にCBN工具を用いることの有効性が示された

ものと考えられる。

4. 結 論

小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工を行い、逃げ面摩耗幅及び仕上げ面粗さに及ぼす加工法および工具材種の影響を検討し、以下の結論を得た。

- (1) ボールエンドミル加工において、切れ刃の位置で逃げ面摩耗幅は異なるが、切削の進行につれて切りくずの除去に関する実切削長さの形状に近づいていく。
- (2) 工具の切削終了点にミスト冷却を与えると逃げ面摩耗幅は減少するが、ステップダウン、下向き切削の条件で最も工具寿命が長い。
- (3) 加工面の最大高さは切削の進行につれて増大するが、(2)と同条件で小さく、L=3800mでも $Ry=1.4\mu\text{m}$ と良好な加工面が得られた。
- (4) CBN工具を用いると逃げ面摩耗幅の進行は超硬工具の約1/30と小さく、仕上面粗さも切削距離L=47kmまで $Ry=1.5\mu\text{m}$ と良好であり、高硬度材の高速加工にCBN工具を用いることが有効であることが示された。

最後に、実験およびデータの処理と図面の作成は学部生池乗伸策君および高橋伸由君の協力を得た。付記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 岩部洋育, 山口恒志, 清水啓輔, 中西賢介: 小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工における工具寿命と仕上げ面粗さに関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 60, 577(1994-9), 2906.
- 2) 高橋一郎, 安斎昌弘, 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.
- 3) 笹原弘之, 水谷文則, 堤 正臣: オイルミスト供給による高速エンドミル加工時の工具摩耗への影響, 精密工学会誌, 66, 1(2000), 80.
- 4) 池田直弘, 高橋一郎, 松岡甫篁, 中川威雄: 特殊ボールエンドによる高硬度材の超高速切削, 形技術者会議'92講演論文集, (1992), 128.
- 5) 鳴滝則彦, 臼杵年, 松本充弘, 篠原健一郎: 焼入鋼切削時のCBN工具の摩耗, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 903.
- 6) 中井哲男: CBN, ダイヤモンドによる難削材の切削加工, 精密工学会誌, 58, 12(1992), 1953.