

高硬度金型 (60HRC) の高速切削

内藤国雄，大庫和孝，高田泰久，渡辺一樹，和田健二

High-Speed Cutting of Hardened (60HRC) Die Mold

Kunio Naito, Kazutaka Ogo, Yasuhisa Takada, Kazuki Watanabe, Kenji Wada

要 旨

放電加工が主体の高硬度金型加工を切削化できれば，短納期・低コストの型製作が可能になり，その効果は大きい。そこで，切削化を目標に工具と切削方法を検討した。

初めに，40HRC～60HRCに熱処理硬化した金型鋼を切削し，高硬度化に伴う切削状況の変化と工具切れ刃の損傷を調べた。

次に，60HRCの高硬度鋼を切削する適正な工具材と刃先形状を検討した。工具材に高靱性のCBN焼結体を選定し，回転中心切れ刃の省略と面取りにより刃先を強化した工具を試作した。

試作工具の耐久性を調べると，傾斜面の切削に比べ平面の切削における工具寿命が短かった。短寿命は，切れ刃の欠損を生じるためであり，欠損箇所の切れ刃面を分析すると被削材が凝着していた。この被削材の凝着防止をはかるため，切れ刃への熱衝撃が少ないミスト潤滑切削を試み，高潤滑性切削油を用いた微量ミスト注油により，工具寿命の長い高速切削ができた。

得られた高速切削の仕上げ面は，放電加工面に比べて粗さが小さく，硬度低下やクラックの少ない高品位面であった。

キーワード

高速切削，高硬度金型，CBN焼結体ボールエンドミル，工具寿命，ミスト潤滑切削，仕上げ面品位

Abstract

Hardened die mold steels have been conventionally made by electric discharge machining. Cutting these hardened steels would have large effects, allowing speedier delivery and lower production cost of die molds. In this study, therefore, a ball end mill has been developed and conditions for cutting hardened steels have been investigated.

First, the change in cutting condition and the damage to cutting edges have been examined by cutting the die mold steels, which have been hardened from 40 HRC to 60 HRC.

Next, the tough sintered CBN was selected for a cutting tool material, and a ball end mill was produced by the way of trial. This tool produced had removed end on the rotation axis and cutting edges strengthened by chamfering.

As a result of the endurance test, the life of the ball end mill was found to be shorter at the cutting plane due to its chipping. The damaged cutting edge was then analyzed by EPMA, which revealed that the steels of the workpiece adhered to the cutting edge.

For the prevention of the failure, the cutting zone was lubricated with the mist oil which gave a little thermal shock to the cutting edge. Spraying the mist of the high lubricant lengthened the life of the cutting tool.

Under the condition of the high cutting speed, the roughness and the change in hardness were smaller than those of the discharge-machined surface, thus producing the higher quality finished surface.

Keyword

High-speed cutting, High hard, Die mold, Compact CBN ball end mill, Life of cutting tools, Mist lubricated cutting, Quality of cutting surface

1. はじめに

放電加工が主体の高硬度金型加工を切削化できれば、能率向上とみがき工程の削減で製作時間の短縮がはかれるだけでなく、熱処理硬化後の素材から金型形状を削りだす直彫り化による工程集約が可能となり、金型の短納期化とコスト低減に及ぼす効果は大きい¹⁾。最近、工作機械の主軸回転数および送り速度の高速化²⁾やNC制御系の高速・高精度化³⁾および工具と切削技術の進展により、高硬度材の高速直彫り切削が可能となりつつある⁴⁾。

このうち、本研究の対象とする工具と切削技術については (Ti, Al) N を被覆した超硬合金製ボールエンドミルにより、熱間鍛造型やダイカスト型などで、熱処理硬化後の実用金型 (50HRC) の高速切削が行われ始めている。しかし、さらに高硬度の60HRC金型鋼を工具の寿命を満足しかつ直彫りにかなう高速で切削した事例はない。

そこで、60HRC金型の切削化をはかることを目標に、次の検討を行った。まず高硬度化に伴う切削状況の変化と切れ刃の損傷を調べ、これをもとに工具材の選定と適切な切れ刃形状を得るための試作を行う。次に、この工具を用いて、高速切削で工具の寿命を満足する切削法と条件を求める。さらに、得られた高速切削面が目標とした高品位

面になっているか放電加工面と比較する。

2. 実験方法

2.1 高硬度鋼の切削

主軸回転数が最高 $5 \times 10^4 \text{min}^{-1}$ の横型マシニングセンタにより、Table 1に示す (Ti, Al) N を被覆した超硬合金製ボールエンドミルを用い、40HRC ~ 60HRC に熱処理硬化した金型用鋼2種を下線で示す回転数、送りおよび取り代で切削した。供試鋼2種の硬さは、焼き戻しの温度と回数を変えることにより調整した。これらの金型鋼で硬さの増加に伴う切削抵抗と工具損傷を調べた。

2.2 工具材質の選定と試作

工具は金型のキャビティの加工では最も一般的な自由曲面加工用のボールエンドミルとした。まず材質を選定した。被覆超硬合金製工具に比べ耐久性に優れていたCBN工具については、CBNの粒径 ($1 \sim 3 \times 10^{-6} \text{m}$) と含有量 (40 ~ 60%) を変えた工具3種について平面切削で比較調査した。次に選定したCBN工具の先端部切れ刃と面取りの適正な形状について調べた。工具の適否は切削量の増加に伴う切れ刃の損傷状況から評価した。

2.3 工具の長寿命化検討

試作したCBN工具を用いて平面および傾斜面の切削で回転数、送りならびにアップおよびダウンカットの切削方式を変えて工具の長寿命化条件を

Table 1 Experimental conditions.

Machine	High-speed machining center ($5 \times 10^4 \text{min}^{-1}$)	
Tool	CBN, (Ti, Al)N coated carbides $\phi 10 \times 10^{-3} \text{m}$, 2 flutes ball end mill	
Work materials	SKD11 (55 ~ 60HRC), SKD61 (40 ~ 50HRC)	
Cutting method	Plane cutting, Inclined-plane (80degrees) cutting Up cut, Down cut	
Lubrication	Dry cutting, Mist lubrication cutting (Emulsion W1, Oil) $0.1 \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{min}$, Air $30 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{min}$	
Spindle speed	$0.1 \sim \underline{2.0}, \underline{3.5} \sim 4.5$	$\times 10^4 \text{min}^{-1}$
Tool feed rate	$0.067 \sim \underline{0.135} \sim 0.3$	$\times 10^{-3} \text{m/tooth}$
Pick feed	<u>0.3</u>	$\times 10^{-3} \text{m}$
Depth of cut	<u>0.3</u>	$\times 10^{-3} \text{m}$

Under line : Normal condition

調べた。寿命は、切削抵抗が急増・急減する時点とみなして切削を停止し、その時の切れ刃の損傷状態を調べるとともに切れ刃面のEPMA分析を行った。寿命の目標は、タイミングプーリやハブクラッチなど、自動車部品の金型における自由曲面の面積を考慮して 0.1m^2 とした。また、一層の寿命向上を実現するため、ミスト潤滑法を検討し、油剤種および注油量の影響を調べた。

2.4 切削面の評価

切削面性状は、みがき工程の省略や削減に影響する。そこで切削後の表面粗さおよび硬さや熱処理組織の変化を、放電加工面と比較して調べた。また、型寿命に影響する残留応力を測定した。

3. 結果と考察

3.1 被削材硬さと切削抵抗、工具損傷

切削抵抗は硬さが増すとFig. 1に示すように大きくなった。とくに、55HRCと60HRC鋼での軸方向分力 F_z の増加が著しかった。

このような軸方向分力の増加は、工具損傷に影響していた。Fig. 2に示すように、回転中心近傍のボールエンド部で摩耗が大きく、また欠損を生じやすかった。回転中心部では、高圧力下で被削材との摩擦が生じることや切削速度がゼロあるいは工具送り速度に応じてマイナスになるといわれている⁵⁾。これらのことが回転中心近傍の工具損

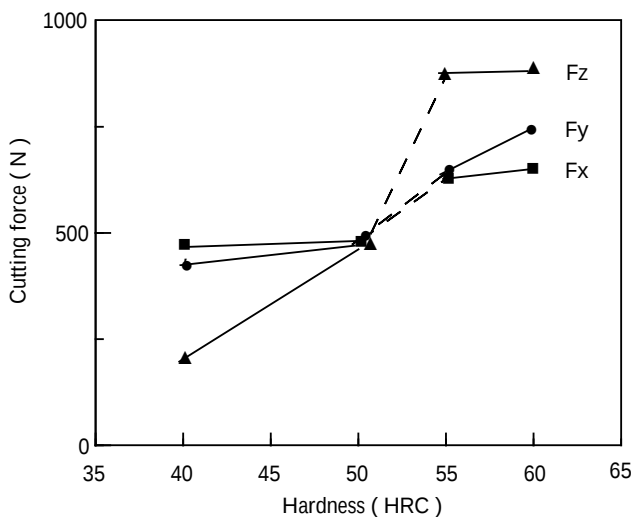


Fig. 1 Relationship between hardness of work and cutting force.

傷を大きくしたと思われる。これをふまえて、CBN工具の形状を変更した。すなわち、先端の回転中心部の切れ刃を寸法精度を悪化させない範囲で省略し⁶⁾、さらに面取りにより切れ刃強度を高める形状とした。

なお、被覆超硬合金工具による切削では、CBN工具に比べて摩耗が大きくなった。また、速度が 400m/min を越える傾斜面の切削では早期に切れ刃の摩滅を生じた。

CBN工具については、 $1 \times 10^{-6}\text{m}$ の微粒CBNで結合材 (TiN系) の含有量が40~50%の高靱性とされる材質が優れていた。選択した材質で、Fig. 2中の面取り形状の傾き角度 θ を10, 25, 40度と変えて調べたが、25度が切れ刃の強度を満足しかつ切りくず生成も良好で優れていた。

3.2 CBN工具の切れ刃摩耗面の分析と解析

前節の結果から先端形状や材質を最適化し、試作したCBN工具で平面および傾斜面の切削を行い、工具の耐久性を調べた。傾斜面切削における工具損傷は、Fig. 3に示すようにクレータ摩耗が進展して寿命に至るもので、目標の 0.1m^2 切削時点まで安定した切削ができた。

一方、平面切削では、Fig. 4に示すように目標

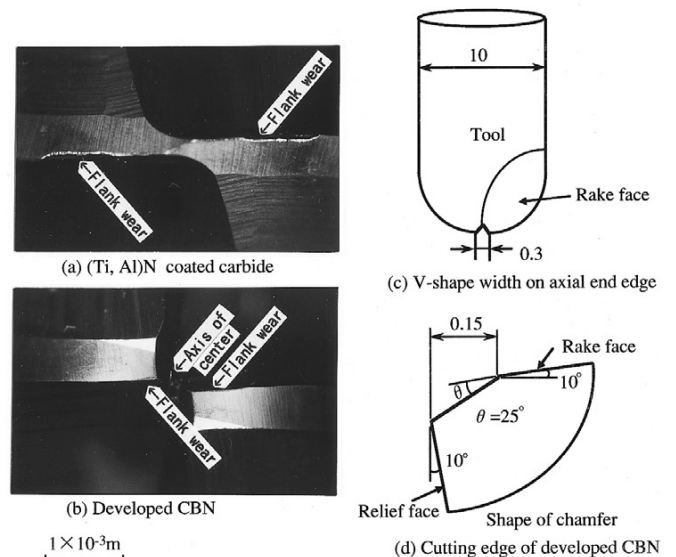


Fig. 2 Tool wear condition after 0.0015m^2 cutting hardened SKD11 (60HRC) and shape of developed CBN ball end mill.

に届かず傾斜面切削に比べ短寿命だった。切削方式について検討したところ、工具回転数 $2 \times 10^4 \text{min}^{-1}$ の条件ではアップとダウンカットの優劣は不明であった。しかし、 $3.5 \times 10^4 \text{min}^{-1}$ ではダウンカットで工具送り $0.135 \times 10^{-3} \text{m/刃}$ の場合に目標にかなり近い寿命を得た。また、傾斜面切削においてもダウンカットが良好だったことから、高速切削ではこの切削方式が優れていると考え、以降はダウンカットで工具寿命の延長を検討した。

平面切削における短寿命原因は、Fig. 5に示すような欠損を生じたためである。欠損の発生する位置は工具送り速度や切削速度により異なるが、いずれの速度の場合も高速になると工具中心側に移行する傾向が認められた。

欠損の発生原因を調べるため、切削速度の条件設定が容易な傾斜面切削で、切削速度を $30 \sim 1200 \text{m/min}$ に変化させて、 0.023m^2 切削後の工具損傷を調べた。その結果、摩耗が少ないにもかかわらず、欠損を発生する切削速度域 ($50 \sim 150 \text{m/min}$) が認められた。この速度域は、Fig. 5に示した平面切削において欠損を生ずる切れ刃位置の速度とほぼ合致していた。

欠損する速度条件で切削した切れ刃をEPMAで面分析すると、金型鋼の構成元素であるFeとCrが検出された。鋼系材料とは親和性の少ないとされるCBN工具であるが、被削材の凝着が生じた

と思われる。このような被削材の凝着は、断続切削において切れ刃の食い付きあるいは切り終りで凝着物が剥がれる際に、切れ刃の一部を剥離し欠損させることがある⁷⁾。このため、欠損のない安定した切削を行うには被削材の凝着をなくすのが望ましいと考えた。

3.3 ミスト潤滑による工具の長寿命化

切れ刃への被削材の凝着を防止するため、切削

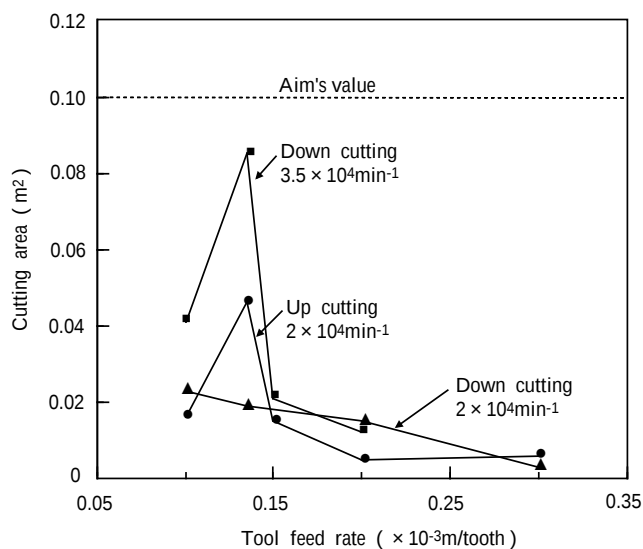


Fig. 4 Relation between tool feed rate and cutting area until tool life at plane cutting.

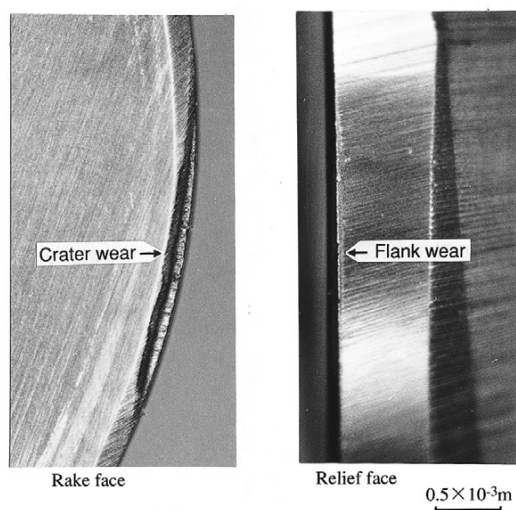


Fig. 3 Tool wear after cutting 0.1m^2 at the inclined-plane cutting.

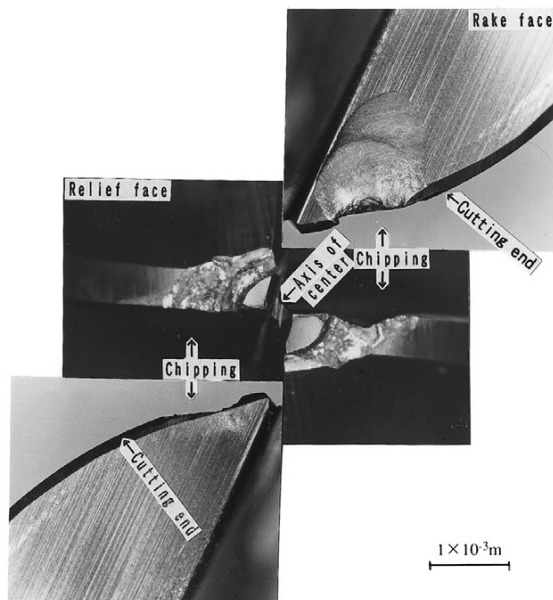


Fig. 5 Tool fracture at plane cutting.

部を潤滑した。潤滑は、切れ刃への熱衝撃を抑制し、かつ切削油の使用が少ない、ミスト注油法を採用した。Fig. 6に、用いたミスト生成ノズルおよびこれを加工機へ装着した状況を示す。ノズルは、油剤種の変更が容易で、ミスト量およびミストパターンが容易に調整できる塗装用ガンを用いた。ミストの生成は、発煙や発火を抑制するため、熱交換型の冷風発生装置からの冷風によった。ノズルおよび冷風装置は小型・軽量のため、加工機の主軸部に容易に取付けることができた。

水溶性油はCBN工具との不適合性⁸⁾が懸念されたが、耐発火・発煙性に優れていることを考慮して用いた。なお、潤滑性を確保するため、濃度は50%と高くした。不水溶性油は、極圧添加剤の異

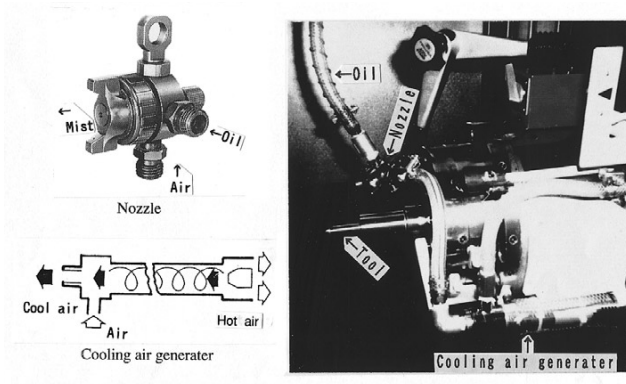


Fig. 6 Mount of the mist-lubricant equipment on the machine.

なる2種類を用いた。これらの油の注油量を変えて切削した場合の、工具寿命までの切削面積を示したのがTable 2である。水溶性油の場合は、工具の寿命は乾式切削よりさらに短く、また切れ刃もクラックを伴う大きな損傷を生じた。不水溶性油間で良好だったのは油脂および極圧添加剤の塩素分、硫黄分を含む歯切り用の高潤滑性（超活性）油であった。この高潤滑性油でミスト注油量と工具寿命の関係を調べると、寿命が極大値を示す条件が認められ、 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{min}$ 注油した場合に、目標面積 0.1 m^2 を越える長寿命の切削ができた。ミスト注油量に対して寿命が極大値を示したことから、ミスト潤滑切削での長寿命化は潤滑特性とともに切れ刃への熱衝撃の緩和を満たす条件で得られたと考えられる。なお、熱衝撃については、水溶性油の従来の流下注油法がミスト注油法の場合よりさらに寿命が短かった点から、長寿命化の阻害因子であることがうかがえる。

ミスト潤滑において、切削面積が 0.07 m^2 以上の長寿命工具における損傷位置は、被削材の凝着により欠損を生じていた切れ刃ではなく、切削負荷の大きい切り込み端だった。また、この損傷は偶発的な欠損ではなく、すくい面のクレータ摩耗に起因するものであった。なお、長時間切削しているにもかかわらず、逃げ面の摩耗幅は $0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 以下と少なく、CBN工具の寿命はすくい面のクレータ摩耗に依存していた。

Table 2 Cutting area until tool life.

Lubrication and cutting fluids		Spraying rate ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{min}$)	Cutting area (10^{-4} m^2)
Mist lubrication cutting	Emulsion (Conc. 50%)	0.2	80
	Active oil	0.1	197
		0.2	667
	Heavy active oil	0.1	510
		0.5	972
		1.0	1248
		2.4	720
Conventional dry cutting		—	50 ~ 891
Conventional wet cutting Emulsion (Conc. 5%) $40 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$		-	12

ミスト潤滑により寿命延長効果の認められた工具の摩耗面をFeとCrについてEPMA分析した結果を乾式切削と比較してFig. 7に示す。図から、ミスト潤滑ではCrがほとんど認められない。また、Feは摩耗端部の切りくずが離脱する箇所で認められ、摩耗面全体に分布している乾式切削とは異なっていた。このため、ミスト潤滑切削におけるFeがどのような状態になっているか、Fig. 7中の□で囲んだ部分を拡大分析して調べた。分析は、油

剤中の極圧添加剤のCl, Sおよび油脂の主成分であるCについて調べた。その結果がFig. 8で、油剤の成分はいずれもFeの分布と重畳する形で認められ、図中に示したような低融点、低せん断応力の潤滑物質⁹⁾を生成していたと考えられる。

3.4 切削面の粗さ、硬さ、残留応力

工具回転数 $2 \times 10^4 \text{ min}^{-1}$ で傾斜面を高速切削した切削面を放電加工面と比較した結果をTable 3に示す。放電加工条件は、直径 $0.25 \times 10^{-3} \text{ m}$ の黄銅

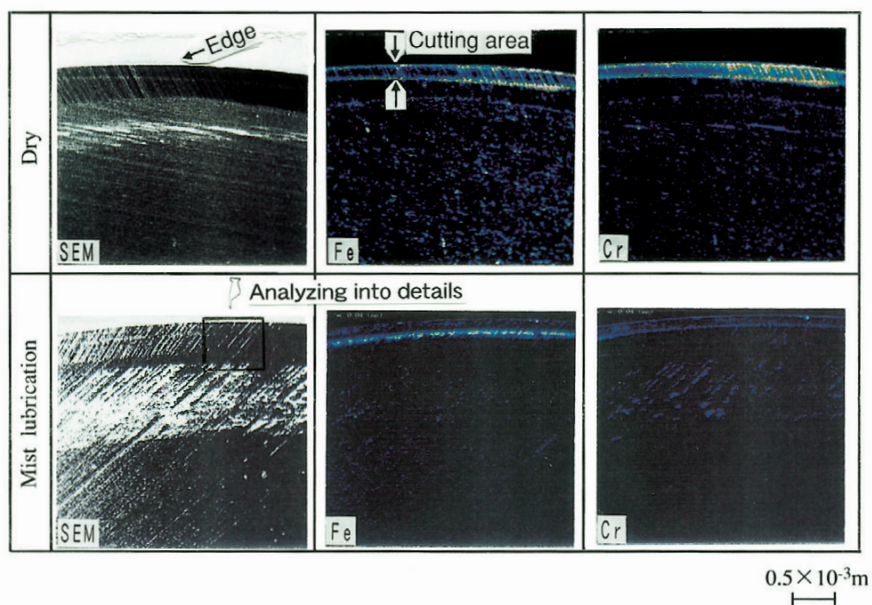


Fig. 7 Fe and Cr adhesion on the wear of rake face after cutting.

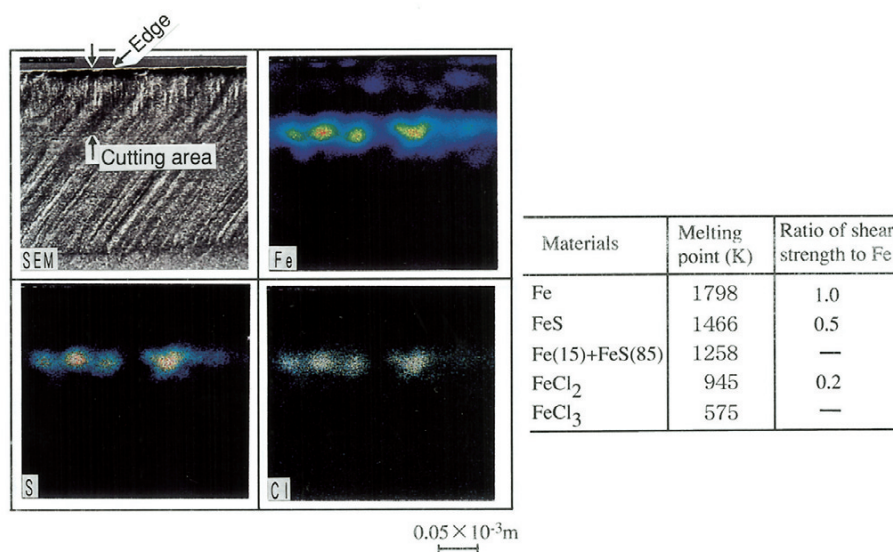


Fig. 8 Lubricating elements on the wear face of mist cutting.

ワイヤを用い電圧58V，電流3.5A，ワイヤ切り込み速度 0.9×10^{-3} m/s，加工幅 35×10^{-3} mである。なお，この場合の切削加工は放電加工の約28倍の加工能率である。

切削仕上げ面がカッターマークによる $3 \sim 4 \times 10^{-6}$ mRzの周期的な凹凸形状であるのに対して，放電加工面は規則性のない梨地状の面で $14 \sim 18 \times 10^{-6}$ mRzと粗い面であった。なお，傾斜面に比べて面粗さの粗い平面切削においても，最大粗さで 9×10^{-6} mRz程度で，放電加工面の約1/2であった。切削表面の硬さおよび組織は内部と変わらなかったが，放電加工面は硬度低下を生じており，深さ約 20×10^{-6} mの位置で硬さの極小値が認められた。また，表面から $5 \sim 10 \times 10^{-6}$ m厚さのナイトール液で腐食されない白層の再溶解凝固層を生じていた。切削面ではクラックは認められなかったが，放電加工面では網目状の深さ約 20×10^{-6} mのクラックが生成していた。クラックは炭化物を起点とし，その周辺で多く発生していた。残留応力は切削面が800MPaの圧縮応力であるのに対して，放電加工面は約600MPaの引張応力であった。残留応力の点からも切削面は放電加工面に比べて金型として好ましい面であった。

4. まとめ

放電加工が主体の高硬度金型加工を高速の切削加工にするため，適切な工具と切削方法および切削面の品位について検討し，以下の結果を得た。

1) 60HRCの高硬度鋼を被覆超硬合金製工具で切削すると摩耗・損傷が大きかった。また，高硬度鋼の切削では工具軸方向の切削抵抗が大きく，回転中心の切れ刃で損傷を生じやすかった。このため，工具材に高靱性のCBN焼結体を選定し，こ

れに刃先強度を高くする面取りおよび回転中心部の切れ刃を省略したボールエンドミルを試作した。

2) 試作工具の耐久性を調べると，傾斜面の切削に比べ平面切削における工具寿命が短かった。これは，特定の切削速度域で被削材が凝着し，切削の断続に伴いこの凝着物が剥離する際に切れ刃の欠損を生じさせることに起因したと考える。

3) 高潤滑性の切削油剤をミスト化し，切削部を潤滑することにより，被削材の凝着防止をはかり，工具寿命の長い切削ができた。

4) 切削面は放電加工面に比べて表面粗さが小さく，組織および硬さの変化がない，また圧縮の残留応力であるなど高品位な面であった。

参考文献

- 1) 阿部忠之, 小川寿巳: JACT NEWS(1997.11.20), 29
- 2) 杉本太, 渋川哲郎, 辻内敏雄: 1997年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 107
- 3) 牟田芳喜, 窪田充, 日笠山晴久, 東正毅: '97型技術者会議講演論文集(1997), 9
- 4) 岩部洋育, 嶽岡悦雄, 宮口孝司, 賀井治久: 精密工学会誌, 64-6(1998), 808
- 5) 高崎昭, 阿部忠之, 神田敬一, 松岡和彦, 渡辺一樹: トヨタ技術, 37-2(1987), 227
- 6) 内藤国雄, 大庫和孝, 小長哲郎, 阿部忠之, 神田敬一, 松岡和彦: 精密工学会誌, 59-4(1993), 649
- 7) 例えば, 機械技術振興協会加工技術データファイル2(1977), 3・4
- 8) 重松日出見, 富田進, 野口武志: 日本機械学会論文集(C), 47-415(1981), 390
- 9) 山本明, 鈴木音作: 切削油剤とその効果, (1966), 47, 朝倉書店

(1999年7月5日原稿受付)

Table 3 Quality of finished surface.

Properties	Cutting	E.D.M.
Roughness (10^{-6} mRz)	3 ~ 4	14 ~ 18
Hardness (mHv)	Unchanged	Softning 200Hv at 20×10^{-6} m depth
Surface	Good	Crack
Residual stress (MPa)	-800	+600

著者紹介



内藤国雄 Kunio Naito
 生年：1941年。
 所属：加工基盤研究室。
 分野：新材料の被削性評価と切削法の研究。
 学会等：精密工学会会員。



大庫和孝 Kazutaka Ogo
 生年：1942年。
 所属：加工基盤研究室。
 分野：切削加工，研削加工からなる機械加工技術の研究・開発。
 学会等：精密工学会会員。
 1987年 日本機械学会賞受賞。
 工学博士。



高田泰久 Yasuhisa Takada
 生年：1965年。
 所属：トヨタ自動車(株)工機管理部 技術開発室。
 分野：自動車用金型に関する生産技術開発。



渡辺一樹 Kazuki Watanabe
 生年：1954年。
 所属：トヨタ自動車(株)工機管理部 技術開発室。
 分野：自動車用金型に関する生産技術開発。
 学会等：日本機械学会会員。



和田健二 Kenji Wada
 生年：1957年。
 所属：トヨタ自動車(株)工機管理部 技術開発室。
 分野：自動車用金型に関する生産技術開発および生産管理。
 学会等：日本機械学会会員。