

高硬度材料の切削加工に関する研究 (第2報)

米山 陽・石黒 輝雄・寺澤 章裕

Study on Cutting of High Hardened Steel (2nd Report)

Akira YONEYAMA, Teruo ISHIGURO and Akihiro TERASAWA

要 約

高品位な高硬度鋼の切削加工面の創成と適正加工条件の確立を目的に、焼入れ処理した冷間金型用合金工具鋼 (SKD11, 60HRC) を対象とし、各種条件において超硬合金工具による切削加工実験を行った。その結果、切削速度が高まるとともに表面粗さは小さくなり、また、加工表面の残留応力も低減されることがわかった。さらに、工具摩耗の抑制効果が期待できるcBN工具により、高硬度鋼への加工実験を行った結果、超硬合金工具と比較して摩耗量が少なく、摩耗の進行が遅いことがわかった。

1. 緒 言

高硬度の金型材料を加工する場合、切削加工が困難であることから、通常は放電加工による方法が採られている¹⁾。放電加工で金型製作を行った場合、高精度加工は可能であるが長時間を要し、現状では加工時間の短縮及び低コスト化は望めない。これら課題解決の方法として、高硬度材料の直彫切削加工が一部で行われてきているが、金型材料などの高硬度材料は難切削性を有するため、適正な加工条件が見出されていない状況である。

そこで、高品位な高硬度鋼の切削加工面の創成と適正加工条件の確立を目的とし、各種条件において超硬合金工具を用いた切削加工実験を行った。また、その加工面の残留応力及び表面粗さを測定することにより、加工面の評価を行った。さらに、工具摩耗の抑制のため、高硬度鋼の切削加工への、cBN (立方晶窒化ホウ素焼結体) 工具の適用について検討を行った。

2. 実験方法

2-1 超硬合金工具を用いた切削加工面の評価

2-1-1 被削材及び切削工具

実験に用いた被削材は、冷間金型用合金工具鋼 (SKD11, 30×50×50mm) で、焼入れ-焼戻し処理を行い、材料硬度を60HRCに調質したものを使用した。

切削工具は、市販の超硬合金製ラジラスエンドミル (三菱マテリアル製, VC-4SRB) を使用した。表1に使用切削工具の詳細について示す。また、工具ホルダは、一般的なコレット方式を用いた。工具ホルダからの切削工具突出量は25mm、切削工具の振れ量は切れ刃近傍のシャンク部分において、2 μ m以下とした。切削加工後

は、ビデオマイクロ装置による切れ刃状態の観察を行った。

表1 切削工具

工具材種	超硬合金 (超微粒子タイプ)
コーティング	(Al,Ti) N
切削工具径	ϕ 8 mm
ねじれ角	$\alpha=30^\circ$
刃数	4 枚
刃先コーナR	0.5mm

2-1-2 実験装置及び加工条件

使用した加工機は、3軸縦型マシニングセンタ (三井精機工業(株)製VU50A, 最高主軸回転数: 20,000rpm, 主軸端: BT40) である。加工条件を表2に示すが、切削速度は4種類を選択し、一刃当りの送り量と軸方向の切込み量を一定として実験を行った。加工方向は、加工機におけるY軸方向のみの一軸送りとし、同一部を加工深さ0.2mmで2パス加工し、総切削長を100mmとした。切削部の冷却は、切削液及びエアブロー等は用いず自然冷却とした。切削工具は、条件ごとに未使用のものを用い、それぞれの評価位置は、切削長75mmの箇所にて行った。

表2 切削加工条件

切削速度	$V_c=10, 25, 100, 315$ m/min
一刃当り送り量	$S_z=0.028$ mm/tooth
軸方向切込み量	$A_d=0.2$ mm
切削幅	$R_d=8$ mm

2-1-3 切削抵抗の測定

加工中の切削抵抗の測定は、図1に示すように、加工機テーブル上に切削動力計（キスラー、9172B）を取り付け、その上に被削材を固定し行った。切削抵抗値は、切削長75mm付近において、切削動力計上の振幅がプラス方向に最大となった値とした。

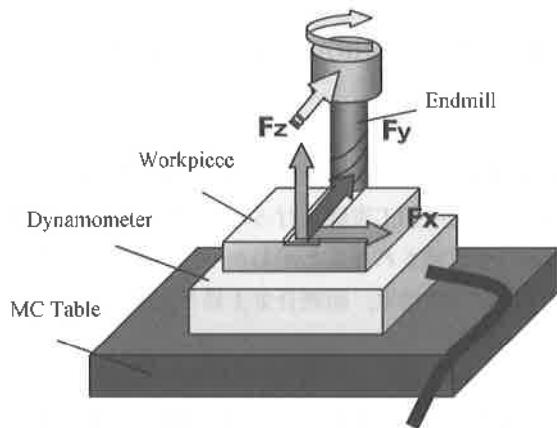


図1 切削抵抗の測定

2-1-4 表面粗さ測定

切削加工面の表面粗さ測定は、触針式の表面粗さ計（株式会社東京精密製 SURFCOM3000A）を用いて行った。測定箇所は切削工具通過箇所の中央とし、測定方向は工具送りと同方向とした。

2-1-5 X線応力測定

切削加工面における残留応力の測定は、X線応力測定装置（株式会社リガク製PSPC-MSF-3M）を使用し、並傾法により行った。表3にX線応力測定条件を示す。回折線は、一般的な鉄鋼材料の応力測定に用いられる α Fe211を利用した。残留応力の測定位置は、切削加工面中央部とし、測定方向は、工具送り方向（フィード方向、 $\phi 0^\circ$ ）と、送り方向に対して直交した（クロスフィード方向、 $\phi 90^\circ$ ）2方向の測定を行った。加工表面から材料内部方向への残留応力分布は、電解研磨を用いて逐次除去し測定した。

表3 X線応力測定条件

回折面	α Fe211
ターゲット	Cr
管電圧	30kV
フィラメント電流	8 mA
測定手法	$\sin^2 \psi$
応力定数	-297MPa/deg.

2-2 超硬合金工具とcBN工具の比較

難削材料の切削における問題点の一つとして、工具摩

耗が挙げられる。そこで、超硬合金より硬度の高いcBNを刃先材料としたラジラスエンドミルによる切削実験を行い、工具摩耗の比較及び切削抵抗の測定を行った。また、加工面の表面粗さ測定については、走査型白色干渉法を用いた非接触三次元表面形状測定機（Zygo製 NewView6300）にて行った。

2-2-1 被削材及び切削工具

実験に用いた被削材料は、2-1における実験と同じである冷間金型用合金工具鋼（SKD11、60HRC）を使用した。

切削工具は、超硬合金とcBNの2種類のラジラスエンドミルを用いた。その詳細について表4に示す。刃先形状は、同一刃先形状の切削工具の入手が不可能であることから、cBN工具はすくい角がポジティブ、超硬合金工具は 0° の工具を用いた。

表4 切削工具

	切削工具1	切削工具2
材種	超硬合金	cBN
コーティング	(Al,Ti) N	無し
切削工具径	$\phi 2.0\text{mm}$	←
刃数	2枚刃	←
ノーズR	0.1mm	←

2-2-2 加工条件

切削速度は、加工機の最大主軸回転数及び工具メーカー推奨条件を考慮し、両切削工具ともに120m/minとした。加工条件の詳細を表5に示す。加工パスは、50×30mmの平面領域に対して、サイドステップ値0.5mmによる平面加工とし、各切削工具の総切削長は6,000mmとした。

表5 切削加工条件

切削速度	$V_c=120\text{ m/min}$
1刃当り送り量	$S_z=0.01\text{ mm/tooth}$
軸方向切込み量	$A_d=0.02\text{ mm}$
切削幅	$R_d=0.5\text{ mm}$
切削方向	ダウンカット
潤滑・冷却	オイルミスト
総切削長	6,000mm

3. 結果及び考察

3-1 超硬合金工具を用いた切削加工について

3-1-1 切削抵抗について

図2に切削抵抗値と切削速度の関係を示す。図中の F_x は主分力を示し、フィード方向と 90° を成す力である。 F_y は送り分力を示し、工具送り方向に発生する力

である。また F_z は、背分力を示しており、切削工具軸方向の力である。

一般的に切削抵抗は、切削速度が増加すると減少する事例が多い²⁾。しかし、本実験においては、主分力 F_x 、送り分力 F_y は切削速度の増加と共に、ほぼ線形的な増加傾向を示し、切削速度315m/minの時に最も高くなり、その値は、主分力 F_x は約100N、送り分力 F_y は約50Nを示した。また、背分力 F_z は切削速度100m/min以上になると著しく増加し、切削速度315m/minの時に最も高い240Nを示した。

背分力の増加は、切削工具のフレーキング損傷を引き起こす原因となる可能性がある。また、主分力、送り分力の増加は切削工具の倒れを引き起こす原因となり得るため、切削抵抗は低いほど望ましいと考えられる。そのため、本実験結果からは、切削抵抗の観点のみでは、極力低い切削速度が好ましいと考えられる。

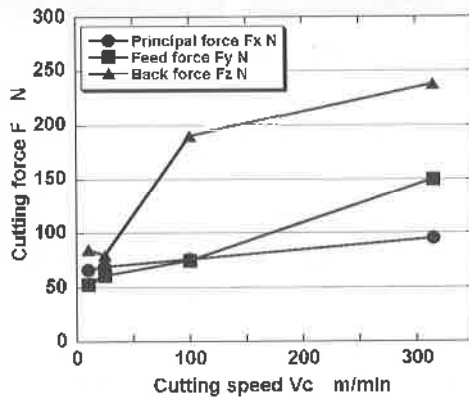


図2 切削抵抗値と切削速度

3-1-2 表面粗さについて

図3に切削加工面の表面粗さと切削速度の関係を示す。表面粗さの値は、切削速度が10m/minの時に最も高くなったが、切削速度25m/min以上においては、算術平均粗さRa、最大高さRzともに、ほぼ一定の値を示す傾向にあり、本実験において最も良好な表面粗さが得られたのは、切削速度315m/min時で、算術平均粗さは $0.2 \mu\text{m Ra}$ 、最大高さRzは $1.1 \mu\text{m Rz}$ であった。

3-1-3 残留応力について

図4に切削加工面における残留応力と切削速度の関係を示す。全体的にクロスフィード方向は、フィード方向と比較して、圧縮残留応力が大きい値を示した。両者ともに切削速度10m/minの時に最も高い圧縮残留応力を示し、フィード方向では1,000MPa程度、クロスフィード方向では600MPa程度の圧縮残留応力を示した。圧縮残留応力は、切削速度の増大に伴い減少し、315m/minの時に残留応力は0近傍へと収められた。

図5及び図6に、フィード方向、クロスフィード方向

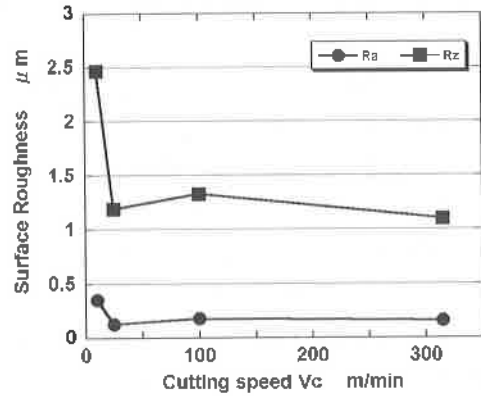


図3 加工面の表面粗さと切削速度

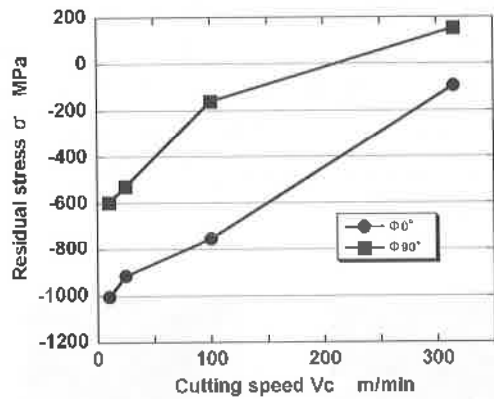


図4 最表面における残留応力と切削速度

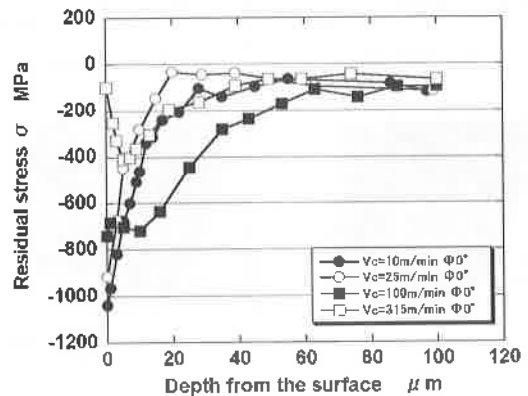


図5 残留応力の深さ分布 (フィード方向)

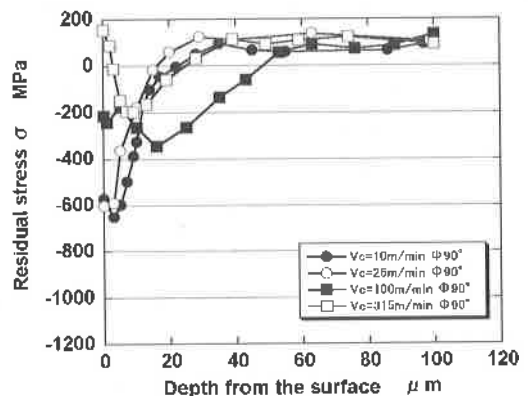


図6 残留応力の深さ分布 (クロスフィード方向)

における、加工表面から材料内部方向への残留応力の分布について示す。残留応力の存在領域は、フィード方向、クロスフィード方向ともに、切削速度100m/minを除き、表面からおよそ40 μ m程度であった。深さが加工表面からおよそ10 μ mまでの領域では、切削速度によって挙動が異なった。また、それより深い領域での残留応力分布は、切削速度100m/minを除き、各条件とも同様な傾向を示し、深さとともに徐々に減少し0近傍へと収れんした。

3-1-4 切削加工後の切れ刃状態について

切削加工後の刃先観察結果を図7に示す。その結果、切削速度が高まるにつれて工具摩耗量が大きくなり、切削速度315m/minにおいては、切れ刃先端のすくい面に欠けが認められた。これは、高硬度鋼切削時に発生しやすいと考えられるフレーキング損傷と思われる。フレーキング損傷は、切れ刃の摩耗進行と背分力の増大が原因と考えられることから³⁾、摩耗の進行度が高く、背分力が増大した切削速度315m/minにおいて顕著になったものと推察される。

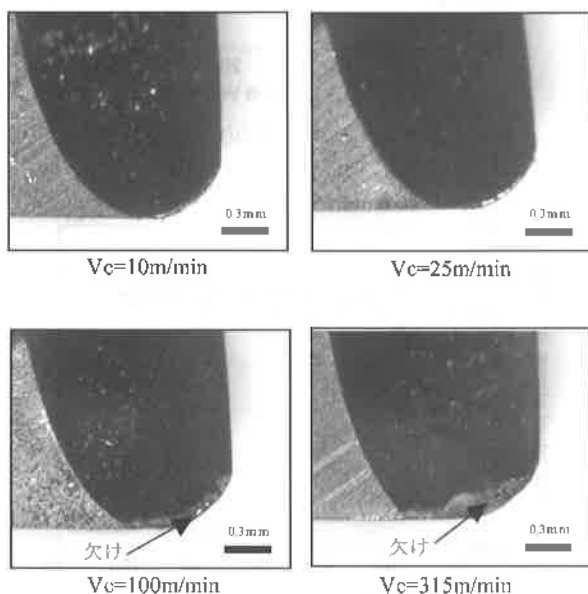


図7 使用後の切削工具すくい面

3-2 cBN工具の適用について

図8に、2-2の実験において同一切削長を加工した超硬合金工具及びcBN工具の刃先SEM写真を示す。超硬合金工具は、幅200 μ mほどの領域でコーティング層の剥離及び最大20 μ m程度の切れ刃の後退が見られたが、チッピング等の異常摩耗は認められないため、正常摩耗が進行した状態と思われる。一方、cBN工具は、幅50 μ m程度の領域で、数 μ mの切れ刃後退量で、超硬合金工具と比較すると大幅に少ない。しかし、その摩耗状態は、小さいチッピングの様に見受けられることから、異常損傷⁴⁾が生じた可能性も考えられる。

図9に非接触表面形状測定機による加工面の測定結果を示す。左側は測定範囲を1mm \times 1mm、右側は中央部を拡大して0.2mm \times 0.2mmとしたものであり、切削工具の進行方向は右から左方向、サイドステップ方向は手前から奥方向である。

1mm \times 1mm範囲のツールパス間が含まれた領域の測定では、cBN工具は超硬合金工具に対して、Ra値は両者ともにほぼ同様な値を示したが、P-V値ではcBN工具の方が低い値を示し、その値は1.00 μ mP-Vであった。また、0.2mm \times 0.2mm範囲のツールパス間の段差を含まない平坦な部分の測定では、超硬合金工具がRa、PV値

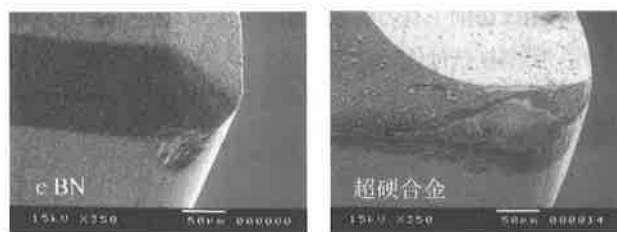


図8 刃先SEM写真

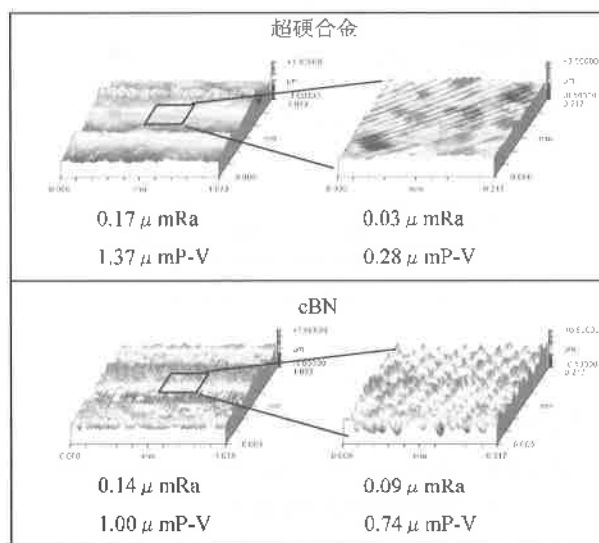


図9 非接触三次元表面形状測定機による測定結果

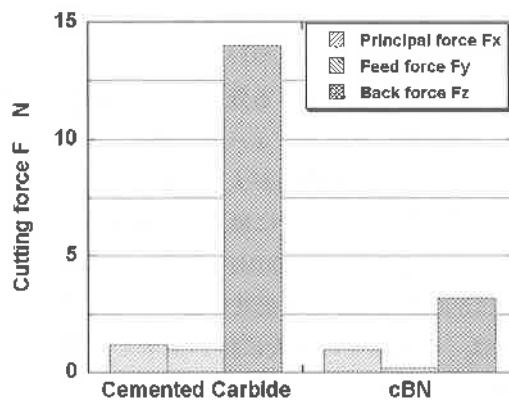


図10 切削抵抗の比較

共にcBN工具より小さくなり、約1/3程度であった。これは、図10に示す様に、cBN工具の切削抵抗が超硬合金工具より低くなり工具倒れが低減されたためと考えられる。

4. 結 言

本研究では冷間金型用合金工具鋼 (SKD11, 60HRC) を対象として切削加工を行い、切削速度の違いが、切削加工面の状態に及ぼす影響について評価した。以下に得られた結果について示す。

- (1)切削抵抗は、切削速度10m/min時に最も低い値を示し、その後は切削速度の増加に伴って増大し、特に背分力 F_z は、315m/minにおいて10m/min時の約3倍の値を示した。
- (2)表面粗さは、切削速度315m/min時に最も良好な値を示し、約0.2 μ mRaであった。
- (3)最表面の残留応力値は、切削速度の増加に伴って加工表面近傍の圧縮残留応力は減少し、315m/minの時に表面近傍の残留応力は0近傍へと収れんした。
- (4)加工面から内部方向への残留応力分布において、存在領域が最も大きかったのは、切削速度100m/min時で50 μ m程度であった。
- (5)cBN工具は超硬合金工具に比べ摩耗が少なく、良好な表面粗さが得られた。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご指導を頂いた、(独)産業技術総合研究所デジタルものづくり研究センターの尾崎浩一先生、碓井雄一先生、狩野勝吉先生、並びにスタッフの皆様方に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 松岡甫篁, 安斎正博, 高橋一郎: はじめての切削加工, 工業調査会, p.11 (2002)
- 2) 狩野勝吉: 切削加工のトラブルシューティング, 工業調査会, p.112 (1996)
- 3) 狩野勝吉: 切削加工実践Q&A 100選, 日刊工業新聞社, p.164 (2007)
- 4) 狩野勝吉: データでみる次世代の切削加工技術, 日刊工業新聞社, p.29 (2000)