焼入鋼旋削時のセラミック工具の初期欠損

(第1報)*

——初期欠損と切削条件——

大石 健 司** 西田 敏 史**

Early Fracture of Ceramic Tools in Turning of Hardened Steel(1st Report)
-Relation between Fracture and Cutting Condition-

Kenji Oishi and Toshihumi Nishida

The early fracture is investigated experimentally that occurs in the turning of hardened steel with ceramic tools, and the occurrence condition is clarified. And a method of evaluation is propounded for the early fracture toughness. A turning test is carried out with hardened SUJ2 steel(HRC66) and ceramic tool. The critical cutting speed decided by one-minute criterion is found out, and the influences for the fracture of cutting conditions are clarified. The main findings are as follows: (1) Black ceramic tools show normal wear and long life at lower cutting speed. But they show suddenly early fracture at high speed. (2) The critical cutting speed becomes high according to the decreasing of feed rate, depth of cut and the increasing of corner radius. (3) The critical cutting speed is decided by the maximum undeformed chip thickness. (4) The early fracture is affected by rather the cutting temperature than the cutting force. (5) The early fracture toughness of various ceramics tools is evaluated by the maximum undeformed chip thickness and the critical cutting speed. (6) The early fracture is controlled by the coolant.

Key words : hardened steel, ceramic tool, early fracture, cutting force, turning, undeformed chip thickness, cutting temperature

1. 緒 言

高硬度で、耐熱性の優れたCBN工具の開発により、従来、研削でしか加工できなかった焼入鋼の切削が可能となり、高能率化が進展している。

しかしCBN工具は製造行程からみても、コスト高は避けられない工具であろう。したがって、実用的に焼入鋼の切削を行うためには、これに代わる安価な工具材種と利用技術が必要であると考えられる。

CBN工具以外では硬さの条件からみて、セラミック工具が利用可能ではないかと考えられる。連続切削には不適であるが、連続切削には適用可能であり、 Al_2O_3 にTiCを添加した黒セラミックは、CBN工

具と同等以上の耐摩耗性を示し、むしろ長寿命であることも報告¹⁾されている。しかし、実用的に使用されにくいのは、突発的に欠損が発生することがあり、信頼性に欠けるためと考えられる。この欠損は摩耗による切削抵抗の増加が一因である場合²⁾もあるが、摩耗が進行していない切削初期に発生する場合もある。

切削工具の欠損に関する研究は多数報告^{3)~7)}されているが、多くは超硬あるいはサーメットの、連続切削で発生する欠損に関するものである。連続切削中で、しかも摩耗が進行していない切削初期に発生する欠損についての研究はみあたらない。

本研究では焼入鋼を旋削し、連続切削の初期に発生するセラミック工具の初期欠損と、切削条件の関係を求め、実験的に整理して欠損発生条件を明らかにした。すなわち、初期欠損はある切削速度(臨界切削速度)以上で発生するが、この臨界切削速度が何によって決まるかを明らかにした。また、各種セラミック工具の欠損発生条件により、焼入鋼旋削時の耐初期欠損性の評価が可能であることを示した。

* 原稿受付 平成元年 3月10日。昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和63年10月4日)にて発表

** 正会員 神奈川県工業試験所(横浜市金沢区昭和町3173)

*** 神奈川県工業試験所

Table 1 Composition of work material

Work material	C	Si	Mn	P	S	Cr
SUJ2	1.02	0.22	0.38	0.014	0.020	1.34

2. 実験方法

セラミック工具の欠損発生状況を明らかにするため、工具寿命試験と切削抵抗測定を行った。

被削材はSUJ2 ($\phi 100 \times 400$, 化学成分は表1) を焼入れし、その外表面から5mmまでの部分を切削した。なお、被切削面の硬さはショア硬度計により確認しながら切削したが、その硬さはHRC66~67 (換算値) の範囲であった (一部HRC65使用)。

工具材種は表2に示すように6種類のセラミック、サーメットおよびCBNを用いたが、大部分の実験は黒セラミック (B-Ceramics) を用いて行った。

工具形状はSNGN432を主とし、これをN11R-44ホルダにクランプして用いた。したがって、刃部形状は(-5,-5,5,5,15,15,var) であり、コーナ半径は0.8~2.0mmの範囲で変えた。なおチャンファ形状は市販のままである。

切削は昌運ST-5旋盤を用い、外周の乾式長手旋削を主とした。大部分の実験は切込み0.5mm (一部0.25mm) として、送りSと切削速度は広範に変えた。切削抵抗の3分力を、キスラー製9257A工具動力計を用いて測定した。

工具寿命の判定は、VB=0.1mmを基準としたが高速側ではこれに達する前に短時間のうちに欠損が発生する。これを初期欠損として欠損発生と切削条件の関係を明らかにした。

欠損発生の判定は、切削中の切削抵抗の変化と、切削状態の目視による観察、切削後の切れ刃の顕微鏡観察によった。

Table 2 Characteristics of various tool materials

Tool	Composition	Hardness	TRS kg/mm ²	E X10 ⁴	α 10 ⁻⁶ /°C	K cal/cm ² ·s·°C
B-Ceramics	Al ₂ O ₃ +TiC	HV3000	90	4.2	8.0	0.05
B-Ceramics-2	Al ₂ O ₃ +TiC	HRA94	90	4.1	7.4	0.06
W-Ceramics	Al ₂ O ₃	HV2400	80	3.8	7.8	0.06
TiC-Ceramics	TiC+Al ₂ O ₃	HRA90	80	4.5	7.6	0.07
Si ₃ N ₄ -Ceramics	Si ₃ N ₄	HRA93	110	2.9	3.6	0.13
WRC	Al ₂ O ₃ +SiCw	HRA94		4.0		
Cermet	TiN+TiC	HRA91	160	5.1	9.0	0.10
CBN	CBN	HV3500	110	5.7	5.6	0.09

(Catalogue data)

Fig.1 Tool life curve of ceramic tool

3. 実験結果

3.1 工具寿命

黒セラミックの寿命曲線を図1に示す。これはHRC65, 送り0.1mm/rev, 切込み0.5mmの場合であるが、100m/min以下で欠損の発生はなく、安定した摩耗が進行し、寿命判定基準をVB=0.1mmとして寿命曲線を求めることができる。しかし100m/minを越えると、ほとんどの場合、1min前後のうちに突発的に欠損が発生し、寿命に達している。

図2は工具の損耗状態を示したものである。(a)は正常摩耗の例で、切削速度60m/minで118min切削後の、黒セラミック工具 (r:2.0mm) の摩耗形態である。逃げ面とすくい面に摩耗が進行しているが、欠損は発生していない。このような正常摩耗が進行したときには、長寿命が得られている。

一方(b)は欠損が発生した場合の例で、すくい面に大きなく離が発生している。

このように、低速では正常摩耗が進行し、寿命曲線が求められるが、高速では切削初期に突発的に欠損が発生することが多い。

そこで、判定時間を1minとして、正常切削と欠損発生の境界の切削速度を、臨界切削速度と呼ぶことにし、この臨界切削速度が切削条件でどのように変わるかを以下の実験で検討した。なお、以下の被削材はHRC66~67である。

(a) Normal wear
 $r:2.0\text{ mm}, a:0.5\text{ mm}, S:0.1\text{ mm/rev},$
 $V:60\text{ m/min}, t:118\text{ min}$

(b) Early fracture
 $r:0.8\text{ mm}, a:0.5\text{ mm}, S:0.1\text{ mm/rev},$
 $V:90\text{ m/min}$

Fig.2 Tool wear and fracture of ceramic tools

Fig.3 Relation between feed rate and critical cutting speed

Fig.4 Relation between corner radius and critical cutting speed

3.2 臨界切削速度におよぼす、送り・コーナ半径の影響

臨界切削速度と送りの関係を図3に示す。図中の臨界切削速度を結ぶ線の上側で欠損が発生し、下側では正常切削ができる。送りが増大すると臨界切削速度は明らかに低下し、欠損発生領域が拡大することがわかる。CBN工具の場合にも同様の傾向で、送りの増加と共に、臨界切削速度は低下している。

コーナ半径と臨界切削速度の関係を図4に示す。コーナ半径を大きくすると、いずれの送りでも臨界切削速度は高速側に移行し、正常切削の範囲は広がる傾向がある。このことは、高硬度材にはコーナ半径の大きい工具が適しているという報告²⁾と一致している。

3.3 欠損発生と最大切取り厚さ

図2 (b) のすくい面の損傷を詳細に観察すると、横切れ刃の切削境界部付近が起点となってクラックが進展し、大きなはく離が発生していることがわかる。したがってセラミック工具の初期欠損を検討する場合には、クラックの起点となる局部、特に切取り厚さが最大となるとところに注目する必要があると考える。

そこで、図3、図4の送り、コーナ半径と、臨界切削速度の関係を、最大切取り厚さで整理し直した。

本実験の切削条件では切込みが小さく、工具のコーナ部のみで切削しているため、切削断面の形状はコーナ半径 r 、送り S 、切込み a で決まる。

そこで、図5に示すように、最大切取り厚さ h_m を切れ刃コーナ円の法線方向の厚さとする、 h_m は

Fig.5 Undeformed chip thickness

Fig.6 Relation between maximum undeformed chip thickness and critical cutting speed

Fig.7 Relation between maximum undeformed chip thickness and critical cutting speed on various tool materials

$$h_m = r - \sqrt{r^2 + S^2 - 2S\sqrt{r^2 - (r-a)^2}}$$
 で求められる。ここで $r \gg S$ として近似すると

$$h_m = \sqrt{a(2r-a)} \cdot S/r \quad (1)$$
 となる。

式(1)から求めた最大切取り厚さと、臨界切削速度の関係を図6に示す。同図には切込みを変えた場合

も合わせて示した。

コーナ半径、送り、および切込みを広範に変えているが、最大切取り厚さで整理すれば、臨界切削速度との関係は、片対数上でほぼ一本の直線に回歸できることがわかる。この結果から臨界切削速度、つまり初期欠損の発生は、最大切取り厚さにより決まることがわかる。したがって、この直線より下で切取り厚さと切削速度を設定すれば、初期欠損は抑制できる。

ところで臨界切削速度を V_c (m/min)、最大切取り厚さを h_m (mm) とすると、直線の回歸式は

$$V_c \cdot e^{B \cdot h_m} = C \quad (2)$$

と表せる。回歸式の切片 C と傾き B の物理的意味については明らかではないが、図6の黒セラミックの場合、 $B = 16.6$ 、 $C = 280$ である。

3.4 各種セラミック工具の耐初期欠損性評価

最大切取り厚さと臨界切削速度の関係は、工具の耐初期欠損性を示しているはずである。そこでこの関係を求めることにより、各種工具の耐初期欠損性の評価を試みた。

図7は各種のセラミック工具を主にサーメットおよびCBN工具を用い、送り、切込みを変えて、最大切取り厚さと臨界切削速度の関係を求めたものである。

CBN工具は臨界切削速度が高く、正常切削の範囲が最も広がっており、この結果からも、焼入鋼の切削に適していることがわかる。

WRC工具および窒化けい素工具は、CBN工具に次いで耐初期欠損性は優れている結果となっているが、この場合正常な逃げ面摩耗、すくい面摩耗が大きく、さらに切削を続けると、摩耗の増大によるとみられる欠損が、短時間のうちに発生する。

黒セラミックは、CBN、窒化けい素等よりも臨界切削速度が低く、正常切削の範囲は狭い。しかし図1に示したように、正常摩耗であれば長寿命を示すので、工具形状と切削条件を適切に選定して、初期欠損を抑制すれば、実用的に利用可能であると考えられる。

Fig.8 Relation between cutting speed and cutting force

Fig.9 Cutting force in various undeformed chip thickness

Fig.10 Cutting temperature in various undeformed chip thickness

Fig.11 Relation between cutting force and temperature in critical cutting speed

4. 検 討

4.1 焼入鋼の切削抵抗

高硬度材の切削における工具損傷は、図2 (b) のようにすくい面に、はく離状の欠損が発生する。これは、切削抵抗の背分力が大きいことが一因であるとの報告²⁾もある。しかし、図1から明らかとなっており、初期欠損は高速側で発生しやすい。

そこで焼入鋼の切削抵抗を測定した。切削速度と背分力の関係を図8に示す。焼入鋼の場合も、背分力は低速では大きい、高速になると急速に減少する。またコーナ半径が大きいほど、背分力は大きい、図4によると臨界切削速度は高速になり、欠損は発生しにくくなっている。

以上の結果から、初期欠損の発生は、単に切削抵抗の大小により決まるのではないことがわかる。

4.2 切取り厚さと切削温度・切削抵抗の関係

初期欠損は高速側で発生しやすいことから、背分力による機械的な圧壊よりも、熱的な原因（熱による工具の強度低下、熱ひずみなど）で発生するのではないかと考えられる。そこで切削温度を測定した。

初期欠損は最大切取り厚さと関係が強いことが判明しているので、切取り厚さが最大となるところの切削温度を測定する必要がある。

コーナ部による切削では切取り厚さが均一ではないので、二次元切削（半径方向切削、切削幅：1mm）により、切取り厚さと切削温度、切削抵抗の関係を検討した。切削温度の測定は工具－被削材熱電対法を用い、切削抵抗も同時に測定した。

切削抵抗は図9に示すように、高速になると減少す

Fig.12 Control of early fracture with coolant

るが、切削温度は図10に示すとおり、いずれの切取り厚さでも明らかに上昇している。

図11は欠損発生と切削温度、切削抵抗の関係を示したものである。すなわち二次元切削の送りを、コーナ切削の最大切取り厚さとして、式(2)からそれぞれの送りに対する臨界切削速度を求め、そのときの切削抵抗と切削温度を図9、10から求めたものである。図中の上側が欠損領域、下側が正常切削領域にあたる。初期欠損の発生は切削抵抗の大小よりも、切削温度の影響が大きいことが明らかである。

5. 切削剤による欠損の抑制

上記の検討から、初期欠損が発生するかどうかは熱的な影響が大きいことが判明した。したがって切削中の切れ刃の温度を下げれば初期欠損は抑制できるはずである。

そこで図6と同様の切削条件で、冷却剤(水溶性切削油剤:ケミカル40倍希釈)を、切りくず排出量の約1000倍である3ℓ/minとして、十分に供給して湿式切削を行い、臨界切削速度の変化を求めた。

乾式と湿式の比較を図12に示す。湿式切削にすると乾式切削に比較して、切取り厚さの厚い方で臨界切削速度が上昇している。したがって、冷却により初期欠損の発生が抑制されていることがわかる。

6. 結 論

セラミック系切削工具による、焼入鋼の連続切削を行い、切削初期(1min以内)に発生する欠損につい

て検討し、その発生条件を求めた。

得られた結果はつぎのとおりである。

- (1) 黒セラミックは、低速では安定した摩耗進行と長寿命を示すが、ある速度(臨界切削速度)以上では切削初期に突発的に欠損を発生する。
- (2) 臨界切削速度は送りが低いほど、コーナ半径が大きいほど、さらに切込みが小さいほど高い。
- (3) 臨界切削速度は切削断面の最大切取り厚さが薄いほど高く、ほぼ次のような関係がある。

$$V_c \cdot e^{B \cdot h_m} = C$$

- (4) 初期欠損の発生は、切削抵抗より切削熱の影響が大きい。
- (5) 最大切取り厚さと臨界切削速度の関係により、各種セラミック工具の耐初期欠損性の評価が可能である。
- (6) 水溶性切削油剤により、初期欠損の発生は抑制される。

おわりに本研究の被削材の熱処理に便宜を図っていただいた日本発条(株)と、工具を提供していただいた切削加工専門委員会の各社に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 大谷敏昭, 藤瀬健領, 横川 洪, 三井武良男: CBNおよびセラミック工具による焼入鋼の旋削, 精密機械, 49, 6(1983)804.
- 2) 木村忠彦, 木曾弘隆, 佐藤勝一: 焼入れ鋼の旋削における適用工具材種, 昭和59年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1984)703.
- 3) 浅井 毅, 中谷征司, 原 昭夫: 鋼切削用超硬工具の初期欠損に関する研究 (第1報), 精密機械, 44, 2 (1978) 147.
- 4) 浅井 毅, 中谷征司, 原 昭夫: 鋼切削用超硬工具の初期欠損に関する研究 (第2報), 精密機械, 44, 3 (1978) 299.
- 5) 浅井 毅, 中谷征司, 原 昭夫: 鋼切削用超硬工具の初期欠損に関する研究 (第3報), 精密機械, 44, 12 (1978) 1476.
- 6) 河端 裕, 藤村善雄, 中林伸一: サーメット工具の耐欠損性に関する研究 (第1報), 精密機械, 48, 3 (1982) 360.
- 7) 河端 裕, 藤村善雄, 中林伸一: サーメット工具の耐欠損性に関する研究 (第2報), 精密機械, 49, 4 (1983) 460.