研 究

工具内部冷却法による切削(第1報)*

—工具寿命と切削温度について—

岡 本 定 次** 土 井 雅 博**

On Cutting with Internally Cooled Cutting Tool (1st Report)

—Tool Life and Cutting Temperature—

Sadaji OKAMOTO, Masahiro DOI

Turning tests of high carbon steel (S50C) are undertaken with a cooled cutting tool in order to reduce the cutting temperature, and hence to improve the tool life. The tool is characterized by internally cooling with circulating liquid through a relatively simple refrigerator.

This paper presents the test results of turning in the cutting speed range of 20 to 250 m/min at -25° to -30°C with high speed steel tool (SKH4) and carbide tool (P10).

The main results obtained are as follows:

- (1) The tool wear can be reduced substantially by this cooling technique. Consequently, the tool life is increased as far as 1.2 to 2.6 times on flank wear and 1.2 to 3.8 times on crater wear as compared with those in the ordinary cutting.
- (2) The temperature on the tool-chip contact interface reduced about 20° to 80°C in the cooled cutting tool.

1. はじめに

切削時に発生する熱が工具刃先温度を上昇させ、工具の寿命に大きな影響をおよぼすことはよく知られている。このことについては工具材料の機械的強度と切削温度または工具・被削材間の拡散や溶着などと切削温度との関係といった観点から説明がなされている¹⁾。

従来、難削材に対する被削性改善の一方法として、低温切削法が行なわれている。この切削法の利点は被削材と工具との両面から被削性を向上させようことである。つまり低温ぜい性をもつ難削材に対して、普通零下数十度の液体またはガス状の冷媒を用いることによって被削材をぜい化させて切削抵抗および切削面あらさを減少させること、また冷却することによって切削中の刃先温度を低下させて工具寿命を延長させることができる。実験の結果として $+4^{\circ}\text{C}$ から -200°C 近傍までの冷媒を切削局部にかけ、または冷媒中で切削を行なうことによって好結果の得られたことがいくつかの研究機関から発表されている^{2)~10)}。低温切削においては発生した切削熱を長時間の切削においても冷却できる一定能力をもった冷却方法が必要である。しかし実際に行なわれている切削法の多くは冷媒を廃棄する形式の冷却方法であり、その

冷媒を得るための装置が大がかりとなり、冷媒のコストも高価で、なかには作業の安全性を欠く方法などもある。また比較的簡単と考えられる冷却法では冷却能力が十分でなかったり、低温ぜい性を示さない材料の切削などまだ問題となる点も少なくない。そのためにまだ実験段階にある切削法が多い。

そこで筆者らは、低温切削法における上記問題点のいくつかを解決して実際の切削加工に応用できる切削方法を考案した。すなわち、一般に使われているごく汎用の冷凍機によって 0°C ~ -40°C に冷却した冷媒を工具を含む閉回路に循環させて、切削中工具のみを連続して冷却することのできる工具内部冷却切削法によって工具寿命を延長させようとするものである。本報では、その冷却切削装置の概要と工具摩耗試験および切削温度測定試験

図 1 冷却切削装置

*原稿受付 昭和46年7月13日。昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和44年10月13日)にて発表。

**正 会 員 武蔵工業大学(東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

- 1 圧縮機
2 凝縮機
3 フィルタ
4 膨張弁
5 冷却槽
6 開閉弁
7 ポンプ
8 バイト
9 冷却液
10 フレオングス

図2 冷却液循環回路

図3 冷却切削用バイト例

の結果を報告する。

2. 冷却切削装置

冷却切削装置と冷却液の循環回路を図1および図2に示す。汎用の冷凍機(冷凍能力 359 kcal/hr, フレオン R-22 使用)によって冷却槽(容量 100 l)の中で不凍液(エチレングリコール水溶液)を冷却する。この冷却液をギヤポンプ(吐出量 7 l/min)により図3に示すようにあらかじめバイトシャンクにあけた穴を通して再び冷却槽にもどす閉回路循環方式とした。この方式によって切削中も一定温度の冷却液を連続して循環させることができ、冷却液の消耗はない。またバイトシャンクについては刃先のたわみ量を最大 0.02 mm 以下におさえるように断面形状および刃先突出量を考慮した。このシャンクを使って切削を行なった結果、通常の穴なしのシャンクに比べ刃先の振動、振幅などに関してはまったく問題

のないことを確かめたが、比較のために行なった室温における常温切削の場合にも同一形状のシャンクを使用した。工具は旋盤の刃物台上に断熱材を介してとりつけた。旋盤は大隈 LS 高速旋盤 (5.5 kW) を使用した。

3. 工具摩耗について

3.1 実験方法

前述の冷却切削装置で工具刃先を $-25^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ に冷却して切削試験を行ない、工具摩耗の進行状態を観察する。この場合、冷却槽の中で冷却液が $-35^{\circ}\text{C} \sim -38^{\circ}\text{C}$ になってから工具に循環しはじめ、およそ5分後には刃先すくい面上の温度は所定の冷却温度に達するので、その時点から切削をはじめた。一般に切削温度は切削速度の関数としてあらわされる。そこで本実験のような比較的軽度の冷却条件では、切削温度があまり高い場合には冷却の効果に限度があるものと考えられるので、それを確かめるために切削速度と冷却効果の関係をしらべた。切削速度を $20 \sim 250 \text{ m/min}$ に変化させた

が、低速域の切削には高速度鋼工具を、高速域の切削には超硬工具を用いた。切削条件を表1に示す。工具刃先は工具研削盤を用いて $\#300$ ダイヤモンド砥石で所定の形状に仕上げた。切削は機械構造用炭素鋼 (S50C) 丸棒被削材 ($150 \phi \times 500 \text{ mm}$) の外周三次元切削を行なった。以上の条件で冷却切削と常温切削を行ない、おのおのについて所定の切削時間ごとに工具すくい面およびけい面の摩耗を工具顕微鏡および触

表1 切削条件 (1)

	低 速 域	高 速 域
工 具 材 種	高速度鋼工具 SKH4	超硬合金工具 P10
切削速度 m/min	20, 30, 40	70, 100, 150, 200, 250
送り mm/rev	0.25	0.31
切込み mm	1.5	1.5
刃 先 形 状	0, 6, 6, 6, 8, 0, 0.5	-7, -7, 7, 7, 5, 0, 0.8
室 温 $^{\circ}\text{C}$	15~20	刃先冷却温度 $^{\circ}\text{C}$ $-25 \sim -30$

図4 工具摩耗形態（クレータ摩耗）

図5 工具摩耗進行状態（高速域フランク摩耗）

針式往上面検査機を用いて測定した。

3.2 摩耗形態および摩耗進行状態

工具摩耗形態の一例としてすくい面クレータ摩耗を図4に示す。いずれもクレータ摩耗深さが0.15 mm またはフランク摩耗幅が0.2 mm になったときのものである。顕微鏡観察により、冷却切削における摩耗形態は常温切削のそれに比べ特に異なった特徴はみられないが、低速域において、冷却切削の場合の構成刃先消滅臨界速度が常温切削のそれよりも高速側に移行しているために、同一切削速度（たとえば切削速度 $V=40$ m/min）においては冷却切削の場合、切れ刃後に沿ったすくい面上にできるランド状平坦部の幅が大きくなっている。つ

図6 工具摩耗進行状態（高速域クレータ摩耗）

図7 工具摩耗進行状態（低速域フランク摩耗）

図8 工具摩耗進行状態（低速域クレータ摩耗）

まり構成刃先がこの平坦部に安定して発生しているものと考えられる。図5～図8に各速度におけるフランク摩耗幅 V_B およびクレータ摩耗深さ K_T の進行状態を示す。すべての速度域において V_B および K_T の増加の割合は冷却切削の場合に小さくなっている。低速域の各速度においては構成刃先の発生が著しく、その一部がすくい面上に残り、機械的にこれを取り除いて測定を行なった。また高速域では、 $V=70$ および 100 m/min においてすくい面上に溶着物が残り、この場合にはとり除くことができなかったので K_T の測定は行っていない。摩耗進行割合については、たとえば $V_B=0.2$ mm になるには $V=100$ m/min において常温切削で切削時間 77 min、冷却切削で 96 min とその比は 1.3、 $V=30$ m/min では常温切削で 40 min、冷却切削で 72 min とその比は 1.8 となっている。

図 9 工具寿命線図 (高速域)

図 10 工具寿命線図 (低速域)

図 11 冷却効果率 (高速域)

図 12 冷却効果率 (低速域)

3.3 冷却効果

工具摩耗量によって工具寿命の判定を行なう場合には基準とする摩耗量の大きさを加工目的に応じて決める必要がある。本実験の結果より一例として $V_B = 0.2 \text{ mm}$, $K_T = 0.15 \text{ mm}$ を採用し寿命の比較を行なった。おのの基準量において得られた工具寿命線図を図 9, 図 10 に示す。いずれの場合にも冷却切削において寿命が増大していることがわかる。また切削速度による影響としては, 工具摩耗が定常的に進行している条件のもとでは切削速度が低い場合ほど寿命増加割合が大きくなっている。これに対し図 10 に示すように, 低速域で構成刃先

の発生する条件においては, フランク摩耗を基準とした場合に逆に $V = 40 \text{ m/min}$ の高速側でその割合が大きくなっている。ここで冷却切削を行なったことによる寿命増大の割合を定量的に明らかにするために, 常温切削における寿命時間 T_R と冷却切削における寿命時間 T_C との比 $K = T_C/T_R$ を冷却効果率として切削速度について比較すると図 11 および図 12 のようになる。フランク摩耗基準の場合には, 高速域で $K = 1.5 \sim 2.0$ となり, 切削速度の影響としては速度が大になるほどわずかに K の値は低下している。これに比べて低速域では切削速度が大になるほど K は大きくなっている。すなわち $V = 20 \text{ m/min}$ では $K = 1.2$ であるが, $V = 40 \text{ m/min}$ では $K = 2.6$ となっている。このことは前述したように常温切削においては $V = 40 \text{ m/min}$ 付近では既に構成刃先の発生のピークを過ぎてにげ面摩耗の促進ははじまっているのに対し, 冷却切削においてはこの速度ではまだ構成刃先の成長が著しく, これがにげ面をも覆っているために摩耗の進行が妨げられ K が大きくあら

われたものと思われる。これに対して $V = 20 \text{ m/min}$ では両者とも同程度の構成刃先に覆われて摩耗はそれほど進行せず冷却の効果はほとんどあらわれていない。クレータ摩耗基準の場合には, 低速域において構成刃先が発生していてもすくい面全体が覆われるわけではなくクレータ摩耗は生じており, 冷却の効果はあらわれている。いずれの速度域においても K は切削速度の影響を大きくうけ, 低速側で大きく高速側では 1 に近づいている。たとえば $V = 20 \text{ m/min}$ で $K = 3.8$ に対し $V = 40 \text{ m/min}$ では $K = 1.7$, また $V = 150 \text{ m/min}$ で $K = 2.0$ に対し $V = 250 \text{ m/min}$ では $K = 1.2$ となっている。このことから本

実験の切削条件では、冷却効果をあげるためには切削速度の低い場合ほど有効であることがわかる。

4. 切削温度と工具寿命の関係について

前節までに、切削中の工具刃先を冷却することによって、工具摩耗の観点から同一条件による常温切削に比べ工具寿命が増大することについて述べた。ここで工具摩耗にもっとも関係の深い因子として刃先温度と刃先の応力が考えられる。そこで本報では常温切削と冷却切削における刃先温度と工具寿命の関係を実験的に求め比較する。

4.1 実験方法

実験に用いた冷却切削装置は前節までのものと同一である。切削温度測定には以後の解析および実験の簡単のために低速域では高速度鋼（SKH 4）チップのメカニカルクランプバイトを用いた二次元切削方式とした。そのために切削温度との関係を求める工具摩耗試験も同一条件で行なった。被削材には炭素鋼鋼管（STKM 48）を用いた。高速域については工具摩耗試験と同一条件で、工具寿命には前節の結果を用いた。切削条件を表2に示す。切削温度測定には、工具-被削材熱電対法を採用した。P10-S50C（高速域）およびSKH 4-STKM 48（低速域）における熱起電力の校正回路および校正線図を図13、図14に示す。冷接点は室温であるのでこの校正線図より室温補正をして切削温度を求める。この方法による測定値は工具すくい面上の工具-切りくず接触面における平均温度であり、以後切削温度はこの温度を意味する。切削温度は切削開始後、低速域で約90秒、高速域で約6秒以上経過するとほぼ定常となり、その時の温度

表 3 寿命方程式

		常温 切削	冷却 切削
高速域	$V_B=0.20 \text{ mm}$	$VT^{0.309}=401$	$VT^{0.279}=426$
	$T_T=0.15 \text{ mm}$	$VT^{0.197}=295$	$VT^{0.162}=300$
低速域	$V_B=0.10 \text{ mm}$	$VT^{0.304}=77$	$VT^{0.231}=70$
	$V_B=0.15 \text{ mm}$	$VT^{0.259}=82$	$VT^{0.224}=77$

図 14 熱起電力校正線図

図 15 切削温度と切削速度の関係

表 2 切削条件 (2)

工具材種	工具形状 deg	切削速度 m/min	切削幅 mm	切込み送り mm/rev	冷却液温 °C	室温 °C
SKH 4	$\alpha=6, \beta=6$	27, 36, 50	2	0.04	30	16.5~18.5
P10	$-7, -7, 7, 7, 5, 0, 0.8$	100, 150, 200	1.5	0.25	//	//

図 13 熱起電力校正回路

を比較する。また熱起電力校正および切削中には、リード線と試験棒および超硬バイトとの間には起電力の発生ないように注意した。

4.2 実験結果

工具摩耗試験の結果から高速域 ($V_B=0.2 \text{ mm}$)、低速域 ($V_B=0.1, 0.15 \text{ mm}$) のおのおの場合の寿命方程式を求め表3に示す。つぎに切削温度と切削速度の関係を両対数目盛上にあらわすと図15に示すようになり、いずれの速度域においても常温切削および冷却切削ともに直線であらわすこと

図 16 切削温度と工具寿命の関係

ができる。いずれの場合にも常温切削の切削温度 θ_R が高く、冷却切削の切削温度 θ_C との差は $20^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 程度である。切削温度については工具摩耗試験の結果のように常温切削と冷却切削の差が切削速度についてなんらかの傾向を示すというようなことはこの段階では明らかに認められなかった。

4.3 工具寿命との関係

表 3 に示した工具寿命と切削速度の関係および図 15 に示した切削温度と切削速度の関係より、切削温度と工具寿命の関係を求め両対数グラフに示したものが図 16 である。両工具材種の場合とも常温切削と冷却切削とほぼ同一直線上にあらわされる。このことから工具寿命を支配する主要な因子は切削温度であることがわかる。また工具寿命と切削温度の間には $\theta T^n = C$ なる関係があることが知られており、使用した工具の温度特性によって定数 n と C の値が決まるものである。そこであらかじめ n と C の値が求められていれば、冷却切削および常温切削において初期の刃先温度を測定しその差を求めることによっておおよその寿命時間の差を推定することができる。また n の値から工具寿命は切削温度の $3 \sim 15$ 乗に逆比例しており、わずかの切削温度の差によっても工具寿命を大幅に増大させることができる。そのために工具冷却によって刃先温度を低下させることは工具寿命延長に対してきわめて有効な切削法であることがわかる。

5. むすび

低温切削法の一分野と考えられる工具冷却切削法の一

例として、一般に使われている冷凍機を用いて簡単な冷却切削装置を試作した。この装置では切削中連続して一定能力の冷凍液を安全にまた消耗することなく工具に循環させることができる。またこの装置によって作りうる比較的軽度の低温域 (-30°C 付近) において切削試験を行ないつぎのような結果をうることができた。

1. 常温切削と比較して工具内部冷却切削の場合には工具摩耗の形態にはそれほど相違はみとめられないが、摩耗の進行を抑制することができた。
2. 摩耗量を基準とする工具寿命が増大した。その増大の程度を冷却効果率 ($K = T_C/T_R$) であらわすと、フランク摩耗基準の場合には ($V_B = 0.2 \text{ mm}$) $K = 1.2 \sim 2.6$ 、クレータ摩耗基準の場合には ($K_T = 0.15 \text{ mm}$) $K = 1.2 \sim 2.8$ となる。また切削速度の低い、つまり切削温度の低い場合ほど K は大きくなる。
3. 切削温度はすべての切削速度において冷却切削の場合に低くなり、その差は $20^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ である。
4. 工具寿命と切削温度の関係を実験式として求めることができた。また工具内部冷却切削の場合にも常温切削と同一の寿命線図上にのることがわかった。この関係から工具寿命は切削温度の $3 \sim 15$ 乗に逆比例し、工具寿命に対して切削温度の影響が大きき、冷却切削における刃先温度の減少が工具寿命を延長させる有効な手段であることがわかる。

最後に本実験を進めるにあたり、種々ご援助賜った東芝タンガロイ株式会社またご指導戴きました安味助教教授および実験に協力された研究室低温切削班の卒業生諸君に感謝いたします。

参考文献

- 1) たとえば 竹山彦彦: 工具摩耗の温度依存性, 機械試験所報, **15**, 4 (1961).
- 2) E.W. Bartle: Machinery (E), **83**, 24 July (1953) 172.
- 3) Carbon Dioxide Co. Ltd: Developments in the CeDe Cut Technique, Machinery (E) **84**, 14, May (1954) 1034.
- 4) G. Pahlitzsch: Low Temperature Cooling, A Means of increasing Cutting Tool Life, Microtecnic, **9**, 2 (1955) 65.
- 5) R.J. Deraney: Sub-Zero Machining and Quenching, Machinery (A) July (1957) 148.
- 6) K.G. Chandramani: Refrigeration in Machining, Int. Jul. Prod. Res, July 14 (1961).
- 7) 益子正巳他: 低温切削に関する研究, 機械学会論文集, **24**, 138 (1958) 103.
- 8) 上原邦雄他: 冷却切削における工具の摩耗機構, 精密機械, **35**, 9 (1969).
- 9) 奥島啓武他: 工具冷却切削の研究, 精密機械, **34**, 2 (1968).
- 10) 奥島啓武他: 電子冷却切削加工について, 機械学会論文集, **33**, 247 (1967) 431.