

低温切削における超硬工具の損傷

藤 井 義 信*

摘要 本研究は超硬工具を用いて、STY 80 鋼(タイヤ鋼)に対する低温切削をおこなった結果について報告するものである。低温をうるためにCO₂ガスを、工具を通して切刃部まで噴射し、約-50°Cまで冷却した。結果として次のことが明らかとなった。

- (1) 焼鈍材切削試験においては実験の範囲では乾式切削の場合とCO₂による冷却の場合とでは寿命に明らかな相違はみとめられない。
- (2) 焼入材切削においてはCO₂冷却の効果があり工具寿命が改善された。
- (3) CO₂冷却の場合超硬工具S₂はセラミック工具がしばしばみせるような突発欠損を生じ、低温脆性を示す。

Failure Characteristics of Cemented Carbides in Low Temperatures

by Yoshinobu FUJII

This report deals in the sub-zero machining of the STY 80 steel with cemented carbide tools. In the tests CO₂ gas was applied for cooling the cutting edge and the gas was fed through the cutting tool. Then temperatures up to minus 50 deg. were obtained in this test. The results are as follows:

- (1) In machining the annealed steel, there has been no difference between the tool lives in dry cut and CO₂ cooling.
- (2) The effect of CO₂ gas cooling is displayed in the machining of the hardened steel, namely the tool life of the carbide tool was improved.
- (3) The cemented carbide tool might present the brittleness in low temperatures because the carbide tool broke down very frequently in the sub-zero machining.

1. 緒 言

最近是非常に切削加工技術が改善されて、従来非常に被削性が悪く削りにくい金属材料の加工もそれ程の困難なしにできるようになってきた。たとえば切削中に生成する熱量を冷却によって、しかも非常に低温にして金属材料の低温における脆性を利用して切りくずの排出を容易にし被削性を改善しようという試みがなされている。

本研究ではCO₂ガスを用いて、これを工具を通して切刃に噴出し、切削点における冷却をおこない超硬工具の寿命改善をすることを目的とする。

CO₂ガスを利用して冷却する切削法については既に益子・隈部⁽¹⁾によってなされているが、同氏らは工具の冷却というよりは被削材の冷却に主眼点をおき、それによる切削力の減少、仕上げ面あらかの向上を期待し、そして成功したものである。一方著者らは工具刃先そのものの冷却効果に重点をおき工具の損傷および寿命を詳細に検

討する。

2. 実験方法

2.1 被削材

被削材としてSTY 80タイヤ鋼を用い、その焼鈍材と焼入材について実験をおこなった。その化学成分を表1に示す。かたきは焼鈍材ではショアかたき29、全面焼入材では表面63~70、内部29、また局部焼入材では80が得られた。

表1 被削材の化学的成分と物理的性質

被削材	化学成分 %				引張強さ	ショア かたき	寸法
	C	Si	Mn	Cr			
車輪材 STY 80	.60 ~ .75	.15 ~ .35	.50 ~ .75	1.0	80~98 kg/mm ²	焼鈍材 29	59φ ×550
						全面 表面 63~70 局部 80 焼入材	

* 愛知工業大学機械工学科

また被削材は直径 59mm 、長さ 550mm の丸棒を用いた。

2.2 工具および工作機械

使用した超硬工具は S2, TX3 である。工具形状は横すくい角 $+6^\circ$ および -6° 、取付角 75° および 45° 、刃先半径 0.3mm とした。なお切削条件は送り $0.3\text{mm}/\text{rev}$ 、切込 0.5mm とした。

実験は丸棒の長手送り切削とし、昌運カズヌーブ旋盤を用いた。

2.3 CO_2 噴射実験

噴射実験に用いた工具およびノズルの形状を図1に示す。実験ではノズル口径および内径・長さなど種々に条件を変えて、刃先の温度を熱電対を用いて測定した。たとえばノズル口径 0.2mm 、ジェット口径 2mm 、長さ 135mm の場合には図2のようになり、刃先は 2min 後には定常温度に達し -39°C となる。またシャンク内部は刃先より約 10°C さらに低い温度になる。上の条件では $-47\sim-56^\circ\text{C}$ を得た。もちろん実験条件により定常温度は図2(a), (b)のように変動する。

また CO_2 ガスは凍結しやすい性質をもっているから、ガス通路がつまり内部の圧力はかなり上昇する。図2の条件では表2に示すように最大 $35\text{kg}/\text{cm}^2$ にも達する。もちろん噴射が円滑におこなわれる場合には圧力の上昇はない。また表2からわかるように凍結をおこす場合でも一たんつまったらそのままという訳ではなく、周期的な噴射をおこすことになる。

噴射条件について多くの実験をおこなった結果次のことが明らかとなった。

(1) ノズル長さの決定 ノズル長さは 90mm 、および 110mm にとって実験し CO_2 ガスの凍結状態を観察した。 90mm の場合には刃先からシャンクの $1/3$ 付近から凍結し始め、そのため刃先とシャンク内部の温度差が大きく、最も冷却される場所は切刃ではないよう考えられる。これに対し 110mm の場合には刃先が早期に凍結し、それから周辺が凍結してゆく傾向がみられる。それ故 110mm の方が冷却効果が良い。

(2) ノズル口径の決定 $0.2\text{mm}\phi$ の場合には噴射は断続的になる。これはシャンク内部で凍結していることを示し、結果として温度の変動が顕著である。 $0.3, 0.4\text{mm}\phi$ ではそれ程温度に差がない。しかも凍結も少なく、シャンク内部の圧力は $1\text{kg}/\text{cm}^2$ をこえない。このノズル口径が大になれば CO_2 ガスの消費量が増加する。すなわち $0.2\text{mm}\phi$ では $133\text{g}/\text{min}$ 、 $0.3\text{mm}\phi$ では $200\text{g}/\text{min}$ および $0.4\text{mm}\phi$ では $260\text{g}/\text{min}$ となる。それ故ノズル口径を不必要に大にすることは好ましくない。実験では $0.33\text{mm}\phi$ が最良である。

(3) ジェット口径の決定 ノズル口径 0.3mm 、ジェ

ット口径 4mm の場合最低温度 -65°C を得たのでこの条件を採用した。すなわち $2\text{mm}\phi$ では -37°C 、 $3\text{mm}\phi$ では -52°C 、 $5\text{mm}\phi$ では -54°C であった。また CO_2 ガス消費量は $2\text{mm}\phi$ で $252\text{g}/\text{min}$ 、 $3\text{mm}\phi$ で $220\text{g}/\text{min}$ 、 $4\text{mm}\phi$ で $240\text{g}/\text{min}$ 、 $5\text{mm}\phi$ で $180\text{g}/\text{min}$ となり、凍結状態の関係もあって変化は不規則である。また前項の

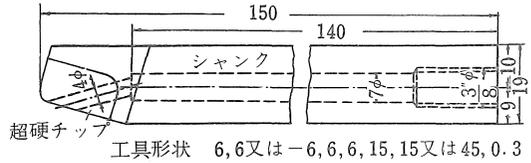


図1 実験に使用した工具の形状

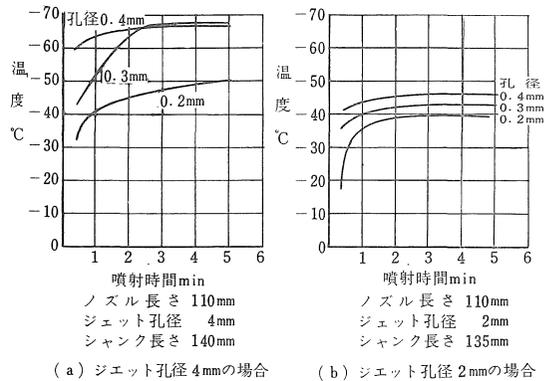


図2 各種実験条件における切刃先端の温度

表2 シャンク内圧の変化

時間 min	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
シ 内 ヤ ン ク 内 圧 kg/cm^2	口径 0.2mm	0	0	0	0	0	—	—	—	—
	0.3mm	1	1.2	2.0	3.5	1	2	0.5	0.5	0.5
	0.4mm	9	8	9	8	7	7	9	8	8

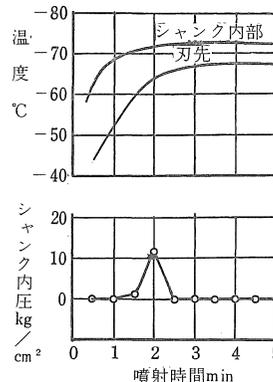


図3 標準噴射条件における温度とシャンク内圧

場合よりも直径変化による差は少ない。

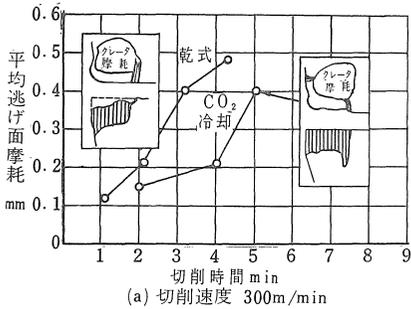
(4) シャンク長さの決定 シャンク長さは全般的に長い方が良く、実験では市販されているシャンク寸法における最大値140mmにおいて最も冷却効果が良かった。

以上の結果から標準使用条件はノズル長さ 110mm、ノズル口径 0.3mm、ジェット孔径 4mm、シャンク長さ 140mmとする。この条件におけるシャンク内部温度、刃先温度およびシャンク内圧の変化を図3に示す。

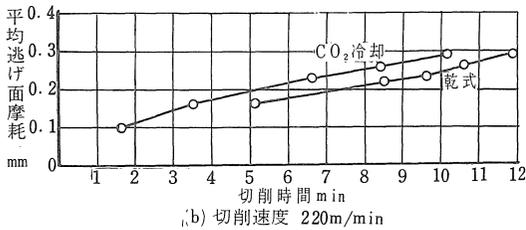
3. 損傷および工具寿命

3.1 焼鈍材の場合

図4に切削速度(a)220m/min、(b)300m/minについて切削時間による平均摩耗幅の変化を示す。この図から低速ではCO₂冷却の効果は少なく高速になると効果が著るしく摩耗が減少する。



(a) 切削速度 300m/min



(b) 切削速度 220m/min

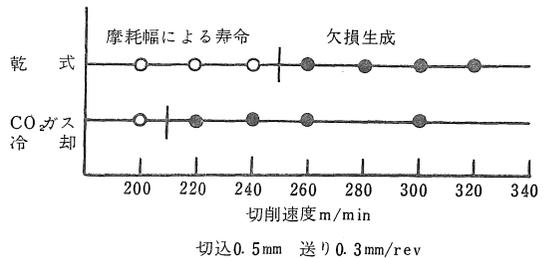
図4 焼鈍材の切削における摩耗

また図のように損傷形態は長方形チップングにノーズ部および境界部の異常チップングが加わった形であり、乾式の場合とCO₂冷却の場合を比較してみると前者の場合はノーズ部摩耗、後者の場合は境界部の異常チップングが著るしい。この境界摩耗は被削材が低温のため表面が硬くなっていること、また一方工具切りくず接触面が高温であるのにその周辺がCO₂ガスにより冷却され熱落差が大きいことによる熱応力が働いていることが原因であろう。

一方すくい面においてはCO₂ガスによる冷却によってもクレータはかなり顕著である。これは高温による溶着がある程度防げても圧着を防げないためであろう。

また乾式切削では限界逃げ面摩耗を0.30mmにとられるが、CO₂冷却切削では更にその限界が下り0.26mmと

なったので本実験は0.26mmをもって比較する。CO₂冷却においてはしばしば切削中に欠損が生ずる。これは摩耗の増大による欠損と考えるよりもセラミック工具に生成するような工具の脆性にもとづく大きな欠損である。これには一つには工具内部が-50°C位であり一方工具表面が切削温度(約700~800°C)であるのでその熱勾配による熱応力発生が影響している。すなわち熱応力は $\sigma = E\alpha\Delta t / (1-\nu)$ (ここにE=縦弾性係数、 α =熱膨脹率、 Δt =温度差、 ν =ポアソン比)で表わされ、他の条件が同一ならば切削速度が大になるほど切削温度が大となり Δt が大となるため、欠損を生じやすい。図5は乾式

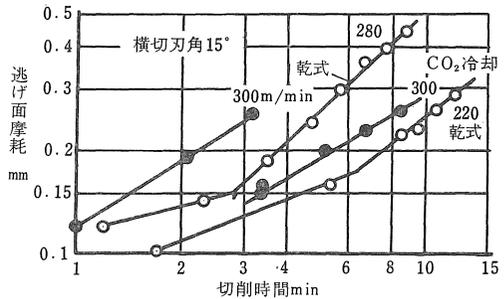


切込0.5mm 送り0.3mm/rev

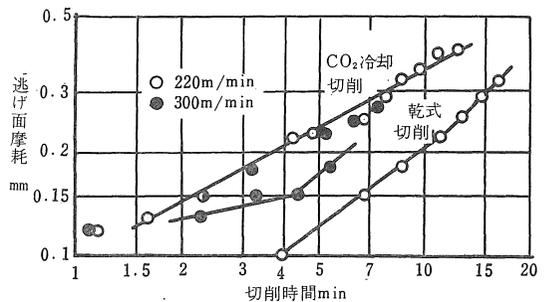
図5 工具欠損による寿命の限界速度

切削とCO₂冷却切削における工具寿命が欠損によって定まる場合の限界速度を示す。やはりCO₂冷却切削の場合の方が限界速度が低い。

また図6は逃げ面摩耗の進行を示すものである。図に



(a) 横切刃角15°



(b) 横切刃角45°

図6 工具摩耗の変化

において乾式切削では第1期摩耗と第2期摩耗とに分割できるが、 CO_2 冷却による場合は両者の分割が困難で大体一本の線上にある。特に取付角が 45° の場合には切削速度 $220m/min$ と $300m/min$ とでは差がほとんどないという結果をえた。これらの結果から CO_2 冷却により超硬工具は熱的な摩耗進行をおさえることができることが明らかである。

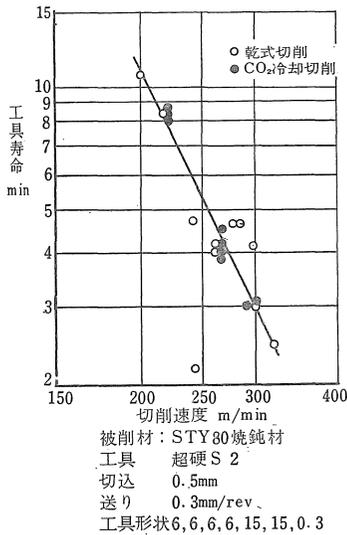


図7 焼鈍材切削における寿命線図

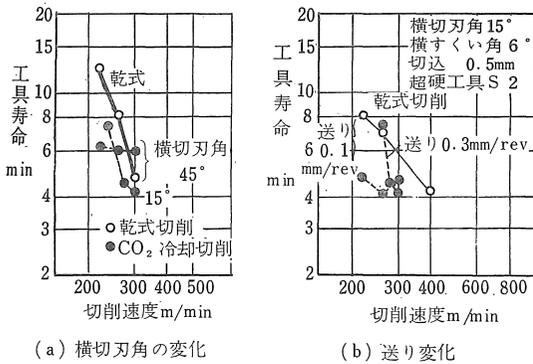


図8 各種切削条件における工具寿命の比較

図7は切込 $0.5mm$ 、送り $0.3mm/rev$ 、工具形状(0, 6, 6, 6, 15, 15, 0.3)の場合の工具寿命線図である。実験ではほとんど乾式の場合と CO_2 冷却の場合とは差がないように考えられる。またその他の条件では図8のように多少寿命は低いが、条件によっては CO_2 冷却の方が高い場合もある。

上述の CO_2 冷却はシャンク内部よりの場合であるが、外部より冷却した場合には図9のように速度 $265m/min$ の場合に差がある以外大体同程度の寿命を示している。

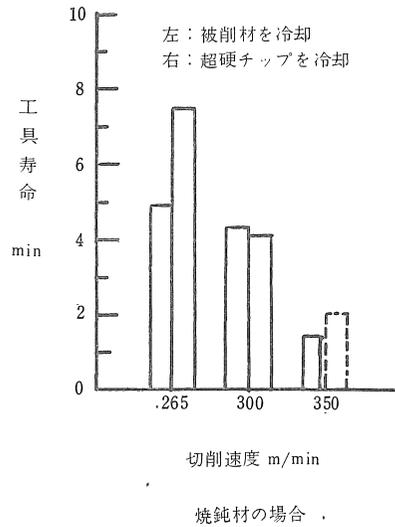


図9 CO_2 冷却における噴射方法と工具寿命との関係

3.2 焼入材の場合

全面焼入材を切削した場合には図10のように、横すくい角 $+6^\circ$ では(a)図のように CO_2 冷却により寿命はかなり改善される。しかも(b)図のようにすくい角を負にすれば、さらに工具寿命をのばすことができる。また超

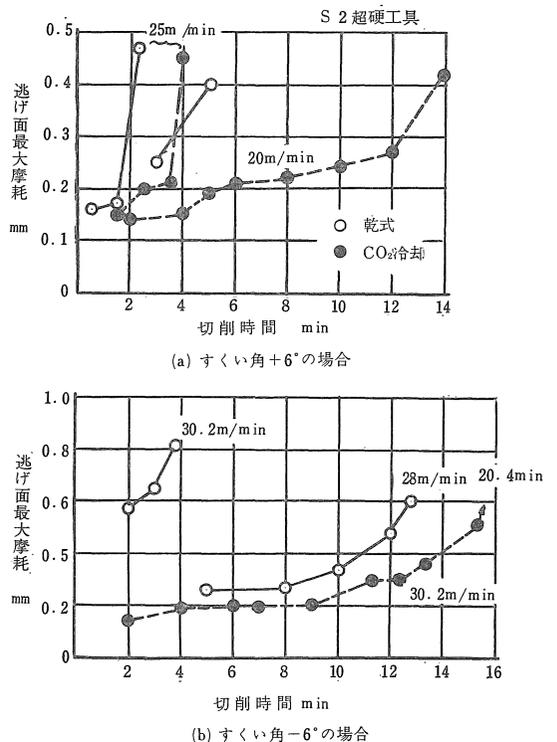


図10 焼入材切削の場合の摩耗曲線

硬材種については図11のように $+6^\circ$ の場合には S_2 、 -6° の場合には $TX3$ がそれぞれ良い結果をうる。また外部より CO_2 を噴射して切りくずを冷却した場合にも $TX3$ の場合が良い。超硬 S_2 種と $TX3$ 種では抗折力は $TX3$ の方が高く靱性があるので、高い熱応力に耐えうるためと考えられる。

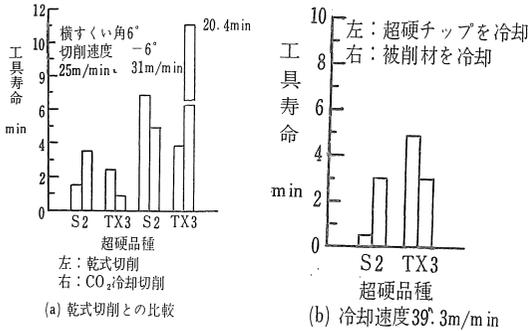


図11 超硬品種と工具寿命との関係 (b)冷却方法の比較

工具寿命は図12, 13に示すように CO_2 冷却により寿命が改善される。その寿命を比較してすくい角 $+6^\circ$ では S_2 超硬の場合、(CO_2 冷却による寿命/乾式切削寿命) = n は $n=1.05\sim 2.66$ 、 $TX3$ においては $0.24\sim 0.55$ 、 -6° では S_2 は $1.65\sim 2.45$ 、 $TX3$ は $4.4\sim 7.35$ となり CO_2

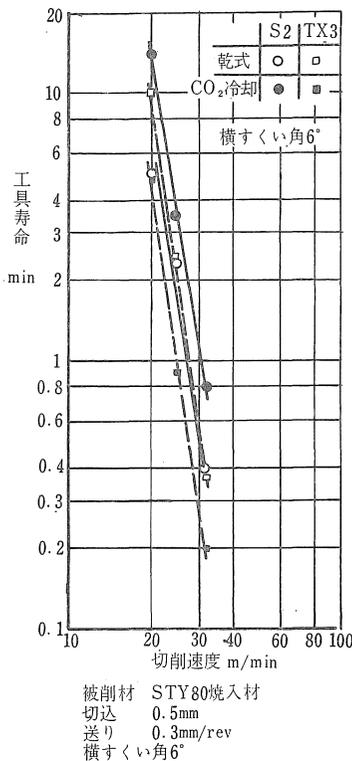


図12 正すくい角の場合の工具寿命線図

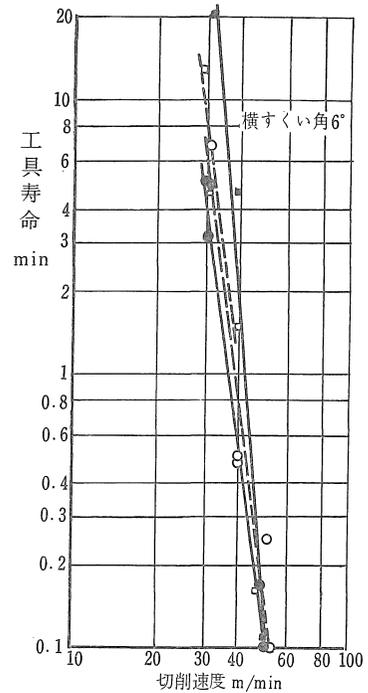


図13 負すくい角の場合の工具寿命線図

冷却による切削が焼入材の加工に非常に効果を発揮する。図14は切削速度による n の変化を示す。

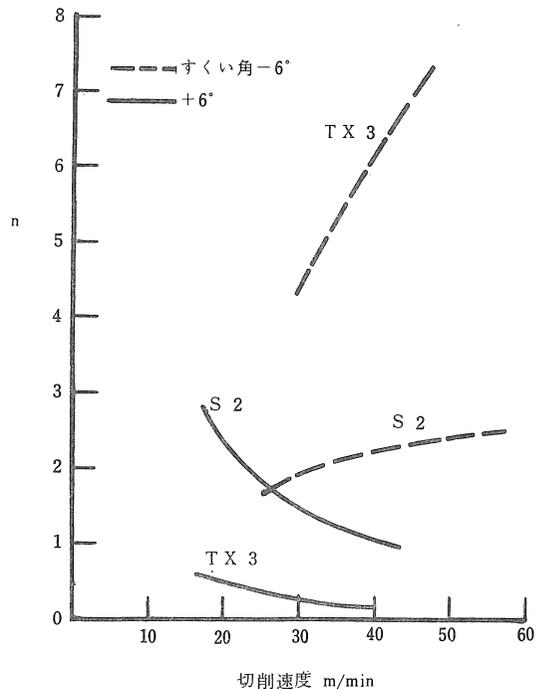


図14 工具寿命倍率の比較

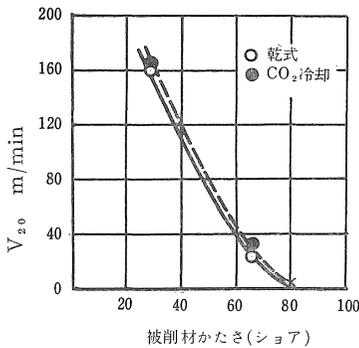


図15 被削材かたさと20分寿命切削速度の関係

局部焼入材に対しては非常にかたいため、乾式切削においても、 CO_2 冷却切削においても、また負のすくい角をもちいても切込みと同時に刃先は瞬間的に破損して切削を継続しえなかった。

以上3種の被削材について20分工具寿命切削速度 m/min と被削材かたさを比較すると図15のようになり、かたさが小なるほど V_{20} は大となるが CO_2 冷却の効果はかたい材料に対して効果がある。

4. 結 言

(1) 市販の超硬ろう付け工具を用いる場合には本実験における CO_2 冷却方法ではシャンク長さ $140mm$ 、ノズル長さ $110mm$ 、ノズル口径 $0.3mm$ 、ジェット孔径 $4mm$ が最適条件である。この条件においては切削を行なわない場合は刃先は最低 $-67^\circ C$ まで冷却できる。

(2) $STY80$ 焼鈍材を加工する場合には超硬工具 S_2

の工具寿命は乾式切削と CO_2 冷却切削とはほとんど差はみられない。しかし CO_2 冷却の場合には突発的な欠損を生じ、これが寿命を決定することが多い。またこの欠損は CO_2 冷却切削の場合の方が乾式の場合よりも低い切削速度で発生する。これは熱応力が超硬工具の破断応力を越えることが発生の原因の一つと考えられる。

(3) 全面焼入材に対しては CO_2 冷却切削は非常に効果を発揮し、工具寿命は乾式切削の場合に比較して最大7倍にも増加する。特に正横すくい角を用いた場合よりも負すくい角の場合の方が工具寿命が長い。また超硬工具の材種については韌性の良い $TX3$ の方が良好な切削性能を示した。

(4) 局部焼入材に対しては表面がかたすぎるため欠損が早期におこり乾式切削でも CO_2 冷却切削でも切削できない。それ故局部焼入材には CO_2 冷却は適用できない。

以上三種の被削材に対しては工具寿命は最もかたさの低い焼鈍材に対して最も高く、かたい被削材に対するほど工具寿命は低くなる。

(5) 実験の結果からシャンク内部より CO_2 ガスを噴射して冷却する方法は切りくずあるいは被削材を冷却する方法に比較して工具寿命の増加が大である。

おわりに本実験に対し多大の御援助を賜った国有鉄道浜松工場の諸氏に深じんの謝意を表す。

文 献

- (1) 益子・隈部, 機械学会講演会前刷 (昭和30年)