

工具の横すくい角が被削性におよぼす影響について

豊島 敏雄*・湊 喜代士*

The Influence of the Side Rake Angle on the Machinability

Toshio TESHIMA, Kiyoshi MINATO

(Received Apr. 15, 1971)

Usually we know that in the cutting operation the side rake of the tool is the important angle which controls the sharpness of the tool, and it influences the cutting force, the built up edge, the crater and the shapes of the chips.

So the authors have researched the relationship between the side rake of the tool and the cutting force for the free machining steel and the carbon steel, and investigated the possibility that the machinability could be judged by cutting ratio besides above mentioned usual four heads.

1 緒 言

被削性という言葉は種々な意味に用いられており確然たる定義はない。しかし要するに工作物材料を切削するときの難易の程度、いかえれば被削材料の削られやすさである。機械部品のほとんどが何らかの形で切削加工をうけている現状においては、被削性は一般の金属材料にとって重要な問題である。

さて、被削性は一般的に

- (1) 切削抵抗の大小
- (2) 切削仕上げ面あらさの良否
- (3) 切削工具寿命の長短
- (4) 切くず処理の難易

の4項目によってその良否の判定規準としている。

本実験研究ではその被削性を改善する手段として、工具形状、とくに横すくい角を変えることによって、いかに切削抵抗、切削仕上げ面あらさ、せん断角、摩擦係数などが影響をうけるものかを探究する。工具として超硬合金工具と高速度鋼工具を用い、被削材として普通炭素鋼とこれに見合う被削性のすぐれた材料すなわち鉛快削鋼を用いて、上記の事項の間の関連性が被削性にどのように影響するかについて見究める。あわせて、被削性判定の基準として上記の4項目以外に

“切くず生成から見た被削性”で判定しうるか否かについて検討しようとするものである。

2 実験装置および方法

2・1 使用機械

- i) 昌運工作所HB—500型高速旋盤
ベットの振り 500mm
中心間距離 1,000mm
主軸回転数 40~3,200rpmの18段変速
- ii) 切削動力計 昌運工作所KSA—500型
- iii) 動歪測定器 新興通信 DS6—RX型
- iv) ペン書きレコーダ 渡辺測器WTR211—3C型
- v) 万能表面形状測定機 小坂研究所 SE—3型

2・2 被削材

普通炭素鋼S15C, S33C

鉛快削鋼S20CF, S35CF

の4種類を用いる。それぞれの熱処理の方法、化学成分および硬度を表1に示す。

* 機械工学科

表 1

被削材	熱 処 理	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Pb	ビッカース 硬 度
S15C	900°C×2H空冷 焼ならし	0.16	0.22	0.45	0.016	0.018	0.14	0.06	0.17	—	151
S33C	870°C×2H空冷 焼ならし	0.36	0.26	0.65	0.016	0.016	0.16	0.07	0.13	—	193
S20CF	900°C×2H空冷 焼ならし	0.19	0.27	0.49	0.009	0.014	0.10	0.07	0.11	0.15	140
S35CF	850°C×2H空冷 焼ならし	0.35	0.27	0.71	0.022	0.022	0.14	0.06	0.12	0.19	243

化学成分 重量%

2・3 使用工具

i) 工具材種として次の2種類

超硬合金工具 P40 (東芝タンガロイトX40)

高速度鋼工具 SKH-4

ii) 工具型式および形状

JIS31-3型

0°, α, 6°, 6°, 15°, 15°, 0.5mm

横すくい角 α = -5°, 6°, 13°, 20°の4種類

2・4 切削条件

切込み量 2.0mm } 一定
送り量 0.2mm/rev }
切削速度 5m/min~200m/minで変化させる。

切削油剤は高速度鋼工具使用のときのみ
スピンドル油60# (1.2ℓ/min)を使用する。(超硬合金工具使用のときは乾切削)

3 せん断角, 切削抵抗および摩擦係数の基礎的關係

いま図1のごとき二次元切削の流れ型の場合について考える。切削中せん断ひずみをおこすせん断面ABが切削方向となすせん断角をφ, 工具のすくい角をαとするとき,

切り取り厚さと切くずの厚さの比, すなわち切削比 r_c は r_c = t₀/t(1)

図において幾何学的關係から

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= AB \sin \phi \\ t &= AB \cos(\phi - \alpha) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

よって

$$r_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \dots\dots\dots(3)$$

この式を変形すると

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \dots\dots\dots(4)$$

この式において切くず厚さを測定すれば, せん断角φを計算で求めることができる。

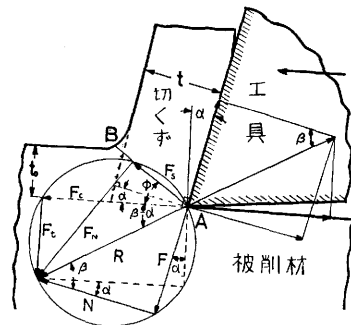


図1 二次元切削における各分力の関係

切削にあたっては工具のすくい面には垂直力Nと摩擦力Fとが作用し, この合力Rが切削抵抗として作用する。

一方せん断面にもこれと同じ大きさの反力が働く。これを図1のようにせん断面への垂直力F_Nと切線力F_s, または切削方向の力F_c(主分力)とそれに垂直な力F_t(背分力)とにわけて考えると, これらの間には次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} F_s &= F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \\ F_N &= F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

あるいは逆に

$$\left. \begin{aligned} F_c &= F_N \sin \phi + F_s \cos \phi \\ F_t &= F_N \cos \phi - F_s \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \\ N &= F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

工具のすくい面上の摩擦係数をμ, 摩擦角をβとすると

$$\mu = \tan \beta = \frac{F}{N} = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \dots\dots\dots(8)$$

切削面種をA₀, せん断面の面積をA_s, 切削部の中をbとすれば

$$\left. \begin{aligned} A_o &= t_o b \\ A_s &= \frac{A_o}{\sin \phi} = \frac{t_o b}{\sin \phi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

であるから上式の諸式を用いてせん断面に働くせん断応力 τ_s から切削抵抗を求める式が導かれる。

まず式(6)および式(8)から

$$F_N = F_s \tan(\phi + \beta - \alpha) \dots\dots\dots(10)$$

したがって式(6)から

$$\begin{aligned} F_c &= F_s \cos \phi + F_s \sin \phi \tan(\phi + \beta - \alpha) \\ &= F_s \frac{\cos \phi \cos(\phi + \beta - \alpha) + \sin \phi \sin(\phi + \beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ &= F_s \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ &= \frac{\tau_s t_o b}{\sin \phi} \cdot \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

同様にして

$$F_t = \frac{\tau_s t_o b}{\sin \phi} \cdot \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \dots\dots\dots(12)$$

切削中のせん断面に働く応力は工作物材料の降伏応力（塑性変形を起こしはじめるせん断応力）に達しているものと考えられるから、せん断角 ϕ および摩擦角 β を知れば材料の降伏応力を用いて切削抵抗を上式によって理論的にも求められる。

4 実験結果および考察

4・1 横すくい角が切削抵抗におよぼす影響

図2において、横すくい角の大小の如何にかかわらず切削速度が増すにつれて、先ず最初、低速度域において切削抵抗が極小値を示す。ついで極大値に達し、それ以降切削速度の増加とともに切削抵抗は漸減する。低速度域において切削抵抗の極小値を示す切削速度はいずれのすくい角の場合も、ちょうど構成刃先が最も顕著に最大にあらわれるところであり、これは図3に示すように構成刃先が発生したために実際の工具のすくい角が工具そのものの元のすくい角よりも増大したために切削抵抗がこのように減少し極小値となるものと考えられる。（なおこのことはせん断角の項でも述べる。）その後、切削速度を増していくと構成刃先は漸次縮少消滅の方向をたどり完全に構成刃先がなくなった切削速度においてその切削抵抗は極大に達する。以後なお切削速度が増加すると、工具と被削材料および切くずとの間に発生する切削熱が上昇することによって被削材料が軟化する、そのために切削抵抗は漸減していくものとする。

切削抵抗が極小から極大へ増加する変動量は主分力の方よりも送り分力（2次元切削の場合の背分力に相当する）の方がはるかに大きい。これは構成刃先が発

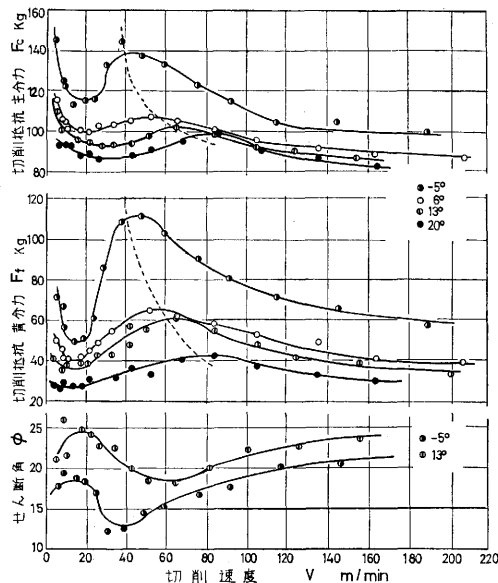


図2 横すくい角に対する切削速度と切削抵抗およびせん断角の関係

被削材；S33C
 工具；P40
 切込み；2.0mm
 送り；0.2mm/rev.

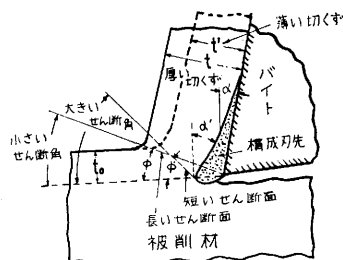


図3 構成刃先の発生による切削機構上の諸変化

生し、実際のすくい角が増大したことによる切削力への影響を主分力の方よりも送り分力の方が大きくうけることに起因する。このことは図1、図3からも容易に理解される。

また同じようなことがすくい角についてもいえる。すくい角が小さいほど極小値、極大値の起伏の状態が大きい、すなわち切削抵抗の変化量が大き、逆にすくい角が大きいほどその変化量は少ない。これは、一般に構成刃先の実際のすくい角は30°~40°くらいであるから、工具のすくい角がこの角度に近いほど構成刃先によるすくい角の変化が少なくなるためと考えられる。

切削抵抗の極小値を示す切削速度はすくい角の如何

に関係なく大略 20m/min 近傍であるのに対し、極大値を示す切削速度は工具のすくい角の大きいものほど高速度側に移行していることが認められる。このことはすくい角が大きいほど構成刃先の消滅する切削速度が高くなるからであるといえる。このことは同じ切削速度ならすくい角が大なるほど工具刃先の切削温度が低いことから理解できる。切削抵抗は切削温度と密接な関係にあることも知り得る。

4・2 横すくい角とせん断角の関係

普通鋼、快削鋼ともに横すくい角 α が大きくなれば、せん断角 ϕ も大きくなる。図4はこれを示す。こ

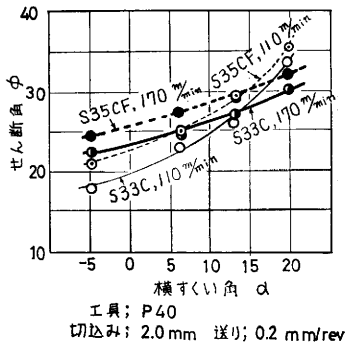


図4 横すくい角とせん断角との関係

のことは図1、図3からも容易に理解できる。すくい角が増大するにつれてせん断角も増していくが、切削速度の大きい方がその増加の割合はゆるやかである。すなわち増加率は小さい。このことから高速になるにつれてせん断角はあまり工具すくい角に影響されることが少なくなっていることを知りうる。これはあたかも前述の図2の切削速度一切削抵抗の関係において高速になるにしたがい工具の各すくい角に対する切削抵抗値が近い値に接近する傾向にあるのと重要な関連性をもっている。

快削鋼は普通鋼に比して（普通炭素鋼S33Cと鉛快削鋼S35CFとは表1にみるように炭素含有量および硬さHvは大体同じである）せん断角が大きい。鉛快削鋼の方が切くず厚が薄く、普通炭素鋼よりも順調な切削状態にあるといえる。すなわち被削性がよいといえる。快削鋼である所以はこのことから知ることができる。

工具材種や被削材種にかかわらず、せん断角と切削速度の間には、一般的に切削速度の増大につれて先ず極大値、ついで極小値を示し以後漸増していることが図2において認められる。これは横すくい角と切削抵抗の項で述べたように構成刃先によるものと考えられ

る。すなわち構成刃先の大きく発達したところでは α 角が大きくなることよりせん断角も大きくなり、さらに切削速度が増して構成刃先が小さくなるにつれてせん断角も減少するものと考えられる。

図5において切削抵抗、せん断角の推移の状態はほぼ対称形を呈している。すなわち切削抵抗の小さいと

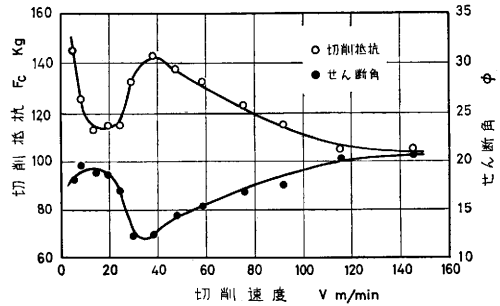


図5 切削速度に対する切削抵抗とせん断角の関係
被削材；S33C、工具；P40
すくい角 $\alpha = -5^\circ$ 、切込み；2.0mm、送り；0.2mm/rev.

ころではせん断角は大きく、切削抵抗の大きいところではせん断角は小さい。切くず厚さが最大になる切削速度で切削抵抗は最大値を示す。これは切り取り厚さ（切込み）が一定としてせん断角の小さいときにはせん断面積大となり、せん断抵抗が大きくなるためである。

図6においては、切くず厚さの精密な測定が容易でないために多少のばらつきがみられるが、先述の傾向をつかむことができる。すなわち切削抵抗Fが増大す

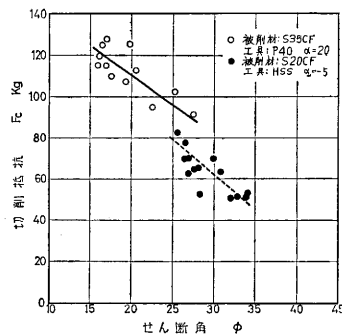


図6 せん断角と切削抵抗との関係
切込み；2.0mm
送り；0.2mm/rev.

ればせん断角 ϕ は減少し、切削抵抗が減少すればせん断角は増大するといえよう。またせん断角 ϕ が増せば切くず厚さ t は小さくなり、逆にせん断角が減少すれば切くず厚さは大きくなる。それゆえに切削抵抗Fと

切くず厚さ t は大略比例関係にあるといえる。よって、切くず厚さを比較することにより、切削抵抗の大小、すなわち被削性の良否の目安を立てることができよう。このことから“切くずの生成の状態”からも被削性を知り得る。ここでいう“切くず生成の状態”を数量的に示すのに切削比 r_0 とせん断角 ϕ を使用する。

4・3 切削抵抗ならびにせん断角からみた普通炭素鋼と鉛快削鋼の比較

鉛快削鋼は普通炭素鋼に較べて切削抵抗小さく、その程度は10~35%減である。図7に示すように、とくに構成刃先が消滅すると考えられる速度域（切削抵抗が極大値を示す近傍）ではその差は大きい。

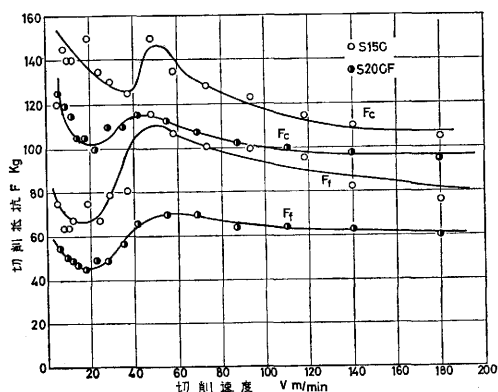


図7 普通炭素鋼と鉛快削鋼との切削抵抗の比較
 工具; P40 すくい角 $\alpha = -5^\circ$
 切込み; 2.0mm 送り; 0.2mm/rev.

次に、せん断角については前述したごとく、また図8でも知りうるように鉛快削鋼の方が大きい。すなわち順調な切削状態にあるといえる。

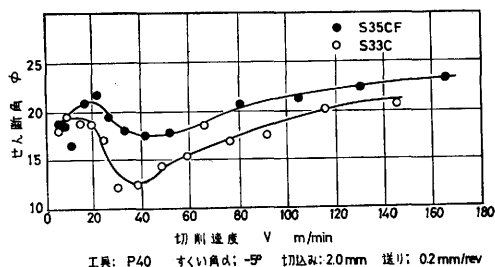


図8 普通炭素鋼と鉛快削鋼とのせん断角の比較

4・4 炭素量の異なる炭素鋼の切削抵抗について

普通炭素鋼 S15C および S33C の硬度は、それぞれ Hv 151, Hv 193 である。この程度の硬度の差違では切削抵抗からみた被削性は図9でわかるように変らな

い。この図9において、切削抵抗の極小値、極大値のあらわれる切削速度は S15C より硬い S33C の方が低速側である。これは硬い方の被削材を切削する場合、硬さの低い被削材に較べて切削速度が同じ時切削温度はより高くなり、構成刃先の発生、消滅が低速において起るためと考えられる。

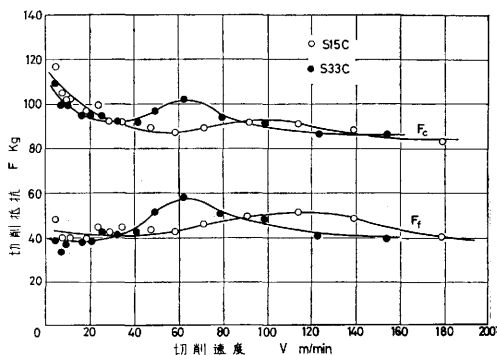


図9 炭素含有量の異なる普通炭素鋼の切削抵抗の比較

工具; P40 すくい角 $\alpha = 13^\circ$
 切込み; 2.0mm 送り; 0.2mm/rev.

4・5 工具材種による切削抵抗、抵抗の変動量および切削面あらさ

一般に高速度鋼工具では湿式切削が、超硬合金工具

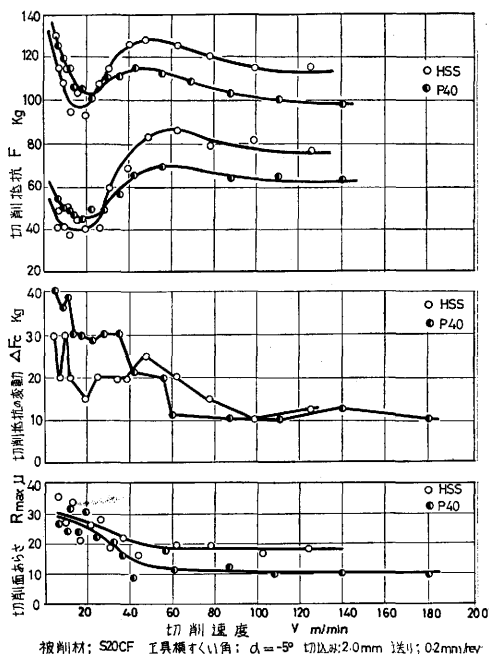


図10 高速度鋼工具と超硬合金工具との切削抵抗、切削抵抗の変動量および切削面あらさの比較

では乾式切削が行なわれるので、その条件で実験した結果について述べる。

図10において高速度鋼工具の方が切削抵抗の極小値と極大値との差が大きい。これは高速度鋼工具の方が被削材との親和力がより強く、構成刃先がしやすいためと考えられる。それ故に構成刃先の最も成長する。すなわち切削抵抗の極小値の切削速度 20m/min 付近では高速度鋼工具の方が切削抵抗は小さく、構成刃先が消滅する切削速度およびそれ以上になると高速度鋼工具の方が親和性のため、かえって抵抗が大となる。

切削抵抗の変動量 ΔF_c は超合金工具の場合に低速部で高速度鋼工具に比して大きく、これが切削面あらさに大きく影響して悪くなる。高速度鋼工具の低速域における切削面あらさが悪いのは構成刃先が大きく発生するためと考える。

上述よりして、高速域（大略 60m/min 以上）では超合金工具で切削作業を行なう方が切削抵抗の点からも切削面あらさの点からも被削性が良い。一方低速域（40m/min 以下）では高速度鋼工具で切削作業を行なう方が、切削面あらさでは超合金工具で切削する時とほぼ同程度であるから、切削抵抗が小さいだけに有利であるといえる。

4・6 “かえり”の現象について

高速度鋼工具を使用して炭素鋼 S33C を切削すると、工具横すくい角 $\alpha = -5^\circ$ のときには、20m/min 近傍以下の低速では、順調に切削できるが、 $V = 30$ m/min 近傍になると急に“かえり”の現象があらわれ、図11に示すように切削抵抗が増大する。 $V = 55$ m/min 近傍以上になるとこの現象はなくなり、それ以後切削抵抗は急激に減少する。工具横すくい角 $\alpha = 6^\circ, 13^\circ, 20^\circ$ の場合にはこのような現象は起らず順調

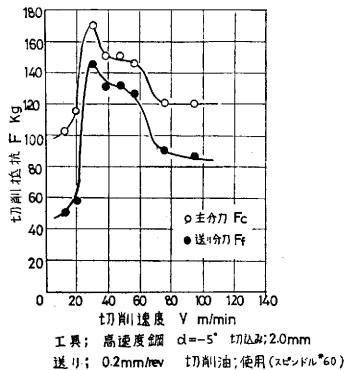


図11 高速度鋼工具を用い“かえり”現象が発生した場合の切削速度と切削抵抗の関係

な切削が可能である。このような現象はS15Cを高速度鋼工具で切削した場合も同様に顕出する。

鉛快削鋼を高速度鋼工具で切削する場合には、工具横すくい角の大小に関係なく“かえり”の現象は起らず順調な切削が行なわれる。要するに普通炭素鋼を高速度鋼工具で切削する場合、横すくい角を負にすることは好ましくない。

4・7 摩擦係数について

一般に金属と金属とを押しつけたときの接触面積は見かけの面積に較べて非常に小さく、例えば滑らかな超合金と鋼との摩擦係数は0.15といわれている。しかし本実験では0.3~1.0範囲になっており、一般の金属と金属とを押しつけた場合とは非常に違うことがわかる。これは「工具すくい面におけるような強い圧力のもとでは、ほとんど見かけの面積に等しい接触面積で摩擦が行なわれているためである」と説明している研究者がいる。実際上の横すくい角は構成刃先の生成により変化するので、ここでは見かけの横すくい角を用いて求めた摩擦係数について考察した。したがって厳格には述べられないが切くずと工具すくい面との間の潤滑状態を知るという点では重要である。

(i) 普通炭素鋼と鉛快削鋼の摩擦係数

図12は工具横すくい角 6° の超合金工具を用いて、

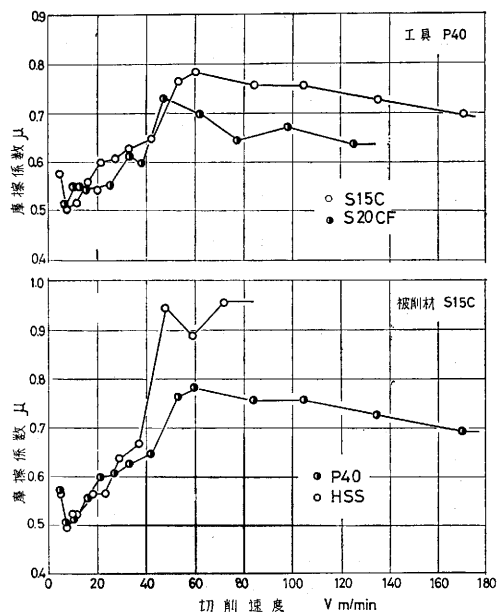


図12 被削材種および工具材種による摩擦係数の変化

工具横すくい角 $\alpha = 6^\circ$
 切込み；2.0mm
 送り；0.2mm/rev.

炭素鋼S15Cと鉛快削鋼S20CFを切削した場合の摩擦係数である。切削速度50m/min以下ではほとんど差はないが、それ以上の高速度になると鉛快削鋼の摩擦係数は普通鋼より小さくなる。これは鉛快削鋼の成分である鉛が潤滑油剤の役目をするためであることは容易に理解できる。

(ii) 工具材種による摩擦係数の変化

切削速度40m/min以上では超硬合金工具の方が高速度鋼工具を用いるよりも摩擦係数は小さい。このことを図12に示す。前項で切削抵抗、切削抵抗の変動量および切削面あらさを総合して考えた時、超硬合金工具の高速度での使用が良いと述べたが、摩擦係数についても、そのことは言明できる。

(iii) 切削比と摩擦係数

切削比が大きくなれば、摩擦係数は小さくなることを図13に示す。

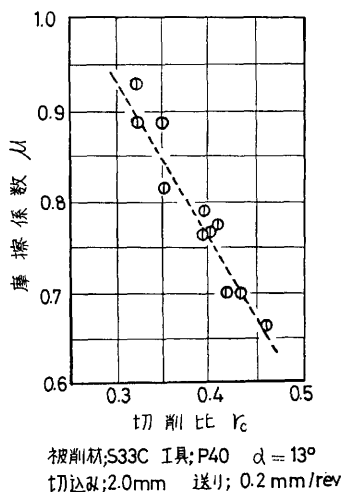


図13 切削比 r_c と摩擦係数 μ

このことより切削比、すなわち切くず厚さを調べることによってその切削における摩擦および潤滑の状態の概略を比較することが可能である。

5 結 論

以上の研究から得られた結果を要約すると次のようである。

- (i) 切削比 r_c およびせん断角 ϕ であらわされる切くず生成の状態からその切削材料の被削性を知ることができる。すなわち被削性の判定基準として“切くず生成から見た被削性”で判定することが可能である。
- (ii) 切削抵抗は削り速度を増すにつれて、まず極小値を、つづいて極大値を示し、以後漸減する。その極小値と極大値との差は主分力より送り分力の方が大きく、またすくい角の大きいときより小さいときの方が大きい。
- (iii) 切削抵抗の極大値となる削り速度は工具のすくい角が大きいほど高い削り速度側に移行する。
- (iv) 工具の横すくい角を大きくするほどせん断角は増大する。その増大する割合は高い削り速度になるにつれて鈍る。
- (v) 鉛快削鋼は普通炭素鋼（鉛快削鋼と相当量の炭素を含有する）に比べ、切削抵抗から見た被削性も、切くず生成から見た被削性でも優れている。
- (vi) 低い削り速度域の切削作業には、超硬合金工具を使用するより高速度鋼工具を使用する方が優位である。
- (vii) 普通炭素鋼をすくい角が負である高速度鋼工具で切削するとき“かえり”の現象が現われる場合があるので、あまり使用しない方が望ましい。
- (viii) 切削比 r_c はその切削における摩擦および潤滑状態を知るひとつの尺度となる。

なお、本研究を行なうに当って、種々御懇篤な御指導を賜わった京都大学奥島啓式教授、星鉄太郎教授に深甚の謝意を表わす。

参 考 文 献

- (1) 奥島・漢；精機学会，昭44年秋季学術講演会前刷
- (2) 竹山・伊藤著；金属切削・研削技術と材料および設計
- (3) 大越；精密機械，第35巻6号
- (4) 田中・津和著；精密工作法(上)
- (5) M.C.Shaw, E.Usui and P.A.Smith; Free Machining Steel-III. Cutting Forces, Surface Finish and Chip Formation.

(昭和43年4月15日受理)