

油剤の効果に関する研究 (第1報)*

—高速度鋼工具による各種被削材の二次元切削—

大草喜太雄**・山本 英司**・益富 雅之**

Study on Effect of Cutting Fluid (1st report)

—Orthogonal Cutting on Various Materials by High Speed Steel Tool—

Kitao ŌKUSA, Eiji YAMAMOTO and Masayuki MASUDOMI

Abstract

This is a report on the effects of cutting fluids, when various metallic materials are cut under orthogonal cutting at constant cutting speed. The effects of cutting fluids on cutting force, shear angle, etc. are investigated in the experiments. The kinds of cutting fluids used are water, water base and mineral oil base.

The materials used in this experiment are carbon steel S10C, S15C, alloy steel SCM4, 18—8 stainless steel (SUS27), cast iron (FC20) and 4—6 brass.

The results obtained are as follows.

1. In such a low cutting speed as $V=10\text{m/min}$, cutting force and coefficient of friction decrease and shear angle increases by using the cutting fluids. The effect of the mineral oil base is greater than the water base.
2. The chip's type is often transformed to flow type from shear type by cutting fluids.
3. The effect of cutting fluids is greater in carbon steel than SUS27 with which the chips easier weld to the tool.

1. 緒 言

高速度鋼工具は耐チップング性に富むため、現在でも多く使用されているが、超硬合金工具などより耐熱性に劣るため、使用する削り速度は比較的低速である。

したがってき裂形、せん断形などの切くずが発生すると同時に、構成刃先を生ずる切削条件で切削することが多い。このような低速域で鋼を切削する時には、油剤を使用することが多いが、その効果は構成刃先の発生しない領域すなわち高速域での冷却効果と異り、かならずしも明確ではない。

著者らは従来より構成刃先¹⁾の発生しない黄銅、通常の方法では構成刃先を明瞭に識別しがたいオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS27)、構成刃先の生成脱落が著しい SCM4 など、鋼、鋳鉄、黄銅より 6 種類の被削材を選んで、乾式および湿式にて二次元切削をし

た。そしてそれらの被削材毎に切削力、切くずの厚さなどを測定し、従来の二次元切削理論²⁾よりせん断角、摩擦係数などを求め、これらに基いて油剤の効果を検討した。

2. 実験方法

使用した機械は門型の平削り盤 (主電動機 1.5Kw) で、工具は高速度鋼工具 SKH 2 相当、すくい角、逃げ角はそれぞれ $10^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 、 6° である。工具の形状は JIS B 4152 の 21—3 形とした。被削材とその硬度は Table 1 に示すごとくである。そのうち SUS 27 は構成刃先らしきものを明瞭には認めがたいが、切くずそのものが溶着し易い材料であり、鋳鉄は常にき裂形の切くずが発生する材料である。

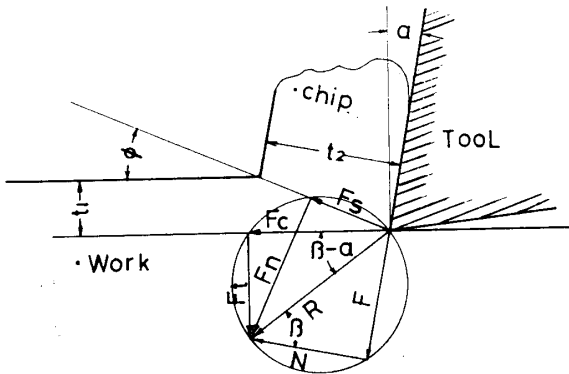
切削方式は Fig. 1 に示すごとくで削り速度 $V=10\text{m/min}$ 、切取り厚さ $d=0.2\sim 1.0\text{mm}$ 、切削幅 3 mm で

* 昭和43年11月3日精機学会秋季学術講演会において講演

** 生産機械工学教室

Table 1 Workpieces

Workpiece	Hardness H_V	Workpiece	Hardness H_V
S10C	121	SUS27	194
S15C	126	FC20	175
SCM 4	290	4-6 Brass	58



Appended Fig.1 Composite cutting force circle

- F_c , Tangential force on tool. kg
- F_t , Thrust force on tool kg
- N , Normal component of tool force kg
- F , Friction component of tool force kg
- ϕ , The shear angle °
- α , The back rake angle °
- β , The friction angle "

ある。切削長さはいずれの材料とも約250mmである。

測定項目は切削力および切くずの平均厚さ、工具と切くずの接触長さなどで、それぞれ電気歪計法の工具動力計（自作）および工具顕鏡微で測定した。

使用した市販の油剤の性状は Table 2 に示すごとくで番号の大きいものほど動粘度が大きく、No. 4, No. 5 は不溶性である。動粘度の測定は細管式粘度測定装置 OV-2 (高津製作所製)、表面張力は毛細管を用いる方法で測定した。

油剤の冷却性能を調べる方法は種々^{2),3)}あるが、いずれもまだ一般化されるには至っていない。そこで著者らは簡易にその性質を調べるため、Fig. 2 に示す装置を用いた。

その方法は熱源として円筒形の小鋼材試片を選び、その中心部と表面へクロメル-アルメルの熱電対を挿入して、あらかじめ試験油剤を入れたビーカー A 内にて両熱電対がほぼ100°Cになるまで、つまり試片の温度がほぼ均一になるまで加熱した。ついでビーカー A と同一試験油剤 (7°C) が入ったビーカー B にその試片を移した。

そして Fig. 3 のごとくビーカー B 中での試片の冷却曲線を求めて、その勾配の大小をもって、各種油剤の冷却性能の目安とした。冷却曲線の勾配が大きいことは単位時間当りの温度降下量が大きいことを意味し、冷却性能がすぐれていることになる。

Table 2 Fundamental characteristics in cutting fluids

Number	JIS	Type	Kinematic Viscosity (20°C)	Specific Gravity(7°C)	Surface Tension(9°C)	Dilution
No. 1	W 2-1	Soluble	$1.053 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{sec}$	$1.009 \text{g}/\text{cm}^3$	$0.0341 \text{g}/\text{cm}$	× 30
No. 2	W 1-1	Emulsion	1.162×10^{-2} "	1.001 "	0.0317 "	× 20
No. 3	W 1-1	Emulsion	1.387×10^{-2} "	1.001 "	0.0350 "	× 20
No. 4	2-1	—	20.60×10^{-2} "	0.985 "	0.0320 "	—
No. 5	2-7	—	61.60×10^{-2} "	0.935 "	0.0331 "	—

No. 4, No. 5 are mineral oil bases.

注

使用した切削方式は Appended Fig. 1 のごとくで、この時のせん断角 ϕ は

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha}$$

で求める。ただし r は切削比、 α は工具すくい角である。

切削力の計算は Appended Fig. 1 の幾何学的関係からえられる。

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha$$

の式にて、それぞれすくい面への垂直力 N 、摩擦力 F を求めた。ここで F_c は主分力、 F_t は背分力で、それぞれ工具動力計で測定した。

摩擦係数 μ は

$$\mu = \tan \beta = \frac{F}{N}$$

より求めた。ただし β は摩擦角である

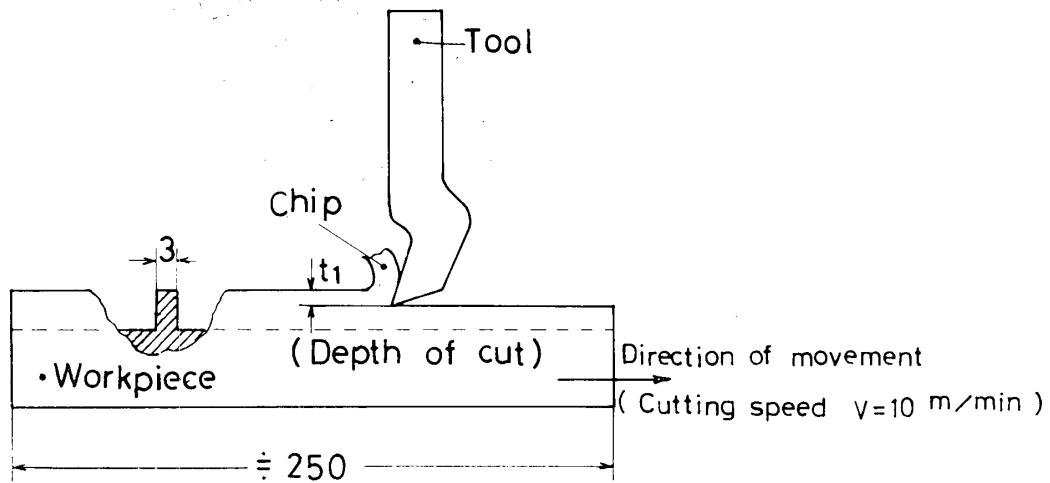


Fig.1 Cutting method

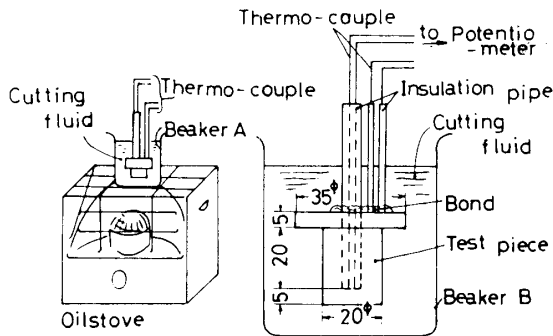


Fig.2 Apparatus for cooling tests of cutting fluid

Fig. 3 より、水が最も冷却性能が大きく、続いてソリュブルタイプ>エマルジョンタイプ>不水溶性>空気の順に冷却性能は劣っている。この傾向は一般に考えられている油剤の冷却性能と一致していて、Table 2 では番号の大きいものほど、すなわち動粘度の大きいものほど冷却性能は劣っている。

3. 実験結果とその考察

3.1 各種油剤の効果

被削材の材質によって油剤の効果が異なると考えられるので、各被削材毎に種々の油剤が切削力などにおよぼす効果について、切削条件を一定として実験をした。

削り速度が $V=10\text{m/min}$ と低く、構成刃先の生成脱落の激しい条件下では Fig. 4 に示すごとく、程度の違いはあるが、いずれの材質でも動粘度の大きい油剤ほど切削力が小さく、水溶性の油剤よりは不水溶性の油剤で効果大きい。

乾式切削で発生した切くずの形態は Fig. 5 にモデル的に示したごとく、SCM 4 ではせん断形、黄銅では著しいせん断形、SUS27, S15C, S10C では流れ形の

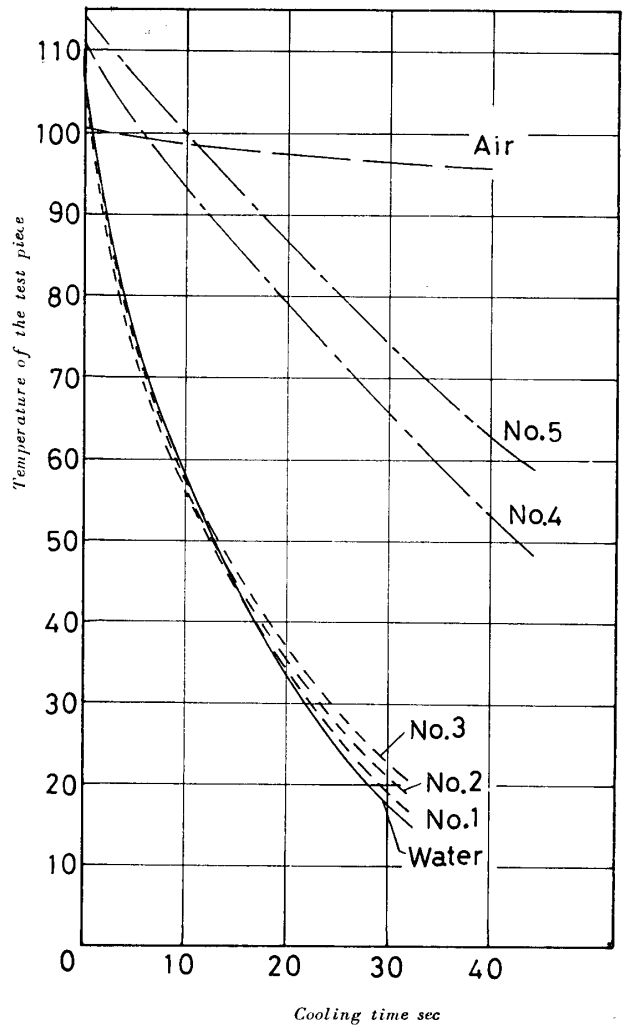


Fig.3 Cooling curves of test piece

Amount and temperature of tested fluids, 500cc, 7°C respectively

Volume of test piece, 12.5cc

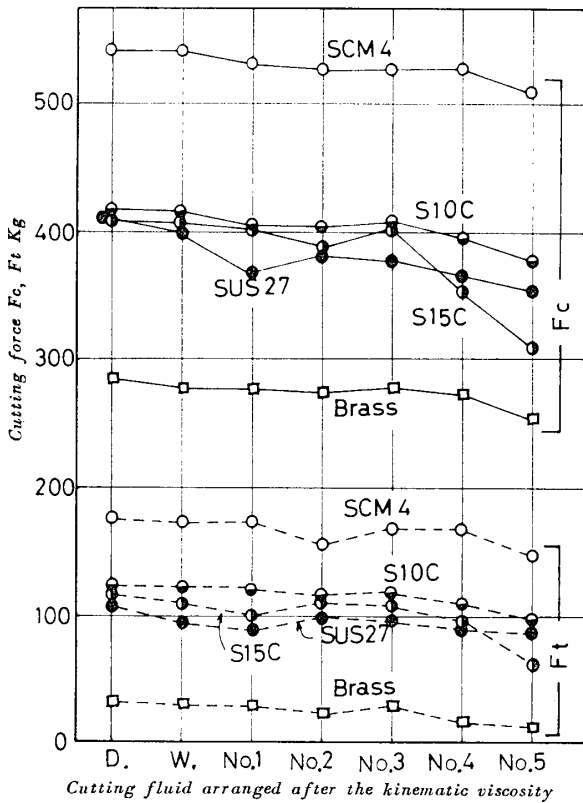


Fig. 4 Relation between cutting force and kind of cutting fluid

Cutting speed $V=10\text{m/min}$, depth of cut

$t_1=0.8\text{mm}$ (only SUS27, $t_1=0.6\text{mm}$), amount of cutting fluid 3 l/min, back rake angle $\alpha=25^\circ$.

F_c Tangential force on tool, F_t thrust force on tool. D : dry, W : water.

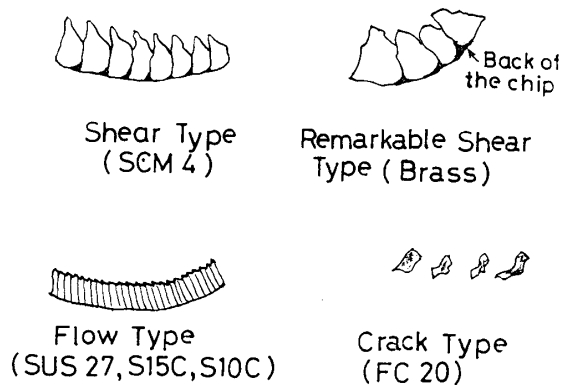


Fig. 5 The types of chip produced (Dry cutting).

Cutting speed $V=10\text{m/min}$, back rake angle $\alpha=25^\circ$, depth of cut $t_1=0.8\text{mm}$.

切くずが発生し、切くずの形態は被削材によって異なる。油剤を用いると SCM 4、黄銅は流れ形の切くずに近づく傾向にあり、その形態からしても油剤の効果

がある。なお油剤の種類としては動粘度の大きい油剤ほど流れ形になり易い。

Fig. 4 の結果からせん断角を求め、その結果を Fig. 6 に示す。いずれの材質にても油剤の使用によりせん断角は大きくなり、油剤の効果はあるが、やはり動粘度の大きい油剤ほどその効果は大きい。

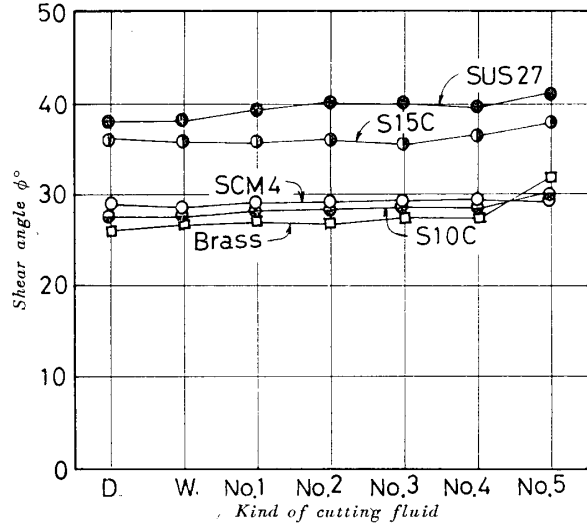


Fig. 6 Relation between shear angle and kind of cutting fluid

The same cutting condition as Fig. 4

材質毎のせん断角は、流れ形に近い切くずが発生する SUS27, S15C では切削力が高いにもかかわらず、せん断角も他の材質より大きかった。S10C では S15C と似た切くずであるが、ややせん断面のはっきりした切くずが発生した。黄銅でせん断角が小さくなったのは切くずの形態が著しいせん断形となるためである。つまり被削材間のせん断角の大きさは、被削材毎の切削力の大きさよりむしろ切くずの形態と密接な関係にある。

Fig. 7 は Fig. 4 の実験結果より摩擦係数を計算したもので、摩擦係数も動粘度の大きい油剤を使用した時ほど、小さくなり良い結果が得られた。この傾向は構成刃先が付着しない黄銅で著しく、SUS27 のように溶着し易い材質ではわずかな減少量であった。このことより油剤の侵入効果がせん断形とか流れ形でことなることがうかがえる。しかも構成刃先や溶着物が発生しないことも潤滑効果を助けたものと思われる。

以上のことより、このような低速で油剤を用いると切削力、摩擦係数は小さく、せん断角は大きくなり乾式より好ましい状態となる。その程度は動粘度の大きい油剤ほど効果が著しい。被削材の材質としては黄銅で摩擦係数の減少量が大きかった。

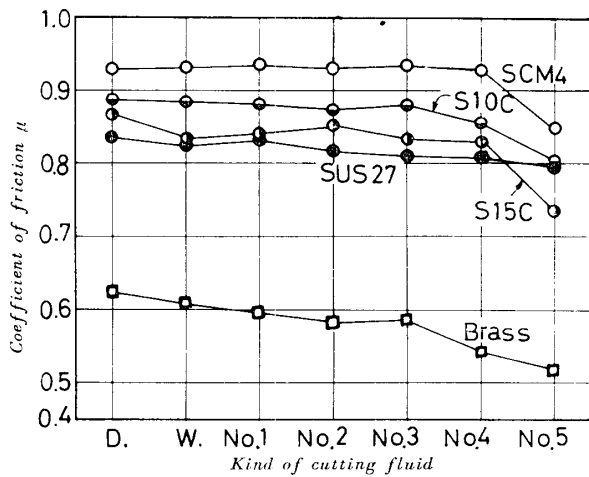


Fig.7 Relation between coefficient of friction and kind of cutting fluid

The same cutting condition as Fig.4

3・2 種々のすくい角での油剤の効果

前述の実験では切削条件が一定であったので、より広い条件下で油剤の効果を調べるため、すくい角や切削取り厚さなどを変えて実験をした。ここで乾式と比較するために用いた油剤は前述の実験で良い結果が得られたNo. 5の油剤一種類とした。

その結果、すくい角が小さい場合には SCM4 ではせん断形の切くずが発生していたが、乾式にてもすくい角 α が 30° 、 35° と大きくなると流れ形に近ずき、構成刃先もほとんどみられなかった。この時の切削力は Fig. 8 に示すごとくすくい角が大きくなり、切刃が鋭角になると小さくなっている。常にき裂形の切くずを発生する FC20 の場合でもやはり切削力はすくい角の増大により減少したが、SUS27 ではその減少量が比較的少ない。

切削力はいずれのすくい角でも乾式に比べ湿式の方が小さく、油剤の効果がある。各すくい角における油剤の効果は、SCM4 ではすくい角が小さく、せん断形の切くずが発生する時には大きく、すくい角が大きくなり切くずの形態も流れ形に近ずくと、油剤の効果は少くなる。

以上のことをまとめると、油剤の効果は被削材の材質によって異なるが、傾向としてはせん断角も小さく、せん断形の切くずが発生する時の方がその効果は大である。せん断角が小さい時には切くずの流出速度が小さいので、油剤が侵入し易いことなどによるものと考えられる。

前述のごとく、すくい角が変化すると切くずの形態も変わるが、Fig. 9 の工具と切くずの接触長さから油剤

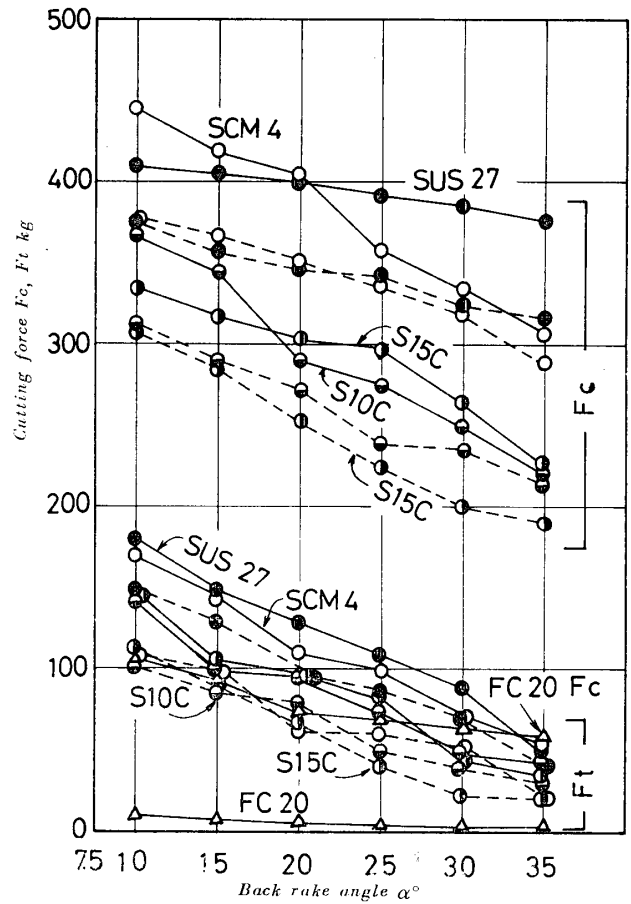


Fig.8 Relation between cutting force and back rake angle
Cutting speed $V=10\text{m/min}$,
depth of cut $t_1=0.6\text{mm}$. number and flow amount of cutting fluid No.5, 3l/min respectively.
—Dry (Solid lines) ———Wet (Dashed lines)

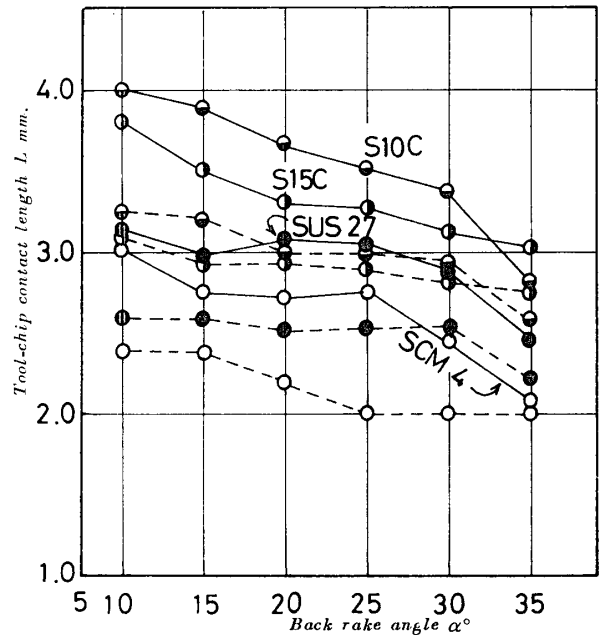


Fig.9 Relation between tool-chip contact length and back rake angle
The same cutting condition as Fig.8. —Dry ———Wet

の効果を検討すると、すくい角が小さい時ほど、より乾式での接触長さが長くなり、油剤を用いた時の接触長さの減少量も大きくなり易い。すくい角が大きく切れ味の良い時には、乾式にてもすでに接触長さが比較的短く、油剤による接触長さの減少量は少い。SUS27ではいずれのすくい角にても接触長さの減少量はほぼ一定であった。

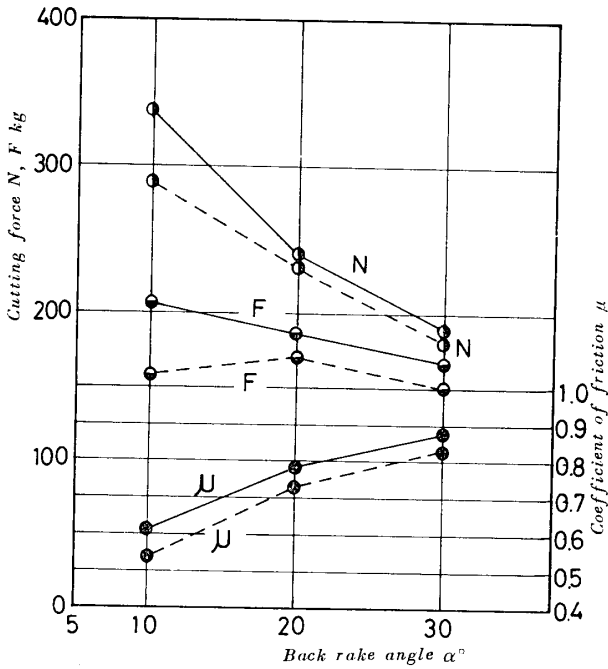


Fig. 10 Cutting force and coefficient of friction in each back rake angle
Workpiece S10C, depth of cut $t_1=0.6\text{mm}$,
N: normal component of tool force, F: friction component of tool force
— Dry - - - - Wet

Fig. 8 より S10C についてすくい面への垂直力 N 、摩擦力 F 、摩擦係数 μ などを計算し、その結果を Fig. 10 に示す。その結果すくい角の増大によりいずれの方向の切削力も減少するが、その減少の割合は摩擦力よりむしろすくい面への垂直力の方が著しい。そのためすくい角の増大により切削力は減少するが、摩擦係数はかえって増大する。一方、油剤の効果はすくい角の効果と異なり、すくい面への垂直力より摩擦力が大きく減少する。そのため油剤を使用すると、いずれのすくい角にても乾式より湿式の方が摩擦係数が小さくなる。

Fig. 11 は SCM 4 についての同様の結果であるが、前述同様、油剤の効果は摩擦力で顕著であり、すくい角の小さい時ほど摩擦係数におよぼす油剤の効果が大きい。

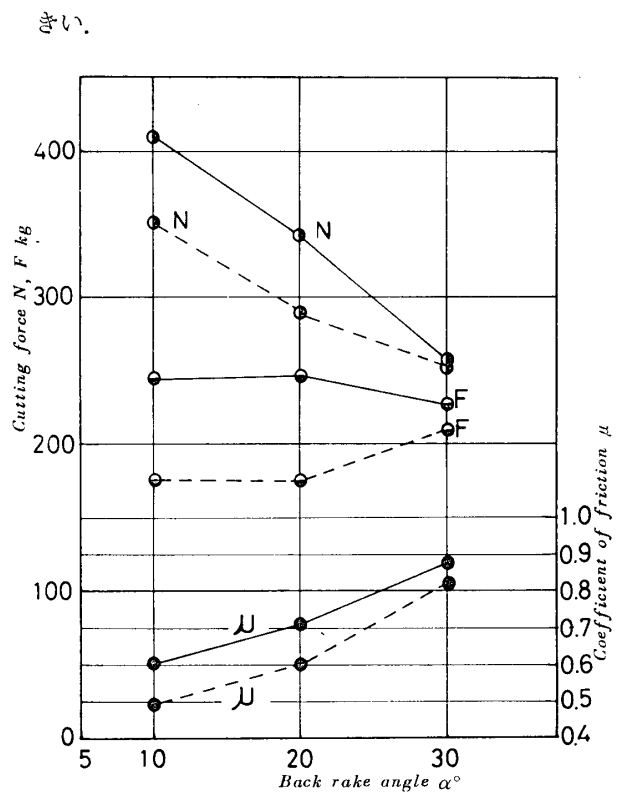


Fig. 11 Cutting force and coefficient of friction in each back rake angle
Workpiece SCM 4, depth of cut $t_1=0.6\text{mm}$

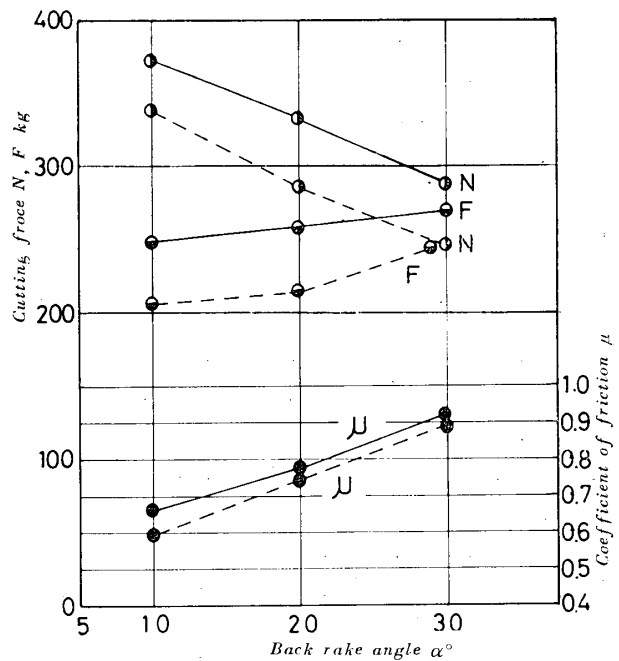


Fig. 12 Cutting force and coefficient of friction in each back rake angle
Workpiece SUS 27, depth of cut $t_1=0.6\text{mm}$

Fig. 12は SUS27について示したものである。

SUS27では前述の材質と異り、乾式ではすくい角が増大すると摩擦力がわずかであるが、かえって増大するので、すくい角の増大による摩擦係数の増大は他の材質より著しい。しかしこの材質にてもすくい面への垂直力は他の材質と同様、すくい角の増大とともに減少し、全体的な切削力は減少する。油剤の切削力などへの効果は、切削力や摩擦係数が減少し、効果があった。

被削材の材質により摩擦係数におよぼす油剤の効果がどのように異なるかを調べるため、横軸に乾式の摩擦係数を取り、縦軸に乾式と湿式の摩擦係数の差を取り、Fig.10~Fig.12などに示した結果より、油剤の効果を調べてみた。その結果はFig.13に示すごとくで、図中の各被削材の各プロット点で、左側の点はすくい角 $\alpha=10^\circ$ 、中央は $\alpha=20^\circ$ 、右側は $\alpha=30^\circ$ である。

従来より溶着し易いと考えられているSUS27では乾式での摩擦係数がいずれのすくい角にても他の材質より大きく、油剤の効果も少い。切くずがせん断形で構成刃先の生成脱落がはげしいSCM4では乾式にてもすでに摩擦係数が小さく、湿式によるその係数の減少量も大きい。S15C, S10Cにてはその両者の中間である。

以上のこのことよりSUS27のごとく溶着し易い材質ほど乾式での摩擦係数が大きく、油剤の効果は少い。またSUS27やS15Cのように流れ形の切くずを示す傾向の大きいもの、構成刃先の発生傾向の少ないものも摩擦係数へおよぼす油剤の効果は比較的少い。このような時には油剤が工具の刃先などに侵入しにくく、油膜を作りにくいからである。

ここで前述同様すくい角が変化した時の実験結果より、摩擦角-工具すくい角($\beta-\alpha$)つまり工具の進行方向と合力とのなす角とせん断角 ϕ との関係を求めるとFig.14に示すごとくなる。

Fig.14よりSCM4切削で油剤を用いると($\beta-\alpha$)と ϕ の関係は乾式に比べ下側につれてくる。また溶着し易いSUS27や軟質なS10CではSCM4の場合と異り、油剤を用いると上側につれ、同一せん断角での合力の方向は油剤を用いると、かえって背分力側に傾く傾向にある。S15Cでのその曲線は乾式と湿式で変わらず同一線上にあった。

これらの曲線と被削材を完全塑性体と考えた従来の式⁴⁾と比べると、勾配など異なるが、S10Cの乾式とKrystofの式が比較的似ている。被削材の材質についてみると、溶着し易い材質ほど勾配が小さくなっている。

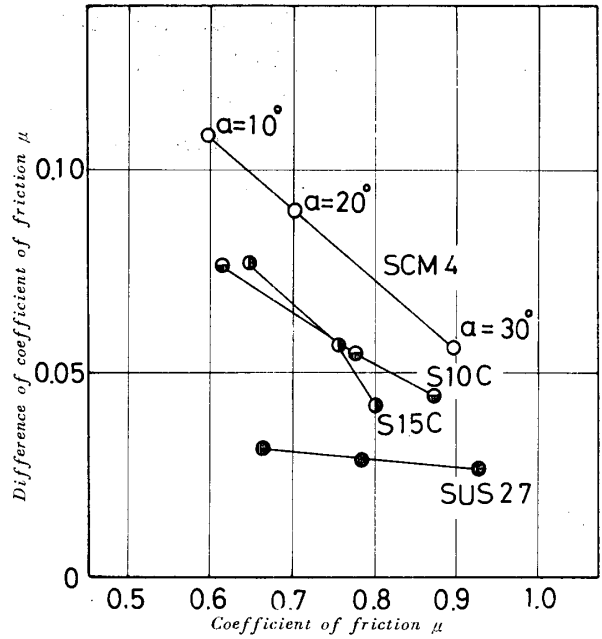


Fig.13 Difference of coefficient of friction in dry and wet
Difference of coefficient of friction = (Coefficient of friction in dry) - (Coefficient of friction in wet)

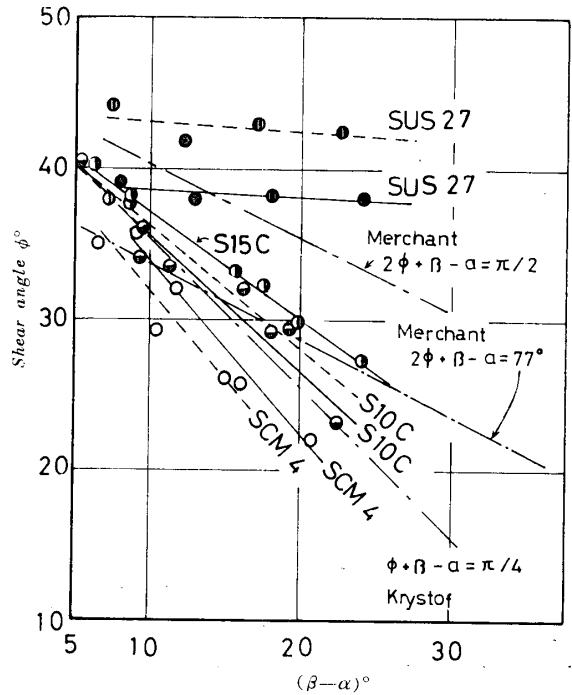


Fig.14 Relation between shear angle and $(\beta-\alpha)^\circ$
The same cutting condition as Fig.8
— Dry - - - - Wet

3.3 切取り厚さが変化した時の油剤の効果

切取り厚さと切削力との関係はFig.15に示すごとく、いずれの切取り厚さでも油剤の使用により切削力は減

少する。その減少量は S15C では切取り厚さの厚い時に著しく、SUS27では切取り厚さに関係なくほぼ一定である。つまりSUS27のように溶着し易い材質では油剤の侵入し易さ、油膜の形成が切取り厚さによって変らず、ほぼ一定であるものと思う。

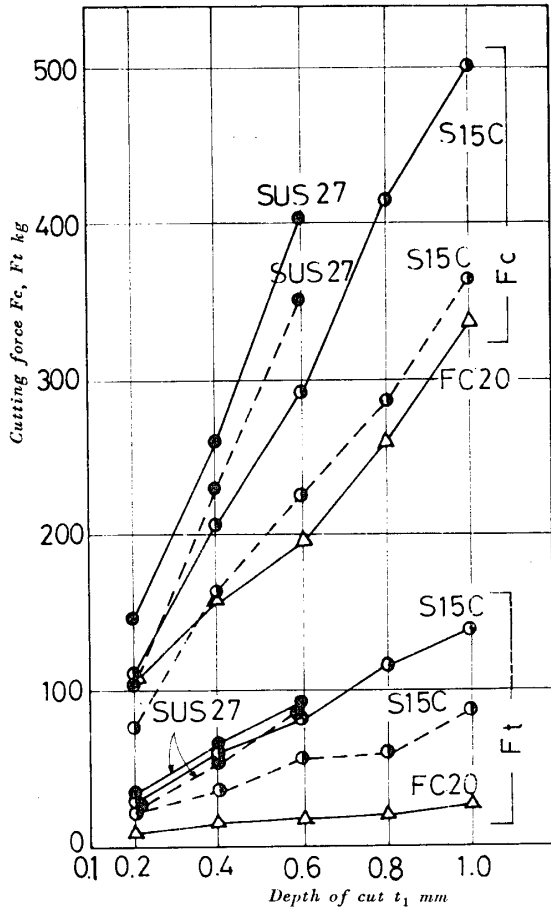


Fig. 15 Relation between cutting force and depth of cut

Cutting speed $V=10\text{m/min}$, back rake angle $\alpha=25^\circ$, cutting fluid No.5, amount of cutting fluid 3 l/min — Dry ——— Wet

Fig. 16に S15C の場合の切取り厚さとすくい面への垂直力、摩擦力、摩擦係数などの関係を示す。切取り厚さが厚くなると、切削力は大きくなるが、計算で求めると摩擦係数も若干は大きくなる。油剤の効果はすくい角を変化させた場合と同様、摩擦力の減少割合が大きいので、摩擦係数は乾式より湿式の方が僅かながら小さくなっている。

Fig. 17は SCM 4 の場合であるが、この材質では切取り厚さが厚くなると、垂直力がより増大するので、切取り厚さが大きくなると、かえって摩擦係数は減少して、前述のS15Cの場合と異なる。しかしSCM 4にて

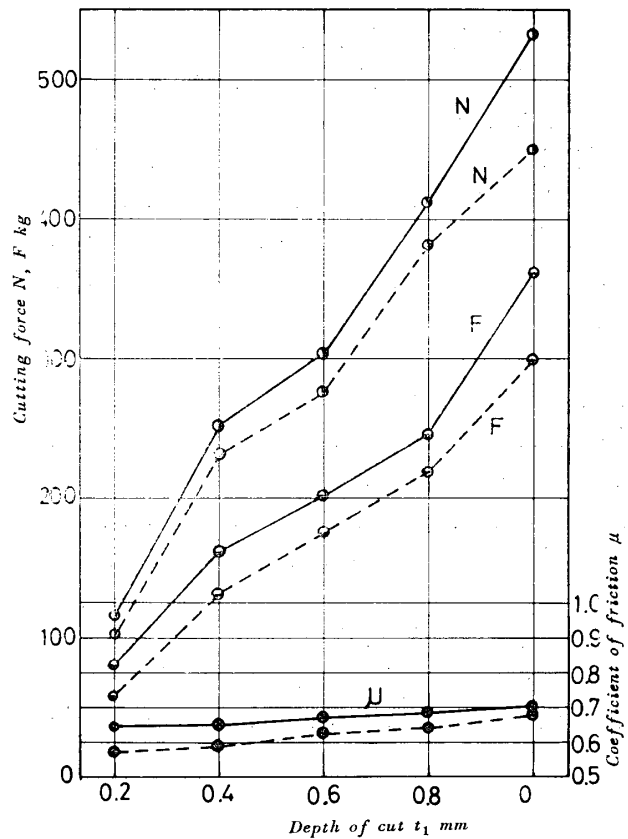


Fig. 16 Cutting force and coefficient of friction in each depth of cut

Workpiece S15C, Back rake angle $\alpha=10$, — Dry ——— Wet

も油剤を用いると摩擦係数は減少している。

摩擦係数へおよぼす油剤の効果はSCM 4, S15Cの両材質とも摩擦力は切取り厚さによって変らずほぼ一定の減少量であるが、垂直力では切取り厚さが薄くなるほどその減少量が少くなるので、切取り厚さの小さい時ほど摩擦係数の減少量が大きくなった。

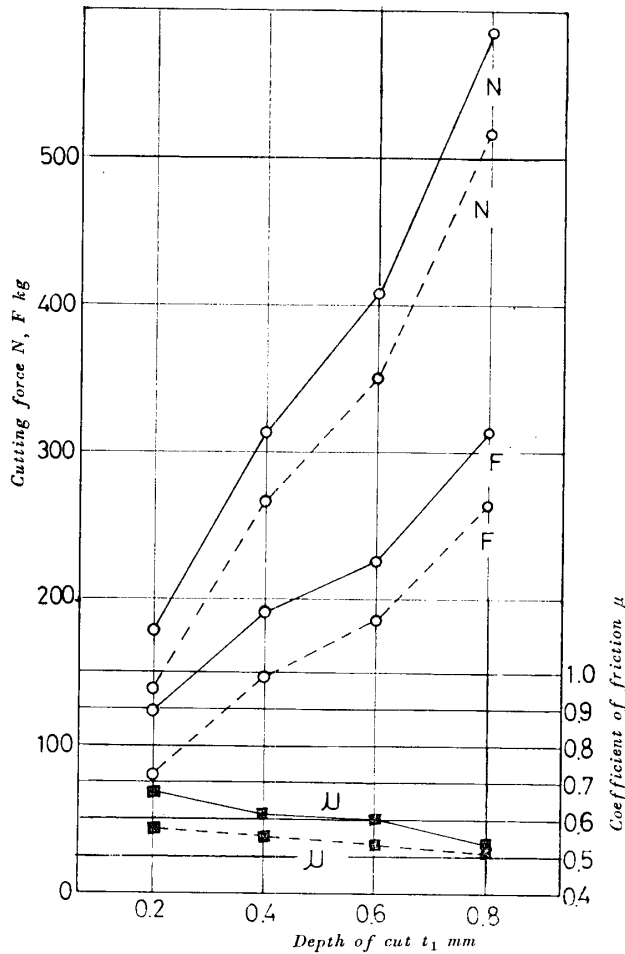


Fig. 17 Cutting force and coefficient of friction in each depth of cut

Workpiece SCM 4, back rake angle $\alpha=10^\circ$

— Dry - - - - Wet

4. 結 言

以上の実験をまとめると以下のように結論される。

$V=10\text{m/min}$ のような低速切削で油剤を用いると、切削力や摩擦係数が減少すると同時に、切くずもせん断形より流れ形になり易い。油剤の種類は冷却性に重点をおいた水溶性の油剤より動粘度の大きい不水溶性の方が効果が大である。

すくい角や切取り厚さなど、つまり切削条件を変えたときの単一せん断面による二次元切削理論で求めた切削力については、摩擦力よりもむしろすくい面への垂直力がより大きく変化した。一方、油剤を使用すると摩擦力がより大きく減少し、摩擦係数は減少する。

摩擦係数の減少割合はすくい角や被削材などによって異り、摩擦係数も大きく、溶着現象を生じていると思われるSUS27の時にはその係数への効果は少く、SCM 4のように構成刃先が発生し易く切くずがせん断形である場合には摩擦係数へおよぼす油剤の効果が大きい。

本報告をまとめるにあたり当時学生であった日本高周波鋼業(株)竹本勇、日本電気(株)高峰市郎両君に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 大草, 北川, 山本: 金属切削における削り速度-切削力の関係について (続報). 日本機械学会関西支部第44期定時総会 講演論文集 (No.44-10)
- 2) 篠崎襄: 切削油剤の冷却能の評価について, 精密機械, 31, 8 (1965) p.708-713
- 3) 吉市亮藏, 玉村謙太郎: 切削油剤が切削工具に及ぼす二, 三の影響, 精密機械, 32, 3 (1966) p.196-204
- 4) 精機学会編: 精密工作便覧, コロナ社 (1964)p.40

(昭和44年4月17日受理)