一応かなりよく一致しているように見える。しかし理論においては有限半径の円筒を半無限体と仮定しており、また刃先温度の測定においても熱電対としての性能に検討の余地が残されているから、これらの点についてはさらに研究を進めてゆく予定である。なお計算に用いた比熱、比重、温度伝導率の値を表1に示す。

表 1

	被 削 材	ドリル
比 熱 cal/gr°C	0.114	0.115
比 重 gr/cm ³	7.86	8.20
温度伝導率 cm ² /s	0.135	0.055

6. 結 言

ドリルののみ部の切削作用を除外して主切刃の切削作用のみに基づく刃先温度を理論的に解析するにあたってドリル刃先をいくつかの部分に分けて考え、その各部分を

それぞれ捲り角、傾き角を同じくするバイトにおきかえて取扱い、一応実験値とかなり近い結果をえた。

終りに本研究の遂行にあたって、実験ならびに計算に協力された馬淵良雄、木村照、梶本正彦の諸君に謝意を表する。
(1958, 8月5日受付)

文 献

- 1) Carslaw and Jaeger : Conduction of Heat in Solids. Oxford, Reprint of Second Impression, 1950, p.220 参照.
- 2) B. T. Chao and K. J. Trigger : Trans. ASME, Vol.75, 1953, p.214.
- 3) E. G. Loewen and M. C. Shaw : Trans. ASME, Vol.76, 1954, p.217.
- 4) J. C. Jaeger : Proc. Roy. Soc. NSW., Vol. 76, 1942, p.203.
- 5) M. C. Shaw, H. N. Cook, and P. A. Smith : Trans. ASME, Vol. 74, 1952, p.1059.
- 6) 大石三郎 : 温度及びその測定法, 産業図書株式会社, 昭和21年, 211頁.

切削剤の切削機構に及ぼす影響¹⁾

竹 中 規 雄* 広 野 雅 道**

Influences of Cutting Fluids on the Metal Cutting Mechanism
Norio TAKENAKA and Masamichi HIRONO

In the two-dimensional cutting of 0.21% carbon steel in the annealed condition using several cutting fluids, the influences of cutting fluids on the metal cutting mechanism such as the shear angle, the friction angle and their functional relationship were studied.

The cutting fluids used were seed oil, spindle oil, water-based fluids and special cutting oil. The specimens were machined under the following conditions. The rake angle was varied from 9.3 to 28 degree, the depth of cut from 0.06 to 0.15mm and the cutting speed was a constant value of 14m/min.

From the analysis of the results, it was found that the functional relationship between ϕ and $(\beta-\alpha)$ can be represented by a single curve and the angle $(\phi+\beta-\alpha)$ was approximately constant of 49 degree for various cutting fluids and conditions.

1. ま え が き

金属の切削現象はこれを支配する因子が非常に多くその複雑性のためいまだ十分に説明されていないようである。しかして、この現象を解明するためには、切屑の剪

断角度と工具のすくい角および切削抵抗の大きさ並に作用方向等の間の関係を確立することが一つの重要な問題であつて、この点に関し、Merchant 以来多くの理論的実験的研究が行われ、近年は高温切削あるいは低温切削などの観点からも種々検討されているが、本報は切削剤を使用した場合に上記の関係がどのように影響されるか実験を行い、切削現象の解明に一寄与せんとするもので

* 東京大学生産技術研究所 正会員

** 静岡大学工学部 正会員

ある。

一般に、切削剤は潤滑作用と冷却作用の二つの機能を有しているが後述の如き低速軽切削の本実験においては主として前者すなわち潤滑機能が影響するものと思われる。

2. 実験方法

0.21%Cの炭素鋼を約 850°C で焼鈍し、大隈 LH 型高速旋盤を用いて下記の条件で二次元切削を行い、ピエゾ電気を応用した切削力測定装置によって主分力並に背分力を測定した。

記

バイト：高速度鋼第 4 種，すくい角 = 28.0°, 16.3°, 11.0°, 9.3° の 4 種類，すくい面は油砥石で研削の条痕が無くなるまで研磨した。

切込み深さ = 0.06, 0.12, 0.15 mm の 3 種類

切削幅 = 0.8 mm 一定

切削剤：次の 5 種類，他に乾式切削

- (1) 菜種油 (2) G 社特殊切削油
- (3) スピンドル油 (4) C 社水溶性切削油
- (5) H 社水溶性切削油

給油方法は普通の流下式で給油量は約 1 l/min である。

切削速度は 14 m/min 一定とした。

これは切削速度がある程度以上になるとバイト刃先部への切削剤の浸透が困難となり切削剤の効果は余り期待出来ず，一方速度が余り低いと切削抵抗の変動，切削面の状況などの点から切削剤の影響の判定が困難となる場合が生ずるためである。

構成刃先は殆んど認められなかつたがこれはバイト切刃の鋭利さと関係があるのでこの点特に注意した。

図 1 は構成刃先をとみなさない二次元流れ型切削模型である。切屑の剪断角 ϕ は切屑厚さ t_2 を，特殊なマイクロメーター（スピンドルの端を円錐状に加工し

図 1 二次元流れ型切削模型

その先端に小鋼球をとりつけたもの）と工具顕微鏡を併用して測定し，これと切込深さ t_1 より次式で計算した。

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha} \right\}$$

図 2 はピエゾ電気を応用した二次元切削力測定装置で

図 2 ピエゾ式切削力測定装置

ある。バイトホルダーは長手方向に段が設けられておりこの部分が外枠に支持された二つのボールベアリング a の上に乗っていてコイルバネ f によつて，バイトホルダーに取付けられたボールベアリング b 及び c を介して水晶管 d 及び e に引きつけられている。

バイトに力が加わると，a を支点として水晶管 d 内の水晶圧電子に主分力 F_c が加わり，同時に e に背分力 F_t が加わつて夫々圧電気が生じこれを増幅してミリアンメータで読みとる。水晶管には乾燥空気を送入する孔が設けられてあつて，エアーコンプレッサで飽和状態に圧縮された圧縮空気を長いゴム管を通じて約 50 cm³/min の割合で管内に送入し，また同時に増幅器の入力部分及びコンデンサに送入して出力電流の漏洩を防ぐことが出来た。

3. 実験結果と検討

実験結果を表 1～表 6 に示す。ここに α = すくい角， t_1 = 切込深さ mm， F_c = 主分力 kg/mm， F_t = 背分力 kg/mm， μ = 切屑と工具すくい面の摩擦係数， β = 摩擦角， t_2 = 切屑厚さ mm， r_c = 切削比， ϕ = 剪断角， τ_s = 切屑剪断面の剪断応力 kg/mm²， λ_s = 同圧縮応力 kg/mm²， ϵ = 切屑の剪断歪

3.1 切削抵抗

主分力，背分力共に切削剤の影響を受けて変化する。

図 3 はその 1 例を図示したものである。いま，乾式切削における主分力，背分力を夫々 1 とすれば，種油，G 切

表 1 菜種油

α	t_1	F_c	F_t	μ'	β	t_2	r_c	ϕ	$\beta-\alpha$	$\phi+\beta-\alpha$	τ_s	σ_s	ε
28	0.06	10.0	3.1	1.011	45.3	0.115	0.522	31.4	17.3	48.7	60.0	68.1	1.701
	0.12	17.8	5.4	1.007	45.2	0.23	0.522	31.4	17.2	48.6	54.0	59.8	1.701
	0.15	20.0	6.3	1.011	45.3	0.30	0.500	30.0	17.3	47.3	46.9	51.0	1.767
16.3	0.06	11.0	4.8	0.829	39.6	0.13	0.461	27.0	23.3	49.3	58.0	70.0	2.151
	0.12	19.3	7.8	0.787	38.2	0.26	0.461	27.0	21.9	48.9	51.8	59.2	2.151
	0.15	22.5	9.3	0.810	39.0	0.33	0.455	26.6	22.7	49.3	47.7	55.0	2.173
11.0	0.06	11.5	5.3	0.714	35.5	0.14	0.429	24.7	24.5	49.2	57.3	66.4	2.420
	0.12	21.3	10.0	0.731	36.2	0.29	0.414	23.8	25.2	49.0	52.0	59.8	2.492
	0.15	25.8	11.8	0.688	34.5	0.35	0.429	24.7	23.5	49.2	51.4	59.4	2.420
9.3	0.06	12.0	5.8	0.697	34.8	0.15	0.364	23.0	25.5	48.5	57.7	65.2	2.599
	0.12	22.5	10.0	0.657	33.3	0.29	0.414	23.8	24.0	47.8	55.8	61.4	2.523
	0.15	27.5	12.5	0.670	33.8	0.35	0.429	24.5	24.5	49.0	55.4	63.0	2.465

表 2 G社特殊切削油

α	t_1	F_c	F_t	μ	β	t_2	r_c	ϕ	$\beta-\alpha$	$\phi+\beta-\alpha$	τ_s	σ_s	ε
28	0.06	10.0	3.1	1.011	45.3	0.115	0.522	31.4	17.3	48.7	60.0	68.0	1.701
	0.12	17.3	5.2	0.996	44.9	0.23	0.522	31.4	16.9	48.3	52.1	58.4	1.701
	0.15	20.0	6.3	1.011	45.3	0.28	0.536	32.3	17.3	49.6	48.3	52.0	1.656
16.3	0.06	11.0	4.5	0.798	38.6	0.13	0.461	27.0	22.3	49.3	58.8	68.0	2.151
	0.12	19.3	7.8	0.787	38.2	0.25	0.480	28.0	21.9	49.9	52.2	62.2	2.088
	0.15	22.5	9.0	0.786	38.2	0.33	0.455	26.6	21.9	48.5	48.2	57.6	2.173
11.0	0.06	11.3	5.0	0.688	34.5	0.14	0.429	24.7	23.5	48.2	58.2	65.0	2.420
	0.12	21.4	9.5	0.692	34.7	0.28	0.429	24.7	23.7	48.4	53.8	60.6	2.420
	0.15	26.5	12.1	0.716	35.6	0.35	0.429	24.7	24.6	49.3	52.9	61.3	2.420
9.3	0.06	12.0	5.4	0.660	33.5	0.14	0.429	24.7	24.2	48.9	60.2	68.8	2.450
	0.12	22.5	10.0	0.658	33.3	0.29	0.414	23.6	24.0	47.6	55.4	60.6	2.538
	0.15	28.1	12.8	0.669	33.7	0.35	0.429	24.5	24.4	48.9	56.2	64.3	2.465

表 3 スピンドル油

α	t_1	F_c	F_t	μ	β	t_2	r_c	ϕ	$\beta-\alpha$	$\phi+\beta-\alpha$	τ_s	σ_s	ε
28	0.06	10.6	4.3	1.182	49.7	0.125	0.480	28.7	21.7	50.4	58.3	70.4	1.841
	0.12	19.3	7.0	1.110	48.0	0.26	0.462	27.5	20.0	47.5	53.1	58.3	1.911
	0.15	22.5	8.4	1.125	48.3	0.32	0.469	28.0	20.3	48.3	50.0	62.5	1.881
16.3	0.06	12.0	5.6	0.940	43.4	0.14	0.429	25.2	27.4	52.6	56.0	72.3	2.283
	0.12	22.0	10.8	0.913	42.4	0.30	0.400	23.3	26.1	49.4	52.6	61.2	2.441
	0.15	27.5	13.0	0.890	41.7	0.36	0.417	24.3	25.4	49.7	54.0	63.6	2.352
11.0	0.06	13.1	6.8	0.790	38.3	0.16	0.375	21.7	27.3	49.0	59.0	68.3	2.705
	0.12	25.8	13.8	0.813	39.1	0.33	0.364	21.0	28.1	49.1	57.0	65.8	2.781
	0.15	31.3	16.9	0.820	39.3	0.38	0.395	22.2	28.3	50.5	56.8	68.8	2.652
9.3	0.06	13.8	7.4	0.718	35.7	0.16	0.375	21.5	26.7	48.2	61.6	73.4	2.755
	0.12	26.5	14.4	0.775	37.8	0.33	0.364	20.9	28.5	49.4	58.0	67.8	2.834
	0.15	32.8	18.4	0.799	38.6	0.39	0.385	22.0	29.3	51.3	59.0	73.0	2.700

表 4 C 社切削油 (水溶性)

α	t_1	F_c	F_t	μ	β	t_2	r_c	ϕ	$\beta-\alpha$	$\phi+\beta-\alpha$	τ_s	σ_s	ϵ
28	0.06	10.6	4.1	1.160	49.3	0.13	0.461	27.5	21.3	48.8	58.0	66.2	1.912
	0.12	19.3	7.0	1.110	48.0	0.26	0.461	27.5	20.0	47.5	53.2	58.2	1.912
	0.15	23.8	9.0	1.140	48.7	0.33	0.455	27.0	20.7	47.7	51.8	56.8	1.945
16.3	0.06	12.5	6.3	0.93	42.9	0.15	0.400	23.3	26.6	49.9	59.4	70.4	2.441
	0.12	23.0	10.8	0.882	41.5	0.30	0.400	23.3	25.2	48.5	55.6	62.4	2.441
	0.15	26.5	12.8	0.902	42.1	0.36	0.417	23.7	25.8	49.5	51.2	59.6	2.441
11.0	0.06	13.8	6.9	0.788	38.2	0.16	0.375	21.7	27.2	48.9	60.8	69.6	2.705
	0.12	24.8	13.1	0.808	38.9	0.32	0.375	21.7	27.9	49.6	53.4	65.6	2.705
	0.15	30.6	15.0	0.755	37.2	0.39	0.385	22.2	26.2	48.4	57.2	63.8	2.653
9.3	0.06	14.0	7.5	0.726	36.0	0.16	0.375	21.5	26.7	48.2	62.5	74.1	2.755
	0.12	26.9	14.4	0.767	37.5	0.33	0.364	20.9	28.2	49.1	59.4	68.4	2.834
	0.15	32.7	17.5	0.765	37.4	0.40	0.385	21.5	28.1	49.6	59.0	69.2	2.755

表 5 H 社切削油 (水溶性)

α	t_1	F_c	F_t	μ	β	t_2	r_c	ϕ	$\beta-\alpha$	$\phi+\beta-\alpha$	τ_s	σ_s	ϵ
28	0.06	10.9	4.4	1.186	49.8	0.13	0.461	27.5	21.8	49.3	58.8	68.8	1.912
	0.12	19.3	7.1	1.123	48.3	0.27	0.445	26.4	20.3	46.7	52.0	55.2	1.991
	0.15	23.8	8.6	1.117	48.2	0.32	0.469	28.0	20.2	48.2	53.3	59.2	1.881
16.3	0.06	13.5	6.9	0.944	43.3	0.16	0.375	22.3	27.0	49.3	62.5	72.7	2.539
	0.12	23.0	11.4	0.922	42.7	0.31	0.387	22.7	26.4	49.1	54.2	56.8	2.505
	0.15	27.0	13.0	0.902	42.1	0.37	0.405	23.7	25.8	49.5	52.2	60.8	2.411
11.0	0.06	14.1	7.6	0.820	39.3	0.16	0.375	21.7	28.3	50.0	63.3	75.6	2.705
	0.12	24.8	12.5	0.776	37.8	0.34	0.353	20.3	26.8	47.1	54.6	59.0	2.863
	0.15	30.6	15.3	0.765	37.4	0.40	0.375	21.7	26.4	48.1	56.2	62.4	2.705
9.3	0.06	14.4	7.9	0.790	38.3	0.165	0.364	20.8	29.0	49.8	63.2	74.1	2.832
	0.12	26.5	13.5	0.735	36.3	0.34	0.353	20.2	27.0	47.2	58.1	62.6	2.914
	0.15	31.9	16.3	0.734	36.3	0.41	0.366	21.0	27.0	48.0	57.2	63.4	2.811

表 6 切削剤なし

α	t_1	F_c	F_t	μ	β	t_2	r_c	ϕ	$\beta-\alpha$	$\phi+\beta-\alpha$	τ_s	σ_s	ϵ
28	0.06	11.8	4.9	1.211	50.5	0.13	0.461	27.5	22.5	50.0	63.6	75.0	1.912
	0.12	20.4	7.9	1.152	49.0	0.28	0.429	25.3	21.0	46.3	53.6	61.0	2.065
	0.15	24.4	9.8	1.182	49.7	0.34	0.441	26.2	21.7	47.9	51.6	57.4	1.968
16.3	0.06	13.1	6.9	0.965	44.0	0.15	0.400	23.4	27.7	51.1	61.4	76.1	2.444
	0.12	23.0	11.5	0.936	43.1	0.31	0.387	22.7	26.8	49.5	54.0	62.5	2.505
	0.15	28.1	14.1	0.932	43.0	0.38	0.395	23.1	26.7	49.8	53.2	62.9	2.457
11.0	0.06	14.4	7.6	0.810	39.1	0.16	0.375	21.7	28.1	49.8	64.8	76.1	2.705
	0.12	25.9	13.8	0.810	39.1	0.33	0.364	21.0	28.1	49.1	57.6	63.3	2.781
	0.15	31.3	16.9	0.820	39.3	0.39	0.385	22.2	28.3	50.5	56.6	68.8	2.652
9.3	0.06	14.8	8.0	0.776	37.8	0.165	0.364	20.8	28.5	49.3	65.0	75.6	2.832
	0.12	27.5	15.8	0.814	39.0	0.34	0.353	20.2	29.7	49.9	58.5	69.8	2.914
	0.15	34.8	19.4	0.800	38.7	0.40	0.375	21.5	29.4	50.9	61.6	73.4	2.755

削油を使用した場合は、主分力は 0.80~0.85、背分力は 0.60~0.70 となる。またスピンドル油及び上記二種の水溶性切削油使用の場合は、主分力は 0.90~0.98、背分力は 0.85~0.90 となる。従つて切削剤の切削抵抗へ及ぼす影響は主分力より背分力の方により著しくあらわれることが知れる。

図 3 切削力に及ぼす切削剤の影響

図 4 摩擦力及び摩擦係数に及ぼす切削剤の影響

図 4 は図 3 の場合の摩擦力 F 及び摩擦係数 $\mu (= F/N)$ を示したもので、摩擦力は切削剤により明瞭に変化することがわかる。これは、切削剤が切屑と工具すく

い面との接触面に毛細管現象や局部的な外気との圧力差によつて滲透して両者の間を疎遠にするためと思われる。そしてその程度は切削剤の潤滑性能に左右されることは容易に理解される。また摩擦力はどの切削剤に対しても切込深さと共に直線的に増加する。しかし摩擦係数は切込深さには無関係に殆んど一定しており、切削剤の性能により異なるものである。また摩擦係数は図 5 に示

図 5 摩擦係数及び剪断角に及ぼす切削剤の影響

されるごとく、工具のすくい角の増加と共に直線的に増加するが切削剤の潤滑作用により小さくなることは明らかである。切削剤による摩擦係数の減少すなわち $\beta (= \tan^{-1} \mu)$ の減少は切削抵抗 R の作用方向と切削方向とのなす角 $(\beta - \alpha)$ を小さくしこのため工具の切削面に対する圧縮力を軽減して仕上面を良好にする一因となるものと考えられる。

3.2 剪断角

図 5 にその 1 例を併記したごとく、剪断角は明らかに切削剤の影響をうけて増加する。例えば種油を使用した場合の剪断角は、切削剤を使用しない場合に比して約 6° 大きくなっている。有効な切削剤を使用すると、切屑の厚さは薄くなりそのカール径は小さくなるのはこのためである。また剪断角はすくい角が大きくなるとこれに比例して大きくなる。

以上のことから切削剤は、剪断角に対しては工具のすくい角を大きくしたと同様な効果をもたらし、一方摩擦係数に対してはすくい角を小さくしたと同様な影響を与えることになり興味深いことである。

図 6 は摩擦係数と剪断角の関係を示したものである。各すくい角べつに、切削剤の潤滑作用により摩擦係数が

減少すると剪断角はそれに反比例して増加する。このことは次項によつて理解される。

図 6 摩擦係数と剪断角の関係

図 7 各種切削剤に対する ϕ と $(\beta - \alpha)$ の関係

3.3 ϕ と $(\beta - \alpha)$

以上の実験値から ϕ と $(\beta - \alpha)$ の関係を図示すると図 7 の如くなる。これは近似的に一つの直線で表わされる。剪断角 ϕ に関する条件式は Merchant 以来多くの研究者により種々提唱されているがそのうち Merchant および Lee & Shaffer の式を同図に併記してみた。すなわち, Merchant²⁾ は最大剪断応力説に基いて, $2\phi + \beta - \alpha = \pi/2$ (図中の M) なる条件式をみちびいているが, その仮定の一つとして摩擦角 β は剪断角 ϕ に無関係であるとしている。しかし図 6 に示されたごとく両者は明らかに函数関係にあるのでその仮定は事実と一致しない。Lee 及び Shaffer³⁾ はすくい面と剪断面の間の切屑部分は理想的な塑性体でありその部分は剪断応力が最大とな

る平面にそつてのみ変形すると考え, $\phi + \beta - \alpha = \pi/4$ なる式 (図中の L) をみちびいている。

本実験では, $\phi + \beta - \alpha = 49^\circ$ 一定となり両者の中間にあるが傾向は Lee & Shaffer のそれに似ている。すなわち, 切削条件には無関係に換言すれば, 切削剤の効果, 刃物の角度, 切込み深さ等のいかに拘らず, 切屑の剪断面と切削抵抗の作用方向のなす角度は一定しているものと判断される。従つて, バイトのすくい角及びすくい面と切屑の摩擦状態によつて切削抵抗の作用方向 ($\beta - \alpha$) が決まり, 剪断角 ϕ は, 被削材による常数を θ とすると

$$\phi = \theta - (\beta - \alpha)$$

の関係で定まるものと推察される。

いま, 図 1 の幾何学的関係から

$$R = \frac{\tau_s A_0}{\sin \phi \cdot \cos (\phi + \beta - \alpha)}$$

ここに A_0 = 切削面積

$$\phi + \beta - \alpha = \theta = \text{常数}$$

であるから上式は

$$R = \frac{k \tau_s A_0}{\sin \phi}$$

$$\text{ここに } k = \frac{1}{\cos \theta}$$

また

$$F_c = R \cos (\theta - \phi)$$

$$F_t = R \sin (\theta - \phi)$$

すなわち切削抵抗は θ , τ_s , ϕ によつて計算される。

3.4 剪断応力, 剪断歪

各種切削剤に対する切屑剪断面の剪断応力は 大体一定しているが, 切込深さに対しては図 8 に 1 例を図示したごとく切込が小さくなると剪断応力は漸増する。この傾向は乾式切削の場合も同様でいわゆる 寸法効果と解される。

図 8 切込みと剪断応力の関係

図9は切屑の剪断歪 ϵ と摩擦係数 μ の関係を示したものである。

$$\epsilon = \cot\phi + \tan(\phi - \alpha)$$

図9 摩擦係数と剪断歪の関係

図10 剪断歪と剪断応力の関係

において、すくい角 α が大きくなれば剪断角 ϕ は大きくなり、一方 $(\phi - \alpha)$ は α の増加と共に減少する(実験値より)から ϵ はすくい角が大きくなれば減少する。また切削剤により切屑とすくい面の摩擦係数が減少すると前述の如く剪断角が大きくなる結果剪断歪は小さくなるのである。

図10は剪断歪と剪断応力の関係であるが歪が大きくなると応力はやや増大し加工硬化の影響と考えられる。

4. むすび

以上、軟鋼の切削機構におよぼす切削剤の影響を要約すると

(1) 主分力、背分力ともに切削剤の影響をうけて減少し、切屑とすくい面の摩擦係数は小さくなりその結果 $(\beta - \alpha)$ は小さくなる。

(2) 切屑の剪断角は切削剤により大きくなる。

(3) 摩擦係数と剪断角は反比例的関係にある。

(4) ϕ と $(\beta - \alpha)$ の関係は一直線で表わされ、 $\phi + \beta - \alpha \approx 49^\circ$ 一定となる。

(5) 切屑の剪断歪は切削剤により減少する。

(6) 剪断応力は歪が大きくなると増大し加工硬化の影響があらわれる。

終りに実験に協力された笹谷、鳴沢の両氏に謝意を表します。
(1958, 8月15日受付)

(注)

- 1) 昭和33年6月20日 浜松地方講演会に於て講演
- 2) M.E. Merchant: Jour. App. Phys. 16, 6 (1945).
- 3) E.H. Lee & B.W. Shaffer: Jour. App. Mech. 18, 4, Dec. (1951).