

# 旋削における三分力について

宮地 秀征, 浜口 敏雄, 山下 実  
渡辺 良助, 本田 巨範

On the Three Components of Cutting Resistance in the Turning of Steel

Hideyuki MIYAJI, Toshio HAMAGUCHI, Minoru YAMASHITA,  
Ryosuke WATANABE and Masanori HONDA

## Abstract

Three components of cutting resistances in the turning of S45C steel are measured with a tool dynamometer of wire strain gauge type. The cutting speed is kept at about 20m/min, and the areas of cut are varied from 0.1 to 0.4 mm<sup>2</sup> (4 steps) for the depth of cut of 1.0 mm and for feed rate of 1.0 mm/rev. respectively. The end cutting edge angle is kept at 5°, front and side clearance angles are kept at 5° and the approach angles (side cutting edge angles) are varied from 0° to 75° (8 steps) for the normal rake angle of 0° and 5° respectively.

Results are as follows:

1. When the depth-feed ratio is set large, the feed component decreases and the back component increases as the increase of the approach angle.

The main component is the largest and the back component is the smallest for smaller approach angles but the feed component turns smaller for larger approach angles.

2. When the depth-feed ratio is set small, there is little change in every component in accordance with the approach angle, and the main component is the largest and the feed component is the smallest.

3. The angle between horizontal component and shank axis decreases from about 70° to about 20° as the increase of the approach angle when the depth-feed ratio is large, and the rate of decrease is high for smaller feed rates.

4. The angle between horizontal component and shank axis increases slightly as increase of the approach angle when the depth-feed ratio is small.

5. The specific cutting resistances obtained by the experiments are as a whole smaller compared with values calculated by Ebi-hara's equation.

## 1. 緒 言

金属切削に関する研究は Taylor 以来多くの人々により行われてきたが、近年は塑生学的見地からの研究が盛んで切削抵抗理論も、Piispanen のカードモデル<sup>1)</sup>、Merchant の最大せん断応力説<sup>2)</sup>、内部摩擦説<sup>2)</sup>、被削材の加工硬化を考慮した Lapsley, Grassi, Thomsen らの理論<sup>3)</sup>、材料の内部欠陥を想定した Shaw の理論<sup>4)</sup>等、数多く発表されている。しかし、任意の刃形、切削条件における切削機構の完全な理解にはまだ多くの困難がある。

このような現実の中で、切削抵抗を実測することは単

に実用上工作機械の設計資料を得るためだけでなく、切削機構の理解に欠くことのできないものであり重要である。本報告は、鋼材の旋削時における切削抵抗を測定し、工具形状(主にアプローチ角)、切削条件(主に切込みと送り)が三分力に及ぼす影響について実験的に調べた結果について述べる。

## 2. 切 削 抵 抗

Fig. 1 に示す切削の最も基本的な形式である二次元切削においては、切削抵抗の主分力  $F_c$  および背分力  $F_t$  はそれぞれ次の式で表わされる<sup>2)</sup>。

$$F_c = \frac{\tau_s A_o \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (1)$$

$$F_t = \frac{\tau_s A_0 \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (2)$$

上式においては切削面積  $A_0$  とすくい角  $\alpha$  は既知の値であり、ここで材料が破断する時のせん断応力  $\tau_s$ 、せん断角  $\phi$ 、摩擦角  $\beta$  または  $(\phi + \beta - \alpha)$  を適当な塑性条件(たとえば Merchant の最大せん断応力説では  $2\phi + \beta - \alpha = \pi/2$ ) から選んで上式に代入すると各分力を求めることができる。

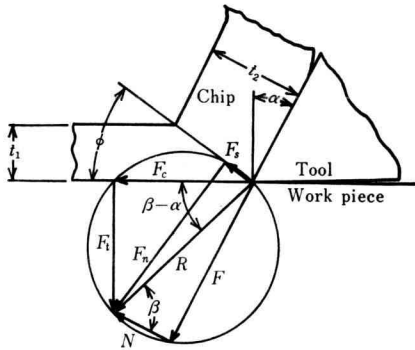


Fig. 1 Relation between forces and angles in orthogonal metal cutting

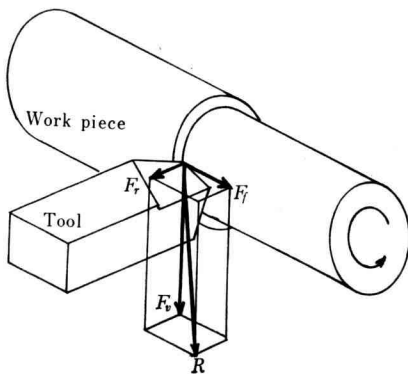


Fig. 2 Three components of cutting force

通常の旋削時の切削抵抗は主切削の他に副切削も同時に切削を行うので、このような二次元切削では表わすことができず、Fig. 2 に示すように主分力  $F_v$ 、送分力  $F_f$  および背分力  $F_r$  の三分力に分けて考える。これら三分力の中では一般に主分力が一番大きく、これを切削抵抗と略称する場合が多い。この切削抵抗を求める理論式はまだ求められていないが実用式には、クローネンベルグの式<sup>5)</sup>、ASME の式<sup>6)</sup> 等があり、また、海老原<sup>7)</sup> による

と鋼材に対し、直線刃バイトの場合には、次の式で切削抵抗を求めることができる。

$$P = K_s \cdot q \quad (3)$$

$$K_s = 230 \left( \frac{\sigma_B}{60} \right)^{0.5} \left( \frac{\delta}{76} \right)^{0.66} \left( \frac{60}{\kappa} \right)^{0.2} \left( \frac{n_s}{5} \right)^{0.12} / q^{0.1} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_B$ : 被削材の引張強さ kgf/mm<sup>2</sup>,  $\delta$ : 削り角 (90°-すくい角) (度),  $\kappa$ : 取付け角 (度),  $n_s$ : 切込みと送りの比,  $q$ : 切削面積 mm<sup>2</sup>,  $K_s$ : 比切削抵抗 kgf/mm<sup>2</sup>,  $P$ : 切削抵抗 kgf

### 3. 実験装置および実験方法

本実験に使用した旋盤は昌運工作所製 HB 500 型旋盤で、切削抵抗の測定には佐藤工機製 AST-TTM 型と称する抵抗線ひずみゲージを用いた三分力測定用切削工具動力計を使用した。その仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specifications of Dynamometer

Rated Capacity (kgf)	Vertical Force 250, Feed Force 250, Radial Force 125
Linearity	within 0.5%
Interaction	within 2%
Characteristic Frequency	1000 Hz

被削材としては機械構造用炭素鋼 S45C を使用した。その引張り強さ  $\sigma_B$ 、及びせん断強さ  $\tau_{MAX}$  は実測によれば次のとおりである。

$$\sigma_B = 65.4 \text{ kgf/mm}^2, \tau_{MAX} = 51.6 \text{ kgf/mm}^2$$

切削工具としては日立金属製 SKH 4 種 X 000 完成

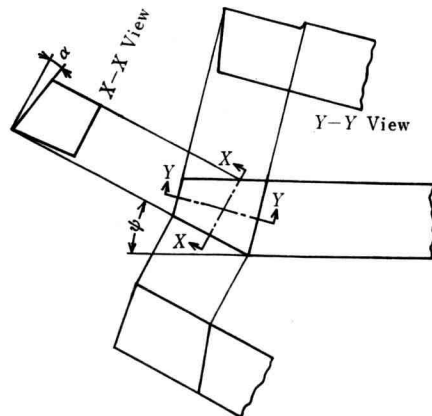


Fig. 3 Tool geometry

バイトを用い, 逃げ角と副切込み角はいずれもすべて  $5^\circ$  とし, 刃先丸みを付けないようにできるだけシャープに研磨し, 垂直すくい角  $\alpha$  を  $0^\circ$  と  $5^\circ$  の2種類についてそれぞれアプローチ角  $\psi$  を  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  と8種類に変化させて使用した。(Fig. 3)

切削条件としては, 切削速度をほぼ  $20\text{ m/min}$  に保ち (実測は  $19\sim 21\text{ m/min}$ ), 送り  $s = 1.0\text{ mm/rev}$  一定で切込み  $t = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{ mm}$ , および切込み  $t = 1.0\text{ mm}$  一定で送り  $s = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{ mm/rev}$  と変化した。

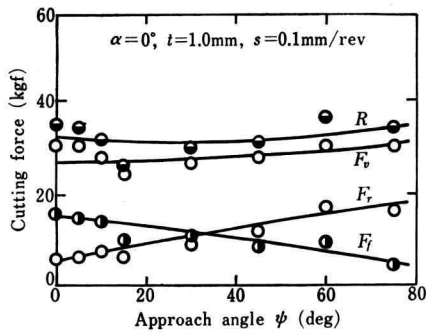


Fig. 4.1

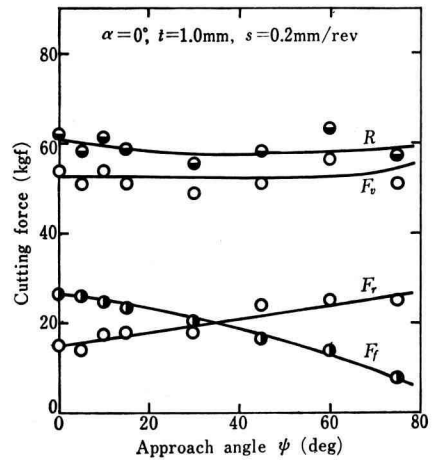


Fig. 4.2

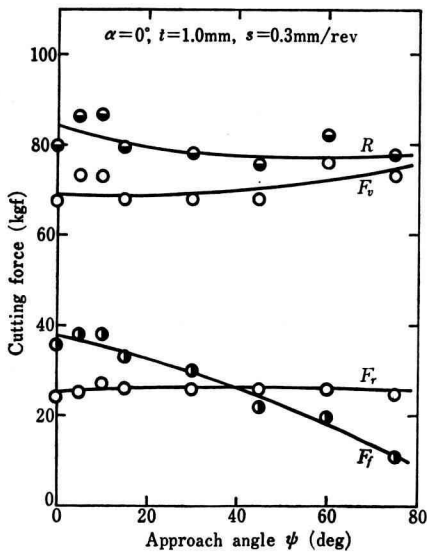


Fig. 4.3

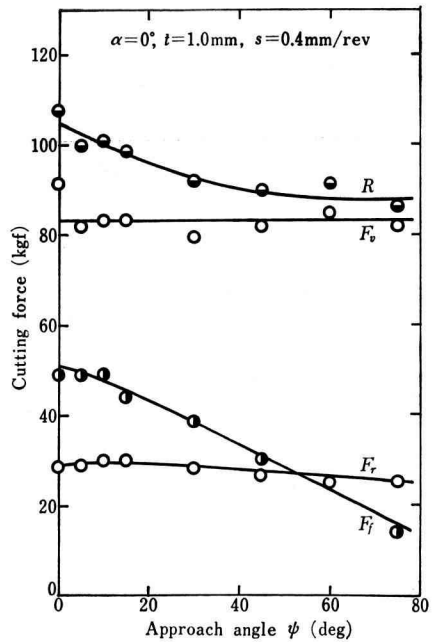


Fig. 4.4

 Fig. 4 Cutting force vs. Approach angle  $\psi$

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 三分力とアプローチ角との関係

##### 4.1.1 $\alpha=0^\circ$ , $t=1.0\text{mm}$ の場合

Fig. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 に垂直すくい角  $\alpha=0^\circ$ , 切込み  $t=1.0\text{mm}$  で送り  $s=0.1, 0.2, 0.3, 0.4\text{mm/rev}$  のおおの場合について, 三分力がアプローチ角  $\psi$  の

増加に対して変化する様子を示した。

これらの図から, 主分力  $F_v$  についてはアプローチ角  $\psi$  の増加に対して余り変化は見られないが, アプローチ角  $\psi$  の大きい所でいくぶん増加する傾向が見られる例もある。これに対し, 送分力  $F_f$ , 背分力  $F_r$  には明確な変化が見られた。まず, 送分力  $F_f$  はいずれの送りで

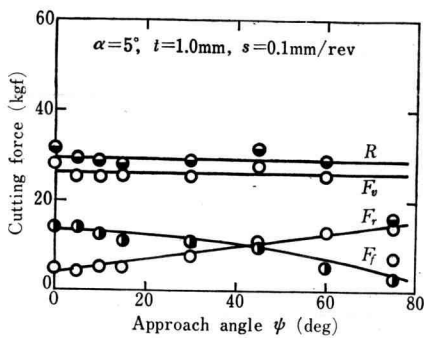


Fig. 5.1

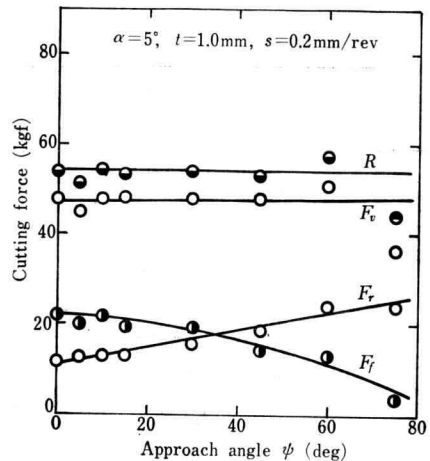


Fig. 5.2

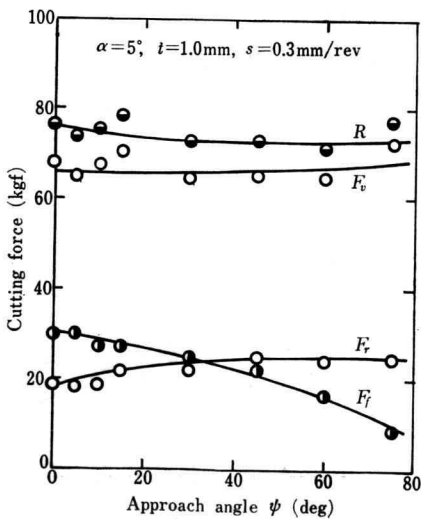


Fig. 5.3

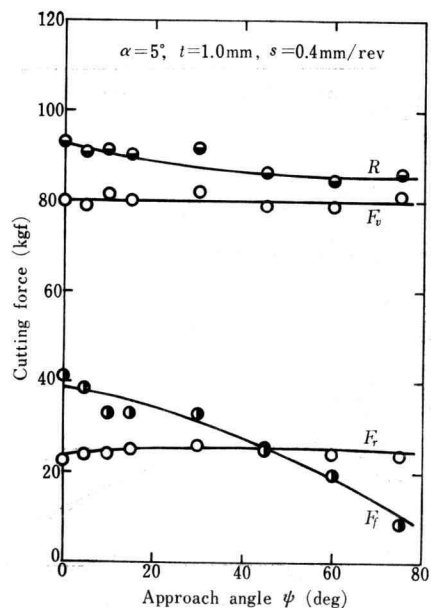


Fig. 5.4

Fig. 5 Cutting force vs. Approach angle  $\psi$

もアプローチ角  $\psi$  の増加にしたがって徐々に減少する  
 その減少の割合は各送りともアプローチ角  $\psi=0^\circ$  の場  
 合と  $\psi=75^\circ$  の場合では約 30% 弱であった。背分力  $F_r$   
 は送分力  $F_f$  とは反対の傾向を示し、アプローチ角  $\psi$  の  
 増加にしたがって増大する。しかし、この増加の傾向は  
 送り  $s$  が小さいほど大きく、送りが大きくなるにした  
 がって背分力  $F_r$  の増加する割合は小さくなり、送り  
 $s=0.4 \text{ mm/rev}$  ではアプローチ角  $\psi$  の増加に対しわず

かに減少する傾向が見られた。

また、これらの図から、三分力間の力の大小関係は各  
 送りとも、アプローチ角  $\psi$  が小さい時には、大きい順  
 に、主分力  $F_v$ 、送分力  $F_f$ 、背分力  $F_r$  であるが、アプ  
 ローチ角  $\psi$  が  $30^\circ \sim 60^\circ$  の間に送分力  $F_f$  と背分力  $F_r$   
 が等しくなる点があり、アプローチ角  $\psi$  がこれより大  
 きい所では、主分力  $F_v$ 、背分力  $F_r$ 、送分力  $F_f$  の順  
 となり送分力  $F_f$  と背分力  $F_r$  の力の大小関係が逆転

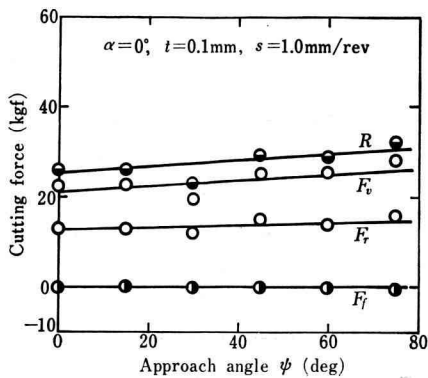


Fig. 6.1

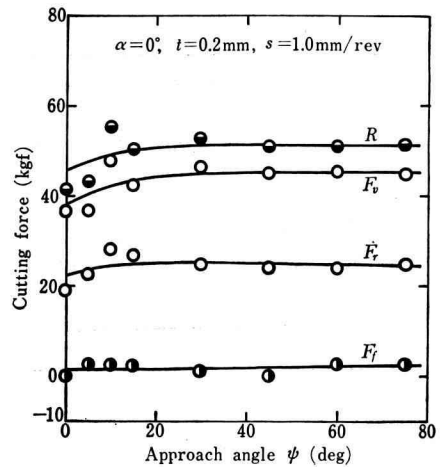


Fig. 6.2

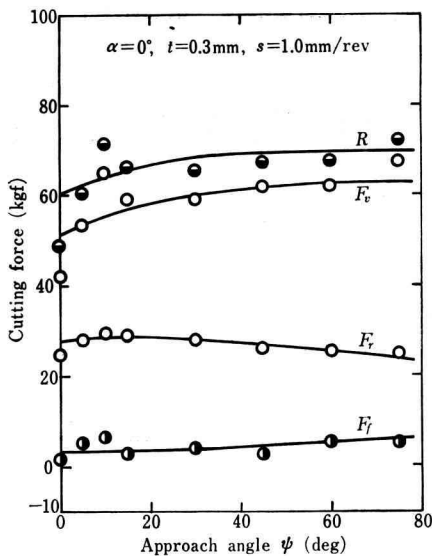


Fig. 6.3

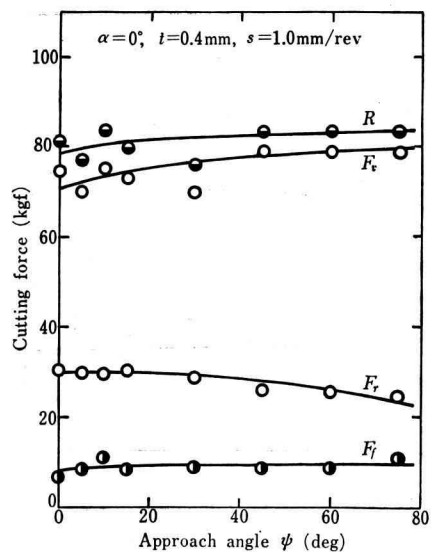


Fig. 6.4

 Fig. 6 Cutting force vs. Approach angle  $\psi$

する。

#### 4.1.2 $\alpha = 5^\circ$ , $t = 1.0 \text{ mm}$ の場合

Fig. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 に垂直すくい角  $\alpha = 5^\circ$ , 切込み  $t = 1.0 \text{ mm}$  で送り  $s = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 \text{ mm/rev}$  のおのおの場合に, 三分力がアプローチ角  $\psi$  の増加に対して変化する様子を示した。

これらの図も垂すくい角  $\alpha = 0^\circ$  の場合とはほぼ同様の傾向を示し, アプローチ角  $\psi$  の増加にしたがって, (1)

主分力  $F_v$  はあまり変化しない。(2) 送分力  $F_f$  は徐々に減少する。(3) 背分力  $F_r$  は増加する。しかし, 送り  $s$  が増大するにしたがって増加の割合は減少し, 送り  $s = 0.4 \text{ mm/rev}$  ではほぼ一定となる。(4) 三分力間の力の大小関係はアプローチ角  $\psi$  の小さい場合, 大きい順に主分力  $F_v$ , 送分力  $F_f$ , 背分力  $F_r$  であるが, アプローチ角  $\psi$  が  $30^\circ \sim 45^\circ$  の間に送分力  $F_f$  と背分力  $F_r$  が等しくなる点がありこれよりアプローチ角  $\psi$  が大

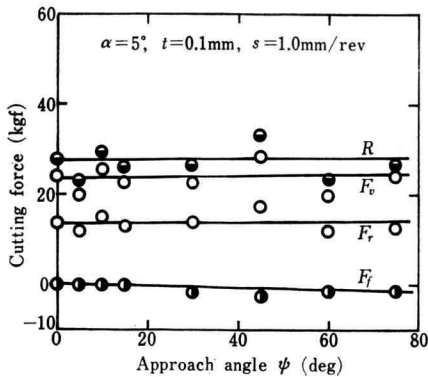


Fig. 7.1

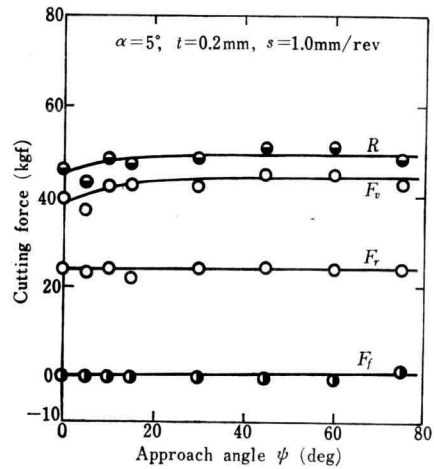


Fig. 7.2

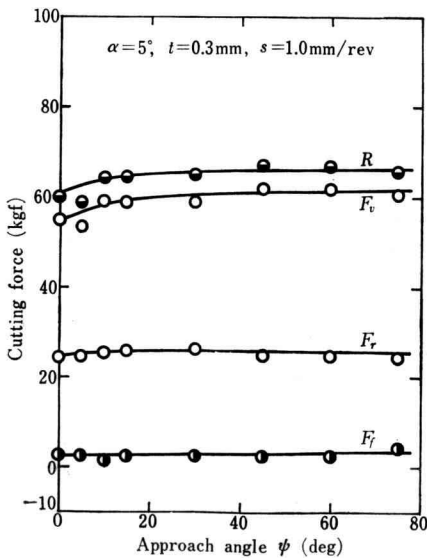


Fig. 7.3

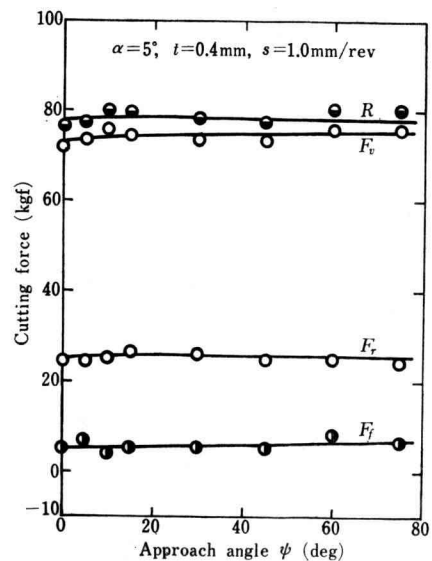


Fig. 7.4

Fig. 7 Cutting force vs. Approach angle  $\psi$

きい所では主成分  $F_v$ , 背成分  $F_r$ , 送成分  $F_f$  となり送成分  $F_f$  と背成分  $F_r$  の力の大小関係が逆転する。

#### 4.1.3 $\alpha=0^\circ$ , $s=1.0$ mm/rev の場合

Fig. 6. 1, 6. 2, 6. 3, 6. 4 に垂直すくい角  $\alpha=0^\circ$ , 送り  $s=1.0$  mm/rev で切込み  $t=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  mm のおのおの場合に, 三分力がアプローチ角  $\psi$  の増加に対して変化する様子を示した。

これらの図から, 主成分  $F_v$  はアプローチ角  $\psi$  の小さい所で増加するがあとはあまり変化しない。背成分  $F_r$  はアプローチ角  $\psi$  の増加に対し, 切込み  $t=0.1$  mm の場合ではほぼ一定であるが, 切込み  $t=0.3, 0.4$  mm の場合ではわずかに減少する。送成分  $F_f$  はアプローチ角  $\psi$  の増加に対しほぼ一定で変化しない。また, 三分力間の力の大小関係ではアプローチ角  $\psi$  の大小に関係なくどの切込みの場合にも大きい順に主成分  $F_v$ , 背成分  $F_r$ , 送成分  $F_f$  であった。

#### 4.1.4 $\alpha=5^\circ$ , $s=1.0$ mm/rev の場合

Fig. 7. 1, 7. 2, 7. 3, 7. 4 に垂直すくい角  $\alpha=5^\circ$ , 送り  $s=1.0$  mm/rev で切込み  $t=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  mm のおのおの場合に, 三分力がアプローチ角の増加に対して変化する様子を示した。

これらの図も垂直すくい角  $\alpha=0^\circ$  の場合とほぼ同様の傾向を示した。すなわち, (1) 主成分  $F_v$  はアプローチ角  $\psi$  の小さい所で増加する傾向があるが, あとはあまり変化しない。(2) 背成分  $F_r$  はアプローチ角  $\psi$  の増加に対して変化せずほぼ一定である。(3) 送成分  $F_f$  もアプローチ角  $\psi$  の増加に対し変化せずほぼ一定である。(4) 三分力間の力の大小関係は大きい順に主成分  $F_v$ , 背成分  $F_r$ , 送成分  $F_f$  でアプローチ角の大小に関係しない。また切込み  $t=0.1$  mm の場合, アプローチ角  $\psi$  の大きい所ではいわゆる食い付きと言われている送成分  $F_f$  が負となる傾向が見られた。

以上四つの場合をまとめて切りくず断面係数 ( $n_s=t/s$ ) が  $0.1\sim0.4$  のように小さい場合と  $2.5\sim10$  のように大きい場合とは三分力の変化の様子が異なることが分かった。

#### 4.2 送成分と背成分との関係

Fig. 4. 1~4. 4 および Fig. 5. 1~5. 4 の三分力の中で, 送成分  $F_f$  と背成分  $F_r$  との関係に注目してさらに検討してみた。これらの二成分間の関係を明らかにするために, Fig. 8, Fig. 9 に示すように横軸に背成分  $F_r$  を, 縦軸に送成分  $F_f$  をとり, 実験結果をこの平面上に表わすと, おおのの点はある切削条件下における送成分  $F_f$  と背成分  $F_r$  との合力のベクトルの先端を表すこと

になる。これらの図によると合力の先端はいずれの送りに対してもほぼ左上から右下へと変化する一連の点で表わされる。

これらのベクトル線図から次のような傾向が見られた。(1) いずれの送りに対しても, アプローチ角  $\psi$  の増加にしたがいその合力の先端がある傾きをもつほぼ一つの直線で表わされる。(2) この直線の傾きは送り  $s$  によって異なり, 送り  $s$  が  $0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  mm/rev と増加するにしたがいその直線の傾きもまた増加する。このことは, 送りが大きいときには小さいときと比べてアプローチ角  $\psi$  が変化した場合, 背成分  $F_r$  成分より送成分  $F_f$  成分の方の変化が大きいことを示している。

次に, 背成分  $F_r$  と送成分  $F_f$  の合力のベクトルが  $F_r$  軸となす角を  $\theta$  として, この  $\theta$  に注目してみる。 $\theta$  は切削抵抗の水平分力がシャンクとなす角に相当する。Fig. 8, Fig. 9 では  $\theta$  は両すくい角, 各送りともアプローチ角  $\psi$  の増加にしたがって減少するとみられるので, これらの関係を明らかにするために Fig. 10, Fig. 11 にアプローチ角  $\psi$  と  $\theta$  との関係を各送りについて示した。

これらの図によると, アプローチ角  $\psi$  の増加に対し,  $\theta$  はほぼ  $70^\circ$  から  $15^\circ$  の間を変化し, 各送り  $s$  とも直線的に減少する。これら直線の傾きは送り  $s$  の小さい

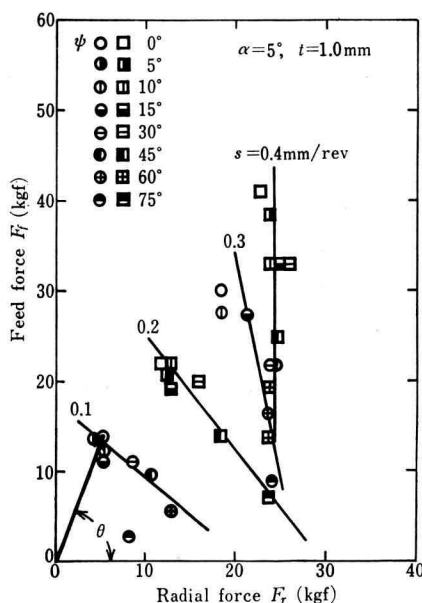


Fig. 8 Vector Representation of Horizontal Components

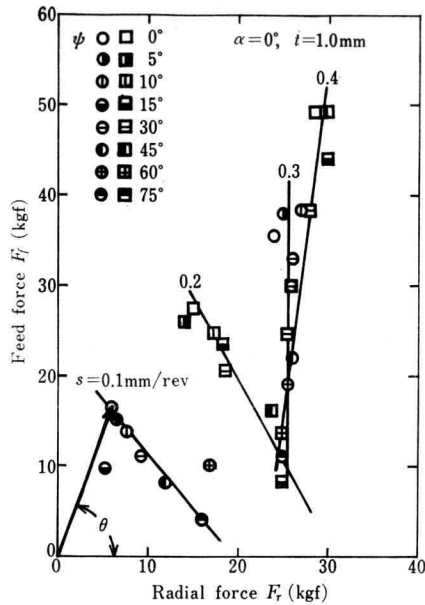
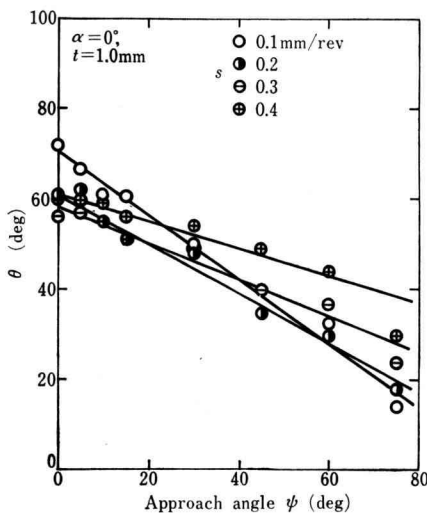
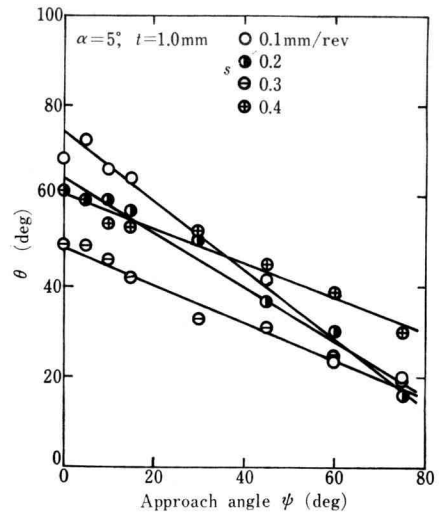


Fig. 9 Vector Representation of Horizontal Components

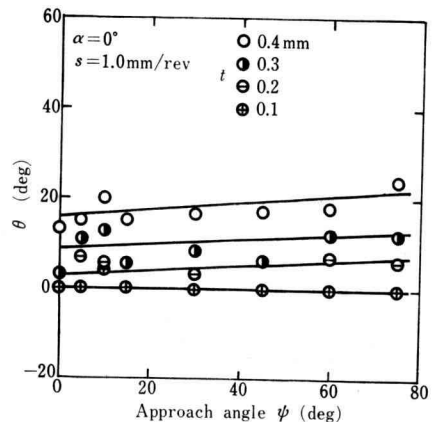
Fig. 10 Approach angle  $\psi$  vs.  $\theta$ 

ほど大きく、送り  $s$  が増加するにしたがって小さくなる。すなわち、送り  $s$  が小さいほどアプローチ角  $\psi$  の変化に対する  $\theta$  の変化の割合は大きい。

以上述べてきたことは送り  $s$  に対して切込み  $t$  が大きい場合 ( $t/s=2.5\sim 10$ ) であるが、送り  $s$  に対し切込み  $t$

Fig. 11 Approach angle  $\psi$  vs.  $\theta$ 

が小さい場合 ( $t/s=0.1\sim 0.4$ ) にはこれらとは異った様子を示す。一例として、 $\theta$  とアプローチ角  $\psi$  との関係を Fig. 12, Fig. 13 に示す。これらの図によると (1) アプローチ角  $\psi$  の変化に対して  $\theta$  はほぼ  $20^\circ\sim 10^\circ$  の間を変化する。(2) 各切込みともアプローチ角  $\psi$  の増加に対して  $\theta$  は正比例関係にありわずかに大きくなる。(3) 同一アプローチ角  $\psi$  の場合には切込み  $t$  の大きいほど  $\theta$  も大きい。

Fig. 12 Approach angle  $\psi$  vs.  $\theta$ 

#### 4.3 海老原の実験式との比較

2で述べた式 (3), (4) を用いて計算した切削抵抗と、各種切削条件の組合わせにより得られた 160 個の実験値



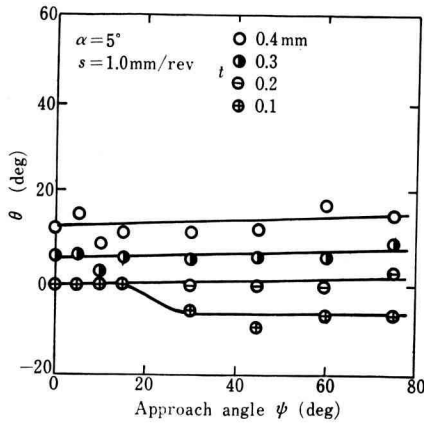
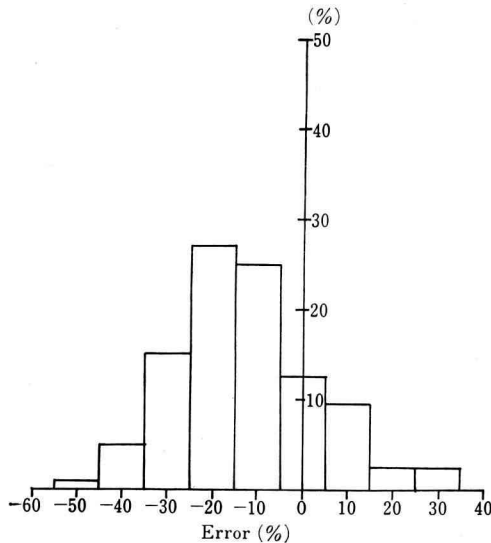
Fig. 13 Approach angle  $\psi$  vs.  $\theta$ 

Fig. 14 Frequency distribution of Error

(主分力  $F_\theta$ ) との誤差の分布を Fig. 14 に示す。横軸は誤差の % で縦軸は指示誤差に対しそれぞれ 5% 以内の実験値数の全実験数に対する % である。これによると誤差  $-20\% \pm 5\%$  がいちばん多く、つづいて  $-10\% \pm 5\%$  で、これらで約半数以上を占める。全般にマイナスの誤差が多く実験値に比べて計算値の方が大きく出ることが多かったことを示している。同様な実験式との比較を行

った益子<sup>8)</sup>によると 112 個の実験値のうち  $\pm 15\%$  以内の誤差で全数のうちの約 91% が合っており、この例と比べてみても本実験は必ずしも海老原の実験式とは良い一致を示したとは言えないが、これは海老原の式で取り付け角が標準では  $60^\circ$  のところ本実験では  $90^\circ \sim 15^\circ$ 、削り角が標準では  $76^\circ$  のところ本実験では  $90^\circ$  と  $85^\circ$ 、切込みと送りの比が標準では 5 のところ本実験では 0.1~10 と広範囲に変化したためである程度やむを得ないであろう。

## 5. 結 言

- (1) アプローチ角  $\psi$  の増加に対する三分力の変化は、切込み  $t$  と送り  $s$  の比が大きい場合 ( $t/s=2.5 \sim 10$ ) と小さい場合 ( $t/s=0.1 \sim 0.4$ ) とでは様子が異なる。
- (2) 切込みと送りの比が大きい場合には、アプローチ角  $\psi$  の増加に対して送分力は減少し、背分力は増大する。また、アプローチ角  $\psi$  の小さい場合と大きい場合とでは送分力と背分力との力の大小関係が逆転する。
- (3) 切込みと送りの比が小さい場合には、アプローチ角  $\psi$  の増加に対して三分力の変化はほとんどみられない。また、三分力間の力の大小関係は大きい順に、主分力、背分力、送分力である。
- (4) 切込みと送りの比が大きい場合には、アプローチ角  $\psi$  の増加に対して  $\theta (= \tan^{-1} F_t/F_r)$  は約  $70^\circ$  から  $20^\circ$  へと減少し、送りが小さいほど変化が大きい。
- (5) 切込みと送りの比が小さい場合には、アプローチ角  $\psi$  の増加に対して  $\theta$  はわずかに増大する。
- (6) 海老原の実験式による計算値と今回の実験値との比較では全般に計算値の方が大きくなった。

## 文 献

- 1) Piispanen, Vaino, *J. Appl. Phys.*, 19-10 (1948), 876.
- 2) Merchant, M. Eugene, *J. Appl. phys.*, 16-6 (1945), 267.
- 3) J. T. Lapsley, R. C. Grassi & E. C. Thomsen, *Trans ASME*, 72, (1950-10)
- 4) M. C. Shaw, *J. Appl. Phys.*, 21 (1950-6)
- 5) Kronenberg, *Grundzüge der Zerspanungslehre*, (1927)
- 6) ASME, *Manual on Cutting of Metals*, (1939)
- 7) 海老原, マシナリー, 臨時増刊 No. 7 (1950)
- 8) 益子, 機誌, 58-438 (昭 30-7), 523