

# 1. 目的

現在製造されている製品の構成材料のすべては、機械加工や溶融加工、塑性加工などの加工を受ける。その中で切削加工は、製品に高い精度を要求することが可能であり、また加工の自由度も広いとため、多くの機械部品の、中でも主要な部分に切削加工品が使用されることが多い。また、この地域には多くの機械工具メーカーや機械工作機メーカーが密集しているため、切削加工についての学習はとかく重要である。

金属切削における切削抵抗は切削理論の研究、材料の被削性の試験、切削油剤の性能試験、切削条件の設定、加工物や工具、および工作機械に与える制度上の問題等、広い範囲に関連する重要な事項である。また、切削機構を考えるには、材料変形を支配するせん断角を知ることが重要である。

本実験では、旋削加工中の切削抵抗を測定するとともに、生成した切屑の厚さを測定することによりせん断角を推定する。そして、切削抵抗とせん断角の測定結果を既存の切削理論と比較して切削機構を考察する。また、材料の被削性や切屑における油剤の効果などについて検討する。

# 2. 切削理論

旋盤による外周削りでは、バイト(工具)の前切刃角および上すくい角が  $0^\circ$  に近く、かつ半径方向切り込み角  $b$  が送り  $f$  に比べて大きくなれば、2次元的に切削がなされるとみなすことができる。切屑が図1に示される分類のうちの流れ型で、せん断部分が単一せん断面上であると仮定して図2の2次元切屑のモデルについて考える。

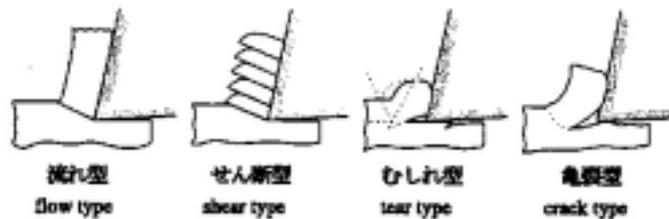


図1 切屑の分類

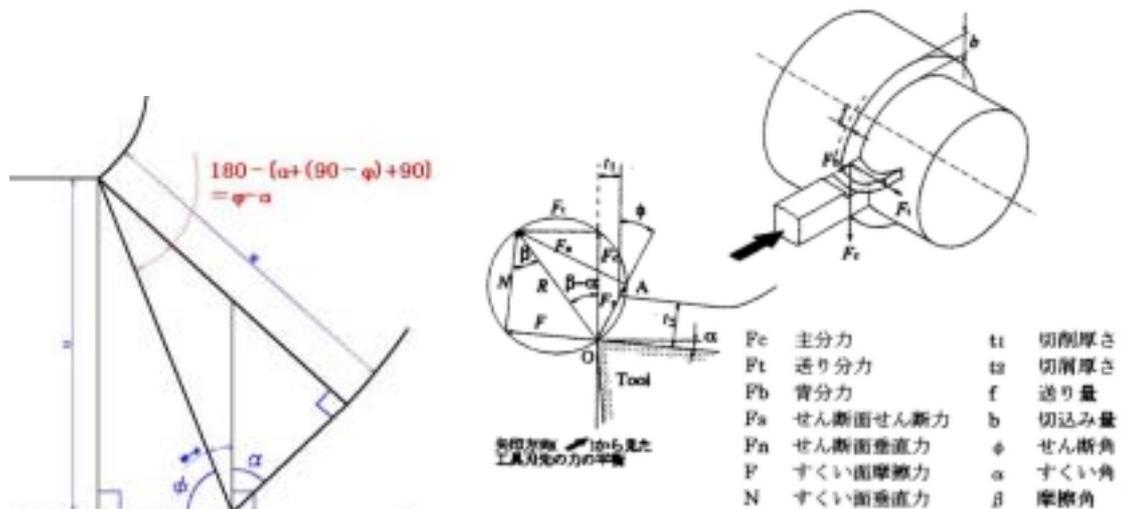


図2 2次元切削モデル

## 2.1 せん断角と切削力の基礎的關係

工具すくい角  $\phi$  , 切削厚さ  $t_1$  および切屑厚さ  $t_2$  を用いれば, 幾何学的な關係より ( 図2 参照 ) 次式の切削比  $r_c$  が得られる .

$$r_c = \frac{t_1}{t_2} = \frac{OA \sin \phi}{OA \cos(\phi - \alpha)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow r_c = \frac{\sin \phi}{\cos \phi \cdot \cos \alpha + \sin \phi \cdot \sin \alpha} = \frac{\tan \phi}{\cos \alpha + \tan \phi \cdot \sin \alpha}$$

$$\Leftrightarrow (1 - r_c \sin \alpha) \tan \phi = r_c \cos \alpha$$

$$\therefore \tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (2)$$

せん断ひずみ  $\gamma$  は図3の幾何学的關係からせん断角  $\phi$  とすくい角  $\alpha$  を用いて次式のように求められる .

$$\gamma = \frac{\overline{dd'}}{ed} = \tan(90 - \phi) + \tan(\phi - \alpha) = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha) \quad (3)$$

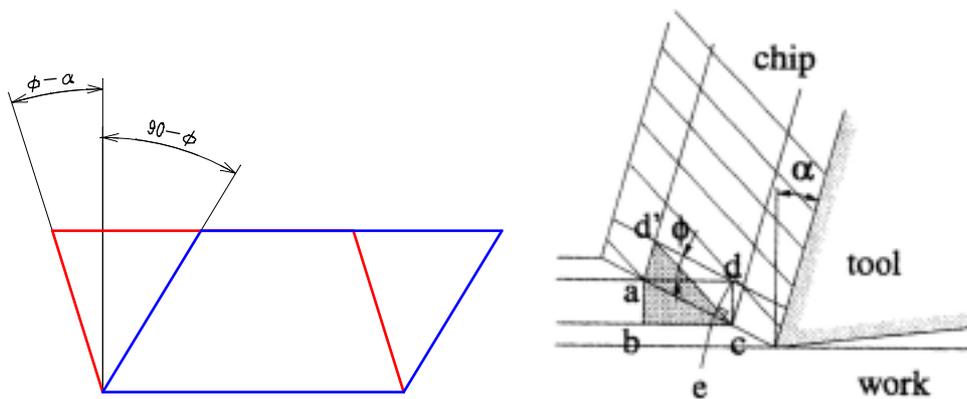


図3 2次元切削におけるせん断変形機構

2次元切削での切削抵抗は主成分力  $F_c$  , 送り成分力  $F_t$  として測定されるから, これらを用いればすくい面摩擦力  $F$  , すくい面垂直荷重  $N$  , せん断面せん断力  $F_s$  およびせん断面垂直力  $F_n$  が次式で計算できる .

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (4)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (5)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (6)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (7)$$

[ 説明 ]

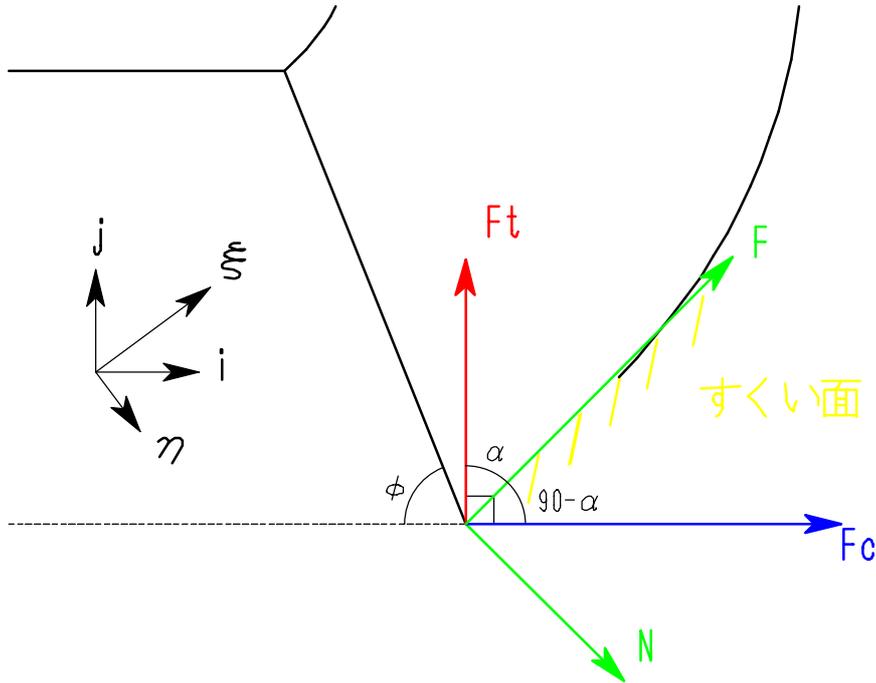


図4 すくい面にかかる摩擦力と垂直力

図4のように工具にかかる力を回転方向の主分力  $F_c$  と送り方向の送り分力  $F_t$  に2成分に分ける．周方向に  $i$  ベクトル，送り方向に  $j$  ベクトル，すくい面方向に  $\xi$  ベクトル，すくい面に垂直方向に  $\eta$  ベクトルをとる．

すくい角を  $\phi$  とすると， $i$  と  $\xi$  の挟角は  $90^\circ - \alpha$  であるので， $F_c$  は，

$$\begin{aligned} F_c &= \xi \cdot F_c \cdot \cos(90^\circ - \alpha) + \eta \cdot F_c \cdot \sin(90^\circ - \alpha) \\ &= \xi \cdot F_c \cdot \sin \alpha + \eta \cdot F_c \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad \dots$$

同様に，送り方向とすくい面との角度はすくい角  $\alpha$  で定義されているので， $F_t$  は，

$$F_t = \xi \cdot F_t \cdot \cos \alpha - \eta \cdot F_t \cdot \sin \alpha \quad \dots$$

よって， $F_c$  と  $F_t$  の合力ベクトルは  $F$  より，

$$F_c + F_t = \xi \cdot (F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \cos \alpha) + \eta \cdot (F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha) \quad \dots$$

ところで，主分力ベクトル  $F_c$  と送り分力ベクトル  $F_t$  の合力ベクトルは，すくい面摩擦力とすくい面垂直力の合力ベクトルと等しくなければならないので，

$$F_c + F_t = \xi \cdot F + \eta \cdot N \quad \dots$$

$\xi, \eta$  は一次独立であるので， $F, N$  のおのこのベクトル成分比較より，

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (4)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (5)$$

が得られる．

説明終わり

[ 説明 ]

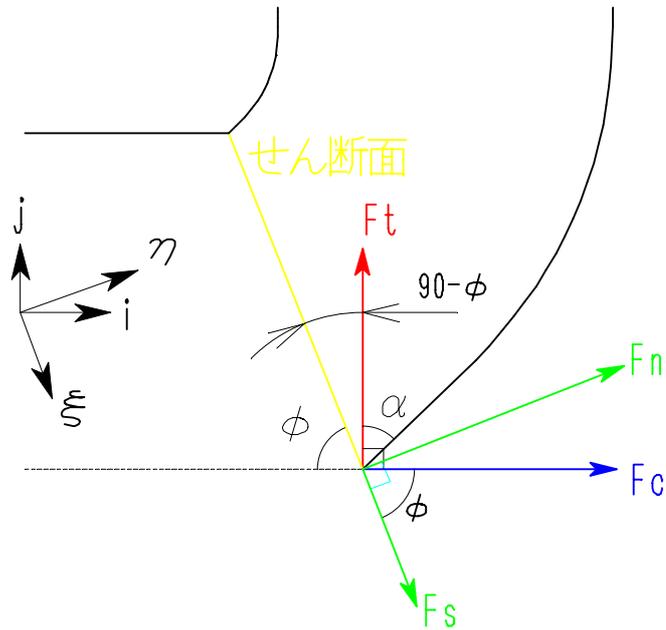


図5 せん断面にかかるせん断力と垂直力

図5のように工具にかかる力を回転方向の主分力  $F_c$  と送り方向の送り分力  $F_t$  に2成分に分ける．周方向に  $i$  ベクトル，送り方向に  $j$  ベクトル，せん断面方向に  $\xi$  ベクトル，せん断面に垂直方向に  $\eta$  ベクトルをとる．

せん断面と周方向のなすせん断角を  $\phi$  とすると，対頂角は等しいので  $F_c$  と  $F_s$  の挟角は  $\phi$  である．したがって， $F_c$  は，

$$F_c = \xi \cdot F_c \cdot \cos \phi + \eta \cdot F_c \cdot \sin \phi \quad \dots$$

同様に，送り方向とせん断面とのなす角は，せん断角  $\phi$  を用いて， $90^\circ - \phi$  と表すことができる．したがって  $F_t$  は，

$$\begin{aligned} F_t &= -\xi \cdot F_t \cdot \cos(90 - \phi) + \eta \cdot F_t \cdot \sin(90 - \phi) \quad \dots \\ &= -\xi \cdot F_t \cdot \sin \phi + \eta \cdot F_t \cdot \cos \phi \end{aligned}$$

よって， $F_c$  と  $F_t$  の合力ベクトルは  $F$  より，

$$F_c + F_t = \xi \cdot (F_c \cdot \cos \phi - F_t \cdot \sin \phi) + \eta \cdot (F_c \cdot \sin \phi + F_t \cdot \cos \phi) \quad \dots$$

ところで，主分力ベクトル  $F_c$  と送り分力ベクトル  $F_t$  の合力ベクトルは，せん断面せん断力とせん断面垂直力の合力ベクトルと等しくなければならないので，

$$F_c + F_t = \xi \cdot F_s - \eta \cdot F_n \quad \dots$$

$\xi, \eta$  は一次独立であるので， $F_c, F_t$  のおのおののベクトル成分比較より，

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (6)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (7)$$

説明終わり

また，せん断面の面積  $A_s$  は  $A_s = t_1 b / \sin \phi$  であるから，せん断面における平均せん断応力を  $\tau_s$ ，平均垂直応力を  $\sigma_s$  とすれば，それぞれ次式で計算できる．

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi}{t_1 b} \quad (8)$$

$$\sigma_s = \frac{F_n}{A_s} = \frac{(F_c \sin \phi - F_t \cos \phi) \sin \phi}{t_1 b} \quad (9)$$

さらに，工具すくい面上の摩擦係数を  $\mu \equiv F/N$ ，摩擦角を  $\beta$  を導入すると，

$$\mu = \tan \beta = \frac{F}{N} = \frac{F_c \tan \alpha + F_t}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (10)$$

となる．つまり，切削中の主分力  $F_c$ ，送り分力  $F_t$ ，および切屑厚さ  $t_2$  を測定することで，せん断面の応力状態およびすくい面の摩擦状態を推測することができる．

## 2.2 切削の消費エネルギー

単位切削容積あたりの仕事量は切削速度を  $V_c$  とすると，

$$w = \frac{F_c V_c}{V_c b t_1} = \frac{F_c}{b t_1} \quad (11)$$

と表される．これは単位切削断面積当たりの切削抵抗を表すことから，比切削抵抗と呼ばれる．一般に切削に必要な動力は次のようなエネルギーとして消費される．

- (1) せん断面におけるせん断エネルギー  $w_s$
- (2) 工具すくい面における摩擦エネルギー  $w_f$
- (3) 新しく新生面に生じさせるための表面エネルギー  $w_a$
- (4) せん断面の通過に際して運動量変化を生じさせるためのエネルギー  $w_m$

通常は(3),(4)のエネルギーは大変小さく無視できる．単位容積あたりのせん断エネルギー  $w_s$  とすくい面摩擦エネルギー  $w_f$  はそれぞれ次式で計算できる．

$$w_s = \tau_s \gamma \quad (12)$$

$$w_f = \frac{F r_c}{b t_1} \quad (13)$$

## 2.3 切削方程式

切削合力  $R$  は図2より

$$R = \frac{F_s}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{\tau_s b t_1}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (14)$$

であるから，被削材のせん断応力  $\tau_s$ ，せん断角  $\phi$ ，すくい角  $\alpha$ ，およびすくい面上の摩擦角  $\beta$  の値が明らかになれば，切削合力を理論的に求めることができる．切削理論は主としてこれらの値を決定する諸因子および相互関係を解明しようという理論である．せん断面せん断応力  $\tau_s$  は被削材の降伏せん断強さ  $k$  と強い関連があるが，材料の加工硬化およびせん断発熱の

影響を受け変化する。また，実験結果よりせん断角  $\phi$ ，すくい角  $\alpha$ ，および摩擦角  $\beta$  の間に強い相互関係のあることが知られている。これらの関係  $\phi = \phi(\alpha, \beta)$  は切削方程式と呼ばれ，切削理論の根幹をなす関係式であることから古くから研究が行われてきた。代表的な切削方程式として Merchant の切削方程式

$$2\phi + \beta - \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

および，Lee-Shaffer の切削方程式

$$\phi + \beta - \alpha = \frac{\pi}{4} \quad (16)$$

がある。Merchant は材料が完全に剛完全塑性体であると仮定し，最小仕事の原理により切削方程式を導出した。Lee と Shaffer はせん断面以外も変形は少ないが塑性状態にあると考え，すべり線理論による解析を行った。

### 3 . 実験方法

#### 3 . 1 実験内容

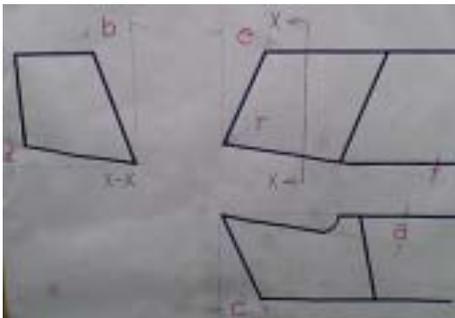
普通旋盤を用い，刃物台に動力計を取り付け，旋削加工中に工具に作用する切削抵抗を測定する。工具材種は高速度工具鋼を用い，被削材には丸棒の炭素鋼，ステンレス鋼，アルミ合金など機械的性質の異なるいくつかの材料について比較を行う。また，切削油材を供給する場合としない場合の比較も行う。

せん断角の推定は，生成された切屑を採取してその厚さを測定することで行う。

#### 3 . 2 実験条件

工具材種：高速度工具鋼 SKH4A  
 被削材種： 機械構造用炭素鋼 S45C  
           ステンレス鋼 SUS304  
           アルミニウム合金 A2017

工具形状



a : 上スクイ角  $0^\circ$   
 b : 横スクイ角  $25.02^\circ$   
 c : 前二ゲ角  $8.86^\circ$   
 d : 横二ゲ角  $7.96^\circ$   
 e : 前切刃角  $8.98^\circ$   
 f : 横切刃角  $0^\circ$   
 $r_{mm}$  : ノーズ半径  $0 \text{ mm}$

切込み角： $90^\circ$

切込み量： $3.0 \text{ mm}$

送り速度： $0.10 \text{ mm/rev}$

切削速度： $1.4 \times 10^4 \text{ mm/min}$  (被削材外径： $55 \text{ mm}$ ，主軸回転数： $83 \text{ rpm}$ )

切削油材：マシン油 G9

### 3.3 切削抵抗の測定手順

切削抵抗の測定には、弾性環を利用した2成分動力計を用いる。弾性環のたわみ(歪)は、弾性環に貼り付けられた歪ゲージ(金属細線)も電気抵抗変化として検出される。理想的には2分力はそれぞれ独立して測定可能であるが、固定部の影響や形状誤差などにより測定結果には相互干渉が生じる。主分力、背分力および送り分力方向の歪の測定結果をそれぞれ $\varepsilon_c$ 、 $\varepsilon_t$ (単位は $\mu$  strain)とすると、本実験で使用する動力計の相互干渉は次式により補正することができ、各分力(単位はN)が検出される。

$$\left. \begin{aligned} F_C &= 3.04\varepsilon_c \\ F_N &= 0.82\varepsilon_t \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

実験の手順は以下の通りである。

- (1) バイトの刃先を被削材外周面に当て、送りハンドルの目盛を0に合わせる。
- (2) バイトを被削材と干渉しない位置まで移動し、設定切り込み量に合わせる。
- (3) 回転数、送り速度等の設定を確認した後、旋盤を移動し自動送りをかける。
- (4) 切削が始まると同時に記録計の紙送りをスタートさせる。また、切削油材を工具すくい面に途切れないように供給し続ける。(油材使用被削材)
- (5) 15秒程度切削したら自動送りを止め、すみやかにバイトを被削材から離す。記録計の紙送りは切削が終わってからも5秒程度続けてゼロ点を記録する。
- (6) 動力計のキャリブレーション(較正)信号を記録する。
- (7) 加工条件によっては構成刃先が生じるので、その有無を確認する。
- (8) 被削材を取り替え、手順(1)から繰り返す。

### 3.4 切屑厚さの測定

切削により生じた切屑を回収して、その厚さを測定する。また、切屑の形態が図1のどの型に対応するかを確認する。切削開始から数秒間と切削終了直前は、送り量の変化などにより安定した切削が行われないので、その部分に対応する切屑は捨て、残りの切屑により厚さの測定を行う。切屑厚さの測定方法は次の2つの方法を用いる。

<直接法> ポイントマイクロメータを使用して厚さを直接測定する。切屑は表面の凹凸が大きくかつ湾曲があるため、多くの標本をとり測定を行う必要がある。

<間接法> 適当な長さの標本を作成し、その長さ $l$ と質量 $W$ を測定する。標本を直方体と近似すれば、被削材の密度 $\rho$ を用いて次式から厚さ $t_2$ を算出できる。

$$t_2 = \frac{W}{\rho lb} \quad (18)$$

## 4 . 測定結果とデータ整理

### 4 . 1 測定値

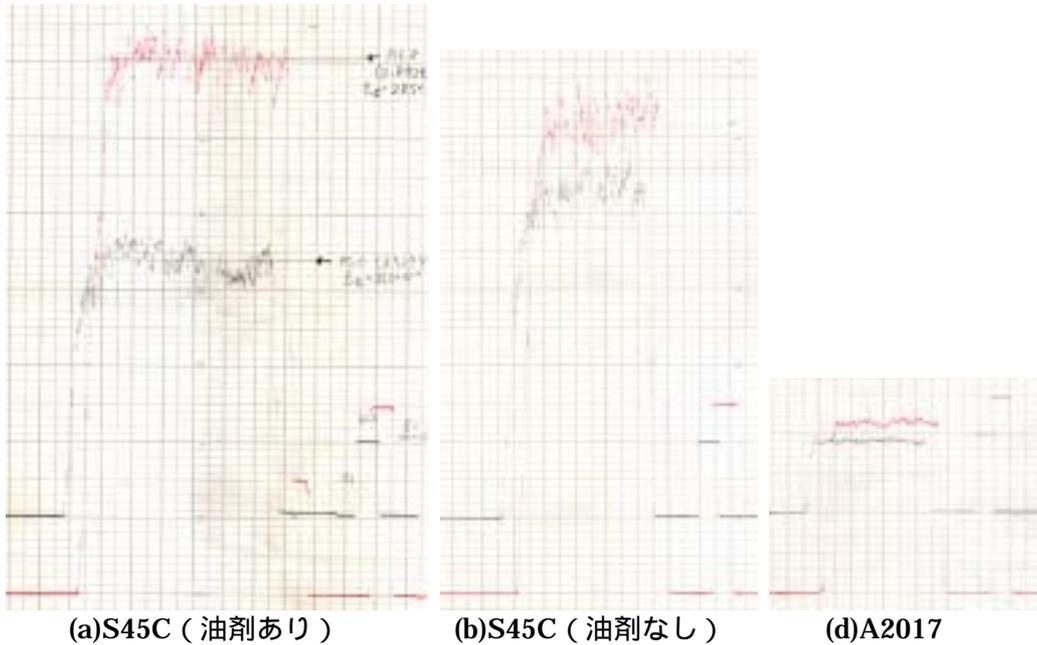


図7 動力計グラフ

表1 主分力方向歪と送り分力方向歪

被削材種	S45C(油剤あり)	S45C(油剤なし)	SUS304	A2017
動力計主分力方向歪 $\epsilon_c [\times 10^{-6}]$	285	250	255	83
動力計送り分力方向歪 $\epsilon_f [\times 10^{-6}]$	353	429	474	96

図7が動力計の記録したグラフである．赤が主分力方向の信号，黒が送り分力方向の信号である．残念ながら SUS304 のグラフは入手できなかったため記載はしていない．この図7のグラフから主分力方向歪と送り分力方向歪を読み取るためのキャリブレーションがグ計測グラフ右側の測定値である．今回のキャリブレーションの値は  $\epsilon = 100 \times 10^{-6}$  である．この値と比較して得た主分力方向歪と送り分力方向歪の値を表1に示す．

図7および表1の値を見ても分かる通り，S45Cにおいて油剤の有無による違いは，油剤が無いと送り分力方向歪は増し，主分力方向歪は減少している．異種材料においての違いは，アルミニウム合金は主分力方向歪，送り分力方向歪の2方向ともに他の2種に比べひずみが小さく，かつ記録したグラフの変動値も小さい．SUS304は送り分力方向歪が今回使用した被削材種のなかで最大であるが，主分力方向歪はS45C(油剤あり)よりも下回っている．

次に，3.4節の通り，切屑を集めて切屑厚さの値を得る．直接法は40箇所を測定し，その平均値と標準偏差を求め95%信頼区間(信頼水準95%の信頼区間)も求める．

ちなみに標準偏差は次式で求まる．

$$\text{標準偏差： } S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (19)$$

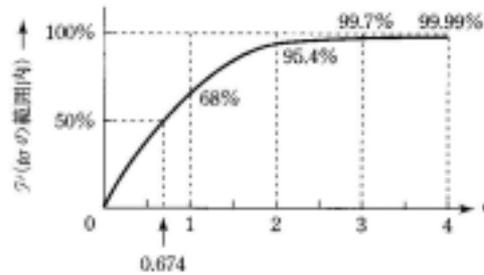
$x$  : 標本の値，  $\bar{x}$  : 標本の平均，  $n$  : 標本数

また，信頼区間は，

$$\bar{x} - c \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \leq x \leq \bar{x} + c \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

で求めることができる。ここで  $c$  の値は、 $t$  分布表より得られる値であり、信頼水準 95% では、 $c = 2.02$  である。

以降、 $k_c \equiv c \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$  とおく。



c	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
P(%)	0	20	38	55	68	79	87	92	95.4	98.8	99.7	99.96	99.99

図 8 信頼限界

表 2 に測定（直接法）によって得られた切屑厚さの平均値  $\bar{t}_2$ ，切屑厚さの標準偏差  $S$ ，間接法に必要な切屑標本の長さ(合計)  $l$ ，切屑標本の質量(合計)  $W$ ，および測定より得られた  $l, W$  の値と実験条件である切込み量  $b = 3.0$  [mm] を式(18)に代入して得られる間接法切屑厚さ  $t_2$  の値を示す。ただし、間接法切屑厚さ  $t_2$  を求める際、式(18)に代入する金属の密度の値は次の定められた値を用いるものとする。

$$\rho_{S45C} = 7870[\text{kg}/\text{m}^3], \rho_{SUS304} = 7870[\text{kg}/\text{m}^3], \rho_{A2017} = 2700[\text{kg}/\text{m}^3]$$

表 2 切屑測定値

被削材種	S45C(油あり)	S45C(油なし)	SUS304	A2017
切屑厚さの平均 $\bar{t}_2$ [mm]	0.242	0.254	0.224	0.182
切屑厚さの標準偏差 $S$ [mm]	0.0221	0.0227	0.0412	0.0101
切屑標本の長さ(合計) $l$ [mm]	453.25	450.85	506.45	169.95
切屑標本の質量(合計) [g]	1.891	1.913	2.087	0.192
間接法による切屑厚さ $t_2$ [mm]	0.1767	0.1797	0.1745	0.1395

#### 4.2 切削抵抗，摩擦角

続いて、表 2 で得られたそれぞれの値を用いて主分力  $F_c$ ，送り分力  $F_f$ ，すくい面摩擦力  $F$ ，すくい面垂直力  $N$ ，すくい面上の摩擦係数  $\mu$  および摩擦角 を表 3 に求める。

主分力  $F_c$ ，送り分力  $F_f$  を求めるにあたっては式(17)による干涉の補正式に表 1 の測定により得られた主分力方向歪  $\varepsilon_c$ ，送り分力方向歪  $\varepsilon_f$  をそれぞれ代入して得る。

すくい面摩擦力  $F$  およびすくい面垂直力  $N$  を求めるにあたっては、式(4)、式(5)にそれぞれ前述の主分力  $F_c$ ，送り分力  $F_f$  を代入して得る。ただし、式(4)、式(5)におけるすくい角 は、今回使用した工具により決定しており、3.2 節でも述べたとおり  $\alpha = 25.02[\text{deg}]$  ( $= 0.4367[\text{rad}]$ ) である。

すくい面摩擦力  $F$  とすくい面垂直力  $N$  が求めれば、それらの値を式(10)に代入して摩擦係数  $\mu$  と摩擦角  $\beta$  を求める。ただし、摩擦角  $\beta$  を求める際に式(10)は以下の逆関数の形にして求めることとなる。

$$\text{式(10)} \Leftrightarrow \beta = \text{Tan}^{-1}(F/N) = \text{Tan}^{-1}\mu \quad (10)'$$

表3 計算結果1

被削材種	S45C(油あり)	S45C(油なし)	SUS304	A2017
主分力 $F_c$ [N]	866	760	775	250
送り分力 $F_t$ [N]	289	352	389	79
すくい面摩擦力 $F$ [N]	629	640	680	180
すくい面垂直力 $N$ [N]	663	540	538	200
摩擦係数 $\mu$	0.949	1.19	1.26	0.91
摩擦角 [deg]	43.5	49.9	51.6	42

注意：計算において有効数字にこだわることは必要であるが、例えば A2017 の  $F_c$  の値のように 250 は本来、 $2.5 \times 10^2$  と書くべきところである。しかし、表で重要視すべきことは有効数字ではなく値の比較のしやすさであると私は考えるので、そのような記述は以下行わない。

#### 4.3 せん断角，せん断歪，切削エネルギー

次に、せん断面せん断力  $F_s$ ，せん断面垂直力  $F_n$ ，せん断面せん断応力  $\tau_s$  およびせん断面垂直応力  $\sigma_s$  を求める。表4に以下の式および値を用いて計算を行う。

まず、式(20)に表1,表2の値を代入して直接法の切屑厚さ  $t_2$  をもとめる。

次に切削比  $r_c$  を求める。式(1)に、実験条件の切削厚さ  $t_1 = 0.10$  [mm] および直接法・間接法の両法における切屑厚さ  $t_2$  を代入して求める。なお、以降の計算は直接法，間接法の両法における値を算出する。

求めた切削比  $r_c$  および実験条件のすくい角  $\alpha = 25.02$  [deg] =  $0.4367$  [rad] を式(2)を变形した次式に代入して、せん断角  $\phi$  [deg] を求める。

$$\text{式(2)} \Leftrightarrow \phi = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha}\right) \quad (2)'$$

得られたせん断角  $\phi$  の値と、すくい角  $\alpha$  の値を式(3)に代入して、せん断歪  $\gamma$  を求める。

せん断角  $\phi$  の値と、表3で得られた主分力  $F_c$ ，送り分力  $F_t$  をそれぞれ式(6),式(7)に代入してせん断面せん断力  $F_s$ ，せん断面垂直力  $F_n$  を求める。また、求めた  $F_s, F_n$  を式(8),式(9)にそれぞれ代入してせん断面せん断応力  $\tau_s$  およびせん断面垂直応力  $\sigma_s$  を求める。

最後に式(12),式(13)を用いて単位容積あたりのせん断エネルギー  $w_s$  とすくい面摩擦エネルギー  $w_f$  を求める。式(12)にはせん断面せん断応力  $\tau_s$  およびせん断歪  $\gamma$  を，式(13)にはすくい面摩擦力  $F$ ，切削比  $r_c$ ，切込み量  $b=3.0$  [mm] および切削厚さ  $t_1 = 0.10$  [mm] をそれぞれ代入する。

また，式(11)に表3で得られている主分力  $F_c$  と切込み量  $b=3.0$  [mm] および切削厚さ  $t_1 = 0.10$  [mm] を代入して単位体積あたりの仕事量  $w$  も求める。

表4 計算結果 2a

被削材種	S45C(油あり)			S45C(油なし)		
	直接法		間接法	直接法		間接法
	Min	Max		Min	Max	
切屑厚さ $t_2$ [mm]	0.235	0.249	0.18	0.247	0.261	0.18
切削比 $r_c$	0.426	0.402	0.57	0.405	0.383	0.56
せん断角 [deg]	25.2	23.7	34	23.9	22.5	33
せん断ひずみ	2.13	2.26	1.6	2.24	2.37	1.7
せん断面せん断力 $F_s$ [N]	661	677	560	552	568	440
せん断面垂直力 $F_n$ [N]	631	613	720	630	616	710
せん断面せん断応力 $\sigma_s$ [MPa]	938	906	1000	746	724	810
せん断面垂直応力 $\sigma_n$ [MPa]	895	820	1400	850	785	1300
せん断エネルギー $\sigma_s$ [J/mm <sup>3</sup> ]	2.00	2.05	1.7	1.67	1.72	1.3
すくい面摩擦エネルギー $f$ [J/mm <sup>3</sup> ]	0.89	0.84	1.2	0.86	0.82	1.2
単位切削あたりの仕事量 [J/mm <sup>3</sup> ]	2.9			2.5		

表4 計算結果 2b

被削材種	SUS304			A2017		
	直接法		間接法	直接法		間接法
	Min	Max		Min	Max	
切屑厚さ $t_2$ [mm]	0.211	0.237	0.17	0.179	0.185	0.14
切削比 $r_c$	0.474	0.422	0.57	0.559	0.540	0.72
せん断角 [deg]	28.3	24.9	34	33.6	32.4	43
せん断ひずみ	1.92	2.15	1.6	1.66	1.71	1.4
せん断面せん断力 $F_s$ [N]	499	539	420	170	170	130
せん断面垂直力 $F_n$ [N]	709	679	760	210	200	230
せん断面せん断応力 $\sigma_s$ [MPa]	787	758	790	310	310	300
せん断面垂直応力 $\sigma_n$ [MPa]	1120	955	1400	380	360	520
せん断エネルギー $\sigma_s$ [J/mm <sup>3</sup> ]	1.51	1.63	1.3	0.51	0.52	0.42
すくい面摩擦エネルギー $f$ [J/mm <sup>3</sup> ]	1.1	1.0	1.3	0.33	0.32	0.43
単位切削あたりの仕事量 [J/mm <sup>3</sup> ]	2.58			0.84		

## 5 . 考察

### 5 . 1 切屑観察



(a)S45C (油剤あり)

(b)S45C (油剤なし)

(c)SUS304

(d)A2017

図9 切屑形状 (平均的な形状を抽出)

図9に切屑の写真を示す．全てに共通して，切屑が丸まっているのが分かる．最も丸まりの変形量が大きいの(d)A2017であり，次いで(a),(b)S45C，(c)SUS304の順である．

それでは，個々の材料の切屑の特徴を見てみよう．

#### (a) S45C (油剤あり)

ある程度切屑が巻きついている．長さも他の材料の切屑と比較しても平均的な切屑であり，特徴がない．

#### (b) S45C (油剤なし)

油剤を使用した(a)の切屑に比べて，長さが短いことが特徴である．ただし，丸まり具合は(a)の切屑の破断直前の丸まりとほぼ同程度である．

したがって，(a)と(b)を比較すると，油剤がある方がより小さく(変形量が大きく)丸まっていることが確認できる．それに対し(b)の油剤なしでは，切屑の長さの維持ができず破断時期が早いいため，小さく丸まる変形には至っていない．

#### (c) SUS304

最も切屑が長い．切削中に切屑が破断することなく長い切屑を維持した．また，この切屑は他の材料の切屑に比べて丸まり具合も少なく大きな曲率で，かつ一定の曲率を保ちながららせん階段状の形状をしている．

#### (d) A2017

切屑が最も小さくまとまっている．巻き取ったかのような隙間のない巻き付きの切屑である．また，切屑の長さ自体もそれほど長くない．



図10 S45C (油剤あり) と A2017 の鳥瞰図

さて、切屑が出る際に、私は旋盤の近くに陣取れなかったので切屑の出方が確認できなかったのだが、切屑は次のどちらかの形態で丸まると私は推察した。

始めは小さな径で丸まり始め、その外側に切屑が巻き付いていき径が大きくなる。

始めは大きな径で排出されるが、続いて外側に同径の切屑が複数周にわたって巻き付いてくるため、外側からかかる力により内側が小さく丸まる。

しかし、の形態では内側が巻きつく際に抵抗が発生するので、全体にわたっての形態で(d)A2017のようにきれいに巻きつくことはありえない。したがって、始めはの状態で巻き始めることがあるかもしれないが、一定量の巻付き後にの形態で切屑は丸まると私は推察する。図9の(a)のS45C(油剤あり)や(d)のA2017を真上から見たものが図10であるが、外側はしっかり隙間なく巻きついているのに対して、内側は少し様子が違う。内側が、外側がの巻きつき方であろう。

次に、切屑の表面を見てみよう。図11に切屑表面を示す。

どの切屑にも切削方向に筋状のキズを確認することができる。若干ながら(d)A2017の傷が浅いように思われるが、それ以外は表面を見比べても特徴や違いは確認することはできない。



(a)S45C (油剤あり) (b)S45C (油剤なし) (c)SUS304 (d)A2017

図11 切屑表面

ところで、切屑の長さを決める要因は材料の破断により決まると仮定して、材料の降伏点や引張強さ、破断伸びを比較してみることにする。

表5にS45C, SUS304, A2017のそれぞれの降伏応力 $Y$ (SUS304およびA2017は0.2%耐力)、引張強さ $\sigma_B$ 、破断伸びを示す。これらの値は機械工学実験・生産加工実験3において測定したもので、実験で測定しなかったA2017は文献値<sup>6)</sup>を用いた。

表5 生産加工実験3における各機械的特性

被削材種	S45C-R	SUS304	A2017-T4
降伏応力(0.2%耐力) $Y$ [MPa]	314	286	275
引張強さ $\sigma_B$ [MPa]	659	715	425
破断伸び [%]	22以上	40以上	20以上

表5において各種材料は降伏応力についての大きな差は見受けられないが、引張強さ $\sigma_B$ には差が見受けられる。引張強さの最も小さいA2017は最も小さくまとまったコンパクトな切屑形状をしており、引張強さの最も大きいSUS304が最も大きな曲率半径の切屑となっている。また切屑長さも、表の破断伸びを見ても分かるとおり、引張強さと破断伸びの最も大きいSUS304が最も切屑が長く、続いてS45C、A2017と引張強さおよび破断伸びの大きさ順と切屑長さ順が一致している。(ただし、切屑の長さは実験中に測定していないので目視で判断した)

したがって、結論として切屑形状は被削材の引張強さおよび破断伸びに影響されることが得られた。

## 5.2 降伏せん断応力とせん断せん断応力の関係

ここでは、降伏せん断応力 $k$ とせん断せん断応力 $\tau_s$ を比較してみる。

材料の降伏せん断応力を求めるにあたっては、材料の降伏条件としてTrescaの最大せん断応力説を採用し、被削材の単軸引張りにおける降伏応力 $Y$ を求め、その降伏応力の1/2をその被削材の降伏せん断応力 $k$ として、せん断せん断応力と比較する。

まず、降伏応力を求めたいが、鉄鋼材料など多くの金属材料において降伏応力 $Y$ はビッカース硬さと実験的に次式のような比例関係にあるようである。

$$Y = \frac{1}{2.6} \cdot \frac{9.8Hv}{\sin 68^\circ} \quad [\text{MPa}] \quad (21)$$

ここで、 $Hv$ がビッカース硬さである。今回の測定ではビッカース硬さの測定を行ってはいないが、ビッカース硬さの値としては次の表6の値を用いる。

表6 ビッカース硬さ

	S45C (油あり)	S45C (油なし)	SUS304	A2017
Hv	184	184	216	141

また、Trescaの最大せん断応力説より、降伏せん断応力 $k$ は

$$k = \frac{1}{2} Y \quad (22)$$

である。以下表7に、式(21),(22)を用いて選出した各被削材の降伏応力および降伏せん断応力の値を示す。

表7の降伏応力と表5の降伏応力を見比べると、式(21)より得た降伏応力の値が通常得られる各材料の値を大きく上回っていることが分かる。

表6のビッカース硬さについては通常得られる値を逸脱しているとはいえないので、式(21)に原因があるようである。

式(21)より得た値が表5の引張強さに近い値を示していることや、引張強さと硬さには実験的に比例関係があることが多くの文献で紹介されていることもあり、私見として式(21)は材料の降伏応力を示す式ではなく引張強さを示していると考えたが、あくまでもこの式は降伏応力を求めるものとして紹介されているものなので、この式が真か偽かを検討することは控えることにする。

表7 式(21)より得た降伏応力と降伏せん断応力

被削材種	S45C (油あり)	S45C (油なし)	SUS304	A2017
ビッカース硬さ Hv	184	184	216	141
降伏応力 Y [MPa]	748	748	878	573
降伏せん断応力 k [MPa]	374	374	439	287

しかし、一般的な材料の機械的性質の値も十分に説明できない様な役に立たない近似式を実験の考察に用いることを私は好まないで、表7の値を用いることは控え、表5で得た降伏応力の値を用いて、降伏せん断応力  $k$  とせん断せん断応力  $\tau_s$  を比較することにする。

表8に式(22)の Tresca の最大せん断応力説より得た降伏せん断応力  $k$  , および表4で得たせん断せん断応力  $\tau_s$  を示す。

材料が塑性変形するためには、降伏せん断応力  $k$  とせん断せん断応力  $\tau_s$  の関係は、

$$\tau_s > k$$

となっていなければならない。

表8の、これら降伏せん断応力とせん断せん断応力とを比較すると全ての材料で直接法・間接法を問わず、 $\tau_s > k$  を満たしていることが分かる。

したがって、切削において材料はせん断変形およびせん断を起こすと言えることが確認できた。

また、 $k$  と  $\tau_s$  のグラフを図12に示してみる。この図の中で直線は  $\tau_s = k$  の式であり、その直線よりもすべてのせん断せん断応力  $\tau_s$  が上回っていることが確認できる。

しかし、 $\tau_s > k$  ではあるものの、それ以上にせん断せん断応力  $\tau_s$  と降伏せん断応力  $k$  の相関性を見出すことはできない。

**表8** せん断せん断応力と降伏せん断応力

		$\tau_s$ [MPa]	$k$ [MPa]
S45C(油あり)	直接法	Max	938
		Min	906
	間接法	1000	330
S45C(油なし)	直接法	Max	746
		Min	742
	間接法	810	330
SUS304	直接法	Max	787
		Min	758
	間接法	790	358
A2017	直接法	Max	310
		Min	310
	間接法	300	213

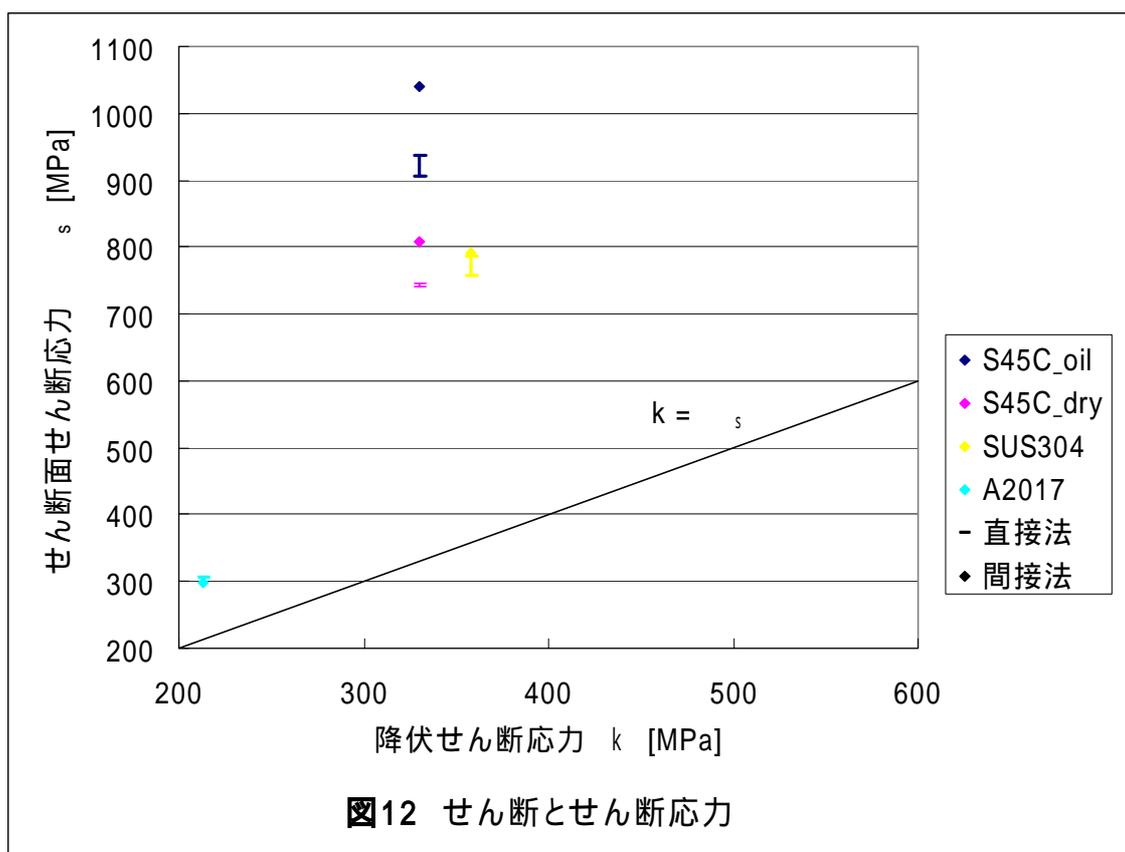


図12 せん断とせん断応力

### 5.3 切削方程式と実験結果の比較

2.3節で述べた切削方程式と実験で得られた測定値との比較をする。

まず、表9に表4で求めたせん断角  $\phi$  と、表3で得た摩擦角  $\mu$  と実験条件で定めたすくい角  $\alpha$  との差を示す。これらの値を縦軸に  $\phi - \mu - \alpha$ 、横軸に  $\phi$  をとってグラフにしたものが図13である。さらに図13には式(15)と式(16)に示した切削方程式示してある。また、測定値の直接法をIで、間接法の値を菱形のポイントで示してある。

表9a せん断角  $\phi$  と  $\mu - \alpha$

被削材種	S45C(油あり)			S45C(油なし)		
	直接法		間接法	直接法		間接法
	Min	Max		Min	Max	
せん断角 [deg]	25.2	23.7	34	23.9	22.5	33
- [deg]	18.5			24.8		

表9b せん断角  $\phi$  と  $\mu - \alpha$

被削材種	SUS304			A2017		
	直接法		間接法	直接法		間接法
	Min	Max		Min	Max	
せん断角 [deg]	28.3	24.9	34	33.6	32.4	43
- [deg]	26.6			17.3		

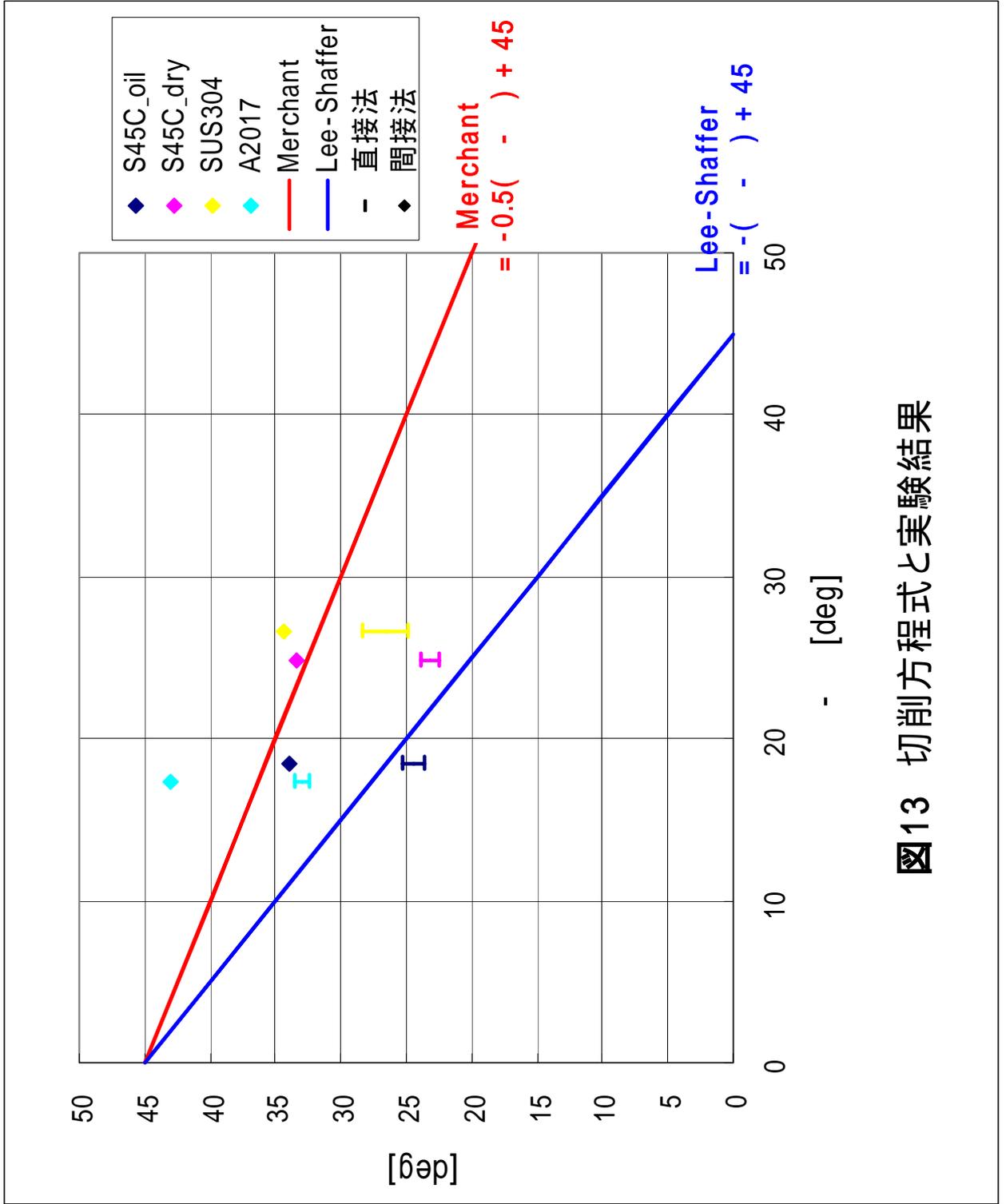


图13 切削方程式と実験結果

その他、紺が S45C の油剤あり、ピンクが S45C の油剤なし、黄が SUS304、ライトブルーが A2017 の値をそれぞれ示している。赤の線形グラフが式(15)の Merchant の切削方程式、青の線形グラフが Lee-Shaffer の切削方程式である。

すべての実験測定値が二直線付近に分布はしているが、S45C(油剤なし)、SUS304、A2017 の直接法測定値は二直線の間分布している。直説法と間接法では間接法の方が切屑厚さが小さく算出される傾向にあるため(6.1節参照)、直説法に比べせん断角が大きく分布している。図を見ても分かるように、測定にエラーの出た S45C(油剤あり)を除き、どの測定値もせん断角と摩擦角とすくい角の差( )には相関性が見られ、右下がりのグラフとして分布していることが伺える。しかしながら、Merchant および Lee-Shaffer の切削方程式に一致しているとはいえず、どちらの関係式も実験値からは若干外れており、実験を十分に説明できてはいない。これらの解析は、Merchant の式は 1941 年、Lee-Shaffer の式は 1951 年に示された古典解析式であり、定説とされているものではない。ちなみに現在では、加工硬化や温度変化、ひずみ速度の影響などを考慮する詳細な解析が行われている。

このグラフを見ただけでは、実験データと切削方程式の関係を検討するには測定値の数が十分ではないので、文献より得られる一般的な実験データを交えて検討してみる。

図 14 に複数の実験者により得られた<sup>9)</sup> Merchant および Lee-Shaffer の切削方程式と実験値の対応グラフを示す。ただし、図中の× は低速切削の実験値である。この実験データでは鋼類の中・高速切削において、 $\beta - \alpha > 20$  [deg] の範囲においては Merchant の式と Lee-Shaffer の式との間の範囲： $45^\circ - (\beta - \alpha) < \phi < 45^\circ - (\beta - \alpha)/2$  にせん断角があり、摩擦角とすくい角の差が  $10^\circ \leq \beta - \alpha \leq 20^\circ$  の範囲では Merchant の式をまたぐ形で、 $\phi > 45^\circ - (\beta - \alpha)/2$  に実験データが分布している。また、せん断角が切削方程式の 2 式に対して図 14 の範囲に分布していることは多くの文献でも示されている<sup>2) 8)</sup>。

したがって、今回の実験で得られた、多くの実験値が切削方程式の二直線の間分布していることについては、一般的に確認されていることであり、結論としては  $\beta - \alpha > 20$  [deg] の範囲においては Merchant の式と Lee-Shaffer の式との間の範囲： $45^\circ - (\beta - \alpha) < \phi < 45^\circ - (\beta - \alpha)/2$  にせん断角があり、摩擦角とすくい角の差が  $10^\circ \leq \beta - \alpha \leq 20^\circ$  の範囲では Merchant の式をまたぐ形で、 $\phi > 45^\circ - (\beta - \alpha)/2$  に実験データが分布することが、実験によって得られた。

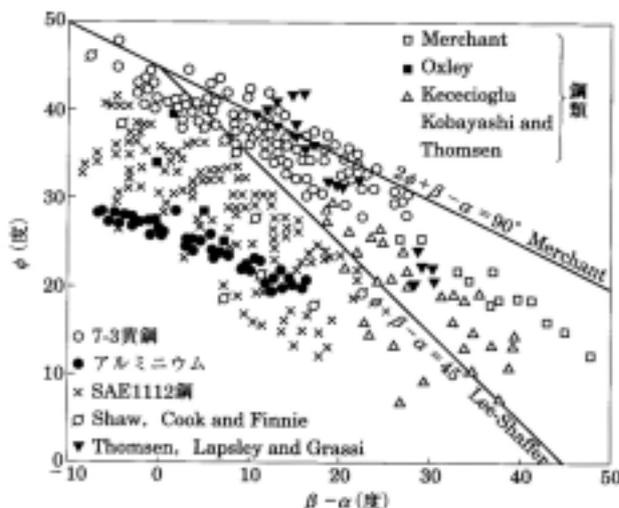


図 14 Merchant, Lapsley による切削方程式と実験結果の対応<sup>9)</sup>

## 5.4 切削の消費エネルギー

表 10 に表 4 で求めた単位切削あたりの仕事量 と単位体積あたりのせん断エネルギー  $w_s$  , すくい面摩擦エネルギー  $w_f$  より求まる切削の消費エネルギーの割合を示す .

被削材に与えた仕事量のうちおよそ 50 ~ 70%程度がせん断エネルギーに使われ , 残りの 30 ~ 50%はすくい面にかかる摩擦エネルギーとなる .

まず , 材料ごとに比較すると , S45C (油剤あり) は切削にかかる摩擦エネルギーの割合が 30 ~ 40%と最も小さく , 効率がよいといえる . それに対して SUS304 や A2017 は摩擦エネルギーの割合が 40 ~ 50%と効率が悪い . ただし , 単位体積あたりのすくい面摩擦エネルギーを比較すると , S45C と SUS304 には大きな差は見られないが A2017 はエネルギー量がそれらと比べて小さく , 1/2 以下である . 単位体積あたりのせん断エネルギーの比較では , S45C が最もエネルギーが必要であり , 続いて SUS304 . A2017 は最も小さく , S45C (油剤あり) の 25%程度である .

次に , S45C における油剤の有無による比較を行ってみよう .

まず , 単位切削あたりの仕事量の比較をしてみると , 油剤がある方が大きな仕事量となっている . せん断エネルギーとすくい面摩擦エネルギーをそれぞれ比較すると , すくい面摩擦エネルギーはほぼ同程度であるため , せん断エネルギーが油剤がある時のほうが大きいとわかる .

したがって , 油剤がある時のほうが全体のエネルギー消費量に対する摩擦エネルギーの割合は小さいが , 全体のエネルギーの絶対量は大きいという結果となった .

表10a 切削のエネルギー

被削材種	S45C(油あり)			S45C(油なし)		
	直接法		間接法	直接法		間接法
	Min	Max		Min	Max	
単位切削あたりの仕事量 [J/mm <sup>3</sup> ]	2.9			2.5		
せん断エネルギー $w_s$ [J/mm <sup>3</sup> ]	2.00	2.05	1.7	1.67	1.72	1.3
$w_s/$ [%]	69	71	59	66	68	53
すくい面摩擦エネルギー $w_f$ [J/mm <sup>3</sup> ]	0.89	0.84	1.2	0.86	0.82	1.2
$w_f/$ [%]	31	29	41	34	32	47

表10b 切削のエネルギー

被削材種	SUS304			A2017		
	直接法		間接法	直接法		間接法
	Min	Max		Min	Max	
単位切削あたりの仕事量 [J/mm <sup>3</sup> ]	2.6			0.84		
せん断エネルギー $w_s$ [J/mm <sup>3</sup> ]	1.51	1.63	1.3	0.51	0.52	0.42
$w_s/$ [%]	58	63	50	61	62	49
すくい面摩擦エネルギー $w_f$ [J/mm <sup>3</sup> ]	1.1	1.0	1.3	0.33	0.32	0.43
$w_f/$ [%]	42	37	50	39	38	51

## 6. 検討

### 6.1 切屑厚さ

今回の実験では切屑の厚さ測定においてはマイクロメータを用いた直接法と、長さ測定を利用した間接法の2通りの測定を行った。

この厚さ測定において、2方法が異なる値をとったことについて誤差や測定上の問題を検討してみる。

まず、表4の切屑厚さの値を直接法と間接法で比較してみると、全ての被削材で  
直接法  $t_2 >$  間接法  $t_2$

となっている。原因としては、

- 間接法においては切屑幅に対して平均的な値を示すこと。
- 長さ測定の際に試片を直方体と仮定したが、実際には切屑は曲がりを持っているため、試片は扇形をしている。長さ測定の際に湾曲を伸ばすため定規で押しつぶす際に、割れや引張り変形を起こしたために実際より長く測定されてしまうこと。

などが考えられる。

表4 (抜粋) 切屑厚さ  $t_2$

	直接法 [mm]		間接法 [mm]
	MAX	MIN	
S45C (油剤あり)	0.249	0.235	0.1767
S45C (油剤なし)	0.261	0.247	0.1797
SUS304	0.237	0.211	0.1745
A2017	0.185	0.179	0.1395

### 参考

これに関連して藤村によって切屑厚さの測定比較<sup>1)</sup>されたものを紹介しておく。

切屑厚さの測定方法は、直接法としてマイクロメータ、ダイヤルゲージを用いた2通り、間接法として重量法および断面法の2通りで、計4通りの比較がなされている。ちなみに断面法とは、樹脂に切屑を埋め込み、それより得た切屑断面より測定する方法である。ただし、この方法は断面形状を知ることは可能であるけれど、その断面が流出方向に対して正確に直角でない場合には誤差を生じてしまう。

表11がその測定結果である。切屑厚さの平均値は断面法が最も大きく、重量法は最も小さくなっている。

したがって、切屑厚さの真値はわからないものの、今回の実験でマイクロメータを用いた直接法と重量法を用いた間接法における値のズレは、測定方法の特性を考慮すると、妥当な結果といえる。

表11 切屑厚さ測定例<sup>1)</sup>

測定法	① マイクロメータ	② ダイヤルゲージ	③ 重量法	④ 断面法
切屑厚 (平均値)	0.513	0.552	0.410	0.821
標準偏差	0.021	0.017	0.025	0.121
最大切屑厚	0.560	0.590	0.470	0.974
最小切屑厚	0.458	0.524	0.359	0.621

被削材 S45C, P10 ( $\alpha = -5^\circ$ )

$v = 150\text{m/min.}$ ,  $f = 0.25\text{mm/rev.}$ ,  $d = 1.5\text{mm.}$  乾切削 測定回数 30

(mm)

## 6.2 切削温度

工具が切削抵抗に打ち勝って被削材を切断する時には多くのエネルギーを消費する。そのエネルギーは図 15 に示す箇所です。その大部分はその場で熱になる。切削温度が高いと工具の刃先が軟化し、磨耗の進行を早め、工具寿命に影響を与えるほか被削材や工具の温度を上昇させ、熱膨張による加工精度の低下を引き起こす。

熱の発生箇所(図 15)は、

### (1) せん断熱

被削材のせん断面でひずみや破断を生じるために費やされ、せん断熱として発生する。

### (2) すくい面摩擦熱

切屑が工具すくい面を激しく摩擦しながら排出していく時に費やされ、摩擦熱として排出される。

### (3) 逃げ面摩擦熱

工具の逃げ面が被削材と摩擦することによって費やされ、摩擦熱として発生する。

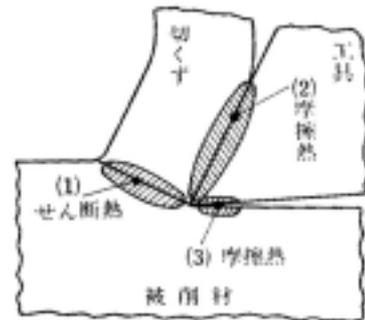
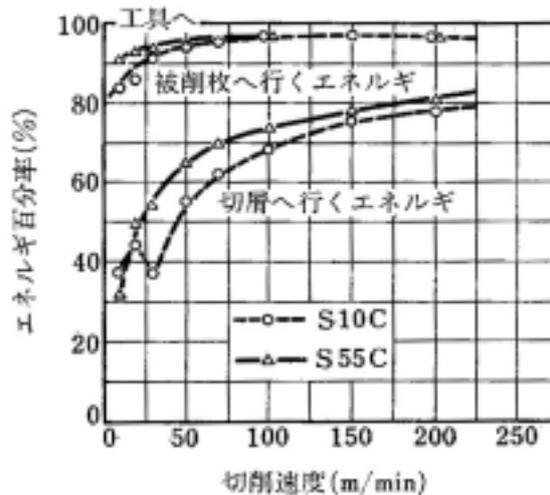


図 15 せん断熱の発生箇所<sup>5)</sup>

熱の行方としては、まずせん断面で発生した熱は大部分が切屑の温度を高め、残りの一部分は被削材へ伝わり温度を高める。温度が上昇した切屑は工具すくい面での摩擦によってさらに温度が高まり、熱の一部は工具に伝わりとともに外部へと逃げていく。また、刃先逃げ面で被削材との摩擦により発生した熱は、工具と被削材の温度を高める。

その伝わる熱の割合としては、旧ソ連の研究結果<sup>3)</sup>によれば、旋盤切削において削り速度および切屑厚さに関連して、熱は次のような割合で伝達される。50~86%は切屑へ、40~10%は工具へ、9~3%は加工される被削材に、残る約1%は周囲の空気へ伝達され、削り速度が増せば、切屑へ伝わる熱の割合が増大し、これが全熱量の90%に達することもある。図 16 が中村により旋削における熱の行方を切削速度についてまとめたもの<sup>1)</sup>である。



S10C, S55C 切削エネルギー百分率(中村)<sup>10)</sup>  
 工具材種 [P10] 工具形状(0-6-5-5-5-0.5mm)  
 切込み 2.0mm, 送り 0.2mm/rev 乾式切削

図 16 切削における熱のゆくえ<sup>1)</sup>  
 (切削速度との関係)

以下に切削温度の近似計算を行う。ちなみに，ここでは切削温度と切削直後の切屑温度を同じ温度と仮定する。

図 15 の(3)工具逃げ面における摩擦エネルギーを非常に小さいものとみなし無視すると，切屑に流入する単位体積あたりの熱量  $Q$  は，単位体積あたりのせん断エネルギー  $\omega_s$  およびすくい面摩擦エネルギー  $\omega_f$  より求めることができる。

$$Q = \omega_s + \omega_f = \omega \quad (23)$$

ところで，金属の比熱  $c$  は温度の関数であるが，ここで  $c$  が温度のみの関数であると仮定する。また，発熱量のうち，切屑へと伝わる割合を  $\phi$ ，金属の密度を  $\rho$  とすると，切屑温度  $T_k$  と熱量  $Q$  の関係は，

$$\phi \cdot Q = \rho \int_{T_0}^{T_k} c \cdot dT \quad (24)$$

では式(24)を用いて，具体的に今回の実験についての切削温度を求めてみよう。

まず，密度については温度変化しないので，切屑長さの測定の際に使用した値を用いることにする。比熱は温度変化をするため図 17，18 より近似式を用いる。

SUS304 は比熱の温度変化が小さいので，

$$c_{SUS304} \approx \text{const} = 0.15 [\text{kcal/kg} \cdot \text{ } ] = 0.63 [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}]$$

とし，S45C と A2017 は次の一次式で近似する。

$$c_{S45C} \begin{cases} = 1.5 \times 10^{-4} T + 0.10 [\text{kcal/kg} \cdot \text{ } ] & (0 \leq T \leq 680 \text{ [ } ] ) \\ = 0.40 [\text{kcal/kg} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}] & (680 < T < 800 \text{ [ } ^\circ\text{C}]) \\ = 0.15 [\text{kcal/kg} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}] & (T \geq 800 \text{ [ } ^\circ\text{C}]) \end{cases}$$

$$c_{A2017} = 1.7 \times 10^{-4} T + 0.2 [\text{kcal/kg} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}]$$

また，切削速度  $v = 140 [\text{m/min}]$  なので，図 16 より  $\phi = 0.77$ 。

これらの値より，切削温度を求めることができる。以下に，温度の導出式，および切屑の温度をまとめた表を表 12 に示す。

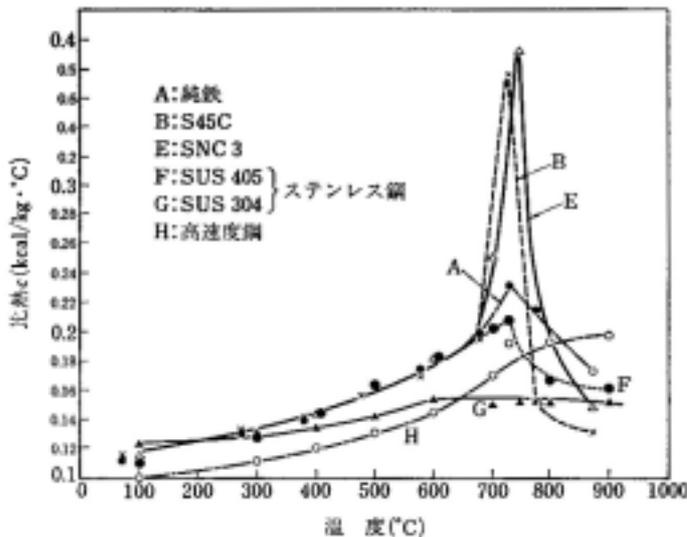


図 17 比熱と温度 1<sup>1)</sup>

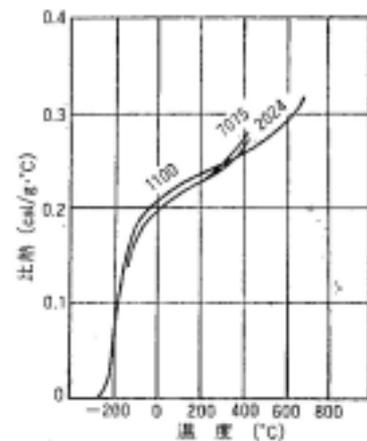


図 18 比熱と温度 2 (アルミ合金) 6)

まず，S45C において，切屑温度が 680 と仮定すると， $\int_{T_0}^{T_k} c \cdot dT$  [kJ/kg]の値は，

$$\begin{aligned} \int_{T_0}^{T_k} c \cdot dT &= \int_{20}^{680} (1.5 \times 10^{-4} T + 0.1) dT \\ &= \left[ \frac{1}{2} \cdot 1.5 \times 10^{-4} T^2 + 0.1T \right]_{20}^{680} \\ &= 100 \quad [\text{kcal/kg}] \\ &= 420 \quad [\text{kJ/kg}] \end{aligned}$$

ここで，表 12 より，S45C において  $\varphi \cdot Q / \rho < 420$  [kJ/kg]なので，切屑温度は 680 以下である．したがって，S45C の油剤ありの切屑温度は表計算より得た表 12 の  $\varphi \cdot Q / \rho$  の値を用いて，

$$\begin{aligned} \int_{20}^{T_k} (1.5 \times 10^{-4} T + 0.1) dT &= 290/4.184 \\ \Leftrightarrow 1.5 \times 10^{-4} T_k^2 + 0.1T_k - 71 &= 0 \\ \Leftrightarrow T_k &= 430 \quad [ \quad ] \end{aligned}$$

となる．同様にして S45C の油剤なしの切屑温度は，

$$\begin{aligned} \int_{20}^{T_k} (1.5 \times 10^{-4} T + 0.1) dT &= 250/4.184 \\ \Leftrightarrow 1.5 \times 10^{-4} T_k^2 + 0.1T_k - 62 &= 0 \\ \Leftrightarrow T_k &= 390 \quad [ \quad ] \end{aligned}$$

SUS304 の切屑温度は，

$$\begin{aligned} T_k &= \frac{\varphi \cdot Q}{\rho \cdot c} + T_0 \\ &= \frac{260}{0.63} + 20 \\ &= 430 \quad [ \quad ] \end{aligned}$$

A2017 の切屑温度は，

$$\begin{aligned} \int_{20}^{T_k} (1.7 \times 10^{-4} T + 0.2) dT &= 80/4.184 \\ \Leftrightarrow 1.5 \times 10^{-4} T_k^2 + 0.1T_k - 21 &= 0 \\ \Leftrightarrow T_k &= 98 \quad [ \quad ] \end{aligned}$$

表12 切削温度

被削材種	S45C(油あり)	S45C(油なし)	SUS304	A2017
単位切削あたりの仕事量 [J/mm <sup>3</sup> ]	2.9	2.5	2.6	0.84
被削材 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	7870	7870	7870	2700
Q/ [kJ/kg]	290	250	260	80
切削温度 T [ ]	430	390	430	98

近似計算ではあるが，S45C や SUS304 は切削温度が 400 前後なのに対して，アルミ合金 A2017 は 100 程度と低温であることが確認できる．

### 参考 切削温度の理論計算

ここでは、より詳しく切削温度を求める方法を紹介する。この計算方法は藤村善雄 著；実用切削加工法の中で紹介されているものである。

切削温度とは一般に切屑 - 工具接触面温度のことをいい、工具磨耗がわずかな場合は工具逃げ面の摩擦エネルギーが無視できるため、切削温度 $\bar{\theta}_t$ は次式となる。

$$\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f \quad (25)$$

ここで、 $\bar{\theta}_s$ はせん断面上におけるせん断エネルギーによる温度上昇すなわちせん断断面平均温度、 $\bar{\theta}_f$ は切屑 - 工具接触面摩擦エネルギーによる平均温度上昇である。

また、切削速度 $v$ に対して工具すくい面上の切屑流出速度 $v_c$ およびせん断面上のせん断速度 $v_s$ は次式で表すことができる。

$$\text{切屑流出速度： } v_c = v \cdot \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} = r_c \cdot v \quad (26)$$

$$\text{せん断速度： } v_s = v \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (27)$$

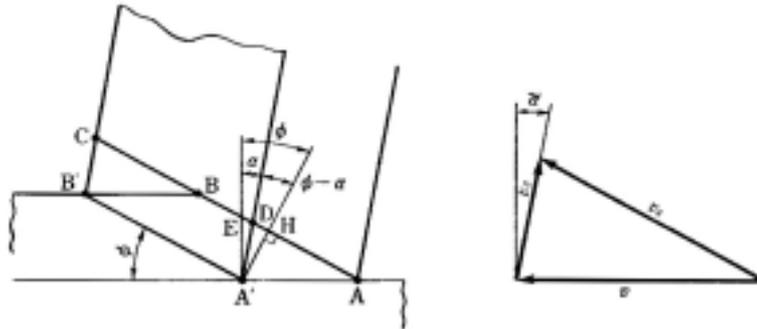


図 19 せん断速度

#### (1) せん断断面平均温度 $\bar{\theta}_s$ の計算

せん断断面単位面積あたり単位時間あたりに消費されるせん断エネルギー $u'_s$ は、

$$u'_s = \frac{F_s \cdot v_s}{t_1 \cdot b} \sin \phi \quad (28)$$

で示され、これがすべて熱エネルギーに転換されるときせん断断面での発生熱量 $q_1$ およびせん断面せん断エネルギー $u_s$ は、

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \frac{u'_s}{J} = \frac{F_s \cdot v_s}{J \cdot t_1 \cdot b} \sin \phi = u_s \frac{v \sin \phi}{J} \\ u_s &= \frac{F_s \cdot v_s}{v \cdot t_1 \cdot b} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

となり、この熱量 $q_1$ が切屑へ流入する割合を $R_1$ とするとせん断断面平均温度 $\bar{\theta}_s$ は、

$$\bar{\theta}_s = \frac{R_1 q_1}{\rho_1 c_1} \left( \frac{t_1 b}{\sin \phi} \right) \left( \frac{1}{v \cdot t_1 \cdot b} \right) + \theta_0 = \frac{R_1 u_s}{J \rho_1 c_1} + \theta_0 \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{1 + 0.664\gamma/\sqrt{L_1}} \\ L_1 &= \frac{v \cdot \gamma \cdot t_1}{4K_1} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

ここで、 $J$  は熱の仕事当量  $426.9[\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kcal}]$ ,  $k_1, \rho_1, c_1$  および  $K_1 = k_1 / \rho_1 c_1$  は室温  $\theta_0$  とせん断面平均温度に対する切屑（被削材）の熱伝導率，比重，比熱および熱伝達率であり，いずれも温度の関数である．

## (2) すくい面の摩擦による温度上昇 $\bar{\theta}_f$

切屑 - 工具接触面で単位面積あたり単位時間に消費される摩擦エネルギー  $u'_f$  は，

$$u'_f = \frac{F \cdot v_c}{a \cdot b} \quad (32)$$

で示され，これが全て熱エネルギーに転換されるときすくい面での発生熱量  $q_2$  は，

$$\left. \begin{aligned} q_2 &= \frac{u'_f}{J} = \frac{F \cdot v_c}{J \cdot a \cdot b} = u'_f \frac{t_1 \cdot v}{J \cdot a} \\ u'_f &= \frac{F \cdot v_c}{v \cdot t_1 \cdot b} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

となり，この熱量  $q_2$  が切屑へ流入する割合を  $R_2$  とするとき，すくい面温度上昇  $\bar{\theta}_f$  は，

$$\left. \begin{aligned} \bar{\theta}_f &= \frac{0.754 \cdot R_2 \cdot q_2 \cdot a}{2k_2 \sqrt{L_2}} \\ L_2 &= \frac{v_c a}{4K_2} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\bar{\theta}_t = \frac{(1 - R_2)q_2 \cdot a}{k_3 \bar{A}} + \theta_0 \quad (35)$$

$$R_2 = \frac{q_2 \frac{a \bar{A}}{k_3} - (\bar{\theta}_f - \theta_0)}{q_2 \frac{a \bar{A}}{k_3} + q_2 \frac{0.377 a}{k_2 \sqrt{L_2}}} \quad (36)$$

ここで、 $a$  は切屑と工具との接触長さ， $k_2, \rho_2, c_2$  および  $K_2 = k_2 / \rho_2 c_2$  は切削温度  $\bar{\theta}_f$  に対する被削材の熱的性質，および  $k_3$  は温度  $\bar{\theta}_t$  に対する工具の熱伝導率である．

また， $\bar{A}$  は面積係数と呼ばれ近似的には次式で与えられ，これを図 21 に示す．

$$\bar{A} \approx \frac{2}{\pi} \left( \ln \frac{2m}{\ell} + \frac{1}{3} \frac{\ell}{m} + \frac{1}{2} \right) \quad (37)$$

ここで， $m/\ell$  は形状比であり，2次元切削では  $b/2a$ ，普通の切削では  $b/a$  である．

なお，式(33),(35),(37)の関係と，

$$u_s \approx \omega_s = \tau_s \gamma, \quad u_f \approx \omega_f = \mu \tau_s r_c / \sin \phi \quad (38)$$

より，

$$\bar{\theta}_t - \theta_0 = \frac{\tau_s}{J} \sqrt{\frac{v \cdot t_1 \cdot \gamma}{k_2 \rho_2 c_2}} \left[ A \mu \sqrt{\frac{t_1 \sec \alpha}{a}} + B \right] \propto \frac{\tau_s}{J} \sqrt{\frac{v \cdot t_1 \cdot \gamma}{k_2 \rho_2 c_2}} \quad (39)$$

と書き換えられる．ここで，A,B は定数である．

この式(39)より，切削温度 $\bar{\theta}_t$ に最も影響を及ぼす要因が $\tau_s$ であり，切削速度 $v$ ，切り込み厚さ $t_1$ ，材料の熱的性質 $k \cdot \rho \cdot c$ も $\tau_s$ に次いで影響を及ぼすことがわかる．

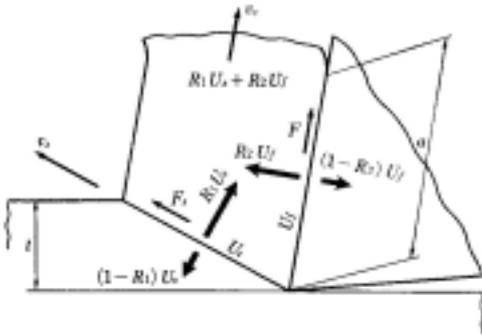


図 20 発生エネルギー流入割合

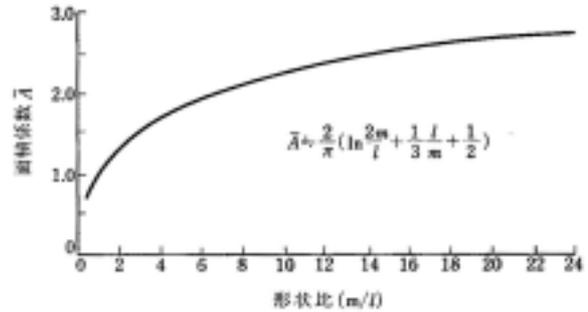


図 21 形状比と面積係数

では，上式(29)～(31)，および式(33)～(36)を用いた切削温度の理論計算を以下に行ってみる．

まず，S45C（油剤あり）のせん断面平均温度 $\bar{\theta}_s$ を求めるにあたって， $\bar{\theta}_s = 330$ と仮定する．この温度での熱伝導率および比熱と初期温度の熱伝導率および比熱の値の平均値を用いて計算を行うこととする．比熱および熱伝導率は次ページの図 17,18 および 22~25 から求める．

このとき， $c=5.4 \times 10^2$  [J/(kg·°C)]， $K_1=11 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s]， $\rho=7.8$ ， $\rho_s=7.9$  [kg/m<sup>3</sup>]， $\tau_s=2.0 \times 10^9$  [J/m<sup>3</sup>]とすると，式(31)より  $L_1=12$ ， $R_1=0.70$ ．

したがって，式(30)よりせん断面平均温度 $\bar{\theta}_s$ は，

$$\bar{\theta}_s = 330 \text{ [ }^\circ\text{C]} \text{ ]}$$

次に，切削温度 $\bar{\theta}_t$ を求めるにあたって， $\bar{\theta}_t = 500$  [°C]と仮定する．

まず，すくい面平均温度 $\bar{\theta}_f$ を求める．このときの  $\rho_f=0.86 \times 10^9$  [J/m<sup>3</sup>]， $r_c=0.41$ ， $K_2=13 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s]， $k_2=49$  [J/(m·s·°C)]とすると，式(33)，(36)より  $q_2=0.13 \times 10^9$  [J·m/s]， $L_2=28$ ， $R_2=0.94$ ．

よって，式(34)よりすくい面平均温度 $\bar{\theta}_f$ は，

$$\bar{\theta}_f = 270 \text{ [ }^\circ\text{C]} \text{ ]}$$

以上より， $\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_s + \bar{\theta}_f = 330 + 270 = 600$  [°C] ]

このとき，仮定した $\bar{\theta}_t = 500$  [°C]と計算値において  $k, c$  の差は少なく，推定 500 に対して計算値 600 は変化なしとする．

同様に，切削温度を求めたものを表 13 に示す．

表 13 切削温度の理論計算結果

	S45C(油あり)	S45C(油なし)	SUS304	A2017
切削温度 [ °C ]	600	570	670	190

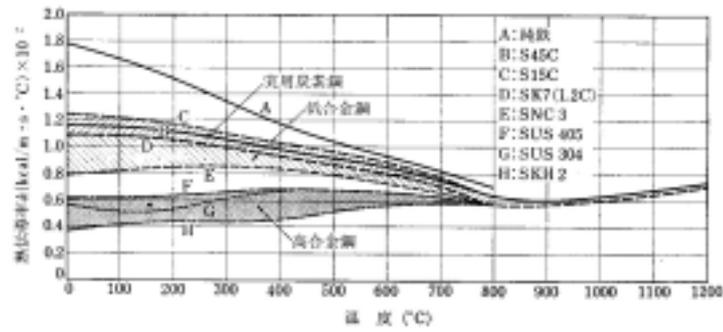


図 22 Fe系の熱伝導率と温度

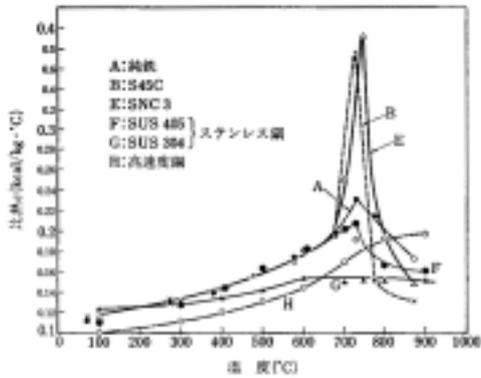


図 17 Fe系の比熱と温度

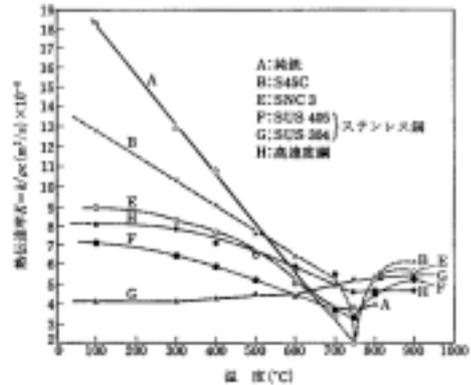


図 23 Fe系の熱拡散率と温度

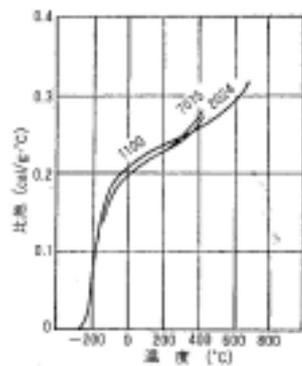


図 18 アルミ合金の比熱と温度

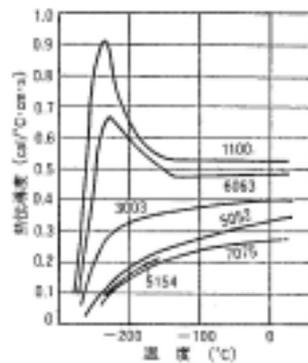


図 24 アルミ合金の熱伝導率

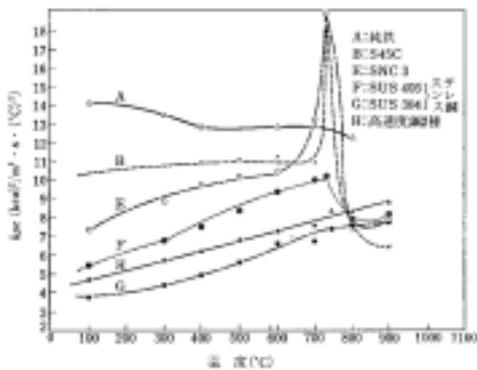


図 25 Fe系の k c と温度

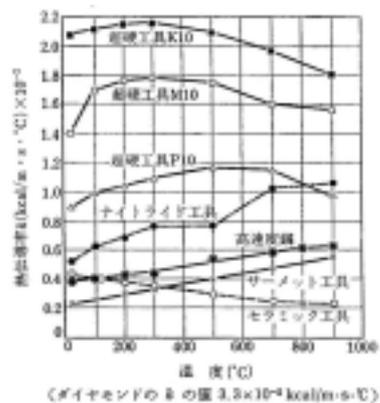


図 26 切削工具の熱伝導率と温度

以上，求めた切削温度  $\theta_t$  と  $\tau_s/\sqrt{k\rho c}$  の関係を確認してみる．

表 14 に概算値で求めた切屑温度および理論計算で求めた切屑温度およびそのときの  $k$   $c$  の値とせん断せん断応力  $\tau_s$  を示す．

また，切削温度（切屑温度） $\theta_t$  と  $\tau_s/\sqrt{k\rho c}$  の値をグラフ化したものが図 26 である．図 26 において描いてある近似直線は最小二乗法によって求めた式であり，

$$\begin{cases} \text{概算値：} & \theta_t = 5.3 \frac{\tau_s}{\sqrt{k\rho c}} + 110 \quad [^{\circ}\text{C}] \\ \text{理論計算：} & \theta_t = 7.4 \frac{\tau_s}{\sqrt{k\rho c}} + 46 \quad [^{\circ}\text{C}] \end{cases}$$

である．また，この近似直線式と計算より得た温度との相関係数  $r$  は，表計算より

$$\begin{cases} \text{概算値：} & r = 0.95 \\ \text{理論計算：} & r = 0.97 \end{cases}$$

であるので，十分に相関しているといえる．

よって，P.26 式(39)の理論で得た  $\theta_t \propto \tau_s/\sqrt{k\rho c}$  の関係が実験値でも確認できた．

表 14 切削温度と  $\tau_s/\sqrt{k\rho c}$

	S45C(油あり)	S45C(油なし)	SUS304	A2017
切屑温度（概算値）[ ]	430	390	430	98
切削温度（理論計算値）[ ]	600	570	670	190
せん断せん断応力 $\tau_s$ [MPa]	920	740	770	310
熱物性値 $k$ $c$ [ $\text{kJ}^2/(\text{m}^4 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}^2)$ ]	190	190	88	400
$\tau_s/\sqrt{k\rho c}$ [ $\text{MPa} \cdot \text{s}^{0.5}/\text{m}$ ]	67	54	82	16

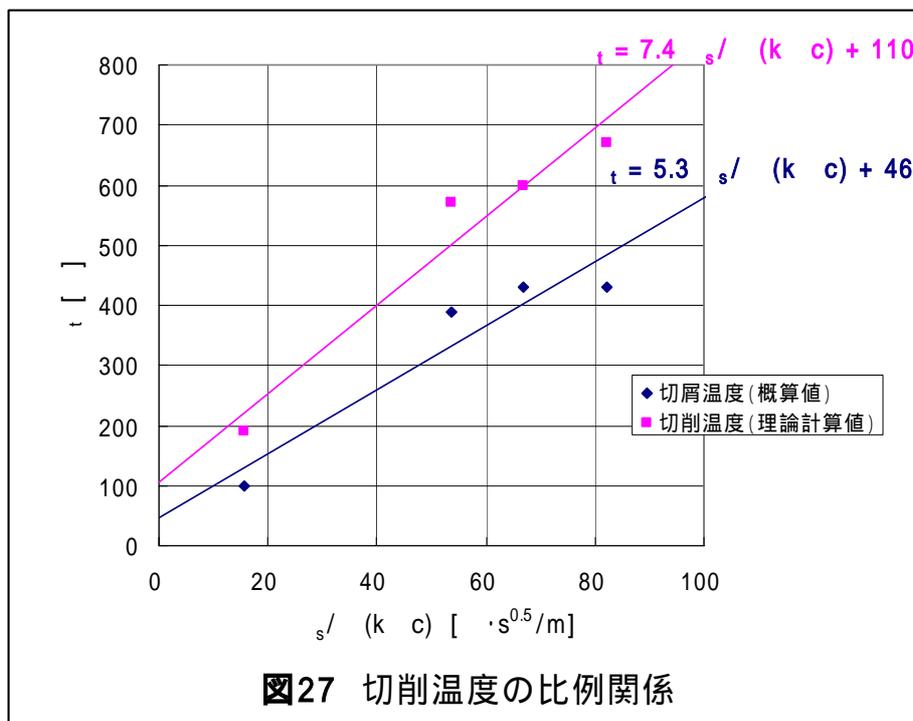


図27 切削温度の比例関係

## 7. 課題

### 7.1 基礎式の導出

P.4, P.5 参照.

### 7.2 Q1 切屑観察および切削抵抗の観点から材料の被削性をそれぞれ定義し、3種類の材料の被削性を比較せよ.

**A1 最も被削性に優れる被削材は A2017、最も悪い被削材は SUS304 である.**

上記のように切削加工のしやすさを決定した理由を以下に記す.

私は、材料の被削性の評価基準として、次の4項目について考えてみた.

- (1) 切削に必要な消費エネルギー
- (2) 工具負担
- (3) 被削材の熱膨張
- (4) 切屑

以下にその詳細を記す.

#### (1) 切削に必要な消費エネルギー

P.19の5.4節でも述べたが、単位切削容積あたりの仕事量は、S45C(油剤あり)を基準に比を取ると、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 \quad 1 : 0.89 : 0.29$$

と A2017 が圧倒的に仕事量が小さい。また、摩擦損失分のエネルギー量も、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 \quad 1 : 1.1 : 0.36$$

と、ほぼ仕事量の比と等しい。

したがって、仕事量の観点から見れば、最良は A2017 で S45C と SUS304 は同程度である。

#### (2) 工具負担

##### (a) すくい面垂直荷重 $N$

すくい面垂直力が大きければ、工具にかかる曲げ応力も大きくなるので工具の負担が大きくなる。すくい面垂直力の比は P.11 表3より、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 \quad 1 : 0.81 : 0.29$$

であり、A2017 が最も小さく、次いで SUS304、最も大きいのは S45C である。

##### (b) すくい面摩擦力 $F$

すくい面摩擦力が大きければ、工具にかかるせん断応力も大きくなるので工具が摩耗しやすくなる。

また、すくい面摩擦力はすくい面垂直力と摩擦係数の積である。

摩擦係数の比は、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 \quad 1 : 1.3 : 0.96$$

と、SUS304 が大きく、S45C と A2017 は変わらないのだが、垂直力と摩擦係数の積よりすくい面摩擦力の比を求めると、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 \quad 1 : 1.08 : 0.28$$

と、ここでは S45C と SUS304 はほぼ同等。A2017 が最も小さい。

(c) 熱的影響

切削温度による影響を考えてみる。切削温度が高いと工具の刃先が軟化し、摩耗の進行を早め、工具寿命に影響を与える。

6.2節で導出した切削温度を見比べても(P.29・表14), A2017の切削温度はS45CおよびSUS304に比べて圧倒的に低く、S45CとSUS304では若干ではあるがSUS304の方が切削温度は高くなっている。

したがって、切削温度が工具に与える影響を考えた被削性は、A2017が最も良く、SUS304が最も悪いといえる。

それでは、熱的影響についてももう少し詳しく考えてみる。

切削温度はP.26式(39)よりせん断面せん断応力 $\tau_s$ および熱伝導率 $k$ 、密度 $\rho$ 、比熱 $c$ に対して、

$$\bar{\theta}_i \propto \frac{\tau_s}{\sqrt{k\rho c}}$$

の関係がある。密度 $\rho$ はほとんど温度に関係なく一定値を示すが、熱伝導率 $k$ 、および比熱 $c$ は温度の影響を受ける。

熱伝導率 $k$ の温度に対する影響は図22のように、材料成分により異なる傾向を示す。炭素鋼グループは温度上昇に伴い $k$ の値が減少するのに対し、高合金鋼グループでは逆に増加し、低合金鋼グループのものは中間的な傾向を示す。一方、800以上ではいずれの材料もほぼ0.006 [kcal/m・s・°C]の画一的な値を示す。アルミニウム合金の熱伝導率 $k$ は図24のものしか見つからなかったので、高温の熱伝導率は分からないが、0.04~0.05 [kcal/m・s・°C]と仮定する。

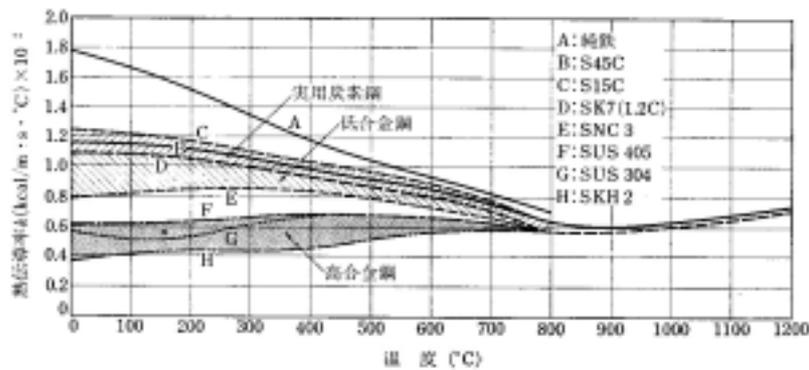


図22 Fe系材料の熱伝導率と温度<sup>1)</sup>

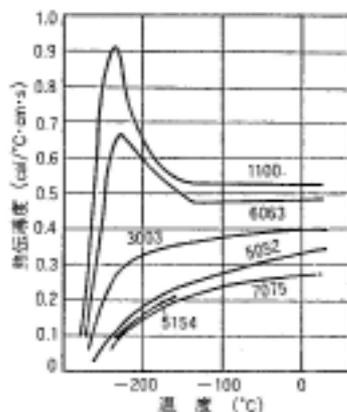


図24 アルミ合金の熱伝導率と温度<sup>6)</sup>

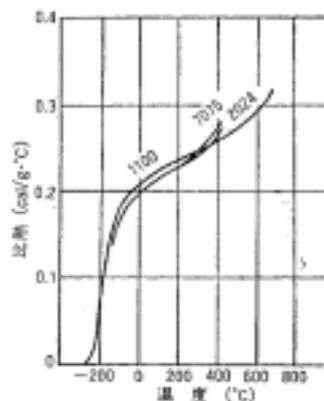


図18 アルミ合金の比熱と温度<sup>6)</sup>

また、比熱  $c$  は前述の図 17, 18 のように炭素鋼、合金鋼グループは温度上昇とともに増加し、750 付近で急増ピークを示し、それ以上では急減、800 以上ではほぼ一定値を示す。一方、SUS304 や SKH2 などの高合金鋼ではピークを示さず、低温では低い値を、高温では炭素鋼よりもむしろ高い値を示す。また、アルミ合金の比熱も温度上昇に伴って増加する。

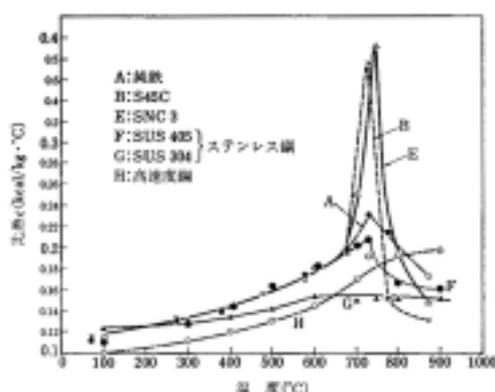


図 17 Fe 系の比熱と温度

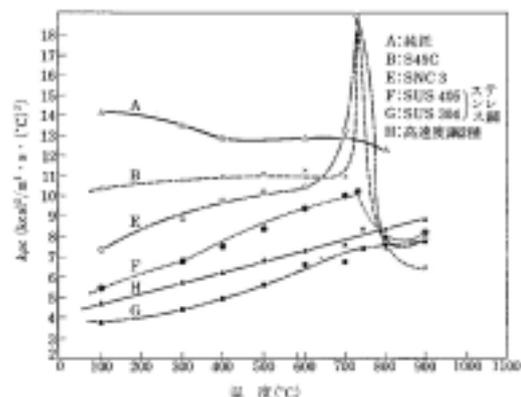


図 25 Fe 系の  $k$   $c$

切削温度に直接ひびく  $k$   $c$  と温度の関係を図 25 に示す。 $k$   $c$  の値は各材料の値が明らかに異なり、500 ~ 700 では SUS304 の値は S45C の値の半分程度である。また、図 24, 図 18 よりアルミ合金の  $k$   $c$  22 ~ 25 [kcal/m²·s·°C] であるので、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 = 1 : 0.5 : 2$$

である。

また、せん断せん断応力  $\tau_s$  を比較すると、表 4 より、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 = 1 : 0.76 : 0.29$$

となる。

したがって、 $\tau_s$  と  $k$   $c$  を総合した切削温度比較をすると、

$$S45C_{oil} : SUS304 : A2017 = 1 : 1.5 : 0.15$$

他の要因もあるので、この比がそのまま温度比になるわけではないが、切削温度の比較をすると SUS304 が高温になりやすく、アルミ合金は切削温度が S45C や SUS304 に比べ極端に低いと推察できる。

#### (d) 硬さ・降伏応力

表 5 よりピッカース硬さを比較すると、SUS304 が 3 種の中で最も硬く、A2017 は最も小さい。

工具は切削の際に、工具表面を機械的に被削材がひっかくことにより摩耗する。したがって、工具負担は被削材の硬さに影響を受けるといえる。

また、前述のように硬さと引張強さの間には比例関係があることが知られているので、降伏せん断応力もピッカース硬さの比に等しい。

したがって、材料の硬さや降伏せん断応力を比較すると、A2017 が最も切削しやすく、SUS304 はもっとも切削しづらいといえる。

表 5 ピッカース硬さ

	S45C (油あり)	S45C (油なし)	SUS304	A2017
Hv	184	184	216	141

### (3) 熱膨張

6.2節や7.2節(2)cで求めた切削温度の影響が高いと、被削材や工具の温度を上昇させ熱膨張による加工精度の低下を引き起こす。したがって、被削性において被削材の熱的性質は重要項目である。

表15に各被削材の線膨張係数を示す。線膨張係数も温度によって変化する性質があるが、残念ながら表15に示す値は0～100の範囲に適応可能な線膨張係数である。今回はこの値を用いて計算を行うこととする。

表15 線膨張係数

	S45C	SUS304	A2017
熱膨張係数 $\times 10^{-6} [^{-1}]$	11.7	16.5	23.0

単純に線膨張係数を見ただけでは、S45Cが最も膨張率が低くA2017が最も高いので、A2017が最も熱膨張による加工精度の低下を引き起こしやすいように思える。

しかし、すでに前述のように、A2017は切削温度自体が他と比べ大きく下回っているため、線膨張係数ではなく熱膨張量を比較しなければならない。

したがって、ここでは線膨張係数と温度上昇の積を被削性のパラメータとして扱うこととする。

初温  $\theta_0 = 20 [^{\circ}\text{C}]$  とし、切削温度  $\theta_t$  には理論計算で得た値を用いると、 $\lambda \cdot (\theta_t - \theta_0)$  は、

$$\text{S45C: } \lambda \cdot (\theta_t - \theta_0) = 11.7 \times 10^{-6} \times (600 - 20) = 6.8 \times 10^{-3}$$

$$\text{SUS304: } \lambda \cdot (\theta_t - \theta_0) = 16.5 \times 10^{-6} \times (670 - 20) = 1.1 \times 10^{-2}$$

$$\text{A2017: } \lambda \cdot (\theta_t - \theta_0) = 23.0 \times 10^{-6} \times (190 - 20) = 3.9 \times 10^{-3}$$

である。

よって、A2017が最も熱膨張が少なく、SUS304が最も熱膨張が大きいので、熱膨張による加工精度の低下の観点から見た被削性は、A2017が最も優れ、SUS304が最も劣っている。

### (4) 切屑

切屑の出かたを比較すると、SUS304は長く連続的に切屑が排出される。長い切屑は切削油剤をかける際に邪魔になることや、被削材や工具に引っかかるなど切削の邪魔になることもある。したがって、私見では切屑が小さいほうが切削しやすいと判断する。

よって、A2017やS45Cの切屑であれば影響は皆無といえるが、SUS304の切屑は切削の邪魔になる可能性があるという点で被削性が悪いといえる。

よって、総合的に判断して、三種の被削材の中では最も切削しやすいのは、すべての項目で良い結果となったA2017である。

S45CとSUS304では、切削抗力および切削抗力は同程度であるが、工具寿命に影響する切削温度および加工精度に影響する熱膨張を比較すると、S45Cが切削温度も低く、熱膨張も小さいので、S45Cの方が被削性に優れるといえる。

したがって、結論として被削性のよさは左から次の順序の通りである。

**A2017 S45C SUS304**

## 熱加工のしやすさ

Q2 3種類の材料を熱的加工法（レーザ加工，放電加工，電子ビーム加工など）によって除去加工する場合の加工のしやすさを比較せよ。

A2 熱加工のしやすさにおいては，A2017 が最も加工性が悪く，S45C が最も加工性に優れている。

熱加工による除去加工は，金属の溶融によって行われる。

以下に，熱加工のしやすさを考えるうえで注意しなければならない項目を挙げ，その項目について各材料の加工性の良し悪しを考えていくことにする。ここで，表 16 に熱加工を行う上で必要となる各金属の物理的性質および機械的性質を記す。

表 16 各金属の物理的性質および機械的性質<sup>15)</sup>

	S45C	SUS304	A2017
溶融融点 [ °C ]	1500 ~ 1527	1427 ~ 1500	680 ~ 820
比熱 [ J/(kg · °C) ]	544	556	879
融解潜熱 [ kJ/kg ]	276		406
熱伝導度 [ J/(m · s · °C) ]	49.4	22.2	167
線膨張係数 $\times 10^{-6}$ [ °C <sup>-1</sup> ]	11.7	16.5	23.0

また，各金属の添加成分は

S45C C : 0.45% , Si : 0.15 ~ 0.35% , Mn : 0.60 ~ 0.90% ,  
P : 0.030% 以下 , S : 0.035% 以下

SUS304 Ni : 8.00 ~ 10.50% , Cr : 18.00 ~ 20.00% , C : 0.08% 以下 ,  
Si : 1.00% 以下 , Mn : 2.00% 以下 , P : 0.040% 以下 , S : 0.030% 以下

A2017 Si : 0.5 ~ 0.8% , Cu : 3.9 ~ 4.5% , Mn : 0.4 ~ 1.0% , Mg : 0.4 ~ 0.8%

熱加工性を左右するパラメータを次の3項目とする。

- (1) 温度と熱容量
- (2) 熱膨張
- (3) 熱影響による含有成分の析出

### (1) 温度と熱容量

表 16 を見ると，A2017 の融点は S45C や SUS304 に比べると溶融しやすいように考えられる。しかし，A2017 の比熱や融解潜熱は，S45C や SUS304 などと比べると大きく，また熱伝導度は A2017 が極めて高い値を示すので局部加熱が難しいと考えられる。したがって，A2017 においては，溶融させるのに多量の熱を急速に供給しなければならず，熱的性質からは最も熱加工性が悪いと判断できる。

S45C と SUS304 では，熱計算の際に用いた図 17 および図 22 より，1000 °C 以上では熱伝導度ならびに比熱は同程度であるが，常温 ~ 1000 °C の範囲では明らかに S45C の方が高い比熱および熱伝導度を有している。したがって，SUS304 の方が S45C より熱的性質では熱加工性に優れているといえる。

よって，溶融に必要な熱エネルギーも観点から熱加工性を比較すると，最もエネルギーが必要となる A2017 は熱加工しにくく，エネルギーのいらぬ SUS304 が熱加工しやすいといえる。

## (2) 熱膨張

前述の切削熱による熱膨張量は A2017 が最も少ないという結論に至ったが、溶融させる場合にはすべての金属において高温状態を扱うので見解が異なる。

表 16 を見ても分かるように、A2017 の線膨張係数は S45C の線膨張係数の約 2 倍である。したがって、A2017 と S45C では熱加工を行った際に溶融部からその付近に同じ温度が伝わった際に A2017 は S45C の 2 倍の熱変形を起こすことになる。

熱ひずみが大きければ加工精度も悪くなり、またひずみに比例して残留応力も大きくなるため、割れを生じやすくなってしまう。

したがって、熱膨張の大きい A2017 は加工精度の観点から熱加工はしにくく、熱膨張の小さい S45C は熱加工性に優れているといえる。

## (3) 熱影響による含有成分の析出

熱影響により、合金中に含有成分が結晶粒界に析出を起すことがあり、場合によっては耐食性の低下や応力腐食割れを生じやすくなる。そのため析出しやすい元素を含む合金は析出を抑える加熱方法を選択しなければならないので、融通の悪さから熱加工性に劣るといえる。

熱影響部において含有成分の析出が最も顕著であるのがステンレス鋼である。

ステンレス鋼を 400 ~ 900 の温度範囲で長時間保持すると、含有物の Cr と C が、



で粒界に Cr 炭化物が析出し、そのため粒界近傍の Cr 濃度が低下する。SUS304 は、その耐食性を Cr によって得ているので、Cr 濃度が低下した粒界は腐食されやすい。そのため、SUS304 の熱影響部では粒界腐食および応力腐食割れを起こしやすい。また、ステンレス鋼の特有の問題として、ステンレス鋼は主に腐食環境で用いられるため耐食性の低下は死活問題である。

したがって、ステンレス鋼の熱加工においては、上述の事を避けるために、1010 ~ 1100 で十分加熱し、急冷を行い、粒界等に析出している Cr 炭化物等の介在物を素地に溶け込ませて均一化する溶体化処理を施すなど、加工に関して工夫が必要となる。

また、熱加工に関して、熱影響部の大きいガス溶断やアーク溶断を用いた除去加工などは選択すべきでない。

よって、熱加工の方法に制約のあるステンレス鋼は加工性が悪いと判断できる。

以上、(1) ~ (3) の内容より、熱膨張が大きく、溶融に多量のエネルギーが必要となる A2017 は最も熱加工性が悪い。

S45C と SUS304 では、S45C の方が熱膨張が小さいこと。また、SUS304 は熱影響部を考慮した加工法を選択しなければならないことから、最も熱加工性に優れているのは S45C であるといえる。

### 7.3 切削油剤の有無によって摩擦角 $\beta$ ，せん断角 $\phi$ および切屑厚さ $t_2$ がそれぞれどのように変化するか予測せよ．そして，その予測を実験結果によって検証せよ．

まず，切削油剤の作用について考えてみよう．切削油剤に望まれる項目は次の4つである．

- (1) 冷却作用
- (2) 潤滑作用
- (3) 浸透作用
- (4) 溶着制御作用

では，その作用を詳しく見てみよう．

#### (1) 冷却作用

切屑が生成される時，切屑と工具すくい面で発生する外部摩擦熱と，被削材がせん断変形するときの金属分子の内部摩擦熱により，切削温度は500～1000にまで上がる．

何度も述べたが，切削温度が高いと工具刃先の軟化が起こり，摩耗が増して工具寿命が早まる．また，工具や被削材の熱膨張が加わって，加工精度も低下する．

したがって，冷却作用は切削熱を吸収，発散し，工具寿命の延長や加工精度の改善を図る非常に重要な作用といえる．

#### (2) 潤滑作用

切削油剤は工具すくい面と切屑の間，刃先逃げ面と材料の間に侵入して摩擦抵抗を減少させる．工具のすくい面をすべる切屑接触長さが減少することにより，切削抵抗も減少し合力の方向も切削方向に近くなる．このことからせん断角が大きくなり薄い切屑で排出されるため，工具の摩耗を低減し，寿命を延ばし，消費動力が軽減され，切削効率が向上する．

#### (3) 浸透作用

潤滑作用の効果を上げるためには，切削油剤が工具すくい面と切屑の間，逃げ面と材料の間に浸透しなければならない．しかし，切削油剤が速くなると切屑の流出にさからって浸透はしにくくなり，80[m/min]以上の切削速度になると浸透は困難になる<sup>4)</sup>．

#### (4) 溶着制御作用

工具刃先に構成刃先が付着すると仕上げ面や寸法精度に，また工具寿命にも影響を与えることになるので，構成刃先の付着を抑制する作用が必要となる．特に極圧添加剤の入った切削油剤は反溶着作用が大きいので良好な仕上げが得られる．

予想としては，油剤が潤滑剤の役割をして摩擦エネルギーは減少すると思ったが結果はそうではなく，表10のように摩擦エネルギーに差はなく，逆に全体の切削仕事エネルギーが，油剤があると増える結果となった．ただし，切削仕事が増えた原因はすくい面垂直力 $N$ が増えたためで，すくい面摩擦力および摩擦係数は小さくなっている．すくい面垂直力 $N$ が増えた理由は分からないが，摩擦係数が小さくなったことより潤滑作用は効果があったといえる．

切削油剤の作用(3)でも述べたように，切削速度が80[m/min]以上では浸透作用が期待できなくなるため，潤滑作用も効果が薄れてしまう．今回の切削速度は140[m/min]であるので潤滑作用が小さいのはこのためである．

また，切削温度は測定していないが，加熱部に常温の油をかけているので，冷却作用があったことは容易に想像できる．実際に切削の際に，油剤をかけた切削ではオイルが蒸発して白煙を上げる様子が確認できた．

では、油剤をかけた場合に、すくい面摩擦力Fは減少し、すくい面垂直力Nは変化しなかったと仮定して摩擦角  $\beta$ 、せん断角  $\phi$  および切屑厚さ  $t_2$  の変化を以下に示す。

まず、すくい面摩擦力Fと摩擦角  $\beta$  の関係は式(10)より

$$\mu = \tan \beta = \frac{F}{N} \quad (10)$$

$$\tan \beta \propto F \quad \text{なので} \quad \beta \propto F \quad (40)$$

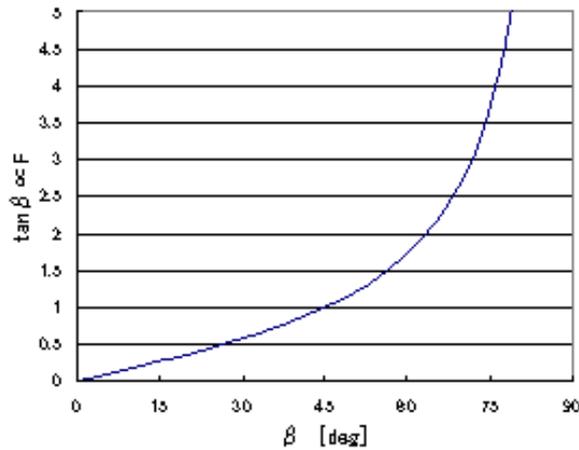


図 25 摩擦力 F と摩擦角  $\beta$  の関係

よって、式(40)より摩擦力Fが減少すると摩擦角  $\beta$  は減少する。

また、実験結果よりせん断角  $\phi$ 、すくい角  $\alpha$ 、および摩擦角  $\beta$  の間に強い相互関係のあることが知られており  $\phi = \phi(\alpha, \beta)$  の関数となっている。Merchant, Lee-Shaffer の両方の切削方程式においても、

$$\phi \propto -(\beta - \alpha)$$

の関係が得られる(図 13 参照)。

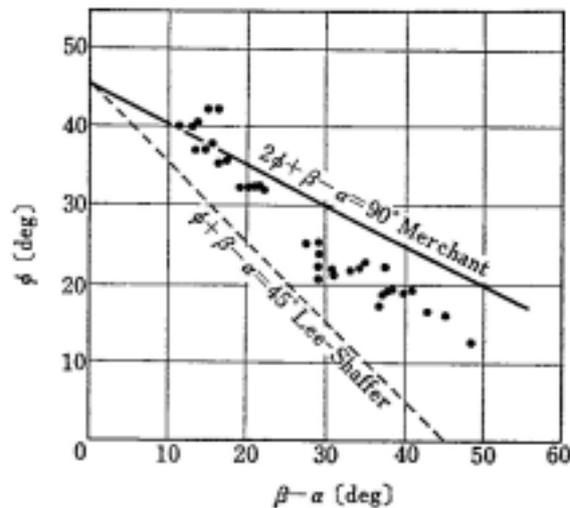


図 13 せん断加工と摩擦角

ところで、すくい角  $\alpha$  は実験条件であるので、

$$\alpha = \text{const} \quad \text{より} \quad \phi \propto -\beta \quad (41)$$

したがって、摩擦角  $\beta$  が減少するとせん断角  $\phi$  が増大する。

よって、式(40),(41)より、

$$F \propto \beta \propto -\phi \quad (42)$$

なので、摩擦力  $F$  が減少すると摩擦角  $\beta$  が減少し、せん断角  $\phi$  は増加することがわかる。

また、せん断角  $\phi$  と切削比  $r_c$  の関係は式(2)

$$\phi = \text{Tan}^{-1} \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha}$$

より、せん断角  $\phi$  が増加すれば切削比  $r_c$  も増加する (図 26 参照)。

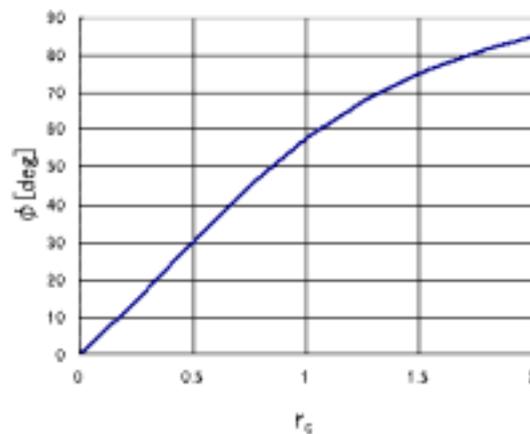


図 26 せん断角と切削比 (  $\alpha = 25.05^\circ$  )

式(1)より  $r_c = t_1/t_2$  であり、切削厚さ  $t_1$  は実験条件で定めるので一定であるので、

$$r_c \propto \frac{1}{t_2} \quad (43)$$

より、切削比  $r_c$  が増加すると切屑厚さ  $t_2$  が減少する (図 27 参照)。

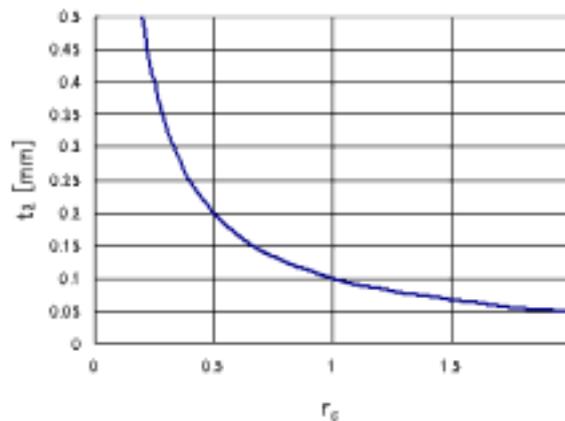


図 27 切削比と切屑厚さ (  $t_1 = 0.1 \text{ mm}$  )

したがって相関的な関係より，切削油剤を使用すると，すくい面摩擦係数が低下することに伴い，せん断角  $\phi$  は大きくなり，切屑厚さ  $t_2$  は厚くなる．

今回の実験では，油剤をかけた S45C の主分力ひずみの測定において，ロガーの表示にエラーが出たこともあり，すくい面主直力が油剤をかけないときよりも大きくなってしまった．

しかし，結果として切屑厚さ  $t_2$  は直接法では信頼区間の重なりがあるものの，間接法の値を比較すると油剤をかけた測定値では小さくなっている．(末尾の表参照)

では，より細かく，前述のすくい面摩擦力  $F$ ，摩擦角  $\beta$ ，せん断角  $\phi$ ，切削比  $r_c$  および切屑厚さ  $t_2$  の変化をしてみる．

末尾の測定結果表の S45C (油剤あり) と S45C (油剤なし) を比較すると，すくい面摩擦力  $F$  は油剤なしの測定値よりも減少しており，それに伴い摩擦角  $\beta$  も減少している．

また，せん断角  $\phi$  も油剤をかけた測定値では，直接法では信頼区間の重なりがあるものの，間接法の値を比較すると増加していることがわかる．

また，せん断角  $\phi$  の増加に伴い，油剤ありの切削比  $r_c$  は，こちらも直接法では信頼区間の重なりがあるものの，間接法の値を比較すると増加していることがわかる．

結果として，油剤をかけた S45C と油剤をかけない S45C では，油剤をかけた S45C の切屑厚さが減少する結果が得られており，これは前述の P.37,38 で示したすくい面摩擦力  $F$ ，摩擦角  $\beta$ ，せん断角  $\phi$ ，切削比  $r_c$  および切屑厚さ  $t_2$  の変化と一致している．

## 8 . 結言

油剤の有無の比較では、すくい面摩擦力が減少することは確認できたが、すくい面垂直力が変化してしまい、油剤をかけた際に、思ったほど摩擦角の減少やせん断角の増加を確認できなかった。ただし、増えたか・減ったかのみを述べれば、間接法の値ではせん断角は増加、摩擦角の減少、切削比の増加および切屑厚さの減少という結果となった。

思ったほど、変化しなかった理由としては、油剤のかけ方が不十分であることも考えられるが、切削速度が 140[m/min]と高速であったため、切削油剤が工具すくい面と切屑の間、逃げ面と材料の間に十分に浸透せず、そのために潤滑作用が十分に得られなかったためだと推測できる。

材料ごとの比較をすると、特にアルミニウム合金は切削抵抗が小さく、切削加工のしやすさでは炭素鋼やステンレス鋼よりもすぐれているといえる。また、切削抵抗に影響を与える因子としては、材料の引張強さおよび硬さが大きく関与しており、引張強さの差がせん断面にかかるせん断応力やせん断エネルギーに相関していることも確認できた。

また、S45C と SUS304 は切削抵抗やせん断角などがほぼ同程度で、加工のしやすさの観点からは非常に近いものの、切屑形状は全く異なるものとなっている。逆を言えば、切屑形状と加工のしやすさには関係しないと私見ではあるが確認した。

しかしながら、熱加工のしやすさにおいては、アルミ合金は融点は低いものの、熱伝導率や比熱が大きいために多量の熱を急速に供給しなければならないこと、線膨張率が大きいために熱加工の際に熱変形が大きく加工精度が悪いなど、熱加工性においてアルミ合金が最も劣っていることも確認した。

## 参考文献

- ( 1 ) 藤村善雄；実用切削加工法，共立出版，( 1980 )
- ( 2 ) 白井英治，白樫高洋；加工力学入門，東京電機大学出版局，( 1996 )
- ( 3 ) ヴェ・イー＝シソエフ；切削工具の理論と実際，工学図書，( 1963 )
- ( 4 ) 町野，横山，朝比，鈴木；機械加工の技術と実際，啓学出版，( 1982 )
- ( 5 ) 荒木孝雄，大中逸雄；溶融加工学，コロナ社，( 2002 )
- ( 6 ) アルミニウム技術便覧，軽金属協会編 ( 1985 )
- ( 7 ) コロージョン・エンジニアリング，腐食防食協会 ( 2000 )
- ( 8 ) 白井英治；切削・研削加工(上)，共立出版，( 1985 )
- ( 9 ) 白井英治，松村隆；機械製法要論，東京電機大学出版局，( 1999 )
- ( 10 ) 蒲地一嘉；金属材料の溶接，共立出版，( 1985 )
- ( 11 ) 中西実，丸尾大；現代溶接技術大系 炎加工・熱切断，産報出版，( 1980 )
- ( 12 ) 大西巖，水野政夫；ガス溶断およびガス加工，溶接ニュース出版局，( 1958 )
- ( 13 ) 百合岡信孝，大北茂；鉄鋼材料の溶接，産報出版，( 1998 )
- ( 14 ) 西本和俊，夏目松吾，小川和博，松本長；ステンレス鋼の溶接，産報出版，( 1998 )
- ( 15 ) 水野政夫，蓑田和之，坂口章；  
現代溶接技術体系 アルミニウムとその合金の溶接，産報出版，( 1980 )