

# 工具一切屑接触長さが切削温度に及ぼす影響

北川 武揚

(昭和41年10月31日受理)

## The Effect of The Length of Tool-Chip Contact on Interface Temperature

by Takeaki KITAGAWA

### Abstract

From an economic stand point, tool life is an item of major importance in metal cutting.

The temperature at the tool-chip interface (the contact surface between the tool face and the chip) is also important with regard to tool life.

This paper reports the effect of tool-chip interface temperature as measured by the tool-chip thermocouple technique while machining the low carbon steel at cutting speed 95 m/min with a carbide tool as the contact length is successively reduced, and the discussion with measured and computed cutting temperature by M. C. Shaw's theory.

The following main conclusions were obtained;

- 1) The tool-chip interface temperature decreased according to reduction of the tool-chip contact length. The temperature difference was about 150°C maximum to minimum.
- 2) The tool-chip interface temperature was lower when the tool of large rake angle was used with same cutting condition.
- 3) The computed temperature nearly agreed with measured temperature.

### 1. ま え が き

金属切削において切削温度は重要な意義をもっている。切削熱の発生は被削材の温度上昇にほとんど作用せず、工具自身の温度上昇に働き、ひいては工具の軟化、摩耗を促進する。

強制的な工具一切屑接触長さ拘束工具による、扇形塑性域をともなった切削機構の塑性学的理論解析が、臼井、菊地および星等<sup>1)</sup>によって行なわれ、これにもとづき、拘束工具の切削性について統一的な解析がなされつつある。

工具と切屑の接触長さの縮小にともない、切削領域は次第にせばめられる。これは臼井等の理論にても明らかであるが、経験からも知られるように非常にシャープな切削が行なわれることを意味し、したがって切削動力の減少が考えられる。もし切削動力のほとんどが熱エネルギーに変るものと仮定すれば、強制的な工具一切屑接触長さの縮小は、切削熱の発生を抑制す

るものであり、当然切削温度の低下を予想しうる。

本報では、このような特殊な切削機構における、工具と切屑の接触長さを人為的に縮小したときの温度に対する影響を扱ったものであり、切削温度の実測値と M. C. Shaw<sup>2)</sup>の理論にしたがった理論値とがどのように対応するかを比較検討した。

## 2. 実 験

### 2.1 使用機械および切削諸元

切削機械は昌運カズヌーブ高速旋盤を使用し、切削諸元は次のとおり。

被削材：S 14 C，工具材質：タンガロイ TX 20，工具形状：[0-var-5-10-10-0-0.3]，切削速度：95 m/min，送り：0.3 mm/rev，切込み：2.0 mm，切削剤：乾。

### 2.2 実験装置および実験方法

旋盤による準二次元切削において、工具と切屑の接触長さ拘束縮小にともなう切削温度の変化を、工具一切屑熱電対法を用いて工具すくい面の平均温度を測定した。工具と切屑の接触長さの変化は、工具すくい面あるいは逃げ面をダイヤモンド砥石にて研削することにより行なった。

熱起電力—温度の較正は、アルメル—クロメル標準熱電対と電気管状炉を用いて行なった。Fig. 2, Fig. 3 は温度較正装置、および較正曲線を示す。較正中、超硬棒冷接点の温度上昇は、一応銅—コンスタンタン熱電対を用いて温度の補正を行ない常時冷却水にて強制冷却を行なっている。

### 2.3 実験結果

この方法で得られた切削温度は工具すくい面の平均温度であり、接触部の中でも温度分布が違

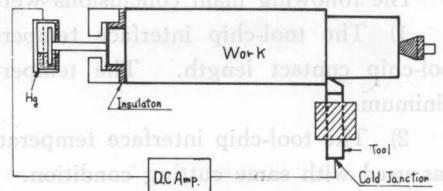


Fig. 1. 工具一切屑熱電対法に依る熱起電力測定回路

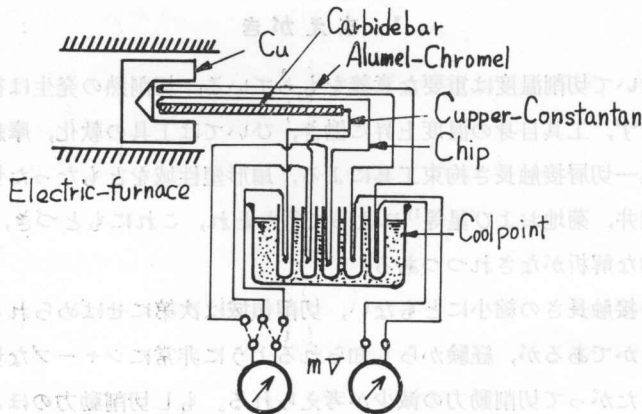


Fig. 2. 起電力—温度較正回路

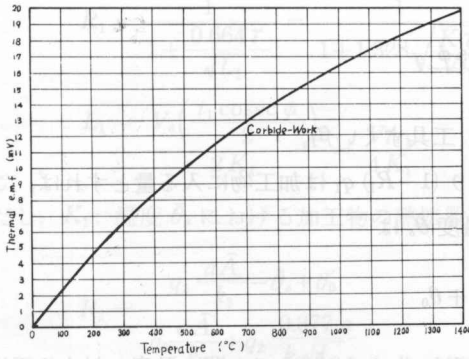


Fig. 3. 熱起電力—温度校正曲線

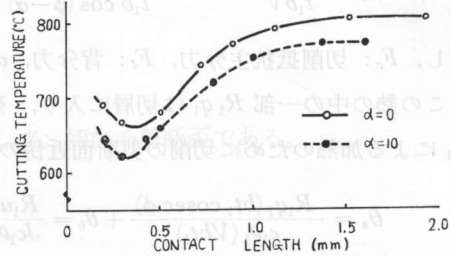


Fig. 4. 工具一切屑接触長さの縮小に伴う実測された切削温度の変化

うであろうが、切削において最も高温になるのはこの部分であるためその平均値を切削温度と考えた。

Fig. 4 は測定された切削温度であるが、接触長さ  $\ell=0.4$  mm 付近で最小値を示し、自然接触長さの場合と比べて約  $150^{\circ}\text{C}$  の温度差を示している。また、すくい角は大きいほど切削温度は低くあらわれている。

### 3. 理論および実験結果との比較

#### 3.1 基礎理論概要

M. C. Shaw 等によって導かれた切削温度の理論式は伝熱学的解析にもとづき、ほぼ次のように示されている。

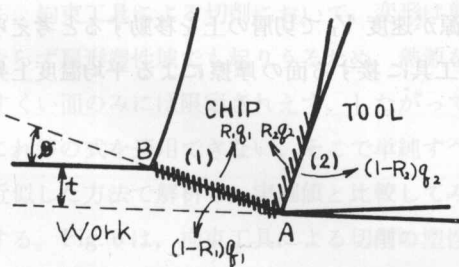


Fig. 5. 切削における主な熱源

は一樣に分布すること、次に切屑が工具と接触している短い時間に切屑に入った熱エネルギーの分布は変化しない。とすれば次のように考えられる。

剪断面で単位時間、単位面積当りに発生する熱量  $q_1$  は

$$q_1 = \frac{F_s V_s \sin \phi}{J t_1 b} = \frac{u_s V \sin \phi}{J}$$

となる。ただし、 $J$ : 熱の仕事当量、 $t_1$ : 切り込み、 $b$ : 切削幅、 $\phi$ : 剪断角、 $F_s$ : 剪断力、 $V_s$ : 切屑の剪断面に沿っての速度、 $V$ : 切削速度、 $u_s$ : 単位体積を切削するときの剪断エネルギー

まず、切削における発生熱エネルギーの分布は二つの領域に分けて考えることができる。すなわち、Fig. 5 に示すように、剪断面における剪断熱エネルギー(1)と、すくい面における摩擦熱エネルギー(2)である。切削温度の解析に当って次の仮定をする。まず剪断面領域とすくい面領域における剪断および摩擦エネルギー

である。 $u_s$ は又次のようにあらわされる。

$$u_s = \frac{F_s V_s}{t_1 b V} = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \cos \phi}{t_1 b \cos(\phi - \alpha)}$$

ただし、 $F_c$ : 切削抵抗主分力,  $F_t$ : 背分力,  $\alpha$ : 工具すくい角。

この熱の中の一部  $R_1 q_1$  は切屑に入り, 残り  $(1-R_1) q_1$  は加工物に入る量とすれば, この  $R_1 q_1$  による加熱のために切削の剪断面近傍の温度  $\bar{\theta}_s$  は

$$\bar{\theta}_s = \frac{R_1 q_1 (b t_1 \operatorname{cosec} \phi)}{c_1 \rho_1 (V b t_1)} + \theta_0 = \frac{R_1 u_s}{J c_1 \rho_1} + \theta_0$$

を得る。ただし、 $\theta_0$ : 最初の温度,  $c_1, \rho_1$ : それぞれ  $\theta_0$  から  $\bar{\theta}_s$  までの間の温度に対する平均の切屑の比熱および密度である。

すくい面で単位時間, 単位面積当りに発生する熱量  $q_2$  は

$$q_2 = \frac{F V_f}{J a b} = \frac{u_f V_{f1}}{J a}$$

となる。ただし、 $F$ : 摩擦力,  $V_f$ : 切屑の流出速度,  $a$ : 工具が切屑と接触する部分の長さ,  $u_f$ : 単位体積を切削するときの摩擦エネルギーである。 $u_f$ はまた次のようにあらわされる。

$$u_f = \frac{F V_f}{t_1 b V} = \frac{(F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha) r_c}{t_1 b}$$

ただし、 $V_f$ : 切屑の工具面に沿った速度,  $r_c$ : 比切屑厚さ。

前と同様に、 $q_2$  中  $R_2 q_2$  だけが切屑に入り, 残りの  $(1-R_2) q_2$  は工具に入るものとする。まず切屑については、長さ  $a$ , 幅  $b$  なる矩形の熱源が速度  $V_f$  で切屑の上を移動すると考えられるから伝熱の Jaeger の解を適用して、切屑の工具に接する面の摩擦による平均温度上昇  $\Delta \bar{\theta}_f$  は

$$\Delta \bar{\theta}_f = \frac{0.754 (R_2 q_2) \frac{a}{2}}{k_2 \sqrt{L_2}}$$

$$L_2 = \frac{V_f \frac{a}{2}}{2 K_2}$$

を得る。ただし、 $k_2, K_2$  は究極の温度における切屑の熱伝導率および熱拡散率。

結局、切屑の工具に接する面の平均温度  $\bar{\theta}_t$  は剪断面の平均温度  $\bar{\theta}_s$  に摩擦による平均温度上昇  $\Delta \bar{\theta}_f$  を加えたものにほかならない。したがって  $\bar{\theta}_t$  は

$$\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_s + \Delta \bar{\theta}_f = \frac{R_1 u_s}{J c_1 \rho_1} + \theta_0 + \frac{0.377 (R_2 q_2) a}{k_2 \sqrt{L_2}}$$

となる。

ここで、分配係数  $R_1, R_2$  も Jaeger の解を適用して次の式が得られる。

$$R_1 = \frac{1}{1 + \frac{0.664 r}{\sqrt{L_1}}} = \frac{1}{1 + 1.328 \sqrt{\frac{K_1 r}{V t_1}}}$$

$$L_1 = \frac{V_s \left( \frac{t_1 \operatorname{cosec} \phi}{2} \right)}{2 K_1} = \frac{V r t_1}{4 K_1}$$

ただし、 $K_1$ : 温度  $\bar{\theta}_s$  における加工物の熱拡散率、 $r$ : 切削の剪断歪である。

$$R_2 = \frac{q_2 \frac{a \bar{A}}{k_3} - \bar{\theta}_s + \theta'_0}{q_2 \frac{a \bar{A}}{k_3} + q_2 \frac{0.377 a}{k_2 \sqrt{L_2}}}$$

ただし、 $k_3$ : 温度  $\bar{\theta}_t$  における工具材料の熱伝導率、 $\theta'_0$ : 工具の最初の温度、 $\bar{A}$ : area factor で旋盤による準二次元切削では  $\frac{b}{a}$  の関数であらわされる。

以上の解析での種々の熱定数  $\rho_1$ ,  $c_1$ ,  $K_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  等はいずれも温度に依存した値である。したがって、温度の計算には try and error を繰返して行なわなければならない。

### 3.2 通常法による解析

切削温度の理論的解析は、Shaw のほかに Trigger<sup>3)</sup> が行なった例があるが、いずれも塑性変形が単純すべり線場を持つ場合についての切削温度を扱ったものである。これを、接触長さ拘束工具による切削における、扇形塑性域を伴ったすべり線場の変形に直接適用出来るかどうかは問題である。すなわち、拘束工具による切削において、変形は剪断面のみならず扇形塑性域でも起りうるため、熱源を剪断面とすくい面のみには限定されえず、したがって、単純にこれ等の式を適用できない。そこで単純すべり線場に近似した方法で解析し、実測値と比較してみることにする。Fig. 6 は、拘束工具による切削の塑性域を単純すべり線場に置き換えて考えた場合の両者の関係を示したもので、破線はすくい角同一で切屑厚さも等しいとして考えられる単純な変形をあらわす。

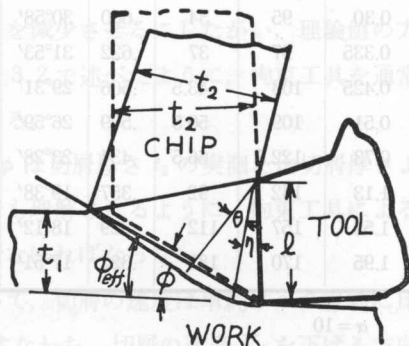


Fig. 6. 拘束を伴う切削模型と通常工具の関係

### 3.3 計算に必要なデータ

Fig. 7, Fig. 8 は切削抵抗と切削比を実測した値を示したものである。

### 3.4 通常法に依る理論計算結果

Fig. 9 は、shaw の式を用いて得られた剪断面の温度  $\bar{\theta}_s$  と摩擦による工具すくい面の温度上昇  $\Delta \bar{\theta}_f$ , およびその和として求めた理論的切削温度  $\bar{\theta}_t$  をプロットしたものである。工具と切屑の接触長さの縮小にともない、 $\bar{\theta}_s$  は明らかに低下するが、 $\Delta \bar{\theta}_f$  は若干上昇の傾向を示す。結果として得られた  $\bar{\theta}_t$  は、はじめの予想通り低下の傾向を明らかに示している。

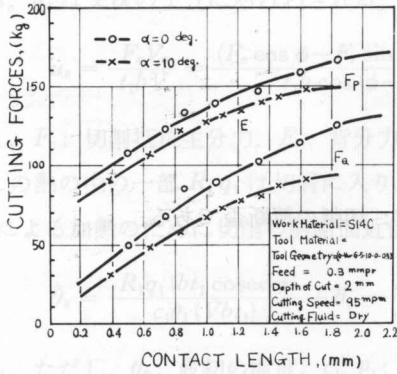


Fig. 7. 工具一切屑接触長さ縮小に伴う切削力の変化 ( $F_P$ : 主分力,  $F_Q$ : 送り分力)

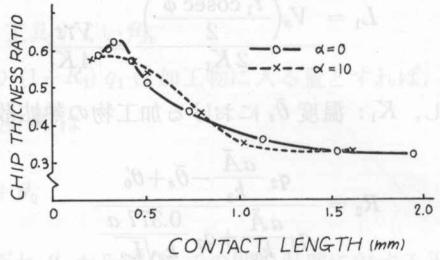


Fig. 8. 工具一切屑接触長さ縮小に伴う切屑比の変化

Table 1. 理論解析結果

$\alpha = 0$

| $l$   | $F_P$ | $F_Q$ | $r_c$ | $\phi$ | $\gamma$ | $\tau_s$ | $u_s$ | $u_f$ | $R_1$ | $R_2$ | $\bar{\theta}_s$ | $\Delta\bar{\theta}_f$ | $\bar{\theta}_t$ |
|-------|-------|-------|-------|--------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|------------------|------------------------|------------------|
| 0.25  | 91    | 30.7  | .585  | 30°20' | 2.29     | 53.0     | 121   | 29.9  | .750  | .880  | 247              | 393                    | 640              |
| 0.30  | 95    | 34    | .600  | 30°58' | 2.27     | 54.9     | 125   | 34.0  | .752  | .887  | 252              | 401                    | 653              |
| 0.335 | 97    | 37    | .622  | 31°53' | 2.23     | 55.3     | 123   | 38.4  | .754  | .893  | 252              | 418                    | 670              |
| 0.425 | 103   | 43.5  | .566  | 29°31' | 2.33     | 56.1     | 131   | 41.1  | .751  | .891  | 263              | 417                    | 680              |
| 0.51  | 109   | 50.5  | .509  | 26°59' | 2.47     | 56.2     | 139   | 42.3  | .747  | .885  | 278              | 409                    | 688              |
| 0.73  | 122.5 | 66.5  | .434  | 23°28' | 2.74     | 57.1     | 157   | 48.1  | .740  | .885  | 303              | 417                    | 720              |
| 1.13  | 142   | 92    | .357  | 19°38' | 3.16     | 57.6     | 182   | 54.7  | .731  | .863  | 340              | 409                    | 749              |
| 1.53  | 157   | 112   | .329  | 18°12' | 3.37     | 59.3     | 200   | 61.5  | .728  | .859  | 362              | 415                    | 778              |
| 1.95  | 170   | 132   | .322  | 17°51' | 3.43     | 62.0     | 213   | 70.8  | .729  | .859  | 388              | 412                    | 800              |

$\alpha = 10$

| $l$   | $F_P$ | $F_Q$ | $F$  | $r_c$ | $\phi$ | $\gamma$ | $\tau_s$ | $u_s$ | $u_f$ | $R_1$ | $R_2$ | $\bar{\theta}_s$ | $\Delta\bar{\theta}_f$ | $\bar{\theta}_t$ |
|-------|-------|-------|------|-------|--------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|------------------|------------------------|------------------|
| 0.211 | 79.5  | 18.0  | 34.5 | .575  | 32°10' | 2.00     | 51.3     | 102   | 33.1  | .760  | .903  | 213              | 480                    | 693              |
| 0.436 | 93.0  | 33.5  | 49.4 | .569  | 31°52' | 2.01     | 53.0     | 107   | 46.8  | .751  | .900  | 222              | 469                    | 691              |
| 0.51  | 77.5  | 38.0  | 54.4 | .539  | 30°21' | 2.08     | 53.9     | 112   | 48.8  | .758  | .897  | 232              | 464                    | 696              |
| 0.797 | 115   | 56.4  | 74.6 | .429  | 24°31' | 2.45     | 56.3     | 138   | 53.3  | .747  | .885  | 273              | 451                    | 725              |
| 1.015 | 127   | 68.0  | 89.0 | .401  | 22°59' | 2.59     | 58.5     | 152   | 59.3  | .745  | .884  | 297              | 442                    | 739              |
| 1.385 | 140   | 83.0  | 106  | .349  | 20°07' | 2.91     | 59.0     | 172   | 61.7  | .737  | .865  | 327              | 419                    | 746              |
| 1.615 | 147   | 90.0  | 114  | .329  | 18°56' | 3.07     | 59.0     | 181   | 62.2  | .733  | .863  | 340              | 409                    | 745              |

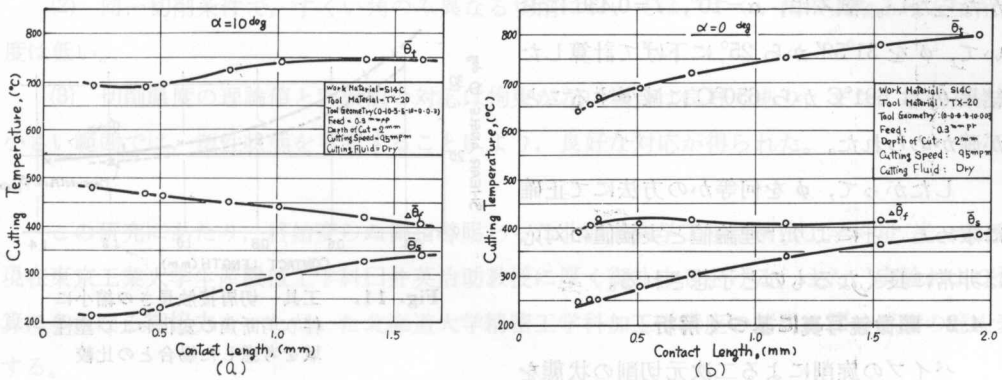


Fig. 9. 工具一切屑接触長さ縮小に伴う理論的切削温度の変化

#### 4. 理論値と実験値の比較

##### 4.1 通常法による理論値と実験値の検討

拘束長さがじゆ分長くなれば、通常における理論値は拘束されないので、測定値に一致するはずである。Fig. 10でも明らかなように、工具と切屑接触長さが自然接触の状態ではきわめて実測値との対応が良好である。しかし、接触長さ  $l$  を減少させるにしたがい、理論値の方が実測値に比し大きくなる傾向が見られる。すなわち、3.2で述べたように、拘束工具を通常法で解析した結果に若干の無理があったものと考えられる。

まず、その原因を剪断角  $\phi$  について考えてみると、 $\phi$  は切屑厚さ  $t_2$  の実測と比切屑厚さより求めたもので、必ずしも適当とは言えない。Fig. 6でも理解されるように、拘束工具による切削の理論に従えば、 $\phi$  はもっと減少する方向の  $\phi_{em}$  でなければならない。

事実、拘束工具の扇形場を伴ったすべり線場において、切屑の速度は単純すべり線場に比べてかなり低いことは白井等の理論にも明白である。すなわち、切屑の速度  $V_f$  を下げる方向は  $\phi$  を減少させる方向であり、結局摩擦によるすくい面温度上昇  $\Delta\theta_f$  を低下せしめる方向には

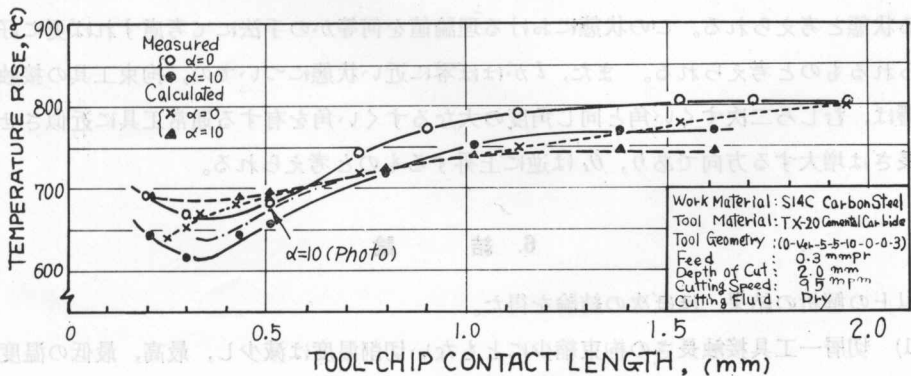


Fig. 10. 切削温度の理論値と実測値の比較

かならない。試みに、 $\alpha=10^\circ$ 、 $l=0.436$ において、 $\phi$ を $31^\circ 52'$ から $25^\circ$ に下げて計算した結果 $\bar{\theta}_t$ は $691^\circ\text{C}$ から $650^\circ\text{C}$ に減少することが確かめられた。

したがって、 $\phi$ を何等かの方法にて正確に求めることにより、理論値と実験値の対応は非常に良くなるものと予想される。

#### 4.2 顕微鏡写真に基づく解析

パイプの旋削による二次元切削の状態を急停止し、顕微鏡写真によって剪断角を求める方法である。試料不足のため、 $\alpha=+10^\circ$ の主な点のみ求めた。Fig. 11の破線にて示した曲線は、顕微鏡写真観察の結果、得られた剪断角 $\phi_{\text{photo}}$ であり、切屑より求めた剪断角を $\phi_{\text{chip}}$ で表わしている。

$\phi_{\text{photo}}$ を用いて計算を行なった結果

$$l = 0.51 \text{ mm} \quad \phi_{\text{photo}} 27^\circ \quad \text{の時} \quad \bar{\theta} = 676^\circ\text{C}$$

$$l = 1.2 \text{ mm} \quad \phi_{\text{photo}} 19.5^\circ \quad \text{の時} \quad \bar{\theta} = 740^\circ\text{C}$$

$l=0.51$ の時、 $\bar{\theta}_t$ は約 $15^\circ$ 低い値を示した。また、 $l=1.2$ の時 $5^\circ$ 低い値を得たがこれは余り問題にならないと思う。Fig. 10で一点鎖線にて示した曲線は、 $\phi$ を考慮した場合の $\bar{\theta}_t$ の変化であるが、実験値と良く近似している。

### 5. 考 察

拘束工具の切屑接触長さ $l$ が大なる所で理論値、実験値共に問題はないが、 $l$ が小さい範囲特に $l=0.55$  mm付近では、顕微鏡写真より得た剪断角 $\phi_{\text{photo}}$ を適用することによって、かなり良く近似された。これは、通常の単純すべり線場よりも、扇形場を伴う拘束されたすべり線場の変形が $l$ が小さいほど苛酷な状態にあり、したがって、 $\phi_{\text{chip}}$ と $\phi_{\text{photo}}$ の差が最も大きくなる状態と考えられる。この状態における理論値を何等かの手法にて考慮すれば更に好結果が得られるものと考えられる。また、 $l$ がほぼ零に近い状態についての、拘束工具の接触長さの影響は、むしろ二次すくい角と同じ角度の大なるすくい角を有する通常工具に近似させれば接触長さは増大する方向であり、 $\bar{\theta}_t$ は逆に上昇するものと考えられる。

### 6. 結 論

以上の解析の結果、ほぼ次の結論を得た。

(1) 切屑—工具接触長さの拘束縮小にともない切削温度は減少し、最高、最低の温度差は約 $150^\circ\text{C}$  ( $V=95$  m/min)であった。

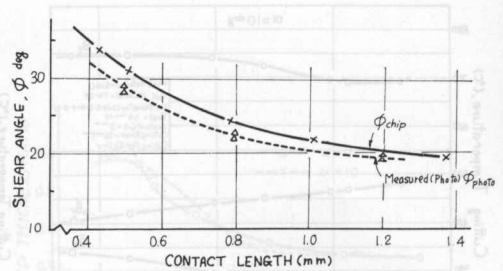


Fig. 11. 工具—切屑接触長さの縮小に伴う剪断角の変化および塑性域を考慮した場合との比較



(2) 同一切削条件で、すくい角のみ異なる切削においては、すくい角の大なるほど切削温度は低い。

(3) 切削温度の理論値と実験値の対応は拘束がない場合は良好であり、また、接触長さが小さい範囲では、塑性状態を考慮することにより、良好な対応が得られた。

新井 義夫

この研究にあたり、終始変らぬ御指導賜わった北海道大学工学部精密工学科星 光一教授、現在東京工業大学生産機械工学科臼井英治助教授に厚く御礼申し上げる。また、実験および計算に多大なる御協力をいただいた北海道大学精密工学科加工学講座の諸氏に深く感謝の意を表す。

文 献

- 1) E. Usui, K. Kikuchi, K. Hoshi: Trans. ASME, 1963.
- 2) E. G. Lowen, M. C. Shaw: Trans. ASME Vol. 76. 1954.
- 3) B. T. Chao, K. J. Trigger: Trans. ASME Series B Vol. 81, 1959.

Abstract

shown that the logarithm of the spot area was a linear function of the the weight of material in thin layer chromatography of Nitrobenzene and the following experimental equation was proposed:

$$-C \cdot A^n$$

the weight of material,  $A$  is the area of a spot,  $n$  and  $C$  are a constant

eriment was carried out on a large chromatoplate on which several spots ographed simultaneously, and good reproducibility was obtained.

1. 緒 言

薄層クロマトグラフィーを利用する定量分析については、これまでに種々の方法が報告されてきた。その中で最も一般的に知られたスポット面積を測定し、重量を求める方法が、Fowier<sup>1)</sup>の方法と見られる。スポット面積と重量の関係を大別すると、つぎの二種類に

分類される。薄層クロマトグラフでは、Fowier<sup>1)</sup>が重量の対数とスポット面積の対数の間に線形関係が成立することを報告している。

$$\log W = \log A \quad (1)$$

この関係を、 $A$  はスポット面積をあらわす。

薄層クロマトグラフィーについては、重量の対数とスポット面積の平方根が直線関係にあると Hardy<sup>2)</sup>が報告している。

$$\log W \propto \sqrt{A} \quad (2)$$