

## 金属切削加工におけるせん断角理論の実験的検討

平松孝俊\*, 李木経孝, 大森正信

(平成11年10月14日受理)

### Experimental study on shear angle theory of metal cutting

Takatoshi HIRAMATSU\*, Tsunetaka SUMOMOGI,

Masanobu OHMORI

(Received October 14, 1999)

The data on metal cutting forces are required not only for the design of machine tools and cutting tools but also for the determination of cutting condition. Many researchers concentrated their efforts on the theoretical study and the empirical study for the prediction of the shear angle that dominates the cutting forces. In the orthogonal cutting tests of various materials under the cutting condition in the range of practical operation, the shear angle is shown to be strongly affected by the cutting speed and to be expressed with a simple empirical equation. However, since the empirical equation is not in sufficient agreement with the theoretical equation, it is necessary to develop the rule that dominates the shear angle. New consideration concerned with the propagation velocity of plastic deformation could be introduced.

**Keywords** : cutting force, shear angle, orthogonal cutting, cutting speed plastic deformation.

金属切削における切削抵抗は、工作機械や工具形状設計のためだけでなく切削条件の決定のためにも必要である。多くの研究者により、切削抵抗に影響を及ぼすせん断角の予測について理論的、実験的検討がなされてきた。実用域の切削条件のもとで様々な材料の二次元切削試験が行われ、せん断角は切削速度に深く関係し、簡単な実験式で表されることが分かった。しかしながら、これらの実験式と理論には十分な一致が認められず、せん断角を支配している要因をさらに解明する必要がある。そこで、塑性変形伝播速度という新しい観点からの考察を行う。

---

\* 広島国際学院大学大学院工学研究科機械工学専攻

## 1. はじめに

様々な金属材料の加工において、広く一般的に用いられ、生産性も高い加工の一つが切削加工である。この切削加工の基礎となるのは、切削抵抗を支配するせん断角の予測に関するせん断角理論である。このせん断角理論は、工作機械や工具の設計、さらに加工条件の適正化に不可欠なものであるため、これまでも、この理論に関する多くの研究や報告がなされてきた<sup>1-10)</sup>。

本研究室においても、せん断角理論の実験的検討に着目し、機械工学実験や卒業研究から得られた種々の基礎データをもとに検討を行い、せん断角が切削速度に大きく影響をうけるとともに簡単な実験式で表されることを明らかにしている。しかしながら、これらの実験結果とせん断角理論との間に定性的な一致は認められるが、定量的には十分な一致は認められない。これは、被削材の力学的性質、切削工具の幾何学的形状、工具と被加工材間の相互作用などの要因が精度の高い理論の確立を阻んでいると考えられる。

そこで、本研究では今まで行ってきた炭素鋼の二次元切削実験の結果を報告するとともに、被削材の力学的性質のうち従来取り上げられなかった塑性変形伝播速度を考慮することによって、せん断角の切削速度依存性を説明しうるかどうかを考察した。

## 2. 切削理論

### 2.1 二次元切削モデル

金属切削における切りくず生成挙動はきわめて多様であるが、これまで多く研究されたのは、流れ型切屑を生成する二次元切削についてであった。ここではこの形態を中心に基礎的事項を示す。図1に示すように、切削中に被削材が塑性変形する領域全体を塑性領域(plastic deformation zone)と称し、これは三つの領域に分けられる<sup>11)</sup>。まず、被削材が工具に近づいて塑性変形開始境界を通過して一時塑性域(primary plastic zone)に入ると、著しい塑性変形を受ける。この段階で被削材の一部はほぼ切りくずの形に変形する。この一次塑性域のなかでせん断変形の激しい領域を一次せん断域(primary shear zone)または主せん断域とよぶ。さらに、きわめて薄いせん断域を想定するときはせん断面(shear plane)とよぶ。次いで、工具のすくい面との接触部近傍では摩擦などにより二次的な塑性変形を受け、これを二次塑性域(secondary plastic zone)という。さらに、刃先先端から逃げ面下方領域では付加的な塑性変形を受け、仕上げ面の加工変質層に強く影響することが多い。本研究では単純化のため、一次塑性域をせん断面と仮定し、二次塑性域及び逃げ面下方塑性域は無視する。

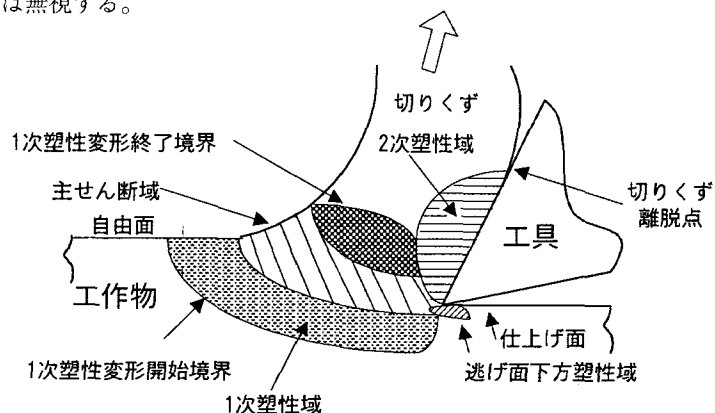
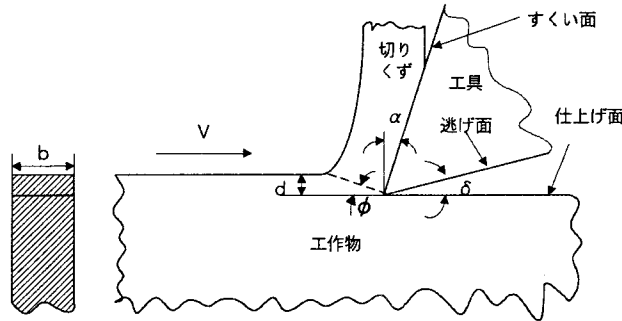


図1 切削加工における変形域の概略



V: 切削速度、d: 切込み、b: 切削幅  
 $\alpha$ : すくい角、 $\delta$ : 逃げ角、 $\phi$ : せん断角

図2 二次元切削用語定義図

二次元切削とは、工具の切刃稜線と切削運動の方向（切削方向）が直行する様式である。この場合、切刃に垂直な各断面内の変形状態は稜線方向に一様となり切り屑生成は二次元的となる。旋盤による切削加工ではこのような状態はおこりにくい、切込みに比べて切削幅（width of cut）が十分に大きければ、ほぼ平面ひずみ状態であると考えてよい。そこで、本試験では切削方向と垂直に切刃が当たるような工具を使用することにより二次元切削を実現する。図2は二次元切削における用語の定義を示す。このうち、切削条件として重要なものは、切込  $d$ 、切削幅  $b$ 、切削速度  $V$ 、すくい角  $\alpha$  であり、これらの切削条件を入力（既知）変数として扱い、切り屑生成機構を解析する。なお、通常の切削においては刃先丸みや逃げ角  $\delta$  が無視できる。

### 2.2 せん断角理論

切削理論の目的は、被削材の物性や切削条件などの入力変数が既知量として与えられたときに、切削力や切削温度、切り屑形態、工具寿命などの出力（未知）変数を、切削実験を行うことなく、予測することである。ここで、せん断応力や摩擦角などは切削とは独立に求められる固有の物性値であり、せん断角を理論的に求めることができれば、切削抵抗の各成分のみならずせん断ひずみや切り屑厚さ及び切削エネルギー、などの予測が可能となる。つまり、切削理論においてせん断角は最も重要な値であり、このせん断角を決定する理論をせん断角理論と称する。例えば、切削抵抗合力  $R$  は、せん断角  $\phi$  の関数として次式で与えられる<sup>12)</sup>

$$R = \frac{\tau_s b d}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \tag{1}$$

ここで、切削幅  $b$ （本実験では切込み）、切込み  $d$ （本実験では送り）、すくい角  $\alpha$  は切削条件として与えられる既知量である。また、せん断応力  $\tau_s$  は被削材固有の値であり、切削とは独立の適切な材料試験による応力-ひずみ曲線から得られる。さらに、平均摩擦角  $\beta$  も工具材料と被削材の組み合わせに対して、切削とは独立の摩擦試験で求められる定数とみなせる。

## 3. 旋盤による切削試験方法

### 3.1 切削抵抗の測定

本研究では一般的な工業材料である炭素鋼 S45C について、普通旋盤（TAKISAWA TAL560 型）で外丸削りの切削試験を行った。また、工具として CTGPR2525（TPP321）型を使用し、切刃に（0-5-6-6-0-30-0.4）形状のサーメットを用いた。旋盤による切削において工具刃先にかかる

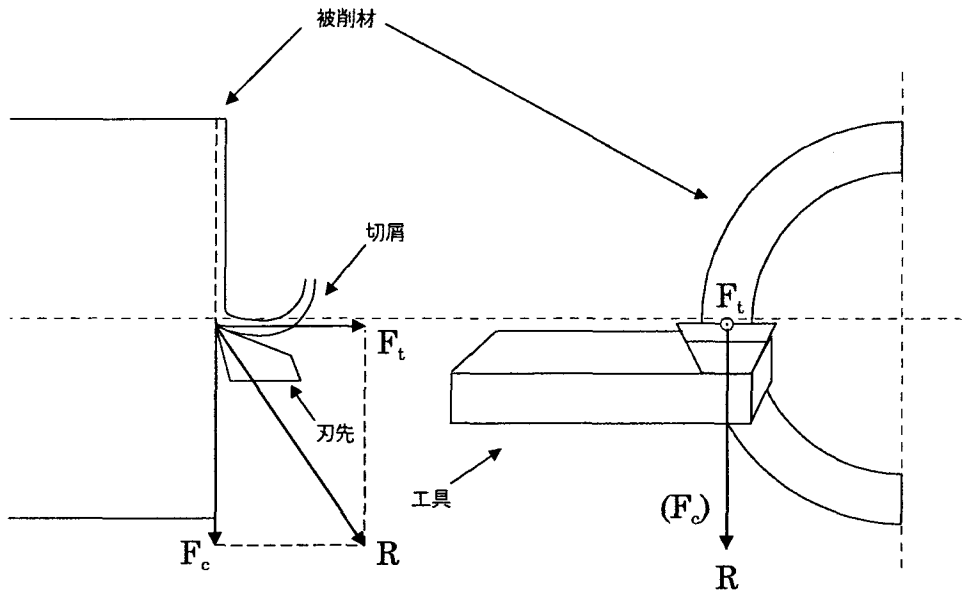


図3 二次元切削における切削抵抗

切削抵抗は、一般には主分力、送り分力及び背分力と言われる3分力に分けられる。この三分力の切削抵抗を合わせて切削抵抗合力とよぶ。本実験では、図3は横切刃角と前すくい角を $0^\circ$ とし、送り(図2のdに相当)に比べ切込み(図2のbに相当)を大きく取ることによって実現した二次元切削で、このときの切削抵抗は本質的には主分力と送り分力のみ二分力となる。この切削抵抗の測定を行うために、水晶圧電式の動力計(KISTLER 9257A型)を用いて切削中の切削抵抗の変動を測定した。これは通常のひずみゲージ型工具動力計と比べると非常に剛性が高く直線性及び分解能が高いため、切削抵抗のわずかな変動も高精度に測定が可能となる。そして、旋盤の刃物台にこの動力計を取り付けて、これに工具を取り付け、切削中の主分力、送り分力、背分力を検出し、チャージアンプ(KISTLER 5007型)を介して、ペン書きレコーダーに記録した。このとき、切込みを1.0mm, 1.5mm, 2.0mmで一定とし、切削速度50~200(m/min)と送り0.071~0.21(mm/rev)をそれぞれ組み合わせて、48条件についての試験を行った。せん断角は生成された切屑厚さ $t$ より求めることができる。

#### 4. 試験結果および考察

##### 4.1 切削抵抗

各切削条件について測定した切削抵抗の各成分を図4に示す。ここでは切込み2.0mmで二次元切削を行った場合の切削速度と切削抵抗の関係を示す。切削速度50m/minのとき切削抵抗はかなりの大きさになっている。この場合、切削速度が上がるにつれ切削抵抗は減少する傾向にある。切削抵抗に及ぼす切削速度上昇の影響として、①構成刃先の発生、②切削温度上昇による摩擦係数の減少とせん断角の増大、③切削温度上昇による被削材のせん断応力の減少、④ひずみ速度上昇によるせん断応力の増大などの因子が挙げられる。本試験の結果は、③の被削材のせん断応力の減少が主なものと考えられる。また、送り(本試験においては、送りが切込み $d$ に相当)が増えるほど切削抵抗も増大する傾向にある。これは、切削断面積の増大によると言える。なお、二次元切削を想

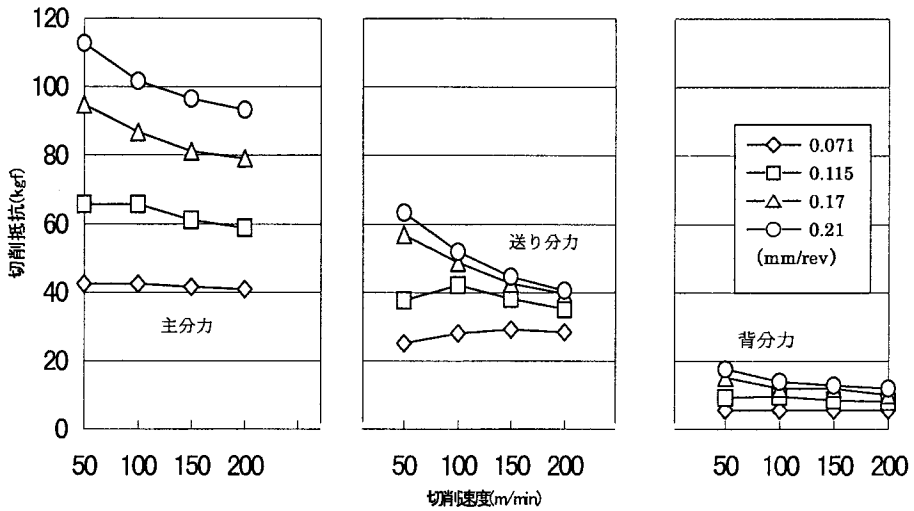


図4 切削速度と切削抵抗の関係 (切込み2.0mm 二次元切削)

定したとはいえ、わずかながら背分力成分が認められる。これは、工具ノーズ部の存在及び切屑の流れ方向が送り方向と完全に一致していないためと考えられる。

4. 2 せん断角

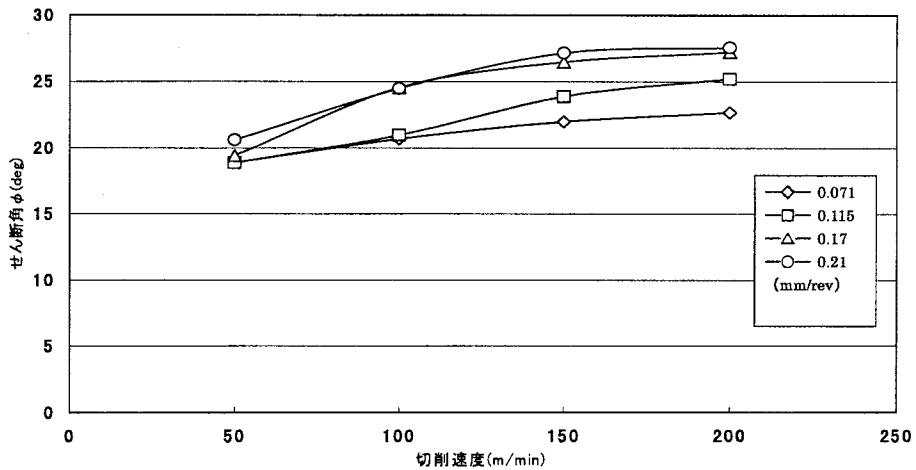


図5 切削速度とせん断角の関係 (切込み2.0mm 二次元切削)

生成された切屑厚さ  $t$  よりせん断角  $\phi$  を求めた。切込み2.0mm で二次元切削を行った場合のせん断角と切削速度の関係を図5に示す。どの送り条件の場合でも切削速度の増加に伴いせん断角も増加している。また、送り速度が大きくなるほどせん断角も増加する傾向である。せん断角の増大は、工具のすくい角を増大させ被削性の向上につながり、また切屑厚さが小さくなるため切屑が受けるせん断ひずみが小さくなり、せん断型や亀裂形の切屑が出にくく最も安定した連続型の切屑を出すことが可能となる。

ここで、せん断角に対する切削速度や送りの影響はChaoらの研究による Thermal Number  $Vh$  ( $V$ : 切削速度,  $h$ : 切取り厚さ) にのみ依存していると報告されている<sup>10)</sup>。この考え方に基づいて、

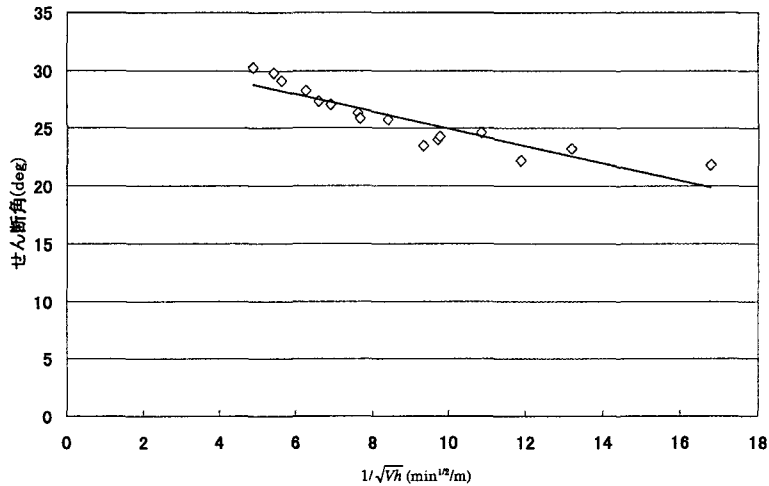


図6  $1/\sqrt{Vh}$  とせん断角の関係 (切込み 2.0mm)

図5の横軸を  $1/\sqrt{Vh}$  に書き替えたものが図6である。多少のばらつきはあるものの、切削速度 50~200m/min, 送り 0.071~0.21mm/rev の広範囲にわたって、1つの簡単な実験式、

$$\phi = \phi_0 - \kappa_2 \alpha - A\sqrt{Vh} \quad (2)$$

で表されることを示している。ここで、 $\alpha$  は工具のすくい角であり、 $\phi_0$ ,  $\kappa_2$ ,  $A$  は被削材で決まる定数である。

## 5. 考 察

前述したように、切削加工におけるせん断角と切削速度には密接な関係があると思われる。本実験結果からも分かるように切削速度が増加すればせん断角も大きくなる傾向にあることが明らかである。しかし、このことについての、具体的な結論は得られていない。これを解明していくには、切削理論だけにとどまらず塑性理論も考慮にいった検討を行っていくことが望まれる。特に、切削加工中のせん断領域での被削材の塑性変形に着目し、さらに切削速度によりせん断領域での材料の変形がどのように変化してくるのか、つまり塑性変形の伝わる速さ（塑性変形伝播速度）によりせん断角がどのように変わってくるかということに焦点をおいて考察する必要があるものと考えられる。

従来、変形速度の増大が金属の加工性をよくするのかどうかについてはっきりした結論は出ていなかった。このことについて、Karman と Taylor は塑性変形の伝わる速さが有限であることと臨界衝撃引張り速度の存在を示した<sup>13)</sup>。彼らは塑性変形の伝播問題をとりあげ、塑性波（塑性変形）の伝播問題は、弾性波（弾性変形）の伝播速度  $C_e$  を

$$C_e = \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

のように求める場合と同じように、2階偏微分方程式を解くことに帰着した<sup>14,15)</sup>。ここで、 $E$  と  $\rho$  はそれぞれ材料の縦弾性係数と密度である。したがって、塑性波の伝わる速さ  $C_p$  は式(3)と似た形の

$$C_p = \sqrt{\frac{\partial \sigma_0}{\partial e} / \rho} \quad (4)$$

で与えられる。ここで  $\sigma_0$  と  $e$  はそれぞれ公称応力と公称ひずみである。式(4)によれば、図7のような引張り公称応力-公称ひずみ曲線をもつ材料を引張るときの  $C_p$  は、同図(b)に示されているよ

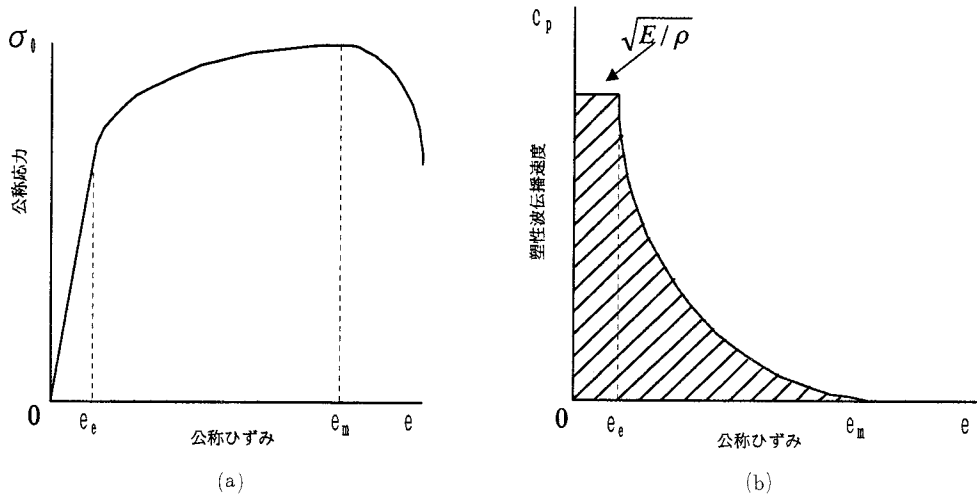


図7 引張り公称応力-公称ひずみ曲線(a)と塑性波伝播速度-公称ひずみ曲線(b)

うに、ひずみ  $e$  の関数で  $e$  とともに小さくなり、応力  $\sigma_0$  が最大となるひずみ  $e_m$  の塑性変形が伝わる速さはゼロとなる。 $e \geq e_m$  のひずみ  $e$  をもつ塑性変形が棒軸方向に伝わらなくなることはよく知られている。すなわち、 $e_m$  のひずみに達すると塑性不安定が起こりそれ以後の変形はくびれ部だけに集中して棒軸方向には伝わらない。断面一様な棒を伸ばすとき  $e \leq e_m$  の範囲では棒は均一に変形するが、それ以上伸ばすとくびれが生じその部分のひずみは増大するが他の部分のひずみは  $e_m$  に保たれたままである。このことが  $e \geq e_m$  のとき  $C_p = 0$  になることの物理的内容である。これはつまり、塑性変形がきわめておそく伝わることを意味する。

ここで粒子速度  $V$  は

$$V = \int_0^e C_p de = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \int_0^e \sqrt{\partial \sigma_0 / \partial e} de \quad (5)$$

で与えられ、 $V$  の最大値  $V_{crit}$  は  $e$  が均一引張りひずみ  $e_m$  の値をとるとき、すなわち

$$V_{crit} = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \int_0^{e_m} \sqrt{\partial \sigma_0 / \partial e} de \quad (6)$$

となる。この  $V_{crit}$  を臨界衝撃引張り速度とよび、これ以上の速さで引張り変形を与えると塑性変形が力を加えた端（衝撃端）のみに集中してそれから先へ伝わらなくなるために破断伸びはきわめて小さくなり、塑性変形が伝わりにくくなる。

図8は軟鋼(0.14% C)を強圧延したのち900℃と再結晶温度よりわずか上の600℃でそれぞれ焼鈍した試料(結晶粒はそれぞれ21 $\mu\text{m}$ と5.6 $\mu\text{m}$ )の引張り公称応力-公称ひずみ曲線である。この二つの試料の破断伸びをいろいろな引張り速度で調べてみると、加工硬化係数のきわめて小さい応力-ひずみ曲線をもつ600℃焼鈍材の臨界衝撃引張り速度は、数  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  という低い速度である。すなわち  $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  で引張り破断させた試料ではもちろんのこと、 $3.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  の速度で変形させたときにも、試料は標点の両端でくびれが生じるまで塑性変形してその一方で破断したが、標点間のかなりの部分は未変形のままであった。それに対して、加工硬化係数の大きい応力-ひずみ曲線をもつ900℃焼鈍材は引張り速度に関係なく30%の破断伸びを示し、 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  の速度でも塑性変形は標点間全域に伝わっていた。このことは、900℃焼鈍材の臨界衝撃引張り速度が、 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  よりず

っと大きい速度であることを示す。このことから、加工硬化係数の小さな600℃焼鈍材の臨界衝撃引張り速度は常に低く、塑性変形が進む速度が低いといえる。逆に、加工硬化係数の大きな900℃焼鈍材は速度に関係なく塑性変形が進む速度は高いといえる。これは切削加工におけるせん断角理論と結び付けて考えると900℃焼鈍材よりも600℃焼鈍材のほうがせん断角が大きくなるものと推測される。

このような考察から、本研究の今後の進め方が提案できる。図8に示すような二種類の焼鈍材の応力-ひずみ曲線と同じような曲線が、引張り試験において得られる材料について切削試験を行えばよいことになる。具体的に用いる材料としては軟鋼と70-30黄銅の二種類を考える。軟鋼は広く一般的に使われている工業材料である。70-30黄銅は切削加工を行なう際に構成刃先が形成されず、きわめて切削加工のしやすい材料である。これら二つの材料に塑性変形(圧延)と熱処理(焼鈍)を組み合わせることにより、先に述べた塑性変形伝播速度の大きな試料と小さな試料を作成する。次に、これらの試料の臨界衝撃引張り速度を求め、大小二速度の切削速度で二次元切削を行い、せん断角及びせん断変形域の大きさの切削速度依存性を調査し、合わせて塑性変形伝播速度の大小と関連づけて考察する。

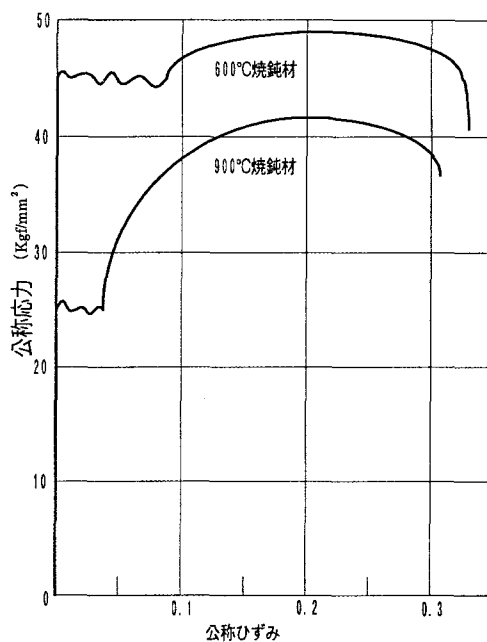


図8 0.14% C 鋼の応力-ひずみ曲線

6. まとめ

金属切削において基礎資料となる切削抵抗及びこれを支配しているせん断角に関する実験手法を確立した。これを用いて、切削速度及び送り条件の広範囲にわたって二次元切削試験を行い、切削抵抗及びせん断角に及ぼす切削条件の影響について把握した。特に、せん断角は切削速度と密接な関係があり、切削速度の増加とともにせん断角が増加することが確認できた。さらに、この関係について、塑性理論を考慮に入れた考察を加え、せん断角の切削速度依存性に塑性変形伝播速度が関与している可能性を指摘した。最後に、本研究の遂行には本学機械実習工場の皆様方に多大なる御協力を頂いた。ここに、感謝の意を表す。また、本研究の一部は平成10年度学内特別研究費によることを付記し謝意を表す。

## 参考文献

- 1) J.Krystof: Berichte uber Betriebschaftliche Arbeiten, 12(1939)
- 2) M.E.Merchant: J.App.Phys, 16(1945)318.
- 3) P.W.Bridgman: J.App.Phys, 14(1943)273.
- 4) E.H.Lee and B.W.Shaffer: J.App.Mech, 18(1951)405.
- 5) M.C.Show, N.H.Cook and I.Finnie: Trans.ASME, B81(1959)251.



- 6) 例えば, 精密工作便覧 (精機学会編: コロナ社刊, (1970)) 52.
- 7) 白井英治, 白樫高洋: 精密機械, 38 (1972) 268.
- 8) W.B.Palmer and P.L.B.Oxley: Proc.IME, 173(1959)623.
- 9) K.Nakayama and M.Arai: Annals of the CIRP, 25(1976)13.
- 10) B.T.Chao and K.T.Trigger: Trans.ASME, B75(1953)109.
- 11) 杉田忠彰他: 基礎切削加工学, 共立出版 (1984) 56.
- 12) 杉田忠彰他: 基礎切削加工学, 共立出版 (1984) 62.
- 13) G.I.Taylor: Civil Defence Res.Committee Rep, 329(1942)
- 14) Th.v.Karman and P.Duwez: J.App.Phys, 21(1950)
- 15) G.I.Taylor: J.Inst.Civil Engers, 26(1946)486.

付 録

せん断角とせん断ひずみ

図1のせん断面モデル (shear plane model) において, 切刃先端から未切削表面にかけてのOAをせん断面といい, OAと切削方向のなす角 $\phi$ をせん断角 (shear angle) という。切刃がO'からOへ前進する間に, 平行四辺形OO'A'Aがせん断変形して平行四辺形OCDAになると考える。せん断すべり量を $\Delta S$ , すべり間隔を $\Delta y$ とすると, せん断ひずみ (shear strain)  $\gamma$ は次のように表される。

$$\gamma = \frac{\Delta S}{\Delta y} = \frac{A'D}{AH} = \frac{DH}{AH} + \frac{HA'}{AH} = \tan(\phi - \alpha) + \cot\phi = \frac{\cos\alpha}{\sin\phi\cos(\phi - \alpha)} \quad (1)$$

幾何学的関係から, せん断角 $\phi$ は切りくず厚さ $t$ との間に次の関係がある。

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

ただし,  $r_c = d/t$ は, 切削比 (chip thickness ratio) とよばれる。

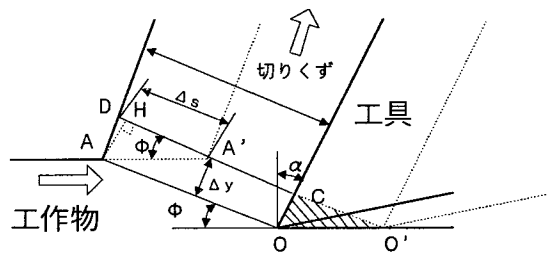


図1 せん断面モデル