数で求めた値であるから自然対数に直して

$$F = 0.0044 n \left(\frac{\theta_s}{\phi t_2} \right)^{0.5} (ht_2)^{0.57} \dots\dots\dots (10)$$

$$\approx 0.44 \frac{ma}{V_f t_2^2} \sqrt{\frac{h \theta_s K}{(1-\delta) Q}} \dots\dots\dots (11)$$

がえられる。勿論、この式は実際の切削条件の範囲で近似的に成立するのであつて、刃先熱源にそう任意点の温度上昇は

$$\theta = \theta_d e^{-F} \dots\dots\dots (12)$$

で与えられ、乾切削における値 θ_d は L , t_2 が非常に小

さくないときには (3) 式で与えられるのである。

次報で (12) 式の熱源上の平均値つまり刃先平均温度上昇を求め、具体的な値を示して考察を加える。

終りに図計算に協力された渋谷昇、堀野誠也、松本守君に深く謝意を表す。(1957, 1月21日受付)

文 献

- 1) 精密機械, 22, 10 (昭31) 423頁
- 2) 精密機械, 20, 7 (昭29) 257頁

高 速 切 削 の 研 究 (第12報)

—二次元流れ型切削に於ける切屑カール機構の解析 (その1)—

正 会 員 竹 山 秀 彦*

Study on High Speed Machining (No.12)

—Analysis of Chip Curl in Two-Dimensional Machining of Flow Type—
(Part I)

Hidehiko TAKEYAMA

There have been several theories of chip curl, such as “bending moment theory” and “temperature theory.” However, they are not satisfactory enough to explain various phenomena which come out in actual metal machining.

Here in this paper, several contradictions involved in the conventional theories have been pointed out after some machining tests. The systematic tests carried out by the author have necessitated introduction of a new factor, that is, shear strain conductivity, which is a motive force of chip curl.

Based upon such an idea, an equation of chip curl for orthogonal cutting has been introduced.

In part 1 some basic ideas have been presented and also discussed, while in part 2 this theory will be insured experimentally.

1. 緒 論

切屑カールの現象は工場現場における切屑処理の上からいっても重要な問題である許りでなく、その機構の解明によつて切削機構の本質的究明特に筆者の刃面切屑触接面積に基づく切削理論の展開にも資する処大なるものあらんと考えて行つたのが本研究である。元来、切屑カールの現場的論文は相当あるがその本質論的論文は数少く且つ随分疑問を挟む処多く、未だ決定的論文の皆無で

* 工業技術院機械試験所

ある現在、在来の論文を批判しつつ系統的に調査して行くことも有意義なことと思ひ、以下に二次元切削における結果の大略を記する。

2. 従来の諸説に対する批判

(1) 曲げモーメント説¹⁾

この説は切屑を一つの直方体の剛体梁と考え、前面と切屑の間に作用する法線力に基づく曲げモーメントによつてカールするという考え方である。この場合弾性限内の梁の式(1)を適用している。則ち、

$$\frac{\rho_{in} + \rho_{ex}}{2} = \frac{EI}{M} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I = \frac{t_2^3}{12 \times w} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ρ_{in} =切屑の内側半径、 ρ_{ex} =切屑の外側半径、 t_2 =切屑厚さ、 w =切削幅或いは切屑幅、 M =切屑に働く曲げモーメント、 E =切屑の弾性常数である。

既に前報²⁾において報告したように、捲面上の切屑との接触面に働く法線応力は近似的に一樣分布しており、且つそれは切込み及び捲角に関して不変であるから、

$$M = \frac{1}{2} w k_2 l^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに l は捲面と切屑の接触長さであり、 k_2 は捲面上の法線応力である。

従つて(1)と(2)より、

$$\frac{\rho_{in} + \rho_{ex}}{2} = \frac{E \cdot t_2^3}{6 k_2 w l^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

しかして Fig.1 の結果より、切屑厚さ t_2 が切屑表面接触長さ l に略々比例するとすれば(3)式は、

$$\frac{\rho_{in} + \rho_{ex}}{2} \approx k t_2 E \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。但し k は比例常数であり、 w は一定として k の中に含ませてある。

即ちこの式よりすれば切屑カール半径は切屑厚さに比例することになり、Fig.1 に示す一定捲角で切込み(二

Fig.1. Effect of feed on chip curl and tool-chip contact length.

Material cut=brass & titanium, rake angle=37° (brass), 22° (titanium), width of cut=1.3mm (brass), 1.1mm (titanium), cutting speed=50mpm, cutting fluid=dry.

次元切削の)を変えたときの切屑半径の変化をあらわす実験とよく合うかに見受けられる(捲角一定なら切屑厚さは切込みに略々比例する)。しかし切込み一定で捲角を

変化させたときの実験結果を切屑厚さについてまとめてみると Fig.2 の如くなり、(4)の傾向と全く逆の傾向

Fig.2. Effect of chip-thickness on chip curl.

Material cut=brass, feed=0.215mm/rev., width of cut=1.8mm, rake angle=var., cutting speed=50mpm, cutting fluid=dry.

を表わすことを知る。即ちここにおいて所謂曲げモーメント説の不合理なことが暴露されたのである。

何れにしても塑性変形の現象に弾性理論を適用することに相当の無理があるように思われる。

(2) 温度説³⁾

これは Dr. Hahn の唱えたもので、もう一つの有力な説である。即ち、剪断面上の温度分布が一樣でない為に高温部の材料は低温部のそれより変形し易いということより切屑がカールするというのである。しかし後述するように、切削が準静的に行われ、従つて現象が殆んど等温的に起つような状態においても殆んど同様に切屑はカールすることからしてもこの温度説には承服し得ない点がある。勿論温度が或る種の作用をなしていることは当然考えられることではあるが。

3. 切屑カールの機構について

かく論じ来つて、ここに改めて塑性的立場に立つて切屑カールを考え直すことの必然性を感じる次第である。

今の処表題に示す如く問題を二次元流れ型切削に限ることとする。しかして今剪断角を ϕ 、工具捲角を α とすれば切屑の剪断歪 r は次式で表現出来る。

$$r = \cot \phi + \tan (\phi - \alpha) \quad \dots\dots\dots (5)$$

今刃先における剪断歪 r (剪断短冊の厚さを1とする)が完全に剪断面を通つて被削材表面に伝わるとすれば、Fig.3 点線のように剪断は刃先のみで行われ、切屑は積重ねたトラップをずらした様な平行移動をなして刃面に沿つて真直に出る筈である。この場合は切削抵抗が刃先に集中し、剪断変形は刃先を過ぎれば直ちに止み、切屑

Fig. 3. Schematic diagram of chip curl.

は全然カールしないことになる。

しかるに前報において屢々報告したように、捲面上には明らかに切屑との接触面積が存在し、そこでは被削材剪断強さに等しい剪断応力が働き、又同時に法線力も作用し、その接触面積で材料の変形を受持っている。Fig. 4

Fig. 4. Plastic deformation near cutting edge in model test. material cut=copper, rake angle=0°.

は特殊類似切削試験における、刃面前方の材料変形の模様を示したものであるが、何れにしても一般に刃先より相当の距離に亘つてやつと全変形が完了することがわかる。換言すれば、剪断は刃先だけでは完了し得ないこと、或いは剪断歪 γ は完全には被削材表面には伝わらないのが一般だということになる。

今このような状況の下において、Fig. 3 においてBがFに移動したときDがE'に来らずEに止つたとする。そこで θ を同図に示す如くとれば、

$$\theta \leq \frac{\pi}{2} - \alpha \quad \dots \dots \dots (6)$$

でなければならない。しかるに一方刃先直前においては、否応なしに $\gamma = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha)$ だけの変形が強制されるわけであるから同図 CEE' に相当するだけの材料は刃先近傍に押込められねばならない筈である。従つて切削幅が可成り長ければ単位の短冊 AFE/C は AFGEC の様な形を取るであらう。しかしてそこでは切屑は依然として $\theta < \frac{\pi}{2} - \alpha$ で捲面と平行でないから AFGEC は次の段階において更に捲面によつて変形され、この場所で $\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha$ 即ち捲面に平行になつて初めて変形は止み切

屑は捲面から離脱して行く。上述せる如き被削材表面附近と捲面附近との間に生ずる体積差或いは切屑流れの速度差が実に切屑カールの原因となると考えられる。

先般来報告し來つた刃面切屑接触面積に基づく切削理論が切屑カールの問題とも密接な関聯をもつものなることが上述の事柄及び以下に述べる諸事実によつて了解出来よう。

扱て上述の原理的考察に基づき切屑カールを量的にしらべて行こう。

切屑厚み t_2 は Fig. 5 における BC 面 (切屑離脱面) 以降は一定であり切屑のなす曲線半径 R であり、又同図における AB 部分も切屑の一部であると仮定する。上述の仮定は Fig. 6 の写真からも無理のないことがわかるであ

Fig. 5. Geometry of chip curl.

Fig. 6. Geometry of chip curl. Material cut=brass, rake angle=37°.

ろ。そこで Fig. 5 において剪断面と被削材表面との交点

A において切屑内門に接線を引く。この時 $\theta \leq \frac{\pi}{2} - \alpha$ なることは勿論である。さて A において上述接線に垂線を引けば、切屑門の中心はその垂線上になければならない。次に切屑内門の接線が曲面に平行になる点 B においてこれに垂線を立てればそれは矢張り切屑門の中心を通り、同垂線の端面との交り C は切屑端面接触面の最上端に一致し、外門は C において端面に接しなければならない。何となれば若し同端面の最上端が C より下だとすれば内外門は同心になり得ず又切屑厚さ t_2 は一様でなくなる。又その最上端が C より上に来れば、一旦 BC で最も薄くなった切屑は其後再び切屑厚さを増すことになり、このためには何等か特殊な力を考えねばならなくなる。

以上の切屑幾何学は、Fig. 6 に示すような実例について行つてよく一致し、又同図より判定した切屑端面接触長さは端面接触部の顕微鏡観察から得られたものと良好な一致を示すことよりその妥当性が了解出来ると思う。

さて切屑門の中心は O A と O B の交点として与えられるから、

$$\rho_{in} = \frac{l - \frac{t_1}{\sin \phi} \sin(\phi - \alpha)}{\cos(\theta + \alpha)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\rho_{ex} = \{l - \frac{t_1}{\sin \phi} \sin(\phi - \alpha)\} \tan(\alpha + \theta) + \frac{t_1}{\sin \phi} \cos(\phi - \alpha) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに ρ_{in} は切屑内門半径、 ρ_{ex} は切屑外門半径、 l は切屑端面接触長さ、 t_1 は切込み、 ϕ は剪断角、 α は端面角、 θ は切屑流出角 (Fig. 5 参照)。

Fig. 3 に見る如く変形歪 γ が完全に被削材表面に伝わらないとした場合その場所の歪を γ' とすれば、

$$\gamma' = \frac{\sin \theta}{\sin(\phi + \theta) \sin \phi} \quad \dots\dots\dots(9)$$

更に、

$$\gamma' = m\gamma, \quad m \leq 1 \quad \dots\dots\dots(10)$$

とおき、 m を剪断歪伝導度と名付ければ、

$$\gamma' = m\{\cot \phi + \tan(\phi - \alpha)\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

従つて (9) と (11) より、

$$m = \frac{\sin \theta \cos(\phi - \alpha)}{\cos \alpha \sin(\phi + \theta)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

しかし後述する実験結果によれば、一般に $\sin(\phi + \theta)$ は 1 に極めて近い故 m は近似的に、

$$m \approx \frac{\sin \theta \cos(\phi - \alpha)}{\cos \alpha} \quad \dots\dots\dots(13)$$

従つて、

$$\theta \approx \sin^{-1} \frac{m \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

そこで (14) を (7) 及び (8) に代入すれば、

$$\rho_{in} \approx \frac{l - \frac{t_1}{\sin \phi} \sin(\phi - \alpha)}{\cos\left\{\alpha + \sin^{-1} \frac{m \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)}\right\}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$\rho_{ex} \approx \frac{l - \frac{t_1}{\sin \phi} \sin(\phi - \alpha)}{\cot\left\{\alpha + \sin^{-1} \frac{m \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)}\right\}} + \frac{t_1}{\sin \phi} \cos(\phi - \alpha) \quad \dots\dots\dots(16)$$

(15) 及び (16) 式でわかるように、切屑門の径は、端面切屑接触長さ l 、剪断歪伝導度 m 、切込み t_1 、端面角 α 及び剪断角 ϕ の函数であつて、従来の諸説に見られるような簡単な議論では到底説明がつかないことがわかる。

4. 切削機構より見た剪断歪伝導度 m

本論文その 2 において、各種金属における剪断歪伝導度 m が、端面角、切込み、切削幅、切削速度及び切削剤によつて如何に変わり、従つて切屑カールに如何に影響するかの実験的結果を詳細に述べるが、今その結果を結論的にいへば、剪断歪伝導度 m は上記諸条件に関して略一定である。言い換えればこの m は被削材金属に固有な定数であることが結論される。若し $m = 1$ なる材料が仮りにありとすれば、所定の変形 γ は正に剪断面に於て完了し、原理的に切屑はカールしないこととなる。そして m が 1 より小となれば、前述の如く切屑の内側と外側で体積差或いは流れの速度差を生じ切屑はカールする様運命づけられる。この意味において m は切屑カールの原動力となるものである。

さて $m < 1$ で切屑がカールする様運命付けられた後は、 l 、 α 及び ϕ 等の幾何学的拘束によつて切屑カールの径が決定されるのである ((7) 及び (8) 式参照)。

前に報告した切削方程式²⁾、

$$\cot \phi = \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} + a \frac{l}{t_1 \cos \alpha} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{又は } \cot \phi = \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} + a \frac{A}{A' \cos \alpha}$$

において a は端面垂直応力と剪断応力との比で、 t_1 は切込み、 A は端面切屑接触面積、 A' は切削面積である。

しかして上述の a は切屑門の内側と外側とに体積差或いは速度差を生ずる現象に關聯をもつと考えられ、その意味で m は a と深い関係をもつものと解される。しかして最初剪断面は $A = 0$ 或いは $l = 0$ 、則ち $\cot \phi = \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha}$ で規定される方向 (このとき切屑比 $r_c = 1$) に生ぜんとするが、 $m < 1$ の関係より端面に沿つての所謂 secondary flow が必然し、切屑端面接触面積が生ず

る。その結果終に $\cot \phi = \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} + a \frac{A}{A' \cos \alpha}$ で与えられるような剪断角をとつて平衡することになる。

5. 結 論

- (1) 先人の切屑カールに関する諸説の不合理なることを指摘し、新たに剪断歪伝導度なる考えを導入した。
- (2) 剪断歪伝導度の考えより構成された切屑幾何学は実験写真においてよく合うものであることを示した。
- (3) 以上より切屑カール径を与える式を誘導した。
- (4) 切屑カールの原動力は切屑の内側と外側における変形度の相違(剪断歪伝導度が1より小)にあり、切屑掘面接触長さ、掘角、剪断角等の因子は切屑カール径を左右する幾何学的拘束である。
- (5) 本報その2において実験結果を纏めて報告し、上

述論理の妥当性を論じよう。

(1956, 10月29日受付)

参 考 文 献

- 1) E. K. Henriksen : Stress Distribution in the Continuous Chip—A Solution of the Paradox of Chip Curl, Trans. of the ASME, Vol. 73, 1951, pp. 461.
- 2) 竹山秀彦 : 高速切削の研究(第7報), 精密機械, Vol. 22, No. 3, pp. 108.
- 3) R. S. Hahn : Some Observation on Chip Curl in the Metal-Cutting Process Under Orthogonal Cutting Conditions, Trans. of the ASME, Vol. 75, 1953, pp. 581.
- 4) 2) に同じ。
- 5) 竹山秀彦 : 高速切削の研究(第8報), 精密機械, Vol. 22, No. 5, pp. 224.

カールツァイス 新式 万能測定顕微鏡 (表紙写真)

本機はカールツァイス(西独オーバーコッヘン)に於いて戦後、新時代に適応するように設計された新式の万能精密測定機である。

従来の同種のものとは全然異つた新しい光学機構を以つて整備されていて、次にその特長の主なるものを上げる。双眼鏡筒は斜めに自由に傾き使用者の体位に適合出来るので座つたまま測定作業が出来る。一度被検物をセットした後は手元の押鍵により同一視野中に、測定値を読み取ることが出来、又この押鍵は各種測定の切替えにも使われる。比較区画もみることが可能であり、被検物と比較図とは赤・緑の補色により現われる。二重像測定装置の際も補色により検査をする。写真撮影装置及び投影装置は取りつけたままであり、従来の如く接眼部を利用することにより起るところの不便は全然ない。

其の他部品としてハイセンタ、V型支持台、落射照明装置、ナイフエッジ、光学的内径測定装置、機械的内径測定装置、サーキュラーテーブル、デバイディングセンター等が用意されてある。

主要寸法

横スケール	200mm	} 読取 1μ
縦スケール	100mm	

顕微鏡の傾き	±15°	} 読取 1分
サーキュラーテーブル	360°	
デバイディングセンター	360°	
角度測定装置	360°	
テムプレット	±8°	

対物鏡 1×	倍数 10×	視野直径 20mm
〃 2×	20×	10mm
〃 4×	40×	5mm
〃 8×	80×	2.5mm

なおカールツァイス(西独オーバーコッヘン)は本機の外に種々新設計の精密測定機械を売り出している。例えば

大型及び小型工具顕微鏡、簡易測定顕微鏡、ブロックゲージ測定用光波干渉計、表面仕上度検査用光切顕微鏡、光波干渉顕微鏡、光学的傾斜度測定器、大型及び小型光学的切削部測定機、光学的円周分度盤、歯車ピッチ試験機等

*「精機4」と御指定の上カタク種々御要求下さい

* 弊社は5月の東京国際見本市に出品いたしますので御照会は直接弊社へ御願いたします。

カール ツァイス 日本総代理店

ファイン テクニック プロダクツ カンパニー

東京都千代田区有楽町1の14 電話(59) 3533, 8658