すくい角が周期的に変動する切削の実験*

稲田 貞俊** 賀勢 晋** 佐藤 悌介**

Experiments on Orthogonal Cutting at Varying Rake
Angle Continuously and Periodically

Sadatosi INADA, Susumu KASEI, Teisuke SATO

When we machine a non-circular section with lathe, for example, relieving of milling cutter blank, turning of polygonal profile coupling and boring of rotary engine casing, the rake angle of cutting tool varies continuously and periodically.

This report deals with the features of such a specialized cutting compared with those of ordinary cutting.

The orthogonal cutting mechanism applied to the experimental results is based on the concept of the theory of the transitional deformation range (i.e. the "flow region" which exist between the rigid region of workpiece and the plastic region of steady chip).

The thickness of chip t_2 , the length of chip contact l , the cutting resistance F_h and F_v , the frictional angle β , the ending boundary angle ϕ_2 , the starting boundary angle ϕ_1 , the chip thickness ratio r_c and the strain of chip ε_2 are compared with those of ordinary cutting.

The conclusions are as follows: The cutting resistance and aspect of frictional angle variation at these specialized cutting are differ from those of ordinary cutting.

1. ま え が き

切込み深さとすくい角とは切削における2つの基本要素である。そのそれぞれが周期的に変動して作業を続ける場合の問題であるが、そのうち切込み深さが周期的に変動し、すくい角が一定である切削はフライス刃先の切削現象としてよく知られている。他方、すくい角が周期的に変動し切込み深さが変らない切削は問題としてあまり取り上げられていない。

図1(a)に示す旋盤における2番取り作業、(b)に示すポリゴン断面の切削あるいはロータリーエンジン部品の加工、さらには(c)に示す回転バイトによる多角形旋削など、主軸1回転に対し n 往復もしくは n 回転するバイトによって切削する場合を考える。すくい角を「切削速度のベクトルに垂直な面と工具すくい面とのなす角」と考えると図1

に示した例の切削速度のベクトルは、速度一定な被削材の動きと、(a)および(b)のように大きさおよび方向、あるいは(c)のように方向のみ変るバイトの動きとの合成されたものであるから、周期的に変動する。したがってすくい角が周期的に変動する切削方式であると考えることができる。あるいはヘールバイトによる切削のように刃先に動きもしくは振動を伴う場合にもわずかなではあるがすくい角が変動する。

本研究は上例のような、すくい角が周期的に変動する切削方式の特色を明らかにするために行なったものである。

2. 流れ領域の概念に基づく解析

図1 すくい角変動を伴う切削

* 昭和40年11月1日 広島地方講演会において発表

**正会員 徳島大学工学部

この研究ではすくい角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ とそれぞれに固定した一般切削の場合と、 $\alpha_1\alpha_2\alpha_3, \dots$ と連続的に変化してこれを繰返す場合とについて切削現象の相違、ないし食い違いを実験より求めるが、実験は2次元切削を取扱い、実験結果の理論的解析に際しては流れ領域の概念に基づき、被削材は完全剛塑性体であると仮定し、構成刃先を伴わないものとする。

図2において被削材剛性域と定常流出切りくず塑性域との間に流れ領域と名付ける過渡的変形領域AOBを考える。

塑性変形はOA上において始まり、切削の進行につれて塑性ひずみはざん次増加しOB線上にて最大の切りくずひずみとなって変形は終了する。いまOAおよびOBを直線と見なし、切りくずは刃物のすくい面のうちODの間だけこすって排除されるものとして、実験結果の考察のために必要な2, 3の事項についてあらかじめ検討する。

(1) 流れ終了角 ϕ_2

流れ領域の概念に基づく切削においては塑性変形はOB面上において終了し、切りくずとなって離れて行くのであるから、この面上においては被削材は降伏状態にあることがわかる。また刃物と切りくずとの接触面OD上においても摩擦のために相当の変形が起きて切りくずが降伏状態にあることが調べられている²⁾。したがってOB面上のせん断応力とOD面上のせん断応力とは、それぞれの面に均一に分布して互いに相等しいと考えると²⁾

$$\frac{R \cos(\phi_2 - \alpha) \cos(\phi_2 - \alpha + \beta)}{t_2} = \frac{R \sin \beta (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi_2) \sin \phi_2 \cos \beta}{t_2 \tan \phi_2 \sin(\phi_2 - \alpha + \beta)} \quad (1)$$

の関係が求められる。ここでRは切削抵抗、 t_2 は生じた切りくず厚さとし、 α はすくい角、 β は刃物面上の平均摩擦角であって図2に示すものである。(1)式を解くと

$$\sin 2(\phi_2 - \alpha + \beta) = \sin 2\beta$$

が得られる。これを満足する流れ終了角 ϕ_2 は

図2 流れ領域の概念による切削模型

$$\phi_2 = \alpha \quad (2)$$

$$\phi_2 = 90^\circ + \alpha - 2\beta \quad (3)$$

の2つの値を取り得る。2つの ϕ_2 のうち、どちらが実際に起きるかを定めなければならないが、 ϕ_2 の大きい方がOBの長さが短く、その状態では早く降伏状態になるので、それが真の終了角となるものと考えられる²⁾。(2)および(3)式の大小を比較すれば

$$\beta < 45^\circ \text{ のときは(3)式の } \phi_2 \text{ が大で } \phi_2 = 90^\circ + \alpha - 2\beta$$

$$\beta > 45^\circ \text{ のときは(2)式の } \phi_2 \text{ が大で } \phi_2 = \alpha$$

となる。摩擦角 β の値は奥島・人見の実験¹⁾ および本研究より明かなように、 $\beta < 45^\circ$ であるから、 ϕ_2 は(3)式によって求められる。

(2) 接触長さl

切削機構の理論解析においてlは大きい意味もっている。研究者によっては接触長さl、したがって刃面切りくず接触面積が切削性を左右する支配的要素であると説明している³⁾⁴⁾。一般のすくい角固定の切削においては、作業後バイトを取外してlの測定ができるが、本研究のようにすくい角が周期的に変動する場合には、lは刻々変化するから一般の方法では測定不可能である。ゆえに測定によらずにlを算出する手段として1つの解析を試みる。図2において塑性変形はOA面上においてはじまり、OB面上において終了する。また切りくずはD点において刃物を離れ、そのままの状態では排出されるのであるからBD面に働く力の合力はOである²⁾⁴⁾。ゆえに図2に示すように、 $\triangle BOD$ の力のつりあいより切削抵抗RはBDに平行でなければならない。それにより式を導いてlを求めると

$$l = \frac{t_2 \tan \phi_2 \sin(\phi_2 - \alpha + \beta)}{(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi_2) \sin \phi_2 \cos \beta} \quad (4)$$

が得られる。これに(3)式の ϕ_2 の値を代入し

$$l = \frac{t_2}{\sin 2\beta} \quad (5)$$

となる。実測したlは、単一せん断角切削方式より求めたlの理論値

$$l = \frac{t_1 \sin(\phi_0 - \alpha + \beta)}{\sin \phi_0 \cos \beta}$$

ただし ϕ_0 = せん断角

よりかなり長いことが既に指摘されており⁴⁾⁵⁾、既に発表されている測定結果では $l = (1.0 \sim 1.2)t_2$ となっている⁶⁾¹⁾。 $l = (1.0 \sim 1.2)t_2$ を(5)式に代入すると $\beta = 45^\circ \sim 25^\circ$ がこの範囲に入り、図11に示す実験結果とよくあっている。これは流れ領域に基づく考え方の妥当性を示すものであって、(5)式をもってlを求める式として差支えないものと考えられる。

(3) 流れ開始角 ϕ_1

図2においてOA間のせん断応力も降伏状態であって

図3 切削実験装置

図4 すくい角の変動状況

接触面OD上のせん断応力と相等しいと考えられるので

$$\frac{R \sin \phi_1 \cos(\phi_1 - \alpha + \beta)}{t_1} = \frac{R \sin \beta}{l} \quad (6)$$

が成立つから、(5)式を代入して ϕ_1 を導けば

$$\phi_1 = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left\{ \frac{4t_1}{t_2} \sin^2 \beta \cos \beta - \sin(\alpha - \beta) \right\} + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (7)$$

が得られる。

3. 実験装置および実験方法

この実験に使用した機械は2番取り旋盤であって、横送り台部を取除き、図3に示す切削実験装置を取付けた。

主軸と連動する2番取りカム軸に斜板カムを取付け主軸との速比1:1で回転させる。斜板カムにローラを付けた垂直案内棒を立て、この棒を上下させ薄鋼帯を経て刃物軸を揺動させる。斜板カムによる運動の伝達であるからローラの丸みを無視すれば案内棒は単弦運動をす

図5 弾性円板

図6 試験片の取付け状態

る。したがって主軸回転角に対するバイトすくい角の関係は図4に示すようになる。すなわちこの実験ではすくい角は -18° より $+18^\circ$ の間で周期的変動をくり返す。

刃物は図3および図5に示す外周角形の弾性円板のボス部に保持される。この弾性円板は鋼片より削り出されたもので円板膜面の厚さが3mmで図5に示す通り表裏8カ所に接着されたひずみゲージによって切削力(主分力と背分力)を検出する⁷⁾。

使用したバイトはS55C材を焼入れ後研削仕上し、切れ刃が円板の中心線に一致し、逃げ角が変動しても逃げ面がつかえないように特殊形状をなし、型板を利用して中心線に一致するように取付けられている。

被削材に鉛を選んだ。鉛は再結晶温度が低いために、切削に際して加工硬化がほとんどなく、また常に構成刃先を伴わない連続形切りくずを生ずるから、被削材を完全剛塑性体と仮定して行なった解析の結果を検討し、すくい角が変動する切削の特色を調べるために適当と考えられる。実験に使用した被削材は純度99.9%の特号鉛の鋳造品である。外径を60mmに削り、図6のように旋盤主軸端に取付け、心押軸の42φエンドミルによって穿孔してパイプ状にする。このパイプを軸方向に構えた前記のバイトによって2次元切削する。パイプの端面切削であるから試験片は全部が切りくずとなり、送り量が切込み量となる。

実験は主軸1回転当り送り量0.1, 0.15 および0.23mmの3種類について行なった。図7に実験装置の主要

図7 実験装置の外観

図8 切りくず厚さ

図9 切りくず接触長さ

部を示す。なおすくい角が増加しつつ切削する区間と減少しつつ切削する区間では現象に差があるかと考えて両者について比較した。すなわち測定では図4に示すように、両区間においてすくい角 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の間で 5° ごとの位置に相当する読みをとり、カムの回転を止めてすくい角を各指定値に固定した場合と比較した。

4. 実験結果

(1) 切りくず厚さ t_2

すくい角 α を固定させた普通の切削の場合と、連続周期的変動をさせた場合とについて、各切込みに対する切りくず厚さの平均値を図8に示す。実線はすくい角を変動させた場合の実験結果である。これと対比参照するために、すくい角を固定した切削を破線で示した。したがって破線は α の変動状態に関係なく左右対称となっている。切込みが増すほど、またすくい角が小な場合ほど厚い切りくずを生ずるが、すくい角変動の場合と固定の場合とを比較すると、いずれも変動の方が厚い切りくずを生じていることが明らかである。同じ α の場合、増加しつつ切削する場合と減少しつつ切削する場合との差はほとんど認められなかった。

(2) 切りくず接触長さ l

すでに述べたように l は直接測定できないので、 t_2 と β を求めて、(5)式より計算する。その結果を図9に示す。 β は図11に示すようにだいたい $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ の範囲にあるから、 $\sin 2\beta$ の変動は鈍感で l は t_2 に多く影響され、 α に変動のある方が l が長くなる。

(3) 切削抵抗(主分力 F_h および背分力 F_v)

切削抵抗によって生ずる弾性円板のひずみを図5のひずみゲージによって検出する。一方バイトのすくい角は図3の片持ばね板に接着されたひずみゲージより検出する。これらを同時にオシログラフに入れて測定し、変動するすくい角各位置における主分力および背分力を求める。この場合、ひずみゲージを接着した弾性円板は刃物を取付けたまま、すくい角だけ揺動するからゲージによって検出された読みがそのまま主分力および背分力にはならないが、すくい角の各位置においてそれぞれの読みから計算によって求めることができる。各切込みについて切削抵抗を図10に示す。これからわかることは α が変動する場合には固定の場合より大きい抵抗を生じていることである。また主分力においてはその差はすくい角にあまり関係がなくてほぼ一定であるのに対して、背分力の方はすくい角が大なときには両者にあまり差がなくて、すくい角が小になり負になるほど差が大きくなっていることが注目される。また主分力はすくい角の変化に

図10 切削抵抗

対して割合に鈍感であるが、背分力は敏感に応じて勾配が急である。

(4) 摩擦角 β

金属切削理論において、摩擦係数 μ ないし摩擦角 β ($=\tan^{-1}\mu$) の意義については必ずしも一様な支持評価を受けているわけではない⁹⁾。しかし β は形式的には常に計算し得る値であり、この研究のように切削機構の本質的解明を主目的とせず、比較を論ずる場合には β を使用して別に不合理は考えられない。

主分力 F_h および背分力 F_v がわかると

$$\tan \beta = (F_v + F_h \tan \alpha) / (F_h - F_v \tan \alpha) \quad \text{より } \beta \text{ を}$$

求めることができる。図11は各切込みについて求めた β であって、 α が大なときは β も大である。 α を固定した

図11 摩擦角

図12 流れ開始角および流れ終了角

図13 セン断角

場合と変動させた場合とを比較すると、切込みが小さいときは変動の場合の β が小であるが、切込みが増すと差がなくなり、切込み0.23mmでは変動の場合の β が大になっている。

(5) 流れ終了角 ϕ_2

ϕ_2 は(3)式より計算することができる。ゆえにすくい角 α と図11の摩擦角 β が関係する。各切込み量に対する ϕ_2 を図12に示す。

(6) 流れ開始角 ϕ_1

ϕ_1 は実験値を使って(7)式より求める。これを図12に示す。すくい角が固定の場合には切込みが小なとき ϕ_1 が小であるが、変動する場合にはすくい角にも切込みにもあまり影響されない傾向がある。図12に示す ϕ_2 と ϕ_1 との差を ϕ とすれば、 ϕ は図2において流れ領域の拡がりを示すものである。すくい角変動の場合と固定の場合とを比較すると、 ϕ は切込み量によって変化のあることがうかがわれる。またいずれの場合もすくい角が減少するほど ϕ も小になっている。

(7) セン断角 ϕ_0

この論文では流れ領域の概念に基づいて両者を比較したが、単一せん断面切削様式を考えた場合、せん断角 ϕ_0 は

$$\phi_0 = \tan^{-1} \frac{rc \sin \alpha}{1 - rc \sin \alpha}$$

ただし $rc = t_1/t_2$ である。

によって求めることができる。 ϕ_0 の計算結果を図13に示す。計算の結果、 ϕ_0 はいずれも ϕ_1 と ϕ_2 との中間にあって、流れ領域の切削概念が妥当であることを示している。

図14 切りくずひずみ ϵ_2 およびせん断ひずみ ϵ_0

(8) 切りくずひずみ ϵ_2 およびせん断ひずみ ϵ_0

流れ領域を考えた切削方式では、流れ領域内でのせん断ひずみは流れ開始線OA上では0であり、次第に増大して流れ終了線OB上では最大となって切りくずひずみ ϵ_2 を残す。 ϵ_2 の計算式は

$$\epsilon_2 = \cot \phi_2 + \tan(\phi_2 - \alpha)$$

である。 ϵ_2 の計算結果を図14に示す。

単一せん断面切削様式を考えた場合には、せん断ひずみ ϵ_0 は $\epsilon_0 = \cot \phi_0 + \tan(\phi_0 - \alpha)$ によって示される。

ϵ_0 の計算結果を図14に参考として示してあるが、 ϵ_0 よりも ϵ_2 が常に小であってひずみ速度は小である。

5. まとめ

(1) 流れ領域の概念に基づく解析において接触長さ l を含まないで流れ終了角 ϕ_2 および流れ開始角 ϕ_1 を求める式を立てた。

(2) すくい角 α を定めた角度に固定した場合と、周期的に変動させた場合について切削抵抗を求めた結果、後者の切削抵抗値が大きいことがわかった。これは α が変動する場合には、流れ領域内において変動に伴う材料の塑性流れが余分に加わることが原因と考えられる。

(3) 切削抵抗の測定値と解析に基づいた計算式とによって l 、 β 、 ϕ_2 、 ϕ_1 、 ϕ_0 、 ϵ_2 および ϵ_0 を α の固定時と変動時について比較し、それぞれ前項に示す結果を得た。

(4) 摩擦角 β が切込みに対して変化する状態が、すくい角固定と変動の場合で相違している。このように切込みによって β に差があるにかかわらず、切削抵抗は常に

変動の方が大であるのは、 β の変動によって ϕ_2 および ϕ_1 が変動し、特にせん断角 ϕ_0 の低下が切削抵抗を大ならしめることで説明できる。

(5) α が増加しつつあるときと、減少しつつあるときの切削諸現象に明確な差違はみとめられなかったけれども ϕ_2 、 ϕ_0 および ε_2 などにいくらかの差が観察された。

この研究に対し有益なご教示を頂いた京都大学奥島啓式教授ならびに実験に当たられた阿部明良、岡田勲、谷川静男、谷信彦の諸氏に深い感謝の意を表する。

(1965, 12月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 奥島啓式, 人見勝人: 二次元切削機構の解析, 機械学会論文集, 25巻150号(昭34)54~59.

- 2) 佐田登志夫: 切削工具面の摩擦と切削機構, 機械学会論文集, 21巻106号(昭30)417~419.
- 3) 竹山秀彦: 高速切削の研究(第7報), 精密機械, 22巻3号(1956)112.
- 4) M.C. Shaw, N.H. Cook, I. Finnie: The Shear-Angle Relationship in Metal Cutting, Trans. ASME, Feb. (1953) 273~288.
- 5) 中山一雄: 切削機械構に関する研究(第1報), 精密機械, 23巻9号(1957)444.
- 6) J.H. Creveling, T.F. Jordan, E.G. Thomsen: Some Studies of Angle Relationships in Metal Cutting, Trans. ASME, Jan. (1957) 127.
- 7) 奥島啓式ほか: 抵抗線ひずみ計を利用する切削3分力測定器, 機械学会論文集, 21巻110号(昭30)709.
- 8) 竹山秀彦: 切削における切削速度の影響(第4報), 精密機械, 21巻10号(1955)389.

情 報

(49頁よりつづく)

通産省鉦工業技術研究補助金決定

通産省では41年度の鉦工業技術試験研究補助金の交付先を決定した。

これによると総件数は101件, 交付金額は8億3000万円, 採択率54.3%, 1件当り平均交付金額は820万円となっている。

交付対象の内訳は国がとくにこれからの産業技術振興に必要としている指定課題の研究83件, 自由課題18件でこのうち19件が鉦工業技術研究組合法などにもとづく共同研究である。

部門別では機械22件, 電気43件, 化学, 繊維19件, 金属鉦山7件, 公害10件となっている。

機械関係つぎのとおり

指定課題

▽回転円板式高速衝撃試験的装置の試作研究=共和電業, ▽レンズ量産工程用検査装置の試作研究=光学工業技術研究組合, ▽光学情報処理に関する研究=光学工業技術研究組合, ▽カルパーフィルムを媒体とする情報処理機器の試作研究=キャノンカメラ, ▽写真計測におけるモーションピクチャフィルム画像の自動解析装置の試作研究=ナック, ▽横形ジグ中ぐり盤の試作研究=三

井精機工業, ▽製鉄作業用クレーンスケールの実用化試験=日本鉄鋼協会, ▽復数主軸割出し精度保持の簡素化と送り主軸回転変速機構の簡素化による多軸自動盤の実用化試作=津田鉄工, ▽連続ブローチ盤の実用化試作=不二越, ▽全姿勢溶接装置の試作研究=大阪変圧器, ▽多溶接製圧力容器製作装置の試作研究, ▽小形抵抗器生産用高精度自動プレスの試作研究=松下電器産業, ▽ゴム履物用射出成形装置の試作および製造方法の研究=日本製鋼所, 興国化学工業, ▽超高压圧力測定器に関する試作研究=長野計器製作所, ▽超高压(3万気圧)高温加工装置の実用化試作=三菱原子力工業, 三菱重工業, 三菱製鋼, ▽超高压高温発生装置についての試作研究=神戸製鋼所, 東京芝浦電, ▽大形ヘリウム液化機の研究試作=日本酸素, ▽2次液体噴射方式によるロケット姿勢制御に関する研究=プリンス自動車工業, ▽垂直短距離離着陸用軽量構造エンジンの試作=石川島播磨重工業, 自由課題

▽自動車用エンジン吸排気弁回転機構の研究=富士パルプ, ▽カットファイバの急速乾燥装置の試作研究=井上金属工業, ▽高精度米麦収穫作業機械の試作研究=井関農機。

(71頁へつづく)