(6) 繰返し押抜きを行なえば、あらさの山は次第に平坦化され、あたり率は次第に増加するが、10回程度を超えたとほとんど安定する。この安定位置は初めのあらさの平均線よりはやや高いところにあり、平均線には容易に達しない。そしてあらさの谷は容易に消失しない。

(7) はめあい面のあたりは予想外に小さく、当たっている部分では摩耗や焼付きが起こり易いから、潤滑には十分注意をしなければならない。

おわりに、本研究について卒業論文としてぼう大な数値計算を手伝われた学生赤丸、大石、碓、山県の諸君に感謝する。
(1961, 10月20日受付)

参考文献

- 1) G. Schmaltz : Oberflächenbeschaffenheit und Passungen (II. Mitteilung : Preßsitz), Werkstattstech. und Werksleiter, 1, Nov. (1936).
- 2) F.P. Bowden and D. Tabor : Proc. roy. Soc. Lond (1939). Sec. A.
- 3) R. Holm: Wisc. Veröff. Siemens-Konz. (1929)
- 4) 岩城, 森: 精密機械, 27巻1号 (1961) 1.
- 5) (1)に同じ。
- 6) 坪井, 伊佐: はめあい方式, 機械学会誌, 61巻470号 (1958).

第1報正誤表本誌45頁にあります。

錐形工具による低速小切込み切削 (第1報)

—— 切削抵抗の実験的検討 ——

田 中 行 雄** 人 見 宗 男**

Low Speed-Small Depth Cutting with Pyramidal Tool (1st Report)

——Experimental Investigation of Cutting Resistance——

Yukio TANAKA, Muneko HITOMI

In order to understand single grain cutting theoretically and make clear the grinding mechanism based on the cutting of the individual grain it is necessary to investigate the basic three-dimensional cutting of various pyramidal tools similar to the abrasive grain in shape.

In this paper, the cutting resistance in low speed-small depth cutting was measured with pyramidal tools of seven different shapes, and the following points were investigated :

- 1) Statistic distribution of the cutting resistance.
- 2) Relation between the cutting resistance and profile of cutting section.
- 3) Relation between the cutting resistance and the shape of the contact area.
- 4) Frictional resistance and plastic flow pressure.

1. 結 言

研削作用は、多数の砥粒切れ刃の高速微小切込みの、三次元切削が集成したものである。そこで、個々の切れ刃の切削作用を理論的に把握することにより、研削作用を説明する目的から、単一砥粒や模型砥粒による切削が盛んに研究されている。

しかし、一定の幾何学的形状をもたない砥粒切れ刃の切削を理論的に把握するには、研削時の砥粒切れ刃を幾

何学的に表わした模型砥粒による、高速微小切込みの三次元切削が明確にされねばならない。そこで、実験的あるいは理論的考察の簡単な、低速小切込みの三次元切削を把握し、それに速度効果と寸法効果を考慮することにより、高速微小切込みの三次元切削を理解しようという考えから、模型砥粒の低速小切込み切削を研究することにした。

さて、竹中²⁾、佐藤³⁾、小林⁴⁾等の、砥粒切れ刃の二次元的観測は、切れ刃を円錐(頂角 110°~160°, 先端曲率 $5\mu\sim 20\mu$)で近似できることを示しているが、著者らが、4—6黄銅を使用状態の砥石で引つき、砥粒切れ刃の接触面を、顕微鏡観察した結果(これについては、

* 昭和34年11月精機学会関西支部秋季講演会、昭和35年2月関西砥粒加工研究会にて講演

** 関西大学工学部 正会員

別の機会に報告する)では、砥粒切れ刃を円錐のみで近似するのは妥当でないと考えられた。

そこで、本報では、7種類の錐形工具を用いて切削実験を行ない、切削抵抗の分布、切削溝断面の形状または接触面形状を規定する諸量と切削抵抗の関係の調査、および切削抵抗の理論的取扱に関する若干の吟味を行なった。

2. 実験装置および方法

錐形工具による切削実験は、図1に示す試作の切削装置により、31.5 g~252 gの範囲の荷重を用い、1.0 m/

図1 切削装置

min および 10 m/min の速さで行なつた。この装置による切削抵抗の測定は、次のごとくである。まず錐形工具を取付け、その先端が試料表面に接触するように調節したのち、所要荷重を重錘により与える。回転台に固定した円板状試料の上面を切削し、切削抵抗の2成分を8枚のひずみゲージで検出し、渡辺測器製のEO-6型ペン書きオシログラフで記録させるのである。8枚のひずみゲージは、40 mm×25 mm×0.6 mmの燐青銅板に貼付け、4枚ずつブリッジにしてある。この場合の切削抵抗較正線図を図2に示す。なお、装置は防振ゴムを介して取付け、切削抵抗垂直分力に対する接線分力の影響を除

図2 較正荷重とオシログラフ記録紙上の変位の関係

くため、レバの回転中心と試料の切削面が同一平面上にくるようにした。

錐形工具は、市販の高速度鋼第4種で作製し、硬度 H_s 73~83 に熱処理したものを研削成形後、油砥石で仕上げて用いた。工具の形状は、3角錐、4角錐、5角錐、6角錐、7角錐、8角錐および円錐の7種類で、その最大投影頂角は、円錐、3角錐および4角錐では、 100° 、 120° 、 140° 、 160° 、他の角錐では 120° のみを採用した。なお、先端曲率半径 R を、顕微鏡写真から図3のような作図により求めた結果、 $4 \sim 5 \mu$ であつた。

試料は、市販の4-6黄銅圧延板から直径127 mmの

図3 曲率半径の求め方

円板状に切り取り、図1の回転台に固定したのち、切削面の振れを除くため研削し、パフで鏡面仕上げして用いた。この試料の硬度は $H_B(10/50)100$ である。

3. 実験結果と考察

3.1. 切削抵抗の分布

錐形工具による切削抵抗は、被加工物および切りくずと工具の摩擦抵抗、切りくず生成抵抗および塑性流動層生成抵抗の和であると考えられる。しかも、切りくず生成抵抗は、切りくずとして変形分離する部分の塑性流動とせん断破壊の抵抗であり、摩擦抵抗は、真実接触凝着面またはその近傍の被加工物内におけるせん断破壊抵抗であると考えられる。したがって、錐形工具の切削作用は、被加工物の塑性流動とせん断破壊に基づいていると考えることができる。

一方微視的な観点に立つ材料強度学⁵⁾によれば、被加工物の破壊強度および塑性流動応力は、確定値ではなく統計的性質をもつと考えられるから、錐形工具の切削抵抗は統計的性質を示すと看做し得る。このような場合、その平均値のみを用いるには、平均値を求めた各母集団が同じ分布型を持ち、それぞれの平均値と頻度最高値がほぼ等しいことが必要である。

図4は、切削抵抗の接線分力 F_t の記録から、50個の F_t の読みを0.1 mmまで求め、0.2 mm間かくで組分けし、各階級の階級値と累積度数百分率を、確率紙で示す。この図において、いずれも直線関係を示しているか

ら、 F_t がほぼ正規分布をし、接触面の形状や法線分力 F_n が分布型にはほとんど影響しないことがわかる。また、標準偏差も 0.50 mm~0.65 mm の範囲であるから、ばらつきにもほとんど差はないといえる。

図4 切削抵抗接線分力の分布
( ) の中の数字は垂直荷重を示し、測定値の記号は図12と同じ

よつて、切削抵抗を平均値で代表させるのは、妥当であるといえよう。

3.2. 切削抵抗と切削断面の形状

研削時の、砥粒切れ刃と被加工物の接触状態を、切削方向に直角な平面へ投影した形状で示せば、幾何学的には図5のような断面形状が考えられる。図6は、最大投影頂角 120° の4角錐工具の稜を中心に、 $F_n=94.5\text{g}$ で切削した時の F_t の記録例である。 $n=1$ の範囲は、三角形の断面形状を切削した場合であり、 $n=2$ の範囲は、V字形の断面形状を切削した場合であるが、同一の F_n に対し、 F_t は 40.0 g および 31.0 g と異なっており、

図5 断面形状

図6 切削抵抗接線分力の記録例

断面形状が異なれば、切削抵抗の接線分力が異なつた値になることがわかる。

そこで、切削抵抗に対する切削断面形状の影響を、数値的に表わすため、三角形断面を基にして、切削断面の形状係数 C_s を、

$$C_s = \frac{[F_t]_2}{[F_t]_1} \quad (1)$$

とおく、但し、 $[F_t]_1$ 、 $[F_t]_2$ はそれぞれ、三角形断面を切削した場合および三角形断面切削した場所を、同一の荷重および切削速度でV字形断面で切削した場合の接線分力である。

図7 切削抵抗法線分力と断面形状係数の関係
(円錐工具でV字形断面を引く場合)

図8 負荷方向投影形状と断面形状係数の関係

図7および図8は、それぞれ、円錐工具のV字形断面切削の C_s と F_n および C_s と工具形状の関係を示す。図よりV字形断面の形状係数は、工具形状、最大投影頂角および法線分力に関係なく、ほぼ0.8になることがわかる。

3.3. 切削抵抗と接触面形状の関係

錐形工具で切削する場合の接触面の形状は、(1)錐形の種類とその切削方向によって定まるところの、負荷方向

に垂直な平面への接触面投影形状（以下、負荷方向投影形状という）、および（2）錐形の軸に平行な平面へ錐体を投影した時の最大投影頂角 2ϕ 、または錐形の側面と軸のなす角 θ （以下、すくい角という）によつて規定できる。そこで、これらの諸因子と切削抵抗の関係について考察する。

一般に、 F_t と F_n の間には、

$$\frac{F_t}{F_n} = k \quad (\text{但し, } k \text{ は定数}) \quad (2)$$

なる関係が成立するとされているので、まずこの点を吟味するため、 F_t と F_n の関係を図9の（a）と（b）に

図9 切削抵抗接線分力と法線分力の関係
（(a)：円錐工具で切削する場合。(b)：正多角錐工具で切削する場合）

示す。(a)と(b)は、それぞれ、最大投影頂角と負荷方向投影形状を、パラメータにして表わしたものであり(b)の場合の(面)と(稜)は、角錐工具の面または稜が接触面の中央にあることを意味している。これらの図において、 F_t と F_n がほぼ完全に正比例しているから、最大投影頂角（または、すくい角）や負荷方向投影形状に無関係に式(2)が成立するといえる。

図10は、最大投影頂角およびすくい角と、式(2)の定数 k の関係を、負荷方向投影形状をパラメータにして示したものである。図より、いずれの負荷方向投影形状の場合にも、最大投影頂角またはすくい角が大きくなるにしたがい、切削抵抗2分力の比が小さくなること、

およびその減少割合が、負荷方向投影形状により異なることがわかる。図11は、最大投影頂角が120°の場合の、負荷方向投影形状と式(2)の定数の関係を示す。図より最大投影頂角およびすくい角が等しい場合でも、負荷方向投影形状で、切削抵抗2分力の比が異なることがわかる。また、工具の形状が、3角錐から8角錐へと変わ

図10 最大投影頂角およびすくい角と
切削抵抗の2分力比の関係
（測定値の記号は図12と同じ）

図11 負荷方向投影形状と切削抵抗の
2分力比の関係

表1 $2\phi=120^\circ$ の場合のすくい角の絶対値

錐体形状	すくい角(θ°)
3角錐	45.0
4角錐	50.7
5角錐	55.7
6角錐	56.3
7角錐	57.8
8角錐	58.0
円錐	60.0

つて行くにしたがい、2分力比は、わずかながら小さくなっている。しかし、表1に示すように、すくい角も3角錐から8角錐へという順序に大きくなるから、工具形状の変化による2分力比の減少には、すくい角の増大による2分力比の減少も含まれるものと思う。

3.4. 切削抵抗の理論的取扱に関する吟味

3.4.1. 摩擦抵抗

摩擦抵抗を数値的に取扱うためには、その大きさと作用方向を正しく把握する必要がある。そこで、錐形工具の切削における、摩擦抵抗の大きさとその作用方向の取扱について考察する。

単一工具の二次元切削の場合、接触面のよごれがなく接触圧力が高いため、工具と被加工物は、見掛けの接触面積と真実接触面積が等しいような接触状態にあると考えられている。この考えを錐形工具の切削の場合に適用すれば、摩擦抵抗の大きさは、見掛けの接触面積と被加工物のせん断応力の積で表わせる。

しかし、このように摩擦抵抗を表わした場合、その作用方向が必要になるが、錐形工具の切削のような三次元的切削過程に関する資料はほとんどないようである。そこで、被加工物の平均降伏圧力を用い、切りくずおよび被加工物と錐形工具の摩擦を考慮して、切削抵抗を幾何学的に解析した、松井⁶⁾、および小林⁷⁾の提案を、実験値と比較し、錐形工具の切削における摩擦抵抗の作用方向の取扱方を考える。松井および小林の解析では、円錐工具に対する切削抵抗の2分力比 k はそれぞれ

$$k = \frac{2}{\pi} \cot \theta + \frac{2}{\pi} \sin \theta \mu \quad (3)$$

$$k = \frac{2}{\pi} \cot \theta + \mu \quad (4)$$

となつている。比較のため式(3)に、 $\sin \theta = (1 + \cot^2 \theta)^{-1/2}$ を代入し、

$$k = \frac{2}{\pi} \cot \theta + \frac{2}{\pi} (1 + \cot^2 \theta)^{-1/2} \mu \quad (5)$$

とする。

式(4)および式(5)の摩擦係数 μ を求めるため、図15に示す装置により、切削実験に用いた4-6黄銅王延板と高速度鋼第4種の組合わせにおける、動摩擦抵抗を測定し、平均値として、 $\mu = 0.23$ を得た。(この値は、単一工具の二次元切削において、すくい面の摩擦係数を検討した Merchant の報告⁸⁾ による値 0.26 とほぼ等し

く、一応妥当な数値と考えられる。)そこで、式(4)および式(5)にこの値を代入し、2分力比 k とすくい角の余接 $\cot \theta$ の理論的關係を示すと、図12の一点鎖線のようにになる。図より、両式は円錐工具の実験結果を定性的には説明するが、定量的には、実験値、式(5)の値、式(4)の値の順序で理論値が大きいことがわかる。また、表2より、3角錐および4角錐工具に対しても、円錐工具の場合と同じ順序で理論値が大きいことがわかる。

図12 すくい角の余接と切削抵抗の2分力比の関係

表2 錐形工具に対する k の理論式と実験式との比較

錐体形状	式(5)の考えの拡張	式(4)の考えの拡張	実験式
3角錐(面)	$\cot \theta$	$\cot \theta + \mu$	$0.41 \cot \theta + 0.24$
3角錐(稜)	$\frac{1}{2} \cot \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} (1 + \cot^2 \theta)^{-1/2} \mu$	$\frac{1}{2} \cot \theta + \mu$	$0.30 \cot \theta + 0.18$
4角錐(面)	$\cot \theta$	$\cot \theta + \mu$	$0.45 \cot \theta + 0.10$
4角錐(稜)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \cot \theta + \frac{1}{\sqrt{2}} (1 + \cot^2 \theta)^{-1/2} \mu$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \cot \theta + \mu$	$0.38 \cot \theta + 0.11$

((面)、(稜)は角錐の面または稜を中心に切削する場合を示す。)

さて、式(4)と式(5)の相違は、摩擦の考え方に集約され、前者より後者的の方が実験値に近いから、式(5)のように、実際の接触面積(但し、見掛けの接触面積)に基づいて摩擦を考える方が妥当であると思われる。しかし、表2に示すように、式(5)の考えも、錐形工具の面を中心に切削する場合は、実験式と全く異なっている。これは、負荷方向投影形状によつて、被加工物の変形分離流動の過程が変化し、摩擦抵抗の作用方向が変わるためと考えられる。したがって、摩擦抵抗の作用方向を理解する意味から、種々の錐形工具の切削における被加工物の変形分離流動を、実験的に検討する必要がある。なお、式(4)および式(5)では、 F_n 方向の摩擦が考慮されていないが、この点も、変形分離流動過程の実験的検討により、明らかにできると考えられる。

3.4.2. 塑性流動圧力

単一工具の二次元切削では、摩擦以外の抵抗として、切りくず生成抵抗が主として考えられているが、錐形工具の小切込み切削の場合には、切削溝の周辺に溝断面と同程度の塑性流動層が生成されるから、その生成抵抗は無視できない。したがって、錐形工具の切削抵抗を考える場合、被加工物の塑性流動圧力が重要になると考えられるので、その特性およびその取扱いを検討する。

図13は、錐形工具の静的押込みにより求めた、静的塑

図13 錐形工具の静的押込みにおける工具すくい角の余接と、平均塑性流動圧力の関係

性流動圧力 P_m とすくい角の余接 $\cot \theta$ の関係を示す。なお、実験式を求めると、 $40^\circ \leq \theta < 90^\circ$ の範囲で、

$$P_m = 35 \cot \theta + 108 \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (6)$$

となる。しかし、切削の場合には、負荷時間が短いから動的な塑性流動圧力 P_d を用いねばならないが、これは Bowden らの実験によれば、 $P_d = 1.32 P_m$ とおけるから、

図14 垂直荷重と接触面負荷方向投影面積の関係

$$P_d = 46 \cot \theta + 143 \quad (\text{kg/mm}^2) \quad (7)$$

となる。図14は、大洋テスト製の微小硬度計によって、マイクロビッカース用圧子の静的押込みと引きを行ない、その時の F_n と、 F_n に垂直な平面への接触面投影

図15 摩擦力測定装置

面積の関係を示す。図より、 $F_m = 110 \text{ kg/mm}^2$ 、引きに対する見掛けの平均塑性流動圧力 $P_s = 165 \text{ kg/mm}^2$ 、 $P_d < P_s$ である。これより引きまたは低速小切込みの切削を動的押込みと定量的に等価なものとして取扱うのは妥当でないと考えられる。また、 F_t 方向と F_n 方向とでは、被加工物の変形に対する拘束性が異なるとみなされるから、塑性流動圧力も異なつた値になると考えねばならない。

4. 結 言

以上、7種類の高速度鋼製錐形工具により、4-6黄銅圧延板の低速小切込み切削を行ない、その切削抵抗を実験的に検討し、次に要約するような結論を得た。

(1) 切削抵抗は、ほぼ正規分布する統計値と考えられその正規性は、接触面の形状には影響されない。

(2) 式(1)のように、切削溝断面の形状係数 C_s を定義し、V字形断面の C_s として0.8を得た。なお、この値は、錐形、最大投影頂角、および法線分力には影響されない。

(3) 最大投影頂角およびすくい角が同一であつても、負荷方向投影形状が変われば、切削抵抗の2分力比は異なってくる。

(4) 錐形工具の静的押込みから、Bowden の実験式を用いて算出した、動的塑性流動圧力 P_d に対し、式(7)の実験式を得た。しかし、これは“引きによる塑性流動圧力”とは一致しない。

(5) 摩擦抵抗を考えるためには、錐形工具の切削過程を実験的に検討し、切削時の見掛けの接触面積および接触面における被加工物の流動方向を理解する必要がある。(1961, 11月11日受付)

文 献

- 1) 小林 昭：研削機構に関する最近の研究状況、

- 精密機械, 25-4(1959), 95.
- 2) 竹中規雄, 古橋一尊: 日本機械学会講演会前刷, 昭30, 10, 16.
- 3) 佐藤健児: 切削理論(I) 砥粒及び砥石による加工, 誠文堂新光社, 昭31-11, 51.
- 4) 小林 昭: プラスチックの研削切断法の研究, 日本機械学会誌, 60巻457号 (1957), 176.
- 5) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂, 昭30, 3.
- 6) 松井正己: 平面の超仕上げに関する研究 (第3報) 精密機械 22巻11号 (1956) 477.
- 7) 小林 昭: プラスチックの研削切断法の研究 (第10報), 精密機械 23巻11号 (1957) 532.
- 8) M.E. Merchant: Metal Cutting Research Machining Theory and Practice, ASM. (1950), 28.

錐形工具による低速小切込み切削 (第2報)*

—— 切削過程の実験的検討 (その1) ——

田 中 行 雄** 人 見 宗 男**

Low Speed-Small Depth Cutting with Pyramidal Tool (2nd Report)
—Experimental Investigation of Cutting Process (Part 1)—

Yukio TANAKA, Munuo HITOMI

From the experimental investigation of the resistance in the low speed-small depth cutting with pyramidal tools, it was known that, in discussing the cutting resistance theoretically, the phenomenal understanding of the plastic flow of work, separation of chip and its flow, and the area of real contact etc., in the cutting process, was necessary.

In this paper, the grooves made with the pyramidal tool were observed with metallographical microscope, and the following points were investigated experimentally:

- 1) Separating form of the chip at the contact plane and directions of the chip flow.
- 2) Plastic flow of the work as piled-up residual.

1. 緒 言

前報¹⁾において、錐形工具による切削抵抗を測定し、その理論的な取扱いについて吟味した結果、(1) 被加工物の切りくずとしての分離とその流動方向、(2) 工具と被加工物の接触状態と接触面積および(3) 接触面の近傍における塑性流動領域などを把握する意味で、被加工物の変形分離流動の過程を実験的に検討すべきであると考えた。

しかし、錐形工具による切削は、単一工具による二次元切削より複雑であり、その過程を直接に観測することはほとんど不可能である。事実、単粒の引ききまたは切削時の被加工物の変形分離流動の過程に関する報告は、盛上がり現象²⁾³⁾⁴⁾と切りくず形状⁴⁾の観測がある程度

ように思われる。

そこで著者らは、前報¹⁾で用いた錐形工具によつて切込み一定の低速小切込み切削を行ない。金属顕微鏡による切削溝の部分的な三次元的観測、および切りくずの形状の観察に基づいて、切削時の被加工物の変形分離流動の過程を間接的に検討し、錐形工具の低速小切込み切削過程の理解を試みた。

本報では、接触面における切りくずの分離とその流動方向、および盛上がり切残しとしての塑性変形について述べる。

2. 実験装置および方法

錐形工具による切削には、平面研削盤(桑野機械製 KGS-A 型)の油圧送り装置を利用した。図1の(a)に示す切削試料を研削盤の往復台上の電磁チェック上面に、また錐形工具を研削盤の主軸軸受部にそれぞれ固定し、最小目盛が 1/1000 mm のダイヤル・ゲージを用い

* 昭和35年11月, 日本機械学会第38期全国大会にて講演

** 関西大学工学部 正会員