丸みのある切れ刃に作用する切削抵抗*

(第1報, 切削抵抗に関する基礎的な検討)

近 藤 英 二^{*1}, 皮籠石 紀雄^{*1}向井原 崇^{*2}, 引地 力男^{*3}Cutting Force Acting on Blunt Cutting Edge
(1st Report, A Basic Consideration on Cutting Force Occurrence)Eiji KONDO^{*4}, Norio KAWAGOISHI,
Takashi MUKAIHARA and Rikio HIKIJI^{*4} Kagoshima University, Dept. of Mechanical Engineering,
Korimoto 1-21-40, Kagoshima-shi, Kagoshima, 890-0065 Japan

Undeformed chip thickness may be smaller than radius of cutting edge at small feed rate when workpieces are cut by a finishing tool with large round corner. Therefore, in finish cut, sharpness of cutting edge has to be taken into consideration in cutting process. The purpose of this study is to find mechanism of cutting force occurrence at smaller undeformed chip thickness than radius of cutting edge. In this study, the effects of cutting edge radius both on cutting force and on burnishing force were investigated in orthogonal cutting. Furthermore, contact length between tool flank face and workpiece during cutting was measured in order to consider the relation between the burnishing force and the contact length. As a result, the conclusions were reached as follows. First, the following parameters vary inversely as the n th power of undeformed chip thickness normalized by radius of cutting edge: (i) cutting forces per unit area of chip section, (ii) specific burnishing force defined as burnishing force divided by undeformed chip thickness and by width of cut, and (iii) specific burnishing length defined as burnishing length divided by undeformed chip thickness. Second, cutting force occurring on flank face of ploughing force is greater than excessive cutting force caused by reduction of rake angle on round face of cutting edge.

Key Words: Cutting, Turning, Sharpness of Cutting Edge, Cutting Force, Burnishing Force, Burnishing Length

1. ま え が き

精密な仕上げ切削においては, 工具のノーズ半径に比べて切込み, 送りを小さくするため, 切取り厚さが切れ刃の丸み半径以下になることもあり, 切削抵抗におよぼす切れ刃の丸みの影響は無視できないと考えられる. 通常, 切削抵抗は切取り厚さが十分に厚いところでは切取り厚さの増加に対してほぼ直線的に増加するが⁽¹⁾, この直線は原点を通らず, 切取り厚さが零のところで見掛けの切削抵抗を生じる. この切取り厚さが零のところでの見掛けの切削抵抗は押しならし力(圧壊力)⁽¹⁾, ploughing force⁽²⁾, 刃先力⁽³⁾と呼ばれ, 切れ刃の丸みに関係することなどが示されている. しかしながら, これまでの研究では切取り厚さの増加に対して切削抵抗が非線形的に大きくなる, 切取り厚さが小さいところでの切削抵抗についての系統的な検討は十分でないようである. 一方, 比切削抵抗の寸法

効果については, 上記の押しならし力以外に, 切取り厚さが薄くなるほど材料欠陥の存在確率が小さくなり, 材料強度が増加することが原因であるとする説明もなされている. しかしながら, この材料強度の上昇に伴って生じると考えられるせん断面せん断応力の増加は, 実験では認められなかったという報告がされている⁽⁴⁾.

そこで, 本研究は切取り厚さの増加に対して切削抵抗が非線形的に急増するような, 切取り厚さが薄いところで延性材料である圧延黄銅板の二次元切削を行い, 比切削抵抗の寸法効果の主な原因は切れ刃の丸みであるという観点から, 切れ刃の丸み半径, 切取り厚さと切削抵抗との関係, およびバニシング抵抗(切屑を発生しないで切れ刃が被削材表面を滑る限界での抵抗力)との関係を調べた. また, 得られた切削抵抗とバニシング抵抗から, 押しならし力の発生機構についても考察した.

2. 実験方法

2.1 実験装置と実験条件 図1は実験装置の概略図である. 実験には研究用に製作したNC旋盤を使

* 原稿受付 1999年7月16日.

^{*1} 正員, 鹿児島大学工学部 (☎ 890-0065 鹿児島市郡元1-21-40).^{*2} 正員, (株)中山製鋼 (☎ 551-8551 大阪市大正区船町1-1-66).^{*3} 正員, 鹿児島工業高等専門学校 (☎ 899-5102 鹿児島県姶良郡隼人町真孝1460-1).

E-mail: kondo@mech.kagoshima-u.ac.jp

い、端面切削用のスローウェイト①を切込み方向に一定速度で送り、直径約 160 mm の円盤状の被削材の外周を乾式で二次元切削した。ここで、実験の前には切れ刃が鋭利なバイト②を旋盤の主軸方向に送って被削材外周を切削し、表面を平滑に仕上げ、切れ刃が被削材の外周面に平行になるようにスローウェイト①を取付けた。加工中の背分力 F_x と主分力 F_y は切削動力計③で測定し、切取り厚さは非接触変位センサ④で切削中の工具台と被削材系との距離 d を測定することにより求めた。ここで、切削動力計③は水晶圧電型切削動力計である。測定した信号は AD 変換し、パーソナルコンピュータ上で処理した。この AD 変換による信号の分解能は背分力 F_x が 0.195 N、主分力 F_y は 0.489 N である。

表 1 は実験条件で、被削材として焼なましをした黄銅製の円盤を使い、切削幅は 2 mm で一定とした。スローウェイトチップは特別に製作した切れ刃の丸み半径が 30 μm 、50 μm 、80 μm の 3 種類のものを使用した。また切削速度は 100 m/min で一定とし、7 μm から 100 μm までの範囲の切取り厚さで実験を行った。

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	Material	Brass (JIS C2801P)
	Width of cut b mm	2
Tool	Clamp holder	Mitsubishi CTRP 2020
	Insert	Mitsubishi TPMN160304 (cemented carbide equivalent to JIS M20)
	Edge radius r μm	30, 50, 80
	Clearance angle γ_0 deg.	6
	Rake angle α_0 deg.	5
Cutting speed	V_0 m/min	100
Feed rate	d_0 $\mu\text{m}/\text{rev}$	7 ~ 100

Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 抵抗力の測定例 図 2 は切れ刃の丸み半径 r が 50 μm の切削工具を使い、工具送り量 69 $\mu\text{m}/\text{rev}$ (切取り厚さ h は 69 μm) で被削材を十数回転分ほど切削し、その後被削材を回転させたまま工具の送りを止め、工具切れ刃を被削材表面で滑らせたときの抵抗である。図 2 の切削実験では、切削工具が被削材に接触してから数回転後には定常な切削状態になった。また工具の送りを止めると抵抗は急激に減少し、数回転後に切屑を流出しなくなり、パニングの状態になった。そこで、ここでは図 2 の定常な状態での背分力の平均値 (被削材約 10 回転分) を切削抵抗の背分力 F_{cx} 、主分力の平均値を切削抵抗の主分力 F_{cy} とする。また、被削材表面で工具を滑らせたときの背分力の平均値 (被削材約 10 回転分) をパニング抵抗の背分力 f_x 、主分力の平均値をパニング抵抗の主分力 f_y として以下に示す。

3. パニング抵抗

図 3 は切取り厚さ h に対するパニング抵抗の背分力 f_x と主分力 f_y で、切れ刃の丸み半径 r をパラメータとして示してある。 r が 80 μm の場合、得られた f_x と f_y は h が大きいところではほぼ一定値になっているが、 h が小さくなるのに伴って減少している。 r が 50 μm の場合は、 r が 80 μm の場合とほぼ同じ傾向が見られるが、 r が 30 μm の場合には、 f_x と f_y の大きさはほぼ一定になっている。そこで、これを詳細に検討するため、この論文ではパニング抵抗の背分力 f_x を切削幅 b と切取り厚さ h で除した f_x/bh を比パニング抵抗の背分力、またパニング抵抗の主分力 f_y を b と h で除した f_y/bh を比パニング抵抗の主分力と定義し、切れ刃の丸み半径 r で規準化した切取り

Fig. 2 Variation of machining forces with progress in cutting

厚さ h/r との関係調べた。得られた結果を図4に示す。ここで、 r と h が異なっても図4の横軸の h/r が同じであれば、得られた結果は同じ幾何学的な条件であることを意味する。また、図中の直線は、得られたそれぞれの実験値から最小二乗法により求めたが、 f_x/bh と f_y/bh の実験値は h/r の増加に対し、ほぼそれぞれの直線によって減少している。

4. バニシング状態での工具と被削材との接触長さ

ここでは図5に示す切削中のバニシング距離⁽⁵⁾ l_{BC} を測定し、工具と被削材との接触長さ l_{AC} を推定する。

4・1 バニシング距離 バニシング距離の測定では、切削の前に工具の切れ刃をマーカーペンで黒く塗り、切削後に図6に示すような治具を使ってマーカーのインクが削り取られた部分の長さ L を光学顕微鏡で測定した。また、図6に示した基準長さ l_0 も別に測定し、バニシング距離 $l_{BC} (=L - l_0)$ とした。

Fig. 3 Variation of burnishing forces with increase in undeformed chip thickness

Fig. 4 Specific burnishing forces versus normalized undeformed chip thickness

図7は実験で得られた切り厚さ h に対するバニシング距離 l_{BC} で、切れ刃の丸み半径 r をパラメータとして示してある。 r が $30 \mu\text{m}$ の場合、得られた l_{BC} は、 h が小さいところでは h の増加に伴って大きくなるが、 h が大きくなると増加率は小さくなり、 l_{BC} は一定値に収束する傾向が見られる。 r が $50 \mu\text{m}$ の場合の l_{BC} は、 r が $30 \mu\text{m}$ の場合の l_{BC} よりも大きい、 h の増加に対する傾向はほぼ同じである。 r が $80 \mu\text{m}$ の場合、 r が $50 \mu\text{m}$ の場合の l_{BC} とほぼ同じ大きさになっており、 r の増加に伴う l_{BC} の増加は飽和する傾向が見られる。

切れ刃が鋭利な場合、バニシング距離は切り厚さに比例し、工具すくい角が小さくなるとバニシング

Fig. 5 Model of contact situation in burnishing

Fig. 6 Measurement method of burnishing length

Fig. 7 Variation of burnishing length with increase in undeformed chip thickness

距離と切取り厚さとの比が大きくなることが報告されており⁽⁴⁾, 切れ刃陵に丸みがある場合には, 丸み部でのすくい角の減少により, パニシング距離が図7に示したような特性になったと推定される. そこで, 図7に示した結果について切取り厚さとパニシング距離との比 l_{BC}/h (以後はパニシング距離の比と呼ぶ) と規準化した切取り厚さ h/r との関係調べた. 得られた結果を図8に示す. また, 図8には最小二乗法により求めた直線が示してある. 得られた l_{BC}/h は, $r = 80 \mu\text{m}$ の場合, h/r が大きいところで直線の値より小さくなる傾向が見られるが, 全体的に l_{BC}/h は h/r の増加に対してほぼ直線的に減少している.

4・2 パニシング抵抗と接触長さ 図3と図7で示したように, 切取り厚さ h に対するパニシング抵抗 f_x, f_y の特性とパニシング距離 l_{BC} の特性は似た傾向を示した. そこで, ここでは工具と被削材との接触長さ l_{AC} と, パニシングの背分力 f_x との関係を調べた. 得られた結果を図9に示す. ここで, パニシング状態での

Fig. 8 Specific burnishing length versus normalized undeformed chip thickness

Fig. 9 Relation between burnishing thrust force and contact length on flank face in burnishing

工具と被削材との接触状態として図5に示したモデルを用い, 接触長さ l_{AC} は図7で示したパニシング距離 l_{BC} から式(1)により求めた.

$$\left. \begin{aligned} l_{AC} &= l_{BC} + r \sqrt{2 \left(\frac{\delta}{r} \right) - \left(\frac{\delta}{r} \right)^2} \\ \delta &= l_{BC} \tan \gamma_0 + r(1 - \cos \gamma_0 - \sin^2 \gamma_0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)の δ は切削加工面の弾性回復量, γ_0 は逃げ角である. 得られた比パニシング抵抗の背分力 f_x/bh は, 切れ刃陵の丸み半径毎に, 接触長さの比 l_{AC}/h に対してほぼ直線的に増加し, また直線の傾きは約1となった. 従って, パニシング抵抗の背分力 f_x は逃げ面の接触長さ l_{AC} にほぼ比例している. しかし係数は r が大きいほど大きく, r が $30 \mu\text{m}$ の場合に比べ $80 \mu\text{m}$ では約70%増加した. この原因の一つとして切れ刃陵の丸み半径が大きくなるほど切削加工面が硬くなるのが考えられるが⁽⁶⁾, 今後さらに検討する必要がある.

5. 切削抵抗

5・1 切削抵抗の測定結果 図10は切取り厚さ h に対する切削抵抗の背分力 F_{cx} と主分力 F_{cy} で, 切れ刃陵の丸み半径 r をパラメータにして示してある. 得られた F_{cx} は h が大きくなるのに伴って単調に増加し, その増加量は r の増大に伴って大きくなっている. また, F_{cy} の特性も, F_{cx} の特性とほぼ同じ傾向が見られる.

図11は規準化した切取り厚さ h/r に対するせん断角 ϕ である. ここで, h が小さいところでは有効なすくい角は公称のすくい角よりも小さくなると考えられる. そこで, 図12に示すように切削前の被削材表面の延長線とすくい面との交点におけるすくい面の傾斜角 α_r を有効すくい角と仮定し⁽⁴⁾, 式(2)によりせん断

Fig. 10 Variation of cutting forces with increase in undeformed chip thickness

角 ϕ を求めた.

$$\left. \begin{aligned} \tan \phi &= \frac{C_h \cos \alpha_t}{1 - C_h \sin \alpha_t}, \quad C_h = \frac{h}{h_c} \\ \alpha_t &= \sin^{-1} \left(1 - \frac{h}{r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで, h_c は切りくずの厚さであり, 切りくずの長さ L_c , 重量 W , 被削材の比重 ρ から式 (3) により求めた.

$$h_c = W/(\rho b L_c) \quad (3)$$

得られた ϕ は, h/r の増加に伴って急激に大きくなるが, h/r が約 1 以上で一定値に漸近する傾向が見られる. また, その大きさは切れ刃の丸み半径 r が大きいほど増大している.

図13は規準化した切り厚 h/r に対する単位切削断面積当りの背分力 p_{sx} と主分力 p_{sy} で, 図10で示した背分力 F_{sx} , 主分力 F_{sy} から求めた. 得られた p_{sx} と p_{sy} の値は, 切れ刃の丸み半径 r の大きさにより多少の違いは見られるが, h/r の増加に伴い, それぞれほぼ直線的に減少している.

5.2 押しならし力の発生機構 押しならし力は, 切れ刃の丸み部でのすくい角の減少による切削抵抗の増加分と逃げ面で発生する切削抵抗 (切削中の被削材の一部を切れ刃の前方で被削材の内部に押し込む力と逃げ面での摩擦力の和) の和になることが指摘されているが⁽¹⁾⁻⁽³⁾, その程度については明確にされていない. そこで, ここでは切削過程を図14のようにモデル化し, 押しならし力の逃げ面で発生する成分はバニング抵抗に近似的に等しいと仮定して⁽⁷⁾, すくい面での切削抵抗を推定する.

図14のモデルでは, 一点鎖線より下の被削材の材料は弾性変形し, A点から被削材内部に押込まれ始め, 最下点のB点を過ぎると弾性回復してC点で工具と離れる. よって, ここでは工具のABCで示される面を工具の逃げ面, この部分で生じる背分力を逃げ面の背分力 g_x , 主分力を逃げ面の主分力 g_y と定義する. 一方, 一点鎖線よりも上の被削材は弾性変形する被削材の材料とA点で分離して切屑になる. よって, ここでは切屑になる被削材の材料が工具と接触する面をすくい面, この部分で生じる背分力をすくい面の背分力 Q_x , 主分力をすくい面の主分力 Q_y と定義する. 従って, 図10の切削抵抗 F は逃げ面の切削抵抗 g とすくい面の切削抵抗 Q とすく

Fig. 11 Variation of shear angle with increase in undeformed chip thickness

Fig. 12 Model of equivalent rake angle α_t

Fig. 13 Cutting forces per unit area of chip section with increase in normalized undeformed chip thickness

Fig. 14 Model of cutting process

Fig. 15 Cutting forces on rake face with increase in undeformed chip thickness

い面の切削抵抗 Q の和になり、式 (4) で表される。

$$\left. \begin{aligned} F_{cx} &= Q_x + g_x \\ F_{cy} &= Q_y + g_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

図3で示したバニシング抵抗は、同じ切削条件であっても切削中に逃げ面で生じる抵抗よりもやや小さくなると考えられるが⁽⁷⁾、ここでは図14の逃げ面での切削抵抗 g が図3で示したバニシング抵抗 f に等しいと仮定し、すくい面の切削抵抗 Q を求めた。図15は得られたすくい面の背分力 Q_x と主分力 Q_y で、図3で示したバニシング抵抗 f_x, f_y を式 (4) の g_x, g_y に、また図10で示した切削抵抗 F_{cx}, F_{cy} を式 (4) にそれぞれ代入して求めた。得られたすくい面の背分力 Q_x は、 F_x と同じように、 h が大きいところでほぼ直線的に増加している。切れ刃の丸み部ですくい角が減少するため、この直線は $h=0$ で原点を通らないと考えられるが、その大きさは F_{cx} の場合よりもかなり小さい。このような傾向は主分力 Q_y でも見られる。一方、切削開始に関するこれまでの研究⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾によれば、切屑が流出し始めるのは、切れ刃前方の被削材の盛り上がり切れ刃の円弧部のかなり上のほうに達してからである。従って、図14では切屑になる材料と被削材に押し込まれる材料が分離する点Aは弾性回復した切削面上の点Cと同じ高さであると仮定したが、実際の分離点Aは切れ刃の円弧部のかなり上方にあるため、切れ刃の丸み部ですくい角の減少による切削抵抗の増加は小さくなったと推定される。

6. ま と め

本研究では実験を行った範囲で以下の結論を得た。

(1) バニシング抵抗 (切屑を発生しない限界値) とそのときのバニシング距離は、切れ刃の丸み半径が $50 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$ の場合、バニシングをする切削加工面が生成されたときの切取り厚さが厚いところではほぼ一定値になるが、薄いところでは小さくなる傾向が見られた。

(2) 比バニシング抵抗 (バニシング抵抗を切削幅と切取り厚さとで除した値)、バニシング距離の比 (バニシング距離と切取り厚さとの比)、単位切削断面積当りの切削抵抗は、切取り厚さ h を切れ刃の丸み半径 r で規準化した無次元量 h/r の n 乗、 $(h/r)^n$ にほぼ反比例した。

(3) 比バニシング抵抗は、工具逃げ面と被削材との接触長さ (バニシング距離) にほぼ比例した。ただし、その比例係数は切れ刃の丸み半径が大きいほど大きくなった。

(4) 切削前の被削材表面の延長線と工具すくい面との交点におけるすくい面の傾斜角を有効すくい角と仮定した場合、得られたせん断角は、切れ刃の丸み半径の増加に伴って大きくなる傾向が見られた。

(5) 押しならし力は、丸み部でのすくい角の減少により増加する成分よりも、逃げ面で発生する成分の方が大きいと推定される。

参考文献

- (1) 益子, 機論, 19-78 (1953), 32.
- (2) Albrecht, P., *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 82-4 (1960-11), 348.
- (3) 奥島・垣野, 機論, 第3部, 34-261 (1968-5), 971.
- (4) 中山・田村, 精密機械, 31-3 (1965-3), 240.
- (5) 杉田・上田・稲村, 基礎切削加工学, (1984-10), 163, 共立出版.
- (6) Kaczmarek, J. 著, 笠原英志訳, 機械と工具, 9-5 (1965-5), 71.
- (7) 津枝・長谷川・中野, 機論, 第3部, 26-166 (1960-6), 803.
- (8) 山本・中村, 精密機械, 34-5 (1968-5), 310.
- (9) 山本・中村, 精密機械, 35-3 (1960-6), 164.
- (10) 津枝・長谷川・中野・福田, 機論, 第3部, 26-166 (1960-6), 809.