アルミニウムの切削仕上面について

財満 鎮雄* 鈴木 康夫* 加茂 尚*

Shigeo Zaima, Yasuo Suzuki and Takashi Kamo : On the Characteristics of the Machined Surface in Orthogonal Aluminium Cutting. Low orthogonal dry cutting tests were performed on commercial pure aluminium (1100) plate to investigate the influence of the cutting conditions on the characteristics of the machined surface in regard to the depth of cut, cutting speed and tool nose radius. The results obtained are summarized as follows :

The deformed layer increases its hardness and thickness with increase in the depth of cut. The roughness of the machined surface increases with increase in the depth of cut if the tool nose is round, but if the tool nose is not round, there is no difference in the surface roughness regardless of the depth of cut when the depth of cut is small and the surface roughness is suddenly deteriorated beyond a certain degree of the depth of cut. As long as the tool nose radius is small, the cutting resistance and the surface roughness increase, but when the tool nose is over a certain radius, the cutting resistance and the surface roughness remain almost constant. The main cause is considered as follows. The contour radius of the built-up edge, which grows and adheres on the negative rake side of the tool nose and participates in cutting, is nearly equal regardless of the nose radius if the tool nose is over a certain radius. In the experimental cutting speed range, the surface roughness is not so affected by cutting speed.

(Received January 6, 1972)

I. 緒 言

アルミニウムは非常に軟質であるため、切削加工の際の変形挙動はかなり複雑で、たとえばその切削加工の前段階の加工によって生じた加工変質層の程度によって切削力に大きな変化が認められ、切屑生成はスティック・スリップ的になることが多く、また切削面には塑性流動的な変形の影響が大きく効いているなどアルミニウムに特有な現象がみられる⁽¹⁾。とくに切削仕上面性状に及ぼす切削条件の影響は極めて重要で、条件によっては実用に供し得ないような粗大な仕上面となることも少なくない。切削仕上面性状に大きく影響する切削条件として考えられる因子としては、工具形状、切込み、送り、切削速度などの諸条件、切削剤の有無、工具系あるいは被削材系の振動など種々考えられる。

本報では、アルミニウム軟質板を低速2次元切削し、その際の切削仕上面性状に及ぼす切削速度、切込みおよび工

具形状のうちとくに刃先丸味半径などの影響について検討を加え、切削仕上面形成機構の解明の一助とするのを目的とした。実際の工具には刃先丸味が必ず存在するものであり、刃先丸味が切削仕上面あらさに及ぼす影響は無視できない⁽²⁾ので、ここでとくに刃先丸味半径の影響を検討の対象に加えた。

II. 試 料 調 整

Table 1 に示す化学成分の板厚 7.0 mm の工業用純アルミニウム板 (1100 材) を 4.0 mm に冷間圧延した後、110

Table 1 Chemical composition of specimen used

Material	Cu (%)	Si (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)	Zn (%)	Al (%)
1100-O	0.12	0.35	0.30	0.02	0.03	0.02	bal.

* 静岡大学工学部機械工学科 (Department of Mechanical Science, Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu)

(1) 財満, 滝水: 日本機械学会論文集, **35**, 277 (1969), 1940.

(2) 財満, 岡崎: 軽金属, **20** (1970), 443.

mm×40 mm の長方形に切断し、電気炉で 500°C、4 時間の焼なましを施して、軟質材(0 材)としたものを試料とした。その二、三の機械的性質は Table 2 に示すように、アルミニウム軟質材の標準的性質とほぼ近い値をもつものである。供試試料として、切削試験を行なう前段階の準備として予備試験より求めた構成刃先も生成されず、切削面に組織の乱れも認められない切削条件、すくい角 $\alpha=50^\circ$ の平バイトを用いて軽く切削して表面を整えたが、Photo. 1 の顕微鏡組織にみるように切削表面に近い部分でも、表面調整予備切削による組織の乱れはほとんど認められないようであった。

Photo.2 Orthogonal cutting apparatus used

Table 2 Mechanical properties of specimen used

Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (0.2%) (kg/mm ²)	Elongation (%)	Vickers hardness Hv (Load 10 kg)
9.5	3.8	38	21.3

Photo.1 Microscopic structure of specimen used after pre-cutting for regulating surface

III. 実験要項

切削試験装置は Photo. 2 に示すようなフライス盤を利用した 2 次元切削装置で、テーブルの横送りによって切削速度を与え、縦送りによって切込みを変化した。

使用工具は高速度鋼 (SKH 4) 製平バイト (12 mm□) で、すくい角 $\alpha=30^\circ$ 、逃げ角 $\beta=8^\circ$ に一定とし、刃先丸味半径は $r=0, 30, 60, 90$ および 120μ の 5 種類に変化した。使用工具はすべて工具研削盤 (WA-60 L 砥石使用) にて最大あらさ約 0.6μ の面に仕上げた。ここで、刃先丸味はオイルストーンを使用して与えたが、丸味半径の測定はレブリカ法、すなわち、切削を急停止して刃先近傍の被削材部分を切出し、合成樹脂に埋めた後顕微鏡写真に撮ったものによった。なお、アルミニウム板切削中の工具摩耗量は極く僅かで、実験前後における刃先丸味の変化はほとんど認められなかった。

切削条件は切削速度を $v=50\sim1000$ mm/min の範囲で 5 段階、切込みを $t_1=30\sim110 \mu$ で 5 種類に変化した乾式切削である。切込みはあらかじめダイヤルゲージを用いて

大体の見当をつけておき、切削後測微顕微鏡によって正確に測定した。

IV. 切削仕上面性状

1. 加工硬化層の測定

乾式 2 次元切削した試料板を切削距離 100 mm 程度の個所から切削方向に約 15 mm、深さ方向に約 10 mm の大きさに切断、合成樹脂に埋込み研磨仕上げした後、切削方向に直角断面の微小ビッカース硬さ Hv (測定荷重 10 g) を測定した。切削表面から深さ方向への硬さ分布を求めれば Fig. 1 のようになる。図中、各標点はそれぞれ 4 回の測定値の平均であり、図の上段、中段、下段の順に刃先丸味半径が $r=0, 60$ および 120μ の場合である。これからみれば刃先丸味半径の大小にかかわらず切込みが増加すれば加工硬化層の深さが増加し、被削材内部への浸透深さ、すなわち、加工硬化層の厚さも増加している。また、切込みの大小に拘わらず、刃先丸味半径が増加しても同様のことがいえるが、これは刃先丸味半径が増加すれば被削材が下方に押付けられ、こすられるといういわゆるパニッシュ作用が大きくなるためと思われる。しかし、刃先丸味半径が $r=60 \mu$ をこえれば刃先丸味半径の増加による硬化層への影響は顕著ではなくなってくるが、その理由については後述する。

2. 切削仕上面あらさの測定

切削仕上面の表面あらさ表示は最大高さあらさ $H_{\max}$ および中心線平均あらさ H_a の両方式に従い、 $H_{\max}$ は切削面の切削方向断面写真により求め、また H_a は触針式中心線平均あらさ計 (触針速度 3mm/sec, 触針圧 1 g, カットオフ 0.75 mm, 測定長さ 20 mm) により求めた。

刃先丸味半径 r と表面あらさとの関係は例えば切削速度 $v=200$ mm/min, 切込み $t_1=70 \mu$ の場合 Fig. 2 のように

Fig.1 Deformed layer after orthogonal cutting

Fig.2 Relation between tool nose radius and surface roughness. (Cutting speed $v = 200$ mm/min, depth of cut $t_1 = 70$ μ)

なり、刃先丸味半径が $r = 0 \sim 60$ μ では半径の増加とともに表面あらさは H_{max} , H_a ともに増大するが、半径が $r = 60$ μ 以上になればほぼ一定の表面あらさとなり、半径が増加しても表面あらさには大きな変化は認められない。

切込み t_1 と表面あらさの関係は例えば 切削速度 $v = 200$ mm/min のとき、刃先丸味半径がない場合 ($r = 0$ μ) と刃先丸味半径がある場合の一例として $r = 90$ μ について求めれば Fig.3 のようになる。これからみれば、刃先丸味がない場合には切込みが小さい間は表面あらさにはほとんど変化がみられないが、切込みが $t_1 = 90 \sim 120$ μ と大きくなれば表面あらさも急激に大きくなる。一方、刃先丸味半径が $r = 90$ μ と大きい場合には、表面あらさは切込みの増大に対して直線的に大きくなっている。

Fig.3 Influences of depth of cut on surface roughness in the case of tool nose radius $r = 0$ μ and $r = 90$ μ. (Cutting speed $v = 200$ mm/min)

切削速度 v が表面あらさに及ぼす影響については、実験範囲の $v = 50 \sim 1000$ mm/min では全体として低い速度領域であるためかほとんど表面あらさに切削速度の変化による影響は認められないようであった。

3. 切屑圧縮係数および切削抵抗の測定

切削の際の切屑厚さ t_2 を測定し、切込み t_1 との比、すなわち切屑圧縮係数⁽³⁾ $r_c = (t_2/t_1)$ を求め、切込み t_1 との関係の求めれば、例えば 切削速度 $v = 200$ mm/min のとき刃先丸味半径 $r = 0, 60, 120$ μ の場合については Fig.4 のようになる。切屑圧縮係数は刃先丸味半径の増加とともに減少するが、この場合には $r = 60$ μ 以上の刃先丸味半径でも半径の増加とともに切屑圧縮係数は減少してはほぼ一定の値とはならない。切込みの増加に対しては、 $t_1 = 70$ μ 以上の切込みではそれぞれの刃先丸味半径のもとで切屑圧縮係数

Fig.4 Influences of depth of cut on chip compression factor. (Cutting speed $v = 200$ mm/min, tool nose radius $r = 0 \sim 120$ μ)

(3) たとえば、M.Kronenberg: *Machining Science and Application*, Pergamon Press, (1966), 5.

はほぼ一定の値をとっている。刃先丸味半径が増加すれば切屑圧縮係数が減少する原因として、刃先丸味半径部分による被削材の押しならし作用によることも考えられる。すなわち、刃先丸味の負のすくい角部分が被削材を押しつけ、内部に押込んでしまうために、この部分の材料は切屑とならず、したがって切屑圧縮係数は小さくなるというものである。この押しならし量と刃先丸味半径 r の関係は材料によって異なり、塩化ビニールでは $r \propto r$ 、黄銅では $r \propto (2/3)r$ 程度とされている⁽⁴⁾。アルミニウムに関しては報告されていないが、本報における刃先近傍の写真から判断すれば、後述の Photos. 3~4 などのように分流点はかなり下方にあるので r はかなり小さいものと思われるものの、押しならし作用が切屑生成に与える影響は少ないようである。

この場合の切削抵抗(主分力 F_c)を求めてみれば Fig. 5 のようになり、刃先丸味半径 r が増加すれば主分力は次第に増加するが、 $r=60\sim 120\mu$ の刃先丸味半径ではほぼ同じような大きさの主分力になった。また、それぞれの刃先半径では当然のことながら主分力は切込みの増大とともに直線的に増加している。

Fig. 5 Influence of depth of cut on cutting resistance. (Cutting speed $v=200$ mm/min, tool nose radius $r=0\sim 120\mu$)

V. 顕微鏡写真による検討

切削を急停止して、刃先近傍における被削材の変形状態を顕微鏡観察し、以上の諸現象の原因を考察してみた。

Photo. 3 はその一例で、切削速度 $v=200$ mm/min、切込み $t_1=70\mu$ のとき、刃先丸味半径が $r=0\mu$ および 90μ の場合を示す。刃先付近には大きな変形が起こっており、切削予定面の下までに変形がおよんでいる。切削面にもかなりの変形がみられ、加工変質層の存在が明らかである。とくに、写真(a)ではすくい角 $\alpha=50^\circ$ の Photo. 1 の場合に比べれば、すくい角が $\alpha=30^\circ$ と小さくなれば、切削面近傍

Photo. 3 Material flow near tool edge in orthogonal cutting. (Cutting speed $v=200$ mm/min, depth of cut $t_1=70\mu$)
(a) $r=0\mu$, (b) $r=90\mu$

の変形状況は注目される。また、刃先による被削材の流動がすくい面側と逃げ面側に分岐する分流点は従来の鉄鋼系材料の切削でみられる写真と比べてみればかなり下方にあり、アルミニウムでとくに目立つ現象とみられる。このように、刃先近傍の顕微鏡写真を検討してみれば、切込みが増加するにつれて変形がより深い部分にまで浸透していることがわかった。また、刃先丸味半径は $r=0\sim 60\mu$ までは刃先半径の増加とともに変形は深く浸透しているが、刃先丸味半径が $r=60\mu$ 以上に増大すれば工具先端部に一種の構成刃先が発生していることが認められた。**Photo. 4** はその実例として $r=90\mu$ の場合を示すが、(a) は切削速度 $v=200$ mm/min、切込み $t_1=90\mu$ 、(b) は $v=500$ mm/min、 $t_1=70\mu$ のときである。(a) のように主として刃先丸味による負のすくい角部分に構成刃先が発生しており、この構成刃先は切削の進行に伴い過切削部に相当する部分で成長し、切削条件によって定まるとされるある一定の大きさに達すると、内部で剪断が生じ下部が脱落する。(b) は脱落直後の状況を示し、この構成刃先の下部脱落が切削面の表面あらさを支配していると思われる。このような構成刃先は刃先丸味半径の増加に伴ってその大きさも増大しているが、刃先に付着して切削に関与している曲面状の構成刃先の先端部の曲率半径を求めてみれば、いずれの場合も $60\sim 70\mu$ のほぼ一定の曲率半径となっていることがわかる。したがって、前述のように刃先丸味半径が $r=60\mu$ 以下では刃先半径の増加とともに加工硬化層は厚くなり、切削抵抗

(4) 津枝, 長谷川, 中野: 日本機械学会論文集, 26, 166 (1959), 803.

は増大し、表面あらさも大きくなるが、 $r=60\mu$ 以上の刃先丸味半径になれば半径が増加してもそれらの値に大きな変化が認められなかった理由が明らかになる。そして、切込みが増加すれば、それに伴って構成刃先は下方、すなわち、切削面側に増大するのが認められ、このため部分分裂して切削面に残留する構成刃先下部が多くなり、表面あらさも大きくなる。

次に、刃先丸味のない場合について観察してみれば、切込みが小さい間は良好な仕上面が得られるが、切込みが $t_1=90\mu$ をこえたあたりで Photo. 5 のように刃先から被削

材内部に向って微小亀裂が発生している。写真は刃先丸味半径 $r=0\mu$ 、切削速度 $v=200\text{mm/min}$ 、切込み $t_1=110\mu$ の場合の例である。この微小亀裂は切込みが増加するにつれて増大し、切削面劣化の原因になると思われ、Fig. 3 の $r=0\mu$ の場合に切込みがある程度大きくなったところで表面あらさが大きい値をとることに一致する。また、この微小亀裂の挙動に対する切削速度の影響は実験範囲では認められなかった。

VI. 結 言

工業用純アルミニウム軟質板の低速2次元乾式切削を実施して得られる切削仕上面性状におよぼす切削条件の影響について、主として切込み、切削速度、工具刃先丸味半径などの諸点から検討した。結果を要約すれば、

(1) 刃先丸味半径の大小にかかわらず切込みの増加に伴って加工硬化層の硬さは上昇し、その深さも内部まで浸透する。切削面の表面あらさは刃先丸味半径が比較的大きい場合には、切込みの増加とともに表面あらさも次第に大きい値をとるが、刃先丸味がない場合にはある切込みまでは切込みが増加しても表面あらさにはほとんど大きな差が認められず、ある切込み以上(本報では約 90μ 以上)になれば表面あらさは急激に増大する。

(2) 刃先丸味半径が小さい間は刃先半径の増加とともに切削抵抗は次第に増大し、切削面の表面あらさも大きい値を示すが、刃先丸味半径がある値をこえれば(本報では 60μ 以上)刃先半径の増加にかかわらず切削抵抗はほぼ一定の値を示し、表面あらさもほとんど変化しないようになる。

(3) その原因としては刃先丸味部分における構成刃先の生成付着が考えられる。すなわち、刃先半径がある値(本報では 60μ)以上になれば刃先丸味の負のすくい角に該当する部分に、円弧状に構成刃先の発生が認められるようになり、この構成刃先は刃先丸味半径の増加に伴って増大し、刃先に付着して実際の切削に関与する。この構成刃先を含めて切削作用を営む見掛け上の刃先端部半径は刃先丸味半径の増加にもかかわらずほぼ一定の値(本報では $60\sim 70\mu$)をとるようになるためと思われる。

(4) 一方、刃先丸味半径が増加すれば切屑圧縮係数は次第に減少するが、この場合刃先丸味半径がある値以上になっても切屑圧縮係数には減少飽和は認められず、切削抵抗、表面あらさなどの変化と異なった傾向をとった。

本報の実施に当り、その費用の一部は文部省科学研究費補助金によった。試料の入手には日本軽金属(株)技術サービス課長前川忠男氏、同係長橋本晃次氏に負うところが大きかった。付記して深甚なる謝意を表する。

Photo. 4 Aspects of built-up edge on tool tip.
(Tool nose radius $r=90\mu$)
(a) $t_1=90\mu$, $v=200\text{ mm/min}$
(b) $t_1=70\mu$, $v=500\text{ mm/min}$

Photo. 5 Observation on tool tip zone in the case of tool nose radius $r=0$. (Cutting speed $v=200\text{ mm/min}$, depth of cut $t_1=110\mu$)