研究論文

各種アルミニウム合金の切削過程に及ぼす
構成刃先の影響山田 茂*・水谷 秀行**
能登谷久公*・高柳 晃***Effects of built-up edge on cutting process of
various aluminum alloysShigeru YAMADA*, Hideyuki MIZUTANI**
Hisakimi NOTOYA* and Akira TAKAYANAGI***

The built-up edge in machining of an aluminum alloy is an important problem, and its shape affects the cutting state of the alloy. The aim of this study is to elucidate the main cause of the shape change of the built-up edge. The effect of the shape of the built-up edge on the cutting process was also investigated. The shape of the built-up edge can be roughly classified into two types: the wedge type and nose type. The machining of Al-Mg alloys results in the formation of the wedge type built-up edge which remains on the tool face. The addition of Si or Bi to a work material of an aluminum results in the formation of the nose type built-up edge. The wedge type built-up edge was observed in machining of alloys with high hardness and high work hardenability. While the cutting force, surface roughness and affected-layer depth decrease in the case of the wedge type built-up edge, these values increase in the case of the nose type built-up edge.

Keywords: built-up edge, aluminum alloy, properties of work material, cutting force, surface roughness

(Received October 1, 1992)

1. 緒 言

近年、工作機械や工具材料の発達によって切削速度の高速化が図られ、構成刃先の問題はあまり重要視されない傾向にあるが、小径の穴加工やタップ作業などにおいては低速切削を余儀なくされる場合も多く、その影響は無視できない。アルミニウム合金の切削には、耐摩耗性に優れたダイヤモンド工具が普及しつつあるが工具形状の創成が容易でコスト的にも有利な高速度鋼工具が使用される場合も多い¹⁾。この場合に発生する構成刃先は、切削抵抗や仕上げ面粗さなど切削過程に及ぼす影響も大

きい。また、切削加工の際に発生する構成刃先の功罪についてはこれまでに検討されているが、その形状の差異を決定する要因について詳細に論じたものはあまりみられない。

本報告では、各種アルミニウム合金切削の際に生じる構成刃先の形状について、その支配要因を被削材の化学組成および機械的性質の観点から検討し、併せて切りくず生成、切削抵抗、仕上げ面粗さおよび加工変質層などに及ぼす構成刃先の形状の影響について検討するものである。

* 富山大学工学部機械システム工学科 (富山市)。Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering, Toyama University (Toyama-shi, Toyama).

** 中部大学工学部機械工学科 (春日井市)。Mechanical Engineering, College of Engineering, Chubu University (Kasugai-shi, Aichi).

*** 東海ゴム工業(株) (小牧市)。Tokai Rubber Industries, Ltd. (Komaki-shi, Aichi).

2. 実験用材料、装置および実験方法

本研究では、鋳造材としては金型鋳造した AC5A アルミニウム合金を、また展伸材としては耐食性の優れた 5056 アルミニウム合金と高張力の 7075 アルミニウム合金を使用した。非熱処理型合金として、被削性の向上を図った Al-Mn-Si 系合金と Al-Mn-Mg 系合金²⁾を使用した。非熱処理型合金についてはシリコンやマグネシウム量を変えたり、ビスマスを追加して材料特性の変化を図ったものである。供試材は、化学組成以外に熱処理などによってその性質を変化させた。その状態を Table 1 の実験用材料の化学組成の表中に調質記号を用いて示した。また、それらの機械的性質は Table 2 に示すとおりであり、被削材硬さの増大は引張強さおよび耐力の増大を意味する。一方、伸びは硬さの増大によって減少する傾向にある。

実験は、まず二次元切削により、切削過程における諸現象の変化を詳細に調べることにした。切りくず生成および構成刃先の生成状態については切削急停止装置³⁾を用いて切削点の観察を行った。加工変質層については、マイクロビッカース硬度計によって測定した加工面の深さ方向の硬さ分布より加工硬化層深さ y_H を求めた。切削抵抗は、ひずみゲージ方式の工具動力計により主分力 Q と背分力 P とを測定した。二次元切削の際の実験条件は、切削工具：材種・SKH4A、すくい角 $\gamma=\pi/18$ rad、逃げ角 $\alpha=\pi/30$ rad、切削速度： $V=5, 200$ m/min、

切込み： $t_1=0.05$ mm、切削幅： $b=1.0$ mm、切削油剤：なし（乾式）である。

一方、仕上げ面粗さについては、一般的な切削方法である長手送り旋削実験を行い、工作物軸方向の断面プロファイルを触針式表面形状測定器により測定し、十点平均粗さ R_z を求めて検討した。長手送り旋削実験条件は次のとおりである。切削工具：材種・SKH4A、工具諸元・ $0-\pi/18-\pi/30-\pi/30-\pi/30-0-0$ 、切削速度： $V=5$ m/min、切込み： $a=0.5$ mm、工具送り： $S=0.15$ mm/rev、切削油剤：なし（乾式）。

3. 実験結果およびその検討

3.1 構成刃先形状に及ぼす被削材の化学組成、機械的性質および加工硬化性の影響

各種アルミニウム合金の切削における構成刃先の生成状態を切削急停止装置を用いて調べた結果、7075-T6 合金（試料 C）中には Mg_2Si , $CuAl_2$, $FeAl_3$ などの硬い金属間化合物が含まれるため、切削に際してこれら硬質粒子の引掻き作用によって構成刃先の生成が抑制されると推察され、これを認めなかったが、その他の材料では明瞭な構成刃先の生成が認められた。構成刃先の形状を大別すると鼻形とくさび形とに分けられ、それらの典型的な観察例を Fig. 1 に示す。図中(a), (b)に示すくさび形構成刃先の場合、切りくずと構成刃先との境界が比較的に明瞭ですくい角増大現象が認められる。

一方、同図(c), (d)に示す鼻形構成刃先の場合には切

Table 1 Chemical compositions of specimens (mass%)

Material			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Bi	Al
Symbol	Alloy	Treatment													
A	AC5A	T6	0.06	0.14	4.42	—	1.74	—	0.02	0.01	2.24	—	—	—	bal
B	5056	H112	0.07	0.18	Tr	0.05	4.47	0.05	Tr	0.01	—	—	—	—	bal
C	7075	T6	0.50	0.70	1.60	0.30	2.10	—	5.60	0.20	—	—	—	—	bal
D	D ₁ D ₂	H34 O	0.09	0.33	—	0.94	<0.01	—	0.95	—	—	0.42	0.51	—	bal
E	E ₁ E ₂	H34 O	1.51	0.32	—	0.95	<0.01	—	0.99	—	—	0.46	0.50	—	bal
F		H34	1.55	0.34	—	1.41	<0.01	—	0.10	—	—	0.54	0.50	0.30	bal
G	G ₁ G ₂	H34 O	0.10	0.33	—	1.44	1.05	—	0.11	—	—	0.50	0.52	—	bal
H	H ₁ H ₂	H34 O	0.10	0.32	—	1.46	2.03	—	0.13	—	—	0.42	0.52	—	bal
I	I ₁ I ₂	H34 O	0.10	0.34	—	1.44	0.34	—	0.10	—	—	0.47	0.53	0.28	bal

Table 2 Mechanical properties of specimens

Material			Tensile strength σ_B (MPa)	0.2% Yield strength $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Elongation δ (%)	Vickers hardness HV	
Symbol	Alloy	Treatment					
A	AC5A	T6	359	272	1.0	130.2	
B	5056	H112	224	155	38.0	68.5	
C	7075	T6	570	513	11.0	188.0	
D	D ₁	Free cutting Al-Mn-Si alloy	H34	176	157	23.0	50.3
	D ₂		O	107	39	50.3	43.7
E	E ₁		H34	176	157	19.5	51.4
	E ₂		O	119	49	47.2	45.7
F			H34	185	166	18.1	56.0
G	G ₁		Free cutting Al-Mn-Mg alloy	H34	243	209	15.5
	G ₂	O		175	54	32.2	52.0
H	H ₁	H34		298	245	15.3	79.2
	H ₂	O		230	75	27.5	66.9
I	I ₁	H34		244	208	16.5	59.2
	I ₂	O		133	42	42.5	49.5

Fig. 1 Observation of chip and built-up edge in orthogonal cutting.

りくずと構成刃先の明瞭な境界は認められず、また、刃先としての鋭さはみられない。

構成刃先の形状に及ぼす化学組成の影響については、マグネシウムの添加によってくさび形構成刃先、シリコンあるいはビスマスの添加によって鼻形の構成刃先が生成される傾向がみられた。本来、構成刃先とは、ある速度範囲で金属を切削中に被削材の一部が切削抵抗のために急激な加工硬化を受け、被削母材よりも著しく硬さの

Fig. 2 Influence of work hardness and work hardenability on the shape of built-up edge.

高い変質物となって切削工具すくい面上の先端部に堆積付着したもので、切削状態に大きな変化をもたらすものとされている。したがって、構成刃先の生成状態は材料の加工硬化性とも関係があるものとされている。そこで、母材硬さと加工硬化の関係を検討するため、横軸に被削材の硬さを取り、また縦軸に構成刃先の平均硬さ HV_{BUE} を被削材硬さ HV で割った値 HV_{BUE}/HV をとり、両者の関係と構成刃先の形状の変化を調べた結果は Fig. 2 に示すとおりである。同図より、 HV_{BUE}/HV (以後、加工硬化率で表す) がある値を境に、それより高めればくさび形構成刃先、逆に低ければ鼻形になる傾向がみられる。被削材硬さについても、ある値を境に硬さの高い領域ではくさび形、それが低い領域では鼻形になる傾向がみられる。したがって、構成刃先形状は被削

Fig. 3 Influence of built-up edge on chip form.

材硬さおよび加工硬化性の違いによっても支配され、硬さの値が高く、加工硬化率の高い材料の切削ではくさび形の構成刃先が生成され、これとは逆の場合には鼻形の構成刃先が生成されることが明らかとなった。

3.2 切りくず生成過程に及ぼす構成刃先の影響

まず、切りくず生成過程について検討すると、前出 Fig. 1 にみられるように、構成刃先形状によって切りくず生成状態が大きく異なることが知られる。すなわち、くさび形の構成刃先を生じた場合の切りくずは、厚さが小さく表面形態も比較的なめらかである。他方、鼻形構成刃先が発生すると刃先前方における被削材の滞留が大きく、切りくず厚さが大となり、切りくずとしての被削材からの分離、排出が困難な状況がうかがわれる。また、構成刃先生成時の切りくずの例を Fig. 3 に示すが、図中(a)および(b)はくさび形構成刃先生成時の切りくずであり、(c)および(d)は鼻形の場合の切りくずを示すものである。くさび形構成刃先の場合には明らかにすくい角増大効果による滑らかな流れ形の切りくずを生成している。これに対し、鼻形構成刃先の場合には、くさび形の場合に比べてカール半径が大きくなり、回転中の工作物に接触してカール方向に対して外向きの曲げモーメントを受け⁹⁾、切断しやすくなる傾向がみられた。また、供試試料中の非熱処理型快削アルミニウム合金には鉛、錫、ビスマスが添加されているが、これらはアルミニウムにはほとんど固溶しないため、合金中では単体の粒子となって存在する。そして、鉛、錫、ビスマスは非常に軟らかく、せん断域において薄く延ばされやすく、しかも低融点であるため、合金中にこれらの粒子が存在

Fig. 4 Effects of mechanical properties and built-up edge on cutting ratio.

すると切りくずはその部分で切断しやすくなるものと考えられる。

一方、切削状態を表す指標として、切削比 t_1/t_2 (t_1 : 切込み深さ, t_2 : 切りくず厚さ) とせん断角 ϕ について検討した。Fig. 4(a) は、切削比 t_1/t_2 と被削材硬さ HV との関係を示し、また、切削比と伸び δ との関係を図(b) にそれぞれ示した。図中の白丸、黒丸はそれぞれ切削中に生じている構成刃先の形状を示すもので、白丸が鼻形、黒丸がくさび形である。同図(a) より、記号 C で示される 7075-T6 材は別として、被削材硬さの大なるものは切削比が大きくなる傾向を示し、また白丸で示される鼻形構成刃先のグループに比べて、黒丸で示されるくさび形構成刃先のグループの切削比はおおむね大きくなる。一方、同図(b) より、くさび形、鼻形構成刃先を問わず、切削比に及ぼす被削材の伸びの影響はほとんどみられない。

Fig. 5 は、切りくず生成の際のせん断角 ϕ について調べた結果である。この場合も、せん断角と機械的性質との相関は明確ではないが、構成刃先形状との関係で考察すれば、くさび形構成刃先生成時のせん断角は比較的大きく、鼻形ではそれが小さくなる傾向が認められた。

Fig. 5 Effects of mechanical properties and built-up edge on shear angle.

Fig. 6 Effects of mechanical properties and built-up edge on cutting force.

このように構成刃先が発生すると、これが切削状態を大きく支配するため、材料の諸性質が切削過程に及ぼす影響を調べるためには、構成刃先の影響を除いた条件下で検討することが必要となる。

3.3 切削抵抗に及ぼす構成刃先の影響

Fig. 6 は切削開始より10数秒後の、いわゆる切削抵抗が定常状態のときの切削主分力 Q と被削材の硬さおよび伸びの関係を示すものである。同図(a)に示すように、鼻形構成刃先を生じる被削材ではその硬さに大きい差がみられないにもかかわらず、切削主分力に大きい違いを生じている。一方、同図(b)によれば、鼻形構成刃先を生じるものの場合、伸びの大きいものほど切削主分力が増大する傾向にある。これは刃先半径の大きい鼻形構成刃先では切りくずとの接触長さが長く、被削材伸びの大きいものの方が切りくず流出の際の摩擦抵抗が大きくなり、切りくず生成に際してより大きな力を必要とすることを示している。また同図(a)の黒丸で示した、くさび形構成刃先および構成刃先を伴わない場合（図中半黒丸で示す7075-T6 合金）、ばらつきはあるが被削材硬さの増加に伴って切削主分力は増加の傾向を示している。他方、同図(b)で、くさび形構成刃先が生ずる場合

(7075-T6 合金を含めて)には、伸びの増加につれて切削主分力は低下する傾向がみられる。これは、伸びの大きい材料では硬さおよび引張強さの低下がみられ、こうした材料では切りくず生成の際のせん断抵抗が減少するためと考えられる。以上のように、構成刃先が生成される場合にはその形状が鼻形かくさび形によって切削主分力に対する被削材硬さおよび伸びの影響には異なった傾向が現われることがわかった。

Fig. 7 は切削速度 V を200 m/min と大きくし、構成刃先の発生を抑制した状態での切削主分力に及ぼす被削材の硬さおよび伸びの影響を示すものである。同図(a)によれば、被削材の硬さが大きくなるにつれて切削主分力は直線的に増加している。また同図(b)によれば、多少のばらつきはみられるが、伸びの増加に伴って切削主分力が減少する傾向を示している。このように大きい切削速度において、切削抵抗と被削材の機械的性質との間に相応の相関状態がみられるのは、切削点温度の上昇による構成刃先消滅効果によるものである⁶⁾。なお、切削背分力については、主分力と定性的に同様の傾向であり、結果は省略した。

Fig. 7 Relation between cutting force and mechanical properties of work in a high speed cutting.

3.4 切削仕上げ面粗さおよび加工変質層深さに及ぼす構成刃先の影響

仕上げ面粗さに及ぼす構成刃先形状の影響をみると、鼻形構成刃先の場合、見かけ上の刃先のまるみ半径は大となり、先に述べたように、構成刃先と切りくずの境界が明確でないこととあわせて、仕上げ面は大きい先端半径をもつ構成刃先による押しつけ作用と仕上げ面のむしり作用によってその粗さは大となることが考えられる。

Fig. 8 は仕上げ面粗さ R_z と被削材硬さとの関係を示すものであるが、鼻形構成刃先の場合、粗さは全般に大となっている。一方、くさび形構成刃先の場合、すくい角増大の効果で、切りくず流出が滑らかに行われ、大きいむしりの発生もみられず、粗さは比較的小さくなる傾向がみられた。また、仕上げ面粗さを材料の機械的性質との関係より考察すると、より硬さの高い材料において粗さは小となっているが、この傾向は、被削材硬さが高い領域でくさび形の構成刃先が発生することに対応して起こったものと考えられる。被削材硬さがある値以上では粗さはほとんど変化がみられないことから、硬さが低く、鼻形構成刃先の生成が容易な材料域において粗さが

Fig. 8 Effects of work hardness and built-up edge on surface roughness.

Fig. 9 Effects of work hardness and built-up edge on depth of work hardened layer.

大きく変動することが知られる。また、ここでは図示しなかったが、伸びの増加によって粗さはやや増大する傾向を示すものの、伸びと仕上げ面粗さの相関は硬さと粗さの場合ほど明瞭ではなかった。

切削等の機械加工が行われた仕上げ面直下には、工具の接触と移動に伴う表面層の流動と加工硬化を生じることが知られている⁷⁾。

Fig. 9 は、マイクロビッカース硬さの変化より求めた加工硬化層深さ y_H と被削材硬さとの関係を示すものである。加工硬化層深さと構成刃先形状の関係をみると、加工硬化層の深さはせん断領域において、刃先から弾塑性境界までの長さに関係し、この刃先から弾塑性境界までの長さが工具の刃先半径に比例すること⁸⁾を考慮すると、鼻形構成刃先を生じる場合には硬化層深さは大となる。他方、くさび形構成刃先の場合には刃先半径が小さく、したがって加工硬化層深さも小となることが考えられる。また、アルミニウム合金の切削による加工硬化層深さは、鋼類の切削の場合と同様、塑性流動層深さに比べて1.5~2 倍程度深いところまで及んでいることもわかった。

4. 結 言

各種アルミニウム合金を切削し、構成刃先の形状に及ぼす被削材の化学組成および機械的性質の影響と切削過程に及ぼす構成刃先の影響を実験的に検討した。その結果、

(1) 構成刃先形状は大別して鼻形とくさび形とに分けられるが、その違いに及ぼす化学組成の影響として、マグネシウムの添加によってくさび形、シリコンあるいはビスマスの添加によって鼻形の構成刃先が生成される傾向がみられた。

(2) 構成刃先形状は、被削材の硬さおよび加工硬化性によっても変化し、硬さが高く、加工硬化性の強い材料ではくさび形となり、これとは逆の場合に鼻形の構成刃先が生成される。

(3) 切削中に発生する構成刃先形状の違いは、切削過程に大きく影響し、くさび形構成刃先が発生すると、鼻形の場合に比べて切削抵抗、仕上げ面粗さおよび加工変質層深さ等が減少傾向を示すことが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 栗原健助：軽金属，**36** (1986)，168.
- 2) 岡庭 茂，矢部正浩，川崎啓一郎，水谷秀行：軽金属，**36** (1986)，470.
- 3) 星 光一，星鐵太郎：金属切削技術，工業調査会，(1969)，26.
- 4) 星 光一，金属切削，工業調査会，(1960)，25.
- 5) 中山一雄：精密機械，**38**，(1972)，1070.
- 6) 財満鎮雄，八木博行，服部 聡：日本金属学会誌，**41** (1977)，956.
- 7) 臼井英治：切削・研削加工学上，共立出版，(1978)，208.
- 8) 井川直哉：機械の研究，**24** (1972)，1545.