非熱処理型快削アルミニウム合金の被削性

岡庭 茂*・矢部 正浩*

川崎啓一郎**・水谷 秀行***

Machinability study on the non heat treatable free cutting aluminum alloy

Shigeru OKANIWA*, Masahiro YABE*

Keiichiro KAWASAKI**, and Hideyuki MIZUTANI***

The cutting mechanism of the alloy some non heat treatable free cutting aluminum alloys, has been investigated with a cutting state frozen equipment in order to consider the machinability. The machinability of each alloy has also been examined by the turning tests. Results obtained are as follows Al-Mn-Si alloys and Al-Mn-Mg alloys differ remarkably from each other in the shape of built-up-edge. The tool wear is influenced by compounds and precipitates in the alloy. Good chips disposal is obtained by addition of silicon and bismuth. Magnesium in the alloy has an effect of diminution of the cutting force and the cut surface roughness, especially at low cutting speed. The chips tend to become more segmental with increasing tool feed, while the cutting force and the cut surface roughness decrease with increase in cutting speed.

Keywords: free cutting alloy, machinability, tool wear, Al-Mn-Si alloy, Al-Mn-Mg alloy

(Received November 7, 1985)

1. 緒 言

切削加工において高品位、高効率および作業の自動化などの要求が一層きびしくなる現状の中で、切削機構の解明によつて加工状態の改善や最適化が進む¹⁾一方、材料学的立場²⁾からは切削特性の良好な材料の研究、開発が望まれる。非熱処理型合金の場合には熱処理に関する工程が不要となり、生産性の向上に直接寄与するばかりでなく、熱処理による歪が起らないため、小径の軸部や薄肉部品で高い精度が要求される場合などに極めて有利な材料といえる。しかし、アルミニウム快削合金の代表として知られる2011, 6262などはいずれも熱処理型の合金であり、非熱処理型の快削合金について被削性の観点から検討した報告はほとんど見うけられない。本報では、切削状態を根本的に改善するためには、まず切削現象を明確に認識しなければならないとの立場から、被削性の向上を図つた非熱処理型アルミニウム合金の切削過程を実験的に解析し、材料の切削特性に及ぼす合金組成ならびに切削条件の影響などについて述べる。

2. 供試料および実験方法

2.1 供試試料

切削実験用材料の製造工程を Fig. 1 に示す。また、試料は合金成分により Fig. 2 のように分類し、それぞれの記号を付す。合金中の Mn 量はいずれの場合も 1.2% 程度であり、これら合金の機械的性質は Table 1 に示す通りである。

2.2 切削状態瞬間停止装置による切削過程の 解析実験

被削性に及ぼす諸因子の影響を切削機構の観点から検討するため、切削状態を瞬間的に凍結して、表面生成、切りくず生成、構成刃先の生成状況などを観察した。切削条件は次の通りである。

切削方式：二次元切削

使用工具：工具材種・SKH4A, K10

工具諸元・すくい角 $=\pi/18$ rad, 逃げ角 $=\pi/30$ rad

切削速度： $V=0.33$ m/s

* (株)日軽技研 (静岡県)。Nikkei Techno Research Co., Ltd. (Shizuoka).

** 日本軽金属(株) (東京都)。Nippon Light Metals Co., Ltd. (Tokyo).

*** 中部大学工学部 (春日井市)。College of Engineering, Chubu University (Kasugai).

Fig. 1 Production process of specimen.

Fig. 2 Classification of specimens.

切込み量： $t_1=0.13$ mm

切削油剤：なし

2.3 旋削による被削性の解析実験

被削性の評価基準としては切削抵抗，工具摩耗，仕上げ面あらさ，切りくず処理性などの項目について，それぞれ次のように実験を行った。切削抵抗は工具動力計に

より主分力 T と送り分力 F とを測定し，仕上げ面あらさは触針式表面形状測定機により，あらさの最大高さ R_{max} を測定した。また，工具摩耗の進行過程は切れ刃の逃げ面摩耗幅 V_B の時間的変化を読み取り顕微鏡によって測定した。そして切りくず処理性については，IN-FOS の形状分類³⁾を参考にして評価した。切削条件は次の通りであり，これらを組織的に組合わせて実験を行った。

切削方式：旋盤による長手送り切削

使用工具：工具材種・SKH51, SKH4A, K10

工具諸元・ $0-\pi/18-\pi/30-\pi/30-\pi/30-0-0$,
TNPR 331M スローアウェーチップ

切削速度： $V=0.2\sim4.0$ m/s

工具送り量： $f=0.05\sim0.13$ mm/rev. of W.P.

切込み量= $t_1=1$ mm

切削油剤：なし

3. 実験結果

3.1 切削状態瞬間停止装置による切削過程の検討

各種アルミニウム合金の切削状態を瞬間的に凍結し，切削点近傍の被削材の挙動を観察した結果の一例が Fig. 3 である。いずれの場合も相当大きな構成刃先の生成が認められ，その形態は，Al-Mn-Si 系合金の場合には鼻形，Al-Mn-Mg 系合金ではくさび形の構成刃先が観察された。このような構成刃先形状のちがいは切りく

Table 1 Mechanical properties of specimen

Materials		Homogenizing condition					
		1: 753 K×4 h			2: 833 K×4 h		
		Tensile strength (MPa)	0.2% yield strength (MPa)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	0.2% yield strength (MPa)	Elongation (%)
A	0	158.8	140.1	25.0	104.9	38.2	50.3
	H34	172.5	153.9	23.0	161.7	144.1	21.4
B	0	168.6	147.0	24.2	111.7	43.1	46.8
	H34	172.5	150.9	23.3	161.7	147.0	22.1
C	0	165.6	143.1	22.1	116.6	48.2	47.2
	H34	172.5	153.9	19.5	168.6	142.1	24.2
E	0	172.5	152.9	20.5	128.4	53.9	41.9
	H34	181.3	162.7	18.1	162.7	148.0	20.4
F	0	170.5	145.0	23.0	130.3	41.2	42.5
	H34	239.1	203.8	16.5	187.2	164.6	17.0
G	0	171.5	144.1	23.1	171.5	52.9	32.2
	H34	238.1	204.8	15.5	220.5	188.2	16.7
H	0	257.7	162.7	21.5	225.4	73.5	27.5
	H34	292.0	240.1	15.3	266.6	212.7	15.9

Fig. 3 Observation of chip generation aspects by the cutting state frozen equipment.

ず生成機構に影響を及ぼし、Fig. 3(b)のようにくさび形の構成刃先が生成される場合には、切りくず流出に關与する切れ刃の実すくい角が増大するため、典型的な流れ型の切りくずが生成され、従つて、Al-Mn-Mg系合金の場合には切削抵抗も比較的低くなることが予想される。これに対し、同図(a)のAl-Mn-Si系合金の場合のように鼻形の構成刃先が形成される場合には、切りくずの流出は困難となり、せん断角 ϕ_1 が減少し、切りくず厚さが増大する。また、Al-Mn-Si系合金の切りくず裏面には構成刃先の脱落片が多く観察され、これが仕上げ面に残る場合には表面あらさの増大の一要因となることが考えられる。また、Al-Mn-Si系、特にBiを添加したE合金(図中(a))の切りくずには、せん断作用によると思われる明瞭な破断面が観察され、切りくずは分断形となりやすい。

前述のような構成刃先および切りくず生成状況についてはH34材の場合にも同様の傾向が認められた。Al-Mn-Si系およびAl-Mn-Mg系合金の切りくず生成におけるせん断角 ϕ_1 を求めると、前者の場合の ϕ_1 は比較的小さく、 $\phi_1 = 16 \cdot \pi / 180 \sim 17 \cdot \pi / 180 \text{ rad}$ となり、また構成刃先の先端半径は設定切込み量 t_1 に比べて相当大きいことがわかる。これに対し、後者の場合は、 $\phi_1 = 23 \cdot \pi / 180 \text{ rad} \sim 24 \cdot \pi / 180 \text{ rad}$ 程度であり、合金成分によつて ϕ_1 に顕著な差異が認められ、これによつて切りくず生成機構が変化するものと考えられる。以上の結果は高速鋼工具による切削の場合であるが、超硬合金K10工具による実験でもほぼ同様の結果が得られ、ここでは工具材種のちがいによる構成刃先生成に及ぼす影響は特に認められなかった。

3.2 切削抵抗、工具摩耗の検討

各種合金切削における切削抵抗をFig. 4に示す。図中(a)のAl-Mn-Si系合金の場合には主分力 T 、送り分力 F ともに切削速度の上昇に伴つて減少し、その傾向は $V=2 \text{ m/s}$ あたりまでが顕著であり、それ以上の切削速度に対しては減少傾向はゆるやかとなる。Al-Mn-Si系合金の中ではBiを添加したE合金がいずれの条件においても切削抵抗は概して低い値を示す。Al-Mn-Mg系合金の場合には、Fig. 4(b)にみられるように高速切削での切削抵抗はAl-Mn-Si系とほぼ同程度であるが、低速切削域での T 、 F がともに比較的小さいためにAl-Mn-Si系合金の場合のような顕著な速度依存性は認められない。低速切削域においてAl-Mn-Si系とAl-Mn-Mg系合金とで切削抵抗が大きく異なるのは、Fig. 3にみられたように構成刃先形状のちがいによるものと思われる。すなわち、鼻形の構成刃先が形成されるAl-Mn-Si系合金では切りくず断面積が大きく、切削抵抗も大きい、くさび形の構成刃先を生ずるAl-Mn-Mg系合金の場合は、流れ形の切りくずが生成され、切削抵抗は比較的低い値を示すものと考えられる。また、 $V=2 \text{ m/s}$ 以上において、各種合金間に切削抵抗の差があまり認められなくなるのは、高速切削における切削温度の上昇によつて構成刃先が消滅して切削状態が良好、かつ安定したことによるものと推察される。

工具摩耗を支配する合金元素としては、従来、Fe、Siなどの影響が指摘されているが⁴⁾、ここではSi量の異なる3種類の合金について工具摩耗の進行過程を調べ、その結果をFig. 5に示す。図は切れ刃逃げ面摩耗幅 V_B の時間的変化を示したものであるが、1.5%SiのC合金が

Fig. 4 Relation between cutting force and cutting speed.

Fig. 5 Relation between tool wear and cutting time.

とくに工具摩耗が激しく、ついでA合金、B合金の順に少なくなっている。この結果をFig. 6に示す合金中の晶出物との関係で考察すれば、工具摩耗の最も大きいC合金の場合にはSiが単体で検出され、これが合金中で硬質粒子を形成し、工具の引つかきの摩耗を助長しているものと考えられる。また、A合金がB合金と比較して、 V_B がやや大きく認められるのは、A合金中にはAl-Mn化合物が検出されており、これはSiやその化合物に比べれば、引つき硬さの値は低い、これも合金中の硬質物質と考えられ³⁾、工具摩耗増大の要因となっているものと思われる。

3.3 仕上げ面あらさ、切りくず処理性の検討

切削仕上げ面の R_{max} をFig. 7に示す。図中(a)がAl-Mn-Si系、(b)がAl-Mn-Mg系合金の場合である。い

*: X-ray intensity (Arbitrary unit)

Materials	Al-Mn	α -Al(FeMn)Si	Pb	β -Sn	Si	BiPb ₃	Mg ₂ Pb
A	**	**	****				
B		****	*****	***			
C		****	*****	***	*****		
E		*****		***	***	*****	
G	**	*	**				****

Fig. 6 Characteristic X-ray intensity of compounds in the specimen.

ずれの条件においてもAl-Mn-Mg系合金の R_{max} はAl-Mn-Si系のそれに比べて明らかに小さいことがわかる。とくに低速切削域において両合金系の R_{max} の差が顕著であるのは3.1で述べたように構成刃先の生成挙動のちがいによるところが大きいものと思われる。すなわち、Al-Mn-Si系合金は構成刃先の生成・脱落が盛んであり、この脱落片の仕上げ面への再付着によつて、仕上げ面あらさが劣化するものと考えられる。これに対し、Al-Mn-Mg系合金では、くさび形の構成刃先が比較的安定して形成され、切りくずの流出が容易となり、その結果、良好な仕上げ面が得られるものと考えられる。このように合金成分は仕上げ面性状を支配する要因として重要であり、とくにアルミニウム合金中のMgは仕上げ面あらさの向上に対し、効果が認められた。

Fig. 7(a)で仕上げ面あらさに及ぼすSi量および調質

(a) Al-Mn-Si alloys

(b) Al-Mn-Mg alloys

Fig. 7 Roughness of cut surface.

条件の影響を調べると、低速切削域において Si 量の最も少ない A 合金と H34 材の場合に R_{max} がやや小さい傾向がみられるが、それらの影響はあまり顕著ではない。また、Fig. 7(b) の Al-Mn-Mg 系合金について均質化処理温度の影響を調べた結果、通常行われる 753K および 833K では R_{max} 値に特定の影響は認められなかった。次に、 R_{max} に及ぼす切削条件の影響として、まず、切削速度の影響は Al-Mn-Si 系合金の場合には切削速度の上昇に伴う R_{max} の減少傾向が顕著であるが、Al-Mn-Mg 系合金の場合には、低速切削域における R_{max} が比較的小さいため、Al-Mn-Si 系合金の場合に比べてその速度依存性は弱い。また、工具送り量の増加は、いずれの合金に対しても仕上げ面あらさを幾分増大させる傾向がみられた。

Fig. 8 に各種合金の切りくず写真を示し、これらの切りくず処理性を INFOS の切りくず形状分類³⁾に従って評価した結果を Fig. 9 に示す。それによれば、均質化処理温度、調質条件、切削速度などのちがいによる影響はあまり認められないが、Al-Mn-Si 系と Al-Mn-Mg 系合金とのちがいは顕著である。すなわち、前者の切りくずは分断形となり、切りくず処理性は良好であるが、

後者の場合にはリボン状あるいはコイル状の連続形切りくずが生成され、処理困難なものとなる。Fig. 10 は Al-Mn-Mg 系合金について切りくず処理性に及ぼす工具形状および工具送り量の影響を調べたものである。図のように合金によっては工具形状を変えても切りくず形状の変化にあまり影響のみられない場合もあるが、全般的にはチップブレーカを有するスローアウェーチップを用いた場合の方が切りくずは分断形になりやすく、切りくず処理性に対するチップブレーカの効果が認められる。また、工具送り量の増加によつて切りくず処理性はやや改善される傾向にある。

4. 結 言

被削性の向上を図つた非熱処理型アルミニウム合金の切削過程と材料の被削性改善のための指針について得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) Al-Mn-Si 系と Al-Mn-Mg 系合金とでは構成刃先形状が著しく異なるため、切削機構に変化が生じ、切削抵抗や仕上げ面あらさなどに顕著な差異が現れる。しかし、切削速度の上昇による構成刃先の消滅とともに、両者の差があまり認められなくなる。

K10 throw away tool , Tool feed $f=0.08\text{mm/rev}$ of W.P.								
Materials	Cutting speed		Materials	Cutting speed		Materials	Cutting speed	
	0.5m/s	4.0m/s		0.5m/s	4.0m/s		0.5m/s	4.0m/s
A1-0			A1-H34			A2-H34		
B1-0			B1-H34			B2-H34		
C1-0			C1-H34			C2-H34		
E1-0			E1-H34			E2-H34		
F1-0			F1-H34			F2-H34		
G1-0			G1-H34			G2-H34		
H1-0			H1-H34			H2-H34		

Fig. 8 Comparison of chip form.

K10 throw away tool , Tool feed $f=0.08\text{mm/rev}$ of W.P.								
Materials	Cutting speed		Materials	Cutting speed		Materials	Cutting speed	
	0.5m/s	4.0m/s		0.5m/s	4.0m/s		0.5m/s	4.0m/s
A1-0	○	○	A1-H34	○	○	A2-H34	●	○
B1-0	○	○	B1-H34	○	○	B2-H34	○	○
C1-0	○	○	C1-H34	○	○	C2-H34	○	○
E1-0	○	○	E1-H34	○	○	E2-H34	○	○
F1-0	○	●	F1-H34	●	●	F2-H34	●	●
G1-0	●	●	G1-H34	●	●	G2-H34	●	●
H1-0	●	●	H1-H34	●	●	H2-H34	●	●

○:Good, ●:Suitable, ●:Inferior

Fig. 9 Comparison of chips disposal.

(2) 合金中に Si, Bi など添加すると切りくずは分断形となり, 切りくず処理性は改善されるが, 仕上げ面あらさは増大し, この傾向は構成刃先が生成されるような条件下で特に顕著である。また, Bi は切削抵抗の低減

に効果が認められ, Si はこれを1.5%と比較的多く添加すると工具摩耗が激しくなる。

(3) Mg は仕上げ面あらさを小さくするのに効果があるが, 切りくずは流れ形の連続したものとなるため,

K10 tool , Cutting speed $V=2.0$ m/s							
Materials	Tool feed (mm/ rev of W.P.)	Tool shape		Materials	Tool feed (mm/ rev of W.P.)	Tool shape	
		Shaped tool ($\theta=\pi/18$)	Throw away chip			Shaped tool ($\theta=\pi/18$)	Throw away chip
F 2 - O	0.05			F 2 • H 3 4	0.05		
	0.08				0.08		
	0.13				0.13		
G 2 - O	0.05			G 2 • H 3 4	0.05		
	0.08				0.08		
	0.13				0.13		
H 2 - O	0.05			H 2 • H 3 4	0.05		
	0.08				0.08		
	0.13				0.13		

Fig. 10 Influence of tool shape on the chip form.

Mg 添加合金の切削では工具切れ刃にチップブレイカを設けるなど、切りくず処理性改善のための施策が必要となる。

(4) 工具送り量の増大によつて切りくずは分断形となる傾向にあり、切削速度の上昇は仕上げ面あらさを小さくし、切削抵抗を低減するのに効果がある。

終わりに、実験に際して協力を得た当時中部大学工学部学生、樋口浩司、藤井和幸両氏に対し深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、竹山秀彦：精密機械，47，10（1981），1284.
- 2) 荒木透，山本重男：精密機械，42，2（1976），68.
- 3) 中山一雄：精密機械，42，2（1976），74.
- 4) たとえば，財満鎮雄，高辻雄三，水谷秀行，鈴木雅弘：軽金属学会第65回秋期大会講演概要集（1983），151.
- 5) 財満鎮雄，高辻雄三，水谷秀行，鈴木雅弘：軽金属 34，3（1984），190.