Al-Cu 系合金の切屑特性におよぼす切削条件の影響

浅 野 和 彦* 藤 原 明*

Kazuhiko Asano and Akira Fujiwara : Influences of the Cutting Conditions on the Chip Formation of Al-Cu Alloy Machining. The effects of the tool dimensions, specimen diameter and the depth of cut on the chip formation characteristics of 2011 (T3) aluminum alloy have been investigated. It has been shown that the chip-treatability can be successfully interpreted in terms of the number of chips, N , produced when a constant amount of materials (100 g in the present work) is cut. At a high cutting speed, N decreases steeply and then increases again with increasing feed. It has been observed that continuous type chips are produced in the specific range of feed, termed the critical feed, at a certain higher cutting speed. Thus plotting N as a function of feed, there appears a discontinuity.

It has been shown that N increases with increasing back rake angle and more markedly with decreasing side rake angle, showing a strong dependence of the free-machining property on the tool dimensions. The effects of the back rake angle and the side rake angle on the machinability are particularly strong when the feed is near the critical value. The specimen diameter and the depth of cut have been shown to have little effect on the free-machining characteristics.

(Received November 27, 1971)

I. 緒 言

アルミニウム合金展伸材の切削においては切屑処理性が重要な問題ではあるが、その評価法については定説がまだない。財満ら⁽¹⁾は切屑の形状を連続流れ型、つまき型および分断型に分類し、これを切削条件の関数として円形グラフによる表示法を用いて、切屑特性を評価している。この他、切屑状態を肉眼観察することによってその特性を調べる方法も試みられている^{(2)~(4)}。しかしながら、Al-Cu

系合金を例にとれば、切屑の形状や大きさ(長さまたは巻き数)は単純なとりあつかいが必ずしも容易ではない。著者ら⁽⁵⁾は、100 g の切屑中に含まれる切屑の個数を媒介として、切屑処理性を評価することを試み、これが、切屑処理性を評価するための簡便法として適用できる可能性があることを示した。Fig. 1 は、2011 (T8) 合金を上すくい角が 0° 、横すくい角が 10° の高速度鋼製バイトで旋削した場合に生成される切屑の個数 (100 g あたり)、 N 、を送り、 f 、に対してプロットしたもの(以下、 N - f 曲線とよぶ)であるが、切削速度および送りによって、生成される切屑の個数

* 株式会社神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel Ltd., Kobe)

(1) 財満, 加茂, 荒尾: 軽金属, **13** (1963), 400.
(2) 財満, 広野: 金属学会誌, **32** (1968), 714.

(3) 財満, 武曾, 山本: 軽金属, **19** (1969), 559.

(4) 財満, 高辻, 飯尾: 軽金属, **20** (1970), 556.

(5) 浅野, 藤原: 軽金属, **21** (1971), 579.

Fig.1 Number of chips per 100g versus feed curves (N - f curves) of 2011 (T8) alloy. Note that there exist discontinuity in some range of feed at a higher cutting speed. Closed circles indicate the formation of stringy chips ($N < 10^3$)

は著しく変化することがわかる。横すくい角が小さい場合には、 N - f 曲線上に、Fig.1 のような谷は現われず、逆に横すくい角が大きい場合にはこの谷の幅は広くなることが明らかにされている⁽⁵⁾。

以上のごとく、生成される切屑の個数は切削条件に強く依存し、したがって、切屑処理性もまた切削条件によって著しく変化することになる。切屑の肉眼観察によって処理性を評価する方法では、切削条件依存性を考慮しないときには、ある程度の危険性は避け難い。著者ら⁽⁵⁾は、Fig.1 に示したような、 N - f 曲線上の谷に対応した送りを臨界送り値と名づけ、切削速度-送り図に、工具の横すくい角をパラメータとして(上すくい角は 0° 一定とした)表示することによって、切屑処理性からみた被削性を判定する方法を提案した。また、Isler ら⁽⁶⁾は、切屑の巻き数を、上と同様、切削速度-送り図として表示する方法を採用している⁽⁶⁾。しかし、いずれの場合においても、切屑のカールの仕方および被削材から排出された切屑が破断するまでの過程は切削条件に対して強い依存性を示すことを考慮すれば切屑特性におよぼす切削条件の影響をさらに詳しく検討しておくことが必要であると考えられる。

切屑特性に影響をもつ切削条件上の因子としては、次のものが挙げられるであろう。

- (1) 工具形状：上すくい角、横すくい角、刃先半径など
- (2) 切削条件：切削速度、送り、切込みなど
- (3) 被削材の性質：材種、調質、試料寸法など

著者ら⁽⁵⁾によれば、工具形状の中では横すくい角の影響が大きい。また、Fig.1 に示したように、送りは切屑特性に

最も顕著な影響を有する因子の一つである。切屑特性と切削速度の関係は、2011 合金に関する限り、高速と低速の場合を検討すれば、中間の速度では、両者の中間の挙動を示し、 N - f 曲線の形状も低速から高速にかけて比較的連続的に変化することが確かめられた⁽⁵⁾。被削材の性質もまた切屑特性を左右する。藤原と浅野⁽⁷⁾によれば、2011 合金においては、T8 材では Fig.1 のように、 N - f 曲線に谷を生じるが、T6 材では横すくい角が 30° であっても、この谷はほとんど認められない。その他の影響については今のところ、よくわかっていない。

以上の点にかんがみ、本研究では、2011 合金の切屑処理性を、被削材の 100 g あたりに生成される切屑の個数を媒介として評価する方法の適用性を検討する目的で、横すくい角、上すくい角、切込みおよび試料寸法の諸因子を取りあげ、それらと生成される切屑の個数との関係を調べた。

II. 実験方法

本研究で用いた被削材は 2011 合金の T3 であり、その化学組成を Table 1 に示す。試料径はとくに断わらない限り、50 mm ϕ のものを用いたが、試料径の影響を調べるために、20~40 mm ϕ のものも用いた。

切削試験は昌運-カズヌーフ製旋盤(無段変速)にて行な

Table 1 Chemical composition of specimen

Element	Cu	Pb	Bi	Mg	Si	Fe
wt%	5.42	0.58	0.48	0.02	0.13	0.27

Table 2 Tool dimensions used

Back rake angle	α°
Side rake angle	β°
End relief angle	7°
Side relief angle	7°
End cutting edge angle	0°
Side cutting edge angle	7°
Nose radius	0 mm

Table 3 Combination of side and back rake angles

$\alpha^\circ \backslash \beta^\circ$	-5	0	5	10	30
0	○	○	○	○	○
10	—	○	—	○	○
20	—	○	—	○	○

Table 4 Cutting conditions used

Cutting speed (m/min)	25, 50, 100, 200
Feed (mm/rev)	0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24
Depth of cut (mm)	0.1, 0.5, 1, 2, 3

(6) P. Isler, G. Barbezat and W. Form: Metals and Materials, 5(1971), 265.

(7) 藤原, 浅野: 軽金属, 22(1972), 340.

Photo.1 Figure of chips at various levels of N

った。工具は研摩仕上げした高速度鋼 (SKH-4) 製バイトの 13 mm □ または 19 mm □ を用いた。工具の諸元を **Table 2** に、また、上すくい角, α , と横すくい角, β , との組合せを **Table 3** に示す。切削条件は **Table 4** に示すとおりである。とくに断わらない限り、切込みは 2 mm である。切削油は用いず、乾式切削とした。すべての切削条件につき切屑を採取し、100 g あたりの切屑の個数, N , を求めた。 N の値は、あらかじめ作製しておいた標準サンプル⁽⁵⁾ (**Photo.1**) との比較によって決定した。

III. 実験結果と考察

1. 横すくい角の影響

前すくい角 $\alpha = 0^\circ$ の場合について、 N - f 曲線に対する横すくい角の影響を調べた。その結果を **Fig.2(a)** および **(b)** に、それぞれ切削速度が $V = 200$ m/min および 25 m/min の場合について示す。高速切削 (**Fig.2(a)**) における N - f 曲線の一般的特長は、すでに示したように、特定の送りところで鋭い谷を生じることである。**Fig.2(a)** からわかるように、この谷は横すくい角 β が大きいほど幅も広く深さも深い。 $\beta = -5^\circ$ の場合には谷は認められない。一方、低速切削 (**Fig.2(b)**) においては N - f 曲線には谷は現れないが、低送りおよび高送りでは N の値が小さく、中間領域で最大値をとる。低送り側で切屑数が減少するのは構成刃先が生成されやすくなることが一因であると考えられる⁽⁵⁾。しかし、詳しい理由についてはまだわかってはいない。

Fig.3(a), **(b)** および **(c)** は上すくい角が $\alpha = 20^\circ$ の場合について、 N - f 曲線におよぼす横すくい角 (0° , 10° および 30°) の影響を示す。 N - f 曲線の形状は、 $\alpha = 0^\circ$ に比較して谷が浅く、滑らかになっていることがわかる。 $\beta = 30^\circ$ の場

Fig.2 N - f curves of 2011 (T3) alloy as a function of the side rake angle β with α being 0°
(a) $V = 200$ m/min, (b) $V = 25$ m/min

合には、切屑はパイプ状となって流出しそれが切刃の根元に衝突する例が多く認められた。これは **Fig.3(c)** において

Fig.3 N - f curves of 2011 (T3) alloy as a function of cutting speed(a) $\alpha=20^\circ, \beta=0^\circ$, (b) $\alpha=20^\circ, \beta=10^\circ$, (c) $\alpha=20^\circ, \beta=30^\circ$

半分塗りつぶした記号で示してある(この図において、縦軸のスケールが(a)および(b)図よりも低いオーダーになっていることに注意)。そのため上すくい角が大きき場合には、 N - f 曲線の正確な形状は決定できなかった。低速側での形状は $\beta=0^\circ$ の場合とほとんど同じになる。

切屑数の絶対値も横すくい角によって変化する。Fig.4 (a)および(b)は上すくい角 $\alpha=0^\circ$ の場合の切屑数と横すくい角の関係を、いくつかの送りの値について比較したものである。高速切削(Fig.4(a))の場合、低送りでは切屑数は横すくい角が増加するとともにはじめ減少するが、 $\beta \geq 5^\circ$ ではほとんど一定となる。 N - f 曲線に谷を生じる付近の送り($f=0.08$ mm/rev)では、横すくい角とともに切屑数は急激に減少し、 $\beta > 15^\circ \sim 20^\circ$ では半連続または連続切屑が生成されて、 $N \ll 10^3$ となる。高送りの場合には、再び切屑数の横すくい角依存性はやや小さくなるが、横すくい角が 30° に近いと連続切屑が生成される。一方、低速切削(Fig.4(b))の場合には、切屑数の横すくい角依存性は著しく大きい。とくに送りが小さい範囲でその傾向が顕著である。高送りの場合には高速切削と同様な傾向である。いずれにせよ、2011 合金の切削においては、横すくい角が小さいほど処理性の良い切屑が生成されることがわかる。ただし、 β が負で、その絶対値が大きくなるほど、むしれを生じるので実際に適切な β の大きさを決定するにあたっては、表面仕上りを考慮することが必要である。

Fig.5(a)および(b)は、同様にして、 $\alpha=20^\circ$ の場合の切屑数と横すくい角の関係を示すが、その傾向は $\alpha=0^\circ$ の場合とほとんど変わらない。高速切削(Fig.5(a))においては、低送り($f=0.04$ mm/min)のとき、上すくい角が大きいと処理性の良くない切屑が生成される傾向を示すが、送りの大きいときには、上すくい角の大きいほど、処理性の良好な切屑が生成されることがわかる。低速切削(Fig.5(b))でもこの傾向は同様である。したがって、上すくい角の増加は、2011 合金の、切屑処理性からみた被削性を向上せしめる効果があるものと判断される。

Fig.4 Side rake angle dependence of N with α being 0° (a) $V=200$ m/min, (b) $V=25$ m/min

2. 上すくい角の影響

前節で述べたように、上すくい角は切屑特性に対してプラスの寄与をなすことが予想されたので、この影響をさらに定量的に検討した。Fig.6(a)および(b)は横すくい角 $\beta=10^\circ$ の場合の N - f 曲線におよぼす上すくい角の影響をまとめたものである。高速切削(Fig.6(a))においては上すくい角が大きくなるほど、 N - f 曲線が全体として N の大

Fig. 5 Side rake angle dependence of N with α being 20°
(a) $V=200$ m/min, (b) $V=25$ m/min

Fig. 6 N - f curves of 2011 (T3) alloy as a function of the back rake angle α with β being 10° . (a) $V=200$ m/min, (b) $V=25$ m/min

きい側に移動し、谷の底が浅くなってくることがわかる。低速切削 (Fig. 6 (b)) の場合も傾向は同様であった。しかしこの場合には、上すくい角の影響は高速切削の場合に比べて大きくはない。とくに低速送り側では上すくい角の影響はほとんどないものと考えられる。

Fig. 7 (a) および (b) は切屑数におよぼす上すくい角の影響を、 $\beta=10^\circ$ の場合について示す。高速切削、低速切削とも上すくい角が大きいほど切屑数が増えることがわかる。とくに、高速切削において、 N - f 曲線に谷を生じる付近の送り ($f=0.08$ mm/rev) の場合には、上すくい角の影響が著しい。すなわち、 $\alpha=0^\circ$ に対しては、処理性からみて望ましくない切屑が生成されるが、 $\alpha=10^\circ$ に対しては

この原因については本研究においては明らかにできなかったが、Fig. 4 (または 5) の結果は、 N に対しては切屑の厚さよりもむしろ、切屑 1 個の長さ (切屑の巻き数) が大きな影響をもつことを暗示しており、したがって、切屑のカール機構およびカールした切屑と被削材または工具の切刃面との衝突の仕方との関連において論じられるべきものと考えられる。これについてはさらに今後の検討にまたねばならない。上すくい角の大小はさらに、切屑の流出方向も変えることになるから、被削材から排出された切屑が分断される機構にも影響すると思われる。なお、上すくい角および横すくい角は切削温度を変化させるから、カールの仕方または添加元素としての Bi-Pb 溶融等を通じて、切屑の分

Fig. 7 Back rake angle dependence of N with β being 10° .
(a) $V=200$ m/min, (b) $V=25$ m/min

Fig. 8 Back rake angle dependence of N with β being $0^\circ, 10^\circ$ and 30°
($V=200$ m/min, $f=0.08$ mm/rev)

処理性の良い切屑が生成される。高速送りおよび低速送り側では切屑数の上すくい角依存性はあまり大きくはない。低速切削でも傾向は同様であり、上すくい角が大きいほど生成される切屑数も多くなる。このような傾向は他の切削条件についても認められたので、その一例を、 $V=200$ m/min, $f=0.08$ mm/rev の場合について Fig. 8 に示す。上すくい角の効果は横すくい角の大きさによって異なり、横すくい角が小さい場合には、切屑数は上すくい角によってほとんど変わらないことがわかる。 $\beta=30^\circ$ であれば、上すくい角の大小によらず、連続切屑が生成され、 $N \ll 10^3$ となるが、 $\beta=10^\circ$ の結果から判断すると、上すくい角の効果は、横すくい角が大きいほど顕著になるものと予想される。

Fig. 4 (または 5) と Fig. 7 (または 8) を比較してみれば、 N に対する上すくい角と横すくい角の影響は逆センスであることがわかる。切削機構的に考えれば、横すくい角が大きいほどせん断角が増加し、したがって切屑の厚さも減少するので、横すくい角の増加は N の増大をもたらすものと予想される。これは実験結果と反対である。

断に関与してくると考えられるが、その詳細についてはさらに検討を要する。

3. 切込みおよび試料径の影響

これまでの結果はすべて、50 mm ϕ の試料を用いて、切込み 2 mm の場合について得られたものである。生成される切屑数によって切屑特性を考察する場合には、さらに試料径および切込みがそれにおよぼす影響をあらかじめ知っておく必要がある。

切込み t の影響については、さきに簡単に報告したように⁽⁵⁾、単に切屑数をもって判定することはできない。切込み、したがって切屑の幅、によらずに分断されるまでの切屑 1 個の長さ(または巻き数)が同一であるならば、他の条件が一定とすれば、 $N \cdot t$ は一定となるはずである。しかし、実さいには、切屑長さは切込みによって異なり、 $N \cdot t$ は一定とならないので⁽⁵⁾、 $N \cdot t$ の大小をもって切屑処理性を比較することはできない。目下のところ、切屑数を切削条件の関数として定式化することは理論的にも実験的にもできていないので、本研究では、さきに切屑特性の判定基準としてとりあげた臨界送りと切込みとの関係を調べた。切削条件はこれまで明らかにした結果に基づいて、切屑特性が最も悪いと考えられる $\alpha=0^\circ$, $\beta=30^\circ$ の工具を用い、高速切削 ($V=100$ または 200 m/min) とした。

Fig. 9 は $t=0.1 \sim 3$ mm とした場合の臨界送りと切込みとの関係を示す。臨界送りは切込みが 2 mm まではほとんど変化しないが、3 mm 程度では臨界送りは若干大きい側にずれる傾向にある。しかし、 $t=0.1$ と 3 mm とにおける臨界送りの差は 0.03 mm/rev 程度であって、臨界送りによって切屑特性を評価する限りは切込みは大きな影響はないものと考えられる。さらに上すくい角が大きく、横すくい角がもっと小さい場合には臨界送りの切込み依存性は小さいので、切屑特性の評価に対して切込みは本質的な影響は与えないと判断される。

一方、切屑数は他の条件が同一であれば試料径によって

Fig. 9 Relation between the critical feed and depth of cut with α and β being 0° and 30° , respectively

ほとんど変化しなかったため、この場合にも臨界送りによってその影響を検討した。その結果を Fig. 10 に示す。臨界送りは試料径が 40 mm まではほぼ一定であるが、それをこえるとやや大きい側に移行する。その差はあまり大きくはないが、試料径が極端に大きい場合には別に検討を要するものと思われる。

Fig. 10 Relation between the critical feed and the specimen diameter with α and β being 0° and 30° , respectively

以上の結果から、50 mm ϕ 以下の試料で、3 mm 以下の切込みを用いれば切屑特性をかなり一般的に評価できるものと考えられるが、切込みおよび試料径が大きくなるにつれて、臨界送りが高い側にずれる傾向にあることは注意を要する点であろう。

IV. 結 言

切削重量 100 g あたり生成される切屑の個数によって、2011 (T3) 合金の切屑特性におよぼす切削条件の影響を調べた。得られた結果を要約すれば次の通りである。

(1) 他の条件が一定であれば、本実験で用いた切削条件の範囲内で、切屑数は上すくい角が大きいほど多い。この傾向は臨界送り(連続切屑が生成される送り)付近でとくに著しい。

(2) 他の条件が一定であれば、切屑数は横すくい角が大きいほど少ない。この傾向は臨界送り付近でとくに著しい。

(3) 試料径は同一条件では切屑数には大きな影響を与えないが、径が 40 mm をこえると臨界送りは若干大きい側にずれる。

(4) 切込みは同一条件下では切屑特性に大きな影響を与えないが、切込みが大きくなると臨界送りも若干大きくなる。

(5) 一定切削重量あたり生成される切屑の個数を媒介として、切屑処理性からみた被削性を判定する方法は簡便法として有効であり、とくにその切削条件依存性を検討するのに適していると判断される。

おわりに本研究を行なうにあたり、当研究所の阪口 新氏に助力をいただいたので記して感謝の意を表します。