

(論文)

# 鉛フリー高被削性押出合金KEの切りくず折断機構

## Mechanism of Chip-breaking of Developed Lead-free Machinable Al Alloy Extrusion KE



吉原伸二\*(工博)

Dr. Shinji YOSHIHARA

To clarify the mechanism of chip-breaking of lead-free machinable KE alloy extrusion, the effect of Si particles on chipping characteristics of AA6061 based aluminum alloys under two-dimensional cutting operation has been investigated. Si particles in the alloy reduced the coefficient of friction between chip and rake surface of tools. It was concluded that the increase in the bending pre-strain resulted from a reduction of the curl radius of chips leading to an easy fracture of chips.

まえがき = 従来の切削用アルミニウム合金(以下, Al 合金という)は, 被削性すなわち切りくずの折断性を高めるために鉛(Pb)およびビスマス(Bi)などの低融点金属を微量添加した合金が開発されており, 自動車部品や一般機械部品市場で多くの実績がある。近年, 地球環境保全要求の高まりを受け, 有害成分と考えられるPbの使用を規制する動きがあり, 代替材の開発が望まれている<sup>1)</sup>。著者らは代替材の開発を目的として, AA6061合金(以下, 6061合金という)をベース材に, Pbおよびその他の低融点金属元素以外の各種添加元素が切りくず折断性に及ぼす影響を調査し, Si添加が最も効果的であることを報告した<sup>1),2)</sup>。添加されるSi量はミクロ組織中に共晶Si粒子が分散し, 切りくず折断性に効果を発揮する2mass%(以下, %と略記する)から最高6%の範囲で検討を加え, 新合金の開発を行った。

本稿では, 開発したPbフリー切削用Al合金押出材KE(Kobe Ecology)の切りくず折断機構について検討・考察した結果を報告する。

### 1. 供試材および試験方法

6061合金をベース材としてSiを2, 4および6%添加した押出材を作製した。表1<sup>3)</sup>にその化学成分を示す。

155mmにDC鋳造後, 510℃で4hの均質化処理を行ってピレットを得た。続いてピレットを500℃の温度で押出比10の50mmの丸棒に熱間押し, 直後に水冷し溶

表1<sup>3)</sup> 供試材の化学成分(質量%)

Table 1<sup>3)</sup> Chemical compositions of alloys (mass%)

| Alloy | Si   | Fe   | Cu   | Mn    | Mg   | Cr   | Zn    | Ti   | Al   |
|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| 6061  | 0.69 | 0.19 | 0.23 | <0.01 | 0.89 | 0.05 | <0.01 | 0.02 | Bal. |
| 2Si   | 2.13 | 0.18 | 0.25 | <0.01 | 0.88 | 0.05 | <0.01 | 0.02 | Bal. |
| 4Si   | 4.20 | 0.19 | 0.25 | <0.01 | 0.89 | 0.05 | <0.01 | 0.02 | Bal. |
| 6Si   | 5.96 | 0.21 | 0.27 | <0.01 | 0.90 | 0.05 | <0.01 | 0.02 | Bal. |

体化処理を行った。その後170℃で6hの時効処理を行い供試材とした。

引張試験は, 荷重軸が押出方向と平行になるように, JIS 4号試験片を採取し, 初期ひずみ速度  $1.7 \times 10^{-3}/s$ , 室温で実施した。

本研究での切削試験は, 切りくずへのせん断変形過程およびカール形成後の切りくず曲げ変形を検討しやすくするため, 単純な切削様式である二次元切削を採用した。装置は形削盤(山口鉄工所製YS660, 切削速度16~132m/min)を使用して, 材料の押出方向に平行に切削が進むように二次元切削を行った。表2<sup>3)</sup>に示す条件で, すくい角  $\phi = 15^\circ$  の高速度鋼製工具を用いて, 潤滑なしにて実験を行った。図1<sup>3)</sup>に試験片の断面形状を示す

表2<sup>3)</sup> 二次元切削試験条件

Table 2<sup>3)</sup> Test condition of two-dimensional cutting

| Tool                 |                  |
|----------------------|------------------|
| material             | High speed steel |
| : rake angle         | 15°              |
| : flank angle        | 15°              |
| $f_1$ : depth of cut | 0.1, 0.2, 0.3 mm |
| cutting speed        | 16m/min          |
| Wetting agent        | non(dry)         |

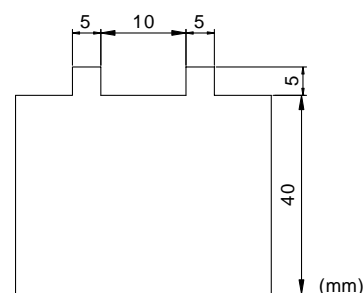


図1<sup>3)</sup> 二次元切削試験用試験片の断面形状

Fig. 1<sup>3)</sup> Cross section of test piece for two-dimensional cutting test

\*アルミ・銅カンパニー 長府製造所 アルミ押出工場 技術部

が、切削幅  $b = 5\text{mm}$  で、切削長さは  $400\text{mm}$  である。また設定した切込量  $t_1$  は  $0.1, 0.2$  および  $0.3\text{mm}$  とし、切削速度は  $16\text{m/min}$  で行った。得られた切りくずは、厚さ  $t_2$  および曲率半径  $r_c$  の計測を行った。

## 2. 試験結果

### 2.1 引張特性

表 3<sup>3)</sup> に押出材の引張試験結果を示す。6061 合金に比べて、Si 量が増えると引張強さ TS および耐力 YS は若干低下する傾向を示した。伸びに関しては 2%Si の添加ではベース材に比べてほとんど変化はないが、Si 量が増え 4%Si、6%Si と増加した場合に伸びが低下する傾向を示した。

### 2.2 ミクロ組織

図 2<sup>3)</sup> に供試材のミクロ組織を示す。6061 合金では、第二相粒子としては、Al-Fe-Si 系晶出物および Mg-Si 系晶出物が観察された。Si を多量に添加された供試材の代表として 6Si 材のミクロ組織を示す。上記 6061 合金で観察された晶出物に加え共晶 Si 粒子が観察され、その平均粒径は  $2 \sim 5\mu\text{m}$  であった。また苛性ソーダ液でエッチングを行い、相の結晶粒径を確認したところ、約  $10\mu\text{m}$  の等軸粒であり、供試材間で大きな差異はなかった。すなわちミクロ組織的に Si 粒子分散量の水準が異なる供試材を準備できたこととなる。

### 2.3 二次元切削試験

図 3<sup>3)</sup> に二次元切削試験で得られた切りくず形状の分類を示す。今回の試験範囲で、切りくず形状は三種類に分類<sup>5)</sup>された。すなわち連続型の 7 型、数巻きで折れる型および一巻き程度で折れる C 型であった。供試材中の Si 量および切込量  $t_1$  との関係でみると、同じ  $t_1$  条件の場合、Si 量が増えるに従い、切りくずが連続型から、折断した型および C 型へと変化することが分かった。一方で、同じ Si 量の供試材の場合、切込量  $t_1$  が増えるに従い、切りくずは連続型から折断型へと変化した。図 4<sup>3)</sup> に切りくずの破面 SEM 像を示す。2Si 材の場合、カールした内面側では、せん断変形の特徴を有する平滑な破面が見られた。一方で、厚さ中央部位からカールした外面

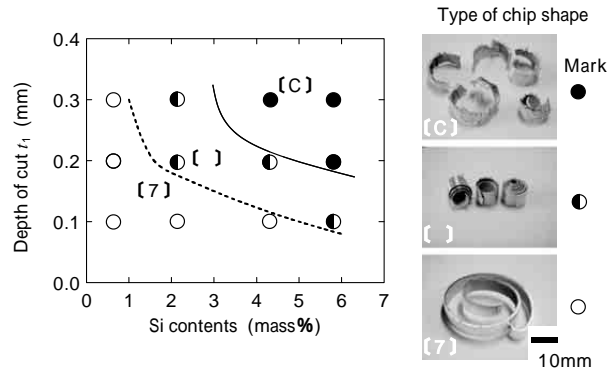


図 3<sup>3)</sup> 切りくず折断性及び Si 量の影響  
Fig. 3<sup>3)</sup> Effect of Si contents and depth of cut  $t_1$  on chipping characteristics

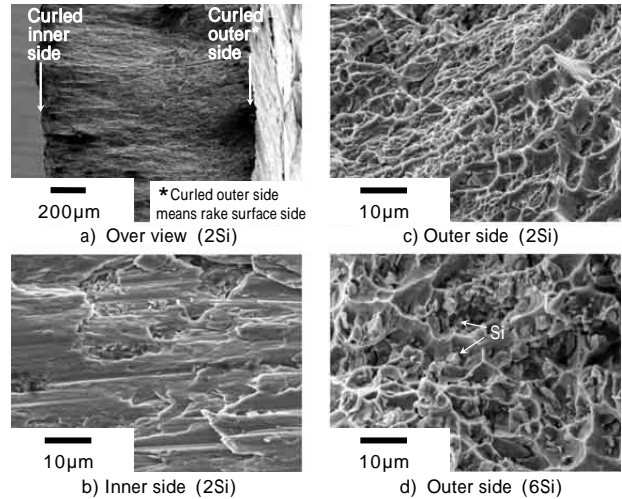


図 4<sup>3)</sup> 切りくず破面の SEM 像 a), b), c) : 2Si 材 d) : 6Si 材, 切込深さ  $t_1 = 0.3\text{mm}$   
Fig. 4<sup>3)</sup> SEM images of fracture surface of chips a), b), c) : 2Si alloy d) : 6Si alloy cut with depth of cut  $t_1 = 0.3\text{mm}$

側にかけては、ディンプルが主体の延性破壊面が観察された。ディンプル自体は等軸であり、破壊様式としては、曲げによる引張作用で破断したことを示している。特に Si 量の多い 6Si 材では、ディンプルの底に Si 粒子が明瞭に観察され、破壊の起点として作用したものと考えられる。

## 3. 考察

### 3.1 せん断ひずみ

折断性及び Si の影響を考察するため切りくずの形状を計測し、切削時に導入されるひずみの推定を行った。表 4<sup>3)</sup> に切りくずの厚さ  $t_2$  およびカール曲率半径  $r_c$  の計測結果を示す。これより、Si 量が多い材料ほど、切

表 3<sup>3)</sup> 引張試験結果  
Table 3<sup>3)</sup> Tensile properties of specimens

| Alloy | YS (MPa) | TS (MPa) | EL. (%) |
|-------|----------|----------|---------|
| 6061  | 340      | 370      | 18      |
| 2Si   | 330      | 360      | 17      |
| 4Si   | 310      | 350      | 14      |
| 6Si   | 320      | 350      | 12      |

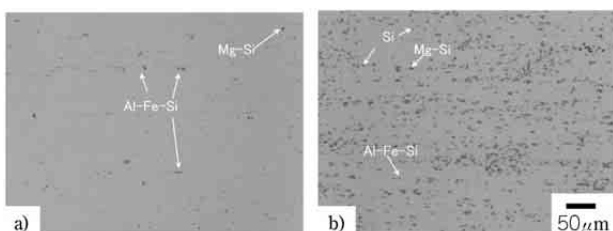


図 2<sup>3)</sup> 押出材の L-R 断面でのミクロ組織 a) 6061, b) 6Si 材  
Fig. 2<sup>3)</sup> Microstructures on L-R section; a) 6061, b) 6Si

表 4<sup>3)</sup> 切りくず寸法の測定結果  
Table 4<sup>3)</sup> Measured chip dimension

| Alloy | $t_1$ (mm) | $t_2$ (mm) | $r_c : t_1 / t_2$ | $r_c$ (mm) |
|-------|------------|------------|-------------------|------------|
| 6061  | 0.3        | 1.17       | 0.26              | 11.0       |
| 2Si   | 0.3        | 1.04       | 0.29              | 5.7        |
| 4Si   | 0.3        | 1.03       | 0.29              | 4.4        |
| 6Si   | 0.3        | 0.81       | 0.37              | 3.5        |

$t_1$ : depth of cut,  $t_2$ : thickness of chip,  $r_c$ : cutting ratio  
 $r_c$ : radius of curled chip

りくず厚さ  $t_2$  が薄くなる傾向が見られた。また  $\phi_0$  は, Si 量が多い材料ほど小さくなった。

つづいて切りくずに導入されたせん断ひずみ  $\epsilon_s$  およびせん断角  $\theta$  を, 式(1)および式(2)に基づいて求めた<sup>4)</sup>。せん断ひずみは

$$\epsilon_s = \frac{\cos \phi_0}{\sin \phi_0 \cos(\phi_0 - \theta)} \dots \dots \dots (1)$$

で示され, せん断角は

$$\tan \theta = \frac{r_c \cos \phi_0}{1 - r_c \sin \phi_0} \dots \dots \dots (2)$$

の関係を満たす。ここで  $\phi_0$  はすくい角,  $\theta$  はせん断角であり,  $r_c$  は切削比で  $r_c = t_1/t_2$  である。計算結果を Si 量に対してプロットしたものを図 5<sup>3)</sup> に示す。これより, 切りくずに導入された  $\epsilon_s$  は, Si 量が多くなると小さくなっていることが分かる。また切削中の  $\theta$  は, Si 量とともに大きくなっていく傾向を示した。これはすくい面上での工具と供試材との相互作用によるものと推察され, 検討結果を後述する。

### 3.2 曲げひずみ

せん断にてひずみが導入された切りくずは, すくい面に沿って上昇しながらカール運動をし<sup>5)</sup>, 曲率半径  $\rho_0$  をもった形状が付与される。今回の二次元切削の場合, 図 6<sup>3)</sup> に示したように, 切削前方の供試材表面に切りくず先端が衝突することで, 曲げモーメント  $M_c$  が工具すく

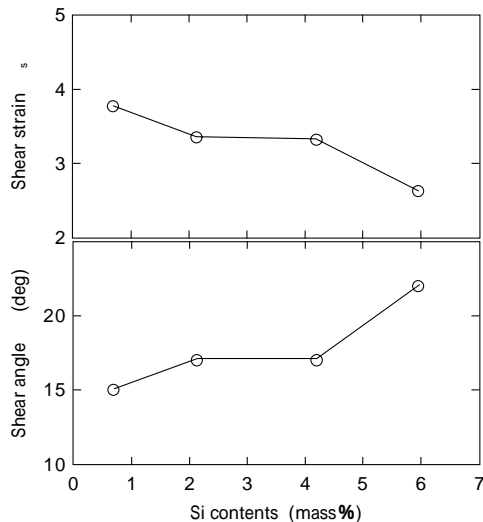


図 5<sup>3)</sup> 切りくずのせん断角  $\theta$  およびせん断ひずみ  $\epsilon_s$  に及ぼす Si 量の影響 ( $t_1=0.3\text{mm}$ )。

Fig. 5<sup>3)</sup> Effect of Si contents on shear angle  $\theta$  or shear strain  $\epsilon_s$  ( $t_1=0.3\text{mm}$ )

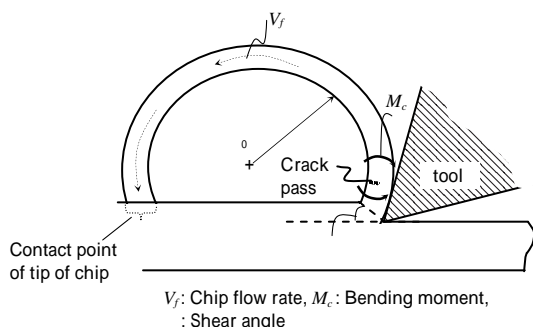


図 6<sup>3)</sup> 切りくず形成機構の模式図

Fig. 6<sup>3)</sup> Schematic illustration showing chip formation mechanism

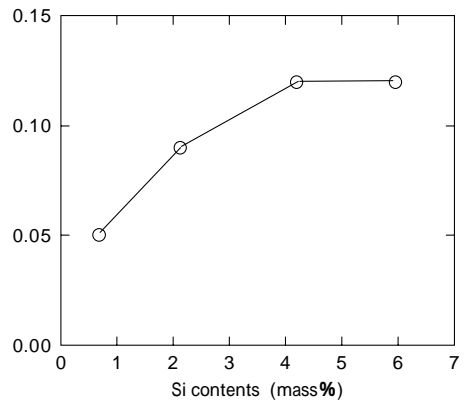


図 7<sup>3)</sup> 切りくずの曲げ予ひずみ  $\phi_0$  に及ぼす Si 量の影響 ( $t_1=0.3\text{mm}$ )  
Fig. 7<sup>3)</sup> Effect of Si contents on pre-bending strain  $\phi_0$  ( $t_1=0.3\text{mm}$ )

い面と切りくずの離脱点に作用し, 曲げ破断するものと考えられる。切りくずの曲げ予ひずみは式(3)で計算される<sup>6)</sup>。

$$\phi_0 = t_2/2 \rho_0 \dots \dots \dots (3)$$

表 4 の  $t_2$  および  $\rho_0$  から曲げ予ひずみ  $\phi_0$  を計算した結果を, Si 量に対しプロットしたものを図 7<sup>3)</sup> に示す。これより, 予ひずみ  $\phi_0$  は Si 量が多くなると増えることが分かる。この予ひずみの増加は, 切りくず自体の残存ひずみを低減させていることを意味する。実際の切削試験の結果では, Si 量が増えるほど切りくず折断性が向上した。Si の効果による予ひずみ  $\phi_0$  の増加が残存ひずみを減少させ, 結果として切りくず折断を促進したものと考えられる。

### 3.3 すくい面での相互作用

前々項にて, 供試材中の Si 量が増えると切りくず厚さ  $t_2$  が小さくなり,  $\phi_0$  が大きくなることを示した。せん断角の理論<sup>4)</sup>にて Merchant によれば式(4)が成り立つ。

$$2\phi_0 + \theta = 90^\circ \dots \dots \dots (4)$$

ここで  $\theta$  は, すくい面での切りくずと工具の摩擦角である。Merchant は, 切削単位容積あたりの仕事量が最小になる方向にせん断面が生ずると考え式(4)を与えている。また, Lee と Shaffer は, 切削中の大きなひずみ速度および加工発熱により材料は完全剛塑性体と考え, すべり線場理論より解析し, 式(5)を得ている。

$$\phi_0 + \theta = 45^\circ \dots \dots \dots (5)$$

今回の供試材アルミニウムにおいてこれらの関係式を同定することはできないが, 定性的には 3 者の角度はバランスしているものと考えられる。本研究の場合もすくい角  $\phi_0$  は既知で与えられるから,  $\theta$  の増大は切削時の  $\phi_0$  の減少を意味する。  $\phi_0$  は切削抵抗と式(6)の関係を満たす。

$$\mu = \tan \phi_0 = F/N = (F_c \cdot \tan \theta + F_t) / (F_c - F_t \cdot \tan \theta) \dots (6)$$

ここで,  $F_c$  は主分力,  $F_t$  は背分力である。著者らは既報<sup>7)</sup>にて, 本供試材を用いた実験で, 切削抵抗に及ぼす Si 量の影響を検討している。表 5<sup>3)</sup> に切削抵抗値および摩擦係数  $\mu$  の計算結果を示す。これより供試材中の Si 量が増えると切削抵抗  $F_c$  および  $F_t$  はいずれも小さくなった。式(6)を用いての  $\mu$  の計算結果も Si 量の増加とともに減少した。すなわち切削中の切りくずとすくい面の相互

表 5<sup>3)</sup> 切削荷重測定および摩擦係数計算結果  
Table 5<sup>3)</sup> Cutting forces and calculated friction coefficients

| Alloy | $F_c$ (N) | $F_t$ (N) | Friction coefficient $\mu$ |
|-------|-----------|-----------|----------------------------|
| 6061  | 220       | 70        | 0.64                       |
| 2Si   | 190       | 51        | 0.59                       |
| 4Si   | 200       | 52        | 0.57                       |

Cutting mode: turning ( $V = 100\text{m/min}$ )  
 $F_c$ : principal force,  $F_t$ : thrust force

作用において、Si 粒子はすくい面での摩擦係数  $\mu$  を下げる作用がある。Si 粒子の  $\mu$  低下作用については、工具と凝着しやすいアルミ母相面積率を下げる効果、もしくは黒鉛快削鋼や BN 快削鋼の様な固体潤滑作用<sup>8)</sup>の可能性もあるが、現状不明であり今後の研究課題である。

以上より切削中の Si 粒子の一連の作用として、既報<sup>2)</sup>ではせん断変形時の応力が Si 粒子を破壊し、応力集中源として切りくず折断し易くなること推察した。加えて本研究での検討により、Si 粒子は切削中のすくい面での摩擦係数  $\mu$  を低下させ、その結果として  $\theta$  が大きくなるような力学的均衡を保ち、生成する切りくず厚さ  $t_2$  を減少させる。 $\theta$  が大きくなると、カール半径  $r_0$  は小さくなり、曲げ予ひずみは増し、最終的に切りくずの容易破壊を導くと考察された。

むすび = 6061 アルミニウム合金に Si を 2, 4 および 6% 添加した押出材(KE 合金)の切りくず折断機構の検討を行い、以下の結論を得た。

ベース合金に Si 量が増えるほど切りくず折断性は向上した。合金中の Si 粒子は、せん断変形時に破壊して応力集中源として作用するとともに、切削中のすくい面との摩擦係数を低下させる。後者の作用の結果、切りくずカール半径を小さくすることで曲げ予ひずみを増大させ、切りくずの容易破壊を導くと考えられた。

本研究結果が、Pb (鉛) フリー切削用アルミニウム合金の被削性向上の基礎的知見となり、さらなる性能向上の助となることを期待する。

#### 参考文献

- 1) 吉原伸二ほか：R & D 神戸製鋼技報，Vol.51, No.1 (2000)，pp.17-20。
- 2) 吉原伸二ほか：軽金属，Vol. 51 (2001) pp.238-241。
- 3) 吉原伸二ほか：軽金属，Vol. 56 (2006) pp.261-265。
- 4) 小野浩二ほか：理論切削工学，(2003) pp.44-45，現代工学社。
- 5) 杉田忠彰：基礎切削加工学，(1988) pp.99-100，共立出版。
- 6) 中山一雄：精密機械，Vol.28 (1962) pp.525-531。
- 7) 和田任弘ほか：粉体および粉末冶金，Vol.51 (2004) pp.199-205。
- 8) 小林一博：熱処理，(2001) pp.196-203。