過共晶 Al-Si 合金の被削性に及ぼす初晶 Si 粒子の大きさと数の影響*

山田 始**・田中 他喜男**

Effects of grain size and number of primary silicon particles
on the machinability of hypereutectic Al-Si alloys*

UDC 669.715'782-14 : 621.9.011

YAMADA Hajime** and TANAKA Takio**

This study was carried out to determine the effect of grain size and number of primary silicon crystals on the machinability of hypereutectic Al-Si alloys. The results obtained are as follows:

(1) The effect of grain size, d (mm), and number, n (No./mm²) of primary silicon crystals on the flank wear of the tool, V_B (mm), are represented by the form, $(d^{2.50} \cdot n)^m$. The value of exponent m is as follows.

Sintered carbide tool;

$$(V_B \leq 0.2 \text{ mm}) \quad m = 0.68, \quad (V_B > 0.2 \text{ mm}) \quad m = 0.58$$

High speed steel tool;

$$(V_B > 0.3 \text{ mm}) \quad m = 0.58$$

Therefore, refinement of primary silicon in hypereutectic Al-Si alloy is very effective in decreasing the tool wear.

(2) It is found that the cutting force is inversely proportional to $d^{0.5} \cdot n^{0.2}$ and the roughness of the finished surface is directly proportional to $d^{0.5} \cdot n^{0.2}$.

(Received June 9, 1975)

1. 緒 言

過共晶 Al-Si 合金は熱膨張係数が小さく、耐摩耗性が優れているので、その需要も増加しつつある。しかし、この合金の被削性は他のアルミニウム合金に比して著しく劣り、逃げ面凝着などの特異な現象も起こるが、なかでも最も大きな欠点は工具摩耗の激しいことである¹⁻⁴⁾。

この合金の被削性の改善に対しては、添加元素による改善も試みられたが、良好な結果は得られていないようである^{5), 6)}。これはひじょうに硬い初晶 Si 粒子の影響が大きいので、その大きさ、および個数は、機械的性質のほか、被削性にも大きな影響を及ぼすものと考えられる。しかし、これらの被削性に対する定量的な関係については、被削性の改善に対しても必要であるが、ほとんど明らかにされていない。したがって、これについて調べた結果、初晶 Si の粒径 (d) および個数 (n) は、工具摩耗に対して $(d^{2.50} \cdot n)^m$ の関係で影響することが明らかとなった。

また、切削力、切削仕上面あらさに対する関係は、ほぼ $d^{0.5} \cdot n^{0.2}$ で表わされることも明らかとなったので、これらの詳細について次に報告する。

2. 試料および実験方法

実験に用いた試料は、17 ~ 30% Si (Fe 0.3, Cu 0.01, Mg 0.01%) の種々のけい素量の合金で、りん処理の有無、あるいは砂型、金型など、冷却速度を異にする鑄型によって、種々の大きさの初晶 Si 粒子を得た。

初晶 Si 粒度の測定は、粗大な板状あるいは不規則な花弁状の Si 粒子も存在するので、顕微鏡写真で約 50 個以上の初晶 Si 粒子を切り抜き、重量法によって、その平均面積を求め、これより粒子径を算出した。

初晶 Si の個数 n (個/mm²) は最初、基準円内の初晶 Si の数を測定し、円周によって切られたものは 0.5 として数えた。このようにして求めた個数と初晶 Si 粒度 a (mm²) との積、すなわち 1 mm² 当りの初晶 Si の総面積とけい素量との関係を求めると Fig. 1 のような結果となった。図示した線は比較的均一な初晶 Si のため、測定誤差が最も少ないと思われるりん処理の場合を基準として結んだものであるが、本実験における初晶 Si の個数は、粒度および個数の測定誤差と被削性の測定誤差とが相乗して、大きな誤差となるのを防ぐため、Fig. 1 を用い、初晶 Si 粒度および試料のけい素量より求まる個数

* 軽金属学会第48回春期大会 (50-6) にて発表した。

** 滋賀県立短期大学 (彦根市)。Shiga Prefectural Junior College (Hikone)。

Fig. 1 Relation between Si content and average total area of primary Si per square mm.

を用いることにした。

切削工具は、超硬工具 G2 の片刃バイトを用い、高速度鋼工具 (SKH 4) も本実験の目的から一部用いた。刃先諸元はいずれも 0, 15, 6, 10, 8, 0, 0 とし、切削力は主分力と送り分力の 2 分力の測定とした。また、切削仕上面あらさの測定は、大越式表面あらさ計により、精度を考慮して 10 点平均あらさ (Hz) とし、基準長さは 2.5 mm とした。

3. 実験結果

3.1 工具摩耗に及ぼす初晶 Si 粒度および個数の影響

Fig. 2, 3 は超硬工具および高速度鋼工具の工具摩耗

V_B (フランク摩耗の最大幅, mm) と初晶 Si 粒度 a (mm^2) および個数 n との関係について示す。図中の数字は工具摩耗の値を示したものであるが、同じ摩耗量の点を結ぶと、いずれも平行な直線関係として取扱うことができる。

したがって、 $a^p \cdot n = \text{const} = C$ なる関係が得られ、図の直線の傾きから指数 p の値を求め、また初晶 Si の粒径を d (mm) とすると超硬、高速度鋼工具のいずれも $a^{1.25} \cdot n = d^{2.50} \cdot n = C$ となる。このため、次に C すなわち $d^{2.50} \cdot n$ と工具摩耗 V_B との関係について図示すると、Fig. 4 のような直線関係となり、次式が得られる。

$$V_B = k_1 (d^{2.50} \cdot n)^m \quad (1)$$

すなわち、初晶 Si の粒径および個数は、工具摩耗に対して $(d^{2.50} \cdot n)^m$ の関係で影響する。

指数 m の値は、Fig. 4 の直線の傾きより求まるが、この直線の傾きは、超硬工具においては $V_B = 0.2$ mm 近辺で変わると見られるので、 m の値は次のようになる。

超硬工具 ($V_B < 0.2$ mm) $m = 0.68$,

($V_B > 0.2$ mm) $m = 0.58$

高速度鋼工具 ($V_B > 0.3$ mm) $m = 0.58$

この結果についてみると、アルミニウム合金の切削の場合の工具寿命の限界は、一般に $V_B = 0.2$ mm とすることが多いが、この範囲と、それ以上の工具摩耗域とでは、初晶 Si 粒度および個数の工具摩耗に及ぼす影響が異なり、 $V_B < 0.2$ mm の範囲のほうが、その影響は大き

Fig. 2 Relation between grain size, number of primary Si and tool wear of sintered carbide tool G2.

Fig. 3 Relation between grain size, number of primary Si and tool wear of high speed steel tool SKH 4.

Fig. 4 Relation between $d^{2.50} \cdot n$ and tool wear (d is grain size in mm, and n is number of primary Si per sq. mm).

いことになる。

この理由について考察するため、Fig. 5 に初晶 Si 粒径、個数の異なる種々の試料に対する、超硬および高速度鋼工具の摩耗の進行状況を示す。超硬工具は $V_B = 0.2$ mm, 高速度鋼工具では 0.3 mm 近辺までは、いずれも摩

耗の進行割合は比較的ゆるやかである。しかし、これを越えると摩耗の増加は著しくなる。Fig. 4 で超硬工具の直線の傾きが $V_B = 0.2$ mm 近辺で変わるのは、このためと思われるが、増加割合の比較的ゆるやかな摩耗は 1 次摩耗といわれ、これは純粋な摩耗によるものとされている。これに対して、増加割合の大きい摩耗を 2 次摩耗といい、これは熱摩耗によるものとされている。したがって、このことからすると、純粋な摩耗のほうが熱摩耗よりも組織の影響を直接うけやすいと考えられるので、1 次摩耗域のほうが、2 次摩耗域よりも初晶 Si 粒度、個数の影響が大きいと思われる。

また、高速度鋼工具では、超硬工具よりも摩耗が著し

Fig. 5 Relation between cutting time and tool wear.

Fig. 6 Relation between cutting time, cutting speed and tool wear of G2 tool.

いので、ほとんどの測定結果が2次摩耗となった。このため、Fig. 4 の高速度鋼工具においては、折点がないものとみられる。しかし、Fig. 5 の工具摩耗の進行状況より、高速度鋼工具においても、 V_B 約 0.3 mm 以下と以上とでは、超硬工具と同じことがいえると思われる。なお、Fig. 5 において、2次摩耗の増加割合は、高速度鋼工具よりも超硬工具のほうが著しいが、これについては、原因は確立されていないが、超硬工具と高速度鋼工具の特性として、他の被削材においても認められている²⁾。

以上、(1)式の関係より、初晶 Si の微細化は、工具摩耗の軽減にひじょうに有効であることが明らかである。しかし、この関係は一定の切削条件によつて得られたものである、すべての切削条件においても、このような関係が成立つかを次に調べることにした。

このため Fig. 6 は、初晶 Si 粒径および個数がそれぞれ異なる試料に対する、工具摩耗と切削速度および切削時間との関係を示す。 V_B 0.2 mm 以下とそれ以上とで、直線の傾きが異なるのは1次摩耗と2次摩耗の相違によるものと考えられるが、初晶 Si の粒径、個数が異なつても、ほぼ平行な直線関係を示す。したがつて、切削速度 V (m/min) と切削時間 T (min) との関係は次のようになる。

$$V \cdot T^{q'} = \text{const} = C \quad (2)$$

さらに、 C と V_B との関係について調べると Fig. 7 のような平行な直線関係となる。したがつて、これより $C = k_2 V_B^{h'}$ なる関係が得られ、これを(2)式に代入すると次の(2)'式となる。

$$V \cdot T^{q'} = k_2 V_B^{h'} \quad (2')$$

係数 k_2 は、初晶 Si の粒径 d および個数 n によつて変わることが Fig. 7 より明らかであるので、次に、 k_2 と d, n との関係を $d^{2.50} \cdot n$ で整理してみると、同様に直線関係として取扱うことができる。したがつて、次の関係式が得られる。

Fig. 7 Relation between value of constant $C = VT^{q'}$ and tool wear of G2 tool.

$$k_2 (d^{2.50} \cdot n)^{m'} = \text{const} = C'$$

この k_2 を(2)'式に代入すると次の(3)式が得られる。

$$VT^{q'} = \frac{C'}{(d^{2.50} \cdot n)^{m'}} \cdot V_B^{h'}$$

$$\begin{aligned} \therefore V_B &= \left(\frac{1}{C'} \right)^{1/h'} (d^{2.50} \cdot n)^{m'/h'} V^{1/h'} T^{q'/h'} \\ &= k_3 (d^{2.50} \cdot n)^m V^h T^q \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式は、切込み、送り量が一定の場合の任意の切削速度、切削時間における工具摩耗と初晶 Si 粒径および個数との関係を示す。したがつて、この式の係数および指数をそれぞれ前の図より求めると、切込み 1.5 mm、送り 0.05 mm/rev の場合には次の値となる。

超硬工具 G2 (すくい角 15°)

$$(V_B \leq 0.2 \text{ mm})$$

$$V_B = 0.007 (d^{2.50} \cdot n)^{0.68} V^{1.09} T^{0.42}$$

$$(V_B > 0.2 \text{ mm})$$

$$V_B = 0.014 (d^{2.50} \cdot n)^{0.58} V^{0.91} T^{0.44}$$

高速度鋼工具 SKH 4 (すくい角 15°)

($V_B > 0.3$ mm)

$$V_B = 0.029(d^{2.50} \cdot n)^{0.58} V^{1.04} T^{0.34}$$

さらに、任意の送り量 F (mm/rev) および切込み量 t (mm) の場合における関係について求めるため、**Fig. 8** に工具摩耗と送り量との関係を示す。この場合は 1 次摩耗と 2 次摩耗の相違は、ほとんど無視することができ、超硬、高速度鋼工具のいずれも、ほぼ平行な直線関係として取扱うことができるとみられる。したがって、これより次の関係式が得られる。

$$V_B = k_4 \cdot F^f = k_5 (d^{2.50} \cdot n)^m V^h T^q F^s$$

また、工具摩耗と切込み量との関係を **Fig. 9** に示すが、この場合もほぼ平行な直線関係として取扱うことができる。したがって、過共晶 Al-Si 合金の任意の切削条件における工具摩耗の一般式として、次の(4)式が得られる。

$$V_B = k(d^{2.50} \cdot n)^m V^h T^q F^s t^s \quad (4)$$

さらに、指数 f, s の値を **Fig. 8, 9** より、また係数 k を種々の実測値より求めると、それぞれ次の(4)式の値となる。

超硬工具 G2 (すくい角 15°)

($V_B \leq 0.2$ mm)

$$V_B = 0.02(d^{2.50} \cdot n)^{0.68} V^{1.09} T^{0.42} F^{0.37} t^{0.23}$$

($V_B > 0.2$ mm)

$$V_B = 0.04(d^{2.50} \cdot n)^{0.58} V^{0.91} T^{0.44} F^{0.37} t^{0.23} \quad (4)'$$

高速度鋼工具 SKH 4 (すくい角 15°)

($V_B > 0.3$ mm)

$$V_B = 0.08(d^{2.50} \cdot n)^{0.58} V^{1.04} T^{0.34} F^{0.37} t^{0.23}$$

d, n : 初晶 Si の粒径 (mm), 個数 (個/mm²)

Fig. 8 Relation between feed rate and tool wear.

Fig. 9 Relation between depth of cut and tool wear.

V_B : 工具摩耗 (mm), V : 切削速度 (m/min),
 T : 切削時間 (min), F : 送り量 (mm/rev),
 t : 切込み量 (mm)

以上の結果、すべての切削条件において、前述の工具摩耗に対する初晶 Si 粒度および個数の関係が成立つことが明らかとなった。また(4)'式は、初晶 Si の粒径、個数がわかれば、容易に工具摩耗を算出することができるので、この式による工具摩耗の計算値と実測値との比較を行なった。この結果を **Fig. 10** に示す。図の実線が計算値、各々の点が実測値であるが、ほぼ満足な結果が得られた。

したがって、次に(4)'式により、種々のけい素量について、初晶 Si 粒径と工具摩耗との関係を求めると **Fig. 11** に示すような関係となる。図には該当する実測値もあわせて示したが、計算値と実測値との多少の相違は、初晶 Si 粒度、個数に関する誤差および被削性の測定誤差などによるものと思われる。

Fig. 11 より、初晶 Si の微細化は、工具摩耗の軽減にひじょうに有効であることがより明かであるが、高いけい素合金ほど、工具摩耗に対する初晶 Si 粒度の影響は大きくなるように見られる。しかし、これは前述の $V_B = k(d^{2.50} \cdot n)^m$ の関係において、 $V_B \leq 0.2$ mm の場合を例にとれば、 $V_B = k d^{1.70} \cdot n^{0.68}$ となるので、 d が小さい場合、例えば $d = 0.025$ mm では $V_B = 0.002 k n^{0.68}$ となる。これに対して d が大きい場合、例えば $d = 0.2$ mm では $V_B = 0.065 k n^{0.68}$ となる。したがって、個数 n は、 d が大きい場合のほうが、 d の小さい場合よりも V_B の値に

Fig. 10 Comparison of the tool wears calculated by formula (4)' with measured values. Full lines are calculated values and dots are measured values.

Fig. 11 Effect of grain size of primary Si on the tool wear of G2 tool for various Si contents of hypereutectic Al-Si alloy. Full lines are calculated values by formula (4)' and dots are measured values.

大きく響くことになる。一方、けい素含有量が多くなるほど d が同じならば、個数 n は増加するので、 V_B も大きくなるが、 d の大きい場合のほうが V_B の値に対する影響は大きくなる。このため、高けい素合金ほど、初晶 Si 粒度が大きくなると工具摩耗に対する影響が大きくなるように見えるものと思われる。

3.2 切削力、切削仕上面あらさと初晶 Si 粒度および個数との関係

次に、初晶 Si 粒度および個数と切削力との関係について、**Fig. 12** に示すように、 $d^{2.5} \cdot n$ で整理してみると、砂型と金型のグループに分かれるが、主分力 F_t (kg)、送り分力 F_f (kg) のいずれも、ほぼ平行な直線関係として取扱うことができるとみられる。したがって、次の関係

式が得られる。

$$F_t \cdot (d^{2.5} \cdot n)^{0.2} = \text{const} = C_1 \quad \therefore F_t = \frac{C_1}{d^{0.5} \cdot n^{0.2}}$$

$$F_f \cdot (d^{2.5} \cdot n)^{0.2} = \text{const} = C_2 \quad \therefore F_f = \frac{C_2}{d^{0.5} \cdot n^{0.2}} \quad (5)$$

すなわち切削力は、ほぼ $d^{0.5} \cdot n^{0.2}$ に反比例し、初晶 Si 粒度、個数の増加に従い減少するが、これは初晶 Si 粒子の切削中の先行割れによるものと思われる。

次に、切削仕上面あらさ H_z (μ) に対して、 $d^{2.5} \cdot n$ の関係で整理してみると、この場合も **Fig. 13** のように砂型と金型のグループに分かれるが、ほぼ平行な直線関係として取扱うことができるとみられる。したがって、

$$H_z = k(d^{2.5} \cdot n)^{0.2} = k(d^{0.5} \cdot n^{0.2}) \quad (6)$$

すなわち、切削仕上面あらさは、 $d^{0.5} \cdot n^{0.2}$ にほぼ比例して増加する。

貴志ら⁸⁾ は、けい素量一定の試料についての実験結果より、切削力および切削仕上面あらさは、ほぼ $d^{0.5}$ の

Fig. 12 Relation between $d^{2.5} \cdot n$ and cutting force.

Fig. 13 Relation between $d^{2.5} \cdot n$ and roughness of finished surface.

Fig. 14 The cutting force and roughness of finished surface of Al-Si alloys cast in a sand or metal mould.

関係で表わされるとしている。しかし、これは一定のけい素量に対する実験結果であるので、初晶 Si の個数の影響については、とくに触れていないが、個数もこれらには関係するものと考えられる。

また、 $d^{2.5} \cdot n$ で関係づけた場合に、切削力および切削仕上面あらさが、砂型と金型のグループに分かれることについて考察するため、Fig. 14 に砂型と金型による切削力および切削仕上面あらさの相違を種々のけい素量について示す。切削力においては、砂型と金型の著しい相違は見られない。とくに過共晶 Si ではその相違は少ない。それにもかかわらず、切削力が砂型と金型のグループに分かれるのは、同一けい素量でも砂型と金型とでは、初晶 Si 粒径、個数が大きく異なるためである。例えば、26%Si 合金における砂型（りん処理）は $d^{2.5} \cdot n = 0.08$ 、金型では 0.035 であるが、切削力はほとんど変わらないので、2つのグループに分かれることになる。すなわち、この相違は $d^{2.5} \cdot n$ で関係づけることによって生じるものである。

切削力に対して、切削仕上面あらさは、同一けい素量

でも砂型と金型とでは、かなりの相違が見られ、金型のほうが良好である。これは凝固速度の速いことによるマトリックスの共晶 Si の微細化、あるいは結晶粒度などの影響によるものと思われる。したがって、切削仕上面あらさにおける砂型と金型のグループには、このような切削仕上面あらさの本質的な相違が含まれるものとみられる。

4. 総括

以上、過共晶 Al-Si 合金の被削性に及ぼす初晶 Si 粒度および個数の影響について総括すると

1) 初晶 Si の粒径 (d) および個数 (n) は、工具摩耗 (V_B) に対して $(d^{2.50} \cdot n)^m$ の関係で影響する。指数 m の値は次のようである。

超硬工具 (G2) $(V_B \leq 0.2 \text{ mm}) \quad m = 0.68,$
 $(V_B > 0.2 \text{ mm}) \quad m = 0.58$

高速度鋼工具 (SKH 4)

$(V_B > 0.3 \text{ mm}) \quad m = 0.58$

したがって、初晶 Si の微細化は、工具摩耗の軽減に対してひじょうに有効である。

さらに、過共晶 Al-Si 合金の任意の切削条件における工具摩耗の一般式として (4)' 式を得た。

2) 切削力、切削仕上面あらさに対する関係は、ほぼ $d^{0.5} \cdot n^{0.2}$ で表わされ、切削力は $d^{0.5} \cdot n^{0.2}$ に反比例し、切削仕上面あらさは、これに比例する。

終わりに、本研究は軽金属奨学会の研究補助金によるものであることを付記し、深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 古市, 玉村: 精密機械, **32** (1966), 558.
- 2) 森永, 財満, 飯尾: 日本金属学会誌, **30** (1966), 463.
- 3) 佐藤, 嵯峨, 水沢: 軽金属, **20** (1970), 556.
- 4) 山田, 田中: 鋳物, **47** (1975), 332.
- 5) 室町, 高辻, 多々: 軽金属, **19** (1969), 543.
- 6) 財満, 高辻, 飯尾: 軽金属, **20** (1970), 556.
- 7) 白井: 切削・研削加工学上, 共立出版, (1971), p. 171.
- 8) 貴志, 江田, 市田, 涌嶋: 精機学会秋期大会 (昭和 49) 前刷, 59.