研究論文

過共晶 Al-Si 合金の低速二次元加熱切削

長谷川嘉雄*・花崎伸作**・峠 睦**

Orthogonal hot machining for hypereutectic Al-Si alloys

Yoshio HASEGAWA*, Shinsaku HANASAKI**
and Mutsumi TOUGE**

Orthogonal cutting tests of hypereutectic Al-Si alloys were carried out at elevated temperatures up to 770 K. Al-16 to 26%Si alloys recrystallize at about 600 K. The average diameter, number and area percentage of primary Si particles increase linearly with an increase in Si content in the alloys. These particles are finely crushed by cutting at 300 K. Crushed and/or fine grained particles gradually decrease at elevated machining temperatures. The cutting force moderates at elevated machining temperatures by the reduction of flow stress in the matrix. The friction angle increases gradually and the shear angle decreases at elevated temperatures. These facts are attributed to increases in τ_c/τ_s and contact length of chips with the tool face.

Keywords: orthogonal hot machining, hypereutectic Al-Si alloys, primary Si particles, cutting force, cutting mechanism

(Received March 3, 1988)

1. 緒 言

Al-Si 系過共晶合金は軽量さと耐摩耗性を兼ね備えた合金であり、ビデオデッキのヘッドやピストン等の軽量化、耐摩耗性および耐熱性が求められる部位に広く用いられている。その金属組織はアルミニウムとけい素の共晶組織（以後母材と呼ぶ）中に、微細な硬質第二相粒子である初晶けい素粒子（以後初晶粒子）が細かく散在した形で観察される。すなわち、延性に富む軟質の母材中に硬い粒子を分散させたものであり、晶出粒子による分散強化型の複合材料の一種と考えることができる。

しかし、これらの合金はその優れた耐摩耗性のために切削加工時に激しい工具摩耗を呈し、良好な仕上げ面が得がたいなど切削加工上および生産管理上の多くの問題点を抱えている。工具摩耗は主として合金中の硬質粒子による機械的な引かき作用^{1),2)}（以下機械的摩耗）に切削熱による凝着摩耗が加わって進行し^{2),3)}、また仕上げ面の劣化は構成刃先や工具逃げ面付着物の生成¹⁾により影響されると考えられる。比較的低速域における切削では構成刃先の生成が著しいため仕上げ面粗さは大きい

が、高速域で切削すると構成刃先は消滅し⁴⁾、仕上げ面は良化する。しかし、高速域の切削では切削熱の上昇による凝着摩耗の活発化や機械的摩耗の増大が起こり、工具摩耗は一層著しいものとなる^{2),5)}。以上のように、延性の高い母材中に散在する硬質粒子の存在が切削加工上の問題を引起こす大きな原因と考えられ、この系の合金を切削する場合、初晶粒子による機械的摩耗の割合を低減させる切削法に留意する必要がある。

そこで、本研究では硬質粒子の悪影響を低減させる一方法として加熱切削^{6),7)}を行った。この場合、過度の加熱は凝着摩耗を活発化させる危険性もあるが、高温域での母材の軟化により機械的摩耗が低下することが期待できる。本報では切削熱の影響を除くため切削方式を低速二次元切削とし、母材中の初晶粒子の挙動および切削機構に及ぼす加熱温度^{*1)}について詳細に調べた。

*1 本報では外部加熱によって上昇する被削材の温度を加熱温度 (heating temperature) と呼ぶことにする。

* 摂南大学工学部（寝屋川市）。Faculty of Engineering, Setsunan University (Neyagawa-shi Osaka).

** 大阪大学工学部（吹田市）。Faculty of Engineering, Osaka University (Suita-shi Osaka).

2. 実験方法

被削材は直径30 mmの丸棒押出材より切出した50×25×5 mmの過共晶 Al-Si 合金である。被削材中の初晶粒子の大きさおよび個数を変化させるため、けい素含有率を16, 19, 23および26 wt%の4種類に設定した。得られた被削材の組成を **Table 1** に、また切削条件を **Table 2** に示す。実験は日立精機製1番半立フライス盤のテーブル左右送りを利用した低速二次元加熱切削により行った。

3. 過共晶 Al-Si 合金の金属材料科学的特性

Fig. 1 (a)～(d)は加工前の被削材表面を光学顕微鏡に

Table 1 Chemical compositions of hyper-eutectic Al-Si alloys (mass%)

Material	Si	Fe	Cu	Mg	Cr
Al-16%Si alloy	17.1	0.33	0.47	0.01	0.01
Al-19%Si alloy	19.6	0.36	0.47	0.01	0.01
Al-23%Si alloy	20.1	0.43	0.30	0.01	0.01
Al-26%Si alloy	24.5	0.46	0.21	0.01	0.01

Table 2 Cutting conditions

Cutting speed	v	mm/s	0.045, 1.9
Depth of cut	t	mm	0.1, 0.2, 0.3
Tool material			Cemented carbide K10
Rake angle	α	deg	12
Clearance angle	γ	deg	9
Heating temperature	T_w	K	300, 370, 470, 570, 670, 770

Fig. 1 Optical surface micrographs of Al-Si alloys before cutting (Etched and microscopied in dark field image). (a) Al-16%Si alloy, (b) Al-19%Si alloy, (c) Al-23%Si alloy, (d) Al-26%Si alloy.

より観察したものであり、黒く見える地の部分が母材、20～50 μm の直径を有する白い析出物様のものが初晶粒子である。けい素含有率の増加に伴い、初晶粒子の大きさおよび個数は増加する。このことについて統計的に調べた結果の一例が **Fig. 2** であり、縦軸には初晶粒子の面積率*2およびその平均粒径*2をとっている。けい素含有率の増加に伴い、両者共にほぼ直線的に増加している。したがって、けい素含有率の増加は被削材中に含まれる硬質粒子の面積率の増加をもたらすと共に、その平均粒径を増加させることがわかる。

被削材の再結晶温度を決定する⁴⁾ため、所定温度に30 min 保持後炉冷して焼なましし、母材のビッカース硬さを測定した。**Fig. 3** はその一例であり、硬さは焼なまし温度の上昇と共に減少し、約600 K 以上ではほぼ一定値をとる。したがって、本研究で使用了被削材の再結晶温度は約600 K であるとした。また、加熱温度上昇による

Fig. 2 Effects of Si content in alloys on average diameter and percent area of proeutectic Si particles.

Fig. 3 Effects of annealing and heating temperature on Vickers hardness number of Al-16%Si alloy.

*2 面積率は観察された領域に対する各初晶粒子の面積の総和の割合であり、平均粒径は各初晶粒子の面積を測定し、それを円に近似したときに得られる直径の平均値である。

母材の硬さ変化を高温硬さ計（日本光学製，TC-QM-3000 H）により測定した。Fig. 3 中（●印）に示すように，高温硬さは加熱温度の上昇と共に急激に低下し，770 K では室温のその約 5 % となっている。このことは加熱温度の上昇により母材が著しく軟化することを示しており，流動応力（変形抵抗）もかなり低下していることが推察できる。

4. 加熱切削における初晶粒子の挙動

Fig. 4(a)～(f)は16%Si 材を二次元切削したときの加工表面の一例である。(a)，(b)は室温で切削したものであり，初晶粒子には多くのクラックが入り，細かく破碎されている。また，初晶粒子と母材の界面にはく離の発生が認められ，初晶粒子の周囲に空洞⁹⁾あるいはボイド⁹⁾が生成したことが推察される。これは刃先近傍の塑性変形域において，初晶粒子がその破壊応力を超えるような大きなせん断応力⁹⁾を受けて破碎され，周囲の母材も初晶粒子による荷重の集中により変形したことを示している。

(c)，(d)の加熱温度は470 K であり，初晶粒子の破碎およびボイドの生成は(a)，(b)同様に認められることから，この温度域でも初晶粒子による荷重の集中は起っていることがわかる。また，新たに刃先により切削方向

Fig. 4 Secondary electron micrographs of cut surface after orthogonal hot machining at various heating temperatures (Al-16%Si alloy, $t=0.2$ mm, $v=0.045$ mm/s). (a) (b) $T_w=300$ K, (c) (d) $T_w=470$ K, (e) (f) $T_w=770$ K.

に引きずられた溝状の痕跡が観察される。これは加熱温度上昇に伴って母材の流動応力が低下し，初晶粒子をそれらが位置していた場所に保つ母材の力（以下母材保持力）が低下したためと推察される。一方，初晶粒子が破碎されないものも認められ，破碎される初晶粒子との出現比率は同程度であった。初晶粒子が破碎されないのは，粒子自体に負荷される応力が初晶粒子の破壊応力に達する以前に緩和されるためであり，初晶粒子近傍の母材がより小さい外力で変形，破壊することに起因している。

(e)，(f)は加熱温度770 K の場合であり，初晶粒子の多くは刃先により引きずられたり母材中に押込まれ，破碎されたものはほとんど観察されなかった。また，初晶粒子周辺のボイドの発生は低温域に比べて顕著に認められる。これは初晶粒子自身が周囲から受ける外力を緩和する方向に移動するためであり，高温域で母材保持力が急激に低下したためと考えられる。

初晶粒子の破碎および圧壊の程度を調べるため，切りくず中の初晶粒子の粒径を測定し，得られた結果を統計処理した。一般に，結晶粒径や硬質粒子径の分布の多くはそのまま統計処理を行うと正規分布とはならず，やや粒径の小さい方に偏った分布となる。このような場合，確率変数に対して対数変換をして標準化を行うことにより，これらの分布は正規分布として捉えることができる¹⁰⁾。Fig. 5 はその一例であり，室温で切削したときの直線が最も左，すなわち初晶粒子径の小さい方に位置している。これらの直線は加熱温度の上昇に伴って次第に右に移動し，加工前の被削材の粒径分布に近づく。これ

Fig. 5 Cumulative logarithmic normal distribution lines of diameter of proeutectic Si particles in chips at various heating temperatures (Al-16%Si alloy, $t=0.3$ mm, $v=0.045$ mm/s).

は加熱温度が高いほど切りくず中に含まれる初晶粒子の粒径が大きくなることを示しており、せん断域で破碎されずに通過する初晶粒子の個数は加熱温度の上昇に比例して多くなることがわかる。

以上のことから、低温域での初晶粒子は切削により破碎されて鋭利な形状となるものが多く、かつそこでの母材保持力が強いいため工具に強く押付けられることによって工具摩耗が激しく進行すると考えられる。逆に、高温域では初晶粒子はほとんど破碎されず、また母材の軟化によって母材保持力が低下するため、機械的摩耗の割合は低温域より小さくなることは容易に推察できる。

5. 切削抵抗に及ぼす加熱温度の影響

Fig. 6 は Al-16%Si 材を 0.045 mm/s にて切削したときの主分力を加熱温度に対して整理した一例である。なお、図中には純 Al 焼なまし材（純度 99.99%）の切込み 0.3 mm における結果も併せて示している。加熱温度の上昇と共に主分力は顕著に減少し、その減少割合は切込みが大きいほど大きく、また再結晶温度を越えると切込みの違いによる主分力の差はなくなる。切削抵抗の減少は純 Al においても認められることから、その減少は母材の軟化による流動応力の低下に起因していると考えられる。

各被削材における主分力を切込み 0.2 mm、切削速度 1.9 mm/s の切削条件で所定の加熱温度ごとに測定し、得られた値を Fig. 2 に示した初晶粒子の面積率により整理したのが Fig. 7 である。室温から 470 K における主分力は初晶粒子の面積率が大きくなると顕著に低下する。これは本研究の目的からは少し離れるが、以下のように説明できる。初晶粒子の面積率の増大は上述したように初晶粒子の平均粒径とその個数に明確な増加を伴う。これらの増加は初晶粒子間相互の平均距離（相対距

Fig. 6 Effects of heating temperature on principal cutting force at various depths of cut (Al-16%Si alloy and pure Al, $v=0.045$ mm/s).

Fig. 7 Effects of percent area of proeutectic Si particles on principal cutting forces in Al-Si alloys at various heating temperatures ($t=0.2$ mm, $v=1.9$ mm/s).

離)の低下をもたらし、初晶粒子周囲の応力分布の相互干渉あるいは重ね合わせにより、実際の応力集中度は増加すると考えられる。また、被削材の平均ひずみが同じ場合、面積率の大きい被削材ほど母材、すなわちマトリクスの体積率は減少するから、そこでのマトリクスが受ける真ひずみは大きくなる。さらに、相対距離の低下は各初晶粒子周囲に発生する空洞が合体する確率を上昇させ、結果的にはマトリクスの巨視的なせん断ひずみは増加する。したがって、初晶粒子の面積率の増加は切削抵抗を支配する因子のうちの主として材料のねばりの低下、すなわち被削材の脆化をもたらし、そのため切削抵抗が低下したと説明できる。

さて、加熱温度が 570 K 以上になると、各被削材における主分力は加熱温度の上昇と共に顕著に低下し、また低温域では明確であった面積率の違いによる主分力の差は小さくなる。これらは加熱温度が再結晶温度以上となると、母材の軟化が急速に進行し、主分力が加熱温度に対応した母材の流動応力に依存した値をとるためと説明できる。ここで示した主分力の低下は母材保持力の低下に対応し、工具摩耗に及ぼす機械的摩耗の影響を低減させることを示している。しかし、過度の加熱温度の上昇は凝着摩耗を増大させる危険性を含んでおり、Fig. 7 の主分力の低下挙動に Fig. 5 の初晶粒子の微細化の程度を考え合わせれば、工具摩耗を軽減させる適切な加熱温度が求められると推察される。

6. 切削機構に及ぼす加熱速度の影響

各切削条件における切削抵抗値と切りくず厚さより、

Fig. 8 Effects of heating temperature on friction angle β , shear angle ϕ , $\omega (= \phi + \beta - \alpha)$ and shear stress τ_s on shear plane (Al-16%Si alloy, $t=0.2$ mm, $v=1.9$ mm/s).

二次元切削理論を用いてせん断角等を算出し、それらに及ぼす加熱温度の影響を調べた。Fig. 8はせん断角 ϕ 、摩擦角 β およびせん断面上せん断応力 τ_s に及ぼす加熱温度の影響を調べた結果の一例である。加熱温度の上昇により、 β は漸増し、 ϕ および τ_s は減少するが、再結晶温度以上になると β および ϕ はほぼ一定値に近づく。

β の漸増、 ϕ の減少については以下のように考えられる。せん断域の被削材にせん断すべりを起こすためには、切削力 R_1 のせん断面上の分力 $R_1 \cos \omega$ (Fig. 9 参照) によってせん断面上に生ずるせん断応力が、被削材のせん断変形応力 τ_s に等しいことが必要である。したがって、

$$R_1 \cos \omega = \tau_s b l / \sin \phi \quad (1)$$

が得られる。ここに、 b : 切削幅、 l : 切込み、 $\omega = \phi + \beta - \alpha$ である。切削力 R_1 とつり合う工具に働く切削抵抗 R_2 は

$$R_2 \sin \beta = F \quad (2)$$

であり、すくい面上の摩擦力 F は中山⁽¹⁾により

$$F = b l \bar{\tau}_c = \frac{k_c k_m b t \tau_c \sin \omega}{\sin \phi \cos \beta} \quad (3)$$

と表される。ここに k_c : 真実接触面積と見かけの接触面積との比であり、0.8前後の定数、 k_m : 実際の切りくず接触長さと理論的接触長さの比、 τ_0 : すくい面における被削材のせん断変形応力、 $\bar{\tau}_c$: すくい面上の平均摩擦応力である。式(3)を式(2)に代入し、 $R_1 = R_2$ とするとつ

Fig. 9 Effects of heating temperature on the cutting mechanism of orthogonal hot machining schematically represented using the results in Fig. 8.

り合い条件式として式(4)が得られる。

$$k_c k_m \frac{\tau_c}{\tau_s} = \frac{\sin 2 \beta}{\sin 2 \omega} \quad (4)$$

k_m の成立範囲は明確ではないが、光学顕微鏡によるその場観察の結果 (Fig. 10 参照) では 2.5~2.6 と計算され、加熱温度の影響を受けず、ほぼ一定値をとる。ここで、二次元切削では切削速度が小さいため、すくい面と被削材の摩擦による温度上昇およびせん断域における変形仕事による温度上昇はいずれも少ないと推察される。また、すくい面では工具への伝熱があるため、すくい面と接する被削材の温度はせん断面上のそれより低くなると考えられる。被削材のせん断変形応力 τ_s が Fig. 3 に示した硬さと同様に温度に依存して単純に減少するとすれば、すくい面の温度の方が若干低いため τ_c が τ_s より大きくなり、加熱温度の上昇と共に式(4)左辺における τ_c/τ_s は増加する。 k_c および ω は被削材を加熱した場合においてもほぼ一定と考えられるから、 τ_c/τ_s の増加は式(4)右辺の β の増加、さらには $\omega (= \phi + \beta - \alpha, \alpha$: 一定) が一定値をとることより ϕ の減少をもたらす。

Fig. 9 は Fig. 8 の数値をもとにせん断面とすくい面に働く力のつり合いを模式的に描いたのである。実線は室温、一点鎖線は 670 K における結果をそれぞれ用いた。なお、670 K における R'_1 の作用点はせん断面の中央にあるべきであるが、ここではすくい面側の各分力の変化挙動を明確にするため、便宜上図のようにした。加熱温度が 670 K まで上昇すると、主分力 F_p の半減、 β の増加および ϕ の減少が観察される。仮に、 β および ϕ の変化を無視すれば、Fig. 9 中の工具に働く力 R_2 は R'_2 となり、工具に働く力の方向は変わらない。しかし、 β および ϕ の挙動は上述した通りであり、またすくい面上の摩擦力 F の挙動は Fig. 10(a), (b) に示したその場観察の結果より以下のように推定される。Fig. 10において切りくずの排出形態に注目すると、低温域ではすく

Fig. 10 In situ optical micrograph of chip formation in orthogonal hot machining. (Al-23%Si alloy, $t=0.06$ mm, $v=0.045$ mm/s), (a) $T_w=300$ K, (b) $T_w=670$ K.

い面上で大きくカールしている切りくずは、高温域では加工硬化が起こらないためすくい面に平行に生成するようになる。このことはすくい面上での切りくずの接触長さ l_c が増加することを示し、式(3)より明らかなように F に影響を及ぼす。すなわち、加熱温度が上昇すると τ_c は単純に減少傾向を示すが、 l_c は増加する。したがって、この l_c の増加は F の減少傾向を鈍化させるため、 F は F' まで減少せず、 F'' 付近の値をとると推察される。以上のような F 、 β および ϕ の変化を考慮に入れると、 R_2 は R_2'' まで変化すると考えられる。

以上のことから、 β の増加は τ_c/τ_s の増加および切りくずの排出形態の差異による F の増加に起因することが明らかとなった。したがって、数式上では τ_c/τ_s が変化し、現象的には切りくずと工具すくい面との接触長さが増加するため β が増加したと説明できる。

7. 結 言

過共晶 Al-Si 合金中に 770 K までの低速二次元加熱切削を施し、以下に示す結論が得られた。

(1) 用いた被削材の再結晶温度は約 600 K であり、被削材中のけい素含有率が増加すると、面積率、初晶粒子の粒径および個数は直線的に増加し、切削抵抗は低下する。

(2) 初晶粒子は低温域での切削により破碎および微細化され、機械的摩耗が増大して工具摩耗を促進させる。

(3) 加熱温度を上昇させると母材の流動応力および初晶粒子に対する母材保持力が低下するため、初晶粒子の微細化の程度は低下し、切削抵抗は減少すると共に、初晶粒子が工具摩耗に及ぼす影響を軽減させる。

(4) 加熱温度の上昇により、すくい面上の平均摩擦角は漸増し、せん断角は減少する。これは工具すくい面と被削材のせん断面との温度差によって生ずる τ_c/τ_s の増加、および被削材が加工硬化しないため、すくい面上での切りくずの接触長さが増加することに起因している。

最後に、本研究を進めるにあたり試料を提供して下さいました昭和アルミニウム株式会社並びに同社研究開発部佃市三氏、および熱心にご協力いただいた当時大阪大学工学部学生浜浩三君、水野成夫君、堀内俊宏君ならびに上坊貴博君に対して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 財満鎮雄, 高辻雄三, 能登谷久公, 伊藤年秀: 日本金属学会誌, **40** (1976), 154.
- 2) 財満鎮雄, 高辻雄三, 後藤信孝: 日本金属学会誌, **41** (1977), 1221.
- 3) 高田孝次, 佐藤 仁, 田辺郁男: 昭和60年度精機学会春期大会学術講演会論文集, (1985), 591.
- 4) 財満鎮雄, 八木博行, 服部 聡: 日本金属学会誌, **41** (1977), 956.
- 5) 古市亮蔵, 玉村謙太郎: 精密機械, **32** (1966), 558.
- 6) 財満鎮雄, 武田裕久, 森下 定: 日本金属学会誌, **38** (1974), 609.
- 7) 江田 弘, 貴志浩三: 日本金属学会誌, **38** (1974), 800.
- 8) 臼井英治, 帯川和之, 白樫高洋: 精密機械, **46** (1980), 849.
- 9) 岩田一明, 上田完次, 柴坂敏郎: 精密機械, **43** (1977), 311.
- 10) A. Hald: Statistical Theory with Engineering Applications, John Wiley & Sons, Inc., (1965), 159.
- 11) 中山一雄: 切削加工論, コロナ社, (1978), 117.