研究論文

Si 粒子分散型アルミニウム粉末押出材の製造 およびその摺動特性

藤田 達生*・清田 文夫*
平野 忠夫**・小島 陽***

Production and wear characteristics of Si-dispersed
aluminum composite prepared by powder extrusion

Tatsuo FUJITA*, Fumio KIYOTA*
Tadao HIRANO** and Yo KOJIMA***

Al-Si-X composites containing dispersed Si particles were prepared by powder extrusion. Wear characteristics of the composites were investigated by a pin-drum type wear testing machine under the lubricated of compressor oil. The wear resistance of the composites is extremely higher than that of the base material because of its large Si particles. In the case of the Si-dispersed composites, wear resistance increases with increasing of the hardness (strength) of the composites.

Keywords: composite, aluminum powder, powder extrusion, wear, Al-Si-X alloy

(Received May 26, 1987)

1. 緒 言

過共晶 Al-Si 合金は、硬度の高い初晶および共晶 Si が存在するために摺動特性に優れ、また、Si を多量に含むために熱膨張係数が小さく、自動車部品やコンプレッサ部品に多用されている。ところが、ほとんどのものは casting 法によって製造されているため、偏析あるいは引け巣の発生という製造上の問題で添加する Si 量に制約がある。また、あまり Si を多量に添加すると初晶 Si が粗大化し、機械的特性、切削性に悪影響を及ぼすという欠点がある。

これらの欠点を補うために粉末冶金の手法の応用が研究されている。粉末冶金の手法では、溶湯を細かい粉末状態に凝固させることにより冷却速度が通常の casting 法に比較して非常に大きくなるため、組織を微細均一とすることができるといふ大きな特徴がある^{1),2)}。このため機械的特性が向上することはもちろんであるが、 casting 法で

実施できる範囲を超えて、多量の Si の添加が可能であり、また、 casting 法では有害となるような Fe, Ni 等の遷移金属を多量に添加しても、微細な金属間化合物として分散するため、新たな機能を付与することも可能である。このような特徴を利用して、摺動特性や特に高温での強度の向上、および熱膨張係数の低減を図った材料が開発されている^{3)~5)}。

ところが、晶出している Si 粉子は、相手材の表面粗さに比較してある程度以上の大きさでないと耐摩耗性への寄与が少ないという実験結果⁶⁾もあり、使用される条件によっては、組織が微細なためにかえって摺動特性が不十分となる場合がある。そこで、比較的大きな硬質相が分散した組織となるように、アトマイズした合金粉末に Si 粉末 (-325 メッシュ) を添加混合し、これを熱間押出加工した Si 粒子分散型複合材料を製作し、摺動特性を調査した。比較のために、Si 粉末を添加していない粉末押出材および casting 法による過共晶 Al-Si 合金につ

* (株)リケン (柏崎市)。Riken Corp. (Kashiwazaki)。

** 昭和電工(株) (秩父市)。Showa Denko K.K. (Chichibu)。

*** 長岡技術科学大学 (長岡市)。The Technological University of Nagaoka (Nagaoka)。

いても同時に試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 粉末押出材の製造方法

Fig. 1 に製造工程のフローチャートを示す。所定組成に調整したアルミニウム合金溶湯をガスアトマイズ法により 10^2 K/s 以上の冷却速度で凝固させ粉末とした。アトマイズガスとしてちっ素を用い、キャリアガスとして空気をを用いた。このため得られる粉末は、液滴表面の酸化により球状化が妨げられ、不規則形状となっている。

このアルミニウム合金粉末と、試薬として市販されている Si 粉末 (−325 メッシュ) とを V コーンにより 30 分間混合した。これを、通常用いられている金型成形法により、温度 150°C 、圧力 1000 kgf/cm^2 の条件で一軸加圧成形し、外径 87 mm、長さ 350 mm の押出用ビレットとした。ビレットの密度は、真密度比 (ρ/ρ_0) で約 70% であった。

これを雰囲気下で $400\sim 450^\circ\text{C}$ に加熱し、同じ温度に保持された押出機のコテナ (コテナ内径 90 mm) に挿入し、押出比 15~25 で熱間押出加工を実施した。予備成形されたビレットは、この熱間押出加工により空隙のない均一な焼結体となった。得られた材料を T6 (溶体化処理: $480^\circ\text{C}\times 3$ 時間→水冷, 時効硬化処理: $175^\circ\text{C}\times 10$ 時間→空冷) あるいは O 処理 ($350^\circ\text{C}\times 10$ 時

間→炉冷) を施し、機械加工の後に試験に供した。今回の試験では、熱膨張係数を小さくするために Si を添加し、さらに強度を向上させるために、時効硬化成分である Cu, Mg および分散強化に効果のある Fe を添加した合金とした。用いたアトマイズ合金粉末の化学組成を **Table 1** に示す。

2.2 摩耗試験

ビンードラム式摩耗試験機により耐摩耗性の評価を実施した。これはロータリー式コンプレッサーに用いられる、ペーンの材料評価に良く用いられる方法である。試験機の概要を **Fig. 2** に示す。機械加工により粉末押出材を、荷重方向に垂直の断面が $5 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}$ の角形状とし、摺動する先端部を R 6 mm の半円状に加工したピンとし、これを外径 45 mm の焼入れ、焼戻した FCD70 製ドラム (硬度 HRC~48) の外周に一定荷重で押しつけ、150 km の距離を摺動させた後の摩耗痕幅で耐摩耗性を比較した。試験に用いたピンおよびドラムの表面粗さは、研磨によりどちらも $R_{\text{max}} 0.8\sim 1.2 \mu\text{m}$ に調整した。荷重は 15 kgf (または 5 kgf) とし、摺動速度は $1\sim 10 \text{ m/s}$ とした。潤滑は銅パイプにより、ドラムの外周にかけ流す方式とした。潤滑油はパラフィン系の冷凍機油を使用し、 80°C に予熱したものを毎分 300 cc 供給した。

2.3 引張試験

インストロン型万能試験機を用いて、室温での引張試験を実施した。試験片形状は JIS-14A 号試験片に準じ、平行部の径 6 mm、長さ 50 mm とし、ひずみ速度 $1.67\times 10^{-2}/\text{s}$ で試験を実施した。

3. 結果および考察

3.1 粉末および粉末押出材の組織

Fig. 3 にアトマイズ粉末および粉末押出材の組織の例を示す。(b) は過共晶 Al-Si 組成の合金粉末であるため、比較的大きな初晶 Si および微細な共晶 Si の晶出が認められる。(a) はさらに Fe を 8% 含む組成のため、粉末の状態では (Al-Si-Fe) 3 元系の棒状の金属間化合物が、微細な共晶 Si (および初晶 Si) と共に晶出している。Si を含む金属間化合物の晶出により母相中の Si

Fig. 1 Preparation of specimens.

Table 1 Chemical composition of the atomized powders (wt.%)

	Si	Cu	Mg	Fe	Al
Al-16Si-3Cu-1Mg	15.8	3.1	1.1		bal.
Al-20Si-3Cu-1Mg	20.3	3.2	1.1		bal.
Al-20Si-3Cu-1Mg-5Fe	20.3	3.0	1.2	5.3	bal.
Al-20Si-3Cu-1Mg-8Fe	19.8	3.2	1.0	7.8	bal.

Fig. 2 Schematic diagram of pin-drum type wear testing machine.

Fig. 3 Microstructure of specimens (OM).

- (a) Atomized powder (Al-20Si-3Cu-1Mg-8Fe)
- (b) Atomized powder (Al-20Si-3Cu-1Mg)
- (c) Permanent mold casting (Al-20Si-3Cu-1Mg)
- (d) Powder extruded (Al-20Si-3Cu-1Mg-8Fe)
- (e), (f) Si particle dispersed composite ((Al-20Si-3Cu-1Mg) + 10Si-powder)

濃度が低下し、初晶Siの量は、Feを含まない(b)よりも少なくなっている。(d)に押出材の状態を示すが、微細な共晶Siは押出時の加熱により球状化、粗大化し数 μm の大きさで分散している。一方、金属間化合物は、押出時の加熱によってはほとんど形状は変化しないが、押出時に受ける大きな塑性流動により微細に破碎され数 μm 以下の大きさで均一に分散している³⁾。(e)に示すように、Si粉末をアルミニウム合金粉末に添加、混合して押出した複合材では、微細なSi晶と金属間化合物が晶出したアルミニウム合金基地中に、比較的大きな添加Si粒子がほぼ均一に分散した組織となっている。それでも、(c)の金型鑄造材と等倍率の組織写真(f)で比較すると、初晶Siよりも小さいSi粒子が多いことがわかる。

3.2 粉末押出材の引張特性

Fig. 4に室温での引張試験の結果を示す。耐摩耗性の向上を目的に比較的大きなSi粒子を用いているため、Si粒子の添加により引張強さ、耐力およびここには示さないが破断伸びが低下している。一方、金属間化合物として微細な晶出物を形成し、分散強化に効果のあるFeを添加した材料は、添加していない材料に比較して強度に優れていることがわかる。特にFeを添加していない材料では、T6処理のものに比較してO処理のもの

Fig. 4 Tensile properties at R.T..

は強度が大きく低下しているのに対して、Feを添加した材料はT6処理のものとの強度の差が小さい。金型鑄造材に比較すると、粉末押出材はもちろん、比較的大きなSi粒子を分散させた複合材でも大幅な強度の向上が認められる。

3.3 粉末押出材の耐摩耗特性

ここでは、耐摩耗性の尺度として摺動試験後に生じるピン側の摩耗痕幅を用いた。Fig. 5に荷重5kgでのSi粒子を分散していない粉末押出材の結果を、金型鑄造法

Fig. 5 Width of wear vs. sliding speed for extruded powders or permanent mold casting at load of 5 kgf and sliding distance of 150 km under oil lubrication.

- Al-20Si-3Cu-1Mg
- ▲ Al-20Si-3Cu-1Mg-5Fe
- Al-20Si-3Cu-1Mg-8Fe
- Al-20Si-3Cu-1Mg (Permanent mold casting)

Fig. 6 Width of wear vs. sliding speed for extruded powders or composites at load of 15 kgf and sliding distance of 150 km under oil lubrication.

- ▲ Al-20Si-3Cu-1Mg-5Fe
- Al-20Si-3Cu-1Mg-8Fe
- Al-20Si-3Cu-1Mg+10Si-powder
- Al-20Si-3Cu-1Mg-8Fe+10Si-powder

による過共晶 Al-Si 合金材料と比較して示す。金型鑄造材は摺動速度にかかわらずほぼ一定の摩耗痕幅となり、安定して良好な耐摩耗性を示す。一方、Si 粉末を添加していない粉末押出材は組織が微細なために、かえって金型鑄造材よりも摩耗が多く、特に 1~3 m/s の低速領域および 10 m/s の高速領域での摩耗が多い。Fig. 6 に荷重 15 kgf での Si 粉末を添加した Si 粒子分散型複合材料の結果を、Si 粉末を添加していない粉末押出材の結果と比較して示す。Si 粉末を添加していない粉末押出

Fig. 7 Width of wear vs. hardness (HRB) for composites at load of 15 kgf, sliding speed of 1 m/s, and sliding distance of 150 km under oil lubrication.

- (Al-(16,20)Si-3Cu-1Mg)+(5,10)Si-powder
- (Al-20Si-3Cu-1Mg-(5,8)Fe)+(5,10)Si-powder
- △ Al-20Si-3Cu-1Mg (Permanent mold casting)

材は、荷重 5 kgf の時よりもさらに大きな摩耗痕幅を示すが、比較的大きな硬質相が分散した組織となっている Si 粒子分散型複合材料では、速度による影響も小さく、耐摩耗性が大幅に向上していることがわかる。Fig. 7 に、荷重 15 kgf、摺動速度 1 m/s の条件で試験した Si 粒子分散型複合材料の摩耗痕幅と硬度の関係を示す。Si 粒子の添加量が 5 % と 10 % では添加量による耐摩耗性への影響は明確でなく、また、合金元素 Fe の添加量および熱処理の種類の影響も硬度（強度）への効果として整理でき、硬度（強度）の高い材料ほど耐摩耗性に優れていることがわかる。

3.4 摺動面観察

Fig. 8 に、Si 粒子分散型複合材料および Si 粒子を添加していない粉末押出材の、摺動速度 1 m/s~10 m/s での試験後のピン摺動面状況の例を示す。Si 粒子を添加していない粉末押出材の場合、均一な摺動傷の発生が認められるが、摺動速度の大きなものほど摺動傷も深くなっている。Si 粒子分散型複合材料の場合、摺動表面には分散させた比較的大きな Si 粒子が露出しているのが観察される。また、試験後の摺動面は比較的滑らかであり、そのなかに大きな摺動傷の発生が認められる。この大きな摺動傷は摺動速度の大きいものほど数が多い。一方、摺動速度の低いものには、露出している Si 粒子の周囲の基地のはく離が認められる。Fig. 9 にこの時のドラム側の摺動面状況の例を示す。いずれの試験でも、ドラムは摺動後も試験前の粗さとほとんど変りなく、試験前の研削目がそのまま残っている。Fig. 10 に金型鑄造材および Si 粒子分散型複合材料の T6 および O 処理における摺動面の例を示す。表面に露出している初晶およ

Fig. 8 Optical micrographs of sliding surfaces of extruded powder and composite at load of 15 kgf, and sliding distance of 150 km under oil lubrication.

(A) Composite ((Al-20Si-3Cu-1Mg-8Fe)+10Si-powder)

(B) Powder extruded (Al-20Si-3Cu-1Mg-5Fe)

Fig. 9 Example of sliding surfaces of drum. (a) Roughness before (A) and after (B) test, (b) Optical micrograph after test.

び分散させた Si 粒子には摺動により傷の発生が認められる。また、摺動により分断された Si 粒子および Si 粒子の脱落した痕と思われる空隙も観察される。大きな摺動傷は、摺動方向に縦断しているものもあるが、摺動面上の Si 粒子または Si 粒子の脱落したと思われる空隙から発生しているものもある。このことより、この摺動傷は、Si 粒子が母材を引っかきながら脱落することにより生じたものと考えられる。

Fig. 10 Optical micrographs of sliding surfaces of composite or permanent mold casting at load of 15 kgf, sliding speed of 1 m/s, and sliding distance of 150 km under oil lubrication.

(a) Composite ((Al-16Si-3Cu-1Mg)+10Si-powder) (T6: H_RB80)

(b) Composite ((Al-16Si-3Cu-1Mg)+10Si-powder) (O: H_RB40)

(c) Permanent mold casting (Al-20Si-3Cu-1Mg) (T6: H_RB84)

(d) Permanent mold casting (Al-20Si-3Cu-1Mg) (O: H_RB22)

Si 粒子が分散したアルミニウム合金材料の摩耗機構を考えると、表面に露出した Si 粒子が負荷を支えているが、これが分断、脱落することにより摩耗が進行

するものと推定される。この時、摺動面の観察からもわかるように、脱落する Si 粒子は基地を引っかいていくため、基地の強度が高いほど Si 粒子の脱落に対する抵抗が大きくなるものと考えられる。また、大きい粒子ほど脱落するために必要な基地の塑性変形量が大きく、脱落に対する抵抗が大きいために脱落しにくく、ある程度以下の大きさに分断されたものが脱落するものと考えられる。そのため、初期の Si 粒径がある程度以上大きくないと耐摩耗性への効果が小さいものと考えられる。また、基地の強度が高いほど Si 粒子の分断が起こりにくく、一層耐摩耗性に有利に働くものと考えられる。

本実験では硬度(強度)の高いもののほど耐摩耗性に優れるという結果になったが、鋳造法による共晶、過共晶 Al-Si 合金を用いた摺動試験で、硬度の低い O 処理材の方が耐摩耗性に優れているという報告⁷⁾がある。これは試験条件(摩耗機構)に差があること、O 処理材の硬度自体も本実験で扱っている硬度範囲よりもかなり低いことなどによるためと考えられる。

また、基地中に Fe を多量に含む合金系では、O 処理時の硬度(強度)低下が小さいために、使用時の摺動熱等の熱履歴による特性の劣化が小さいことが期待され、長期間、安定した摺動特性を示すものと考えられる。このような合金系は、粉末冶金的手法を用いることにより初めて実現することができ、また、粉末冶金的手法を用いれば粒子分散型複合材料の製造は比較的容易であり、添加する硬質粉として多くのものが考えられる。今回は

鋳造合金の延長上にある Si 粒子分散型複合材料についての摺動特性について試験したが、今後、種々のセラミックス等の硬質粒子を添加した複合材料についてその特性を試験する必要がある。

4. 結 言

Al-Si-X 系アルミニウム合金粉末に Si 粒子を添加、混合して製作した、Si 粒子分散型複合材料の摺動特性について試験を行った。この結果、次のようなことがわかった。

(1) Si 粉末を添加していない粉末押出材は、同様組成の鋳造材に比較して、機械的特性にはすぐれるものの、今回のような条件下では耐摩耗性が十分ではない。

(2) Si 粉末を添加して Si 粒子分散型複合材料とすることで、耐摩耗性を大幅に向上することができる。

(3) Si 粉末を添加した Si 粒子分散型複合材料の場合、基地の硬度(強度)が高いほど耐摩耗性も高い。

参 考 文 献

- 1) 鈴木, 菅野, 林: 軽金属, **32** (1982), 32.
- 2) 平野: 素形材, **3** (1985), 16.
- 3) 藤田, 平野: 工業材料, **32**(13) (1984), 32.
- 4) 藤田, 清田, 平野: 軽金属学会第70回春期大会講演概要集 (1986), p. 109.
- 5) 平野, 藤田: 軽金属学会第30回シンポジウムテキスト (1987), p. 75.
- 6) (株)リケン: 未発表データ.
- 7) 山田, 田中, 大塚: 軽金属, **37** (1987), 83.