

粉末液相成形法によるアルミニウム基複合材料の
製造とその特性 (第2報)
SiC粒子/6061アルミニウム合金複合材料への適用
*Fabrication and Properties of Aluminum Matrix
Composite by Powder Liquid Forming Technique
(2nd Report)*
*Application to SiC Particle/6061 Aluminum Alloy
Matrix Composites*

宮田 良雄* 白川 信彦* 和田林良一*
Yoshio Miyata Nobuhiko Shirakawa Ryoichi Wadabayashi

(1998年10月14日 受理)

For manufacturing high-strength light metal composites, SiC/6061 aluminum alloy composites were fabricated using a powder liquid forming (PLF) technique, and the compactability in preforming process and in the PLF process were examined. After subsequent heat treatment, deformability in upsetting process and mechanical properties of the PLF products were investigated.

In case of PLF process, the relative density of the composites reached to 1.0 and distribution of SiC particles was almost uniform, regardless of the volume fraction of particles.

Chemical composition of the PLF products was almost same as that of used raw 6061 powder, and heat treatment could be applied as well as commercial aluminum alloys. Deformability in upsetting process was deteriorated by adding SiC particles. Tensile strength and hardness increased with the increase in the volume fraction of the SiC particles, but elongation decreased. Sheet metal obtained by rolling of the PLF composites could be formed in deep drawing or bulging, but the deformability was inferior to that of continuous casting 6061 alloy.

キーワード：粉末液相成形法，複合材料，6061アルミニウム合金粉末，炭化珪素粉末

1. はじめに

粉末液相成形法は、常温で予備成形した圧粉体をその液相温度まで加熱して加工する方法で、特に粒子分散型複合材の製造方法として有効である。前報¹⁾では純アルミニウム粉末に炭化珪素粒子を複合強化材として添加し、強化材の均一な分布と複合材の高密度化に対するこの加

工法の有効性を明らかにした。

近年、高強度部品の軽量化にアルミニウム合金が使用されることが多いが、これをマトリックスとする複合材を製造する場合、比較的変形抵抗が高いことや、成形後に熱処理が施されることなど、純アルミニウムの場合と異なる状況が予想される。そこで、一般によく用いられるAl-Mg-Si系の6061合金粉末と炭化珪素粉末に対して本法を適用し、高強度軽合金複合材料の製造を試み、その成形性と性状を調査したので報告する。

* 生産技術部 塑性加工グループ

2. 実験方法

(1) 供試粉末と粉末予備成形条件

供試粉末として6061合金(以後,合金と称す)と炭化珪素(SiC)(-400メッシュ)を使用した. 表1に合金粉末の化学組成と粒度分布を, 図1にそれらの粒形写真を示す.

表1 化学組成と粒度分布
Chemical composition and particle size distribution

化学組成 (mass%)							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn+Ti	Al
0.69	0.23	0.22	0.02	0.89	0.12	0.02	残部
粒度分布 (mass%)							
45 μm以下		45~63 μm			63 μm以上		
72.8		26.7			0.5		



図1 供試粉末の粒形写真
Scanning electron micrograph of powder used

粉末粒子の形状は, 合金粉末はやや扁平で丸みを帯びた形状であり, SiC粉末は角張った形状を呈している.

合金粉末に対するSiC粉末の添加割合は, 0, 10, 20 mass%(以後, massの表示は省く)の3種類とした. 両粉末を秤量後, 超小型V型混合機で乾式にて3.6ks混合し, 粉末予備成形に供した.

粉末予備成形は, 30トン万能材料試験機を使用し, 混合粉末20gをダイ・キャビティ内に入れ, 常温にてそれぞれ29.4, 49.0, 78.4, 117.6, 147.0kNの加圧力で円柱形状(φ25.4mm)に圧縮成形した. この時の潤滑剤は, エチルアルコールに分散させたステアリン酸カルシウムを使用し, ダイ内面に刷毛塗りをした.

各条件下で成形した圧粉体の密度を測定し, 相対密度がほぼ同一(0.8)になるように予備成形での加圧力を決定した. なお相対密度は, 圧粉体の測定密度を混合粉末の理論密度(合金; 2.70g/cm³, SiC; 3.17g/cm³の完全混合物として重量比率で計算した値)で除して求めた.

(2) 粉末液相成形条件

粉末液相成形には粉末予備成形と同じ30トン万能材料試験機を使用し, 金型は粉末予備成型用金型と同様の円柱形状(φ25.4mm)とし, コイニング形式で密閉型成形ができる構造とした.

水性黒鉛潤滑剤を塗布した金型内に相対密度が0.8になるように予備成形した試料を挿入し, 金型ごと箱形加

熱炉に入れて, 大気雰囲気中にて加熱を行った. 成形温度は合金の液相線温度(927K)を境に723Kと933Kの2条件とし, この温度で1.8ks保持後49.0, 78.4, 98.0, 117.6, 137.2kNの荷重にて成形を行った.

(3) 粉末液相成形品の性状

粉末液相成形品の性状を明らかにするため, 933Kでの成形品についてその変形能, 機械的性質および板材としての二次加工性について調べた. なお, 比較のために6061連続鋳造材(以後, CC材と称す)についても調べた.

変形能は, 特殊鍛造試験機(ボードドロップハンマ)を用いて鍛造温度723Kにて自由据え込みを行い, 試料側面での割れの有無で判断した. また, 機械的性質と板材としての成形性を調べる目的で, 成形品を圧縮・圧延にて直径約65mm, 板厚約1.6mmの円板に加工した. この円板からワイヤーカット放電加工機にて標点間距離20mm, 巾7.5mmの引張試験片を切り出し, インストロン材料試験機を用いて引張試験を行った. なお深絞り, 張出し用試料は円板のまま使用した. また各試験片は表2に示す条件で熱処理を行った. 深絞り試験および張出し試験は表3に示す条件で行い, 張出し試験にはエリクセン試験工具を用いた.

表2 熱処理条件
Heat treatment condition

調質	処理条件
O	688K×10.8ks後, 炉冷
T4	溶体化処理 823K×5.4ks後, 水冷 時効処理 常温×345.6ks

表3 深絞りおよび張出し試験条件
Deep drawing and bulging test condition

深絞り試験		張出し試験	
ボ ン チ	φ40×R4,R8	張出し速度	5mm/min.
ダ イ ス	φ45×R10	ブランク	
潤 滑	白色ワセリン	締め付け荷重	10KN
絞 り 速 度	11~12mm/min.	潤 滑	白色ワセリン
しわ押さえ力	1.0KN		

3. 結果および考察

(1) 粉末予備成形

図2に圧粉体成形時の各SiC粉末添加量での相対密度と成形圧力の関係を示す. 図中には純アルミニウム粉末を母材とした場合の結果¹⁾についても併記した.

いずれの場合も, SiC粉末の添加量に関わらず成形圧力の増加にともなって相対密度は上昇した. また, 同一成形圧力で比較すると, 添加量の増加にともなって相対密度は低下した. これは, SiC粉末の変形抵抗が合金粉末と比較して高いためであると考えられる. また,

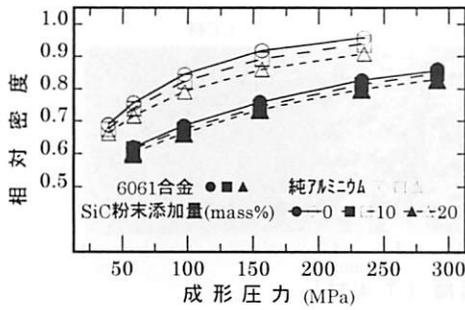


図 2 相対密度と成形圧力の関係
Relation between relative density and compacting pressure

純アルミニウム粉末の場合と同一成形圧力で比較すると添加量の多少に関わらず合金粉末の方が相対密度は低い値を示した。供試粉末の硬さ測定(11点平均)では、合金粉末はHv(0.01)67.3, 純アルミニウム粉末はHv(0.01)25.2で、この硬さの差が変形抵抗に影響し密度の差となって現れたものと察せられる。また常温圧縮による成形では、成形圧力ある程度以上に上げて密度の上昇は見られず、本合金の場合の相対密度は、約0.8が限界となることが判った。

(2) 粉末液相成形

図3に予備成形品を723Kおよび液相線温度以上の933Kで加圧成形した場合の相対密度と成形圧力の関係を示す。

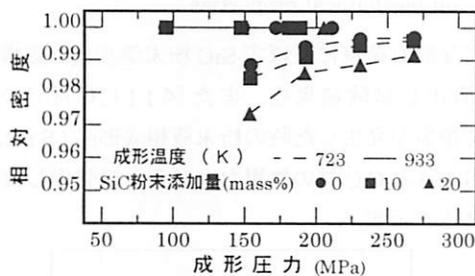


図 3 相対密度と成形圧力の関係
Relation between relative density and forming pressure

成形温度が合金の液相線温度以下(723K)では、成形圧力の増加にともなって相対密度は上昇したが、相対密度を1.0まであげることが極めて困難であった。また同一成形圧力で比較すると、SiC粉末の添加量の増加にともなって相対密度は低下する傾向が認められた。これは、常温での予備成形の場合と同様でこの温度では合金粉末は固体であり、変形抵抗の高いSiC粉末粒子が合金粉末粒子の変形を妨げるために空隙への充満が困難になることに起因するものと考えられる。このことは複合材を従来の粉末鍛造法で成形しても、十分な密度を得ることが困難であることを示している。これに対し、液相線温度以上(933K)での成形では、SiC粉末の添加量に関係なく相対密度は1.0まで上昇した。この温度域では液相状態で加圧されるため、合金表面の酸化膜が破壊さ

れ、液状合金が流出して合金とSiC粉末間の濡れ性が向上することにより高密度化したものと考えられる。この状況は前報¹⁾の場合と同様である。これらのことから、マトリックスとなる金属材料の液相線温度以上で加圧成形すればその金属の合金成分に関係なく常に高密度の複合材が得られるものと思われる。

(3) 粉末液相成形品の性状

表4に粉末液相成形品と溶解材(高周波遠心铸造にて供試粉末の圧粉体を溶解し鑄込んだ試料)およびCC材の化学組成を、図4に粉末液相成形品とCC材についてそれぞれのO材とT4材のX線回折による定性分析結果を、また図5に粉末液相成形品のEDXによる酸素の面分析結果を示す。

表 4 粉末液相成形品と溶解材とCC材相化学組成
Chemical composition of as-PLF and Casting and CC materials

化学組成 (mass%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
成形品	0.63	0.30	0.15	0.01	0.91	0.11	0.00	0.00	残部
溶解材	0.70	0.21	0.15	0.01	0.55	0.12	0.01	0.00	残部
CC材	0.72	0.20	0.21	0.00	0.73	0.16	0.01	0.04	残部

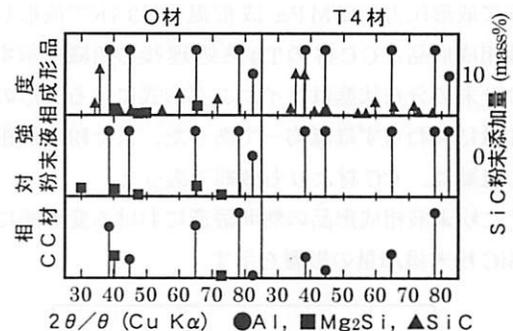


図 4 X線回折による定性分析
X-ray diffraction patterns obtained from specimen

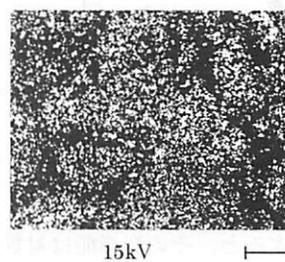


図 5 EDXに結果よる粉末液相成形品の面分析結果(O材)
Result of EDX area analysis at PLF

粉末液相成形品と溶解材の組成を比較すると、Mg量が大きく異なる。すなわち供試粉末に対するMg量の歩留まりは溶解材では約60%となっているのに対し、粉末液相成形品では供試粉末とほとんど変化はなかった。このことから粉末液相成形法は少なくとも見掛け上は、素材の化学組成を損なうことなく成形できる加工法であることが判った。また、X線回折の結果ではSiC粉末

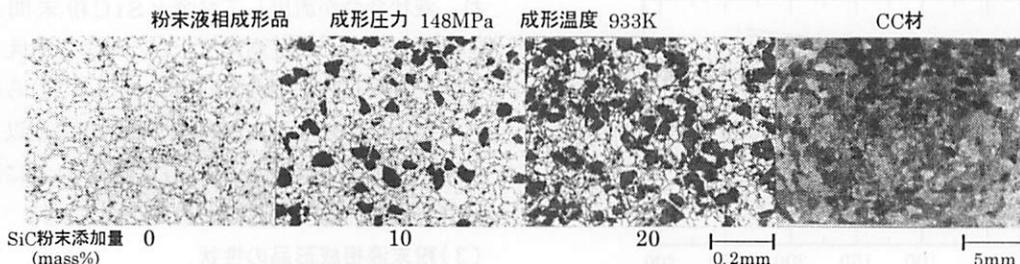


図 6 粉末液相成形品とCC材の組織 (T4材)

Structures of as-PLF and CC materials

添加した粉末液相成形品は、当然ではあるがO材、T4材に関わらず、SiCのピークが存在し、変質は起こっていないことが推察される。また、粉末液相成形品とCC材のいずれも、O材にはMg₂Siのピークが表れたが、T4材ではそのピークが消えており、十分な熱処理が行われているものと考えられる。このことから粉末液相成形品は熱処理においても問題がないといえる。なお、粉末液相成形品は大気中でしかも融点以上での加熱であるにも関わらず、酸化物のピークは現れなかった。しかし、EDXによる酸素の面分析結果から酸素がほぼ均一に分布しており、粉末表面の酸化物が成形中に分散したのと考えられる。

図6に成形圧力148MPa、成形温度933Kで成形した粉末液相成形品とCC材のT4熱処理後の組織を示す。

SiC粉末の分布状態はコイニング形式による成形のため添加量に関わらずほぼ均一であった。また粉末液相成形品の組織は、CC材よりも微細であった。

図7に粉末液相成形品の熱間鍛造における変形能に及ぼすSiC粉末添加量の影響を示す。

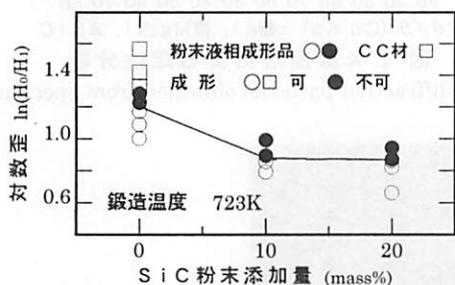


図 7 変形能に及ぼすSiC粉末添加量の影響

Effect of the amounts of SiC-particles on deformability

添加量0%と10%を比較すると、その変形能は対数歪で0.3と大きな差を示しているが、添加量10%と20%ではその差は小さい。なお比較に用いたCC材の変形能は、粉末液相成形品より高い値を示した。

図8にT4材の機械的性質に及ぼすSiC粉末添加量の影響を示す。

添加量の増加にともないほぼ直線的に抗張力と硬さは増加し、伸びは低下した。またSiC粉末を添加しない粉末液相成形品とCC材を比較すると、粉末液相成形品の方が、伸びは若干低い値を示しているが、抗張力と硬さはほぼ同程度の値を示している。また展伸材²⁾の機械

的性質と比較しても遜色がなく、粉末液相成形法で成形した本製品は、十分に満足できる機械的性質を持っていることが判った。

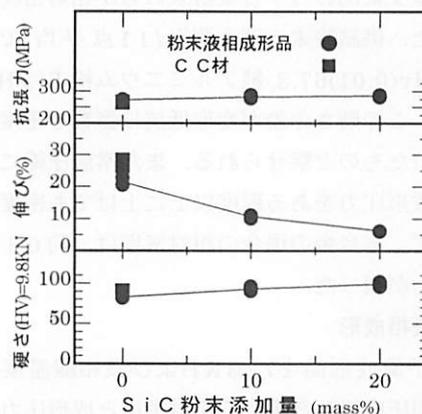


図 8 機械的性質に及ぼすSiC粉末添加量の影響

Effect of the amounts of SiC-particles on mechanical properties

図9に深絞り荷重に及ぼすSiC粉末添加量の影響を、図10に張出し試験結果を、また図11にO材での張出し試験で亀裂が発生した時の粉末液相成形品(SiC粉末添加量0%)とCC材の外観および各々の張出し荷重と張出し高さを示す。

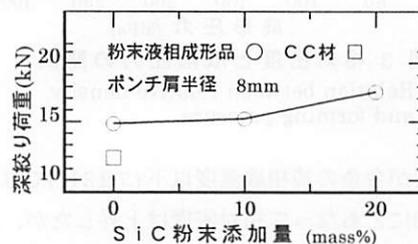


図 9 深絞り荷重に及ぼすSiC粉末添加量の関係 (O材)

Effect of the amounts of SiC-particles on deep drawing pressure

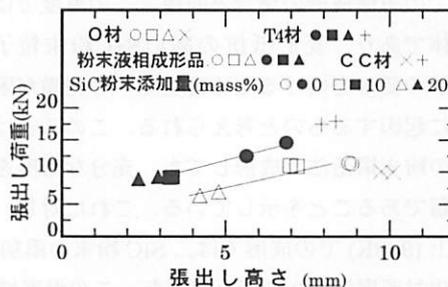


図10 張出し試験結果
Result of bulging test

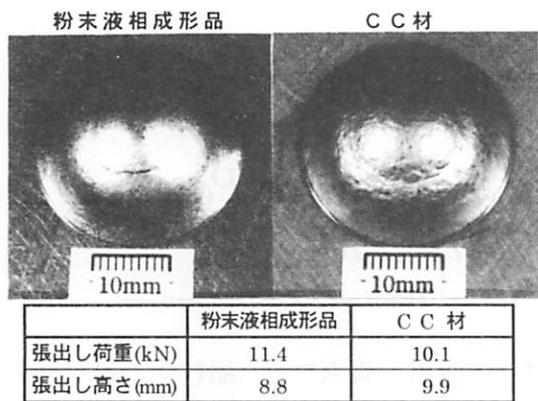


図11 張出し試験後の外観写真 (O材)
Externals photographs after bulging

深絞り試験では、深絞り荷重はSiC粉末添加量の増加にともない上昇した。張出し試験では、その変形能を張出し高さで比較すると、O材、T4材に関わらず、CC材>添加量0%>添加量10%>添加量20%の順に大きい値を示した。亀裂の発生の様子はCC材の場合は延性的に円周方向にくびれているのに対し、粉末液相成形品は脆性的でほぼ直線形状であった。

4. まとめ

アルミニウム合金として一般に用いられている6061合金の粉末にSiC粉末を強化材として添加し、粉末液相成形を行い、以下のことが明らかとなった。

(1)予備成形としての混合粉末の常温圧縮では、成形圧力の増加にともない相対密度は上昇するが、理論密度には達せず相対密度は約0.8が限界である。また同一圧力

で比較すると、SiC粉末添加量の増加にともない相対密度は低下する。なお、合金粉末は純アルミニウム粉末と比較して、同じ相対密度を得るために必要な圧力は高く、圧縮成形性は合金粉末のほうが劣る。

(2)常温圧縮で予備成形した圧粉体の高温成形において、合金の液相線温度以下では相対密度を1.0まであげることができないが、液相線温度以上ではSiC粉末の添加量に関わらずほぼ理論密度に到達する。また粉末液相成形品の組織は微細であり、熱処理が可能である。

(3)SiC粉末を添加しない場合の粉末液相成形品の性状をCC材と比較すると抗張力、硬さでは差がないが、伸びで若干劣る。

(4)強化材としてSiC粉末を添加した粉末液相成形品のSiC粉末の分布状態は、添加量に関係なくほぼ均一であり、また強化材の添加により抗張力や硬さは若干上昇するが、伸びや変形能は大きく低下する。

以上のことから、粉末液相成形品は展伸材やCC材と比較して延性が少し劣るものの、その他の特性はほぼ同等とみなせる。また本法を複合材の製造に適用すれば強化粉末の均一な分布と高密度な成形品が得られ、本法は今後の発展が期待できる加工技術と考えられる。

参考文献

- 1)宮田良雄, 白川信彦, 和田林良一, 大阪府立産業技術総合研究所報告, 11,36(1998)
- 2)アルミニウムの組織と性質, 軽金属学会, 1991,p477