

半溶融鍛造による各種アルミ基複合材料の製造

東京大学生産技術研究所 柳本研究室

1. はじめに

地球にやさしいを合い言葉に、様々な分野で省資源・省エネルギーの取り組みがなされている。自動車産業における軽量化もその一貫であり、鉄系の部品を軽合金やプラスチックあるいは複合材料の部品に置き換えることが進められている。

筆者らは、金属の半溶融（・半凝固）加工の研究を行っているが、合金材料の半溶融状態には、適度な軟質性・流動性・混合性・接合性の点において、固体状態あるいは溶湯状態にはない優れた性質があることを明らかにしてきた。

本稿では、アルミ合金材料の半溶融特性を利用し、鋳造や塑性加工では製造が難しいか全く不可能な各種アルミ基複合材料の製造について示す。すなわち、(a)アルミ合金板の表面に強化粒子（繊維）を直接埋め込む、埋め込み型複合材料、(b)アルミ合金と強化粒子とを用い均一に混合した、均一混合型複合材料、(c)アルミ合金板に強化粒子とアルミ基材との複合材料を積層する、積層型複合材料の製造について示す（図1）。

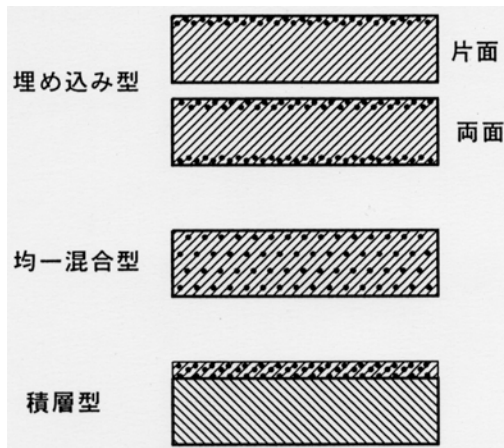


図1 粒子強化複合材料の分類

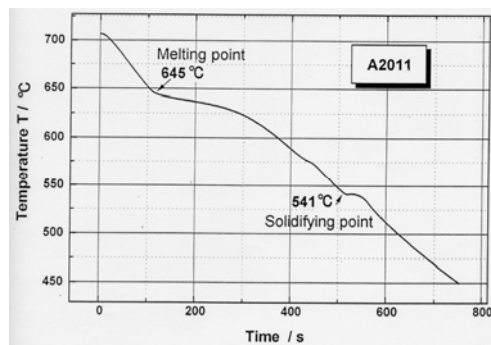


図2 A2011合金の冷却曲線

2. アルミニウム合金の半溶融特性

半溶融温度幅の広狭を問わないならば、合金材料のほとんどが半溶融状態になり得る。ここでは、展伸材の一般的なアルミ合金A2011を取り上げ、半溶融特性について説明する。まず、A2011合金の冷却曲線を図2に示す。図から、A2011合金の凝固開始温度は645°Cであり、凝固終了温度は541°Cであって、従って半溶融温度範囲は約100°Cであることがわかる。JISの2000系、4000系、5000系、7000系アルミ合金の半溶融温度範囲は概略50°Cから100°C程度ある。図3は、A2011合金の固相率と温度との関係ならびに内部組織を示す。図から分かるように、固相率と温度との関係は直線で

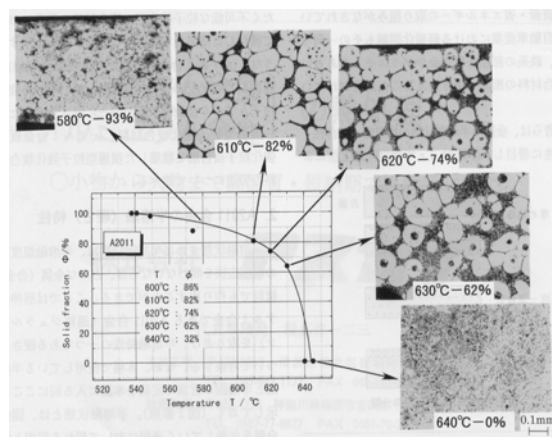
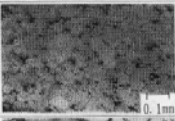

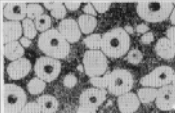

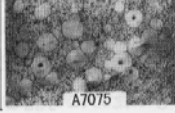


図3 温度と固相率と組織の関係

なく、放物線になっており、固相率が 100%から 80%程度までは、温度の上昇に対して固相率は鈍い変化となるが、固相率が 80%以下では、温度の上昇に対し敏感に変化する。また、内部組織は温度の上昇（固相率の低下）にとともない結晶（固相成分）が球状化し、それが次第に分離していることが分かる。図 4 は、内部組織と人間の手の感触から得た硬さのイメージを対応させて示してある。例えば、固相率が 30%から 70%の内部組織は球状の固相粒が液相中に浮遊した状態となっているが、このような組織の合金は粘土のような硬さとなる。この硬さは、固体状態や溶湯状態では作り出すことができないものであり、半熔融状態においてのみ作り出すことができ、半熔融加工法による複合材料の製造は正にこの特性を利用している。

A2011			
Hardness	Image	Microstructure	Temp. /°C (S. F. /%)
Hard ↑ Soft	Plastics		541~590 (100~90)
	Wood		590~626 (90~70)
	Clay		625~635 (70~50)
	Grease		*(A2011) 635~640 (50~30)
	Viscous fluid		*(A2011) 640~645 (30~0)

3. 表面埋め込み型粒子強化複合材料の製造

表面埋め込み型粒子強化複合材料の製造方法の概略を図 5 に示す。金型またはアルミ合金板上に強化粒子を敷き、アルミ合金を半熔融状態にして加圧する。A2011 アルミ合金板を用いた実験では、温度は 630°C 前後、加圧力は 20MPa であった。埋め込む強化粒子（強化繊維）としては、不定形状のアルミナ粒、アルミナ球、中空アルミナ球、鋼球、鋼短繊維を用いた。

図 6 は直径 32mm、板厚 10mm の A2011 合金の円板の片面に、#80 の球状のアルミナを埋設させた製品の横断面ならびに平面を示す。アルミナ球が表面近傍に二重・三重になって、その間を A2011 合金が隙間なく包み込んでいることがわかる。同様に図 7 は A2011 合金の円板の両面に、太さ 0.1mm から 0.4mm、長さ約 10mm の鋼短繊維を埋め込んだ製品の横断面を示す。この場合もアルミ合金が繊維をほぼ完全に包み込

図 4 半熔融状態の組織と硬さのイメージ

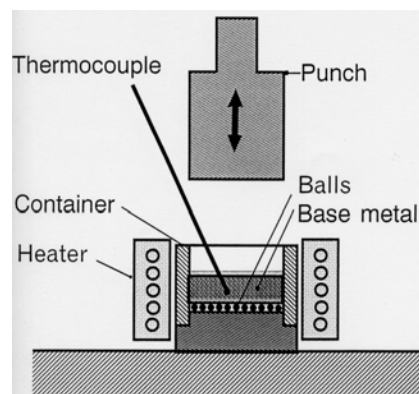


図 5 埋め込み型粒子強化複合材料の製造方法

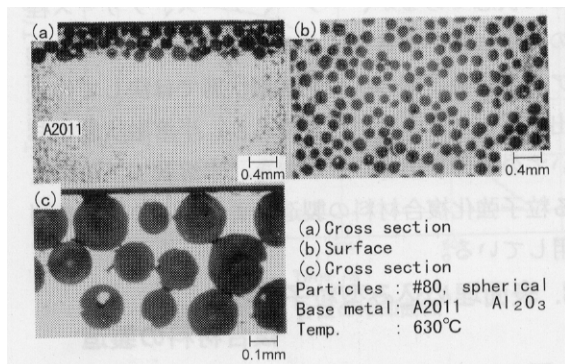


図 6 表面に球状アルミナを埋設した製品例

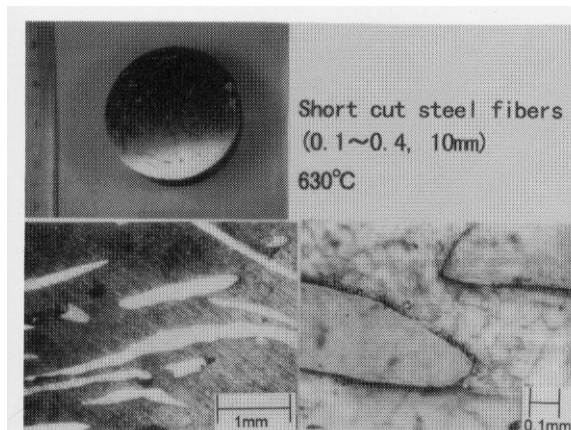


図 7 表面に鋼短繊維を埋設した製品例

んでいることがわかる。一工程で板の両面に強化粒子（繊維）を複合化させることは、アルミ合金が半熔融状態で適度な硬さを持つためにできることで、溶湯状態では難しい。図に示される製品は、表面が硬く、耐摩耗性・耐熱性に優れることから、ブレーキパッドやブレーキシューなどの応用が考えられる。

図8は、直径1mm、2mm、3mmの鋼球を縦横に隙間なく整列させ、A2011合金板表面に埋設し、平面の一部を切削した際の横断面と平面を示す。このような複合材は、強化粒子（この場合鋼球）の大きさや埋め込む間隔を適当に変えることで、複合材表面の摩擦・摩耗特性を使用目的に応じて作り込むことができる。図9は、直径2mmと3mmの鋼球を埋設したアルミ基複合材の摩耗試験結果を示す。比較のために鋼球を埋設しないA2011だけの結果も示す。鋼球を表面に埋設することで、埋設しない場合と比べ、摩耗量が約1/3に減ることがわかる。また鋼球を埋設した複合材料においても、表面に露出した鋼とアルミ合金の面積比によって摩耗量に差が生じている。

図10に示すように、鋼球の頭の一部が金型に残った状態で複合化することにより、図11に示すように、鋼球の一部が表面に飛び出た形の複合材料の製造が可能となる。鋼球でなくても円柱でも可能であり、その後の処理により飛び出た鋼球や円柱は回転させることもできる。このような製品は、ケージ、ローラーウェイ、軸受けなどへの応用が考えられる。

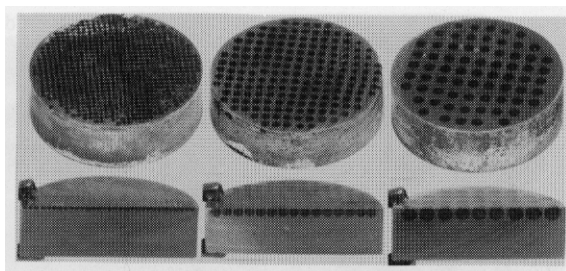


図8 表面に鋼球を整列させ埋設した製品例

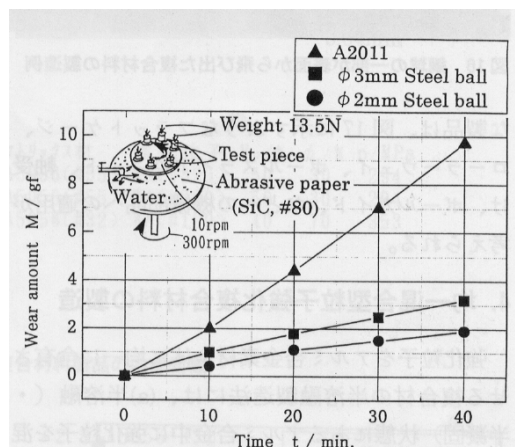


図9 鋼球を埋設した製品の摩耗特性

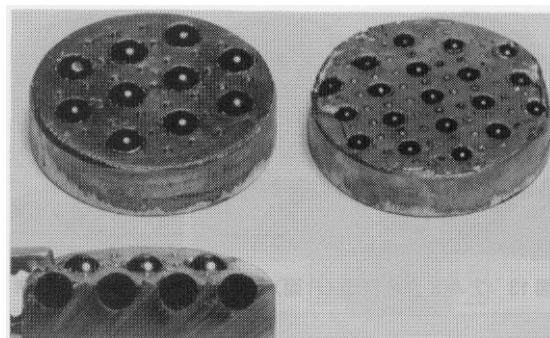
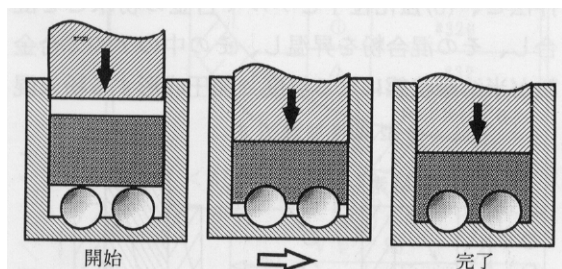


図11 鋼球の一部が表面から露出した複合材料の製品例

4. 混合型粒子強化複合材料の製造

強化粒子をアルミ合金全体に均一に含有させ複合材を製造する方法として、(a)半熔融状態にあるアルミ合金中に強化粒子を入れ攪拌混合し、それを型に入れ加圧成形する方法、(b)強化粒子とアルミ合金の粉末を複合し、その混合粉全体を加熱し、アルミ合金粉が半熔融状態になる温度で加圧成形する方法、がある。図12は上述の(b)による複合材料製造実験の概略を示す。この方法により、強化粒子の含有率が最大60体積%までの複合材料の製造を行った。図13は製造条件と製品の一例であり、時計のケースと歯車を示す。いずれもA5056合金とセラミック粒子との複合材料であるが良好な外観性状である。強化粒子をアルミ合金が完全に包み込む形で複合化されるためには、加圧力が約300MPa以上が必要であり、この程度の加圧力であれば空隙などの欠陥は観察されない。図14は摩耗量と強化粒子の含有量との関係を示す。摩耗量は、加圧力や強化粒子の大きさとも関係するが、最も大きな影響は強化粒子の含有率であり、強化粒子の含有率の増加とともに摩耗量は急激に低下していることがわかる。アルミナ粒子がA5056合金中に10~20%程度含有した場合の摩耗量は、鉄合金のS45CやSUS316の摩耗量に匹敵することを確認している。

5. 積層型粒子強化複合材料の製造

積層型粒子強化複合材料は、その積層部を構成する粒子強化複合材料部分の耐熱強度や耐摩耗性などの特性を、裏金(素板)の延性や加工性でもって補うことを目的に作られる。簡単な形状の場合には、積層部の予成形過程を省き、合金材と強化粒子の混合粉を直接素板に積層化し、界面接合と予成形行程を同時に行うことも可能である。また、積層部が薄くて良い場合には、半熔融状態にある金属板に前節で示したように、強化粒子を、直接、裏金(素材)に埋設することも可能である。

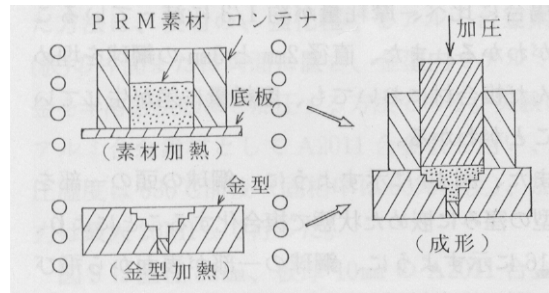


図12 均一混合型粒子強化複合材料の製造方法

マトリックス材	A5056 (#32,#55)
強化粒子	アルミナ粉末 (WA,#100,#320,#1500)
体積含有率 (V _p /%)	0~60
鍛造温度 (T/°C)	590~626
マトリックス材の固相率 (φ/%)	90~50
鍛造圧力 (p/MPa)	157~500
金型温度 (T _D /°C)	室温~680
ラム速度 (/mm・s ⁻¹)	約9
圧力保持時間 (/min.)	1
プレス機	油圧式最大能力100ton

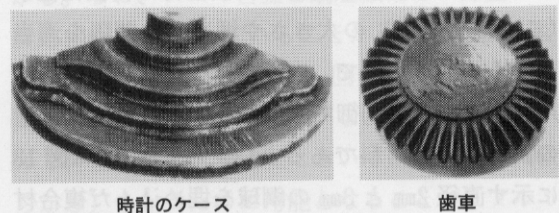


図13 均一混合型粒子強化複合材料の製造条件と製品例

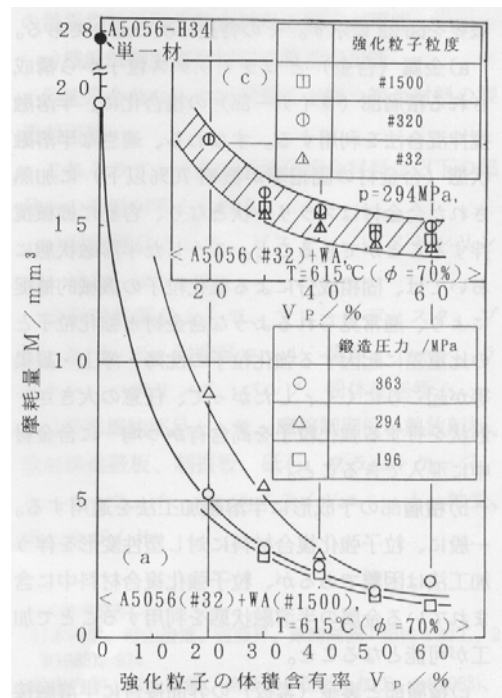


図14 均一混合型粒子強化複合材料製品の摩耗量

図15は、A5056粉末とアルミナ粒との混合粉をA5052板（裏金）に積層させた製品例を示す。製造条件は、積層部の強化粒子の体積含有率が30%、接合圧力が88MPa、接合温度が615°C（A5056の固相率は約70%）である。

図16(a)は、図15で示した製品を短冊に切り出し、積層部を外側にして抗折試験を行った後の様子を示す。積層部には亀裂が生じるが、裏金（素板）と積層部は良く接合されており、積層部が裏金から剥離することはなかった。図16(b)は、積層部を内側にして半径20mmでU曲げ成形を行った後の様子を示す。積層部を内側にした場合には、積層部の亀裂や裏金と積層部の剥離はなく良好に曲げ加工ができた。

図17は、裏金（素板）と積層部との接合強さについて検討した結果の一例を示す。図から、アルミナ粒子の含有率が高いほど、また接合圧力が高いほど、大きな接合強さになっていることがわかる。裏金に用いたA5052板自体のせん断強さは125MPa（0材）から170MPa（H38材）であることから（アルミハンドブックから）、接合強さがほぼ裏金のせん断強さにまで達している。

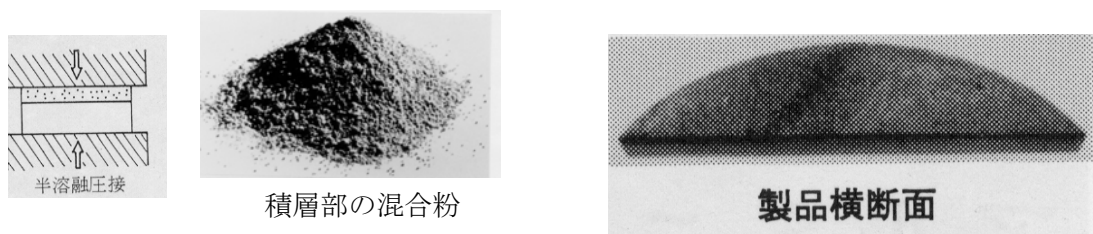


図15 積層型粒子強化複合材料の製造法と製品例

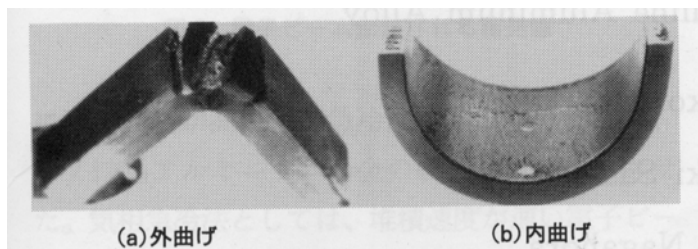


図16 積層型粒子強化複合材料製品の外曲げ試験と内曲げ試験後の様子

まとめ

アルミ合金の半溶融特性（軟質性、混合性、接合性）を利用し、アルミ基複合材料の製造について、埋め込み型、均一混合型、積層型にわけ示した。主な結果をまとめると概略以下のようになる。

- (a) アルミ合金板表面への粒状、球状、線状の各種強化粒子の完全多層埋め込みが可能。
- (b) 単行程によるアルミ合金板の両面への強化粒子の

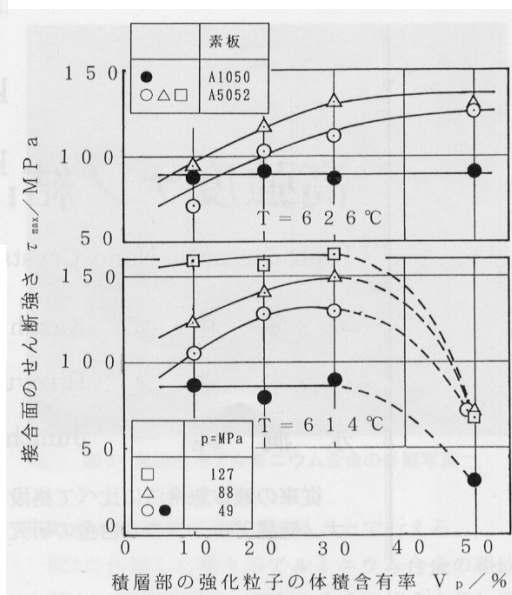


図17 積層型粒子強化複合材料の裏金（素板）と積層部間の接合強さ

埋め込みが可能。

- (c) 強化粒子の含有率が 60%ものアルミ基粒子強化複合材料の製造が可能。
- (d) 裏金のせん断強さに匹敵する高い接合強さの積層型粒子強化複合材料の製造が可能。
- (e) 鉄系合金なみの耐摩耗性を持つ複合材料の製造が可能

これらのアルミ基粒子強化複合材料は以下の部品製造の可能性を有する。

- (a) 耐熱部品としての、ピストン、ピストンリング、ピストンヘッド
- (b) 耐摩耗部品としての、ブレーキディスク、ブレーキパッド、耐摩耗ロール、歯車、ベーン、ライナー、ベアリング、バルブ
- (c) 特殊機能部品としての、摩擦制御板、熱放射板、放射線遮蔽板、制振板、砥石、フラットケージ、ローラーウェイ、ボールスライドユニット、軸受、ボールガイド

参考文献

- 1) 木内学・杉山澄雄・遠藤昇・楯崎尚哉：塑性と加工、24-272(1983)、974-980.
- 2) 木内学・杉山澄雄・遠藤昇：塑性と加工、24-274(1983)、1113-1119.
- 3) 木内学・柳本潤・杉山澄雄：第 46 回塑性加工連合講演会講演論文集、(1997)、409-410.
- 4) 杉山澄雄：アルトピア、31-12(2001)、23-31.