

加工熱処理によるアルミニウム基セル複合体の開発

横浜国立大学 大学院工学研究院システムの創生部門

助教授 梅澤 修

(平成 16 年度研究開発助成 A F - 2 0 0 4 0 0 2)

キーワード：ガラスバルーン複合体，繰返し加工熱処理，リサイクル

1. 研究の目的と背景

現在、超軽量・低強度特性を生かすべく、軽量金属や高分子を用いたポーラス材料の開発が活発化している。その機械的性質を高めようとする場合、セルの微細化・均一分散がその有力手法であるが、多孔質あるいは発泡等を利用する方法では、セル構造体の大きさや幾何学的配置、またそれらの均一性を mm オーダー以下で制御することが困難である。他には、中空粒子を金属中に分散させる方法がある。例えば、廃ガラスバルーンと再生アルミニウム合金を鋳造により複合化した素材が建築内装用パネルとして開発されている¹⁾。このような鋳造パネルを、任意の形状に塑性加工する、バルーンの大きさ・形状・分散を幾何学的に制御する、新たな機能を付与あるいは利用する、などについては未検討であるが、新たなセル複合体の開発手法を提供できる可能性がある。また、材料のリサイクル過程において不純物の混在により同一素材への循環が困難なアルミニウム合金やガラスなどの回生素材を複合内在化（融合）することによるアップグレードリサイクル手法の提案につながる。

一方、塑性変形能に優れるアルミニウム合金を基地とし、硬質で脆性的な第 2 相を分散した難加工材料としては、過共晶 Al-Si 系合金が代表的である。従来の研究において、微小塑性加工と熱処理を繰り返すことにより変形不能な Si 晶を破碎・微細分散させ、冷間鍛造に十分な加工性を有する高機能複相組織合金の創製方法を開発した²⁾。SiO₂ は Si と同様に硬質で脆性的であり、同様の手法の適用可能性がある。

以上より、新しい高性能と材料素材としての基本性能をバランスして獲得するために、廃ガラスバルーンと再生アルミニウム合金の複合体に加工熱処理を施し、セル構造体³⁾の微細化組織創製について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

廃ガラスのバルーン（約 1mm 径の中空球状体）と再生アルミニウム合金 AC3A を基地とするバルク複合体を溶製した 10mm 厚の板材を供試材（AC 材）とした（図 1）。この供試材にスエージまたは平圧延を用いた多パス加工を施し、試料とした。

2.2 スエージ加工

A5083 合金で作製したシース管（内径 10mm）に丸棒に加工した

供試材を充填し、これを熱間スエージ加工（520°C 加熱，HS 材）および冷間スエージ加工+熱処理（520°C・30min）に供した。加工パスは Φ (mm) = 11 → 10.4 → 10.15 → 9.75 → 9.5 → 9.0 → 8.6 → 8.1 → 7.4 → 7 → 6.5 → 6.0 → 5.3 → 4.8 → 4.2 → 3.3 で行った。

冷間スエージ加工により総減面率 52% ($\eta = 0.42$) の CS1 材と、同じく総減面率 92% ($\eta = 0.65$) の CS2 材を解析試料に用いた。

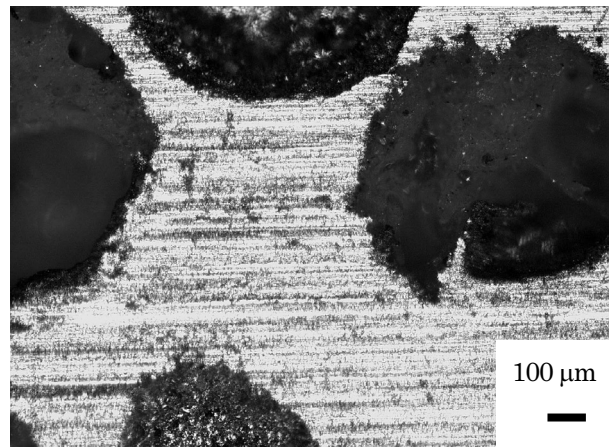


図 1 複合材断面図（黒色部：空隙）

2.3 平圧延加工

10^t × 20^w × 200^l (mm) の寸法に切り出し、冷間または熱間圧延加工に供した。冷間圧延加工は 0.1 mm 圧下/パスで 10 パス行い、その後 520°C・30min の焼きなましを施した。この加工熱処理サイクルを繰り返して、7 mm 厚（総減面率 35%， $\eta = 0.31$ ）の CR1 と 5 mm 厚（総減面率 52%， $\eta = 0.42$ ）の CR2 を得た。一方、熱間圧延加工は、520°C に加熱後 0.5 mm 圧下/パスを 2 回施し、再加熱保持後熱間加工を繰り返して、3 mm 厚（総減面率 89%， $\eta = 0.52$ ）の HR1 と 1 mm 厚（総減面率 94%， $\eta = 0.61$ ）の HR2 を得た。

2.4 組織観察方法

寸法法により比重を求めた。すなわち、体積と質量を測定し、比重を算出した。

ガラスバルーンの変形や破碎・分散状態について光学顕微鏡で組織観察を行った。

2-5 強度試験

AC材とCS2加工まま材(CS2H)およびそれらの焼なまし(520°C-30min)材(AN, CS2A)を用い、引張試験に供した。引張速度は0.5 mm/minで、標点間距離25mmである。

また、AC材とCS1加工まま材(CS1H)およびそれらの焼なまし(520°C-30min)材(AN, CS1A)を用い、圧縮試験に供した。試験片はφ9mmまたはφ6mmの円柱であり、圧縮速度0.5 mm/minで適宜試験片直径を測定した。

3. 実験結果

3-1 加工組織

3-1-1 比重変化

表1に比重測定結果をまとめて示す。AC3Aの比重は2.7であるので塑性加工を行うことによってCS1材とCS2材の比重が基地である合金の比重に近づいていくことがわかる。すなわち、ガラスバルーンが変形あるいは破壊して、中の空隙の体積率が減少したと考えられる。

表1 比重測定結果

試料	比重 (g/cm ³)	減面率 (%)
AC	1.5	0
CS1 (冷間)	2.2	52
CS2 (冷間)	2.2	92
HR1 (熱間)	2.3	94
HR2 (熱間)	2.0	89
CR1 (冷間)	1.9	52
CR2 (冷間)	1.7	35

3-1-2 スエージ加工組織

図2にCS1材、図3にCS2材の断面組織を示す。縦断面を比べると、加工度が高まるにつれて加工方向にガラスバルーンが伸長し、円から楕円、そして棒状に細長くなっていることがわかる。一方、横断面ではガラスバルーンの断面直径が1 mmから約0.5 mm (CS1), 0.25 mm (CS2) と小さくなっている。横断面における空隙率は低下している。

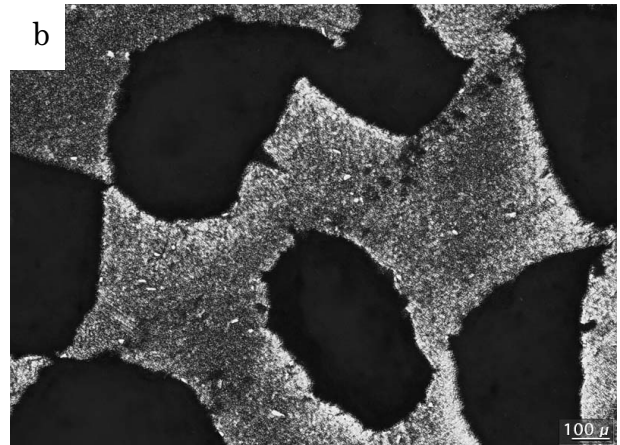
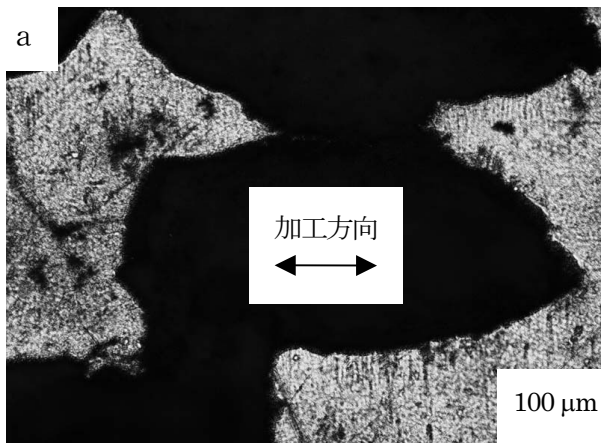


図2 CS1材断面組織：(a) 縦断面, (b) 横断面

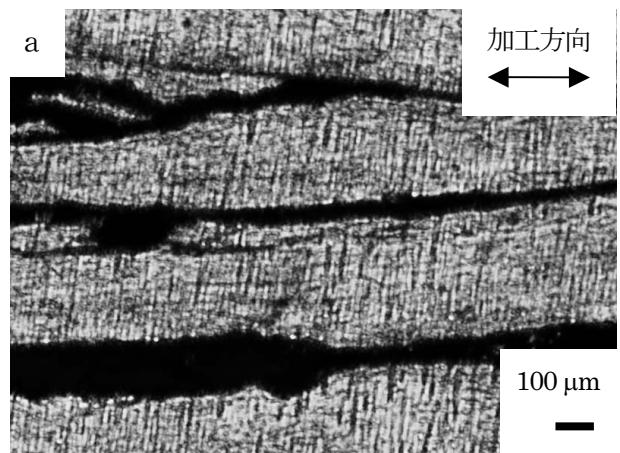


図3 CS2材断面組織：(a) 縦断面, (b) 横断面

供試材のスエージ加工では、ガラスバルーンは基地と協調変形して加工方向に伸長したフィラメント上の空隙の形成を得ることができた。ガラスバルーンは部分的に破碎してしまうが、細径のロータス状の空隙を形成でき、セル構造体の微細化組織創製の一手法として可能性を示した。

3-1-3 圧延組織

冷間圧延加工では20%減面率で圧延面にき裂を生じ、50%減面率で試験片が破断した。一方、熱間圧延加工では90%減面率

以上までき裂を生じることなく圧延できた。しかしながら、板厚 1 mmでは耳割れが生じ、試験片端部ではガラスパルーンとアルミニウム合金基地との界面はく離が生じていると考えられる。

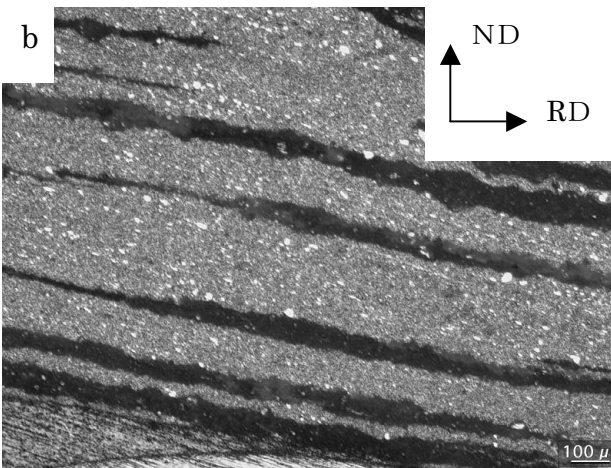
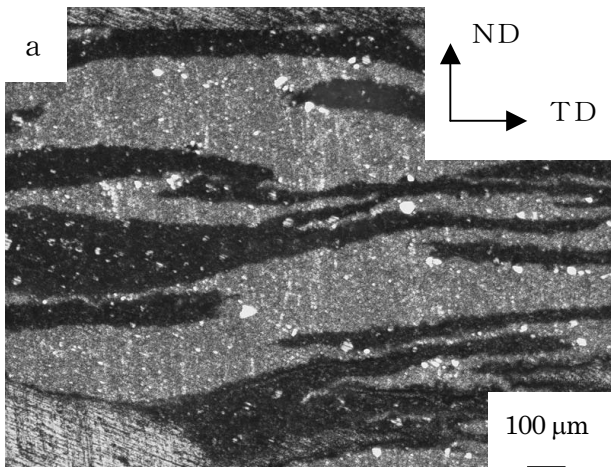


図4 HR1 材断面組織：(a) RD 面, (b) TD 面

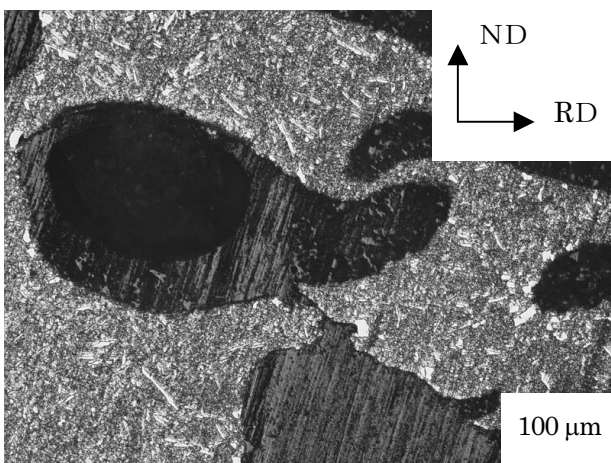


図5 HR2 材断面組織 (TD 面)

図4に示すように、HR1 材は圧延方向 (RD)、板幅方向 (TD) ともにガラスパルーンが伸長しており、パンケーキ状に変形した厚さ 0.1 mm程度の空隙が層状に得られた。また、ガラスパルーン

は部分的に合体している。これは、500°C以上に加熱することでガラスが軟化し、アルミニウム合金基地と協調変形したためと考えられる。

しかし、恒温加工でないため圧延ロールからの抜熱によって加工温度が低下すると十分な協調変形は生じない。図5に示すようにガラスパルーンは楕円形への変形にとどまる。冷間加工でも同様である。アルミニウム合金基地のみが変形に寄与するため、ガラスパルーンの破碎と空隙の合体によりき裂が早期に形成するものと考えられる。

3.2 引張試験

図6に引張試験の結果を示す。比重が大きく、引張軸に平行にガラスパルーンが伸長しているCS2材では、AC材と比較してヤング率が高まり降伏強さと引張強さともに上昇している。強度は3倍程度となっている。さらに、加工硬化にもなう一様伸びが増大している。応力-ひずみ曲線において不連続な荷重降下が生じているが、これはガラスパルーンの剥離や破壊による断面減少の影響と考えられる。

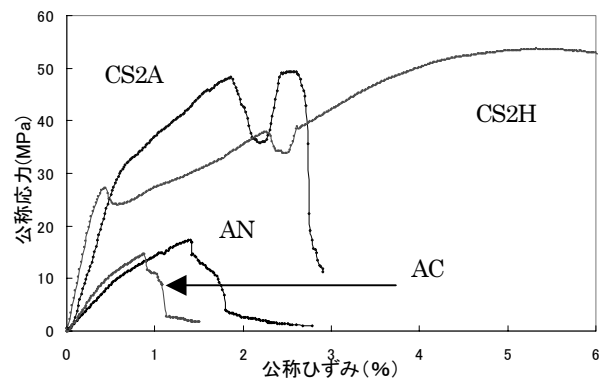


図6 公称応力-公称ひずみ曲線

3.3 圧縮試験

3.3.1 試験結果

CS1材はAC材に比較して高い圧縮応力と弾性限を示した(図7)。これは比重が高まりアルミニウム基地の割合が高いためと考えられる。見かけのヤング率も増大し、AC材が約2GPaであるのに対し、CS1材では約7GPaである。

CS1材の曲線形状は緻密材のそれに近いが、AC材では弾性限を超えたあと平坦になっており、いわゆるプラトー域が生じている。さらに歪が増大すると応力が上昇するが、これはガラスパルーンが破壊されて材料が緻密化したためと考えられる。CS1材においても応力の上昇に変化が認められ、プラトー域に対応すると考えられる。

次に各試験片のポアソン比を求め、図8に示す。4つの試験片とも同様の挙動を示し、ひずみが増えるにつれポアソン比も増加している。これは、試験中における試験片の体積が一定でないためである。

ポアソン比は体積が変化しない場合(液体のような場合)に

は0.5となり、通常の固体は体積が変化するので、(体積弾性率)ポアソン比が0.3ぐらいの材料が多い。弾性論において一様な立方体を考えた場合、ポアソン比 σ の取り得る範囲は、

$$-1 \leq \sigma \leq 0.5$$

となる。

図8におけるポアソン比が一定のひずみ範囲と図7における弾性域のひずみ範囲はほぼ等しい。ポアソン比は材料の弾性域内では一定となることから、弾性域内ではガラスバルーンの破壊は起こっていないと判断される。

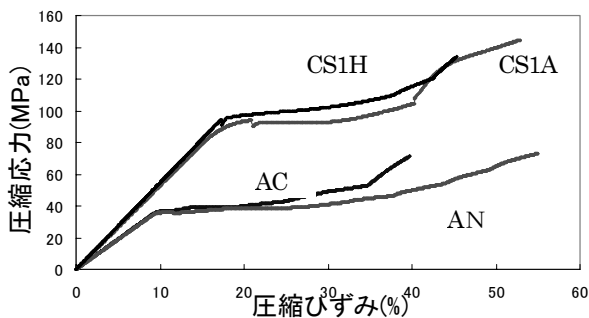


図7 公称応力-圧縮ひずみ曲線

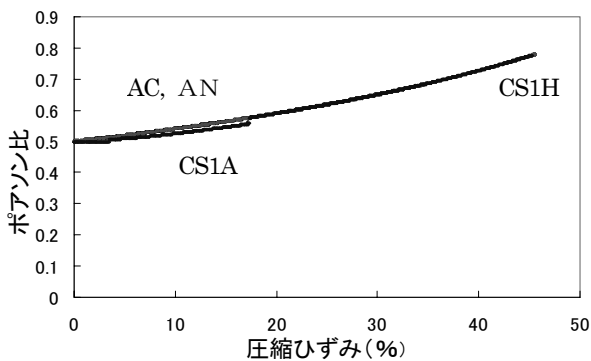


図8 圧縮ひずみによるポアソン比の変化

そこで、エネルギー吸収能について考える。ガラス(セル壁)が塑性的に曲がり、座屈し、あるいは破壊するにつれて、エネルギーは吸収されていくが、圧縮ひずみが40%近傍までは、一定応力(プラトー域)にある。プラトー域が大きいほど多くのエネルギーを吸収可能である。プラトー域でなされた仕事はすべて塑性仕事、破壊の仕事または壊れたセル壁断片同士の摩擦仕事で散逸することから、エネルギー吸収能は優れているといえる。また、ガラスバルーン自体によるエネルギー吸収も考えられるが、検討が必要である。

3.3.2 変形組織

バルジ変形における圧縮ひずみ分布を反映して、ガラスバルーンの変形・破壊形態は図9に示すように異なる。主ひずみ最大となる中心部ではガラスバルーンは圧縮変形しており、対角線上ではせん断変形している。横断面では、ガラスバルーンは破壊・分断している。

変形を担うアルミニウム基地は、AC材では曲げ、引張、座屈などの破壊の挙動を示している。CS1材では、棒状のガラスバルーンが圧縮軸に平行に配置していることから、主に座屈挙動が観察された。

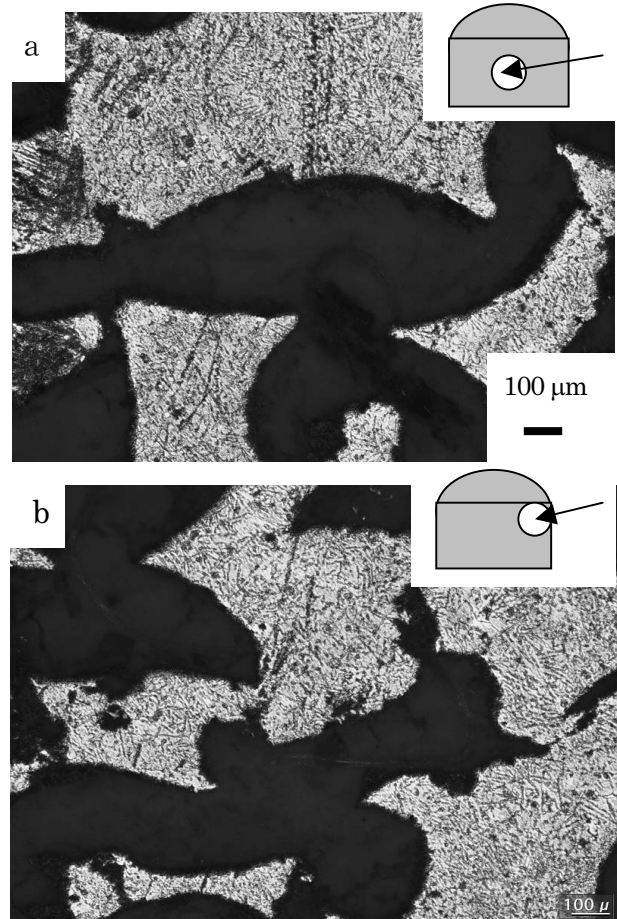


図9 AC材圧縮変形後の縦断面：(a) 中心部、(b) 端部

4. 結論

廃ガラスバルーンと再生アルミニウム合金の複合体に加工熱処理を施し、その組織と基本性能について検討した。複合体の比重は約1.5~2.2とアルミニウムの2.7に対し小さい値であり、軽量材料として位置づけられる。スエージ加工および圧延加工による加工熱処理によって、種々な形状のセル構造体の創製とセルの微細化について可能を示した。

セル組織がフィラメント状となる場合、ガラスバルーンの影響が少なくなり引張強度・延性が改善する。しかし、比重の増大や、試料形状の制約、組織および特性の異方性、デラミネーションの発生などの問題を有する。加工方法とセル構造体の形成について系統的な実験が必要である。

また、加工材においても十分な変形吸収能を有しており、圧縮、曲げ、引張りなど、種々の応力場において適用可能である。

そして、複合体の構成から予想される高い電磁シールド特性と併せ、リサイクル素材を複合化した新しいリサイクル部材の開発が期待される。

謝 辞

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団に研究開発助成として採択されたものであり、同財団からの研究助成に対し厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 内外テクノス HP:
<http://www.naigai-technos.co.jp/products/index.html>
- 2) O. Umezawa, K. Nagai : Metall. Mater. Trans. A, Vol. 30A, No. Aug, (1999), pp. 2221-2228.
- 3) 大塚正久：セル構造体—多孔質材料の活用のために—
内田老鶴圃 (1993)
- 4) 朝比奈正：新しい用途を拓くポーラス金属, AIST Today, Vol. 2, No. 2, (2002), p. 13.