

# 塑性流動を利用した高衝撃エネルギー吸収特性を有する 複合ポーラス金属の創製

芝浦工業大学 工学部 機械工学科  
教授 宇都宮 登雄

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013015)

キーワード：ポーラス金属，摩擦攪拌，傾斜機能材料

## 1. 緒言

ポーラス金属は超軽量でエネルギー吸収特性に優れた材料<sup>1-3)</sup>であり，自動車に代表される輸送機器では衝撃吸収材として，また産業用機械部品や構造部材の軽量化材料として広く活用が期待されている<sup>4,5)</sup>。著者らは，摩擦攪拌プロセス (Friction Stir Processing) 技術を応用した，ポーラス金属の作製法を確立した<sup>6,7)</sup> (以下，摩擦攪拌法と呼ぶ)。本方法は，摩擦攪拌による塑性流動を用いて金属板材中に添加剤を均一に混入させるもので，高速プロセス・高いエネルギー効率といった特長を有している。さらに，摩擦攪拌法では摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding) 技術も併用することが可能で，一個体内で気孔形態を変化させることにより，力学特性も傾斜的に変化させた傾斜機能ポーラス金属も作製している<sup>8,9)</sup>。

一方，低強度と高強度板材を用いて作製したポーラス金属の静的／衝撃圧縮試験を実施したところ，異なる特性が現れた。すなわち，低強度ポーラス金属では，衝撃試験で現れるプラトー領域 (連続的な局所圧潰により圧縮応力がほぼ一定となる領域) での応力は，静的試験のそれと同程度であったが，高強度ポーラス金属では，静的試験のそれより低くなった<sup>10)</sup>。このことから，より高い衝撃エネルギー吸収特性を有するポーラス金属，また種々のエネルギー吸収特性を組み合わせた傾斜機能ポーラス金属の作製のためには，この応力低下のメカニズムの解明と，それを改善した高強度ポーラス金属の創製が必要と考えられる。また，ポーラス金属の実用化上の問題点として，力学特性が気孔形態に依存するため，その予測が難しいことがある。著者らは，マイクロフォーカス X 線 CT 観察を用いて気孔形態の 3 次元構造の事前把握する技術を構築してきた<sup>8,9)</sup>。この技術を圧縮試験結果と関連づけることで，力学特性 (エネルギー吸収特性) を事前推定することが期待できる。

本研究では，低強度および高強度ポーラスアルミニウムの作製および静的／衝撃圧縮試験を実施し，低強度／高強度のポーラスアルミニウムのプラトー領域での圧潰状況の観察を通して，応力低下のメカニズムを明らかにする。さらに，この応力低下メカニズムにもとづいて，応力低下の改善を図ったポーラスアルミニウムの作製法の検討を行う。本作製法では，摩擦攪拌接合技術を活用し，ポーラスアルミニウムの傾斜機能化や，低強度と高強度部の複合化による高強度化を目指す。また，作製した各種ポーラスアルミニウムの力学特性を，X 線 CT 観察による気孔形態構造と対応づけて事前評価できる手法を構築する。

## 2. 低強度／高強度ポーラスアルミニウム

### 2.1 作製方法

図 1 に，摩擦攪拌法を用いたポーラスアルミニウムの作製法の概略を示す。出発材として，純アルミニウム A1050 (低強度) 板材と，アルミニウム合金 A6061 およびアルミニウム合金ダイカスト ADC12 (高強度) 板材を用いた。図 1(a), (b) のように A, B の板材間に添加剤 (粉末) を挟み，A1050 では 5 列×2 パス，A6061 および ADC12 では 5 列×4 パスのマルチパス<sup>11)</sup>を行うことにより，添加剤をアルミニウム合金中に混合させるとともに板同士を接合した。この A, B の接合材を裏返し，さらに C の板を重ねて同様の摩擦攪拌を繰り返した。添加粉末としては，A1050, A6061 では，発泡剤の粒径 45  $\mu\text{m}$  未満の水素化チタン ( $\text{TiH}_2$ ) 粉末，気孔形態安定剤の粒径約 1  $\mu\text{m}$  のアルミナ ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) 粉末を用い，ADC12 では，内部含有ガスが発泡源となるため気孔形態安定剤のアルミナ粉末のみを用いた。 $\text{TiH}_2$  粉末の添加量は，A1050 では，摩擦攪拌の対象体積分のアルミニウムの質量に対して 1 mass%，A6061 では 0.6 mass% とした。アルミナの添加量は，全ての材料で 5 mass% の同

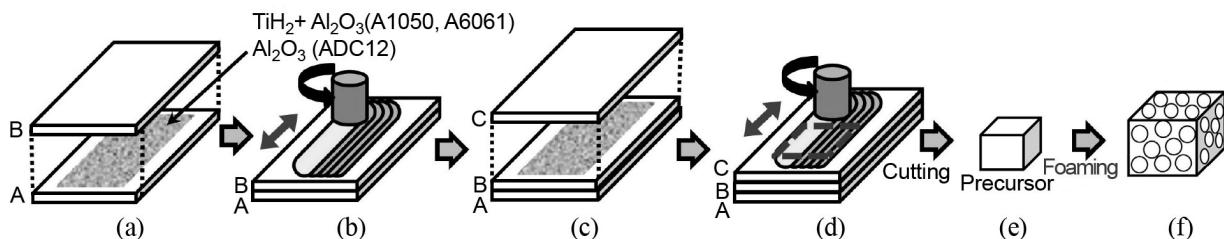


図 1 摩擦攪拌法を用いたポーラスアルミニウムの作製法概略

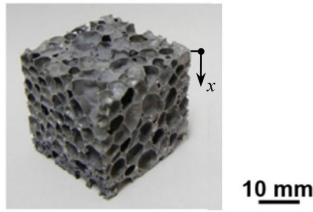


図2 A6061 ポーラスアルミニウム

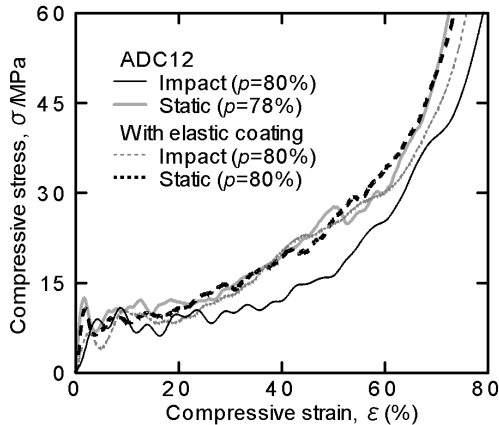


図3 公称圧縮応力とひずみの関係(ADC12)

量とした。ツール回転数および接合速度は、それぞれ、A1050では2200 rpm, 100 mm/min, A6061およびADC12では1000 rpm, 100 mm/minであった。その後、図1(d), (e)のように、積層板の攪拌領域から、機械加工によりプリカーサを切り出した。このプリカーサを電気炉内に入れて発泡させた後、電気炉から取り出し空冷した。発泡時の保持温度、保持時間は、A1050では1003 K, 12~13分, A6061では1003 K, 11.5~12分, ADC12では948 K, 10~12分と1005K, 8.5~10.5分を採用した。発泡後のプリカーサから、A1050, A6061では25 mm×25 mm×25 mm, ADC12では20 mm×20 mm×20 mmの圧縮試験片を放電加工により切り出した(図1(f)参照)。図2に、作製した圧縮試験片の例としてA6061のものを示す。発泡前後の密度より算出し気孔率 $p$ は、A1050では83~91%, A6061では79~90%, ADC12では74~83%であった。

## 2.2 気孔形態

作製した圧縮試験片の気孔形態は、マイクロフォーカスX線CT(SMX-225CT, 島津製作所)を用いて行った。X線源はタングステンであり、試験片全体をコーンビームCTにより撮像した。撮像条件は、X線管電圧80 kV, X線管電流30  $\mu$ A, 画像サイズ512×512 pixelとした。取得した全ての2次元断面画像に対して2値化処理を行い、アルミニウムと気孔を分離し、その断面での局所気孔率 $p_x$ と各気孔の相当円直径 $d$ を算出した。さらに、各試験片における全気孔に対する平均値 $d_m$ を求めた。これらの処理には、WinROOF(三谷商事)を用いた。A1050, A6061, ADC12に対する $d_m$ の値は、それぞれ、1.8~2.4 mm, 1.9~2.5 mm, 1.1~1.3 mmであった。

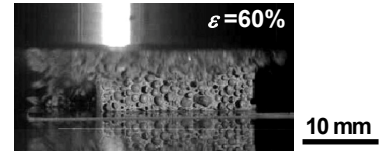


図4 衝撃試験における圧潰状況(ADC12)

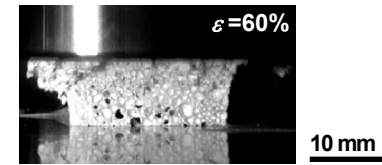


図5 弾性塗料塗布試験片の圧潰状況(ADC12)

## 2.3 圧縮試験

作製した試験片を用い、静的圧縮試験はJIS H 7902<sup>12)</sup>、衝撃圧縮試験はJIS H7904<sup>13)</sup>にしたがって行った。静的試験は、精密万能試験機(オートグラフ AG-100kNG, 島津製作所)を用いた。試験片の変形挙動は、ビデオカメラによる外部観察で記録した。衝撃試験には、落錘式衝撃試験機(Dynatup 9250HV, Instron)を用いた。錘の質量は、A6061, ADC12では25 kg, A1050では6.5 kgとした。試験体の圧潰状態は、高速度カメラ(FASTCAM MAX 120K, Photron)を用いて撮影速度6000 fps, サンプリング周期1200 KHzで撮影した。

## 2.4 試験結果および考察

図3に、ポーラスアルミニウムの静的圧縮試験と衝撃圧縮試験で得られた公称圧縮応力とひずみの関係の例として、ADC12の結果(黒およびグレーの実線)を示す。A1050やA6061のような延性的な破壊を起こす材料では、プラトー領域における圧縮応力は、衝撃試験の方が高低の変動が大きくなるが、静的試験のそれと同程度であった<sup>10)</sup>。それに対し、図3のADC12の圧縮応力は、衝撃、静的試験ともに同程度の高低の変動が起こるが、衝撃試験では、特に圧縮ひずみ20%以降で静的試験のそれより低下する傾向が見られた。衝撃、静的試験いずれの場合でも、プラトー領域では層状の局所圧潰が繰り返して起こるが、A1050は延性が高いため破片の脱落は起こらない。図4に、ADC12のポーラスアルミニウムの衝撃試験における圧潰状況の例を示す。ADC12は、セル壁強度は高いが延性は低く脆性的な破壊を起こすため、破片の脱落が起こる。さらに、衝撃試験では図4のように、破片は短時間で飛散するようになる。したがって、この飛散により起こる試験片体積減少にともなう圧縮荷重の低下や、気孔内圧力の減少がこの領域での圧縮応力低下の原因と考えられる。

このことを確認するため、破片の飛散を押さえる処置として、弾性塗料(プロト PW-T, ハギテック)を側面(4面)に塗布し、0.04 mm程度のゴム状皮膜を形成させた試験片の圧縮試験を行った。図5に、圧潰状況の例として、衝撃試験での圧潰状況を示すが、弾性塗料の塗布によって破片の飛散は止められていることがわかる。図3に、弾性

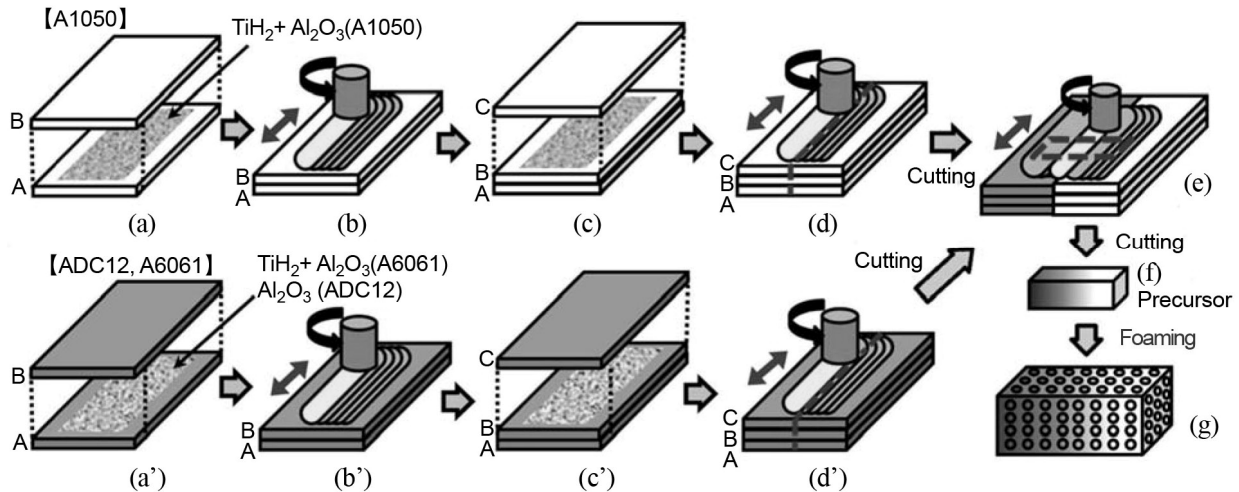


図6 傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製法概略

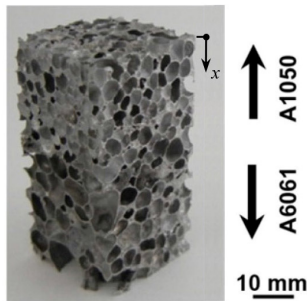


図7 傾斜機能ポーラスアルミニウム (A6061/A1050)

塗料を塗布した試験片の公称圧縮応力とひずみの関係を破線で示す。この図より、静的試験のプラトー領域における圧縮応力は、弾性塗料の塗布の有無による差はほとんど現れないが、衝撃試験のそれは、圧縮ひずみが20%以上では静圧縮試験の結果と同レベルまで上昇していることがわかる。これらの結果より、短時間での破片の脱落、飛散が圧縮応力の低下の原因であることが確認できる。

### 3. 傾斜機能／複合化ポーラスアルミニウム

#### 3.1 作製方法

ここでは、異なる金属種を接合し、力学特性を変化させた傾斜機能ポーラスアルミニウムと、ADC12の周囲をA1050で囲んで破片の飛散、脱落の防止を図った複合化ポーラスアルミニウムの作製を試みる。図6に、傾斜機能ポーラスアルミニウムの作製法の概略を示す。図6(a)~(d)、(a')~(d')のように、2.1節に示した方法と同様の摩擦攪拌により添加粉末を混合したA1050、A6061、ADC12の接合材を作製し、その攪拌部を中心に機械加工により切り出した。さらに、図6(e)のように、2枚の接合材を、A6061/A1050とADC12/A1050の組合せで1列×1パスの摩擦攪拌接合により突き合わせ接合を行った。ツール回転数および接合速度は、それぞれ1000 rpm、100 mm/minであった。接合線を含む攪拌部から機械加工により切り出したプリカーサを電気炉に入れて発泡させ(図6(f)参照)、その後、炉

より取り出して空冷した。保持温度、保持時間は、A6061/A1050では1003 K、12.5~15分、ADC12/A1050では1003 K、10.5~13分とした。さらに、放電加工により、発泡後のプリカーサから20 mm×20 mm×40 mmの傾斜機能ポーラスアルミニウムの圧縮試験片を切り出した。図7に、作製した圧縮試験片の例としてA6061/A1050のものを示す。

図8に、複合化ポーラスアルミニウムの作製法の概略を示す。図8(a)~(d)、(a')~(d')のように、2.1節に示した方法と同様の摩擦攪拌により添加粉末を混合したA1050、ADC12の接合材を作製した。ただし、A1050のTiH<sub>2</sub>粉末の添加量は0.6 mass%と1 mass%を用い、摩擦攪拌は7列の広範囲で行った。続いて、図8(e)、(e')のように、A1050接合板の攪拌部より、内部を中空とした部材を切り出し、その中空部にADC12積層板の攪拌部から切り出した部材を挿入してプリカーサとした。さらに、図8(f)のように、プリカーサを高温炉内で発泡させた後、炉より取り出して空冷した。保持温度、保持時間は、それぞれ1003 K、12~14分であった。発泡後のプリカーサからADC12部が20 mm×20 mm×20 mm、周囲のA1050部の厚みが1, 2, 3, 5 mmの複合化ポーラスアルミニウムの圧縮試験片を放電加工で切り出した。図9に、作製した圧縮試験片の例としてA1050部の厚みが5 mmのものを示す。試験片全体の気孔率 $p$ は80~83%であった。

#### 3.2 気孔形態

作製した試験片の気孔形態のX線CT観察を、2.2節に示した観察法と同様の方法で行った。傾斜機能ポーラスアルミニウムの平均相当円直径 $d_m$ は、A6061/A1050では、A6061層とA1050層でほぼ同じで2.3~2.5 mm、ADC12/A1050では、ADC12層で1.3~1.5 mm、A1050層で2.1~2.6 mmであった。複合化ポーラスアルミニウムでは、ADC12部の気孔率 $p_{ADC12}$ は76~83%、平均相当円直径 $d_{mADC12}$ は1.8~2.3 mmでありADC12ポーラスアルミニウムのそれ(1.1~1.3 mm)より大きくなっていった。

#### 3.3 圧縮試験およびその結果にもとづく考察

傾斜機能ポーラスアルミニウムおよび複合化ポーラス



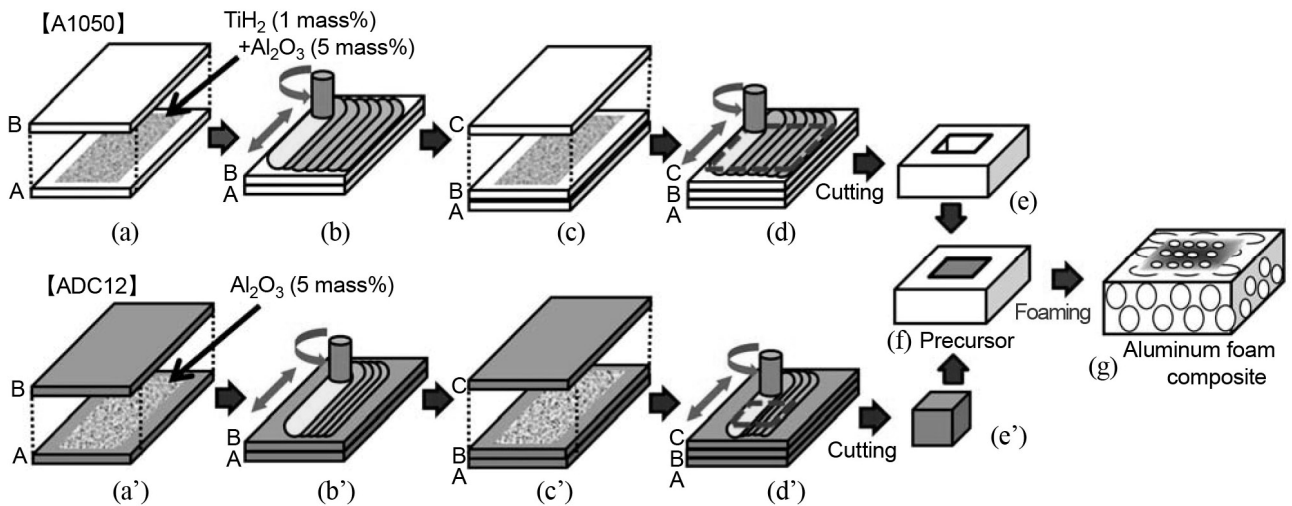


図8 複合化ポーラスアルミニウムの作製法概略

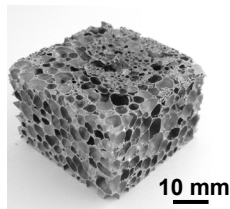


図9 複合化ポーラスアルミニウム (A1050 厚み: 5 mm)

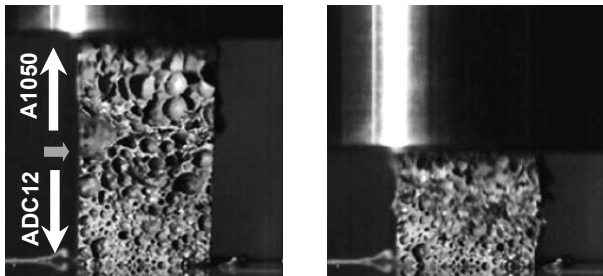


図10 ADC12/A1050 傾斜機能ポーラスアルミニウムの圧潰状況

アルミニウムの圧縮試験を、2.3 節に示した試験法と同様の方法で行った。ただし、衝撃圧縮試験における錘の質量は 25 kg とした。図 10 に、傾斜機能ポーラスアルミニウムの圧縮試験の圧潰状況の例として、ADC12/A1050 の衝撃試験結果を示す。図中のグレーの矢印は、初期の試験片における 2 つの層の境界を示している。この図のように、傾斜機能ポーラスアルミニウムの圧縮試験では、はじめに低強度 (A1050) 層でのみ圧潰が開始し、その後、高強度 (A6061 や ADC12) 層で圧潰が起こる。ただし、A6061/A1050 では、延性的破壊を起こす材料の組合せのため、破片の脱落は現れないが、ADC12/A1050 では、ADC12 層で破片の脱落、衝撃試験では破片の瞬時の飛散が発生した。図 11 に、傾斜機能ポーラスアルミニウムの公称圧縮応力とひずみの関係の例として、A6061/A1050 の衝撃試験の結果を示す。図中の矢印は、高強度層の圧潰が始まる境界

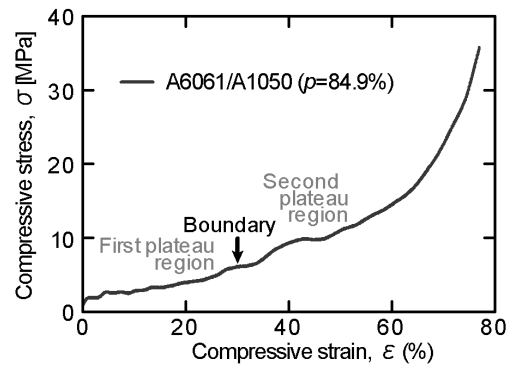


図11 公称圧縮応力とひずみの関係 (A6061/A1050 傾斜機能ポーラスアルミニウム)

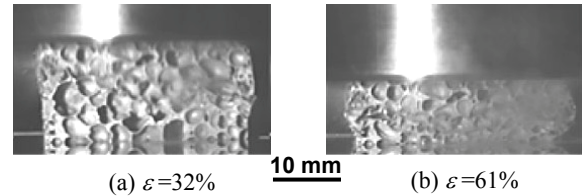


図12 複合化ポーラスアルミニウムの圧潰状況 (A1050 厚み: 5mm)

を示している。この関係において、低強度層と高強度層それぞれに対応したプラトー領域 (図中の First plateau region と Second plateau region) が現れ、それぞれの領域においてプラトー応力が評価できることがわかった。

図 12 に、複合化ポーラスアルミニウムの圧縮変形挙動の例として、A1050 部の厚みが 5 mm の結果を示す。A1050 部の厚みが 5 mm, 3 mm のとき、この図のように、破片の飛散はほとんどみられず、A1050 部の延性変形により飛散防止の効果が現れた。一方、A1050 部の厚みが 2 mm 以下では薄く、効果は十分でなく飛散が確認される結果となった。また、複合化ポーラスアルミニウムのプラトー応力については、圧縮荷重方向に対して垂直な断面に ADC12 部と A1050 部を有しているため、ADC12 に対する圧縮応

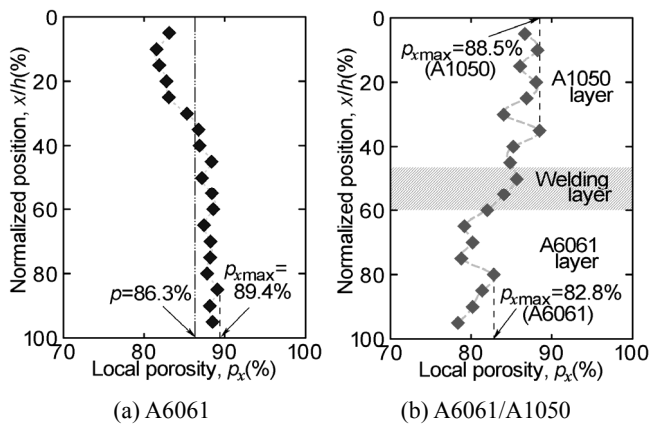


図 13 局所気孔率  $p_x$  の分布

力に換算する形で定義することとした。すなわち、ADC12 と A1050 母材の 0.2%耐力は、それぞれ  $150 \text{ N/mm}^2$ ,  $30 \text{ N/mm}^2$  であり<sup>14, 15)</sup>、この強度比 (1 : 5) を用いて ADC12 と A1050 部の断面積を補正し、次式により複合化ポラスアルミニウムのプラトー応力  $\sigma_{plC}$  を評価した。

$$\sigma_{plC} = \frac{P}{A_{ADC12} + 0.2A_{A1050}} \quad (1)$$

ここで、 $P$  は圧縮負荷荷重、 $A_{ADC12}$ ,  $A_{A1050}$  は、それぞれ ADC12 および A1050 部の断面積である。

## 4. プラトー応力の推定

### 4.1 推定法

「局所気孔率が最大となる圧縮荷重に垂直な断面における平均応力  $\sigma_{lmax}$  がその限界値  $\sigma_{cr}$  に達したとき、層状の局所変形が起こり、そのときの公称圧縮応力がプラトー応力  $\sigma_{pl}$  となる。」と仮定することにより、 $\sigma_{pl}$  は次式で推定できる<sup>16)</sup>。

$$\sigma_{pl} = \sigma_{lmax} (1 - p_{lmax}) = \sigma_{cr} (1 - p_{lmax}) \quad (2)$$

ここで、 $p_{lmax}$  は局所気孔率の最大値であり、 $\sigma_{cr}$  としては、0.2%耐力  $\sigma_p$  と、次式で定義される流動応力  $\sigma_{fl}$  を用いた。

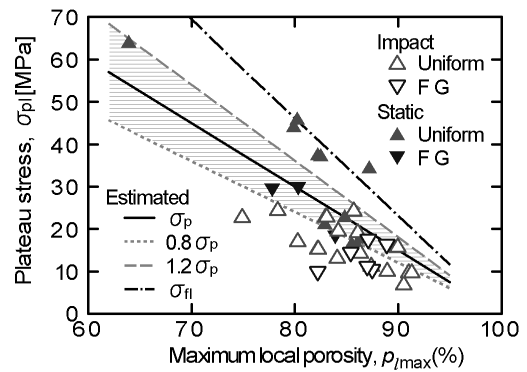
$$\sigma_{fl} = (\sigma_p + \sigma_u) / 2 \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_u$  は引張り強さである。

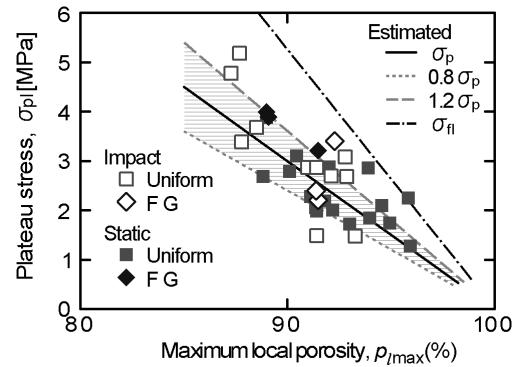
### 4.2 適用結果および考察

図 13(a), (b) は、それぞれ、X 線 CT 撮像により得られた 2 次元断面層画像をもとに算出した、試験片上部からの距離  $x$  (図 2, 7 参照) と局所気孔率  $p_x$  の関係の例として、A6061 ポラスアルミニウム、A6061/A1050 傾斜機能ポラスアルミニウムの結果を示している。このような  $p_x$  の分布より、全ての試験片に対する  $p_{lmax}$  を求めた。なお、傾斜機能ポラスアルミニウムでは、それぞれ 2 つの層に対する  $p_{lmax}$  を求めた。また、複合化ポラスアルミニウムの  $p_{lmax}$  は、圧縮負荷方向に垂直な断面の ADC12 と A1050 部を分けることなく、断面全体の局所気孔率  $p_l$  の分布をもとに推定した。

図 14 は、プラトー応力の圧縮試験結果と式(2)による推定結果の例を示している。図 14(a) は、ADC12 ポラスア



(a) ADC12 layer



(b) A1050 layer

図 14 プラトー応力の試験結果と推定結果(ADC12, A1050 ポラスアルミニウムと ADC12/A1050 傾斜機能ポラスアルミニウム)

ルミニウムと ADC12/A1050 傾斜機能ポラスアルミニウムの ADC12 層の結果、図 14(b) は、1050 ポラスアルミニウムと ADC12/A1050 傾斜機能ポラスアルミニウムの 1050 層の結果を示している。これらの図には、静的試験と衝撃試験の結果と、 $\sigma_p$  を用いた推定結果の  $\pm 20\%$  誤差 ( $0.8\sigma_p$  と  $1.2\sigma_p$ ) の線もあわせて載せている。破片の飛散がない A1050, A6061 ポラスアルミニウムや、ADC12/A1050, A6061/A1050 傾斜機能ポラスアルミニウムの A1050 層、A6061 層に対する試験結果は、図 14(b) のように、ほぼ  $\pm 20\%$  誤差内に収まっている。また、 $\sigma_{fl}$  を用いた推定結果は、試験結果の最大値に対応するようである。一方、ADC12 では、図 14(a) のように、破片の脱落のみが起こる静的試験では、試験結果は  $\sigma_p$  を用いた推定結果のほぼ  $\pm 20\%$  誤差内に収まったが、破片の短時間での飛散が起こる衝撃試験では、推定結果より  $20\%$  程度低くなった。

図 15 は、複合化ポラスアルミニウムに対して推定法を適用した結果の例として、破片の飛散を防止できた A1050 部の厚みが 5 mm, 3 mm の結果を示している。図中には、参考として ADC12 ポラスアルミニウムの静的圧縮試験および衝撃圧縮試験の結果を載せている。この図より、複合化ポラスアルミニウムの試験結果は、推定結果に対して低い値となっていることがわかる。この主な原因として、3.2 節に示したが、複合化ポラスアルミニウムの ADC12 部の  $d_m$  (1.8~2.3 mm 程度) は、ADC12 ポラ

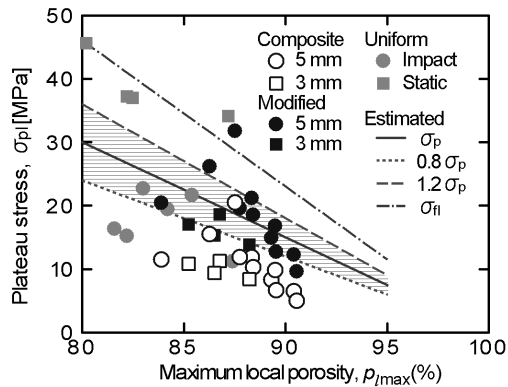


図 15 プラトー応力の試験結果と推定結果 (複合化ポーラスアルミニウム)

スアルミニウムのそれより大きいことが考えられる。この気孔の粗大化は、複合化ポーラスアルミニウムのプリカーサは ADC12 部の周囲を A1050 で囲んでいるため、発泡の際、ADC12 部の周囲方向への膨張が阻止され、気孔の合体が早めに起こったこと原因と考えられる。そこで、複合化ポーラスアルミニウムの ADC12 部の平均相当円直径 ( $d_m$ )<sub>C</sub> と ADC12 ポーラスアルミニウムのそれ ( $d_m$ )<sub>U</sub> の比を用いて、次式でプラトー応力試験結果の補正を試みた。

$$\sigma_{plm} = \frac{(d_m)_C}{(d_m)_U} \cdot \sigma_{plC} \quad (4)$$

式(4)による補正結果を、図 15 に黒い中実記号で示しているが、推定結果に近い値となった。補正の精度には問題があると思われるが、複合化ポーラスアルミニウムの ADC12 部の ( $d_m$ )<sub>C</sub> が、ADC12 ポーラスアルミニウム程度の値であれば、推定法の適用が可能となることが示唆される。今後、この気孔径の条件を満足する複合化ポーラスアルミニウムの作製と圧縮試験の実施を行いたい。

## 5. 結言

A1050, A6061, ADC12 を用いて作製したポーラスアルミニウム、傾斜機能ポーラスアルミニウム、複合化ポーラスアルミニウムの静的／衝撃圧縮試験を実施した。その結果、プラトー領域での圧縮応力の低下は、破片の瞬時の飛散、脱落が原因であることがわかった。さらに、複合化により破片の飛散防止効果が現れることが確認できた。また、X 線 CT 画像をもとにした推定法により、破片の飛散が起

る場合、若干低い推定となったが、プラトー応力は推定可能となることがわかった。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 25 年度一般研究開発助成 (AF-2013015) のもとで行われました。ここに記して、厚く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 小橋眞: 軽金属 55 (2005) 327.
- 2) H. Nakajima: Prog. Mater. Sci. **52** (2007) 1091.
- 3) 金武直幸, 小橋眞: 軽金属 62 (2012) 122.
- 4) J. Banhart: Int. J. Veh. Des. 37 (2005) 114.
- 5) 三好鉄二, 濱田猛, 金橋秀豪: R&D 神戸製鋼技報 57 (2007) 95.
- 6) Y. Hangai and T. Utsunomiya: Metall. Mater. Trans. A **40** (2009), 1284.
- 7) Y. Hangai, T. Utsunomiya, M. Hasegawa: J. Mater. Proc. Tech. **210** (2010) 288.
- 8) Y. Hangai, K. Takahashi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Sci. and Eng. A, **534** (2012), 716.
- 9) 宇都宮登雄, 高橋和也, 加藤弘規, 半谷禎彦, 北原総一郎, 桑水流理, 吉川暢宏: 軽金属 62 (2012), 278.
- 10) 久保田直之, 齋藤公佑, 半谷禎彦, 宇都宮登雄, 石間経章, 川島久宜, 桑水流理, 北原総一郎, 吉川暢宏: 日本機械学会 2013 年度年次大会, J045042, (2013).
- 11) Z. Y. Ma: Metall. Mater. Trans. A, **39** (2008) 642-658.
- 12) 日本規格協会: ポーラス金属の圧縮試験方法 JIS H 7902 (2008).
- 13) 日本規格協会: ポーラス金属の高速圧縮試験方法 JIS H 7904 (2012).
- 14) The Japan Inst. Light Metals, Microstructures and Properties of Aluminum, (1991) 415.
- 15) Japan Die Casting Association, Die Casting, ([http://www.diecasting.or.jp/diecast/pdf/book/pdf\\_set023-0.pdf](http://www.diecasting.or.jp/diecast/pdf/book/pdf_set023-0.pdf)) (2004), 19.
- 16) T. Utsunomiya, R. Yamaguchi, Y. Hangai, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Trans. **54** (2013), 1182.