Review

K. Kitazono

アルミニウム板材の繰り返し接合による高機能ポーラスアルミニウムの創製

北薗　幸一*

1. はじめに

ポーラスアルミニウムはアルミニウム内部に意図的に気孔を導入した材料であり，軽量であることに加え，衝撃吸収性 [1]，吸音性 [2]といった付加的な機能を有するため，近年盛んに研究開発が行われている．ポーラスアルミニウムは様々な方法で作製されているが，ガスの圧力を利用して発泡させるものに限定すると，溶湯発泡法 [3]とプリカーサ(Precursor)法 [4]に大別される．

溶湯発泡法とは，るつぼ中でアルミニウムを溶解し，セラミックス粒子等を添加して粘性を増加させた後，不活性ガスまたは発泡剤を添加して気泡を発生させる作製法である．ちょうどビールの泡のようになった段階で冷却し凝固させることにより，ポーラスアルミニウムが得られる．溶湯発泡法は大量生産に適しているが，発泡プロセスは溶湯の粘性と表面張力の変化に敏感であるため，合金元素の添加には注意が必要である．また，重力の影響により，上部と下部で密度差が発生しやすいという欠点もある．

プリカーサ法とは，あらかじめプリカーサと呼ばれる発泡前駆体を作製した後，加熱・発泡させる作製法である．プリカーサ法の利点は，任意の形状のプリカーサを任意の形状の容器中で発泡させることにより，様々な形状のポーラスアルミニウムを得られるという Near Net-Shape 成形性にある．通常，アルミニウム粉末と発泡剤粉末を混合した後，押出し等により固化・成形して作製される粉末プリカーサがよく用いられる．しかしながら粉末プリカーサ法は，粉末が高価であり，発火性などから取扱いが難しいといった欠点を有する．

最近，筆者は，金属粉末の代わりに安価な金属板を利用する新しいプリカーサ法を考案した．このプロセスを ARB プリカーサ法と呼ぶ [5]．本研究では，アルミニウム合金板からのポーラスアルミニウム作製プロセスと発泡体の特性について述べる．

2. ARB プリカーサ法

ARB プリカーサ法は，強ひずみ加工法の一つである繰返し重ね接合圧延(ARB)法 [6]をポーラスアルミニウムの作製に応用したものである．**図 1** にその概略を示す．最初に 2 枚のアルミニウム合金板を表面処理し，表面の酸化物を取り除く．次にそれらを積層し，界面に発泡剤粒子を挿入する．積層板を圧下率約 50%で圧延すると同時に接合する．長さが 2 倍になった板を半分に切断し，最初と同様の表面処理を施した後，再び圧延接合する．このサイクルを繰り返すことにより，発泡剤粒子がアルミニウムマトリックス中に均一に分散した ARB プリカーサが完成する．これを加熱することにより，発泡剤が分解しガスが発生することによる発泡が生じ，冷却することにより，ポーラスアルミニウムが得られる．

ポーラスアルミニウムを作製する場合，加熱によって水素ガスを発生する水素化チタン(TiH_2)が発泡剤として適している．この理由は，水素化チタンの分解温度(700 K 前後)がアルミニウムの融点(923 K)に近く，アルミニウム融液あるいは固体中への水素の溶解度が少ないためである．

図 2 に市販の 1050 アルミニウム板から作製された ARB プリカーサの発泡試験結果を示す．気孔率は，加熱温度，加熱保持時間，加熱速度によって変化するが，本実験では，約 40%の気孔率を有するポーラスアルミニウムを作製できた．

3. ARB サイクル数の影響

ARB プリカーサ法では，発泡挙動に ARB プリカーサ

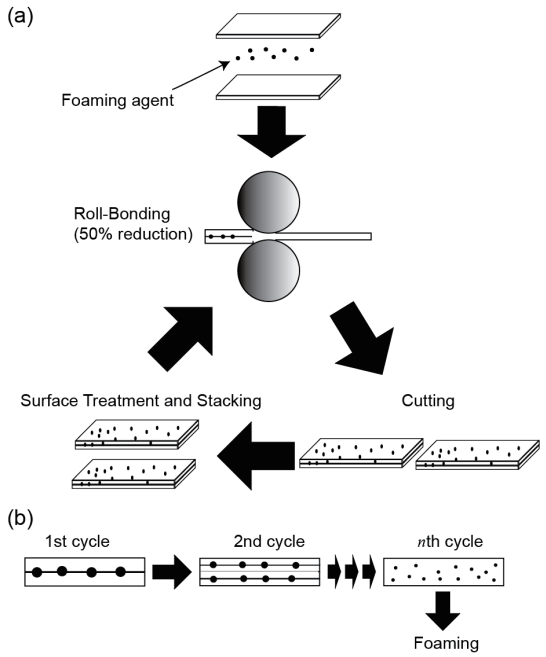

図 1　ARB プリカーサ法による板材からのポーラスアルミニウム作製過程

＊首都大学東京大学院システムデザイン研究科　准教授

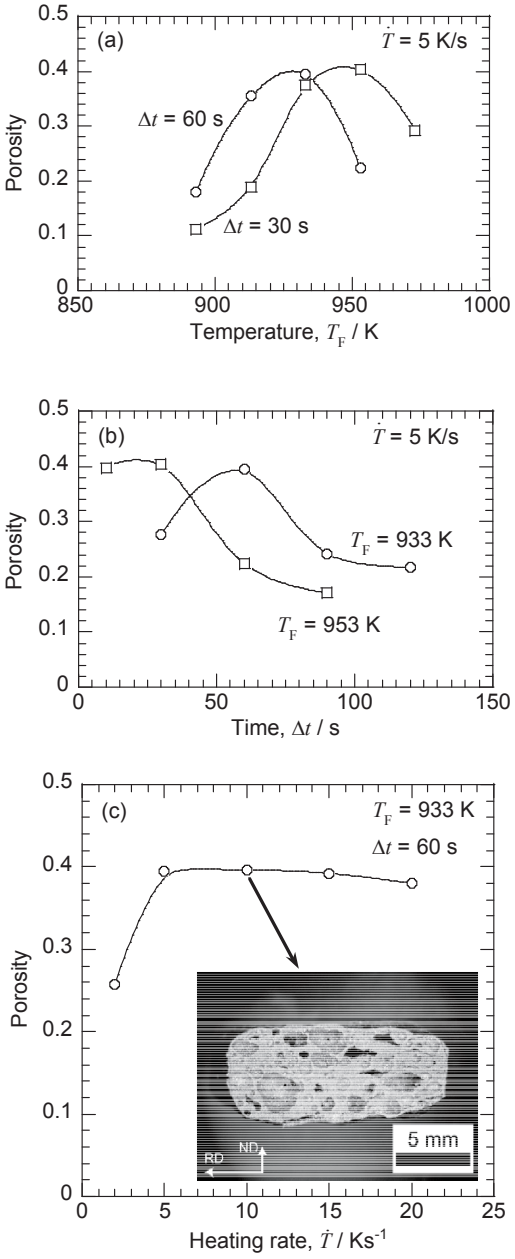

図 2　1050 アルミニウム合金板から作製された ARB プリカーサの発泡試験結果

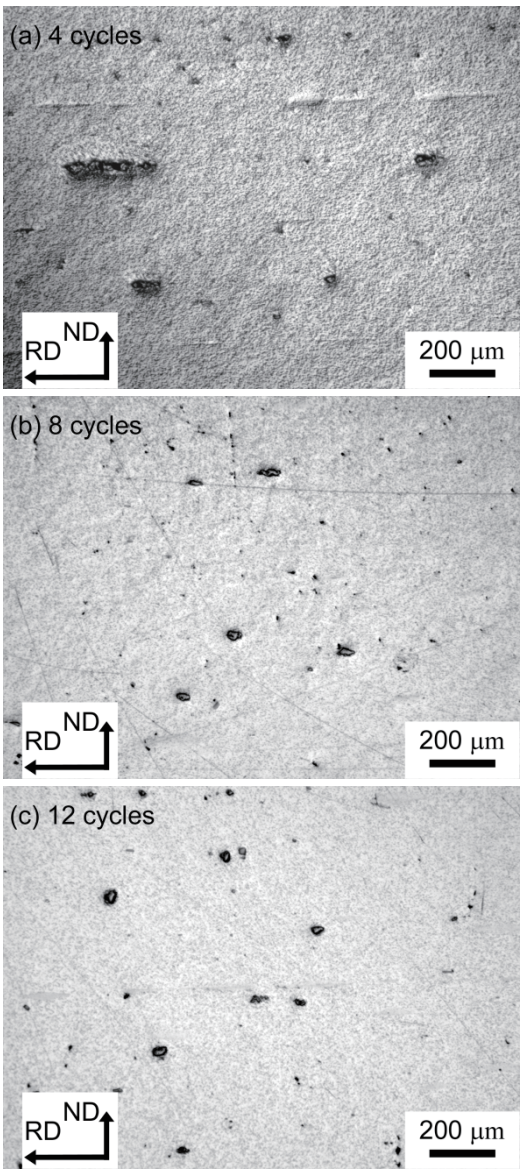

図 3　4045 アルミニウム合金板から作製された ARB プリカーサの断面写真

の内部組織が強く影響する．そこで，ARB サイクル数が発泡挙動に及ぼす影響について調べた. 出発材料として，住友軽金属工業(株)製 4045 アルミニウム合金板を用いた [7]. 4045 合金は, Si を約 10%含有するため融点が低く，発泡に適している．最初にステンレススチール製ワイヤブラシで表面を磨いた厚さ 3 mm の 2 枚の板材を積層した．発泡剤として粒子径 45μm 以下，全重量の 0.5 mass% に相当する水素化チタン粉末を界面に挿入し，圧延接合を行った．

図 3 に 4 サイクル，8 サイクル，12 サイクルの ARB を行った ARB プリカーサの光学顕微鏡写真を示す．黒い部分が水素化チタンであり, サイクル数の増加に伴い，プリカーサ中に均一に分散することが分かる．なお，圧延接合により，板は加工硬化するので，そのままではサイクル数の増加は難しい．そこで本実験では，各サイクル後に 623 K で焼鈍することにより，加工ひずみを除去し，サイクル数を増加させた．

完成した厚さ 3 mm のプリカーサを 1 辺 15 mm の正方形に切断し，赤外線イメージ炉を用いて大気中で加熱・発泡試験を行った．一定速度で加熱し，様々な発泡温度に達してから 60 s 保持した後，自然冷却した．得られた発泡アルミニウムの密度をアルキメデス法により評価した．**図 4** にそれぞれの ARB プリカーサについて，各発泡試験を行ったポーラスアルミニウムの断面写真を示す. サイクル数が増加するにつれて，気孔率が増加し，気孔径は減少した．また，サイクル数の増加につれて，セル形態は均一になった．これは，サイクル数の増加につれて水素化チタン粒子がアルミニウム中に均一に分散し，初期のガス発生場所も均一に分散したためである．

図 5 に気孔率に及ぼす ARB サイクル数の影響を調べた結果を示す．すべての発泡温度 843，883，923 K において，サイクル数の増加とともに気孔率は増加した．これは，図 3 のようにプリカーサ中に水素化チタン粒子が

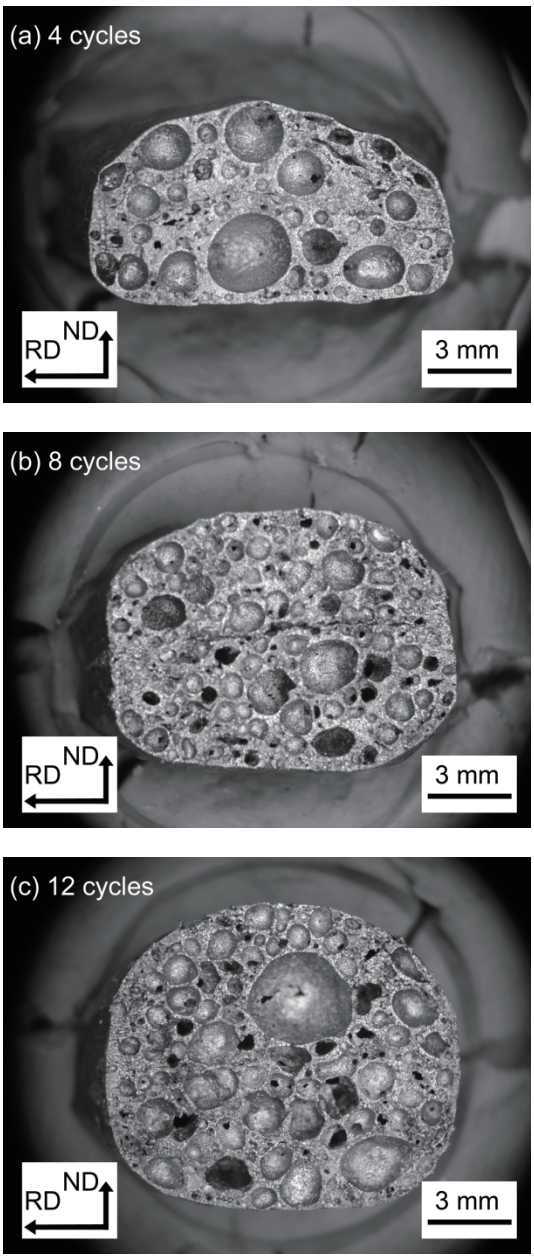

図 4　4045 アルミニウム合金板から作製された ARB プリカーサの発泡試験結果

均一に分散することにより，気孔の合体が抑制されたためである．一方，8 サイクルを超えると気孔率の増加はほぼ飽和した．これは 7 サイクル以上でアルミニウム層の厚さが，水素化チタン粒子の直径以下になり，十分な均一分散が達成されたためと考えられる．したがって，ARB プリカーサ法でポーラスアルミニウムを作製する場合，気孔率を沿謳歌させるためには，発泡挙動に影響を及ぼす発泡剤粒子の均一分散が重要となる．

4. 機械的特性の異方性

図 4 の断面写真のように板材から作製されたポーラスアルミニウムの気孔は，完全な球形ではなく，圧延面に平行に伸張した円盤状になりやすい．これにより，ポーラスアルミニウムの機械的特性にも異方性が生じる．そこで，気孔形状と圧縮特性の関係を調べた [8]．

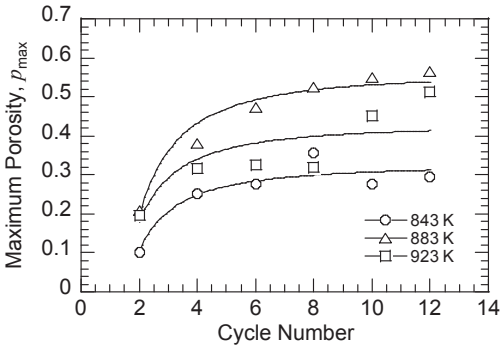

図 5　ポーラス 4045 アルミニウム合金の気孔率に及ぼす ARB サイクル数の影響

出発材料として市販の板厚 3 mm の 5052 アルミニウム合金板と水素化チタン粉末を用いた．6 サイクルの ARB の後，913 K で加熱発泡試験を行った．

得られた気孔率 47%のポーラスアルミニウムの断面写真を**図 6** に示す．ほとんどの気孔は，圧延面に平行な円板状の形状であった．

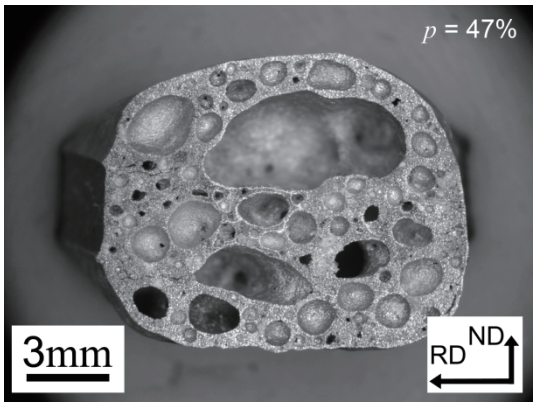

図 6　ARB プリカーサ法によって作製されたポーラス 5052 アルミニウム合金の断面写真

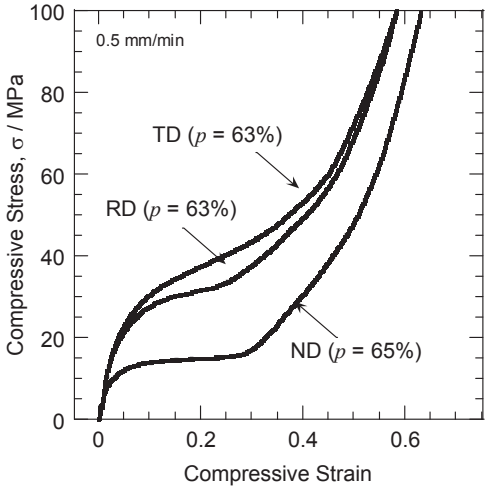

図 7　ポーラス 5052 アルミニウム合金の圧縮試験結果

得られた発泡体から 1 辺 7 mm の立方体試験片を作製し，圧延方向(RD)，板幅方向(TD)，板厚方向(ND)のそれぞれについて，クロスヘッド速度 0.5 mm/min で圧縮試験を行った．圧縮試験結果を**図 7** に示す．気孔率がほぼ等

しいにもかかわらず，ND 方向の圧縮強度は，RD，TD 方向に比べて低かった．また ND 方向では変形応力が一定のプラトー領域が見られたが，RD，TD 方向では，プラトー領域が存在せず，変形応力は緩やかに増加した．

圧縮挙動の異方性について，**図 8** の模式図を用いて考察する．本実験では，TD，RD 方向の気孔形態は左図，ND 方向の気孔形態は右図のようであると考えられる．前者の場合，気孔の端に発生する局所的な応力集中は小さいが，後者のように気孔が圧縮軸に垂直方向に伸張するほど応力集中が増加する．これにより，ND 方向の圧縮強度が低くなったと考えられる．

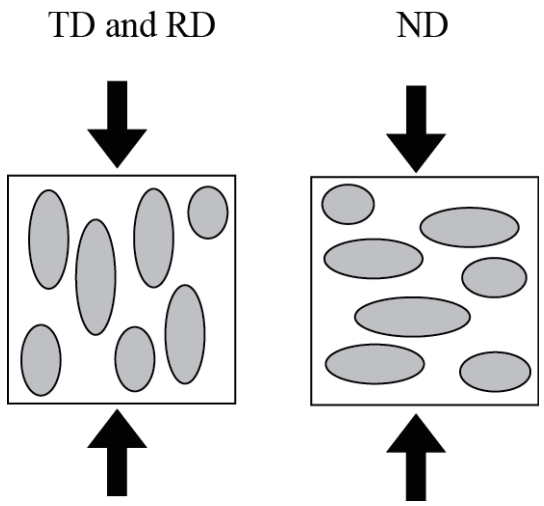

図 8　圧縮挙動に及ぼす気孔形状の影響

溶湯発泡法では，このような気孔形状の異方性は現れず，重力の影響による上部と下部の密度の違いのみが現れる．これに対し，プリカーサ法では，プリカーサ作製時の加工履歴に依存した異方性が表れやすいため，注意が必要である．

一方，円盤状気孔を有するポーラスアルミニウムは，機械的特性だけでなく，熱的，電気的特性も異方性を有する．例えば，同気孔率のポーラスアルミニウムと比較して，円盤状気孔を有するものは，板厚方向の熱伝導率が低いため，液体燃料タンク等の断熱構造部材への応用が期待される [9]．

5. まとめ

ポーラスアルミニウムの新しい作製プロセスとして，圧延接合を応用した ARB プリカーサ法を考案し，その有効性を実験的に調べた．1050，4045，5052 アルミニウム合金板からポーラスアルミニウムを作製できることが実験的に確かめられた．本プロセスは，従来の粉末プリカーサ法に比べて，異方性気孔が生成しやすいが，安価な板材を利用できるため，今後の発展が期待される．

参考文献

1) F. Han, Z. Zhu and J. Gao: Metall. Mater. Trans., 29A (1998), 2497-2502.
2) T. J. Lu, A. Hess and M. F. Ashby: J. Appl. Phys., 85 (1999), 7528-7539.
3) 上野英俊・秋山茂: 軽金属, 37 (1987), 42-47.
4) 小橋眞・棚橋伸也・金武直幸: 軽金属, 53 (2003), 427-432.
5) K. Kitazono, E. Sato and K. Kuribayashi: Scripta mater., 50 (2004), 495-498.
6) Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji and T. Sakai: Acta Mater., 47 (1999), 579-583.
7) K. Kitazono, S. Nishizawa, E. Sato and T. Motegi: Mater. Trans., 45 (2004), 2389-2394.
8) K. Kitazono, Y. Kikuchi, E. Sato and K. Kuribayashi: Mater. Letters, 61 (2007), 1771-1774.
9) 北薗幸一・佐藤英一・栗林一彦: 日本金属学会誌, 66 (2002), 53-59.