

# 発泡6061アルミニウム合金の開発と材料特性

長田 貢一<sup>\*1</sup>、天野 和男<sup>\*2</sup>、彦坂 武夫<sup>\*1</sup>

## Development and Characteristics of 6061 Aluminum Alloy foam

Kohichi OSADA<sup>\*1</sup>, Kazuo AMANO<sup>\*2</sup> and Takeo HIKOSAKA<sup>\*1</sup>

Industrial Technology Division, AITEC<sup>\*1\*2</sup>

溶湯攪拌法を用いて、6061 アルミニウム合金と気体(H<sub>2</sub>) を混合させ発泡材料を得るための作製条件を検討した。その結果、平均空孔径 3.1 mm、空孔率 92%(密度 0.21Mg/m<sup>3</sup>)の発泡材料を得た。圧縮変形特性では、ひずみ 0.6 付近まで 1MPa と低いプラトー応力が得られた。また、吸音特性は、1kHz 以下においてグラスウールよりも優れていた。

### 1. はじめに

地球温暖化の原因の一つであるCO<sub>2</sub>削減の観点等から、工業製品の部品には軽量かつ高機能な材料が求められている。こうした中、発泡金属材料(発泡体)は、軽量で機械的強度が低い代わりに、緻密体では得られない性質が発現するため、焼結など粉末冶金<sup>1-4)</sup>、めっき<sup>5)</sup>、燃焼合成<sup>6)</sup>、塑性加工<sup>7)</sup>及び鑄造<sup>8-13)</sup>など、様々な方法による種々な金属への開発が試みられている<sup>14)</sup>。この材料の将来的な用途の1つに、自動車の衝撃吸収材がある。フルフラップ全面衝突試験時にはダミー胸部の合成加速度は490m/s<sup>2</sup>(50G)を超える場合があり<sup>15)</sup>、自動車の造部材には衝撃を吸収できる構造と材料設計が必要である。この点において、発泡体の圧縮特性は、アルミニウム合金製もしくは鋼製のパイプ材のように衝撃吸収の異方性がなく、低応力・高ひずみで衝撃エネルギーの吸収を発揮できる点で優れている。その他、発泡体の塑性加工による2次加工を考慮した建築用・土木用の吸音ボードへの利用が考えられる。

本研究では、生産性が高く安価に大物製品が作製できる溶湯攪拌法を用いて、6061アルミニウム合金の発泡体の開発を試みた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 発泡体

##### 2.1.1 原材料

実験に用いた6061アルミニウム合金の化学組成を表1に示す。6061アルミニウム合金を基材とし、増粘材に粒状の金属Ca(99wt%以上)、発泡材としてTiH<sub>2</sub>(平均粒径45µm以下の微粉、95wt%以上)を用いた。

表1 6061アルミニウム合金の化学組成(wt%)

| Si   | Cu   | Fe   | Zn   | Mg   | Mn   | Cr   | Ti   | Al   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.68 | 0.29 | 0.20 | 0.14 | 0.75 | 0.03 | 0.07 | 0.02 | Bal. |

##### 2.1.2 原料溶湯の溶製

原料溶湯は、図1(a)に示す溶湯攪拌装置を用いて溶製した。るつぼ型電気炉及び#30黒鉛るつぼを用いて、6061アルミニウム合金6kgを温度1073Kで溶解した。予めCaを1wt%添加し、その後溶湯温度973K、攪拌回転数10s<sup>-1</sup>、攪拌時間0、1.8、3.6、5.4、7.2、10.8ksの条件で調整した。攪拌は、モータに取り付けたシャフト及び攪拌羽根による機械的攪拌力を利用した。モータ及び羽根の間にトルクメータを設置して溶湯の攪拌トルクをモニタした。

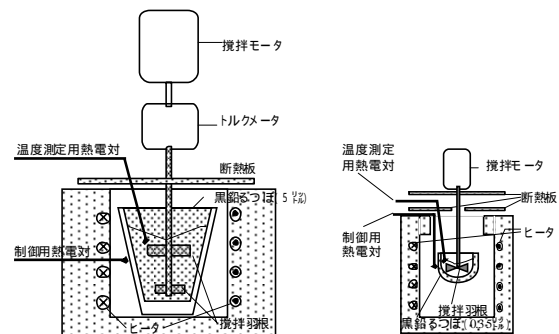


図1 溶湯攪拌装置及び発泡体作製装置

##### 2.1.3 発泡体の作製

図1(b)に、発泡体作製装置の概略図を示す。2.1.2項で溶製した原料溶湯を350g採り分け、発泡体作製装置で最適発泡条件の検討を行った。溶湯温度(909、913、933、

\*1 工業技術部 加工技術室 \*2 工業技術部 加工技術室 (現工業技術部 応用技術室)

973、1033K)、攪拌時間を変えた原料溶湯(0、1.8、3.6、5.4、7.2、10.8ks(対応する攪拌トルク値は、それぞれ245、220、284、331、430、468Nmm)、TiH<sub>2</sub>を1wt%(一部0.3wt%)添加後、攪拌時間(15、30、60、120、300s)を変え、気体H<sub>2</sub>を混合させて発泡体を作製した(予備実験では、TiH<sub>2</sub>1wt%で90%以上の空孔率が得られた)。また、攪拌回転数は、装置の構造を考え最大の攪拌力が得られる条件10s<sup>-1</sup>を採用した。

## 2.2 材料評価

発泡体の発泡率は、アルキメデス法により測定し、発泡状態の確認のため断面のマクロ組織観察等を行った。発泡体の良否は、主に空孔率で判断した。

機械的性質の測定は、16×16×16mmの供試材を作製してインストロン型万能試験機により試験速度10、1000mm/minで圧縮試験、また、20×16×80mmの供試体を用い、試験速度10mm/min、スパン距離60mmの条件で3点曲げ試験を行った。

音響特性は、90mm×20mmの供試体を作製し、JIS A 1405(A管法)により吸音率を測定し、吸音材として建築用に用いられているグラスウールと比較した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 発泡体の作製条件

#### 3.1.1 原料溶湯の作製と粘性

図2に原料溶湯の攪拌トルクと攪拌時間の関係を示す。一般に攪拌トルクと粘性は比例関係にあり、トルクの測定により相対的な溶湯粘性の大きさが確認できる。Caを添加することにより、攪拌経過時間に対し分単位で増粘効果が現れることが報告されているが<sup>6)</sup>、本実験では1.8ksまでは逆にトルクが減少し、それ以降は攪拌時間と共に一様に増加し、高粘性の溶湯が得られた。一時トルクが減少した原因として、溶湯攪拌時には、大気中での攪拌によってAl、Mg、Caの酸化物及びその複合酸化物と

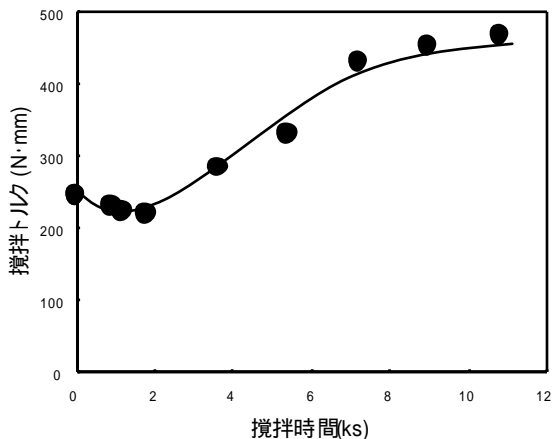


図2 原料溶湯の攪拌トルクと攪拌時間の関係

の混合のため増粘するが、チクソトロピー効果などの別な機構により攪拌時間1.8ksまでは粘性低下が生じたと思われる。

#### 3.1.2 発泡体作製条件の検討

発泡体を作製する条件は、2.1.3項で設定した攪拌回転数10s<sup>-1</sup>、1wt%TiH<sub>2</sub>の他に、攪拌時間、溶湯粘性及び溶湯温度の3条件がある。

図3に0.3wt%TiH<sub>2</sub>の添加量で攪拌時間(15~300s)を変えて作製した発泡状態を示す。攪拌時間120sのものが空孔率は67%で最も高く、気孔の大きさのばらつきも比較的少なかったことから、攪拌時間は120sが最適条件と判断した。

次に、図3の攪拌時間の検討の場合と同様に、溶湯温度及び原料溶湯の攪拌時間(攪拌トルク)と発泡状況との関係を調べた。その結果、最も高い空孔率が得られる溶湯温度は909Kであり、原料溶湯の攪拌時間(攪拌トルク)は、3.6ks(284Nmm)であった。これらの結果を踏まえ、1wt%Caを添加し、973Kに保持した原料溶湯を攪拌回転数10s<sup>-1</sup>で3.6ks攪拌した増粘溶湯を原料溶湯とした。この溶湯を用いて溶湯温度909Kで、攪拌回転数10s<sup>-1</sup>、攪拌時間120sの条件で作製した発泡体の断面のマクロ組織とその空孔径の分布を図4に示す。その結果、空孔率92%(密度

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| 発泡体外観   |      |      |      |      |      |
| 断面マクロ組織 |      |      |      |      |      |
| 攪拌時間(s) | 15   | 30   | 60   | 120  | 300  |
| 空孔率(%)  | 33.2 | 45.2 | 65.5 | 67.7 | 54.8 |

図3 攪拌時間と発泡状態

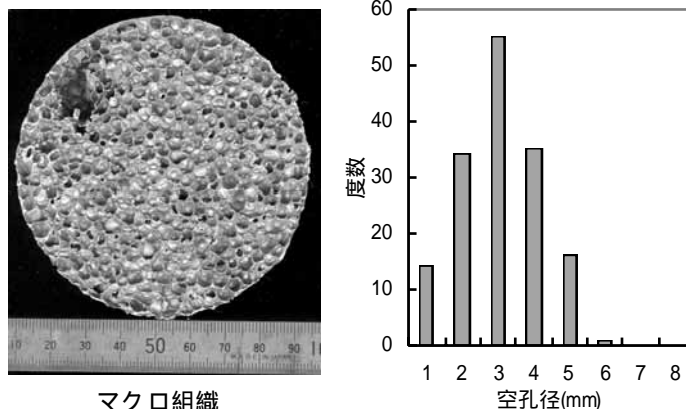


図4 試作発泡体の断面のマクロ組織及びその空孔径の分布

0.21Mg/m<sup>3</sup>)で、平均空孔径3.1mmのばらつきの少ない発泡体を得た。また、実験は#3.1の小るつぽを用いたが、#30るつぽにスケールアップしても発泡体の作製は可能であったことから、さらなるスケールアップも容易であり、粉末冶金等の他の方法に比較し、生産性とコスト低減を実現できると思われる。

### 3.2 材料特性

#### 3.2.1 機械的特性

試作発泡体の静的圧縮特性を調べた。その結果を図5に示す。いずれの試験速度においても、多孔質体特有の応力ひずみ曲線が得られた。低ひずみでは、発泡体の圧縮弾性率を示す急激な応力増加が見られるが、その後塑性変形による空孔壁の圧壊が進むため応力の増減を繰り返しながら、1MPa程度の応力プラトー領域のひずみが0.6程度まで続き、最後に発泡体の空孔の圧壊が終わり、緻密体で見られる圧縮曲線に漸近して急激な応力増加を示した。

ひずみ0~0.6での応力の平均値は試験速度10mm/minで0.6MPa、1000mm/minで1.0MPaとなり、ひずみ速度の2桁の変化に対し僅かな応力の変化がみられた。すなわち、圧縮応力のひずみ速度依存性の存在が示唆された。なお、この試験片の密度は0.21Mg/m<sup>3</sup>であり、このプラトー領域(0~0.6とした)の単位質量当たりの吸収エネルギーは圧縮速度10mm/minで1.7kJ/kg、1000mm/minで2.9kJ/kgとなり、NEDOプロジェクト中間報告の目標値(中間目標5kJ/kg以上、最終目標8kJ/kg以上)<sup>17)</sup>には及ばなかった。

図6に、発泡体の3点曲げ試験における応力ひずみ曲線を示す。低ひずみでは弾性変形によるひずみの増大に伴い直線的な応力増加が見られ、最大応力付近から、塑性変形が始まるため急激な応力の減少が起こり、ひずみの増加とともに0に漸近した。なお、曲げ強さは4.3MPaであった。

圧縮及び曲げの試験結果から、本発泡体はいずれも緻密体に比べ加工応力が非常に小さく、その分塑性加工し易い材料と言える。また、圧縮及び曲げの弾性率は、それぞれ0.41、0.63GPaで緻密体の圧縮、引張の69.7、68.3GPa<sup>18)</sup>などと比べると1/100以下の値である。したがって、本発泡体を単独で構造体に用いるのではなく、パイプ材に充填して構造部材の強度、剛性を向上させるとともに、制振性・吸音性・断熱性を付加することによる機能向上を狙った適用方法が考えられる。

一般に、弾性率もしくは材料強度と振動減衰率とは背反する関係にあり<sup>19)</sup>、弾性率の低いものほど内部損失が大きいことから、本材料は制振材への応用も考えられる。

#### 3.2.2 吸音特性

多孔質体は、多数ある空孔のセル壁と空気との摩擦を生み熱エネルギーに変換することで、音波のエネルギーの一部を熱エネルギーに換えるため、吸音性が得られる<sup>20)</sup>。図7は、発泡体及びグラスウールの吸音特性(A管法)を示す。グラスウールが1200Hz付近から高周波側で高い吸音率を示すが、1000Hz以下の低周波域では、発泡体はグラスウールよりも優れた吸音特性が得られた。また、通気孔のある方が、吸音特性が良いことも分かった。このことは、通気孔により内部気孔のセル壁まで音波が侵

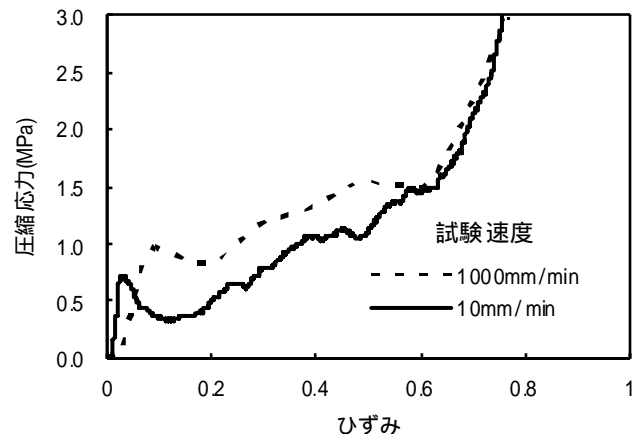


図5 発泡体の圧縮試験結果

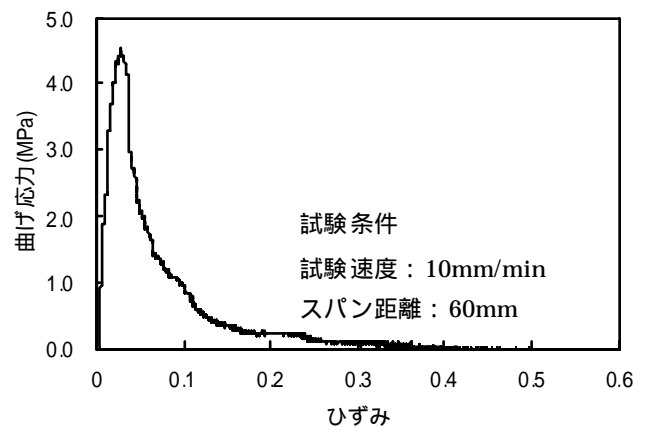


図6 発泡体の3点曲げ試験結果

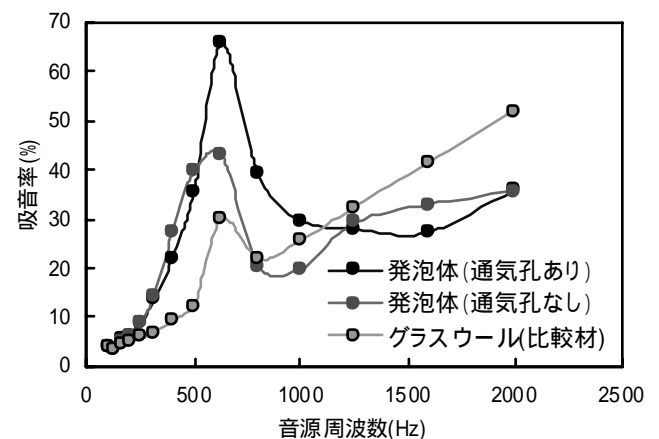


図7 発泡体の吸音特性

入することで、より多くのセル壁と摩擦を起こし、音波のエネルギーを閉気孔材よりも減衰させるためと考えられる。これらのことから、本材料とグラスウールを併用することで高周波から低周波にかけての広帯域の音波の吸音に対応できると考える。

#### 4. 結び

6061アルミニウム合金の発泡体を作製する最適条件を検討し、空孔率92%(密度 $0.21\text{Mg/m}^3$ )、平均空孔径 $3.1\text{mm}$ の材料を作製した。また、作製した発泡体の吸音性、衝撃吸収性及び加工特性などを調べた。

今回、衝撃吸収特性に関しては、静的圧縮試験に留まり、ひずみ速度 $1\text{s}^{-1}$ であった。今後は、自動車などの衝突事故を模擬できるひずみ速度 $10\sim 10^3\text{s}^{-1}$ 程度の動的圧縮試験を検討していく。

本材料は、包装材料及び作業用、バイク、スキー、登攀等のスポーツ用ヘルメットなどの衝撃吸収材へも活用できる可能性があるため、衝撃吸収材としての材料評価方法の検討も考えている。

さらに、金属特有の耐熱衝撃性と多孔質構造に起因する断熱性<sup>21,22)</sup>も期待できる。そのため、ヒートサイクル試験・熱伝導率測定などを検討していく予定である。

#### 文献

- 1) 津田, 小橋, 金武: 軽金属学会第108回春期大会講演概要, 181(2005)
- 2) 太田, 小橋, 金武: 軽金属学会第108回秋期大会講演概要, 183(2005)
- 3) 太田, 小橋, 金武: 軽金属学会第109回秋期大会講演概要, 115(2005)
- 4) 加藤, 園田, 山田, 朝比奈: 軽金属学会第108回秋期大会講演概要, 171(2005)
- 5) 本多: まてりあ, **38**(6), 470(1999)
- 6) 小橋, 大路, 金武: 軽金属学会第109回秋期大会講演概要, 115(2005)
- 7) 三原, 吉村: 国立大学法人香川大学技術シーズカタログ, EN-04-012
- 8) 朝比奈: AIST Today, **2**(1), 13(2002)
- 9) 神鋼鋼線工業株式会社カタログ 商標名「アルポラス」
- 10) 下浦, 軽金属協会編: アルミニウム技術便覧, P1247(1996), カロス出版
- 11) 特許第1566284号(特許公報 平1-51528)
- 12) 池田, 中嶋: 鑄造工学, **74**(1), 812(2002)
- 13) 玄, 村上, 中嶋: 鑄造工学, **4**(1), 817(2002)
- 14) (財)素形材センター: ポーラス金属の利用技術の可能性に関する調査研究報告書 - 要旨 - 平成18年3月(システム技術開発調査研究17-R-4), (財)機械システム振興協会
- 15) 国土交通省・独立行政法人自動車事故対策機構: 自動車アセスメント 車種別安全性能比較評価一覧, 2006.3詳細版
- 16) 上野, 秋山: 軽金属, **37**(1), 42(1987)
- 17) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会: 自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術の開発 中間報告書(案) 平成16年9月
- 18) (社)軽金属学会: アルミニウム技術便覧, P108(1996), カロス出版
- 19) 津田昌利: 制振及び吸音分野への多孔質鑄鉄の適用, 学振第24委員会鑄鉄分科会資料, No.166, 昭和61年12月10日
- 20) V.O.Knudsen, C.M.Harris(平山, 岸人, 斎藤, 中込共訳): 建築の音響設計, P66(1957), 丸善
- 21) L.J.Gibson, M.F.Ashby(大塚正久訳): セル構造体 - 多孔質材料の活用のために -, P272(1993), 内田老鶴園
- 22) 近藤連一: 多孔質材料 - 性質と利用 -, P185(1973), 技報