

金属多孔体の構造と変形能

芝浦工業大学 工学部 金属工学科

教授 大塚正久

(平成2年度研究開発助成 AF-90010)

1. 研究の背景

1.1 多孔体の分類

気泡（ポア）を含む材料を一般に多孔質材料または多孔体という。多孔質材料は有機高分子系において発泡ポリウレタンや発泡スチロールなどがクッション材や包装材に、無機系では気泡コンクリートや泡ガラスが建材や断熱材など、それぞれ工業材料としての分野を現在では確立している。多孔質材料、自然界にも多くの実例を見ることができる。木材や骨、蜂の巣などがそれである。木材などは数千年前から建築物などの構造材として使用されており、現在もなお多量に使用されている。今では、ポリマー、セラミック、金属はもとより複合材料でさえもフォームにすることができる。見方を変えれば、多孔質材料は「緻密な固体と気体との複合材料」と見なすこともできる。

このような材料の特徴として、

- ・熱伝導が小さい
- ・エネルギー吸収能が大きい
- ・比表面積が大きい
- ・軽量である
- ・弾性率が小さい
- ・防音・防振特性に優れる
- ・意匠性がある

などが挙げられる。それぞれの特徴を生かした製品がすでにいくつか開発され市販されている。

多孔質材料のうち、気孔率が高いものを発泡材またはフォーム (foam) などと呼ぶ。気孔率が70%以上のフォームは特に興味深い。70%以下の多孔体が「固体」の特性を示すのに対して、70%以上の気泡を含むフォームはセル構造に起因した独特の挙動を示すようになるからである。

フォームは、独立した気泡をもつクローズドセルフォームと貫通気孔をもつオープンセルフォームに大きく分類され、その性質も異なる¹⁾。クローズドセルフォームは、軽量、剛性、比強度、衝撃吸収性、音響特性、熱伝導などの性質に優れていることから、構造材料と同時に断熱材・防音材²⁾として用いられ、オープンセルフォームは、浸透性、通気性、吸音性に優れているため、おもに機能性材料として用いられている。

ところで、これまでフォームといえばごく一部を除いて、非金属材料を中心に開発されており、金属系のフォームが作られることは少なかった。しかし、近年、非金属フォームにはない特異な性質（化学的性質、耐熱性、延性など）をもつことから金属系のフォームが注目されるようになり、実用化されるようになった。金属フォームもクローズドセル型とオープンセル型に分けられる。前者は軽量、剛性、強度、衝撃吸収性、音響特性から主に建材や自動車のバンパーなどの構造材に用いられ、後者は浸透性、通気性、吸音性から軸受け材、フィルター、多孔質電極、触媒担体、熱交換器などの機能性材料に用いられる。原料金属は、Al、Ni、Zn、Fe³⁾ などである。このうち最も多く使用されているのが本実験に用いたAlである。

クローズドセルフォームの一例として、セラフォームと呼ばれる泡ガラスがある。ガラスの特性である耐候性とフォームの軽量という性質（重さは緻密体の約10の1）を組み合わせたもので、外装材としてかなり広く普及している。他方、クローズドセル型金属フォームの一例がセルメット³⁾と呼ばれる多孔質ニッケルで、Niの化学的性

質とフォームの高比表面積を活かして、触媒や消炎材として利用されている。

クローズドセル型アルミニウムフォームの製造法とその特性については1.3節で詳しく述べる。

1.2 クローズドセルフォームの製造法

アルミニウムの製造法を示す前に、まず一般の金属のクローズドセルフォームの製造法について述べる。元来、金属中にはピンホールなどの含有ガスによる微小な気泡、あるいは凝固時の収縮による引け巣と呼ばれる気孔が生じる場合が多く、材料欠陥の原因となるため種々の防止策が取られてきた。これを逆に利用し気泡を全面にかつ均一に発生させたものがクローズドセルフォームである。クローズドセルフォームの製造工程は以下のとおりである。

溶解工程→増粘工程→混合工程→発泡工程→
加工工程

溶解工程で原料の金属を溶かし、増粘工程において溶湯の粘性を増加させ、混合工程で発泡剤を溶湯中に攪拌し、発泡工程で泡がうまくできるようにさらに攪拌し、加工工程ではできたフォームを望みの寸法に仕上げる。

この工程の中で重要な工程はいうまでもなく発泡工程であるが、金属の発泡には、発泡材から発生したガスによる気泡の発生、及びこの気泡の浮上を防ぎ、かつ気泡同士の合体を防ぐための適度の粘性が必要である。普通、熔融金属は水のような低粘度を示ししかも凝固に際して粘度は急激で不連続に変化するのでその制御は難しいため、フォームの増粘工程も重要である。その増粘方法⁹⁾は、粘性を増加させる合金元素の添加をする方法、合金の凝固過程における固液共存過程を利用する方法、熔融金属へ空気、酸素、水蒸気などを吹き込む方法、浴中に生じた微細な酸化物により見かけの粘性を増加させる方法、耐熱性のある酸化物、炭化物等のセラミックの微粒子を熔融金属中に混合分散させ、見かけの粘性を増加させる方法などがある。これらの方法のうち最も簡単に粘性を制御できるのは、合金元素の添加でありアルミニウ

ムフォームでもこの方法が用いられている。

発泡工程では発泡剤の問題⁹⁾がある。金属を発泡させるには熔融金属の吸蔵されているガスを利用する以外に発泡剤を添加して泡を発生させている。発泡剤は高温の熔融金属中で熱分解反応によりガス成分を放出し、その種類と発生ガスは、水素化チタニウム (TiH₂) などの金属水素化物による水素ガス、炭酸カルシウムなどの炭酸塩による炭酸ガス、含水鉱物 (雲母など) や結晶水を含む化合物による水蒸気などがある。発泡剤を選択する際の留意点は、熱分解温度が金属の融点付近にありかつその分解速度が早いこと、熔融金属とぬれがよく混合が容易であること、単位重量当たりのガス発生量が多いことなどであり、しかも安価であることが望ましい。

次に、発泡方法の種類は溶解度差法、粉末冶金法、溶湯直接混合法、無重力混合法などがある⁹⁾。溶解度差法とは、熔融金属中に溶解しているガス (多くは水素や窒素) が凝固時に溶解度の急激な減少のために放出される現象を利用した方法であり、粉末冶金法とは、金属粉と発泡剤粉との混合体を金属の融点以上に加熱し発泡させる方法で、発泡剤が熔融金属とのぬれの悪いセラミックの場合あるいは高融点金属などに対して有効である。ただし、気孔率を大きくとれないのが欠点である。

他方、溶湯直接混合法とは溶解金属に発泡剤を直接添加し発泡させる方法で、最も基本的な方法である。

無重力混合法は、原理的には簡単で、アルゴンなどの不活性ガスを吹き込むだけの方法である。気泡の浮力など重力下で生じる問題がほとんど無視できるため均一なセル構造が得られるものと期待されるが、技術的には解決すべき点も多い。

一方、オープンセルフォームの製造工程はスラリー法と電気メッキ法とに大別される。いずれもポリウレタンフォームを担体とする点では共通するが、前者では物理的に素材を塗着するのに対して、後者では電気化学的に塗着する。これまでの

ところ、スラリー法はアルミナやジルコニアなどセラミックス系のオープンセルフォームの製造に、また電気メッキ法はニッケルフォームの製造に用いられている。

例えば、Niフォームの製造工程の概略は以下のとおりである⁹⁾。

導電処理工程→メッキ工程→熱処理工程→加工工程

導電材には炭素が多く使われる。熱処理はポリアクリルフォームの焼成除去を目的としている。スラリー法の詳細は割愛する。

1.3 アルミニウムフォームについて

アルミニウムフォームの開発⁹⁾はまず昭和30年代にアメリカを中心として国内でも行われてきた。

アルミニウムフォームは前にも述べたように木材よりも軽く、衝撃吸収能、音響特性等普通の金属ではみられない多くの機能性を持ち合わせている材料である。この材料は昭和40年代にはいと建築用材料、衝撃緩衝材として企業化の動きも見られ、精力的に市場開発調査が実施された。しかし、当時のアルミニウムフォームはコスト面もさることながら、気泡径の制御、均一分散化技術等に難点があり、安定した製品の供給が困難なために製品化するまでにいたらなかった。そのような状況においても、アルミニウムはその軽さ、強さ、柔らかさ、加工のしやすさ、資源の豊富さ、それに比較的低い融点(約660℃)をもつなどの特徴とフォームとして予想される特性を考えると、フ

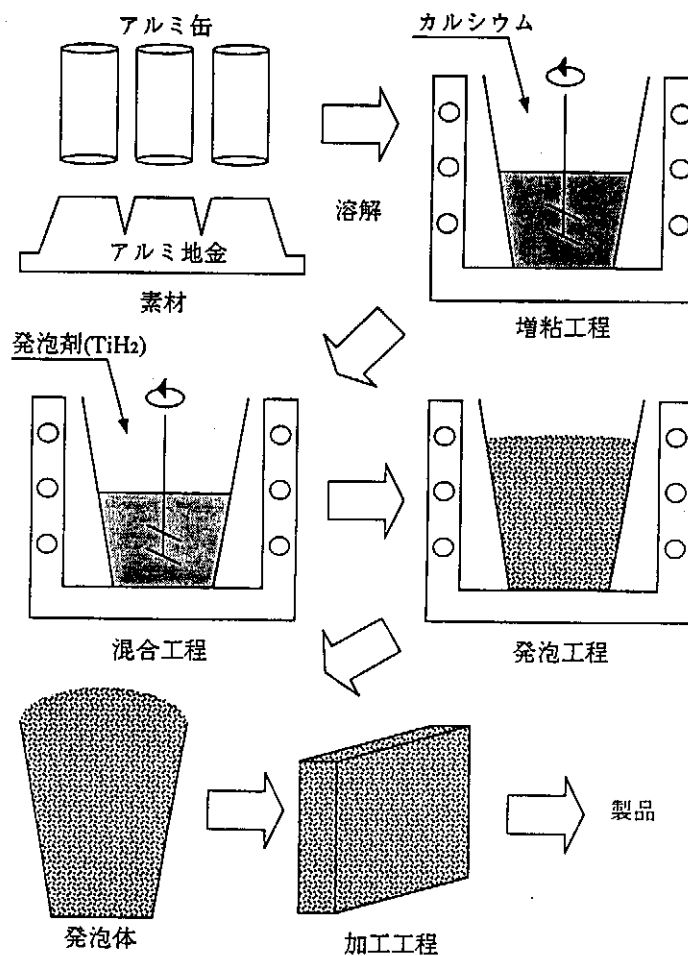


図1

フォームに用いられる金属として最右翼に位置していた。このような背景のもとで、近年通産省工業技術院九州工業技術試験所において比重0.2~0.4の範囲で気泡を任意に制御し、均一に分散させることを可能にしたアルミニウムフォームの製法が開発された。図1にアルミニウムフォームの製造工程の模式図を示す。その工程⁹⁾は

溶解工程→増粘工程→混合工程→発泡工程→
加工工程

から成り立っている。以下に、各工程について説明する。

(1) 溶解工程

フォーム用のアルミ合金として特に適したものはなく、むしろ経済的な意味からアルミ缶などの再生地金等を使用する。また、増粘用の添加剤(カルシウム0.8wt%)を必要に応じてこの工程で添加溶解しておく。

(2) 増粘工程

すでに述べたように、アルミニウムフォームの製法上重要な工程であり、合金添加法を使用している。具体的には、金属カルシウム(0.8wt%)を添加、攪拌することにより溶湯の粘性を増加させている。

(3) 混合工程

溶湯直接混合法による発泡剤の混合工程である。アルミニウムフォームの発泡剤として、水素化チタニウム(TiH_2)の微粉末を2wt%添加、攪拌する。 TiH_2 は720℃においてほぼ全量が熱分解し、分解後のTiは強化合金として働く、一般に、Tiは非常に高価であり2%の添加においてアルミニウムの2~4倍コストがかかり、製品、価格のかなりの部分を占めている。

(4) 発泡工程

各工程を経たアルミニウム浴を2分間静置すると、ちょうどパンが焼けるのと同様に H_2 における発泡が開始され、溶湯が上昇してくる。まだ若干の発泡が起きている状態で容器を炉外に出して冷却する。

(5) 加工工程

できた製品の寸法は、600×2000×600mmであり、それぞれの用途に応じて任意の板厚や寸法に切断される。このようにして生産されたアルミニウムフォームは以下の特徴を有する。

- a. 比重が小さい(0.2Mg/m³, アルミニウム固体の約1/10)
- b. 比強度が比較的大きい(アルミニウム固体の約1/2)
- c. 防音性がよい
- d. 断熱性が高い(熱伝導はアルミニウムの1/100, 大理石と同等)
- e. 剛性が高い
- f. ハニカムに比べて異方性が少ない
- g. 歪約70%低い変形応力での加工が可能

これらの特徴を利用してアルミニウムフォームは、高速道路の防音材、耐熱材、金属板と組み合わせてサンドイッチパネルのコア材、衝撃吸収能から自動車のバンパー、建築用部材、オフィスの電磁波シールド材、独特の意匠性をもったデザインディスプレイ材として使用されている。

1. 4 本研究の目的

フォームは前にも述べたように、材料そのものの性質とセル構造から由来する性質とをうまく組み合わせ断熱材、梱包材、構造材、触媒材、防音材といった分野で使用されている。しかし、以前より大量に使用されてきたにもかかわらず、セラミックス系のフォーム⁹⁾に比べて金属系のフォームの研究は明らかに立ち遅れており理解が浅く、しかも体系化されていない。そこで本研究では、これから需要が期待されるアルミニウムフォームを用いて、その力学的な挙動に注目し圧縮応力下における弾性変形、塑性変形、強度への温度・歪速度の影響を発泡化させずに得られた中実材料と比較しながら調査することを目的とした。

2. 試料および実験方法

2. 1 供試材

先に述べたように、供試材は純度99mass%の地金よりバッチ式の化学発泡法で作成したアルミ

ニウムフォームである。その化学成分を表1に示す。(ここでTiは発泡剤のTiH₂7から、Caは溶湯

表1

(mass %)

Si	Mn	Fe	Ca	Cu	Ti	Ni	Al
0.06		0.75	0.78		0.4		bal.

の増粘剤として添加されたカルシウムから混入したものである) るつぼは反応容器と鑄型を兼ねているが、壁の近傍では凝固速度が速くどうしてもセルの直径が内部のものより小さくまたセルの形状も壁に垂直な方向に伸びた非等軸的なものとなる傾向がある。そこで、得られた鑄塊は幅600mm、長さ2000mm、高さ600mmの大きさであるが、セル寸法が比較的一様でかつ等軸的な試料を得るためにその表層を取り除いて厚さ300mmにした。そこから、実験に使用する種々の寸法をもつ正方形断面の一辺の長さa、高さhの角柱試料を切り出した。以下に、その組合せを示す。

a = 5mm~50mm

h/a = 0.5~2.5 (アスペクト比)

さらに、図2に示すように供試材の長さ方向をX方向、気泡の上昇する方向つまり幅方向をY方

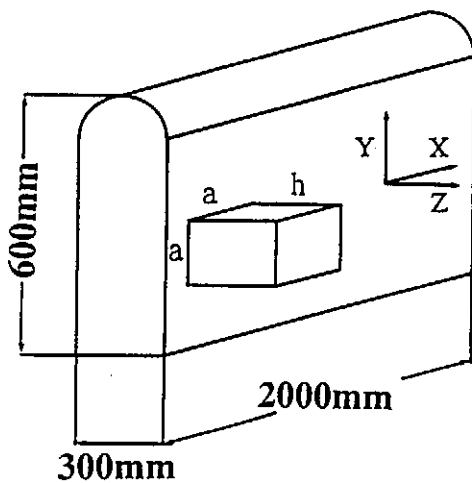


図2

向、それに垂直な方向をZ方向とした。そして、試料の密度を測定し相対密度の範囲 $\rho^* / \rho_s = 0.08 \pm 0.005$ のものを実験に使用した。また、発泡化させずに得られた中実材料は a = 5mm、h/a = 1.5の寸法に仕上げた。

2.2 組織観察

(1) マクロ組織観察

マクロ組織観察では試験片を# 2000までエメリー研磨し、実体顕微鏡や試験片を直接接写することを行った。さらに、マクロ組織観察実験の一部として、フォームのセルの大きさ測定やセル壁の厚さ測定を行った。フォームではセルの大きさ、セル壁の厚さがその圧縮強度に深くかわるため、セルの大きさとセル壁の厚さを測定した。

まず、セル寸法は、結晶粒径の測定によく用いられる切片法¹⁹⁾により測定した。すなわち、対象面に全長Lの直線をランダムに引き、この直線と交わるセルの平均数をN_Lとすると、平均のセル寸法Dは次式で与えられる。

$$D = k \times (L/N_L)$$

ここに、kは幾何学的な定数で、セル形状によって決まる。今の場合、球形セルを仮定し、k = 1.5を用いた。

セル壁の厚さは、任意の直線と交わるセル壁の切片長さの平均値を用いた。ただしより厳密には、比較的深いセル(すなわち観察面がセルの重心付近を通るようなセル)のセル壁厚さの平均値をとるべきであろう。

(2) ミクロ組織観察

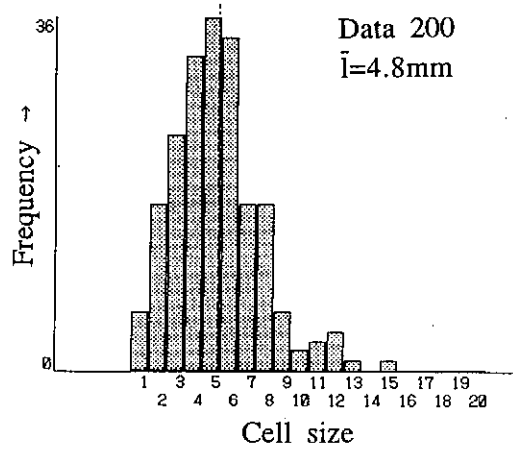
ミクロ組織観察ではエメリー研磨を# 2000まで、さらにバフ研磨を行いふっ化水素で30秒間腐食した後、光学顕微鏡にて観察を行った。なお、光学顕微鏡で観察された相についてEPMAで分析を行った。

2.3 圧縮試験

圧縮試験に用いた装置は、インストロン型万能試験機で、その試験条件は歪速度 $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、試験温度77K~573K、特に断わらない限り試験片の圧縮方向はZ方向とした。また、発

泡化処理を施さずに得た中実材料についても同様な試験を行い、フォームと中実材料の比較を試みた。

前述のように、アルミニウムフォームはセルの構造がランダムである。このため、圧縮試験結果にもばらつきが生じるものと考えられたので、同一条件で5本の試験片を用いて、再現性を確認しながら試験した。さらに、強度が試験片の寸法に依存することも考えられたので、この点についても調査した。



3. 実験結果

3.1 組織観察

(1) マクロ組織観察

本供試材の断面を実体顕微鏡で観察したところ、ほぼ等軸的なセル構造をもつことがわかった。図3および図4はそれぞれセル寸法とセル壁厚さの分布を示す。サンプル数は200である。これからわかるように、セルの大きさは1mm以下の小さなものから20mmの大きいものまで分布し、その平均値は4.79mmであった。また、セル壁の厚さは0.1mmから1.5mmまで分布しその平均値は0.33mmであった。

(2) ミクロ組織観察

供試材中のセルのエッジ部とフォーム部のミク

級	級の限界		度数
1	0.000000	~ 1.000000	6
2	1.000000	~ 2.000000	17
3	2.000000	~ 3.000000	24
4	3.000000	~ 4.000000	32
5	4.000000	~ 5.000000	36
6	5.000000	~ 6.000000	34
7	6.000000	~ 7.000000	17
8	7.000000	~ 8.000000	17
9	8.000000	~ 9.000000	6
10	9.000000	~ 10.000000	2
11	10.000000	~ 11.000000	3
12	11.000000	~ 12.000000	4
13	12.000000	~ 13.000000	1
14	13.000000	~ 14.000000	0
15	14.000000	~ 15.000000	1
16	15.000000	~ 16.000000	0
17	16.000000	~ 17.000000	0
18	17.000000	~ 18.000000	0
19	18.000000	~ 19.000000	0
20	19.000000	~ 20.000000	0

(mm)

図3

図4

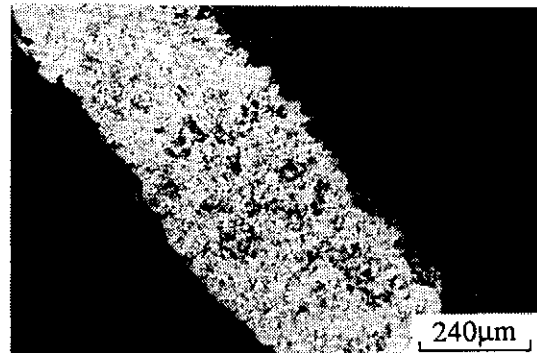
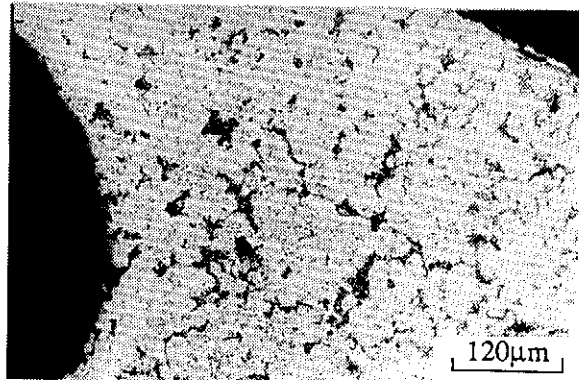


図5

ロ組織の一例を図5に示す。両部位の間に組織の差は認められない。エッジの組織をさらに高倍率で観察したものが図6である。マトリックス相、相1および相2のEPMA分析結果を図7に示す。

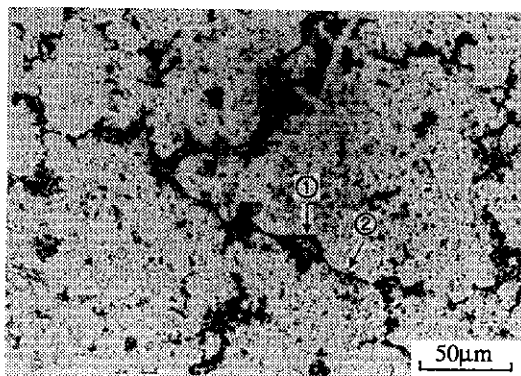


図6

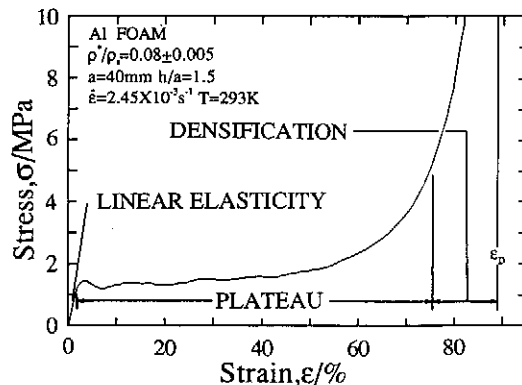
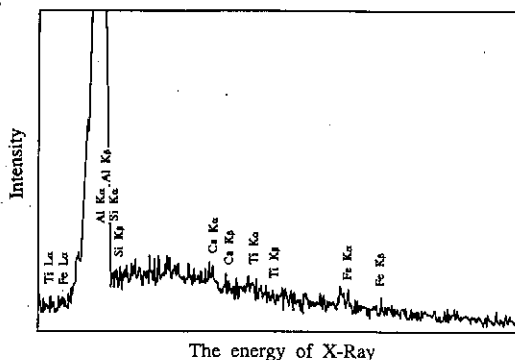


図8



The energy of X-Ray

	weight (%)	atomic (%)
Al	99.16	99.41
Si	0.10	0.10
Ca	0.22	0.15
Ti	0.10	0.06
Fe	0.41	0.20

図7

この結果と平衡状態図¹⁰⁾より母相はほぼ純Al、相1はAl₃Fe、相2はAlC₃+Al₃Tiであると推定される。

3.2 応力-ひずみ曲線

図8にa=40mm、h=60mmなる試料を常温圧縮したときの応力-歪曲線を示す。ただし、 $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ である。図には3つの特徴がある。

第1は、変形の初期に線形弾性域が現れることである。この段階ではセル壁の弾性的な圧縮、引

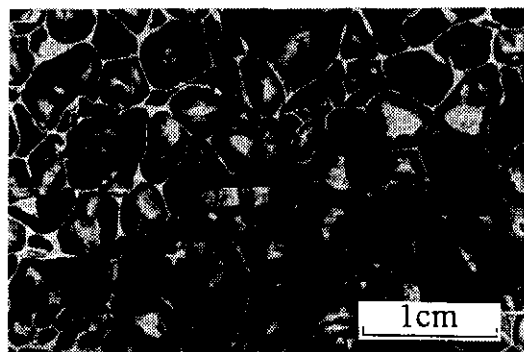


図9

張、曲げ変形に起因すると考えられる。

第2は、降伏後かなり長い歪範囲にわたって応力がほぼ一定の段階が現れることである。さらに細かくみると、いったん緩やかな応力ピークを示した後、凹凸をくり返しながら変形してゆくこと

がわかる。この応力一定の領域をプラトー段階と呼ぶ。図9に $\epsilon = 5\%$ 変形させたときの断面組織とそのSEM拡大写真を示す。これらの写真から、ある試料断面を貫通するセル壁の座屈が場所を変えて断続的に発生し、ちょうど軟鋼の下降伏挙動に似た現象が起きるためこのような応力一定の段階が現れることがわかる。

図10はフォームと緻密体の応力-歪曲線を比較したものである。緻密体では応力が急増するが、

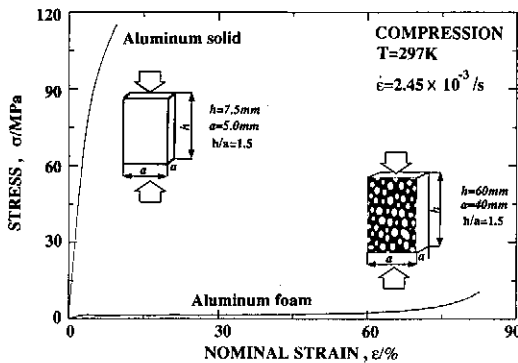


図10

フォームでは歪50%まで低い応力のまま変形が進行する。この点がフォームをエネルギーを吸収材料として利用する際に重要となる。

応力-歪曲線の特徴の第3は、歪が50%を越えると応力が緩やかに上昇し始め、70%を越えると急増し始めることである。これは座屈によるセル壁の折り畳みが進んでセル壁同士が互いに接触し、フォームが緻密化しはじめたことによるもので、この段階を緻密化段階と呼ぶ。なお、図中に示した ϵ_0 はフォームが完全に緻密化する歪を示したもので次のように求めた。

$$\begin{aligned}\epsilon_0 &= 1 - 1.4 (\rho^* / \rho_s) \\ &= 1 - 1.4 (0.08) \\ &= 0.89\end{aligned}$$

3.3 データの再現性

アルミニウムフォームを $a = 40\text{mm}$ 、 $h/a = 1.5$ 、 $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $T = 293\text{K}$ の条件で5本圧縮試験した結果を図11に示す。各曲線とも形

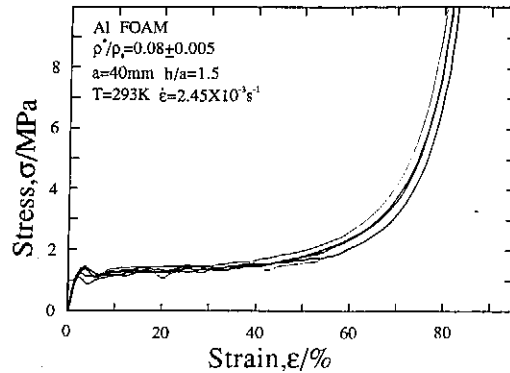


図11

状はよく似ており、プラトー段階での応力のばらつきも小さい。変形初期のピーク応力と後期の緻密化開始歪に若干のばらつきがあるが、密度のばらつきやたまたま試料中に存在した粗大なセルによるものと考えられる。しかし、全体的にみて本供試材の圧縮データに関する再現性は良好であるといえる。

3.4 試料寸法の効果

試験片のアスペクト比 $h/a = 1.5$ 、一辺の長さを $a = 5\text{mm} \sim 50\text{mm}$ と変化させて寸法の効果をみた結果を図12に示す。試験条件は、 $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $T = 293\text{K}$ である。5mmと10mmを除いてプラトー域での応力はほぼ1.3MPa一定となることから、寸法効果は20mm以下で現れてくると考えられる。

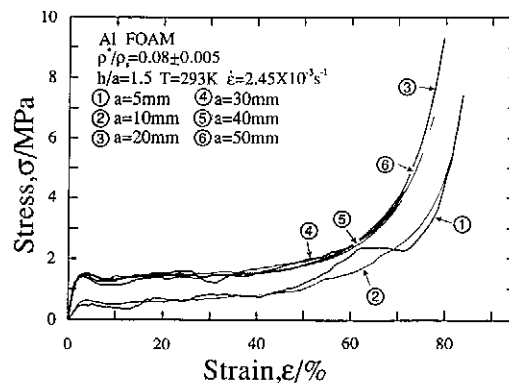


図12

3.5 試料形状の効果

試験片の一辺の長さ $a = 40\text{mm}$ 、アスペクト比 $h/a = 0.5 \sim 2.5$ と変化させたときの結果を図13に示す。試験条件は、 $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $T = 293\text{K}$ である。プラトー域での応力は $h/a = 2.5$ を除いてほぼ一定の 1.3MPa となった。しかし、応力-歪曲線では $h/a = 0.5$ においてその曲線が他のものと異なっている。従って、 $h/a = 0.5$ と 2.5 を除けば、形状効果は認められなかった。

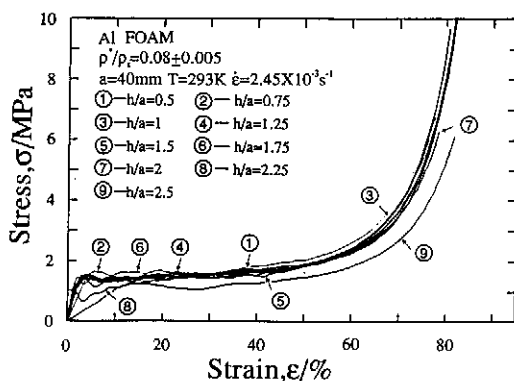


図13

3.6 強度の異方性

図14は $a = 40\text{mm}$ 、 $h/a = 1.5$ なる試料を図2のX、Y、Zの3方向に圧縮したときの公称応力-歪曲線を示している。試験条件は、 $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $T = 293\text{K}$ である。このように全歪領域において3本の曲線はよく一致し、そのプラトー

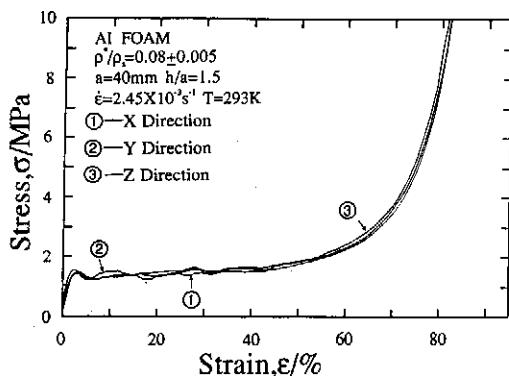


図14

での応力もほぼ一致している。このように、本供試材にはハニカムなどのような強い異方性はないといえる。

3.7 強度の温度依存

アルミニウムフォームにおける温度の影響を調べるために、 $a = 40\text{mm}$ 、 $h/a = 1.5$ なる試料を3つの温度 77K 、 293K 、 573K で圧縮した。歪速度は $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ である。結果を図15に示す。 573K において曲線の凹凸はなくなり、 77K では逆に凹凸は激しくなっていた。この理由は、 573K においてセル壁が軟化しある断面のセル壁が座屈を起こすのではなく全体のセル壁が変形することにある。また、 77K ではセル壁が軟化し脆くなったために応力は上昇し凹凸が大きくなったものと考えられる。

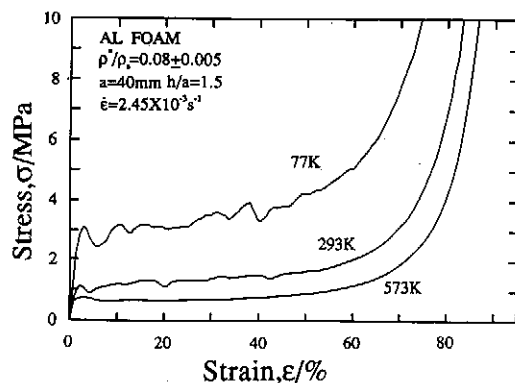


図15

3.8 強度の歪速度依存

図16は $a = 40\text{mm}$ 、 $h/a = 1.5$ なるフォームの変形応力の歪速度依存性を見たもので、比較のため緻密体 ($a = 5\text{mm}$ 、 $h/a = 1.5$) の結果も併記してある。なお、温度は $77\text{K} \sim 573\text{K}$ 、歪速度範囲は $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-2}\text{s}^{-1} \sim 10^{-5}\text{s}^{-1}$ である。緻密体では一般によく知られているように高温側で歪速度の影響があったが、フォームにおいてはその影響はみられなかった。つまり、緻密体に比べてフォームの強度は歪速度に鈍感であるといえる。

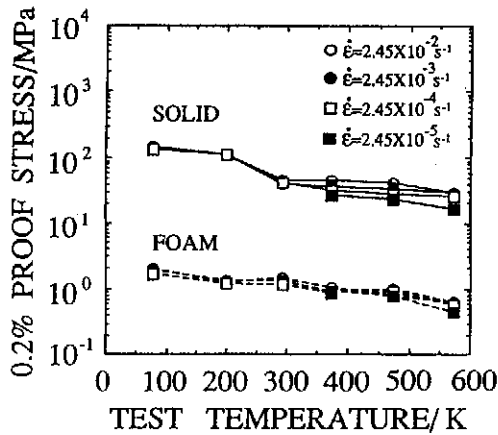


図 16

4. 考察

4.1 セル構造と変形のモデル化

4.1.0 エッジ体積率 ϕ

以下では、アルミニウムフォームの変形機構を考察するが、球状のセルでは解析が困難なので、図17に示すような立方体形状のクロズドセルを仮定する²⁾。立方体の辺の部分にはエッジと呼ばれる支柱が、面の部分にはフェースと呼ばれる薄い膜があり、立方体の一辺の長さは l 、エッジの厚さは t_e 、フェースの厚さは t_f である。

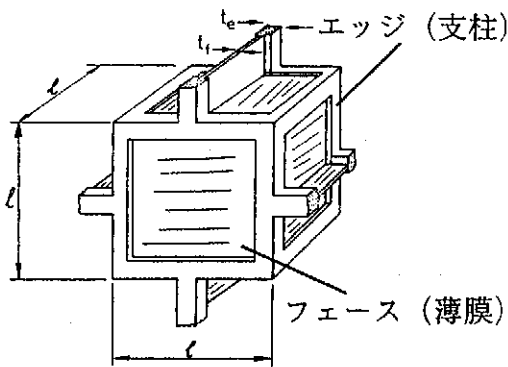


図 17

まず、フォームの変形機構を考察するにはエッジ部のセル壁全体に対する体積率 ϕ が重要になるので、その ϕ を求める。このモデルのエッジのセル壁全体に対する体積率を求める式は幾何学的な関係からこのようになっている。

$$t_e/l = 1.4 (1 - \phi) (\rho^*/\rho_s)$$

ρ^*/ρ_s は相対密度である。この式を変形して

$$(1 - \phi) = (t_e/l) / \{1.4 (\rho^*/\rho_s)\}$$

$$\phi = 1 - [(t_e/l) / \{1.4 (\rho^*/\rho_s)\}]$$

これに測定値、セルの大きさ $l = 4.79\text{mm}$ 、セル壁の厚さ $t_e = 0.33\text{mm}$ 、相対密度 $\rho^*/\rho_s = 0.08$ を代入すると体積率 $\phi = 0.39$ となる。つまり、セル壁を構成しているアルミニウムのうち約40%がエッジに集まっていることになる。以後、アルミニウムフォームの変形の解析にはこの求めた値 $\phi = 0.39$ を用いてゆく。

4.1.1 線形弾性領域

アルミニウムフォームの変形の第一段階は線形弾性変形である。この段階では、おもにセル壁の弾性変形によるもので、その変形が寄与する成分は図18に示されるように、セル壁の曲げ、内部ガス圧、フェース部の薄膜伸びの三つである。線形弾性変形におけるフォームのヤング率はこの三つの成分を考慮にいれて次のように表される。

$$E^*/E_s = \phi (\rho^*/\rho_s)^2 + (1 - \phi) (\rho^*/\rho_s) + \{P_o/3E_s (1 - \rho^*/\rho_s)\}$$

E^* : フォームのヤング率

E_s : 緻密体のヤング率

P_o : 内部ガス圧

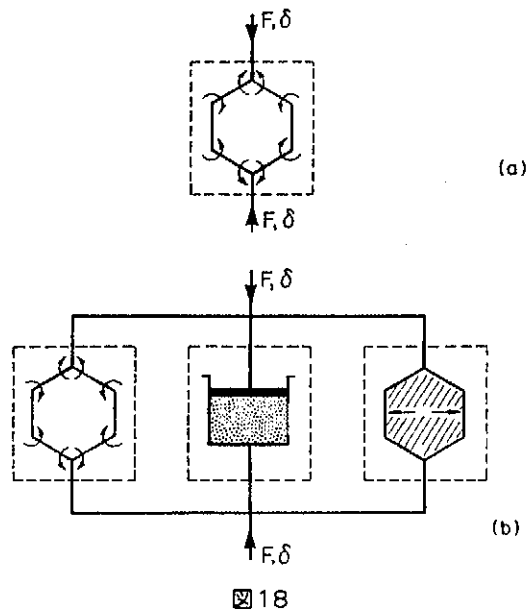


図 18

この式の右辺の第1項はセル壁の曲げの影響、第2項はセルフェースの伸びの影響、第3項は内部ガス圧の影響を示している。

ここで、内部ガス圧は通常、大気圧とされているがそれが正しいかどうかを推定してみる。まず、試料の重さを圧縮前と圧縮後で測定するとその重さの差が含まれているH₂の重さとなる。そして、H₂の体積はセルの体積と等しいのでH₂ガス密度がわかり、これを標準状態のガス密度と比較することにより内部のガス圧が大気圧であるかどうかの判断ができる。三つの試験片について実験した結果は、ガス密度 $1.2 \times 10^{-5} \text{Mg/m}^3$ 、 $2.2 \times 10^{-5} \text{Mg/m}^3$ 、 $7.6 \times 10^{-5} \text{Mg/m}^3$ 、平均すると $3.7 \times 10^{-5} \text{Mg/m}^3$ であった。標準状態のガス密度は $8.9 \times 10^{-5} \text{Mg/m}^3$ であり、およそ実験値とは2倍の差になる。しかし、計算時に閉じていないセルの体積の含まれていることから実験値は実際の値より小さく求められていると考えられる。従って、内部のガス圧は大気圧としてもよいことがわかる。

さらに、内部ガス圧が大気圧と等しいならば先の式の第3項は無視できるほど小さくなるので実質的には次のようになる。

$$E^*/E_s = \phi (\rho^*/\rho_s)^2 + (1 - \phi) (\rho^*/\rho_s)$$

この式を ϕ を変化させ、 E^*/E_s と ρ^*/ρ_s との関数でグラフ化したものが図19である。この図に

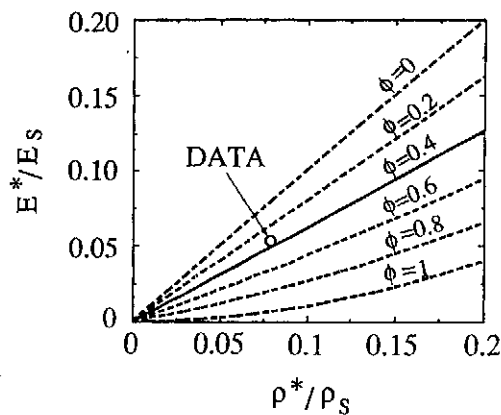


図19

測定値 $\rho^*/\rho_s = 0.08$ 、 $E^*/E_s = 0.05$ を示すと図中のDATAの位置にくる。この点は先に求めた ϕ の値 $\phi = 0.4$ の曲線上に乗っていることから、図17のモデルによりフォームの線形弾性変形挙動を説明できることがわかる。

4.1.2 塑性崩壊とプラトー領域

次に、変形の第2段階すなわち応力がほぼ一定となるプラトー段階を考える。この段階において、セル壁は弾性的なたわみの状態からエッジの角の部分で塑性ヒンジ¹⁾と呼ばれる塑性変形を起こす。塑性ヒンジが起こる応力は先の三つの影響を考えて次のようになっている。

$$\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys} = 0.3 \{ \phi (\rho^*/\rho_s) \}^{3/2} + (1 - \phi) (\rho^*/\rho_s) + (P_0 - P_a) / \sigma_{ys}$$

σ_{pl}^* : フォームのプラトー応力

σ_{ys} : 緻密体の降伏応力

P_a : 大気圧

さらに、式の第3項は $P_0 = P_a$ であるから無視できる。従って

$$\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys} = 0.3 \{ \phi (\rho^*/\rho_s) \}^{3/2} + (1 - \phi) (\rho^*/\rho_s)$$

となる。そして先と同様に ϕ を変化させ、 E^*/E_s と ρ^*/ρ_s との関数でグラフ化した結果が図20である。これより、本供試材の σ_{pl}^* と σ_{ys} との比は0.051になる。この値を $a = 40 \text{mm}$ 、 $h/a = 1.5$ 、 $\dot{\epsilon} = 2.45 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、の条件で試験温度を77K、293K、573Kと変えたときの各温度の平均

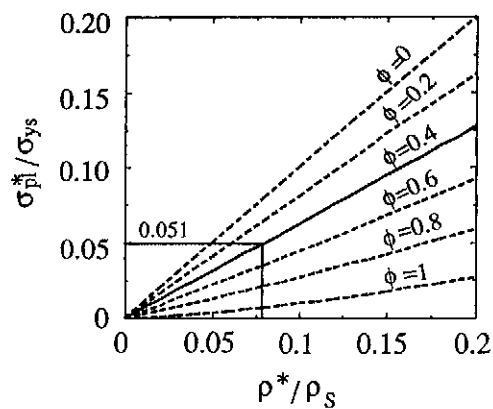


図20

表2

	EXPERIMENTAL (MPa)			THEORETICAL
	$(\sigma_{pl})^*$	(σ_{c2})	$\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys}$	$\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys}$
77K	3.13	129.42	0.024	0.051
293K	1.42	45.00	0.032	0.051
573K	0.64	29.31	0.022	0.051

値と比較したものが表2である。いずれの温度においても理論値よりも少し低くなっているがその差はファクター2ないし3の範囲に留まっている。この結果は、先の式が温度に依存しないことを示している。

4. 1. 3 緻密化領域

アルミニウムフォームの変形の第三段階は緻密化段階である。これは座屈によるセル壁の折り畳みが進んでセル壁同士が互いに接触する段階である。完全緻密化歪 ϵ_0 はセルが完全につぶれ中実材料と同じ状態になる歪 (0.89) のことであるから、それをここでは検討する。圧縮中のフォームの密度変化を計算によって求めた結果が図21である。密度は歪が60%を越えるあたりから急上昇しはじめ、歪90%において 2.4 Mg/m^3 となり、ほぼ母材なみといえる

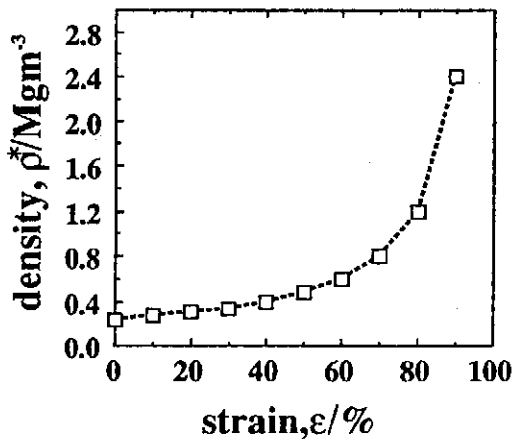


図21

4. 2 強度に及ぼす温度と歪速度の影響
3. 2節で述べたように、緻密体では高温側で歪

速度の低下にともなう耐力の低下がみられたが、フォームにおいては歪速度の影響はみられなかった。この理由を考える。一般に、温度一定のとき歪速度 $\dot{\epsilon}$ と応力 σ の間には次の関係が成り立つ。

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n$$

ここに、Bおよびnは材料定数である。この式に基づいて、フォームと緻密体について歪速度と0.2%耐力の両対数プロットを試みた結果が図22である。データは直線上にのり、その傾きから応力指数nを求めると、緻密体では $n=10$ 、フォームでは $n=20$ となった。緻密体のn値は純Alのクリープにおけるn値 (=5) より2倍も大きい。これは3. 1節で述べたように、母相中に化合物の粒子が分散しているためと思われる。フォームのn値が緻密体のそれのさらに2倍 (=20) となった理由は定かでない。

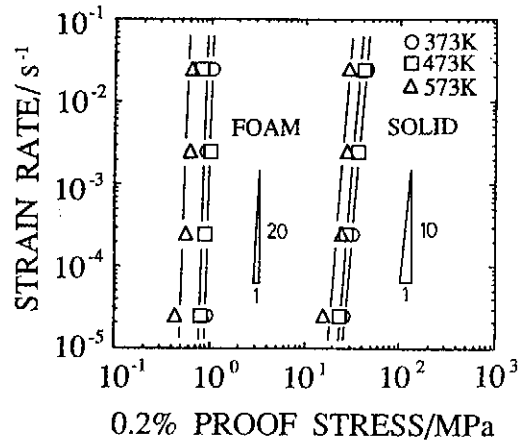


図22

5. まとめ

- 1) 本供試材のアルミニウムフォームは等軸的なセル (寸法4.79mm、セル壁厚さ0.33mm) のクローズドセルフォームである。
- 2) ミクロ組織観察において、フェース部とエッジ部に組織の違いはみられず析出していた相はその大きさが数 μm から十数 μm の Al_3Fe 、 Al_3Ti 、 Al_2Ca であった。
- 3) 本フォームの応力-歪曲線は、線形弾性段階、

プラトー段階、緻密化段階の3段階からなる。各段階の変形はセル壁の挙動をモデル化することにより理解できる。

- 4) 本フォームは辺長 = 20mm~50mm、高さ対辺長比 = 0.75~2.25 の範囲では寸法効果も形状効果も示さない。また強度の異方性も存在しない。

謝 辞

実験に協力された芝浦工業大学大学院小嶋昭夫氏（現在、株式会社アドバンテスト）と同北條伸夫氏に感謝する。本研究は天田金属加工機械技術振興財団からの資金援助を受けて行なわれた。同財団の関係各位に深謝する。アルミニウムフォーム試料は神鋼鋼線工業株式会社より提供いただいた。同社の伊藤雅夫氏にお礼申し上げる。

参考文献

- (1) L.J.Gibson and M.F.Ashby, Cellular Solids, Pergamon Press, (1988).
- (2) 今川、上野、秋山、素形材、28 (1987), 1
- (3) 谷、工業材料、30 (1982), 8.
- (4) 新日本製鉄、産業公害防止協会（共編）、産業公害、2 (1991), 3.
- (5) 今川、上野、秋山、工業材料、30 (1982), 71.
- (6) 今川、秋山、上野、素形材、★ (1986), 7.
- (7) 福島、藤井、北沢、日立造船技報、49 (1988), 42.
- (8) 伊藤ら、日本金属学会報、26 (1987), 311.
- (9) 例えば、近藤ら（編著）、「多孔材料」、技報堂、(1973).
- (10) 日本塑性加工学会（編）、「超塑性材料の特性標準化に関する調査報告」、(1988), 47.
- (11) T.B.Massalski, Binary Alloy Phase Diagrams, ASM, (1988).