

(論文)

# 発泡アルミニウムの製造技術とその諸特性

## The Manufacturing Process and Mechanical Properties of Porous Aluminum



西 誠治\*  
Seiji Nishi



楨井浩一\*(工博)  
Dr. Koichi Makii



有賀康博\*  
Yasuhiro Aruga



濱田 猛\*\*  
Takeshi Hamada



内藤純也\*\*  
Junya Naito



三好鉄二\*\*\* (工博)  
Dr. Tetsuji Miyoshi

Porous aluminum has an extremely low density and novel physical, mechanical, acoustic properties. It has now taken attention as an excellent energy absorber. Its energy absorption properties were improved by controlling the porosity size distribution. It was found that a composite made from aluminum section and porous aluminum had a superimposing effect in terms of energy absorption properties. The same result was found through FEM analysis. The collapse behavior of porous aluminum for compression testing was investigated with in-situ X-ray radiography.

まえがき = 近年、発泡金属に対する関心は高く、特に発泡アルミニウムについては、単体およびその複合材料のエネルギー吸収特性や疲労特性などの機械的特性の研究が欧州および北米を中心に活発に行われており、製造企業も増加している。この特徴は超軽量で優れたエネルギー吸収特性や吸音特性などの性質を有することであり、現在、主として吸音材、アルミハニカムの代替材などに利用され、さらには、自動車軽量化に向けた適用が検討されている。そのひとつとして、平成14年度から、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクト「自動車軽量化のためのアルミニウム合金高度加工・形成技術の開発事業」がスタートし、当社も参画している。本報告では、発泡アルミニウムの製造方法、耐衝撃部材としての圧壊特性を主とした機械的性質、ならびに高輝度X線を用いた発泡形態のイメージング技術について述べる。

### 1. 発泡アルミニウムの製造技術

#### 1.1 製造工程

発泡アルミニウムの製造法には、鑄造法、粉末冶金法、化学蒸着法など多くの製造方法があるが、神鋼鋼線工業

㈱では、工業技術院九州工業試験所(現在:産業技術総合研究所九州センター)で開発された鑄造法に属するクローズドセル発泡アルミニウムの製造方法を工業化し、商品名アルポラス(神鋼鋼線工業㈱の商標)として製造・販売を行っている。アルポラスの製造工程を図1に示すが<sup>1)</sup>、発泡剤として水素化チタンを用いている。まず、アルミニウム溶湯にカルシウムを添加し、大気中で攪拌することにより酸化物を生成させ、溶湯中に分散させることにより増粘を行っている。増粘した溶湯を鑄型に注湯し、鑄型内において発泡剤を添加し強攪拌することで溶湯内に均一分散させる。水素化チタンから解離した水素ガスにより、溶湯は発泡し10倍以上に膨張して鑄型内を満たす。水素化チタンが分解して生成する気泡の上昇および結合による気泡の消失を抑制するために、溶湯の粘性を増加させる必要があり、事前の増粘工程が必須である。その後、強制空冷で凝固させることにより発泡アルミニウムを得ることができる。実生産の発泡体のブロックサイズは2045×450×650mmで、重量は160kgである。発泡体は、用途に応じて任意のサイズに帯鋸で切断される。

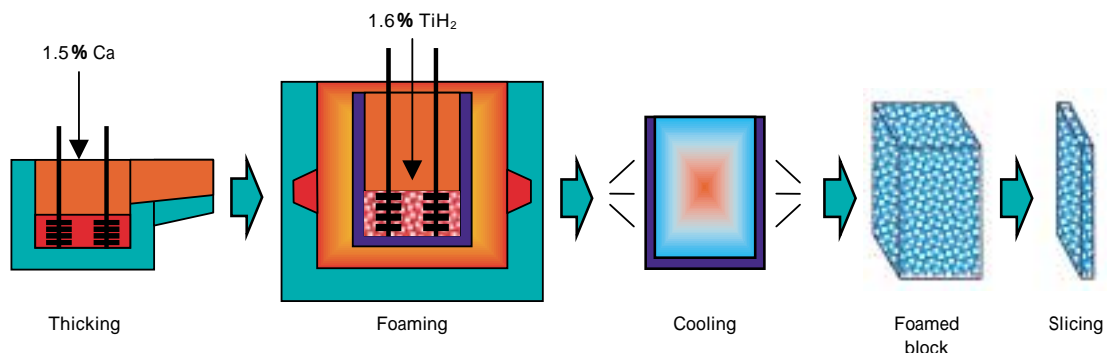


図1 アルポラスの製造工程  
Fig. 1 Manufacturing process of ALPORAS

\*技術開発本部 材料研究所 \*\*技術開発本部 機械研究所 \*\*\*神鋼鋼線工業㈱ 開発本部

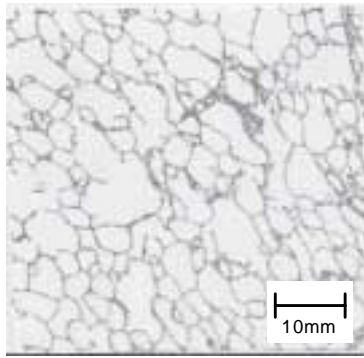
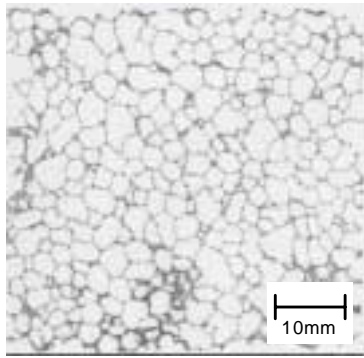


図2 気泡分布の比較  
Fig. 2 Comparison of pore distribution

### 1.2 特性向上のための製造方法の改善

発泡アルミニウムは、車両などの構造部材や衝撃吸収部材として、より高い強度とエネルギー吸収特性を要求されている。発泡金属の強化には、相対密度を高くすること、構成材料自体を高強度化すること、およびセル構造の最適化がある。相対密度を高めると後述するプラトー応力は増大するが、プラトーひずみが減少し変形能が低下するため、必ずしも吸収エネルギーの増大にならない<sup>2)</sup>。

図2に、密度がほぼ同じ値でピーク応力値の異なる発泡体の気孔分布の例を示す。(a)と(b)の密度はほぼ同じであるが、(a)のほうがより均一な気泡分布となっており、ピーク強度が高い。これは、(b)においては気泡が不均一かつ粗くなっており、気泡の合体などにより膜に波形や亀裂などの欠陥が増加したことや、構造によるものと推測される。この原因としては、Ca量が少なく粘度が不足して冷却時に気泡の合体が生じたものと考えられ、粘度は重要な制御因子である。現在、「高信頼性ポラスアルミニウム材料の開発」のプロジェクトでは、成分の最適化によるセル構造の改善と、合金化による高強度化および吸収エネルギーの増大を目的とした開発を行っている。また、連続発泡などの新しいプロセスの開発も実施中である。

## 2. 発泡アルミニウムの特性と評価技術

### 2.1 発泡アルミニウムの圧壊特性

図3にアルポラスの静的圧壊試験結果を示す。このようにポラス金属を圧縮変形させると、そのマクロ構造から型材では得難い独特の荷重・変位曲線を示す。圧縮変形に伴って、弾性変形領域、応力がほぼ一定のプラト

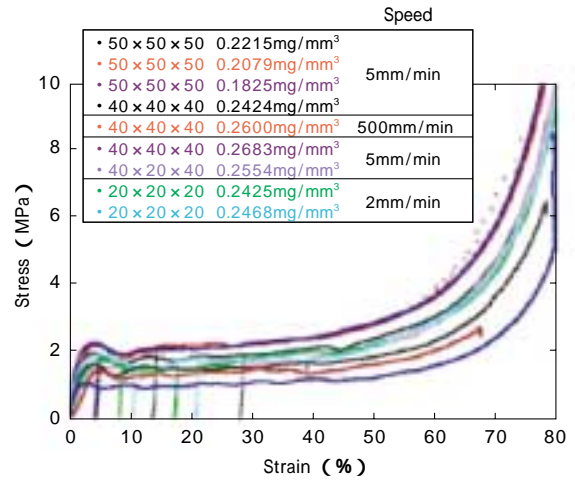


図3 静的圧縮試験での応力-ひずみ曲線

Fig. 3 Stress-strain curve from a uniaxial compression test on cubic specimen of ALPORAS

ー領域、さらに空隙減少による緻密化領域が現れる。このことから、ポラス金属は安定した衝撃保護が期待できる。また、除荷・再負荷を行っても応力-ひずみは完全回復する高い延性を有することや、試験片サイズの影響は少ないことがわかる。図4は図3の結果をエネルギー吸収量と密度の関係で整理し直したものであるが、変形量一定の条件では、エネルギー吸収量は密度とともに線形増加することがわかる。

一方、自動車など衝突時のひずみ速度は $10^3/s$ にまで達するとされている。衝撃試験方法には落錘式などがあるが、ここでは、図5に示すホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験を用いた。この方法は、圧縮空気加速された打撃棒が入力棒の端面に衝突し、入力棒と出力棒の間に挟んだ試験片を圧縮変形させるものである。図6に、アルポラスの衝撃および準静的圧縮試験結果を示す。これより、アルポラスにはひずみ速度依存性のあることがわかる。

### 2.2 ポラス金属のFEM解析予測

ポラス金属に対し限界状態理論を適用し、圧壊特性のFEM解析における構成式とその妥当性を検証した。ポラス金属の体積弾性挙動をその体積ひずみが静水圧

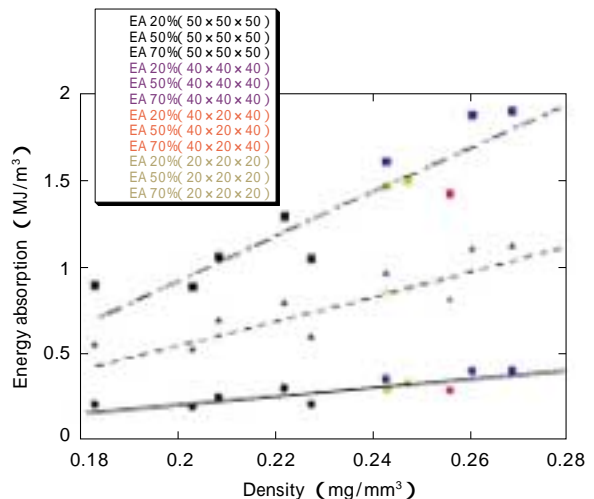


図4 密度とエネルギー吸収量の関係

Fig. 4 Relationship between density and energy absorption

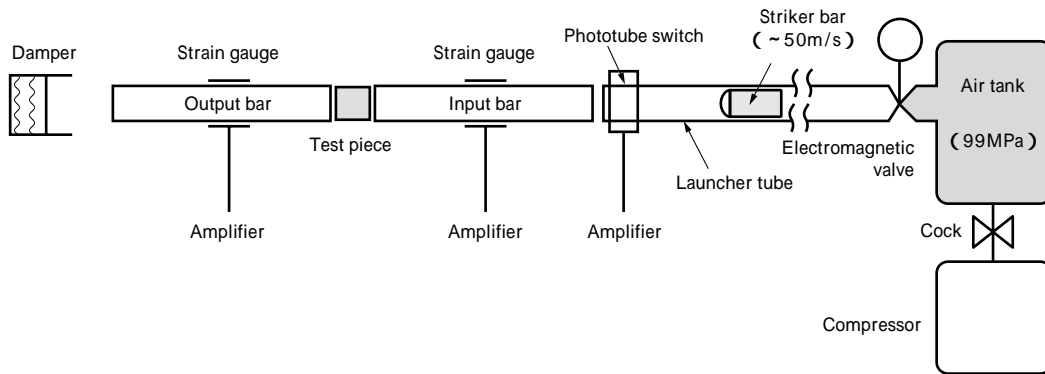


図5 スプリット・ホプキンソン棒法衝撃試験機の構成  
Fig. 5 Schematic arrangement of the split Hopkinson pressure bar apparatus

応力の対数に比例すると仮定し、降伏に至るまでの挙動を式(1)のように定義する。

$$p = -p_t^{el} + (p_0 + p_t^{el}) \exp\left[\frac{1+e_0}{\epsilon_{vol}^{el}}(1 - \exp\left[-\frac{\epsilon_{vol}^{el}}{e_0}\right])\right] \dots\dots(1)$$

ここに、 $p$  : 静水圧応力、 $p_t^{el}$  : 静水圧引張強度、 $p_0$  : 相当静水圧応力の初期値、 $\epsilon_{vol}^{el}$  : 材料パラメータ(対数体積弾性率)、 $e_0$  : 初期間隙比、 $\epsilon_{vol}^{el}$  : 弾性ひずみの体積変化分である。また、ポーラス金属の降伏曲面は、相当静水圧応力  $p$  によって定義した。さらに、偏差主応力平面内における降伏曲面がMisesの降伏曲面に一致すると仮定し、ポーラス金属の降伏曲面を式(2)で定義した。

$$F = f - f_0 = \left[\left(\frac{p_t - p_c}{2} + p\right)^2 + \left(\frac{q}{M}\right)^2\right] - \frac{p_c - p_t}{2} = 0 \dots\dots(2)$$

ここに、 $q$  : Mises 相当応力、 $p_t$  : 材料の静水圧引張強度、 $p_c$  : 体積塑性ひずみの関数である静水圧縮降伏応力である。 $M$  は、式(3)で定義される  $p$ - $q$  平面内における限界状態の勾配である。

$$M = \sqrt{p_t p_c - \frac{1}{3} (p_t - p_c)^2} - \frac{1}{9} \dots\dots(3)$$

ここに、 $p_0$  : 単軸圧縮における初期降伏応力、 $p_{c0}$  :  $p_c$  の初期値である。

ここで、静水圧引張強度  $p_t$  は、塑性変形の全過程を通じて一定、圧縮強度  $p_c$  は、材料の圧縮(密度増加)とともに発展していくものと仮定する。硬化則は、降伏後の相当静水圧応力と間隙比との関係から対数体積塑性率を

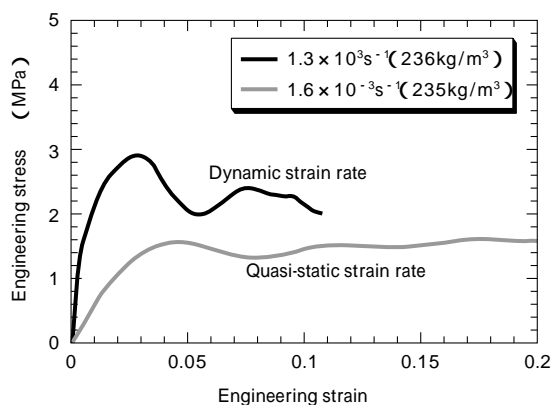


図6 アルポラスの衝撃および準静的ひずみ速度における応力-ひずみ関係  
Fig. 6 Engineering stress-strain curves of ALPORAS at dynamic and quasi-static strain rates

用いて指数形式で与える方法と、静水圧応力軸上における降伏曲面の大きさ  $p_c + p_t$  と体積圧縮塑性ひずみ  $\epsilon_{vol}^{pl}$  を区分的線形形式で与える方法を用いた。

相当塑性ひずみ増分  $d\epsilon_{vol}^{pl}$  の方向が降伏曲面の法線方向と一致し、一軸圧縮では軸直行方向に塑性ひずみが生じないと仮定すると、単軸圧縮降伏応力と静水圧縮降伏応力との関係は式(4)のように表される。

$$\frac{p_t - p_c}{3} - \left(\frac{2}{9} + \frac{1}{3M^2}\right) p_0 = 0 \dots\dots(4)$$

図7に、ポーラス金属の単軸圧縮試験結果と、式(4)からパラメータ決定を行ったFEM解析結果を示す。塑性域の硬化則を指数形式とした場合には、対数体積塑性率によって適合限定されるが、区分的線形形式とした場合には実験結果を良好に再現することができる。

ポーラス金属とさまざまな材材との一体化面を接触問題として取扱ったFEM解析により、クラッシュボックス想定部材の形状抽出を行った。図8に変形図を示し、図9に50%変形時のエネルギー吸収量予測結果を示す。これより、いずれの材材においても複合部材のエネルギー吸収量は、フレーム単体やアルポラス単体の合計よりも大きくなっており、アルポラス充填による複合化において重量効果があることがわかる。

### 2.3 クラッシュボックス想定部材の圧壊試験結果

前節でのエネルギー吸収量予測結果をもとに、クラッシュボックス想定部材を試作した。図10には、試作したクラッシュボックス想定部材とその想定部材の落錘式衝撃

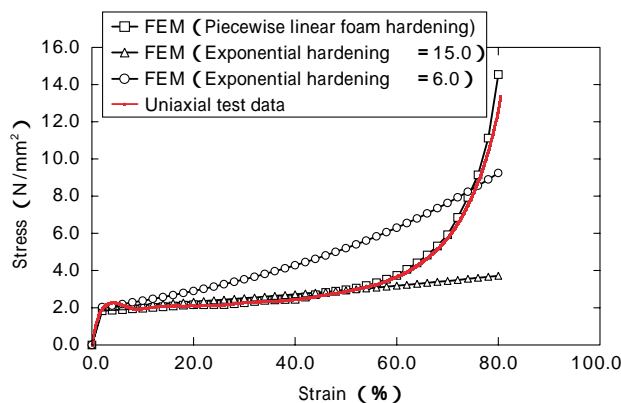


図7 アルポラスのFEM解析結果  
Fig. 7 FEM result of ALPORAS

Strain	Square pipe	Cylinder	Hat formed	Combine hat formed
	80 × 80mm, R10 t 2.5mm	90 t 3mm	80 × 60mm, R10 t 2mm	80 × 60mm, R5 t 2mm
25%				
50%				
75%				

図 8 FEM解析変形図

Fig. 8 Displacement of the crash box by FEM analysis

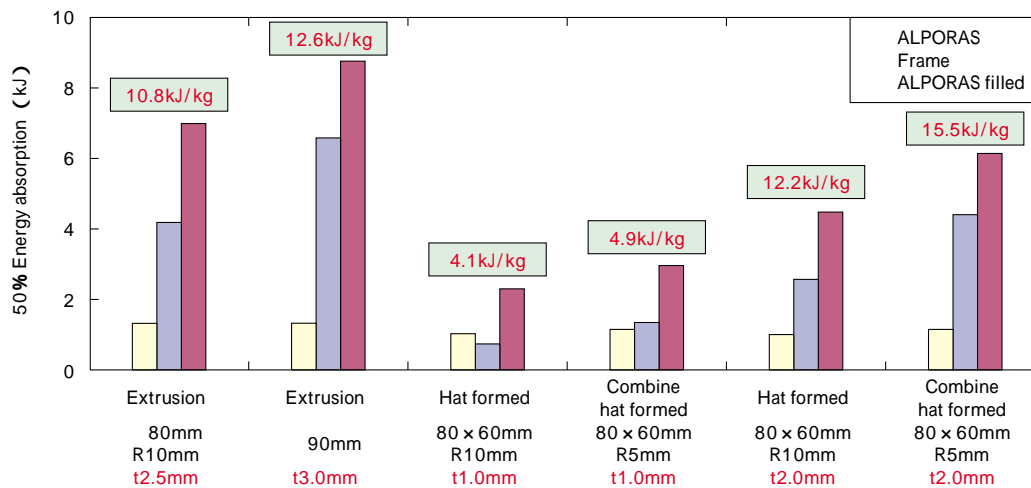


図 9 エネルギー吸収量のFEM解析結果

Fig. 9 FEM analysis result of the energy

試験での50%変形時のエネルギー吸収量を示す。クラッシュボックス想定部材の長さは、全て200mmである。押出材内側の断面寸法は76 × 76mm、板厚 2 mmであり、曲げ成形したハット型型材と、重ね合わせハット型型材の内側の断面寸法は70 × 70mm、板厚1.5mmで、ピッチ30mmのスポット溶接で締結した。供試材は、押出材、曲げ成形型材ともにアルミニウム合金5052H34である。これより、前節の予測と同様に、実試験においても複合化による重畳効果のあることがわかる。

### 3. 発泡形態のイメージング技術

#### 3.1 実験方法

発泡体のマクロな変形挙動と発泡セル個別のミクロな変形挙動との相関関係を明らかにし、発泡体の衝突吸収エネルギーに及ぼす発泡形態の支配因子を明らかにするために、静的および変形中のin-situイメージングを試みた。従来は、立体的な粒径分布を2次元断面観察により評価しているために、平均粒径しか評価しておらず、発泡径

の不均一性評価が不可能であった。そこで、セル壁構造の観察に必要なμmオーダの高分解能と、セル径の不均一評価に必要な数十mmオーダの広視野という二律背反を両立できる観察技術の開発を行った。

静的な高解像度・広視野イメージング用と変形中のin-situイメージング用の設備を、大形放射光設備SPRING-8のビームラインBL19B2に導入した模式図を図11に示す。測定試料にはアルポラスを用いた。用いたX線のエネルギーは33keVである。

静的な観察では、光源の輝度と平行性に優れるSPRING-8のビームラインBL16B2を光源として用いた。Z方向移動ステージ上に試験片を設置し、試験片を移動させ、高解像度と広視野を両立するパノラマ法とするために、複数枚の透過写真を撮影した。高分解能のCCDカメラを用い、得られた透過写真を画像解析ソフトを使って画像合成し、静的なパノラマ写真とした。これにより、mmオーダ発泡体の径の不均一性評価に必要な10mm以上の視野と、数10μmオーダのセル壁内部構造の観察に

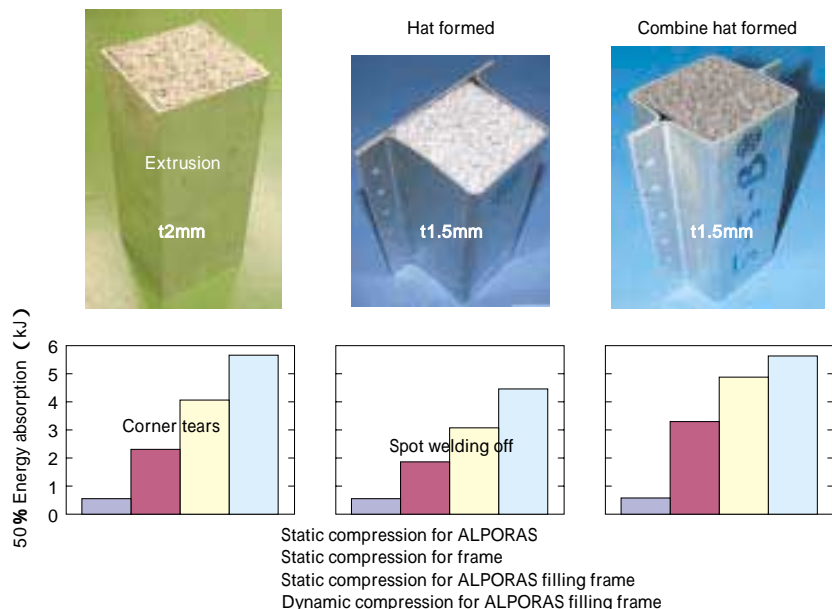


図10 クラッシュボックス想定試作部材のエネルギー吸収性能  
Fig.10 Energy absorption performance of the crash box

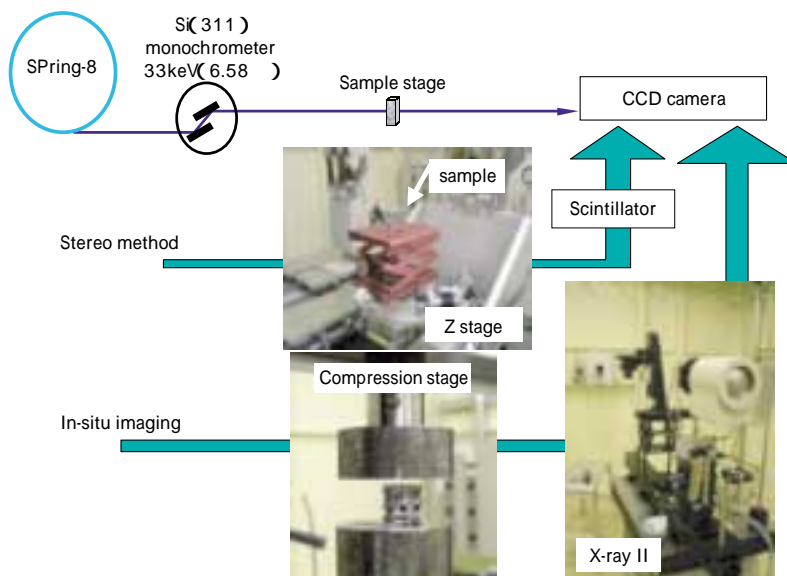


図11 in-situ X線イメージング実験光学系の模式図  
Fig.11 In-situ X-ray imaging facility

必要な数 $\mu\text{m}$ の空間分解能が可能となる。

一方、変形下でのin-situイメージングについては、その撮影速度を80ms、試料の圧縮速度を8mm/minとした。用いたビームラインはSPring-8のBL19B2である。撮影系には、CCDカメラと高速撮影による輝度の劣化を電氣的に増幅するX線イメージング・インテンシファイアを用いた。

### 3.2 実験結果

Zステージを移動させ、静止画をソフト的にパノラマ合成したものを図12(a)に、その拡大図を図12(b)に示す。今回パノラマ法にて撮影できた視野は、10mm×10mm×21mmである。直径で3mm程度の発泡セルと、そのセル内部に微小な不完全発泡セルが共存している様子が観察された。一方、図12(b)では、セル壁内部に

0.1mmオーダの微小な不完全発泡体があることがわかった。今回用いたシンチレータの材質がCsI製であるために、これ以上の空間分解能が得られなかったが、現在、高分解能型であるYAG製シンチレータによるさらなる高分解能化を目指している。

図13に、試料を圧壊試験しながら記録した荷重-変位曲線と、in-situ X線イメージングにより80msごとに撮像した画像のうち、荷重-変位曲線上に記したa~lの箇所に対応する画像をそれぞれ示す。最初に下側1/3の箇所が崩れ、その上側が覆いかぶさるように下の層を包み込む(c, d)。ついで中心の層と上側の層の間で崩壊が起き、中心の層に覆いかぶさるように崩れる(g, h)。このとき、中心の層はしばらく形状を保つ。さらに中心の層が崩れ(j)、最後に全体が崩れる(l)という4段階の崩

壊となることがわかった。本実験では、画像分解能と変形装置の制御上、試験機の圧縮速度は遅いものである。実際の自動車の衝突・圧壊を想定すると、変形装置の制御系改造などを行い、圧縮速度の高速化とともにCCDカメラへの画像の取込み間隔が数10ms～サブmsであることが必要であり、広視野で高解像度の撮像を継続して検討している。

むすび＝超軽量で特有の機械的性質と吸音性特性を有し、最近ではエネルギー吸収材として注目を集めている発泡アルミニウムについて、気泡分布の制御によりエネルギー吸収特性を改善した。また、発泡アルミニウムを形材に内装することによる複合化によって、エネルギー吸収特性に重量効果のあることがわかった。これらの挙動はFEM解析によっても予測された。さらに、高輝度X線を用いたin-situイメージング技術により、圧縮変形下で

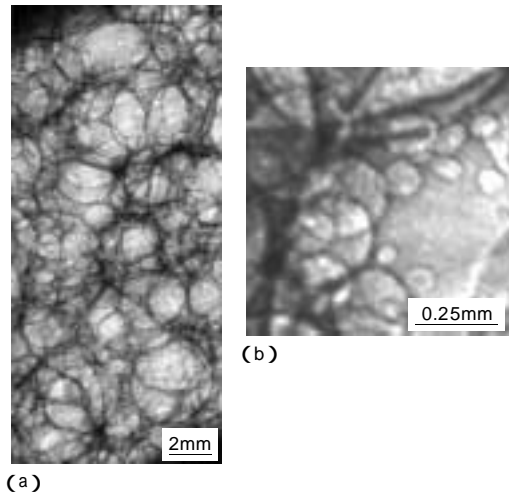


図 12 パノラマ法による広視野像(a)と高分解能像(b)  
Fig.12 Compatibility between wide area imaging(a) and high resolution imaging(b) by means of a panorama method

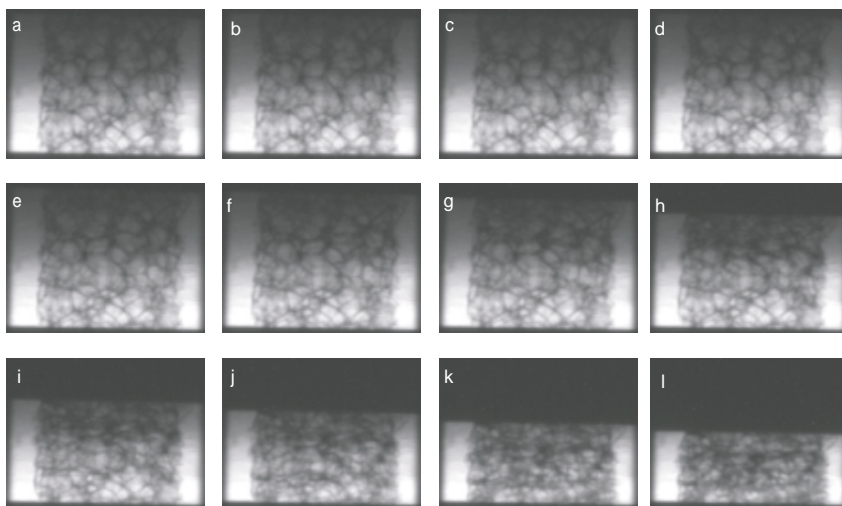
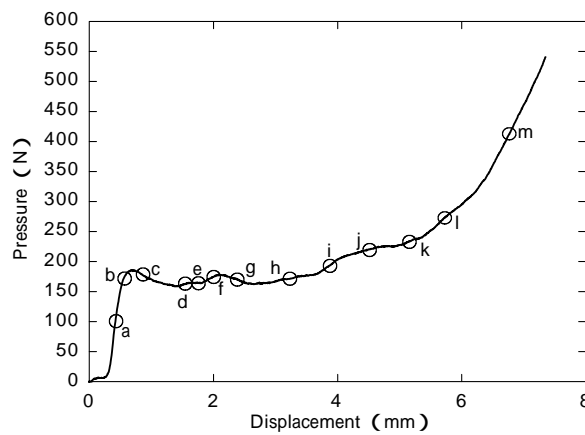


図 13 発泡アルミニウムの荷重-変位曲線と in-situ X 線イメージ  
Fig.13 Load-displacement curve and in-situ X-ray image of aluminum foam

の崩壊挙動を解析した。今後、発泡アルミニウムが自動車の軽量化に役立つことに加え、安価な製造技術開発とともに、さらにその特性が生かされて用途が広がることが期待される。

なお、本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究として行われたものである。

#### 参 考 文 献

- 1) T. Miyoshi et al. : Adv. Eng. Mater., 2, No.4 (2000) p.179.
- 2) L. J. Gibson et al. : " Cellular Solids, Structure and Properties- Second edition " (1997) Cambridge University Press, Cambridge, UK.