

(解説)

衝突安全性に優れたポーラスアルミニウム複合部材

Development of Porous Aluminum Alloy for Use with Parts Having Excellent Crashworthiness



三好鉄二*(工博)
Tetsuji Miyoshi



濱田 猛**
Takeshi Hamada



金橋秀豪**(工博)
Hidetaka Kanahashi

We developed a porous aluminum alloy having strength 2.5 times higher than conventional ones by alloy designing. The manufacturing technology of a large, near-net-shaped porous aluminum was also developed. By filling the porous alloy in a double-hat-shaped aluminum crash box, energy absorption of 17.3kJ/kg was obtained. The value, highest ever, is expected to reduce the weight of the conventional crash box by 65.1%. The mechanical response of the part was also simulated by FEM analysis.

まえがき = 近年、地球環境の保全を背景に自動車の燃費向上が求められており、その施策の一つとして自動車の軽量化がある。一方、搭乗者および歩行者保護の観点から安全性向上が求められている。これまで素材による軽量化は、車両用構造材料として用いられている鉄鋼材料の高強度薄肉化ならびに比強度の高いアルミニウム合金などの多用化により行われてきた。ポーラスアルミニウムは、多孔質で比表面積が大きい構造のため、超軽量で比剛性、エネルギー吸収特性、吸音特性などに優れ、衝突安全性や快適性などの観点で車両に適合した材料といえる。しかし、これまでにコンセプトカーや少量生産のスポーツカーなどに適用された例はあるが、量産車に適用された例はない。量産車に実用化されるには、さらなる比強度および品質保証など信頼性の向上とコストダウ

ンが必要である。平成14年度から5年間、(独)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」に神鋼鋼線工業㈱も参画し、ポーラスアルミニウムの高強度化、アルミニウム緻密材との複合化によるポーラス構造体の基礎設計技術ならびにコストダウンを可能にする型発泡製造技術を開発したので概要を紹介する。

1. 適用部位

ポーラスアルミニウムの車体への適用検討部位とその要求特性を図1に示す。バンパ、クラッシュボックス、ボンネットなどはエネルギー吸収特性が要求され、フロントピラーやセンタピラーなどは、さらに剛性や曲げ強

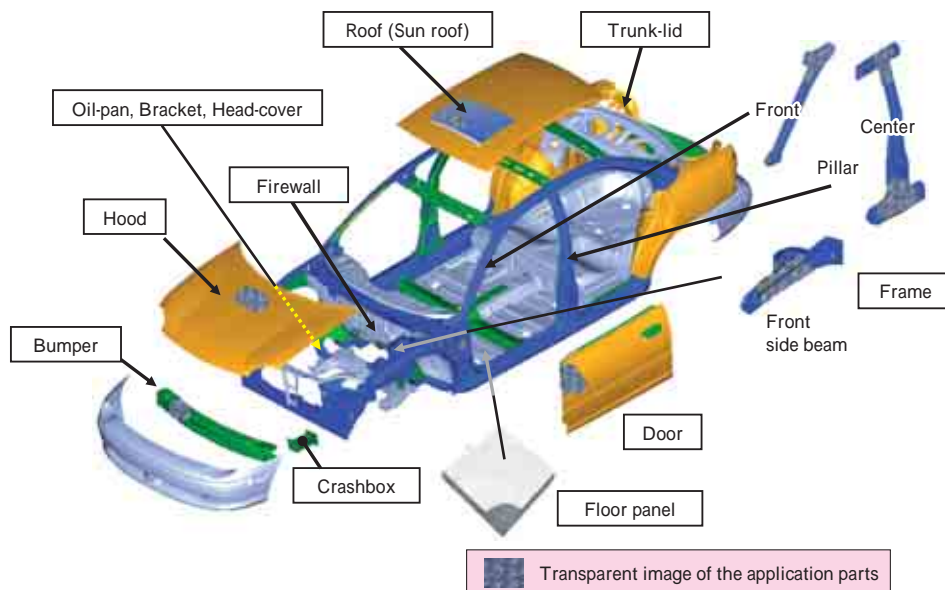


図1 ポーラスアルミニウムの自動車部材への適用
Fig. 1 Aluminum foams for automobile application

*神鋼鋼線工業㈱ 開発本部 **㈱神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所

度が要求される。ポーラスアルミニウムは、エネルギー吸収特性以外にも断熱・吸音特性など多くの特徴を有するため、上記部品の他にもフード、トランクリッドやサンルーフなどの蓋物のほか、ファイアウォールなど多くの部位で検討されている。

2. エネルギー吸収部材の開発目標

エネルギー吸収部材であるクラッシュボックスを前提に590MPa級DP鋼板を凌駕する特性を開発目標とした。図2に落錘衝撃試験による各部材の荷重変位曲線と開発目標を示す。比較材の590MPa級DP鋼板ハット形材は、初期に高いピークが存在し、座屈の繰返しによる荷重の変動が大きい。これに対しポーラスアルミニウムの従来材は、初期のピークが小さく、荷重の変動が小さく安定している。しかし、強度が低いため、部材重量当たりのエネルギー吸収量(kJ/kg)は590MPa級DP鋼板に比べて低く、軽量化できない。したがって、軽量化が実現できる高強度化が必要であり、開発目標値は50%変形時のエネルギー吸収量を8kJ/kgとした。開発材の一例を図2に示すが合金化により高強度化目標を達成し、初期ピーク値も低く、荷重がほぼ一定である。

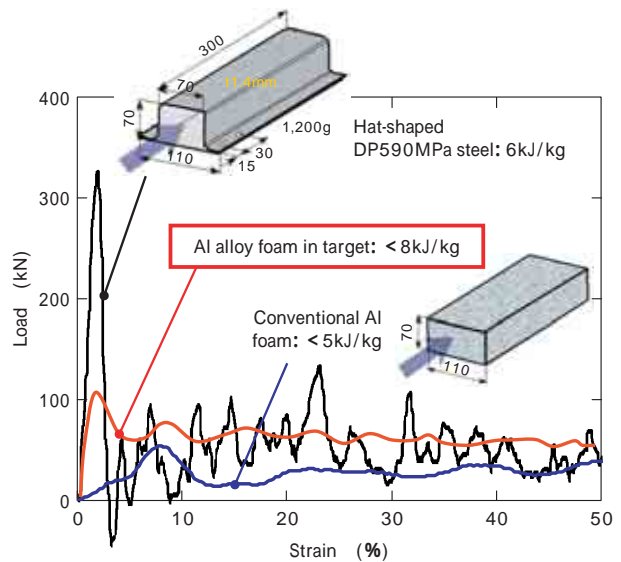


図2 高エネルギー吸収ポーラスアルミニウムの開発目標
Fig. 2 Target of developing high energy absorption Al foam

3. ニアネット型発泡製造法

製造プロセスにおいては、量産コスト低減および品質向上を目的とした型発泡技術の開発を行っている。型発泡製造工程の模式図を図3に示す¹⁾。Ca添加で粘性を高めたアルミニウム合金溶湯に水素化チタンを添加し、発泡炉内で均一に分散するまで攪拌した発泡溶湯を鑄型に注湯し、発泡させる。鑄型内に充満した後、強制冷却して凝固させることにより、ニアネットのポーラスアルミニウムを得ることができる。ニアネット型発泡製造法により作製した自動車のセンタピラー型のポーラスアルミニウムを図4に示す。長さ1.2mで、表面にはスキン層が存在し、引けもなく形状は良好である。切断面からわかるように気泡のばらつきも少ない。また、図5に示すように、厚さ10mm程度の薄板の製作も可能である。

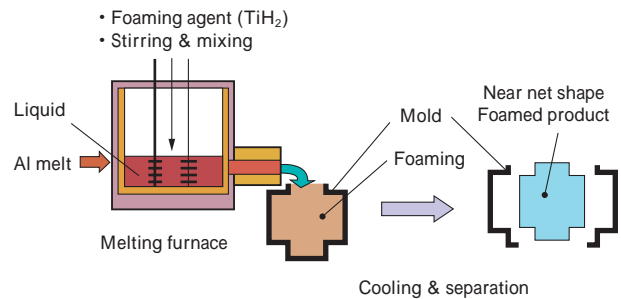


図3 ニアネット型発泡法
Fig. 3 Near net shape foaming process

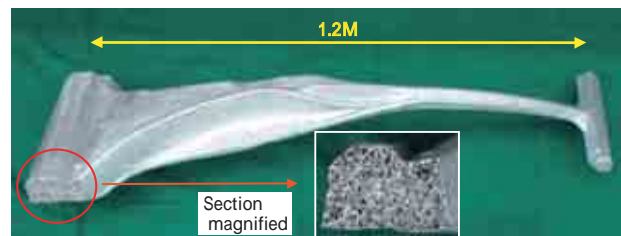


図4 センタピラー充填型発泡材
Fig. 4 Example of near net shape foam filled in center pillar

4. ポーラスアルミニウムのエネルギー吸収特性

純アルミニウム系ポーラスアルミニウムと、Al-Zn-Mg合金系ポーラスアルミニウムの静的および動的圧縮試験を行った。動的試験は図6に示す落錘式衝撃試験を用いた。160kgの錘を高さ11mから自由落下させて供試体に衝突させ、ロードセルにて荷重を測定する方法である。なお、衝突速度は53km/hである。図7に典型的なポーラスアルミニウムの静的および動的応力ひずみ曲線を示す。ポーラスアルミニウムは、いずれもほぼ一定の応力で変形するいわゆるプラトー領域が観察され、そのひずみ量は50%以上あり、低密度の材料ほど大きい。さらに変形が進行すると緻密化により応力は急増する。純アルミニウム系ポーラスアルミニウムは動的のほうがプラトー応力は増大し、速度依存性があることがわかる^{2,3)}。一方、Al-10mass%Zn-1mass%Mg合金ポーラスアルミニウムでは、速度依存性は小さい。50%圧縮変形による

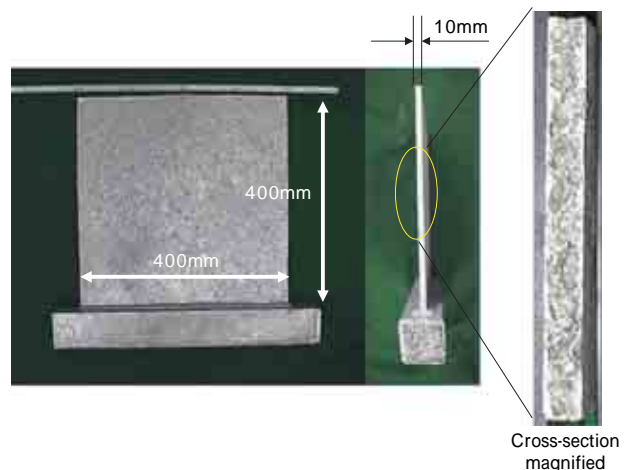


図5 ニアネット型発泡法による薄板発泡材
Fig. 5 Foaming panel produced by near net shape forming process

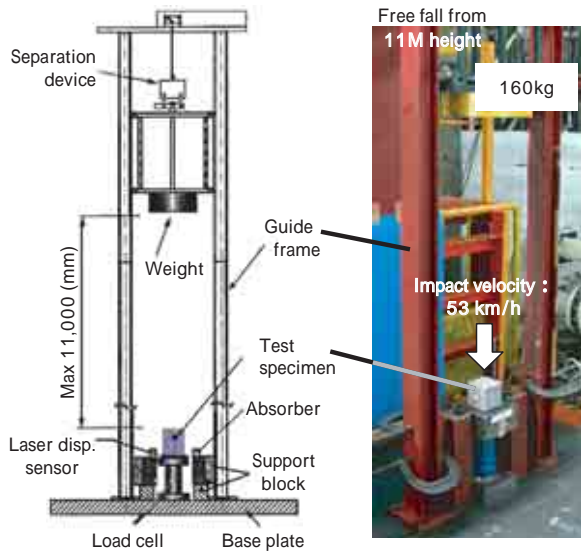


図6 落錘式衝撃試験方法
Fig. 6 Drop weight testing apparatus

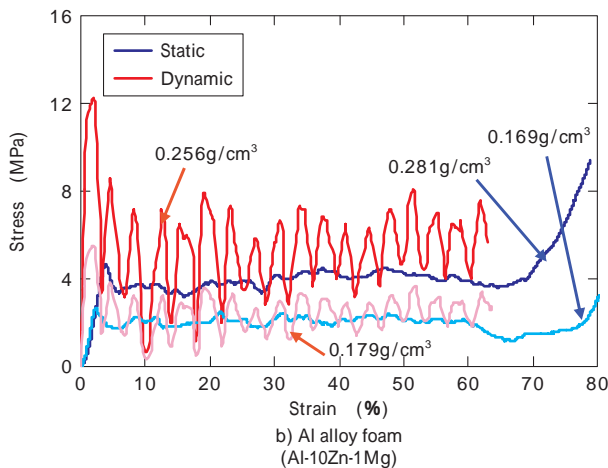
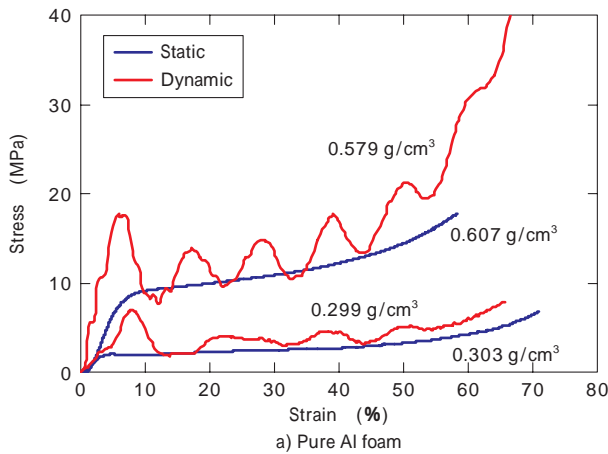


図7 静・動的圧縮条件下におけるポラスアルミニウムの応力-ひずみ曲線
Fig. 7 Compressive stress-strain curves of Al foams under static and dynamic (53km/h) loading

単位重量当たりのエネルギー吸収量を図8に示す。ZnおよびMgを複合添加することにより、現行材である純アルミニウム系よりも2倍以上のエネルギー吸収量を得ることができ、合金系では、密度が 0.3g/cm^3 で開発目標値の 8kJ/kg 以上を達成した。

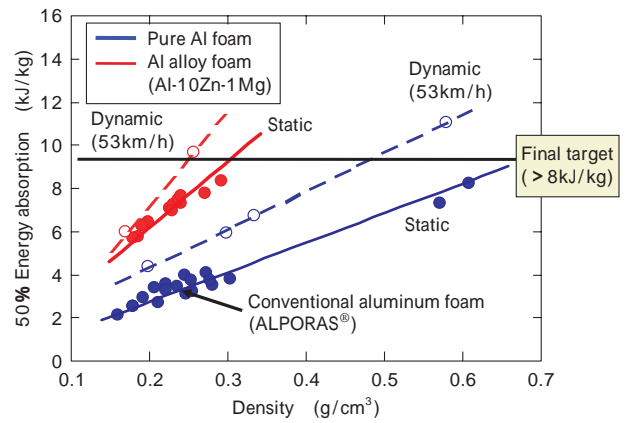


図8 ポラスアルミニウムの50%エネルギー吸収特性
Fig. 8 Variations of energy absorption per unit weight of developed and conventional foams at strain of 50%

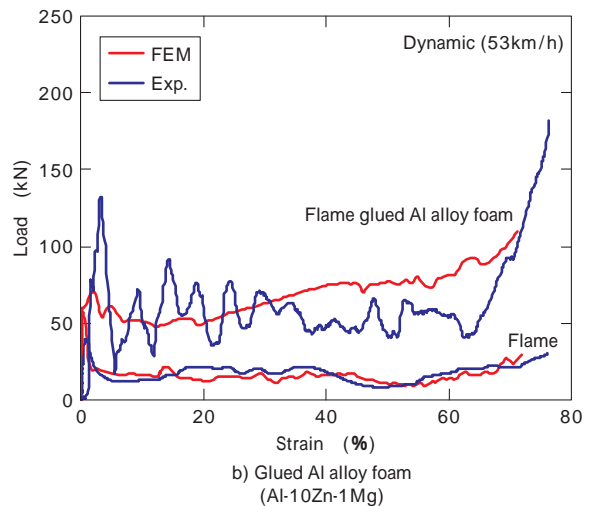
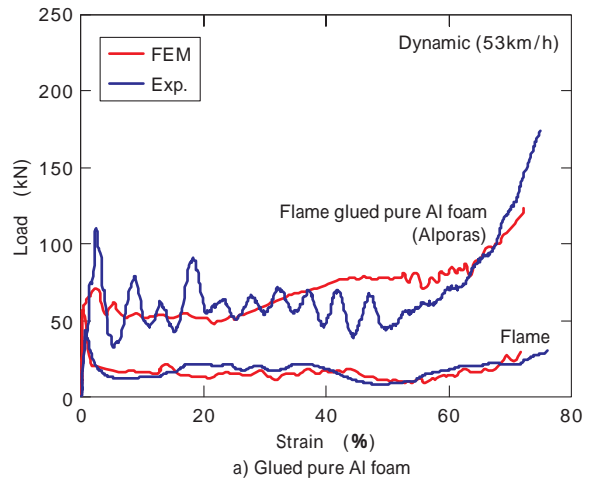
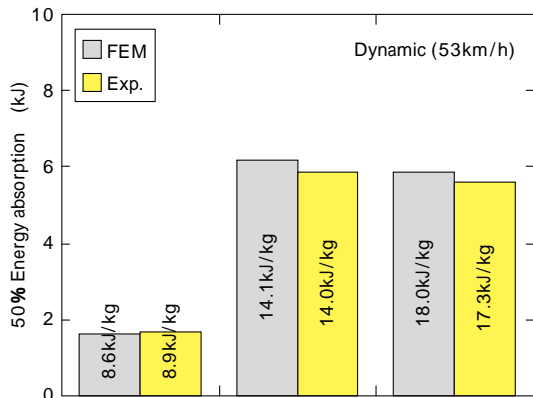


図9 ポラスアルミニウムを充填したアルミニウム合金製Wハットクラッシュボックスの衝撃特性予測および試験結果
Fig. 9 Prediction and dynamic test results of W-hat Al alloy crash-boxes filled with Al foams

5. クラッシュボックス想定部材の圧壊試験結果とFEM解析予測

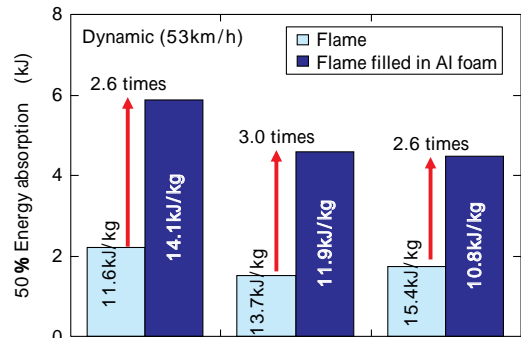
外殻フレームにハット型アルミニウム薄板を用いポラスアルミニウムを充填したクラッシュボックス想定部材を試作し、落錘式衝撃試験を行った。その結果およびFEM解析予測を図9に示す。フレーム単体に対し、ポ-



Foam material	Non	Pure Al (Alporas)	Al alloy (Al-10Zn-1Mg)
Filling method	Non	Glued	Glued
Specimen weight	190 g	419 g	325 g

図10 ポーラスアルミニウムを充填したアルミニウム合金製Wハット・クラッシュボックスの衝撃試験結果

Fig.10 50% energy absorption per unit weight of W-hat Al alloy crash-boxes filled with Al foams



Shape	W-hat shaped	Circular	Hexagonal
Cross sectional			
Filling method	Pure Al foam (Alporas) glued	Pure Al foam (Alporas) filled	Pure Al foam (Alporas) filled
Specimen weight	419 g	387 g	413 g

図11 各種クラッシュボックスの衝撃試験結果の比較

Fig.11 50% energy absorption per unit weight of various crash-boxes

表 1 各種クラッシュボックスの衝撃エネルギー吸収特性のまとめ

Table 1 Energy absorption characteristics of various types of crash box

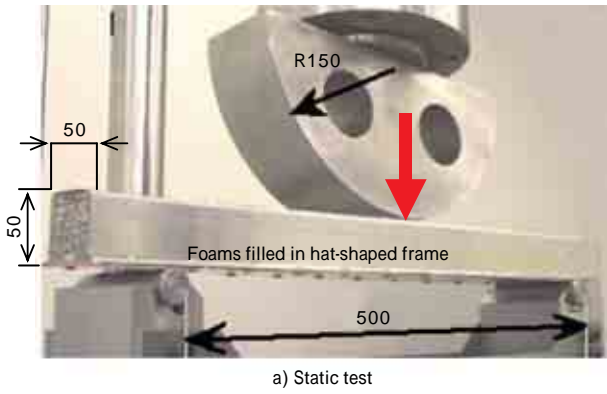
Flame	Conventional crash box		Developed crash box			
	DP590 steel	6063 Al	5052-H34 Al	5052-H34 Al	5052-H34 Al	5052-H34 Al
Foam material	-	-	Pure Al foam	Pure Al foam	Pure Al foam	Al alloy foam
Filling method	-	-	Glued	Filled	Filled	Glued
Cross sectional						
50% energy absorption	6.0 kJ/kg	12.7 kJ/kg	14.1 kJ/kg	11.9 kJ/kg	10.8 kJ/kg	17.3 kJ/kg
Wight reduction	0%	-	57%	49%	44%	65%
	-	0%	10%	-	-	27%

ラスアルミニウムを充填し、接着すると重畳効果が出現し、高いエネルギー吸収特性を得ることができる。また、フレーム単体およびクラッシュボックス想定部材のFEM解析予測は、試験結果にほぼ一致しており、複合効果の予測を可能にした。これらの50%変形時のエネルギー吸収量を図10に示す。棒グラフ中の数値は、部材重量当たりのエネルギー吸収量である。Al-10Zn-1Mg合金ポーラスアルミニウム充填材がもっとも軽量化効果があることがわかる。また、形状効果について調査した結果を図11に示す。いずれの形状も2.6倍から3倍のエネルギー吸収量の増大が観察された。クラッシュボックス想

定部材の試験結果を表1にまとめた。比較材に590MPa高強度鋼板およびアルミニウム押出材を用い、比較材に対する軽量化率を計算した。最高強度のダブルハット型に合金系ポーラスアルミニウムを充填し、接着した供試体は鋼板製に対し65%、アルミニウム押出材に対し27%の軽量化効果が見込める。

6. フレーム想定部材の強度特性

ピラーなどのフレーム部材では、複雑な付加モードが存在し、エネルギー吸収特性のほか高剛性や高強度が要求される。フレーム想定部材は、静的および動的三点曲



Weight : 175kg
Impact velocity : 50km/h

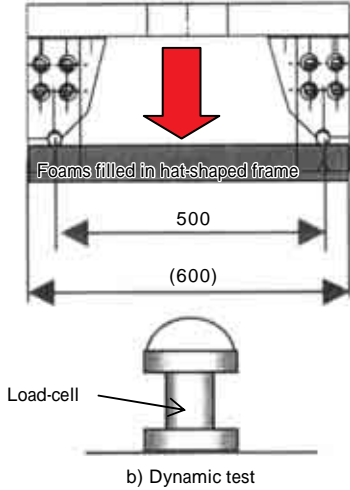
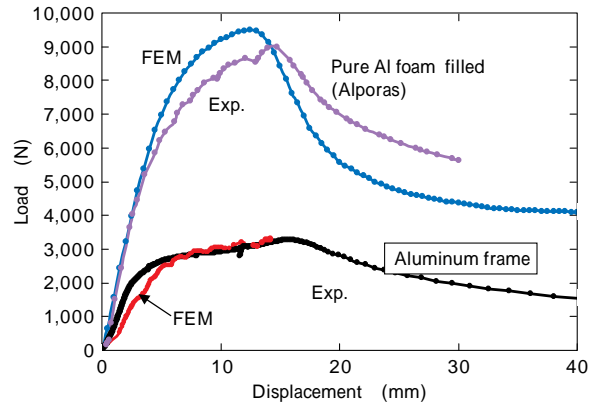


図 12 三点曲げ試験方法

Fig.12 Three-point bending test method



Pure Al foam filled in Al frame
(Alporas : 0.250g/cm³) (t1mm, 5052H34)

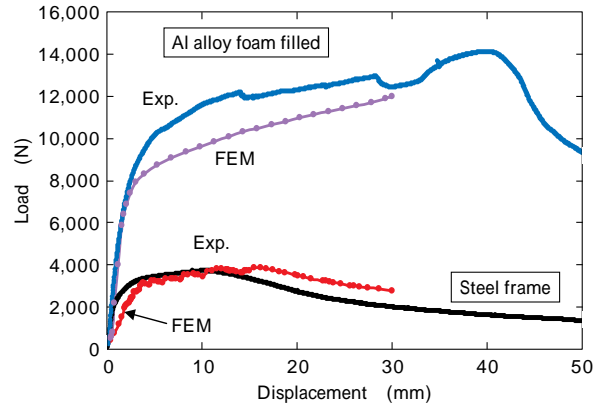
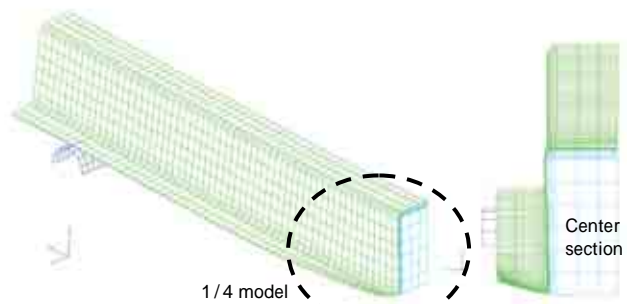
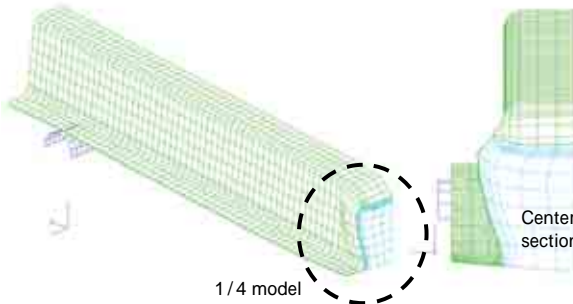
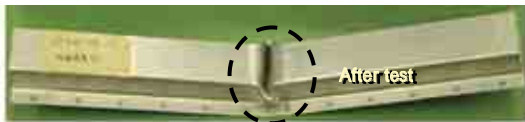


図 13 曲げ強度向上効果

Fig. 13 Improvement of bending strength



Alporas filled in Al frame
(t1mm, 5052H34)

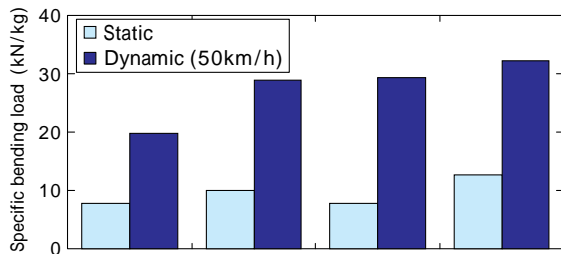
Al alloy foam filled in Steel frame
(Al-10Zn-0.3Mg) (t1mm, SPCC)

図 14 ポーラスアルミニウム充填フレームの曲げ座屈

Fig.14 Buckling pattern of frame filled with Al foams

げ試験で評価した。三点曲げ試験方法および供試体形状を図12に示し、試験結果の例を図13に示す。図13左図は5052H34の1mm厚さのハット型フレーム単体と純アルミニウム系ポーラスアルミニウムを接着充填した静的試験結果で、右図はSPCCの1mm厚さのハット型フレーム単体と合金系ポーラスアルミニウムを接着充填した静的試験結果であり、いずれもFEM解析結果を併記した。これらの荷重変位曲線からいずれもポーラスアルミニ

ウムを充填することで強度が約3倍になり、剛性も向上する。特に合金系を充填したフレームは最大荷重を示す変位が大きく、側面衝突に対し、高いエネルギー吸収量が期待できる。また、図14に供試体の曲げ試験後の写真とFEM解析結果を示す。FEM解析の曲げ座屈形態がそれぞれ一致していることがわかる。その結果、図13に見られるようにFEM解析予測は高い精度で実験結果を再現している。図15に各フレームの静的および動的試



Filled foam	Non	Pure Al (Alporas)	Pure Al (Alporas)	Al alloy (Al-10Zn-0.3Mg)
Flame material	5052-H34 Al alloy	5052-H34 Al alloy	440MPa steel (t1.4mm)	440MPa steel (t1.4mm)
Specimen weight	423 g	1,106 g	2,250 g	2,300 g
Weight reduction	-	32%	27%	34%

図15 ポーラスアルミ接着充填フレーム部材の静動曲げ特性
Fig.15 Bending property of hat shaped frame glued in pure Al foams under static and dynamic loading

験結果をまとめた。比強度は、ポーラスアルミニウムを充填することにより、いずれの構成も約30%向上する。

むすび=本研究で開発した合金系ポーラスアルミニウムの複合部材およびFEM解析予測は、自動車部材に適用することで30%以上の軽量化が可能であり、かつ高いエネルギー吸収特性を有することから衝突安全性の向上が期待できる。また、各部品的小型化による車両自体の小型化、フレーム材では断面形状の縮小が可能で、ピラーの小断面化による視界の改善や、制振、防音や断熱などの快適性など多くの付加価値が期待できる。なお、本研究は、新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託研究成果を引用した。

参考文献

- 1) T. Miyoshi et al. : JIMIC-4 Porous Metals and Metal Foaming Technology, MetFoam2005, Kyoto (2005) p.255 .
- 2) T. Mukai, et al. : Scripta Mater. 40 (1999) p.921 .
- 3) T. Hamada et al. : JIMIC-4 Porous Metals and Metal Foaming Technology, MetFoam2005, Kyoto (2005) p.533 .