

# 衝撃荷重を受けるアルミハニカムセル構造の エネルギー吸収能向上

康井 義明\*<sup>1</sup>・小澤 成匡\*<sup>2</sup>・小寺 弘晃\*<sup>2</sup>

## Energy Absorption Efficiency of Aluminum Honeycomb Cell Structures under Axial Dynamic Impact Loading

by

Yoshiaki YASUI\*<sup>1</sup>, Shigemasa OZAWA\*<sup>2</sup> and Hiroaki KODERA\*<sup>2</sup>

(Received on Sep. 30, 2006 & accepted on Nov. 22, 2006)

### Abstract

Honeycomb structures are used as buffers in the field of transportation equipment owing to their excellent impact energy absorption. In this study, the impact absorption characteristics of various aluminum honeycomb cells under axial dynamic impact loading were evaluated by numerical and experimental analysis. Enlarged models of hexagonal unit cells, which determine the impact absorption characteristics of the honeycomb structure, were used. For the purpose of improving the energy absorption ability and reducing the initial peak stress, honeycomb cells having a rib inside the cell, honeycomb cells filled with high-rigidity urethane foam and honeycomb cells with holes at the corner part of the cell were investigated by conducting dropped-hammer impact tests as well as finite-element method (FEM) analysis. As a result of the investigation, it was shown that the energy absorption efficiency of honeycomb cells having the rib inside the cell is higher than those of normal cells and honeycomb cells filled with urethane foam. It was recognized that inserting the rib inside the cell affected the absorption characteristic of the honeycomb cells markedly. Experimental results of the crushing behavior, initial peak stress and energy absorption agree approximately with those of FEM analysis. Furthermore, it was found that the honeycomb cells that had holes and ribs show excellent performance.

**Keywords:** Aluminum honeycomb cell, Dynamic axial crushing, Urethane foam, Holes, Energy absorption efficiency, Inner rib, FEM

## 1. 緒言

近年、輸送機器の高速化・軽量化に伴い衝突安全性の観点から優れたエネルギー吸収特性を有する緩衝材が求められている。過去、アルミハニカム構造の動的な圧縮特性を利用した緩衝材としての研究は静的・準静的衝突速度から衝撃の速度に対して種々の報告が行われており<sup>1)~7)</sup>、発泡剤を充填した円管部材などの衝撃緩衝を扱った研究等もなされている<sup>8)~12)</sup>。最近では薄肉部材内に補強材として充填材およびリブを配したときの圧潰特性に関する研究<sup>13,14,17)</sup>や初期の衝撃緩和を目的にセル稜部に円孔を設けたときの緩衝特性に関する研究<sup>15,16)</sup>が行われており、緩衝材設計に対する要求は年々厳しくなっている。しかるに高いエネルギー吸収性能の確保と衝撃初期の高い応力(初期ピーク応力)の低減を図ることのできる衝撃緩衝構造材を提案すれば、より実用的な観点から安全性に貢献できると考えられる。

以上の観点から本研究では、アルミハニカム構造の衝撃緩衝特性向上を図るべく各種ハニカムセル構造について検討を行った。セルの稜部に円孔を設けた有孔ハニカムセル、エネルギー吸収能向上を目的として内部に発泡ウレタンを充填した充填ハニカムセル、セル内部に一枚の板を挟んだ強化型形状とするリブ

付きハニカムセルを検討し、さらに初期ピーク応力の低減を目的として、リブ付きハニカムセルの稜部に円孔を設けた有孔リブ付きハニカムセルについて調べた。そして内部リブおよびセル板厚を変化させた種々の形状における動的圧潰実験並びに数値解析を実施して、それぞれのハニカムセルの圧潰挙動ならびにエネルギー吸収特性を比較し、衝撃緩衝効果を検討している。

## 2. 実験

### 2.1 試験片および実験方法

本実験で用いる試験片(Fig.1)の材質はアルミ合金 A5052-H34とし、機械的性質は密度 $\rho=2680\text{kg/m}^3$ 、ヤング率 $E=73\text{GPa}$ 、降

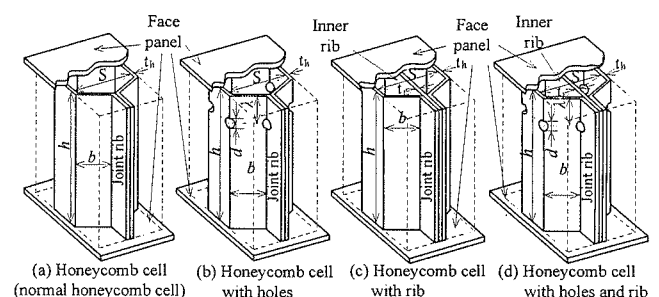


Fig.1 Test specimens

\* 1 工学部動力機械工学科教授

\* 2 大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

伏応力  $\sigma_f=194\text{MPa}$ , 引張強さ  $\sigma_B=253\text{MPa}$ , ポアソン比  $\nu=0.34$  である。

本研究で使用した各種ハニカムセルの形状寸法を Table1 に示す。Fig.1(d)の有孔リブ付きハニカムセルにおいて、衝撃緩衝材の圧潰の起点は衝突端付近が好ましいとされていることからセル上端近傍に円孔を設けた。円孔径は本実験範囲内において十分に初期ピーク応力低減効果の得られる寸法とした。

試験片は専用の金型治具にて加工した2枚のアルミ板の結合リブ部(Joint rib)・内部リブ(Inner rib)および同材質の厚さ 1mm の表面板(Face panel)を、2液性アクリル系構造用接着剤にて接着し作製している。

充填ハニカムセル構造に使用した発泡材は、自動車の車体の高剛性化を目的にフレーム内やサイドメンバ等の空間部に充填されている高剛性発泡ウレタン[株]サンスター技研, 10倍発泡タイプ]を用いた。発泡後の密度が  $110\text{kg/m}^3$ , 降伏強度は  $1.1\text{MPa}$  である。

衝撃実験は落錘型試験装置(Fig.2)を用い、ハニカムセルを十分に圧潰させるために最大落錘高さ  $H=2.3\text{m}$  から落錘質量を任意に変化させ、試験片に軸圧縮衝撃荷重を与えた。実験に際しては、落錘並びに設置台の平行をとり、片当たりによる圧潰変形挙動が生じないように行った。ロードセルにより荷重値、レーザー変位計により変位を測定した。単体モデル(ノーマルセルと称する)、充填ハニカムセル(充填セル)、リブ付きハニカムセル(リブ付きセル)、有孔リブ付きハニカムセル(有孔リブ付きセル)についてそれぞれ実験的検証を行った。

## 2.2 物理量の定義

Fig.3 は衝撃実験においてノーマルセルを衝突速度  $V=6.7\text{m/s}$  にて圧潰させたときの応力変位線図のモデル図を示した。セルに軸圧縮荷重を加えると、各壁面の降伏により座屈する。その際発生する応力のピーク値が初期ピーク応力(①Initial peak stress  $\sigma_{cr}$ )である。その後蛇腹状の逐次座屈変形によってほぼ一定の応力で圧潰が進行し、セルの緻密化によって変形能力を失い応力が急激に上昇する底付き(③Bottom out)を呈する。初期ピーク応力後の最低応力から底付きまでの応力の平均値が平均圧潰応力(②Average compressive stress  $\sigma_{av}$ )であり、底付きまでの変

位量が有効ストローク(④Effective Stroke  $\delta_s$ )とした。エネルギー吸収量は底付きまでの荷重を有効ストロークにて積分して求めた。

## 3. 数値解析

各種ハニカムセルの衝撃解析には汎用有限要素法ソフトウェア[MSC.MARC]を用い、ノーマルおよびリブ付きセルの実験を再現した衝撃軸圧潰シミュレーションを実施している。解析モデルは Fig.4 に示し、実験で用いている試験片と同材質、同形状としている。結合リブ部は剥離しないものとし、変形の対称性を考慮した 1/2 モデルとした。要素分割は要素縦横比が約 1 となるように、円孔部においては円孔近傍をより細かく分割し

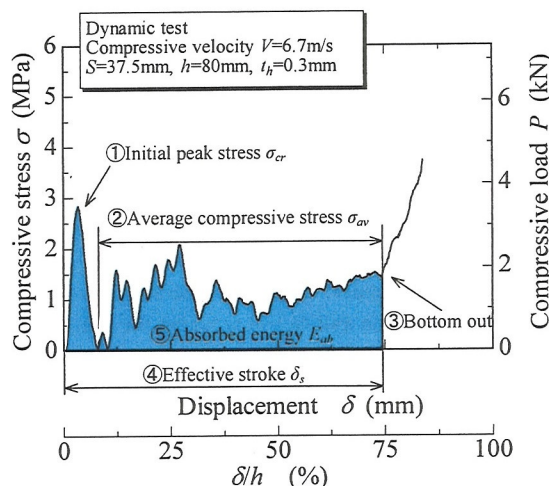


Fig.3 Model of compressive stress and displacement

Cell size $S$ (mm)	37.5
Height $h$ (mm)	80
Thickness $t_h$ (mm)	0.3,0.4,0.5,0.6
Rib thickness $t_r$ (mm)	0.3,0.4,0.5,0.6
Hole position $\lambda$ (mm)	10, 20, 40, 60, 70
Hole diameter $d$ (mm)	5, 8, 10

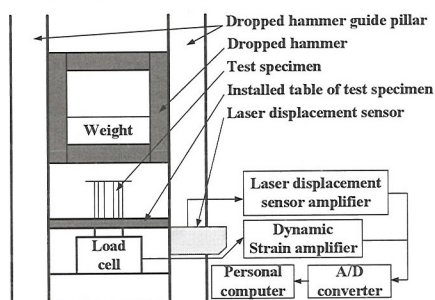


Fig.2 Dropped hammer apparatus

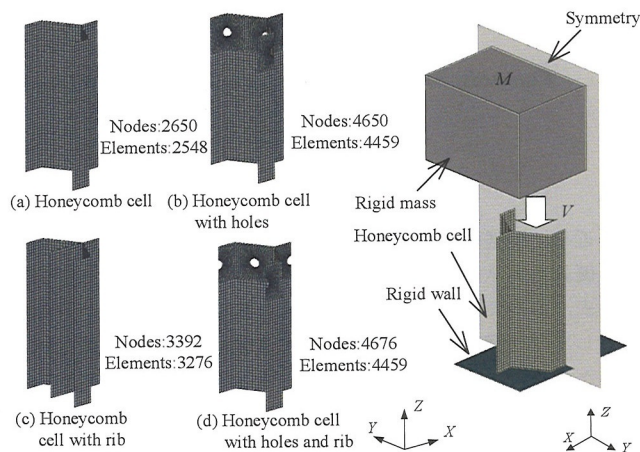


Fig.4 Analysis model

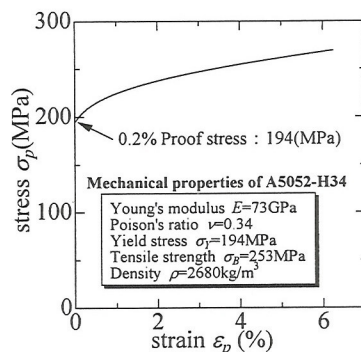


Fig.5 Stress-plastic strain curve (A5052-H34)



た。なおリブ付きセルの結合リブ部においては、セル板厚の2倍の厚さに内部リブの板厚を加えた厚さとした。ハニカムの要素タイプは四節点四辺形厚肉シェル要素を用いており、落錘の要素タイプは8節点立体要素である。A5052-H34材は弾塑性材料として扱い、材料のひずみ速度依存性についてはアルミの静動比が1に近いという特性上考慮していない<sup>18)</sup>。解析における材料定数は Fig.5 に示す静的引張試験から得られた値を用い、その塑性挙動は精度良く表現するために真応力-対数ひずみ曲線を多直線近似することで定義した。境界条件はモデル上下端のZ並進成分以外固定とした。解析条件は衝撃試験装置の落錘を再現した同質量の剛体を初速度  $V=6.7\text{m/s}$  でモデル上端に衝突させ、ハニカムセルを圧潰させている。圧潰荷重はハニカム下端の剛体板の反力から求め、圧潰変位量は同モデル上端の節点のZ方向変位より算出している。今後特に断りのない限り、内部リブをリブと称する。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 有孔ハニカムセル

Fig.6 は解析にてノーマルセルと穴位置  $\lambda=10\text{mm}$ 、穴径  $d=5\text{mm}$  としてセル稜部および壁面に円孔を設けた有孔セルにおいて衝突速度  $V=6.7\text{m/s}$  にて圧潰させたときの応力と変位の関係の一例と Table2 にその際得られた数値を示した。両セルは圧潰初期に大きな相違が見受けられ、各有孔セルの初期ピーク応力はノーマルセルと比べ低い値となっている。圧潰中期( $\delta=20\text{mm}$ )以降は同様な応力変動を呈しているが、セル壁面部よりもセル稜部に円孔を設ける方がより大きい初期ピーク応力の低減効果が得られることが確認できた。

Fig.7 は上記の解析条件において各セルの衝突直後(衝突からの時間  $T=0.03\text{ms}$ )での応力分布を示した。Fig.7(a)に示すノーマルセルと Fig.7(b)の壁面部に円孔を設けた有孔セルにおいては稜部に応力集中が生じていることがわかるのに対し、Fig.7(c)のように稜部に円孔を設けると全体として低い応力分布となっていることが見てとれる。これはハニカムの圧潰のメカニズムは壁面部が座屈し、稜部が壁面を支え、降伏し座屈を生じるため、稜部に形状の弱部である円孔を付与することにより衝突直後の座屈に伴って生じる応力が緩和したものと考えられる。

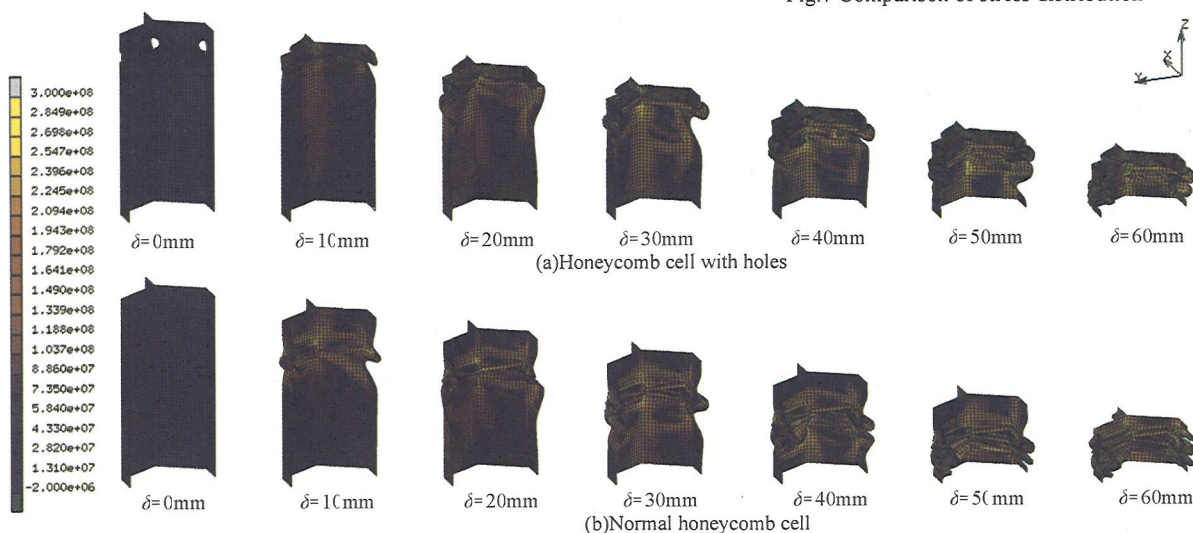


Fig.8 Crushed deformation of normal honeycomb cell and with holes

Fig.8 に解析におけるノーマルおよび有孔セルの圧潰形態を示した。Fig.8(b)のノーマルセルは第一座屈がセル上端付近で生じているのに対して、Fig.8(a)の有孔セルは円孔近傍で生じており、座屈の起点が変化していることが確認できる。その後は両者共に逐次座屈現象を呈している。

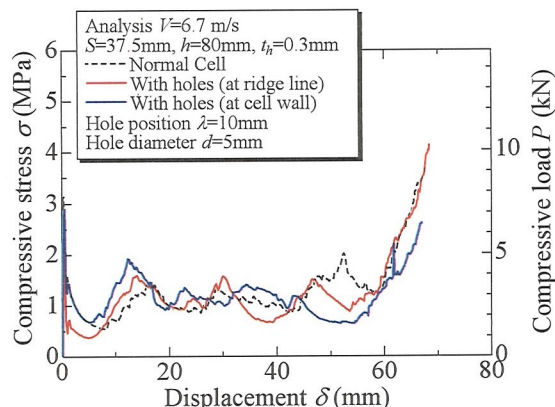


Fig.6 Relation between compressive stress and displacement

Table2 Absorbing characteristics of honeycomb cell with holes and normal cell

	$\sigma_{cr}$ (MPa)	$\sigma_{av}$ (MPa)	$E_{ab}$ (J)	$\delta_s$ (mm)
Non holes	3.11	1.15	167	60
Holes (cell wall)	2.90	1.07	160	60
Holes (ridge line)	2.05	1.11	163	60

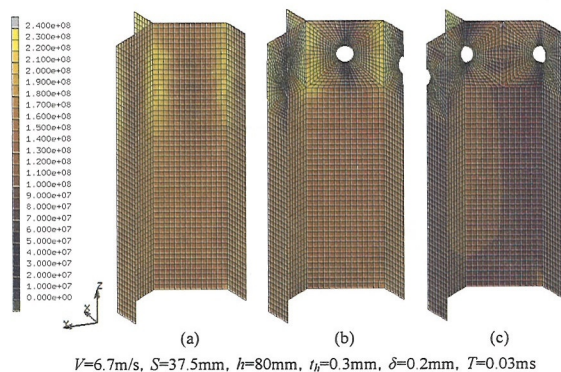


Fig.7 Comparison of stress distribution

以上より、セル稜部への円孔付与は衝突直後に生じる座屈の起点および圧潰初期における挙動に大きく影響を及ぼしていることが分かった。

Fig.9は実験において穴径  $d=5, 8, 10\text{mm}$  の有孔セルを衝突速度  $V=6.7\text{m/s}$  にて圧潰させたときの応力と変位の関係の一例を示したものである。この図より稜部に円孔を設け穴径を大きくするにつれ初期ピーク応力の低減効果が大きくなることがわかった。

Fig.10はノーマルセルと各穴径の有孔セルの初期ピーク応力と板厚の関係を示した。ノーマルセルと  $d=5\text{mm}$  の有孔セルの実験および解析における初期ピーク応力はほぼ同値となっており、実験において有孔セルは各板厚にて穴径の増加に従って初期ピーク応力が減少する傾向となった。各板厚において  $d=5, 8, 10\text{mm}$  ではノーマルセルと比較してそれぞれ約45%, 65%, 70%低下が見受けられた。これは、稜部に形状的弱部である円孔を設けたことで軸方向の剛性が局所的に低くなり、穴径が増すにつれて穴位置近傍のセル壁面に対する開口部の割合が高まり、より衝突直後の座屈を誘起しやすくなったためであると思われる。しかし、 $d=8\text{mm}$  と  $d=10\text{mm}$  でのピーク応力にあまり差が見られないことから、特に本実験で板厚の薄い  $t_h=0.3\text{mm}$  においては、これ以上の穴径の拡大は初期ピーク応力低減効果にほとんど寄与しないと考えられる。

Table3は実験と解析におけるノーマルセルと有孔セルのエネルギー吸収量を示したものである。また、表中には同板厚のノーマルセルの吸収量に対する各有孔セルの吸収量の比率を併記した。これより、ピーク値低減に伴うエネルギー吸収量の低下は数%から最大でも10%程度であることが見て取れる。以上のことから、高エネルギー吸収量の確保を意図して板厚の増加を図る状況下でも稜部へ適切な円孔を設ける手法によって薄肉時の初期衝撃程度までの緩和が可能であることが分かった。

Fig.11に円孔を設けた位置が異なる5種類の有孔セルをそれぞれ圧潰させたときの応力と変位の関係を示した。円孔を配する位置を変化させたことによる初期ピーク値の差異は認められなかった。 $\lambda=10, 20, 60, 70\text{mm}$  の圧潰挙動はほぼ同様な傾向を示しているのに対し、唯一  $\lambda=40\text{mm}$  では  $\delta=40\text{mm}$  付近より急激な応力上昇が生じており、不安定な圧潰挙動を呈している。この結果より、セル稜部に円孔を設ける場合、配する位置がセル高さ中央( $\lambda/h=0.5$ )のときハニカム構造が本来持つほぼ一定の荷重変動にて圧潰が進行する優れた緩衝特性を十分発揮できなると考えられる。

## 4.2 リブ付きハニカムセル

### 4.2.1 内部リブが緩衝特性に及ぼす影響

Fig.12はノーマルセルとリブ付きセル( $t_b=t_r=0.3\text{mm}$ )を衝突速度  $V=6.7\text{m/s}$  にて圧潰させたときの応力と変位の関係を示したものである。リブ付きセルは圧潰初期から底付きに至るまでノーマルセルに比べ終始高い応力レベルで圧潰が進行している。

Fig.13では解析と実験においてノーマルおよびリブ付きセル

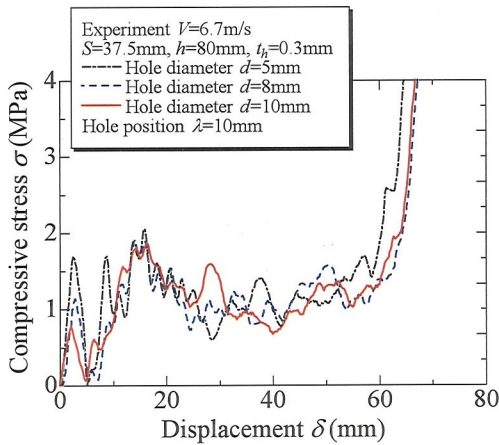


Fig.9 Relation between compressive stress and displacement

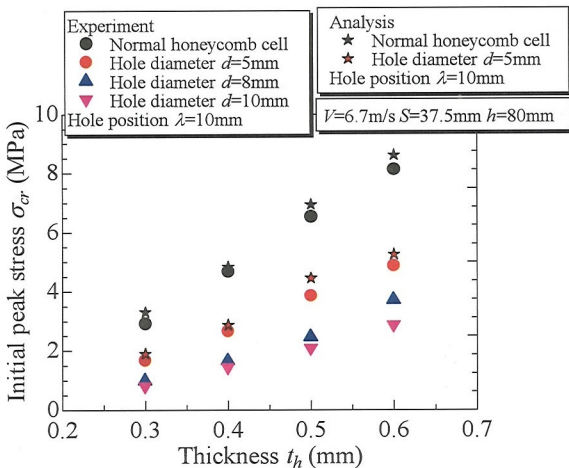


Fig.10 Relation between initial peak stress and thickness

Table3 Comparison of absorbed energy for normal honeycomb cell and honeycomb cell with holes

Method	Experiment				Analysis	
	Normal	$d=5(\text{mm})$	$d=8(\text{mm})$	$d=10(\text{mm})$	Normal	$d=5(\text{mm})$
$t_h$						
0.3(mm)	171(J)	168(J) 98(%)	165(J) 96(%)	163(J) 95(%)	175(J)	163(J) 93(%)
0.4(mm)	255(J)	246(J) 97(%)	234(J) 92(%)	228(J) 90(%)	261(J)	241(J) 92(%)
0.5(mm)	351(J)	338(J) 97(%)	327(J) 92(%)	317(J) 90(%)	370(J)	343(J) 93(%)
0.6(mm)	455(J)	425(J) 97(%)	414(J) 93(%)	400(J) 91(%)	463(J)	431(J) 93(%)

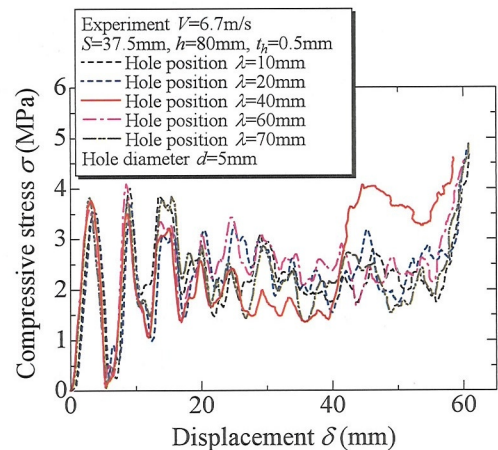


Fig.11 Relation between compressive stress and displacement



の変位  $\delta=20\text{mm}$ ,  $40\text{mm}$ ,  $60\text{mm}$  での圧潰形態を示す。リップ付きセルはノーマルセルと比較すると規則的で鮮明な塑性変形を呈した。これはセル内にリップを配することでセル壁面の変形を拘束・抑制し、座屈変形を生じさせるのに必要な荷重が増大したためである。またリップ付きセルの有効ストロークの減少は少なく、セル内にリップを配したことによるセルの緻密化の影響は低いと考えられる。

Fig.14 は板厚を  $t_h=0.3, 0.4, 0.5, 0.6\text{mm}$  と変化させたときの実験と解析におけるノーマルセルとリップ付きセル( $t_h=t_r$ )の平均圧潰応力と板厚の関係を示したものである。各板厚においてリップ付きセルの均圧潰応力はノーマルセルに比べ高い値を示し、 $t_h=0.3, 0.4, 0.5, 0.6\text{mm}$  でそれぞれ 66%, 63%, 64%, 61%向上しており、解析においても実験と同様の傾向を示した。これよりセル板厚が変化した場合においてもセル内にリップを配したことによる効果が現れることが確認できる。

Fig.15 は実験と解析におけるノーマルセルとリップ付きセル( $t_h=t_r$ )のエネルギー吸収能(単位質量あたりのエネルギー吸収量)と板厚の関係を示している。リップ付きセルのエネルギー吸収能は板

厚の変化にかかわらずノーマルセルと比較して 40%前後とほぼ一定の増加量が得られており、解析においても同様の結果が得られている。これよりリップを配したことによる試験片質量の増加を考慮しても各板厚においてその効果は顕著に現れている。

以上のことからセル内にリップを配する手法は緩衝特性の向上に大きく寄与し、ハニカム構造の軽量であるという特徴を十分に発揮することのできる構造であることが分かる。

4.2.2 リップ板厚変化が緩衝特性に及ぼす影響

Table4 は各リップ付きセルのエネルギー吸収量を比較したものである。また表中にリップ付きセル( $t_h=t_r$ )のエネルギー吸収量を基準値 100%とし、同セル板厚においてリップ板厚を変化させた場合の増減率を示している。セルおよびリップ板厚の比  $t_r/t_h < 1$  のセルについては、基準値に比べ数%から 10%前後の減少率となった。これはセル内のリップが圧潰時に及ぼす影響が弱く、内部リップとしての効果を十分に発揮できなかったためであると考えられる。

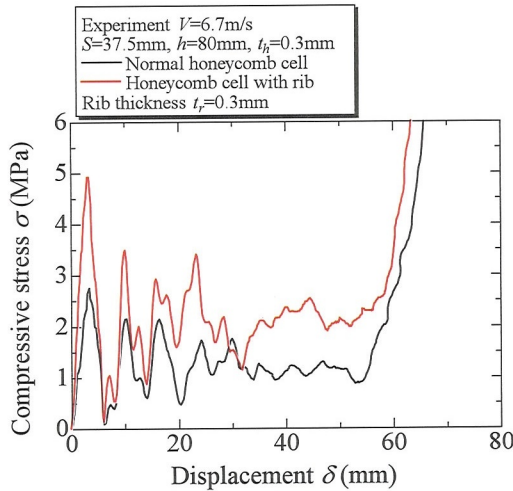


Fig.12 Relation between compressive stress and displacement

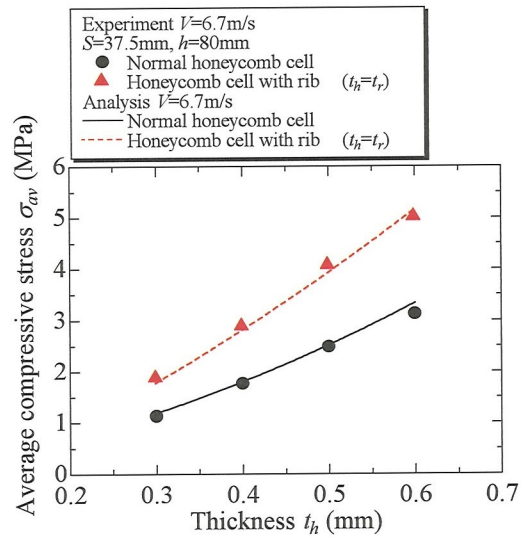


Fig.14 Relation between average compressive stress and thickness

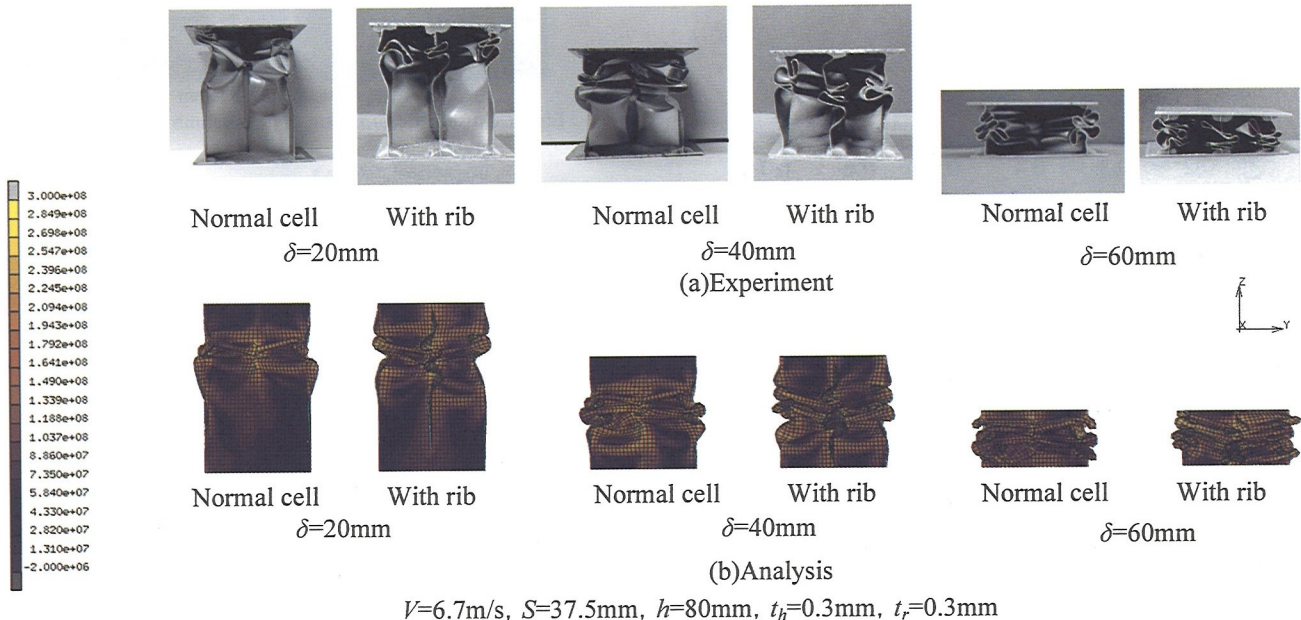


Fig.13 Crushed deformation of normal honeycomb cell and honeycomb cell with rib

次に  $t_r/t_h > 1$  の各セルのエネルギー吸収量については、最大で 20% 程度増加しているが、 $t_h=0.3\text{mm}$ ,  $t_r=0.6\text{mm}$  のセルのエネルギー吸収量は減少した。これは Fig.16 に示す  $t_h=0.3\text{mm}$ ,  $t_r=0.3, 0.5, 0.6\text{mm}$  と変化させたリブ付きセルの応力と変位の関係から、 $t_r=0.6\text{mm}$  の圧潰挙動はリブ板厚が増したことで初期ピーク応力は上昇しているものの、その後は他のリブ付きセルに見受けられるようなリブ板厚増加による応力レベルの上昇は確認できず低い応力で圧潰が進行したためである。

また Fig.17 に示す各リブ付きセルの圧潰後の写真からも  $t_h=0.3\text{mm}$ ,  $t_r=0.6\text{mm}$  は  $t_h=t_r=0.3\text{mm}$  に比べ、不安定な圧潰形態を呈している。Fig.18 に各板厚におけるノーマルセルのエネルギー吸収能  $E_{ef}$  に対する各リブ付きセルのエネルギー吸収能  $E_{ef}^*$  の比 ( $E_{ef}^*/E_{ef}$ ) とセル板厚に対するリブ板厚の比 ( $t_r/t_h$ ) の関係を示す。板厚比  $t_r/t_h=1$  については各板厚の値を平均した。これより、板厚比 ( $t_r/t_h$ ) が高くなるにつれてエネルギー吸収能比は向上し  $t_r/t_h=1.7$  近傍でピークを迎え、それ以降はセル内のリブ板厚を増加してもエネルギー吸収能比は減少していく傾向にある。

以上のことよりセル内にリブを配する場合、セル板厚とリブ板厚の比 ( $t_r/t_h$ ) はエネルギー吸収特性と密接した関係を持っていることが分かる。特に今回の実験範囲内においてセル板厚に対してリブ板厚を過度に厚くすると不規則な座屈変形を呈してしまい、緩衝特性の低下に繋がることを確認できた。

#### 4.3 充填ハニカムセル

発泡ウレタンの充填が緩衝特性に及ぼす影響について検討

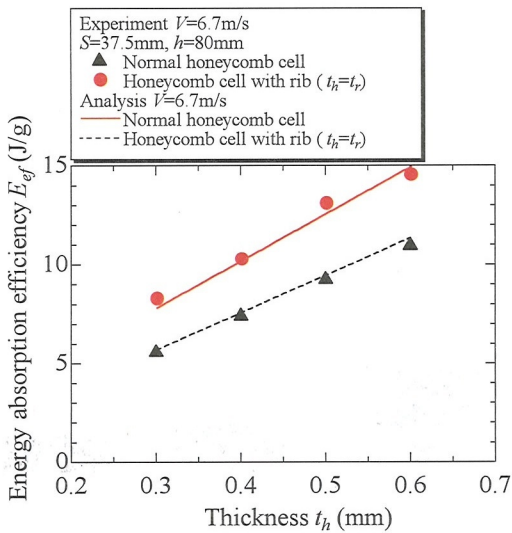


Fig.15 Relation between energy absorption efficiency and thickness

Table4 Comparison absorbed energy for honeycomb cell with rib

Model	Experiment				Analysis
	$t_r/t_h$	$t_h$	$t_r$	$t_h$	
0.3mm	0.3	287J	322J	346J	273J
	1.0	100%	112%	121%	95%
0.4mm	0.3	383J	410J	444J	502J
	1.0	93%	100%	108%	122%
0.5mm	0.3	513J	523J	585J	615J
	1.0	88%	89%	100%	105%
0.6mm	0.3	638J	705J	710J	723J
	1.0	88%	97%	98%	100%

した。Fig.19 はノーマルセルと充填セルを衝突速度  $V=6.7\text{m/s}$  にて圧潰させたときの応力と変位の関係を示したものである。充填セルは圧潰開始から底付きに至るまでノーマルセルよりも高い応力レベルで圧潰が進行している。また充填セルの有効ストロークはノーマルセルと比較して短くなっている。これは充填された発泡ウレタンがセルの緻密化による底付き前に内部の気泡が潰れきった状態、つまり相対密度が 1 となって変形能力を失ったためである。

Fig.20 にノーマルセルと充填セルの平均圧潰応力と板厚の関係を示した。充填セルは板厚が変化してもそれぞれのノーマルセルの平均圧潰応力よりも高い応力値を得ている。平均圧潰応力が上昇した要因として、セル内に発泡ウレタンを充填することで各壁面のセル中心方向への変形を拘束・抑制し、座屈変形を生じさせるのに必要な荷重が増大したためであると考えられる。また、Fig.21 に示したノーマルおよび充填セルの圧潰形態からも分かるように充填セルはノーマルセルに比べ細かい座屈ピッチで規則正しい圧潰パターンを呈していることも大きく貢献し

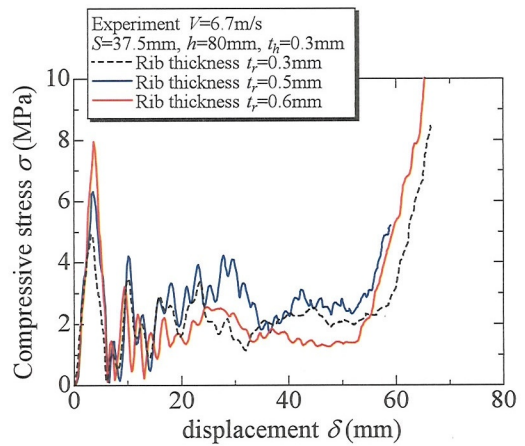


Fig.16 Relation between compressive stress and displacement

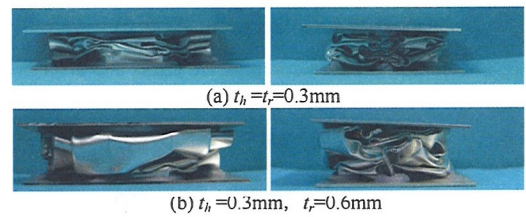


Fig.17 Crushed deformation of honeycomb cell with rib

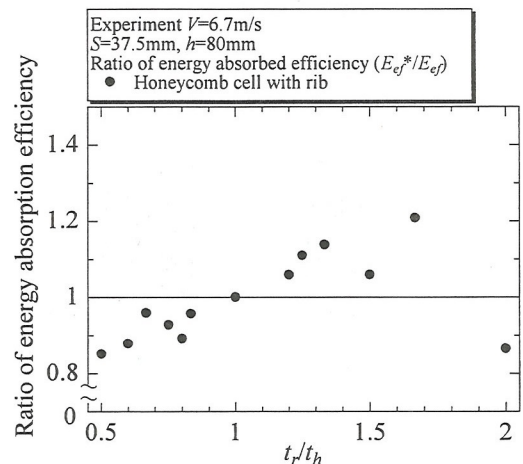


Fig.18 Relation between ratio of energy absorption efficiency and  $t_r/t_h$



ていると思われる。

Fig.22 にノーマルセルのエネルギー吸収能  $E_{ef}$  に対する充填セルのエネルギー吸収能  $E_{ef}^*$  の比( $E_{ef}^*/E_{ef}$ )と板厚の関係を示した。ノーマルセルと充填セルのエネルギー吸収能比は板厚が薄くなるに伴って上昇している。本実験範囲内では  $S=37.5\text{mm}$ ,  $t_h=0.3, 0.4, 0.5, 0.6\text{mm}$  の全実験条件にてこの比が 1 を上回っており、発泡ウレタン充填による試験片質量の増加を考慮しても充填セルのエネルギー吸収能はノーマルセルより高いことが確認できた。板厚の薄い  $t_h=0.3\text{mm}$  にてエネルギー吸収能比が最も優れていることより、実用的な観点から発泡ウレタンは薄肉部材に充填するのが効果的であるといえる。

#### 4.4 エネルギー吸収能への寄与の検討

Fig.23 はノーマルセル, 充填セル, リブ付きセル( $t_h=t_r$ )の板厚変化におけるエネルギー吸収量を比較したものである。

この図から、板厚の薄い場合においてより高いエネルギー吸収量を得る為には発泡剤の充填が、板厚が厚くなる場合は内部リブ補強を加えることが有効であることがわかる。

Fig.24 はノーマルセルを 1 としたときの充填セル, リブ付き

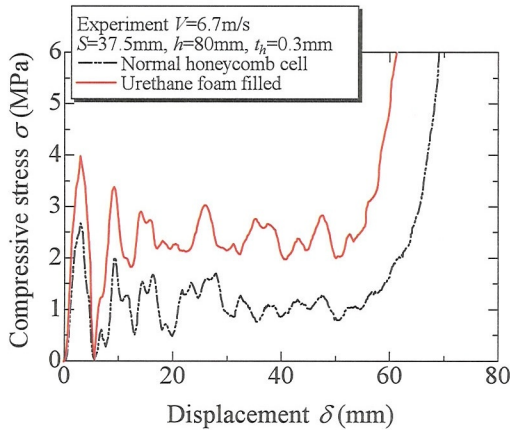


Fig.19 Relation between compressive stress and displacement

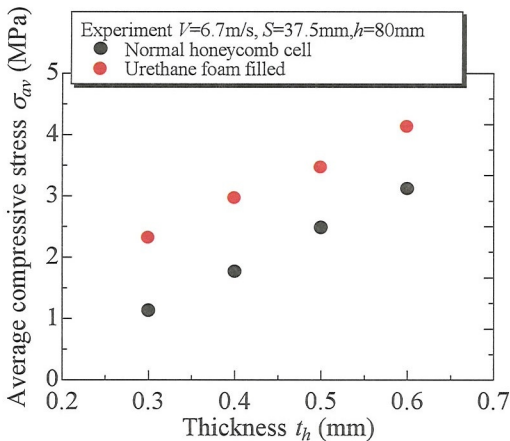


Fig.20 Relation between average compressive stress and thickness

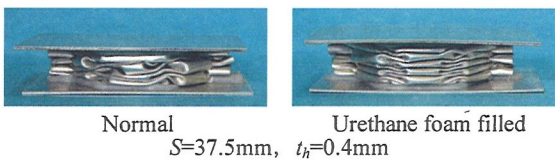


Fig.21 Deformed shapes of normal honeycomb cell and urethane foam filled

セル( $t_h=t_r$ )と有孔セルの板厚変化させたときの各種セルにおけるノーマルセルとのエネルギー吸収能の比を比較したものである。有孔セルにおいてエネルギー吸収能の差は数%となっており、初期ピーク応力低減がエネルギー吸収能へ与える影響は少ないといえる。リブ付きセルは全ての板厚において充填セルよりも高いエネルギー吸収能を示しており、軽量であることが優先される場合において有効であるといえることができる。

#### 4.5 有孔リブ付きハニカムセルの緩衝効果

ここで、優れたエネルギー吸収能を示したリブ付きセルについてセル稜部に円孔を設け初期ピーク応力低減の検討を行った。

Fig.25 はノーマルセル, リブ付きセル, 有孔リブ付きセルを衝突速度  $V=6.7\text{m/s}$  に圧潰させたときの応力と変位の関係を示している。有孔リブ付きセルの初期ピーク応力はノーマルセルと比べても低減が認められ、また応力変動はリブ付きセルとほぼ同様の挙動を呈している。有孔リブ付きセルは稜部に円孔を設けたことによる初期ピーク応力の低減効果、セル内にリブを配したことによる応力レベルの上昇という 2 つの特徴を有する圧潰挙動となった。Fig.26 にノーマルセルのエネルギー吸収能に対する各板厚におけるリブ付きおよび有孔リブ付きセルのエネルギー吸収能比( $E_{ef}^*/E_{ef}$ )とノーマルセルの初期ピーク応力  $\sigma_{cr}$  に対する各種セルの初期ピーク応力  $\sigma_{cr}$  の比( $\sigma_{cr}^*/\sigma_{cr}$ )をそれぞれ示し

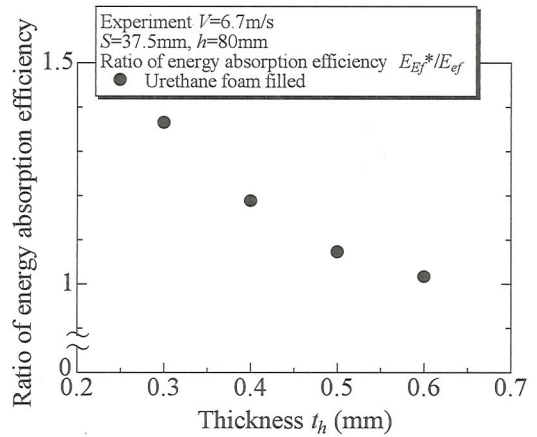


Fig.22 Relation between ratio of energy absorption efficiency and thickness

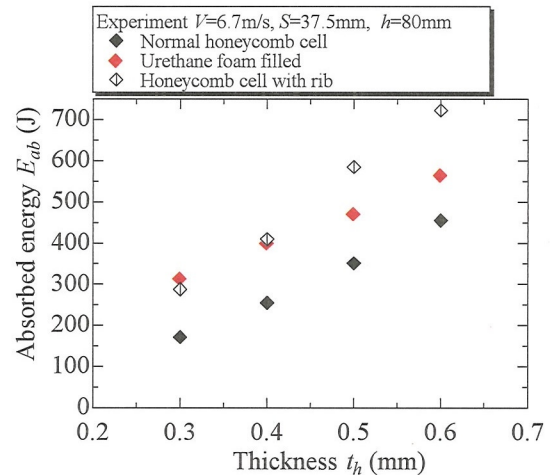


Fig.23 Relation between absorbed energy and thickness

5. 結 言

ハニカム構造の構成要素であるセルを拡大モデル化し緩衝特性向上を目的に有孔セル, 充填セル, リブ付きセル, 有孔リブ付きセルを用い, 動的圧潰実験および数値解析を行った. その結果, 以下の知見および成果を得た.

- (1)セル稜部に円孔を設けることによって初期ピーク応力は低くなり, 初期衝撃の緩和に有効な手段であることを示せた.
- (2)セル内にリブを配する手法は緩衝特性の向上に大きく寄与し, 板厚に依らず一定のエネルギー吸収能の増加を図ることができた.
- (3)板厚比( $t_r/t_h$ )の増加によってエネルギー吸収特性は向上するが, 過度なリブ板厚の増加はその特性を低下させる.
- (4)高剛性発泡ウレタンの充填効果は板厚の薄い場合に顕著に現れ, エネルギー吸収量の向上に十分寄与することを明らかにできた.
- (5)充填セルは板厚の薄い部材において高いエネルギー吸収量を得たい場合に有利であり, リブ付きセルは軽量性が求められる場合に有効であることがわかった.
- (6)有孔リブ付きセルは高エネルギー吸収特性を有し, かつ初期の衝撃を緩和することができる優れた緩衝特性が認められた.

参考文献

- 1) 國本 隆, 山田 仁: 軽金属, 37(1987), 327.
- 2) 國本 隆: 軽金属, 40(1990), 390.
- 3) T.Wierzbicki: Int.J.Impact.Eng, 1(1983), 157.
- 4) 康井義明, 粕谷平和, 森山裕幸, 國本 隆, 馬場武明, 奥戸行一郎: 日本機械学会論文集, 61(1995), 1979.
- 5) Y.Yasui: Int.J.Impact.Eng, 24(2000), 659.
- 6) 小笠原永久, 白鳥正樹, 宮原 進, 于 強: 日本機械学会論文集, 63 (1997), 774.
- 7) 小笠原永久, 白鳥正樹, 宮原 進, 于 強, 宮野 篤: 日本機械学会論文集, 63(1997), 2575.
- 8) W.Abramowicz, T.Wierzbicki: Int.J.Mech.Sci, 30(1988), 263.
- 9) 山崎光悦, 木村卓示, 重原秀行: 日本機械学会北陸信越支部第36期総会・講演会論文集, 997(1999), 235.
- 10) 中野康治, 三村耕司, 榎田 努, 宮本睦久, 山下喜市, 若森達也, 谷村眞治: 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 99(1999), 645.
- 11) 芦田喜孝, 中野康治, 山下喜市, 若森達也, 三村耕司, 谷村眞治: 日本機械学会講演論文集, 014(2001), 6-19.
- 12) 日下貴之, 梶田真仁: 材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集, 7th(2002), 185.
- 13) 康井義明, 持田麻衣, 宝蔵寺泰光: 軽金属, 54-12(2004), 556-561.
- 14) 康井義明, 宝蔵寺泰光, 野上貴司: 機講論, 165-166 (2004)
- 15) 康井義明, 細見光史, 鬼武章: 軽金属, 55-6(2005), 252-257.
- 16) 康井義明, 野上貴司, 小澤成匡: 機講論, 41(2005), 209-210.
- 17) 康井義明, 小澤成匡, 小寺弘晃: 機構論, 60-2(2006), 55-56.
- 18) 吉田夕貴夫, 万向, 高橋雅之, 細川俊之, 山下哲夫: アルミ押出部材の動的曲げエネルギー吸収特性, 自動車技術会論文集, 28-1(1997), 133-136

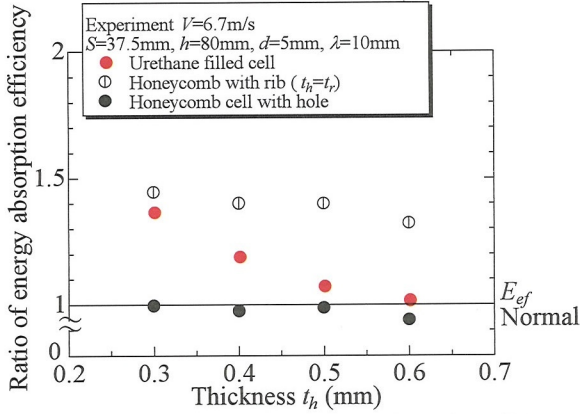


Fig.24 Relation between ratio of energy absorption efficiency and thickness

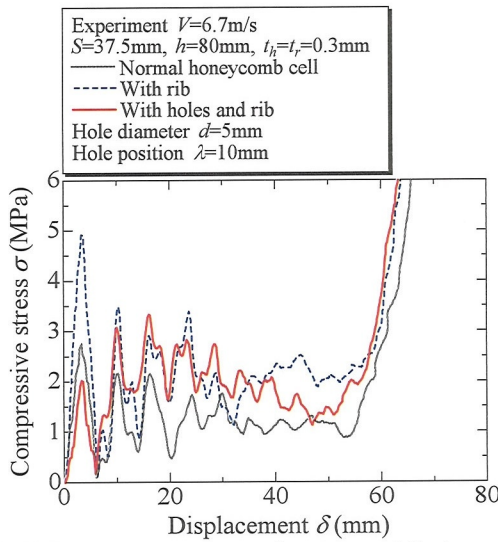


Fig.25 Relation between compressive stress and displacement

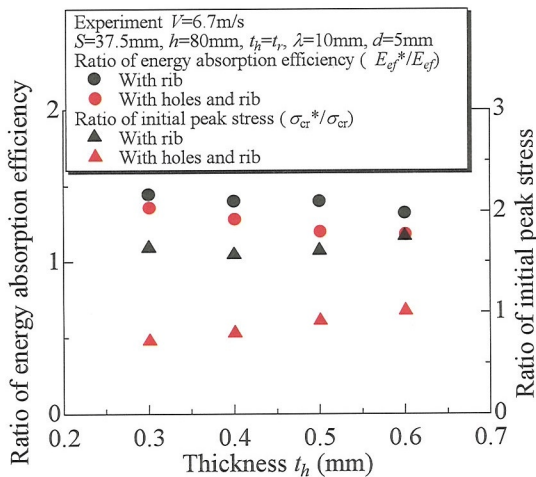


Fig.26 Relation between ratio of energy absorption efficiency, ratio of initial peak stress and thickness

た. 有孔リブ付きセルのエネルギー吸収能比はリブ付きセルに比べ最大でも 10%程度の低下に止まっており, 高い値を示した. また有孔リブ付きセルの  $\sigma_{cr}$  比は, 各板厚においてリブ付きセルに比べ 50%程度に減少し, さらに 1 以下を示していることから低減効果が確認できる. これらのことより有孔リブ付きセルは高いエネルギー吸収特性を有し, 応力の変動が少ない実用的な緩衝材として優れた構造であることが言える.