

# 新しいボディ構造形成技術

—設計技術・接合技術・環境技術の最前線と欧州状況—

New Techniques of Car Body Structure Fabrication

—The Front of Engineering for Design,  
Joining and Environment, and State of Europe—

開催日 2000年4月19日(水)  
会場 化学会館ホール〔東京〕  
主催 社団法人自動車技術会  
企画 構造形成専門委員会

# 衝突安全性能と軽量化の両立への試み

鷹取 収  
((財) 日本自動車研究所)

山本 三幸  
(住友金属工業 (株))

川瀬 文臣  
(イダ産業 (株))

原 敏久 上田 智彦  
(日産車体 (株))

原賀 康介  
(三菱電機 (株))

Attempt to Cope with both Crashworthiness and Weight Reduction

Osamu Takatori  
(Japan Automobile Research Institute)

Miyuki Yamamoto  
(Sumitomo Metal Industries Ltd.)

Fumio Kawase  
(Iida Industry Co., Ltd.)

Toshihisa Hara Tomohiko Ueda  
(Nissan Shatai Co., Ltd.)

Kosuke Haraga  
(Mitsubishi Electric Corp.)

Key word : Body, Crashworthiness, Welding / Urethane Foam, Drop Test, Energy Absorption

## 1. はじめに

自動車は社会のニーズにより常に変化が求められている。とりわけ近年はCO<sub>2</sub>削減が大きく取り上げられている。自動車関連のCO<sub>2</sub>排出量を製造、走行、廃棄の3過程に分けて考えると、走行過程でのCO<sub>2</sub>排出量は全体の70から90%にも相当すると言われている<sup>1)</sup>。したがって、自動車のCO<sub>2</sub>を削減するための最も有効な手段は、走行過程のCO<sub>2</sub>を抑制することと考えられる。そのためには、自動車の軽量化が不可欠となる。その一方で、自動車に関する課題は軽量化だけでなく、衝突安全性能も重要な課題である。つまり、衝突安全性能を確保しつつ、自動車の軽量化を図らなければならない。

本報告では衝撃吸収性能を衝突安全性能の評価指標として、その性能に及ぼすボデーの鋼種、発泡充填材および溶接方法の影響について実験的に検討している。

## 2. 衝撃試験

実車衝突における部材の衝撃吸収エネルギーを把握するため、自動車の構造部材をモデル化した部材(以下、試験用部材と言う)を用いて、軸圧潰および3点曲げ圧潰の衝撃圧潰試験を実施した。試験用部材には3種類の鋼種、3種類の発泡倍率の充填材、3種類の溶接方法を用い、目的に合わせてそれぞれを組み合わせた。試験結果の再現性を確認するため、軸圧潰試験は3回、3点曲げ圧潰試験は2回ずつの同一

繰り返し試験を行った。以下の試験結果では、それぞれの結果の平均値を用いる。

### 2.1. 試験用部材

#### (1) 材料

試験用部材の鋼板には270MPa級の軟鋼、高張力鋼として440MPa級のDP鋼および590MPa級のTRIP鋼を用いた。DP鋼は軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相からなる複合組織鋼のことである。TRIP鋼は加工を加えた場合、残留オーステナイトが徐々に硬いマルテンサイトに変態しながら変形が進行する変態誘起塑性鋼のことである。各鋼板の機械的性質および化学成分を表1に示す。

高剛性発泡充填材には、加熱硬化ブロックタイプであるエポキシ系またはゴム系の発泡材に比べて、発泡倍率をコントロールし易いことから、ウレタン系発泡材を用いることにした。表2に試験に使用した発泡充填材の比重を示す。

#### (2) 形状および溶接方法

図1に試験用部材の形状・寸法を示す。この試験用部材は自動車のフロントサイドメンバーおよびセンターピラーなどの閉断面部材をモデル化したものである。試験用部材の角部は折り曲げ加工で成形した。試験用部材のフランジ幅は、スポット溶接の場合には20mmとした。レーザー溶接の場合はフランジ幅が狭くても済むという特徴から、スポット溶接の半分の10mmとした。スポット溶接のピッチは

表1 供試鋼板の機械的性質と化学成分

鋼種	板厚 [mm]	機械特性値			化学成分 [%]					
		YS [MPa]	TS [MPa]	EL [%]	C	Si	Mn	P	S	
軟鋼	JSC270C	0.8	196-247	320-350	42-45	0.03-0.05	0.002-0.010	0.12-0.20	0.009-0.011	0.005-0.008
	JSH270C	1.6	229-237	354-366	41-42	0.04-0.05	0.01	0.25-0.26	0.010-0.015	0.009-0.013
	JSH270C	2.3	226-251	341-364	43-46	0.05	Tr	0.24-0.25	0.014-0.026	0.010-0.013
高張力鋼	440 DP	1.6	279	481	40	0.06	Tr	1.12	0.016	0.001
	590 TRIP	0.8	366	623	33	0.10	1.24	1.60	0.011	0.002
	590 TRIP	1.6	378	614	37	0.09	1.27	1.61	0.012	0.001
	590 TRIP	2.3	386	628	34	0.10	1.27	1.60	0.010	0.001

50mmとし、レーザー溶接は連続線溶接とした。スポット溶接のナゲット径  $d$  は、実際のボデー構造に使用されている  $d=5\sqrt{t}$  ( $t$ :板厚) を標準径とした。軸圧潰試験ではスポット溶接のナゲット径の影響を把握するため、ナゲット径  $d$  を  $d=7.5\sqrt{t}$  に変更した試験用部材も使用した。表3にスポット溶接の溶接条件、表4にレーザー溶接の溶接条件を示す。

表2 発泡充填材の比重

発泡倍率	比重 [kg/m <sup>3</sup> ] (実測値)
10倍	99
5倍	206
3倍	316

表3 スポット溶接の溶接条件

鋼種	板厚 $t$ [mm]	目標ナゲット径 $d$ [mm]	初期加压時間 [cycles]	加圧力 [N]	通電時間 [cycles]	溶接電流 [kA]	保持加压時間 [cycles]
270MPa級	0.8	$5\sqrt{t}$	50	1960	1+11	6.2	5
	1.6			2940		7.0	
	2.3			3920		5+25	
590MPa級	0.8	$5\sqrt{t}$		2940	5+11	7.0	
		$7.5\sqrt{t}$		8.5			
	1.6	$5\sqrt{t}$		3920	5+20	6.0	
		$7.5\sqrt{t}$	9.0				

表4 レーザー溶接の溶接条件

鋼種	板厚 $t$ [mm]	目標品質	出力 [kW]	溶接速度 [m/min]	シールドガス
270MPa級	0.8	板間の溶け込み幅が板厚以上かつ裏ビードが出ること	3	2.0	Ar 20 l/min
	1.6			1.5	
	2.3			2.0	
440MPa級	1.6		3	2.0	
590MPa級			3	2.0	

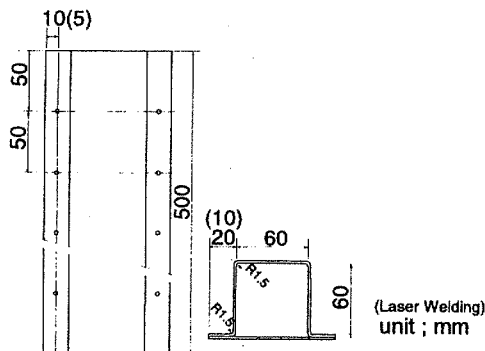


図1 試験用部材の形状・寸法

## 2.2. 試験方法

試験には図2に示す落錘衝撃試験装置を用いた。この試験機はガイドレールに沿って錘体を自由落下させ、試験用部材に衝撃を与えるものである。図3に軸圧潰試験、図4に3点曲げ圧潰試験の試験条件を示す。本試験では実車部材の平均的な変形速度を考慮して、錘体と試験用部材の衝突速度を30km/hとした。また、錘体質量は吸収エネルギーを比較するための十分な潰れ量が得られるように、試験毎に調節した。軸圧潰試験における座屈荷重は試験用部材の下に取り付けたロードセルで計測し、3点曲げ圧潰試験ではストライカと錘体の間に取り付けたロードセルで座屈荷重を計測した。変位はレーザー変位計を用いて計測した。

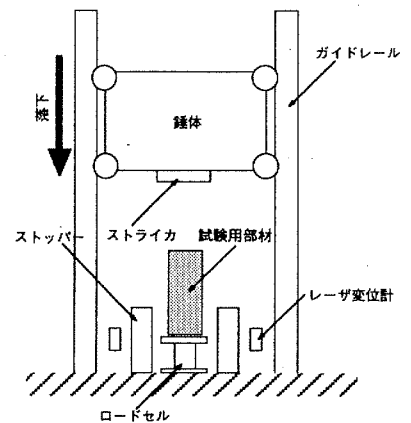


図2 落錘衝撃試験機 (軸圧潰試験時)

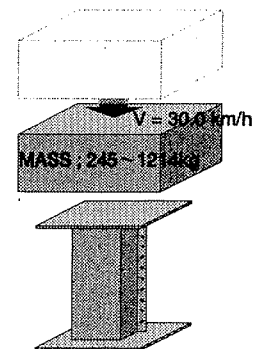


図3 軸圧潰試験の試験条件

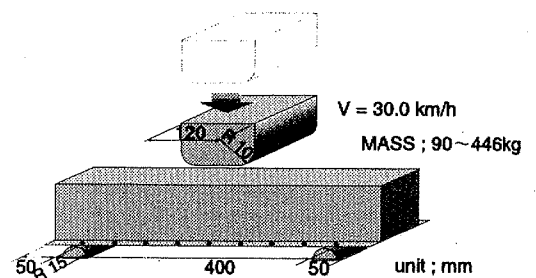


図4 3点曲げ圧潰試験の試験条件

### 2.3. 試験結果

表5に軸圧潰試験の結果を前委員会の試験結果<sup>3)</sup>と併せて示す。発泡材を充填している試験用部材や板厚が2.3mmの鋼板を使用している試験用部材の一部では、溶接部が破壊し、外側に大きく膨らむ変形が発生した。溶接部の破壊は溶接部近傍の母材が切れて発生したものである。図5に試験用部材が膨らんでいる様子をカット断面で示す。溶接部が破壊していない左側は蛇腹状に鋼板が変形しているのに対し、破壊している右側は大きく外側に膨らんでいる。図6に同試験の荷重および吸収エネルギー勾配を示す。吸収エネルギー勾配が一定となる区間は、潰れ量が35から80mmの区間である。35mm以前は降伏荷重により吸収エネルギー勾配が急になり、80mmでは溶接部の破壊により勾配が緩やかになっている。全試験において潰れ量50mm付近の吸収エネルギー勾配が安定していることから、吸収エネルギーは衝突瞬間から50mm変形した時点までの吸収エネルギーの総和で算出することにした。標準化のため、吸収エネルギーは試験用部材の単位長さ当たりの質量で除した値(以下、比吸収エネルギーと言う)を用いる。

表5 軸圧潰試験結果一覧

鋼種	板厚 t [mm]	溶接方法	充填材の発泡倍率	E <sub>50</sub> (M/L) [Jm/g]	部材の膨らみ	
270MPa級	0.8	スポット5√t	—	0.502	—	
		レーザー連続	5	0.840	—	
	1.6	スポット5√t	—	0.700	—	
			10	0.894	—	
		レーザー連続	5	1.085	—	
			—	0.882	—	
			10	1.053	—	
			5	1.179	—	
		2.3	スポット5√t	—	0.849	—
			レーザー連続	5	1.231	あり
440MPa級	1.6	レーザー連続	—	0.934	—	
		10	5	1.263	あり	
			—	1.058	—	
590MPa級	0.8	スポット5√t	—	0.510	—	
		スポット7.5√t	—	0.552	—	
		レーザー連続	—	0.685	—	
	1.6	スポット5√t	—	0.872	—	
			スポット7.5√t	—	1.008	—
		レーザー連続	—	1.048	—	
			10	1.181	—	
			5	1.400	あり	
	2.3	レーザー連続	—	1.347	あり	

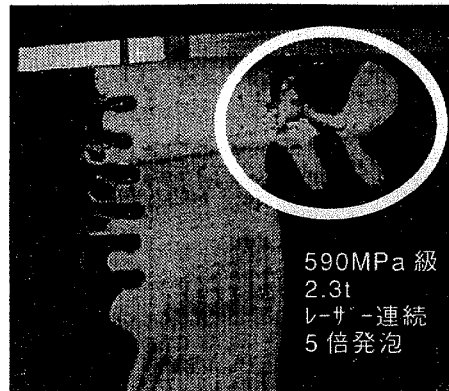


図5 軸圧潰試験部材の膨らみ (カット断面)

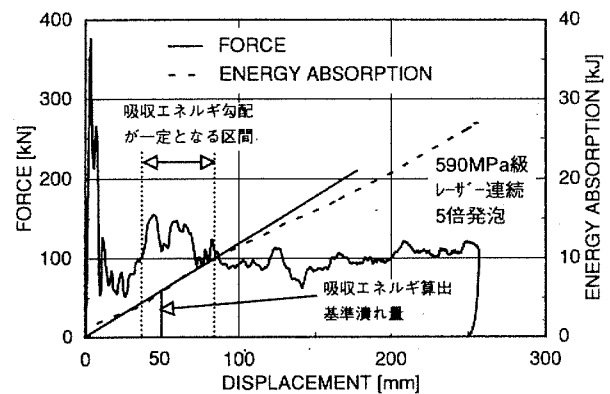


図6 軸圧潰試験の荷重と吸収エネルギー勾配

表6に3点曲げ圧潰試験の結果を示す。3点曲げ圧潰試験では溶接部が破壊している試験用部材はない。なお、3点曲げ圧潰試験においても、潰れ量50mmまでの吸収エネルギーから算出した比吸収エネルギーで比較する。

表6 3点曲げ圧潰試験結果一覧

鋼種	板厚 t [mm]	溶接方法	充填材の発泡倍率	E <sub>50</sub> (M/L) [Jm/g]	
270MPa級	0.8	スポット5√t	—	0.190	
		レーザー連続	5	0.354	
	1.6	スポット5√t	—	0.295	
			5	0.465	
		レーザー連続	3	0.525	
			—	0.336	
			10	0.416	
			5	0.515	
		2.3	スポット5√t	—	0.395
			レーザー連続	5	0.596
440MPa級	1.6	レーザー連続	—	0.346	
		5	3	0.609	
			—	0.531	
590MPa級	0.8	スポット5√t	—	0.200	
		レーザー連続	—	0.229	
	1.6	スポット5√t	—	0.343	
			—	0.382	
		レーザー連続	5	0.569	
			3	0.694	
			—	0.550	
	2.3	レーザー連続	—	0.550	

板厚と吸収エネルギーの関係を整理するため、この関係を  $E_{50} \propto t^n$  と仮定して板厚指数  $n$  を最小二乗近似で求めた。表7に各試験用部材における板厚指数を示す。板厚指数の大きさは吸収エネルギーに対する板厚変化の感度と言い換えることができる。鋼種で見ると、軟鋼より高張力鋼板を使用している試験用部材の方が板厚指数が大きい。これは鋼板自体の曲げ剛性差の影響によるものである。スポット溶接の板厚係数がレーザー溶接より大きい理由は、板厚が増すとスポット溶接間におけるフランジ部の開きを抑制するからである。発泡材を充填すると板厚指数が小さくなる理由は、吸収エネルギーを発泡材と鋼板で分担しているからである。

以下に吸収エネルギーの影響因子を鋼種、発泡充填材、溶接方法に分けて述べる。

表7  $E_{50} \propto t^n$  での板厚指数  $n$  の比較

供試体			板厚指数 $n$	
鋼種	溶接方法	充填材の発泡倍率	軸圧潰	3点曲げ圧潰
270MPa級	スポット径 $5\sqrt{t}$	—	1.61	1.68
590MPa級			1.78	1.78
590MPa級	スポット径 $7.5\sqrt{t}$		1.87	—
270MPa級	レーザー連続		1.64	1.81
270MPa級	レーザー連続	5倍発泡	1.16	1.28

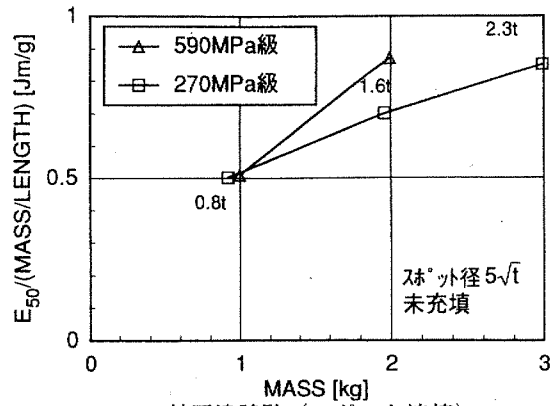
(1) 鋼種の影響

図7に軸圧潰試験および3点曲げ圧潰試験の結果を鋼種の比較で示す。スポット溶接を用いている試験用部材の軸圧潰試験結果 (a) から、軟鋼より高張力鋼板を使用している試験用部材の方が比吸収エネルギーが高いことがわかる。板厚が増すほどその差は大きくなる傾向にある。同様の結果が3点曲げ圧潰試験結果 (c) から確認できるが、軸圧潰試験結果より鋼種間の比吸収エネルギー差が小さい。レーザー溶接を用いた試験用部材の試験結果 (b), (d) から、軟鋼より高張力鋼板を用いた試験用部材の方が比吸収エネルギーが高いことがわかる。

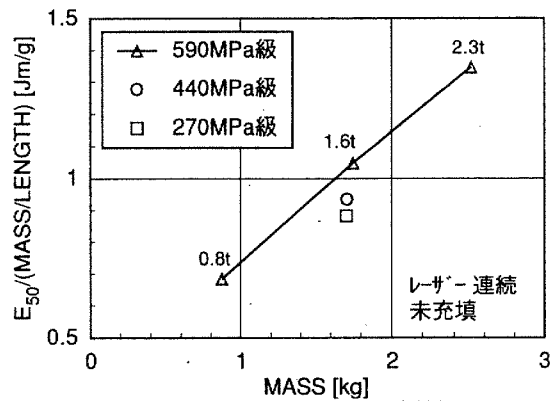
試験用部材の鋼種を270MPa級から590MPa級に置換したとき、どれだけの質量軽減効果が期待できるかを試算した。変更前の吸収エネルギーと同じエネルギーを吸収するための板厚を予測する方法で、表7の板厚指数を用いた。試算には板厚1.6mmのレーザー連続溶接の試験結果を用いた。表8にその結果を示す。軸圧潰モードで9%、3点曲げ圧潰モードで6%の質量を軽減できると言える。同様に、試験用部材の鋼種を440MPa級から590MPa級に置換した場合、軸圧潰モードで6%、3点曲げ圧潰モードで4%の質量を軽減できると言える。高張力化による質量軽減効果は、3点曲げ圧潰モードより軸圧潰モードに対する方が高いことがわかる。

表8 鋼種による質量軽減効果

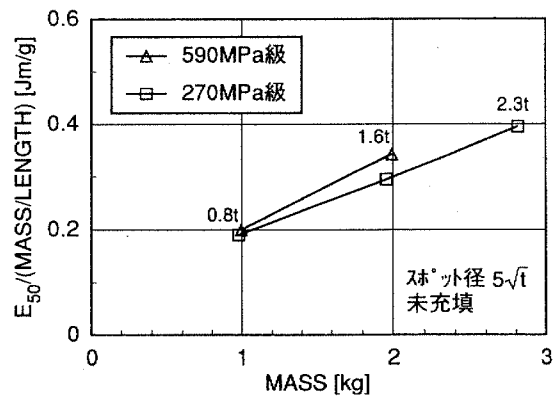
鋼種の変更点	質量軽減効果 [%]		備考
	軸圧潰	3点曲げ圧潰	
270MPa級 →590MPa級	9	6	レーザー連続
440MPa級 →590MPa級	6	4	レーザー連続



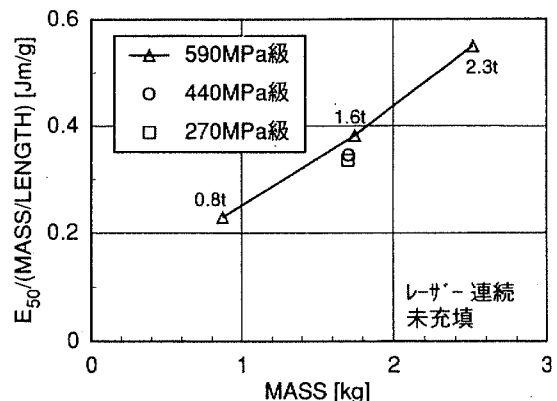
(a) 軸圧潰試験 (スポット溶接)



(b) 軸圧潰試験 (レーザー溶接)



(c) 3点曲げ圧潰試験 (スポット溶接)



(d) 3点曲げ圧潰試験 (レーザー溶接)

図7 吸収エネルギーに及ぼす鋼種の影響

## (2) 発泡充填材の影響

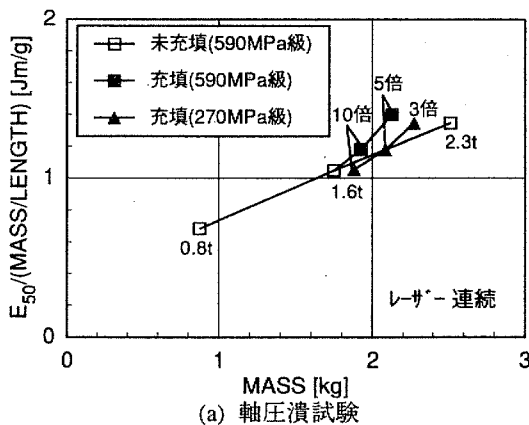
図8に軸圧潰試験および3点曲げ圧潰試験の結果を発泡材の有無の比較で示す。それぞれの試験で発泡材を充填している試験用部材は、270MPa級および590MPa級の板厚1.6mmのものである。

軸圧潰試験結果(a)を見ると、発泡倍率が低くなるほど比吸収エネルギーは高くなる。これは発泡材の強度が試験結果に反映されたためと思われる。590MPa級の板厚1.6mmの試験用部材に10倍と5倍の発泡材を充填したときの比吸収エネルギーは、発泡材を充填せずに板厚を増した試験結果より高い。同様に、270MPa級の試験用部材に発泡材を充填したときでも、590MPa級の板厚を増したときの比吸収エネルギーより大きくなり得る。これらのことより、質量増加を極力抑えながら吸収エネルギーを増したい場合、発泡材の充填は有効であることがわかった。同様の結果が3点曲げ圧潰試験結果(b)からも確認できる。

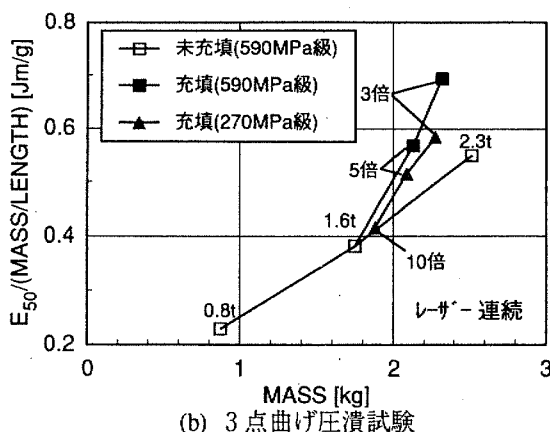
図9に軸圧潰試験後の試験用部材における変形モードの比較を示す。両試験用部材は波状に潰れているが、充填材の有無により波の大きさに差異がある。発泡材を充填していない試験用部材に比べ、発泡材を充填している試験用部材は波が小さい。これは発泡材があるため、部材の中心方向への変形が抑えられたためである。図10に座屈波の実長 $e$ と平均荷重の関係を示す。平均荷重は衝突瞬間から潰れ量

50mmまでの平均荷重である。発泡材を充填していない試験用部材の座屈波の実長と平均荷重には相関があるが、充填と未充填の試験用部材を合わせて見ると相関がない。つまり、発泡材を充填することにより座屈波の実長は短くなるものの、平均荷重の増加には座屈波の変化が寄与していないと言える。

図11に3点曲げ圧潰試験の試験用部材における変形モードの比較を示す。同図は潰れ量50mm付近に達した瞬間の様子である。3点曲げ圧潰試験では発泡充填材の有無により変形モードが異なる。発泡体を充填していない試験用部材は、インパクトの接触面で局所的な凹みが発生し、その付近の側壁は大きく膨らむ。これに対し、発泡材を充填している試験用部材はインパクトの接触面で大きな変形は生じず、側壁の膨らみも小さく、インパクトの両端部付近でしわが発生している。発泡材が充填されているために荷重が分散したことによるものと思われる。

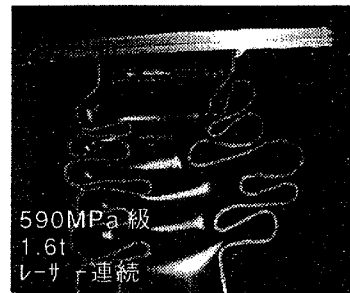


(a) 軸圧潰試験

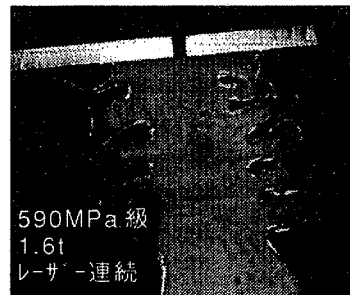


(b) 3点曲げ圧潰試験

図8 吸収エネルギーに及ぼす発泡充填材の影響



(a) 発泡材未充填



(b) 発泡材充填(10倍発泡)

図9 発泡充填材の有無による変形モードの違い(軸圧潰)

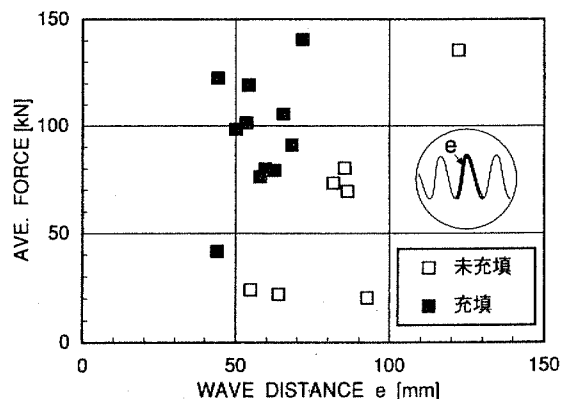
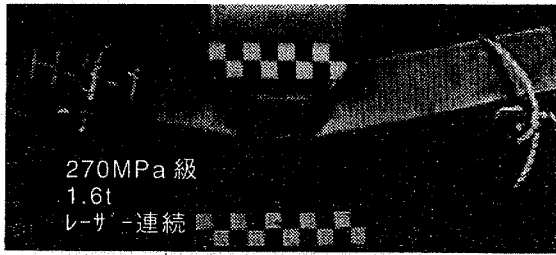


図10 座屈波の実長 $e$ と平均荷重の関係



(a) 発泡材未充填



(b) 発泡材充填 (5倍発泡)

図11 発泡充填材の有無による変形モードの違い (3点曲げ圧潰)

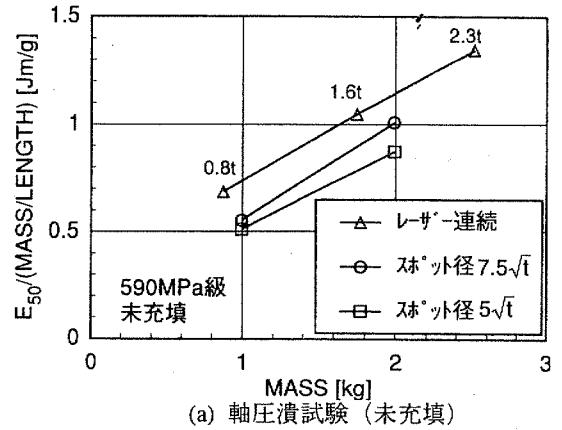
270MPa級の板厚1.6mmの試験用部材に5倍発泡の充填材を充填したとき、どれだけの質量軽減効果が期待できるかを試算した。試算にはレーザー溶接を用いた試験用部材の試験結果を用いた。表9にその結果を示す。軸圧潰モードで20%、3点曲げ圧潰モードで25%それぞれ質量を軽減できると言える。発泡材充填による質量軽減効果は、軸圧潰モードよりも3点曲げ圧潰モードに対しての方が高い。

表9 発泡充填材による質量軽減効果

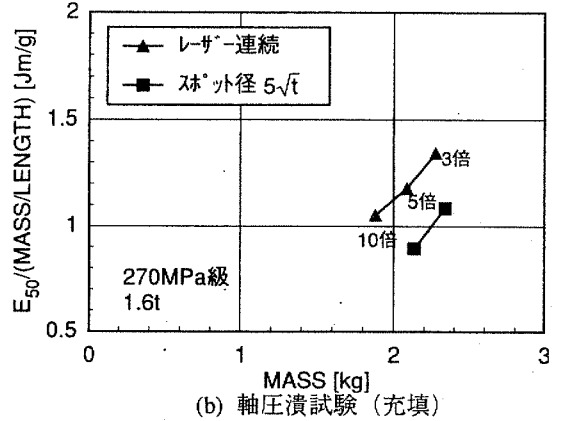
充填材の変更点	質量低減効果 [%]		備考
	軸圧潰	3点曲げ圧潰	
未充填→5倍発泡	20	25	270MPa級 レーザー-連続

### (3) 溶接方法の影響

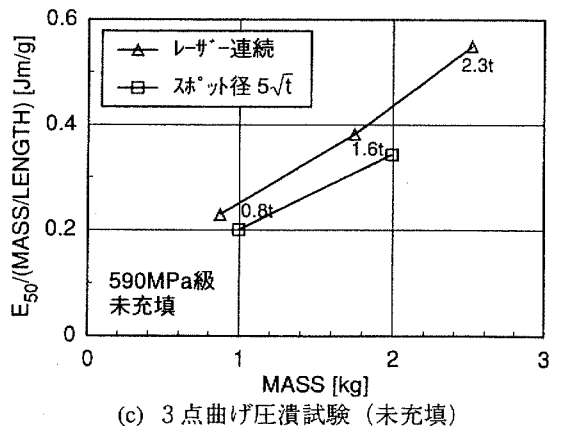
図12に軸圧潰試験および3点曲げ圧潰試験の結果を溶接方法の比較で示す。発泡材未充填の軸圧潰試験結果 (a) に注目すると、レーザーの連続溶接で接合した試験用部材は、スポット溶接のものより比吸収エネルギーが高い。スポット溶接のナゲット径が $7.5\sqrt{t}$ の試験用部材は、ナゲット径が $5\sqrt{t}$ のものより比吸収エネルギーが高い。溶接の衝撃強度が比吸収エネルギーに影響しているものと思われる。レーザー溶接の比吸収エネルギーがスポット溶接のものより高いことは、3点曲げ圧潰試験結果 (c) から確認できる。さらに、発泡材を充填した試験用部材の試験結果 (b), (d) から確認できる。



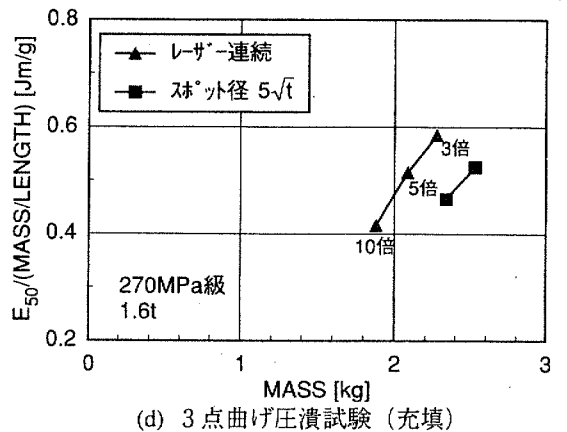
(a) 軸圧潰試験 (未充填)



(b) 軸圧潰試験 (充填)



(c) 3点曲げ圧潰試験 (未充填)



(d) 3点曲げ圧潰試験 (充填)

図12 吸収エネルギーに及ぼす溶接方法の影響

ナゲット径が $5\sqrt{t}$ のスポット溶接の試験用部材をレーザー連続溶接に変更したとき、どれだけの質量軽減効果が期待できるかを試算した。さらに、軸圧潰モードについてはスポット溶接のナゲット径を $5\sqrt{t}$ から $7.5\sqrt{t}$ に変更したときの質量軽減効果も予測した。試算には590MPa級の板厚1.6mmの試験結果を用いた。表10にその結果を示す。軸圧潰モードで15%、3点曲げ圧潰モードで11%の質量を軽減できると言える。但し、この結果にはフランジ幅の縮小による質量低減効果も含まれている。同じように、軸圧潰モードにおいてスポット溶接のナゲット径を $5\sqrt{t}$ から $7.5\sqrt{t}$ に変更したとき、7%の質量を軽減できると言える。スポット溶接のナゲット径を大きくするだけでも質量低減効果があることがわかった。

表10 溶接方法による質量軽減効果

溶接方法の変更点	質量低減効果 [%]		備考
	軸圧潰	3点曲げ圧潰	
スポット径 $5\sqrt{t}$ →レーザー連続	15	11	590MPa級 フランジ効果を含む
スポット径 $5\sqrt{t}$ →スポット径 $7.5\sqrt{t}$	7	—	590MPa級

前述の通り、軸圧潰試験では衝撃強度が最も高いと思われるレーザー連続溶接を用いた試験用部材でも、潰れが進むに連れて溶接部の破壊が生じている。このことを確認するため、潰れ量毎の比吸収エネルギーの比較を図13に示す。潰れ量で衝突瞬間から50mm、50から100mm、100から150mm、150から200mmの4段階に分けて比吸収エネルギーを比較する。10倍発泡の試験用部材の比吸収エネルギーは、潰れ量が50から100mmで若干の低下が見られるものの、100mm以降ではほぼ安定した比吸収エネルギーを示している。一方、5倍発泡の試験用部材は潰れが進むに連れて比吸収エネルギーが低下し、潰れ量100mm以降では10倍発泡の試験用部材の比吸収エネルギーと逆転している。これは潰れ量が50から100mmの間で、5倍発泡の試験用部材の溶接部が破壊したためと思われる。このことは衝撃強度が最も高いと思われるレーザーの連続溶接でも強度不足になり得ることを意味する。鋼板の高張力化または発泡材を充填し、高吸収エネルギーを部材に期待する場合、部材の接合強度に十分留意しなければならないと言える。

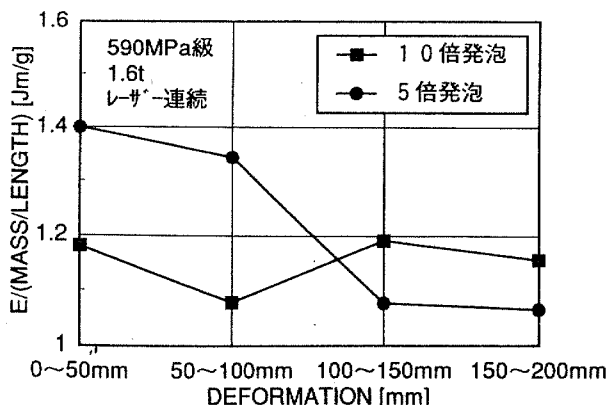


図13 潰れ量毎の比吸収エネルギーの比較

#### (4) 組合せ効果

前項までは吸収エネルギーの影響因子を鋼種、発泡充填材、溶接方法のそれぞれ単独での影響度合いについて解析した。ここではそれらを組合せた場合の効果について述べる。

鋼種を270MPa級から590MPa級への変更、溶接方法をナゲット径が $5\sqrt{t}$ のスポット溶接からレーザー連続溶接への変更を同時に行ったとき、また、270MPa級の板厚1.6mmの試験用部材に5倍発泡の充填材を充填、溶接方法をナゲット径が $5\sqrt{t}$ のスポット溶接からレーザー連続溶接への変更を同時に行ったときのそれぞれの質量低減効果を試算した。表11にその結果を示す。いずれの場合も、単独で変更したときの質量低減効果の和と同等である。このことから、鋼種、発泡充填材、溶接方法の改善を組合せたことによって特異な現象は発生しないと言える。

表11 組合せによる質量軽減効果

変更点	質量低減効果 [%]				備考
	軸圧潰		3点曲げ圧潰		
	組合せ	単独	組合せ	単独	
270MPa級→590MPa級					
スポット径 $5\sqrt{t}$ →レーザー連続	25	9	18	6	
未充填→5倍発泡					
スポット径 $5\sqrt{t}$ →レーザー連続	35	20	34	25	270MPa級
		15		11	

#### 3. まとめ

自動車の衝突安全性能と軽量化の両立を目指し、鋼種、発泡充填材および溶接方法について軸圧潰試験および3点曲げ圧潰試験を行った。その結果、鋼板の高張力化、発泡材の充填および溶接方法の強化はいずれも衝突安全性能を維持しつつ、軽量化を図ることがわかった。特に、3点曲げ圧潰モードにおける発泡材の充填は、部材の変形モードをコントロールする効果があり、これを利用することで効率的なエネルギー吸収が実現できると考える。但し、鋼板の高張力化または発泡材を充填し、高吸収エネルギーを部材に期待する場合、部材の接合強度に十分留意しなければならない。

#### 参考文献

- 1) 小林ほか、自動車のLCA研究、第2回エコバランス国際会議講演集、P76-79 (1996)
- 2) 船崎ほか、乗用車のライフサイクル・インベントリ分析—廃棄段階の重要性と課題—、自動車技術会講演集、79-99 (1999)
- 3) 山本ほか、薄板溶接方法の比較と部材の動的圧潰特性、自動車技術会シンポジウム No.9705 (1997)