

特集：新型デミオ

11

## 高強度発泡充填材フレームの開発 Development of Frame Reinforced High Strength Structural Foam

奥山 智仁\*1 田中 力\*2 本田 正徳\*3 松岡 秀典\*4  
Tomohito Okuyama Chikara Tanaka Masanori Honda Hidenori Matsuoka  
棗 裕貴\*5 梶村 勇一\*6 石亀 勝義\*7  
Hirotaka Natsume Yuichi Sugimura Katsuyoshi Ishigame

### 要 約

低燃費をもたらす車体の軽量化と高い衝突安全性能の両立には、鋼板製車体フレームの曲げ強度について質量効率の向上が重要であり、曲げ変形時の断面崩壊の抑制が有効であることが知られている。高強度発泡充填材をフレーム内部に全て充填し補強する技術は、曲げ強度を向上させる有効な技術であるが、軽量化と低コストの視点で質量効率の向上が必要であった。本開発では、断面崩壊の抑制に重要なフレーム縦面とその支持部材に着目し、最小限の充填量で曲げ強度を向上できる構造の導出と、商品化における構造制約や製造時に求められる特性を満たす材料開発を行い、新型デミオのBピラーに適用した。

### Summary

That the compatibility of high crash safety performance and reducing vehicle weight resulting in low fuel consumption, improvement of mass efficiency of the bending strength of the steel body frame is important, suppression of the cross-section collapse of the deformation is effective bending is known have. Technique of reinforcing filling all within the frame of high strength structural foam, is an effective technique for improving the bending strength, but improved mass efficiency was required in perspective of cost and weight. In this development, to derive the structure that focuses on an important frame vertical surface to the suppression of the cross-section collapse and the support member, it is possible to improve the bending strength in the filling amount of the minimum, the properties required at the time of manufacture and structural constraints in commercialized it developed as a new material to satisfy, it is applied to the B-pillar of the new Demio.

## 1. はじめに

近年、自動車はCO<sub>2</sub>排出量の削減や省エネルギー化に対して燃費性能を向上することと、衝突時において人命を保護するために車体フレーム（以下、フレーム）の高い衝突安全性能との両立が求められている。フレームの曲げ強度の向上には高張力鋼板を用いるが、グローバルな供給・仕様を考慮すると板厚の増加や補強用鋼板の追加等が避けられず、コスト増や重量増となる。また、高強度発泡充填材（以下、充填材）をフレーム内部に全て充填する構造は、曲げ強度を向上させる有効な技術ではあるが、軽量化と低コスト化の視点では質量効率が低く、マツダで一部車種<sup>(1)</sup>、他社も高級車への採用に留まっている。そこで、質量効率の向上をねらい、最小限の充填量で曲げ強度を向上できる

構造の考え方と具体形状を見出し商品化における構造制約や製造時に求められる特性を満たす材料開発に取り組んだ。

## 2. 最小量の充填構造の導出

### 2.1 質量効率を上げる着眼点

フレームに多く用いられる薄肉中空断面の場合、断面崩壊によってフレームの曲げ強度が理想強度である全塑性モーメントより大幅に低く、鋼板が本来有する材料強度を活用できていない。Fig. 1に示すフレームの断面において、上面幅を狭めることで曲げ強度を向上する方法<sup>(2)</sup>は知られているが、更なる曲げ強度の向上には縦面の座屈耐力を向上する必要がある。木村ら<sup>(3)</sup>によると、薄板の曲げ座屈耐力 $M$ と全塑性モーメント $M_p$ の関係は、換算幅厚比 $\lambda^*$ の値により式(1)または、式(5)のいずれかで表される。

\*1~3 技術研究所  
Technical Research Center

\*6, 7 衝突性能開発部  
Crash Safety Development Dept.

\*4, 5 ボデー開発部  
Body Development Dept.

i)  $\lambda^* \leq \lambda_e^*$  の場合、座屈耐力の式

$$\frac{M}{Mp} = (\alpha - 1) \left( \frac{\lambda}{\lambda_e} \right) + 1 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{TS}} \quad \therefore \alpha < 1 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{TS}}{kE}} \quad (3)$$

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{0.9}{\alpha}} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{YP}$ : 降伏応力  $\sigma_{TS}$ : 最大引張応力  
 $k$ : 座屈係数  $E$ : ヤング率  $b$ : 板幅  $t$ : 板厚

ii)  $\lambda^* \geq \lambda_e^*$  の場合、弾塑性座屈の式

$$\frac{M}{Mp} = \frac{\lambda_p^*}{\lambda} \quad (5)$$

$$\lambda_p^* = \frac{3\alpha - 1}{2\alpha} \lambda_e^* \quad (6)$$

Fig. 2に、式(1)~(6)に基づき算出した1,180MPa級高張力鋼板 ( $\sigma_{YT}=777\text{MPa}$ ,  $\sigma_{TS}=1,199\text{MPa}$ ,  $E=205,900\text{MPa}$ , 質量密度 $\rho=7.6\text{g/cm}^3$ , 板長さ=150mm) の曲げ座屈耐力 *Moment* を質量 *Mass* により除した質量効率を示す。材料特性一定のもとに質量効率を向上させるには、断面幅  $b$  の拡大により質量効率を向上させた上で、板厚  $t$ , もしくは座屈係数  $k$  の増大により全塑性モーメント  $Mp$  からの低下率を低減することが有効であると分かる。しかし、板厚  $t$  の増大は軽量化、板幅  $b$  の増大はレイアウト成立性を考慮すると設計が困難である。

一方、座屈係数  $k$  は、板のアスペクト比、荷重条件一定の場合には、板の支持条件によって決定する因子である。従って、板の曲げ座屈耐力の質量効率を向上させるため、板の支持条件の工夫による座屈係数  $k$  の増大が有効な方策である。理由は、式(1)の  $\alpha - 1$  が式(2)より負の値となるため、式(3)より  $k$  を大きくすると、 $\lambda^*$  の値を小さくでき、結果  $M/Mp$  を1に近づけることができるためである。

ここまで述べてきたように、マツダのフレーム開発において、板の曲げ座屈耐力の向上は、板幅  $b$  をできるだけ大きくした上で、板の支持条件を工夫し、座屈係数  $k$  を増大させる方策で進めており、本田ら<sup>(4)</sup>が報告しているように支持条件をFig. 3に示す断面形状により実施している。しかし、更なる高張力鋼板の高強度薄板化は、断面が座屈しやすくなる。そこで、断面形状に加え、より一層の座屈係数  $k$  の向上を図る手段として充填材フレームの開発に取り組んだ。

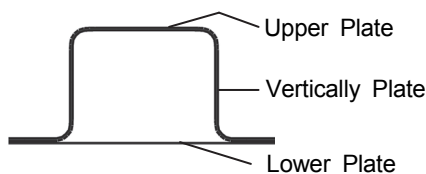


Fig. 1 Section of Frame

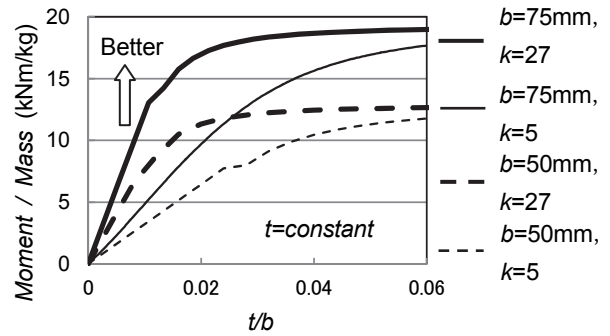


Fig. 2 Mass Effectiveness of Bending Buckling Strength

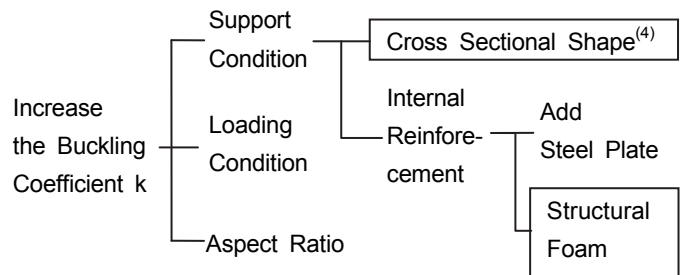


Fig. 3 Technique to Increase the Buckling Coefficient k

## 2.2 座屈係数 $k$ を満たす効果と適値

### (1) 充填材フレーム構造

充填材フレームはFig. 4に示すアウトパネル・レインフォースメント・インナパネルの3枚の鋼板から構成される。フレーム曲げ強度の質量効率の向上を図るには、2.1からレインフォースメント縦面の端部拘束による座屈係数  $k$  の増大が有効である。充填材は、Fig. 4に示すアウトパネルとレインフォースメントの板間を充填し、充填材と各鋼板とを接着し、端部を拘束する補強効果を得る。フレーム縦面を拘束する上で、上端にRを持つ稜線部 (Fig. 4のA部) は変形起点となり強度は低下する。また、充填材と鋼板との接着面が剥離することで拘束力が大きく低下する。そのため、まずはフレーム内部の変形挙動を把握できるCAEを用いて、剥離現象を再現させ、次にフレーム縦面と稜線部の補強箇所に着目して、質量効率が最大となる充填量を明らかにした。

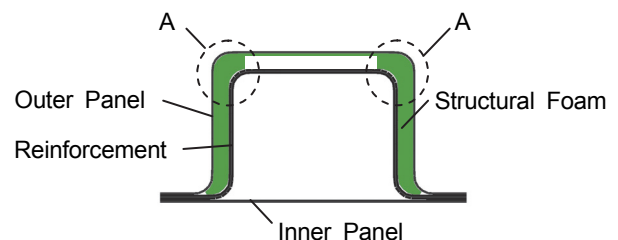


Fig. 4 Section of Frame Reinforced Structural Foam

(2) 接着界面の剥離挙動を再現できるCAE手法の構築

CAEは、解析ツールとしてLS-DYNAを用いた。充填材の剥離現象は、Fig. 5に示すフレーム内の充填構造を模擬したサンドイッチ試験から、Fig. 6に示す粘りを伴ってから完全剥離に至る。従来のCAEは、境界条件の設定が接触する面同士が干渉した量に応じて反力を生じるAutomatic Surface to Surfaceであり、この粘りを再現できなかった。そこで、接着界面に一定荷重が生じた後に、鋼板と充填材の相対変位の大きさにより徐々に伝達荷重が減少し、完全剥離に至る境界条件とすることで、粘りを再現した。この境界条件は、実部品レベルでも剥離挙動を再現でき、曲げ強度の予実差を10%から5%以下へと精度を向上させ、以降に述べる検討(2.2(3)と4.1)に適用した。

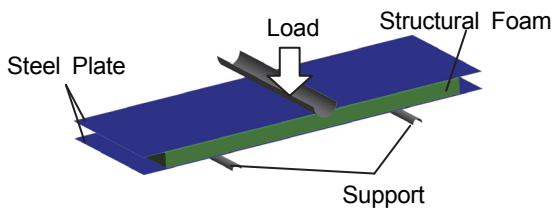


Fig. 5 Sandwich Test Piece

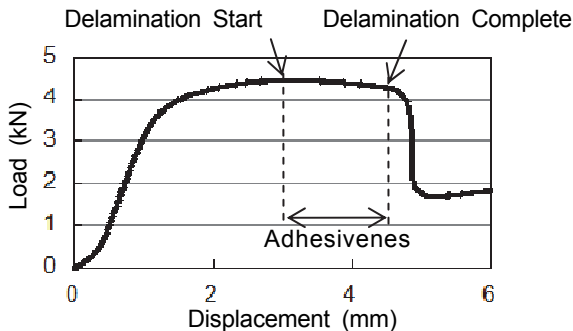


Fig. 6 Delamination Behavior for Sandwich Test

(3) 充填材による効果と適値

フレーム縦面の拘束に必要な充填範囲とフレーム強度の質量効率の関係をFig. 7に示す。充填範囲は、縦面の拘束に影響しない上面の稜線R止まりを起点 $x=0$ とし、徐々に範囲を下面に向けて広げている。また、フレーム強度の質量効率は、充填材の追加質量 $\Delta Mass$ と、フレームの曲げ強度の向上代 $\Delta Moment$ の商とした。座屈係数 $k$ は、式(1)~式(6)とフレームの曲げ強度結果から算出した。

結果、最も質量効率が高いのは、拘束端部となる縦面の稜線R止まりまで充填した範囲 $x=0\sim 30$ であり、座屈係数 $k$ は補強なしのフレームから3倍以上に向上した(Fig. 7のMax Point)。つまり、縦面の拘束は、稜線部(Fig. 4のA)を支持、補強することで十分であり、それ以上の追加補強は、充填材を増量した質量ほどフレーム強度の向上が得られないと分かった。

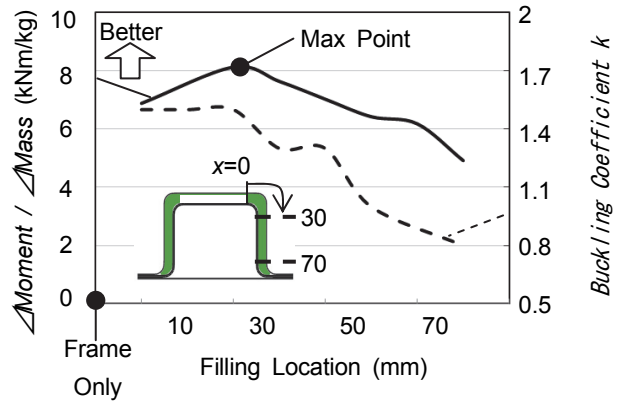


Fig. 7 Range of Filling Location and Mass Efficiency



3. 充填材の材料開発

3.1 開発の狙いと目標特性

Bピラー等に充填材フレーム構造を取り入れる際に、設計の制約や生産性を満たす主要要件は、以下の3点とした。特にCの観点から、充填材のタイプは、過去に実績のあるマツダで使用した軟質シートではなく、成形タイプの充填材開発が必要である(Table 1)。

- A. 板間隙を確実に充填するために2倍の高発泡率
- B. 衝突性能を満足する圧縮強度
- C. 組み付け時の作業容易性や位置ずれが生じないこと

Table 1 Comparison the Features of the Structural Foam

Type		Flexible	Molding
Appearance			
Storage	Temperature Control	Need	No Need
Manufacture	Ease of assembly	Bad	Better
	Assembly Position	Varies	Not Vary
Efficiency	High Strength	Both Easy	Both Not Easy
	High Foaming		

3.2 材料開発

成形タイプの充填材における組成改良の考え方をTable 2に示す。フレームの板間隙を充填し、衝突性能を満足するため、充填材は高発泡と高強度の両立が求められた。従来の成形タイプは、発泡硬化前のエポキシ樹脂のモノマー分子量が大きく、ポリマー化させたときの架橋密度が低い。そのため、高強度化できなかつた。そこで、分子量が異なる複数種のエポキシ樹脂をブレンドし高強度化を実現した。更に、高強度を維持した上で高発泡化は、従来は気泡が肥大化し低強度化するため、複数種の発泡剤の併用により発泡セルを微細化して実現した (Fig. 8)。

Table 2 Modification Concept of Material Composition

	Concept	Initiatives
Epoxy Resin	Increase of the Cross-linking Density	Mono Material →Multi Material
Foaming Agent	Hypertrophy Suppress of Bubbles	Mono Material →Multi Material

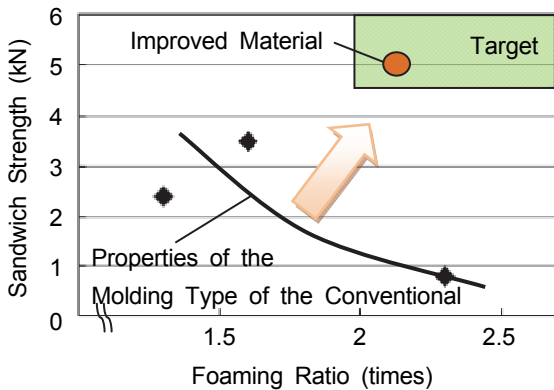


Fig. 8 Target and Performance of the Improved Material

4. 商品化開発

4.1 実部品構造化への応用

充填材フレーム構造を車体に適用するために、設計や衝突安全性の観点から以下の課題に取り組んだ。

(1) レイアウト要件との両立

充填材を発泡させる最低板厚を確保するためには、レインフォースメントとアウトパネルの板間隙が一定以上必要である。その板間隙が確保可能な範囲を明らかにした。

(2) 衝突要件との両立

車両を模擬したバリアが車両側面に衝突すると、ドアのヒンジを介してBピラーに荷重が伝達される。その際、車室内の空間を確保するには、ロアヒンジ部より上部のBピラーが座屈しない強度分布とする必要がある (Fig. 9)。

その強度分布を充填材フレーム構造により、4.1 (1) の充填可能な範囲内で適量配置とした。

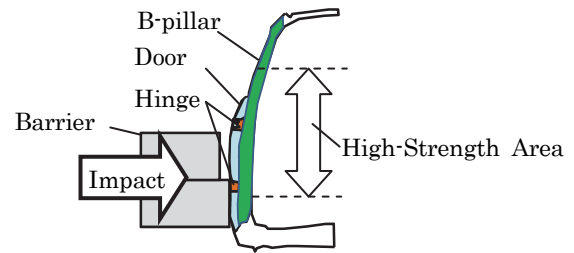


Fig. 9 Concept of High-Strength Area in Side Impact

4.2 品質確保

充填材は、フレームに組み付ける工程、及び塗装工程で発泡硬化させる。そのため、組み付ける工程の生産性確保と発泡硬化後の材料性能の確保が必要となる。更に、海外生産を考慮すると、物流を含む2か月間の保存による特性劣化の防止が必要であった (Table 3)。

(1) 保管条件

充填材を常温で保管できるように、充填材の吸湿性メカニズムを明らかにした。充填材は、発泡硬化の前後において、海外工場を含む温度・湿度計測から温度35℃・湿度58%の高温多湿環境下 (以下、高温多湿環境下) での強度低下の抑制が課題となる。充填材を発泡硬化する前に高温多湿環境下で長期間保管した充填材は、発泡セルの肥大化により必要な強度以下となる。発泡セルの肥大化抑制は、エポキシ樹脂の粘度を上げる必要がある。一方で、発泡硬化後の被水環境下に長期間さらされると、鋼板界面の濡れ性が低下し、強度が低下する。濡れ性を上げるためには、エポキシ樹脂の粘度を下げる必要がある。そのため、発泡硬化前後に要求される粘度を両立させるため、複数のエポキシ成分と複数のフィラーを配合した (Fig. 10)。

(2) 品質保証

充填材のマツダ構内への輸送から発泡硬化までの一連の工程において品質保証を実施した。以下に車体組み立て工程と塗装工程の各工程での取り組みを示す。

車体組み立て工程について、充填材により充填するレインフォースメントとアウトパネルの板間隙が広すぎると、未充填や密度低下により、フレーム強度の目標品質を確保できない。そのため、試作車やパイロット車の板間隙を測定し、設計において許容できる板間隙のバラつき範囲内であることを確認した。

塗装工程について、国内外の塗装工場では、異なる種類の化成処理液、電着液を使用している。充填材がそれらの液に浸漬した際に液を汚染しないこと、充填材が溶解・変質しないことを確認した。また、発泡硬化条件として電着塗装時の乾燥炉の温度が重要である。海外工場も含めた乾燥炉の温度が1年を通してどのような時間変動を示すか計



測し、充填材が発泡硬化し要求性能を満たす温度であることを確認した。

Table 3 Initiatives and Tasks at the Time of Manufacture

Task	Initiatives
Storage Condition	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydroscopic mechanism</li> <li>Inspection of the storage stability</li> </ul>
Cure Condition	<ul style="list-style-type: none"> <li>Make the cure wind curve</li> <li>Measure cure extent</li> </ul>
Quality Assurance	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transportation condition of temperature and humidity</li> <li>Measurement dispersion of the space between the outer panel and the reinforcement</li> <li>Compatibility with electrodeposition and chemical conversion treatment</li> <li>Measurements of the drying oven temperature, including overseas plants</li> </ul>

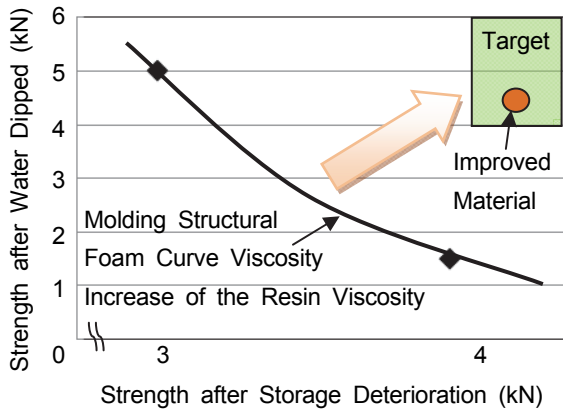


Fig. 10 The Strength Relationship in the Water Resistance of the Foaming before and after

4.3 軽量化と低コスト化の効果

新型デミオのBピラーに本構造・材料を適用し、従来のフレーム内部に充填材を全て充填する構造から充填量を7割削減し、低コスト化を実現した。従来の構造に比べ約1kg/台の軽量化をした上で性能を向上し、各国NCAPなどの高い衝突安全性能を満足した (Fig. 11)。

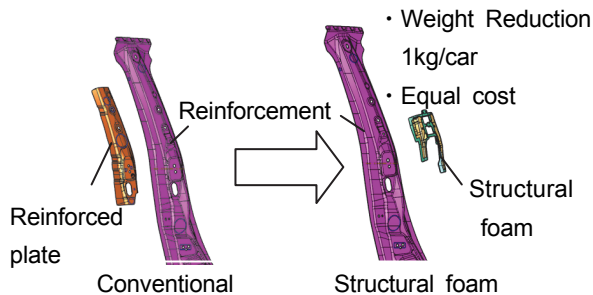


Fig. 11 Structure that are Applied to the B-pillar

5. おわりに

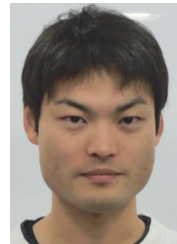
(1) 板の座屈理論より、フレーム縦壁の支持部を補強する考え方を見出し、最小限の充填量で曲げ強度を向上できる稜線補強の形状を見出した。

(2) 構造制約や製造時に求められる特性を満たす充填材を開発した。

参考文献

- (1) 深堀ほか：車体フレームの剛性に対する充填材の効果, マツダ技報, No.20, pp.115-121 (2002)
- (2) 植田ほか：部材の座屈強度に及ぼす材料強度と断面形状の影響に関する考察(その1), 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.115-09, pp.21-24 (2009)
- (3) 木村ほか：薄板の座屈後耐力, 日本建築学会論文集, 第545号, pp.135-140 (2001)
- (4) 本田ほか：薄肉中空フレームにおける曲げ強度の質量効率を向上させる断面形状の研究, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.129-14, pp.1-4 (2014)

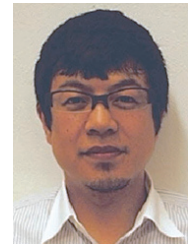
■ 著 者 ■



奥山 智仁



田中 力



本田 正徳



松岡 秀典



齋 裕貴



相村 勇一



石亀 勝義