

論文・解説

21

## 曲げ変形における高エネルギー吸収フレームの開発 Development of High-Energy Absorbing Frame Structure

河村 力\*1      本田 正徳\*2      児玉 悠貴\*3      元木 正紀\*4  
Chikara Kawamura      Masanori Honda      Yuki Kodama      Masaki Motoki  
片岡 愉樹\*5      亀井 丈広\*6      若林 充\*7      寺田 栄\*8  
Yuki Kataoka      Takehiro Kamei      Mitsuru Wakabayashi      Sakayu Terada

### 要 約

低燃費実現のための車体軽量化と人命保護のための衝突安全性能の両立が求められている。そのためには、車体フレームのエネルギー吸収（Energy Absorption, 以降EA）の質量効率向上が必要である。そこで、前突時の主要なEA部材であるフロントフレームを対象に、曲げ変形におけるEA質量効率向上技術の開発を行った。

過去、変形初期における座屈を断面形状により抑制し、フレーム曲げ強度質量効率を向上させる「鉄使い切り技術」を開発してきた。本開発では、変形初期に加え、変形過渡の座屈も制御することにより、EA質量効率の向上をねらった。そのため、フレーム曲げ変形時に圧縮荷重が作用する板と、曲げ荷重が作用する板の座屈周期の連成に着目した。座屈周期を支配する各板幅の比により、座屈後まで含めた変形挙動を制御することで、単位体積あたりの歪エネルギー量を高め、フレーム曲げ変形時のEA質量効率の向上を実現した。これにより、従来フロントフレーム構造に比べて、EA質量効率を大幅に向上できるフレーム構造を導出した。

### Summary

There is an increasing need for compatibility between a lighter vehicle body for lower fuel consumption and life-saving crash safety performance. To achieve this, it is necessary to increase energy absorption efficiency with respect to the weight of steel-sheet body frame. In light of such circumstances, Mazda developed a technology for improving energy absorption efficiency versus bending deformation for the front frame, which is largely involved in energy absorption upon frontal crash.

In this development, the focus was placed on coupled cycles between the plane under a compressive load and the plane under a bending load upon deformation of the frame. By controlling the deformation behavior, including that after buckling, by plane-width ratio, the density of strain energy increased, which then improved energy absorption efficiency with respect to the weight upon deformation of the frame. As a result, a frame structure for greatly improving energy absorption efficiency, compared with the conventional front frame structure, was brought into reality.

### 1. はじめに

自動車のCO<sub>2</sub>規制強化から、車両の運動効率改善が必要である。そのためにはパワートレインのエネルギー効率改善と同時に、車体重量を大幅に低減させる必要がある。一方、衝突安全性能の向上要求はより一層高まっており、車両軽量化と衝突安全性能の両立が課題である。

車体の衝突安全性能は主にキャビン領域の耐力部材と、フロントやリアエンドでのEA部材に大別される。耐力部

材に対しては、材料領域では鋼板のハイテン化が進み、構造領域では座屈抑制をねらった断面形状<sup>(1)</sup>や発泡充填剤等の耐力向上技術の確立を行ってきた。一方、EA部材に対しては、軸圧縮部材の研究は盛んであるが、曲げ変形部材に対しては、まだまだ研究されていない。

しかし、前輪駆動の自動車において、前面衝突時や後面衝突時の主要なEA部材であるフロントフレームやリアフレームは、主に曲げ変形部材であり、曲げ変形におけるEA質量効率の向上が必須である。

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

\*4,5 衝突性能開発部  
Crash Safety Development Dept.

\*6,7 ボデー開発部  
Body Development Dept.

\*8 CAE開発部  
CAE Technology Development Dept.

自動車の骨格構造を構成するフレームの多くは、薄板大断面の中空部材であり、座屈を伴う変形挙動をとる。この座屈現象のふるまいにより、フレームの耐力や変形挙動は大きく変わる。座屈現象は板幅や板厚等の構造要因に支配される。

そこで本開発では、この座屈現象を制御することにより、曲げ変形時における、単位体積あたりの歪エネルギー量を向上させ、フレームのEA質量効率を向上させる構造技術開発を行った。

## 2. 構造要件の導出

### 2.1 フレーム座屈現象の分析

フレームの曲げ変形現象と座屈の関係性を明確にするため、フロントフレームを想定した一定断面フレームを対象に解析と実験にて現象分析を行った。

試験体仕様をFig. 1に示す。断面形状は内寸100×50mm、フレーム長445mm、板厚1.2mmとした片ハットフレームであり、フランジ部をスポット溶接にて接合している。材料は980MPa級の高張力鋼板を用いている。

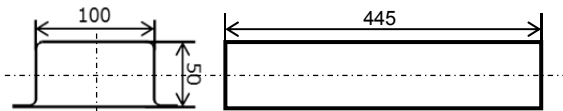


Fig. 1 Dimension of Specimen

実験評価方法と、解析での検証方法をFig. 2に示す。実車衝突時の曲げ変形を再現するため、フレーム両端部をピン固定し、断面中心に対し偏芯させたフレーム軸方向に準静的荷重を負荷した。この際の並進方向の発生荷重と曲げ変形時の現象を観察する。

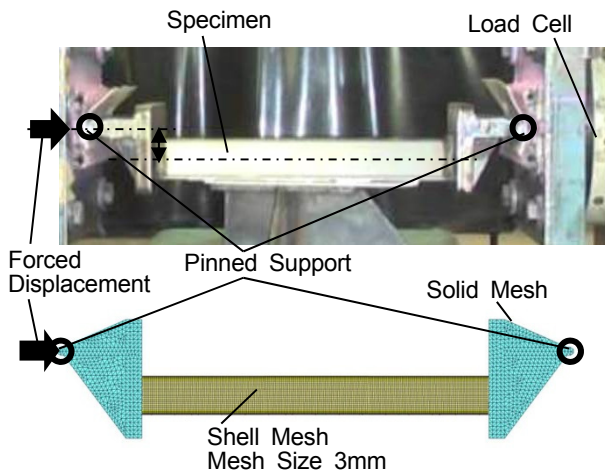


Fig. 2 Test and Analysis Condition

実験の観察結果から、変形初期にフレームを構成する各板の内、圧縮荷重と曲げ荷重が作用する板（以降、圧縮板

と曲げ板）に弾性座屈波が発生した。この座屈波が進展し、お互いに干渉しながら、フレームを構成する板を折りたたむように変形させ、面外変形が起きていることが分かった（Fig. 3）。また解析から、この変形によって、材料降伏点までの歪を発生することなく、曲げ変形が進み、最大荷重以降急激に荷重が低下していることを確認した。

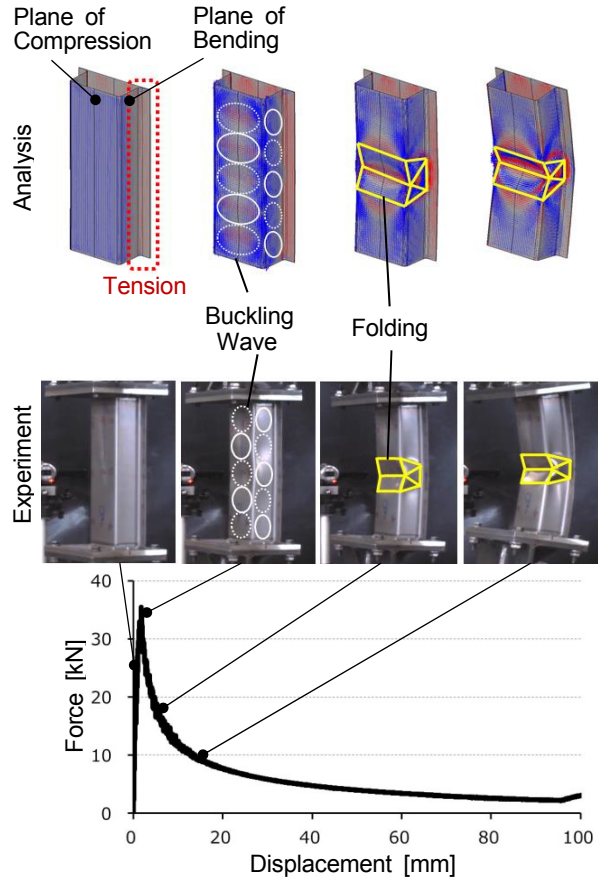


Fig. 3 Deformation Process of Frame Bending

### 2.2 座屈制御のための仮説検証

現象観察と座屈理論から座屈抑制の方法を以下のように考えた。Fig. 4に示すように、圧縮荷重により座屈する曲げ変形領域を極小化することで、圧縮側板の折りたたみ現象によるフレーム長短縮を抑制する。これにより引張側板に面内引張荷重を発生させ、歪エネルギーを発生させることにより、EA量を向上させることをねらう。

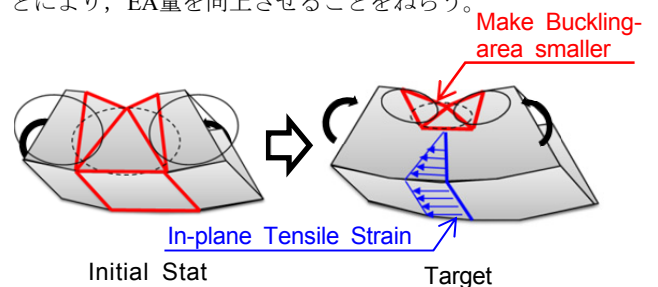


Fig. 4 Target of Bending Mode

最大荷重後の急激な荷重落ち込みは、圧縮板と曲げ板の面外変形によって起きている。その面外変形は圧縮板の弾性座屈波と、曲げ面の弾性座屈波が連成し、発生している。この座屈波の波長を小さくし、座屈変形部を極小化することで、引張荷重作用部に塑性歪を発生させることが期待できる。

すなわち、座屈変形領域を極小化することで圧縮板の折りたたみを抑制し、EA量を向上できると考えた。

上記仮説の妥当性を検証するため、理想状態を圧縮板の面外変形がない状態と定義し、解析にて検証した。

理想状態を解析にて模擬するため、単点拘束 (SPC) にて曲げ板の並進方向の面外変形のみを拘束した。拘束条件と解析結果をFig. 5に示す。解析条件はFig. 3と同様である。

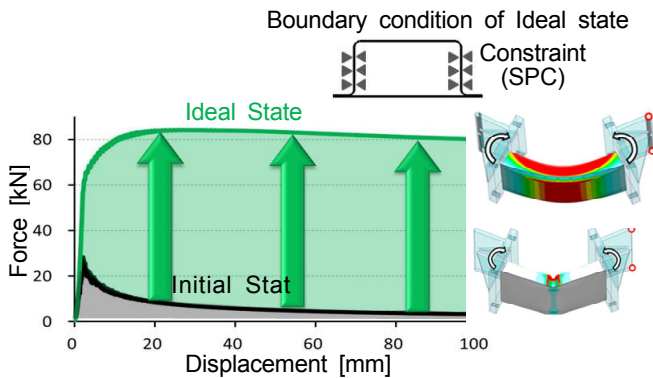


Fig. 5 Theoretical Limitation of Buckling Suppression

フレーム縦板の面外変形を拘束し、座屈を完全に抑制することにより、既存フレーム比EA量を12倍まで向上できることが分かった。この結果から、圧縮側座屈を抑制・極小化しEA量を向上させるという仮説の妥当性を確認できた。

### 2.3 制御因子の抽出と分析

座屈理論から座屈周期は圧縮荷重作用部の構成板の板幅によって決定し、面外変形量の変位は板厚 $t$ により決定する。今回の曲げ変形フレームを構成するパネルに、座屈理論を適用するとFig. 6となる。

圧縮板は板幅全域に圧縮荷重が作用するため、板幅 $b$ が座屈周期となる。曲げ板は、板幅 $h$ の半分に圧縮荷重が作用するため、 $h/2$ が曲げ板の座屈周期となる。これに対し、実験での座屈周期をFig. 7に示す。

圧縮板は本来の座屈周期となっているが、曲げ板は本来の座屈周期ではなく、圧縮板の座屈周期と同じ周期で座屈している。このことから、各座屈周期を決定する、板幅 $b$ と板幅 $h$ の比率である $b/h$ の適値があると推察した。以降、 $b/h$ を制御因子として取り扱い検証を行った。

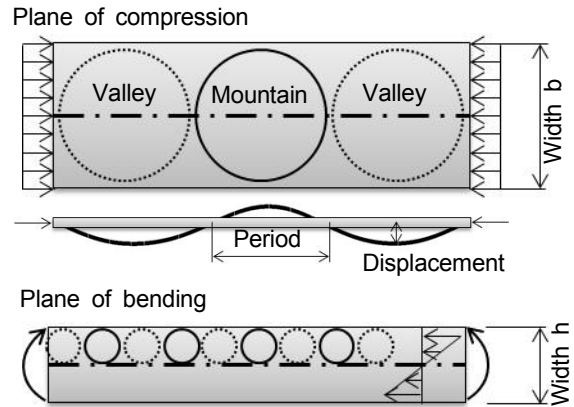


Fig. 6 Period-Buckling from Buckling Theory

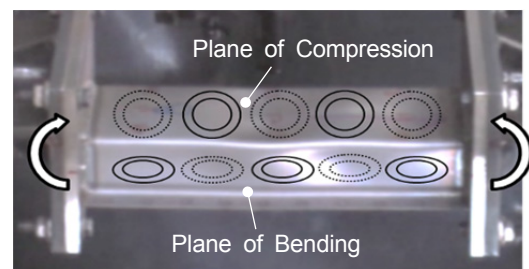


Fig. 7 Period-Buckling of Experiment

制御因子 $b/h$ のEA量に対する影響を検証するため、Fig. 8のとおり矩形一定断面フレームにて検証を行った。

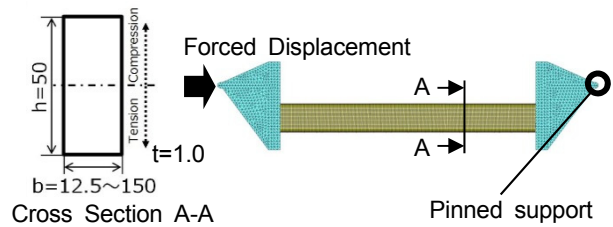


Fig. 8 Verification Model of Controllable Factor

まず圧縮板の板幅 $b$ と曲げ板の板幅 $h$ の比である $b/h$ と、EA量の関係を図. 9に示す。

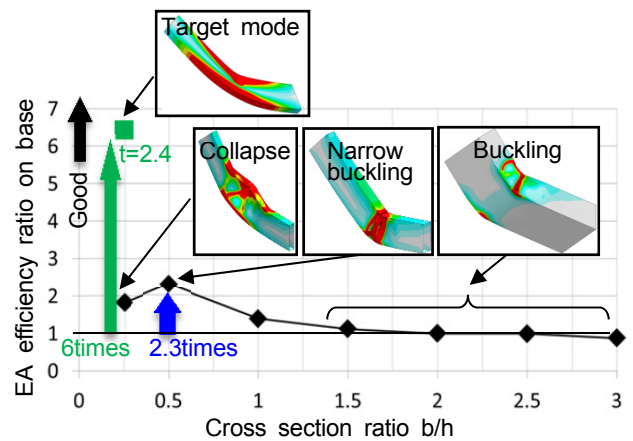


Fig. 9 Relation between EA and  $b/h$

$b/h$ を小さくすることにより、EA量が向上する傾向にあり、歪分布をみても座屈部を極小化できていることが確認できた。しかし、 $b/h$ を0.25まで小さくするとフレームの横倒れが生じ、EA量を向上できないことが分かった。これに対し、板厚 $t$ を1.0mmから2.4mmへ上げると、横倒れを抑制でき、ねらいの変形モードを実現できることを確認した。

車体フレームにおいて、2.4mmもの厚板は適用可能部位に限られる。そこで、板幅や板厚同様に、座屈現象の制御因子である、支持条件の検証を行った結果をFig. 10に示す。本検証ではFig. 10のとおり拘束点を曲げ板に設定し、その拘束位置を変化させることで支持条件とEA量の関係を検討した。その結果、稜線部を除いた圧縮荷重作用部に拘束位置を設けることで、⑦のようなフレームの横倒れを抑制でき、なおかつ、②のように弾性座屈領域から塑性座屈領域へ移行でき、EA量を向上できることが分かった。

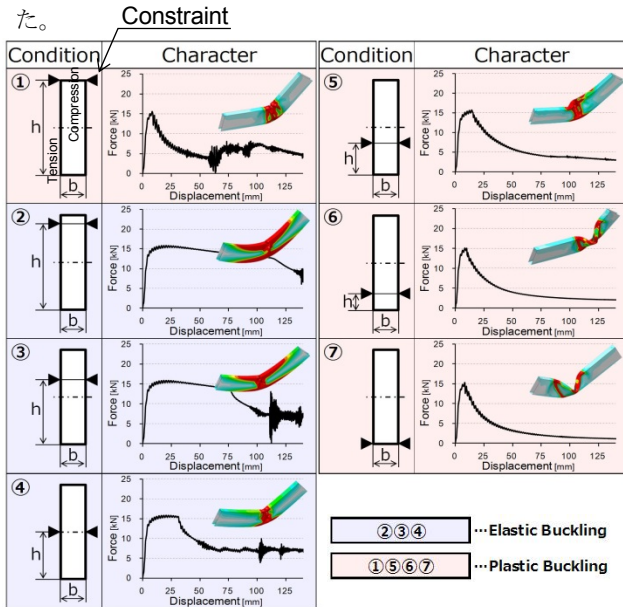


Fig. 10 Verification Model of Controllable Factor

本結果を基に、断面中央部に拘束を付与した場合の $b/h$ とEA量の関係をFig. 11に示す。検証の結果、 $b/h$ を1以下とし、縦板に拘束を付与することで、EA量を4.3倍向上できることを確認した。

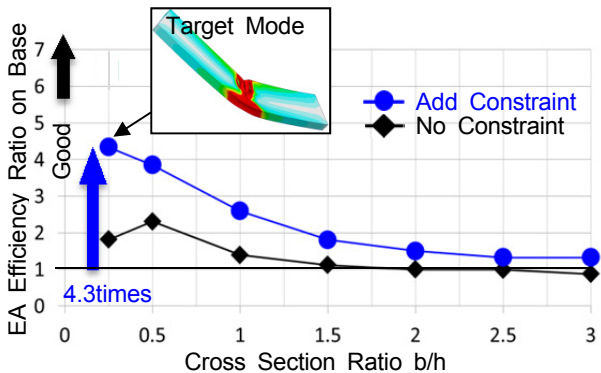


Fig.11 Relation between EA and  $b/h$  with Constrains

前述の検証結果から、Fig. 12に示す構造要件を導出した。

要件1) 断面縦横比 $b/h \leq 1$

要件2) 縦板に拘束機能を付与

※ $b/h \leq 0.25$ の場合、拘束機能必須

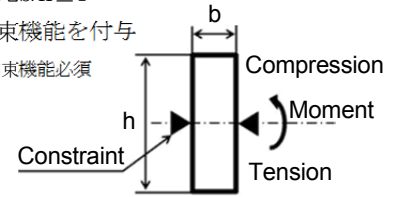


Fig. 12 Requirements of High EA Structure

### 3. 実車への適用

#### 3.1 フロントフレームの要求特性

導出した構造要件をもとに、実車フロントフレームへの適用検討を行った。フロントフレーム適用に際しては、本部品特有の課題である以下2点への対応についてもFig. 13のとおり検討した。

- (1) 衝突時のパルス制御のため、最大発生荷重を維持しながら、EA量を上昇させる
- (2) 衝突時に、所定の位置で必ず曲げる

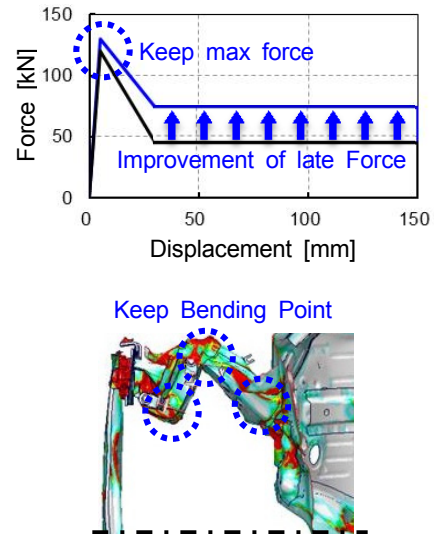


Fig. 13 Task of a Front-Frame

#### 3.2 フロントフレームの基本構造導出

操安性等の制約から、フロントフレーム断面寸法の大幅な変更は不可能である。そのため、断面外形を維持したまま、構造要件を満足させる構造を検討した。

そこで、Fig. 14のとおり、フロントフレーム内に別途EA部材を設け、EA部材とフレームとが成す断面により、断面縦横比 $b/h \leq 1$ を実現させた。拘束機能については、フロントフレームでの実現が困難なため、 $b/h > 0.25$ とすることで拘束機能がなくともEA量を向上できる構造とした。更に、最大発生荷重の制御をEA部材板厚により行い、曲げ変形の安定性は折れビードを設けることで実現をねらった。



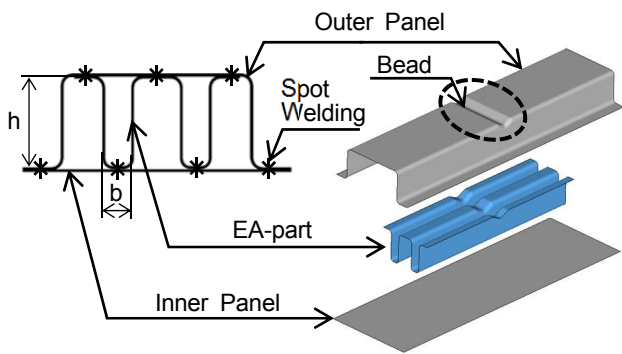


Fig. 14 Initial Structure of the Front-Frame

本構造での荷重特性と断面変形の挙動をFig. 15に示す。

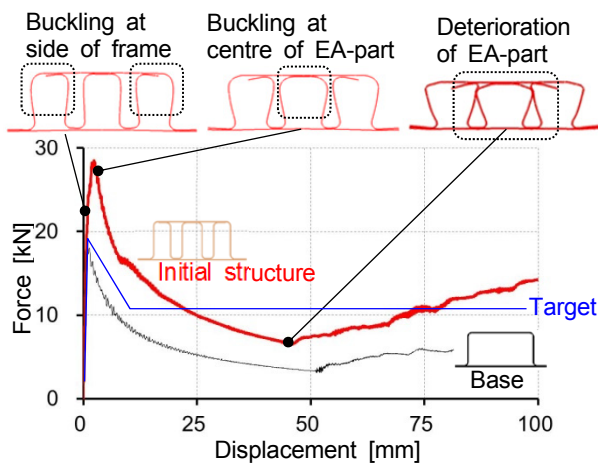


Fig. 15 Results of Initial Structure

アウターパネルの座屈をEA部材が阻害することで初期の荷重の上昇を招いた。またアウターパネルの座屈がEA部材へ伝ばすることにより、EA部材の断面が早期に崩壊し、フレーム全体の座屈後の荷重低下を引き起こしていることが分かった。

上記の検証結果から、最大発生荷重の上昇を抑制するため、フレーム全体の座屈現象を、EA部材が阻害しないよう、フレーム圧縮荷重作用部と独立させる。更に、変形後期の荷重を上昇させるため、フレーム全体の座屈がEA部材へ伝ばすることを遮断し、EA部材の断面崩壊の抑制をねらうこととした。

以上から、Fig. 16に示すとおり、EA部材をアウターパネルと完全に独立させた状態で、フレーム引張側に配置する構造とした。

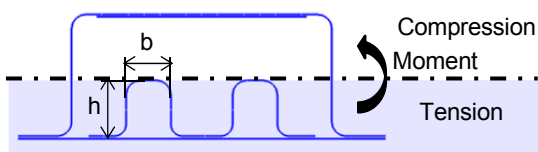


Fig. 16 New Structure with Isolate EA-Parts

本構造での荷重特性と、断面変形挙動をFig. 17に示す。

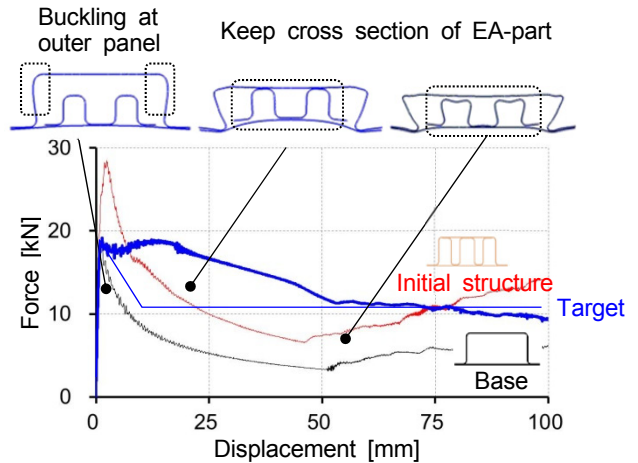


Fig. 17 Results of New Structure

EA部材の引張側独立配置により、EA部材が最大発生荷重を決めるフレーム全体の座屈を阻害することなく、同時にフレーム全体の座屈がEA部材へ伝ばしないため、EA部材が変形後期も断面形状を維持することにより、変形後期の荷重を高くすることができた。

### 3.3 具体構造化

導出したフロントフレームの基本構造を、実車のフロントフレームへ適用した。適用部位はエンジンマウント直後の曲げ変形部位である。

適用した際の実験結果をFig. 18に示す。最大発生荷重はベースを維持したまま、変形後期の荷重を向上でき、従来比EA量を93%向上できた。これによりフロントフレームのEA量質量効率を72%向上した。

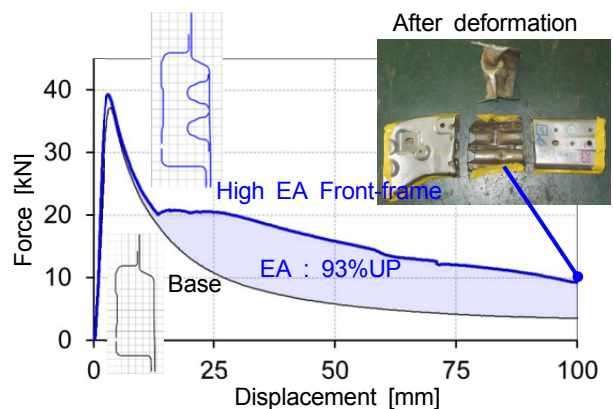


Fig. 18 Results of the Real Front-Frame Structure

## 4. おわりに

フレーム構成板の座屈周期を断面形状により制御し、高いEAを実現する構造を開発した。これにより、圧縮板と曲げ板の座屈連成を抑制し、引張荷重作用部の広域に塑性

歪を発生させることで高いEA量を実現できた。

本構造をフロントフレームに適用し、座屈現象の伝ばを断面形状の工夫により制御することで、最大発生荷重を維持しながら、EA質量効率を従来比72%向上するフロントフレームが得られることが分かった。

### 参考文献

- (1) 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（2014）

### ■ 著 者 ■



河村 力



本田 正徳



児玉 悠貴



元木 正紀



片岡 愉樹



亀井 丈広



若林 充



寺田 栄