

(技術資料)

# 自動車パネルの熱変形解析設計技術

## Thermal Deformation Analysis for Automotive Panel Design



福本幸司\*1  
Koji FUKUMOTO



高木康夫\*1  
Yasuo TAKAKI



岩瀬 哲\*1  
Tetsu IWASE

A wide variety of materials are being used for automotive bodies to reduce their weight. Dissimilar materials constituting an automotive body may thermally deform during the paint baking process due to differential thermal expansion. A computer-aided engineering (CAE) technique has been developed to accurately predict the thermal deformation of a typical structure for automotive components. The factors taken into account include the temperature-dependent properties of aluminum alloys and thermosetting adhesives. The thermal deformation of a hybrid panel consisting of aluminum and steel sheets joined by a hemming process was well predicted by the CAE simulation. The simulation also clarified the design factors governing the thermal deformation.

まえがき＝近年、自動車の構造は低コスト化と軽量化の両立を図るため、異材接合部を含む部材の増加、いわゆるマルチマテリアル化が進んでいる。例えば、鋼製部材に剛結合されるアルミパネル部品、あるいは接着樹脂およびヘム加工により接合されるクロージャパネルに対して、アウトパネルをアルミ板に、インナパネルを鋼板とするような異材の組合せで構成する部品が検討、あるいは実用化されている<sup>1)~5)</sup>。

このような部品では、材料間の線膨張係数の差異に起因する熱変形が焼付塗装時に問題になる場合が多く、その抑制対策を事前検討するために、熱変形を精度良く予測するためのCAE解析手法の開発が望まれていた。

そこで本稿では、自動車用部品として典型的な構造を対象に熱変形を精度良く予測するための解析手法を構築し、精度検証を行った。また、アルミ合金板と鋼板を組合せたハイブリッドパネルやアルミルーフパネルを対象に熱変形に対する設計因子の影響について検討を行ったので報告する。

### 1. 熱変形予測のためのCAE解析手法の構築

焼付塗装時の温度履歴の一例を図1に示す。このような温度変化における自動車部品の熱変形を予測するための解析手法を構築した。

対象とした部品は、自動車部品の典型的な構造として、①接着樹脂およびヘム加工で接合されるフード、サイドドアなどのクロージャパネル、②フレームに溶接やリベットなどで剛結合されるルーフパネルである。

#### 1.1 材料特性のモデル化

熱変形シミュレーションを行うにあたり、塗装前後の素材特性に加え、塗装条件（温度、保持時間）での素材

特性を測定し、モデル化を行った。当社6000系アルミ合金板の素材特性を図2に示す。なお、図中の加工硬化特性は、①塗装前（室温）、②塗装時（塗装温度×保持時間）、③塗装後（室温）を示しており、遷移領域の加工硬化特性は、これらを線形内挿で表現できると仮定した。

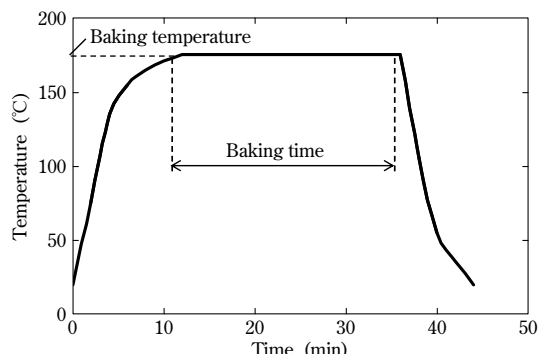


図1 焼付時の温度履歴  
Fig. 1 Temperature change in paint-baking

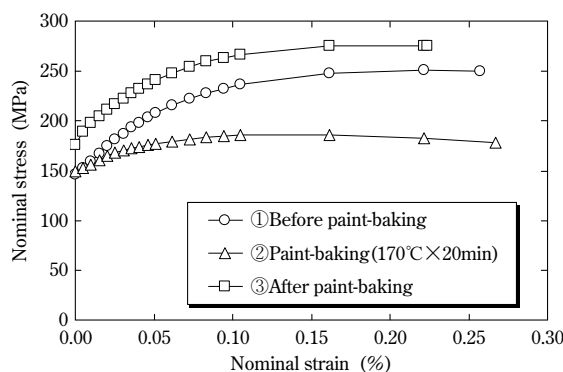


図2 6000系アルミ合金板の応力ひずみ曲線  
Fig. 2 Stress-strain curve of 6000 series aluminum alloy

\*1 アルミ・銅事業部門 技術部

## 1.2 異材を接合するヘム部のモデル化

フードやドアに代表されるクロージャパネルは、アウトパネル（以下、アウトという）とインナパネル（以下、インナという）とがヘム加工により結合されている。ヘム部の模式図を図3に示す。なお、ヘム部には部品剛性や強度向上、および電食防止を目的に接着樹脂が塗布されている。この接着樹脂は焼付塗装により熱硬化が進み、所定の接着強度が発現する。そのため、熱変形の予測を精度良く行うためには、この接着樹脂のモデル化がポイントになる。

接着樹脂を塗布したヘム試験片を対象に、試験温度170℃において保持時間をパラメータとして行った引張試験の結果を図4に示す。ヘム部の荷重特性は温度や保持時間の影響を受け、保持時間が短いと、きわめて低い荷重で変形することがわかる。つまり、アウトとインナを異材の組合せとした場合、焼付塗装時に線膨張係数の差に起因するずれ変形がヘム部に生じ、その後の時間経過で樹脂が硬化して両者が固着されると仮定できる。

このヘム部のずれ変形と接着樹脂の熱硬化特性を考慮したモデル化を図5に示す。ヘム部において、アウトとインナはヘム面内のすべり変形のみ可能とし、加えて、アウト端部とインナ端部に樹脂の硬化特性を表現するは

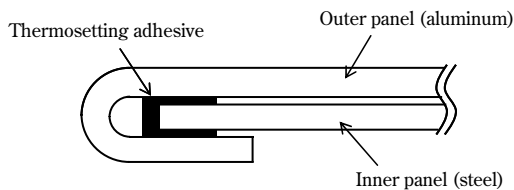


図3 ヘム部の模式図  
Fig. 3 Schematic of hemming parts

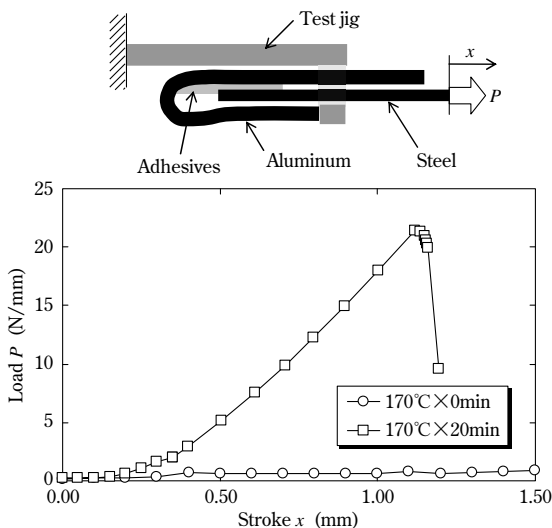


図4 ヘム試験片の引張荷重特性  
Fig. 4 Load characteristics of hemming

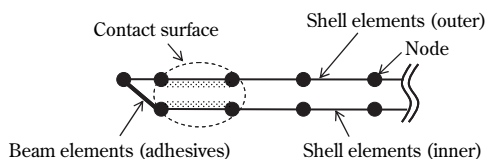


図5 ヘム部のモデル化手法  
Fig. 5 Modeling of hemming parts

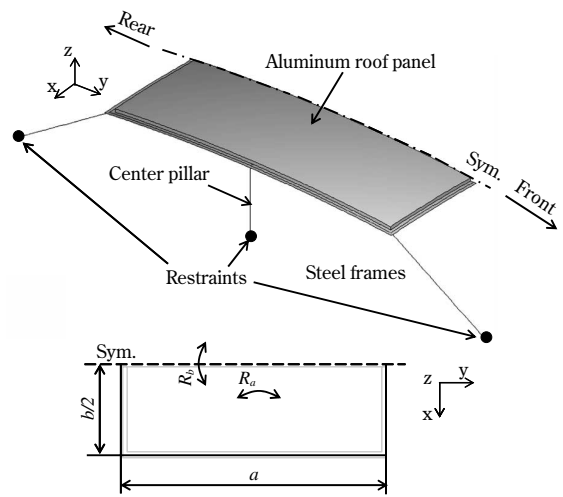


図6 ルーフ解析モデル  
Fig. 6 FEM model of roof structure

り要素を定義している。これにより、熱膨張時にはアウトとインナの線膨張差によるずれ変形を再現し、冷却時には接着樹脂の熱硬化によるヘム部の剛性、強度向上を表現できると考えた。

## 1.3 異材を剛結合する場合のモデル化

アルミルーフパネルの熱変形を対象としたシミュレーションでは、周辺部品である鋼製フレームの変形まで考慮する必要があることがわかっている<sup>1)~4), 6), 7)</sup>。ルーフパネルの熱変形解析モデルを図6に示す。鋼製フレームは文献1)を参考に、ドアパネル上端部までを対象とし、かつ、計算時間短縮のためにはり要素でモデル化した。鋼製フレームの断面形状は、典型的な市販車の部材を基に設定した。

## 2. 解析精度の検証

アルミ合金板製アウトと鋼板製インナを接着樹脂とヘム加工で接合したハイブリッドパネルを対象に、ヘム部のモデル化を織込んだ解析モデルの精度検証を行った。なお解析には有限要素解析ソフトABAQUSを用いた。

### 2.1 試験条件

今回製作した試験体を図7に示す。試験体形状および焼付塗装を模擬した試験条件を表1に示す。試験体は拘束のない状態で熱処理を行った。なお、試験では熱処理前後のパネル形状を計測し、その差分を熱変形量として評価する方法を採った。

### 2.2 熱変形量分布の比較

熱処理後のハイブリッドパネルの変形量分布の比較を図8に示す。今回検討したハイブリッドパネルでは、コーナー部がアウト面側に反る熱変形が生じている。焼付塗装時の変形の模式図を図9に示す。

この原因は以下のように推測できる。まず、熱処理時の昇温段階では、アルミ板と鋼板の線膨張係数の差に応じたヘム部のずれ変形が生じると同時に、接着樹脂の熱硬化が進む。その後の冷却時にはヘム部のずれ変形は生じにくくなり、冷却時の素材間の線膨張係数の差、すなわち、熱収縮量が鋼板よりアルミ板の方が大きいことによってヘム部がアウト面側に反る変形が生じる。

表1 試験体形状および試験条件  
Table 1 Testing conditions

Panel size (mm)	350×250×10
Outer panel	6000 series aluminum alloy ( $t: 1.00\text{mm}$ )
Inner panel	GA steel 0.60mmt
Adhesives	thermosetting type
Heat treatment	170°C×20min

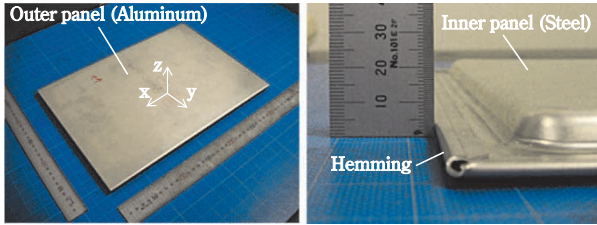
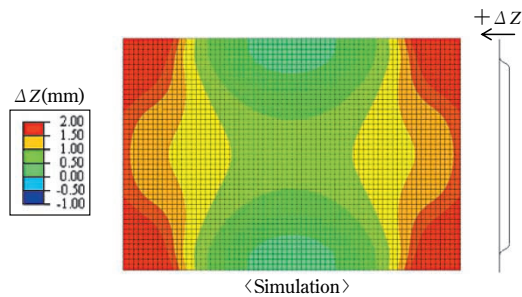
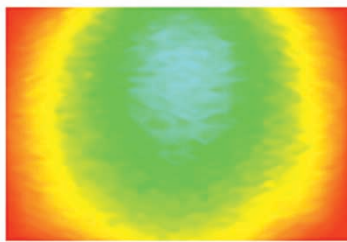


図7 試験体の概観写真

Fig. 7 Photographs of test structure



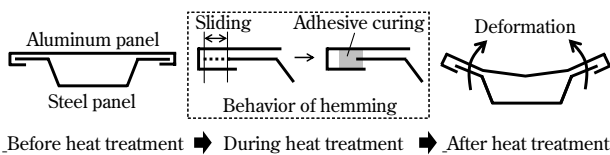
<Simulation>



<Experiment>

図8 熱変形量分布の比較

Fig. 8 Comparison of thermal deformations



Before heat treatment → During heat treatment → After heat treatment

図9 焼付塗装時の変形模式図

Fig. 9 Schematic of thermal deformation in paint-baking process

また、シミュレーションはこの変形モードを精度良く表現できており、本解析手法が有効であることが確認できた。

### 3. 熱変形に対する設計因子の影響度調査

ここでは、先に検討したハイブリッドパネルおよびアルミルーパネルの熱変形に対する設計因子の影響度について検討した。

#### 3.1 ハイブリッドパネルの熱変形について

前章の結果より、ハイブリッドパネルの熱変形挙動にはヘムずれ変形の影響が大きいと考えられる。そこで、熱変形抑制に有効なヘムずれ防止条件をシミュレーションで検討した。

まず、ヘムずれが起こらない条件（最初から接着樹脂が剛であると仮定）での熱変形時の挙動を調べた。熱処理時にヘム部に作用する荷重分布を図10に示す。これより、熱処理時にヘム部にはコーナ部から一定範囲に荷重が作用していることがわかる。

つぎに、この荷重分布に基づき、各コーナ部の長さ70mm部分に拘束を与えた試験サンプルを作成し、熱変形評価を行った。溶接材料にFCW(Flux Cored Wire)を用いた異材接合<sup>8),9)</sup>を適用した試験体の写真を図11に示す。また、熱変形量分布の比較を図12に示す。これより、ヘム部全長を拘束することなく、シミュレーションで得られた荷重分布に基づくコーナ部近傍のみの拘束に

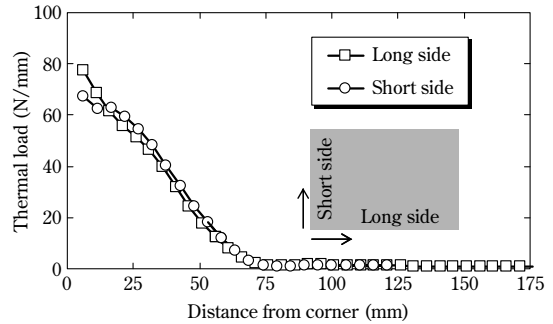


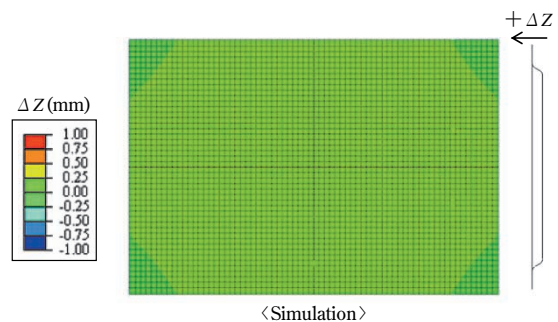
図10 高温時のヘム部荷重分布

Fig.10 Load distribution of hemming at high temperature



図11 FCWによる試験体の異材接合部

Fig.11 Photograph of dissimilar material welding by FCW



<Simulation>



<Experiment>

図12 熱変形量分布の比較

Fig.12 Comparison of thermal deformations



よって残留変形を大幅に抑制できることがわかった。また、シミュレーションで得られる荷重分布に基づき、施工範囲に加えて施工方法を選定することも可能である。

### 3.2 アルミルーフパネルの熱変形について

アルミルーフパネルの熱変形現象を把握するために、ルーフパネルと銅製フレームから構成される構造モデルでの熱変形シミュレーションを行った。

#### 3.2.1 解析モデルと熱変形

解析モデルは図6に示したように車両の左右1/2対称モデルとした。アルミパネルの基本形状諸元を表2に示す。解析に用いた材料特性を表3に示す。なお、シミュレーションでは、塗装工程を模擬した温度変化を与えた後にルーフパネルに生じる残留変形を評価する。

昇温時の変形モードを図13に示す。これより、昇温時にはルーフパネル中央が上方に持上がるように変形することがわかる。また、センタピラー近傍を除く部分にてフレームも上方へ変形しており、ルーフパネルの熱変形挙動には周辺部材の剛性が大きく影響していることがわかる。

温度変化を与えた後のパネルに生じた上下方向変形量分布および相当塑性ひずみ分布を、それぞれ図14、図15に示す。これより、文献1)、2)で報告されているように、塑性ひずみを伴う凹凸の局所変形がルーフパネル端部に生じていることが確認できる。これは、剛性の高いセンタピラー近傍(A-A'断面)にひずみが集中し、ある

表2 パネルの寸法諸元  
Table 2 Panel specification

Properties	Base condition
Panel size : $a \times b$ (mm)	1,500 × 1,000
Panel radius : $R_a, R_b$ (mm)	9,000, 6,000
Roof shape	Panel without bead
Panel thickness : $t$ (mm)	1.00

表3 素材機械特性  
Table 3 Mechanical properties

Properties	Material	
	Aluminum	Steel
Young's modulus : $E$ (MPa)	68,600	205,800
Poisson's ratio : $\nu$	0.30	0.30
Thermal expansion coefficient : $\alpha$ ( $K^{-1}$ )	$2.20 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-5}$
Yield stress : $\sigma_y$ (MPa)	130	200
Tensile stress : $\sigma_B$ (MPa)	250	300
Elongation : $\phi$ (%)	28	50

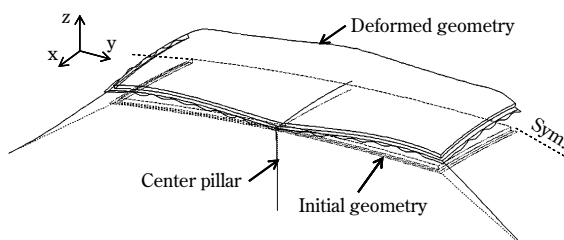


図13 高温時の変形モード (変形倍率: 10倍)  
Fig.13 Deformation at high temperature (amplitude×10)

温度以上では熱膨張による座屈が起こって局所変形が残留すると考えられる。ここでは、この局所変形を熱変形として扱う。

#### 3.2.2 シミュレーションによるパラメータスタディ

熱変形に対するルーフパネルの設計因子の影響を調査するため、熱変形の量を図16に示す局所変形の振幅値  $U_{p-p}$  をピーク間距離  $L$  で除した無次元量  $U_{p-p}/L$  で定量化する。そして、表4に示すパネル板厚、材料耐力および図17に示すビード形状などの設計因子を種々設定してシミュレーションを行い、熱変形量  $U_{p-p}/L$  に対する影響を調査した。その結果を図18に示す。

##### (1) 板厚 $t$ の影響

板厚を変化させた場合の温度変化に対する熱変形量  $U_{p-p}/L$  を図18(a)に示す。温度変化  $\Delta T$  が大きくなると、熱変形量も大きくなることがわかる。また、パネル板厚の増加に伴い、熱変形量は小さくなる。これは板厚増加によるパネルの座屈強度向上の効果と考えられる。

##### (2) 素材耐力 $\sigma_y$ の影響

耐力を変化させた場合の温度変化に対する熱変形量

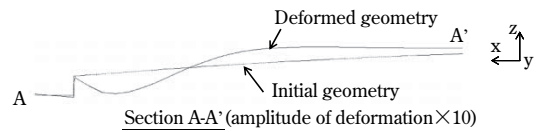
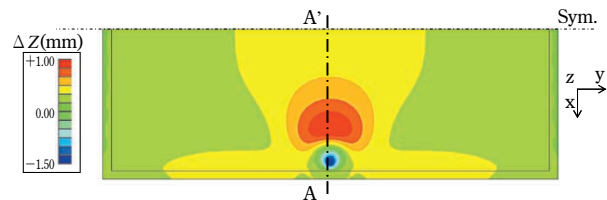


図14 ルーフパネルの変形量分布  
Fig.14 Deformation distribution of the panel



図15 ルーフパネルの相当塑性ひずみ分布  
Fig.15 Distribution of equivalent plastic strain in roof panel

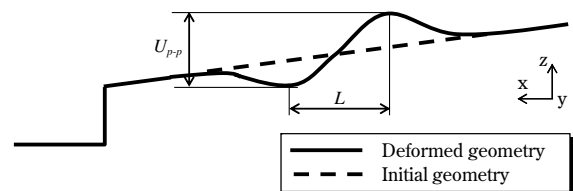


図16 熱変形量の定義  
Fig.16 Definition of thermal deformation

表4 計算条件  
Table 4 Simulation conditions

Properties	Parameters
Panel thickness : $t$ (mm)	0.90, 1.00, 1.10
Yield stress : $\sigma_y$ (MPa)	110, 130, 150
Roof shape	without bead, with bead

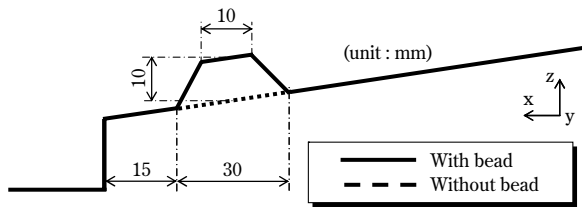
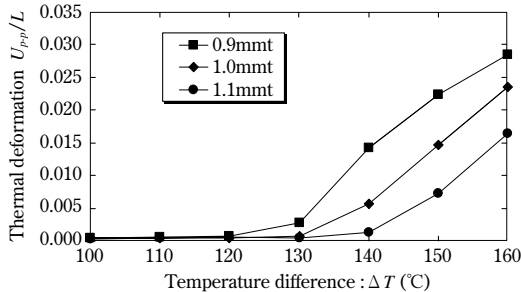
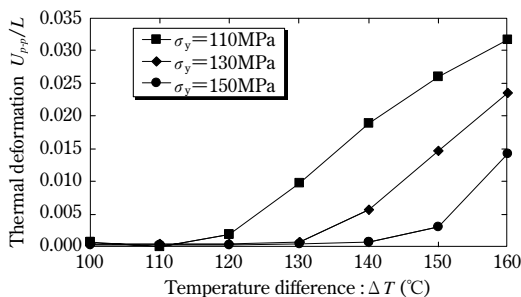


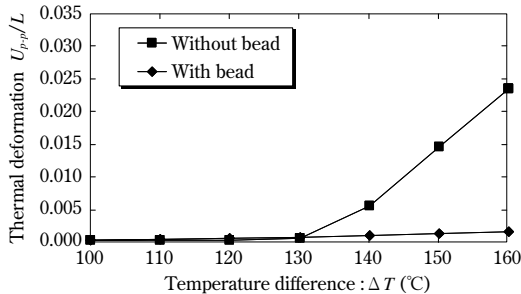
図17 パネル端部のビード形状  
Fig.17 Bead shape at panel flange



(a)熱変形量に対するパネル板厚の影響  
(a) Effect of panel thickness on thermal deformation



(b)熱変形量に対する素材耐力の影響  
(b) Effect of yield stress on thermal deformation



(c)熱変形量に対するルーフ形状の影響  
(c) Effect of roof shape on thermal deformation

図18 温度変化と熱変形量の関係

Fig.18 Relationship between thermal deformation and temperature

$U_{p-p}/L$ を図18(b)に示す。素材耐力が高くなると熱変形量は小さくなる。これは、耐力向上によるパネルの座屈強度向上の効果と考えられる。

### (3) ビードの影響

パネル端部にビードを設けた場合の温度変化に対する熱変形量 $U_{p-p}/L$ を図18(c)に示す。ビードを設けることにより、熱変形量は大幅に小さくなる。これは、ビードによりパネル端部の座屈強度が向上したためである。

以上のように、熱変形抑制のためにはアルミルーフパネルの座屈強度向上の対策が有効といえる。

むすび=アルミ合金板を用いた自動車パネルの熱変形について、鋼製部材に剛に結合されるアルミルーフやフード、ドアなどへの適用を想定したヘム加工で結合されるハイブリッドパネルを対象にCAE解析手法を構築した。そして、熱変形試験による精度検証を行い、以下の結果を得た。

- (1) アルミ合金板の温度依存性や接着樹脂の熱硬化特性をモデル化した本解析手法は、熱変形を精度良く予測でき、変形抑制のための設計検討が可能である。
- (2) ハイブリッドパネルの熱変形は、熱膨張時のヘム部のずれ変形と接着樹脂の熱硬化が原因で生じる。また、異材接合などによりヘムずれ防止の施工を行うことにより、熱変形は大幅に抑制できる。
- (3) アルミルーフパネルの熱変形抑制は、パネル板厚の増加や材料耐力の向上、ビード付加など、ルーフパネルの座屈強度を向上させることが有効である。

### 参考文献

- 1) 松村吉修ほか。三菱自動車テクニカルレビュー。2004, No.16, p.82-87.
- 2) 松村吉修ほか。三菱自動車テクニカルレビュー。2006, No.18, p.69-75.
- 3) Chr. Lahaye. 7th European Automotive Lightweight Conference. 2005-6-28/29. Automotive Circle International, 2005, p.371-398.
- 4) Chr. Lahaye. 15th European Automotive Lightweight Conference. 2006-5-9/10. Automotive Circle International, 2006, p.73-100.
- 5) Paul Jonason. Door and Closures in Car Body Engineering. 2010-11-16/17. Automotive Circle International, 2010, p.1-27.
- 6) J. N. Dargnies. 2nd European Al-Automobile Conference. 2002-11-7/8. Automotive Circle International, 2002, p.10-21.
- 7) 福本幸司ほか。自動車技術会学術講演会前刷集。2005, No.72-05, p.15-20.
- 8) 松本 剛ほか。自動車技術会学術講演会前刷集。2010, No.158-10, p.15-20.
- 9) 松本 剛ほか。自動車技術会論文集。2011, Vol.42, No.2, p.591-596.