

(論文)

高加工性ハイテン材を活用した自動車用シート部品の軽量化

Weight Reduction of Automotive Seat Components using High-strength Steel with High Formability



吉岡典恭*¹
Noriyasu YOSHIOKA



橘 美枝*¹
Mie TACHIBANA

Seat frames are among the automotive parts that need to be lightened. To this end an attempt has been made to derive a component shape that achieves weight reduction by utilizing high-strength steel with excellent formability. The relationship between weight and stiffness under varying geometric parameters was clarified to specify the portions that exhibit strong correlations. On the basis of these results, a stiffening shape has been derived for application to the actual parts. The results show that a 10% weight reduction can be achieved while maintaining stiffness. The resultant shape, however, has turned out to be more difficult to form. To resolve this issue, Kobe Steel's high-tensile-strength steel with high formability has been adopted and its formability has been verified on an actual machine. It has been confirmed that the forming can be accomplished without cracking.

まえがき = 省エネルギーや温室効果ガス削減に向けて自動車の燃費やCO₂排出量の基準が段階的に強化されているなか、その対応として走行抵抗の低減策の一つである軽量化が強く求められている。いっぽう、衝突安全性の向上を目指し、安全基準や自動車アセスメントの強化と拡充が進められ、ボデーの強化やエネルギー吸収量の向上が求められている。

こうしたボデーの軽量化と強化という課題を両立させる手段として、材料の高強度化、軽量素材への置換、構造の合理化などが進められている。そのうち最も主要な方策である鋼板の高強度化においては、それに伴う加工性の低下から、部品形状の簡略化を強いられるなど、部品の形状自由度が低下するという問題がある¹⁾。このような問題に対し、当社は従来の鋼板に比べ加工性を高めた高強度鋼板（以下、高加工性ハイテン材という）の開発^{2)~4)} やその利用技術の開発^{5)~8)} など、自動車のさらなる軽量化に貢献することを目指して技術開発を行っている。

本稿では、その一例として軽量化ニーズの高い自動車部品の一つであるシートフレームを対象に、高加工性ハイテン材を活用して軽量化を実現する部品形状の導出を試みたのでその結果を報告する。

1. 軽量化の課題と対策の考え方

鋼板の高強度化による軽量化は、薄肉化と引き換えに低下する部材強度を、材料の高強度化によって補完するものである。しかしながら、部材剛性は弾性係数や板厚、部材形状に依存するため、薄肉化によって低下する剛性は材料の高強度化によって補完することはできない。そ

のため、薄肉化による軽量化では、剛性の向上が一つの課題となっている。その課題に対し、部品形状に剛性を補うための形状（以下、補剛形状という）を形成することによる対策を考える。形状の追加は重量増を伴うため、補剛形状は最小とすべきであるが、部位を限定した局所的な形状の追加は、部品の成形難度が増すと考えられる。そこで、高加工性ハイテン材の優れた加工性を生かしてその形状を成形することで、剛性と軽量化の両立を図ることにした。

2. 検討対象

2.1 シートフレームに求められる剛性

自動車のシートは多様な機能を有し、シートフレームは様々な外力に対する剛性が求められる。そのうち、後面衝突時の初期変形域の剛性は、乗員の頸部傷害の軽減に関係し、アクティブヘッドレストなど機構部品の廃止にもつながる⁹⁾ ため、軽量化や原価低減などを期待できる非常に重要な特性である。そこで、本検討ではシートフレームの車両後方負荷における剛性を目標特性とした。

2.2 構成部品の剛性への寄与

量産車両のシートフレームからリバースエンジニアリングにて作成した有限要素モデルを使い、3.1節に定義する剛性値に及ぼす各構成部品の寄与を調査した。構成部品の板厚を設計変数にグローバル感度解析を行った結果を図1に示す。横軸は剛性値への寄与率を示している。本結果から、バックサイドフレーム、クッションサイドフレーム、ロアレール、アッパレールの4部品の寄与がとくに高いことが分かる。

*¹ 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部

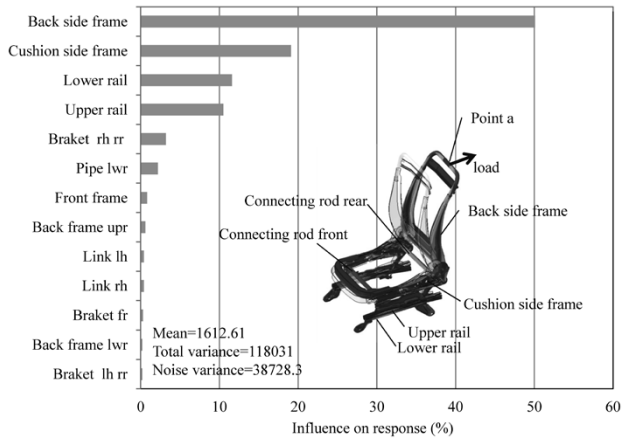


図1 シートフレーム構成部品の剛性への寄与率
Fig. 1 Contribution rate of seat frame components to seat frame stiffness

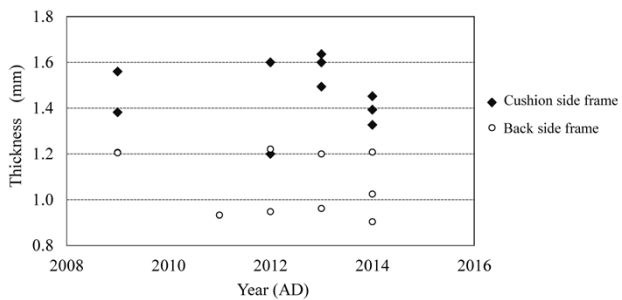


図2 量産車のクッションサイドフレームおよびバックサイドフレームの板厚調査結果 (当社調べ)
Fig. 2 Trend of sheet thickness of cushion side frame and back side frame

2.3 検討対象の選定

前節で述べた4部品のうち、ロアレールおよびアップレールは機能面からほぼ一様断面の部品であり、前章の局所的な補剛形状による軽量化の考え方に沿わない。このため検討の対象から除外し、バックサイドフレームおよびクッションサイドフレームの2部品について量産部品の板厚を調査した。2009年～2014年に量販された10車種に適用されている材料の板厚を図2に示す。この図から、2部品の相対比較においては、クッションサイドフレームの板厚が厚く、薄肉化の余地が残ると考えられる。そこで、構成部品の中からクッションサイドフレームを検討対象として選択した。

3. 補剛形状の検討

3.1 剛性値の定義

本検討では、シートフレーム上部の中央点 (図1および図3のa点) に後方へ荷重を負荷した際の、その荷重を負荷点の変位量で除した値 (式(1)、以下剛性値という) と定義した。

$$k = F/x \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

- k : 剛性値
- F : 負荷点の荷重
- x : 負荷点の変位量

3.2 クッションサイドフレームの変形挙動の明確化

クッションサイドフレームの変形挙動を明らかにする

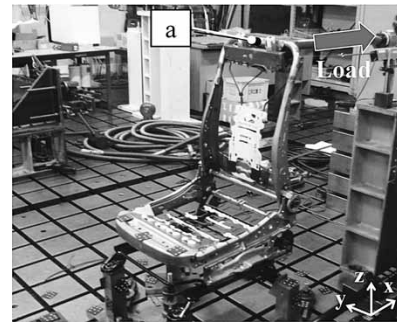


図3 シートフレームの後方載荷実験の外観
Fig. 3 Load test in rearward direction

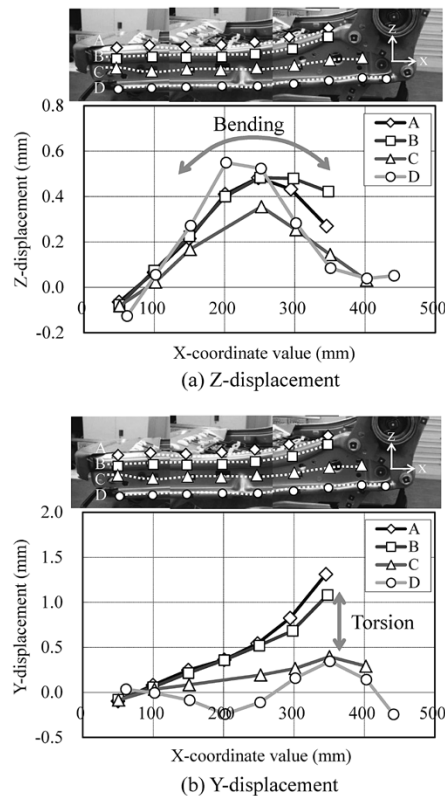


図4 後方載荷実験におけるクッションサイドフレームの変形量
Fig. 4 Deformation of cushion side frame in load test

ため、量産シートフレームの後方載荷実験を行い、クッションサイドフレームの変位量を測定した。

実験の外観を図3に示す。実験では、車体と同様に固定できる治具を用いてシートフレームを定盤に固定した。アジャスタは、JIS D 4610を参考に前後位置を最後端位置とし、シートバック角度を25°にセットした。そしてバックフレーム上部の中央 (図3中のa点) を油圧ジャッキにて後方へ1.5kN載荷し、クッションサイドフレーム上の40点における載荷前後の3次元空間座標を非接触式3次元測定機で測定した。ここで得られる座標値の差は移動量であり、当該部品の変形成分と剛体回転成分からなる。そこで、前後にある2本の連結ロッド (図1のConnecting rod) の中心を結ぶ線が定盤となす角度の変化量を剛体回転量として移動量から減算することで当該部品の変位量とした。

車両の高さ方向 (z) および幅方向 (y) の変位量を図4に示す。グラフ中の各プロットのマーカは、上部の

写真中のマーカに対応している。図4 (a) からは、当該部品は側面視で曲げ変形していることが、また図4 (b) からは、上面視でバックフレーム取付部の近傍で上部と下部との間に相対変位が発生、つまり車両前後方向 (x) 軸回りにねじれ変形していることが確認できる。

3.3 剛性評価の方法

剛性評価には汎用有限要素法プログラムを用いた。周辺部品の変形による現象複雑化の回避、およびモデル作成や計算時間の短縮化を目的に、シートフレーム全体をモデル化せず、対象部品のみを単体でモデル化し、前節で示した変形状態を境界条件で再現した (図5)。

クッションサイドフレームに接続する周辺部品のうち、最も剛とみなせる連結ロッドとの接合点を変位拘束点とし、図4 (a) の面内曲げ変形を再現するため、前側のみ車両前後方向 (x) の変位を自由とし、前後の連結ロッドの相対位置が自由に变化できる条件とした。また、図4 (a) の面内曲げと図4 (b) のねじれ変形を再現させるモーメントを発生させるため、バックフレーム上部中央 (a点) に相当するx方向、z方向ともオフセットした位置 (図5のa点) に強制変位を与えた。

本境界条件下で求めた各方向の変位量を図6に示す。図6 (a) からは図4 (a) と同様に側面視の曲げ変形が、また図6 (b) からは図4 (b) と同様に車両前後方向 (x) 軸回りのねじり変形が確認でき、両者の変形挙動は実験結果と良く一致することが確認できた。

3.4 剛性と重量に及ぼす設計変数の影響

薄肉化しながらも剛性を維持し、軽量化効果も得るためには、付与する補剛形状の重量変動に対する剛性変動が、板厚のそれ以上であることが必要である。そこで、部品形状を決定する設計変数を変動させた際の重量変動量あたりの剛性変動量を調査した。

部品の側面視の外形状を変更しないという制約条件の下に図7に示す設計変数を変動させて線形構造解析を行い、変動重量あたりの剛性変動量を算出した結果を図8に示す。車両前後方向 (x) へ伸びる部品下部のビードの高さ (図7中のH2) を増すことが最も重量効率よく剛性を向上でき、また板厚のそれを上回ることが分かる。本設計変数は、部品下部の局所剛性に関係するものであることから、当該部位の変形が剛性値に影響していると考えられる。

3.5 剛性と部品変形量の関係

前節の調査の結果、車両前後方向 (x) へ伸びる部品下部のビードの変形が剛性値に影響していることが示唆されたため、両者の相関分析を行った。

部品下部のビードの高さについて、無作為に範囲を選択して変更した15の部品モデルを線形構造解析し、当該ビード上の各点 (図9上図) における車両幅方向 (y), および高さ方向 (z) それぞれの変位量と剛性値の相関分析結果を表1に、相関係数の分布を図9に示す。本結果は、有意水準1%で検定すると各方向とも $x=350$ から 450 で有意な差が認められ ($p<0.01$), 母相関係数の99%信頼区間は、例えば $x=400$ ではそれぞれ $-0.975 \sim -0.999$, $-0.789 \sim -0.988$ と非常に強い負の相関がみら

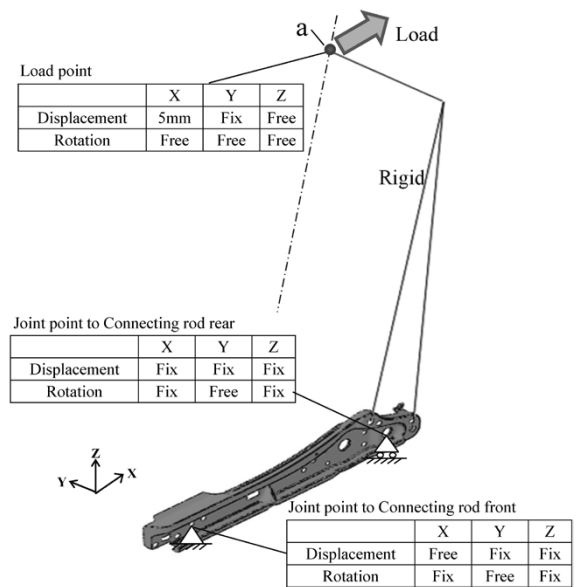


図5 構造解析の境界条件
Fig. 5 Boundary condition in structural analysis

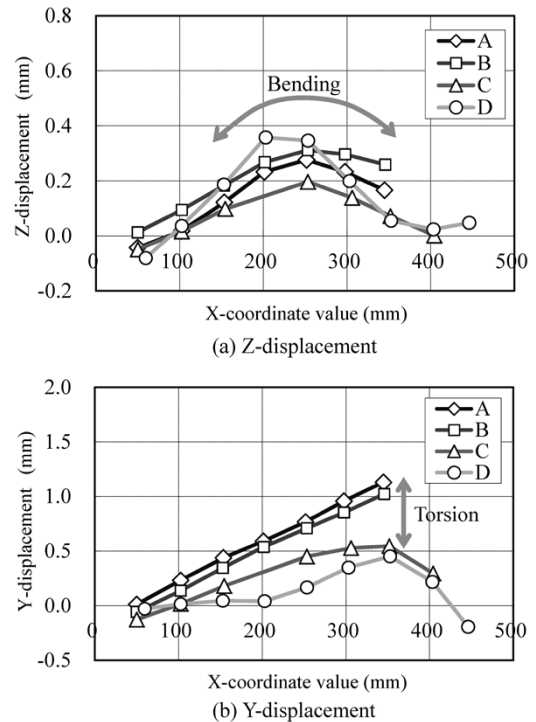


図6 構造解析におけるクッションサイドフレームの変形量
Fig. 6 Deformation of cushion side frame in structural analysis

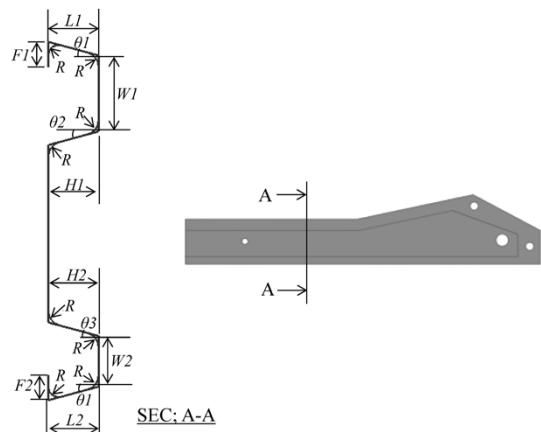


図7 部品形状の設計変数
Fig. 7 Geometry parameters

れる。つまり、剛性値は $x=400$ 付近の変位量と非常に強い負の相関があり、当部位の変形を抑制することで剛性値を向上できるものと考えられる。

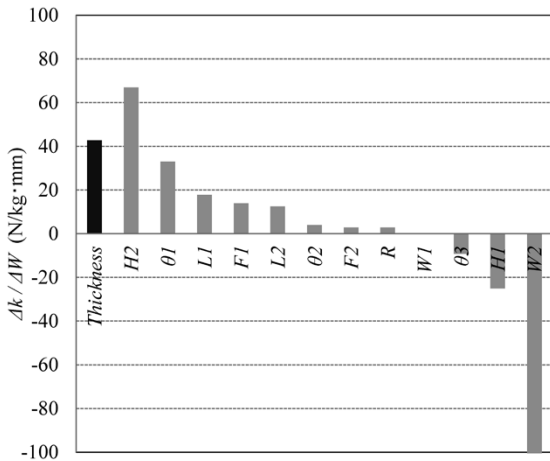


図8 設計変数を変化させた際の単位重量あたりの剛性変動量
Fig. 8 Stiffness changes per unit weight for various geometry parameter

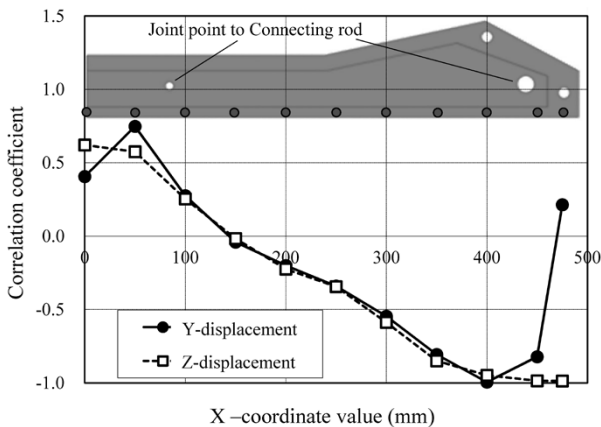


図9 シートフレーム剛性値とクッションサイドフレーム変位の相関係数の分布
Fig. 9 Distribution of correlation coefficients between seat frame stiffness and displacements at lower bead in cushion side frame

3.6 補剛形状の導出

前節までの調査結果から、重量効率よく剛性を向上させるために設定すべき補剛形状は、 $x=400$ 近傍の変位を抑制することを目的に下部ビードの高さを増して設定すれば良いと考えられる。そこで、補剛ビードを部品内で機能するはりと見立て、当該部を曲げモーメントが全長一定の片持ちばりの自由端とみなせば、当該部変位量はBernoulli-Eulerのはり理論から導出される式(2)が適用できる。式(2)によれば、たわみ量は固定端までの長さの2乗に比例するため、その抑制には相対的に剛な部位と最短距離でつなぐことが有効である。

$$w = (Ml^2)/(2EI_y) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- w: 自由端の最大たわみ量
- M: 曲げモーメント
- l: 固定端から自由端までの長さ
- E: ヤング率
- I_y : y軸回りの断面2次モーメント

したがって、変形量を抑制したい $x=400$ 近傍から後部の連結ロッド近傍をつなぐ区間に補剛のためのビード形状を設定することで、最小重量で剛性向上が図れるという結論が得られた。

4. 補剛形状の適用

4.1 軽量化効果

前章の結果を量産部品(図10(a))に適用し、軽量化効果を確認した。ここで使用した量産部品の部品下部には高さ約14mmのビードが車両前後方向に伸びており、これに対して図10(b)に示すように、前述の部位に限定して高さを28mmとする補剛形状を追加した。

補剛形状を追加した部品の剛性と重量の関係を図11に示す。縦軸、横軸ともにそれぞれの量産部品($t=1.6\text{mm}$)の値で正規化している。板厚を1.4mmにゲージダウンしながら剛性を維持し、10%の軽量化効果を得

表1 シートフレーム剛性値とクッションサイドフレーム下部ビード上の変位との相関分析結果

Table 1 Results of correlation analysis between stiffness value and displacements at lower bead in cushion side frame

Y-displacement											
X-coordinate value	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	475
Correlation coefficient	0.406	0.748	0.276	-0.0400	-0.200	-0.340	-0.545	-0.806	-0.994	-0.822	0.214
Number of sample	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
t-value	1.60	4.06	1.04	0.144	0.736	1.30	2.35	4.91	33.4	5.20	0.791
Degrees of freedom	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
p-value	0.133	0.001	0.319	0.887	0.475	0.215	0.035	0.000	0.000	0.000	0.443
99 % confidence lower limit	-0.303	0.221	-0.430	-0.655	-0.738	-0.800	-0.875	-0.953	-0.999	-0.957	-0.482
99 % confidence upper limit	0.826	0.937	0.773	0.607	0.494	0.371	0.131	-0.356	-0.975	-0.395	0.745
Z-displacement											
X-coordinate value	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	475
Correlation coefficient	0.621	0.575	0.254	-0.0164	-0.224	-0.344	-0.587	-0.849	-0.948	-0.986	-0.986
Number of sample	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
t-value	2.86	2.53	0.948	0.0592	0.829	1.32	2.62	5.79	10.8	21.0	21.7
degrees of freedom	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
p-value	0.0134	0.0249	0.360	0.954	0.422	0.210	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000
99 % confidence lower limit	-0.016	-0.088	-0.449	-0.641	-0.749	-0.801	-0.889	-0.964	-0.988	-0.997	-0.997
99 % confidence upper limit	0.900	0.885	0.763	0.621	0.474	0.367	0.0697	-0.469	-0.789	-0.938	-0.941

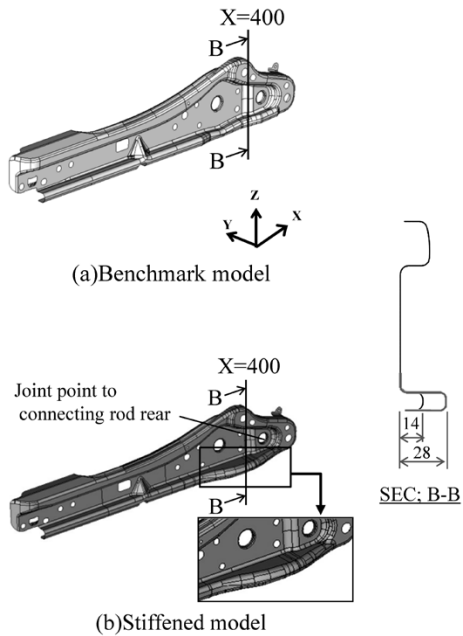


図10 (a)ベンチマーク部品と(b)補剛形状を付与した部品
Fig.10 (a) Benchmark model and (b) stiffened model

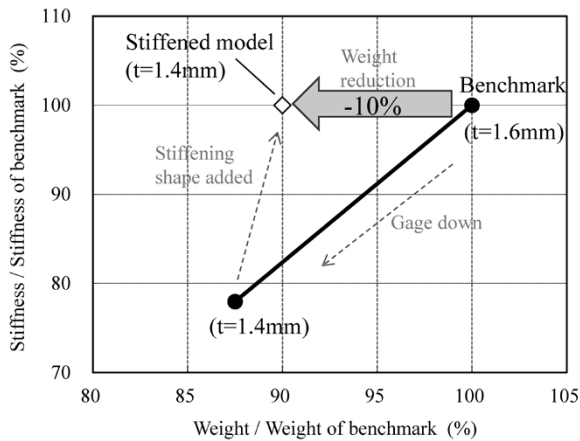


図11 補剛形状を付与した部品の剛性と重量
Fig.11 Relationship between stiffness and weight in stiffened model

られることが確認できる。

4.2 成形性の実機検証

補剛形状を付与したクッションサイドフレームは、局所が突出した形状となったため、成形難度は元の量産部品より増したと考えられる。そこで、量産部品(590MPa級, $t=1.6\text{mm}$)に比べ高強度かつ薄肉(1180MPa級, $t=1.4\text{mm}$)の鋼板を用いて成形可否の検証を行った。

補剛形状部は厳しい張り出し成形となるため、適用する鋼板は伸び特性に優れる材料が好ましいと考えられる。そこで、同じ強度クラスの一般的なDual Phase鋼板に比べて伸び特性に優れる1180MPa級の高加工性ハイテン材を用いた。表2にその機械的特性を示す。

実機でプレス成形し、図12に示す成形品を採取した。局所的な突起形状を有する形状を割れなく成形できることが確認できた。

表2 使用した材料の機械的特性
Table 2 Mechanical properties of material

	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)
CR1180	900	1,192	18.5

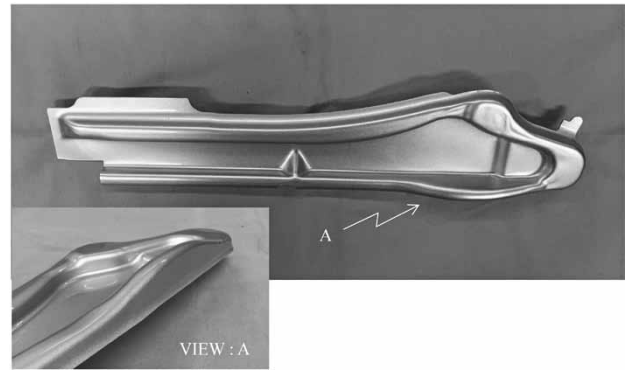


図12 1180MPa級高加工性ハイテンによる試作品
Fig.12 Forming test sample using 1180MPa-class high strength steel with high-formability

むすび=高加工性ハイテンを活用した軽量化の一例として、自動車用シートの構成部品であるクッションサイドフレームを対象に軽量化形状の導出を試み、以下の結果を得た。

- 1) 後方载荷において、部品下部に車両前後方向に伸びるビードの高さを増すことにより、重量効率よく剛性を向上させることができる。
- 2) 下部ビードの車両後方部の変形量は、剛性値と強い負の相関がある。
- 3) 上記部位から連結パイプ取付部下までの間のビード高さを増加させると、1ゲージダウンしながら元の剛性を維持し、10%の軽量化効果が得られる。
- 4) 上記形状は、当社の1180MPa級鋼板で割れなく成形できる。

今後ますます高まると予想される軽量化ニーズに対する高加工性ハイテン材の活用方法の一つとして本結果が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 佐藤章仁. 塑性と加工. 2005, Vol.46, No.534, p.548-551.
- 2) 三浦正明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.15-18.
- 3) 中屋道治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.19-22.
- 4) 中屋道治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.1, p.46-49.
- 5) 岩谷二郎. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.23-27.
- 6) 山本倫明. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.37-41.
- 7) 橘 美枝ほか. R&D 神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.31-36.
- 8) 吉岡典恭. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.2, p.53-56.
- 9) 牧野茂雄. MOTOR FAN illustrated. 2009, Vol.29, p.38-53.
- 10) 日本機械学会. 機械工学便覧. Vol.6, p.4-52.