

(論文)

ロール成形による高性能軽量ドアビーム

Roll-formed Lightweight Door Beam



吉岡典恭*1

Noriyasu YOSHIOKA

High tensile strength (Hi-ten) steel is increasingly used for bodies in white (BIW) to reduce the weight of automobiles. Roll forming is a method for processing super hi-ten steel and has an advantage that it increases design freedom for cross-sectional shapes. This design freedom is exploited to develop a light door beam with high performance by adequately stiffening the cross sectional shapes to prevent the cross section from collapsing. The newly developed door beam is expected to reduce the weight of a conventional door beam by 10%.

ま え が き＝地球温暖化防止への取組の一環としてCO₂排出量削減に向けて燃費目標値が設定されるなど、自動車の燃費向上が強く求められており、その具体策の一つとしてボデーの軽量化ニーズが一層高まっている。一方、自動車事故による死傷者数低減に向け、法規制やNCAP (New Car Assessment Program) の試験強化にみられるように、衝突安全性を向上させるための自動車ボデーの高強度化ニーズは依然として高い。

こうしたボデーの軽量化と高強度化の両立に向け、自動車メーカーではボデー材料である鋼板のハイテン化を主要方策の一つとし、その適用の範囲を拡大している。

自動車のボデーを構成する部品の多くは冷間でプレス成形されており、これまでのハイテン実用化はその成形上の課題を乗り越えながら行われてきた。従来の冷間プレス成形に代わり、近年ではホットスタンプやハイドロフォーミングなどの工法も適用されてきている^{1), 2)}。ロール成形もその一つである³⁾。ロール成形は、プレスにおける精度不良や加工力不足などの課題の克服や製造コストの低さといった利点に加え、断面形状の自由度が高いという長所を併せもっており、その自由度の高さを断面設計へ生かすことによって軽量化の実現につながる可能性を秘めているといえる。

そこで本稿では、ロール成形の特徴を生かせる部品の一つとしてドアビームを選定し、その断面形状自由度の高さを生かした軽量ドアビームの開発を行ったので報告する。

1. 開発の目標値

ドアビームは比較的細長い棒状の補強部品である。自動車のサイドドア内部に車両前後方向に配置される。その主な役割は、車両側面方向からの衝突時における乗員保護を目的とした衝突物の車内侵入防止やボデーの変形

抑制などである。

自動車の側方からの衝突安全性に関する評価方法に対しては、各国の法規やNCAPなどそれぞれの国の交通事故に合った多くの規定が定められている。それらのうち、米国の基準であるFMVSS NO.214のDOOR CRUSH RESISTANCE REQUIREMENTSでは、ドア中央部を負荷デバイスで押込んだ際のInitial crush resistance^{註)}が10kN以上となるよう規定されている。本開発では、この車両として求められる性能をドアビーム単体で受け持つことを想定し、これをエネルギー吸収量へ置換えて(平均圧壊抗力10kN×ストローク152mm)安全率1.2を乗じた1.82kJを性能目標として設定した。

ところで、ドアビームは現在1,470MPa級以上の高周波焼入れパイプが多く用いられている⁴⁾。その外径はφ31.8mmのものが多いが、板厚は車両により様々である。外径φ31.8mmの1,470MPa級パイプを対象に、後述の評価方法(スパン長800mmの3点曲げ試験)によって目標性能としたエネルギー吸収量1.82kJを有する板厚を求めたところ2.3mmであることがわかった。この板厚のパイプを重量ベンチマークとして設定し、同じ強度クラスの1,470MPa級冷延鋼板を用いて10%軽量化することを重量目標とした。

また、単位重量あたりの性能を大きく左右し、ドア内部のレイアウト性にも影響するビームの高さ、すなわち車両幅方向の寸法は、ベンチマークのパイプ外径である31.8mm以下とすることを形状制約とした。

2. 性能評価の方法

ドアビーム単体の評価方法はFMVSS NO.214のDOOR CRUSH RESISTANCE REQUIREMENTSの試験方法に

註) 負荷デバイスストローク初期152mmにおける平均圧壊抗力

*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部

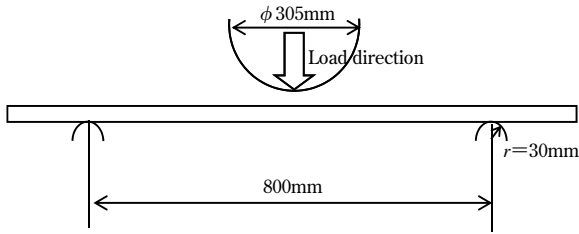


図1 3点曲げ試験の方法
Fig. 1 Method of 3 points bending test

準拠し、図1に示す静的3点曲げ試験とした。デバイス直径はφ305mmで、評価ストロークは同規格 Initial crush resistance と同じ152mmである。また性能を左右する支持スパンは1,500~2,000ccクラスの中形セダンのドアビーム取付けスパンを想定して800mmとした。以上の評価条件に基づいたFEM解析を行うことによって断面開発を進めた。さらに、試作部品を用いた実験による検証も行った。

3. FEM解析による断面形状の開発

3.1 FEM解析の方法

FEM解析には、汎用ソフトLS-DYNA ver.971倍精度を用いた。完全積分シェル要素を用い、積分点を板厚方向5点とし、要素サイズは3.0mmを基本に、曲げR部をさらに細分化した。材料特性は、比較部品の解析も含め表1に示す当社の1,470MPa級冷延鋼板の機械的特性をSwift型指数硬化式で近似した。

3.2 軽量化における課題

圧壊性能を維持しながら軽量化を図ることは、重量あたりの性能を向上させることであり、それを実現する一般的な方策としては使用材料の強度向上がある。しかし、本開発のベンチマーク品は既に現在の最高強度クラスにあるため、さらなる高強度化には限界がある。そこで、同強度クラスの材料を薄肉化し、形状的対策で性能効率を向上させることにした。

目標性能としたエネルギー吸収量 (EA) は、式 (1) で表される。

$$EA = \int_0^{152} F ds \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F : 抗力、 s : デバイスストロークである。

また、単純支持された3点曲げの抗力 F は式 (2) で表されるため、評価ストローク内における負荷部の曲げモーメント (M_c) を向上させることが必要であることがわかる。

$$F = \frac{4M_c}{L} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 L : 支持スパンである。

M_c の最大値 M_{max} を、全塑性モーメント⁵⁾ (M_p) で無次元化した M_{max}/M_p を強度効率の指標として導入する。 M_p は負荷点断面全域 (面積を A とする) の曲げ応力 (断面の垂直応力) が降伏応力に達したと仮定したときの曲げモーメントであり、式 (3) で表される。

$$M_p = \int_A \sigma_y \cdot |y| dA \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 σ_y : 降伏応力、 y : 中立面からの距離である。

図2に板厚 t で一辺の平面幅が b の角形パイプ (正方形) における M_{max}/M_p と幅厚比 (b/t) の関係と、構造設計で用いられる有効幅⁶⁾の板厚比 b_e/t を示す。ここではKarmanの近似式⁶⁾を用いた。同図より3点曲げの負荷点においては有効幅に関係なく M_{max}/M_p と b/t の間に負の相関関係があることが確認できる。すなわち、断面サイズを変化させずに薄肉化すると M_{max}/M_p は低下して材料が有する強度を発揮できず、重量あたりの性能はむしろ低下してしまうという問題が生じる。 b/t が大きくなることにより、はり部材を構成するそれぞれの面の剛性が低下して局所的な座屈変形が発生しやすくなり、早期に断面崩壊に至るためである。そこで、断面崩壊のトリガである局所変形を抑制することを断面開発の課題として取組んだ。

3.3 性能向上への方策

局所変形が、 b/t の増加に伴う局部剛性の低下によるものであれば、何らかの方法によって当該部の剛性低下を補うことにより M_{max}/M_p を高めることが可能であるといえる。さらに同じ理由で M_c が低下に転ずるタイミングも遅延させることができ、 EA 量をさらに拡大できると考えた。

そこで、局所変形が発生する部位の剛性を補う手段として、断面形状を工夫することにした。それによって材料降伏後の加工硬化領域まで断面変形を抑制し、 M_{max} の最大化とその維持によって性能効率の増大を狙うことにした。

3.4 断面形状の検討

まず、ベースとする断面形状を台形閉断面構造とし、下底 (長辺) が曲げ引張り側 (車室側) となるように配置した。ロール成形は断面形状自由度が高く、開断面や閉断面ともに成形可能であるが、ここでは、突合せ溶接を用いた閉断面パイプ構造を選択した。これは、台形断面の脚部が互いに外に膨れようとする変形を相殺することができ、断面変形の抑制に有利であると考えたからで

表1 使用した材料の機械的特性とswift式パラメータの値
Table 1 Mechanical properties of material and swift parameter

	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	$\sigma = F(E_0 + \epsilon_p)^n$		
				F	E_0	n
CR1470	1,072	1,546	10.5	2,161.73	0.000532	0.09323

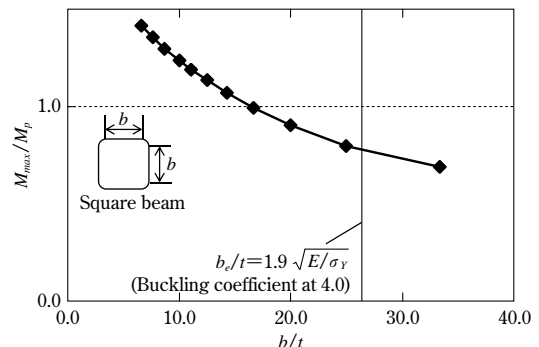


図2 M_{max}/M_p と b/t の関係
Fig. 2 Relationship between M_{max}/M_p and width-thickness ratio

ある。また台形としたのは、変形量の少ない曲げ引張り側へ材料を多く配置することと、面外変形が発生する最大圧縮応力発生部の補剛形状に要する重量を最小化すべく曲げ圧縮側の b/t を下げておくためである。

次に補剛のための形状を、負荷デバイスの線接触部でありかつ最大圧縮応力部である断面上部（車両外側）へ付与した。(a) ベース断面、および (b) 断面上部に補剛形状を付与した断面、それぞれの断面を有するビームの FEM 解析を行った。その結果を図 3 に示す。縦軸は支持スパン中央における M_c/M_p 、横軸は負荷デバイスのストロークである。この図より、断面上部の補剛による M_c/M_p 最大値への向上効果が確認できた。さらに (b) の M_c/M_p 低下を遅延させることを目的に、局部変形が発生する台形脚部（側壁部）に対して補剛を施した。その結果が図 3 (c) であり、(b) に比べて M_c/M_p の低下開始が大幅に遅延することを確認できた。

これらの検討結果に加えて軽量化対策を施すことによって図 4 に示す断面形状を開発した。

3.5 FEM解析結果

開発断面と比較部品におけるエネルギー吸収量と重量の関係を図 5 に示す。縦軸はエネルギー吸収量であり、横軸は、ベンチマークとした板厚 2.3mm の円形パイプ重量に対する百分率である。比較用に示した円形パイプと角形パイプの解析結果はすべて開発断面と同じ Swift 型指数硬化式を用いたものである。開発断面はそれらに対して重量効率の点で優位にあることが確認できた。また、開発断面における性能目標、重量目標ともに達成できる板厚は 1.8mm であることがわかった。図 6 に板厚 1.8mm

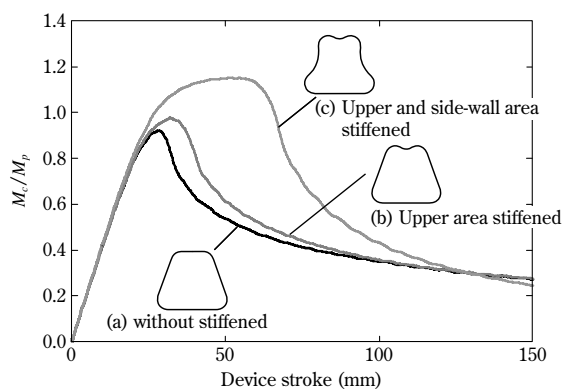


図 3 補剛の効果
Fig. 3 Effect of stiffening to M_c/M_p

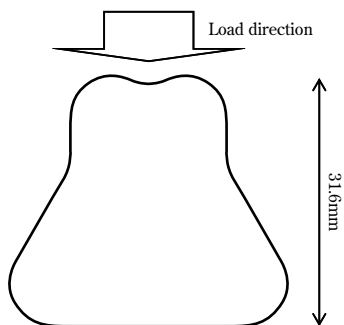


図 4 開発ドアビームの断面形状
Fig. 4 Cross-section of developed door beam

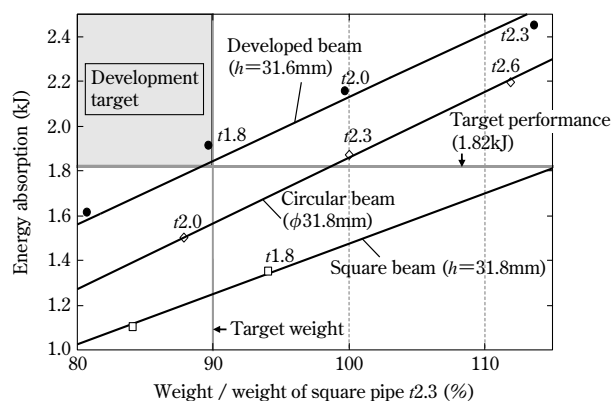


図 5 エネルギー吸収量と重量の関係
Fig. 5 Relation between energy absorption and weight

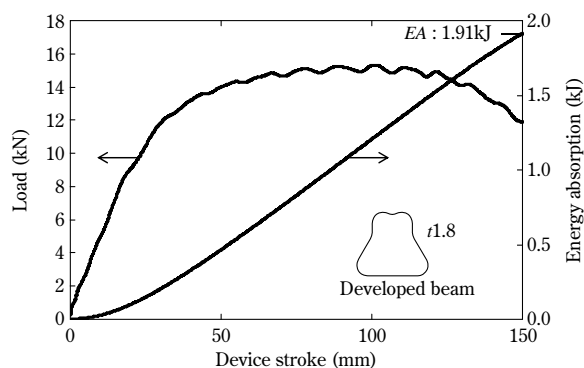


図 6 開発ドアビーム ($r1.8\text{mm}$) の荷重-ストローク線図 (FEM)
Fig. 6 Load-device stroke curve of developed $r1.8\text{mm}$ beam by FEM

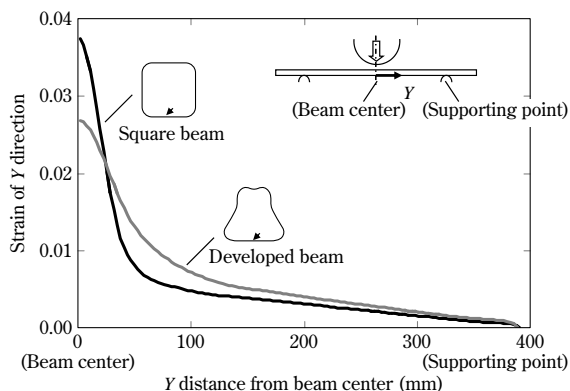


図 7 断面下部長手方向ひずみ (デバイスストローク 60mm)
Fig. 7 Strain of Y direction (device stroke at 60mm)

の開発断面の解析における荷重とストロークの関係を示す。ピーク値発生後も荷重が高いレベルで安定化し、エネルギー吸収量が増加していることが確認できた。

一方、ドアビームのように衝突時に大変形する部品への超高強度材の適用においては、衝突変形時の破断による性能低下の防止、およびその破断面からの乗員の保護の観点から、耐破断性も重要になる。開発ドアビームおよび比較用の角形パイプそれぞれの断面下部（曲げ引張り側）中央の板表面長手方向ひずみを図 7 に示す。開発ドアビームでは、長手方向の引張りひずみが分散され、ピーク値が低減していることが確認できた。これは、断面変形を抑制したことによってひずみの局所化が抑えられ、変形が広範囲に進行したためである。実際の破断発生の有無は次章の実験によって検証した。

4. 実験による性能検証

図4で示した開発断面形状のドアビームを $r1.8\text{mm}$ で試作し、目標性能であるエネルギー吸収量およびその変形過程における破断発生の有無の2点について実験による検証を行った。

開発断面を有するドアビームの試作にあたっては、材料は表1で示した当社の1,470MPa級冷延鋼板を使用し、プレスブレーキによるV曲げで成形した。その後断面幅方向を矯正拘束した状態で、断面下部中央を突合せレーザ溶接にて接合した(図8左)。

このドアビームを用いて図1に示した3点曲げ試験を実施した(図8右)。このときの荷重—ストローク線図を図9に示す。エネルギー吸収量は、性能目標である1.82kJを上回る1.87kJが得られた。また、評価範囲であるデバイスストローク152mmを超える300mmまで押込んだものの、図10に示すように懸念された破断はなかった。なお、今回の性能目標としなかった抗力最大値は、16.7kNであった。

本実験結果により、重量目標である円形パイプ($\phi 31.8\text{mm}$, $t2.3$)を10%軽量化した断面で目標性能を達成することが確認できた。

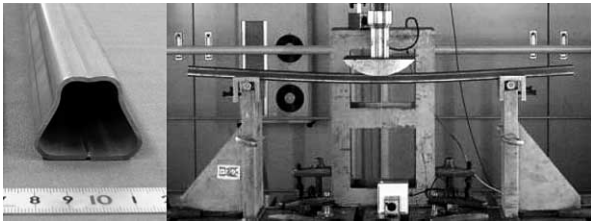


図8 試作部品と実験の様子
Fig. 8 Test specimen and scenery of experiment

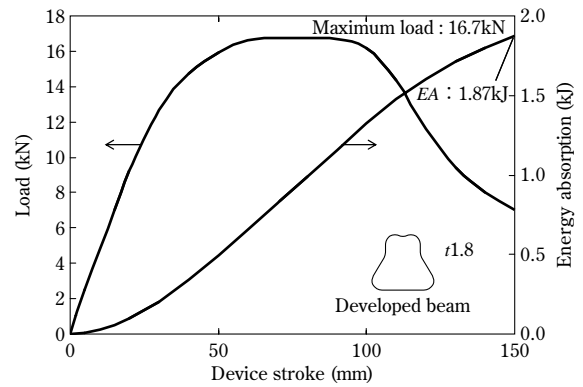


図9 開発ドアビームの荷重—ストローク線図(実験)
Fig. 9 Load—device stroke curve in experiment



図10 300mm 押し込み後の開発ドアビーム
Fig.10 Developed beam after device 300mm stroke

むすび＝当社の1,470MPa級冷延鋼板を用い、超ハイテンの加工法の一つであるロール成形による軽量ドアビーム断面の開発を試みた。ロール成形の特長である断面形状自由度の高さを生かした補剛断面形状とすることにより、薄肉化の課題である断面の局部変形を抑制し、高性能と軽量化を両立させることができた。

その結果、本開発ドアビームでは1,470MPa級パイプに対し、10%の軽量化が見込めることがわかった。

参考文献

- 1) Schiessl G. et al. : Proceedings of the IDDRG 2004 Conference, 2004, pp.158-166.
- 2) Mason M. : Proceedings of the 29th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Vol.1 (1996), pp.143-156.
- 3) 橋 美枝ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.57, No.2 (2007), pp.31-36.
- 4) 清水 純ほか：SUBARU Technical Review, No.37(2010), pp.19-24.
- 5) 日本機械学会編：機械工学便覧 新版, 1991, p.A4-38.
- 6) 日本機械学会編：機械工学便覧 新版, 1991, p.A4-91.