



受賞技術-8

# 高効率クラッシュボックスの開発

## Development of Crash-box with High Impact Energy Absorption

住友金属工業(株) 総合技術研究所  
利用技術研究開発部 主任研究員

**田村憲司** Kenji Tamura

住友金属工業(株) 自動車技術部  
担当課長

**中澤嘉明** Yoshiaki Nakazawa

住友金属工業(株) 総合技術研究所  
先進デザイン研究開発部 主任研究員

**吉田経尊** Michitaka Yoshida

豊田鉄工(株) 技術部  
SE推進室 室長

**高木勝利** Katsutoshi Takagi

豊田鉄工(株) 開発部  
第2開発室 主担当員

**加納光寿** Mitsutoshi Kano

### 1 緒言

近年、乗用車の性能開発は、環境保護と安全性確保の観点から、軽量化と衝突安全性能の両立が一層重視されるようになった。

衝突安全性能を重視した車体構造の原型は、1959年のメルセデスタイプ220であり<sup>1)</sup>、車体の端部を潰れ易くして衝突時の衝撃を吸収し、キャビンは潰れにくくして生存空間を確保する構造が初めて提案された。以来、主として時速50km/hを超える高速衝突の際の人員保護を目的に、種々の開発がなされてきた。

一方、事故車両の補修性(修理のしやすさ)も重要な要求性能であり、時速15km/h程度の軽衝突時には、車両損傷部位が容易に補修可能な構造が求められる。低速衝突時に予想される修理工数によって、新型車両には個別にあらかじめ保険料率が算定されており、車両を購入するユーザーにとっては、選択する車両が補修性に優れるほど保険料が軽減される。

上記の低速衝突時の補修費の軽減を目的として、1990年代から導入された新部品がFig.1のようにフレームの先端を別部品としたクラッシュボックスである。

クラッシュボックス導入までは、フレームを直接バンパーラインフォースに締結する構造が用いられ、低速の前面衝突ではフレームに著しい損傷を生じ、大幅な補修を必要としていたが、クラッシュボックスを用いることで低速衝突時にはフレームの補修が不要になった<sup>2)</sup>。従来このようなクラッシュボックスには、Fig.2に例示するようなクラッシュビードと称する部材軸方向に直行する溝を多数設ける設計がなされ、その溝を基点に蛇腹状に崩壊させることによって衝突エネルギーを吸収した。その結果、低速衝突での修理費が大幅

に低減され、新車体構造としてクラッシュボックスは多大な経済効果をもたらした。

一方、最近の新車の開発動向としては、客室の居住性を確保しながら車体軽量化を図るため車体前部を短くするショートノーズデザイン化が進行しつつある。そのためクラッシュボックスの性能としては、軽量で、かつ極力少ない変形量で十分なエネルギー吸収能を有すること(高効率吸収)が望まれている。

また補修性を評価する低速衝突条件についても、最近の車

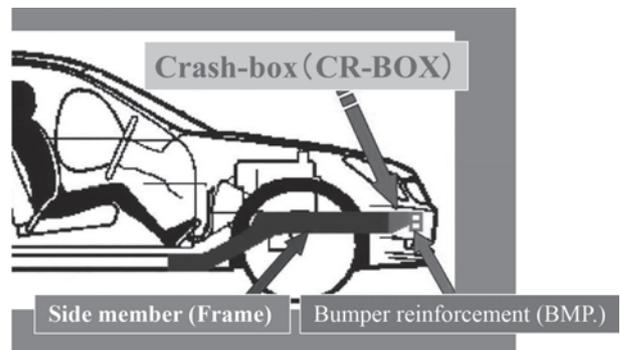


Fig.1 Position of crash box

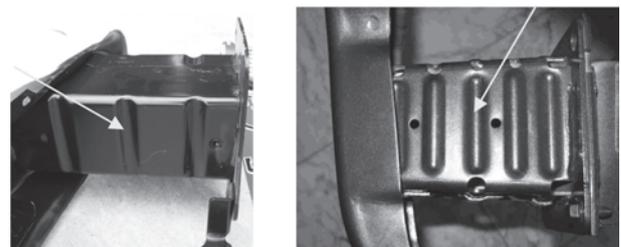


Fig.2 Typical types of conventional crash box with crash beads

\* 平成21年度文部科学大臣表彰科学技術賞開発部門受賞技術

体構造の進化や車両質量の増加等に伴い、実態に即した衝突実験基準への見直しが行われた。RCAR<sup>3)</sup> (Research Council for Automobile Repairs) にて制定された現在の基準では、Fig.3のように斜め10°の荷重入力を前提としており、車体にかかる負荷条件は従来の基準に比べて格段に厳しくなっている。

そこで、新衝突基準に適合し、かつ効率的に衝突エネルギーを吸収するためには、クラッシュビードに依存する従来技術では限界があり、より高度な軸圧壊変形(塑性座屈変形)の制御技術が必要となってきた。

本開発では、従来設計と全く異なる断面形状による座屈制御技術を確立し、エネルギー吸収効率を飛躍的に向上できるクラッシュボックスを実現した<sup>4-6)</sup>。以下に、その技術的内容および効果について詳細に説明する。

## 2 クラッシュボックスの役割と従来設計

### 2.1 クラッシュボックスに要求される性能

クラッシュボックスの役割とは、まず第一には軽量でかつ衝突のエネルギーを十分に吸収することである。しかし、単に吸収エネルギーが高ければ良いのではなく、フレームに損傷が及ばないように、クラッシュボックスは一定荷重以下で優先して潰れることが重要であり、自動車メーカーでは、クラッシュボックスの崩壊荷重はフレームの耐力以下に設計される。その上で、Fig.3のような斜め荷重の作用でもエネルギー吸収性能を発揮しなければならない。

つまり、クラッシュボックスに求められる性能は、以下の3点である。

- 1) フレームの耐力以下で潰れること
- 2) 所定のストローク量でエネルギー吸収すること
- 3) 斜め入力荷重に対して折れないこと

### 2.2 従来クラッシュビード品の課題

本開発にあたり、まず従来のクラッシュビード品の課題を明確にすべく、数値解析を実施した。クラッシュビード品の

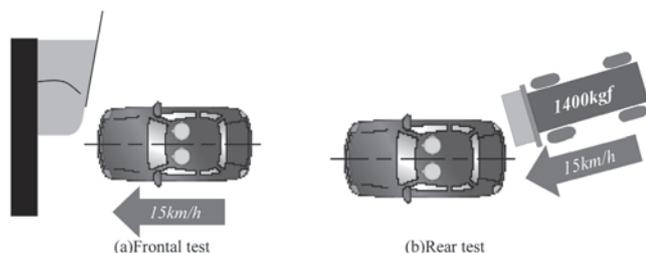


Fig.3 Procedure of impact test in RCAR<sup>3)</sup>

代表例およびその比較例として、Fig.4に示すような3種の六角形部材を用い、圧壊時の荷重特性を分析した。解析には、動的陽解法汎用FEMコードPam-Crash ver. 2001.1を用い、速度55km/hで剛体壁により圧壊する解析を実施した。解析に用いた材料は、板厚1.6mmの440MPa級高張力鋼板であり、ひずみ速度依存性は、Cowper-Symonds則<sup>7)</sup>にて考慮した。

Fig.5に解析結果を示す。クラッシュビード導入モデルは、クラッシュビードを有しない比較例に比べ、変位(S)に対する変形荷重(P)の変動は小さく安定するが、変形荷重は低下している。すなわち、クラッシュビードは座屈変形の起点(潰れ易い箇所)を導入することで塑性座屈が容易になる反面、部材全体でのエネルギー吸収性能は比較例に比べて低下する。そのため、新車開発途上において設計したクラッシュボックスで所望のエネルギーが得られない場合には、部材板厚を上げて対応する必要があり、車体の重量増加を招いていた。

さらに、車種毎(部材断面形状毎)にクラッシュビードの配置位置やその溝形状の検討を行う必要があり、新車開発において目標性能を満足させるためのビード設計には試行錯誤を要していた。

## 3 高効率エネルギー吸収のための基礎検討

### 3.1 軸圧壊変形における基本現象

本章では、まず安定な変形状態でかつ高荷重を示す形状制

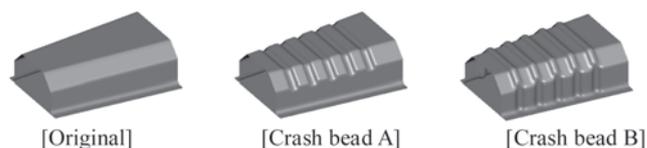


Fig.4 Crash analysis models for evaluating crash bead effect

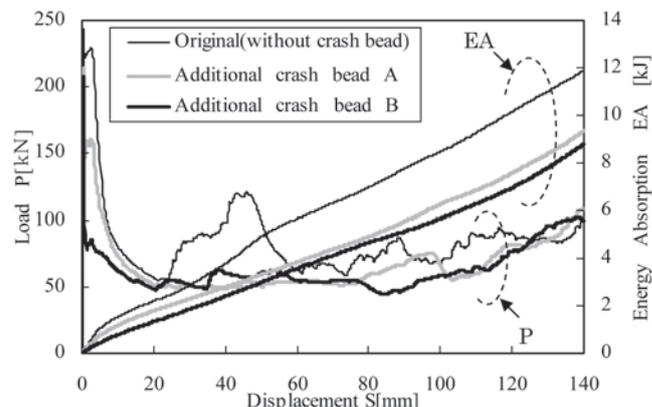


Fig.5 Analytical results of crash bead effect

御指針を得るために、衝撃吸収部材を代表する片ハット部材での変形挙動と荷重特性の関係について解析した。ここで、“安定な変形状態”とは、短い周期で繰り返し座屈変形を生じることを意味し、以下この表現を用いる。

Fig.6に示すように、衝突時の変形においては、部材の横断面内で剛性の低い平坦部（稜線間）は軸方向荷重によって断面外方向へ弾性たわみを生じ、円弧部（稜線部）は軸方向に圧縮ひずみを生じる。その後、圧壊の進行とともに、稜線部には圧縮ひずみが蓄積され、稜線部の面外変形、すなわち塑性座屈（稜線部が折れる）が生じる。次に、稜線部座屈起点から平坦部にかけてしわが成長し、平坦部に曲げ変形が生じる。その後、平坦部のしわは圧壊の進行とともに押しつぶされて、しわの上下の稜線部分が接触して次の稜線座屈発生へと移行し、以下これを繰り返して蛇腹状に崩壊する。

一連の崩壊過程における荷重の推移をFig.7に模式的に示す。稜線座屈が発生するまで（図中①）は弾性的に荷重が上昇し、稜線座屈の発生時に荷重が初期の極大値を示す（②）。この後、平坦部の曲げ変形の進行に伴って荷重が低下し、座屈しわが押し潰れる時点で荷重の極小値が発現する（③）。以下、この荷重の上昇・下降を繰り返し、蛇腹状の軸圧壊が破綻した段階からは部材が折れ曲がって荷重が一気に低下する（④）。

上記の検討から、高効率のエネルギー吸収を実現するためには、稜線座屈時の荷重極大値を高くする一方、しわ折り曲

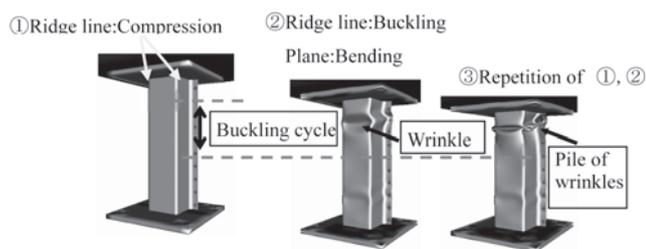


Fig.6 Schematic drawing of axial collapse of hat-shape channel component

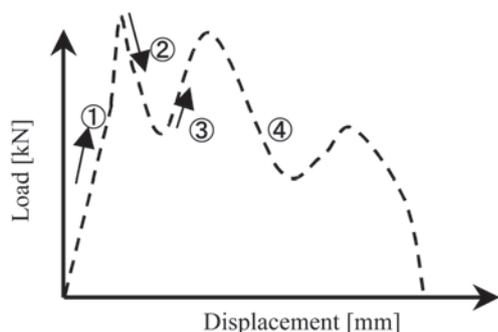


Fig.7 Schematic illustration of Load-Displacement curve during crash deformation

げ時に荷重が低下する変位量が極力小さい短い周期の繰り返し座屈を生じ、かつ部材全長にわたって安定した繰り返し座屈変形を確保する必要がある。つまり部材の高性能化を図るためには、以下の2点が重要である。

- (1) 高い座屈荷重の確保
- (2) 短座屈周期での繰り返し稜線座屈の実現

### 3.2 高効率エネルギー吸収のための断面形状

#### 3.2.1 解析条件

上記の高性能化の指針すなわち高座屈荷重化と短座屈周期化を果たす部材断面形状設計のために、筆者らは、前者については座屈荷重を生じる起点である稜線数、後者についてはしわを生成する平坦部の幅（稜線間距離）に着目した。

そこで、これら稜線数および稜線間距離の部材変形挙動に及ぼす影響を明確化すべく、正多角形の軸圧壊解析を実施した。解析には、Fig.8に示す直径が60、120、240mmの各円に内接する種々の正多角形モデルを用い、衝突速度15km/hでその軸方向の一方の端部に剛体壁を衝突させた。なお解析に用いた材料は、板厚1.6mmの590MPa級高張力鋼板であり、ひずみ速度依存性はCowper-Symonds則にて考慮した。

#### 3.2.2 稜線数の影響

Fig.9に、直径120mmの円とこの円に内接する4角形～12角形の多角形モデルにおける解析結果を示す。各モデルは断面周長がそれぞれ異なるため、荷重を各モデルの断面周長で除算した値 $P_{std}$ （単位周長あたりの荷重）にて性能を評価した。図中の12角形の結果に代表されるように、稜線数の増加に伴い稜線部の座屈発生毎に生じる荷重の極大値が大きくなっており、稜線数を増やすことにより本開発で狙う部材性能の第1目標である高座屈荷重化が可能といえる。

#### 3.2.3 稜線間距離の影響

Fig.9からは、多角形の角数の増加に伴う座屈毎の変位間隔、すなわち座屈周期も短くなっていることもわかる。本解

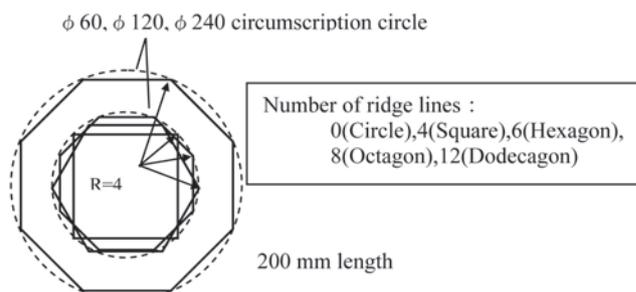


Fig.8 Cross sectional shape of analytical models

析に用いた多角形モデルは、上述のように同一の円に内接しており、角数つまり稜線数の増加に伴って隣接する稜線間の距離は短くなる。つまり座屈周期の変化は稜線間距離の変化による影響も含んでいると考えられる。そこで、次に稜線間距離に着目して解析を行った。

Fig.10に、解析条件の中から4角形、6角形、8角形の3つのモデルを抽出し、稜線間距離 ( $W_p$ ) によってエネルギー吸収性能と座屈周期を整理した結果を示す。図中の中実プロットは160mm変位までの平均荷重を断面周長で除算した  $P_{std.ave}$  であり、中空プロットは160mmの変位までに生じた座屈回数 ( $N_b$ ) である。 $P_{std.ave}$  は部材の重量あたりのエネルギー吸収性能つまりエネルギー吸収効率の比較を意味する。

同図から明らかなように、稜線間距離を短くすることによって座屈周期が短くなり、エネルギー吸収効率が上昇する。

すなわち、稜線間距離は座屈周期を支配し、稜線間距離を短く設定することによって部材軸圧壊の短座屈周期化が実現でき、その結果エネルギー吸収効率が向上できる。しかし、実設計で適用しうる稜線間距離には下限が存在し、それ以下

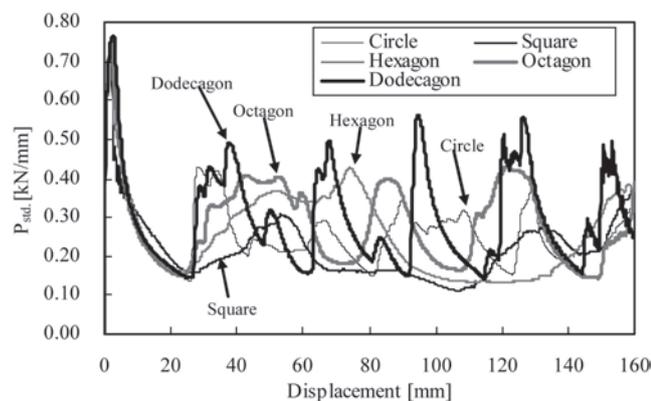


Fig.9 Analytical results of  $\phi 120$  inscribed circle models

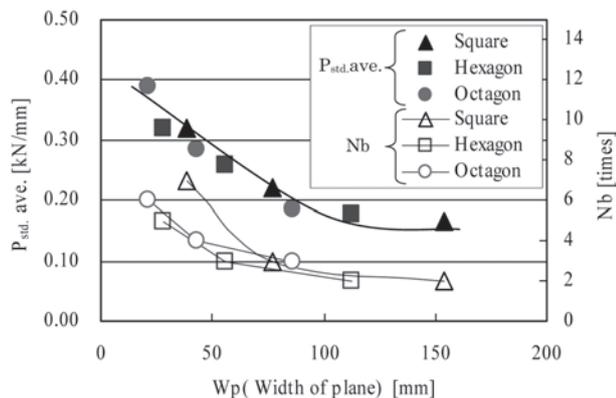


Fig.10 Influence of width of flat part between ridge lines on energy absorption and number of bucklings

では稜線間にしわが形成されることなくオイラー座屈によって部材が折れ曲がる。そのため、部材設計にあたっては設計者が適宜最適な距離を選択する。

以上の検討結果から、高効率エネルギー吸収を実現するためのクラッシュボックスの設計指針として、稜線数を極力多数確保し、稜線間距離を適正な範囲で小さく設計することが重要であることを明確化した。次章で実部材設計の具体的な内容を詳細に述べる。

## 4 新形状クラッシュボックス

### 4.1 新形状設計の特徴

一般に、クラッシュボックスの断面形状は、配置される空間の制約や他の部材の配置の都合上、扁平な場合が多く、前章で検討したような正多角形をそのまま適用することはできない。つまりクラッシュボックス断面形状に多角形を適用した場合には、一部の辺の長さが極めて大きな扁平多角形とせざるを得ず、適正な稜線間距離を断面全域で確保することができなくなる。

そこで、そのような扁平断面でも高効率エネルギー吸収を実現しうる形状設計をFEM解析によって精緻に検討した結果、筆者らは適正な稜線間距離を断面全域で確保するために、稜線間距離が長い辺に断面内側へ突出する凹み、すなわち部材全体で見渡せば部材軸方向に平行に複数の溝を設ける新形状を見出した。その具体的な形状ならびに実部材の形状写真を Fig.11 に示す。

新設計形状では、扁平な8角形の対向する2つの長辺に各々2列の凹みを与えることで、いずれの稜線間も適正な長さにとどめることが可能となった。また、これらの凹みを設けることにより、稜線数は元の8角形の8本から実に3倍の24本にまで増加し、部材全体として大きな座屈耐力が確保できる上、座屈発起点である稜線が断面内で多数存在することから、あらゆる方向からの衝撃入力に対しても安定して圧壊変形が開始することが期待できる。

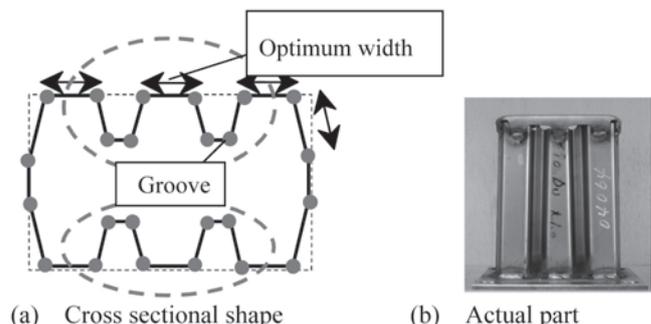


Fig.11 Design proposed for actual crash box

本開発部材の性能を検証すべく、FEM解析によってその性能を評価した。結果をFig.12に示す。ここでは板厚1.6mmの590MPa級部材を用い、10°傾斜した剛体壁で圧壊した。同図に示すように、本開発部材では、斜めの荷重入力においても部材に折れ曲がりを生じることなく極めて細かいしわが繰り返し形成される。

本開発部材の性能を実部材にて検証すべく、落錘試験を実施した。製作した部材は、板厚1.0mmの590MPa級高張力鋼板を用い、部材長さを200mmとした。

Fig.13に、軽衝突相当の速度での落錘試験を行ったその結果とFEM解析結果を併せて示す。本開発部材は、極めて短い周期で部材全長にわたって繰り返し蛇腹状の座屈が生じ、極めて小さい荷重振幅で高効率のエネルギー吸収が可能である。またFEM解析と試験結果とを比較すると、座屈しわの発生挙動および荷重推移が精度良く一致しており、本解析での形状設計検討の妥当性が実証された。

#### 4.2 新設計の汎用性1：材質によらない性能の安定性

本開発部材では、断面形状自体の特性として極めて安定した座屈性能が発揮されることから、材料特性が変わってもその変形挙動がばらつかないことが期待される。そこで、軟鋼から780MPa級高張力鋼板の各種強度レベルの板厚1.0mmの材料を用い、新形状部材の落錘試験を実施し、圧壊変形挙動を比較した。

Fig.14に、落錘試験後の各部材の写真を示すが、いずれの材料(特性)においても、細かい座屈しわが得られ、全ての

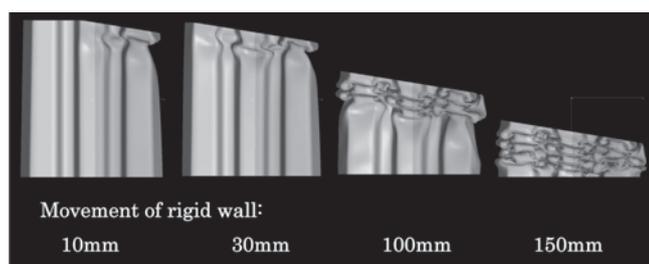


Fig.12 Analytical result of crash deformation with rigid walls inclined by 10 degrees

強度レベルの部材で安定した変形挙動が確認された。すなわち、新たな塑性座屈変形制御技術に基づいた新設計形状は、材料強度に依らず安定した衝撃吸収能を実現し、極めて汎用性が高いことが明らかとなった。

#### 4.3 新設計の汎用性2：接合方法によらない性能の安定性

本開発部材を成形・組み立てするにあたり様々な加工法が考えられるが、現時点で最も汎用性が高く実績のあるプレス成形による部材加工と、それらを溶接し閉断面化する2部品構成を選択した。ここでは閉断面化する接合方法について検討した。

衝突時のエネルギー吸収特性は、レーザー溶接などによる連続接合部材の方が優れているが、汎用性の点ではスポット溶接の方が有利である。そこで、本開発形状における溶接工法による衝突性能の比較検証を行い、量産に適した溶接工法を提案した。

試験品はこれまでと同様の断面形状とし、板厚1.2mmの440MPa級高張力鋼板を用いて、連続溶接(レーザー)と点溶接(スポット)部品の衝撃エネルギー吸収能を落錘試験で評価した。

Fig.15と16に試験後の試験体写真と荷重-変位線図をそれぞれ示すが、外観上はいずれの部材も細かいしわを生じる良好な圧壊挙動を呈し、座屈しわに対する板の重ね部位や溶

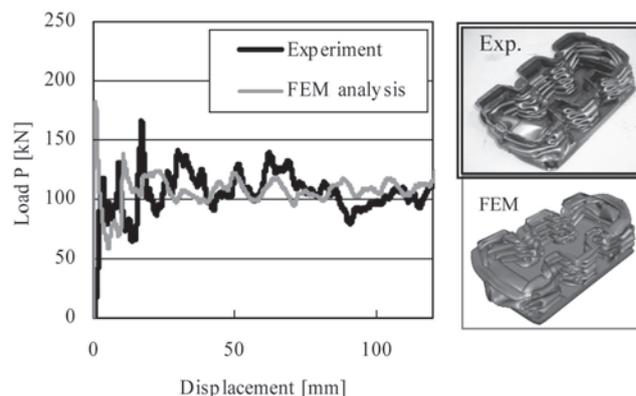


Fig.13 Crash performance of newly designed crash box



Fig.14 Deformed crash box with various steels after weight drop test

金部の影響はほとんど見られず、荷重-変位線図に対する連続溶接と点溶接の差も認められない。本開発部材形状とすることによって、スポット溶接で連続溶接と同等な性能を確保可能であることが明らかになった。

#### 4.4 従来品との性能比較

Fig.17に440MPa級高張力鋼板を用いたクラッシュボックスの素材板厚と圧壊中の平均荷重 $P_{ave}$ とエネルギー吸収効率EP ( $P_{ave}$ を部材重量で除したもの) の関係を、従来のクラッシュビード品と比較して示す。図から明らかなように、例えば板厚1.6mmの従来品のEP値より開発品の板厚0.8mmでのEPの値の方が大きく、本開発部材形状は、従来のクラッシュビード品に比べ軽量で高いエネルギー吸収能を有することがわかる。

## 5 まとめ

以上、高効率なエネルギー吸収を実現し、かつ斜め衝突でも安定したエネルギー吸収性能を発揮できるクラッシュボッ

クス新形状の開発について述べた。本開発クラッシュボックスによる具体的な効果として、従来設計品に対して大幅な軽量化が可能であるのみならず、性能が安定することからFEM解析を援用することで大幅な設計期間短縮が可能であり、新車開発における開発リードタイム短縮に大きく貢献できる。さらには、クラッシュボックスが確実にエネルギーを吸収し、軽衝突時にはクラッシュボックスとバンパーの交換のみで補修が完了するため、他部材の修理・交換が不要となり車体のLCA (Life Cycle Assessment) に貢献し、ひいては鉄資源などの省資源化に寄与することが期待できる。

#### 参考文献

- 1) Eckerman, E. 著, 松本廉平訳: 自動車の世界史, 株式会社グランプリ出版, (1981), 289.
- 2) 自研センターニュース, 355 (2005) 4, 6-8.
- 3) 自研センターニュース, 353 (2005) 2, 6-9.
- 4) 中澤嘉明, 田村憲司, 吉田経尊, 高木勝利, 加納光寿: 新しい断面形状設計技術に基づく高効率クラッシュボックスの開発, 自動車技術会, 37 (2006) 3, 43.

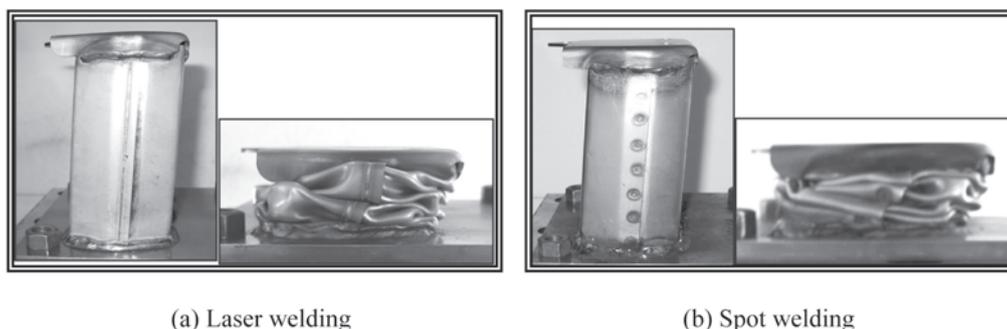


Fig.15 Drop weight test result for comparing welding methods

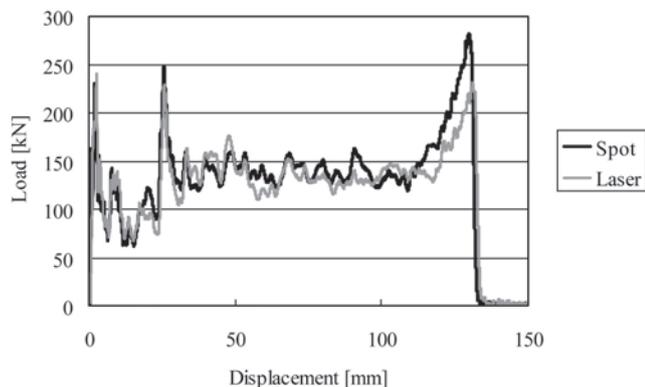


Fig.16 Comparison of Load-Displacement curves between laser weld CR-BOX and spot weld one

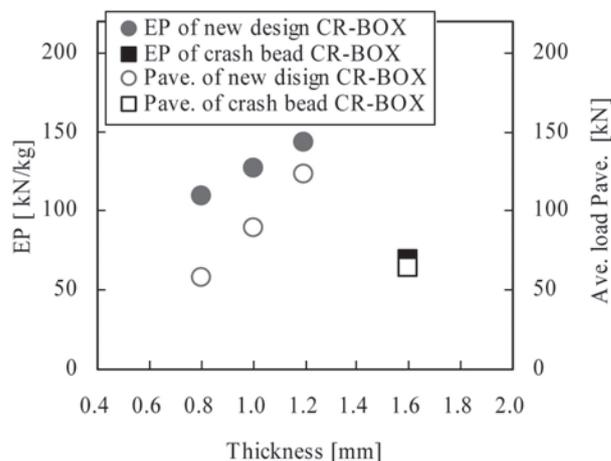


Fig.17 Comparison of efficiency of energy absorption between newly developed crash box and conventional one

- 5) 中澤嘉明, 田村憲司, 吉田経尊, 高木勝利, 加納光寿 : 高効率クラッシュボックスの開発 (第1報), 自動車技術会 学術講演会前刷集, 26 (2005) 05, 9.
- 6) 加納光寿, 高木勝利, 中澤嘉明, 田村憲司, 吉田経尊 : 高効率クラッシュボックスの開発 (第2報), 自動車技術会 学術講演会前刷集, 26 (2005) 05, 13.
- 7) Cowper, G.R. and Symonds, P.S. : Strain hardening and strain rate effect in the impact loading of cantilever beams, Brown University, Division of Applied Mathematics Report, 28 (1957) .

(2011年2月10日受付)