

博 士 学 位 論 文

自動車用衝撃吸収構造の  
設計効率化

2018年9月

金沢工業大学大学院工学研究科博士後期課程

機械工学専攻

清水 駿矢



# 目次

第1章	緒論	1
1-1	研究背景	2
1-1-1	交通事故と乗員保護	2
1-1-2	アクティブセーフティとパッシブセーフティ	2
1-2	衝撃吸収構造の研究動向	7
1-2-1	車両構成部材のアルミニウム合金への転換	7
1-2-2	圧潰によって衝撃吸収を行う部材	7
1-2-3	衝撃吸収部材の研究動向	8
1-3	本研究が解決する課題とアプローチ	12
1-3-1	現状の製品設計と問題点	12
1-3-2	概略設計手法	12
1-3-3	理想の衝撃吸収挙動	12
	参考文献	15
第2章	推定式の提案	21
2-1	はじめに	22
2-2	本研究の流れ	22
2-2-1	衝突解析と実験の精度検証	22
2-2-2	推定式と衝突解析の比較	22
2-3	まとめ	24
第3章	衝突解析の精度検証のための実験	25
3-1	はじめに	26
3-2	衝突解析手法	26
3-2-1	軸圧潰における衝突解析	26
3-2-2	断面圧潰における衝突解析	28
3-3	まとめ	40
	参考文献	41
第4章	軸圧潰衝撃吸収部材の荷重推定式構築	43
4-1	はじめに	44
4-2	寸法因子の選定と解析条件	44

4-3	ピーク荷重の推定式構築	46
4-4	平均荷重の推定式構築	51
4-5	座屈回数の推定	54
4-6	まとめ	54
第5章	断面圧潰衝撃吸収部材の荷重推定式構築	55
5-1	はじめに	56
5-2	寸法因子の選定と解析条件	56
5-3	ピーク荷重の推定式構築	58
5-3-1	リブ部ピーク荷重の推定式構築	58
5-3-2	側面部ピーク荷重の推定式構築	59
5-4	平均荷重の推定式構築	63
5-4-1	リブ部平均荷重の推定式構築	63
5-4-2	側面部平均荷重の推定式構築	64
5-4-3	押出長さについて	64
5-5	まとめ	64
第6章	実形状に対する推定式の精度評価	71
6-1	はじめに	72
6-2	実形状での座屈荷重推定	72
6-2-1	試験モデルと試験結果	72
6-2-2	解析モデルと解析結果	72
6-2-3	推定式との比較	73
6-2-4	実形状の座屈荷重推定のまとめ	73
6-3	実形状の改良案導出	81
6-3-1	目標値の設定	82
6-3-2	改良案の導出	83
6-3-3	改良点	84
6-3-4	改良案の性能評価	84
6-4	まとめ	86
第7章	結論	87

# 第 1 章

# 緒 論

## 1-1 研究背景

### 1-1-1 交通事故と乗員保護

近年、我が国を含めた主に自動車を用いて移動・運搬を行なう世界各国では、自動車による交通事故の被害を小さくするために、さまざまな安全対策を行なっている。

我が国での平成 18 年中の交通事故による死者数は表 1-1-1, 図 1-1-1 のように 6352 人で, 6 年連続の減少となるとともに, 昭和 30 年以来 51 年振りに 6000 人台前半となった。また, 平成 16 年に過去最悪を記録した交通事故発生件数及び負傷者も, 17 年に引き続き 2 年連続で減少している。しかしながら, 交通事故の発生件数は 80 万件を超え, さらに負傷者数も 8 年連続で 100 万人を超えるなど, 依然として憂慮すべき交通事故情勢にある<sup>1)</sup>。

そして, 負傷者数を状態別にみると, 図 1-1-2 のように自動車乗車中が 6 割以上(構成率 63.0%)を占め圧倒的に多く, 次いで自転車乗車中(同 15.9%), 二輪車乗車中(同 13.9%)の順に多い<sup>1)</sup>。

さらに, 交通事故件数を事故類型別にみると, 図 1-1-3 のように追突と出会い頭衝突で全体の約 6 割(構成率 58.3%)を占めるのを始め, 車両相互事故が 8 割以上(同 85.8%)を占めている<sup>1)</sup>。

このような現在の交通事故の状況から, 事故の発生件数や負傷者の減少のために, 自動車メーカーなどは多くの安全性能を有した自動車作りを行なっている。

### 1-1-2 アクティブセーフティとパッシブセーフティ

自動車の衝突安全性能向上を図る手段として 2 つのアプローチが挙げられる。一つがアクティブセーフティ(予防安全), もう一つがパッシブセーフティ(衝突安全)である。

アクティブセーフティは, 赤外線やレーザレーダなどのセンサ技術の高精度化やコンピュータ演算処理装置により, ITS(Intelligent Transport System)技術として, 自動車が衝突する前の状況を瞬時に判断して, 事故を回避する技術である<sup>2)</sup>。1991 年から運輸省(現:国土交通省)が ITS を用いた自動車安全技術開発の推進のために ASV(Advanced Safety Vehicle)プロジェクトを企画し, ASV 技術の開発普及が正しく進むように以下のような ASV の基本理念を策定した<sup>3)</sup>。

- (1) ドライバ支援の原則
- (2) ドライバ受容性の確保
- (3) 社会受容性の確保

その代表的な技術例に, 車載センサで得られた情報を用いて運転を支援する自立探知型技術として, 図 1-1-4 に示す事故回避支援システム ADA(Active Driving Assist)がある<sup>4)</sup>。これはステレオ式カメラを用いてドライバへの警報機能と事故回避ブレーキ機能を有し, ヒューマンエラーに起因する事故を予防する事故回避支援システムである。また, 図 1-1-5 に示すナビゲーション

ンから得られる前方カーブの曲率と自車の車速からオーバースピードでのカーブ進入を防止するシステムやドライバが予見できない道路わきから飛び出す歩行者情報を道路脇のインフラを用いて車両に連絡するインフラ協調通信利用システム技術なども研究されている<sup>3)</sup>。

しかし、前述した予防安全技術だけでは完全に衝突事故を避けることは難しいと考えられるため、不幸にも衝突する状態になった際の安全性にも着目する必要がある。自動車が実際に衝突する現象は車体のエンジンルーム部分のみが有効につぶれる一次衝突と、車体が潰れた後に乗員がハンドルなどの内装と衝突する二次衝突に分けられる。一次衝突では車体が潰れる際のエネルギー吸収特性を向上する技術が、二次衝突では乗員の衝突挙動をシートベルトやエアバッグでコントロールする技術開発が行われており、これらの技術をパッシブセーフティと呼ぶ。乗員が内装部品に衝突するまでの距離(時間)で、また人体耐性を越えない減速度範囲で乗員はシートベルトによって初期拘束され、最終的には展開したエアバッグの収縮動作に対応して頭部と胸部がソフトランディングする設計となっており、この加害性を低下させるためにエアバッグ展開容量が連続的に変化する技術も開発されている<sup>5)</sup>。

本研究では、パッシブセーフティに焦点を当てた研究を行う。なかでも、一次衝突においてエアバッグが作動しない低速領域において効果を発揮する車体構造であるバンパレインフォースを対象とする。

Table 1-1-1 Traffic accident occurrence in 2006<sup>1)</sup>

		構成率	前年比	指数
発生件数	88万6,864件	100.0%	-4万6,964件、-5.0%	1.15倍
死亡事故	6,147件	0.7%	-478件、-7.2%	0.65倍
重傷事故	6万1,084件	6.9%	-4,529件、-6.9%	0.85倍
軽傷事故	81万9,633件	92.4%	-4万1,957件、-4.9%	1.19倍
死傷者数	110万4,551人	100.0%	-5万8,953人、-5.1%	1.16倍
死者数	6,352人	0.6%	-519人、-7.6%	0.64倍
負傷者数	109万8,199人	99.4%	-5万8,434人、-5.1%	1.17倍
重傷者	6万4,122人	5.8%	-4,828人、-7.0%	0.83倍
軽傷者	103万4,077人	93.6%	-5万3,606人、-4.9%	1.20倍

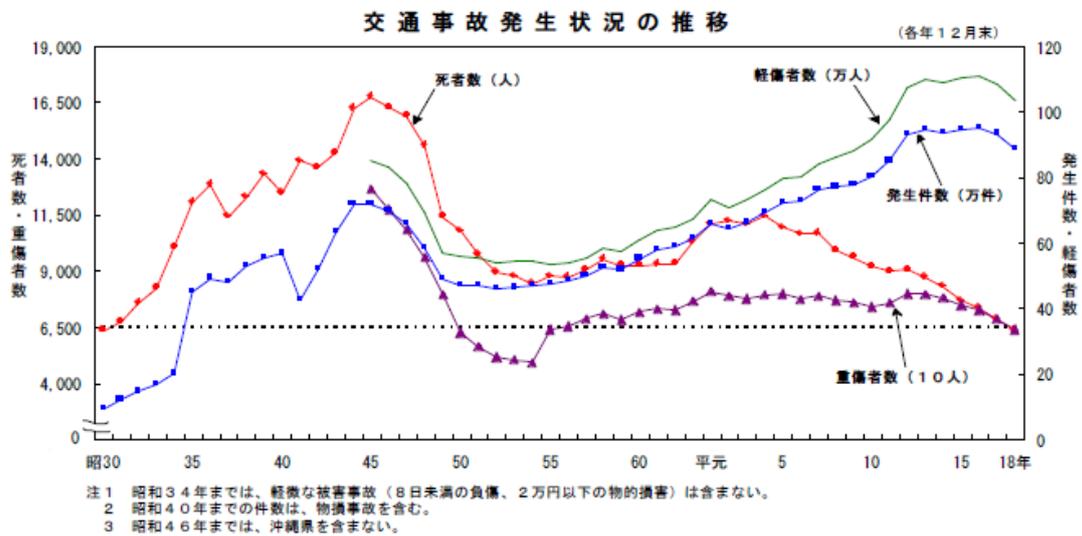


Fig. 1-1-1 Transition of traffic accident occurrence<sup>1)</sup>

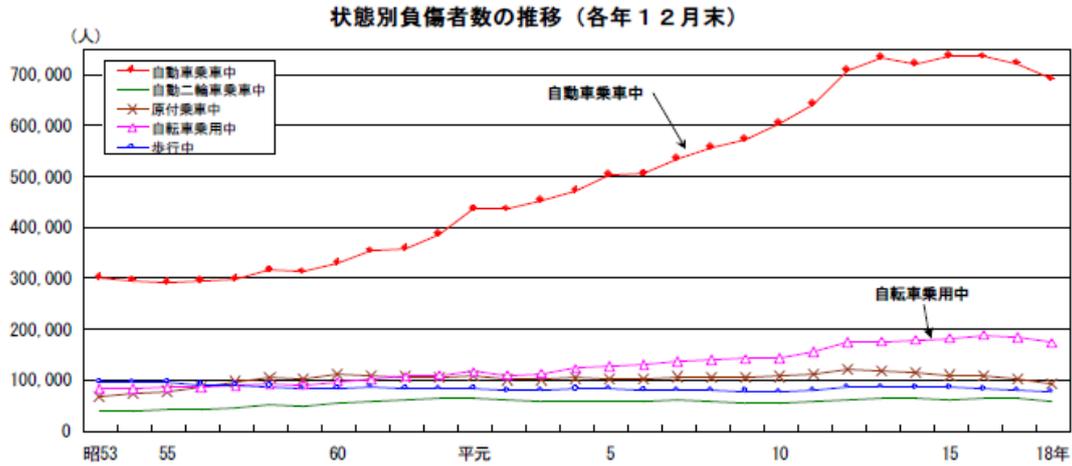


Fig. 1-1-2 Changes in the number of injured people classified by means of transportation<sup>1)</sup>

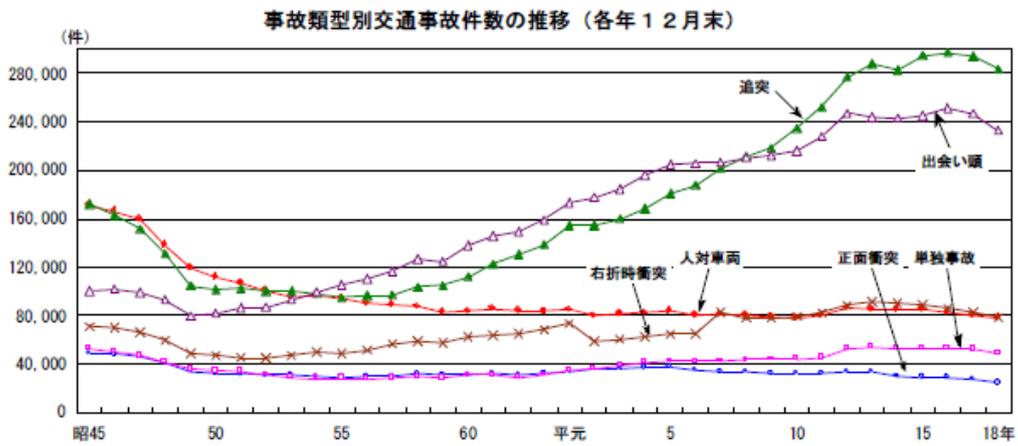
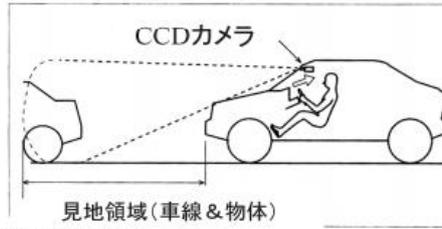
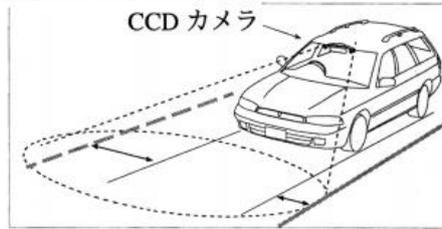


Fig. 1-1-3 Trends in the number of traffic accidents classified by accident type<sup>1)</sup>

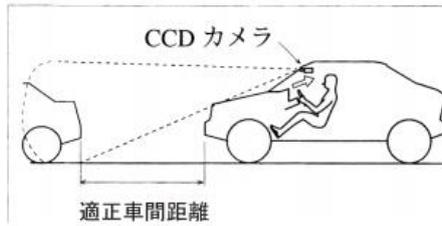
①車間距離警報システム  
(衝突警報システム)



②車線逸脱時警報システム



③車間距離自動維持運転システム



④事故回避自動操作システム(衝突軽減自動ブレーキ)

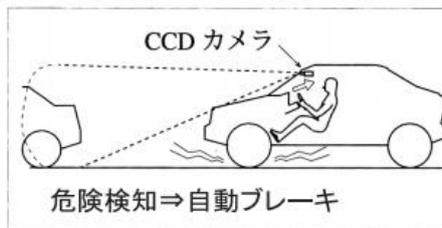


Fig. 1-1-4 Outline of active driving assist<sup>4)</sup>

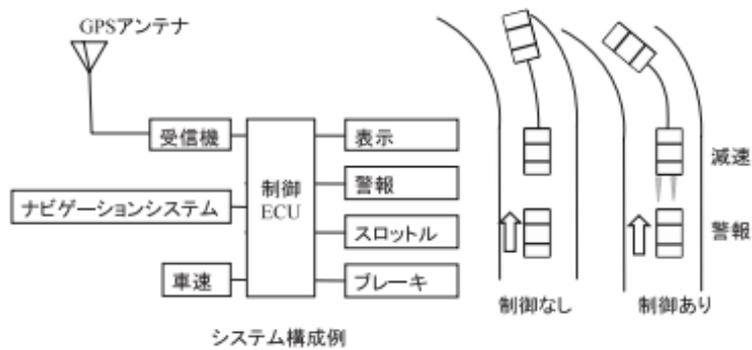


Fig. 1-1-5 Corner prediction system<sup>3)</sup>

## 1-2 衝撃吸収構造の研究動向

### 1-2-1 車両構成部材のアルミニウム合金への転換

近年資源利用に関する様々な問題が顕在化しており、その対策が広く求められている。世界人口は現在の70億人から2050年に90億人に達し、それに伴い1次エネルギー需要は2030年に現状の1.5倍まで増加が予想され<sup>6)</sup>、現在の資源消費ペースを維持すると、2050年時点の一部の金属資源は枯渇の懸念が指摘されている<sup>7)</sup>。また地下資源採掘は森林破壊等の環境への悪影響を及ぼし、陸上の生物多様性低下が警告されている<sup>8)</sup>。上記のような問題認識に対し、自動車メーカーは様々な取り組みを行っている<sup>9)</sup>。

その取り組みの一つとして、車両構成部材のアルミニウム合金への転換が挙げられる。環境問題の対策として、CO<sub>2</sub>の排出を削減する必要がある。その有効な手段のひとつが、車両の軽量化による低燃費化である。自動車の重量を100kg軽量化することは、1km/Lもの燃費向上効果に匹敵するといわれている<sup>10)</sup>。また、排気ガス全体の削減や取り回し性、運動性能向上などのメリットもある。

軽量化対策は、従来使用されていた材料から軽量なものに代えることで容易で有効な手段であるため、さまざまな材料の検討が行なわれている。なかでも、アルミニウム合金は、従来使用されていた鋼板と比較して比重が約1/3であるだけでなく、以下のようなメリットがある<sup>11)</sup>。

#### (1) 比強度が高い

合金にすることや処理を変えることで強度を自由に変化させることができる。

#### (2) 耐食性が高い

酸化被膜が生成される。

#### (3) 加工性が良い

圧延、押出、鍛造、成形などの塑性加工が容易である。

#### (4) リサイクルがしやすい

使用後に再度溶解してアルミニウム地金として再生できる。この再生に必要なエネルギーは、ボーキサイト鉱石から新地金を製造するエネルギーのわずか3%であり、品質的にも高品質の地金が得られる。

上記のメリットの中でも、図1-2-1に示す押出成形の特徴として一定断面の連続成形が可能な点に着目し、バンパレインフォースに対してアルミニウム合金が採用されている。

### 1-2-2 圧潰によって衝撃吸収を行う部材

自動車衝突時に図1-2-2のように圧潰することで衝撃吸収を行う部材には、高速での衝突時に効果を発揮するものと低速での衝突時に効果を発揮するものがある。下記にそれぞれの代表例と効果を示す。

#### (1) 高速での衝突時に効果を発揮する部材

- ・Aピラー、Bピラー

衝突時に乗員の居住空間を確保する働きがある。

- ・フロントサイドメンバー

衝突時に入力荷重を後方の部材に伝達・分散させることで衝撃を緩和する働きがある。また、構成部材としての役割はサスペンションやエンジン等を支持するものである。

## (2) 低速での衝突時に効果を発揮する部材

### ・バンパレインフォース

衝突時にフロントサイドメンバー等，他の構成部材の損傷を最小限に抑える働きがある。バンパレインフォースは，図 1-2-3 のようにバンパと車体を支持している構成部材であり，バンパビーム（以下ビーム）とバンパステー（以下ステー）から構成されている。バンパレインフォースは本来，バンパを支持するのみの役割を担っていたが，前述の環境問題に対する軽量化の回答の一つとして，車両の構成部材そのものに衝撃吸収特性を付与する流れの中で低速域での衝撃吸収の役割を付与された<sup>12-13)</sup>。なお，本研究における低速域とは，衝突時にエアバッグが作動しない領域である 20km/h 以下を意味する。

ビームおよびステーは共にアルミニウム合金の押出成形によって成形されている。押出成形は一定断面を成形できるメリットがあり，近年成形技術の進歩により成形可能な形状も非常に多くなっている<sup>14)</sup>。また，部材の設置方向によって押出方向に圧潰させる軸圧潰と押出方向に対して直角に圧潰させる断面圧潰に分けられる。同一形状の部材に対して軸圧潰と断面圧潰させた場合に得られる荷重-変位曲線は，異なる結果が得られる。なおどちらの場合も圧潰直後に荷重が増大している。本研究では，この際に部材に加わる荷重を初期ピーク荷重と定義する。また，初期ピーク荷重以降の荷重値に関しては，ほぼ一定に推移していることが分かる。本研究では，この際に部材に加わる荷重を平均荷重と定義する。

バンパレインフォースは小さなスペースに収める必要があり，かつ多くの衝撃を吸収しなければならない<sup>15-27)</sup>。そのため，様々な断面形状を成形することができ，かつ異なる 2 つの圧潰形態によって得られる衝撃吸収性能が変化することから，これまで様々な形状の検討がされてきた。

## 1-2-3 衝撃吸収部材の研究動向

### ・薄肉円筒に着目した研究

薄肉円筒部材に着目した場合，準静的弾性については，Euler から始まる研究の流れの中でエネルギー法により明らかにされている<sup>18-19)</sup>。ただし，これらの方法は外力が保存力なら適切であるが，一般の非保存力であれば問題を生じる可能性がある<sup>20)</sup>。また，非弾性の場合は塑性ヒンジ・モデルのような力学的な理想化に基づく研究が発展してきた<sup>21-22)</sup>。実験や数値解析による研究も数多く報告されている<sup>23-37)</sup>。宇治橋らは，薄肉円筒の圧潰とエネルギー吸収特性について計測法や評価法に着目することで，衝撃吸収特性の定量的な評価を行っている<sup>24)</sup>。谷村らは，連続して発生する座屈挙動に着目し座屈現象そのものの評価を行っている<sup>25)</sup>。牛島らは，加工硬化を考慮した平均荷重の評価という非常に検討範囲を絞り込んだ研究を行っている<sup>26)</sup>。さらに，

圧潰の形態に着目した研究もなされている。村瀬らは、円筒の軸圧潰に対して実験による荷重値の測定を行っている<sup>31)</sup>。佐々木らは、円筒の軸圧潰が軸対称に座屈する点に着目し、衝撃吸収材としての評価を行っている<sup>32)</sup>。藤原らも同様に、円筒の軸圧潰特性に着目して研究を進めている<sup>33)</sup>。

#### ・多角形断面に着目した研究

これまでの研究では多くの場合円筒を対象とした研究であったが、近年部材の断面形状に焦点を当てた研究も多くなされている。前述の円筒や角筒など特定形状の部材の衝撃塑性座屈に関する研究の歴史は古いが、幾何形状を根本的に変えて部材全体の衝撃吸収エネルギー吸収特性を改善する研究は、緒に就いたばかりである<sup>38)</sup>。そのため、薄肉多角形部材を対象とした研究に注目が集まっている<sup>39-49)</sup>。中澤らは、多角形断面について凹凸を設け断面形状を複雑化させた場合や、多角形断面の寸法因子と衝撃吸収特性の関係について研究を行っている<sup>38,40,41)</sup>。康井らも同様に、薄肉多角形部材に着目し、衝撃吸収特性の評価を行っている<sup>49)</sup>。

#### ・部材の構成材料に着目した研究

また、部材を構成する材料そのものや物性に着目した研究もなされている。武智らは、鉄鋼材料の金属組織に着目し、拘束変形挙動との関係性について評価を行っている<sup>39)</sup>。平本らは、FEM(Finite Element Method)による高強度熱延鋼板の衝突解析を行っている<sup>42)</sup>。水井らは、高張力鋼板を用いた正面衝突性能の向上に関する研究を行っている<sup>43)</sup>。国重らは、分散強化と固溶強化を組み合わせた自動車用鋼板について拘束変形特性の向上を目的としている<sup>44)</sup>。高木らは、高張力鋼板の高速変形挙動を、三浦らは組織の観点から同様の研究を行っている<sup>45,47)</sup>。

#### ・複合形状に着目した研究

より実製品に近い形として、複合形状を対象とした研究もなされている。村瀬らは、薄肉複合部材の軸圧縮試験による評価と、曲げ試験による特性評価を行っている<sup>52)</sup>。また、前述の結果をもとに、圧縮時の動的崩壊挙動や崩壊特性の推定も行っている<sup>53)</sup>。西村らは、薄肉複合材料の適用範囲を低速度域に絞りこみ、上記と同様の研究を行っている<sup>54)</sup>。

#### ・折紙構造に着目した研究

近年、折紙構造が注目されている。折紙構造を製品に適用することで小型で持ち運びがしやすい等の利点がある。この利点を生かし、宇宙ステーションへ応用することで地上では収納した状態でありながら、宇宙空間では展開することで本来の大きさに戻るなどの成果がある。

また、小型化だけでなく蛇腹のような構造を作製することで、衝撃吸収特性を付与することが可能である。趙や萩原らは、折紙構造の特性を生かし衝

突方向のばらつきを考慮した部材設計や特性の最適化を行っている。形状に対して多くの研究を行っており，半割型の部材や円筒型，らせん型などがある<sup>55,56,57,58</sup>。楊らは，折紙構造を軽量化へ反転させる，複数の構造を組み合わせるなどの研究を行っている<sup>59,60</sup>。

#### ・ 自動車用衝撃吸収構造に特化した研究

これまで様々な衝撃吸収構造について研究動向を確認してきた。円筒形状については形状や実験方法，解析による評価手法など多くのことが明らかとなっていることがわかった。それに対して，衝撃吸収特性を高めるために多角形断面や複合形状，折紙構造など多くの形状パターンが評価され始めている。さらには，部材の構成材料の物性そのものに着目し，マクロの観点から衝撃吸収特性を評価する試みも進んでいる。

上記のように現状，様々なアプローチのもと研究が進められているが，自動車用衝撃吸収構造に特化することでより詳細な設計を行っている例もある。康井らは，斜め衝撃荷重を受ける車両用衝撃吸収構造に着目して圧潰特性の評価を行っている<sup>64</sup>。赤崎らは，中空アルミ押出材をクラッシュボックスに適用した場合の圧潰特性について評価を行っている<sup>66</sup>。さらに，萩原らは折紙構造をフロントサイドメンバーに適用する試みも進めている<sup>55</sup>。

#### ・ 研究動向のまとめ

衝撃吸収構造に着目した場合，多くの研究がなされていることがわかった。なかでも円筒断面については様々な観点から多くの研究者によって研究がなされている。それに対して，角筒や複合形状に対する研究は発展の最中であり，今後幅広く研究がなされていくと考えられる。現在の研究では対象とする形状を絞り込み，衝撃吸収特性の評価を行う場合がほとんどである。

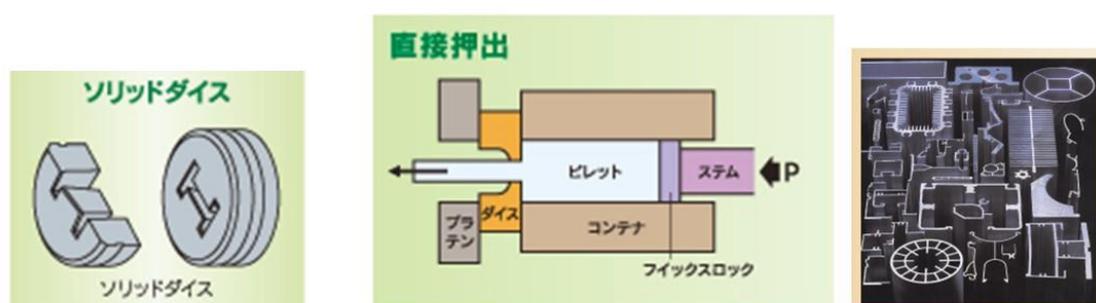
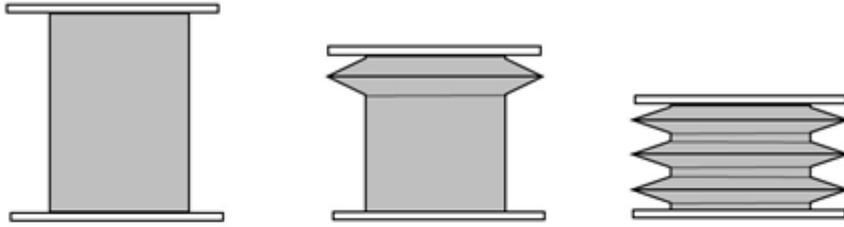


Fig. 1-2-1 Extrusion molding method and molded article shape<sup>68)</sup>

壓潰過程



壓潰荷重

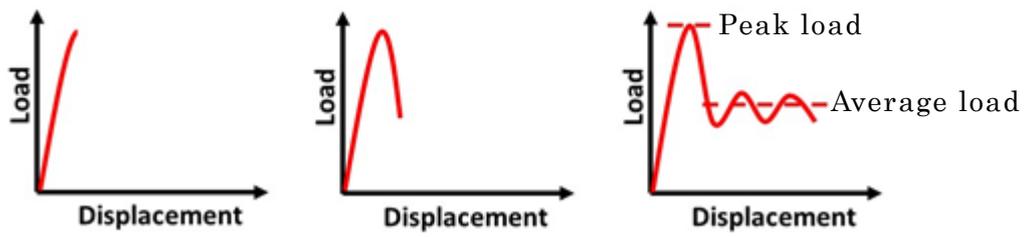


Fig. 1-2-2 Impact absorption by crush

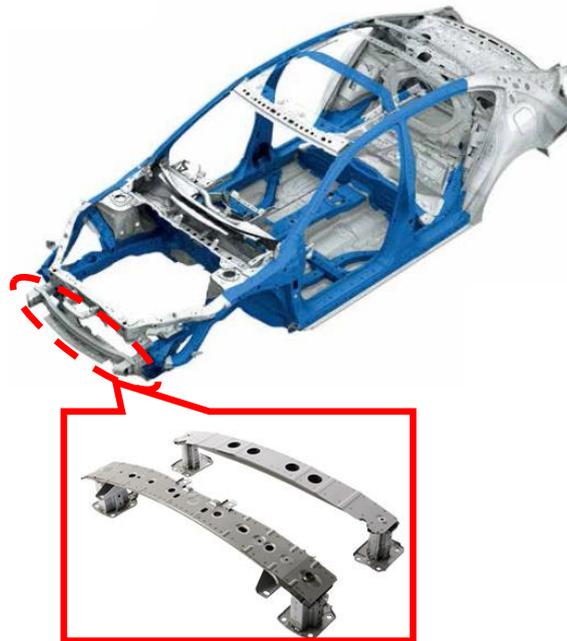


Fig. 1-2-3 Bumper reinforcement

## 1-3 本研究が解決する課題とアプローチ

### 1-3-1 現状の製品設計と問題点

従来の設計過程では、図 1-3-1 に示すように「形状の提案」「有限要素モデルの構築」「有限要素解析による性能評価」を一連の流れとしていた。モデルの構築、有限要素解析には多くの時間を要することから、従来の製品開発では形状決定までに期間を要していた。そのため、これまでも塑性関節モデルを利用した軸圧潰解析<sup>61-62)</sup>、オフセット衝突時の衝撃圧潰特性評価<sup>63-64)</sup>、柱状シェル構造材の多目的最適設計が行われ<sup>65-66)</sup>設計時間の短縮を図ってきた。しかしながら、概略設計が行えるような研究は多くなされていない。

### 1-3-2 概略設計手法

本研究で考案する概略設計手法は、図 1-3-2 に示すように従来の製品設計過程の初期段階に使用するものである。従来の設計では、図 1-3-1 のように形状を提案した後有限要素解析による性能評価を行っている。その結果、要求性能を満たさない場合は再び形状の提案に戻るといったサイクルが組まれている。本設計手法は前述のトライ&エラーによる製品開発ではなく、あらかじめ考えられる形状に対して、その形状のもつ大まかな衝撃吸収特性を把握することで多くの時間を要する有限要素解析による性能評価を最終形状の決定にのみ適用することが可能である。そのため、図 1-3-2 のように形状決定後に性能評価をするのではなく、形状検討の段階で性能評価を行う。例として、正方形断面の衝撃吸収部材に対して形状検討を行う際、考えるすべての形状パターンを一つずつ解析評価するのではなく、概略設計手法による大まかな性能評価を行い、形状決定後に衝突解析による詳細な評価を行うものである。ただし、概略設計を行うためには形状と衝撃吸収特性の関係をまとめた膨大なデータベースが必要となる。

そのため、本研究では、一般的な自動車用衝撃吸収部材を対象としてバンパレインフォースに着目した。バンパレインフォースを構成するステーは軸圧潰の正方形断面、ビームは断面圧潰の台形断面を前提条件として、形状と衝撃吸収特性の評価が可能な推定式を構築した。この推定式を用いることで、形状の最終決定までに要していた時間を削減することができ、従来よりも多くの形状に対して性能評価が可能となる。また、本手法の特徴として設計者の技量や知識によって使用目的が変わる。設計の初期段階や設計の経験が少ない設計者が使用する場合、大まかな形状を絞り込む段階で本手法が適用できる。それに対して、従来の形状からの設計変更段階や設計の経験が多い設計者が使用する場合、より細かい部分の形状設計において適用できる。以上のように、本手法を用いる設計者の技量や設計の段階によって、幅広い範囲で本手法が効果的である。

### 1-3-3 理想の衝撃吸収挙動

本研究では、従来の研究で着目されてこなかった衝撃吸収挙動に着目する。衝撃吸収挙動は、荷重-変位曲線の傾向と同義である。通常、衝撃吸収部材を

圧潰させた際に生じる衝撃吸収挙動は図 1-3-3 のように圧潰初期に荷重が増大する区間があり、その後は一定に推移する。この挙動の問題点を下記に示す。

- (1) 圧潰によって衝撃吸収を開始するまでにステアに大きな荷重が加わるため、衝突直後のステアが変形していない区間において、乗員（人身事故時は被害者にも）に大きな衝撃が加わる。
- (2) 一度圧潰を開始してしまうと一定間隔で座屈するため、ステアの変位量と加わった荷重の力積であるエネルギー吸収量が増加しにくい。

そこで、図 1-3-4 のように初期に部材に加わる大きな荷重（以下初期ピーク荷重）を低減し、初期ピーク以降の荷重（以下平均荷重域の荷重）を徐々に増加させることで、乗員への衝撃を緩和しつつエネルギー吸収量を稼ぐことができると考えられる。

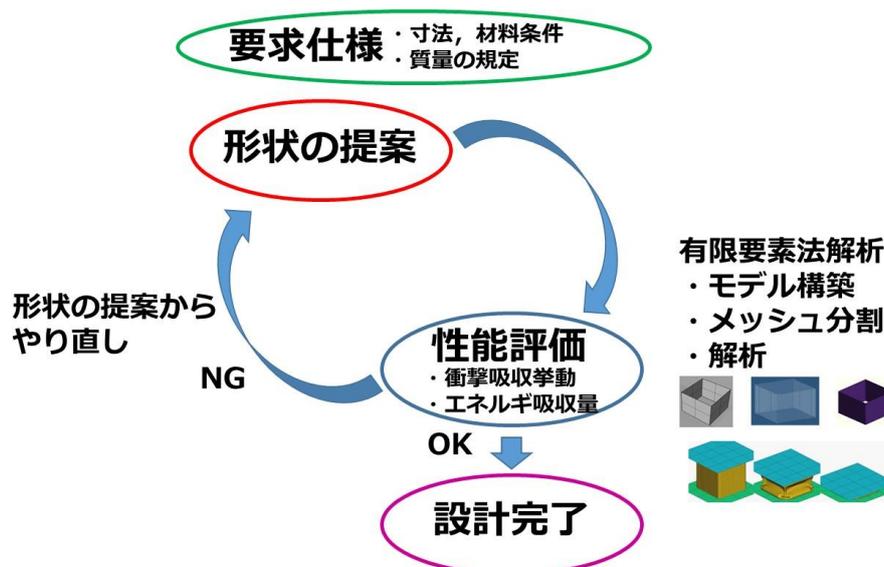


Fig. 1-3-1 Current design process

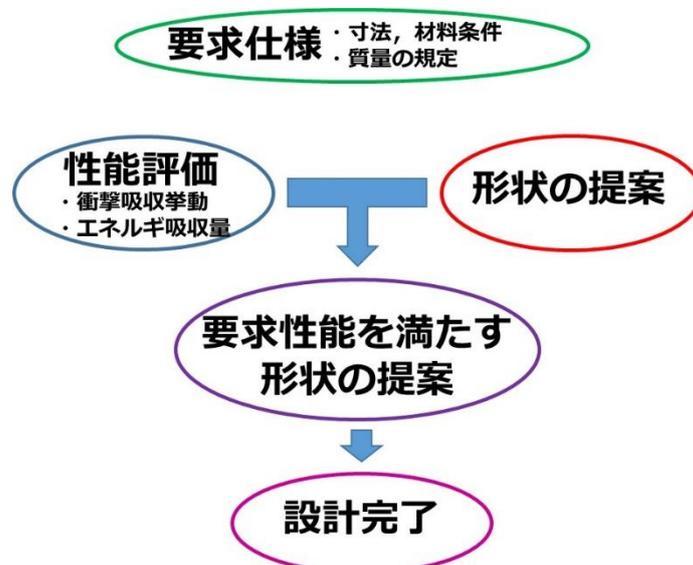
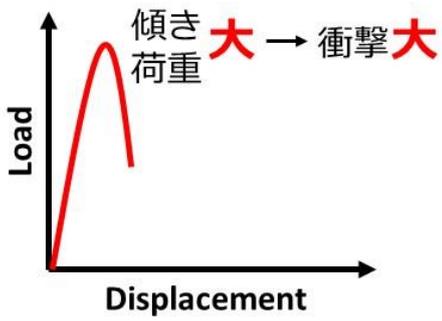


Fig. 1-3-2 Design process of this research

圧潰初期



圧潰後期

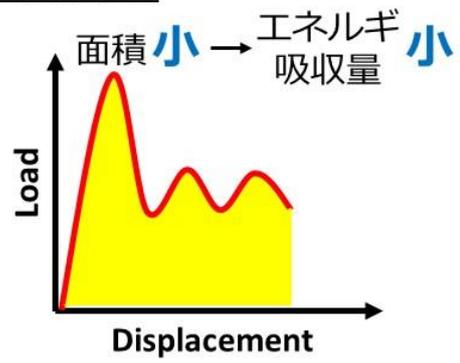


Fig. 1-3-3 Problems of shock absorption

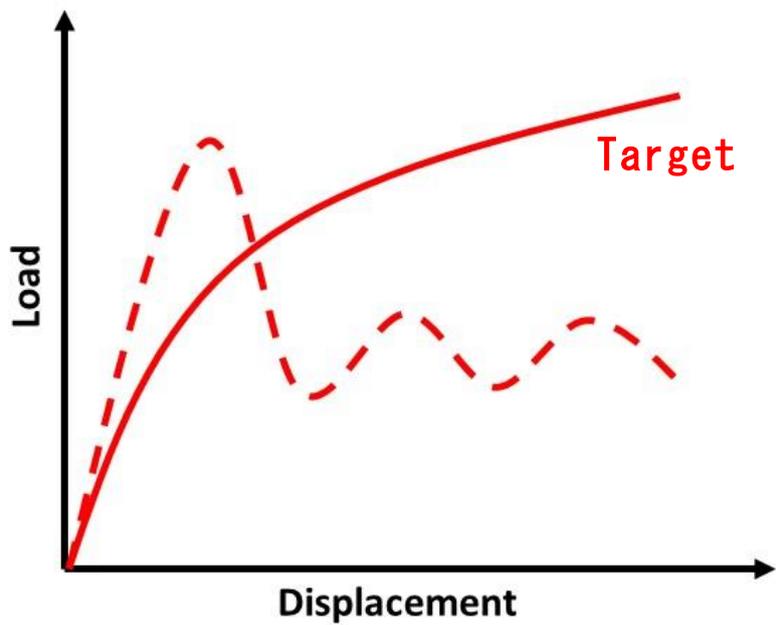


Fig. 1-3-4 Ideal impact absorption behavior

## 参考文献

- 1). 警視庁交通局：「平成 18 年中の交通事故の発生状況」, pp.26-28
- 2). 藤田 浩一, 所 節夫, 藤波 宏明, 川崎 智哉, 加藤 秀樹：「プリクラッシュセーフティの開発」, 自動車技術, Vol.59, No.12, pp.85-90, 2005
- 3). 国土交通省ホームページ：  
<http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/index.html>
- 4). 株式会社 SUBARU ASV 広報資料および新卒採用ホームページ：  
<http://www.fhi.co.jp/jinji/guide/visonandvalue/techonology/techonology03.html>
- 5). 槇 徹雄：「自動車の安全性を高める技術」, 日本ロボット学会, Vol.27, No1, pp.16-19, 2009
- 6). 青木 昇二：「自動車のアルミニウム化動向とリサイクル技術」, 軽金属学会論文集, 第 63 巻, 第 7 号, pp.260-270, 2013
- 7). 原田 幸明, 島田 正典, 井島 清：「2050 年の金属使用量予測」, 日本金属学会論文集, 第 71 巻, 第 10 号, pp.831-839, 2007
- 8). The Economics of Ecosystems and Biodiversity : "An Interim Report", European Communities, 2008
- 9). 日産自動車株式会社ホームページ NGP2016 :  
<http://www.nissan-global.com/JP/ENVIRONMENT/APPROACH/GREENPROGRAM/>
- 10). 福富 洋志：「自動車軽量材料の開発技術」, シーエムシー出版, p.136
- 11). 神尾 彰彦：「アルミニウム新時代—軽量・高強度と新機能を追求」, 工業調査会, pp13-27, 1993
- 12). 榎田 努, 三村 耕司, 梅寄 祐樹：「動的軸圧潰する薄肉円管のエネルギー吸収能とモード分岐」, 日本材料学会論文集, Vol.55, No.9, pp.799-806, 2006
- 13). 陳玳珩, 増澤崇, 尾崎伸吾：「リブやリングを有する薄肉円筒の軸圧潰」, 日本材料学会論文集, Vol.57, No.7, pp.696-703, 2008
- 14). 群馬アルミニウム株式会社ホームページ
- 15). 山崎 光悦, 韓 晶, 石川 秀樹：「円筒の衝撃座屈圧潰吸収エネルギー最大化設計に関する研究」, 日本機械学会論文集(A 編)64 巻 620 号, pp.239-245-2998
- 16). 韓 晶, 山崎 光悦：「リブ付・リブなし角筒の衝撃圧潰吸収エネルギー最大化設計に関する研究」, 日本機械学会論文集(A 編)65 巻 632 号, pp.196-201, 1999
- 17). 韓 晶, 山崎 光悦：「薄肉曲り部材の衝撃圧潰吸収エネルギー最大化設計に関する研」, 日本機械学会論文集(A 編)66 巻 651 号, pp.33-39, 2000
- 18). S.P.Timoshenko and J.M.Gere : "Theory of elastic stability",

McGraw-Hill, pp.457-473-2961

- 19). W.Flugge : "Stresses in shells", Springer-Verlag, pp.439-459, 1973
- 20). V.V.Bolotin : "Nonconservative problems of the theory of elastic stability", Pergamon Press, pp.86-104-2963
- 21). J.M.Alexander : "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading", The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol.13, Pt.1, pp.10-15-2960
- 22). W.Abramowicz and N.jones : "Dynamic axial crushing of circular tubes", International Journal of Impact Engineering, Vol.2, No.3, pp.263-281, 1984
- 23). W.H.Horton, S.C.Bailey and A.M.Edwards : "Nonsymmetric buckle patterns in progressive plastic buckling", Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, Vol.23, No.2, pp5-43-444-2966
- 24). 宇治橋 貞幸, 石井 義唯, 安達 忠晴, 太田 道隆 : 「衝突による薄肉円筒の圧潰とエネルギー吸収特性 (計測法および評価法について)」, 日本機械学会論文集 (A 編), 59 巻 558 号, pp.193-299, 1993
- 25). 谷村 眞治, 三村 耕司, 石川 雄一, 榎田 努 : 「鋼製薄肉円管の連続塑性座屈に関する研究」, 日本機械学会論文集 (A 編), 66 巻 642 号, pp.176-183, 2000
- 26). 牛島 邦晴, 陳 玳珩, 増田 健一, 春山 繁之 : 「加工硬化を考慮した円筒の軸圧潰における平均荷重の評価」, 日本機械学会論文集(A 編) 72 巻 718 号, pp.54-61, 2006
- 27). Alexander, J.M., An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells under Axial Loading, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 13-2, pp.10-15-2960
- 28). Abramowicz, W. and Jones N., Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes, International Journal of Impact Engineering, 3-2, pp.263-281, 1984
- 29). Wierzbicki, T. et al., Alexander Revisited-A Two Folding Elements Model of Progressive Crushing of Tubes, International Journal of Solids and Structures, 29- 24, pp.3289-3295-2992
- 30). Al Galib, D. and Linam, A., Experimental and Numerical Investigation of Static and Dynamic Axial Crushing of Circular Aluminium Tubes, Thin-Walled Structures, No.42, pp.1103-2137, 2004
- 31). 村瀬 勝彦, ノーマン・ジョーンズ : 「円管の衝撃軸圧縮塑性座屈実験」, 材料, Vol.42, No.483, pp.1420-1426, 1993
- 32). 佐々木 健, 黒川 知明 : 「円管の衝撃軸対称崩壊過程と緩衝材評価」, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.63, No.616, pp.2610-

- 2617, 1997
- 33). 藤原 昭文, 橋村 徹:「円筒の軸圧潰特性」, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.64, No.620, pp.1069-1076, 1998
  - 34). Alghamdi, A.A.A., Collapsible Impact Energy Absorbers: an Overview, Thin-Walled Structures, No.39, pp.189-213, 2001
  - 35). Guillow, S.R. et al., Quasi-Static Axial Compression of Thin-Walled Circular Aluminium Tubes, International Journal of Mechanical Sciences, No.43, pp.2103-2123, 2001
  - 36). Bardi, F.C. et al., On the Axisymmetric Progressive Crushing of Circular Tubes under Axial Compression, International Journal of Solids and Structures, No.40, pp.3137-3156-2003
  - 37). Abbas, H. et al., Curved Fold Model Analysis for Axisymmetric Axial Crushing of Tubes, Thin-Walled Structures, No.41, pp.639-661, 2003
  - 38). 中澤 嘉明, 田村 憲司, 日下 貴之, 吉田 経尊, 北條 正樹:「薄肉多角形断面部材の塑性座屈挙動に及ぼす断面凹型化の効果」, 材料, Vol.56, No.11, pp.1042-1048, 2007
  - 39). 武智 弘, 高橋 学, 伊藤 耿一, 遠藤 孝雄, 友田 陽:「自動車用鉄鋼材料の金属組織と高速変形挙動」, 鉄と鋼:日本鉄鋼協会会誌, Vol.88, No.11, pp.703-714-3002
  - 40). 中澤 嘉明, 田村 憲司, 日下 貴之, 北條 正樹:「薄肉多角形部材の塑性座屈挙動に及ぼす断面形状因子の影響」, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.73, No.727, pp.331-337, 2007
  - 41). 中澤 嘉明, 田村 憲司, 日下 貴之, 北條 正樹:「薄肉多角形部材の塑性座屈挙動に及ぼす板厚の影響」, 日本機械学会論文集 (A編), Vol. 73, No.731, pp.828-834-3007
  - 42). 平本 治郎, 比良 隆明, 金子 真次郎, 坂田 敬, 阿部 英夫:「FEMによる歪み時効硬化型新高強度熱延鋼板の衝突解析」, 材料とプロセス, Vol.14, No.6, pp.1094-2097, 2001
  - 43). 水井 直光, 福井 清之, 小嶋 啓達, 山本 三幸, 川口 喜昭, 岡本 篤樹:「高張力鋼板の適用による車体の正面衝突安全性向上の基礎検討」, 材料とプロセス Vol.9, No.6, pp.1100-1103-2996
  - 44). 国重 和俊:「分散強化と固溶強化の組み合わせによる自動車用鋼板の高速変形特性の向上」, ふえらむ: 日本鉄鋼協会 会報, Vol.12, No. 9, p.600, 2007
  - 45). 高木 周作, 三浦 和哉, 古君 修, 谷村 眞治:「高張力薄鋼板の高速変形挙動」, 材料とプロセス Vol.9, No.6, pp.1108-1111, 1996
  - 46). 高橋 学, 吉田 博司:「鋼の高速変形挙動に及ぼす予加工と焼き付け硬化の影響」, 材料とプロセス, Vol.14, No.6, pp.1098-1101, 2001
  - 47). 三浦 和哉, 高木 周作, 比良 隆明, 古君 修, 小原 隆史, 谷村 眞治:「高張力鋼板の高速変形挙動におよぼす組織の影響」, 自動車用材料

- シンポジウム, pp.57-64-2997
- 48). 東 健司, 向井 敏司, 谷村 眞治:「高速変形特性と材料のミクロ組織」, 材料, Vol.42, No. 48, pp.1414-2419, 1993
  - 49). 康井 義明, 細見 光史, 鬼武 章:「衝撃軸圧潰荷重を受ける各種多角形薄肉断面構造部材の動的エネルギー吸収特性」, 軽金属, 第 55 巻 第 6 号, pp.252-258, 2005
  - 50). A.K.Toksoy and M. Guden, "Partial Al form filling of commercial 1050H14 Al crash boxes:The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption", Thin-Walled Structures, Vol.48, pp.482-494-3010
  - 51). A. Darvizeh, M. Darvizeh, R. Ansari and A. Meshkinzar, "Effect of low density, low strength polyurethane form on the energy absorption characteristics of circumferentially grooved thick-walled circular tubes", Thin-Walled Structures, Vol.71, pp.81-90, 2013
  - 52). 村瀬 勝彦, 西村 尚哉, 恩田 貴量:「薄肉複合部材の動的崩壊挙動-軸圧縮試験および曲げ試験による特性評価-」, 材料, Vol.60, No.6, pp6-27-532, 2011
  - 53). 村瀬 勝彦, 西村 尚哉, 恩田 貴量, 渡邊 武:「薄肉複合部材の動的崩壊挙動-塑性崩壊特性の推定-」, 材料, Vol.61, No.11, pp.875-880, 2012
  - 54). 西村 尚哉, 恩田 貴量, 渡邊 武, 村瀬 勝彦:「薄肉複合部材の動的崩壊挙動-充填効果係数による低変形速度域におけるエネルギー吸収量の推定-」, 材料, Vol.65, No.3, pp.233-238, 2016
  - 55). 趙 希禄, 胡 亜波, 荻原 一郎:「衝突方向のばらつきを考慮した半割り型自動車サイドメンバーの圧潰エネルギー吸収性能のロバスト最適化」, 日本機械学会論文集 (A 編), 76 巻 767 号, pp.86-93, 2010
  - 56). 趙 希禄, 胡 亜波, 荻原 一郎:「折紙工学を利用した円筒薄肉構造物の衝突圧潰特性の最適設計」, 日本機械学会論文集 (A 編), 76 巻 761 号, pp.10-17, 2010
  - 57). 荻原 一郎, 山本 千尋, 陶 鑫, 野島 武敏:「反転らせん型モデルを用いた円筒形折り構造の圧潰変形特性の最適化検討」, 日本機械学会論文集 (A 編), 70 巻 689 号, pp.364-3, 2004
  - 58). 趙 希禄, 胡 亜波, 荻原 一郎:「折紙工学援用による半割り型自動車サイドメンバーの衝突圧潰エネルギー吸収性能に関する研究」, 日本機械学会論文集 (A 編), 76 巻 769 号, pp.1-8, 2010
  - 59). 楊 陽, 趙 希禄, 戸倉 直, 荻原 一郎:「トランスコアパネルからなる軽量化構造の衝突エネルギー吸収性能向上」, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.845, pp.1-13, 2017
  - 60). 楊 陽, 奈良 知恵, 荻原 一郎:「二枚貼り折紙構造のエネルギー吸収特性」, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.815, pp.1-14-3014

- 61). 十河 敬寛, 宇治橋 貞幸, 松本 浩之, 足立 忠晴 : 「薄肉管の衝撃軸圧潰によるエネルギー吸収特性の解析」, 日本機械学会論文集(A編), 63巻 605号, pp.146-151, 1997
- 62). 宇治橋 貞幸, 十河 敬寛, 松本 浩之, 足立 忠晴 : 「薄肉管の衝撃軸圧潰によるエネルギー吸収能」, 材料, Vol.42, No.483, pp.1427-1431, 1993
- 63). 趙 希祿, 胡 亜波, 荻原 一郎 : 「衝突方向のばらつきを考慮した折り紙型自動車サイドメンバーの圧潰エネルギー吸収性能のロバスト最適化」, 日本機械学会 CD-ROM 論文集 No.10-8, 2010
- 64). 康井 義明, 深津 敬博 : 「斜め衝撃荷重を受ける車両用薄肉構造部材の衝撃圧潰特性」, 東海大学紀要工学部 Vol.47, No.2, pp.109-114-3007
- 65). 山崎 光悦, 北山 哲士, 牛田 卓宏 : 「衝撃吸収エネルギーおよびピーク荷重を考慮した柱状シェル構造材の多目的最適設計」, 日本機械学会論文集(A編) 75巻 752号, pp.126-132, 2009
- 66). 赤崎 圭輔, 橋村 徹 : 「中空アルミ押出型材を用いたクラッシュボックスの圧潰特性」, 日本機械学会 2010年度年次大会講演論文集
- 67). 水野 拓磨, 瀬戸 雅宏, 山部 昌 : 「衝撃吸収部材の簡易設計手法に関する研究」, 2010年自動車技術会秋季学術講演会
- 68). 株式会社 UACJ ホームページ :  
<https://uex.uacj-group.com/process.html>



## 第 2 章

### 推定式の提案

## 2-1 はじめに

前章では、自動車における衝突安全性対策の現状について述べた。また、対策の1例である衝撃吸収部材に着目し、現状の製品開発と問題点について評価を行い、その解決案として概略設計案を提起した。

本章では、前章で提起した概略設計案を実現するうえで必要となる部材寸法と衝撃吸収特性の関係を導出するための流れについて検討を行う。

## 2-2 本研究の流れ

### 2-2-1 衝突解析と実験の精度検証

本研究では、推定式を構築するうえで必要となる部材寸法と衝撃吸収特性の関係を衝突解析手法を用いた評価によって明らかにする。しかしながら、実際の衝突現象を衝突解析によって再現ができることが前提となる。そのため、第3章では衝突解析と実験の精度検証の確認を行う。

なお、自動車用衝撃吸収構造は、大きく分けて2つの圧潰形態による衝撃吸収を行う。部材の押出方向と同一方向に圧潰することで衝撃吸収を行う場合を軸圧潰と定義する。対して押出方向と直角方向に圧潰することで衝撃吸収を行う場合を断面圧潰と定義し、双方の圧潰形態について解析と実験の精度検証を行う。

### 2-2-2 推定式と衝突解析の比較

衝撃吸収部材の圧潰現象は材料力学の分野にあたり、座屈式で説明できる。座屈とは柱が軸方向圧縮力を受けているとき、圧縮応力が降伏点に達する前に柱が曲がる現象であり、長柱で生ずる。短柱では圧縮応力が降伏点を超え、塑性領域に入ってから曲げ変形が生ずる<sup>1)</sup>。

座屈式は学者によりいくつか導出されており、Euler's law (以下オイラー則)、Rankin's law (以下ランキン則)、Tetmeyer's law (以下テトマイヤー則)、Johnson's law (以下ジョンソン則) などがある<sup>2)</sup>。本研究では、理論式であるオイラー則と実験式であるランキン則に着目し、それぞれの適用範囲や荷重を導出するうえでの問題点について考察する。また、前述の問題点を解決するために、衝突解析手法が適用可能であるか、実験との比較を行うことで評価を行う。以下にオイラー則を示す。

$$W_0 = \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad (2-1)$$

$$\sigma_0 = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{k}\right)^2} \quad (2-2)$$

$W_0$  : 座屈荷重,  $\sigma_0$  : 座屈応力,  $L$  : 柱の長さ,  
 $E$  : ヤング率,  $I$  : 断面二次モーメント

$k = \sqrt{I/A}$  : 断面二次半径,  $A$  : 断面積

図 2-2-1 にそれぞれの座屈式の座屈応力を示す．オイラー則は  $\lambda$  が一定の値以下だと定数をとるようになっており，座屈式はそれぞれ  $\lambda$  の値によって適用できる範囲が定まっている．オイラー則の適用できる  $\lambda$  の範囲を表 2-2-1 に示す．これらから，オイラー則は  $\lambda$  が大きいとき，つまり柱の高さが大きいか，断面積が小さいときに適用できることがわかる．ここで，バンパビーム及びブステーでは，断面積の大きさに対して側面部やリブの高さが小さいため，衝撃吸収部材のピーク荷重の推定には適していないことが予想される．以下にランキン則を示す．

$$W_0 = \frac{\sigma_c A}{1 + \frac{a}{n} \left(\frac{L}{k}\right)^2} \quad (2-3)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_c}{1 + \frac{a}{n} \left(\frac{L}{k}\right)^2} \quad (2-4)$$

$W_0$  : 座屈荷重,  $\sigma_0$  : 座屈応力,  $L$  : 柱の長さ,  
 $I$  : 断面二次モーメント

$k = \sqrt{I/A}$  : 断面二次半径,  $A$  : 断面積

$\sigma_c$  : 圧縮強さ,  $a$  : 材料定数,  $n$  : 端末係数

表 2-2-2 にランキン則の適用できる  $\lambda$  の範囲と材料定数を示す．ランキン則は実験式であり，材料ごとに実験定数（圧縮強さ，材料定数）がある．オイラー則とは逆に， $\lambda$  が小さいときに適用できる．つまり，短柱であるか，柱の断面積が大きいときに適用できる．バンパビーム及びブステーでは断面積の大きさに対して側面部やリブの高さが小さいため，衝撃吸収部材のピーク荷重の推定に適していると考えられる．しかしながら，ランキン則は梁や中実の柱のような単純な形状のピーク荷重を求めている．衝撃吸収部材は，所望する衝撃吸収特性を得るために複雑な形状になることが考えられるため，ランキン則をそのままの形で使用することが可能かどうか検討する必要がある．そこで，本研究ではコンピュータシミュレーションである衝突解析に着目する．第 4 章、第 5 章では推定式であるランキン則と衝突解析によって得られた荷重値を比較し，推定式の導出につなげる．

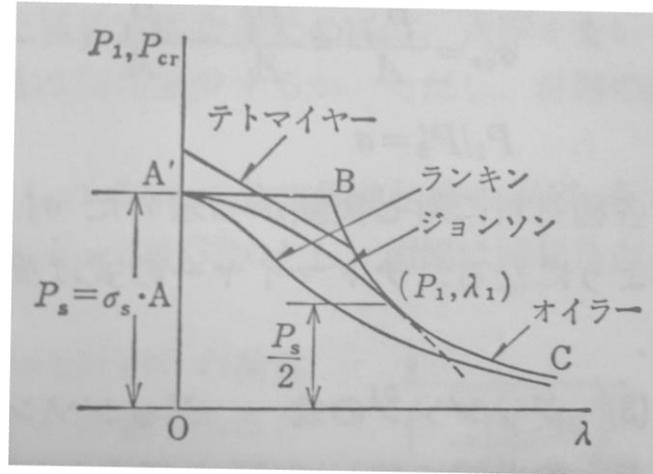


Fig.2-2-1 Comparison of buckling stress<sup>2)</sup>

Table 2-2-1 Applicable range of Euler's law

材料	鋳鉄	軟鋼	硬鋼	木材
$\lambda$	>70	>102	>95	>80

Table 2-2-2 Applicable range of Rankin's law

材料	鋳鉄	軟鋼	硬鋼	木材
a	1/1600	1/7500	1/5000	1/750
$\lambda$	<80	<90	<85	<60

### 2-3 まとめ

本章では、本研究の流れとして実験、衝突解析、推定式、推定式の立ち位置について説明を行った。また、本章では推定式について詳細な言及を行い、圧潰荷重の導出においてランキン則とオイラー則では適用可能な範囲が異なることが分かった。なかでも、衝撃吸収部材の寸法条件で使用することが可能なランキン則について、本来中実部材の座屈荷重を導出するものであり、平均荷重は求めることができないことがわかった。さらに複雑な座屈挙動を示す本研究のような場合は、ピーク荷重についても推定できない可能性があることがわかった。そこで、本研究で用いる中空部材に対して用いることが可能な推定式を構築するべく次章より検討を行う。

## 第 3 章

### 衝突解析の精度検証のための実験

### 3-1 はじめに

本章では、前章で提示した研究の流れにおける衝突解析と衝突現象の整合性評価を行う。衝突解析が実験を再現できているかどうか評価することで、衝突解析を用いて衝撃吸収特性の評価を行い、既存の座屈荷重推定式であるランキン則の結果との比較を行うことが可能である。

### 3-2 衝突解析手法

本研究で使用する解析ソフトは、衝突・衝撃などの動的な変形を解析することができる PAM-CRASH 2G (ESI 社製) である。PAM-CRASH 2G は、動的陽解法を用いた有限要素法構造解析プログラムで、衝撃・衝突現象だけでなく、幾何学的非線形、材料非線形、接触などの強い非線形を伴う現象についても高速・高精度な解析を行なえるソフトウェアである。

今回の解析では、図 3-2-1 に示すような軸方向に設置して軸圧潰させる方法と軸方向に対して直角に設置して断面圧潰させる方法の 2 つの圧潰形態に着目する。それぞれの圧潰形態を同一条件で圧潰させた際に得られる衝撃吸収挙動を図 3-2-2 に示す。図 3-2-2 より、初期ピーク荷重、平均荷重域の荷重ともに軸圧潰の方が高い傾向を示している。初期ピーク荷重の低減のみに着目すれば断面圧潰で良いが、エネルギー吸収量は荷重と変位の力積で求められることから、断面圧潰の場合ほとんどエネルギーを吸収できていないことがわかる。そこで、本研究では軸圧潰と断面圧潰どちらにも着目することで、より細かい衝撃吸収特性の操作が可能になると考える。

また、実験と解析の比較を行う際に、静的圧潰試験と衝突解析の結果と比較する。なお、衝撃吸収時の変形は非常に高速であり、素材は高いひずみ速度で変形していく。金属材料には一般にひずみ速度依存性があり、高速変形下では通常の静的な変形時に比べ強度が著しく上昇する場合があります、この比率を静動比という。このようにひずみ速度により素材の特性が変化しては、安定した衝撃吸収性能は望めない。その中でも、アルミニウム合金のひずみ速度依存性は静動比で 1~1.2 と鋼板に比べて非常に小さいため、静的圧縮試験で得られた結果を実際の衝突によるものとして扱ってもよいと考える<sup>3)</sup>。解析条件などは、行なった各圧潰試験の条件に合わせて設定を行なう。

#### 3-2-1 軸圧潰における衝突解析

##### 1) 試験条件

自動車の衝突における圧潰現象を再現するために、バンパステーを考慮した図 3-2-3 に示すような断面形状の試験片を作製した。試験片の材料は 5000 系アルミニウム合金 (以下 A5052) である。自動車のバンパステーを再現しているため、試験片を圧潰させる方向は、断面に対して垂直である軸圧潰にて行なった。この試験に用いる試験機は、アムスラー万能試験機である。

## 2) 試験結果

圧潰試験で得られた荷重－変位曲線は、圧潰初期に荷重のピークが存在し、その後荷重は減少する。減少した荷重は変位が進んでもほぼ一定の値で推移する。初期ピーク荷重は部材の側面が座屈するまで上昇し、座屈した後は減少する。平均荷重は、側面の曲げ変形が進んでいる状態であると考えられる。

## 3) 解析条件

前述の静的な圧潰試験を解析ソフト上で再現するため、圧潰試験で用いた試験片と同じ形状をモデル化した。解析モデルはシェル要素での作製を行なった。

各種の解析条件は、圧潰試験の条件を参考する。部材の解析モデルに適用する材料は、A5052 とする。圧潰試験を再現するために使用する圧子の材料は鋼材とし、圧子の解析モデルも試験片モデルと同様にシェル要素とした。そして、圧子の解析モデルは剛体定義とした。衝突速度は 5mm/s である。

板は剛体定義とし、底面を完全拘束、材料は圧子と同様とする。なお、試験片自体には一切拘束を定義しないこととした。圧子に関しては、初速度をかける方向以外には移動しないように定義し、試験片を圧潰する方向のみに進んでいく設定である。表 3-2-1 に各種の解析条件をまとめる。

## 4) 解析結果の評価

解析結果を図 3-2-4 から図 3-2-6 に示す。それぞれの荷重－変位曲線は、接触してから、急激に荷重が上昇し、その後 30kN 前後で平均的に推移している。側面部が座屈するまでは、荷重が上昇し続け、座屈してしまうと、荷重が減少する。つまり、接触初期の荷重が上昇した最大値はこの部材の最大座屈荷重であると考えられる。

## 5) 圧潰試験結果と解析結果の比較

圧潰試験結果と解析結果を比較すると、初期の最大荷重値に差が生じた。圧潰試験での初期最大荷重値は 80kN であるが、解析による初期最大荷重は 100kN となり、20kN の差が出た。初期接触以降の荷重値の変動は、両者同じように変動している。

圧潰試験と解析結果を比較して、試験片と解析モデルの変形挙動は同様の状態が得られることがわかった。荷重－変位曲線では、初期の荷重のピークの値が実際の試験結果よりも大きい。これは、解析モデルをシェル要素で作製したため、実際の部材の内側部分の R が再現できなかったためであると考えられる。また、荷重－変位曲線の変化の挙動は試験結果と解析結果で同様の挙動を示しており、今回の圧潰試験は、解析により再現が可能であると考えられる。圧潰中のモードを比較した場合、図 3-2-7 のように同一の圧潰傾向が見られたことから、実現象を解析によって再現することが可能であるといえる。

### 3-2-2 断面圧潰における衝突解析

#### ・試験条件

自動車の衝突における圧潰現象を再現するために、バンパビームを考慮した図 3-2-8 に示すような断面形状の試験片を作製した。試験片の材料は 7000 系アルミニウム合金（以下 A7075）である。自動車のバンパビームを再現しているため、試験片を圧潰させる方向は、断面に対して垂直である軸圧潰の方向ではなく、図 3-2-9 に示すような断面に対して平行である断面圧潰にて行なった。今回の試験では、この試験片の断面圧潰試験を行なうことで、衝突現象を再現する。この試験に用いる試験機は、アムスラー万能試験機である。

#### ・試験結果

圧潰試験後の試験片形状を図 3-2-10 に示す。試験後の形状を見てみると、圧子が接触していない両端部分はほとんど変形していないことがわかる。そして、圧子が接触している部分を中心に両端が上方へ持ち上がっている。また、圧子の中心を対称に試験片が変形している。

圧子が接触した部分の断面を見てみると、両側の側面が外側に座屈し、内側のリブ部分は片側に座屈している。つまり、圧子が接触している部分は完全に圧潰し、その周辺の部分もそれに伴い変形している。しかし、両端までは変形せず上方へ持ち上がっている。これは、圧潰によって、部材の上面は圧子の両端により下方へ移動したためであると考えられる。

図 3-2-11 に圧潰試験で得られた荷重－変位曲線を示す。得られた荷重－変位曲線は、接触初期に荷重のピークが存在し、その後荷重は減少する。減少した荷重は変位が進んでもほぼ一定の値を推移し、変位が 30mm あたりで小さな荷重の山があり、その後完全に圧潰してしまうため、荷重が急上昇している。荷重の初期のピークは部材の側面が座屈するまで上昇し、座屈した後は減少する。一定に荷重が推移する場所は、側面の曲げ変形が進んでいる状態であると考えられる。

#### ・解析条件

前述の静的な圧潰試験を解析ソフト上で再現するため、圧潰試験で用いた試験片と同じ形状を図 3-2-12 のようにモデル化した。

図 3-2-8 の試験片の断面図では、内側の部分に R が施されている。そのため、ソリッド要素での解析モデルを作製すべきであるが、試験片の長さが 400mm で、一番肉厚の薄い部分が 2.2mm である。そのため、肉厚の薄い部分のメッシュを作製する際、最低でも 3～4 層のメッシュが必要であると考えられるため、メッシュサイズが 0.5mm 程度となってしまう。0.5mm でメッシュを作製すると、長さが 400mm であるため、要素数が多くなってしまい、解析時間がかかることとなるので、シェル要素で解析モデルの作製を行なった。作製した解析モデルはメッシュサイズが 2.5mm、要素タイプは弾性 4 節点、要素数は 23520 である。

各種の解析条件は、圧潰試験の条件を参考する。部材の解析モデルに適用する材料は、A7075 とする。圧潰試験を再現するために使用する圧子の材料は鋼材とし、圧子の解析モデルも試験片モデルと同様にシェル要素とした。そして、圧子の解析モデルは剛体定義とした。衝突速度（初速度）は 1m/s と 2.5m/s の 2 条件である。現象解析時間はこの衝突速度を考慮し、2 条件とも 60ms とした。

また、圧潰試験を再現するにあたり、静的な圧潰試験では試験片の両端部は固定しているのではなく、固定なしで試験台の上に設置してあるだけであることから拘束条件を検討した。試験片モデルの底面を完全に拘束してしまうと、実験結果の再現が難しいため、新たに試験片の下部に試験台を考慮した板をモデル化した。図 3-2-13 に解析方法を考慮した解析モデルを示す。

板は剛体定義とし、底面を完全拘束、材料は圧子と同様とする。なお、試験片自体には一切拘束を定義しないこととした。圧子に関しては、初速度をかける方向以外には移動しないように定義し、試験片を圧潰する方向のみに進んでいく設定である。表 3-2-2 に各種の解析条件をまとめる。

#### ・解析結果の評価

上記の条件での解析結果を図 3-2-14 から図 3-2-16、表 3-2-3 に示す。図 3-2-14 は 2.5m/s でのシミュレーションでの変形の様子である。0～30ms まで 10ms ごとの変形である。

圧潰が進むにつれて、圧子が接触している部分は、側面が外側に座屈し、広がっている。また、圧子が接触している周辺では変形しているが、両端は変形していない。さらに圧子が接触している場所を中心に対称な形状で圧潰していることがわかる。

初速度が 1m/s の解析結果である図 3-2-15 の荷重－変位曲線は、接触してから、急激に荷重が上昇し、その後 40～50kN 程度で一定に推移している。初期の接触の際の急激に荷重が上昇したのは、側面と内側のリブ部分が座屈する影響であると考えられる。側面とリブ部分が座屈するまでは、荷重が上昇し続け、座屈してしまうと、荷重が減少する。つまり、接触初期の荷重が上昇した最大値はこの部材の最大座屈荷重であると考えられる。また、荷重が最大値を示した後、一定に推移する部分は、座屈が終わった後の側面とリブ部分の曲げ変形の影響であると考えられる。

初速度が 2.5m/s の解析結果である図 3-2-16 に示す荷重－変位の曲線は、1m/s の解析結果と同様の傾向の曲線となった。1m/s の解析結果よりも最大荷重は高い値となっているが、一定に荷重が推移することなどは初速度が変化しても変わらないと考えられる。

#### ・圧潰試験結果と解析結果の比較

圧潰試験結果と解析結果を比較すると、図 3-2-10 の変形後の試験片と図 3-2-14 の解析結果の 30ms の変形の様子を比較すると、同様の変形が生じている。圧潰試験での試験片の特徴が解析結果のモデルでも再現されているこ

とから、衝撃解析により、圧潰試験の変形挙動の検討が可能であると考えられる。

また、荷重 - 変位線図を比較すると、解析結果での 1m/s のときは圧子の重さが小さかったため、変位が 30mm までしか変形しなかったが、両者の解析結果を比較すると、初期の最大荷重値に差が生じた。圧潰試験での初期最大荷重値は 136kN であるが、解析による初期最大荷重は 163kN となり、27kN の差が出た。初期接触以降の荷重値の変動は、両者同じように変動しているが、約 10kN 程度の差が生じている。

2.5m/s のときは 1m/s の場合とは違い、変位が 50mm 以上となった。圧潰試験の結果の初期最大荷重値は 145kN であるが、解析による初期最大荷重は 171kN となり、26kN の差が出た。初期接触以降の荷重値の変動も 1m/s と同様に変動しているが、約 10kN 程度解析結果との差が生じている。

圧潰試験と解析結果を比較して、試験片と解析モデルの変形挙動は同様の状態が得られることがわかった。荷重 - 変位曲線では、初期の荷重のピークの値が実際の試験結果よりも大きい。これは、解析モデルをシェル要素で作製したため、実際の部材の内側部分の R が再現できなかったためであると考えられる。また、荷重 - 変位曲線の変化の挙動は試験結果と解析結果で同様の挙動を示しており、今回の圧潰試験は、解析により再現が可能であると考えられる。

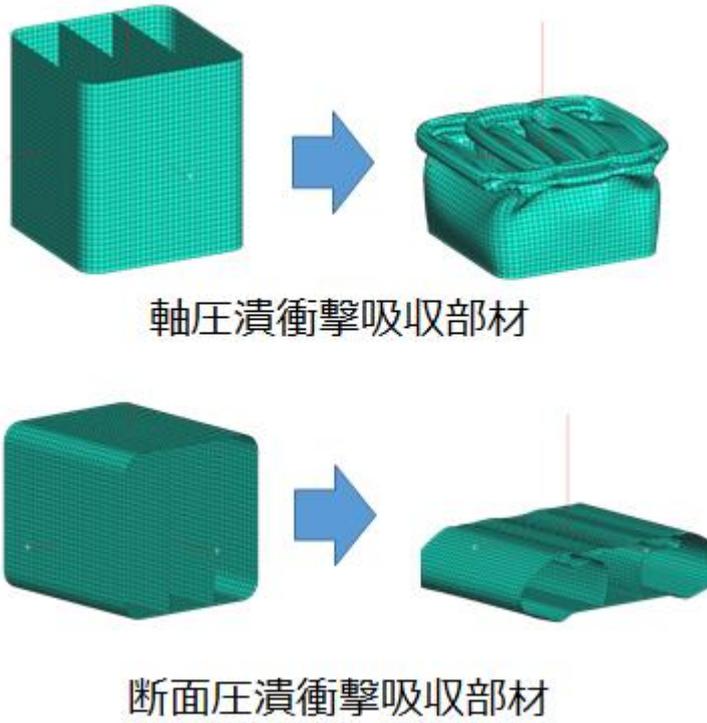


Fig. 3-2-1 Comparison of crushed forms



Fig. 3-2-2 Influence of difference in crush form on impact absorption behavior



Fig. 3-2-3 Shape of specimen of shaft crush impact absorbing member

Table 3-2-1 Impact analysis condition

試験片の材料	5000系アルミニウム合金 (A5052)
圧子の材料	鋼材 (ヤング率 206GPa, ポアソン比 0.3)
圧子の衝突速度	5mm/s
ヤング率	69.3GPa
ポアソン比	0.3
試験片寸法	40×50×(50or100or150)mm
メッシュサイズ	2.5mm
要素数	1440,280,4320

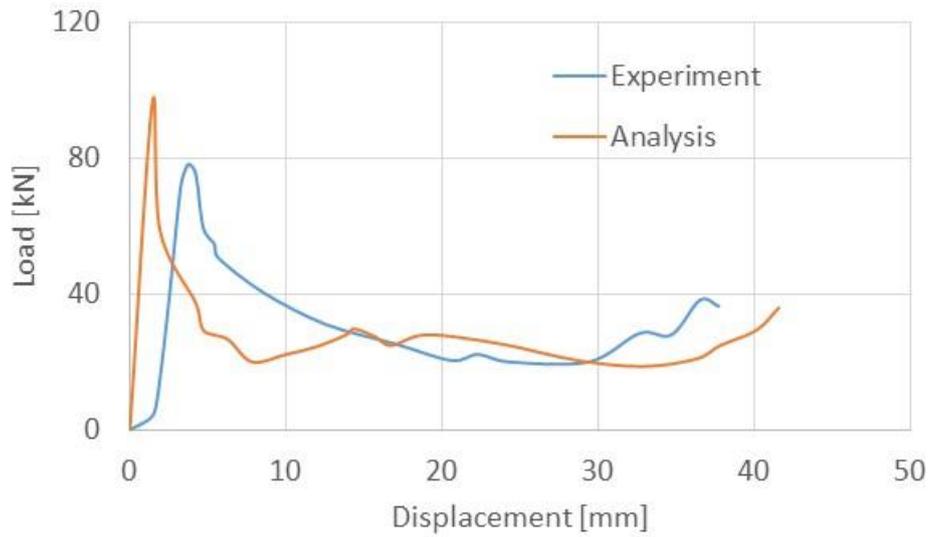


Fig. 3-2-4 Comparison between analysis and experiment (h=50mm)

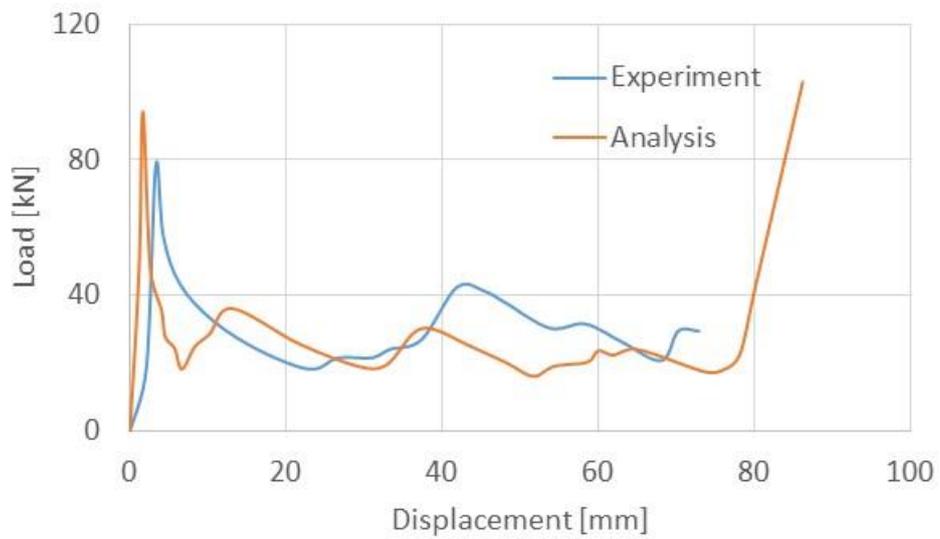


Fig. 3-2-5 Comparison between analysis and experiment (h=100mm)

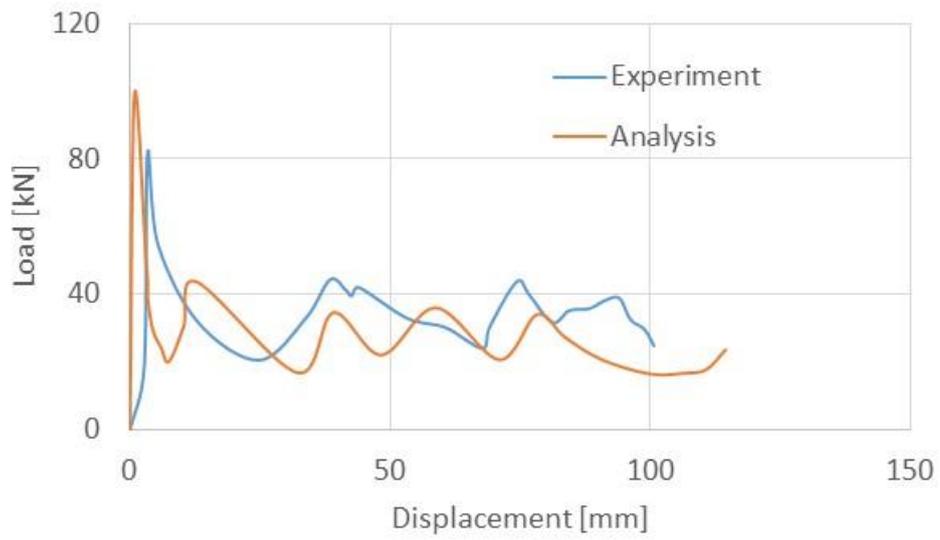
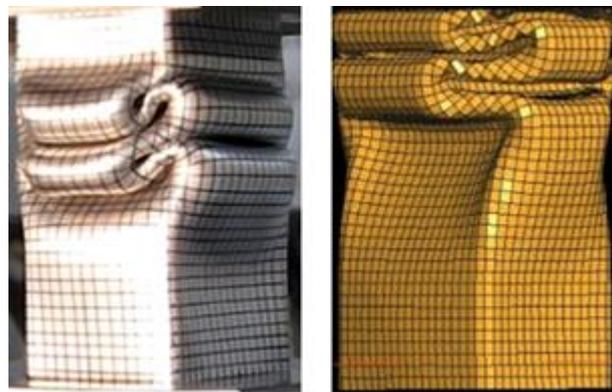


Fig. 3-2-6 Comparison between analysis and experiment (h=150mm)



Experiment

Analysis

Fig. 3-2-7 Comparison of crush mode

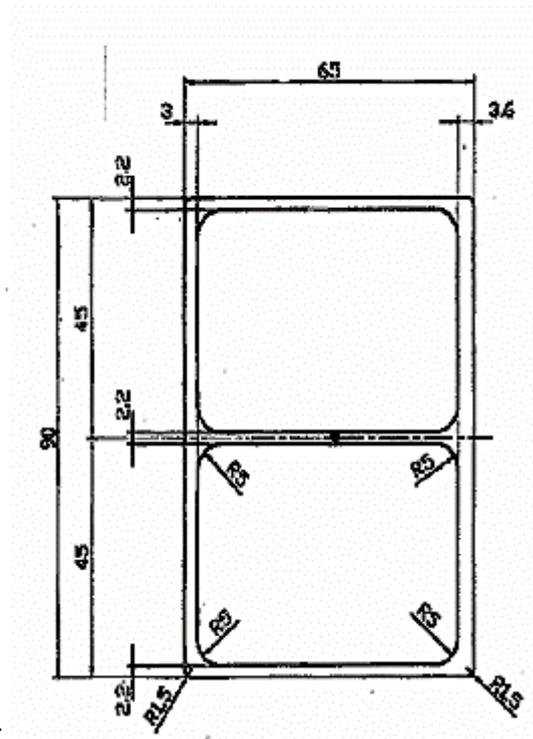


Fig. 3-2-8 Cross-sectional shape of section collapse impact absorbing member

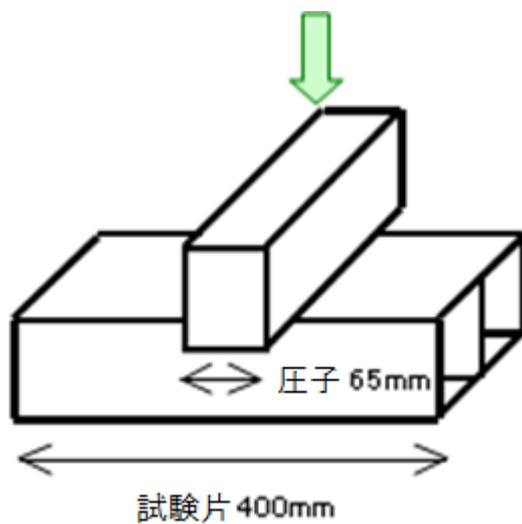


Fig. 3-2-9 Compression test method

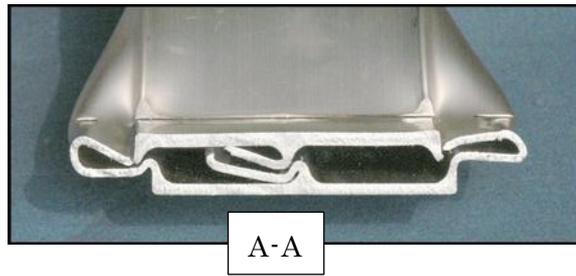
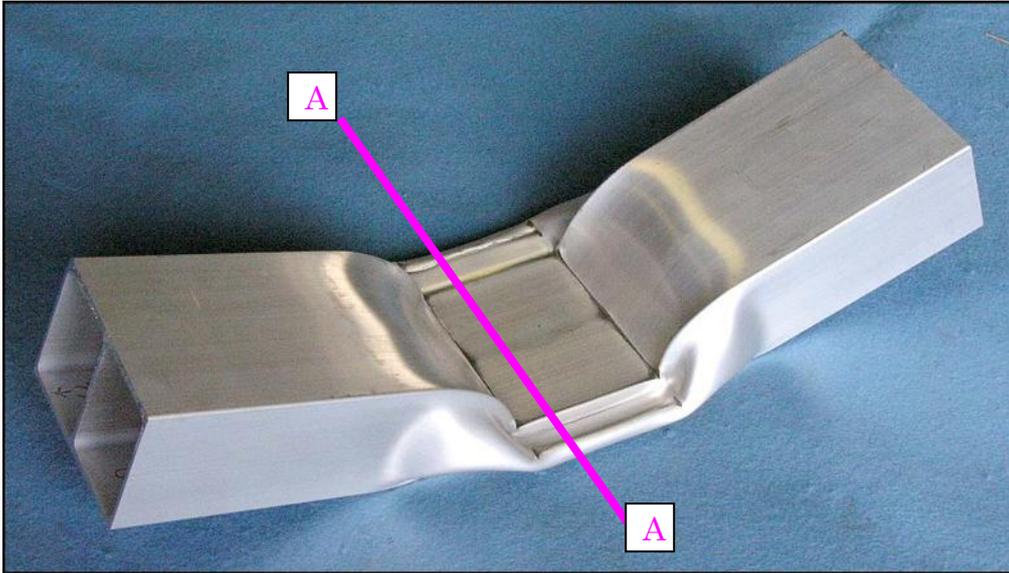


Fig. 3-2-10 Specimen shape after crush test (A-A)

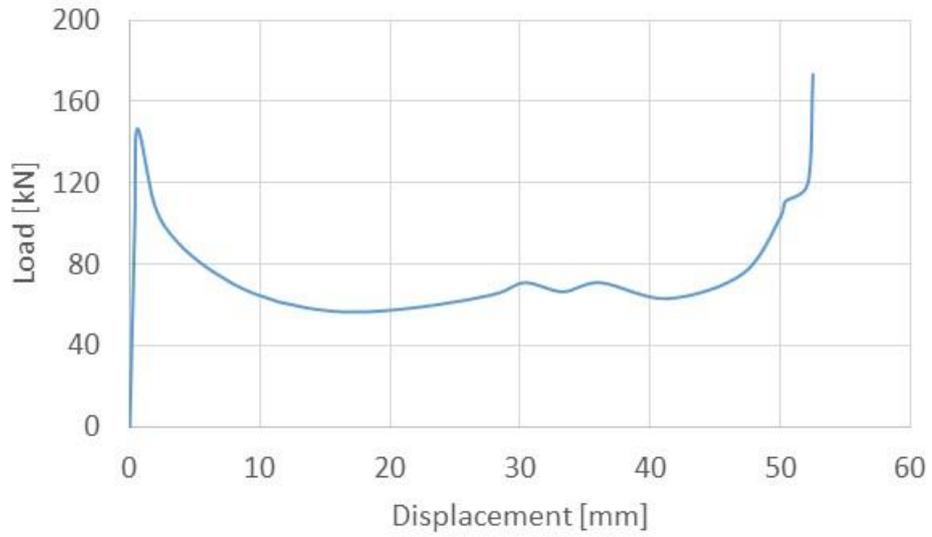


Fig. 3-2-11 Experimental result

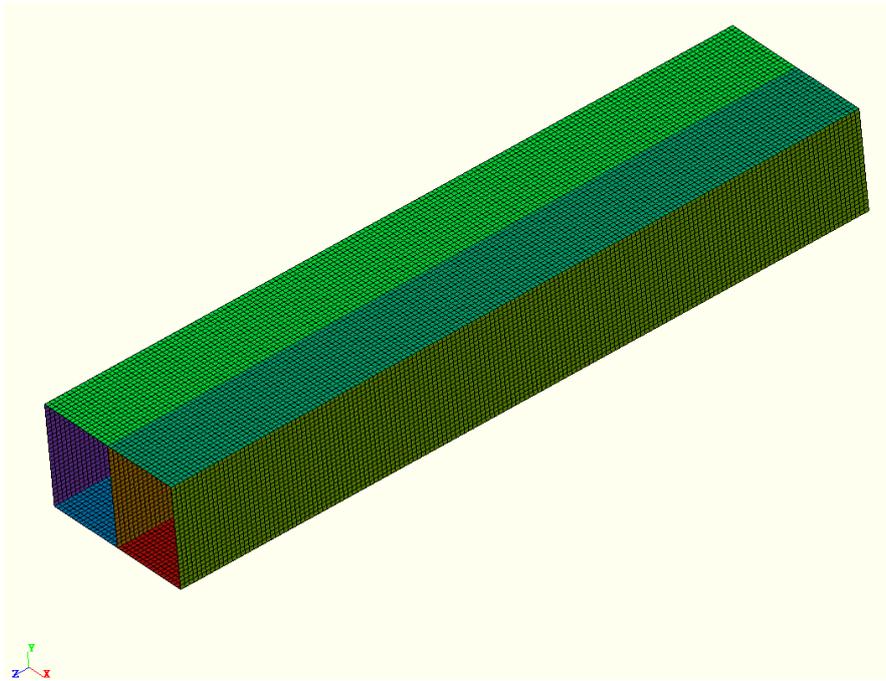


Fig. 3-2-12 Analysis model (test piece)

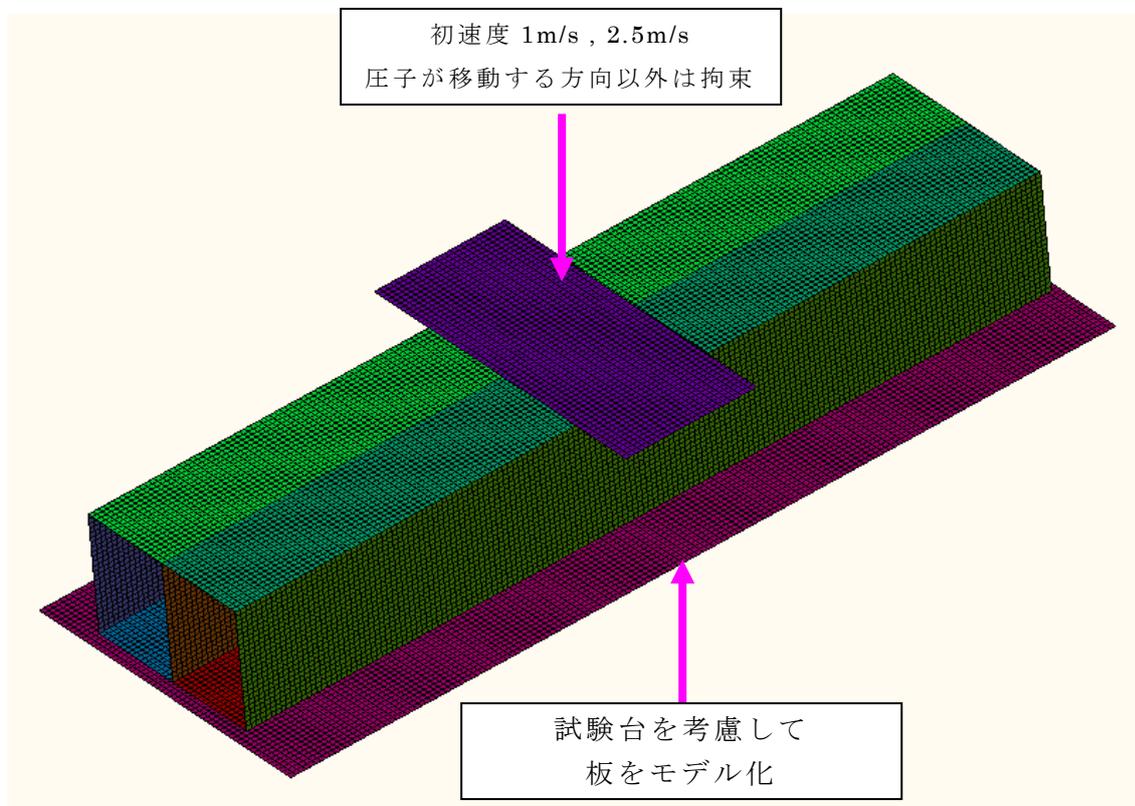


Fig. 3-2-13 Analysis model with analysis method taken into account

Table 3-2-2 Impact analysis condition

試験片の材料	7000系アルミニウム合金 (A7075)
圧子の物性	鋼材 (ヤング率 203GPa, ポアソン比 0.3)
ヤング率	71.6GPa
ポアソン比	0.3
降伏強度	505MPa
摩擦係数	0.82
加工硬化係数	0.22
圧子の衝突速度	1m/s, 2.5m/s
試験片寸法	90×65×400mm
圧子寸法	65×150mm
試験台寸法	410×150mm
メッシュサイズ	2.5mm
要素数	23520
現象時間	60ms

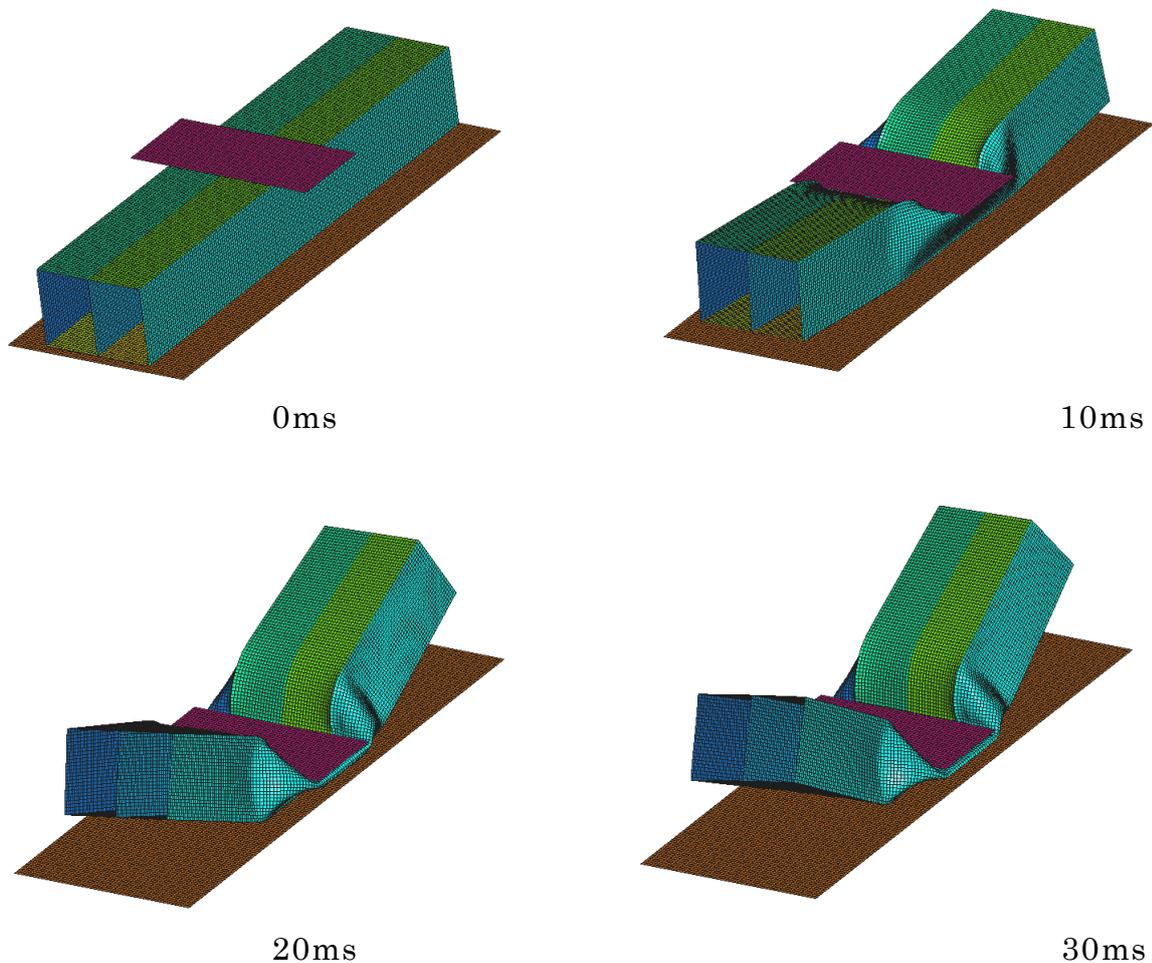


Fig. 3-2-14 Deformation process (v=2.5m/s)

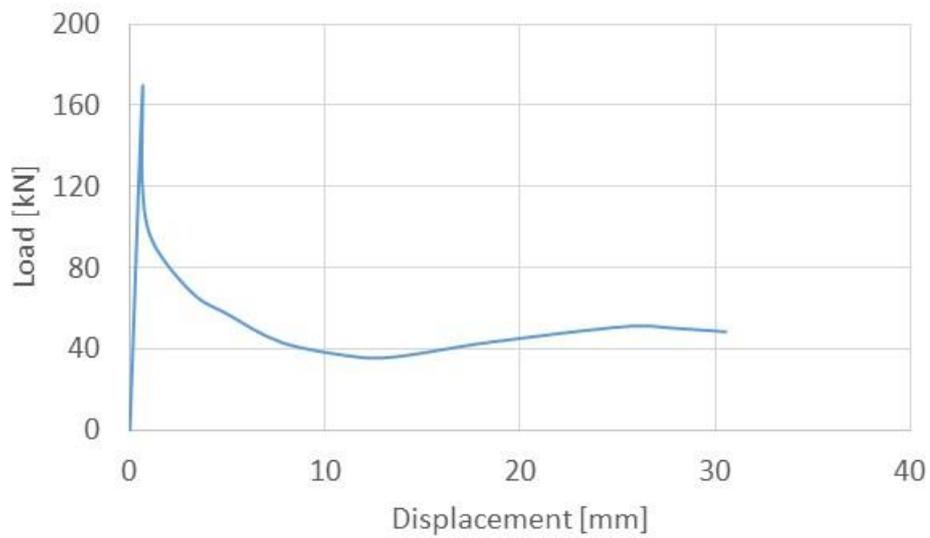


Fig. 3-2-15 Analysis result (v=1.0m/s)

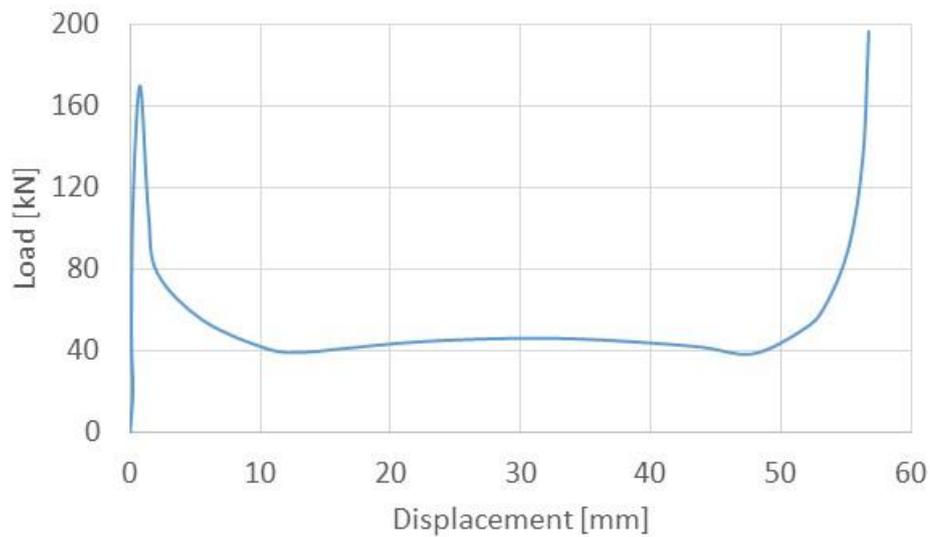


Fig. 3-2-16 Analysis result (v=2.5m/s)

Table 3-2-3 Analysis result

初速度 m/s	最大荷重 kN
1	163
2.5	171

### 3-3 まとめ

本章では、圧潰荷重の導出式であるオイラー則とランキン則に着目し、それぞれの適用範囲と問題点について考察を行った。また、衝突を再現する実験は大掛かりで、コスト、時間、安全面などに問題が起こることが多い点も踏まえ、衝突解析により各種の検討を行なうことを考えた。そのため、使用する衝突解析ソフトの有用性を検討するために、簡易的な衝突試験を行なうことで検証した。

圧潰試験では、極低速での衝突であると考え、解析結果との比較を行なった。その結果、ピーク荷重は解析のほうが少し大きい結果となったが、荷重-変位曲線の荷重の推移は同様の挙動を示し、変形の様子においても試験片の変形を解析では再現できていた。よって、この圧潰試験は衝突解析により検討が可能であるということになった。以上の点を踏まえ、本研究で設計指針を構築する際に使用する座屈荷重は、衝突解析によって得られた値を参照することとする。

## 参考文献

- 1). 三木 光範：「材料力学の学び方・解き方」，共立出版，pp.171-180，(1994)
- 2). 渥美 光，鈴木 幸三，三ヶ田 賢次：「材料力学(1)」，森北出版，pp.217-222，1976
- 3). 水野拓磨，瀬戸雅宏，山部昌：「衝撃吸収部材の簡易設計手法に関する研究」，2010年自動車技術会秋季学術講演会，pp.21-23，2010



## 第 4 章

# 軸圧潰衝撃吸収部材の 荷重推定式構築

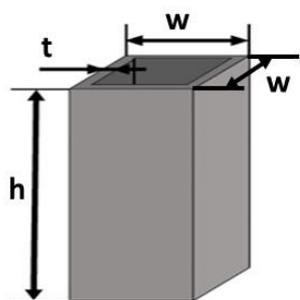
#### 4-1 はじめに

本章では、部材形状と座屈荷重の関係が導出可能な推定式を構築するために、既存の座屈荷重推定式であるランキン則と衝突解析の比較を行う。これによって、本来中実部材の座屈荷重推定に用いられるランキン則を中空部材に対しても使用可能かどうかを判断し、推定式の構築につなげる。そこで本章では、座屈現象によって衝撃吸収を行う部材の形態の一つである軸圧潰に対してランキン則と衝突解析の結果を比較する。

#### 4-2 寸法因子の選定と解析条件

本研究で検討する衝撃吸収部材の形状として、正方形断面の押出材を対象とする。現状ステーやビームは、アルミニウム合金の押出成形法を用いて作製したものが多く使用されている。押出成形は一定断面であれば連続成形が可能であり、形状の自由度も高い。しかし、部材の形状が複雑化することで推定式を構築することが困難となると考えられる。そこで本研究では座屈荷重と寸法因子の関係を評価し推定式を構築しやすくするために正方形断面を選定した。図 4-2-1 に部材形状を示す。また、図 4-2-1 中の軸高さ ( $h$ )、一辺長さ ( $w$ )、板厚 ( $t$ ) を設計因子として選定した。寸法条件は網掛け部の条件が基準条件である。

本研究では車両に対して前面からの衝突を想定し、インパクトを表 4-2-1 のように定義し、図 4-2-2 に示す状態で解析を行った。なお、インパクト条件は車両質量を 500kg の剛体とし、解析条件、材料特性を表 4-2-1、表 4-2-2 のように定義した。これは、本章において軸圧潰衝撃吸収部材としてバンパステーを対象とするため、1000kg の車体質量に対して 2 本のステーで衝撃を吸収することから、半分の 500kg を設定値とした。



高さ $h$ [mm]	30	50	70
一辺長さ $w$ [mm]	15	30	50
板厚 $t$ [mm]	1	2	3

Fig.4-2-1 Dimensions of compression impact analysis model

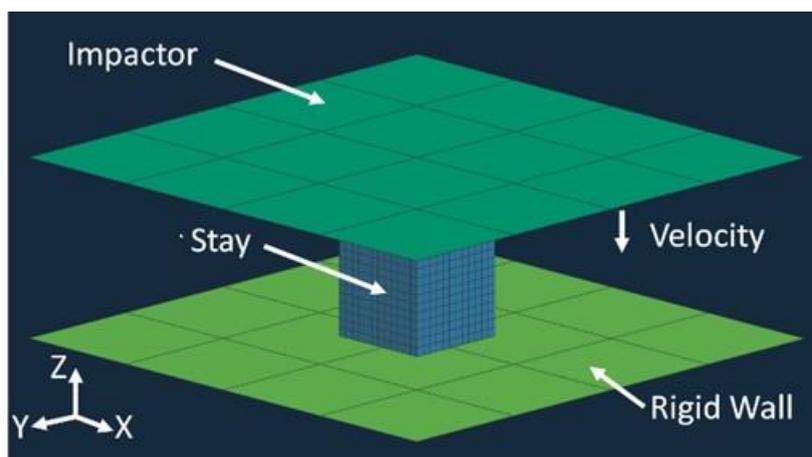


Fig.4-2-2 Schematic diagram of impact analysis

Table 4-2-1 Impact analysis condition

質量 [kg]	1000
寸法 [mm]	200×100
衝突速度 [m/s]	5.56 (20 [km/h] )

Table 4-2-2 Material characteristics

材質	A5052
ヤング率 [GPa]	69.3
ポアソン比	0.30
メッシュサイズ	2.5mm
要素数	288～2240

### 4-3 ピーク荷重の推定式構築

ピーク荷重推定については、ランキン則と比較することが可能である。ランキン則は下記の式(4-1)の形で表される。

$$W_0 = \frac{\sigma_c A}{1 + \frac{a}{n} \left(\frac{h}{k}\right)^2} \quad (4-1)$$

$W_0$ :座屈荷重,  $\sigma_c$ :圧縮強さ,  $A$ :断面積,  $a$ :材料定数  
 $n$ :端末係数,  $h$ :高さ,  $k = \sqrt{I/A}$ :断面二次半径,  $I$ :断面二次モーメント

上記の式(4-1)のように、ランキン則は非常に複雑な式の形をとっている。これは、ランキン則で取り扱うことができる適用範囲が広いからである。そこで、本研究で取り扱う因子である、高さ ( $h$ )、一辺長さ ( $w$ )、板厚 ( $t$ ) について、衝突解析によって得られたピーク荷重とランキン則によって得られたピーク荷重の比較を行う。これによって、本研究で取り扱う条件範囲内において、ランキン則をより簡略化することができないか評価を行う。最終的に、それぞれの因子がピーク荷重に与える影響度に注目することで、本研究の適用範囲外への応用を検討する。

#### ・板厚 $t$ および一辺長さ $w$

図 4-3-1 に板厚を変化させた場合のピーク荷重の解析値とランキン則の比較結果を示す。また、図 4-3-2 に一辺長さを変化させた場合のピーク荷重の解析結果とランキン則の比較結果を示す。

図 4-3-1, 4-3-2 より、板厚および一辺長さがピーク荷重に与える影響は、解析とランキン則で大きな違いがないことが分かる。以上の結果より、ピーク荷重は板厚および一辺長さに比例することが分かる。しかし、板厚と一辺長さは共に部材断面を構成する因子であるため、断面積とピーク荷重の関係性を明らかにできれば、ランキン則をより簡略化することが可能である。そこで、以下で部材断面積とピーク荷重について評価を行う。

#### ・部材断面積

図 4-3-3 に板厚と一辺長さから構成される断面積とピーク荷重の関係を示す。なお、断面積がピーク荷重に与える影響度について評価を行うため、基準条件である断面積  $116\text{mm}^2$  の場合の断面積およびピーク荷重を 1 とした比率で結果をまとめた。

図 4-3-3 より、ピーク荷重は部材断面積によってまとめることができる。これは、座屈部分に発生している応力値は寸法因子に関わらず、同一である（材料によって決定される）ためである。その結果、断面積に比例する結果となった。

#### ・高さ $h$

図 4-3-4 に高さを変化させた場合のピーク荷重の解析値とランキン則の比較結果を示す。また、高さがピーク荷重に与える影響度について評価を行う

ため、図 4-3-5 に基準条件である高さ 50mm の場合の断面積およびピーク荷重を 1 とした比率で結果をまとめた。

図 4-3-5 より、ランキン則では軸高さの増加に比例する形でピーク荷重が減少しているのに対して、解析結果は図 4-3-5 の影響度からも分かるように高さとピーク荷重の関係は一定である（影響を与えない）ことが分かった。前述の板厚および一辺長さについては、ランキン則に近似した変化が見られたが、高さに関しては異なる結果となった。これは図 4-3-6 のように、ランキン則は部材が全圧潰することを前提としたピーク荷重を算出するものであるため、本研究のように複数回座屈が生じる場合との差異が生じたと考えられる。

ランキン則によるピーク荷重の導出は、板厚、一辺長さ、高さを変数とした非常に複雑なものである。しかし、本研究の条件範囲内であれば、以下の関係より、簡略的にピーク荷重を導出することが可能である。

ピーク荷重は、板厚と一辺長さを分けて考える必要はなく、板厚と一辺長さによって構成される部材の断面積によって決定される。

ランキン則では、座屈長さと部材高さが同等という理想条件下でピーク荷重を評価しているが、実際の衝突現象では座屈長さは一定であり、座屈回数が変化するだけであるため、ランキン則とは異なり、高さの因子はピーク荷重に影響を与えない。

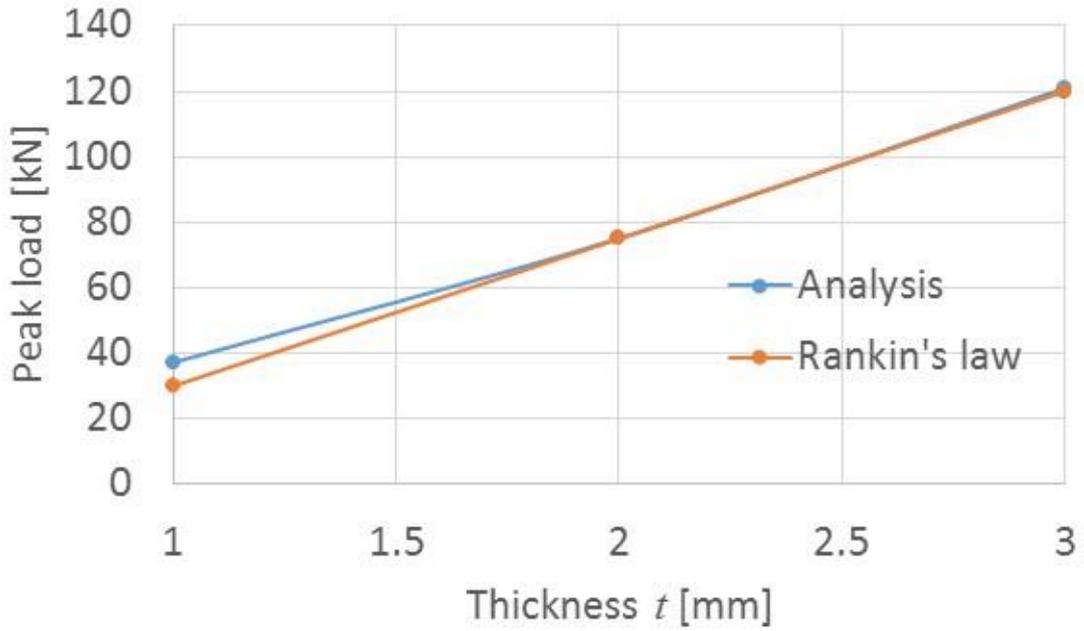


Fig. 4-3-1 Relation between the peak load and the thickness

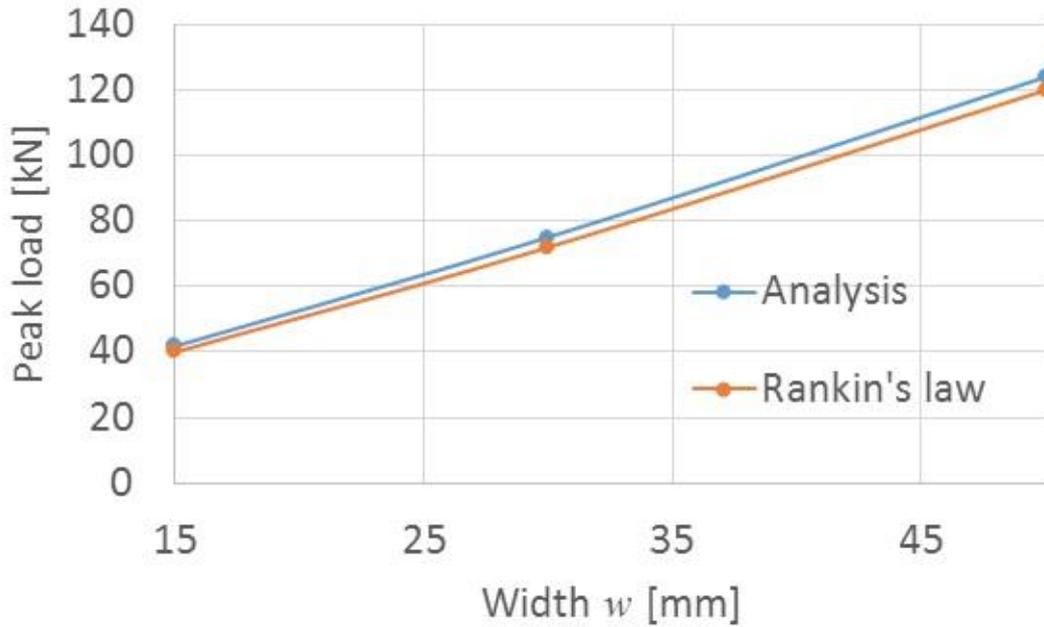


Fig. 4-3-2 Relation between the peak load and the length

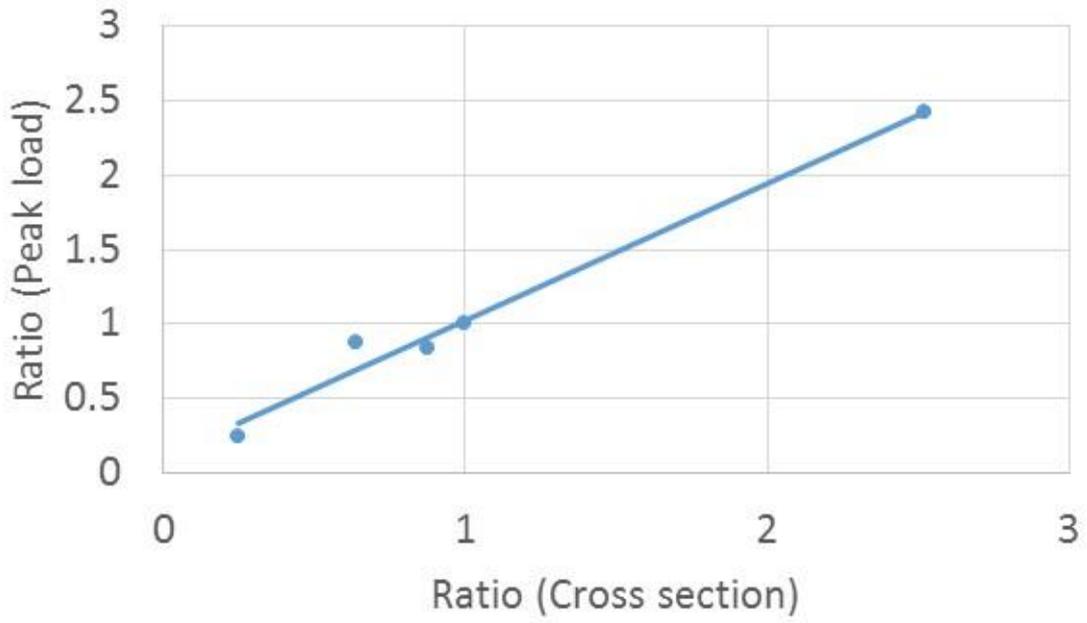


Fig. 4-3-3 The ratio of cross section to peak load

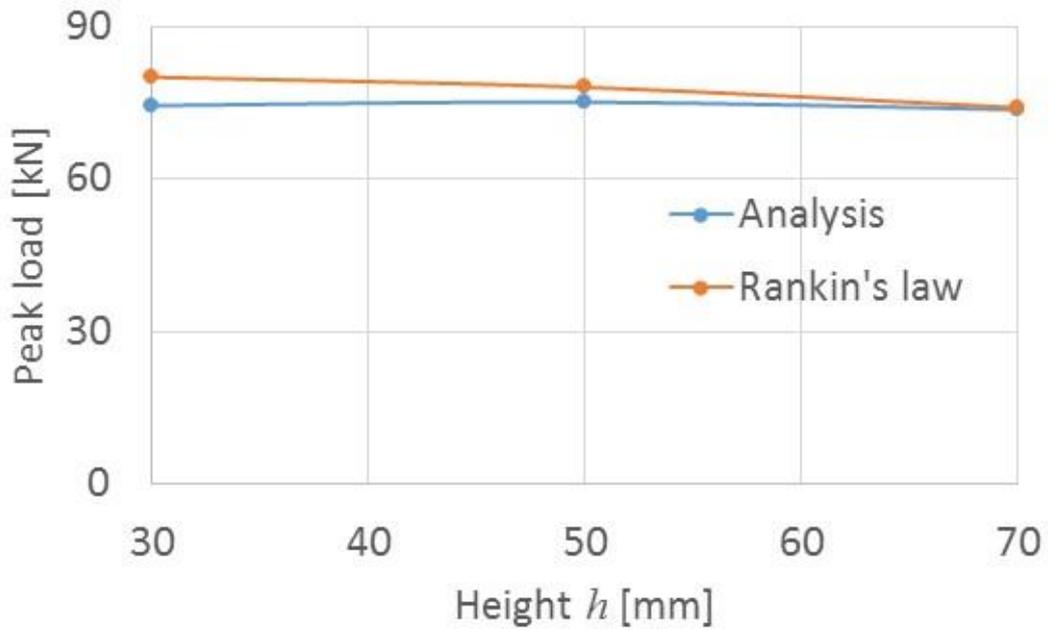


Fig. 4-3-4 Relation between the peak load and the height

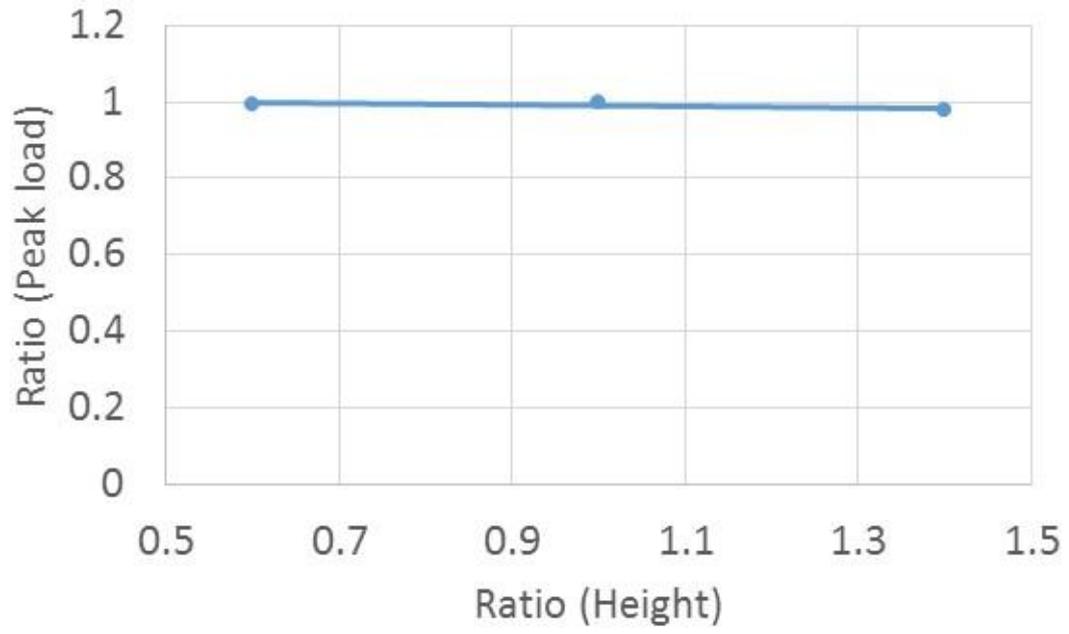


Fig. 4-3-5 The ratio of height to peak load

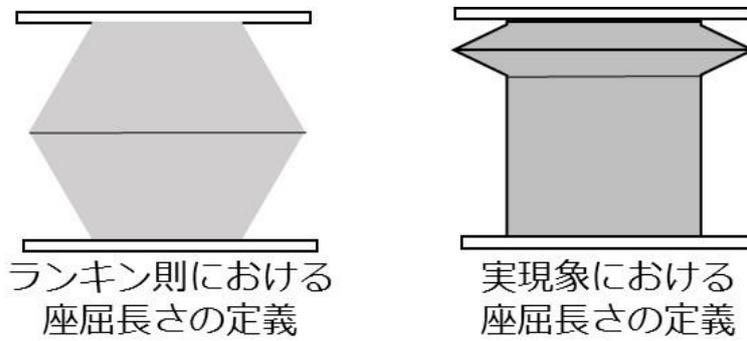


Fig. 4-3-6 Difference in buckling length

#### 4-4 平均荷重の推定式構築

平均荷重については、これまで推定する方法がなかった。しかし、軸圧潰衝撃吸収部材は一定の間隔で座屈現象を繰り返すことからピーク荷重の推定方法と同様にランキン則を応用することで推定が可能ではないかと考えた。そこで、軸高さ ( $h$ )、一辺長さ ( $w$ )、板厚 ( $t$ ) についてピーク荷重と平均荷重の関係に着目し、ランキン則への応用の可能性評価を行う。

図 4-4-1 に軸高さを変更した場合の荷重-変位曲線を、図 4-4-2 に板厚を変更した場合の荷重変位曲線を示す。図 4-4-1, 4-4-2 より、それぞれの平均荷重値は同一条件におけるピーク荷重値の約半分の値である。また、各寸法因子を変更した場合のピーク荷重の変化割合と同等の割合で平均荷重も変化していることがわかる。このことから、軸高さ、板厚に関してはピーク荷重推定の場合と同様ランキン則によって推定することが可能である。

図 4-4-3 に一辺長さを変更した場合の荷重-変位曲線を示す。図 4-4-3 より、ピーク荷重は寸法変化に対して同等の割合で変化しているのに対して、平均荷重は大きく変化していないことがわかる。この点について以下で考察を行う。

図 4-4-4 に板厚を変更した場合の部材の圧潰モードを、図 4-4-5 に一辺長さを変更した場合の部材の圧潰モードを示す。図 4-4-4 より、板厚を変化した場合については圧潰モードに大きな違いはなく、座屈回数も 3 回で同一であることがわかる。これに対し、一辺長さを変更した場合は図 4-4-5 より座屈回数に変化が生じていることがわかる。今回の場合、部材の軸高さを統一しているため、一辺長さが小さいほど座屈回数が増加し、座屈長さが短くなることがわかる。この点に注目してランキン則の式に着目すると、座屈回数に影響を与える因子である末端係数  $n$  が含まれていることがわかる。また、軸高さについてはランキン則における理想状態として、軸高さ=座屈長さという考えのもと評価を行っている。しかし、実現象において複数座屈を生じる場合が多い為、ランキン則における軸高さを部材の高さではなく座屈長として評価することで推定値の精度が向上することを前節で明らかとした。これらのことより、座屈回数と座屈長さが変化しない板厚を変更した場合については断面積の変化のみの影響によってピーク荷重と同一の変化が生じたと考えられる。対して、座屈回数、座屈長さ共に変化する一辺長さを変化させた場合、ピーク荷重については 1 回の座屈を対象としているため末端係数が変化することがなかったが、平均荷重については末端係数、座屈長さともに変化したことがピーク荷重の変化との違いであると考えられる。

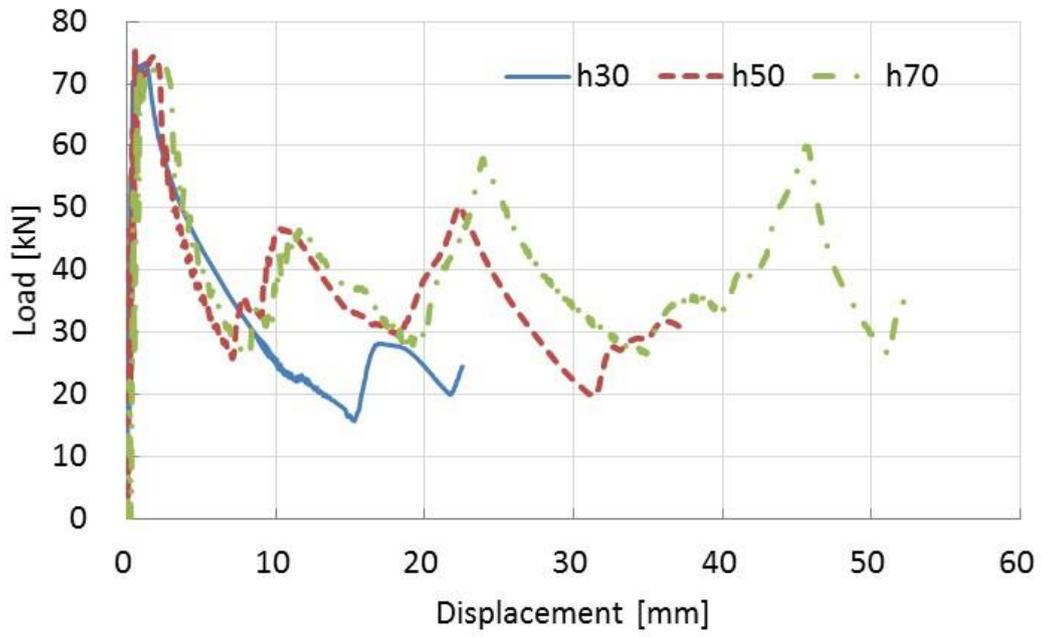


Fig. 4-4-1 Load-displacement curve (height)

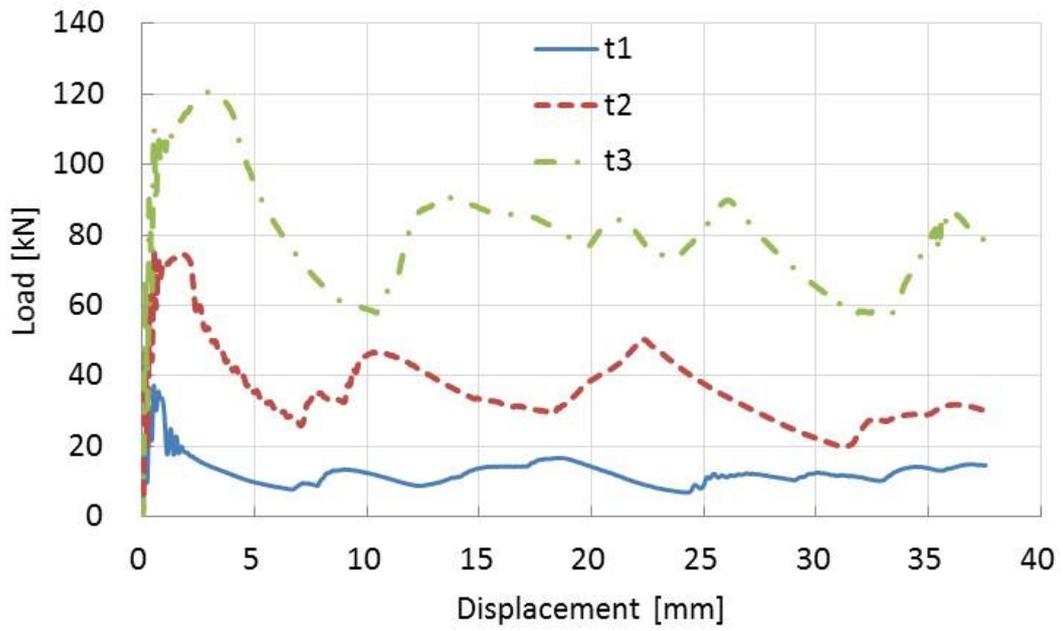


Fig. 4-4-2 Load-displacement curve (thickness)

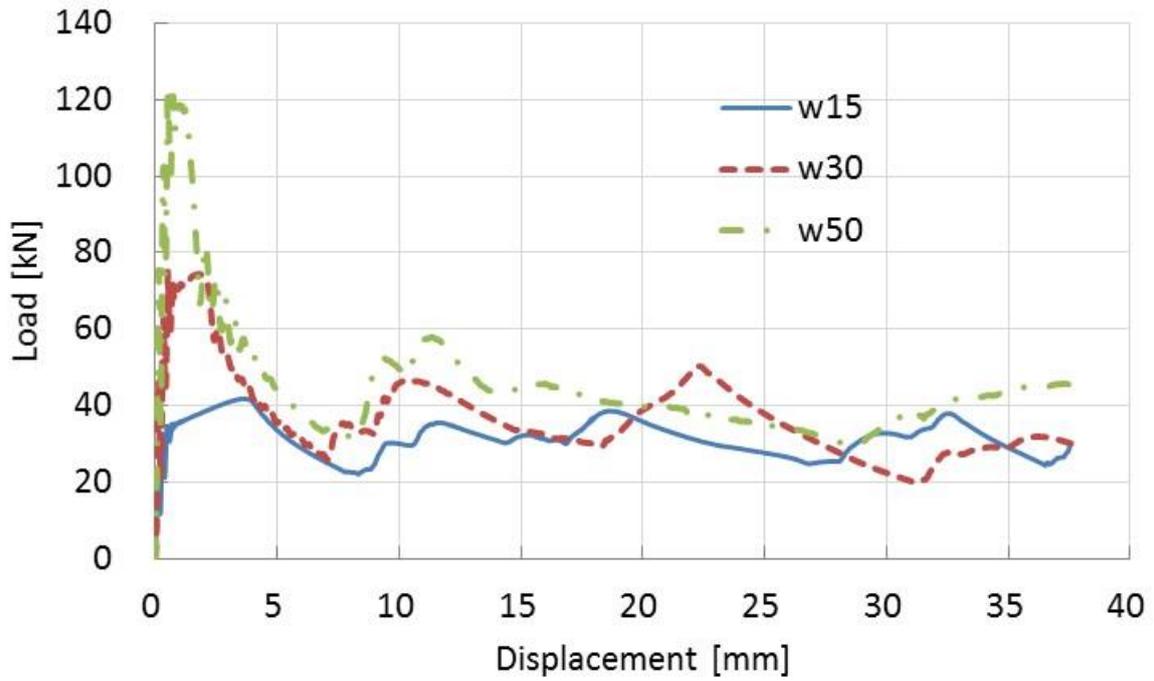


Fig. 4-4-3 Load-displacement curve (width)



Fig. 4-4-4 Comparison of buckling mode (thickness)

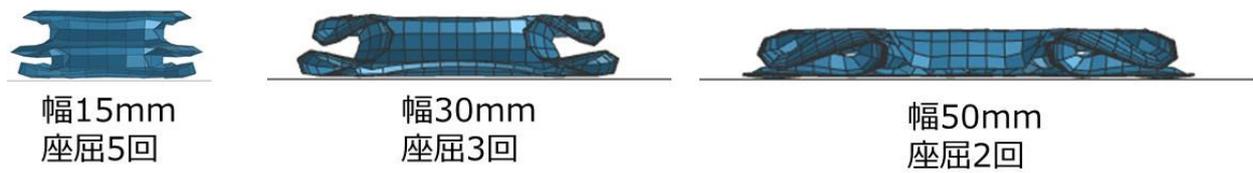


Fig. 4-4-5 Comparison of buckling mode (width)

#### 4-5 座屈回数の推定

前節において一辺長さが変化することで座屈回数に変化が生じることが明らかとなった。ここでランキン則の項である  $h/k$  に着目する。 $h/k$  は座屈長さ $h$ と断面二次半径 $k$ の比である。断面二次半径は断面二次モーメントと断面積の比で表されるため、今回の条件の場合、断面二次半径を一辺長さ $w$ と置き換えることが可能である。つまり  $h/k=h/w$  として考えることができる。

本研究において座屈長さに変化が生じた一辺長さを変化させた場合の座屈長さ $h$ と一辺長さ $w$ より上記の比を計算すると、 $w=15\text{mm}$  の場合 0.67、 $w=30\text{mm}$  の場合 0.57、 $w=50\text{mm}$  の場合 0.5 という結果が得られる。ここで、 $h/w$  が 0.5~0.7 の範囲で高さに対する座屈回数が決定されると仮定すると、 $w=30\text{mm}$  で高さが 70mm の場合、座屈回数は 3.3~4.7 回という結果が得られる。実際の結果は 4 回であるため、仮説が正しいと考えられる。座屈回数は整数であるため 0.5~0.7 という幅があるとも考えることも可能であるため、この知見を応用することで平均荷重の値だけでなく座屈回数を推定することも可能である。

#### 4-6 まとめ

本章では軸圧潰衝撃吸収部材を対象として、ランキン則と衝突解析を比較することで形状と座屈荷重の関係の評価が可能な推定式の構築を行った。その結果、ピーク荷重、平均荷重ともにランキン則が適用可能であることがわかった。

ピーク荷重についてはランキン則における座屈長さの定義と実現象における座屈長さの定義が異なる。そのため、ランキン則では軸高さが増加することで同一割合で座屈長さも増加したため座屈荷重が減少するとされてきた。しかし、実現象は軸高さが増加しても座屈長さは変化しないため座屈荷重に影響を与えないことが明らかとなった。

平均荷重については、ピーク荷重の場合と同様に軸高さの変化が座屈荷重に与える影響はない。さらに、一辺長さが増加することで座屈回数が増えることが明らかとなった。このことから、ランキン則では寸法形状に関係なく座屈回数は 1 回とされてきたが、実現象において一辺長さの変化が座屈回数に影響を与えることがわかった。

上記の一辺長さ $w$ と座屈回数 $n$ の関係に着目し、ランキン則の項である細長さ比 $h/w$ について評価を進めた結果、細長さ比に着目することで座屈回数を推定可能であることが明らかとなった。本来座屈荷重を導出するためのランキン則によって座屈回数が推定可能となったことで、これまで導出できなかったエネルギー吸収量や衝撃吸収挙動の推定なども可能となる。

## 第 5 章

# 断面圧潰衝撃吸収部材の 荷重推定式構築

## 5-1 はじめに

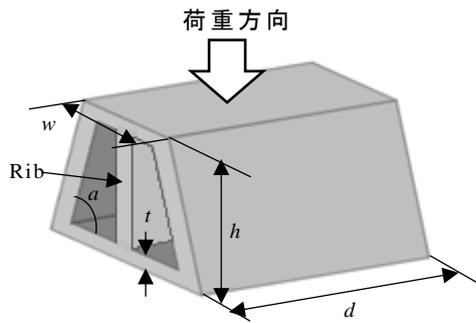
本章では、部材形状と座屈荷重の関係が導出可能な推定式を構築するために、既存の座屈荷重推定式であるランキン則と衝突解析の比較を行う。これによって、本来中実部材の座屈荷重推定に用いられるランキン則を中空部材に対しても使用可能かどうかを判断し、推定式の構築につなげる。そこで本章では、座屈現象によって衝撃吸収を行う部材の形態の一つである断面圧潰に対してランキン則と衝突解析の結果を比較する。

## 5-2 寸法因子の選定と解析条件

本研究で検討する衝撃吸収部材の形状として、台形断面の断面圧潰部材を対象とする。現状ステーやビームは、アルミニウム合金の押出成形法を用いて作製したものが多く使用されている。押出成形は一定断面であれば連続成形が可能であり、形状の自由度も高い。そこで、本研究では台形断面の衝撃吸収部材を対象とする。これは、現状のビーム形状に台形断面のものが存在するためである。元々鋼材のプレス材を組み合わせていた断面圧潰衝撃吸収部材が成形時の抜き勾配を考慮して台形断面となっていたことに由来する。また、長方形断面の設計因子はモデルの幅、高さ、板厚の3つであるが、台形断面ではモデルの上底長さ、下底長さ、高さ、板厚、等脚台形角度となり設計因子が増えるため衝撃吸収部材形状の決定が困難となる。本研究の目的のひとつとして、設計プロセスの短縮が挙げられるため、台形断面形状の衝撃吸収量を容易に推定できれば部材設計初期段階において有益な情報となると考えられる。よって、本研究では、単純な角パイプではなく台形断面を対象とすることで、取り扱える形状の自由度が高い推定式の構築を行う。

図 5-2-1 に部材形状を示す。また、図 5-2-1 中の上底 ( $w$ )、高さ ( $h$ )、角度 ( $a$ )、板厚 ( $t$ )、押出長さ ( $d$ )、リブを設計因子として選定した。寸法条件は網掛け部の条件が基準条件である。なお、本研究における荷重推定では、図 5-2-2 のように台形断面を構成する側面部とリブ部を分けて評価を行う。これによって、側面部の形状変化やリブの本数変化等、形状変更に対応しやすくなり様々な条件を検討することが可能になる<sup>1)</sup>。

本研究では車両に対して前面からの衝突を想定し図 5-2-3 のような解析条件を設定し、インパクトを表 5-2-1 のように定義した。なお、インパクト条件は車両質量を 1000kg の剛体とし、解析条件、材料特性を表 5-2-1、表 5-2-2 のように定義した。



上底 $w$ [mm]	50	-	-	-	-
高さ $h$ [mm]	65	80	95	-	-
角度 $a$ [deg]	50	60	70	80	90
リブ Rib	0	1	-	-	-
板厚 $t$ [mm]	1	1.5	2	-	-
押出長さ $d$ [mm]	30	65	100	-	-

Fig. 5-2-1 Dimensions of compression impact analysis model

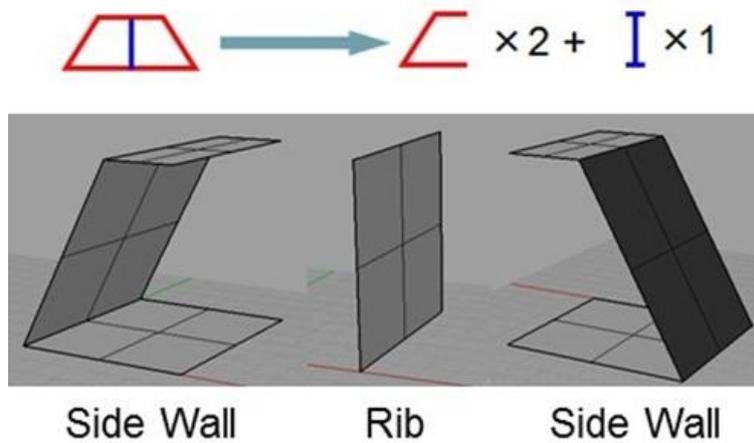


Fig. 5-2-2 Method for evaluating shock absorbing property of rib

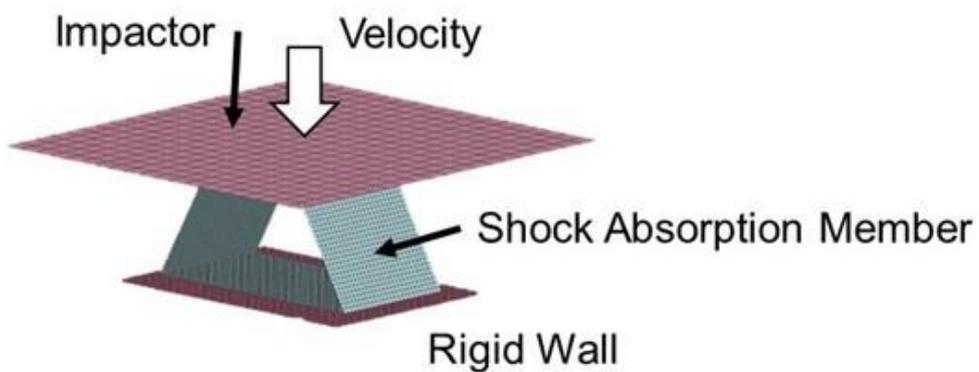


Fig. 5-2-3 Schematic diagram of Impact analysis

Table 5-2-1 Impact analysis condition

質量 [kg]	1000
寸法 [mm]	200×100
衝突速度 [m/s]	5.56 (20 [km/h])

Table 5-2-2 Material characteristics

材質	A5052
ヤング率 [GPa]	69.3
ポアソン比	0.30
メッシュサイズ	2.5mm
要素数	1104~9648

### 5-3 ピーク荷重の推定式構築

#### 5-3-1 リブ部ピーク荷重の推定式構築

リブ部のピーク荷重推定については、リブを単純な柱として考えることで、ランキン則を比較することが可能である。ランキン則は第4章の式(4-1)の形で表される。式(4-1)のように、ランキン則は非常に複雑な式の形をとっている。これは、ランキン則で取り扱うことができる適用範囲が広いからである。そこで、本研究で取り扱う因子である、板厚  $t$ 、押出長さ  $d$ 、高さ  $h$  について、衝突解析によって得られたピーク荷重とランキン則によって得られたピーク荷重の比較を行う。これによって、本研究で取り扱う条件範囲内において、ランキン則をより簡略化することができないか評価を行う。最終的に、それぞれの因子がピーク荷重に与える影響度に注目することで、本研究の適用範囲外への応用を検討する。

#### ・板厚 $t$ および押出長さ $d$

図 5-3-1 にリブ部板厚を変化させた場合のピーク荷重の解析値とランキン則の比較結果を示す。また、図 5-3-2 に押出長さを変化させた場合のピーク荷重の解析結果とランキン則の比較結果を示す。

図 5-3-1、5-3-2 より、板厚および押出長さがピーク荷重に与える影響は、解析とランキン則で大きな違いがないことが分かる。以上の結果より、リブ部ピーク荷重はリブの板厚および押出長さに比例することが分かる。しかし、板厚と押出長さは共にリブの断面を構成する因子であるため、断面積とピーク荷重の関係性を明らかにできれば、ランキン則をより簡略化することが可能である。そこで、以下でリブ部断面積とピーク荷重について評価を行う。

#### ・リブ部断面積

図 5-3-3 にリブ部板厚と押出長さから構成される断面積とピーク荷重の関係を示す。なお、断面積がピーク荷重に与える影響度について評価を行うため、基準条件であるリブ部断面積  $130\text{mm}^2$  の場合の断面積およびピーク荷重を 1 とした比率で結果をまとめた。

図 5-3-3 より、リブ部ピーク荷重はリブ部断面積によってまとめることができる。これは、座屈部分に発生している応力値は寸法因子に関わらず、同一である（材料によって決定される）ためである。その結果、断面積に比例する結果となった。

#### ・高さ $h$

図 5-3-4 にリブ部高さを変化させた場合のピーク荷重の解析値とランキン則の比較結果を示す。また、リブ部高さがピーク荷重に与える影響度について評価を行うため、図 5-3-5 に基準条件であるリブ部高さ 65mm の場合の断面積およびピーク荷重を 1 とした比率で結果をまとめた。

図 5-3-4 より、ランキン則では高さの増加に比例する形でピーク荷重が減少しているのに対して、解析結果は図 5-3-5 の影響度からも分かるようにリブ部高さとピーク荷重の関係は一定である（影響を与えない）ことが分かった。前述の板厚および押出長さについては、ランキン則に近似した変化が見られたが、高さに関しては異なる結果となった。この結果について考察を行う。

リブ部高さ 65mm の場合と 95mm の場合の圧潰モードの比較図を図 5-3-6 に示す。共にピーク荷重を生じた時点での圧潰モードとなるが、65mm の場合リブ部が全圧潰しているのに対し、95mm の場合リブ部は全圧潰していないことが分かる。また、圧潰していない部分が約 30mm であることから、高さが異なる場合であっても、座屈長さは変化しないことが分かる。ランキン則は図 5-3-7 のように部材が全圧潰することを前提としたピーク荷重を算出するものであるため、本研究の場合との差異が生じたと考えられる。

ランキン則によるピーク荷重の導出は、板厚、押出長さ、高さを変数とした非常に複雑なものである。しかし、本研究の条件範囲内であれば、以下の関係より、簡略的にピーク荷重を導出することが可能である。

- ・リブ部ピーク荷重は、板厚と押出長さを分けて考える必要はなく、板厚と押出長さによって構成されるリブ部の断面積によって決定される。
- ・ランキン則では、座屈長さと部材高さが同等という理想条件下でピーク荷重を評価しているが、実際の衝突現象では座屈長さは一定であり、座屈回数が変化するだけであるため、ランキン則とは異なり、高さの因子はピーク荷重に影響を与えない。

### 5-3-2 側面部ピーク荷重の推定式構築

側面部のピーク荷重推定については、リブ部と異なり角度  $a$  を有していることから、ランキン則をそのまま使用することはできない。そこで、基準モデルについて角度  $a$  のみを変化させたモデルの解析を行い、ピーク荷重の変化について評価を行った。その結果をもとに、 $a=90\text{deg}$ （長方形断面）におけるピーク荷重を 1 とした比率でまとめ、得られた傾向を補正式としてランキン則に掛け合わせることで側面部の推定式を構築する。 $a=90\text{deg}$  を基準とした  $\sin(a)$  とピーク荷重の関係を比で表した結果を図 5-3-7 に示す。

図 5-3-8 より、 $\sin(a)$  とピーク荷重の関係は線形近似できることがわかる。この近似式を補正式として基準となる解析結果に掛け合わせることで側面部のピーク荷重を表現する。式(5-1)に側面部の補正式を示す。

$$W_{\text{peak-side}} = 2.08 \times \sin(a) - 1.09 \quad (5-1)$$

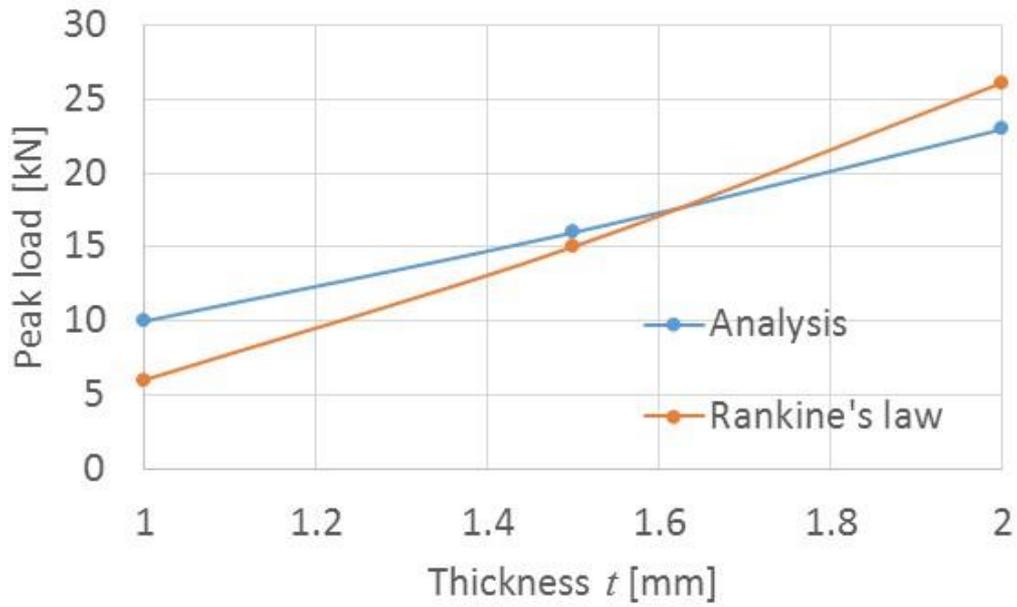


Fig. 5-3-1 Relation between the peak load and the thickness

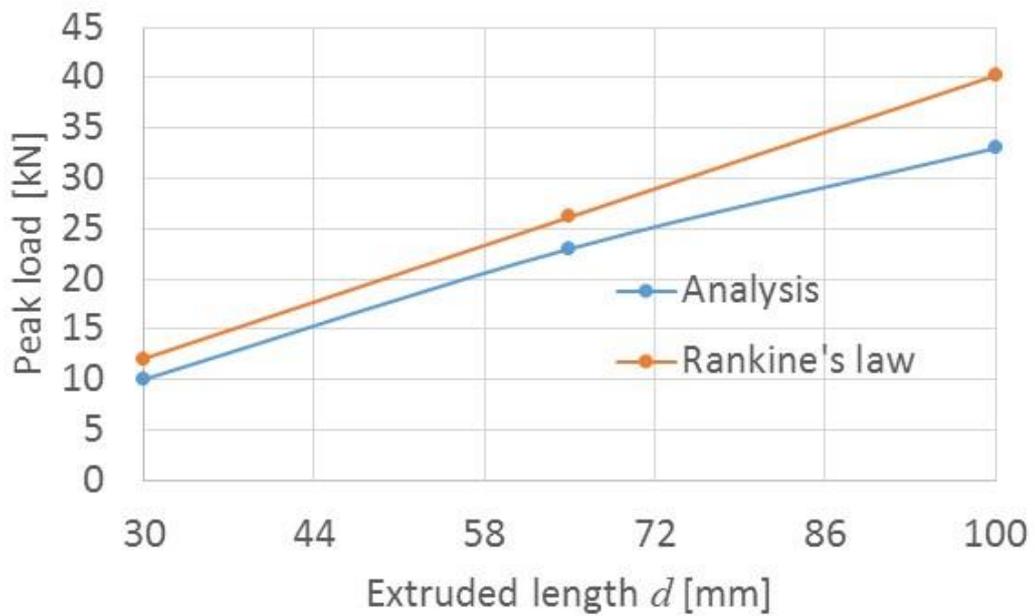


Fig. 5-3-2 Relation between the peak load and the extrude length

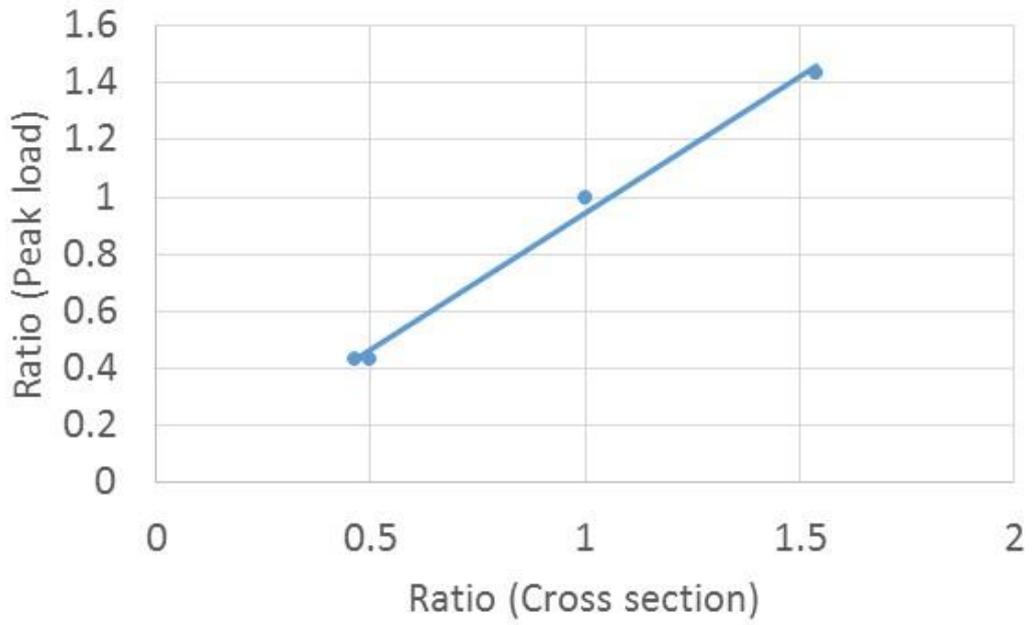


Fig. 5-3-3 Ratio of cross section to peak load

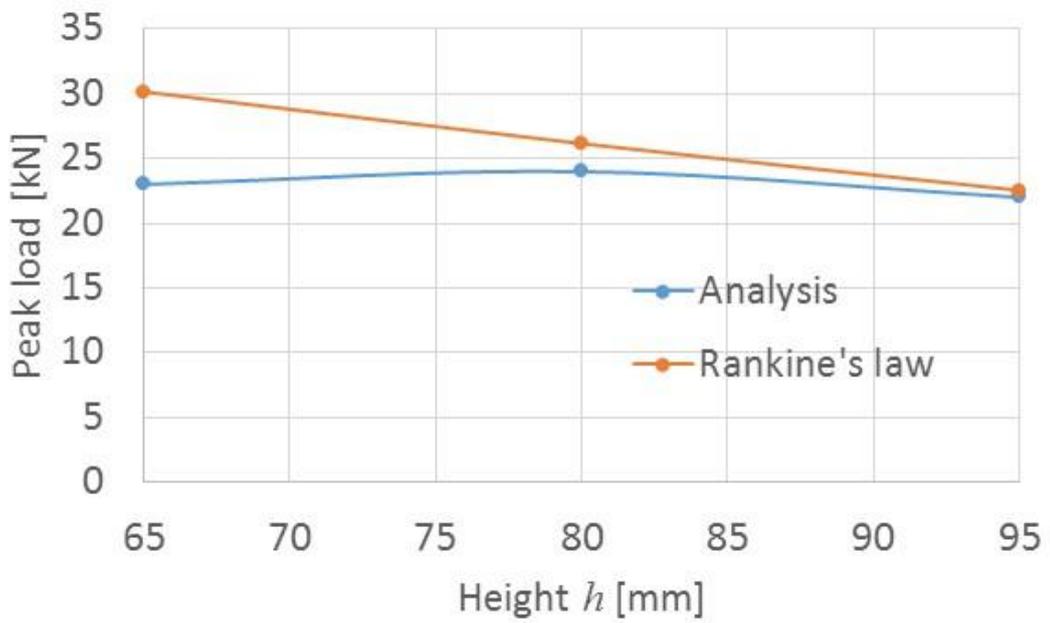


Fig. 5-3-4 Relation between peak load and height

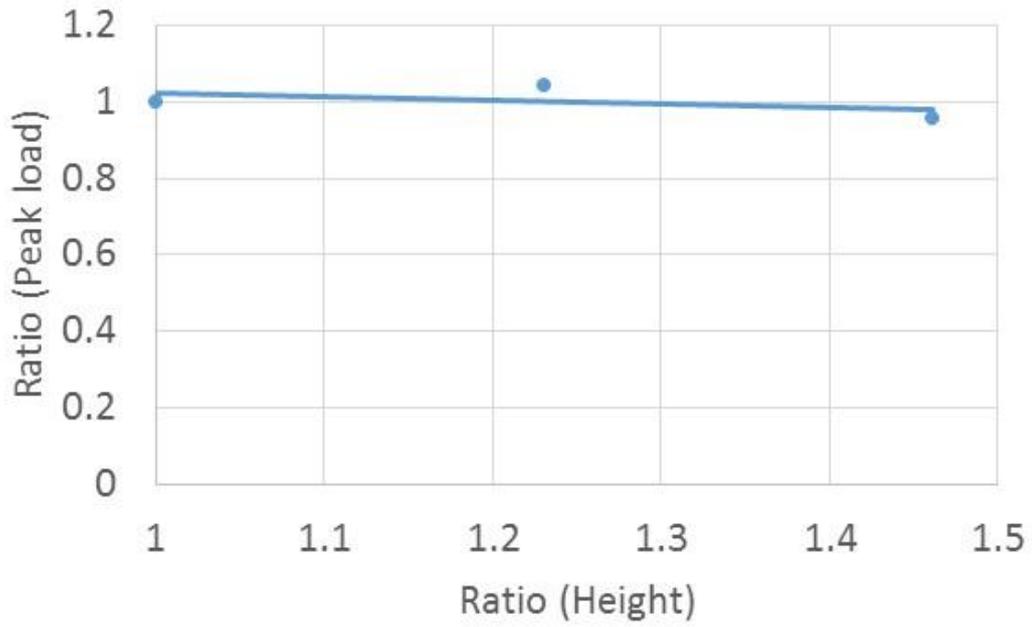


Fig. 5-3-5 Ratio of height to peak load



Fig. 5-3-6 Relationship between height and buckling length

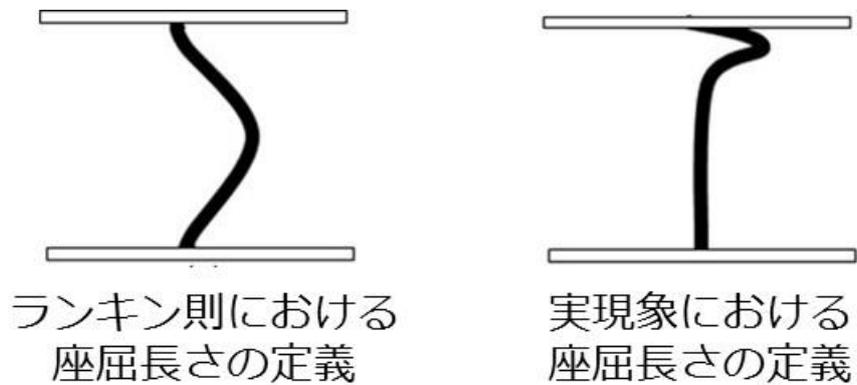


Fig. 5-3-7 Difference in buckling length

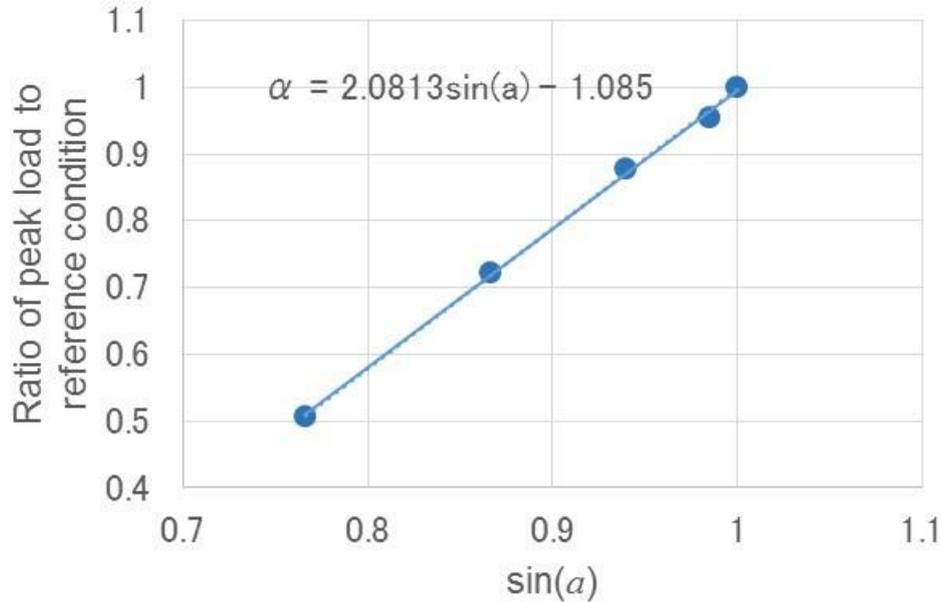


Fig. 5-3-8 Influence degree of the corner angle

#### 5-4 平均荷重の推定式構築

表 5-4-1(a)から(d)に Rib0,  $d65$  のとき, その他の設計因子の組み合わせを, 基準値を 3 つ以上含む条件において総当たりで解析を行った結果を示す. また, ピーク荷重・平均荷重は側面部 1 つ分の値を記載してある. この結果から側面部のピーク荷重・平均荷重を推定する式を構築する.

表 5-4-2 に Rib1,  $d65$ ,  $a60$ ,  $r0$  のとき, その他の設計因子の組み合わせを, 基準値を 2 つ以上含む条件において総当たりで解析を行った結果を示す. また, ピーク荷重・平均荷重はリブ部 1 つ分の値を記載してある. この結果からリブ部のピーク荷重・平均荷重を推定する式を構築する.

表 5-4-3 に  $w50$ ,  $a60$ ,  $h65$ ,  $t2$ ,  $r0$  のとき,  $d$  を変化させて解析を行った結果を示す. また, ピーク荷重・平均荷重は Rib0 では側面部 1 つ分, Rib1 ではリブ部 1 つ分の値を記載してある. この結果から  $d$  についての推定式を構築する.

##### 5-4-1 リブ部平均荷重の推定式構築

リブ部平均荷重の推定式には重回帰分析を行う. 式(5-2)を元に回帰分析を行い, 係数を決定する. 表 5-4-4 にリブ部平均荷重の回帰分析係数項を示す. このとき,  $a$  と  $r$  を説明変数としなかった. その理由として, リブ部には側面部の角度  $a$  が影響しないと考えたこと, 側面部  $r$  が影響しないと考えたためである.

$$W_{\text{Rib}} = \alpha + C_1 w + C_2 a + C_3 h + C_4 t + C_5 R \quad (5-2)$$

重相関 R 値は 0.849 であり, 重決定  $R^2$  値は 0.721 である.

### 5-4-2 側面部平均荷重の推定式構築

側面部平均荷重の推定も同様に重回帰分析を行う。表 5-4-5 に側面部平均荷重の回帰分析係数項を示す。側面部ではリブ部と異なり、 $a$  と  $r$  の項も説明変数として採用している。重相関  $R$  値は 0.885 であり、重決定  $R^2$  値は 0.783 である。

### 5-4-3 押出長さについて

部材長手方向  $d$  については理論式がなく、回帰分析をするにも変数がひとつであるために不可能である。よって、 $d$  については基準の 65mm を 1 としてそれぞれリブ部及び側面部について比をとった。この比をそれぞれリブ部・側面部の式に掛けることで推定する。リブ部・側面部はそれぞれ次式となった。

$$\text{ratio}_{d, \text{ Rib}} = 1.087 \times \left(\frac{d}{65}\right) \quad (5-3)$$

$$\text{ratio}_{d, \text{ side}} = 0.973 \times \left(\frac{d}{65}\right) \quad (5-4)$$

## 5-5 まとめ

本章では断面圧潰衝撃吸収部材を対象として、ランキン則と衝突解析を比較することで形状と座屈荷重の関係の評価が可能な推定式の構築を行った。その結果、ピーク荷重についてはランキン則が適用可能であることがわかった。また、平均荷重については寸法因子と座屈荷重の定量的な関係の評価できなかつたため、回帰分析による推定式の構築を行った。

ピーク荷重についてはランキン則における座屈長さの定義と実現象における座屈長さの定義が異なる。そのため、ランキン則では軸高さが増加することで同一割合で座屈長さも増加したため座屈荷重が減少するとされてきた。しかし、実現象は軸高さが増加しても座屈長さは変化しないため座屈荷重に影響を与えないことが明らかとなった。また、これまでは評価できないとされてきた斜め面を有する部材についても、角度の補正係数をランキン則にかけ合わせることで評価が可能である。

平均荷重については、各寸法因子を変化させた場合の座屈荷重を衝突解析によって導出し、その結果をもとに回帰分析を行い推定式を構築した。なお、本研究で構築した推定式は、材料係数を形状係数とともに設定しており、他材料における座屈荷重の推定にも使用することが可能である。

Table 5-4-1(a) Analysis result (Rib0, d65)

$w$ [mm]	$a$ [deg]	$h$ [mm]	$t$ [mm]	$r$ [mm]	Average load [kN]
30	60	80	2.0	0.0	2.70
	70				2.73
	80				2.23
50	60				2.48
	70				3.08
	80				25-2
70	60				2.00
	70				2.87
	80				2.62
30	60	95	2.0	0.0	2.26
	70				2.05
	80				1.88
50	60				1.88
	70				2.44
	80				1.91
70	60				1.55
	70				2.26
	80				2.01

\* Average load は側面 1 つ分

Table 5-4-1(b) Analysis result (Rib0, d65)

$w$ [mm]	$a$ [deg]	$h$ [mm]	$t$ [mm]	$r$ [mm]	Average load [kN]
50	60	65	2.0	0.0	2.97
	70				3.03
	80				3.49
30	60		1.0		0.525
			2.0		3.03
			3.0		6.98
50			1.0		0.409
			2.0		2.89
			3.0		7.09
70			1.0		04-30
			2.0		2.57
			3.0		7.11

\* Average load は側面 1 つ分

Table 5-4-1(c) Analysis result (Rib0, d65)

$w$ [mm]	$a$ [deg]	$h$ [mm]	$t$ [mm]	$r$ [mm]	Average load [kN]	
30	60	80	1.0	0.0	0.532	
			2.0		2.74	
			3.0		6.15	
1.0			04-28			
2.0			2.67			
3.0			5.64			
50		80	1.0		0.350	
			2.0		2.16	
			3.0		6.41	
70		95	30		1.0	0.550
					2.0	2.28
					3.0	6.16
30	95		1.0	0.392		
			2.0	2.02		
			3.0	4.65		
50	95		1.0	0.295		
			2.0	1.64		
			3.0	5.00		
70	95	1.0	0.295			
		2.0	1.64			
		3.0	5.00			

\* Average load は側面 1 つ分

Table 5-4-1(d) Analysis result (Rib0, d65)

$w$ [mm]	$a$ [deg]	$h$ [mm]	$t$ [mm]	$r$ [mm]	Average load [kN]	
50	60	65	2.0	1.5	3.06	
				3.0	2.42	
				5.0	1.86	
			3.0	1.5	3.20	
				3.0	2.63	
				5.0	1.99	
	70		70	1.5	3.20	
				3.0	1.39	
				5.0	1.37	
70	60	80	2.0	1.5	4.88	
50				3.0	3.0	4.04
					5.0	3.34
					1.5	3.22
50				60	3.0	1.93
					5.0	1.43

\* Average load は側面 1 つ分

Table 5-4-2 Analysis result (d65, a60, r0)

$w$ [mm]	$h$ [mm]	$t$ [mm]	Average load [kN]	
30	65	1.0	0.970	
		2.0	3.24	
50		1.0	1.22	
		2.0	5.80	
70		1.0	1.13	
		2.0	4.34	
		3.0	5.99	
30		80	1.0	0.644
			2.0	2.77
			3.0	5.28
50			1.0	0.630
			2.0	3.89
	3.0		3.79	
70	1.0		0.881	
	2.0		4.03	
	3.0		10.4	
30	95		1.0	0.645
			2.0	1.54
50			1.0	0.623
		2.0	1.79	
70		1.0	0.509	
		2.0	2.56	
		3.0	2.58	

\* Average load はリブ 1 つ分

Table 5-4-3 Analysis result (w50, a60, h65, t2, r0)

$d$ [mm]	Rib [-]	Average load [kN]
30	0	1.32
65		3.06
100		4.87
135		5.94
30	1	2.20
65		5.48
100		6.63
135		10.6

\* Average load は Rib0 は側面 1 つ分, Rib1 はリブ 1 つ分

Table 5-4-4 Regression analysis coefficient term (Average of Rib section)

$\alpha$	3-21
C <sub>1</sub>	0.0213
C <sub>2</sub>	-
C <sub>3</sub>	-0.0615
C <sub>4</sub>	3-26
C <sub>5</sub>	-

Table 5-4-5 Regression analysis coefficient term (Average of side section)

$\alpha$	-0.946
C <sub>1</sub>	0.00198
C <sub>2</sub>	0.0248
C <sub>3</sub>	-0.0334
C <sub>4</sub>	3-20
C <sub>5</sub>	-0.293

## 第 6 章

# 実形状に対する 推定式の精度評価

## 6-1 はじめに

これまで部材断面設計因子を様々に組み合わせて衝撃解析を行い、得られたデータから部材のピーク荷重及び平均荷重を推定する式を構築してきた。しかし、これらは飽くまでもコンピュータ上での計算であり、実際の衝突現象と合致しているかどうかは定かでない。本来ならば実際に目標値を設定し、衝撃吸収部材を設計することが望ましいが、これまでに衝撃吸収部材の設計を行っておらず、対象とする衝撃吸収部材の目標等の情報が不明瞭であり、正確な評価を行うことができないと考えられる。そこで本章では、実際に自動車に搭載されているバンパビームとステーについて静的圧潰試験を行い、得られたデータと本研究で推定した値とが合致するか確認する。これによって、推定式が実形状のような複雑形状にも対応可能かどうかを評価する。また、推定式を用いた改良設計を行うことで、推定式の汎用性を高める。

## 6-2 実形状の座屈荷重推定

前章までで軸圧潰、断面圧潰それぞれのピーク荷重と平均荷重を推定可能な推定式の構築を行った。しかし、構築した推定式は単純形状に対して得られた結果であり、複数の部材によって構成されるような実形状に対して適用可能か評価ができない。そこで実形状として本研究の対象であるバンパレイソフオースを例に、実現現象と推定式によって得られる荷重値を比較し、推定式の整合性評価を行う。

### 6-2-1 試験モデルと試験結果

図 6-2-1 から 6-2-3 に試験で用いたバンパビーム及びステーの図面を示す。試験には A7075 を使用し、図 6-2-4 の状態で試験を行った。アムスラステージの移動速度を 1m/s とした。その際に左右ステーに加わる荷重を検出した。なお、静的圧潰試験は日軽金アクト様のご協力の元で行われた。

図 6-2-5 に静的圧潰試験より得られた荷重-変位曲線を示す。試験結果より、圧潰初期から変位 10mm を超えたところでピーク荷重が生じ、ステー圧潰中に荷重が減少、その後ビームが圧潰を開始したところで荷重が上昇する傾向が確認できた。

図 6-2-6 に試験結果のステー部圧潰挙動を示す。変位 8mm ごとに図を示したが、変位 32mm のところで台形断面ステーの圧潰が完了していることがわかる。

### 6-2-2 解析モデルと解析結果

図 6-2-7 に解析で使用したモデルを示す。解析条件は試験条件と同様に 7000 系アルミニウム合金を用い、1m/s で衝突用のバリヤに強制変位させた。

図 6-2-8 に解析によって得られたステー部の圧潰挙動を示す。圧潰試験と同様の挙動が得られ、変位 32mm 近傍でステーの圧潰が完了することも確認できた。

### 6-2-3 推定式との比較

本研究では台形断面形状の衝撃吸収特性について推定式を構築してきた。検証に用いたアセンブリモデルではステー部が台形断面形状であるため、ステーについて推定式と実験結果を比較する。このとき図 6-2-9 にステー部の各部位を I ~ IV まで名称を付けてそれぞれについてピーク荷重及び平均荷重を推定して考察を行った。また、ステー部各位の寸法を表 6-2-1 に示す。

ステー部の I ~ IV についてピーク荷重と平均荷重を算出し、グラフ上にまとめた結果を図 6-2-10 に示す。なお、今回検討したステーはそれぞれ高さが異なっており、衝撃吸収を行う際に変位差を生じる。そのため、それぞれの変位差を考慮してグラフにプロットしている。また、それぞれの波形を足し合わせて一つの部材として表現したものが図 6-2-11 となる。この結果が、推定式を用いた際に得られるステー（複合部材）の衝撃吸収特性である。推定式より得られた荷重値は、ピーク荷重が 171.3kN、平均荷重が 167.7kN である。

図 6-2-12 に圧潰試験から得た荷重-変位曲線と推定式から得たピーク荷重を比較したものを示す。圧潰試験の結果におけるピーク荷重が約 180kN であるのに対して、推定式では 171.3kN でありその誤差はおよそ 5%となった。この結果より推定式が実際の圧潰現象と近似した値を得ており、推定式が妥当であると考えられる。

図 6-2-13 に圧潰試験から得た荷重-変位曲線と推定式から得た平均荷重を比較したものを示す。圧潰試験の結果における平均荷重が約 150kN であるのに対して、推定式では 167.7kN でありその誤差はおよそ 11%となった。この結果より推定式が実際の圧潰現象と近似した値を得ており、推定式が妥当であると考えられる。

### 6-2-4 実形状の座屈荷重推定のまとめ

本節ではこれまで構築した推定式を用い、複数部材からなる実形状に対して推定式が適用可能かどうか評価を行った。その結果、複合形状のような複雑な部材に対しても実現象の荷重値を推定可能であることがわかった。

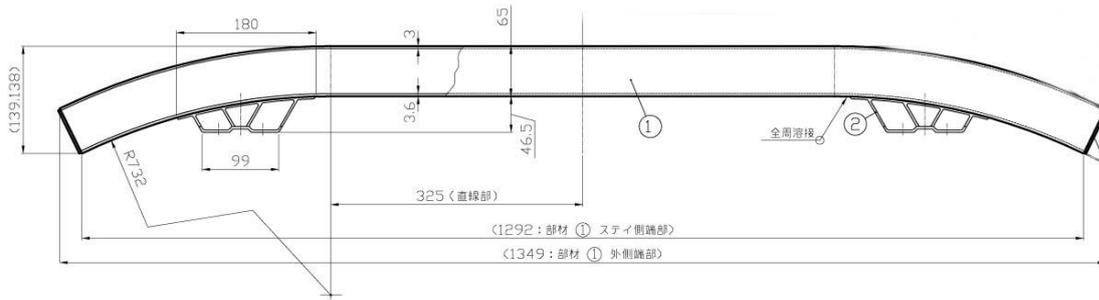


Fig. 6-2-1 Bumper reinforcement

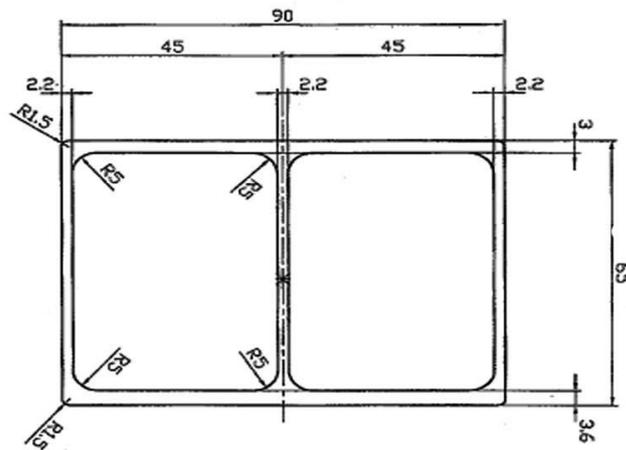


Fig. 6-2-2 Sectional view of beam

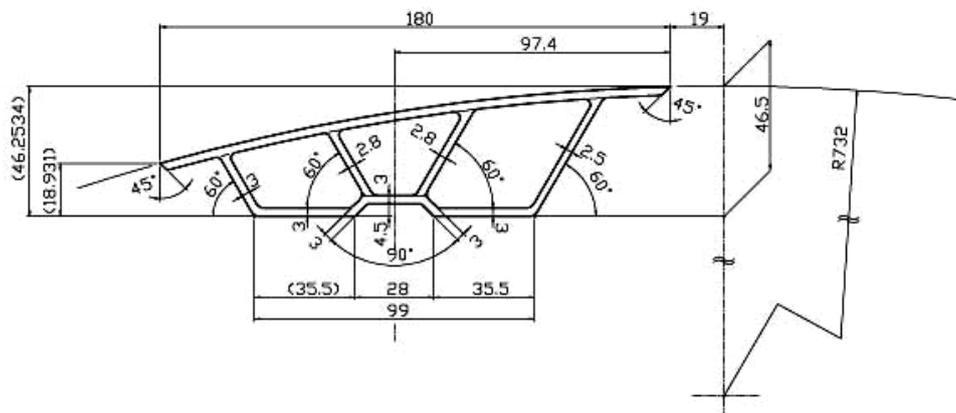


Fig. 6-2-3 Sectional view of stay

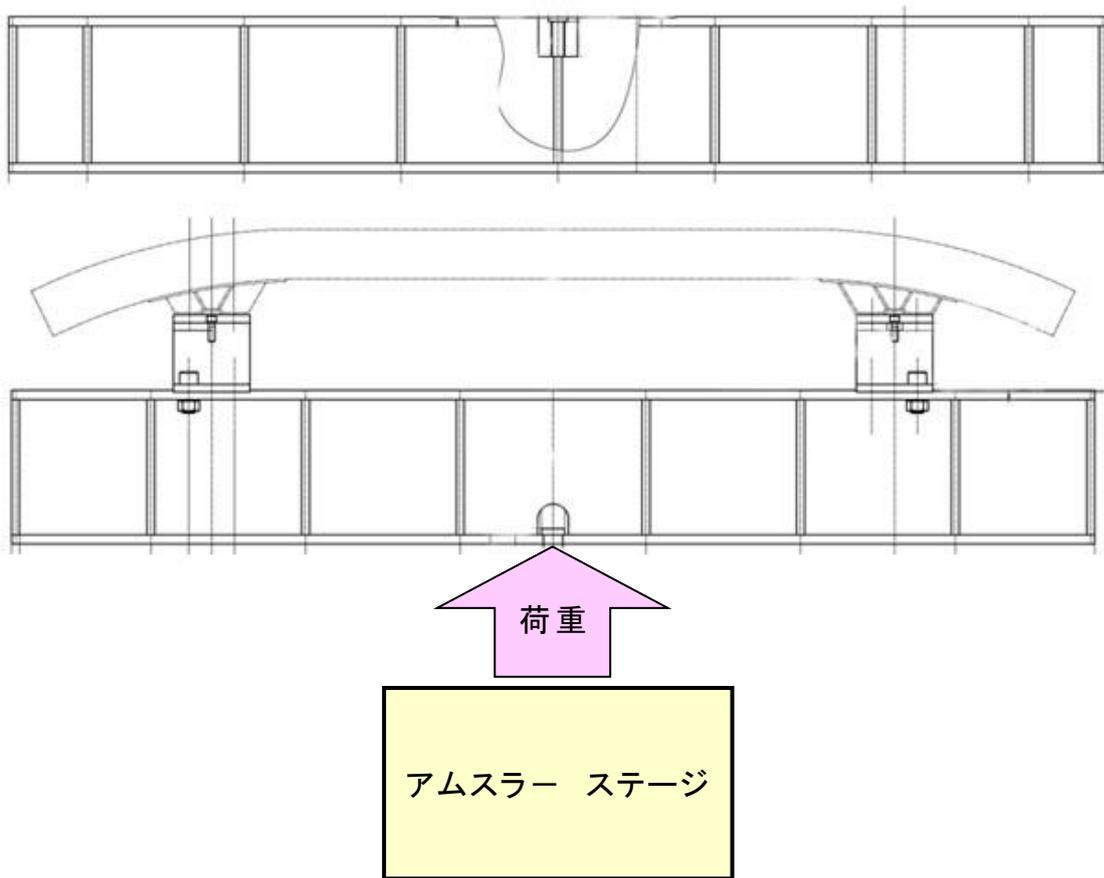


Fig. 6-2-4 Schematic diagram

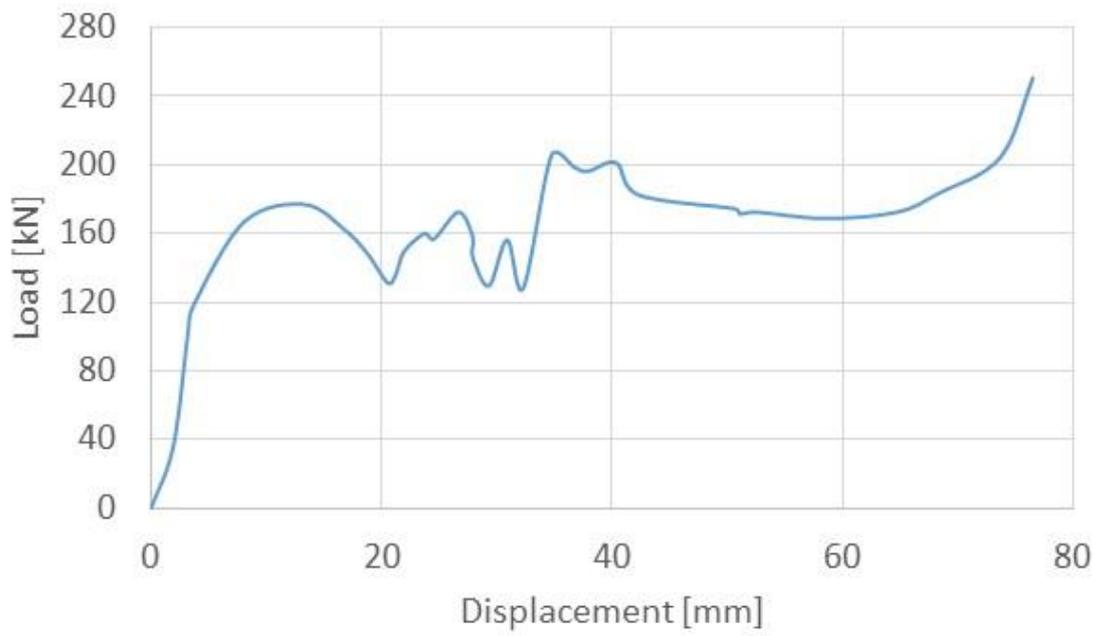


Fig. 6-2-5 Load-displacement curve of bumper reinforcement

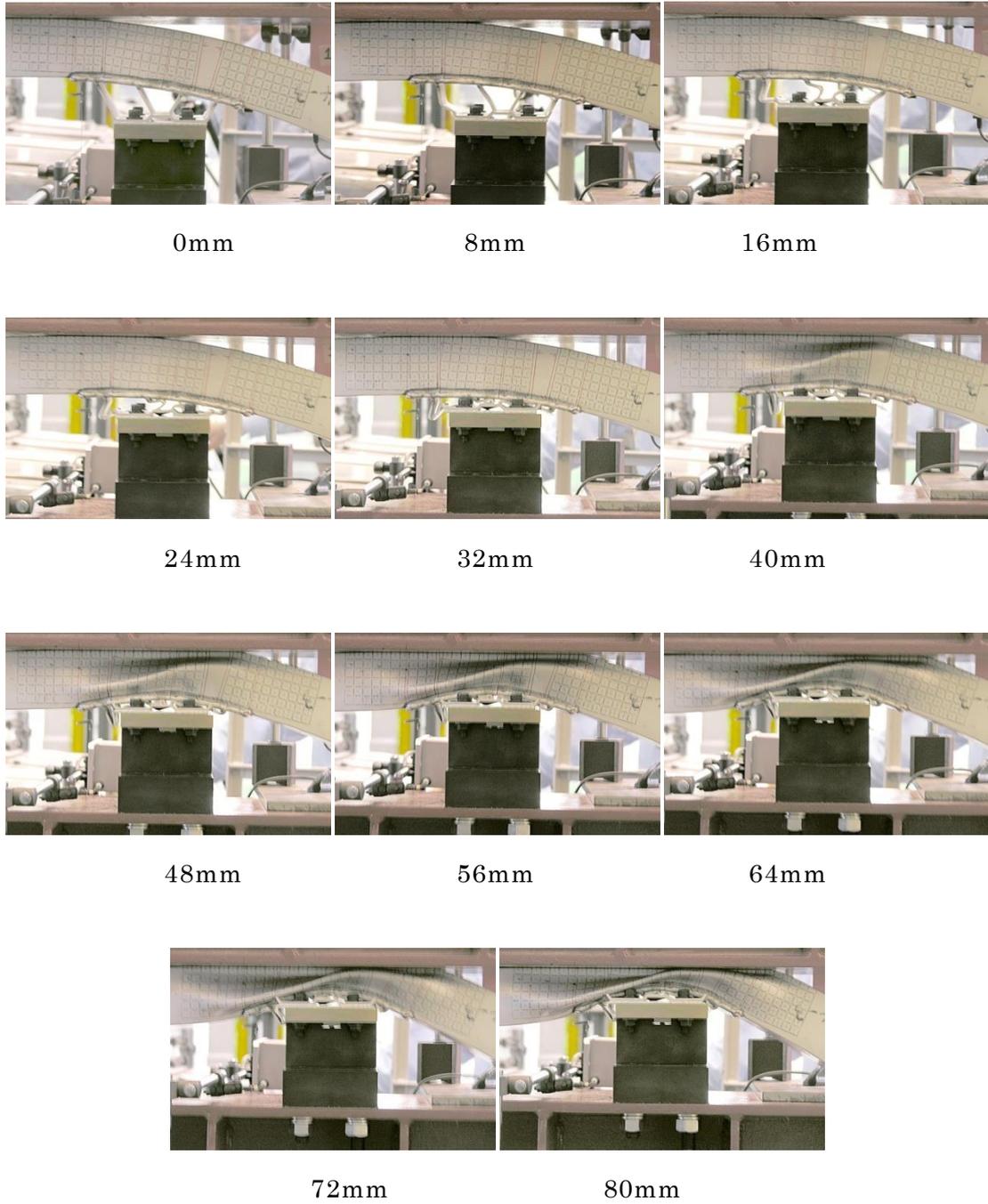


Fig. 6-2-6 Crush motion of experiment

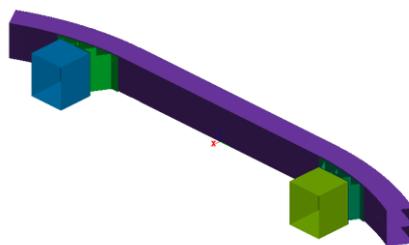


Fig. 6-2-7 Analysis model

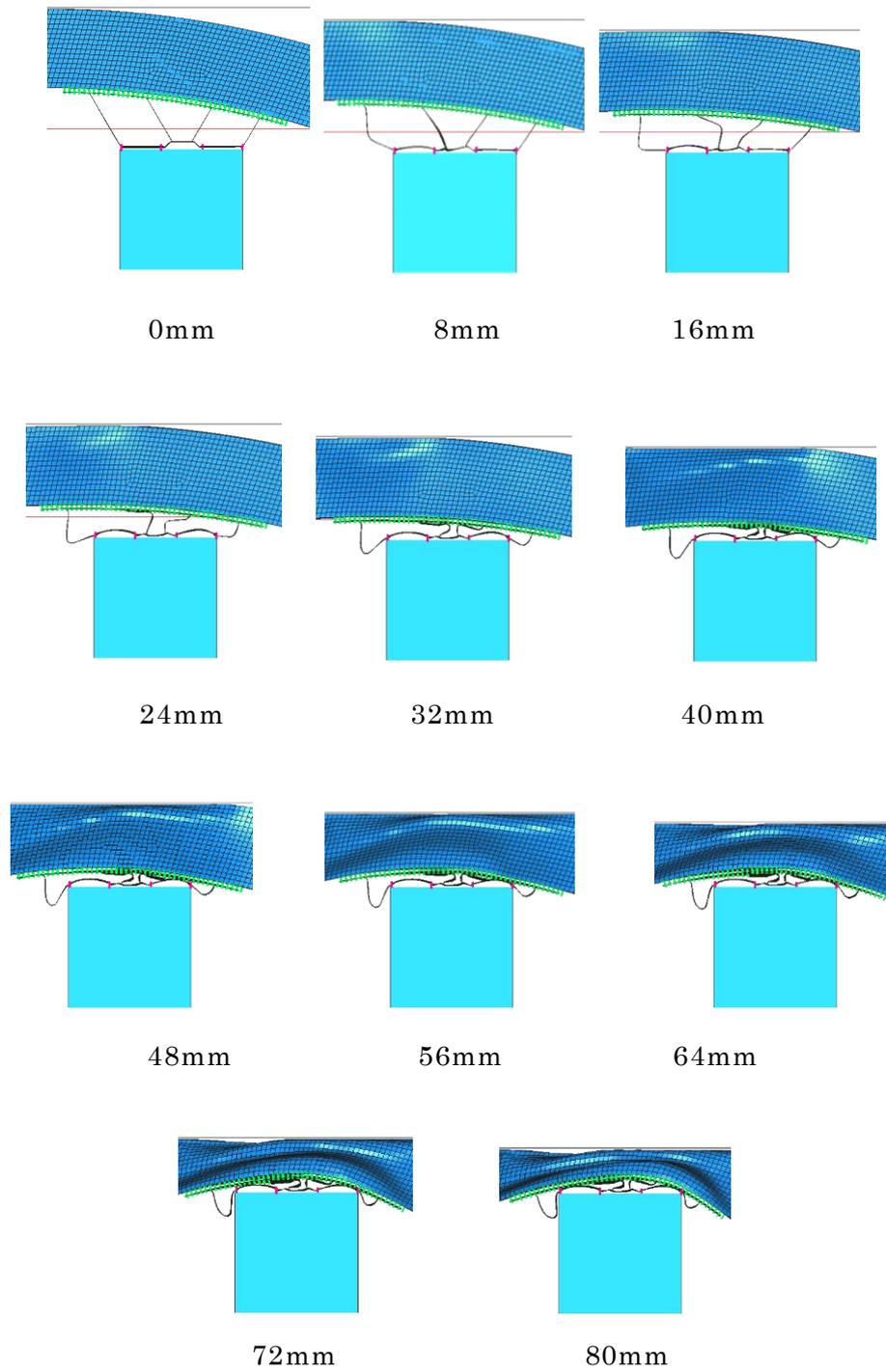


Fig.6-2-8 Crush motion of analysis

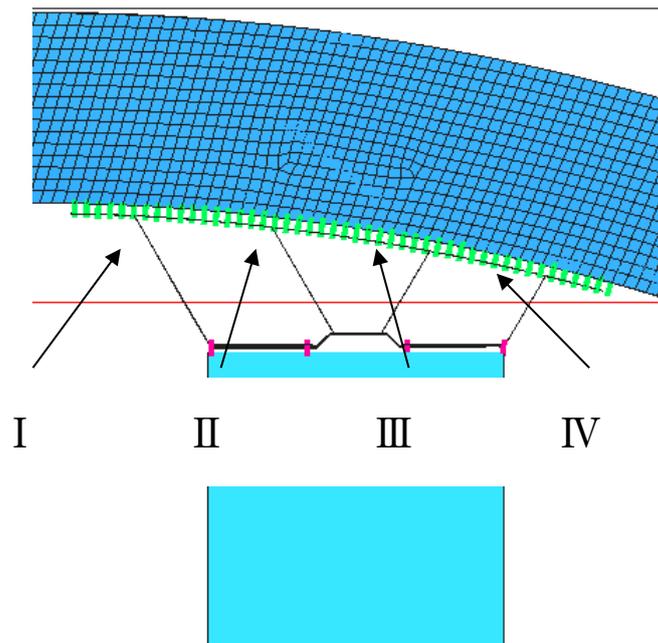


Fig. 6-2-9 Each part of the stay

Table 6-2-1 Dimensions of each part of the stay

	I	II	III	IV
$w$ [mm]	35.5	28.0	28.0	35.5
$h$ [mm]	46.5	41.3	32.9	18.9
$a$ [deg]	60			
$t$ [mm]	2.5	2.8	2.8	3.0
$R$ [mm]	0.0			
$d$ [mm]	90.0			

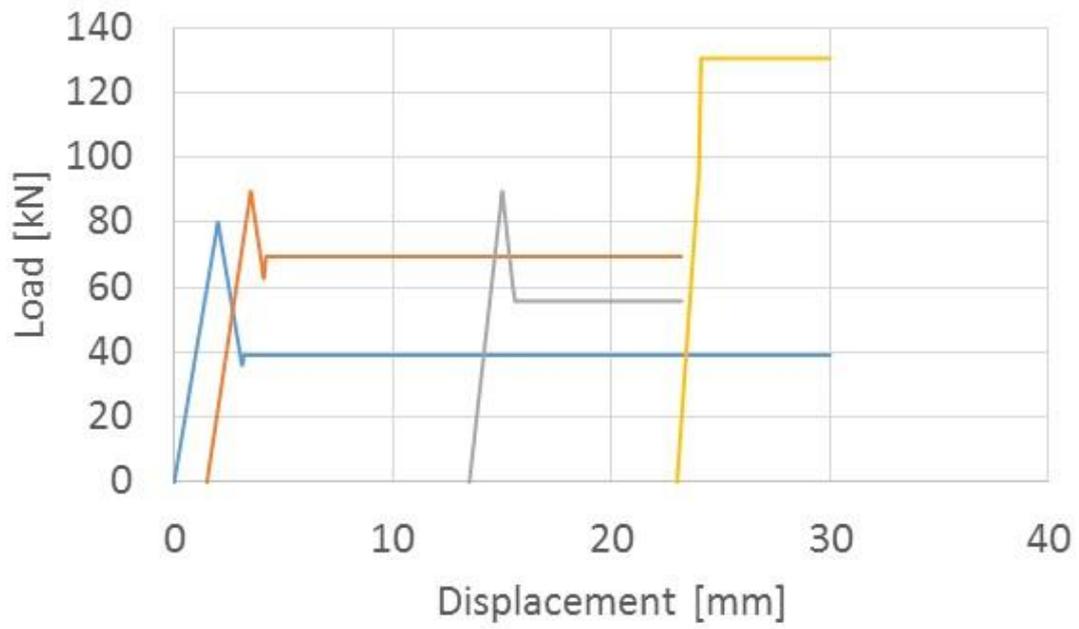


Fig. 6-2-10 Load prediction considering time difference

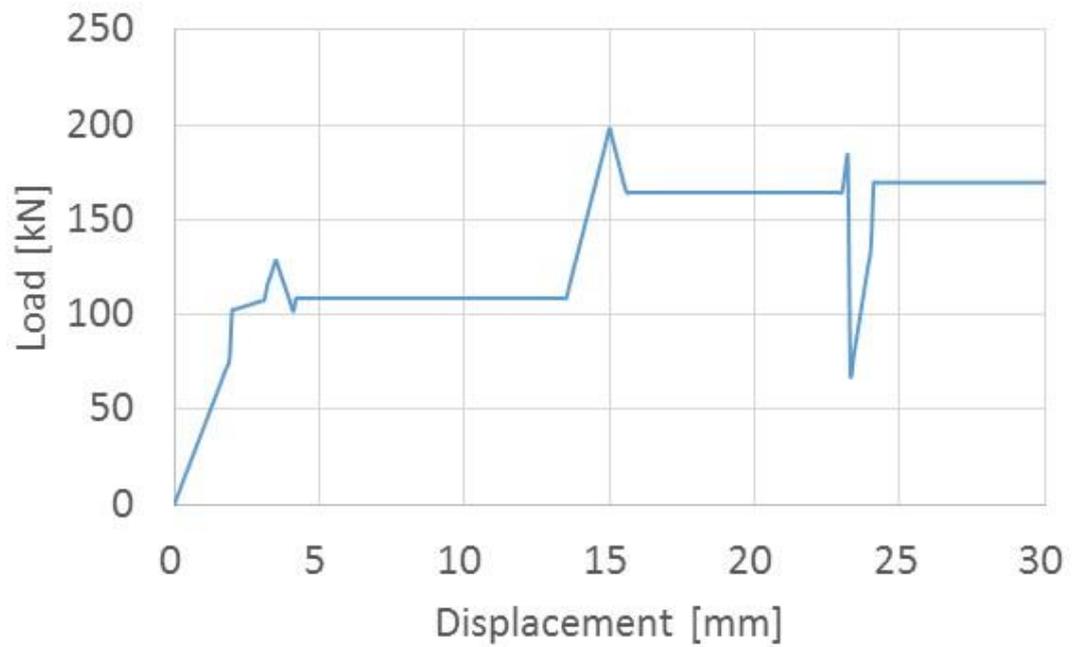


Fig. 6-2-11 Load prediction using prediction equation

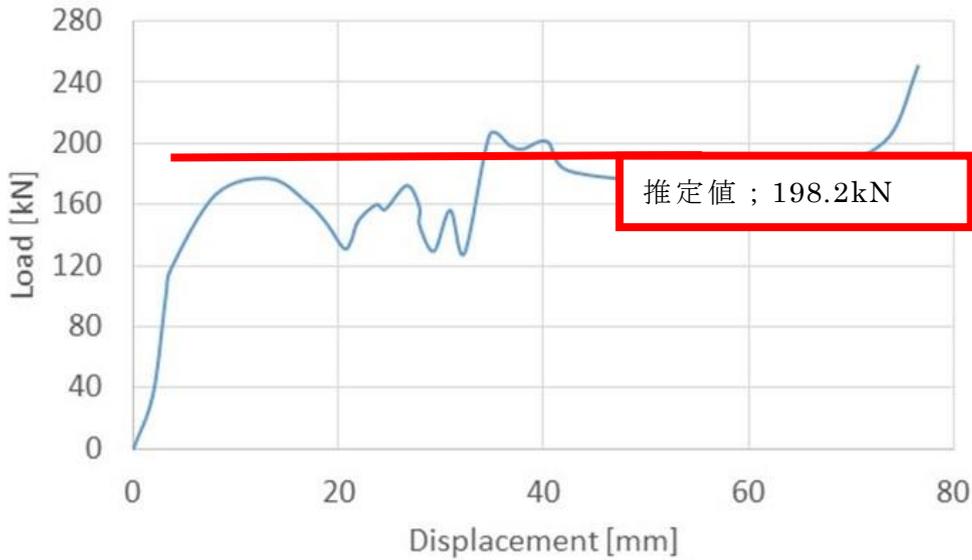


Fig. 6-2-12 Comparison of peak load of experiment result and estimated formula

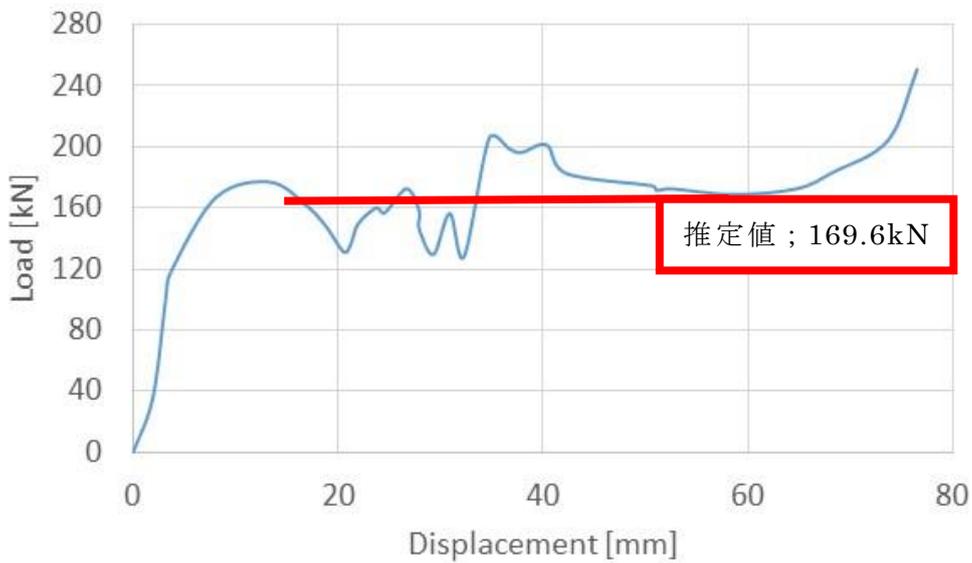


Fig. 6-2-13 Comparison of average load of experiment result and estimated formula

### 6-3 実形状の改良案導出

前節では、これまで構築してきた推定式を用いて既存のバンパレインフォースの荷重値を推定した。その結果、推定値は実測値と大きな誤差がなく、推定式に部材寸法を入力することで複雑な形状についても荷重推定が可能であることを結果として得た。以上の点より、本研究で構築した推定式を設計プロセスに組み込むことで、形状検討の段階で形状と圧潰荷重の関係性を評価することが可能となり、設計の効率化につながると考えられる。

本節では、推定式の応用性について評価を行う。前章まではゼロから設計を行う際に推定式を使用することを前提としていたが、実際の製品設計はゼロから設計することがすべてではない。自動車を例とした場合、ゼロから設計する場合のフルモデルチェンジに対して部分的に形状・仕様変更を行うマイナーチェンジが存在する。その点に着目し、既存の製品に対して狙った目標値が得られる形状への改良過程に推定式を応用することができないか評価を行う。

### 6-3-1 目標値の設定

対象とする既存製品として、前章の図 6-2-3 に示したバンパステーを改良することとする。以下に目標値の設定とその他の条件について述べる。

#### (1) 達成目標の設定

本検討における数値目標として、低速での自動車衝突のエネルギー吸収を例に考える。前節の図 6-2-5 の結果より、既存のバンパレインフォースの衝撃吸収挙動はエネルギー吸収量に特化したものであることがわかる。しかし、バンパステーの役割としてエアバッグが作動しない低速域での乗員の保護も考えられる。その観点より、目標とする衝撃吸収挙動を右上がりの緩やかな挙動とし、最大荷重を 200kN とする。図 6-3-1 に既存形状の衝撃吸収挙動に対する目標値の比較を示す。

#### (2) 制約条件

制約条件として、既存の製品の形状を大きく変更しないものとする。また、材料についても変更せず、あくまで微小な形状変更によって目標を達成するものとする。

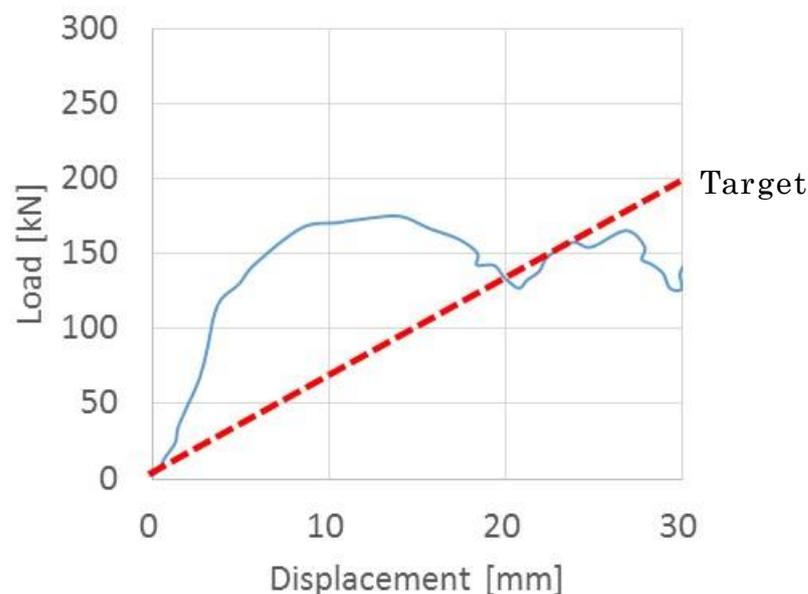


Fig. 6-3-1 Target value of improvement plan

### 6-3-2 改良案の導出

図 6-3-2 に既存形状と改良案の比較図を示す．図中の上側が既存形状であり，下側が改良案である．また，改良箇所は赤で示している．図 6-3-3 に既存形状の衝撃吸収特性における問題箇所を示す．

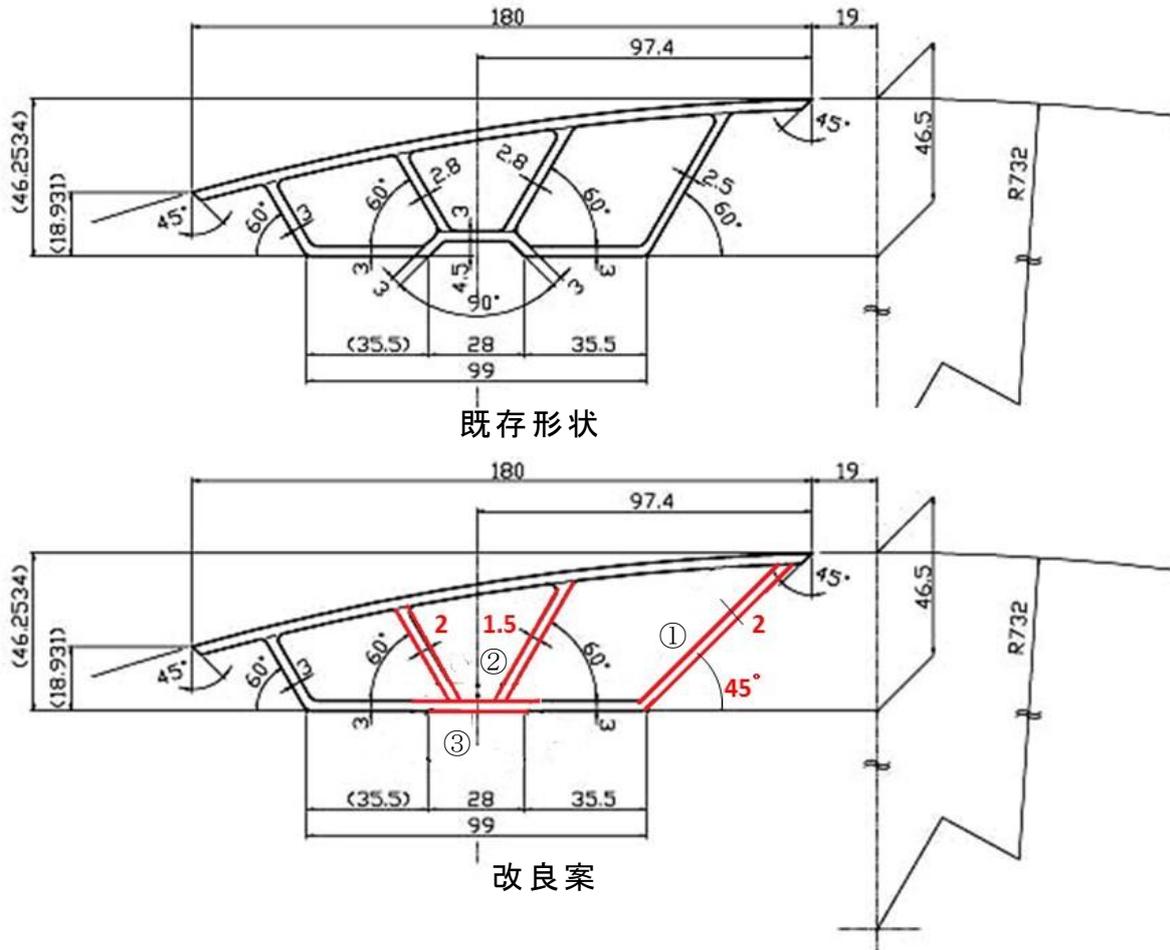


Fig. 6-3-2 Changes to improvement plan

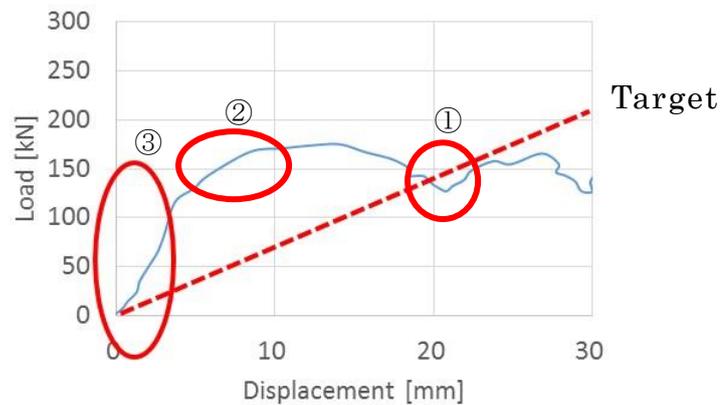


Fig. 6-3-3 Delamination point with target

### 6-3-3 改良点

図 6-3-2 の①の問題点に着目した場合、圧潰直後のピーク荷重にかい離が見られる。図 6-3-3 より、変位 3mm 付近で目標値と測定値に大きなかい離が生じている。そのため、板厚を低減することで荷重値の低下を図った。また、斜め面を有する場合、角度を浅くするほど荷重値が低下することから、角度を 15deg 浅くした。

次に②の問題点に着目した場合、複数の部材を組み合わせた際に生じる変位差を伴うピーク荷重が結果のかい離に影響していると考えられる。図 6-3-3 より、変位 5mm 付近と 9mm 付近で挙動に変化が生じていることがわかる。このピーク荷重が原因となり、目標値と測定値に大きなかい離が生じている。そのため、板厚を低減することで荷重値の低下を図った。

最後に③の問題点に着目した場合、形状に起因する平均荷重の低下が問題として考えられる。図 6-3-3 より、変位 20mm 付近で荷重値が低下し、衝撃吸収挙動が右下がりに変化することがわかる。そのため、部材を全圧潰させ平均荷重の低下を防ぐために形状の変更を行った。

### 6-3-4 改良案の性能評価

図 6-3-4 に改良案の衝撃吸収挙動を示す。なお図の衝撃吸収挙動は推定式をもとに作製したものである。前節で挙げた問題点を考慮して改良を行った結果、目標とした衝撃吸収挙動に近づいていることがわかる。なお、今回対象とした既存形状は複数のリブによって構成されているため、従来通り有限要素解析を用いた形状変更を行った場合、それぞれの影響を経験的に考慮する必要があり、非常に時間がかかってしまう。しかし、推定式を使用した場合、寸法変更による荷重値の変化を瞬時に概算することができ、非常に効率が良いと考えられる。実際にモデルの作製から解析まで行った結果、モデルの構築に 1 時間程度、解析条件の設定および解析完了までに 2 時間で結果が得られることがわかった。なお、解析結果は図 6-3-5 に示すように荷重値にわずかなずれは生じるが、衝撃吸収挙動は狙ったものが得られており、概略設計として用いる際に有用だと考えられる。

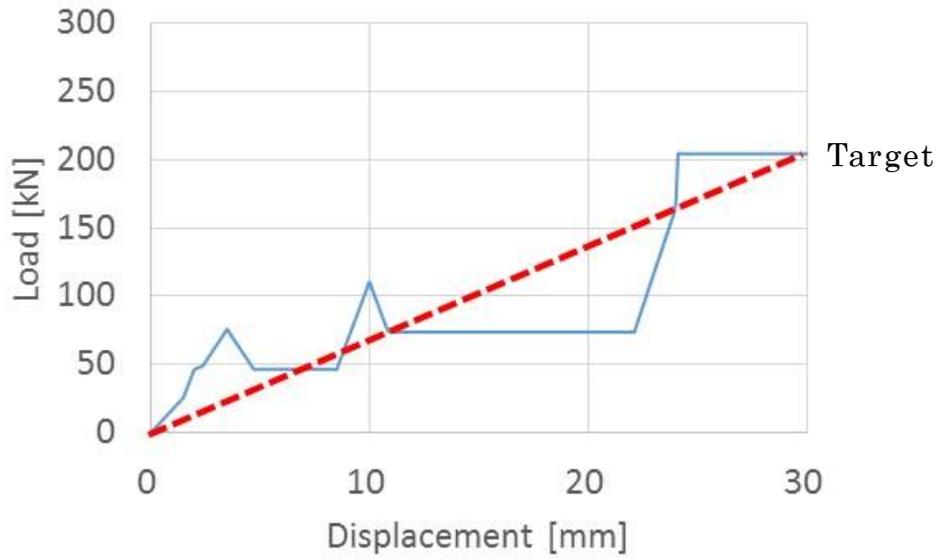


Fig. 6-3-4 Comparison of improvement plan and target value

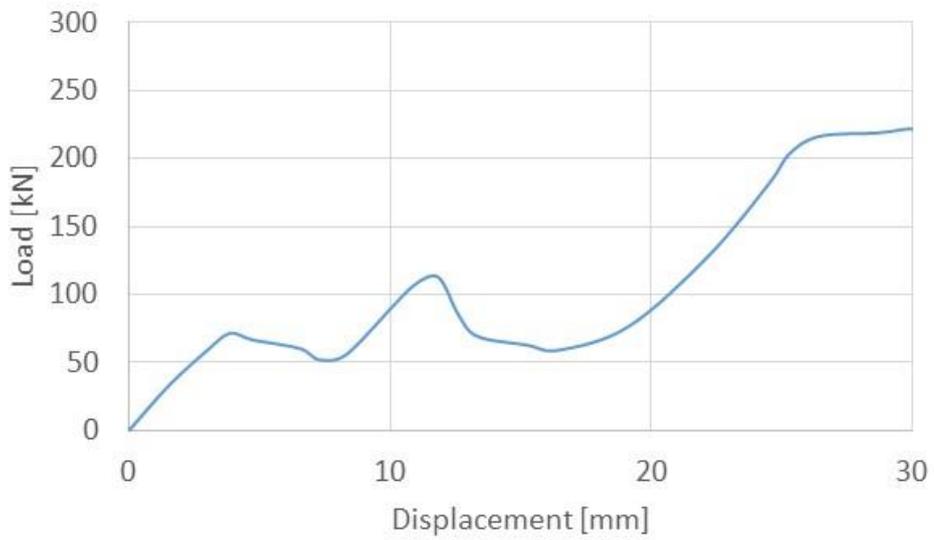


Fig. 6-3-5 Analysis result

#### 6-4 まとめ

本章ではこれまでに構築してきた推定式を用いて、実際のバンパーシステムの衝撃吸収特性と比較した。

ピーク荷重では誤差が 5%となりおおよそ整合性を得ていると考えられる。ピーク荷重はランキン則を基にしているため、精度の高い推定式が構築できたものと考えられる。

平均荷重は誤差が 11%となった。平均荷重には理論式がないため、本研究では解析結果から重回帰分析を行ったが、データ数が少ないために構築した推定式の信頼度が低下してしまったと考えられる。しかしながら、誤差は許容範囲であり、おおむね実際の衝撃吸収特性を示していると考えられる。また、構築した推定式をもとに改良設計を行ったところ、目標とする衝撃吸収挙動が実現可能な形状設計が可能であることがわかった。荷重値にわずかな差は生じたが非常に短時間で概略設計が可能であるため、実際の設計現場において有用であると考えられる。

## 第 7 章

## 結 論

本研究では新たな手法として、衝突解析によって得られた荷重値とランキン則によって得られた荷重値を比較することで、荷重導出の推定式の構築を試みた。また、導出された推定式を用いた概略設計手法の構築を行った。その過程で、下記の知見が得られた。

第2章では、本研究の流れとして実験、衝突解析、推定式、推定式の立ち位置について説明を行った。また、本章では推定式について詳細な言及を行い、圧潰荷重の導出においてランキン則とオイラー則では適用可能な範囲が異なることが分かった。なかでも、衝撃吸収部材の寸法条件で使用することが可能なランキン則について、本来中実部材の座屈荷重を導出するものであり、平均荷重は求めることができないことがわかった。さらに複雑な座屈挙動を示す本研究のような場合は、ピーク荷重についても推定できない可能性があることがわかった。そこで、本研究で用いる中空部材に対して用いることが可能な推定式を構築するべく次章より検討を行った。

第3章では、衝突解析の実現象との整合性評価を行った。その結果、ピーク荷重は解析のほうが少し大きい結果となったが、荷重-変位曲線の荷重の推移は同様の挙動を示し、変形の様子においても試験片の変形を解析では再現できていた。よって、衝突解析は実現象を再現できていることがわかった。以上の点を踏まえ、次章以降、ランキン則と衝突解析によって得られた荷重値を比較し、寸法形状と座屈荷重の関係が評価可能な推定式の構築を行った。

第4章では、第2章で問題となったランキン則の適用について、軸圧潰部材の座屈荷重推定に使用するために、軸圧潰衝撃吸収部材の寸法と荷重の関係に着目した。新たな知見として部材断面を構成する板厚、一辺長さそれぞれの影響を考慮するのではなく、それらによって構成される部材断面積によって荷重値が決定されること、軸高さが変化しても荷重値は変化しないという知見が得られた。このことから、本研究の条件下であれば、ランキン則を定数（材料条件や拘束条件）と部材断面積のみの簡略化した形で使用できることが分かった。

平均荷重については、板厚の影響を考慮したランキン則に変形することで推定が可能であることがわかった。また、ランキン則の因子である細長さ比に着目することで、新たに座屈回数を推定することが可能となった。

第5章では、第2章で問題となったランキン則の適用について、断面圧潰部材の座屈荷重推定に使用するために、断面圧潰衝撃吸収部材の寸法と荷重の関係に着目した。リブ部に関しても本研究の条件下であれば、ランキン則を定数と部材断面積のみに簡略化可能であることが分かった。

側面部に関しては、本来ランキン則は斜め面を有する部材の座屈荷重を導出することができないため、そのまま適用することは不可能である。そこで、側面部の角度とピーク荷重は比率で表せることに着目し、前述の簡略化した

ランキン則に、今回算出された比率を掛け合わせることで、これまで評価が  
できなかった角度を有する側面部のピーク荷重を評価することが可能とな  
った。

平均荷重については、寸法因子と座屈荷重の関係について定量的な評価を  
行うことができなかった。またランキン則による評価は寸法因子が多く、そ  
れぞれの相互作用も考えられたため、本研究では衝突解析によって得られた  
結果をもとに、重回帰分析を行い推定式の構築、及び影響度の評価を行った。

第 6 章では、実形状への応用について検討を行った。第 4 章までに構築し  
た推定式は単一の部材を対象とするものである。実際の製品は複数の部材を  
組み合わせた形状であるため、実形状への応用が可能であるか検討を行った。  
実形状の評価は、バンパレインフォースに対して静的圧縮試験を行い、圧潰  
荷重と推定式によって得られる荷重値を比較することで、推定式の精度の確  
認、および複数の式を組み合わせて使用することが可能か評価した。その結  
果、推定式によって得られた荷重値は、実験値と比較して誤差 10%程度であ  
ることから、実形状を対象とした実際の製品設計の現場でも、本研究の推定  
式は使用することで大まかな座屈荷重を推定することが可能である。

また、推定式の応用性について評価を行った。これまでは設計を初期段階  
から行う際に推定式を使用することを前提としていたが、実際の製品設計は  
初期段階から設計することがすべてではなく、自動車を例とした場合、何も  
ない状態から設計する場合のフルモデルチェンジに対して、人気の車種など  
は大きく形状を変更せず部分的に形状・仕様変更を行うマイナーチェンジが  
存在する点に着目し、既存の製品に対して狙った目標値が得られる形状への  
改良過程に推定式を応用することができないか評価を行った。その例として、  
前章で取り扱ったバンパステーに対して目標値を設定し、改良設計を行った  
結果、目標の衝撃吸収挙動に近づけることができ、解析による設計と異なり、  
瞬時に設計変更による効果が得られた。

本研究における工学的意義として、これまで推定することができなかった  
領域の荷重推定が可能となった点を挙げる。ランキン則は、本来軸圧潰のピー  
ク荷重を推定するものであった。また、中空ではなく中実の部材に用いる  
推定式であるため、本研究の条件において軸圧潰、断面圧潰ともにピーク荷  
重、平均荷重を推定する手段がなかった。そこで、ランキン則と衝突解析の  
結果を比較することで表 7-1 のように軸圧潰のピーク荷重、断面圧潰のリブ  
部ピーク荷重は簡略化ランキン則によって推定することが可能となった。ま  
た、ランキン則の適用範囲外である斜め面を有する断面圧潰の側面部ピーク  
荷重については、ランキン則に角度の補正式を掛け合わせることで推定す  
ることが可能となった。

平均荷重は、複数回の座屈によって構成されることから、ランキン則が適  
用可能だと考えた。そこで、ピーク荷重の場合と同様ランキン則と衝突解析  
の結果を比較した結果ランキン則による推定が可能であることがわかった。

それに加え、これまで座屈荷重のみを推定可能であったランキン則を応用することで座屈回数を推定できることが明らかとなった。これによって、これまで平均荷重の値のみ推定していたが座屈の回数と平均荷重域の荷重増減が把握でき、より詳細な設計を行うことが可能となる。断面圧潰の平均荷重については、寸法因子と座屈荷重の関係を定量的に評価することができず、形状因子も多い為、相互作用によってランキン則が適用できないことがわかった。そのため、衝突解析によって得られた荷重値をもとに重回帰分析を行い推定式を構築した。

本研究における工業的な意義として、これまで着目されてこなかった衝撃吸収挙動について検討し、狙った挙動が実現可能な部材設計を行うことができた。図 7-1 のように衝撃吸収に特化した挙動や乗員の衝撃に対応した挙動など、使用用途に応じた衝撃吸収構造の開発が可能となった。

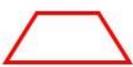
エネルギー吸収量の確保と乗員に加わる衝撃の低減は相反関係にあり、両立するのは困難である。しかしながら、現状においてはエネルギー吸収量を優先した研究がほとんどであり、本研究での取り組みが衝撃吸収部材の開発現場において、乗員に加わる衝撃に着目する要因となることを望む。

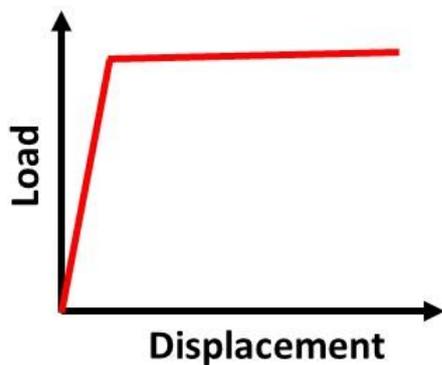
本研究では、自動車の衝撃吸収構造に着目して概略設計手法の構築を行った。その際、バンパレインフォースを構成するステーは軸圧潰の正方形断面、ビームは断面圧潰の台形断面を前提条件とした。そのため、前提条件以外の寸法条件や形状パターンに対しては推定式が適用できない。表 7-2 のように、現状の衝撃吸収部材には、円形断面や多角形断面など多くの形状パターンが存在する。また、今回対象とした正方形断面や台形断面についても自動車以外の適用を考えた場合、小さなものから大きなものまで幅広い大きさの部材が存在する。つまり、本研究は現存する衝撃吸収部材のごく一部を対象としたものであり、今後検討しなければならない形状パターンを多く残している。現状考えうるすべての形状パターンに対応可能な概略設計手法を確立する場合、形状パターンや寸法条件をさらに増やした評価を行わなければならない。しかし、本研究では部材の形状や寸法に対して衝撃吸収特性が得られる推定式の構築手法や推定式を用いた概略設計手法の構築に関するプロセスを確立することができている。よって今後、本手法の適用範囲を拡大するにあたり、様々な形状パターン（自動車以外の部品に対する適用も含め）に対し寸法条件や形状について衝突解析による衝撃吸収特性の評価を行う。その結果をもとに、四角形以外の断面に対してランキン則が適用可能であるかを評価する。適用可能である場合、ランキン則による衝撃吸収特性の評価を行う。ランキン則が適用できない場合は、回帰分析による推定式の構築を行う。

以上の評価を考えうるすべての形状パターン、寸法条件に対して行うことで、アルミニウムの座屈現象を利用した衝撃吸収部材であれば適用環境に関係なく概略設計が可能となる。概略設計の中身として、設計の初期段階に形状パターンを絞り込む使い方だけでなく、細かな形状変更などの際にも適用

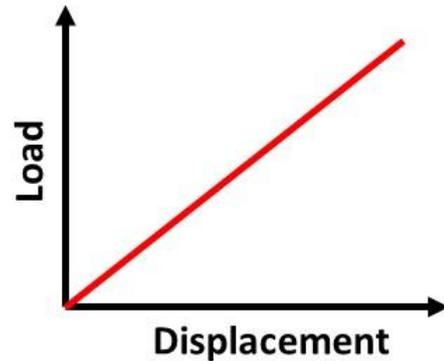
することができる。上記の使用方法の違いは、概略設計手法を用いる技術者の知識や経験が影響するものであるため、衝撃吸収部材を研究しているすべての技術者が使用できるものと考えられる。

Table 7-1 Established prediction formula

		ピーク荷重	平均荷重
軸圧潰		簡略化ランキン則	応用ランキン則
断面圧潰	I	簡略化ランキン則	重回帰分析
		簡略化ランキン×a	重回帰分析



エネルギー吸収量に着目



乗員に加わる衝撃に着目

Fig. 7-1 Design focused on impact absorption behavior

Table 7-2 Comparison of target areas

適用箇所		本研究	考えられる形状や適用例
自動車部品	バンパステア	正方形断面	円形断面, 多角形断面など
	バンパビーム	台形断面	多角形断面など
	サイドメンバー		多角形断面, 富士山型断面など
自動車以外の部品			鉄道車両部品, 住宅用制震機構



# 謝辭

## 謝辞

本研究を遂行し博士學位論文をまとめるにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました、指導教官である山部昌教授に深く感謝しております。時に応じて、厳しくご指導いただいたこと、また優しく励ましてくださったことを通して、私自身の至らなさを実感することができたことは今後の人生における努力の糧になるものであります。6年前、同研究室に配属になり、教授の下で研究を始めた当初、アルミニウムおよび有限要素解析の知識が乏しい著者に対し、その基礎から懇切丁寧に、分かりやすく教えていただきました。さらに、研究の進め方や考え方、研究者の心構えを時には厳しく、時には優しくご指導いただきましたこと、深く感謝いたします。また、学会発表やインターンシップなど貴重な体験をさせていただき、今後の著者の人生においても特別なものであったと思います。研究以外に関しましては、私を含め学生全員に非常に近い距離でいただきましたおかげで楽しい時間を過ごすことができました。この6年間、先生にはご迷惑やご心配をかけてばかりだったと思います。大変申し訳ない気持ちで一杯です。この6年間で先生からご指導いただいた数々は、今後の私にとって、大きな糧となると確信しております。厚く御礼申し上げます。

日本大学生産工学部機械工学科 高橋進教授には本論文の副査を引き受けていただき、多くのご指導をいただきました。大変お忙しいにもかかわらず、研究会や公聴会に参加していただき、専攻内審査ではコメントをいただきました。先生のご指摘により、本論文の完成度を高めることができました。厚く御礼申し上げます。

金原勲教授には本論文の副査を引き受けていただき、多くのご指導をいただきました。大変お忙しいにもかかわらず、研究会や公聴会に参加していただき、多くのコメントをいただきました。先生のご指摘により、本論文の目的をよりクリアにすることができました。厚く御礼申し上げます。

長沼要教授には本論文の副査を引き受けていただき、多くのご指導をいただきました。大変お忙しいにもかかわらず、研究会や公聴会に参加していた

できました。先生のご指摘やご指導により、本論文の方針を固めることができました。厚く御礼申し上げます。

瀬川明夫教授には本論文の副査を引き受けていただき、詳細な内容や体裁について多くのご指導をいただきました。大変お忙しいにもかかわらず、研究会や公聴会に参加していただきました。先生のご指摘やご指導により、本論文を完成させることができました。厚く御礼申し上げます。

瀬戸雅宏准教授には著者が6年前に山部研究室に配属となつてから、解析や実験に幾度となく立ち会っていただき、その都度的確なご助言とご指摘をいただきました。研究以外でも気さくに声をかけていただいたり、気にかけていただいたり、あらゆる場面で著者をサポートしてくれました。また、山部教授と同様に、この6年間ご迷惑やご心配をかけてばかりだったと思います。大変申し訳ない気持ちで一杯です。この6年間で瀬戸氏からご指導いただいた数々、特に研究の進め方や研究に対する考え方など、今後の私にとって、大きな糧となると確信しております。厚く御礼申し上げます。

圧潰試験におきましては、多くのご支援とご指導をいただきました日軽金アクト株式会社取締役 齋藤栄徳様ならびにグループ技術センターでご支援賜りました方々に深く感謝しております。また、インターンシップにおきましても、多くのご支援とご指導をいただきました、日軽金アクト株式会社 齋藤栄徳様ならびに自動車ビジネスユニットの方々に深く感謝しております。今後の展望として、衝撃吸収部材の接合を考慮した荷重値の推定が重要となる中、その基礎づくりをさせていただきました。どの方も気さくに声をかけていただき、右往左往している著者に対して多くの助言をいただきました。

田中宏明氏には、あらゆる場面でサポートしていただきました。発表練習や研究の相談等多くの場面でお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

鈴木享氏には、PC にトラブルが起きた際など、快く相談に乗ってくださり、サポートしていただきました。厚く御礼申し上げます。

高崎 祐子氏には、6年前に山部研究室が配属となる前の研究室見学の段

階から、様々な面でお世話になりました。特に、研究以外の事務的な面や精神面でサポートしていただいたように思います。すれ違うたびに気さくに声をかけてくださり、楽しい時間を過ごすことができました。公聴会直前や、論文の執筆や研究に行き詰まった時期には、温かい激励のお言葉をかけてくださり、大変励みになりました。心より感謝申し上げます。

これまで、非常に多くの方々に支えられたからこそ、ここまで歩んでくることができました。さらに、一つの研究を成し得たことを心から嬉しく、大変幸せに思っております。厚く御礼申し上げます。今後も、人とのつながりを大切にし、“人に感謝する”気持ちを常に持ちながら、これからの道を歩んでいきます。

最後に、これまで自分の思う道を進むことに対し、温かく見守りそして辛抱強く支援して下さった両親に対して厚く御礼申し上げます。また、ここでは名前を挙げることはできなかった、山部研究室に配属となつてからの6年間で出会った全ての学生や関係者の方、著者の研究に携わっていただいた全ての皆様に深く感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

## 研究業績

### 査読付き論文

- 1). 清水駿矢, 瀬戸雅宏, 田中宏明, 山部昌, 初期ピーク荷重および衝撃吸収エネルギーに着目した衝撃吸収構造の設計, 日本設計工学会誌, 第 50 巻 12 号(2015) pp.21-26
- 2). 清水駿矢, 瀬戸雅宏, 山部昌, 断面圧潰衝撃吸収部材のピーク荷重推定法に関する研究, 日本設計工学会誌, 第 53 巻 6 号(2018) pp.437-446

### 口頭発表

- 1). 清水駿矢, 瀬戸雅宏, 山部昌, 自動車用バンパシステムのエネルギー吸収における簡易設計指針の構築, 日本設計工学会 (2015 年度秋季研究発表講演会)
- 2). 清水駿矢, 瀬戸雅宏, 田中宏明, 山部昌, 射出発泡成形品の熱伝導率に与える気泡構造の影響, プラスチック成形加工学会 (第 23 回秋季大会)
- 3). 清水駿矢, 瀬戸雅宏, 山部昌, 初期ピーク荷重および衝撃吸収エネルギーに着目した衝撃吸収構造の設計, 日本設計工学会 (2016 年度春季研究発表講演会)



# 付録

付録

本研究で使用した衝突解析手法のプログラム例を以下に示す. なお, 一部省略している箇所がある.

```
$
$-----
$   PAM-SOLID input file exported by PAM Application
$   Win32 Version: 2004.00   Date: 26-9-2014 14:20
$   Model: D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pam\6 m2.5.pc
$   Unit System: Millimeter/Kilogram/Millisecond/Kelvin
$-----
$
$-----
$   PAM-SOLID SOLVER CONTROLS
$-----
INPUTVERSION 2004
SOLVER CRASH
ANALYSIS EXPLICIT
UNIT MM KG MS KELVIN
SIGNAL YES
FILE 2 m2.5
SHELLCHECK YES      10.      4.      40.      140.      30.      100.
SOLIDCHECK YES       4.      40.     140.      30.      100.
DCOMP LCB
$
TITLE / PAM-SOLID Simulation
RUNEND/
TIME      20.
END_RUNEND
$
OCTRL /
THPOUTPUT INTERVAL    0.01
DSYOUTPUT INTERVAL    0.1
GLBTHP DFLT
SHLTHP DFLT
NODPLOT DFLT
```

SOLPLOT DFLT  
SHLPLOT DFLT  
MPPOUTPUT WRITE REMOVE

END\_OCTRL

\$

TCTRL /

INITIAL 0.0

END\_TCTRL

\$

ECTRL /

STRAINRATE YES

END\_ECTRL

\$

\$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004

\$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121

\$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121

\$

\$ Control Card Section

NODE /	1	-15.	9.	0.0
NODE /	2	22.5	9.	0.0
NODE /	3	60.	9.	0.0
NODE /	4	97.5	9.	0.0
NODE /	5	135.	9.	0.0
NODE /	6	135.	46.5	0.0
NODE /	7	135.	84.	0.0
NODE /	8	135.	121.5	0.0
NODE /	9	135.	159.	0.0
NODE /	10	97.5	159.	0.0
NODE /	11	60.	159.	0.0
NODE /	12	22.5	159.	0.0
NODE /	13	-15.	159.	0.0
NODE /	14	-15.	121.5	0.0
NODE /	15	-15.	84.	0.0
NODE /	16	-15.	46.5	0.0
NODE /	17	60.	121.5	0.0
NODE /	18	60.	84.	0.0

NODE /	19	60.	46.5	0.0
NODE /	20	97.5	84.	0.0
NODE /	21	97.5	121.5	0.0
NODE /	22	97.5	46.5	0.0
NODE /	23	22.5	84.	0.0
NODE /	24	22.5	121.5	0.0
NODE /	25	22.5	46.5	0.0

\$HMCOMPS 1 "IMPACTOR\_150X150.PRT" 58

SHELL /	1	1	18	20	21	17
SHELL /	2	1	17	21	10	11
SHELL /	3	1	20	7	8	21
SHELL /	4	1	21	8	9	10
SHELL /	5	1	3	4	22	19
SHELL /	6	1	19	22	20	18
SHELL /	7	1	4	5	6	22
SHELL /	8	1	22	6	7	20
SHELL /	9	1	15	23	24	14
SHELL /	10	1	14	24	12	13
SHELL /	11	1	23	18	17	24
SHELL /	12	1	24	17	11	12
SHELL /	13	1	1	2	25	16
SHELL /	14	1	16	25	23	15
SHELL /	15	1	2	3	19	25
SHELL /	16	1	25	19	18	23

\$ Appended Data \$\$

\$-----

\$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$ WARNING - No Material definition for Part 1

\$

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\pc\impactor 150x150\_2002.pc

\$ Include D:\pam\_crash\shimizu\pc\impactor 150x150\_2002.pc

\$

\$

\$

\$

\$  
 \$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004  
 \$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121  
 \$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121

\$  
 \$ Control Card Section

NODE /	26	-15.	9.	-51.70002
NODE /	27	22.5	9.	-51.70002
NODE /	28	60.	9.	-51.70002
NODE /	29	97.5	9.	-51.70002
NODE /	30	135.	9.	-51.70002
NODE /	31	135.	46.5	-51.70002
NODE /	32	135.	84.	-51.70002
NODE /	33	135.	121.5	-51.70002
NODE /	34	135.	159.	-51.70002
NODE /	35	97.5	159.	-51.70002
NODE /	36	60.	159.	-51.70002
NODE /	37	22.5	159.	-51.70002
NODE /	38	-15.	159.	-51.70002
NODE /	39	-15.	121.5	-51.70002
NODE /	40	-15.	84.	-51.70002
NODE /	41	-15.	46.5	-51.70002
NODE /	42	60.	121.5	-51.70002
NODE /	43	60.	84.	-51.70002
NODE /	44	60.	46.5	-51.70002
NODE /	45	97.5	84.	-51.70002
NODE /	46	97.5	121.5	-51.70002
NODE /	47	97.5	46.5	-51.70002
NODE /	48	22.5	84.	-51.70002
NODE /	49	22.5	121.5	-51.70002
NODE /	50	22.5	46.5	-51.70002

\$HMCOMPS 1 "IMPACTOR\_150X150.PRT" 58

SHELL /	17	2	43	45	46	42
SHELL /	18	2	42	46	35	36
SHELL /	19	2	45	32	33	46
SHELL /	20	2	46	33	34	35

SHELL /	21	2	28	29	47	44
SHELL /	22	2	44	47	45	43
SHELL /	23	2	29	30	31	47
SHELL /	24	2	47	31	32	45
SHELL /	25	2	40	48	49	39
SHELL /	26	2	39	49	37	38
SHELL /	27	2	48	43	42	49
SHELL /	28	2	49	42	36	37
SHELL /	29	2	26	27	50	41
SHELL /	30	2	41	50	48	40
SHELL /	31	2	27	28	44	50
SHELL /	32	2	50	44	43	48

\$ Appended Data \$\$

\$-----

\$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$ WARNING - No Material definition for Part 1

\$

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\pc\impactor 150x150\_2002.pc

\$-----

\$ MATERIAL DEFINITIONS

\$-----

\$ WARNING - No Material definition for Part 1

\$ WARNING - No Material definition for Part 2

\$-----

\$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

PART / 1SHELL 3

NAME part\_1

0.0

0.0

1. 0

END\_PART

PART / 2SHELL 3

NAME part\_1\_2

0.0  
0.0  
1. 0

END\_PART

\$ENDDATA

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\pam\_crash\impactor 150x150\_2002.pc.bak

\$ Include D:\pam\_crash\shimizu\pc\1\_2002.pc

\$

\$

\$

\$

\$

\$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004

\$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121

\$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121

\$

\$ Control Card Section

\$HMCOMPS 1 "1.PRT" 58

\$ Appended Data \$\$

\$-----

\$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$ WARNING - No Material definition for Part 1

\$

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\pc\1\_2002.pc

\$-----

\$ NODE DEFINITIONS

\$-----

NODE / 3011 60. 84. 0.0

\$-----

\$ MATERIAL DEFINITIONS

\$-----

\$

MATER /	3	100	0.0222	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1.	0

NAME rigid\_wall

206. 0.3

\$

MATER / 4 103 2.680000e-6 0 0 0 0  
0 0 0 0 0 0 1. 0

NAME Al\_5052-O\_shell

70.1 0.08676 0.33 0.01 0.01 0.01 0.83  
2.189 0.144 1.429 0.181 1.047 0.214 0.516 0.227  
0.427 0.245 0.271 0.25 0.292 0.256  
0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0

EPMX 0.0

\$-----

\$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$-----

\$ RIGID BODIES

\$-----

RBODY / 1 0 3011 0

NAME RigidBody\_1

PART>NOD 1

END

\$-----

\$ BOUNDARY CONDITIONS

\$-----

BOUNC / 3011 110111

NAME Displace\_1

BOUNC / 0 111111

NAME Displace\_2

PART>NOD 2

END

```

$-----
$   INITIAL VELOCITY
$-----
INVEL /   3011   0.0   0.0  -4.17   0.0   0.0   0.0   0
NAME InitVeloc_1
$-----
$   CONTACT INTERFACES
$-----
$-----
$   TIME HISTORY OUTPUT FOR NODES
$-----
THNOD /       0
NAME Node_Time_History_1
      NOD       18
      END
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\1.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\5_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version   : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1  "5.PRT"  58
$ Appended Data  $$
$-----
$   MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\5_2002.pc

```

```

$-----
$   PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\5.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\6_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version   : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "6.PRT" 58
$ Appended Data  $$
$-----
$   MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\6_2002.pc
$-----
$   PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\6.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\7_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004

```

```

$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "7.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\7_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\8_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "8.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\8_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\9_2002.pc
$
$
$
$

```

```

$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "9.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\9_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\10_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "10.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\10_2002.pc
$-----
$ MATERIAL DEFINITIONS
$-----

```

```

$ WARNING - No Material definition for Part 9
$-----
$   PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam-crash\10.pc.bak
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam-crash\10.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel1_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version   : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL1.PRT" 58
$ Appended Data  $$
$-----
$   MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel1_2002.pc
$-----
$   PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam-crash\compoundmodel1.pc.bak
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam-crash\compoundmodel1.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel2_2002.pc
$

```

```

$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL2.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel2_2002.pc
$-----
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\compoundmodel2.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel3_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL3.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----

```

```

$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel3_2002.pc
$-----
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam-crash\compoundmodel3.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel4_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL4.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel4_2002.pc
$-----
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam-crash\compoundmodel4.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-1_2002.pc
$

```

```

$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL5-1.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-1_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-2_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL5-2.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-2_2002.pc

```

```

$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-3_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL5-3.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-3_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-4_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL5-4.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1

```

```

$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-4_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-4_2002.pc
$
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version   : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1  "COMPOUNDMODEL5-4.PRT"  58
$ Appended Data  $$
$-----
$      MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel5-4_2002.pc
$-----
$      PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$-----
$      CONTACT INTERFACES
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\compoundmodel5.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel6_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004

```

```

$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "COMPOUNDMODEL6.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\compoundmodel6_2002.pc
$-----
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\compoundmodel6.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\pc\basemodel_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "BASEMODEL.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pc\basemodel_2002.pc

```

```

$-----
$   PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\basemodel 90-90-60.pc.bak
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\basemodel 90-90-60.pc.bak
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\basemodel 90-90-60.pc.bak
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam_crash\basemodel 90-90-60.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\50mm_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version   : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "50MM.PRT" 58
$ Appended Data  $$
$-----
$   MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\50mm_2002.pc
$-----
$   MATERIAL DEFINITIONS
$-----
$

```

MATER /	21	103	2.700000e-6	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1.	0

NAME Al\_6061-T6\_shell

59.27	0.276	0.33		0.01	0.01	0.01	0.83
2.243	0.2894	0.823	0.3257	0.584	0.3475	0.352	0.3524
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
0.0	0.0	0.0	0.0				
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

EPMX            0.0

\$-----

\$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$ENDDATA

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\pam\_crash\50mm pam.pc

\$ Include D:\pam\_crash\shimizu\line cross 10mm new\_2002.pc

\$

\$

\$

\$

\$

\$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004

\$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121

\$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121

\$

\$ Control Card Section

\$HMCOMPS 1 "LINE\_CROSS\_10MM\_NEW.PRT" 58

\$ Appended Data \$\$

\$-----

\$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$ WARNING - No Material definition for Part 1

\$

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\line cross 10mm new\_2002.pc

\$-----

\$ NODE DEFINITIONS

\$-----

\$-----

\$ MATERIAL DEFINITIONS

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

MATER /	22	302		0.0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1.	0

NAME Spotweld definition\_1 Material

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
0	0.0	0				

\$-----

\$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$

\$ENDDATA

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\line cross 10mm new pam.pc.bak

\$-----

\$ NODE DEFINITIONS

\$-----

\$-----

\$ MATERIAL DEFINITIONS

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

MATER /	24	302		0.0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1.	0

NAME	Spotweld	definition_1	Material			
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	0	0.0	0			

```

$-----
$   PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\pam-crash\line cross 10mm new pam.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t1_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version   : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "LINE_T1.PRT" 58
$ Appended Data  $$
$-----
$   MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t1_2002.pc
$-----
$   NODE DEFINITIONS
$-----
$-----

```

\$ MATERIAL DEFINITIONS

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

\$-----

MATER /	25	302		0.0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1.	0

NAME Spotweld definition\_1 Material

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
0	0.0	0			

\$-----

\$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS

\$-----

\$

\$ENDDATA

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t1 v15.pc.bak

\$ENDDATA

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t1 v15.pc

\$ Include D:\pam\_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t2\_2002.pc

\$

\$

\$

\$

\$

\$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004

\$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121

\$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121

\$

\$ Control Card Section

\$HMCOMPS 1 "LINE\_T2.PRT" 58

\$ Appended Data \$\$

```

$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t2_2002.pc

```

```

$-----
$ NODE DEFINITIONS
$-----

```

```

$-----
$ MATERIAL DEFINITIONS
$-----

```

```

$-----
$ -----
$ -----
MATER /      27      302          0.0      0      0      0      0
           0      0      0      0      0      0      1.      0
NAME Spotweld definition_1 Material
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0
      0      0.0      0

```

```

$-----
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----

```

```

$
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t2 v15.pc.bak

```

```

$-----
$ NODE DEFINITIONS
$-----

```

```

$-----
$ MATERIAL DEFINITIONS
$-----

```

```

$ -----
$ -----
$ -----
MATER /      29      302      0.0      0      0      0      0      0
            0        0        0        0        0        0        1.        0
NAME Spotweld definition_1 Material
      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0
      0        0.0        0

```

```

$-----
$   PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\斜め検証\line t2 v15.pc
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\impacter.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\pc\11,15_2002.pc
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version   : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1  "11_15.PRT"  58
$ Appended Data  $$
$-----
$   MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----

```

```

$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\pc\11,15_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\pc\t2 lock_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "T2_LOCK.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\pc\t2 lock_2002.pc
$-----
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$-----
$ BOUNDARY CONDITIONS
$-----
$-----
$ CONTACT INTERFACES
$-----
CNTAC /      1      33
NAME m-i
      0.0      0.0      0.5  0  0      0.0  0
      0      0.1      0.0  0      0.0
      0.55      0      0.0

```

0 0 0

PART 10

END

PART 1

END

CNTAC / 3 33

NAME m-w

0.0 0.0 0.5 0 0 0.0 0  
0 0.1 0.0 0 0.0  
0.55 0 0.0  
0 0 0

PART 10

END

PART 2

END

CNTAC / 6 36

NAME self

0.0 0.0 1. 0 0 0.0 0  
0 0.1 0.0 0 0.0  
0.6 0 0.0  
0 0 0

PART 10

END

\$ENDDATA

\$ End Include D:\pam\_crash\shimizu\H26\PAM-Crash\11.pc

\$ Include D:\pam\_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\1\_2002.pc

\$  
\$  
\$  
\$

```

$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "1.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\1_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\3_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "3.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\3_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\4_2002.pc
$
$

```

```

$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "4.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\4_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\5_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "5.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\5_2002.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\6,7_2002.pc

```

```

$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
$HMCOMPS 1 "6_7.PRT" 58
$ Appended Data $$
$-----
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ WARNING - No Material definition for Part 1
$
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\6,7_2002.pc
$-----
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
$-----
$ENDDATA
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pam\6.pc
$ Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\6,7 m2.5_2002.pc
$
$
$
$
$
$ PAMCRASH-HM INPUTVERSION : 2004
$ PAMCRASH Input Deck Generated by HyperMesh Version : 9.0b121
$ Generated using HyperMesh-Pamcrash Template Version : 9.0b121
$
$ Control Card Section
NODE / 7379 75. 69. -1.
NODE / 7380 72.5 69. -1.

```

```

NODE /      7381          70.          69.          -1.
NODE /      7382          67.5         69.          -1.
NODE /      7383          65.          69.          -1.

```

```
$HMCOMPS 1 "6_7.PRT" 58
```

```

SHELL /      7181      10      91      94      96      90
SHELL /      7182      10      90      96      86      87
SHELL /      7183      10      79      97      95      78
SHELL /      7184      10      97      96      94      95
SHELL /      7185      10      80      85      97      79

```

```
$ Appended Data  $$
```

```
$-----
```

```
$ MATERIAL AND ELEMENT DEFINITIONS
```

```
$-----
```

```
$ WARNING - No Material definition for Part 1
```

```
$
```

```
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pc\6,7 m2.5_2002.pc
```

```
$-----
```

```
$ PART AND ELEMENT DEFINITIONS
```

```
$-----
```

```
PART /      10SHELL      21
```

```
NAME part_1_3
```

```
0.0
```

```
0.0      0.0
```

```
2.      0
```

```
END_PART
```

```
$ENDDATA
```

```
$ End Include D:\pam_crash\shimizu\H26\gakkai\pam\6 m2.5.pc
```

```
ENDDATA
```