



# 紙系緩衝材を用いた包装設計に関する研究

中川, 幸臣

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2008-09-25

(Date of Publication)

2012-12-12

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4449

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004449>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



# 博士論文

紙系緩衝材を用いた包装設計に関する研究

平成 20 年 8 月

神戸大学大学院自然科学研究科

中 川 幸 臣

# 要 旨

## 紙系緩衝材を用いた包装設計に関する研究

中川幸臣

緩衝包装設計は、安全な製品輸送を実現するための重要な役割を担っている。緩衝包装の目的を具体的に述べれば、「製品が、生産者から最終顧客までの流通過程で落下衝撃などの外力により破損等の品質低下が起きないように緩衝材を用いて保護する」ことである。特にこの目的を省資源やリサイクル等の環境適合性を考慮した上で実現することが重要視されている。そして近年、そのリサイクル性や廃棄性の良さが利点となり、国内輸送や海外輸送を問わず包装用緩衝材に段ボールやパルプモールドなどの紙系緩衝材が、従来の主要緩衝材であった発泡スチロールや発泡ポリエチレンなどのプラスチック系緩衝材の代替品として使用される包装設計の事例が増えている。しかしながら、現状の紙系緩衝材の包装設計技法についてはその技術が十分に確立されているとは言い難く、包装設計者は過去の経験や試行錯誤の繰り返しに頼ったいわゆるトライ・アンド・エラーの手法で作業を進めている場合が多い。このような状況の中、各業界において今後さらに紙系緩衝材が環境に優しく、また設計し易い包装材として認識され、利用が広がっていくためには安全で適正な包装が実現できるような緩衝設計を中心とした包装設計技法の確立が求められてくる。

ところで紙系緩衝材と一言で表しても、その種類や形態は様々で、それぞれに異なった特徴を有している。さらに素材が紙であることから、材質のグレード表示が同じ場合でもメーカーが違えば各々の材料物性にも若干の差が出ることはよく起こりうる事象である。つまり、材質毎に一般化された物性表を作成することはほぼ不可能であると考えられる。したがって、精度の良い効率的な緩衝包装設計を実現するためには設計者各自で扱う材料の物性を十分に把握しなければならない。本研究では包装設計者が実際に緩衝材のどのようなデータを収集し、それらを基にどのような手順で緩衝設計を行えば従来の手法から脱した適正な包装設計を実現できるかという点について実験や考察を試みる。本論文は6章から構成されており、概略は以下のとおりである。

第1章では一般的な紙系緩衝材の概要や利用状況、さらに本研究の背景および研究の目的と内容について述べる。

第2章では段ボール緩衝材の水分の影響を考慮した緩衝設計技法について述べる。これはまず、積層段ボール緩衝材を用いて緩衝特性に関する実験を行い、水分（湿度）条件による緩衝材の圧縮特性や衝撃吸収エネルギー量の差を求める。そしてその結果より、安全かつ適正な積層段ボール緩衝材の必要寸法を求める手順を考案する。最終的にこの方法を用いて落下高さや製品の許容加速度等の任意の緩衝設計条件における緩衝材適正寸法が推定できるようにする。

第3章では製品毎に形状が異なる段ボール薄板構造体緩衝材について考える。緩衝特性に関する実験にはスリーブ状の段ボール構造体を緩衝材の基本モデルとして設定する。そして実験結果より、緩衝材の構造的要因（製品支持部の有効周囲長や折り曲げ部の有無等）が緩衝特性に及ぼす影響を明らかにする。その後で緩衝特性線図等を作製し、形状が複雑で一定ではない薄板構造体においてもそれらを利用することで、緩衝設計の一般化ができることを示す。

第4章では汎用構造解析ソフトウェアを用いて段ボールの強度解析シミュレーションを行い、包装設計の効率化について検討する。その解析モデルは、利用者の実用性に重点を置いたものにするため、段ボールシート全体を一様な単一素材と見なした簡易手法である。そこでは、段ボールの特性から解析のための物性値の設定には工夫が必要になってくるが、実験と解析の比較から精度の良い結果が得られる条件について調べる。そして、従来のトライ・アンド・エラーに依存した設計手法から一歩進んだ効率的な手法の提案を行う。

第5章は段ボールとともに紙系緩衝材の代表的な種類であるパルプモールドについてリードタイムや金型コスト削減のための検討を行う。ここでの大きな特徴は、成型用の金型が従来の金型と大きく異なっており、コンポーネントと呼ぶ脱着可能な部品を用いている点である。それにより、一つの金型で多製品に適用できる汎用性が実現でき、発生する衝撃加速度のレベルが前もって予測できるようになるため、効率的な緩衝設計ができるようになり、コストと設計リードタイムの削減が可能となる。

最後に第6章として、本研究で得られた内容を総括するとともに、結論についてまとめる。

# Abstract

## Study on Packaging Design by Paper Cushioning Materials

Yukiomi NAKAGAWA

Cushioning design is quite important to realize safe transportation for products. Giving the purpose of cushioning design specifically, it is to protect products from shock load by the free drop during distribution process by using cushioning materials for fear of the deterioration of the product quality. Especially, it would be more important to carry out this purpose with considering the environmental suitability.

Recently, the paper cushioning made from corrugated board or molded pulp have been used as an eco-friendly material instead of expanded plastic form extensively. However, the current designing technique for paper cushioning materials has not been established yet, and there are many case that packaging designers tend to carry out their tasks with trial and error method. In this situation, it is necessary to establish the optimum packaging designing method for paper cushioning materials to be expanded as a normal in various fields.

Referring to the paper cushioning materials, there are many types which have different properties. And it is also common that the material property would be a little different even for the same grade among the manufacturers. In fact, it is quite impossible to make the common tables of the material properties for each grade. Therefore, packaging designers would have to figure out the material properties each to realize the optimum cushioning design. In this paper, it discusses that what kind of data should be collected and how the cushioning design process should be defined by using the data to break through the conventional way. To address these issues, the experiments and examinations regarding paper cushioning properties are carried out. This

paper consists of the six chapters, and the outlines of the chapters are as follows.

In chapter 1, the summary and current situation of paper cushioning materials are described. And the background, purpose and contents of this paper are discussed.

In chapter 2, the design of corrugated board cushioning under the influence of moisture stress is discussed. The experiments regarding the cushion properties are carried out by using laminating corrugated boards. Then the compression properties or the amounts of shock absorbing energy of cushioning in a different moisture condition are examined. And from these results, the cushioning design procedure to estimate the optimum size of laminating corrugated boards for safe and adequate packaging is considered. Furthermore, that procedure would be aimed to be able to predict the most optimum size of cushioning under the arbitrary conditions which include drop height and fragility of a product.

In chapter 3, the cushioning property of sleeve-structure corrugated board which has a different shape by each product is discussed. A simple sleeve-structure corrugated board is used for experiments as a fundamental cushioning model. Then, considering the experimental results, the structural factors which influence the cushioning property would be clarified. These structural factors mean a perimeter of supported area of a product, a folded part of a sleeve and so on. After the cushioning property curves are made, it shows that standardization of cushioning design for paper material which has a complicated shape would be feasible.

In chapter 4, the application of the FEM software to corrugated board packaging is discussed. The FEM technology has already been established and used extensively in many categories, but generally, it hasn't been applied to cushioning package yet. Therefore, the potentiality of the FEM software application to corrugated board is examined. As this study is focused on the practicality for packaging designer, the modeling of corrugated board for simulation is simplified particularly to assume corrugated board as single

uniform material. Considering the property of corrugated board, it is necessary to devise the setting of values for simulation. Therefore, the optimum conditions to obtain fine results would be examined by comparing the found values with the calculated values. Then the new packaging design method with the FEM software would be suggested to break the conventional trial and error method.

In chapter 5, the molded pulp cushioning which is typical packaging material as well as corrugated board is discussed regarding the reduction of cost and lead time. This study features the new mold tool system which is quite different from the usual type. This new system consists of the detachable components which cushioning properties are already cleared. Furthermore, as this mold tool has the flexibility to be able to adjust a number of products even in one tool and the acceleration level while impacts could be predicted in advance, effective cushioning design would be carried out to save efforts.

In chapter 6, the contents of this study are summarized and the conclusions would be described.

# 目 次

## 第 1 章 序 論

- 1.1 緒 言
- 1.2 本研究の目的
- 1.3 本論文の内容

## 第 2 章 湿度の影響を考慮した段ボール緩衝材の 包装設計

- 2.1 緒 言
- 2.2 実験方法
  - 2.2.1 実験用試料
  - 2.2.2 温湿度の条件について
  - 2.2.3 落下衝撃試験の方法
- 2.3 実験結果及び考察
  - 2.3.1 落下衝撃試験の結果
  - 2.3.2 エネルギー密度と最大応力
  - 2.3.3 衝撃加速度の推定値と実測値の比較
- 2.4 積層段ボールの緩衝設計
- 2.5 結 言

## 第 3 章 段ボール薄板構造体緩衝材の包装設計

- 3.1 緒 言
- 3.2 実験方法
  - 3.2.1 段ボール構造体実験用モデル
    - (1) スリーブ構造体の基本モデル
    - (2) せん断条件を考慮したモデル
  - 3.2.2 静的圧縮試験の方法
  - 3.2.3 動的圧縮試験の方法

- 3.3 実験結果及び考察
  - 3.3.1 静的圧縮試験の結果
  - 3.3.2 動的圧縮試験の結果
  - 3.3.3 緩衝材の吸収エネルギー量について
- 3.4 包装設計の応用事例
  - 3.4.1 ダミー木箱を用いた緩衝設計
  - 3.4.2 落下試験の結果
- 3.5 結 言

## 第4章 構造解析シミュレーションによる緩衝包装設計

- 4.1 結 言
- 4.2 段ボールの簡易モデル化について
  - 4.2.1 シミュレーションソフトウェア
  - 4.2.2 簡易モデル化の考え方
  - 4.2.3 段ボールの解析用物性値の設定
- 4.3 基礎実験における結果と考察
  - 4.3.1 段ボールシートの基本実験における実験値と解析値の比較
    - (1) 曲げ試験
    - (2) エンドクラッシュ試験
  - 4.3.2 新しいモデル化の検討
    - (1) 段ボール物性値の新しい設定
    - (2) エンドクラッシュ試験
    - (3) スリーブ構造体の緩衝性試験
- 4.4 段ボール包装品モデルにおける結果と考察
  - 4.4.1 実験用段ボール緩衝材
  - 4.4.2 包装品モデルによる落下試験
  - 4.4.3 落下試験のシミュレーション解析結果
  - 4.4.4 解析精度についての考察
- 4.5 結 言

## 第5章 組付け式金型を用いたパルプモールド緩衝材の包装設計

### 5.1 緒言

### 5.2 基本モデルによる実験

#### 5.2.1 コンポーネント形状の検討

#### 5.2.2 実験方法

##### (1) 静的圧縮試験

##### (2) 動的圧縮試験

### 5.3 実験結果及び考察

#### 5.3.1 静的圧縮試験

#### 5.3.2 動的圧縮試験

#### 5.3.3 基本コンポーネントのテーパの影響について

### 5.4 組付け式金型について

#### 5.4.1 金型用標準コンポーネントの決定

#### 5.4.2 組付け式金型の概要

### 5.5 製品への設計事例及び評価

#### 5.5.1 組付け式金型による緩衝材の試作

#### 5.5.2 包装品モデルによる評価試験

##### (1) 落下試験

##### (2) 振動試験

##### (3) 実輸送試験

### 5.6 結言

## 第6章 結論

記号表  
謝辞

# 第1章 序 論

## 1.1 結 言

工業製品は工場から出荷されユーザーの手に届くまでに流通途中の様々なハザードにより破損しないよう包装によって保護しなければならない。特に製品が輸送中に破損し易い条件としては、輸送・荷役中に高い位置から落下した際に生じる衝撃によるダメージが最も多いと考えられる。緩衝包装はそのような落下衝撃によるダメージから製品を保護するために施され、そのことは包装が果たすべき最も基本的な機能である。

包装用緩衝材の基本的な役割は、落下などで包装品が衝撃を受けた時に、その発生した衝撃エネルギーを吸収して製品への外力の伝達を緩和し、結果としてその製品の強度を表すファクターである許容加速度よりも伝達した加速度が低くなるようにしなければならない。従って、衝撃エネルギーの吸収性に優れていることが緩衝材の機能の良否を決定すると言える。

従来から包装用緩衝材として発泡スチロールや発泡ポリエチレンなどのプラスチック系緩衝材が代表的な材料であるが、これらは衝撃吸収性や復元性の点で優れた性能を持っていることや、性能に関して温湿度の影響をほとんど受けないこと、加工性の良さなどから家電品等の工業包装分野でよく用いられている。しかし近年の地球環境保護の観点から、プラスチックを廃棄物として出すことが問題視され、包装廃棄物の処理が大きな社会問題として取りあげられている。そこで各企業には包装材に関して廃棄性・リサイクル性を考慮した素材への転換が求められることになり、緩衝材についてもプラスチック系材料から段ボールやパルプモールドなどの紙系材料への変更を図る事例が増えている。

しかし、紙系緩衝材への転換を進める際には、プラスチック系材料とは大きく異なる材料特性となることを考慮しなければならず、そのまま材料のみの置き換えで対処できる訳ではない。特に紙系材料を緩衝材に用いる場合に製品に与える影響で最も注意しなければならない特性として、一度潰れた後の復元性に劣ることや温湿度により緩衝性が変化する点<sup>2)</sup>がある。

また、紙系材料を用いた緩衝設計は技法として確立されていないため、過去の経験や試行錯誤に頼っており、設計技術の継承や安定化の点で問題となっている。例えば発泡プラスチック系のブロック状緩衝材の場合、製品強度や落下高さ等の

条件から適正な材料の使用量を導き出す計算手法が確立<sup>3)</sup>しているが、紙系緩衝材についても一般化された設計手法が求められている。

## 1.2 本研究の目的

本研究を進めるにあたって、前節で述べたように紙系緩衝材の包装設計に関する材料特性及びそれを利用した設計法について明らかにされていない点が多いことが指摘できる。このことがトライ・アンド・エラーに依存した緩衝設計が主流となってしまう原因となっている。ただ、紙系材料の場合、材料物性のデータベースは存在せず、その理由は、例えば段ボールシートを例に考えれば、ライナと中芯の紙質グレードや坪量の組み合わせ<sup>4)</sup>だけでも非常に多くなり、また、同じグレード紙でもメーカーによりその特性が多少異なってくるためである。このようなことから、紙系緩衝材においてはその都度材料特性を実験的に求めておく必要があり、本研究は、合理的な緩衝包装設計のために必要な材料特性の種類と、それらを利用した設計法について検討するものである。

ところで、紙系緩衝材を包装材として利用し易くするために、緩衝包装設計を一般化していくために重要なことは、まず、その基礎物性や緩衝材の形状と緩衝特性の関係を整理することである。すなわち、緩衝性能への湿度や緩衝材の形状の影響を求めることにより、設計者がどのような材料特性を事前に求めておくべきかを明らかにするとともに、求めた物性値を基に緩衝設計を実施し易くするための手順を確立することによって、今まで以上に利用拡大を図ることも期待できる。

また、包装設計の効率化を考えた場合、汎用構造解析ソフトウェア<sup>5)</sup>を設計に取り入れた手法について検討することも重要である。構造解析シミュレーションは製品設計支援として使われることは既に常識化しており<sup>6)</sup>、これを有効に利用することで製品設計の効率化を実現している。そこで、紙系緩衝材を用いた包装設計についても構造解析シミュレーション利用の可能性やその効果について検討することも意義深い。

## 1.3 本論文の内容

本論文で述べる紙系緩衝材の設計技法に関する具体的な研究については以下のような内容である。

### ①湿度の影響を考慮した段ボール緩衝材の包装設計について

紙系緩衝材は言うまでもなく素材が紙であることから、輸送中の外気に含まれる水分の影響を強く受けることが懸念される。同じ緩衝材を使用した場合でも輸送時の季節や天候など、コントロールできない要因によって緩衝性に差が出てしまうが、どのような条件であっても製品を保護し安全な輸送を実現しなければならない。ここでは実験用の試料としてブロック形状の積層段ボール緩衝材を用いて異なる湿度条件下での緩衝特性について検討する。積層段ボール緩衝材は塑性変形を起こしながらエネルギー吸収されるため、エネルギー吸収量の限界を超えた時に“底つき”を起こす。したがって、緩衝材の吸収エネルギー量と発生する加速度との関係より、湿度条件によって安全な緩衝設計が可能な応力範囲について明らかにする。そして、その結果を用いて湿度条件による適正な緩衝材寸法を導き出す方法を提案する。

### ②段ボール薄板構造体緩衝材の包装設計について

現在、市場に出回っている段ボール緩衝材の構造を考えると、段ボールシートを折り曲げや切り込みなどの加工によって製品形状に合わせた薄板構造体が非常に多く、緩衝材の形状は製品毎に異なるため設計法の一般化が困難となっている。そこでまず、薄板構造体緩衝材の基本モデルとしてスリーブ構造体を用いた基礎的な緩衝実験を行う。スリーブ構造体の緩衝特性に影響を及ぼすと考えられる要因として、試料端部の折り曲げ部の有無、製品支持部のせん断条件の有無、試料の縦横比などが挙げられ、これらの要因の違いが緩衝性に与える影響について検討する。また、各要因の影響を考慮した緩衝特性曲線を求め、それを利用した包装品モデルを試作し、落下試験による加速度測定などを行うことによって、緩衝特性曲線を用いた方法の実用性を検討する。

### ③構造解析シミュレーションによる緩衝包装設計について

一般に工業製品の設計において、汎用の構造解析ソフトウェアを用いて強度解析等のシミュレーションを行い、その効率化を図ることは既に常識といってもよい。しかしながら緩衝包装の分野では、シミュレーションを用いた設計は、発泡ポリエチレン緩衝材の例<sup>7)</sup>を除けばほとんど行われていない。ここでは、紙系緩衝材の包装設計にも汎用構造解析シミュレーションを利用して、設計の効率化

を図ることができるかについて検討する。さて、有限要素法（FEM）を用いたシミュレーションでは対象物のモデル化が最も重要なポイントになってくるが、段ボールのモデル化を考えた場合、それ自体がライナと中芯からなる構造体であり、さらにその構造体によって緩衝材が形成され非常に複雑である。また、材質が紙であり、厚潰による塑性変形を解析する必要がある、厳密なシミュレーションには膨大な計算が必要である。ここでは、段ボールのモデル化に際して、実用性を考慮し、段ボールシート全体を単一素材と見なした簡易モデルによる検討を行う。そして、材料試験などの基礎的な強度試験や、ダミー包装品の落下試験などのシミュレーションを行い、その解析精度について検討する。

#### ④組付け式金型を用いたパルプモールド緩衝材の包装設計について

パルプモールド緩衝材は段ボール緩衝材とともに紙系緩衝材の代表的なものであるが、現状では段ボール緩衝材と比較すると工業製品用緩衝材としての利用はそれほど多くない。その理由として考えられることは、一般的にパルプモールドは製品形状に合わせた型成形により作製され、事前に緩衝特性を定量的に把握することが難しいことが挙げられる。さらに、金型の試作・修正を経て緩衝材を完成させるまでのリードタイムが長くなりがちなこと、また、金型のイニシャルコストが高いことも課題となっている。ここではこれらの課題に対応するため、新形式のパルプモールド緩衝材を提案する。すなわち、従来の製品形状に合わせた金型作製を行うのではなく、緩衝特性が既知で一定形状のコンポーネントを組み合わせることで金型を形成することによって、緩衝設計に汎用性を持たせる工夫をしている。そして、この方法により、実製品に対応したパルプモールド緩衝材を試作し、その実用性について検討する。

最後に、以上の項目について得られた結果をとりまとめ、総括する。なお、本研究による成果は以下の有審査論文として公表している。

- (1) 中川幸臣：水分の影響を考慮した段ボール緩衝材の包装設計について、日本航海学会論文集、Vol. 112、p. 241-246、2005
- (2) 中川幸臣、丹羽一邦：包装設計のFEM解析にける段ボールのモデル化の検討、日本包装学会誌一般論文、Vol. 14、No. 5、p. 317-327、2005

- (3) 中川幸臣、丹羽一邦、斎藤勝彦：段ボール構造体の落下衝撃シミュレーション、日本包装学会誌一般論文、Vol.15、No.6、p.333-343、2006
- (4) 中川幸臣、斎藤勝彦：段ボール構造体を用いた緩衝包装に関する一考察、日本航海学会論文集、Vol.116、p.261-268、2007
- (5) 中川幸臣、佐藤幹彦、斎藤勝彦：組付け式金型を利用したパルプモールド緩衝材の低コスト化に関する研究、日本包装学会誌一般論文、Vol.16、No.5、p.335-345、2007

また、同様の内容を以下の国際会議のフルペーパー形式アブストラクト審査論文として発表している。

- (1) Yukiomi NAKAGAWA, Katsuhiko SAITO : Design of Corrugated Fiberboard Cushion under Moisture Stress, Proceeding of the 22<sup>nd</sup> IAPRI Symposium, 2005
- (2) Yukiomi NAKAGAWA, Katsuhiko SAITO : Evaluation of Cushioning Property for Sleeve-structure Corrugated Fiberboard, Proceeding of the 15<sup>th</sup> IAPRI World Conference on Packaging, 2006
- (3) Yukiomi NAKAGAWA, Katsuhiko SAITO : Development of a New Type Molded Pulp Cushioning to Reduce a Cost and Lead Time, Proceeding of the 23<sup>rd</sup> IAPRI Symposium, 2007
- (4) Yukiomi NAKAGAWA, Masaharu YAMAMOTO, Katsuhiko SAITO: New Approach for Molded Pulp Cushioning by Detachable Components and Commercial 3-D CAD System, Proceeding of the 16<sup>th</sup> IAPRI World Conference on Packaging, 2008

## 参考文献

- 1) 金子武弘、岡昌二、日本包装学会誌、**15**(3)、127-132(2006)
- 2) 中川幸臣、カートンボックス、**15**(178)、65-67(1996)
- 3) 木村年治：精密機器・電子機器包装ハンドブック、641-654、フジ・テクノシステム、1991
- 4) JIS P 3902：段ボール用ライナ、JIS P 3904：段ボール用中しん原紙
- 5) 株式会社テラバイトホームページ(<http://www.terabyte.co.jp>)
- 6) 西川剛弘、相田誠司、”デザインCAEの基礎と応用”、森北出版、2-9(2001)
- 7) 前沢英一、山崎博、岸田欣増、包装技術、**40**(2)、195-198(2002)
- 8) 深沢義人、高田幹生、喜多村謙一、大澤一男、佐々木貴徳、塚本雅弘、山本敏治、日本包装学会誌、**14**(1)、27-34(2005)

## 第2章 湿度の影響を考慮した段ボール緩衝材の包装設計

### 2.1 緒言

近年、環境問題により内容品を輸送中の落下衝撃から保護するために使われる包装用緩衝材として段ボール等の紙系材料が利用される事例が非常に増えており、今後も定着する傾向にある。しかし、紙系緩衝材については緩衝設計の基礎となる安全な緩衝材使用量を割り出すためのデータ整備がまだ十分とは言えず、経験則に依存した設計が多いのが現状である。

特に紙素材であることから、その物性が湿度に大きく影響を受けるため、同一の材料でも外気の状態によっては輸送中に緩衝特性が変化することが問題となる。例えば船舶での長期輸送による輸出用包装品などでは十分な安全性の確認が必要である。

本研究ではブロック状構造体である積層段ボール緩衝材を取り上げ、緩衝特性についての実験を行う。実験では各湿度条件における緩衝特性について調べ、更にそれらの結果より、湿度の影響を考慮した緩衝設計法について検討する。

### 2.2 実験方法

#### 2.2.1 実験用試料

実験に用いる積層段ボール緩衝材について Fig. 2.1 に示す。試料の原材料は新聞古紙 100% で坪量が  $115\text{g}/\text{m}^2$ 、外側寸法が  $80\times 80\times 80\text{mm}$  であり、段の種類は A

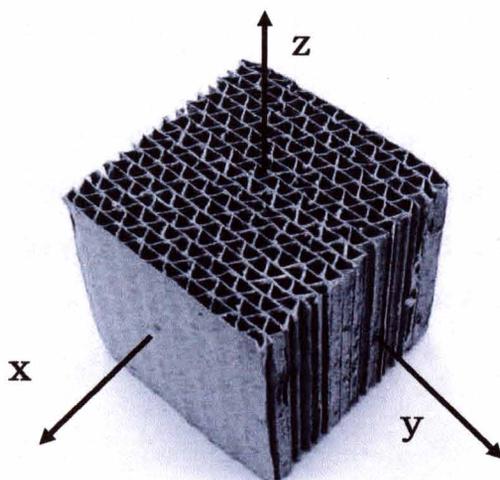


Fig.2.1 Corrugated Fiberboard Cushioning

フルートである。A フルートは段の高さが約 5mm、30cm 当たりの段の数が約 34 個の段形状を示す。積層段ボールは力を加える方向によって強度特性が異なるので各方向について実験を行う。ここでは段の流れ方向（段ボールシート製造時に機械がシートを流す方向）に対し垂直な方向を x 方向、段の流れ方向を y 方向、段のフルート形状が正面に見える方向を z 方向とする。試料については x、y、z の各方向について同条件で実験を行うため、データの比較のし易さから立方体形状とし、また、適正な加速度測定を行うため試料の寸法を一辺 80mm とする。

### 2.2.2 温湿度の条件について

段ボールのような紙系材料の場合、含水分は温湿度環境によって変化し、強度特性にも差が出るが、特に相対湿度の影響が大きい。ここで過去に段ボール箱の圧縮強さに及ぼす温湿度の影響を調査された例によれば<sup>1)</sup>、湿度を同じ条件に設定して温度が 20℃から 40℃になる場合、段ボール箱の圧縮強さは約 10%の低下にとどまるが、温度を一定にして湿度が 35%から 95%になる場合には圧縮強さに約 60%もの低下が認められている。したがって、ここでの温湿度条件についても温度を 20℃一定とし、湿度については 35, 65, 95%の 3 段階とする。そして、試料が雰囲気中の水分に十分なじむように、実験の前にこれらの温湿度条件のもとで 24 時間放置しておく。

### 2.2.3 落下衝撃試験の方法

各温湿度条件の環境において前処置を施した積層段ボール緩衝材に 3 つの各方向それぞれに包装緩衝材用落下試験機を用いて、加速度センサーを取り付けたおもりを落下させ衝撃加速度の測定を行う。この時の落下高さは 60cm 一定とし、また、使用したおもりの荷重範囲は 5.9N~196N とする。測定は各 5 回ずつ実施し、各測定値の最大許容範囲は ±5 % として平均値によって評価する。なお、加速度センサーには 500Hz のローパスフィルターをかけて測定を行う。

## 2.3 実験結果及び考察

### 2.3.1 落下衝撃試験の結果

試料の各方向についての落下衝撃試験の結果を Fig. 2.2~Fig. 2.4 に示す。これらの図において、横軸におもりの質量を試料の見かけの支持面積で除した値を応

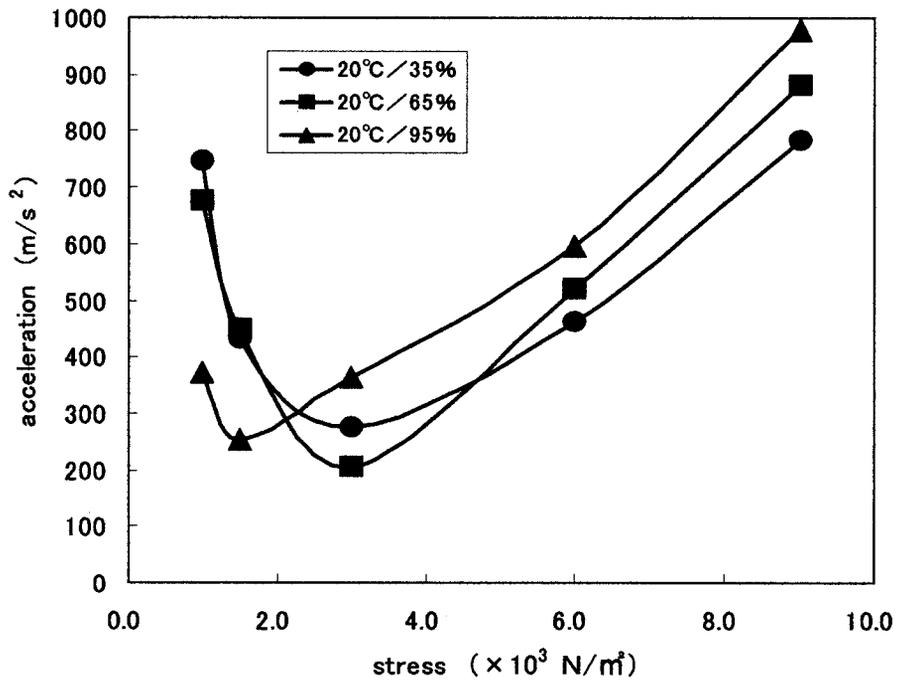


Fig.2.2 Relation between stress and acceleration (x-direction)

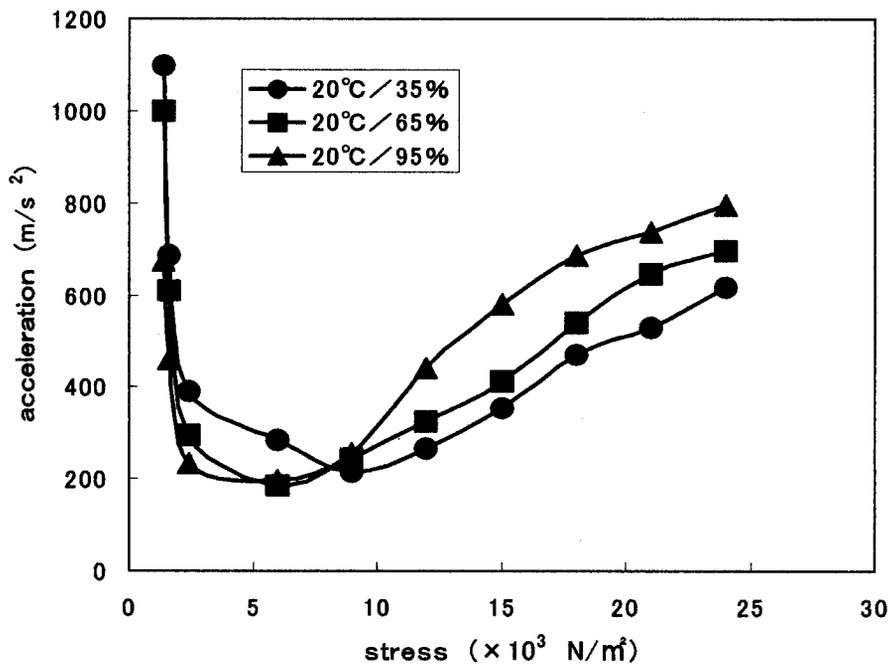


Fig.2.3 Relation between stress and acceleration (y-direction)

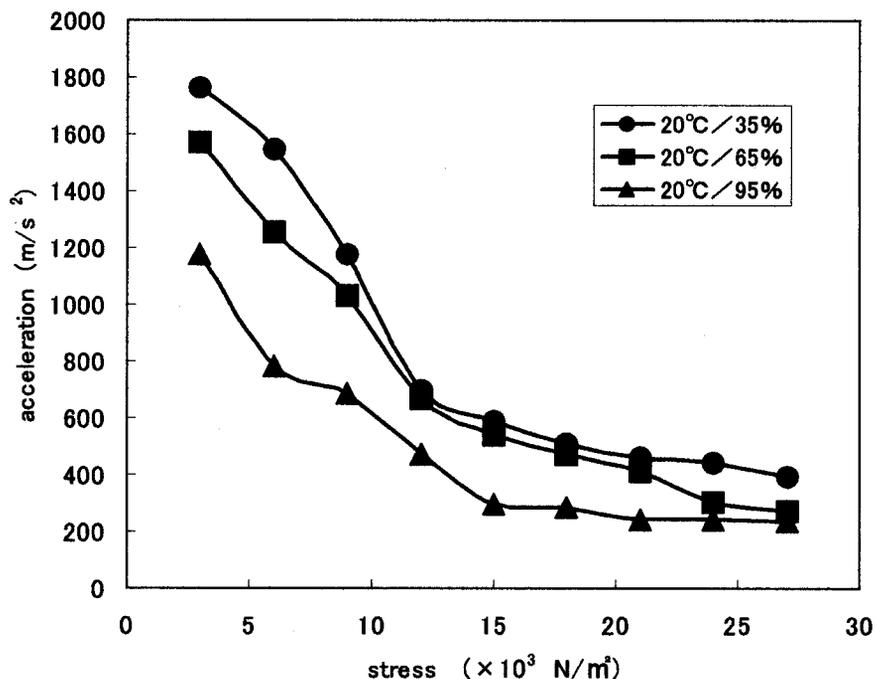


Fig.2.4 Relation between stress and acceleration (z-direction)

力として示し、縦軸に各々測定された衝撃加速度を示す。

各図より積層段ボールの緩衝性は湿度により差があることがわかる。湿度が低く、つまり乾燥側になるほど加速度線図が応力の大きい側へシフトする傾向がある。湿度 65% の条件を標準として考えると、最も衝撃加速度が低くなる応力点を最適応力とすれば、最適応力より低い応力側においては湿度 35% の乾燥状態の方の加速度が高くなるが、湿度 95% の多湿状態では加速度が低くなっていることがわかる。したがって、低応力側では湿度の高い方が内容品への衝撃によるダメージは小さいと言える。一方、最適応力より高い応力側において、x 方向と y 方向の試料について見ると、多湿状態の方の衝撃加速度が高くなっている。これは高応力側では、多湿状態において試料の圧縮量も大きくなり、底づきが起こりやすくなっていることが原因と考えられる。なお、底づきは試料が大きく圧潰し、緩衝性能も損なわれて衝撃加速度が高くなる現象を表す。

これらの結果からわかるように、紙系緩衝材では同一素材の試料においても水分の影響により乾燥状態では材質が硬化し、逆に多湿状態では材質が軟化するため同じ条件の実験を行っても結果は異なってくる。一般に段ボール原紙の場合、

相対湿度が 65%では含水分は約 9%、乾燥状態の 35%では約 5%、多湿状態の 95%では約 20%とかなり変動する<sup>2)</sup>ため物性も異なる。しかし、実際に紙系緩衝材を用いた包装品が流通している時もその外気の雰囲気中の湿度は変動し、それに伴い段ボールの含水分も速やかに変化するため、このような結果を踏まえた安全な緩衝設計の技法が必要になる。

### 2.3.2 エネルギー密度と最大応力

一般にブロック状緩衝材は同一素材であっても厚さや面積が変化すると材料の剛性も変化するため、そのままでは材料固有の特性を表すことができない。したがって緩衝材の厚さと面積の影響を除いた単位体積当たりの特性を求めれば材料間の比較ができる。緩衝材を圧縮する力を面積で除した応力 $\sigma$ と緩衝材の変形量を緩衝材厚さで除した歪 $s$ の関係について、ある発泡プラスチック系緩衝材の場合を例にとると Fig. 2.5 のように表される。図の曲線下の面積は緩衝材単位体積当たりの吸収エネルギー $\varepsilon$ であるから、これに緩衝材の体積 $V$ を乗じれば緩衝材全体の吸収エネルギー量 $E$ となるので次式のように表せる。

$$E = \varepsilon \cdot V \quad (2.1)$$

よって、積層段ボールのようなブロック形状の緩衝材は、試料の体積と吸収エネルギー量が比例すると考えられる。そこで、試料の単位体積当たりの吸収エネルギー量の大きさと衝撃加速度との相関を調べることによって緩衝性の判断の基

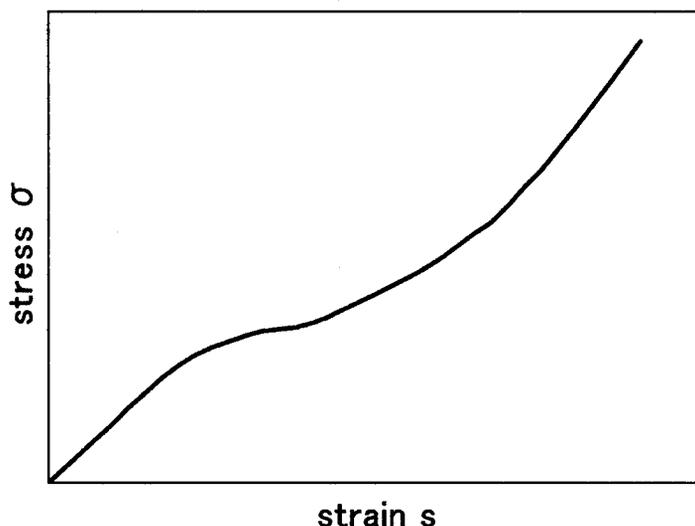


Fig.2.5 Relation between strain and stress

準とすることを考える。ここで、実験時のおもり（実際の包装設計においては内容品とみなされる）の位置エネルギーを試料の体積で除した値をエネルギー密度  $E_d$  と定義し<sup>3)</sup>、次式によるものとする。

$$E_d = \frac{WH}{V} \quad (2.2)$$

$E_d$  ; エネルギー密度 ( $J/m^3$ )       $W$  ; おもりの荷重 (N)  
 $H$  ; 落下高さ (m)       $V$  ; 緩衝材の体積 ( $m^3$ )

また、おもりの質量と衝撃加速度との積を最大衝撃力とし、その試料単位支持面積当たりの値を最大応力  $D_s$  と定義し、次式による。

$$D_s = \frac{ma_c}{A} \quad (2.3)$$

$D_s$  ; 最大応力 ( $N/m^2$ )       $m$  ; おもりの質量 (kg)  
 $a_c$  ; 衝撃加速度 ( $m/s^2$ )       $A$  ; 試料の支持面積 ( $m^2$ )

ここで、Fig. 2.2～Fig. 2.4 に示される実験結果に基づき、積層段ボール試料の各方向について湿度条件ごとのエネルギー密度と最大応力との関係を Fig. 2.6～Fig. 2.8 に示す。これらの線図を用いれば、内容品の位置エネルギー（製品質量、想定落下高さ）と緩衝材寸法が既知の場合は発生する加速度の大きさを予め推測することが可能である。さらに、実際の緩衝包装設計において過剰包装を避けるために、適正な緩衝材使用量を求める必要があるが、その場合には内容品の許容加速度を実験で測定される加速度に置き換え、式(2.2)、(2.3)から緩衝材の最適寸法（緩衝材の体積と支持面積）を導くことができる。

例えば、Fig. 2.7 の特性を有する y 方向の緩衝材を用いて 20℃/65% の温湿度条件で質量 3kg、許容加速度  $490m/s^2$  の製品を落下高さ 60cm で緩衝設計を行う場合、図からエネルギー密度  $4 \times 10^4 J/m^3$ 、最大応力  $9.5 \times 10^4 N/m^2$  のポイントを選んで式(2.2)、(2.3)で算出すると、緩衝材体積が  $441cm^3$ 、支持面積が  $155cm^2$  であるから緩衝材厚さはおよそ 2.8cm となる。

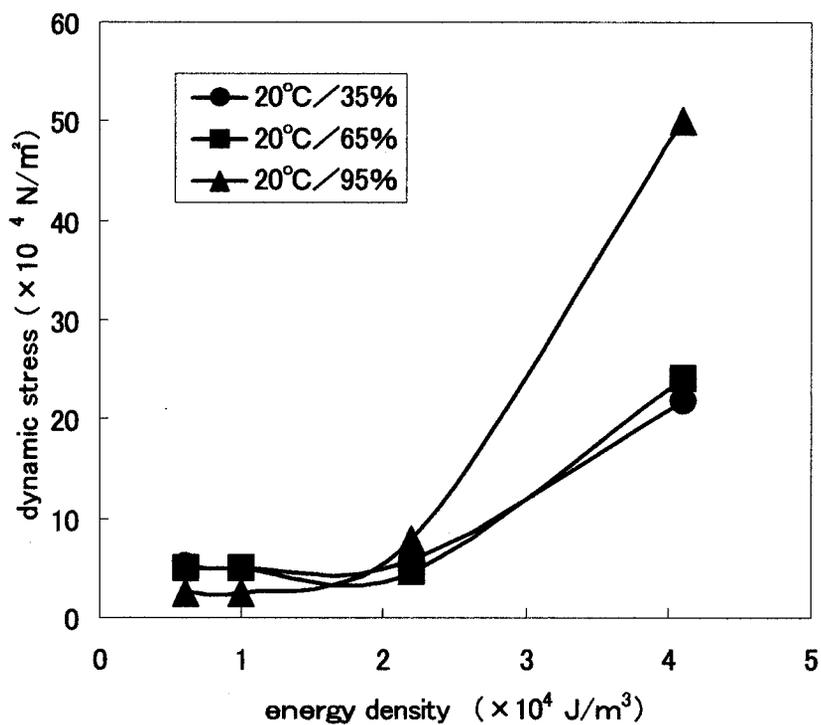


Fig.2.6 Relation between energy density and dynamic stress (x-direction)

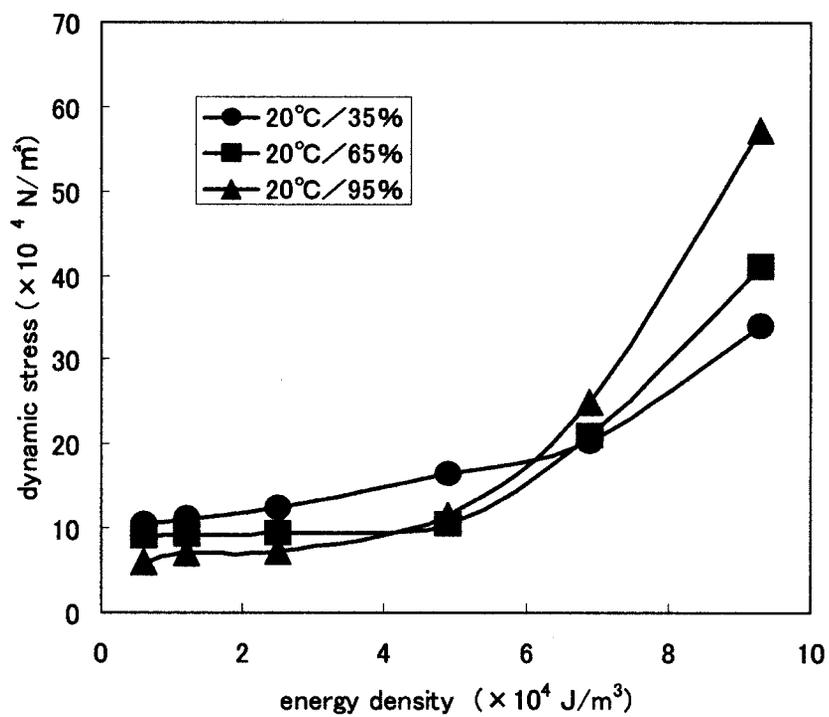


Fig.2.7 Relation between energy density and dynamic stress (y-direction)

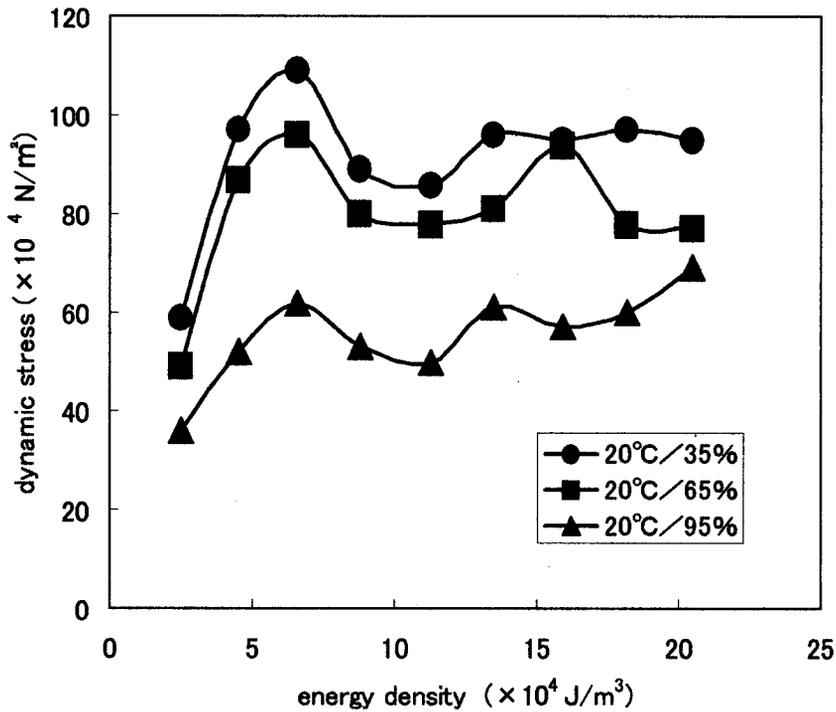


Fig.2.8 Relation between energy density and dynamic stress (z-direction)

積層段ボール緩衝材には一般的な傾向として、落下高さに関係なく加速度が一定、つまり加速度の大きさに対して落下高さの依存性がほとんど無く<sup>4)</sup>、任意の設計条件で緩衝材寸法を簡易に求めることができる。したがって、発泡プラスチック系緩衝材のように落下高さや緩衝材厚さごとに「応力-加速度線図」を揃える<sup>5)</sup>必要は無く、簡易な方法で緩衝設計に応用することができる。

### 2.3.3 衝撃加速度の推定値と実測値の比較

次に前述の方法による試料の衝撃加速度の推定値と、落下衝撃試験による実験値との比較を行う。湿度条件は65%とし、試料寸法を120×80×80mm、荷重方向をy方向と設定して実験を行う。また、この時の落下させるおもりの質量は5.8kgで、落下高さを30cmとする。

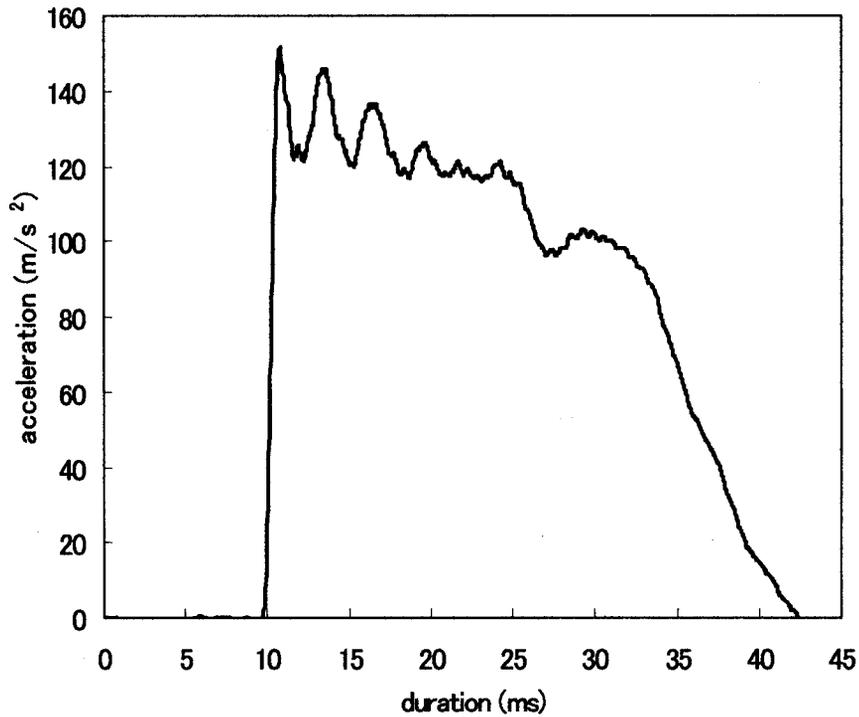


Fig.2.9 Acceleration wave of the drop test (5.8kg weight, 30cm height)

Table.2.1 Comparison between the calculation and experiment of drop test  
(cushioning direction : y temperature/humidity : 20°C/65%)

Dimensions [ mm ]	Weight [ kg ]	Drop height [ cm ]	Acceleration [ m/s <sup>2</sup> ]	
			experiment	calculation
80 × 50 × 40	5.0	30	295	314
80 × 80 × 50	1.8	60	306	338

前出の式(2.2)を用いるとエネルギー密度  $E_d$  は  $2.2 \times 10^4 \text{ J/m}^3$  となり、Fig. 2.7より最大応力  $D_s$  は  $9.5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  が求められる。したがって、これを式(2.3)へ代入すれば推定される衝撃加速度は  $157 \text{ m/s}^2$  となる。一方、実験により測定された衝撃加速度波形を Fig. 2.9 に示すが、図より加速度の最大値はおおよそ  $151 \text{ m/s}^2$  で

あり、推定値に近似した値となっている。

さらに異なる緩衝材寸法や落下高さなど他の条件においても実験値と推定値の比較を行い、Table2.1に示すようにそれぞれ近似した結果が得られている。以上の結果から、今回の「エネルギー密度-最大応力」線図を利用する方法により、内容品に加わる衝撃加速度の大きさを推定することが可能である。

## 2.4 積層段ボールの緩衝設計

紙系緩衝材についてこれまでの経験や試行錯誤の繰り返しに依存した緩衝設計から合理的な手法への移行を図るためには、製品の許容加速度や落下高さなどの任意の条件において緩衝材の必要寸法が求められなければならない。そこで今回の積層段ボールの緩衝設計の一般化のために式(2.2)及び式(2.3)を基に緩衝材の必要寸法を読みとるための線図を Fig. 2.10 及び Fig. 2.11 に示す。Fig. 2.10 はエネルギー密度  $2 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4 \text{ J/m}^3$  の範囲で式(2.2)の緩衝材体積と内容品の位置エネルギーとの関係を図示したもの、Fig. 2.11 は最大応力  $5 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  の範囲で式(2.3)の緩衝材支持面積と内容品の最大衝撃力との関係を図示したものである。これらの線図を利用した緩衝設計の手順について以下に述べる。

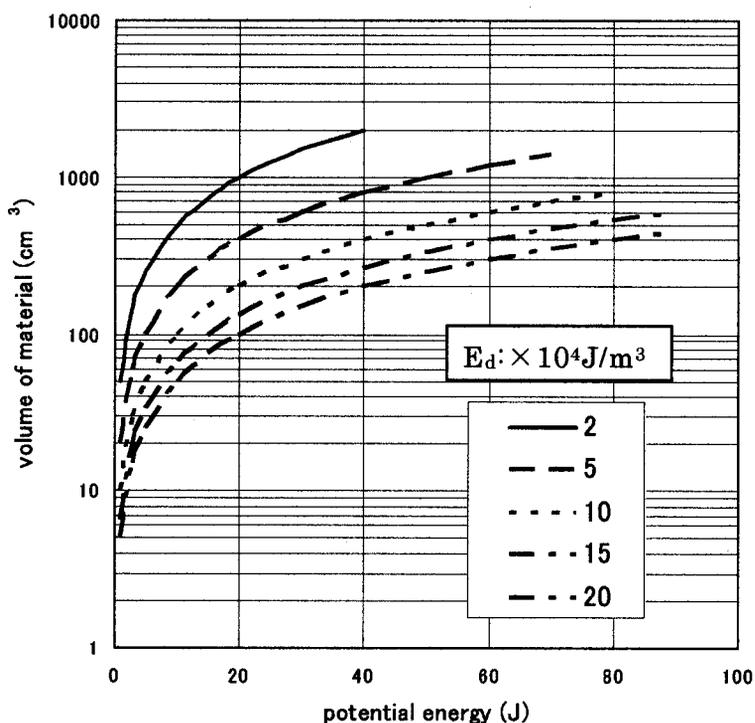


Fig.2.10 Relation between potential energy and volume of cushioning

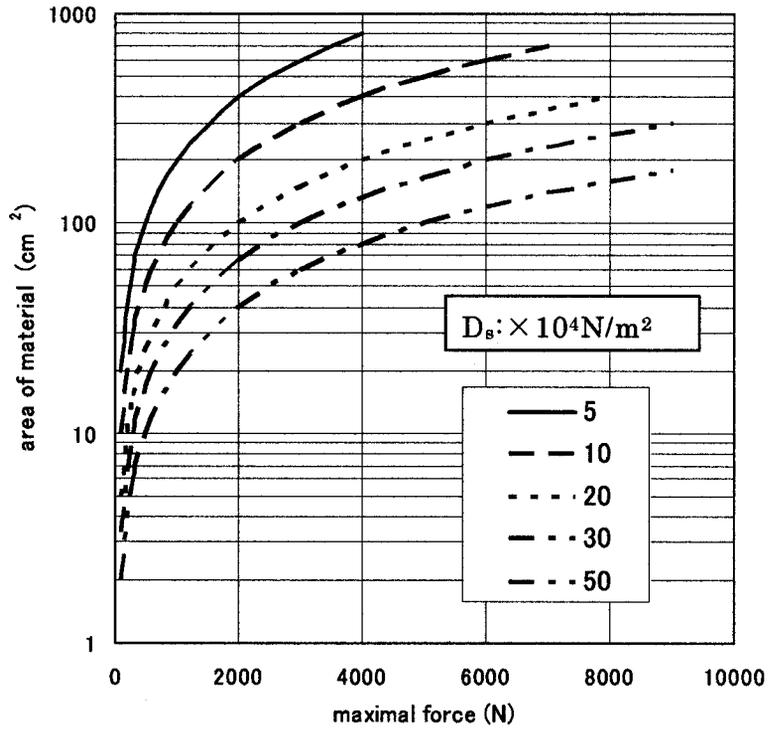


Fig.2.11 Relation between maximal force and area of cushioning

**手順 1 : 応力範囲の設定**

Fig. 2.2～Fig. 2.4 の加速度特性を示した線図において適正な応力範囲を考えた場合、外気の乾燥時に加速度値が大きくなる。したがって、製品の許容加速度を乾燥状態の線図に当てはめて適正な応力範囲を設定する。(Fig. 2.12 参照)

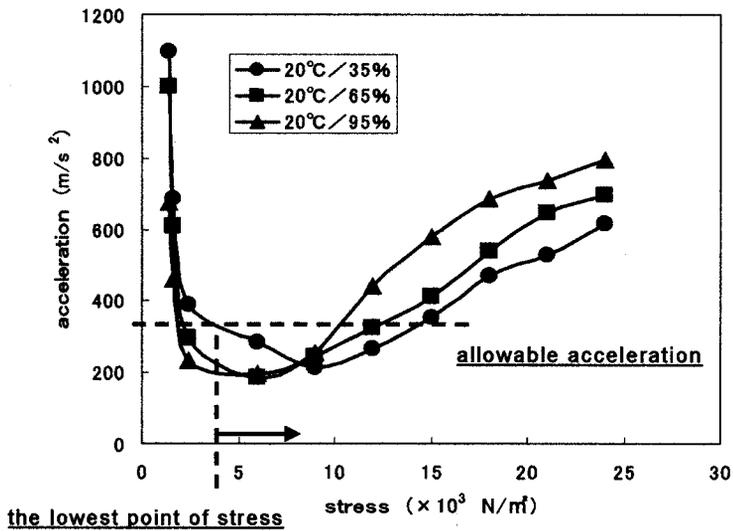


Fig.2.12 Set up the stress range

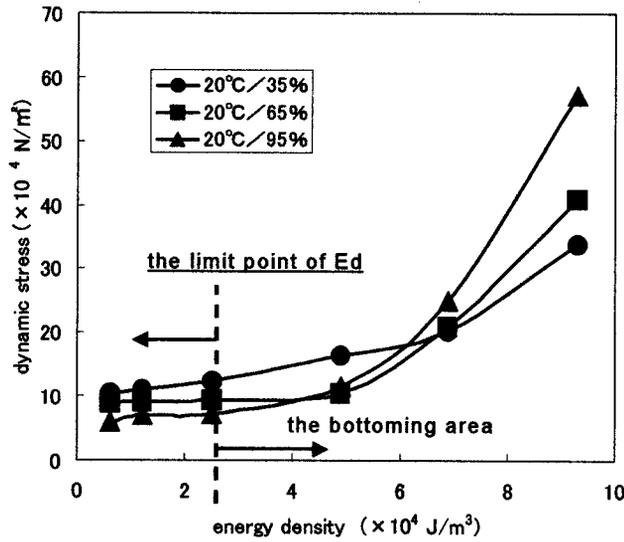


Fig.2.13 Set up the energy density

### 手順 2 : 底つき防止条件の設定

次に多湿状態時の内容品の安全維持について考える。もし、多湿時でも緩衝材の底つきが発生しなければ衝撃加速度は標準時よりも低くなるため、内容品のダメージも小さくなる。しかし、多湿時の緩衝材のエネルギー吸収量はかなり減少しているため内容品の位置エネルギーが大きい場合は注意が必要である。特に試料の x 方向や y 方向で使用する場合、Fig. 2.6 や Fig. 2.7 において最大応力が急激に立ち上がり始める点から底つきが発生すると考えられる。さらに、湿度 95% の線図が他の線図よりも低いエネルギー密度で応力が立ち上がるので、この線図から底つきが発生しないエネルギー密度の条件を選ぶ。(Fig. 2.13 参照)

### 手順 3 : 緩衝材の必要寸法の算出

手順 2 で決定したエネルギー密度と最大応力及び設計の初期条件（製品質量、製品許容加速度、落下高さ）から式(2.2)と式(2.3)を利用して緩衝材の必要体積と支持面積を算出する。または簡易に Fig. 2.10 と Fig. 2.11 から必要寸法を読みとることもできる。

### 手順 4 : 緩衝材の支持面積の確認

計算で求められる緩衝材の支持面積が実際に内容品の支持可能な面積より大き

くなる場合もある。その時は応力条件を変更する必要があるが、変更後の加速度のレベルを再度チェックし、内容品の許容加速度を超えていないことを確認する。もし、変更後の応力条件で許容加速度以下のレベルが求められない場合は、緩衝材の使用方向を変更するか、あるいは他の緩衝特性を持った材料への変更も考えなければならない。

以上の手順により積層段ボールを用いた緩衝設計を適正に行うことができる。この方法は緩衝材がブロック形状であることから、その体積が基準となっている。したがって、任意の緩衝材寸法においてその体積から底づき発生の判断が可能であり、汎用性のある方法として用いることができる。

しかし、ここで注意すべきことは、これは基本的に1回の落下衝撃に対しての緩衝材寸法を求める方法ということである。一般に紙系緩衝材は復元性に乏しいため、落下されるごとに緩衝材自身が圧潰変形しながらエネルギー吸収することで内容品の破損を防いでいる。したがって、設計条件で複数の落下を考慮する場合には緩衝材厚さを十分に取り必要があるが、必要以上の厚さにすると過剰包装となりコストにも影響するので注意しなければならない。

近年、紙系緩衝材が多用される背景として、環境問題に加え、輸送環境が良くなっていることも挙げられる。最近の機械荷役による集合包装が中心の輸送形態では、物流実態調査の事例<sup>6)</sup>からも1回の輸送で想定落下高さから複数回落とされることは極めて少ない。適正な包装設計のためには、実輸送環境をよく把握し条件設定することも重要である。

## 2.4 結 言

積層段ボールをはじめ紙系緩衝材は同じ材料であっても、湿度条件によって強度特性が変化するため扱いにくい面がある。しかし、湿度条件別に「エネルギー密度－最大応力」線図を求めることにより緩衝設計の一般化を図ることが可能となる。この線図は任意の緩衝材寸法や落下高さの条件を設定して用いることができる。今後、他の紙系緩衝材にも応用ができれば、効率的な緩衝設計法として活用範囲を広げることが期待できる。

## 参考文献

- 1) 手寫正、小林兼弘、愛知県工業技術センター報告、**18**、65-69(1982)
- 2) 輸送包装研究会：輸送包装設計ハンドブック、455-456、輸送包装研究会、1994
- 3) Gary Burgess: Generation of Cushion Curves from One Shock Pulse,  
*Packaging Technology and Science*, 7, 169, 1994
- 4) 川地芳照、坪井嘉彦、愛知県工業指導所報告、**2**、20-23(1967)
- 5) 星野茂雄・豊田実：緩衝包装設計ハンドブック、123-144、日本生産性本部、  
1969
- 6) 長谷川淳英、日本包装学会誌、**13**(2)、71-82(2004)

## 第3章 段ボール薄板構造体緩衝材の包装設計

### 3.1 緒言

近年、一般的な包装材として定着している段ボール緩衝材であるが、これについては折り曲げや切り込みなどの加工によって内容品の形状に合わせた薄板構造体が多い。しかし、このような緩衝材は形状が内容品毎に異なるため、設計法の一般化が非常に困難である。現状は緩衝材の試作後に実際の包装をした状態で落下試験を行って性能を調べるという方法がほとんどで、これでは内容品が異なれば緩衝材の形状も当然異なるため、試作の度に試験で確認するまで衝撃加速度のレベルがわからない。したがって、このような作業の繰り返しにより、緩衝材が完成するまでに時間やコストがかかってしまうことが問題となる。

そこで、段ボールの薄板状構造体緩衝材の基本モデルとしてスリーブ構造体を用いて緩衝特性に関する実験を行う。この実験から基本モデルの構造が緩衝性に影響を及ぼす要因を明らかにし、それを基にした薄板状緩衝材の設計法について検討する。

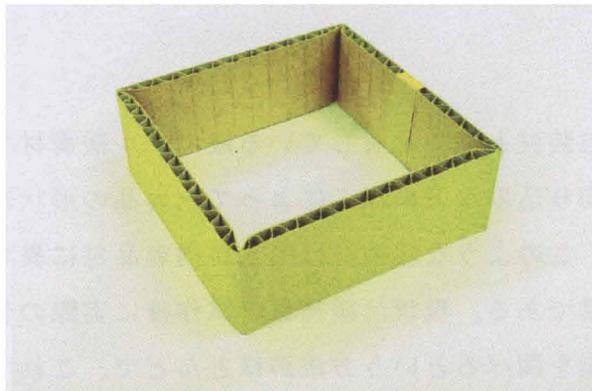
### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 段ボール構造体実験用モデル

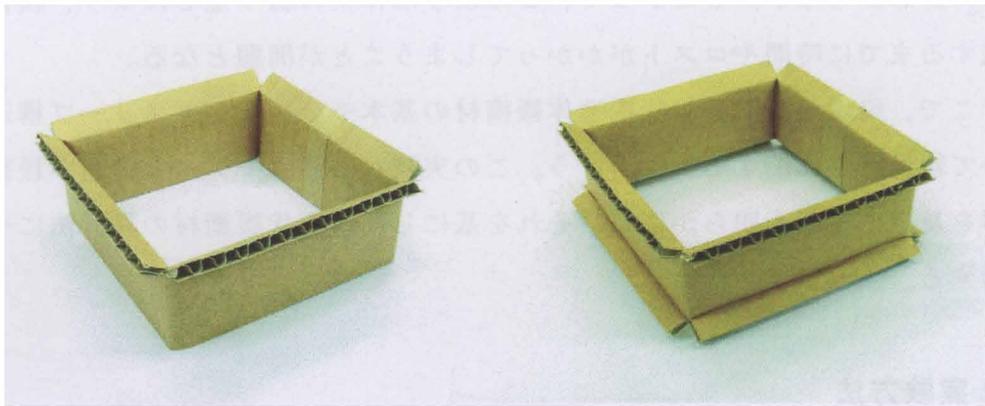
##### (1) スリーブ構造体の基本モデル

本実験で用いた段ボールの材質については、表裏のライナは同じ材質で坪量  $210\text{g/m}^2$  の K ライナ、中芯は坪量  $125\text{g/m}^2$  の普通芯で構成された A フルートのシートとする。各原紙のリングクラッシュ値はライナが  $319\text{N}$ 、中芯が  $84.1\text{N}$  である。また、試料はすべて段ボールや板紙の試験を実施する時の温湿度の標準状態である  $23^\circ\text{C}/50\%$  の雰囲気で行い、さらに実験時の温湿度も  $23^\circ\text{C}/50\%$  で一定とする。

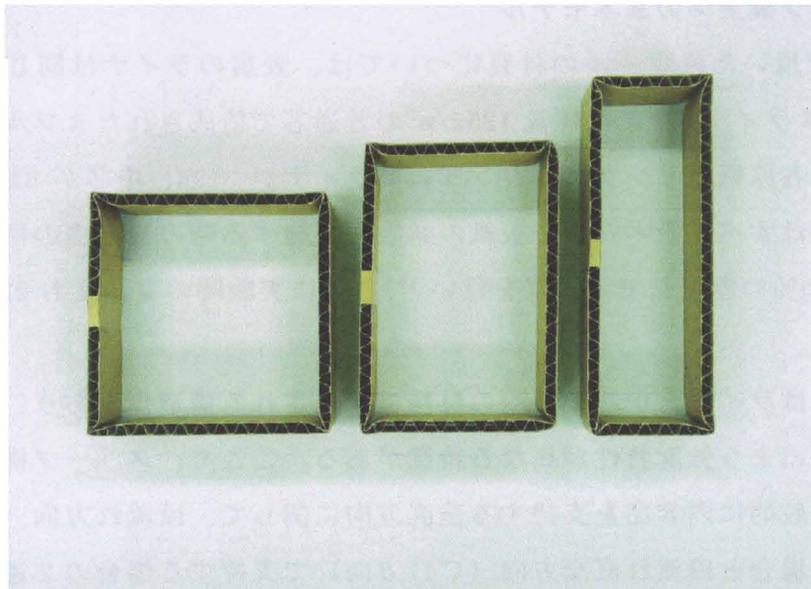
段ボールはライナと中芯の2つの材料で構成される構造体であり、同じ試料でも荷重方向により強度特性が異なる特徴がある。ここで、スリーブ構造体を考える場合、一般的に内容品を支持する垂直方向に関して、段流れ方向 (MD 方向) で支持する場合と段流れ直交方向 (CD 方向) で支持する場合の2通りが考えられるが、圧縮強度で言えば通常、MD 方向よりも CD 方向の方が強度は高い。したがって、段ボールシート1枚の構造による緩衝材を考えると、吸収エネルギー



**Fig.3.1 Basic model of sleeve-structure cushioning**



**Fig.3.2 Sleeve-structure model with folded parts**



**Fig.3.3 Sleeve-structure models of different aspect ratio**

量の大きさ等から実用性を考慮し Fig. 3.1 に示すような C D 方向を垂直方向としたスリーブ構造体を用いる。試料の外側寸法は  $100 \times 100 \times 35\text{mm}$  及び  $100 \times 100 \times 50\text{mm}$  の 2 種類とする。また、実際の段ボール緩衝材には折り曲げ構造をもつ場合も多く見られることから、スリーブの上端部と下端部に折り曲げ部を設けた試料も作製する。Fig. 3.2 に一例を示すが、折り曲げ部をスリーブ上端部のみに設けた片側折り曲げモデルと、上端・下端の両方に設けた両側折り曲げモデルの 2 種類について調べる。なお、この折り曲げ部はスリーブ各辺の外側に  $10\text{mm}$  の幅で折り曲げて成形する。

次にスリーブ構造体の同一周囲長における縦横比の違いによる影響を調べるため、Fig. 3.3 に示すように異なる縦横比のモデルを作製する。周囲長は  $400\text{mm}$  一定とし、スリーブ縦横寸法をそれぞれ  $100 \times 100\text{mm}$ 、 $120 \times 80\text{mm}$ 、 $150 \times 50\text{mm}$  に設定する。写真は折り曲げ部の無い試料の例であるが、折り曲げ部をもった試料でも同様に縦横比モデルを作製する。

## (2) せん断条件を考慮したモデル

実際の段ボール薄板構造体緩衝材の包装設計を考えると、内容品と外装箱の空間を補うために緩衝材両端部は内容品の端部からはみ出した構造になることが多い。そのような場合、Fig. 3.4 のように緩衝材の変形時に内容品との間でせん断力が作用する。そこで、緩衝材に発生するせん断力を考慮した実験モデルを考案

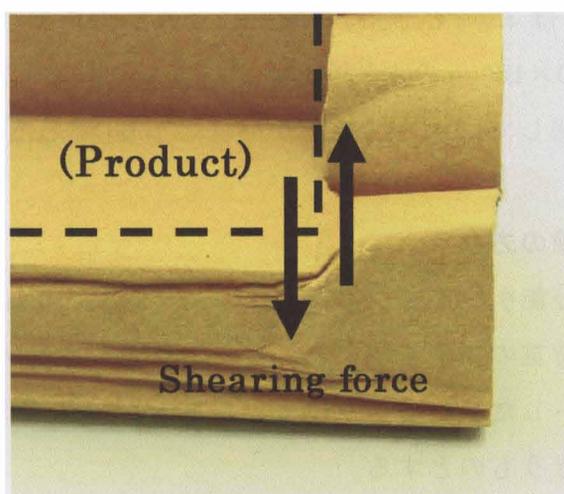


Fig.3.4 Example of a practical packaging design  
(generating shearing force)

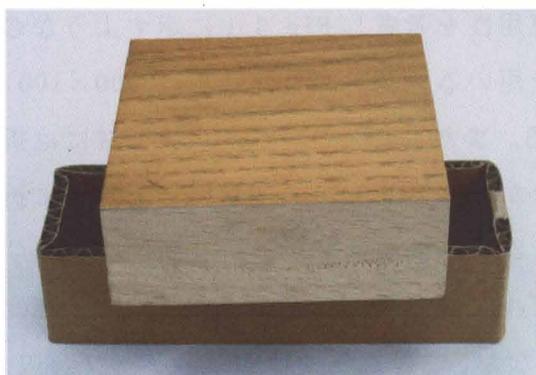


Fig.3.5 Wooden jig to generate shearing force

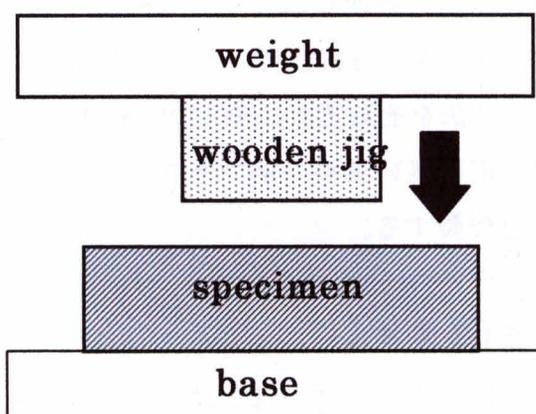


Fig.3.6 Drop test considered the influence of shearing force

し、緩衝特性への影響を調べる。使用した試料は前出の縦横比  $150 \times 50\text{mm}$  のスリーブ構造体で、高さは  $35\text{mm}$  とした。実験時にせん断力を発生させるため、Fig. 3.5 に示す断面寸法  $100 \times 100\text{mm}$  の木片を用いる（受圧部長さ  $200\text{mm}$ ）が、図のように試料の長さ方向に関しては木片端部より左右に  $25\text{mm}$  ずつはみ出した状態となる。

### 3.2.2 静的圧縮試験の方法

各試料について万能引張圧縮試験機により圧縮速度  $10\text{mm}/\text{min}$  で静的圧縮を行い、変形量と圧縮荷重の相関を調べる。また、せん断条件の圧縮試験については試料に木片をセットした状態で木片の上から荷重を加える。なお、試験は各条件について5回ずつ行うものとする。

### 3.2.3 動的圧縮試験の方法

落下衝撃試験機を用いて各試料に加速度センサーを取り付けたおもりを落下さ

せ、加速度を測定する。落下高さは 60 cm 一定とし、おもりの荷重範囲は 17.6N ~56.8N とする。また、せん断条件の試料の測定については Fig.3.6 のようにおもりの底面中央部に木片を取り付けて落下させる。なお、加速度センサーには 500Hz のローパスフィルターをかけ、各条件について 5 回ずつ測定する。

### 3.3 実験結果及び考察

#### 3.3.1 静的圧縮試験の結果

Fig. 3.7 に試料寸法 100×100×35mm の試験結果の一例を示す。図より、折り曲げ部の無い試料については圧縮後直ちに急激な荷重の上昇が見られ、折り曲げ部を有する試料とは大きく異なり、折り曲げ部の有無による圧縮荷重のピーク値にはおよそ 40%の差が認められる。これは折り曲げ部がある場合には圧縮時に荷重点の偏心が起こることが要因と考えられる。この結果から、輸送中に包装貨物に衝撃が加わった場合、緩衝材の折り曲げ部の有無によって加速度レベルも変わってくる事が予測される。ところで、各曲線下の面積の大きさは試料の吸収エネルギーの大きさに相当するが、各試料の面積を比較してみると圧縮荷重が平衡になった後（変位量 10~25mm）はほぼ同じ面積であり、各試料間の吸収エネルギー

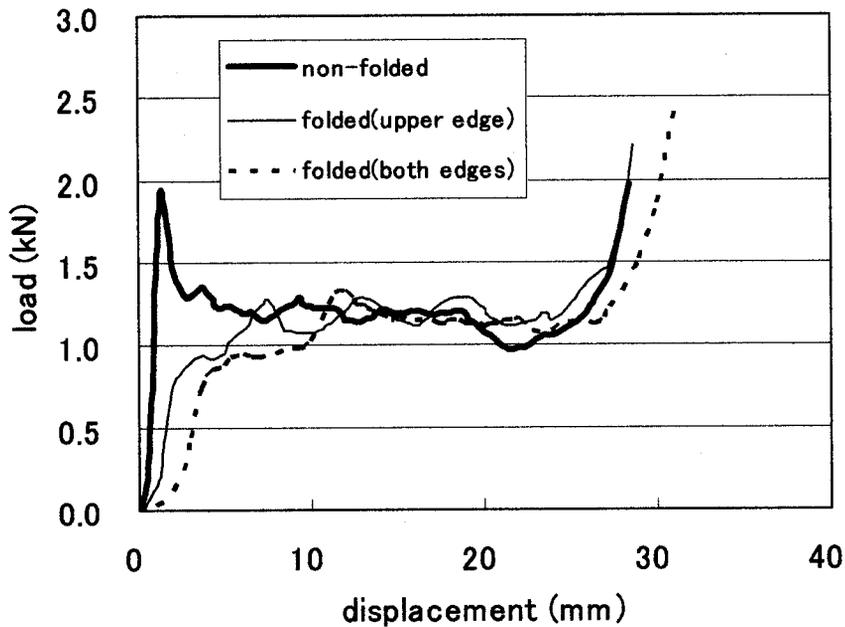


Fig.3.7 Comparison of the displacement – load curves among sleeve-structure models by static compression test

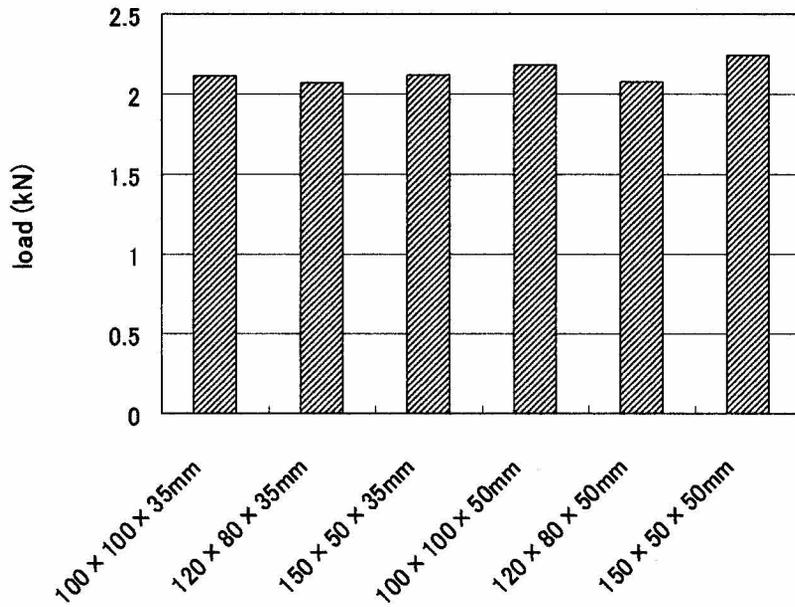


Fig.3.8 Comparison of static peak load by the difference of aspect ratio (non-folded models)

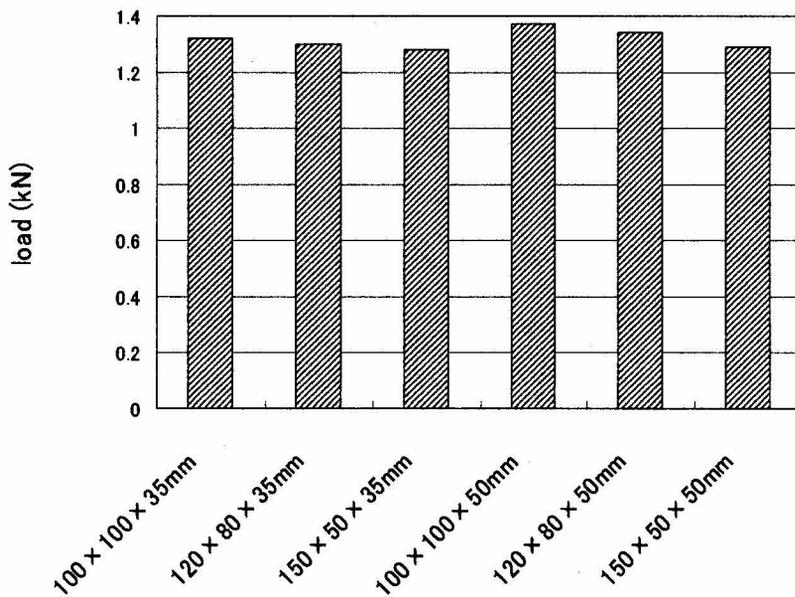


Fig.3.9 Comparison of static peak load by the difference of aspect ratio (both edges folded models)

量に大きな差はないと考えられる。なお、試料高さ 50mm の場合も同様の結果が得られている。

Fig. 3.8 に折り曲げ部の無い試料、また、Fig. 3.9 に両側に折り曲げ部を有する試料について縦横比の違いによる圧縮荷重の最大値を 5 回測定の平均値で比較したものを示す。Fig. 3.8 ではいずれも 2.1kN 前後、Fig. 3.9 ではいずれも 1.3kN 前後の値を示しており、今回の周囲長と高さの寸法比率においては縦横比による顕著な差は認められない。例えば、従来から段ボール箱の圧縮強度について、原紙のリングクラッシュ強さと箱の周囲長から予測されることが多いが<sup>2)</sup>、今回のスリーブ構造体についても試料の周囲長のみで強度が説明できる。

次に、せん断力が作用する条件の結果について試料高さ 35mm の例をとりあげ、折り曲げ部の有無別に Fig. 3.10 及びに Fig. 3.11 に示す。図はせん断力が作用しない試料との比較であるが、試験時の試料の受圧部長さが異なる(400mm と 200mm)ため縦軸の値は単位受圧部長さ当たりの荷重値で表している。各図よりせん断条件を有する試料の方が全体に荷重値が大きくなっているが、この結果からもせん断条件の有無により落下時に発生する加速度にも差が出る事が推定される。

### 3.3.2 動的圧縮試験の結果

100×100×35mm の試料の動的圧縮試験の結果を Fig. 3.12 に示す。図の横軸は

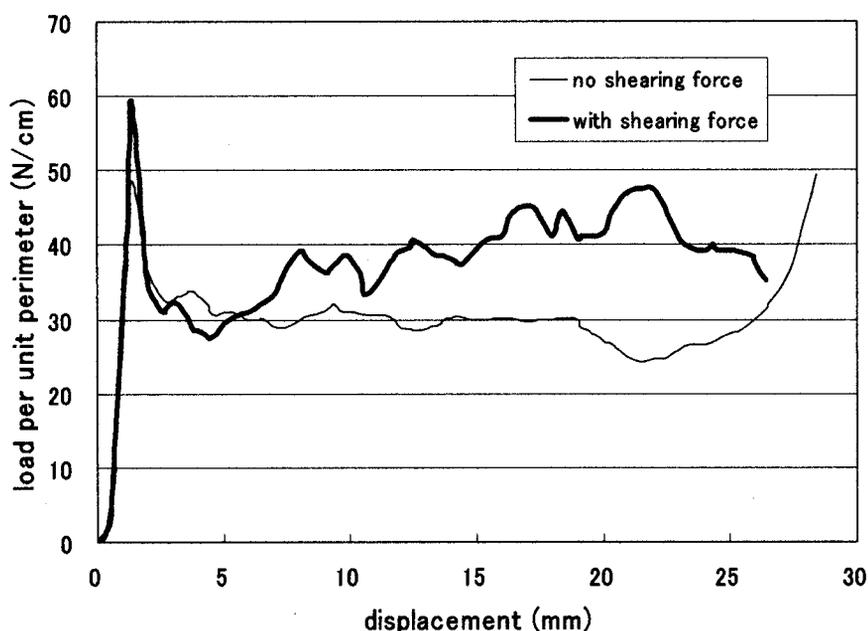


Fig.3.10 Comparison of the influence of shearing force (non-folded model)

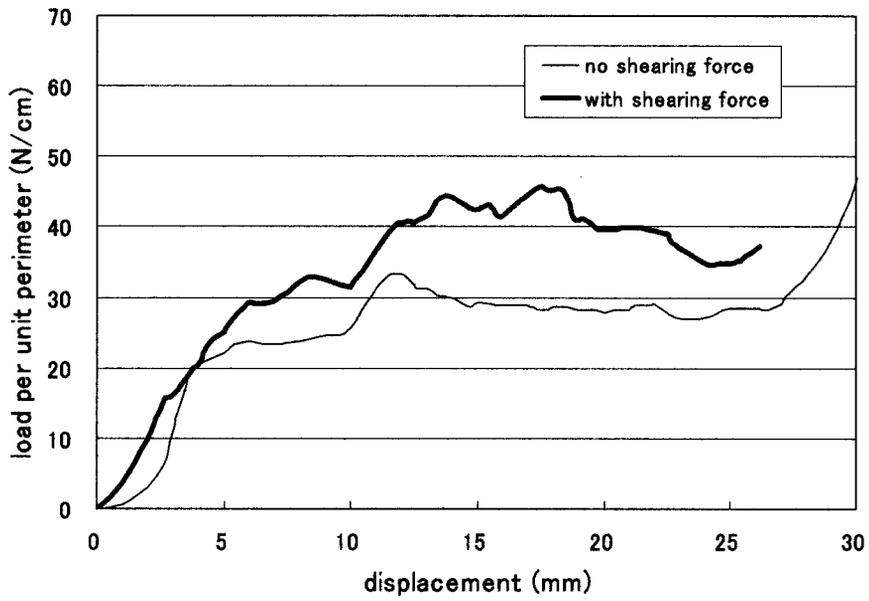


Fig.3.11 Comparison of the influence of shearing force (both edges folded model)

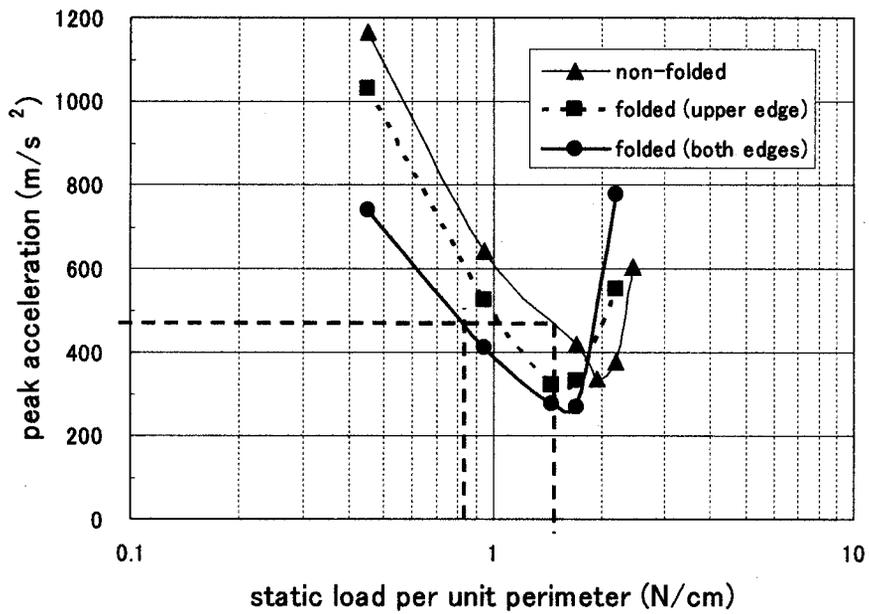


Fig.3.12 Comparison of cushioning property for the sleeve-structure models

試料の単位周囲長当たりの静的荷重の大きさを表す。従来、ブロック状の緩衝材ではおもりの質量を支持面積で除した静的応力を用いるのが一般的であるが<sup>3)</sup>、ここでは薄板状スリーブ構造体でさらに折り曲げ部の有無により実際の支持面積を求めることが困難であるため、静的応力に準ずるパラメータとしてこの値を設定する。また、図中のプロット値は5回測定の平均値を示す。

図より単位周囲長当たり荷重が 1.5N/cm 以下の範囲において、試料の折り曲げ条件により加速度に差が出るのがわかるが、両側折り曲げモデルが全体的に加速度の値が低い。実際の緩衝設計でこの図を利用する場合には、底つき発生防止も考慮すれば荷重値 1N/cm 前後の条件が適切だと考えられる。例えば、図に示すようにある内容品の許容加速度が  $490\text{m/s}^2$  だとすれば、単位周囲長当たり荷重の最低値は両側折り曲げモデルが約 0.8N/cm、折り曲げ部の無いモデルが約 1.3N/cm となる。

次に縦横比の違いによる動的圧縮試験の結果を Fig. 3.13 に示す。図は試料高さ 35mm の折り曲げ部の無いモデルの結果であるが、縦横比に関わらず各試料ともほぼ同じであることがわかる。静的圧縮試験でも Fig. 3.8 のように荷重値がほぼ同じであるが、動的圧縮試験も同様の傾向であることがわかる。また、折り曲げ部を有するモデルに関しても同じ結果が得られている。これらの結果よりスリーブ構造体段ボールの加速度レベルは有効周囲長により決定されると考えられる。

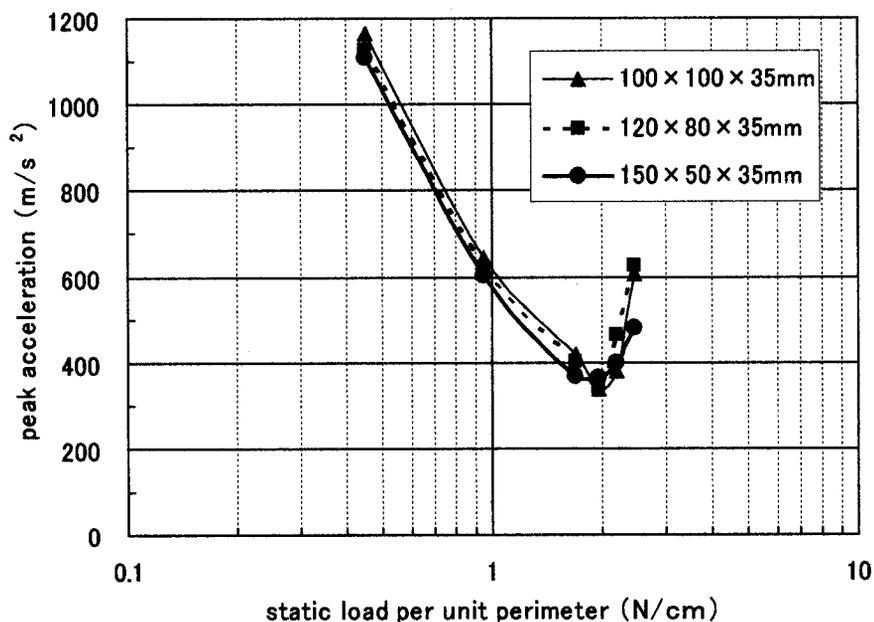


Fig.3.13 Comparison of cushioning property for aspect ratio (non-folded model)

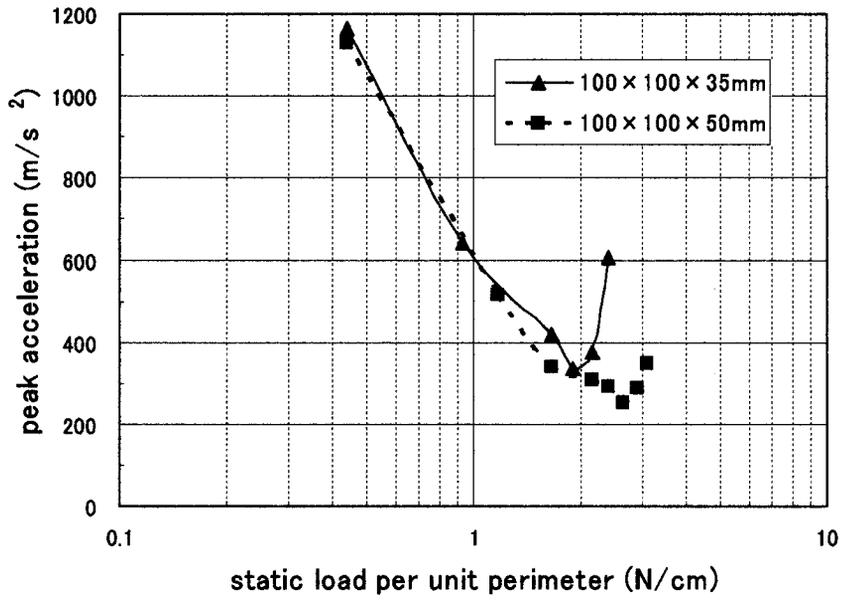


Fig.3.14 Comparison of cushioning property for specimen height (non-folded model)

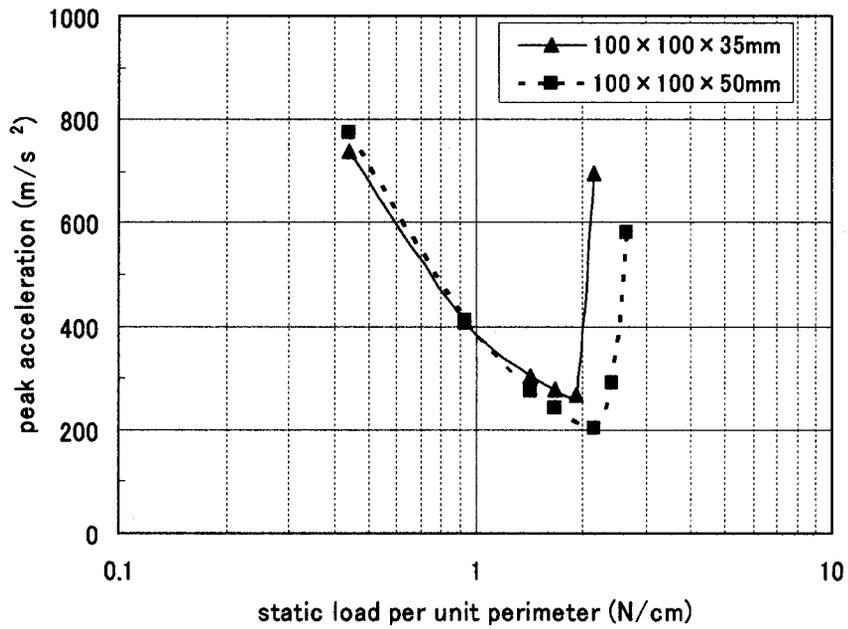


Fig.3.15 Comparison of cushioning property for specimen height (both edges folded model)

さらに試料高さの違いによる動的圧縮試験の結果を折り曲げ部の無いモデルについて Fig. 3.14 に、両側折り曲げモデルについて Fig. 3.15 にそれぞれ示す。両図からわかるように、折り曲げ部の有無によらず試料高さ別の曲線の傾向はよく一致している。つまり、低荷重域では試料高さに関係なく加速度レベルはほぼ同じであり、高さ 50mm の試料については試料高さの分だけ吸収エネルギー量が大きいため底づきが発生する荷重値が 35mm 試料よりも大きくなる。したがって、低荷重域での条件設定で緩衝設計を行う場合、加速度レベルは試料高さに関係なく緩衝材周囲長で決定される。

続いてせん断条件を考慮したモデルの動的圧縮試験の結果を Fig. 3.16 に示す。各曲線を比較すると Fig. 3.12 の基本スリーブ試料の結果と傾向はよく一致しているのがわかるが、静的圧縮試験でせん断条件による荷重値の上昇が認められるように動的圧縮試験においても加速度値が全体的に高くなるのがわかる。Fig. 3.17 は両側折り曲げモデルのせん断条件の有無による緩衝曲線の比較であるが、単位長さ当たり荷重が 1N/cm 付近の実用域において  $150\text{m/s}^2$  程度の加速度差が確認できる。実際の緩衝設計で製品の支持形態が今回のようなせん断条件を

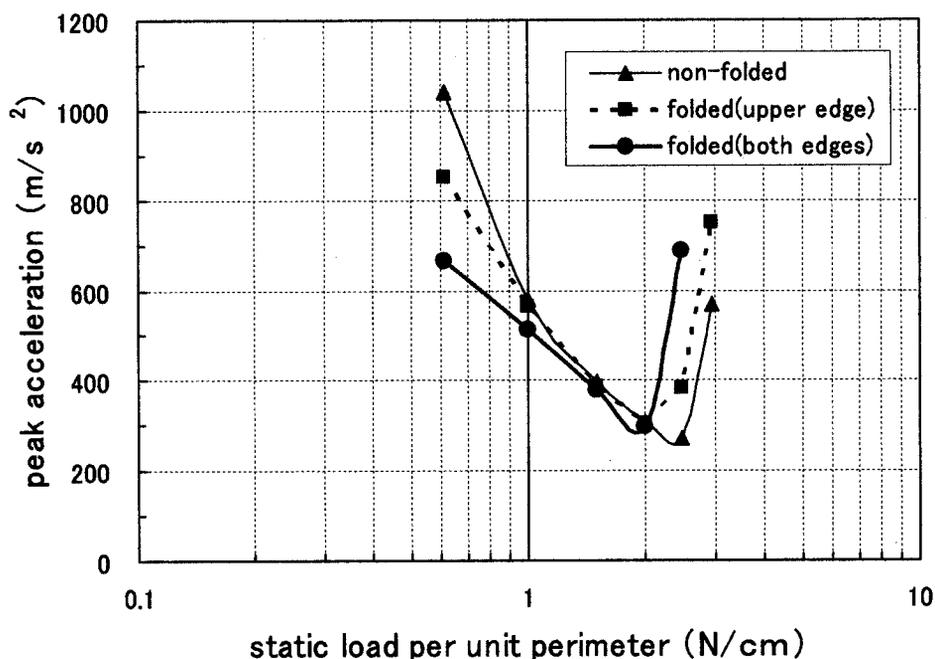


Fig.3.16 Comparison of cushioning property for the sleeve-structure models with shearing force

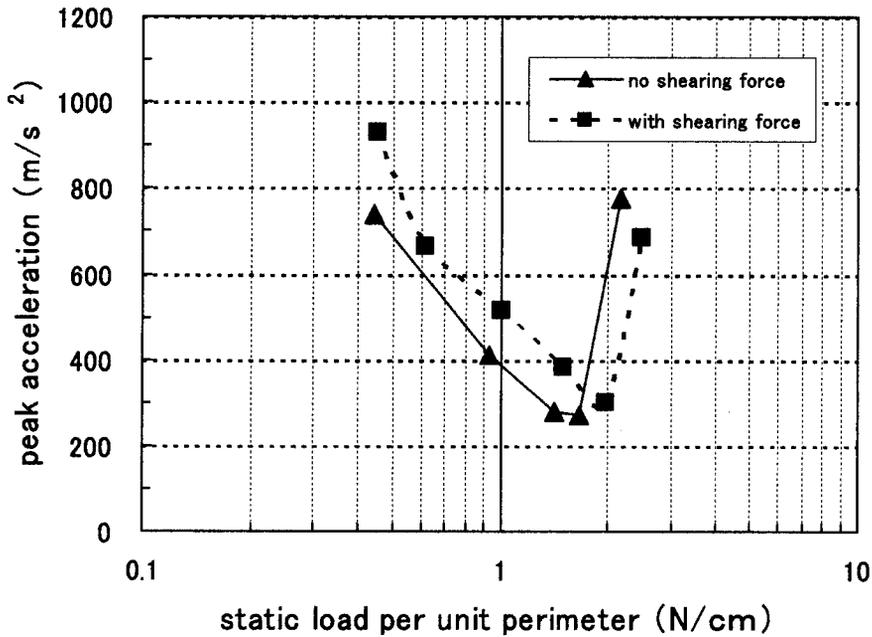


Fig.3.17 Comparison of cushion curves for the influence of shearing force (both edges folded model)

含んでいる場合は加速度の上昇が予測されるので注意が必要であり、せん断条件によって求めた緩衝特性曲線を利用することで安全な設計が実現できる。

### 3.3.3 緩衝材の吸収エネルギー量について

従来、発泡プラスチック系のブロック状緩衝材については材料の単位体積当たりの吸収エネルギー量と最大応力の関係から最適な設計条件を求める方法が試みられている<sup>4)</sup>。また、積層段ボール緩衝材については第2章で述べたように、見かけの体積から単位体積当たりの吸収エネルギー量を求めて設計の一般化を図っている。

ここでスリーブのような薄板構造体でも有効周囲長、試料高さ、シート厚さから体積を求め、動的圧縮試験から得られる最大荷重値との関係から試料の底づきが起こる限界条件について調べる。落下時のおもりの位置エネルギーの大きさを試料の単位体積当たりのエネルギー量に換算した値をエネルギー密度  $E_D$  と定義すれば次式が得られる。

$$E_d = \frac{WH}{l \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

$E_d$  ; エネルギー密度 (J/m<sup>3</sup>)       $W$  ; おもりの荷重 (N)  
 $H$  ; 落下高さ (m)       $l$  ; 緩衝材の有効周囲長 (cm)  
 $h$  ; 緩衝材の高さ (cm)       $t$  ; シート厚さ (cm)

また、測定された加速度値におもりの質量を乗じて試料の有効周囲長で除した値を単位長さ当たりの最大荷重  $D_p$  とすれば次式が得られる。

$$D_p = \frac{ma_c}{l} \quad (2)$$

$D_p$  ; 最大荷重 (N/cm)       $m$  ; おもりの質量 (kg)  
 $a_c$  ; 衝撃加速度 (m/s<sup>2</sup>)       $l$  ; 緩衝材の有効周囲長 (cm)

動的圧縮試験でおもり質量が増え、試料の底づきが発生すれば加速度値の急激な上昇が起き、最大荷重値も急上昇する。せん断条件の有無ごとにエネルギー密度と最大荷重値の関係を求めた図を Fig. 3.18 及び Fig. 3.19 に示す。ただし、こ

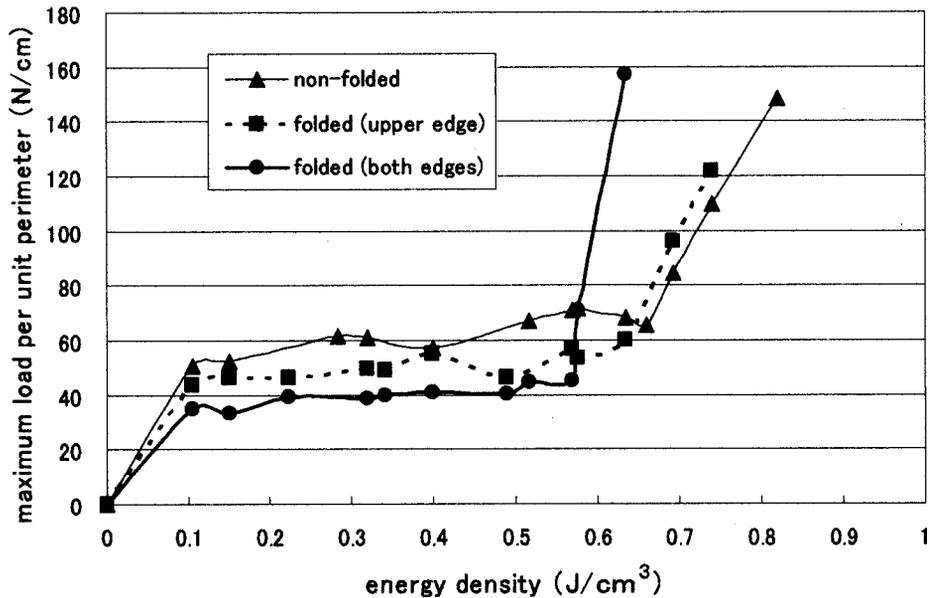


Fig.3.18 Relation between energy density and maximum load (no shearing force)

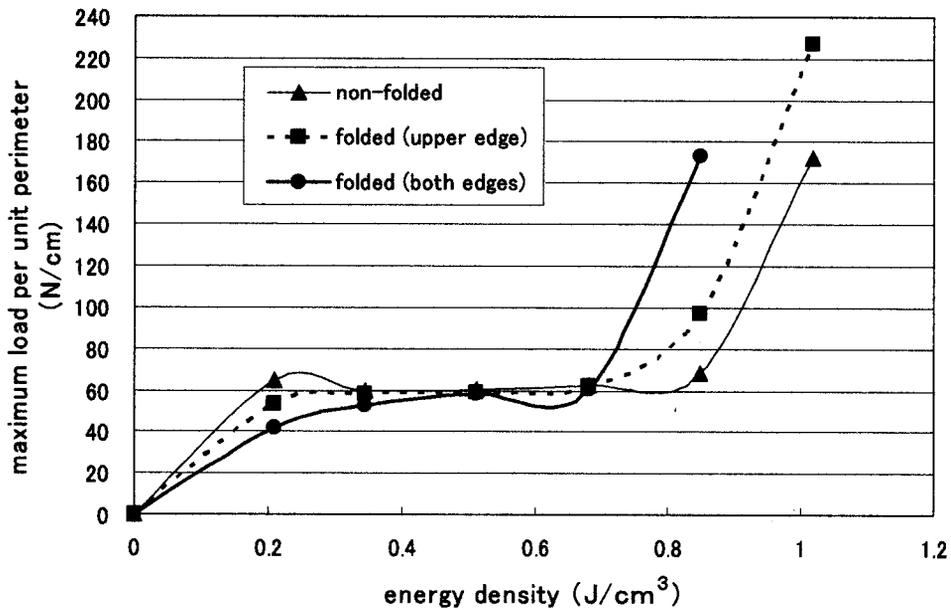


Fig.3.19 Relation between energy density and maximum load  
(with shearing force)

こでの段ボールシート厚さ  $t$  は 5mm とする。各図において折り曲げ部があるモデルでは、Fig. 3.18 のせん断条件が無い場合でおよそ  $0.5\text{J}/\text{cm}^3$ 、Fig. 3.19 のせん断条件を有する場合でおよそ  $0.7\text{J}/\text{cm}^3$  付近から最大荷重値が急上昇しており、これらのエネルギー密度の条件で底づきが発生する。設計時に適正な緩衝材高さを設定する必要があるが、この線図を利用することで製品質量と落下高さから適正な高さを推定できる。

### 3.4 包装設計の応用事例

#### 3.4.1 ダミー木箱を用いた緩衝設計

これまでに収集した段ボールスリーブ構造体の緩衝特性データの実用性を検証するため、実際の内容品に模したダミー木箱について緩衝包装の試作と落下試験を行う。ダミー木箱の寸法は  $400 \times 300 \times 100\text{mm}$ 、質量は  $5.3\text{kg}$  で、また、許容加速度を  $490\text{m}/\text{s}^2$  とする。

次に、木箱用段ボール緩衝材として木箱両端部を支持するサイドパッド方式の緩衝材を折り曲げ部の有無により Fig. 3.20 に示すように試作する。ここで、内容

品を支持する部分の緩衝材高さは 35mm とし、支持部の有効長さはせん断条件がある場合の緩衝特性を示す Fig. 3. 19 を利用して決定する。ここで底づきが発生しない安全な条件を考え、エネルギー密度を折り曲げ無しモデルで  $0.5\text{J}/\text{cm}^3$ 、両側折り曲げモデルで  $0.3\text{J}/\text{cm}^3$  と設定すれば、支持部の長さは折り曲げ無しモデルが 350mm、両側折り曲げモデルが 600mm となる。ただし、ここでの段ボールシートの厚さを 5mm とする。

### 3. 4. 2 落下試験の結果

落下試験は Fig. 3. 21 のように緩衝材で木箱両端部を支持固定し、段ボール箱に入れた状態で行う。落下高さは 60cm とし、落下箇所は底面とする。なお、外装用段ボール箱については落下試験の結果になるべく影響しないように底面シートの段を事前に潰した後、試験を行う。また、加速度センサーには基本モデル実験と同様に 500Hz のローパスフィルターをかける。

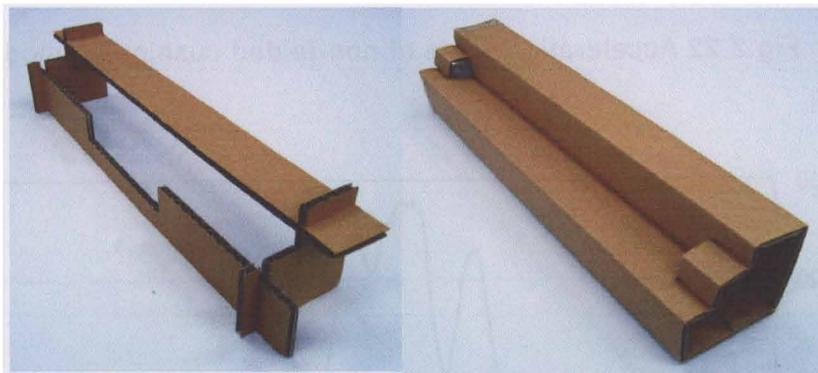


Fig.3.20 Side pad cushioning model  
(left: non-folded type, right: folded type)



Fig.3.21 Mockup set up on the cushioning

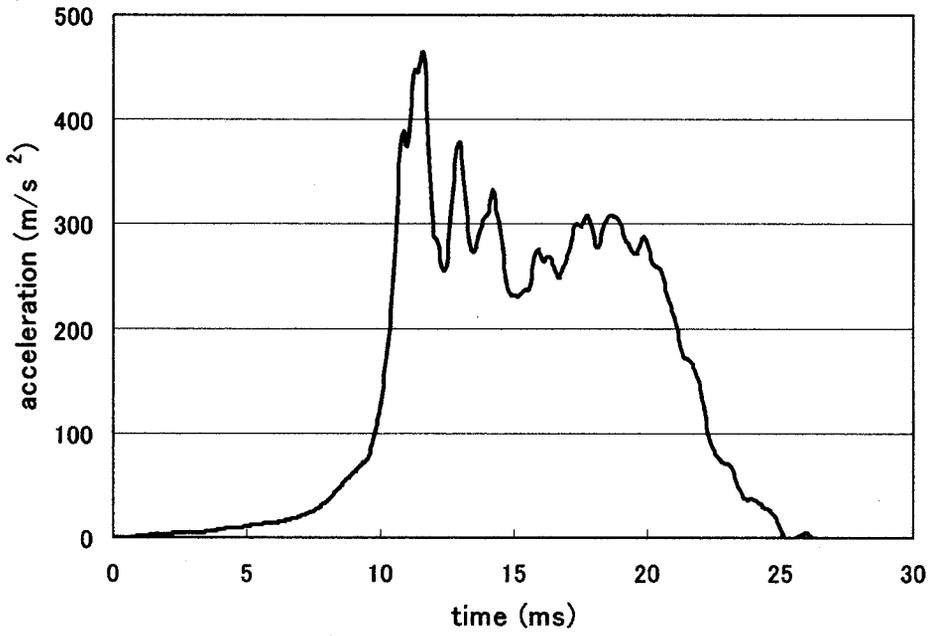


Fig.3.22 Acceleration wave of non-folded cushioning model

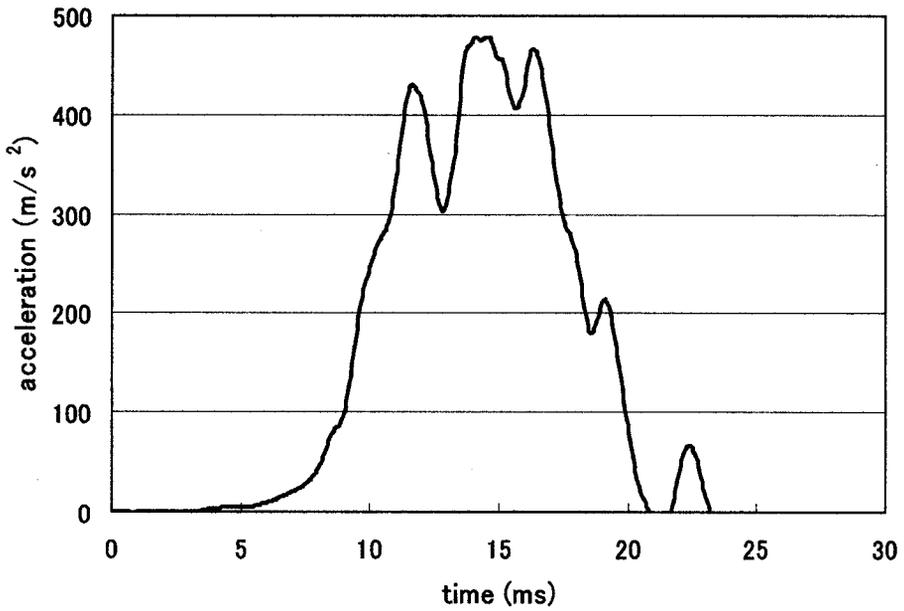


Fig.3.23 Acceleration wave of folded cushioning model

試験結果を Fig. 3.22 及びに Fig. 3.23 に示す。図より測定されたピーク加速度はどちらも  $490\text{m/s}^2$  に近い値であり、実用的な精度で緩衝設計が行うことができる。これらの結果より、薄板状段ボールスリーブ構造体で緩衝設計を実施する場合、内容品支持部の有効周囲長と折り曲げ部及びせん断条件の有無が加速度レベルを決定する最も重要なファクターであることがわかる。

### 3.5 結 言

一般に、段ボールシートの薄板構造体緩衝材は内容品毎に形状が異なり、また、複雑であることから設計法の確立が困難と見なされがちである。しかし、ここで述べたようにスリーブ構造モデルを用いた緩衝特性に関する基礎実験を行うことで、緩衝包装設計の一般化を図ることも可能である。

実験結果から試料の有効周囲長、折り曲げ構造の有無、内容品支持部のせん断条件の有無が緩衝性に大きく影響することがわかる。一見複雑で緩衝性に関して法則性が見出しにくい段ボール緩衝材についても実験により、せん断条件も考慮した「単位長さ当たり荷重－最大加速度」線図や「エネルギー密度－単位長さ当たり最大荷重」線図等を作成することで適正な試料寸法を求めることができる。これにより試行錯誤の繰り返しに頼る方法を大幅に軽減することができ、設計の効率化を図ることができる。

### 参考文献

- 1) JIS P 8111 : 紙、板紙及びパルプ－調湿及び試験のための標準状態
- 2) K. Q. Kellicutt: Basic Design For The Use of Fiberboard in Shipping Containers; No. D1911, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 12, 1951
- 3) 星野茂雄・豊田実: 緩衝包装設計ハンドブック、123-144、日本生産性本部、1969
- 4) Gary Burgess: Generation of Cushion Curves from One Shock Pulse, Packaging Technology and Science, 7, 169, 1994

## 第4章 構造解析シミュレーションによる緩衝包装設計

### 4.1 緒言

一般に工業製品の設計において構造解析ソフトウェアを利用して強度解析等のシミュレーションを行い、設計の効率化を図ることは常識となっている。しかし緩衝設計の分野においては、これまで発泡プラスチック系緩衝材の包装品については事例<sup>1) 2)</sup>があるが、段ボールのシミュレーションに関しては均質化法を用いた事例<sup>3)</sup>が報告されている以外はほとんど無く、現状ではまだ一般的ではない。

近年、製品開発のサイクルは短くなっており、設計者も迅速な対応が求められる。設計リードタイムの短縮化を図るためには、製品のみならず包装設計の迅速化・効率化も必要になってくる。そのためには緩衝設計に構造解析ソフトウェアを導入し、シミュレーションにより時間やコスト等の改善を図ることができるか検討する必要がある。ここでは段ボール緩衝材をモデル化しシミュレーション解析と実験値との比較を行い、その結果から段ボールが構造解析ソフトウェアの利用により設計効率を上げることができるか考察する。

### 4.2 段ボールの簡易モデル化について

#### 4.2.1 シミュレーションソフトウェア

本研究に用いた構造解析ソフトウェアは米国 LSTC 社製の「LS-DYNA」である。このソフトウェアは塑性加工解析や衝撃落下解析の分野で実績があり<sup>4)</sup>、広く利用されている。今回の段ボールの大変形解析に利用することにも適していると考えられる。

LS-DYNA は非線形解析の手法として陽解法を用いて解析を行う<sup>5) 6)</sup>。これはある時刻  $t$  での運動方程式を基に時刻  $t + \Delta t$  の解を近似的に求める手法で、通常、連立方程式の求解操作を必要としない。したがって、運動方程式を解く時間が節約できる反面、 $\Delta t$  を十分小さくとらなければ解の安定性が保証されないという特徴を持っている。

離散化された運動方程式は一般に次式のように書ける。

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = \{F\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ :質量マトリックス、 $[C]$ :減衰マトリックス、 $[K]$ :剛性マトリックス、 $\{F\}$ :荷重ベクトル、 $a$ :加速度ベクトル、 $v$ :速度ベクトル、 $u$ :変位ベクトルとする。

この運動方程式の時間積分には中央差分法を用いるが、この場合、加速度を未知変数とし対角質量マトリックスにより連立方程式によらず解を求めることができる。

$$a^n = M^{-1} \cdot (P^n - F^n - F_{damp}^n) \quad (2)$$

$$v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + a^n \cdot \Delta t^n \quad (3)$$

$$u^{n+1} = u^n + v^{n+1/2} \cdot \Delta t^{n+1/2} \quad (4)$$

ここで  $P$ :外荷重、 $F$ :構造内力、 $F_{damp}$ :減衰力、 $\Delta t$ :時間ステップ幅、 $n, n+1/2, n+1$ :計算ステップとする。

また、 $\Delta t$ は応力波伝搬速度を基にしたクーラン条件を満たすように決定する必要がある。上式により  $n+1$  ステップでの加速度が計算でき、したがって同様に変位も求めることができる。

#### 4.2.2 簡易モデル化の考え方

段ボールは表裏ライナと中芯を貼合した構造体であり、さらに各原紙がそれぞれの強度特性に異方性を有している。この段ボールに折り曲げや切り込み等の操作を行うことにより段ボール緩衝材は形成されるが、シミュレーションのためにこれをソリッド要素で詳細にモデル化して解析を行うことは大変な労力が必要となる。しかし、本研究の目的は内容品を含んだトータル包装品レベルでのシミュレーションを行うことにある。この場合、内容品については詳細なモデル化が必要になってくる<sup>7)</sup>が、包装材の段ボールまで詳細にモデル化しては設計の効率が反対に悪くなる可能性もある。その点から実用性を考慮し、段ボールはできる限り単純なモデル化を行った方がシミュレーションの効果を上げられると期待できる。したがって、ここでは段ボールシート全体を一様な単一素材と見なした簡易モデルのシェル要素解析について検討する。

#### 4.2.3 段ボールの解析用物性値の設定

実験に用いる段ボールシートの原紙構成は、表ライナ及び裏ライナともに坪量

210g/m<sup>2</sup>のクラフトライナ、中芯は坪量 120g/m<sup>2</sup>の普通芯で構成されたAフルートのものとする。また、試料はすべて 23℃/50%の標準状態で前処理したものを実験に用いる。

簡易モデルでシミュレーションを行うため、解析に用いる段ボールの物性値はライナや中芯の単体の物性ではなく、段ボールシートの状態での引張試験から得られる物性値を利用する。段ボールシートは異方性材料で、段流れ方向（MD方向）と段流れ直交方向（CD方向）で強度特性が異なるため、それぞれの方向について引張試験を行う。Fig. 4.1 に段ボールシートのMD、CD各方向の引張特性を示す。試験条件は試料幅 35mm、治具つかみ間隔 180mm、試験速度 10mm/minとする。図より、引張強度についてはMD方向、伸びについてはCD方向が大きくなっているのがわかるが、これはライナや中芯単体での引張特性と同じ傾向である。

また、シミュレーションに用いる段ボールシートのポアソン比は文献を参考にして 0.1 の数値を設定する<sup>8)</sup>。

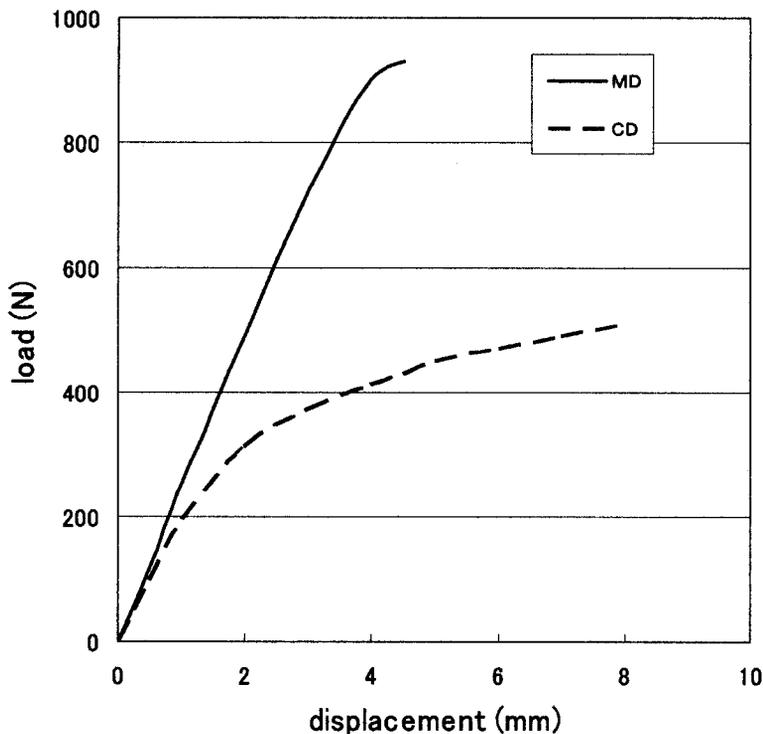


Fig.4.1 Tensile property of corrugated fiberboard

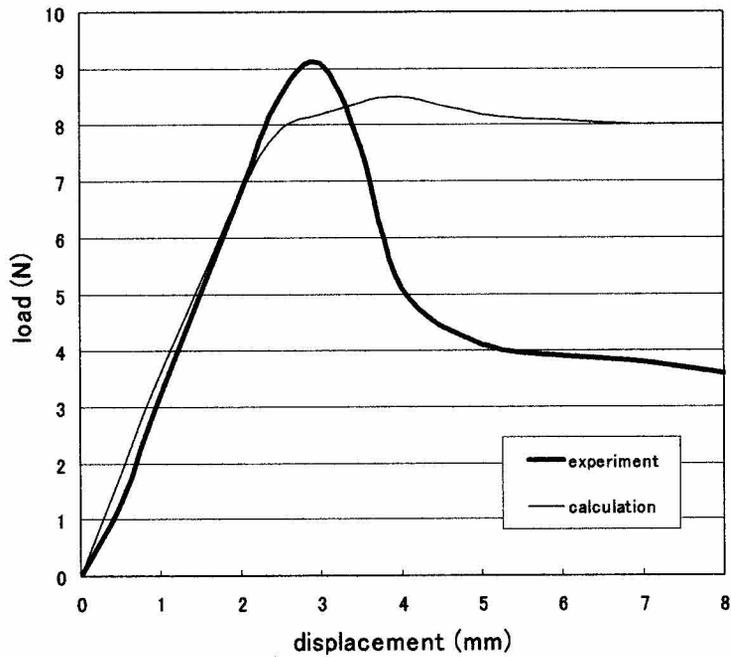


Fig.4.2 Comparison between the calculation and experiment of bending strength



Fig.4.3 Example of simulation for bending test

### 4.3 基礎実験における結果と考察

#### 4.3.1 段ボールシートの基本実験における実験値と解析値の比較

段ボールシートの強度特性を調べる基本的な試験である曲げ試験とエンドクラッシュ試験について実験とシミュレーションの比較を行う。なお、ここでの解析には LS-DYNA の塑性モデル解析の計算則を用いる。

##### (1) 曲げ試験

段ボールシートの曲げ試験を、 $35 \times 150\text{mm}$  の長手方向が CD 方向となるシート

を支持部の支点間隔 120mm の 3 点曲げで行い、シミュレーション結果と比較する。なお、試験に用いる支持及び曲げに用いる円柱治具の直径は 20mm、圧縮速度を 10mm/min とする。実験と解析結果の比較を Fig. 4.2 に、また解析例を Fig. 4.3 に示す。

Fig. 4.2 より解析結果を実験結果と比較してみると、最大荷重までの挙動については良く一致しているが、実験でシートが折れ曲がり荷重が急激に下降するところから解析結果との大きな差が認められる。実験ではシートは最大荷重を超えた時にシートの曲げ部にけい線が入り折れてしまうため、そこから急激な荷重の低下が認められる。しかし、シミュレーションではシートの折れ曲がり現象の再現は困難で、最大荷重を過ぎた後もある程度荷重レベルを維持しながら変形が進んでいる。このような実験と解析の結果の差については改めて検討する必要がある。

## (2) エンドクラッシュ試験

次に段ボールシートのエンドクラッシュ試験で実験とシミュレーションの比較を行う。試験は 50×100mm の試料を CD 方向に圧縮速度 10mm/min で行う。実験と解析結果の比較を Fig. 4.4 に示す。

図より圧縮荷重が最大値になるまでの弾性域の荷重と変位の挙動に関してはある程度精度の良い解析になっているが、最大荷重を過ぎて座屈域になると実験と解析との結果に大きな差が生じているのがわかる。実際の試験の様子を見ると、試料は圧縮を加えると Fig. 4.5 のように端部から局部座屈が発生し、蛇腹状に潰れていく。しかし、シミュレーションではこのような座屈現象の再現が難しい。段ボール緩衝材の現実的な効果について考えると、ここで課題となっている座屈後の荷重の挙動こそが衝撃エネルギーを吸収する状態を示すことになるため、座屈後の解析精度を上げなければ段ボール緩衝材のシミュレーションについては十分な効果が得られない。したがって、段ボールの座屈後の荷重挙動を考慮した材料のモデル化について再検討を行う。

### 4.3.2 新しいモデル化の検討

#### (1) 段ボール物性値の新しい設定

段ボールが座屈した後の荷重挙動についても考慮するため、ここで LS-DYNA の

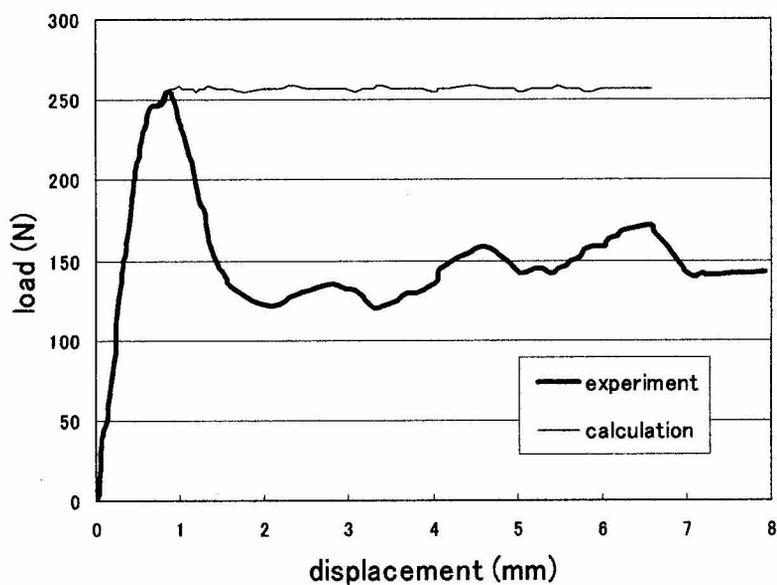


Fig.4.4 Comparison between the calculation and experiment of end crush test by plastic model

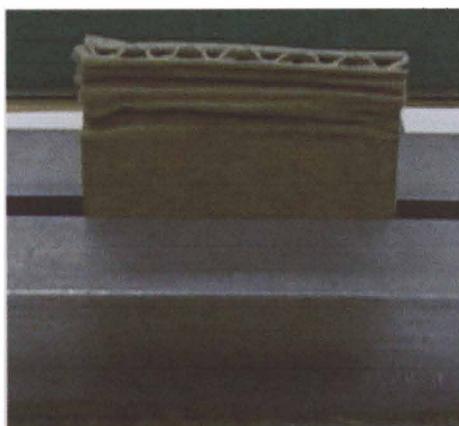


Fig.4.5 Local buckling of corrugated fiberboard by end crush test

破壊モデル解析の計算則を用いることを試みる。解析に用いる数値として圧縮強度に加え、せん断破壊強度と残留強度を設定する。圧縮強度は材料の最大荷重に寄与し、またせん断強度・残留強度はピーク荷重後の座屈挙動に影響すると考えられる。ここで新しい設定による解析に用いる材料物性値について Table. 4.1 にまとめて示す。なお、表中の弾性率の値は初期の微小変形域において適用される。

Table.4.1 parameters for destructive model of corrugated fiberboard

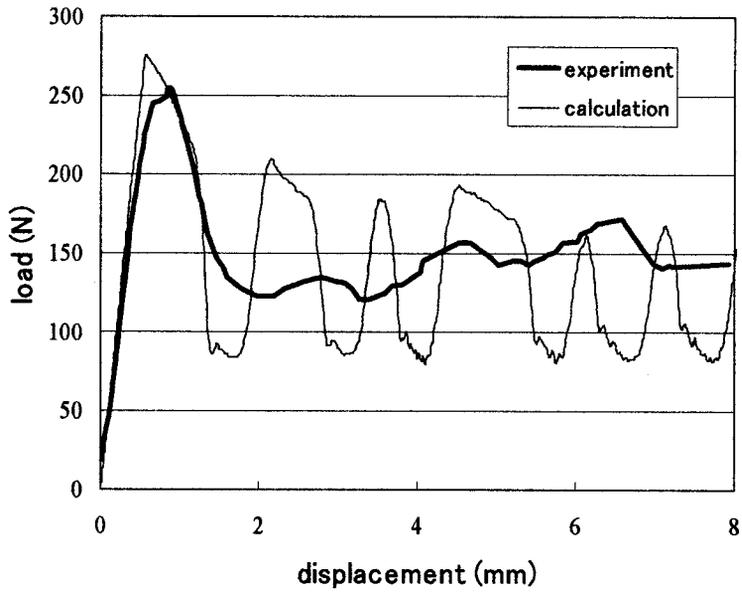
parameter	values
elastic modulus (CD direction)	656MPa
elastic modulus (MD direction)	374MPa
Poisson's ratio	0.1
compressive strength (CD direction)	1.05MPa
compressive strength (MD direction)	0.44MPa
shearing strength	0.30MPa

## (2) エンドクラッシュ試験

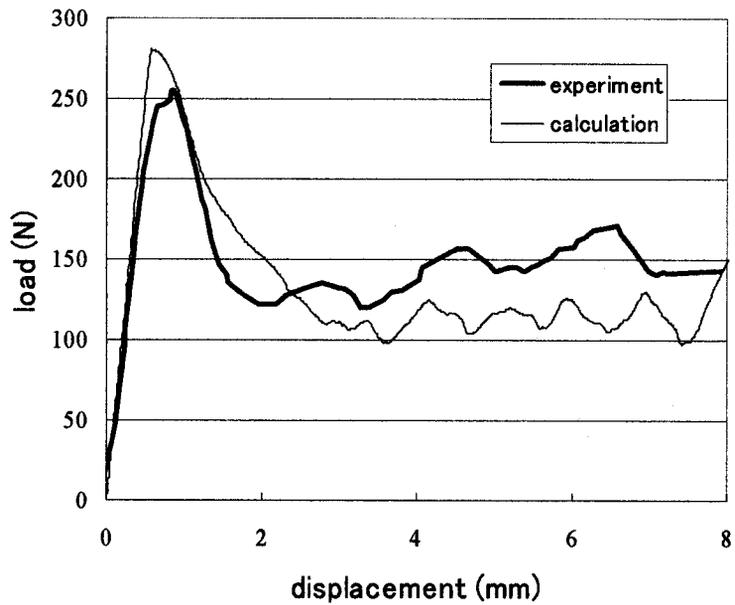
新しい設定値を用いた破壊モデルでの解析について前出と同じ条件でエンドクラッシュ試験を行う。また、解析時の初期不整の有無の影響について調べるため、モデル上端部の試験機が接触する部分の板厚方向に対し、一様にランダムな初期不整を設定したモデルの解析を行う。なお、設定幅は試料幅に対して最大1%の範囲内とする。

実験と解析の比較について Fig. 4.6 及び Fig. 4.7 に結果を示す。まず、Fig. 4.6 は初期不整の設定が無い場合の解析と実験の比較であるが、図より最大荷重を過ぎた座屈域の荷重の挙動について見ると、解析結果も実験同様に変位 1mm の付近から座屈後大きく荷重が下がっているのがわかる。ただ、実験では変位 2mm を過ぎたところからおよそ 120~170N の荷重範囲で上下に推移しながらほぼ横ばいに圧縮変形が進行しているのに対し、解析ではおおよそ 80~210N の荷重範囲で実験よりもかなり多くの上下の挙動を繰り返している様子がわかる。

一方、Fig. 4.7 は初期不整を設定した場合であるが、図より変形が進んで荷重が座屈域に入ったところでも解析値が実験値の挙動とかなり近似しているのがわかる。この初期不整の操作により実際の座屈現象に近いシミュレーションが行えると考えられ、解析精度が向上する。したがって、次にこれらの材料則を用いて段ボール構造体の落下衝撃試験の解析を行い、緩衝設計への適用について検討する。



**Fig.4.6 Comparison between the calculation and experiment of end crush test by destructive model**



**Fig.4.7 Comparison between the calculation and experiment of end crush test by destructive model with initial irregularity**

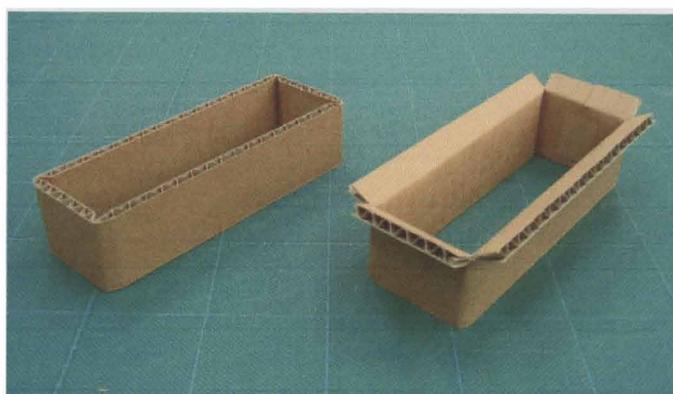


Fig.4.8 Sleeve structure model of corrugated fiberboard

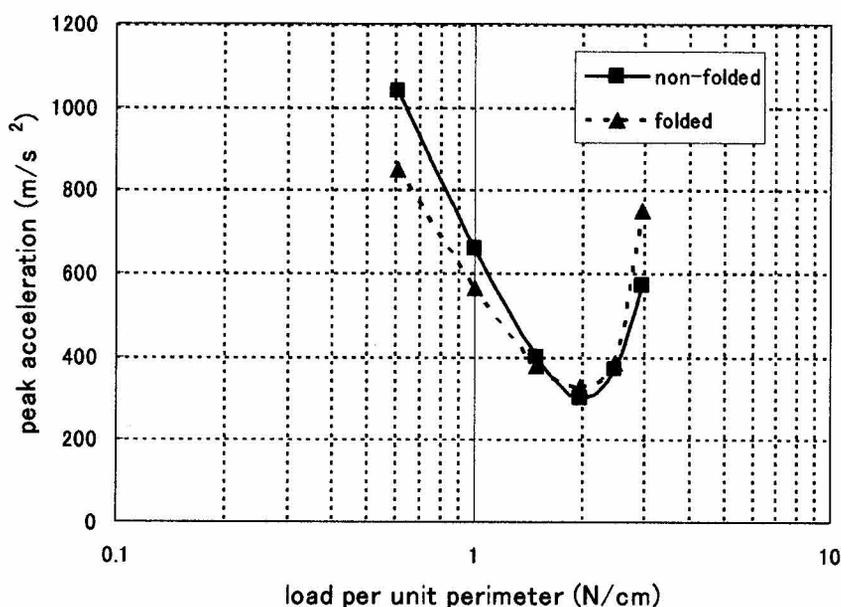


Fig.4.9 Comparison for acceleration of sleeve structure model

### (3) スリーブ構造体の緩衝性試験

落下衝撃試験のシミュレーションに用いる段ボール緩衝材の試料は3章の3.2項で述べたせん断条件を考慮したスリーブ構造体とする。試料の外観を Fig.4.8 に示すが、試料の外側寸法は 150×50×50mm、また折り曲げ構造を考慮したモデルについては試料上端部を長さ 10mm 延ばしてけい線部を設け、上側の部分を外側に折り曲げる。実験は落下衝撃試験機を用いて調べるが、試料にせん断力が作用するように3章の Fig.3.6に示すようにおもりの底面に 100×100mm 断面の角材を取り付けて落下高さは 60cm で試験を行う。なお、加速度センサーには 500Hz のローパスフィルターをかけ、各条件について 5 回ずつ測定する。

Fig. 4.9 に結果を示すが、図中のプロット値は5回測定の平均値を示す。図より試料の折り曲げ構造の有無により発生する加速度の大きさに差が出ることがわかる。例えば横軸の単位長さ当たり荷重が  $1\text{N/cm}$  付近ではおよそ  $100\text{m/s}^2$  の差があり、実際の緩衝設計を行う際にも折り曲げ構造の有無について考慮しなければならない。

次にこの段ボールスリーブ構造体の落下試験のシミュレーションを行う。解析条件は落下高さを  $60\text{cm}$ 、おもりの質量を  $2.1\text{kg}$  とする。また、解析は新たに設定した破壊モデルで行う。さらに段ボール構造体について考える場合、通常の段ボールシートと折り曲げ部分のシートには強度に差があるため、その影響を考慮したモデル化を試みる。今回、試料端部に折り曲げ構造のあるモデルについては段ボールの折り曲げ部分の物性値を垂直、水平方向とも通常の段ボールシートの数値より強度を小さく設定して計算を行う。また、折り曲げ無しのモデルについても試料の上下両端部の物性値については通常の数値と異なった数値を用いる。これはモデル全体に同一の数値を用いた場合に衝撃の初期段階において加速度値が大きくなり、実際と隔たった値になることを防ぐため、この操作は解析精度を上げるための初期不整の意味合いを含んでいる。これらの部分の材料物性値について Table. 4.2 に示す。

実験と解析結果の比較を Fig. 4.10 及び Fig. 4.11 に示す。Fig. 4.10 は折り曲げ構造が無い試料、Fig. 4.11 は折り曲げ構造を有する試料の結果である。Fig. 4.10 より単純なスリーブ構造体について実験と解析を比べると、衝撃の初期段階でピーク加速度に達するまでの波形の挙動、またピーク後の波形の上下動の様子などについては良く似た結果が得られている。一方、Fig. 4.11 の折り曲げ構造があるモデルについては解析結果では  $1\text{ms}$  付近で最初のピークに達した後、一度加速度

Table.4.2 parameters for destructive model of corrugated fiberboard

a part of specimen	values	
	compressive strength (CD direction)	shearing strength
folded part of board	0.3MPa	0.05MPa
edge of board	0.6MPa	0.05MPa

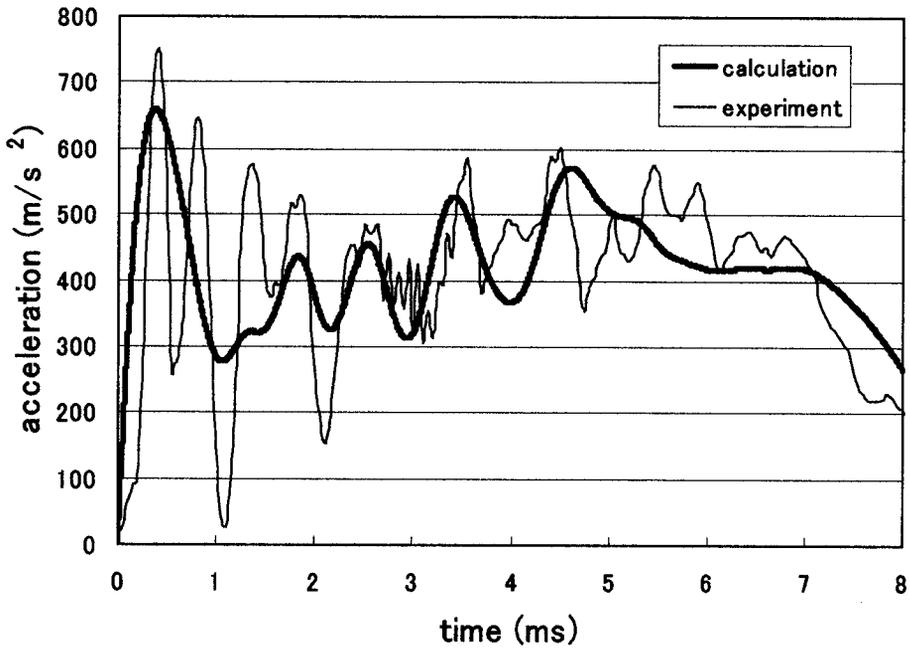


Fig.4.10 Comparison between the calculation and experiment of drop test for the simple sleeve structure model

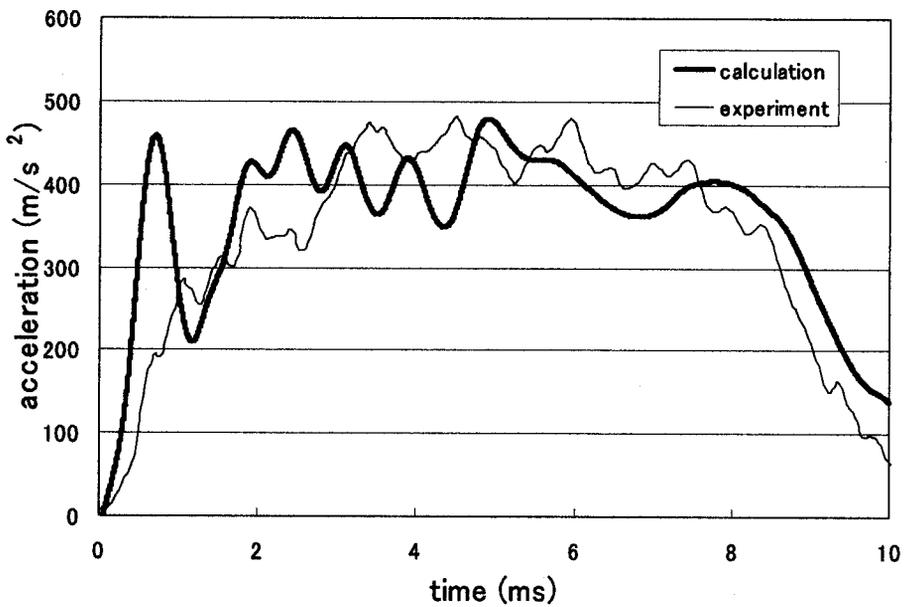


Fig.4.11 Comparison between the calculation and experiment of drop test for the sleeve structure model with folded board

が下がってから再び上昇する挙動を示している。しかし実験では解析に出ている初期段階でのピーク加速度は見られず、全体的に正弦半波に近い波形となっているものの、初期のピーク加速度の発生を除くと他の波形はかなり実験に近似しているのがわかる。シェル要素解析において段ボール折り曲げ部のモデル化は非常に困難であるが今回のように部分的に物性値を変更する等の工夫により解析の精度を高めることは可能であると考えられる。

#### 4.4 段ボール包装品モデルにおける結果と考察

##### 4.4.1 実験用段ボール緩衝材

本研究は最終的に製品と段ボールを同時に扱うトータル包装品レベルでのシミュレーションを目的としている。そこで、包装品のシミュレーションの前段階として、製品ダミーの木箱をサイドパッド方式の段ボール緩衝材で支持するシンプルな包装品モデルを考案し、実験と解析を試みる。

段ボール構造体を利用した緩衝設計の事例として家電製品が多いことから<sup>9)</sup>、今回使用する木箱は箱型の家電製品を想定し、第3章3.4項と同じ、長さ400mm×幅300mm×高さ100mm、質量5.3kgのものとする。また、この木箱の緩衝包装設計の条件も落下高さ60cm、許容加速度 $490\text{m/s}^2$ とする。したがって、実験用段ボール緩衝材も前章同様にFig.4.12に示すサイドパッド方式で、折り曲げ構造を有する緩衝材と無い緩衝材の2種類用意する。

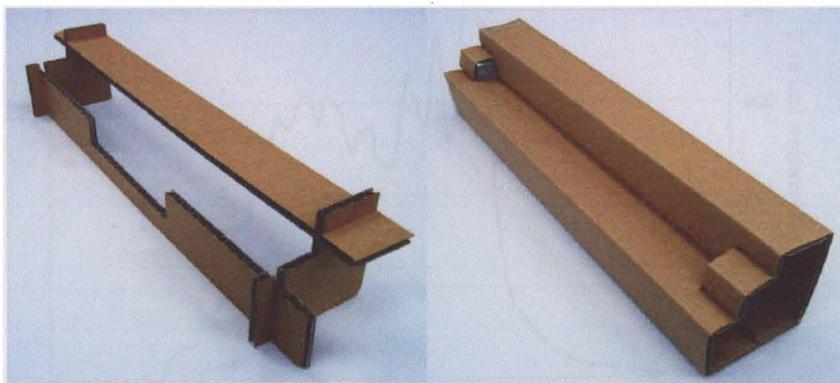


Fig.4.12 Side pad cushioning model

(left: non-folded type, right: folded type)

#### 4.4.2 包装品モデルによる落下試験

サイドパッド方式の緩衝材と外装用段ボール箱を用いて木箱を包装し、落下試験により衝撃加速度を測定する。包装の仕様は木箱の両端の上下部にそれぞれ2個ずつのサイドパッド緩衝材を用いて固定し、段ボール箱に入れるものとする。この時、外装の段ボール箱の底面フラップ部の緩衝効果の影響を避けるため、あらかじめ底部の段ボールについては段を潰した状態にしておく。試験条件は落下高さ 60cm の底面落下とし、木箱天面の剛性が高い端部(長さ面の中央上部)に加速度センサーを取り付ける。なお、センサーのローパスフィルターを 500Hz に設定する。

試験結果について Fig. 4.13 及び Fig. 4.14 に示す。Fig. 4.13 は折り曲げ構造が無い試料の加速度波形であるが、衝撃の初期段階でピーク加速度 ( $465\text{m/s}^2$ ) に達した後、加速度が平衡状態を維持したまま緩衝材の変形が進む様子がわかる。また、波形の形状については台形波に近い。一方、Fig. 4.14 は折り曲げ構造を有する試料であるが、この波形はピーク加速度 ( $478\text{m/s}^2$ ) の地点をほぼ中心に左右対称の台形波に近い形状となっている。さらに緩衝材の変形量であるが、左右それぞれの緩衝材の両端部の残留高さを測定して平均値を求めたところ、折り曲げ構造の無い試料が 11.8mm、折り曲げ構造を有する試料が 5.6mm である。

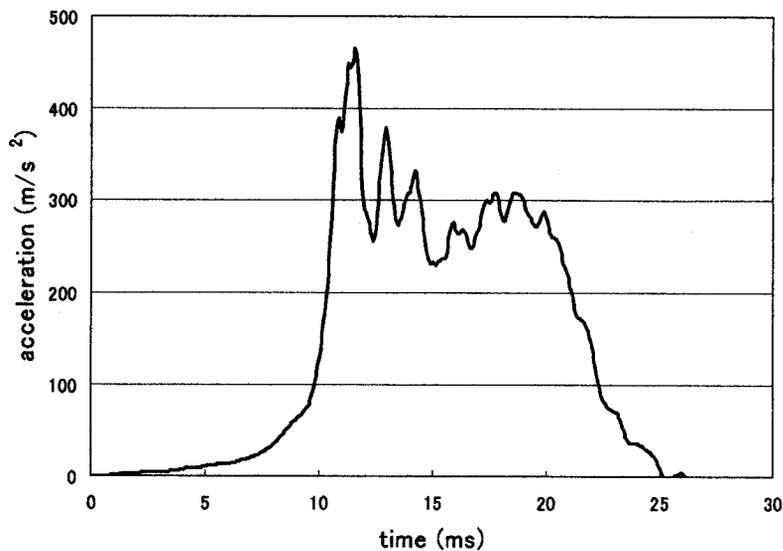


Fig.4.13 Acceleration wave of non-folded structure model

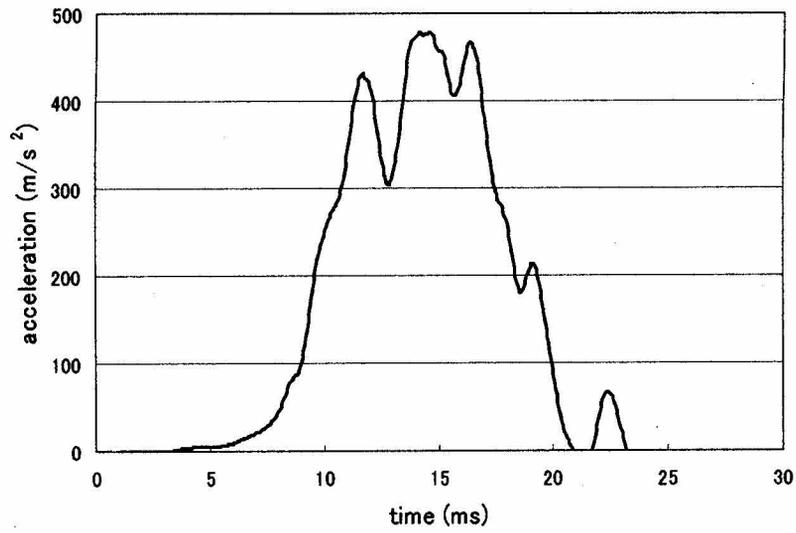


Fig.4.14 Acceleration wave of folded structure model

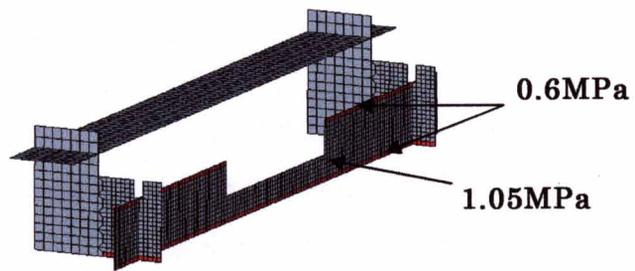


Fig.4.15 Compressive strength values for simulation of non-folded structure model

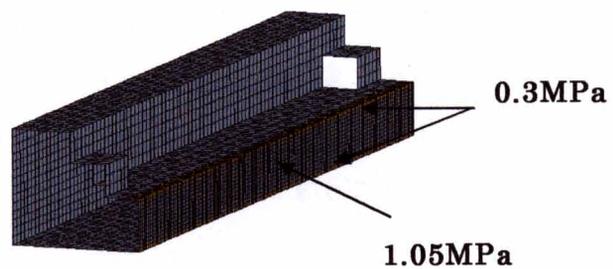


Fig.4.16 Compressive strength values for simulation of folded structure model

#### 4.4.3 落下試験のシミュレーション解析結果

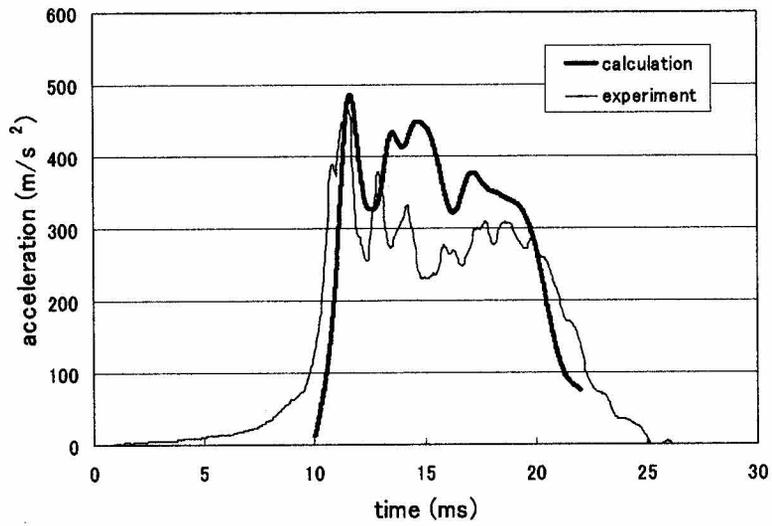
これら落下試験について同一の実験条件でのシミュレーションを行う。解析に用いる段ボールの材料物性値については前出の Table. 4.2 と同じ数値とする。また、折り曲げ構造が無い試料については前項と同様に、試料が木箱に接する部分と外装箱に接する部分の上下両端部の物性値を通常の数よりも低い数値とする。Fig. 4.15 及び Fig. 4.16 にそれぞれの試料の圧縮強度設定値を示す。

折り曲げ構造が無い試料の解析と実験結果との比較を Fig. 4.17 に示す。図より衝撃初期段階での加速度の立ち上がりの様子やその後の波形の変動について近似した傾向が認められる。また、ピーク加速度についても実験値が  $465\text{m/s}^2$ 、解析値が  $487\text{m/s}^2$  と 5% 程度の誤差で、内容品に加わる最大加速度の推定という点では実用的なレベルの精度が得られている。さらに緩衝材の変形量について Fig. 4.18 に示すが、解析では最大値が  $13.0\text{mm}$  となった。実験で測定した落下後の変形量は  $11.8\text{mm}$  で、実際に段ボールが破れながら変形し反発による変位の復元がほとんど無いことを考えれば妥当な数値であると言える。Fig. 4.19 はシミュレーション解析による緩衝材の変形と実験後の実際の緩衝材の様子を比較した例であるが、座屈変形の様子についてかなり似た結果となっている。

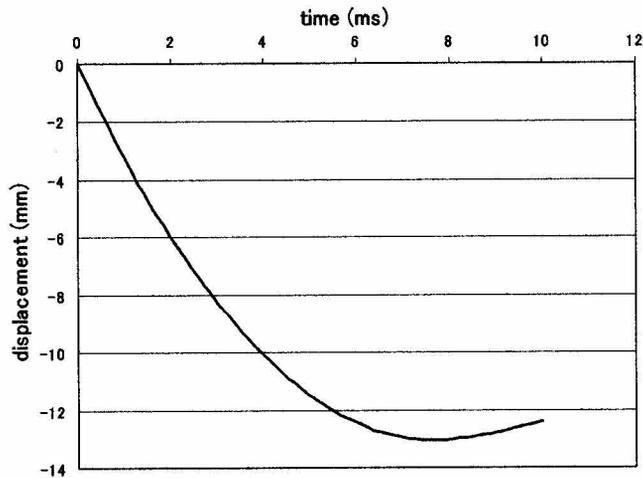
次に折り曲げ構造を有する試料の解析と実験結果との比較を Fig. 4.20 に示すが、実験結果と比べ解析値の衝撃時の加速度波形の立ち上がりが急になっており、実験値との差が認められる。ピーク加速度については実験値が  $478\text{m/s}^2$ 、解析値が  $452\text{m/s}^2$  と 5% 程度の誤差で、こちらも加速度レベルの推定としては良好な結果である。また、緩衝材の変形量は Fig. 4.21 に示すように最大で  $11.2\text{mm}$  となったが、実験での変形量は  $5.6\text{mm}$  で解析値よりも小さい値となっている。この変形量の差の原因としては折り曲げ構造がある場合、実験後の試料の状態から判断すると最大変位まで達した後に変位の復元があることが考えられる。Fig. 4.22 にシミュレーションと実験による緩衝材の変形の様子の比較を示すが、ともに段ボールの端部から座屈しているようすがわかる。

#### 4.4.4 解析精度についての考察

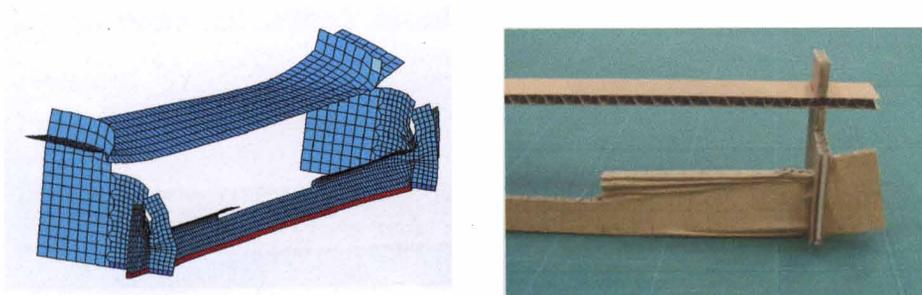
次に本研究で設定した段ボールの材料物性値が他の任意の試験条件においても有効であるかについて調べるため、落下高さを変えた条件において解析を行う。前出と同じ木箱・段ボール緩衝材を用いて解析を行うこととし、落下高さ  $45\text{cm}$



**Fig.4.17 Comparison between the calculation and experiment of drop test for non-folded structure model**



**Fig.4.18 Calculation of displacement for non-folded structure model**



**Fig.4.19 Examples of simulation and specimen for non-folded structure model**

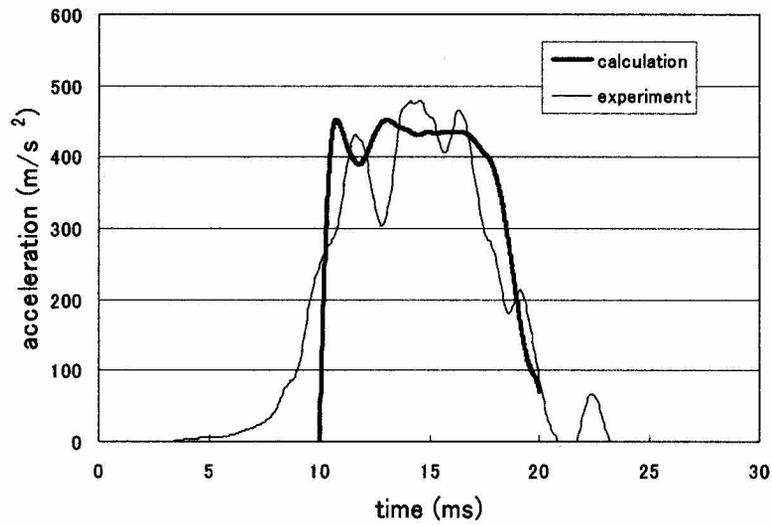


Fig.4.20 Comparison between the calculation and experiment of drop test for folded structure model

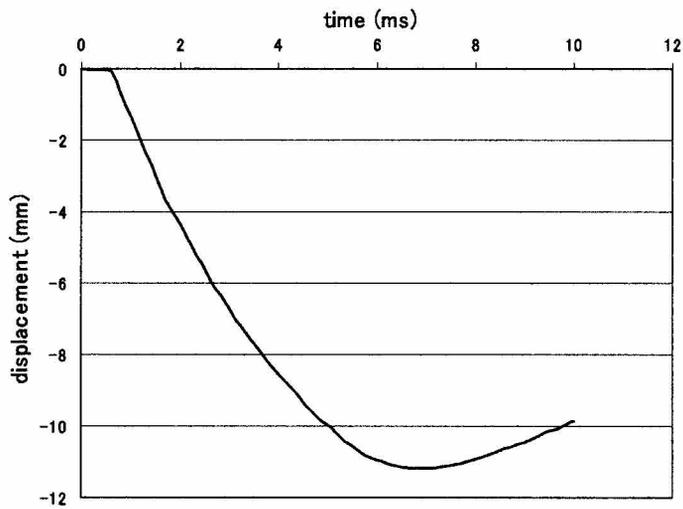


Fig.4.21 Calculation of displacement for folded structure model

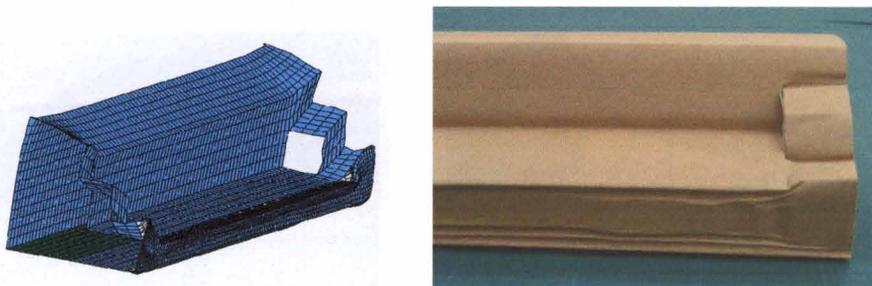


Fig.4.22 Examples of simulation and specimen for folded structure model

Table.4.3 the results of the calculation and experiment for 45 and 75cm drop test

drop height	acceleration (m/s <sup>2</sup> )			
	non-folded structure model		folded structure model	
	experiment	calculation	experiment	calculation
45cm	491	495	405	462
75cm	492	471	488	482

及び 75cm の 2 パターンの底面落下の条件とした。ここでは緩衝材の性能を示す最も代表的な数値であるピーク加速度の値で比較するものとする。

Table. 4.3 に折り曲げ構造が無い試料と折り曲げ構造を有する試料それぞれのピーク加速度の実験値と解析値をまとめて示す。折り曲げを有する試料の 45cm 落下の場合に誤差が 10%以上になっているが、他の条件ではいずれも 5%以下となっており、緩衝包装設計における最大加速度の推定値を求めるレベルで考えれば概ね良好な結果が得られている。

緩衝包装設計を行う際には、想定される落下高さから内容品に衝撃が加わった場合に予測される加速度を事前に知ることができれば設計の効率化に大いに役立つ。したがって、これらの結果が今回の手法の実用性を裏付けている。

#### 4.5 結 言

汎用の構造解析ソフトウェアを用いて段ボールの簡易モデル化によるシミュレーションを行ったが、段ボールの基本的な実験のみでなく、木箱を用いた包装品モデルについても落下衝撃の解析が可能である。また、これらの解析精度を上げるためには段ボールの物性値の設定が大きな要素となるが、特に段ボールを単一素材と見なして考えた場合でも、けい線折り曲げ部や上下の端面部等に通常部分の数値とは異なった数値設定をすることで解析精度を向上させることができる。

今回の手法により段ボール包装品の落下試験についてシミュレーションの一般化を図ることができれば、現品サンプルの繰り返し試作による設計が常識となっている現状に対して試作回数を削減するための設計効率化の実現に寄与できると考えられる。

## 参考文献

- 1) 前沢英一、山崎博、岸田欣増、包装技術、**40**(2)、195-198(2002)
- 2) 深沢義人、高田幹生、喜多村謙一、大澤一男、佐々木貴徳、塚本雅弘、山本敏治、日本包装学会誌、**14**(1)、27-34(2005)
- 3) 川島義隆、西村太志、手塚明、岐阜県生産情報技術研究所研究報告、**2**、9-34(2001)
- 4) LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL、Livermore Software Technology Corporation、(2003)
- 5) LS-DYNA THEORETICAL MANUAL、Livermore Software Technology Corporation、(1998)
- 6) 久田俊明、野口裕久、"非線形有限要素法の基礎と応用"、丸善、261-272(1995)
- 7) 東町高雄、"有限要素法のノウハウ"、森北出版、25-27(1993)
- 8) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、**7**(4)、175-183(1998)
- 9) 日本電機工業会包装委員会、包装技術、**43**(8)、588-597(2005)

## 第5章 組付け式金型を用いたパルプモールド緩衝材の包装設計

### 5.1 緒言

パルプモールドは開発当初は主に鶏卵や青果物等の食品用包装材として利用されていたが、最近では段ボールと並んで工業製品用の緩衝材の代表例として挙げられる。しかし現状では工業用緩衝材として段ボール緩衝材と比較すると、まだその利用割合は十分高いとは言えない。その理由として、一般的にパルプモールドは内容品の形状に合わせた型成形により作製されるため、その支持形状が一定でないことから緩衝性能の推定が困難なことが挙げられる。また、試作金型を作製した後に試作品の評価試験を行ってから修正などの過程を経て完成させる必要があるため、必然的に完成までのリードタイムが長くなる傾向がある。さらに通常、金型のイニシャルコストも高いことが他の材料と比較した場合に課題となる。現在、包装用緩衝材が対象とする家電製品や電子機器等の製品モデルのサイクルは短く、また、種類も多様化する傾向にあり、ますます多品種少ロットに迅速に対応することが包装材に求められている。

本研究ではこれらの課題に対応するため、新しい考え方によるパルプモールド緩衝材の検討を行う。まず、緩衝設計の一般化を図るため、パルプモールドの基本的な形状を決定し、その試料について緩衝特性を調べる。そして、次にその基本形状の試料をそのまま包装設計に用いるという考え方を取り入れる。

次に、一つの成形金型で多製品に対応可能な機能を持たせる工夫について、従来のように金型を一体化して作製するのではなく、緩衝機能を有する箇所（これをコンポーネントと呼ぶ）を取り外し自由なパーツ化し、組付け方式の金型にすることを試みる。つまり、緩衝設計の条件に合わせてコンポーネントの位置や数量を調節することで汎用性を有する構造とする。

これらの考え方に基づくパルプモールド緩衝材の評価については具体的な設計を想定した試作を行い、試験を行う。室内での落下試験による加速度測定や包装品モデルの実輸送試験などを行い緩衝材の実用性について検討する。

### 5.2 基本モデルによる実験

#### 5.2.1 コンポーネント形状の検討

ここで提案するパルプモールド緩衝材はコンポーネントの形状が緩衝性能を決定する。パルプモールドの形状が強度特性に与える影響について実験や数値解析を行った例があるが<sup>2) 3)</sup>、ここではコンポーネントの形状について平面構造体及び曲面構造体の2つを考え、その代表例として上面が正方形の四角錐モデルと円形の円錐台モデルを設定する。これらの形状の細部を決めるファクターとして試料高さ、試料厚さ及びテーパが挙げられる。ここで、テーパとは製作過程でパルプモールドを金型から離形する際に必要となる金型の勾配のことを指す。

試料の各形状ファクターは、四角錐モデルの上面の正方形の一辺の長さを20mm（周囲長80mm）、円錐台モデルの上面の直径を25mm（周囲長78.5mm）とし、製品を支持する部分の周囲長をほぼ同等として性能の比較を行う。さらに試料高さを20mm及び40mm、試料厚さを2mm（パルプモールドは表面が均一な材料ではないため平均値とした）、テーパについては $5^{\circ}$ 及び $15^{\circ}$ とする。また、段ボール古紙と新聞古紙を重量比で6:4に混ぜ合わせたものを原材料とした。試料の $23^{\circ}\text{C}/50\%$ の標準状態における含水分は9.1%で、密度は $0.23\text{ g/cm}^3$ であった。Fig. 5.1に四角錐モデル及び円錐台モデルの一例を、またFig. 5.2に円錐台モデルの断面の様子を示す。



Fig.5.1 Component model of molded pulp cushioning (left: quadrangular pyramid, right: frustum)

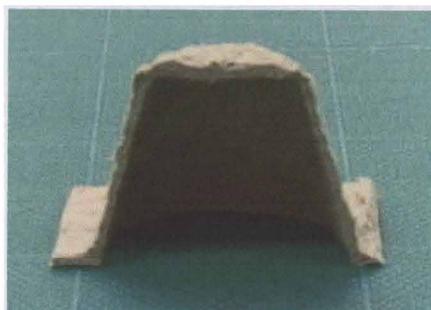


Fig.5.2 A vertical section of component (frustum)



Fig.5.3 Basic model unit for experiments

## 5.2.2 実験方法

### (1) 静的圧縮試験

万能引張圧縮試験機により圧縮速度 10mm/min で静的圧縮試験を行い、変形量と圧縮荷重の関係を調べる。試験時の試料は Fig.5.3 に示すような 3×3 列のものを基本単位とする。

なお、試験は各条件において 5 回ずつ行う。また、試料はすべて JIS に基づき、紙系材料の試験を行う場合の温湿度の標準状態である 23℃/50%の雰囲気中で 24 時間前処置を行い<sup>4)</sup>、さらに実験時の温湿度条件も 23℃/50%で一定とする。

### (2) 動的圧縮試験

落下衝撃試験機を用いて各試料に加速度センサーを取り付けたおもりを落下させ、衝撃加速度を測定する。落下高さは 60cm 一定とし、おもりの荷重範囲は四角錐モデルが 17.6N~254N、円錐台モデルが 17.6N~339N である。なお、加速度センサーには 500Hz のローパスフィルターをかけて測定し、各条件において 5 回ずつ測定を行う。また、試料の温湿度条件は静的圧縮試験と同じとする。

## 5.3 実験結果及び考察

### 5.3.1 静的圧縮試験

試料高さ 20mm の場合の静的圧縮試験の結果の一例を Fig.5.4 に示す。図より、四角錐モデルも円錐台モデルも圧縮量約 6mm のところで座屈するまではほとんど同じ挙動を示している。しかし座屈後に関しては、円錐台モデルがテーパにかか

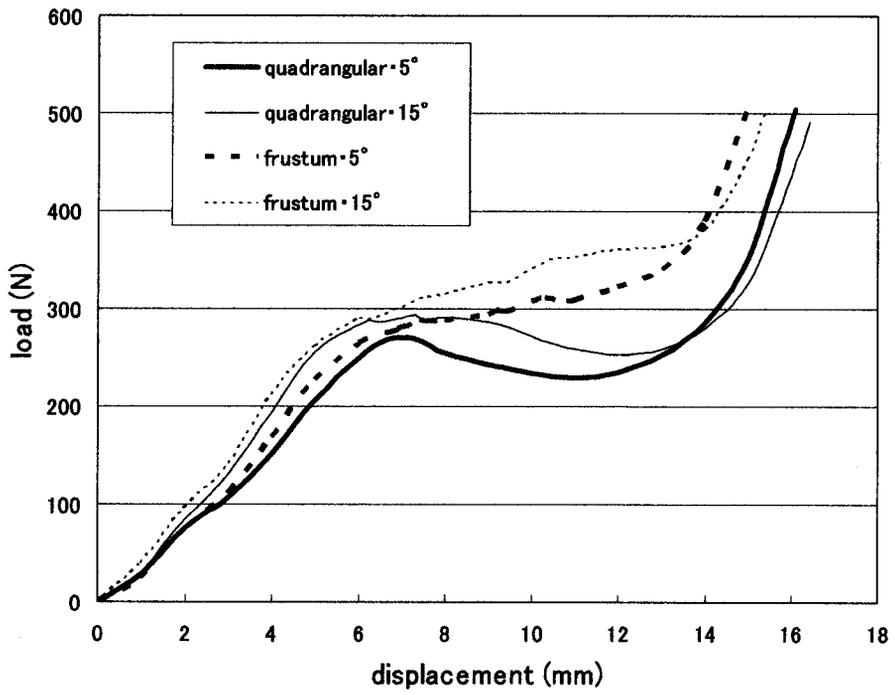


Fig.5.4 Comparison of load among the component models by static compression test (specimen height : 20mm)

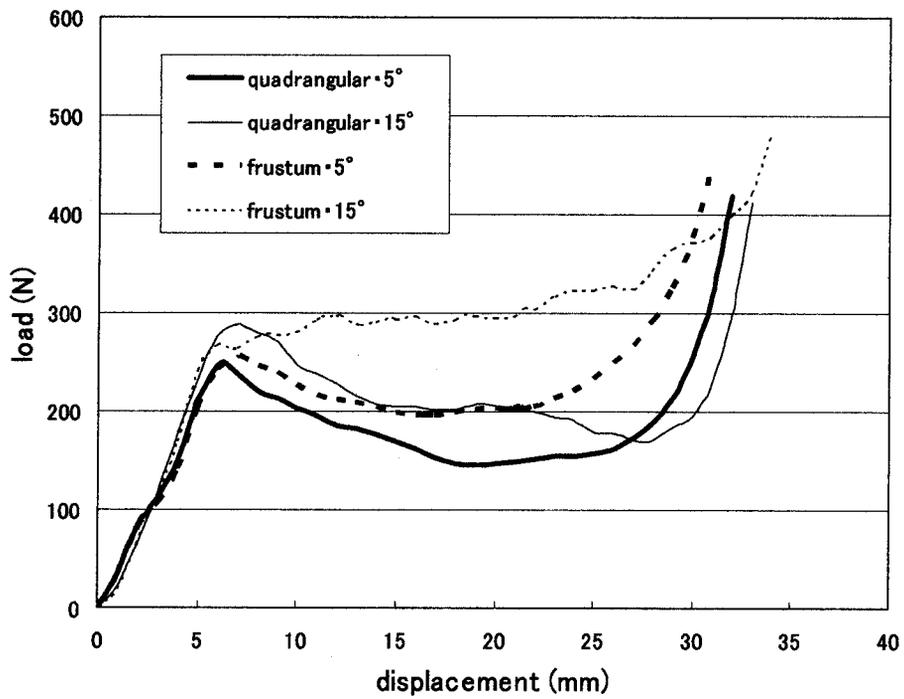


Fig.5.5 Comparison of load among the component models by static compression test (specimen height : 40mm)

ならず、やや傾きは小さくなっているものの、圧縮荷重の値が上昇しながら底づきに達しているのに対し、四角錐モデルは座屈後に圧縮荷重が下降した後に底づきに達するのが認められる。これは荷重を支持する試料壁面の構造的な強度の差が出ており、曲面と平面との曲げ強さの違いが影響していると考えられる。

次に試料高さ 40mm の場合の静的圧縮試験の結果の一例を Fig. 5.5 に示す。図より、各試料とも圧縮量 6~7mm で座屈するまではほとんど同じ荷重の挙動を示しているのがわかる。しかし、座屈後の挙動について、四角錐モデルは試料高さ 20mm の場合と同様にテーパに関係なく、最初の座屈と底づきの間で荷重が下降しているのに対し、円錐台モデルではテーパの違いにより荷重の挙動に差が出ている。テーパ 15° の試料は高さ 20mm の場合と同様に座屈後もほぼ一定の荷重レベルを維持しながら底づきに達するのに対し、テーパ 5° の試料は座屈後の荷重の低下が認められ、四角錐モデルに近似した結果である。このことからパルプモールドの強度は試料高さが大きくなるにしたがいテーパの影響が大きくなると推測できる。

また、パルプモールド緩衝材の機能を考えると、試料が底づきに達するまでの荷重曲線下の面積の大きさが衝撃吸収のエネルギー量と関係があり、今回の結果では全体的に円錐台モデルのほうが面積は大きい。さらに落下時に発生する衝撃加速度の大きさは座屈荷重の大きさに関わってくると考えられるが、今回はどちらのモデルもほぼ同じレベルである。これらの圧縮試験の結果より、四角錐モデルと円錐台モデルとを比較すれば、製品支持部の周囲長がほぼ同じであるならば、設計条件が厳しい場合には円錐台モデルのほうが有利になる。

### 5.3.2 動的圧縮試験

試料高さ 20mm の動的圧縮試験の結果を Fig. 5.6 に示すが、図の横軸はコンポーネント 1 個あたりのおもりの静的荷重を示す。また、図中のプロット値は 5 回測定の実験値の平均値である。各モデルとも衝撃加速度の最低値は  $490\text{m/s}^2$  前後でほぼ同じレベルであり、緩衝性に大きな差は認められない。また、各モデルの変形量について Fig. 5.7 に示すが、モデル間で変形量に大きな差は認められず、荷重の増加に伴い変形量も同じ傾向で推移する。

次に試料高さ 40mm の動的圧縮試験の結果を Fig. 5.8 に示す。図より各モデルとも加速度の最低値は  $300\text{m/s}^2$  前後で、特に 10N 以下の低い荷重域ではどの線図も

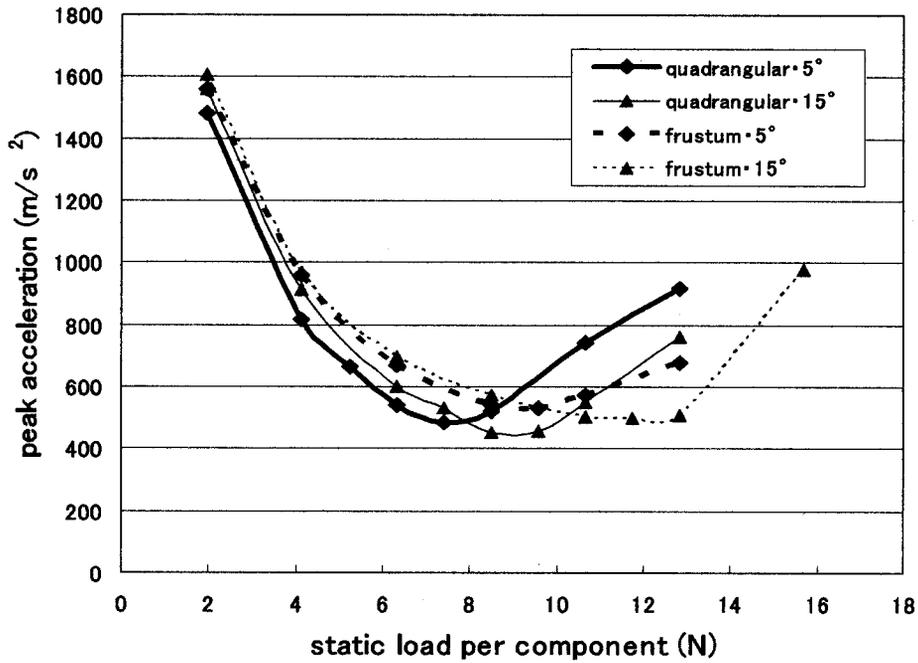


Fig.5.6 Comparison of cushioning property for the component models (specimen height : 20mm)

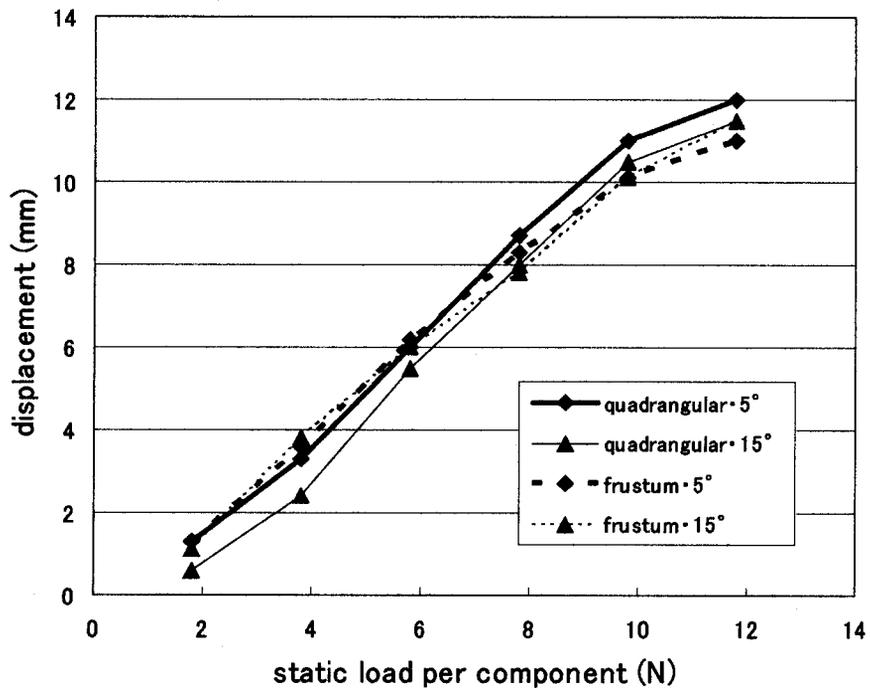


Fig.5.7 Comparison of displacement among the component models by dynamic compression test (specimen height : 20mm)

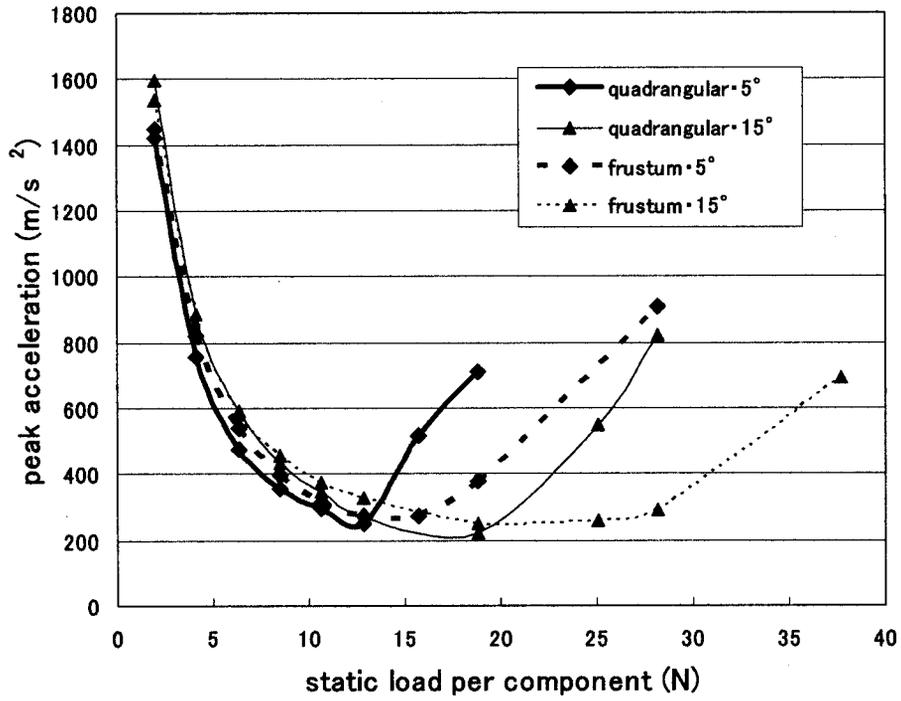


Fig.5.8 Comparison of cushioning property for the component models (specimen height : 40mm)

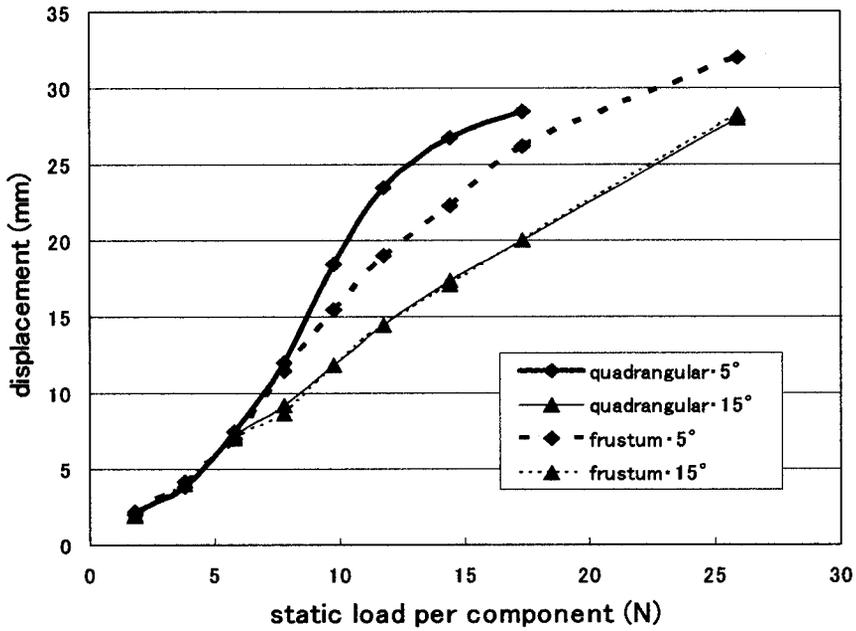


Fig.5.9 Comparison of displacement among the component models by dynamic compression test (specimen height : 40mm)

同じ傾向の緩衝特性を示している。しかし高い荷重域で見ると、四角錐モデルと円錐台モデルとでは緩衝性を維持する荷重範囲に差が認められる。例えばテーパ $15^{\circ}$ の試料で比較してみると、四角錐モデルは19N付近で底づきが発生しているが、円錐台モデルは25Nあたりの範囲まで低い加速度レベルを維持している。静的圧縮試験の結果からも明らかなように、構造的強度は円錐台モデルのほうが大きく、質量の大きな製品に対しては緩衝材として有利であると言える。また、この時の各モデルの変形量を Fig. 5.9 に示すが、テーパの違いにより変形量に差があるのがわかる。荷重が大きくなるに伴い四角錐モデル、円錐台モデルともテーパ $5^{\circ}$ の場合の変形量がテーパ $15^{\circ}$ よりも大きくなっている。例えば、円錐台モデルにおいて最も加速度値が低い値となる15N付近の荷重値では変形量に約5mmの差がある。

これらの結果より、パルプモールド緩衝材の基本コンポーネントとして円錐台形状に決定する。

### 5.3.3 基本コンポーネントのテーパの影響について

緩衝材の基本コンポーネントの形状を円錐台タイプとするが、ここで再度、緩衝性能に及ぼすテーパの影響について検討を行う。最初の設定ではテーパを $5^{\circ}$ と $15^{\circ}$ の2種類として実験を行い、試料高さ40mmの円錐台モデルにおいて圧縮特性に違いがあることがわかっている。そこで、テーパによる緩衝性への影響についてさらに詳しく調べるため、このモデルのテーパの条件に $10^{\circ}$ と $20^{\circ}$ を追加して試料を作製し、静的圧縮試験及び動的圧縮試験を行う。

Fig. 5.10 に静的圧縮試験の結果の一例を示すが、各試料の座屈後の圧縮荷重の挙動に差が認められる。テーパ $5^{\circ}$ と $10^{\circ}$ の試料では座屈後に荷重が低下しているが、テーパ $15^{\circ}$ と $20^{\circ}$ の試料については底づきに達するまで、ほぼ横ばいに一定の荷重を保っているのがわかる。また、荷重曲線下の面積の大きさについてはテーパ $15^{\circ}$ と $20^{\circ}$ の試料ではほとんど差が無い。

次に、動的圧縮試験の結果を Fig. 5.11 に示すが、テーパの条件によらず、衝撃加速度の最低値のレベルはほぼ同じである。しかし、緩衝性が得られる静的荷重範囲には差が認められ、テーパ $15^{\circ}$ と $20^{\circ}$ の試料が共に30N付近の荷重範囲まで緩衝性を維持している。静的圧縮試験の結果と併せて、テーパ $15^{\circ}$ の試料とテーパ $20^{\circ}$ の試料とでは緩衝性に関する特性はほぼ同じであると判断できる。

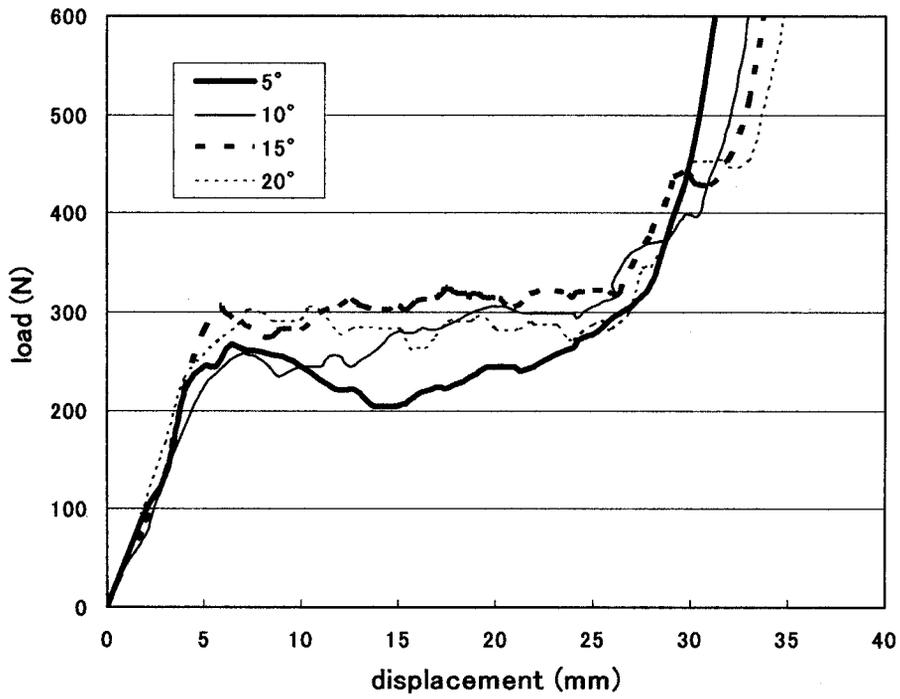


Fig.5.10 Comparison of load for the taper of the frustum model

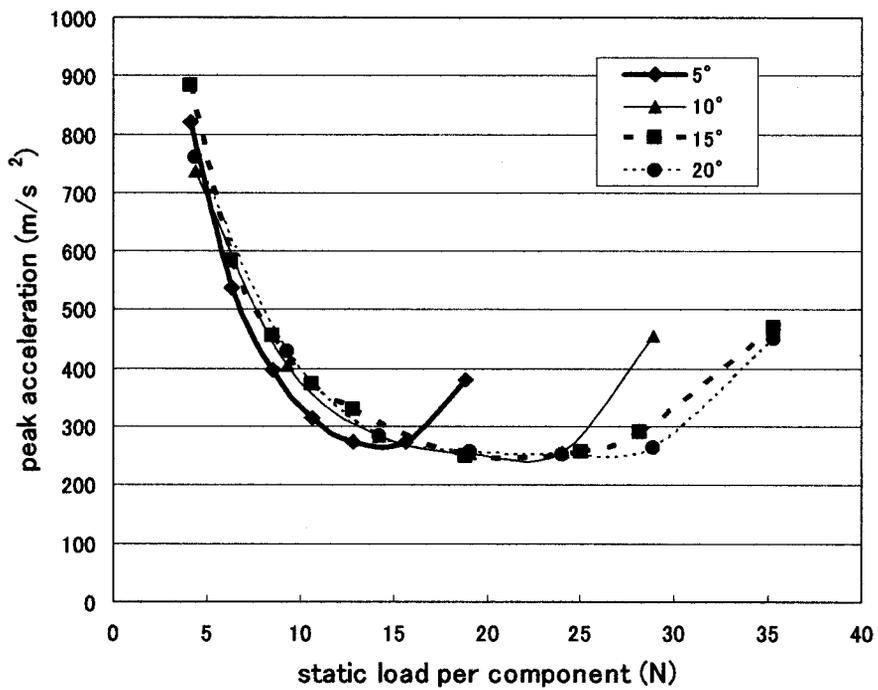


Fig.5.11 Comparison of cushioning property for the taper of the frustum model

## 5.4 組付け式金型について

### 5.4.1 金型用標準コンポーネントの決定

これまでの実験結果から、コンポーネントのテーパは  $15^{\circ}$  から  $20^{\circ}$  の間で設定することが妥当である。しかし、さらに設計時の利便性も考えた場合、コンポーネントをベースに取り付ける際の底側の必要面積は小さい方が有利であると考えられる。したがって、今回は緩衝性能と寸法優位性から円錐台モデルのテーパ  $15^{\circ}$  の試料を金型用の標準コンポーネントとして決定する。

### 5.4.2 組付け式金型の概要

ここで提案する金型の最も大きな特徴として、一つの金型で複数個の製品に対応できる汎用性を有していることがあげられる。一般的に従来の金型は内容品の形状に合わせて作製されるため、個々に金型を用意する必要がある。したがって、内容品形状が複雑になるほど金型の作製も難しくなり、修正行程などを経て金型が完成するまでのリードタイムに影響を与えることになる。

そこで、この課題を克服するために組付け式金型という新しい方式によりパルプモールド緩衝材を作製することを試みる。この金型の基本的な考え方は製品にきちんと沿った形状の緩衝材で保護するのではなく、製品の各面に対して一定の緩衝性能を持ったコンポーネントを必要な個数だけ用意して支持するというものである。

組付け式金型は Fig. 5.12 のような平面状のベース金型と内容品を直接支持するコンポーネント金型から成っており、ベース金型には盤面上に一定間隔でコン

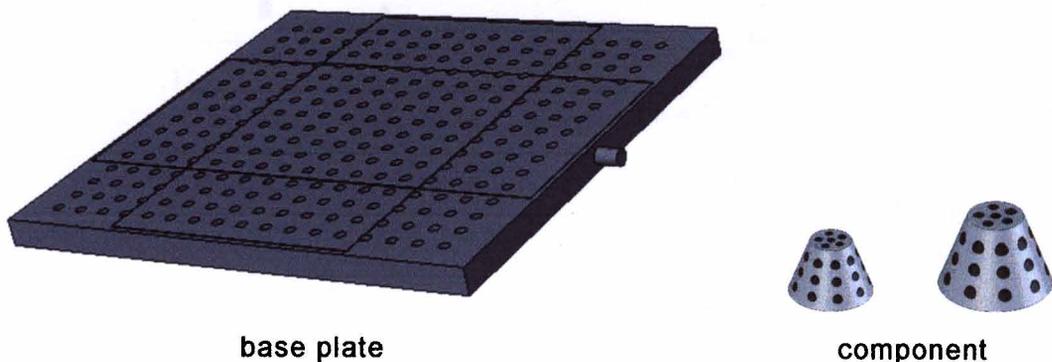


Fig.5.12 Illustration of a new mold tool

ポーネント固定用のねじ穴を空けている。これによりコンポーネント金型はベース金型上で自由に取り外して位置変更や数量調整ができるようになっている。したがって、内容品の大きさや許容加速度レベルに合わせて金型を作ることができるため、金型一式で多製品への対応が可能となるような汎用性を持たせることができる。

さらに、この方式によるメリットとして、緩衝設計の合理化があげられる。従来の方法では、パルプモールドは個々の製品に合わせた形状となるため、落下時に発生する衝撃加速度のレベルについては実際に試作を行った後に落下試験で確認するまでその大きさが把握できないという状況が一般的である。したがって、試作後の試験の結果、緩衝材の修正の必要が生じた場合、再度金型の形状を考案し直す行程に戻らなければならないため、金型にかかる手間やコストが増大することになる。また、修正の回数が増えるにしたがい、当然その負担も増大することになり、この点がパルプモールド完成までのリードタイムが長くかかる原因となる。しかし、この組付け式金型を利用すれば、コンポーネントの緩衝性能が既知であるため、設計技法が確立された他の緩衝材<sup>5)</sup>と同様に試作前に衝撃加速度レベルの推定を行うことができる。さらに、金型の修正を行う場合も、ベース金型上のコンポーネント金型の位置や個数を付け替えるのみの作業で金型を修正することができるため、非常に短時間に簡易に実行できる。

この組付け式金型はこのようにシンプルな構造であるため、従来のパルプモールドの金型に比べて製造コストも低く抑えることが可能で、さらに同じ金型を繰り返し用いることでコストメリットを増大させる。ただし、設計の対象となる内容品の形状はコンポーネントで保持し易い箱型形状が中心となる。また、内容品の突起部等の細部寸法に対応するためコンポーネントは予め高さの異なる複数のバリエーションを用意しておくことによりスムーズな設計が実現できる。

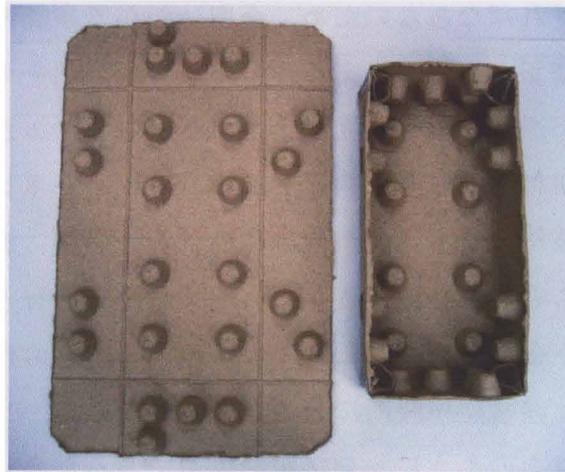
## 5.5 製品への設計事例及び評価

### 5.5.1 組付け式金型による緩衝材の試作

組付け式金型によるパルプモールド緩衝材の実用性について調べるため、実際の製品への包装設計を行う。ここでは箱型形状の製品モデルとして市販の小型ガステーブルを用いる。製品の外寸は570×440×150mm、質量は10kgで、また、緩衝設計の条件は、落下高さ60cmで許容加速度を390m/s<sup>2</sup>に設定する。



**Fig.5.13 A sample of the mold tool for a gas appliance**



**Fig.5.14 A sample of the molded pulp cushioning for a gas appliance**



**Fig.5.15 A gas appliance set up on the cushioning**

Fig. 5.8 の緩衝特性曲線を基にして緩衝材の各面に用いるコンポーネントの個数を8個とし、緩衝材の形式については内容品の左右両端を支持するサイドパッド方式とする。Fig. 5.13 に試作した金型を示すが、ベース金型上のコンポーネントの位置は製品の突起部を避け、さらに衝撃時の変形を防ぐため剛性の高い部分を選んで配置する。次に、この金型で成形したパルプモールド緩衝材の例を Fig. 5.14 に示すが、写真の左側は組立て前の状態、右側は組立て後の状態を表している。内容品は Fig. 5.15 に示すような状態で固定され、段ボール箱に入れられて包装される。この包装品を用いて落下試験、振動試験及び実輸送試験を行い、緩衝材の実用性について検討する。

## 5.5.2 包装品モデルによる評価試験

### (1) 落下試験

落下試験はガステーブルと同じ外側寸法(570×440×150mm)と質量(10kg)の木箱を用いて行う。木箱天面の端部に加速度センサーを取り付け、落下高さを60cmとし、落下箇所は底面、前側面、左つま面の面落下により測定する。なお、外装用の段ボール箱については測定する加速度値にできる限り影響を与えないように

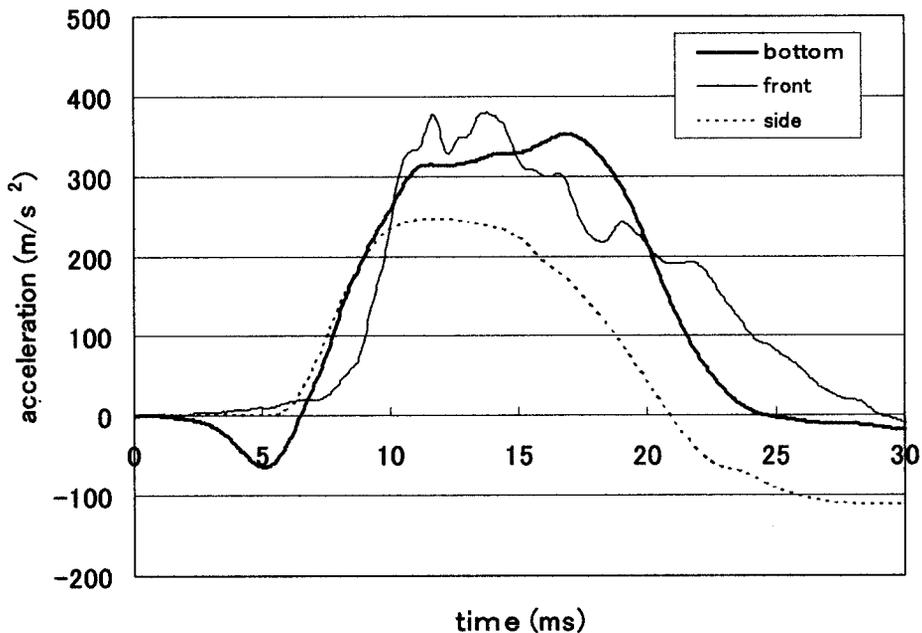


Fig.5.16 Acceleration waves of the drop test for a gas appliance package

底面シートの段を事前に潰した後、試験を行う。また、加速度センサーには 500Hz のローパスフィルターをかける。

Fig. 5.16 に試験結果を示すが、底面と前側面については最大加速度の値は  $390\text{m/s}^2$  以下の数値となっており、概ね予測された加速度レベルである。また、左つま面に関しては  $250\text{m/s}^2$  と予測された数値より低い値であるが、これについては落下姿勢等の影響も考えられる。この低い数値は内容品への直接的なダメージについての影響は無視できるので、緩衝材としては十分な機能を有していると言える。

この方式によるパルプモールド緩衝材を用いることのメリットとして、設計技法が一般化された緩衝材と同様に事前に衝撃加速度レベルの推定ができることを挙げているが、この結果からもそのことがわかる。

## (2) 振動試験

輸送中のトラックや鉄道の振動による緩衝材の劣化について調べるため振動試験を行う。試験は JIS Z 0232 に準拠したランダム振動で実施するが、振動数範囲と PSD については Fig. 5.17 に示すとおりで、また加振方向は上下・前後・左右の 3 方向、加振時間は各方向 30 分とする。

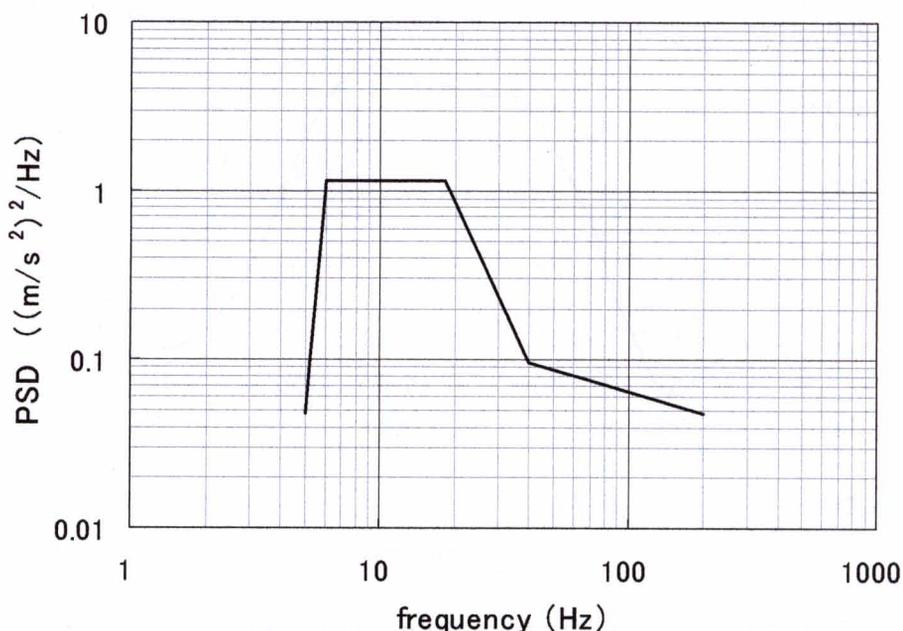
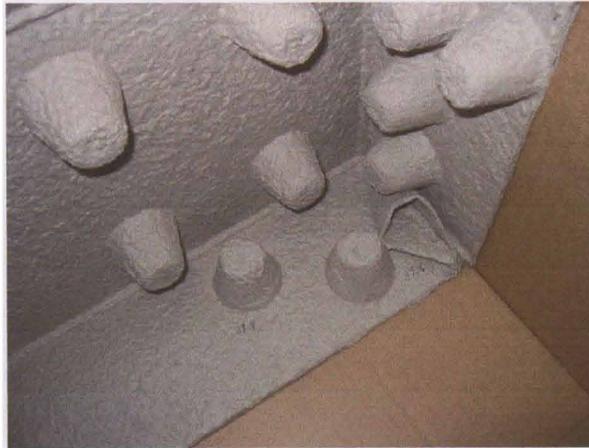


Fig.5.17 Relation between frequency and PSD for the vibration test



**Fig.5.18 A condition of the cushioning after the vibration test**



**Fig.5.19 A condition of the cushioning before the transport test**



**Fig.5.20 A condition of the cushioning after the transport test**

Fig. 5.18 に試験後の緩衝材の様子を示すが、緩衝材の変形について調べたところ、上下・前後・左右のすべての方向について変形量は約 1mm となっており、これは実用上、十分な緩衝性能を維持できる劣化のレベルであると言える。

### (3) 実輸送試験

室内実験と並行して試験用包装品を実際のトラック輸送で評価する実輸送試験を実施する。試験では 1000km 相当の輸送距離を設定し、愛知県←→茨城県間での往復トラック便で輸送を行う。緩衝材の評価については、輸送前・輸送後の変形量を測定することとする。

ここで Fig. 5.19 に輸送前のパルプモールド緩衝材、Fig. 5.20 に輸送後の緩衝材の様子を示す。図のように輸送後の緩衝材の潰れは目視レベルではほとんど無く、実測値で 1~2mm 程度の変形量となっており、実輸送試験においても緩衝材の耐久性は十分である。

## 5.6 結 言

本研究により組付け式金型によるパルプモールド緩衝材の有効性を示すことができ、この方式による包装設計により金型のイニシャルコストを大幅に削減することが期待できる。また、事前に加速度レベルの把握ができ、金型の調整も簡単であるため緩衝設計が行い易く、迅速な緩衝材の試作も可能である。このため作製に要するリードタイムの短縮が図ることができる。

このメリットは昨今のモデルチェンジのサイクルが短い多品種少ロット製品に対する包装設計に生かすことができる。今回は比較的緩衝設計が行い易い箱型形状製品を対象とした開発に取り組んだが、今後もコンポーネントの形状を工夫することで更に複雑な形状の製品にも対応することが期待できる。

## 参考文献

- 1) 日本パルプモールド工業会ホームページ(<http://pulpmold.gr.jp/index.html>)
- 2) 中川幸臣、加藤久也、小林兼弘、愛知県工業技術センター報告、31、21-26(1995)
- 3) X.Ma、A.K.Soh、B.Wang、Packaging Technology and Science、17、193-204(2004)
- 4) JIS P 8111：紙、板紙及びパルプ—調湿及び試験のための標準状態
- 5) 星野茂雄、豊田実、”緩衝包装設計ハンドブック”、日本生産性本部、219-236(1969)

## 第6章 結 論

本論文は近年増加している紙系緩衝材を用いた包装設計の効率化について、様々な観点から実験や設計技法の考察を行う内容について述べている。

どのような分野であっても、包装は常にコストの問題が考慮される。あらゆる製品が工場から出荷されれば、必ずトラック、鉄道、航空機等の輸送行程があり、内容品を輸送中の振動や落下等のダメージから保護するために包装が施される。したがって、内容品が消費者に届くまでは包装も重要な役割をもった製品の一部であり、包装の効率化を図ることはトータルコストの削減につながる。包装設計を行う企業は安全な輸送を実現させることを最低条件として、その上で材料使用量、輸送効率、環境への影響等を考慮しながらコスト削減に取り組んでいる。

プラスチック系材料から紙系材料への移行は環境問題が背景となっており、材料の切り替えによって緩衝設計に関する技術面で新しい課題が出てきている。発泡プラスチック緩衝材を使用する場合は一般的にメーカーから得られる緩衝特性のデータを利用して設計を行うことも可能であるが、紙系緩衝材はそのようなデータベースはほとんど整備されていないため、設計者自身が緩衝特性を調べる必要がある。しかし、その緩衝特性データの取得に関して効率の良い具体的な手順がわからないため結局は、試行錯誤の繰り返しに頼らざるを得ない状況になることが懸念される。この問題点を解決するため、紙系緩衝材の設計に必要なと考えられる要因を特定し、それぞれの内容について実験を行い、その結果から効率的な設計のための手順についてまとめる。

段ボール緩衝材の水分の影響を考慮した緩衝設計技法については、湿度条件によって強度特性が変化するため扱いが難しい材料に対して、湿度条件毎に吸収エネルギー量と衝撃加速度のデータを収集する。そこから緩衝材の「エネルギー密度－最大応力」線図を求めることで水分条件を考慮した適正な材料寸法を求めることが可能となり、設計の一般化が図れるようになる。また、この方法は任意の設計条件で用いることができるため活用範囲も広がる。

次に、内容品毎に形状が異なる段ボール薄板構造体緩衝材については、その構造の複雑さもあって試行錯誤の繰り返しに依存した設計が多いが、スリーブ構造体モデルによる基礎実験を行い、緩衝特性に及ぼす構造要因について明らかにすることで緩衝設計の一般化を図ることができる。実験結果から緩衝材の内容品支

持部の有効周囲長、折り曲げ構造の有無、せん断条件の有無が緩衝性に大きく影響することがわかり、これらの条件別に緩衝材の「単位長さ当たり荷重-最大加速度」線図を作成し、利用することで適正な試料寸法が求められる。

さらに、汎用の構造解析ソフトウェアを利用した段ボール包装設計の効率化については、実用性を考慮し、段ボールを単一素材として見なしてモデル化を行う場合でも、けい線折り曲げ部や上下の端面部等に通常部分の数値とは異なった数値を設定し、工夫することにより解析精度を向上させることができる。現状の段ボール包装設計は現品サンプルの繰り返し試作に頼った設計がほとんどであるが、このような方法を包装設計にも取り入れていくことで試作回数を削減し効率的な設計を実現できる。

また、段ボールとともに紙系緩衝材の代表的なものであるパルプモールドについては、コンポーネントを用いた組付け式金型を利用することにより設計リードタイムや金型コスト削減が期待できる。この方法は事前に加速度レベルの推定ができることや、一つの金型で多製品に対応できることなどが大きな特徴である。特に迅速な緩衝材設計が可能なことから、モデルチェンジの早い多品種少ロット品向けに適している。

本論文で取り組んだ紙系緩衝材の設計効率化に関するデータ取得の方法のうち、各自で扱う材料に適しているものを取り入れてデータの蓄積を図り、今後も紙系緩衝材の利用が拡大していくための設計技法の確立に繋がることを期待したい。

## 記号表

- $A$  : 緩衝材の内容品支持面積。
- $a$  : 運動方程式の加速度ベクトル。
- $a_c$  : 落下試験時の衝撃加速度。
- $[C]$  : 運動方程式の減衰マトリックス。
- $D_p$  : 試料単位長さ当たりの最大荷重。
- $D_s$  : 試料単位支持面積当たりの最大応力。
- $E$  : 緩衝材全体の吸収エネルギー量。
- $E_d$  : 緩衝材のエネルギー密度。
- $F$  : 運動方程式の構造内力。
- $F_{damp}$  : 運動方程式の減衰力。
- $\{F\}$  : 運動方程式の荷重ベクトル。
- $H$  : 落下試験時の落下高さ。
- $h$  : 緩衝材の試料高さ。
- $[K]$  : 運動方程式の剛性マトリックス。
- $l$  : 緩衝材の有効周囲長。
- $[M]$  : 運動方程式の質量マトリックス。
- $m$  : おもりの質量。
- $n, n+1/2, n+1$  : 運動方程式の計算ステップ。
- $P$  : 運動方程式の外荷重。
- $t$  : 段ボールシートの厚さ。
- $u$  : 運動方程式の変位ベクトル。
- $V$  : 緩衝材の体積。
- $v$  : 運動方程式の速度ベクトル。
- $W$  : おもりの荷重。
- $\varepsilon$  : 緩衝材の単位体積当たりの吸収エネルギー量。
- $\Delta t$  : 運動方程式の時間ステップ幅。

## 謝 辞

最後に、本論文に関する一連の研究の遂行、ならびに本論文の執筆にあたり、多大なるご指導ならびにご鞭撻を賜りました神戸大学大学院海事科学研究科 齋藤勝彦教授に心より感謝申し上げます。また、本論文の査読および校正をいただきました神戸大学大学院海事科学研究科 木村隆一教授ならびに阿部晃久教授に深くお礼申し上げます。

さらに、段ボールの構造解析シミュレーションに関する研究について、細部にわたり懇切なるご指導を賜りました株式会社テラバイト 丹羽一邦様に深く感謝いたします。また、パルプモールド緩衝材に関する研究について、実験用試料のご提供をいただきました株式会社 名古屋モウルドの関係各位の皆様に深く感謝いたします。

本研究は愛知県産業技術研究所の研究業務として行ったもので、研究を実施するにあたり、多大な便宜をお図りいただきました愛知県産業技術研究所主任研究員 山本昌治氏、同技師 佐藤幹彦氏に厚く御礼申し上げます。