

包装設計の FEM 解析における段ボールの モデル化の検討

中川 幸臣* 丹羽 一 邦**

Investigation of Corrugated Fibeboard Model for FEM Analysis for Packaging Design

Yukiomi NAKAGAWA* and Kazukuni NIWA**

近年、段ボールは外装容器としての用途以外にも製品を保護する緩衝材や固定材など内装材として使われる事例が多くなってきている。しかしながら現状の段ボール包装設計においては現物での試行錯誤や過去の経験のみに頼った手法がほとんどである。そこで今後、段ボール包装設計の効率化を図るため、段ボールが FEM 解析によりシミュレーションが実施できるかについて検討することは重要である。そこで、段ボールの原紙、シート及び構造体を用いて基礎的な実験とその FEM 解析を行った。

今回は最初の取り組みとして段ボールを詳細モデル、簡易モデルの 2 つの方法でモデル化し、シェル要素とソリッド要素による解析を試みた。そこから解析精度を向上させるための要因について考察し、更に実用性を高めるためのモデル化について検討を行った。

キーワード：段ボール、緩衝包装設計、衝撃解析、有限要素法

Recently, corrugated fiberboard is often made into inner materials such as cushioning or fixing than boxes. But as their structure which suit for products are complicated, trial-and-error or empirical approach tends to be used for the design of these inner materials. To realize more efficient and quick design process of them, new method is attempted to incorporate ordinary analysis simulation software.

In this report, basic material behavior of corrugated fiberboard and simple model structures are simulated and effectiveness of simulation for packaging design is evaluated.

Keywords : corrugated fiberboard, cushioning design, impact analysis, FEM

*愛知県産業技術研究所（〒448-0003 愛知県刈谷市一ツ木町西新割）：

Aichi Industrial Technology Institute Nishishinwari, Hitotsugi-cho, Kariya, Aichi 448-0003, Japan

**株式会社テラバイト（113-0034 東京都文京区湯島 3-31-6）：

Terrabyte Co., Ltd. 31-6, 3chome, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0034, Japan

1. 緒言

近年、段ボールは従来の外装用容器としての用途のみならず、製品を落下衝撃から保護する緩衝材や固定材などの内装材として使われる事例が非常に多くなっている。一般的に段ボールの内装材は製品形状に合わせた切り込みや折り曲げなどの構造を有した薄板状の構造体であることが多く、その包装設計技法についてはその場限りの試行錯誤の繰り返しの依存する傾向がある。ところで、その包装の対象となっている製品については設計段階において汎用構造解析ソフトを用いて強度解析等のシミュレーションを行い、開発の効率化を図るという手法はもはや常識となっている。また今後、製品と包装材（ここでは段ボールを考える）を含めたトータルパッケージでのシミュレーション解析を行うことができれば包装設計の迅速化・効率化を図ることができると考えられる。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いくつか事例報告がある^{1) 2)}。しかし、段ボールの有限要素解析については均質化法を用いた事例³⁾などが報告されているが、現状ではまだ一般的な手法が確立されているとは言えない。そこで、最初の取り組みとして段ボールについて汎用構造解析ソフトを利用した強度解析が可能であるのかについて調べる必要がある。今回、段ボールをいくつかの方法でモデル化し、強度解析のシミュレーションにより実験データとの比較を行った。その結果より段ボールが有限要素解析でどの程度扱うことができるのか、また、どのような課題が生じるのかといった内容について考察を行った。

2. 実験方法

2.1 段ボールのモデル化についての考え方

一般に段ボールは表裏ライナと中芯を貼合した構造体であり、また各原紙がそれぞれ強度に異方性を有している。つまり、素材そのものが構造体であると考えられるためシミュレーションの対象として考える場合にはその材料特性を十分に把握して解析に取り入れていく必要がある。今回は段ボールシートのモデル化については次の2つの方法で検討した。

(1) 段ボールの構造を詳細にモデル化

段ボールを形成するライナと中芯をそれぞれシェル要素で詳細にモデル化を行い、材料の異方性や塑性特性などについても考慮して解析を行う。

(2) 段ボールの簡易モデル化

構造体である段ボールを一つの均一な素材と見なし、段ボールシート全体をシェル要素またはソリッド要素で簡易にモデル化するものである。これは、今後の利用を踏まえて実際の製品を含んだ包装品のシミュレーションを行う場合に段ボールはできる限り単純モデル化した方が望ましく、それにより解析ソフト利用の効果・実用性が高まると考えられるためである。

2.2 解析ソフトについて

本研究に用いた汎用構造解析ソフトは米国LSTC社製の「LS-DYNA」である。このソフトは塑性加工解析や衝撃落下解析の分野で実績のあるもので⁴⁾、今回のような段ボールの大変形解析には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^{5) 6)}。これはある時

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、 Δt 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。

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

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、 Δt : 時間ステップ幅、 $n, n + 1/2, n + 1$: 計算ステップとする。

また、 Δt 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。

2.3 段ボールの基本物性について

実験に用いた段ボールシートの原紙構成については表ライナ及び裏ライナともに坪量 210g/m^2 の K ライナ、中芯は坪量 120g/m^2 の

普通芯で構成された A フルートのものを使用した。表裏ライナ及び中芯の引張特性について Fig. 1 及び Fig. 2 に示す。

また、今回の試料はすべて $23^\circ\text{C}/50\%$ の湿度条件で前処置を行ったものを実験に用いた。

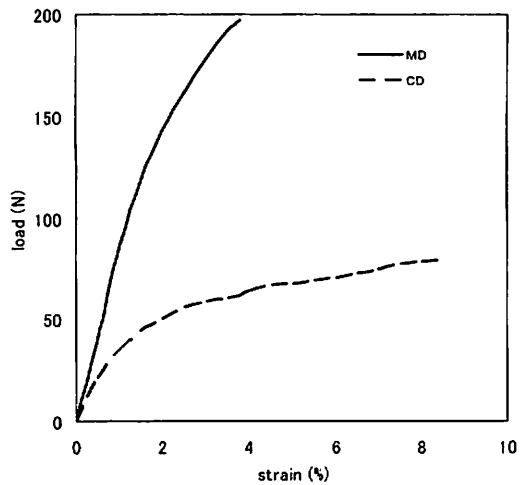


Fig. 1 Tensile property of linerboard

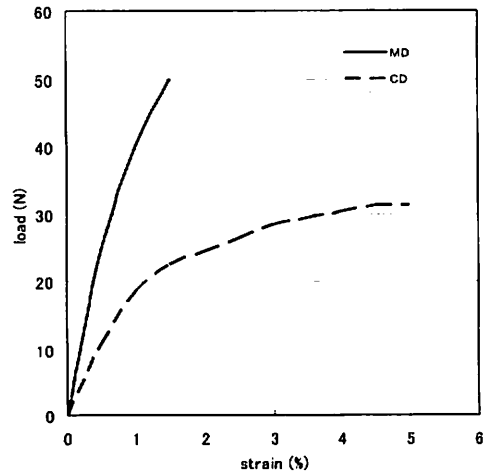


Fig. 2 Tensile property of corrugating medium

3. 実験結果及び考察

3.1 詳細モデルによる解析

段ボールシートの詳細モデルの例を Fig. 3 に示すが、これはライナ、中芯をそれぞれシェル要素でモデル化したものである。材料モデルには原紙の有する異方性や塑性特性を考慮したデータを使用して解析を行った。また、ライナと中芯の接着部の剥がれについては実験データを基に一定の剥がれ強度を与えて解析を行っている。また段ボール原紙のポアソン比については 0.1 とした⁷⁾。

最初に段ボール原紙単体でどの程度の解析が行えるのか調べるため、表ライナについてリングクラッシュ試験を実施してシミュレーションを行った。Fig. 4 に実験値とシミュレーション解析結果との比較を示す。図から荷重の最大値はほぼ同じ値になっているが、最大値になるまでの座屈変形の挙動に関しては差が出た。実験で用いた試料と解析モデルとの精度の差も影響していると考えられる。また、解析モデルでは原紙がリングクラッシュ用の治具で固定される部分について完全に固定した拘束条件でモデル化を行ったが、実際には試験時の原紙のすべりなども考えられるため、その影響も考えられる。さらに解析時のモデルの初期不整の条件についても調べる必要がある。

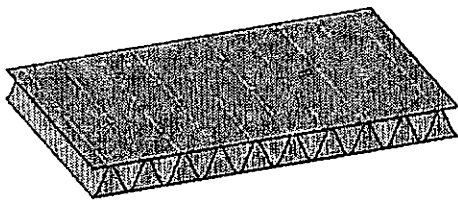


Fig. 3 Detailed model of corrugated fiberboard

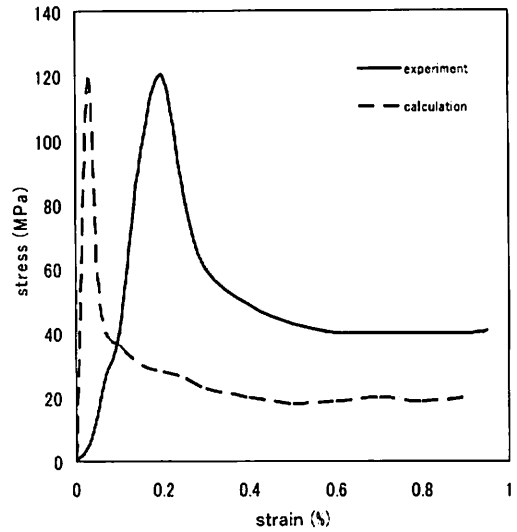


Fig. 4 Comparison between the calculated and found values of compressive strength by ring crush test

次に段ボールシート詳細モデルの解析事例について述べる。まず、Fig. 5 は 50×100 mm のシートを段流れ方向 (MD 方向) と直交する方向 (CD 方向) に圧縮速度 10 mm/min でエンドクラッシュ試験を行った時の実験値とシミュレーション解析結果との比

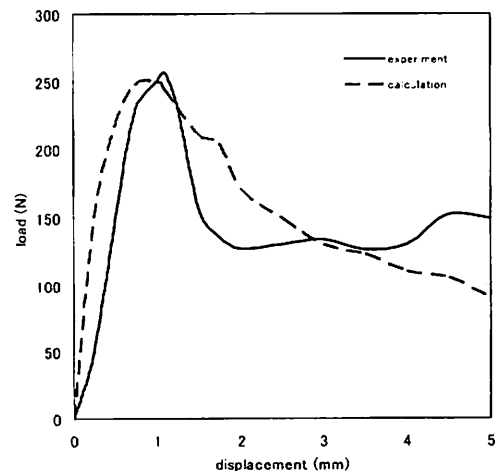


Fig. 5 Comparison between the calculated and found values of compressive strength by end crush test

較を示している。図より最大荷重を過ぎてからの荷重挙動にやや差があるものの、最大荷重値やそれに達するまでの変位の大きさについては実験値とよく一致している。

続いて段ボールシートのライナと中芯をピンアタッチメントによって引き剥がす接着力強さ試験についてであるが、この試験の特徴はライナと中芯の接着部が弱い箇所から順に剥がれていくことである。Fig. 6 に結果を示すが、実験値の線図からもその様子が明らかである。またシミュレーション解析結果と比較してみると、変位挙動には差が認められるが実験同様にライナと中芯の剥がれる様子が結果に示されている。さらに荷重の最大値についても実験値とほぼ近似した数値が得られた。ところで、この変位の差についてはライナと中芯の間で剥がれが発生する際に剥がれの判定基準となる荷重の大きさに起因していると考えられる。

段ボールの詳細モデルについて解析を行ったが、各試験において実験値との荷重と変位

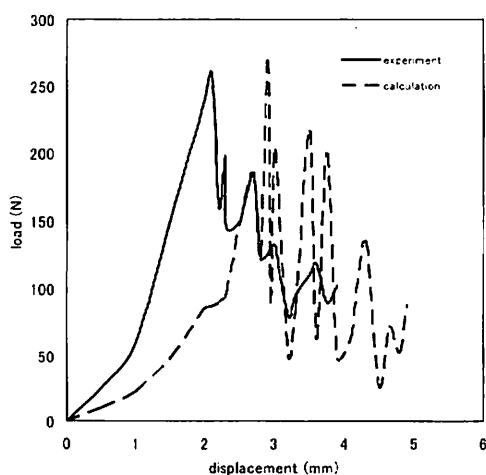


Fig. 6 Comparison between the calculated and found values of tensile strength by adhesion test

の挙動の一致に関しては差が認められたが、最大荷重の精度については十分に実用できる結果が得られたと考えられる。実際に段ボール箱の強度推定や段ボール緩衝材の加速度の推定を行う場合は段ボールの圧縮強度が最も重要なファクターとなるため、その点では最大荷重が解析で求められれば汎用構造解析ソフトの利用技術の有効性が期待できる。

3.2 簡易モデルによる解析

3.2.1 段ボールシートの簡易モデル化

緩衝材・固定材として段ボールを用いた包装貨物の落下衝撃に関するシミュレーションを行う場合、解析対象の中心は段ボールで保護されている製品であり、包装貨物全体のモデル化を図る際に製品の詳細なモデリングは不可欠である⁸⁾。つまり、製品の詳細モデルを作成することによって予想される製品へのダメージの大きさを測ることができる。一方、製品を保護する段ボールに関しては積層や折り曲げなどの加工を行い複雑な形状で製品を支持している事例が多い。しかし、実用性を考慮した場合、製品・段ボールとも詳細にモデル化を行っていたのでは非常に手間がかかってしまい、あまり現実的ではないと言える。したがって、段ボールについてはできる限り単純にモデル化ができた方が望ましく、ソフト利用の効果・実用性も高まると考えられる。

そこで、段ボールを一つの単一素材と考え、段ボールシート全体をシェル要素もしくはソリッド要素により簡易モデル化し、シミュレーション解析を行った。簡易モデルでのシミュレーションを行うためにライナや中芯の単体での物性ではなく、段ボールシートの状態での物性データを解析に利用した。今回、物

性データとしてエンドクラッシュ試験、フラットクラッシュ試験、曲げ試験によって得られた物性値を用いた。

用いた段ボールの物性として Fig. 7 にシートの MD 方向、CD 方向それぞれの引張り特性について示す。試験片のシート幅 35 mm、治具つかみ間隔 180 mm、引張り速度 10 mm/min とした。図より、MD 方向の強度が大きいものの、破断するまでのシートの伸びは CD 方向のほうが大きく、これはライナや中芯単体での引張り特性と同様の傾向であると言える。

3.2.2 簡易モデルのシェル要素解析

段ボールシートの曲げ試験をシェル要素で解析を行った結果を Fig. 8 に、また解析例を Fig. 9 に示す。試験は 35×150 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 120 mm で 3 点曲げを実施したが、試験に用いた支持及び曲げに用いた円柱治具の直径は 20 mm とした。

図より実験結果と比較して最大荷重までの

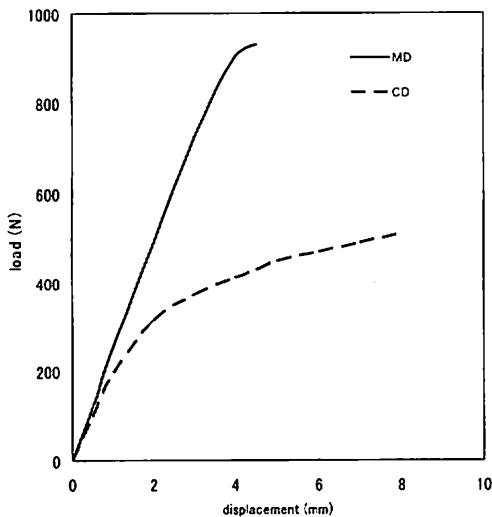


Fig. 7 Tensile property of corrugated fiberboard

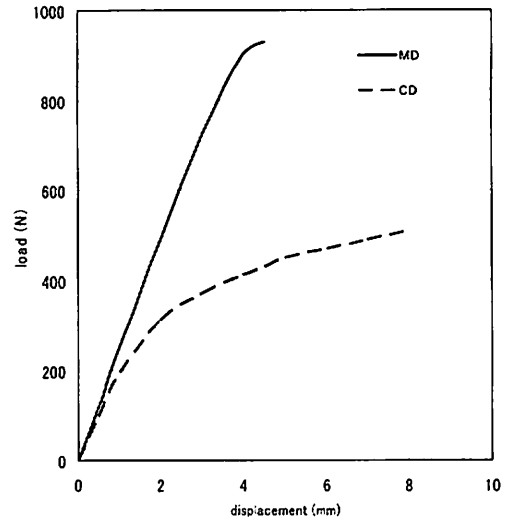
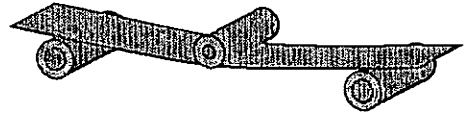


Fig. 8 Comparison between the calculated and found values of bending strength



と

Fig. 9 Example of simulation for bending test

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た。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解析においてはシートの折れ曲がり現象の再現は困難でピーク値を過ぎた後もある程度荷重を維持しながら変形が進んでいる。このような現象の解析については今後課題として残った。また、詳細モデルで実施したエンドクラッシュ試験についても簡易シェルモデルで解析を行ったが曲げ

試験同様、最大荷重までの挙動についてはよく一致していたが解析では座屈後の荷重が低下せずにはほぼ横ばいの傾向を示していた。

次にこの段ボールシートを用いて0201型の箱(300×300×300 mm)を試作し、箱の圧縮試験について解析を行った。Fig. 10に実験の様子をFig. 11に解析の一例を示す。また、Fig. 12に解析結果を示すが、変位と荷重の相関に違いが認められるが、最大荷重の値や座屈モードについては比較的良く一致している。解析には異方性を考慮した面内剛性、曲げ剛性及び非線形特性を材料モデルの中に取り入れているが、段ボールシート単体のみの強度解析では座屈現象がうまく再現で

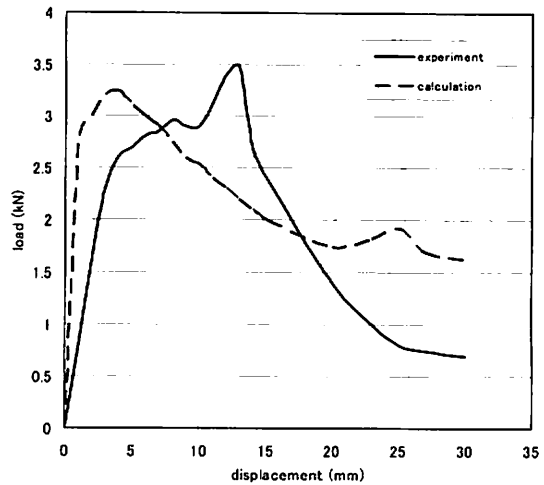


Fig. 12 Comparison between the calculated and found values of compressive strength

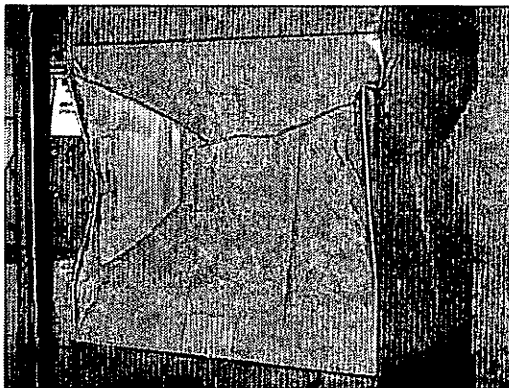


Fig. 10 Compression test of corrugated fiberboard box

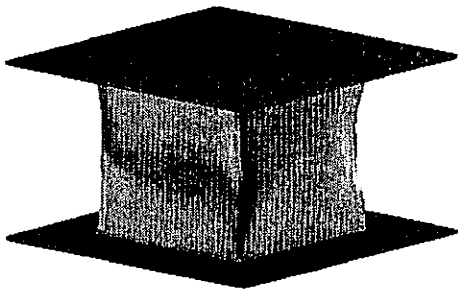


Fig. 11 Example of simulation for compression test

きないため座屈後の実験と解析の差が大きくなったが、今回の段ボール箱のように多面で構成された形状の解析ではある程度の変形挙動の再現ができた。しかし、段ボールにけい線が入る現象の座屈についてはシェル要素によるシミュレーションでの完全な表現は難しいため、さらに材料モデルの工夫が必要であると考えられる。

3.2.3 簡易モデルのソリッド要素解析

段ボールシートを単一素材と見なして全体をソリッド要素でモデル化して解析を行った事例について述べる。材料モデルについては3軸独立でそれぞれ異方性かつ非線形特性を考慮したものを利用した。

まず、段ボールシートのフラットクラッシュ試験についてソリッドモデルでの解析例をFig. 13に示す。フラットクラッシュ試験の場合、シートの厚さを考慮しなければならないためソリッド要素モデルとなるが、図より解析結果は最初の座屈荷重のみでなく、シートの段が潰れた後の荷重の挙動についても良

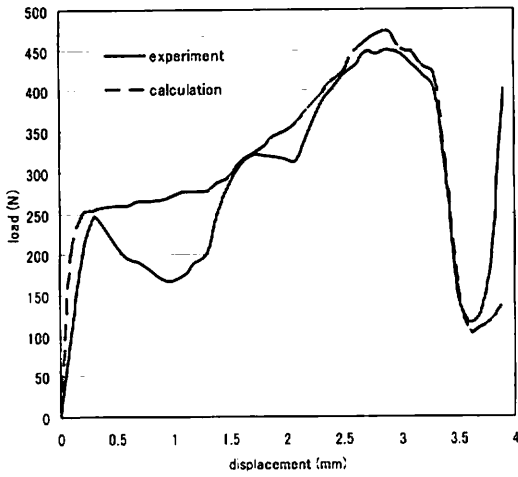


Fig. 13 Comparison between the calculated and found values of compressive strength by flat crush test

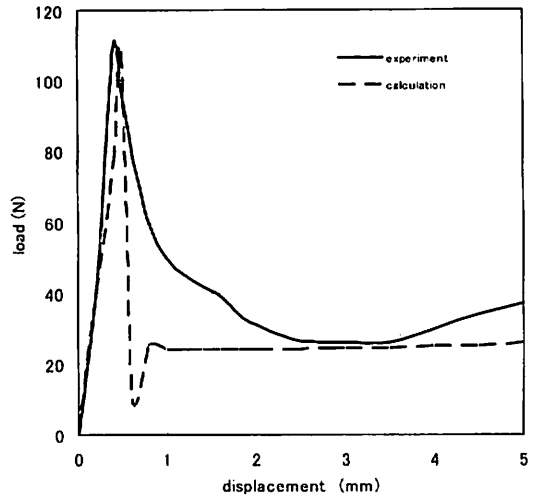


Fig. 15 Comparison between the calculated and found values of compressive strength by end crush test (MD)

く実験値と一致している。このような単純なモデルでのソリッド要素解析では比較的精度の良い結果が得られることがわかった。

次にエンドクラッシュ試験についてシートのCD方向・MD方向それぞれについてソリッド要素で解析を行ったが、その結果について Fig. 14 及び Fig. 15 に示す。図よりこのよ

うなシート単体の実験でもシェル要素での解析結果に比べ、ソリッド要素の場合には座屈後の荷重の低下が大きいものの、荷重の挙動については実験と近似した傾向を示しているのがわかる。しかし、実験と比較して座屈後の荷重値にかなり差が出ていた。例えばCD方向について実験時の試料 (Fig. 16) と解析

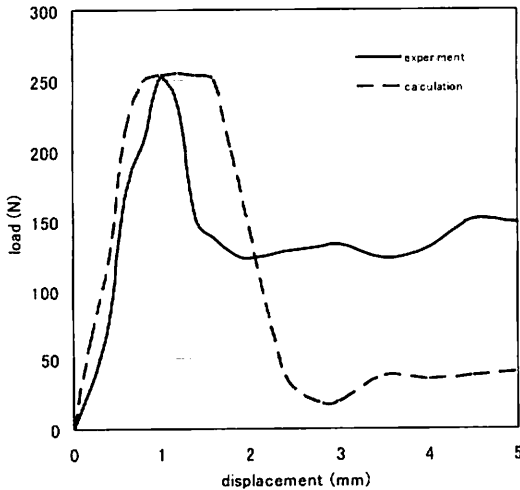


Fig. 14 Comparison between the calculated and found values of compressive strength by end crush test (CD)

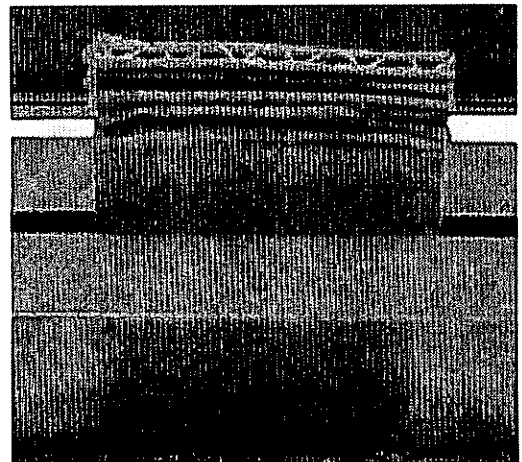


Fig. 16 Local buckling of corrugated fiberboard by end crush test

モデル (Fig. 17) との座屈の様子を比較してみると、実験ではシートの上端部から蛇腹状に圧潰していくのに対し、解析の方ではシートの中央部に近い箇所から座屈が起こるような挙動を示した。このことから座屈後のモデルの材料データの扱いについて特に非弾性域での物性について検討し直す必要がある。

これまでは静的現象についての解析事例について述べてきたが、実際の包装設計では静的圧縮による強度の解析に加え、落下衝撃時の段ボール緩衝材の変形など動的現象に対する解析が重要である。そこで、積層した段ボールシート及び一枚の段ボールシートを折り曲げた構造体について落下衝撃試験の解析を行った。

まず、100×100 mm のシートを 5 枚積層した構造の段ボール緩衝材に落下高さ 30 cm で質量 2.8 kg のおもりを落下させ、動的圧縮を加えた時の加速度測定について解析を行った。Fig. 18 に解析結果を示すが、ピーク荷重については変位に差があるが荷重値はほぼ同じ大きさとなっているのがわかる。また積層段ボールの圧縮試験の場合、シートのフルート部が一段ずつ潰れながら試料の変形が進行す

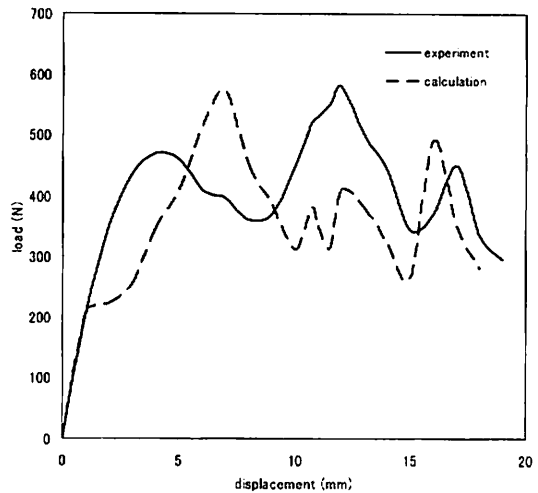


Fig. 18 Comparison between the calculated and found values of compressive strength by dynamic compression test (Laminating cardboards)

るため、荷重を示す線図にも複数の山状の波形が出るのが一般的であるが今回の解析においても同様の傾向が示されている。

次に、段ボールシートを Fig. 19 のように CD 方向にけい線を入れてロール状に折り曲げた構造体 (100×100×35 mm) に落下高さ 30 cm で質量 1.8 kg のおもりを落下させたときの加速度測定について解析を行った。解析結果を Fig. 20 に示すが、図より座屈変形挙

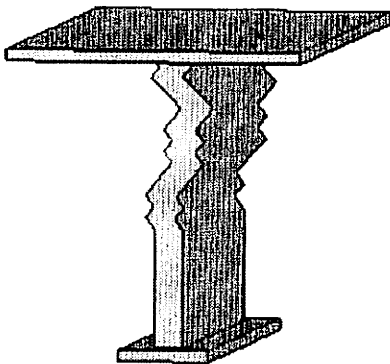


Fig. 17 Example of simulation for end crush test

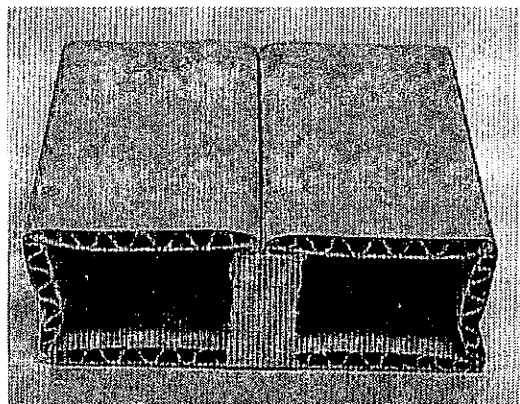


Fig. 19 Corrugated fiberboard structure model

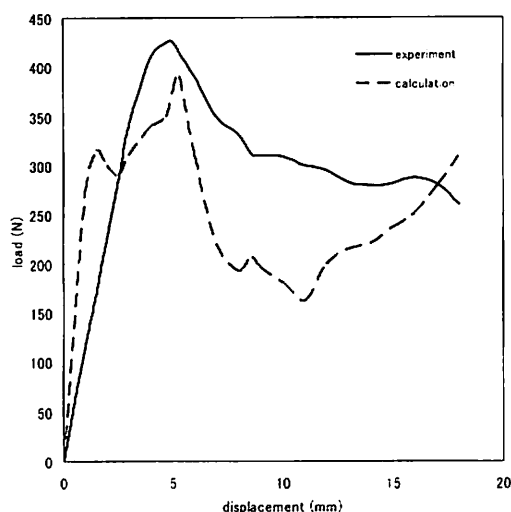


Fig. 20 Comparison between the calculated and found values of compressive strength by dynamic compression test (Cardboard structure)

動は定性的に実験値と計算値の一致がみられ、最大加速度値についても比較的合っていた。しかし、座屈後の加速度波形の挙動については差が認められる。特に線図の立ち上がりの部分で解析値の方が急激に荷重が上昇しているのがわかるが、これは材料の粘弾性の影響が関わっていると考えられる。今回の解析結果については材料の粘弾性については考慮せずに計算しており、今後の検討課題としてあげられる。また、モデル化においても今回はすべて一様な厚みで解析しており、段ボール構造体のけい線部分のモデル化が考慮されていないことも一因と考えられることから、これについても今後の課題となる。

5. 結言

段ボールのシミュレーションについて詳細モデル及び簡易モデルにより解析を行った。段ボール原紙、段ボールシート及び簡単な構

造体モデルについてそれぞれシェル要素及びソリッド要素でモデル化し、解析を行った。その結果から圧縮荷重等の強度を推定するレベルにおいては、実験値と解析値の近似が認められ、その有効性を示すことができた。しかし、簡易モデルについては段ボールの座屈変形後の荷重の挙動が実際の場合と異なってしまふなどの課題があり、今後、けい線部分のモデル化や座屈変形に関する材料物性の扱い方について検討が必要である。また、落下衝撃などの動的現象の解析においては材料の粘弾性の影響を考慮する必要があり、この考え方についても課題が残る。

また、本研究は最終的には被包装製品を含んだトータルの包装貨物状態でのシミュレーションが行えるようにすることを目標とし、実用性を高めたものにしたと考えている。そのためには、段ボールシート全体を一つの素材と見なした簡易モデル化は不可欠であり、段ボールの適正な材料構成則を明らかにすることでその精度を高めていきたい。

<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、29-34(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、p.261-272 (1995)
- 7) 松島理、松島成夫、日本包装学会誌、7(4)、175-183(1998)
- 8) 東町高雄、“有限要素法のノウハウ”、森北出版、p.25-27(1993)

(原稿受付 2005 年 3 月 14 日)

(審査受理 2005 年 9 月 2 日)