

立体紙製品の構造解析に関する研究 (第2報)

川島 義隆 西村 太志* 多賀 郁生

原田 匡人** 戸倉 直** 野口 哲司** 手塚 明***

Research on Structural Analysis of Paper Ware ()

Yoshitaka KAWASHIMA Futoshi NISHIMURA* Ikuo TAGA
Masahito HARADA** Sunao TOKURA** Tetsuji NOGUCHI** Akira TEZUKA***

あらまし 現在、包装容器や緩衝材はプラスチック製品から、リサイクルしやすく、かつ生分解性である紙製品へと代替されることが多くなっている。しかし、それらの強度設計は試行錯誤で行われており、効率的な設計方法が望まれている。段ボール製品（緩衝材や箱など）の解析を行うためには、段の構造解析やその構成材料である段ボール原紙の基礎的解析が必要であるが、いまだ十分に検討されていないのが現状である。本報告では、段ボール原紙の基礎的試験、及び汎用解析ソフトLS-DYNAを用いた圧縮特性の解析を行うことにより、その問題点を検討した。その結果、試験片支持具と原紙が接触する部分を節点拘束により簡易化すると、その最大圧縮応力は変わらないが、その座屈後の挙動に差異があった。その簡易化モデルにおいて、1/2モデルはフルモデルに対して最大圧縮応力、座屈後の挙動ともに大きく異なった。また、異方性を持つ材料モデルによる圧縮特性の解析は、実験と比較するとその最大圧縮応力値のオーダーは合うが、その圧縮量や異方性挙動に差異があり、今後の課題であることがわかった。

キーワード 材料試験、有限要素法、構造解析、段ボール

1. 緒言

近年まで、工業製品等の輸送や保管に使われる包装材料には発泡スチロールなどのプラスチック製品が多く使用されてきた。しかし、「容器包装リサイクル法」の施行や環境保護の観点から、リサイクルコストが安く、生分解性である紙系の緩衝材や包装容器の利用が多くなっている。紙系の包装材料として代表的なものは段ボールが挙げられ、従来から容器（箱）として広く一般的に使用されている。しかしながら、段ボール箱の積層による変形や耐荷重特性などの解析はなされておらず、それらに対する包装設計現場からのニーズも強い。また、最近の傾向として電気製品や工業部品などの精密機械を包装するための緩衝材として使用されることが多くなっており、正確な強度設計（緩衝設計）も必要とされている。

段ボール製品の実用的な解析を行うためには、材料特性（紙）、構造特性（段構造、2.1参照）の解明およびその有限要素モデル作成の煩雑さの回避が必要となってくる。

る。後者の問題に対して、我々は、段ボール製品は多数の段構造で構成された複合的構造物であり、その段の周期性に着目し、均質化法^[1]を用いて静的弾性解析を行うことを提案^[2]している。しかし、前者の問題に対しては学会などでも十分検討されていないのが現状である。そのため、本報告では材料特性、すなわち段ボール原紙の基本的な力学特性の把握を目的として、基礎的実験、圧縮特性解析におけるモデリングの検討及び実験との比較を行い、段ボール原紙の圧縮特性解析における問題点等の検討を行う。

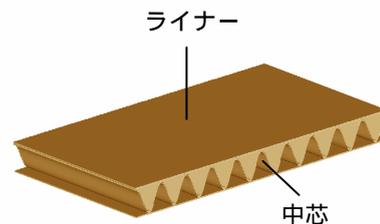


図1 両面段ボール

* 兼製品技術研究所

** 株式会社日本総合研究所

*** 独立行政法人 産業技術総合研究所 計算科学研究部門

2. 予備実験

2.1 段ボール原紙

段ボールは図1に示すように、ライナー及び中芯と呼ばれる原紙で構成され、中芯を波形に成形し、その片側または両側にライナーを張り合わせることで、段ボールの段構造が作られる。

実験に使用した段ボールの表ライナー（公称坪量170 g/m²）、中芯（公称坪量120 g/m²）及び裏ライナー（公称坪量170 g/m²）の坪量（JIS P 8124）、紙厚（JIS P 8118）の実測値を表1に示す。

表1 段ボール原紙の坪量、紙厚

原紙	公称坪量 (g/m ²)	測定値	
		坪量 (g/m ²)	厚さ (mm)
表ライナー	170	171.6	0.205
中芯	120	121.6	0.211
裏ライナー	170	168.6	0.206

2.2 原紙の材料特性の把握及び材料定数の同定

オートグラフ（株）島津製作所AG-20kNIにより原紙の引張強さ試験（JIS P 8113）を行った。試験片は長さ250mm、幅15mm、つかみ具間隔180mmとし、試験速度は10mm/minとした。測定した原紙の縦方向（MD）、横方向（CD）のそれぞれの引張強さを表2に示す。また、表ライナー、中芯に関して、試験10回測定のうち代表的な曲線を図2に示す。なお、図2は、X軸に関してはオートグラフの引張量（Stroke）をつかみ具間隔（Length=180）で除した値（Stroke/Length）、Y軸に関しては単位面積あたりの引張力でプロットした。

表2 段ボール原紙の引張強さ

原紙	方向	引張強さ (kN/m)
表ライナー	縦	11.3
	横	4.7
中芯	縦	5.0
	横	2.2
裏ライナー	縦	10.4
	横	4.3

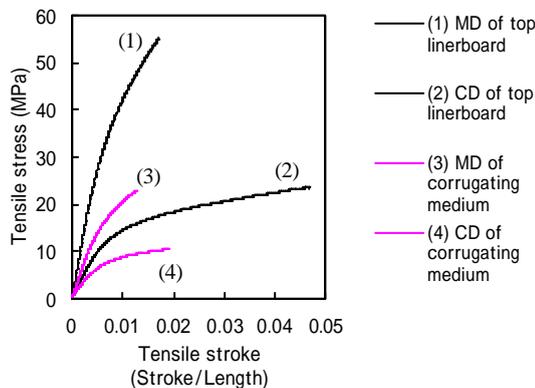


図2 段ボール原紙の引張り特性

段ボール原紙を代表とする機械抄き紙は縦方向に繊維が配向するのが特徴である。その繊維配向性の偏りが図2が示すような強度の差となる。すなわち面内異方性を持つといえる。

また、引張り試験から得られたヤング率、耐力（0.02%とした）を表3に示す。

表3 段ボール原紙のヤング率・耐力

原紙	方向	ヤング率 (MPa)	耐力0.02% (MPa)
表ライナー	縦	5692.0	24.2
	横	2036.7	9.5
中芯	縦	3024.9	11.6
	横	1499.0	4.9
裏ライナー	縦	5473.9	19.5
	横	2171.8	6.9

3. 力学モデルの検討

汎用解析ソフトLS-DYNA（Version 950, (株)日本総合研究所）を用い、原紙の圧縮特性試験のモデル化による解析精度及びその計算時間の違いを検討するため、図3～5に示すような3種類の有限要素モデルを作成した。モデルは試験片支持具をモデル化し、その他のモデルは節点拘束により簡易化したモデルである。また、モデルとの違いはフルモデルと1/2モデルの違いである。



図3 モデル（原紙+支持具、フルモデル）



図4 モデル（原紙、フルモデル）



図5 モデル（原紙、1/2モデル）

原紙モデルの要素は四角形シェル要素を用い、一辺0.5mm程度にメッシュを作成(フルモデル: 節点数8,729, 要素数 8,400), 材料モデルは面内異方性を持つ Mat_special_orthotropic^[3]を使用する。なお、この材料モデルは面外・面内の異方性を扱うこともできるが、今回は異方性はないものとする。また、原紙の材料定数は表3の値を使用し、ポアソン比を0と仮定する。荷重は前章と同様、試験速度は10mm/minとし、上部から剛体壁により圧縮を行う。表4に力学モデルの詳細を示す。

表4 リングクラッシュ試験の力学モデル

要素	原紙	4 節点シェル (Belytschko-Tsay) (面内 1 点、厚み 2 点積分)
	支持具	8 節点ソリッド, 剛体
材料モデル		Mat_special_orthotropic ^[3]
荷重条件		上部からの強制変位(10mm/min)
拘束条件	モデル	下面
	モデル モデル	下面 支持具に接触する部分 ・ x,y 方向変位 ・ x,y,z 軸回りの回転
	モデル	切断面における対称境界条件
接触条件		Automatic_general

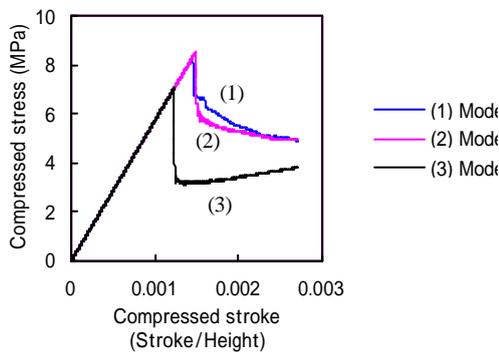


図6 モデル ~ の解析結果の比較

表5 解析結果

	最大圧縮点		計算時間 (Hour)	解析時間 (Sec)
	応力 (Mpa)	圧縮量 (Stroke/Height × 100, %)		
モデル	8.32	0.152	48	0.15
モデル	8.51	0.155	26	0.15
モデル	7.06	0.123	14	0.15

モデル ~ を用いて解析した結果を図6, 表5に示す。モデル, の最大圧縮応力及びその圧縮量は同程度であるが、モデル は、図6からわかるように、他のモデルと比較して座屈が早く、最大圧縮応力、座屈後の

波形に違いがみられる。これは拘束条件の多さが起因していると思われる。

モデル は に比べると座屈後の挙動に違いが見られるが、最大圧縮応力は変わらない。よって、計算時間を考慮し、次章ではモデル を使用して、原紙の圧縮特性の解析をすることとする。

4 原紙の圧縮特性の解析

4.1 実試験

段ボール原紙の圧縮特性の解析を行うため、オートグラフにより圧縮強さ試験(リングクラッシュ試験, JIS P 8126)を行った。原紙の圧縮試験は、短冊状に切断した原紙を円形に設置し、その上端部より圧縮を行う。その短冊状の試験片は長さ152.4mm, 高さ15mmとし、試験速度は引張試験と同様に10mm/minとした。測定した原紙、それぞれの最大圧縮強さを表5に示すとともに、表ライナーに関して試験10回測定のうちの代表的な曲線を図7に示す。

表5 段ボール原紙の圧縮強さ

原紙	方向	圧縮強さ (N)
表ライナー	縦	294.3
	横	209.1
中芯	縦	143.1
	横	106.1
裏ライナー	縦	334.4
	横	245.9

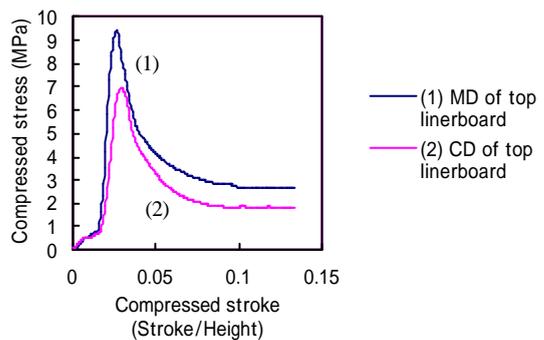


図7 段ボール原紙の圧縮特性

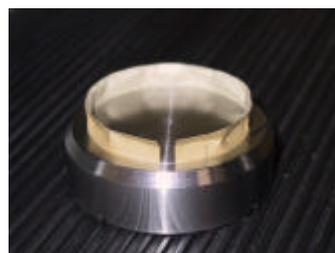


図8 圧縮後の原紙

図7からわかるように原紙が座屈するまで原紙はその強度を保つが、座屈後は急激に強度を失う。圧縮試験後の座屈した原紙（裏ライナー）を図8に示す。なお、図7は、X軸に関してはオートグラフの圧縮量(Stroke)を試験片高さ(Height=15)で除した値(Stroke/ Height)、Y軸に関しては試験片の圧縮部分における単位面積あたりの圧縮力でプロットした。

4.2 解析

モデルを用いて、原紙（表ライナー）の縦方向と横方向の圧縮特性の解析を行った。その結果を図9、またその最大圧縮応力値を実験値とともに表6に示す。

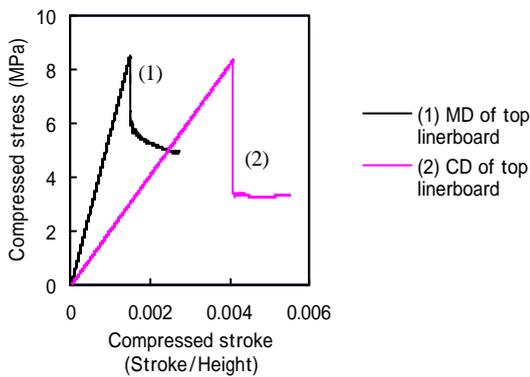


図9 原紙の圧縮特性の解析結果

表6 解析結果と実験における最大圧縮応力値の比較

方向	実験(MPa)	解析(MPa)
縦	9.42	8.51
横	6.69	8.38

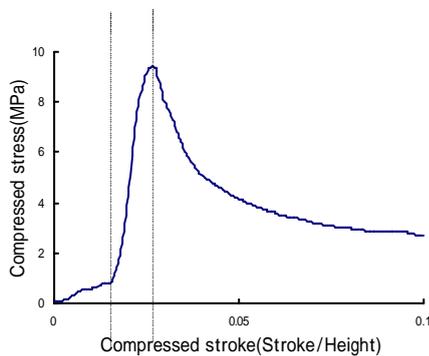


図10 原紙の圧縮特性の区分

図10に示すように、原紙の圧縮特性は、領域は試験機の圧縮面と試験片の間のわずかな隙間を埋める区間、領域は原紙が座屈（折れる）するまでの面内圧縮する区間、領域を座屈後の区間の3つ部分に分けられるとすると、図9の解析結果は図10の領域に相当すると

といえる。

解析（図9）では、縦方向は横方向に対して最大圧縮応力は1.02倍でほとんど差がなく、その圧縮量は0.39倍の差がある。また、実験（図7）では、同様に最大圧縮応力は1.41倍で大きな差が見られ、その圧縮量は0.82と差は小さい。よって、両者において材料圧縮特性の違いがある。また、表6より実験及び解析の最大圧縮応力値はオーダーが合う程度の精度であり、その時の実験における圧縮量は解析のそれに対して縦方向で7.19倍、横方向で3.41倍となり、大きな違いがある。よって、今回使用した解析モデルでは原紙の圧縮特性を十分に表現できておらず、上記の違いを考慮するためには、材料モデルの変更など含めた力学モデルの検討が必要であるといえる。

5.まとめ

段ボール製品の構造解析を目的として、段ボール原紙の引張特性から材料定数を同定し、LS-DYNAを用いて、原紙の圧縮特性の解析を行った。

(1) 試験片支持具をモデル化した場合、座屈後の挙動は実験のそれとよく似ている。また、そのモデルの簡略化として、節点拘束による方法は最大圧縮応力に差がないが、座屈後の挙動に違いが見られる。また、その1/2モデルはフルモデルの最大圧縮応力値及び座屈後の挙動に比べ大きな差が見られ、その精度の問題がある。

(2) 異方性を持つ材料モデルにより、段ボール原紙（ライナー）の縦・横方向の圧縮特性の解析を行った。その最大圧縮応力値は実験のそれとオーダーは合うが、その圧縮量や異方性挙動に違いがあり、これらを考慮した解析を行うには、力学モデルの検討が必要であるといえる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、段ボール関連資材を提供して頂いた協和ダンボール(株)の代表取締役 高木良直氏、取締役技術製造部長 土方正和氏並びに関係者の方々、また各種試験を行う際、試験機器の借用及び助言を頂いた岐阜県製品技術研究所美濃分室の方々に深く感謝の意を表します。

文献

[1] Gudes, J. M., Kikuchi, N., "Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., pp.143-198, 1990.
 [2] 川島ら, "均質化法を用いた段ボール緩衝材の解析", 茨城講演会講演論文集, pp.241-242, 2001.
 [3] (株)日本総合研究所, "LS-DYNA Version950 使用の手引き", pp5.84-5.85,2000.