

# 段ボール製品の強度解析技術に関する研究(第2報)

## - IT/MT分野におけるシミュレーション技術の適用に関する研究 -

川島 義隆 多賀 郁生 伊田 徹士\* 原田 匡人\*  
梅津 康義\* 松井 和己\*\* 手塚 明\*\*\*

### Structural analysis for corrugated fiberboard products( )

#### -Research on the Application of Numerical Simulation in IT/MT field-

Yoshitaka KAWASHIMA Ikuo TAGA Tetsuji IDA\* Masahito HARADA\*  
Yasuyoshi UMEZU\* Kazumi MATSUI\*\* Akira TEZUKA\*\*\*

あらまし 従来より、段ボール箱の設計において、段ボール箱の最大圧縮強さを推定する各種の算定式が利用されている。一方、包装設計現場では、圧縮強度値のみならず、変形や強度解析等に対するニーズも強い。段ボール箱圧縮強度の要因の中で、その重要な項目の1つとして段ボールシートの強度特性が挙げられる。そのため、段ボール箱の強度解析を行うためには、段ボールシートの力学的特性や材料定数の測定は重要といえる。本報告では、段ボール原紙及びシートの強度試験により材料定数を求め、段ボールシートの曲げ強さ及び箱の圧縮強さの静的解析を行ったので、これらの結果について報告する。

キーワード 段ボール、強度解析、箱圧縮強さ

## 1. 緒言

工業製品等の輸送や保管に使われる包装材料には、段ボール箱が広く使用されている。段ボール箱の設計において、その重要な項目の1つとして、箱圧縮強さが挙げられる<sup>[1]</sup>。そのため、従来から段ボール箱の最大圧縮強さを推定するケリカット式などの算定式<sup>[1]</sup>が提案されている。一方、包装設計現場では、最大圧縮強度値のみならず、段ボール製品の変形及び強度解析等に対するニーズも強い。そのため、近年では、有限要素法を用いた段ボールの強度特性解析<sup>[2-3]</sup>などが行われている。

前報<sup>[4]</sup>では、段ボールシートを一樣な平板とみなし、シートの圧縮及び曲げ強度試験より、段ボールシートの材料定数を求め、箱圧縮強度特性解析の基礎的検討を行った。

本報告では、さらに、原紙及びシートの強度試験によるせん断弾性係数の算定や段ボール箱の折り部のモデル化を行うことにより、段ボールシートの曲げ強度特性及び箱圧縮の強度特性の静的解析を行った。2章では、段ボールシートの圧縮及び曲げ強さ試験より、段ボール原紙及びシー

トの材料定数を求め、3章では、それらを用い、段ボールシートの曲げ強度特性、箱のコーナー部の曲げ強度特性及び箱圧縮特性の静的解析を行ったので、これらの結果について報告する。

## 2. 段ボール原紙及びシートの強度特性

### 2.1 段ボール原紙の圧縮特性

圧縮強さ及び曲げ強さ試験に用いる段ボールシート及び箱は、表1に示す段ボール原紙を用いた。原紙は表ライナー(公称坪量 170 g/m<sup>2</sup>)、中芯(公称坪量 120 g/m<sup>2</sup>)及び裏ライナー(公称坪量 170 g/m<sup>2</sup>)の3種類である。

表1 段ボール原紙の坪量、紙厚

原紙	公称坪量 (g/m <sup>2</sup> )	測定値	
		坪量 (g/m <sup>2</sup> )	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

そして、これらの3種類の原紙に対して、段ボール原紙の圧縮強さ試験<sup>[5]</sup>(リングクラッシュ試験, JIS P 8126)を

\* 株式会社日本総合研究所

\*\* 横浜国立大学

\*\*\* 独立行政法人 産業技術総合研究所

行った。試験片は長さ 152.4mm, 幅 12.7mm, 圧縮速度は 10mm/min とし, 標準状態 (JIS Z 8703, 温度 23±1, 湿度 50±5%) で行った。図 1 に表ライナーのひずみ - 応力特性を示す。

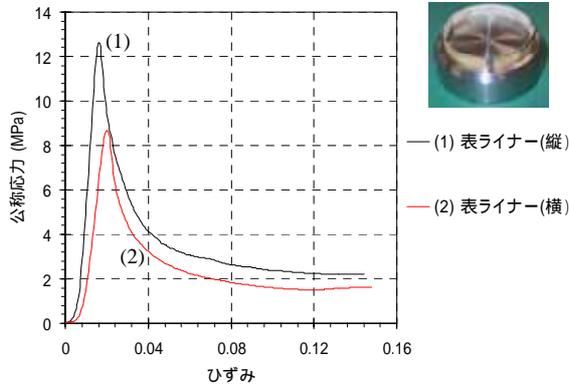


図1 原紙の圧縮強さ試験

## 2.2 段ボール原紙の引張特性

2.1節と同様 標準状態において 3種類の原紙に対して, 段ボール原紙の引張強さ試験<sup>[5]</sup> (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, 引張速度は 10mm/min とした。図 2 に表ライナーのひずみ - 応力特性を示す。

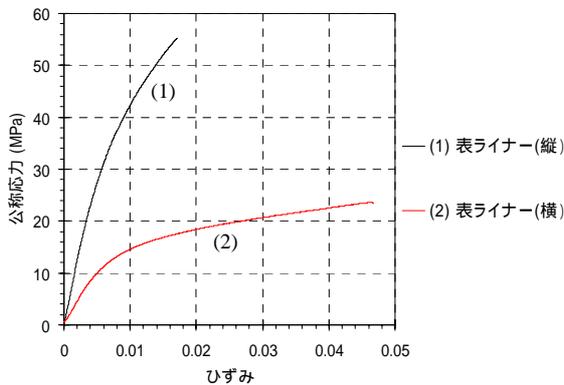


図2 原紙の引張強さ試験

## 2.3 段ボール原紙の材料定数

段ボールシートの曲げ強度特性の解析を行うため, 2.1 ~ 2.2 節で行った原紙の圧縮及び引張強さ試験の結果から, 3種類の段ボール原紙の材料定数を求めた。

表2 段ボール原紙の材料定数

原紙	方向	ヤング率(MPa)		せん断弾性係数	
		圧縮	引張	圧縮	引張
表ライナー	縦	1737.1	5728.4	630.5	1510.3
	横	989.6	2051.1		
中芯	縦	1047.5	3042.4	412.1	1007.5
	横	679.4	1506.4		
裏ライナー	縦	1601.6	5503.2	578.4	1562.6
	横	905.4	2182.2		

求めたヤング率を表 2 に示す。各ヤング率を比較すると, 段ボール原紙はその縦方向と横方向ではその強度特性に差異があり, 異方性を持っていることがわかる。また, 各原紙のせん断弾性係数は, ポアソン比を 0 と仮定し, 次に示す Campbell<sup>[6]</sup>の式を用いた。

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{1 + \mu_{xy}}{E_x} + \frac{1 + \mu_{yx}}{E_y} \quad (1)$$

ここで,

$G_{xy}$  : せん断弾性係数  
 $E_x, E_y$  : 原紙の縦及び横方向のヤング率  
 $\mu_{xy}, \mu_{yx}$  : 原紙のポアソン比

## 2.4 段ボールシートの圧縮強度特性

段ボールシートの圧縮強度特性を測定するため, 段ボールシートの垂直圧縮強さ試験<sup>[5]</sup> (JIS Z 0403-2, 試験片: 幅 90mm, 高さ 60mm) を行った。圧縮速度は 10mm/min とし, 外装用両面段ボール (A 段, 厚み 5.35mm) の試験片に対して, 縦方向, 横方向及び斜め (45° 方向) の 3 方向の圧縮強さ試験を行った。図 3 に変位 - 荷重特性, 表 3 に最大荷重値を示す。

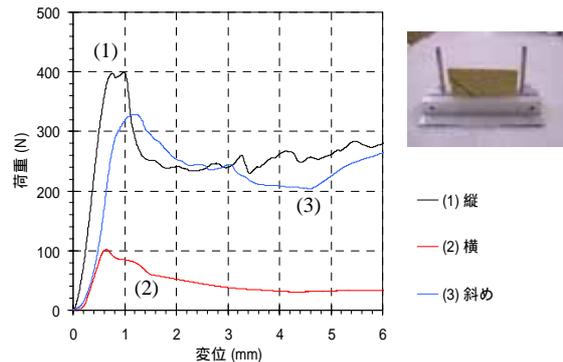


図3 段ボールシートの垂直圧縮強さ試験

## 2.5 段ボールシートの曲げ強度特性

段ボールシートの曲げ強度特性を測定するため, 3 点曲げ強さ試験 (試験片: 長さ 200mm, 幅 50mm, 支点間距離 150mm) を行った。2.4 節と同様に, 曲げ方向は縦方向, 横方向, 斜め 45° 方向の 3 種類とする。図 4 に変位 - 荷重特性, 表 3 に最大荷重値を示す。

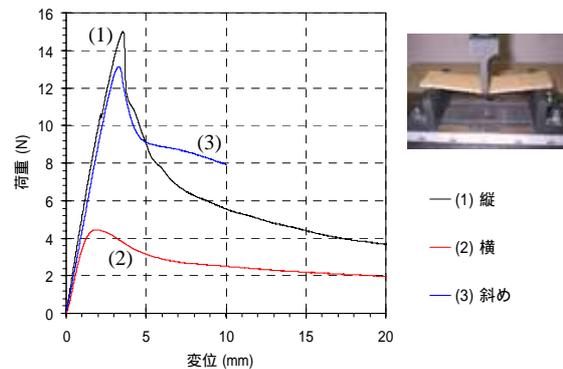


図4 段ボールシートの曲げ強さ試験

### 2.6 段ボールシートの材料定数

段ボールシート及び箱の有限要素解析を行うにあたり、段ボールシートの材料定数を求める。段ボールシートは多数の段で構成されるが、ここでは、一様な平板とみなす。圧縮及び曲げ強度特性より求めたヤング率をそれぞれ表3に示す。

また、せん断弾性係数は、次に示す石川<sup>[7]</sup>の式を用いる。

$$G_{xy} = E_{45} / \{2(1 + \nu_{45})\} \quad (2)$$

ここで、

- $G_{xy}$  : せん断弾性係数
- $E_{45}$  : 45°方向のヤング率
- $\nu_{45}$  : 45°方向のポアソン比

である。

式(2)を用いるためには、試験片の縦方向に対する斜め(45°)方向のヤング率が必要となる。そのため、2.4~2.5節の圧縮強さ試験と曲げ強さ試験において斜め方向の試験を行い、その強度特性から45°方向のヤング率を求めた。そして、ポアソン比を0と仮定し、式(2)及び求めたヤング率より、段ボールシートのせん断弾性係数を求めた。それらを表3に示す。

表3 段ボールシートの強度特性

	方向	最大荷重値(N)		ヤング率 (MPa)	せん断弾性係数(MPa)
		平均	標準偏差		
圧縮強さ	縦	404.5	46.7	39.7	16.5
	横	104.9	15.5	19.5	
	斜	328.5	23.5	33.0	
曲げ強さ	縦	14.7	0.8	466.5	213.9
	横	4.0	0.4	228.2	
	斜	13.0	0.7	427.8	

### 3 段ボールシート及び箱の強度特性の解析

#### 3.1 段ボールの有限要素解析

段ボール箱の圧縮強度において、図14(a)に示すように段ボール箱の圧縮後の変形を観察すると、強度要因の重要な要素の一つとして段ボールシートの曲げ強度特性が挙げられる。従って、箱圧縮特性の解析のため、3.2節では段の詳細モデル化によるシートの曲げ強度特性、3.3節では折り部の板厚を考慮した簡易モデル化によるコーナー部の曲げ強度特性、3.4節では箱圧縮特性の有限要素解析について述べる。

#### 3.2 段ボールシートの曲げ強度の解析

段ボールシートは、多数の段で構成され、その1つの段は表ライナー、中芯及び裏ライナーにより構成される。そのため、段ボールシートの強度特性は、原紙の強度特性に大きく影響を受ける。原紙の強度特性は、2.2~2.3節において、測定を行ったが、図1~2、表2より原紙の圧縮と引張特性は大きな差異を持つ。そのため、段ボールシートの曲げ強度特性の解析で使用される材料定数は、表2に示す原紙の圧縮強さ試験から測定した定数と引張強さ試験から測定した定数をそれぞれ用い、その両者の結果を比較する。解析モデルは、図5に示すようにシェル要素により段ボールの段を詳細にモデル化し、片持ち梁としてモデル化を行う。そして、境界条件は片側を固定、他方を強制変位させる。また、原紙の材料は異方性を持つ弾性材料とする。

縮と引張特性は大きな差異を持つ。そのため、段ボールシートの曲げ強度特性の解析で使用される材料定数は、表2に示す原紙の圧縮強さ試験から測定した定数と引張強さ試験から測定した定数をそれぞれ用い、その両者の結果を比較する。解析モデルは、図5に示すようにシェル要素により段ボールの段を詳細にモデル化し、片持ち梁としてモデル化を行う。そして、境界条件は片側を固定、他方を強制変位させる。また、原紙の材料は異方性を持つ弾性材料とする。

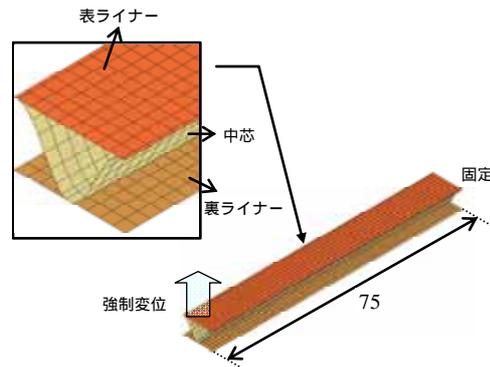


図5 段ボールシートの曲げ解析モデルと境界条件

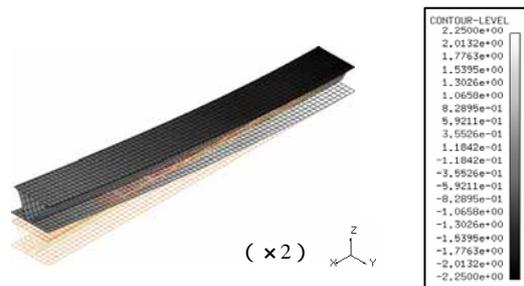


図6 段ボールシートの曲げ強度特性 (変形とその断面力分布, X方向, 変位=3.6mm)

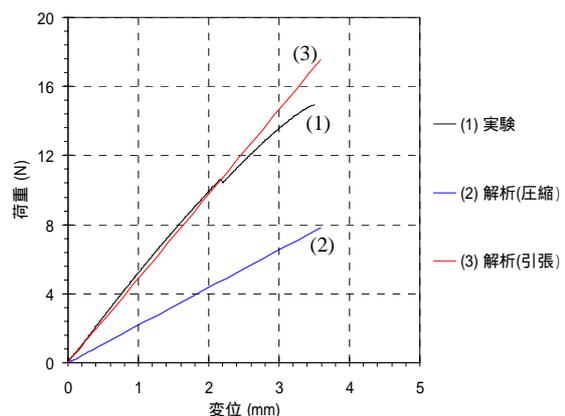


図7 段ボールシートの曲げ強度特性(変位 - 荷重特性)

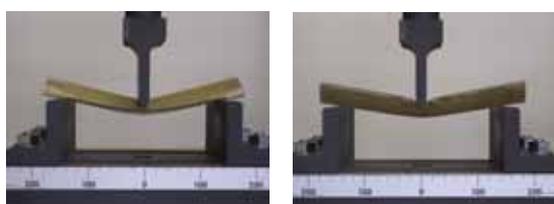
解析結果として、図6に変形及びその断面力分布、図7に試験結果とともに変位 - 荷重特性を示す。図7より、引張ヤング率を使用した結果の方が、圧縮ヤング率を使用した結果より、試験値の最大荷重値までの傾きによく合う傾

向を示している．従って，段ボールシートの強度要因は原紙の引張特性が大きく影響していることがわかった．

### 3.3 段ボール箱のコーナー部の曲げ強度解析

#### (1) 試験

段ボール箱のコーナー部の曲げ強度特性を解析するため，折り形状を持つ試験片の3点曲げ強さ試験を行った．折り試験片の大きさは長さ 200mm，幅 50mm（支点間距離 150mm）で，折りは幅方向の中央部 25mm の位置とし，折り試験片の角度（90°）を保持するため，試験片の両端をセロハンテープで保持した．試験は，図 8 に示すように，折り試験片の表側と裏側からの曲げを行った．その最大曲げ荷重値を表 4 に，たわみ - 荷重特性を図 10 に示す．



(a) 表押し (b) 裏押し

図8 折り試験片の曲げ強さ試験

表4 段ボールシートの折り試験片の最大曲げ強さ

折り試験片	最大荷重	標準偏差
表曲げ	30.7	1.2
裏曲げ	22.4	1.0

(N)

#### (2) 解析

解析モデルは片持ち梁としてモデル化を行い，図9に示すように1/4モデルとする．段ボールシートは一般的な平板とみなし，シェル要素によりモデル化を行う．図13(b)の箱のコーナー部のように，シートの折り部でその厚さが変化するため，図9の色の違いが示すようにモデル化を行う．また，材料モデルは，前報<sup>[4]</sup>と同様に，圧縮特性と曲げ特性を独立に定義できる異方性を持つ弾塑性モデル<sup>[8]</sup>を用いる．また，図3より，段ボールの圧縮強度特性の最大点以降は，ひずみの増加に対して最大荷重からの荷重増加はみられないことより，シートを完全弾塑性体<sup>[9]</sup>とみなす．そして，圧縮強度特性の最大点を降伏点とみなし，その点を降伏応力とする．

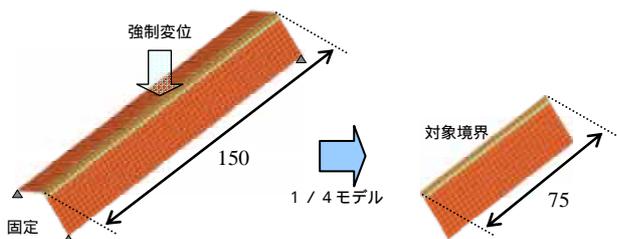


図9 コーナー部の曲げ解析モデル

解析結果として，図 10 に変位 - 荷重特性，図 11 に断面力分布を示す．図 10 より，解析の変位 - 荷重特性は，実験の表押しと裏押しの特性の平均的な傾向を示している．

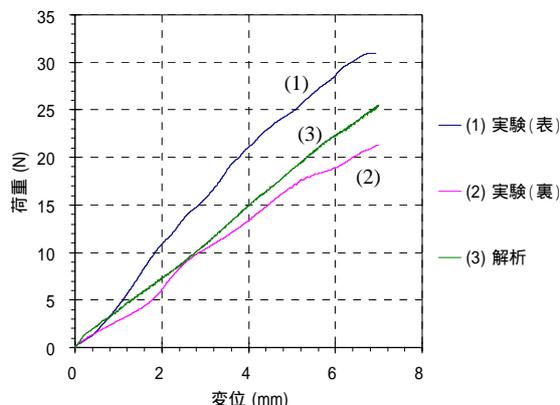


図10 コーナー部の曲げ強度特性（変位 - 荷重特性）

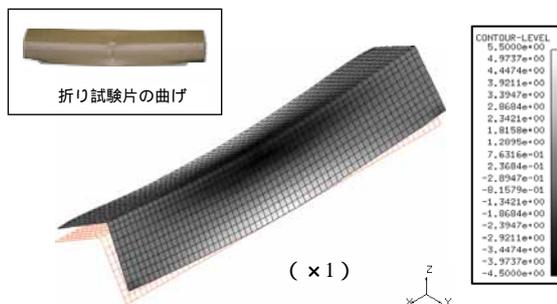


図11 コーナー部の曲げ強度特性  
（変形と断面力分布，x方向、変位=7.0mm）

### 3.4 段ボール箱圧縮強度特性の有限要素解析

#### (1) 試験

試験に使用する段ボール箱は 0201 形式，長さ 380mm，幅 300mm，高さ 234mm（図 12 参照）であり，試験方法は，包装貨物及び容器 - 圧縮試験方法（JIS Z 0212，B 法）に基づき，試験を行った．その結果，段ボール箱の最大圧縮強さは平均 2919.8N，標準偏差 156.0N であった．段ボール箱の圧縮後の変形を図 14(a)に，代表的な変位 - 荷重特性を図 15 に示す．

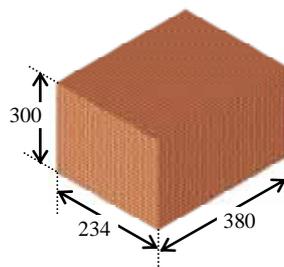


図12 段ボール箱の寸法

(2) 解析

図13(a)に示すように、段ボール箱の解析モデルは1/4モデルとする。そして、対称境界条件を課し、剛体壁により上面からの圧縮及び下面の支持を行う。材料モデルは3.3節と同様とする。また、図13(b)に示すように、段ボール箱のコーナー部は折ることによりシートの厚さが小さくなる。そのため、図13(a)に示す色の違いは、そのモデル化を示している。

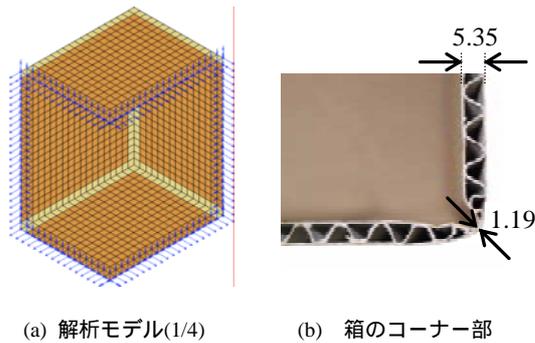


図13 段ボール箱のモデル化

図14, 15に試験及び解析結果を示す。図14より解析と実験の変形はよく一致しているといえる。また、図15の変位-荷重特性において、解析結果の最大圧縮荷重点までの変位量は、実験のそれと比べると小さい傾向を示しているが、最大圧縮強さは概ね近い値を示している。

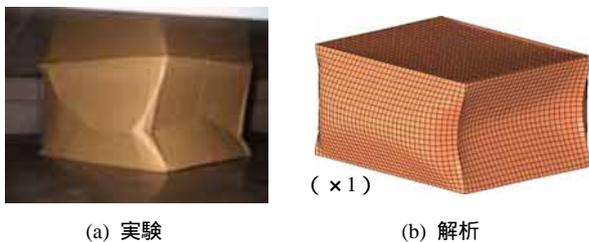


図14 段ボール箱圧縮特性(変形図, 変位=30.0mm)

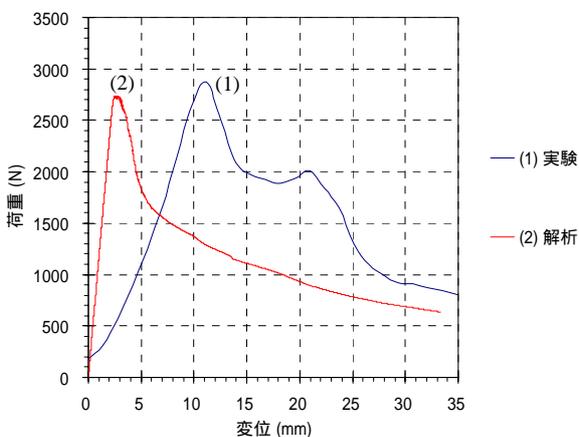


図15 段ボール箱圧縮特性(変位-荷重特性)

また、図16に箱圧縮における鉛直方向の断面力分布及び水平方向軸の曲げモーメント分布を示す。最初、段ボール箱の4枚の側板の鉛直方向に荷重がかかっている(図16(b)左)が、その後、側板の座屈が生じることにより、側板の曲げ特性が顕著になっていることがわかる(図16(1)-(c)右)。

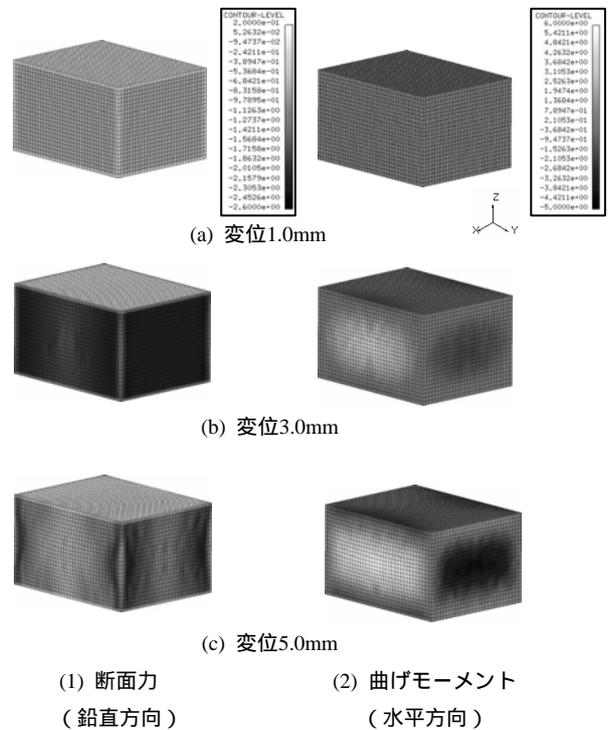


図16 段ボール箱圧縮特性(断面力と曲げモーメント)

4. まとめ

段ボール原紙の圧縮強さ及び引張強さ試験、シートの圧縮強さ及び曲げ試験を行うことにより、段ボール原紙及びシートの基本的な力学特性の測定を行った。

そして、段ボール原紙の強度試験から求めた材料定数を用い、段を詳細にモデル化することにより、段ボールシートの曲げ強度特性の静的弾性解析を行った。その結果、圧縮ヤング率を使用した場合より、引張ヤング率を使用した場合の方が、試験結果によく合う傾向を示した。従って、段ボールシートの強度要因は原紙の引張特性が大きく影響していることがわかった。

また、段ボールシートを簡易モデル化することにより圧縮強さ試験及び曲げ強さ試験から材料定数を求め、折り形状を持ったシートの曲げ強度の静的解析を行った結果、試験結果における表側からの曲げと裏側からの曲げの変位-荷重特性の平均的な傾向を示した。さらに、箱圧縮特性解析を行った結果、最大圧縮強さは概ね近い値を示し、かつ解析と試験の両者の変形はよく一致することがわかった。しかしながら、解析結果の最大圧縮荷重点までの変位量は、試験のそれと比べると小さい傾向を示すことがわかった。

## 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）の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

## 文 献

- [1]五十嵐清一，“2001年度版 段ボール包装技術入門”，(株)日報，pp116-146, 2000.
- [2]中川幸臣，丹羽一邦，筒井喜平，“段ボールの強度解析シミュレーション”，包装技術，41-3, pp217-220, 2003.
- [3]丹羽一邦，“ダンボール衝撃解析のための実験とシミュレーション方法”，LS-DYNA Users Conference 2001 講演論文集, pp.17-2-15-9, 2001.
- [4]川島ら，“段ボール製品の強度解析技術に関する研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告, No.6, pp.17-18, 2005.
- [5]日本規格協会，“JISハンドブック 紙・パルプ”，2005.
- [6]Campbell, J. G., “The in-plane elastic constants of paper”, Australian J. Appl. Sci., 12-3, pp356-357, 1961 .
- [7]石川隆司，“複合材料力学入門 第2章 複合材料の弾性・非弾性挙動”，日本複合材料学会誌，22,2, pp76-81, 1996.
- [8]（株）日本総合研究所，“LS-DYNA Ver970 User's Manual Volume ”，2003.
- [9]鷲津ら，“有限要素法ハンドブック 応用編”，培風館，pp174-176, 1983.