

立体紙製品の構造解析に関する研究 (第3報)

川島 義隆 田中 等幸 原田 匡人* 野口 哲司* 手塚 明**

Research on Structural Analysis of Paper Ware ()

Yoshitaka KAWASHIMA Tomoyuki TANAKA
Masahito HARADA* Tetsuji NOGUCHI* Akira TEZUKA**

あらまし 本報告では、ブロック型段ボール緩衝材の圧縮特性の解析及びその準静的・動的解析手法の検討を目的として、1層段ボールの平面圧縮特性の解析、均質化法プログラムのLS-DYNAへの組み込みに関する検討及び4層段ボール緩衝材の圧縮特性の線形均質化法による試行解析を行った。その結果、段ボール原紙の圧縮ヤング率を用いた1層段ボールシートの平面圧縮特性の弾性解析は、微小変形領域の範囲において実験と概ね一致することがわかった。また、組み込み検討の結果、LS-DYNA Ver.960の仕様の範囲外ではあるが、マクロ要素番号及びその節点変位を参照することにより、均質化解析が可能であることがわかった。また、それを用いた均質化解析は、マクロ要素数が不十分ではあるが、詳細解析における剛体壁反力波形の傾向が均質化解析においても現れていることがわかった。

キーワード 段ボール、緩衝材、均質化法、LS-DYNA

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が、近年、リサイクルコストが安く、生分解性である紙製品への代替が増加している。そのため、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への利用も多くなっており、紙系緩衝材の正確な強度設計（緩衝設計）技術が必要とされている。

代表的な紙系包装材料である段ボールは箱や緩衝材など多岐にわたって利用されているが、そ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）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。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。また、緩衝材の性能評価には、落下衝撃試験等による動的試験で評価されることも多く、そのためには動的解析が必要となってくる。従って、我々は、段ボール製品の均質化法を用いた準静的・動的解析を目的として、商用ソフトLS-DYNA（Livermore Software Technology Corporation）への均質化法のプログラムの組み込みに関する検討^[3]を行った。本

報告では、ブロック型段ボール緩衝材の圧縮特性の解析及びその準静的・動的解析手法の検討を目的として、緩衝材を構成する1層段ボールの平面圧縮特性の基礎的解析、均質化法プログラムのLS-DYNAへの組み込みに関する検討、そして、その試行解析として、4層段ボール緩衝材圧縮特性の線形均質化解析を行ったので、これらを報告する。

2. 1層段ボールの平面圧縮特性

2.1 段ボール平面圧縮試験

1層の段ボールの平面圧縮特性を把握するため、オートグラフ（（株）島津製作所AG-20kNI）を用い、平面圧縮強さ試験（JIS Z 0403-1）により圧縮試験を行った。試験に用いた段ボールは表ライナー（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）で構成された外装用両面段ボール（A段、協和ダンボール（株））である。試験速度は10mm/minとし、試験は段が完全につぶれるまで行った。得られた応力-歪み曲線のうちの代表的な曲線を図3に示す。

2.2 材料定数の同定

段ボール原紙を代表とする機械抄き紙の引張り時の変形挙動は繊維間や繊維結合部での微細な破壊が多数発生することに対して、圧縮時の挙動は繊維の折損や座屈が局部的に起こるとされている^[4]。

段ボールの平面圧縮特性は、主に中芯の縦方向の圧縮特性が支配的であることを考え、解析に使用する材料定

* 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

数は、段ボール原紙の圧縮特性試験から同定した。試験は原紙の圧縮強さ試験（リングクラッシュ試験、JIS P 8126）により行い、試験片は長さ152.4mm、幅15mm、試験速度は10mm/minとした。測定した原紙（表ライナー）の縦方向（MD）、横方向（CD）のそれぞれ試験10回測定のうちの代表的な曲線を図1に示す。そして、原紙の圧縮特性曲線において、応力0.1MPaの点から最大圧縮応力点までの立ち上がりの直線を圧縮ヤング率とする。原紙3種類のそれぞれの縦方向、横方向の圧縮ヤング率の平均を表1に示す。

表1 段ボール原紙のヤング率

原紙	方向	ヤング率 (MPa)
表ライナー	縦	1213.7
	横	703.1
中芯	縦	730.3
	横	480.0
裏ライナー	縦	1163.5
	横	647.9

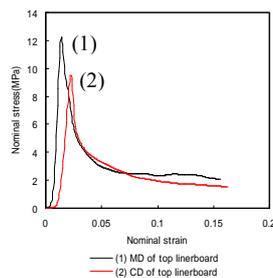


図1 表ライナーの圧縮特性

2.3 解析条件

図1より、段ボール原紙は面内異方性を示すことが分かる。しかしながら、本報告では問題を単純化するため、等方性として扱うことにする。そして、段ボール平面圧縮時における中芯原紙は、主に縦方向の圧縮を受けるため縦方向のヤング率を用い、等方弾性体として解析を行う。また、ライナーも同様に扱うことにする。

解析モデルは段の1/2モデルとし、モデル側面に対称境界条件を付与する。要素タイプは8節点ソリッド要素（8点積分）、ポアソン比は石淵ら^[5]の値を参考に、ライナーは0.07、中芯は0.03とする。力学条件は上部から剛体壁による強制変位、圧縮速度は試験と同じ10mm/minとする。

表2 平面圧縮解析モデル

要素	8節点solid
節点数	1,045
要素数	460
大きさ (mm)	x=4.45
	y=5.00
	z=5.35
材料モデル	等方、弾性

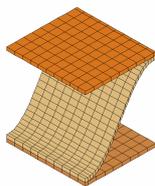


図2 平面圧縮解析モデル

2.4 解析結果

比較のため、解析結果の剛体壁反力を、図3の実験による圧縮特性曲線上にプロットする。反力を示す直線は、圧縮試験時の試験機の圧縮面と試験片の間の不安定な接触区間を考慮して、プロットしている。

図3より、本解析は等方弾性解析であり、また初期不整等の座屈解析を考慮していないことから、微小変形領域（歪み1%程度の領域）なら、概ね一致していると考えられる。従って、段ボール原紙の材料定数として、原紙

の圧縮試験から同定したヤング率を用いることに問題ないといえる。

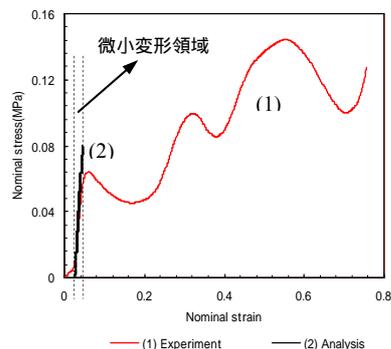


図3 段ボール平面圧縮の解析と実験の比較

3. LS-DYNAを用いた均質化解析

3.1 ユーザー定義物性材料モデルサブルーチン

LS-DYNAでは、ユーザー独自の定義に基づく物性特性の材料を用いて解析を行う場合、LS-DYNAに用意されているユーザー定義物性材料モデル^[6]を利用する。具体的には、公開されているユーザー定義物性材料モデル用のサブルーチン（以下、ユーザー定義サブルーチン）に必要とする応力-歪み関係式などのユーザー独自の定義をFortran 90のプログラムで記述し、利用することになる。

我々は、このユーザー定義サブルーチンを利用して、3.2節で述べるアルゴリズムにより均質化解析を行う。そのため、ユーザー定義サブルーチン内に均質化法のプログラム（均質化サブルーチン）の記述を行うことにより、LS-DYNAへの組み込みを行う。しかし、このことを前提として、ユーザー定義サブルーチンの仕様を検討すると、次のような問題点が生じる。そのサブルーチン内では簡単な関数の定義を行うのが目的であり、その中で行列計算を行うことは考慮されていない。また、そのサブルーチンは要素単位での応力更新が目的で作成されており、サブルーチン内での変数の参照は歪み増分等の変数に限定されている。よって、均質化解析では行列計算を必要とし、かつモデル全体の要素、節点情報の参照を行うため、このユーザー定義サブルーチンは均質化サブルーチンの組み込みには対応していないことが分かる。

従って、我々は、前者の問題に対しては、3.3節で述べる方法で均質化サブルーチンの作成を行い、また、後者の問題に対しては3.4節で述べる方法で対処を行うことにより、均質化サブルーチンのLS-DYNA Ver.960 (Windows版)への組み込みを行った。

3.2 均質化解析アルゴリズム

均質化サブルーチンはユーザー定義サブルーチン内において、図4に示すようなタイミングで使用される。すなわち、マクロ要素の応力更新は、マクロ要素の歪み増分と均質化サブルーチンで計算した均質化弾性定数により、

マクロ応力増分を求めることにより行う。

そして、解析時の各時間ステップにおいて、均質化サブルーチン内では、次のような計算手順(図5参照)を踏む。前ステップで計算したマイクロ変位を用いて、マイクロ構造を更新する。次に、更新されたマイクロ構造より、現ステップの均質化弾性定数、マイクロ変位を求める。そして、その均質化弾性定数は現ステップのマクロ応力更新のために戻され、また、そのマイクロ変位は次ステップ用に保存される。

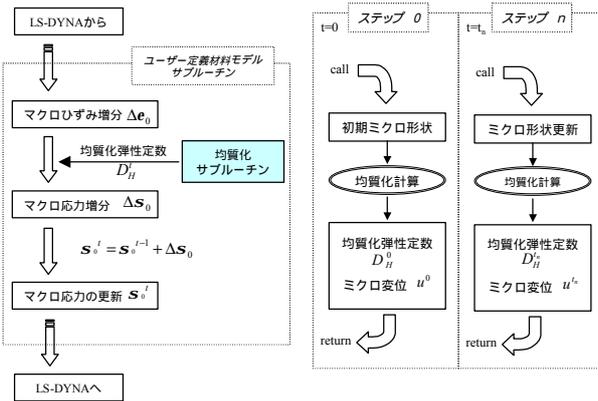


図4 マクロ応力更新

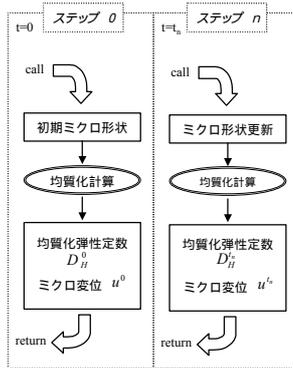


図5 均質化サブルーチン

3.3 均質化サブルーチン

均質化サブルーチンは、マイクロモデルの均質化弾性定数の導出^[1]を行うため、行列計算を行う必要がある。しかし、ユーザー定義サブルーチン内ではLS-DYNAのソルバーの利用ができないため、ユーザーがそのサブルーチン内にソルバープログラムを用意する必要がある。一方、本均質化解析では、マイクロ及びマクロモデルの節点、要素コネクティビティ等やマクロ要素ごとのマイクロ節点変位をcommon変数としてメモリ上に保存するため、大規模解析を行う場合、そのメモリの省力化が必要となってくる。従って、以上の問題を考慮して、組み込みを行う均質化サブルーチンはElement by Element (EBE)法^[7]により行列計算を行うソルバー^[8]を用いた。EBE法は行列計算を行う際、全体行列を作成せず、要素毎の行列の大きさで行列計算を行うため、スカイライン等の解法に比べ、メモリを節約できる利点がある。

3.4 LS-DYNAへの組み込み

均質化解析を行うため、ユーザー定義サブルーチンを使用する場合、そのサブルーチンをcallしているマクロ要素の番号、積分点及びそのマクロ要素の節点変位を参照できないといった問題を生じる。本均質化解析では、各時間ステップでマイクロモデルの形状の更新を行うため、それを行うためにはマクロ節点変位からマイクロモデルの節点変位を計算する必要がある。従って、上記の問題に対処するためには、マクロモデルの要素は1要素(1点積分)とし、マクロモデルの境界条件及びユーザー定義サブルーチンの引数である歪み増分から、マクロ要素の

節点変位の計算を行わなければならない。これは1点積分からのマクロ要素の節点変位の計算は精度が十分に出来ないと問題が生じる。従って、LS-DYNAの仕様の範囲内では、十分な精度を持つ均質化解析ができないことが分かる。そこで、LS-DYNAの仕様の範囲外における使い方であるが、次のような対策を行った。

- (1) ユーザー定義サブルーチンをcallしている上位の subroutine urmathnより、マクロ要素番号を参照する。
- (2) LS-DYNA入力データの*user_loadingカードを追加し、ユーザー荷重ルーチンloadud に追加した common変数により均質化サブルーチンからマクロ要素節点変位を参照する。

しかしながら、この方法においても、LS-DYNAの仕様上、87を越えるマクロ要素の番号を参照することができない。従って、現段階での均質化解析は、マクロ要素数87以下の制限内で行う必要がある。

4. 段ボール緩衝材の圧縮特性解析

4.1 解析条件

均質化サブルーチンの組み込みを行ったLS-DYNAを使用し、段ボール緩衝材の圧縮特性の均質化解析を行う。その解析モデルを図6、7、表3に示す。また、その比較として、緩衝材の詳細にメッシュを切ったモデル(表4、図8)による解析(詳細解析)を行う。対象とする緩衝材は、前章で述べたLS-DYNAの仕様における制限を考慮し、4層に積層した段ボール緩衝材とする。すなわち、均質化解析においてはマクロモデルの要素数は64要素となる。また、その均質化解析結果との比較を行うため、8要素、27要素のマクロモデルによる均質化解析も行う。材料モデルは線形弾性。材料定数は原紙の圧縮ヤング率を用い、変形領域は微小変形領域とする。境界条件は、剛体壁により上面圧縮(強制変位)し、その圧縮速度は試験速度の10,000倍(10 × 10⁴ mm/min)とする。また、緩衝材の4つ

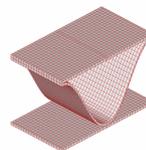


図6 ミクロモデル

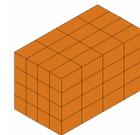


図7 マクロモデル(64要素)

表3 均質化解析モデル

モデル	マイクロ	マクロ			
節点数	5,355	8	27	64	
要素数	2,560	27	64	125	
要素タイプ	8節点solid				
積分点数	8	1			
大きさ (mm)	X	8.90	17.8	26.7	35.6
	Y	5.00	10.0	15.0	20.0
	Z	5.35	10.7	16.1	21.4
材料モデル	等方弾性	ユーザー定義材料モデル			

表4 緩衝材の詳細解析モデル

節点数	290,385
要素数	163,840
要素タイプ	8節点solid
積分点数	8
大きさ (mm)	x=35.6
	y=20.0
	z=21.4
材料モデル	等方, 弾性

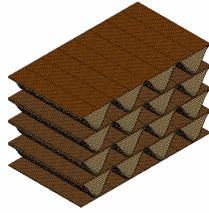


図8 緩衝材の詳細解析モデル

の側面には対称境界条件を付与している。

4.2 解析結果

図9に3種類のマクロモデルによる均質化解析の剛体壁反力波形をそれぞれ示す。マクロモデルの要素数を増やすに従い、剛体壁反力は階段状の波形に漸近していくことが分かる。図10に詳細解析及び64要素のマクロモデルを用いた均質化解析の両者の剛体壁反力波形を示す。詳細解析結果を見ると、歪みの増加に対して反力が出ない区間があり、階段状に反力が出るのがわかる。また、均質化解析は、現段階ではマクロ要素数が少ないため、その反力波形は詳細解析のそれとは合っていないが、詳細解析と同様な傾向は出ているといえる。従って、より多くのマクロ要素数で均質化解析を行えば、詳細解析の結果に近くなると考えられる。

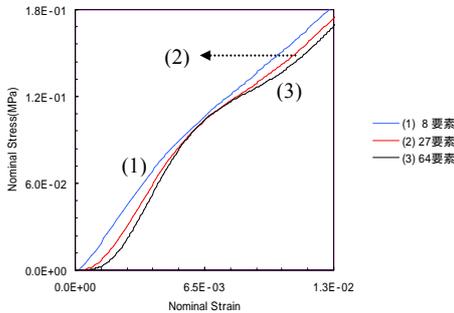


図9 要素数の違いによる剛体壁反力 (均質化解析)

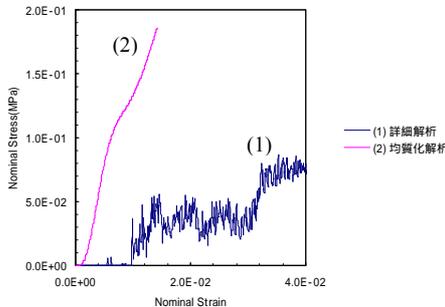


図10 詳細解析と均質化解析における剛体壁反力の比較

5. まとめ

段ボールの圧縮特性解析を目的として、段ボール原紙

の圧縮ヤング率を用いた1層段ボールの平面圧縮特性の弾性解析を行った。その結果、微小変形領域の範囲において、実験のそれと概ね一致することがわかった。

また、段ボール緩衝材の準静的・動的均質化解析を目的として、LS-DYNA Ver.960への均質化法のサブルーチンの組み込みに関する検討を行った。その結果、LS-DYNAの仕様の範囲外ではあるが、マクロ要素の番号及び節点変位を参照することにより、均質化解析が可能であることがわかった。そして、組み込みLS-DYNAを用いた段ボール緩衝材の線形均質化解析を試行的に行った。現段階では、マクロ要素数が少ないが、詳細解析における剛体壁反力波形の傾向が、均質化解析において現れており、マクロモデル要素数を増やすに従い、詳細解析のそれに近づくと考えられる。本解析で対象とした緩衝材は小規模であったが、実際の製品はよりサイズが大きく、その解析は大規模となる。すなわち、均質化解析におけるマクロ要素数が非常に多い場合に相当する。そのため、さらに組み込みの検討を行い、大規模均質化解析を行っていく予定である。

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)の関係者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", 機械学会関東支部茨城講演会講演論文集, pp.241-242, 2001.
- [3] 川島ら, "段ボール緩衝材に関する研究", LS-DYNA User Conference 2002 講演論文集, pp17-1-17-8, 2002.
- [4] 古川ら, "機械抄き紙の塑性変形挙動とその構造的変化", 紙パ技協誌, pp582-590, 1991.
- [5] 石淵ら, "段ボールシートの三次元曲げ応力解析", 機論, 60, 580, A, pp.2774-278, 1994.
- [6] (株)日本総合研究所, "LS-DYNA Version950 使用の手引き", pp.5.73-5.74, 2000.
- [7] Thomas J. R. Hughes, "The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis", Dover Pubns Inc., pp483-487, 2000.
- [8] ソースプログラムはScaled EBE solver (独立行政法人産業技術総合研究所)を使用した。