

一般論文

## ハイブリッド緩衝防振包装設計の提案

張 奇 \*、 齋 藤 勝 彦 \*\*、 長 岡 克 樹 \*

### Proposal of Hybrid Cushioning/Damping Package Design

Qi ZHANG\*, Katsuhiko SAITO\*\* and Katsushige NAGAOKA\*

製品を物流中の衝撃と振動から守るため、包装設計が行われている。設計した包装品の緩衝性能と防振性能は、それぞれ落下試験と振動試験で確認されており、包装品の緩衝性能については、実験結果を基にしたクッションカーブを利用した緩衝材の厚さと受圧面積が採用されるため、試験結果を予測できる。しかし防振性能については、その都度振動試験で確認せざるを得ず、試験不合格による再設計が問題になっている。そこで、本研究では、緩衝包装設計と防振包装設計を並行して行う「ハイブリッド緩衝防振包装設計」を提案する。具体的には、マルチボディダイナミクスによる数値シミュレーションを防振設計の援用ツールとして、包装品の振動応答を数値化し評価できるようにする。さらに、候補となる複数の緩衝性能及び防振性能を分析・比較することにより、緩衝機能・防振機能・省材料の3つの要素について適正包装を見出す過程をケーススタディーにより例示する。

In order to protect the products from shock and vibration in transport, Cushioning Packaging Design is conducted. The cushioning performance and anti-vibration performance of a package will be tested by drop test and vibration test. About the cushioning performance, the result of drop test is predictable because the cushioning material's thickness and bearing area will be decided by cushion curves which are plotted based on results of tests. However, about the anti-vibration performance, the result of vibration test is not predictable, so that it remains uncertain until actually conduct vibration test and failures in vibration test lead to Redesign which has been a serious problem. Therefore, in this paper, we propose the "Hybrid Cushioning/Damping Package Design" in which both of Cushioning Packaging Design and Anti-vibration Package Design will be conducted. Specifically, the Multibody Dynamic simulation is applied as an aided design tool for Anti-vibration Package Design so that numerically analyzing of package's vibration response becomes possible. Furthermore, we give a case study to demonstrate how to find out the appropriate package considering the factors of cushioning performance, anti-vibration performance and the material cost by analyzing and comparing multiple candidates of cushioning performance and anti-vibration performance.

**キーワード** : 包装、緩衝包装設計、振動、シミュレーション、マルチボディダイナミクス

**Keywords** : Packaging, Cushioning Package Design, Vibration, Simulation, Multibody Dynamic

\*ティ・エス・ケイ株式会社 〒939-3548 富山県富山市三郷9番地 Tel : 076-478-5550  
TSK Corporation, 9, Sangou, Toyama 939-3548, Tel : 076-478-5550

\*\* 神戸大学 輸送包装研究室 〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1

Kobe University, 5-1-1, Fukaeminami, Higashinada-ku, Kobe 658-0022, Japan

連絡者 (Corresponding author) : cho@tsk-corp.jp (Qi ZHANG)

## 1. 緒言

輸送中の大きな物理的ハザードとして衝撃と振動が挙げられ、それらのハザードから製品を守るため、包装設計が行われている。設計した包装品の緩衝性能と防振性能は、それぞれ落下試験と振動試験で確認されており、包装品の緩衝性能については、実験結果を基にしたクッションカーブを利用した緩衝材の厚さと受圧面積が採用されるため、試験結果を予測できる。しかし防振性能については、その都度振動試験で確認せざるを得ず、試験不合格による再設計が問題になっている。近年、製品自身の薄物化、軽量化が進んでいる一方、包装に対する使用量の削減も同時に求められている。この影響で、輸送中の衝撃のみならず、振動による品質問題も増えている傾向が見られる。そこで、本研究では「ハイブリッド緩衝防振包装設計」を提案する。これは、緩衝包装設計と防振包装設計を並行して行う<sup>1)</sup>のが特徴であり、防振包装設計を行う際に数値シミュレーションを援用ツールとして使用する。

製品設計の援用ツールとして使われている数値シミュレーションとしては、有限要素法がよく用いられている。ただし有限要素法は、材料物性パラメーターを決定していく手順が明確ではなく、通常の包装設計業務として利用するためにはシステムとして使い易いように工夫する必要があると感じる。一方、マルチボディダイナミクスも製品設計援用ツールとして用いられており、これはモデルが単純なだけに取り扱いが簡便であり、包装設計者に広く利用されることが期待できる。そこで、本研究では通常の包装設計業務に数値シミュレーションを活かすことを目的とするため、

マルチボディダイナミクスを採用し、解析ソフトとして数多くの実績がある Maplesoft 社の MapleSim<sup>TM2)</sup> を使用する。

## 2. 緩衝防振包装設計

### 2.1 現状の緩衝包装設計

緩衝包装設計は、Fig. 1 のような手順で実施され、緩衝設計後の包装品の振動応答について、「製品が振動試験で不具合がないか」を確認するのが普通である。すなわち、これまでの緩衝包装設計では、落下試験での結果はある程度予測できるものの、振動試験の結果は予測されにくいのが現状である。従って、振動試験で製品の振動易損度を超えた場合、「緩衝包装設計」のステップに戻り、再設計する必要がある。近年包装設計に短い設計リードタイムが一般的に求められてきたため、上記の問題による時間ロスや業務の展開に大きな支障が出ており、解決策を見出すのが急務である。

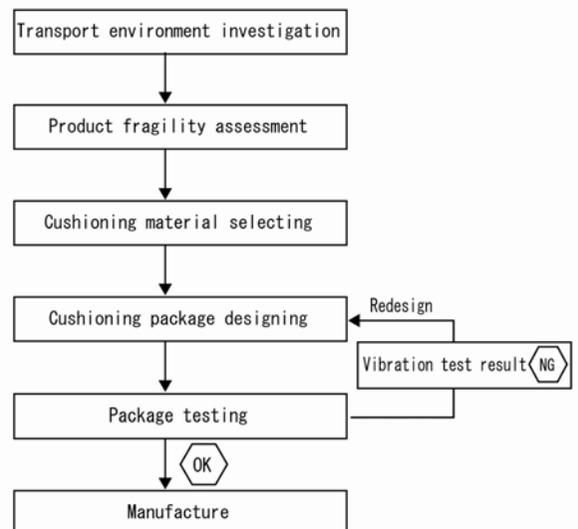


Fig.1 The simplified flowchart of traditional cushioning package design

## 2.2 緩衝防振包装設計フロー

2.1 で述べた問題を解決するため、張ら<sup>1)</sup>は、緩衝防振包装設計 (Fig. 2) を提案している。

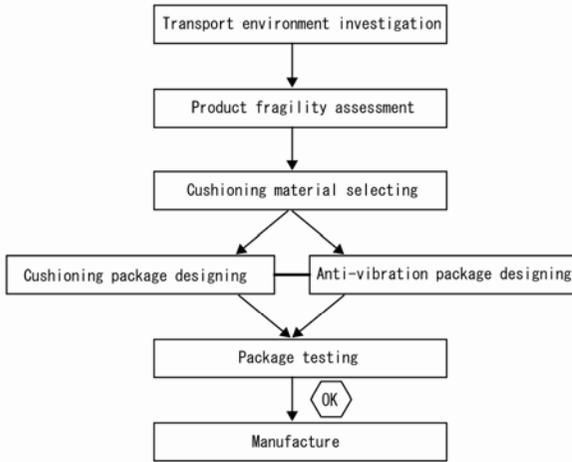


Fig.2 The simplified flowchart of cushioning/damping package design<sup>1)</sup>

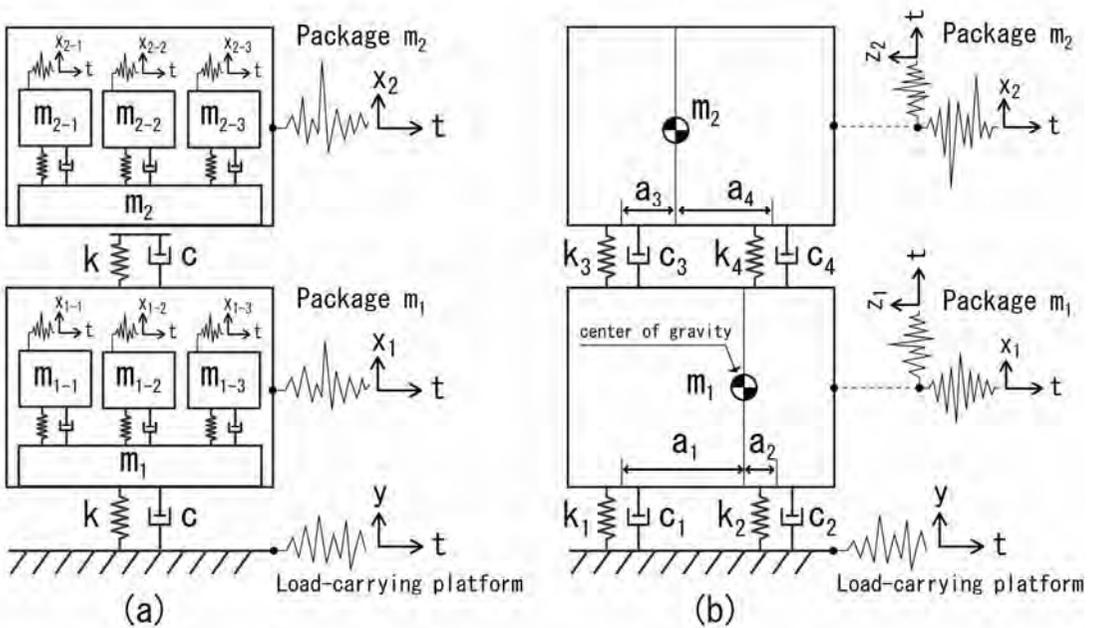
現状の緩衝包装設計との違いは、「緩衝包装設計」と「防振包装設計」を並行して行うことであり、従って「包装試験」のステップに含まれている落下試験と振動試験の両方の試験結果を予測できるようになる。

## 3. ハイブリッド緩衝防振包装設計

### 3.1 マルチボディダイナミクス

マルチボディダイナミクスによる数値シミュレーションのメリットの一つとして、比較的単純なモデルで複雑な構造体の挙動を確認できることであり、自動車分野において、既に実用的な解析が行えるようなレベルまで至っており、幅広く利用されている<sup>2)</sup>。

Fig. 3 は、2 段積みされた包装品について、マルチボディダイナミクスとしてモデル化し



(a) Single-Degree-Of-freedom (SDOF) model with small components inside,  
 (b) Multi-Degree-Of-Freedom (MDOF) model with mass eccentricity

Fig.3 Packages Models of Multibody Dynamics

た例を示す。(a)は、多くの内容品や部品を含んだ包装品が2段積みされている例であり、2段積みされた包装品が跳ね上がりを含む1自由度振動をしながら包装内容品または部品に振動が伝わっていく状況を示している。また(b)は、偏重心の段積み包装品の例であり、系の入力(衝撃・振動)は垂直方向の1軸のみであるが、包装品は加振方向以外にも動く多自由度振動<sup>3)</sup>へと拡張している。本研究では、マルチボディダイナミクスによる数値シミュレーションの包装分野における活用の基礎段階として、比較的単純なモデルから着手する。

Fig. 4に本研究で利用する包装品のモデルを示す。ここで、モデルの質量を $m$ 、バネ定数を $k$ 、減衰係数を $c$ とする。このモデルは線形バネ-ダンパー-質量系として考慮し、粘性減衰モデル(VD model: viscous damp model)とも呼ばれ、Zhongら<sup>4)</sup>はVD modelによっても包装品の動的挙動を比較的良好に再現できることを示している。

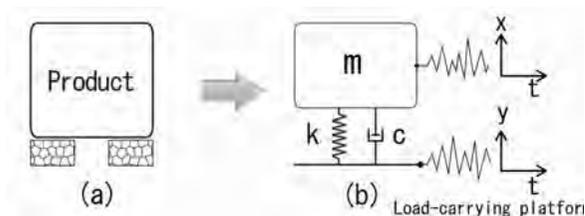


Fig.4 The viscous damp model (VD model)  
(a) Cushioned Package, (b) VD model

### 3.2 ハイブリッド緩衝防振包装設計フロー

Fig. 5は、ハイブリッド緩衝防振包装設計フローを示している。まず、緩衝材の種類・初期厚さ・受圧面積は、従来の方法と同様に緩衝材の動圧縮試験によって得られたクッ

ションカーブにより仮決定する。それに対応した緩衝材の振動伝達特性(正弦波振動試験などにより求めておく)となるバネ定数と減衰係数(シミュレーション同定した結果)を数値モデルに代入し、モデルの振動応答を計算する。得られた振動応答が、設計条件(包装内容品の蓄積疲労値など)に適合するか否かを判定し、過大な振動応答が予測されれば、緩衝材の再設計を行うという手順となる。従って、包装試作品による振動試験を省略できるメリットがある。

## 4. ケーススタディー

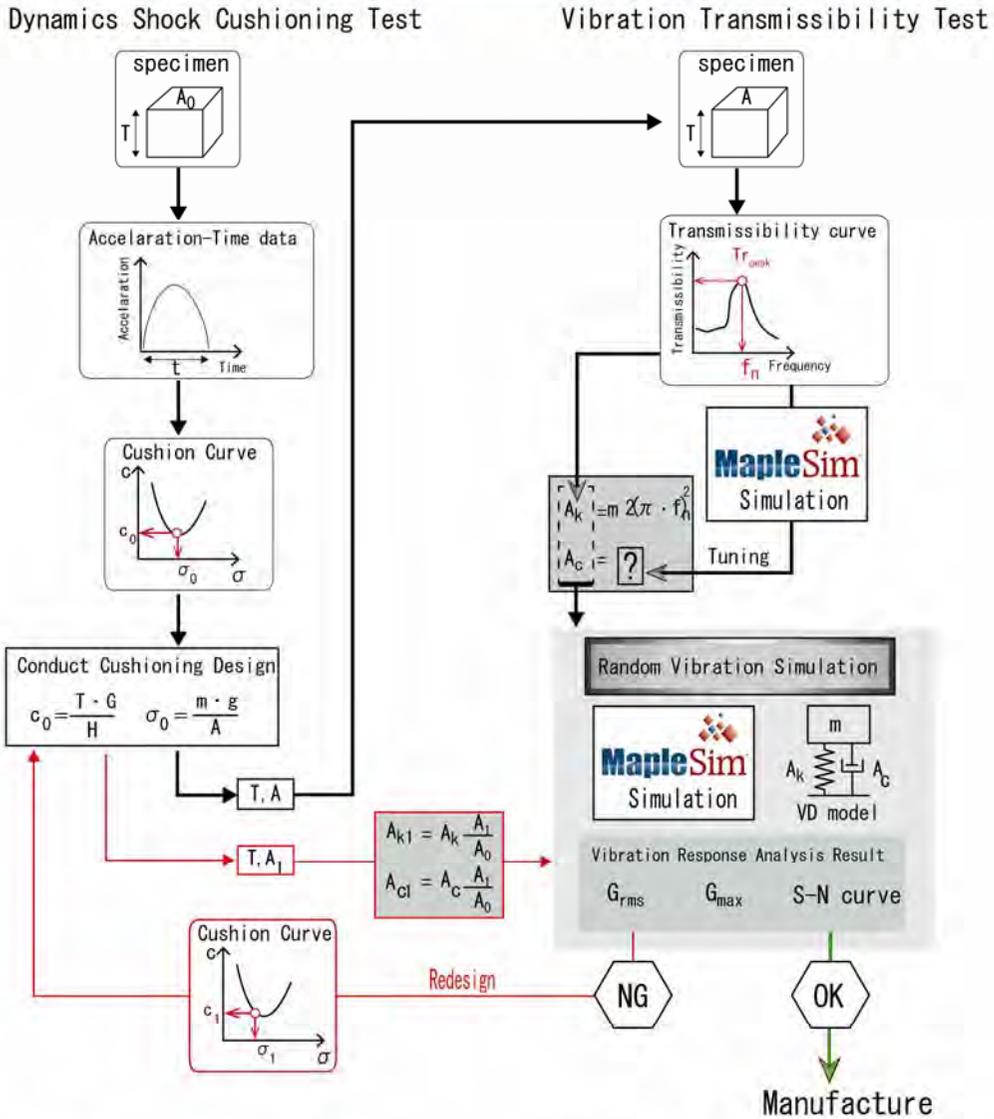
### 4.1 条件設定

ハイブリッド緩衝防振包装設計の有効性を理解するためのケーススタディーとして、加速度計測装置(DER1000:神栄テクノロジー(株))を内蔵した製品ダミー(質量4kg:木製:Fig. 6参照)について検討する。

使用する緩衝材は発泡ポリエチレン(エペランXL®38倍発泡:㈱カネカ)、落下高さ60cm、入力振動の加速度パワースペクトル密度(PSD)がFig. 7で示され、加速度衝撃限界値を60Gと想定する。

Fig. 8 (d)は、緩衝材のクッションカーブであり、加速度限界条件より緩衝材の初期厚さは4cmとなり、緩衝材の受圧面積は静的応力の範囲(0.033~0.090kgf/cm<sup>2</sup>)より121~44.4cm<sup>2</sup>の範囲となる。ここでは、静的応力範囲の低応力限界(×印)と高応力限界(▲印)およびクッションカーブが極小値となる応力(●印)の3種類の緩衝材をダミー底面に施した場合(Fig. 8 (a) (b) (c)参照)について検討する。

# Flowchart of Hybrid Cushioning Package Design



$A, A_0, A_1$ : Bearing area       $m$ : Mass       $A_k, A_{k1}$ : Spring constant       $A_c, A_{c1}$ : Damping coefficient  
 $T$ : Thickness       $G$ : Allowable peak acceleration      S-N curve: Stress-Number of cycles to failure curve  
 $c, c_0, c_1$ : Cushion factor       $g$ : Gravitational acceleration       $G_{rms}$ : Root-mean-square g-value of vibration response  
 $\sigma, \sigma_0, \sigma_1$ : Stress       $f_n$ : Natural frequency       $G_{max}$ : Maximum g-value of vibration response  
 $H$ : Drop height       $Tr, Tr_{peak}$ : Transmissibility      VD model: Viscous damp model

Fig.5 The flowchart of hybrid cushioning/damping package design



Fig. 6 Dummy Product

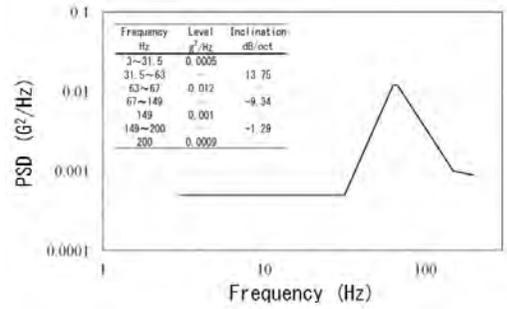
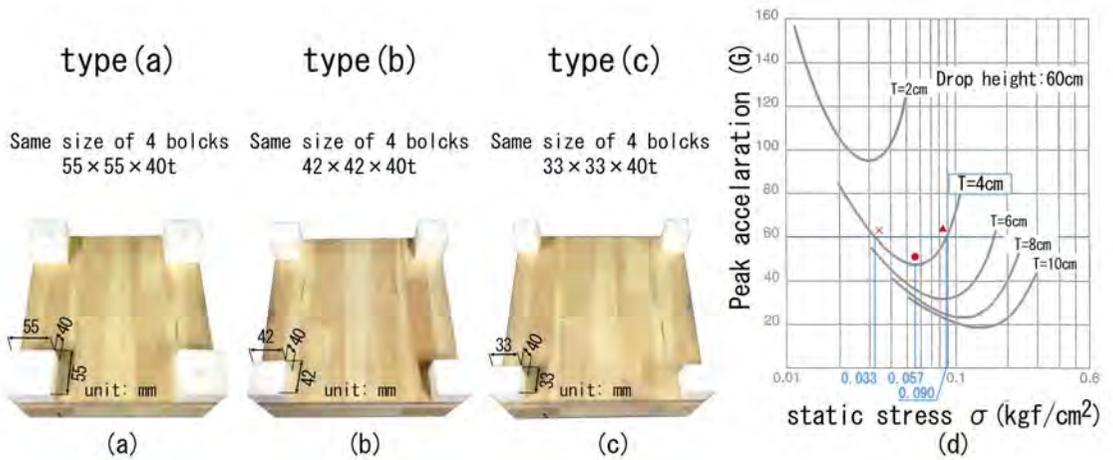


Fig. 7 PSD of Assumed transport environment



(a)  $\sigma = 0.033 \text{ kgf/cm}^2$  (b)  $\sigma = 0.057 \text{ kgf/cm}^2$  (c)  $\sigma = 0.090 \text{ kgf/cm}^2$  (d) cushion curve of Eperan™ XL38

Fig. 8 Cushion curve and dummies based on selected stresses



Fig. 9 Vibration transmissibility test

ネ定数を代入しておき、固有周波数である 60Hz のときの振動伝達率が 8.5 となるように減衰係数をチューニングしていく。その結果、**Fig. 8 (a)** で示されるダミー包装品の場合、 $A_c$  は 185 N·s/m となる。同様の方法で、**Fig. 8 (b) (c)** のダミー包装品についてもバネ定数と減衰係数を求めた結果を、**Table 1** に示す。

Table 1 The  $A_k$  and  $A_c$  used in the simulation

	$A_k$ (kN/m)	$A_c$ (N·s/m)
type (a)	568	185
type (b)	278	110
type (c)	216	98

### 4.3 振動シミュレーション

ダミー包装品の振動応答を予測するため、シミュレーションを行う。**Fig. 11** は、**Fig. 7** で示される入力振動 PSD (Grms=0.76G) のフーリエ逆変換処理によって生成された加速度時系列とタイプ (a) のダミー包装品の応答加速度時系列を示す。同様にタイプ (b) (c) についてもシミュレーションを行い、応答加速度の実効値を求めた結果を **Table 2** に示す。また、**Table 2** には、同一 PSD でのランダム振動実験による結果も併せて記載している。

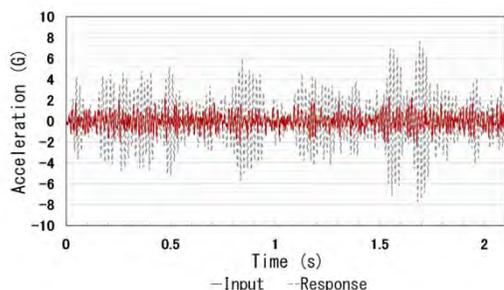


Fig.11 The vibration input and vibration response of type (a)

Table 2 The results of actual vibration test and vibration simulation

	Grms of actual vibration test (G)	Grms of vibration simulation (G)
type (a)	2.24	2.38
type (b)	0.98	1.12
type (c)	0.57	0.81

これよりシミュレーションの結果は実験値よりも大きいのが、この理由は、シミュレーションでは 1 自由度系として扱われているものの、実験による応答振動は上下方向以外にも微小な振動がみられる<sup>3)</sup> ことが一因である。

### 4.4 緩衝と防振が両立する静的応力

**Table 2** に示されるように、加速度衝撃限界値である 60G を下回る静的応力範囲で、想定される入力振動に対して、包装内容品の振動応答はさまざまである。**Table 2** のような振動応答となる場合、低応力側 (タイプ (a)) では、振動応答が極端に大きく、緩衝材の使用量も多くなるために明らかに採用できない。タイプ (b) と (c) を比べると、タイプ (b) では最大衝撃値が 60G 以下に抑えられ、必要以上の緩衝能力があり、より安全側であるものの、タイプ (c) よりも振動応答がやや大きく緩衝材の使用量も多くなる。したがって、緩衝能力に安全余裕を見込む必要がない場合は、防振効果をもっとも優れ、かつ緩衝材の使用量が最も少ないタイプ (c) を採用すべきである。同様に、入力振動条件が異なれば、緩衝能力に適合する静的応力範囲での振動応答特性も異なるので、シミュレーションにより事前に応答振動特性を把握しておけば、振動試験の結果による設計変更の手間がなくなる。

## 5. まとめ

ここでは、マルチボディダイナミクスによる数値シミュレーションを援用ツールとして設計に組み込んだ、ハイブリッド緩衝防振包装設計の方法論を提案した。実際に振動試験を実施しなくても振動応答を数値的にある程度評価できるようになるため、設計段階で緩衝機能・防振機能・省材料の3つの要素を同時に満足する適正包装条件を見出すことができる。

緩衝材の緩衝能力は、**Fig. 8 (d)** のようなクッションカーブがデータベースとして使用されることが一般的である。それに加え、緩衝材の振動応答特性を把握するため、静的応力別にバネ定数と減衰係数の値が必要である。ここでは、便宜的にそれらの定数は振動試験によって求めているが、実際の設計局面では、現実的ではなく、あらかじめ緩衝材ごとにそれらの係数を、静的応力別に求めておく必要がある。

また、本研究ではマルチボディダイナミクスによる数値シミュレーションの包装分野における活用の第一段階であり、比較的単純なモデルでの応用事例を提案したが、今後はより実際の包装形態・物流形態に近い複雑なモデルづくりとその応用方法の検討が必要である。

### <引用文献>

- 1) 張ら、日本包装学会、第22回年次大会予稿集、56 (2013)
- 2) MapleSim™ Model Gallery,  
[http://www.maplesoft.com/products/maple\\_sim/modelgallery/detail.aspx?id=66#](http://www.maplesoft.com/products/maple_sim/modelgallery/detail.aspx?id=66#)  
(2014年6月1日)

- 3) 津田和城、日本包装学会、第22回年次大会予稿集、152 (2013)
- 4) Chen ZHONG and Katsuhiko SAITO, 日本包装学会誌、19 (2), 123 (2010)

(原稿受付 2014年6月3日)

(審査受理 2014年8月8日)