貨物落下に対する最適緩衝設計手法の応用

第3報:製品の重心位置が緩衝材の形状に及ぼす影響

中嶋隆勝* 寺岸義春* 高田利夫* 野上良亮*

An Application of the Optimum Cushioning Design Method for Drop of Packaged Freight

The 3rd Report : Effect of the Position of Product's Center of Gravity on the Shape of Cushioning Materials

> Takamasa NAKAJIMA*, Yoshiharu TERAGISHI*, Toshio TAKADA*, Ryosuke NOGAMI*

We developed the optimum cushioning design method for the product whose center of gravity was not at its center. In addition, the effect of the position of the product's center of gravity on the optimum shape of cushions calculated by this newly developed design method was investigated. The main results obtained are as follows:

(1) The position of the center of gravity of the product without any protuberances and any steps does not affect the optimum thickness and the optimum volume of cushion, the area of corrugated fiberboard and the cost of packaging materials.

(2) The volume of cushion and the cost of packaging materials increase monotonically with shifting the center of gravity far from the center of the product with a protuberance. But, if the thickness of cushion is minimized, the position of the center of gravity does not affect the thickness of cushion.

(3) The volume of cushion and the cost of packaging materials increase monotonically with shifting the center of gravity from the concave side to the convex side of the product with a step.

Keywords : Package, Optimum cushioning design, Dropping shock, Center of gravity, Strength of product, Cushion

重心位置が偏った製品に対する最適緩衝材設計手法を開発した。また、製品の重心位置が緩衝材の最適 形状などにどう影響するかを本手法による設計のシミュレーションによって調べた。その結果、得られた 主な結論を示す。

(1) 突起物も段差もない製品の場合、重心位置が変化しても緩衝材の厚さ及び緩衝材の使用量、段ボール の使用量、包装材料費はあまり変化しない傾向が確認できた。

(2) 突起物を有する製品の場合、緩衝材の使用量及び包装材料費は重心が製品中央から遠ざかるにつれて 単調に増加する傾向が確認できた。ただし、緩衝材の厚さを最小化した場合、緩衝材の使用量はあまり変 化しない。

(3) 段差を有する製品の場合、緩衝材の使用量及び包装材料費は、製品の重心位置が製品の凹側から凸側 に近づくにつれて単調に増加する傾向が確認できた。

キーワード:包装、最適緩衝設計、落下衝撃、重心、製品強度、緩衝材

大阪府立産業技術総合研究所(〒550大阪府大阪市西区江之子岛2-1-53): Osaka Prefectural Industrial Technology Research Institute, 2-1-53, Enokojima, Nishi-ku, Osaka-shi, Osaka, 550

1.緒 言

流通過程において使用される包装材料を適 正な量に削減することは、企業の利潤追求の 目的だけでなく、環境保護、省資源などの観 点から重要な課題である。

著者らは、緩衝材の使用量を適正化するた めの研究^{い~6)}を行ってきた。前報⁶⁾ 及び前々 報⁰ では、段差を有する製品及び突起物を有 する製品についての最適緩衝設計手法を報告 した。

本研究では、テレビなどのように段差があ るだけでなく、その重心の位置が偏った製品 (ブラウン管のテレビの場合、画面側に重心 が偏っている)について、設計の制約条件 (製品強度、製品の受け部の面積など)を満足 する範囲内で、最適化の目標(緩衝材の厚さ の最小化、緩衝材の使用量の最小化、包装材 料費の最小化)が達成できる緩衝材形状の最 適設計手法を開発した。また、本手法による 設計のシミュレーションによって、製品の重 心位置が緩衝材の最適形状などに及ぼす影響 について検討した。

記号表

- A: 緩衝材の受け面積 (cm²)
- t:緩衝材の厚さ(cm)
- e:緩衝材の単位体積当たり吸収エネルギー (J)
- ε:緩衝材の最大ひずみ(%)
- σ:緩衝材に発生する最大応力(Pa)
- M:製品の質量(kg)
- M₁: 製品の受け部 I 側にある1つの緩衝材 が支える製品の質量を表す(kg)
- M₁:製品の受け部Ⅱ側にある1つの緩衝材

が支える製品の質量を表す(kg)

- α:製品に発生する衝撃加速度(m/s²)
- g:地球の重力加速度(m/s²)
- G: aをgで割ることによって無次元化さ れた衝撃加速度
- X_P:製品にある実起物の長さ (cm)
- X_s:製品にある段差 (cm)
- H:貨物の落下高さ(cm)

添字

- a:許容値を表す
- I:製品の受け部Iまたは製品の受け部I
 側にある緩衝材を表す
- Ⅱ:製品の受け部Ⅱまたは製品の受け部Ⅱ
 側にある緩衝材を表す

2. 最適緩衝設計手法

2.1 設計変数及び最適化目標

実際に緩衝材を設計する際、輸送環境や製品 強度だけではなく、製品の形状などを考慮し て、緩衝材の詳細な寸法を決定しなければな らない。しかし、ここでは簡単化のため前 報⁵⁰ 及び前々報⁴⁰ と同様、最も緩衝特性に影 響を与える緩衝材の厚さtと面積Aのみを設 計変数とした。

また、前報⁵ 及び前々報⁴ と同様、緩衝材の 厚さ、緩衝材の総使用量、包装材料費(緩衝 材と外装段ボールの材料費の和とした。)を 最適化の目標(目的関数)とし、これらのう ち1つを選択できるようにした。

2.2 モデル化

本設計手法で考えた落下衝撃のモデルを Fig. 1に示す。Fig. 1 (a) は製品に突起物も段差





Fig. 1 (a) Illustration of drop collision modeling of a packaged cargo to include a product without a protuberance and a step

(b) Illustration of drop collision modeling of a packaged cargo to include a product with a protuberance

(c) Illustration of drop collision modeling of a packaged cargo to include a product with a step

もない場合、Fig. 1 (b) は製品に突起物があ る場合、Fig. 1 (c) は製品に段差がある場合 である。このモデル化では以下の条件が仮定 されている。

(1) 包装貨物の落下は製品の底面に対して垂 直方向のみである。

(2) 製品の重心位置はFig. 1の左右にのみ偏 っており、前後方向には偏っていない。

(3)底面の緩衝材についてのみ考え、緩衝材 Iと緩衝材Ⅱをそれぞれ2個ずつ使用するものとする。

(4) 段差がない場合、緩衝材 I と緩衝材 Ⅱの
 厚さは同じであり、段差がある場合、緩衝材
 I (凹側)の厚さは緩衝材 Ⅱ(凸側)の厚さ
 よりも段差分、大きいものとする。

2.3 設計仕様

本システムに入力が必要な仕様を以下のよう に設定した。

- (1) 輸送環境のレベル(落下高さ)
- (2) 緩衝材の特性(応力-ひずみ線図)
- (3) 緩衝材の許容ひずみ (ε)
- (4) 製品の許容衝撃加速度(a. or G.)
- (5) 製品の受け部の強度(σ)
- (6) 製品の外寸法、質量
- (7) 突起物の長さ(X_P)及び段差(X_s)
- (8) 製品の受け部の面積(A.)
- (9) 緩衝材、段ボールの単価
- (10) 重心の位置(M₁/(M₁+M₁))

ここで、(6) 製品の外寸法及び (9) 緩衝材、 段ボールの単価は包装材料費を算出する際に 用いた。 2.4 プログラムの概要

本システムでは、最適緩衝設計手法³⁰を改 良して、最適設計寸法を次のような手順で決 定した。

Fig. 1 (a) 及び (b)、(c) で示したように 製品の各受け部をそれぞれ I、Ⅱで表した。 特に、段差を有する製品の場合、段の凹側を Iとし、凸側をⅡとした。また、受け部 I及 び受け部Ⅱを支える緩衝材はそれぞれ緩衝材 I、緩衝材 IIと表した。

緩衡材 I 及び緩衡材 II が支える製品の質量 をそれぞれ $M_1 、 M_u$ とした。これによって、 重心位置を $M_1 / (M_1 + M_n)$ で表すことがで きる。 $M_1 / (M_1 + M_n)$ が大きければ重心位 置は受け部 I 近くであることを意味し、 $M_1 / (M_1 + M_n)$ が小さければ重心位置は受け部 I 近くであることを意味する。

まず、緩衝材 I 及び緩衝材 II の最大ひずみ ε 、最大応力 σ 、単位体積当たりの吸収エネ μ ギー eがそれぞれ (ε_1 , σ_1 , e_1) (ε_1 , σ_1 , e_1) になるような緩衝材の形状すなわち 厚さと面積の組み合わせにどのようなものが 存在するかを調べる (Fig. 2 (a) の双曲線① 及び Fig. 2 (b) の双曲線⑥)。次に、設計の 制約条件を満足する範囲を調べる (Fig. 2 (a) の②③④⑤及び Fig. 2 (b) の⑦⑧⑨⑩の 範囲)。これらが重なった部分がそれぞれの 緩衝材の設計可能な寸法の集合となる (Fig. 2 (a) の①の太線上及び Fig. 2 (b) の⑥の太 線上)。

さらに、製品の段差を考慮して、上記制約 条件に、次の制約条件を追加しなければなら ない。緩衝材 I の厚さは緩衝材 II の厚さに比 べて段差分厚くする必要がある。よって、次 式が成立しなければならない。



Fig. 2 (a) Design feasible region of cushion I under the restraints



Fig. 2 (b) Design feasible region of cushion II under the restraints



Fig. 2 (c) Design feasible thickness of cushion I and that of cushion II in the case that the product has a step

$$t_1 = t_1 + X_s$$

ここで、Xsは段差を表す。

図示すると、それぞれの緩衡材の厚さは Fig. 2 (c)の棒グラフの太線で示した範囲に なければならない。

Fig. 2 (a) 及び Fig. 2 (b) で示した①~ ⑩の制約条件の内容は次のとおりである。

①及び⑥上の点は、緩衝材の最大ひずみが それぞれε₁、ε₁となるような緩衝材の形状 を表す。また、この曲線は緩衝材が吸収する 全エネルギーと落下エネルギーとが等価であ ることから導き出される。そのエネルギーの 等価式は次式である。

$$A_{1} t_{1} e_{1} = M_{1} gH$$
$$A_{1} t_{1} e_{1} = M_{1} gH$$

ここで、添字Ⅰ、Ⅱはそれぞれ緩衝材Ⅰ、 緩衝材Ⅱを表し、Aは緩衝材の受け面積、tは 緩衝材の厚さ、gは地球の重力加速度、Hは落 下高さを表す。

②及び⑦は製品に発生する衝撃加速度が製品の許容衝撃加速度以下となる制約条件であり、次式で表される。

 $\frac{A_{\mathrm{I}}\sigma_{\mathrm{I}}}{M_{\mathrm{I}}} < \alpha_{\mathrm{a}} \quad , \quad \frac{A_{\mathrm{I}}\sigma_{\mathrm{I}}}{M_{\mathrm{I}}} < \alpha_{\mathrm{a}}$

③及び⑧は緩衝材が座屈しないという制約 条件であり、次式[®] で表される。

$$A_{1} > \left(\frac{4}{3}t_{1}\right)^{2}$$
, $A_{1} > \left(\frac{4}{3}t_{1}\right)^{2}$

ただし、受け面の形状は正方形に近いもの とする。

④及び⑨は緩衝材の面積が製品の受け部の 面積以下となる制約条件であり、次式で表される。

$$A_1 < A_a$$
 , $A_1 < A_a$

⑤及び⑩は製品に突起物がある場合の制約 条件で、突起物が底づきしない条件で次式で 表される。 $t_1 (1 - \varepsilon_1) > X_P$ $t_B (1 - \varepsilon_B) > X_P$

ここで、X_Pは突起物の長さを表す。また、t (1 - ϵ)は緩衝材が最大限に変形した時の厚 さを意味する。

以上の制約条件を満足する範囲内(Fig. 2 (c)の棒グラフの太線で示した範囲)で設計 の目的関数を最も満足する点を求める。その 点は、最大ひずみがε₁、ε₁となる範囲内で の緩衝材の最適形状である。目的関数を包装 材料費とした場合、目的関数が最小となる点 は厚さが最小となる点である。なぜならば、 曲線①及び⑥上の点であれば緩衝材の体積は すべて等しいため、緩衝材の厚さが最小とな る時、必要となる段ボールの量が最小化され 包装材料費が最小となるためである。

上記と同様の理由から、緩衝材の使用量を 最小化した場合の最適解は多数存在する。そ のため、第2の最適化目標として厚さの最小 化を設定することによって、最適解を決定で きるようにした。

以上の作業をさまざまな(ε_1 , σ_1 , e_1)及 び(ε_1 , σ_1 , e_1)に対して行うことによって、 すべての最大ひずみに対する緩衝材の最適設 計寸法が決定できる。

ただし、次の2つの制約条件を満す範囲内 で(ε_1 , σ_1 , e_1)及び(ε_1 , σ_1 , e_0)を変 化させなければならない。

(1) 緩衡材に発生する最大応力が製品受け 部の強度 σ_a 以下でなければならないという 制約条件 $\sigma_1 \leq \sigma_1$ 。, $\sigma_2 \leq \sigma_2$ 。

(2) 緩衝材の最大ひずみが緩衝材の許容ひ ずみ以下でなければならないという制約条件

 $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_a$, $\varepsilon_2 \leq \varepsilon_a$

これは緩衝材の劣化がひどくならないため に設定した条件である。

制約条件によっては、厚さを最小化した場 合、緩衝材 I (凹側)には多数の最適解が存 在する。その時、緩衝材 I (凹側)の最適解 を唯一に決めるため第2の最適化の目標とし て緩衝材の体積の最小化を行うことにした。

以上の手順をFig.3に示す。



Fig. 3 Algorithm for finding the optimum design size of cushions

シミュレーション

本シミュレーションで用いたすべての設計 仕様を以下に示す。ただし、製品の重心位置 が緩衝材の最適形状や包装材料費などにどの ように影響するかを調べるため、重心位置 M₁/(M₁+M₂)をさまざまな値に変えてシ ミュレーションを行った。

- (1) 落下高さ:60cm(底面落下)
- (2) 緩衝材:発泡ポリエチレン(発泡倍率45倍)
- (3) 緩衝材の許容ひずみ:75%
- (4) 製品の許容衡撃加速度:588m/s²(60G)
- (5) 製品の受け部の許容応力: 1.0MPa
- (6) 製品の外寸法: 800×600×600mm
- (7) 製品の質量: 40kg
- (8) 製品の受け部の面積: 1200cm²
- (9) 緩衝材の数:底面に4個(段がある場合 2種類の緩衝材が各2個とする。)
- (10) 包装材料費を最小化する際、緩衝材、段 ボールの単価をそれぞれ3200円/m³、 100円/m²とした。

また、本シミュレーションは①突起物、段 差のない製品、②段差はないが3cmの突起物 を有する製品、③突起物はないが3cmの段差 を有する製品に対して行った。そして、それ らの結果及び考察はそれぞれ4.1、4.2、4.3で 述べる。

4. 結果と考察

4.1 突起物も段差もない製品の場合

Fig. 4より、製品の重心位置が変化しても、 緩衝材の厚さは一定の値となる傾向が確認で きた。この結果から、製品の重心位置が変化 しても、貨物の外寸法はあまり変化しないこ



Fig. 4 Relationship between thickness of cushion I and position of the center of gravity $(M_{\rm I} / (M_{\rm I} + M_{\rm I}))$ from simulation results. This product has no protuberance and no step.

とがわかる。そのため、製品の重心位置は、 段ボールの使用量や貨物の外寸法すなわち倉 庫などでの貨物の保管スペースなどにはあま り影響しないと考えることができる。

Fig. 5より、製品の重心位置が変化しても







Fig. 6 Relationship between area of cushion I and position of the center of gravity $(M_{t} \swarrow (M_{t} + M_{II}))$ from simulation results. This product has no protuberance and no step.

緩衝材の使用量は一定の値となる傾向が確認 できた。また、Fig. 6より、緩衝材Ⅰの受け 面積は緩衝材Ⅰが支える製品の質量M₁に比 例する傾向が確認できた。緩衝材Ⅱについて も同様の結果となった。

以上の結果及び包装材料費の定義から考え て、包装材料費も重心位置には影響されない 傾向があることがわかる。

4.2 3cm の突起物を有する製品の場合

4.2.1 左右対称なグラフについて

例えば、ある製品の $M_1/(M_1 + M_n)$ が 0.1であるときその製品の $M_n/(M_1 + M_n)$ は 0.9である。また、 $M_1/(M_1 + M_n)$ が 0.9の 製品の $M_n/(M_1 + M_n)$ は0.1である。すなわ ち、 $M_1/(M_1 + M_n)$ が 0.1の製品と $M_1/(M_1 + M_n)$ が 0.9の製品を比較すると、製品 の受け部 I と受け部 II とが反対となっている だけで、その他の条件は全く同じである。こ のため、この2つの製品に対して最適設計し た場合、緩衝材の使用量、包装材料費、緩衝 材の厚さは同じ値になる。よって、Fig. 7、 Fig. 9、Fig. 10は左右対称なグラフとなる。 また、同様の理由から、緩衝材 II に関するグ ラフは、緩衝材 I に関するグラフ Fig. 7、Fig. 8、Fig. 11を左右に反転したものと同じであ る。

4.2.2 緩衝材の厚さについて

Fig. 7より、緩衝材の厚さまたは緩衝材の 使用量を最小化した場合、緩衝材の厚さは重 心位置にあまり影響されない傾向が確認でき た。この結果から、貨物の外寸法及び段ボー ルの使用量も重心位置にあまり影響されない ことがわかる。



Fig. 7 Relationship between thickness of cushion I and position of the center of gravity (M₁ / (M₁ + M₈)) from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

4.2.3 緩衝材の受け面積について

Fig. 8より、緩衝材 I の受け面積は、重心 位置が受け部Ⅱから受け部 I に移るにつれて 単調に増加する傾向が確認できた。ただし、 緩衝材の使用量を最小化した場合、重心位置 がM₁/(M₁+M₀) < 0.4の範囲では緩衝材 I の受け面積はほぼ一定の値となる。これは、 重心位置が受け部Ⅱに近づいた結果、緩衝材 Ⅰの形状が座屈する限界となり、受け面積を 十分に削減できなかったためである。



Fig. 8 Relationship between area of cushion I and position of the center of gravity $(M_1 / (M_1 + M_{\pi}))$ from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

4.2.4 包装材料費及び緩衝材の使用量につ いて

Fig. 9及びFig. 10より、重心位置が製品の 中心部 $(M_1/(M_1+M_1) = 0.5)$ から離れる につれて、緩衝材の使用量及び包装材料費は 単調に増加する傾向が確認できた。この理由 は次のとおりである。

重心位置が偏れば、重心から遠い側の緩衝 材が座屈する形状に近づく。そのため、緩衝 材が座屈限界に達すれば、十分に受け面積を 削減できなくなる。よって、重心から遠い側 の緩衝材の体積は増加し、その結果、緩衝材 の総使用量及び包装材料費が増加する。

4.2.5 最大衝撃加速度について

Fig. 11より、緩衝材の厚さを最小化した 場合、受け部Ⅰ(及び受け部Ⅱ)に発生する



Fig. 9 Relationship between volume of the cushions and position of the center of gravity (M₁ ∕ (M₁ + M₁)) from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.



Fig. 10 Relationship between cost of package materials and position of the center of gravity $(M_{I} / (M_{I} + M_{\alpha})$ from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

衝撃加速度は、重心位置にかかわらず製品の 許容衝撃加速度と一致する傾向が確認でき た。一方、緩衝材の使用量を最小化した場合 及び包装材料費を最小化した場合、受け部 I に発生する衝撃加速度は、特に M₁/(M₁+



Fig. 11 Relationship between maximum acceleration I and position of the center of gravity $(M_1 / (M_1 + M_{II}))$ from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

M_n) > 0.2の範囲では、製品の許容衝撃加速 度よりもかなり小さな値となる傾向が確認で きた。この結果から、緩衝材の使用量を最小 化した場合及び包装材料費を最小化した場 合、製品の許容衝撃加速度が本設計仕様値よ り多少小さくても、緩衝材の形状には全く影 響しないことがわかる。上記傾向の理由は以 下のとおりである。

緩衝材の使用量を最小化した場合及び包装 材料費を最小化した場合、制約条件として、 製品の許容衝撃強度よりも突起物が底づきし ない条件の方が厳しい。よって、突起物が底 づきしないように十分な厚さ(体積)の緩衝 材を使用した結果として衝撃加速度が小さな 値となった。

4.3 3cmの段差を有する製品の場合

4.3.1 緩衝材の厚さについて

Fig. 12より、最適化の目標をどれに設定



Fig. 12 Relationship between thickness of cushion I and position of gravity $(M_1 / (M_1 + M_2))$ from simulation results. This product has a step 3cm long.

しても、緩衝材厚さは重心位置にあまり影響 されない傾向が確認できた。この結果から、 貨物の外寸法及び段ボールの使用量も重心位 置にあまり影響されないことがわかる。

4.3.2 緩衝材の使用量について

Fig. 13より、重心位置が凸側(II)から凹 側(I)に移動するにつれて、必要となる緩 衝材の使用量は単調に減少する傾向があっ た。

包装材料費の定義及び段ボールの使用量が 重心位置に影響されないことから、包装材料 費と緩衝材の使用量とは重心位置に対して同 様の傾向を示すことがわかる。

4.3.3 緩衝材の受け面積について

Fig. 14より、緩衡材 I (凹側)の受け面積 は、重心位置が製品の中心から凹側(I)に 移動するにつれて、単調に増加する傾向が確 認できた。また、重心位置が製品の中心から 凸側(II)の範囲では、受け面積はほぼ一定 の値を保つ傾向が確認できた。これは、重心



Fig. 13 Relationship between volume of the cushions and position of the center of gravity (M₁ / (M₁ + M₁)) from simulation results. This product has a step 3cm long.



Fig. 14 Relationship between area of cushion I and position of the center of gravity $(M_1 / (M_1 + M_{\pi}))$ from simulation results. This product has a step 3cm long.

位置が製品の中心から凸側(Ⅱ)にある範囲 では、緩衝材Ⅰ(凹側)は座屈の限界の形状 となっており、受け面積を十分に削減できな かったためである。

Fig. 15より、どの最適化を行った場合で



Fig. 15 Relationship between area of cushion II and position of the center of gravity $(M_1 / (M_1 + M_1))$ from simulation results. This product has a step 3cm long.

も緩衝材Ⅱ(凸側)の受け面積は、重心位置 が凸側(Ⅱ)に近づくほど大きくなり、M₁に ほぼ比例する傾向が確認できた。また、Fig. 12の緩衝材の厚さがあまり変化しない傾向 と併せて考えると、緩衝材Ⅱ(凸側)の体積 も M₁にほぼ比例する傾向があることがわか る。

4.3.4 緩衝材の最大ひずみについて

Fig. 16より、緩衝材 I (凹側)の最大ひず みは、重心位置が凸側(II)から製品のほぼ 中央に移動するまで単調に増加する傾向があ り、その後、重心位置がほぼ中心から凹側 (I)までの範囲では、緩衝材 I (凹側)の最 大ひずみは許容ひずみの制約条件のために、 ほぼ一定の値となる傾向が確認できた。重心 位置が凸側(II)にあるとき、緩衝材 I (凹 側)の最大ひずみが小さな値となったのは、 緩衝材 I (凹側)が座屈限界の形状となり、 十分に体積(受け面積)を削減できなかった ためである。

Fig. 17より、緩衝材Ⅱ(凸側)の最大ひず



Fig. 16 Relationship between maximum strain of cushion I and position of the center of gravity $(M_1 \swarrow (M_1 + M_2))$ from simulation results. This product has a step 3cm long.



Fig. 17 Relationship between maximum strain of cushion II and position of the center of gravity $(M_1 \swarrow (M_1 + M_I))$ from simulation results. This product has a step 3cm long.

みは、重心位置にはあまり影響されない傾向 が確認できた。これは緩衝材Ⅱ(凸側)の体 積(受け面積)をM₁に比例した値にできた結 果である。

4.3.5 最大衝撃加速度について

シミュレーション結果から、製品の凸側 (II)に発生する最大衝撃加速度は、重心位置 にかかわらず、すべて許容衝撃加速度と一致 する傾向が確認できた。また、Fig. 18より、 製品の凹側(I)に発生する最大衝撃加速度 は、許容衝撃加速度よりも十分に小さな値と なる傾向が確認できた。

 $M_1/(M_1 + M_n) < 0.3 の範囲では、重心$ 位置が凸側(II)に近づくにつれて、緩衡材の使用量(Fig. 13参照)が増加しているにもかかわらず、凹側(I)に発生する衝撃加速度(Fig. 18参照)が減少せず、増加する傾向 $が確認できた。これは<math>M_1$ が小さい場合、緩衡 材 I(凹側)が座屈限界の形状となり、受け



Fig. 18 Relationship between maximum acceleration I and position of the center of gravity (M_1 / (M_1 + M_2) from simulation results. This product has a step 3cm long.

面積(体積)を十分に削減できなかったため、 M₁に対してA₁が必要以上に大きくなり、製 品が緩衝材を十分に変形させることができな かったためだと考えられる。

4.3.6 製品が傾く角度について

Fig. 19より、製品の凹側(I)に傾く角度 は、重心位置が凹側(I)からほぼ中心まで の範囲ではほぼ一定の値となるが、その後、 重心位置が凸側(II)に近づくにつれて、単 調に減少し、さらに凸側(II)に近づけば、製 品の傾く方向が逆転し、凸側に傾き始める傾 向が確認できた。これらの理由は以下のとお りである。

製品の傾きは各緩衝材の変形量の差が大き いほど大きい。また、変形量は緩衝材の厚さ と最大ひずみとの積である。すなわち、製品 の傾きは各緩衝材の厚さ及び最大ひずみによ って決定される。ここで、Fig. 12より緩衝 材の厚さは重心位置が変化しても一定となる



Fig. 19 Relationship between slope of the product and position of the center of gravity (M_t ∠ (M₁ + M₁)) from simulation results. This product has a step 3cm long.

傾向がある。また、Fig. 16及びFig. 17よ り、重心位置が製品の中心よりも凹側(I) にある範囲では、緩衝材I(凹側)、緩衝材II (凸側)の最大ひずみは共にほぼ一定となっ ている。よって、製品の傾きはほぼ一定の値 となる。一方、重心位置が製品の中心よりも 凸側(II)にある範囲では、Fig. 17より緩衝 材II(凸側)の最大ひずみはほぼ一定の値と なるが、Fig. 16より緩衝材I(凹側)の最大 ひずみは重心位置が凸側(II)に近づくにつ れて単調に減少している。このため、重心位 置が凸側(II)へ近づくにつれて製品の傾き は凸側方向へ変化していく。

5. 結 論

重心位置が偏った製品に対する緩衝材の最 適な形状を決定する設計手法が開発できた。 また、製品の重心位置が緩衝材の最適形状な どにどのように影響するかを本手法による設 計のシミュレーションを行うことによって確 認できた。その結果、得られた主な結論を以 下に記す。

(1) 突起物も段差もない製品の場合、重心位 置が変化しても緩衝材の厚さ及び緩衝材の使 用量、段ボールの使用量、包装材料費はあま り変化しない傾向が確認できた。

(2) 突起物を有する製品の場合、重心位置が 変化しても緩衝材の厚さ及び貨物の外寸法、 段ボールの使用量はあまり変化しない傾向が 確認できた。また、緩衝材の使用量を最小化 した場合及び包装材料費を最小化した場合、 緩衝材の使用量及び包装材料費は製品の重心 が製品の中心から遠ざかるにつれて単調に増 加する傾向が確認できた。これは突起物があ りなおかつ緩衝材が支える質量が小さくなれ ば、緩衝材の形状は座屈限界に達するためで ある。

(3) 段差を有する製品の場合、重心位置が変 化しても緩衝材の厚さ及び貨物の外寸法、段 ボールの使用量はあまり変化しない傾向が確 認できた。また、緩衝材の使用量及び包装材 料費は、製品の重心位置が製品の凹側(I) から凸側(II)に近づくにつれて単調に増加 する傾向が確認できた。製品の落下衝撃によ る傾きは、重心が製品中央部から凸側(II) に近づくにつれて、凸側方向への傾きが増加 する傾向が確認できた。

<引用文献>

- 1)中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、材料、41(460),28(1992)
- 2) 中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、日本機械学会論文集C編, 59 (558), 624 (1993)
- 3)中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、2(2),85(1993)
- 中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、3(3),141(1994)
- 5)中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、4(2),104(1995)
- 6) Harris, C. H. and Crede, C. E., "Shock and Vibration Handbook 3", Mc Graw-Hill, p.41 • 39 (1961)

(原稿受付 1994年 9月26日) (審査受理 1995年 5月 8日)