

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島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^{1)~6)}を行ってきた。前報⁶⁾及び前々報⁴⁾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)
- M_I: 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)
- M_{II}: 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: α を g で割ることによって無次元化された衝撃加速度
- X_F: 製品にある突起物の長さ (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⁶⁾及び前々報⁴⁾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⁶⁾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

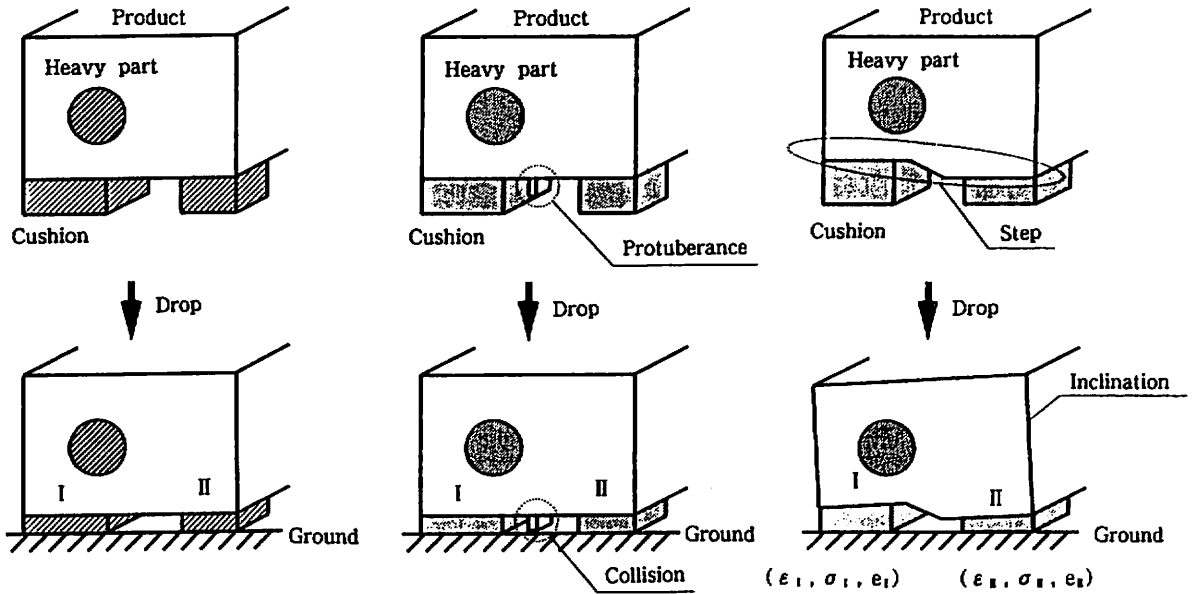


Fig. 1 (a) Illustration of drop collision modeling of a packaged cargo to include a product without a protuberance and a step

(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_s)
- (4) 製品の許容衝撃加速度 (a_s or G_s)
- (5) 製品の受け部の強度 (σ_s)
- (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_s)
- (9) 緩衝材、段ボールの単価
- (10) 重心の位置 ($M_1 / (M_1 + M_2)$)

ここで、(6) 製品の寸法及び (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²⁾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。

緩衝材 I 及び緩衝材 II が支える製品の質量をそれぞれ M_I 、 M_{II} とした。これによって、重心位置を $M_I / (M_I + M_{II})$ で表すことができる。 $M_I / (M_I + M_{II})$ 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、 $M_I / (M_I + M_{II})$ が小さければ重心位置は受け部 II 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ルギー e がそれぞれ $(\epsilon_I, \sigma_I, e_I)$ ($\epsilon_{II}, \sigma_{II}, e_{II}$) 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。

$$t_I = t_{II} + X_s$$

ここで、 X_s は段差を表す。
 図示すると、それぞれの緩衝材の厚さは Fig. 2 (c) の棒グラフの太線で示した範囲に

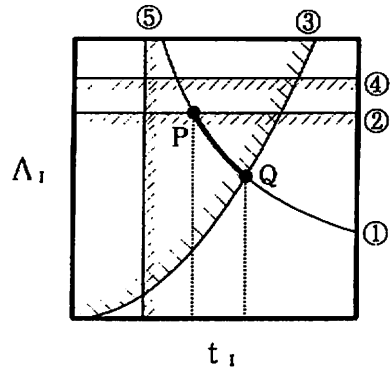


Fig. 2 (a) Design feasible region of cushion I under the restraints

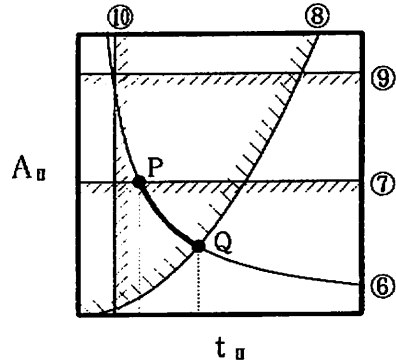


Fig. 2 (b) Design feasible region of cushion II under the restraints

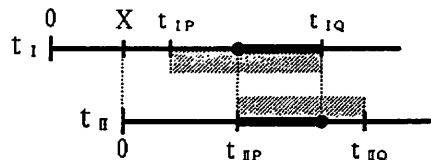


Fig. 2 (c) Design feasible thickness of cushion I and that of cushion II in the case that the product has a step

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 ε_1 、 ε_2 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。

$$\begin{aligned} A_1 t_1 e_1 &= M_1 g H \\ A_2 t_2 e_2 &= M_2 g H \end{aligned}$$

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。

$$\frac{A_1 \sigma_1}{M_1} < \alpha_a, \quad \frac{A_2 \sigma_2}{M_2} < \alpha_a$$

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⁹⁾で表される。

$$A_1 > \left(\frac{4}{3} t_1\right)^2, \quad A_2 > \left(\frac{4}{3} t_2\right)^2$$

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。

$$A_1 < A_a, \quad A_2 < A_a$$

⑤及び⑩は製品に突起物がある場合の制約条件で、突起物が底つきしない条件で次式で表される。

$$\begin{aligned} t_1 (1 - \varepsilon_1) &> X_p \\ t_2 (1 - \varepsilon_2) &> X_p \end{aligned}$$

ここで、 X_p は突起物の長さを表す。また、 $t(1 - \varepsilon)$ 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 ε_1 、 ε_2 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 $(\varepsilon_1, \sigma_1, e_1)$ 及び $(\varepsilon_2, \sigma_2, e_2)$ 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 $(\varepsilon_1, \sigma_1, e_1)$ 及び $(\varepsilon_2, \sigma_2, e_2)$ を変化させなければならない。

(1) 緩衝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 $\sigma_1 \leq \sigma_{1a}, \quad \sigma_2 \leq \sigma_{2a}$

(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

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

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。

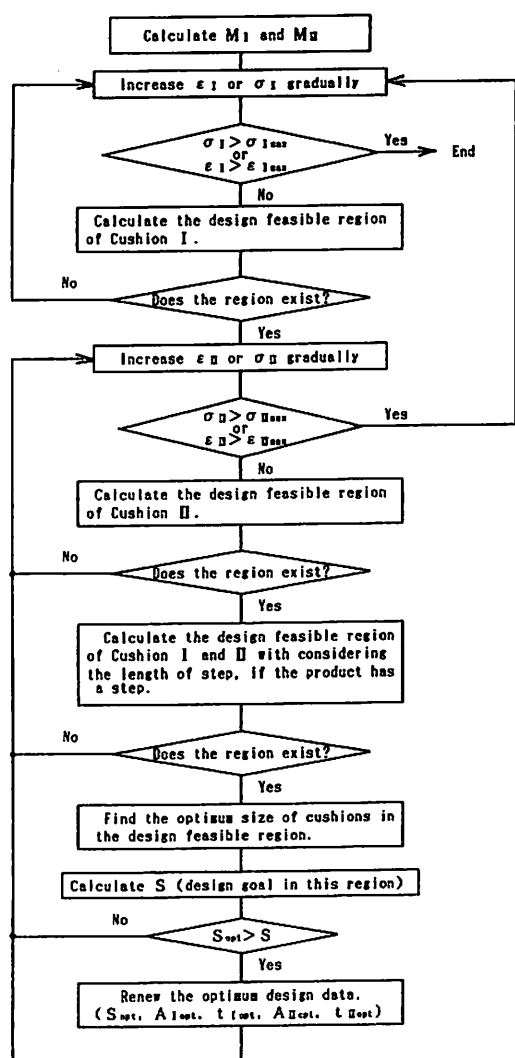


Fig. 3 Algorithm for finding the optimum design size of cushions

3. 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 $M_1 / (M_1 + M_2)$ 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) 製品の許容衝撃加速度：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

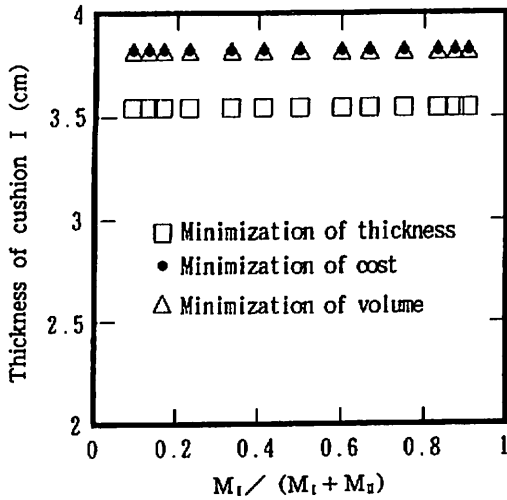


Fig. 4 Relationship between thickness of cushion I and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has no protuberance and no step.

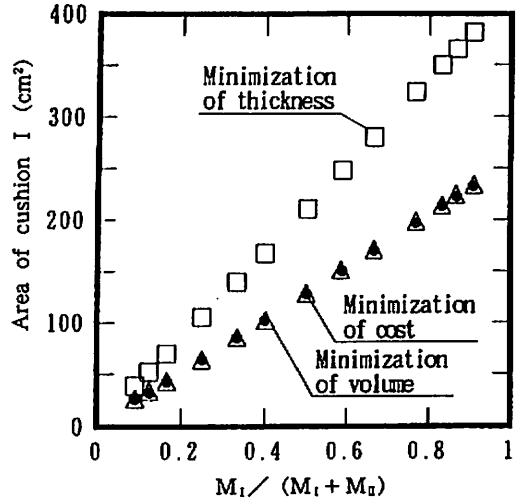


Fig. 6 Relationship between area of cushion I and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has no protuberance and no step.

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

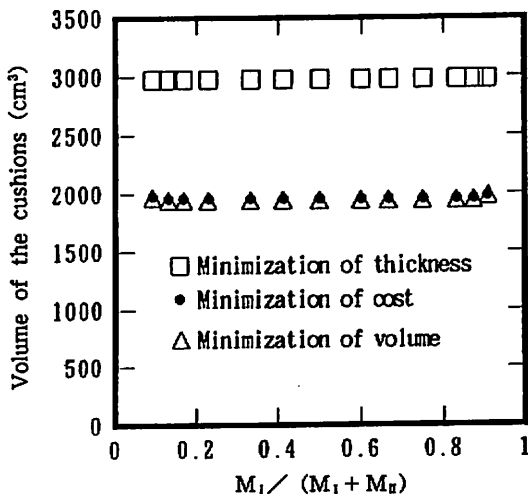


Fig. 5 Relationship between volume of cushions and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has no protuberance and no step.

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 M_1 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 $M_1 / (M_1 + M_2)$ が 0.1 であるときその製品の $M_2 / (M_1 + M_2)$ は 0.9 である。また、 $M_1 / (M_1 + M_2)$ が 0.9 の製品の $M_2 / (M_1 + M_2)$ は 0.1 である。すなわち、 $M_1 / (M_1 + M_2)$ が 0.1 の製品と $M_1 / (M_1 + M_2)$ 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等である。

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。

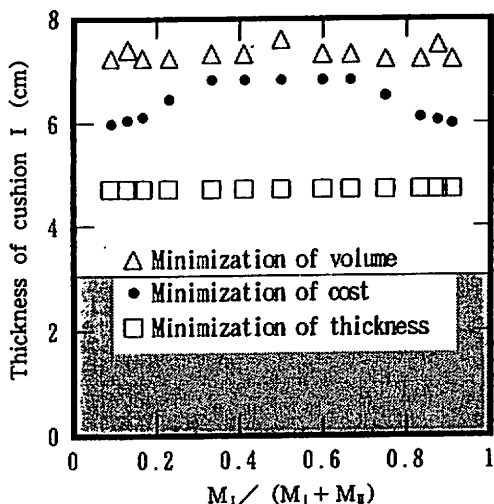


Fig. 7 Relationship between thickness of cushion I and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

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 $M_1 / (M_1 + M_2) < 0.4$ 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。

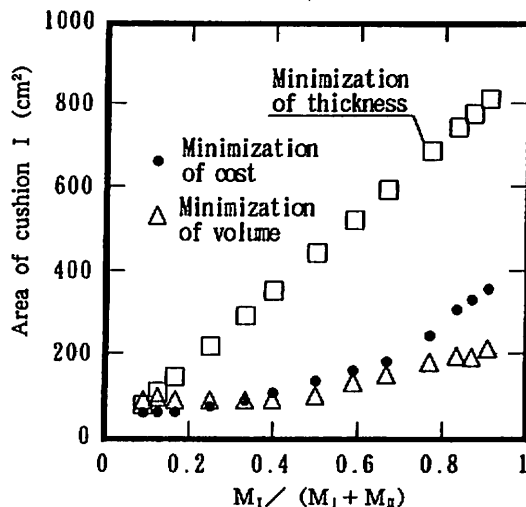


Fig. 8 Relationship between area of cushion I and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

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 ($M_1 / (M_1 + M_2) = 0.5$) 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

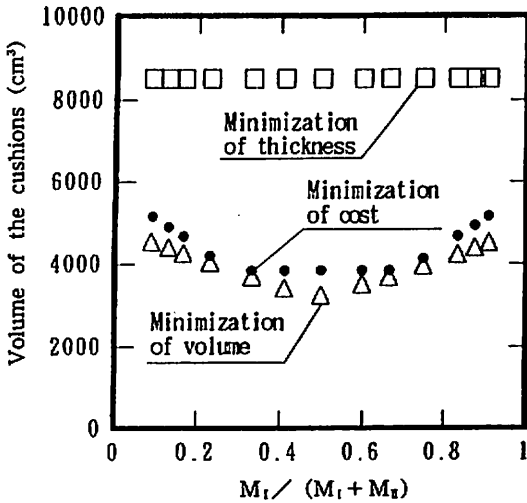


Fig. 9 Relationship between volume of the cushions and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

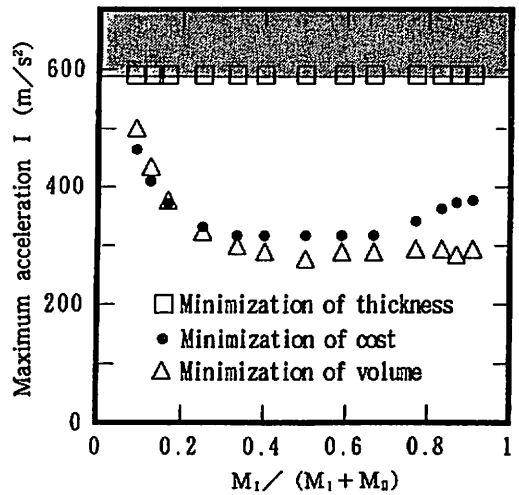


Fig. 11 Relationship between maximum acceleration I and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

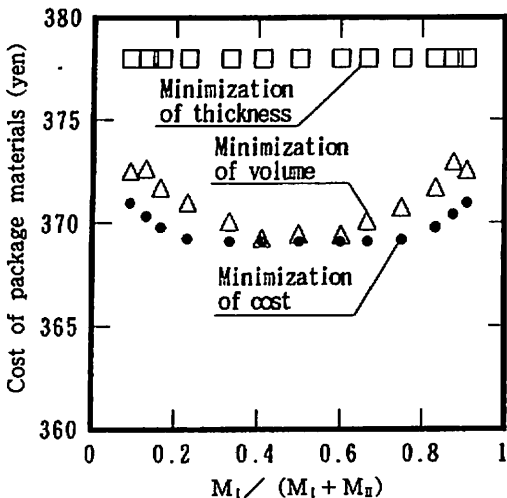


Fig. 10 Relationship between cost of package materials and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a protuberance 3cm long.

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 $M_1 / (M_1 +$

$M_2) > 0.2$ 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つきしない条件の方が厳しい。よって、突起物が底つ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

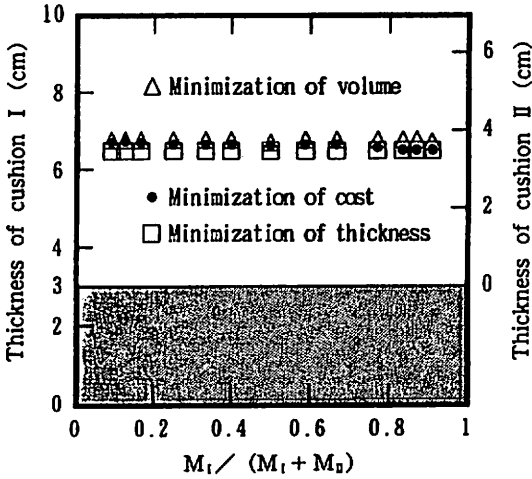


Fig. 12 Relationship between thickness of cushion I and position of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

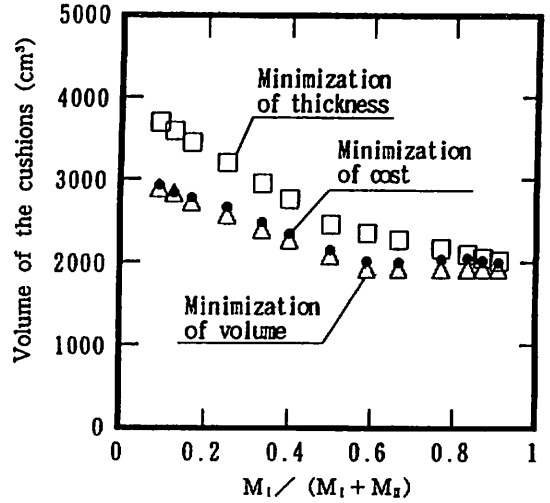


Fig. 13 Relationship between volume of the cushions and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

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、緩衝材 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

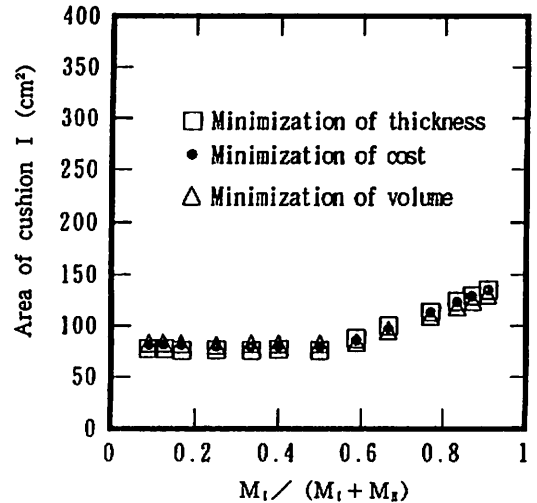


Fig. 14 Relationship between area of cushion I and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_2)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

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

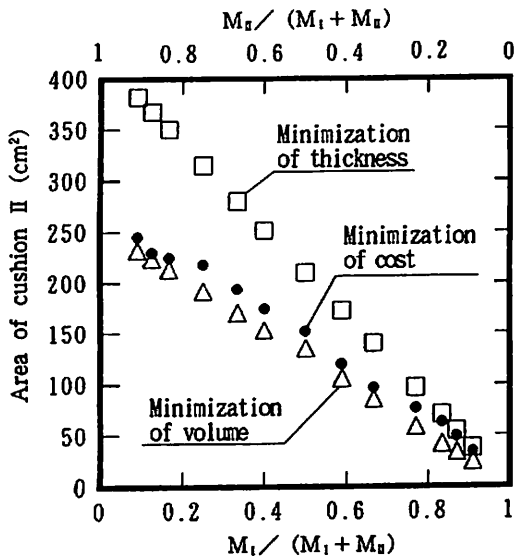


Fig. 15 Relationship between area of cushion II and position of the center of gravity ($M_1/(M_1+M_2)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

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、 M_2 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 M_2 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) の最大ひずみ

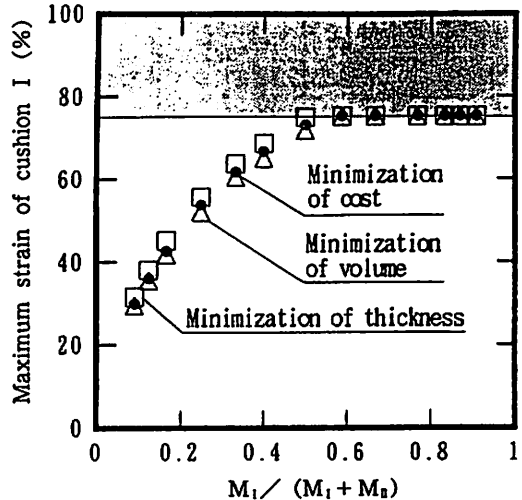


Fig. 16 Relationship between maximum strain of cushion I and position of the center of gravity ($M_1/(M_1+M_2)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

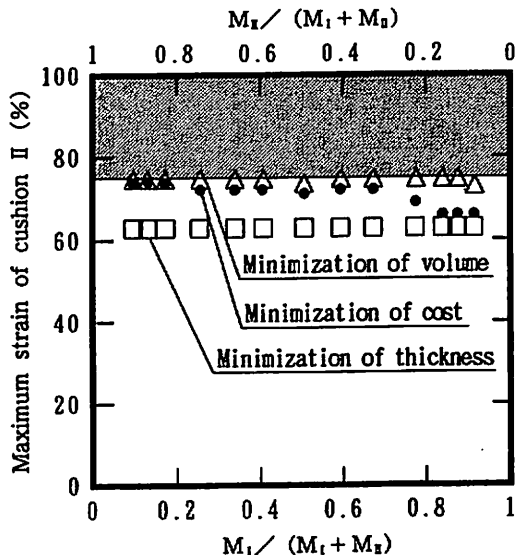


Fig. 17 Relationship between maximum strain of cushion II and position of the center of gravity ($M_1/(M_1+M_2)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

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 M_0 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。

$M_1 / (M_1 + M_0) < 0.3$ の範囲では、重心位置が凸側 (Ⅱ) に近づくにつれて、緩衝材の使用量 (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 M_1 が小さい場合、緩衝材Ⅰ (凹側) が座屈限界の形状となり、受け

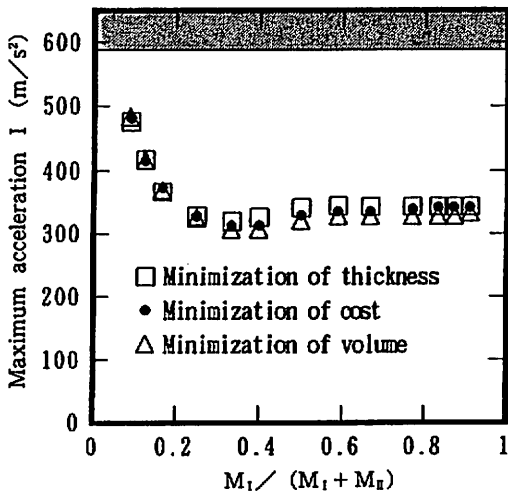


Fig. 18 Relationship between maximum acceleration I and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_0)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

面積 (体積) を十分に削減できなかったため、 M_1 に対して A_1 が必要以上に大きくなり、製品が緩衝材を十分に变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

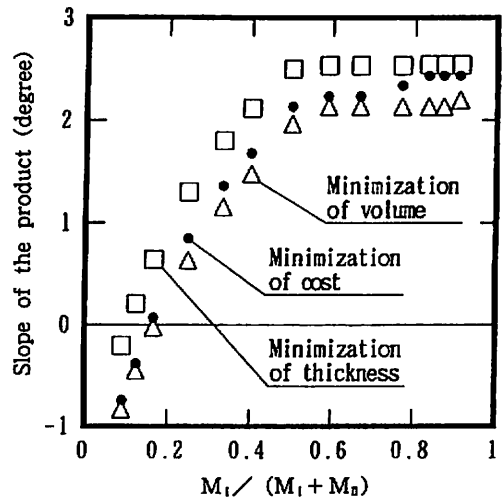


Fig. 19 Relationship between slope of the product and position of the center of gravity ($M_1 / (M_1 + M_0)$) from simulation results. This product has a step 3cm long.

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)
- 4) 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)