

Femtet 入門：梱包材の緩衝理論と解析事例

目次

・座学

1	梱包設計コンセプト	P. 3
2	梱包クッションの役割	P. 4
3	落下による梱包製品の運動	P. 5
4	線形弾性における加速度と時間の関係	P. 6
5	緩衝材（非線形クッション）における重要なパラメータ	P. 7
6	梱包クッションの「衝撃緩衝特性」実測方法	P. 8
7	梱包クッションの具体的な設計方法	P. 9
8	衝撃緩衝特性「 $C_f - S_{max}$ 線図・ $G_{max} - S$ 線図」による設計値の決定	P. 10
	・ Femtet 解析事例「梱包クッション（発泡倍率：40%）の準静的構造解析」	
9	（1）目的・概要	P. 11
10	（2）解析条件	P. 12
11	（3）クッションの圧縮変位と最大主歪	P. 13
12	（4）結論	P. 14

1. 梱包設計コンセプト

梱包設計コンセプト

運搬中の梱包製品における外力（落下）は避けられない為、許容加速度・許容応力以下に抑えることである。



運搬中の梱包製品落下事故（イメージ）

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved.

3

・商品性と製品保護

梱包材も商品の一部であり、外観品質は顧客の印象を左右します。カートンの潰れや汚れは商品の価値を損なう為、外観品質維持が不可欠です。また、製品は輸送距離や時間に関わらず、開梱時に工場出荷時と同等の状態が保たれていることが重要であり、あらゆる物流環境や輸送中の危害から確実に保護しなければなりません。

・生産・物流・販売性への寄与

梱包は各工程の効率を阻害しないことに加え、生産・物流・販売活動を円滑かつ効率的に進めるよう設計される必要があります。

・安全材料とコスト

梱包は高い安全性と信頼性を備え、お客様および取扱者、さらには環境に対しても安全な材料・構造・形態を採用することが求められています。なおかつ、コストも考慮しなければなりません。材料費のみならず、加工・生産・物流・販売・リサイクルを含めたライフサイクル全体でコストを最適化することが重要です。

・省資源・省エネルギー

梱包は必要最小限の材料と部品点数で構成し、容積および質量の最小化を図ることで、資源とエネルギーの効率的利用を実現します。

・廃棄処理と環境問題

梱包は廃棄処理性やリサイクル性を重視し、環境負荷の低減を最優先とします。環境に悪影響を及ぼす場合は、製品の提供そのものの適格性が問われます。

2. 梱包クッションの役割

梱包クッションの役割

梱包クッションは、「外力の緩衝」「集中荷重の分散」「製品の固定」の機能が求められる。

The diagram shows three scenarios of a product falling from a height h :

- 梱包製品の落下衝撃（外力）**: A packaged product falls, and the impact is shown as a single point of contact. The formula $G = \sqrt{\frac{2hk}{W}}$ is provided, with definitions: G : 衝撃値 (Impact value), h : 落下高さ (Fall height), W : 梱包製品重量 (Packaged product weight), k : 衝突面のバネ定数 (Spring constant of the impact surface).
- 裸梱包製品の落下**: An unpackaged product falls, and the impact is shown as multiple points of contact, leading to **破損** (Damage).
- クッション付き梱包製品の落下**: A cushioned product falls, and the impact is shown as multiple points of contact, leading to **クッション機能** (Cushioning function).

裸梱包の場合、 K : 衝突面のバネ定数が大きく、集中荷重が発生し易い為、製品破損が起きる可能性が高くなる。

梱包クッションがある場合、外力の緩衝、集中荷重の分散、製品の固定が出来る為、製品を保護できる。

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved.

製品は工場で作成した後、さまざまな物流手段を経て最終ユーザーへ届けられ、そこで初めて機能が発揮され、ビジネスが成立します。製造場所と消費場所が離れている以上、製品の移動は不可欠です。この輸送過程において、梱包クッションは外的環境からの影響を緩和・分散する役割を担います。その主な機能は「外力の緩衝」「集中荷重の分散」「製品固定」の三つです。

・外力の緩衝

物流中、製品は落下衝撃を受ける可能性があり、その発生自体を完全に防ぐことは困難です。

衝撃の大きさ： G は落下高さ： h および衝突面の剛性： k の平方根に比例し、製品重量： W の平方根に反比例します。クッション材は衝突面の剛性を低減することで、製品に伝わる衝撃を小さくします。

（ G 、 h 、 k の関係式は以下の式を参照のこと - - - 式の求め方は次頁に示します）

$$G = \sqrt{\frac{2hk}{W}}$$

・集中荷重の分散

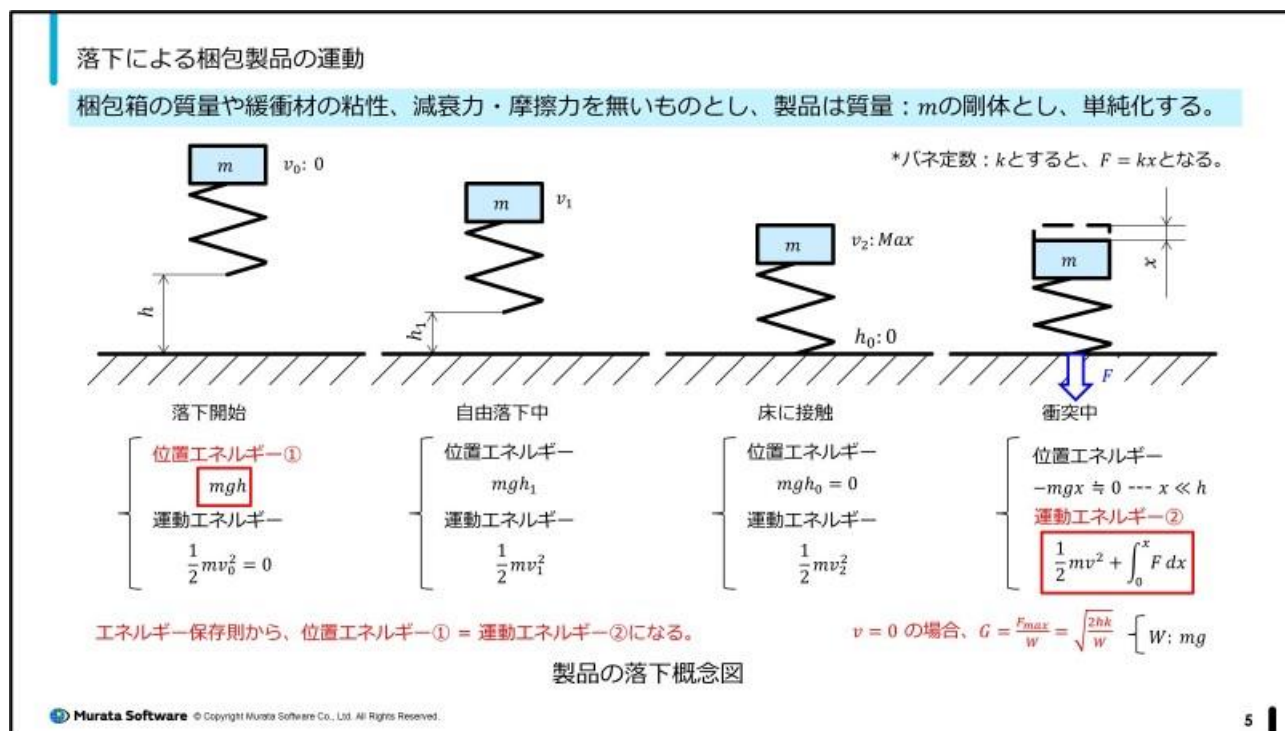
突起やコーナー部が先に衝突した場合、局所的に大きな荷重が作用し、破損が生じやすくなります。

クッション材は接触面を広げ、集中荷重や曲げモーメントを分散します。

・製品固定

製品は通常直方体の箱に収納されますが、製品形状との間に隙間が生じます。この隙間により製品は箱内で移動し、振動や衝撃を受ける為、クッション材は所定位置に保持する機能が求められます。

3. 落下による梱包製品の運動



落下により製品に生ずる最大加速度と緩衝材のひずみの関係を求める解析法を理解するために梱包製品を単純化する必要があります。製品を変形のない質量： m を持った剛体とし、外装箱の質量を無視し、更に緩衝材には粘性による減衰力、摩擦力もないとすると、梱包製品の落下は図のように単純化できます。

緩衝材が直線的弾性を持つとすると、床面接触後の落下による緩衝材の変位（歪量）： x により、質量： m に伝わる力： $F = kx$ になります。（非線形な緩衝材では、 $F = f(x)$ --- 別途、説明します）質量： m の梱包製品が床に衝突している場合、作用している力の関係はニュートンの第2法則により①式になります。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + F = mg \quad \text{--- ①} \quad \left\{ \frac{d^2x}{dt^2} : \text{質量：} m \text{が落下し、緩衝材が} x \text{寸法圧縮されたとき、} m \text{に生じる加速度} \right\}$$

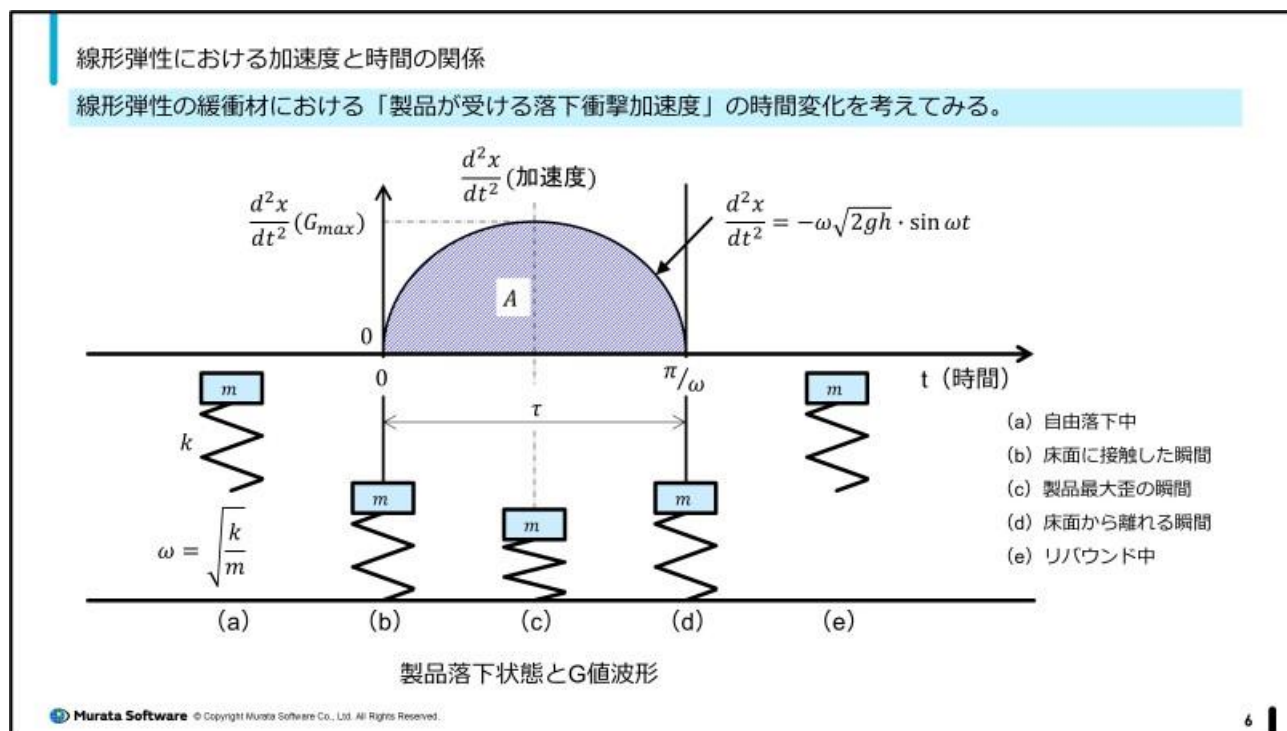
$$\text{① 式を積分すると、} \frac{1}{2} m \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + \int_0^x F dx = \int_0^x mg dx + C \quad \text{--- ②} \quad \left\{ \frac{1}{2} m \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) = \frac{1}{2} mv^2 \right\}$$

次に、梱包製品が床に接触する瞬間を初期条件とすると、 $x = 0$ 、 $\frac{1}{2} mv^2 = mgh$ となり、②式の C は、 mgh になることが分かります。

また、一般的には $x \ll h$ である為、 $-mgx = 0$ とすると、 $\frac{1}{2} mv^2 + \int_0^x F dx = mgh$ --- ③ になります。

そして、 $W : mg$ 、バネ定数： k とすると、衝撃値： $G = \frac{F_{max}}{W} = \sqrt{\frac{2hk}{W}}$ となります。

4. 線形弾性における加速度と時間の関係



線形緩衝材の場合、落下衝撃により製品に生ずる加速度が時間経過により変化していく様子を説明します。落下している梱包製品において、時間変化に対する変位： x は dx/dt であり、これを速度と言います。更に、時間変化に対する速度： v は d^2x/dt^2 であり、これを加速度と言います。

$$\text{質量：} m \text{ の運動方程式は、} m \frac{d^2x}{dt^2} + F = mg \Rightarrow m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = mg \quad \text{--- ④}$$

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ とすると、④式は $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = g$ になります。これを $X = x - \frac{g}{\omega^2}$ 、ラプラス変数： s として、

$$\text{ラプラス変換すると、⑤式になります。} s^2 X(s) - sx(t=0) - \frac{dx}{dt}(t=0) + \omega^2 X(s) = \frac{g}{s} \quad \text{--- ⑤}$$

$$\text{この式を逆ラプラス変換すると、⑥式になります。} x = \sqrt{\frac{W^2}{K^2} + x^2} \cdot \sin(\omega t - \alpha) + \frac{W}{K} \quad \text{--- ⑥}$$

次に、重量による変位（静的変位）： $\frac{W}{K}$ は落下による変位： x に対し、小さいので、無視すると⑦式が求まります。 $x = x \cdot \sin(\omega t) \quad \text{--- ⑦}$ そして、⑦式を時間で二階微分すると、⑧式になります。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega \sqrt{2gh} \cdot \sin(\omega t) \quad \text{--- ⑧} \quad A = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} -\omega \cdot v \cdot \sin(\omega t) dt = [v \cos(\omega t)]_0^{\frac{\pi}{\omega}} = -2v \quad \text{--- ⑨}$$

$$\text{衝撃時間：} \tau \text{ とすると、} A = \int_0^{\frac{\tau}{\omega}} \frac{d^2x}{dt^2} (G_{\max}) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} t\right) dt = \frac{2\tau}{\pi} \frac{d^2x}{dt^2} (G_{\max})$$

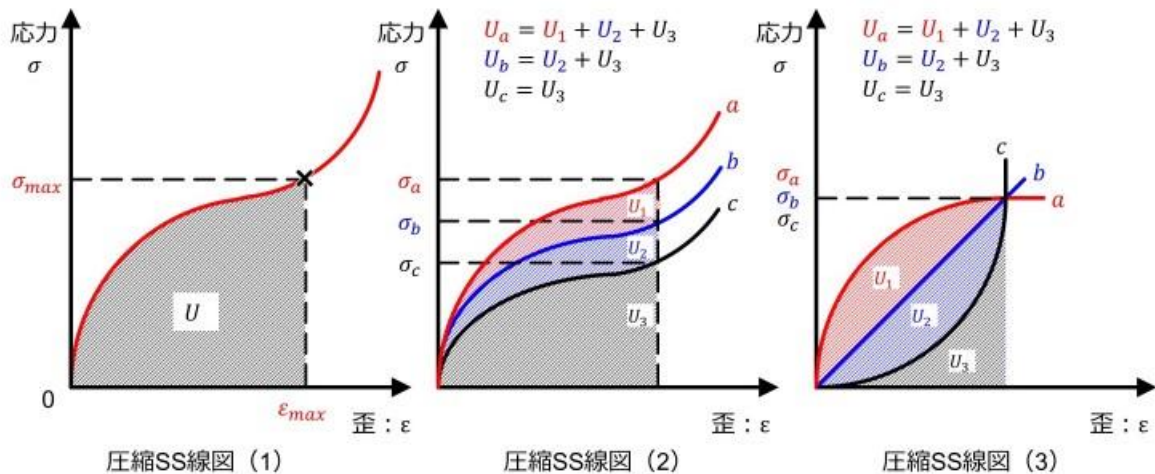
以上から、 $\tau = 44.9\sqrt{h}/G_{\max}$ となります。

例) $h : 500 \text{ mm}$ 、許容 G 値： $35G$ とすると、時間： $\tau \approx 28.7 \text{ msec}$ になります。

5. 緩衝材（非線形クッション）における重要なパラメータ

緩衝材（非線形クッション）における重要なパラメータ

緩衝材設計に必要な3要素は「緩衝係数： C_f 」「製品強度（許容衝撃値）： G 」「保証落下高さ： H 」である。



実際に用いられる発泡スチロールや発泡ポリエチレンフォームは、変位： x に対して非線形特性を示します。緩衝の基本は、落下高さ： h と製品重量： W による位置エネルギー： Wh が衝突により緩衝材を圧縮し、その反力が製品に作用する点にあります。

$$Wh = \int_0^{x_{max}} F dx \quad \{x_{max} \ll h\}$$

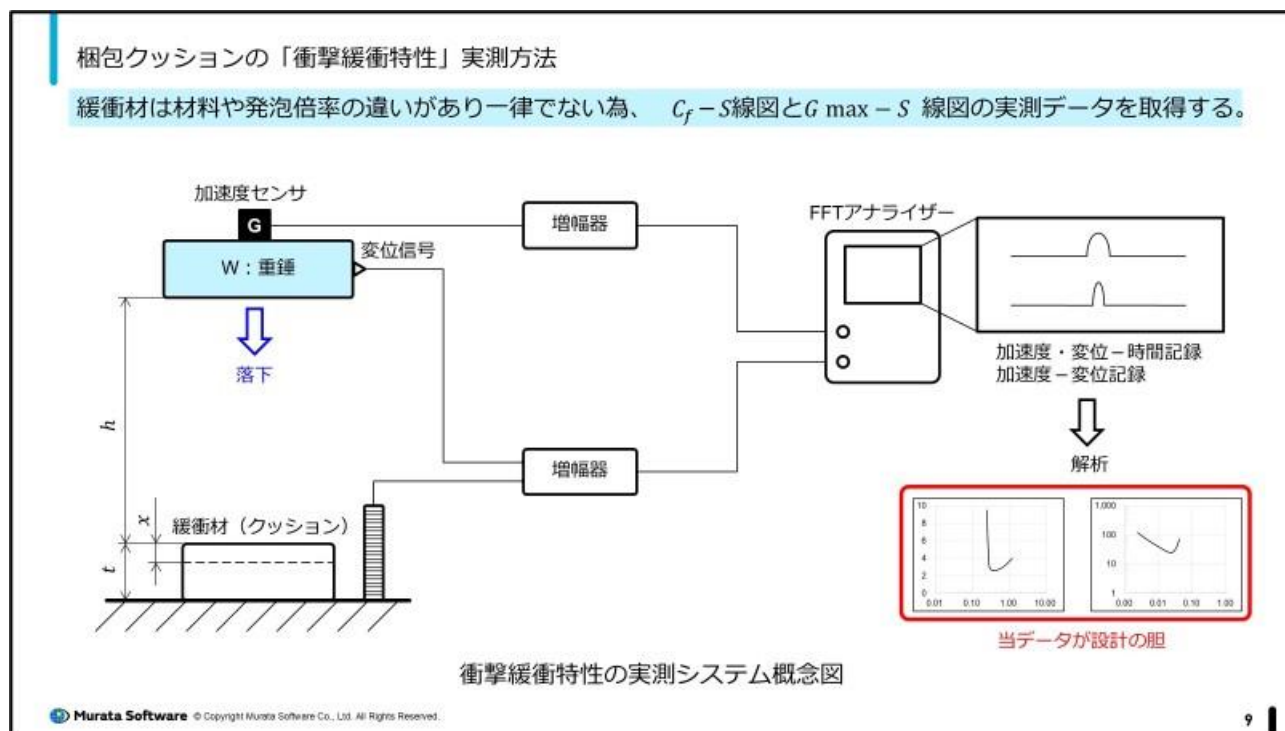
非線形材料では、荷重-変位関係が一次関数とならず、更に厚さや面積により剛性が変化する為、単純な材料定数で特性を表すことが困難です。そこで、形状依存性を除く為、応力 $\sigma = F/A$ を縦軸、歪： $\varepsilon = x/t$ を横軸とした **SS 線図（Stress-Strain）** を用います。

単位体積当たりの歪エネルギー： U を用いると、圧縮エネルギーは $Wh = U \cdot A \cdot t$ --- ⑩となります。設計では U を大きくすれば、接触面積： A や板厚： t を小さくできますが、応力増大により製品破損のリスクも高まります。

最大応力： $\sigma_{max} = WG/A$ --- ⑪ $\{\sigma_{max}$ ：最大応力、 G ：製品に生じる加速度、 A ：緩衝材の接触面積}で表されます。材料比較には緩衝係数 $C_f = \sigma_{max}/U$ --- ⑫ を用い、値が小さいほど緩衝性能は高くなります。必要厚さは次式で整理することが出来て、設計に必要な主要パラメータは落下高さ： h 、許容加速度： G 、緩衝係数： C_f の3つに集約されます。

$$t = \frac{Wh}{UA} = \frac{C_f}{\sigma_{max}} \cdot \frac{Wh}{A} = C_f \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \cdot h = C_f \cdot \frac{h}{G} \quad \text{--- ⑬}$$

6. 梱包クッションの「衝撃緩衝特性」実測方法



本図は、衝撃緩衝特性を実測するシステム概念図です。実測目的は、設計に必要な梱包クッションの機械的性能を得るためです。

前頁で示したように、緩衝材の厚さ： t を求めるために必要なパラメータは落下高さ： h 、製品が破損なく耐えられる許容加速度： G 、緩衝係数： C_f の3つです。

つまり、⑫式で示した $t = C_f \cdot \frac{h}{G}$ を満足するように設計することです。

ここで、重要になるのが、緩衝係数： C_f です。これは、非線形である梱包クッションの実測データが必要になることを意味しています。もし使用する材料の衝撃緩衝特性を把握できていない場合、合理的な緩衝設計を行うことは出来ません。具体的な設計方法の項目でも説明しますが、重要な特性曲線は、緩衝係数： C_f —最大応力： S_{max} 線図と最大加速度： G_{max} —静的応力： S 線図です。実測する試験片は、緩衝材：クッションで、発泡倍率違いやクッション厚違いのデータを取得する必要があります。

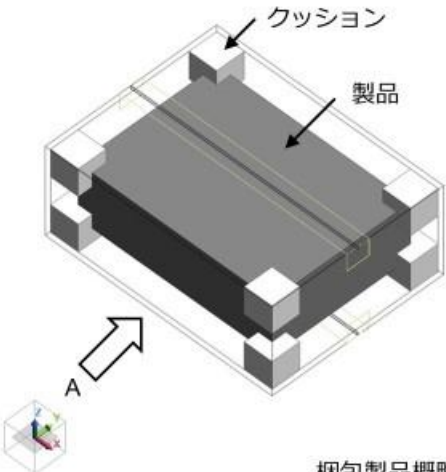
EPS を密度{発泡倍率}で表すと、33.0 (g/l) {30 倍}、25.0 (g/l) {40 倍}、20.0 (g/l) {50 倍}、17.0 (g/l) {60 倍} 等になります。

クッション厚に関しては、落下高さに対して 1/30、1/25、1/20、1/15、1/12、1/10、1/8、1/6、1/5、1/4、1/3、1/2 のように、数多くの厚さ違いデータを取得することを推奨します。

7. 梱包クッションの具体的な設計方法

梱包クッションの具体的な設計方法

梱包を設計検討する前に、大前提である設計条件（製品重量、落下高さ、許容 G 値）を明確にしておく。



製品重量 : $W = 30 \text{ (N)}$
落下高さ : $h = 500 \text{ (mm)}$
許容 G 値 : 35 (G) --- 設計 G 値 : 31.5 (G)
緩衝材密度 : $\rho = 25 \text{ (g/l)}$ --- 発泡倍率 : $40 \text{ (\%)}$



<A (Free)>

梱包製品概略図 (カートン：透明)

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved.

9

梱包クッションの具体的な設計方法を説明します。

本図は一般的に見かけるDVDやブルーレイのレコードプレーヤー製品の梱包状態と仮定しています。設計条件として、製品重量： $W = 30 \text{ (N)}$ 、落下高さ： $h = 0.5 \text{ (m)}$ 、許容衝撃値： $G = 35$ とします。製品重量：質量： $m \times$ 加速度： $\alpha = W$ で表すことができます。

落下高さは、各メーカーで定められた信頼性基準に基づき、製品保証される安全規格です。一般的な落下高さは実装試験により得られた衝撃データを基に算出されたものであり、計算上 3σ (99.8%)の信頼度を持つとされています。また、梱包製品重量、仕向地、大きさによって、異なることが多く、設計前に把握しておくことが重要になります。

また、許容 G 値も同様に、信頼性基準に基づき、製品保証される安全規格になります。

許容 G 値は製品内の最も脆弱な部品、且つ性能を決定する重要部品の保証限界から決定されることが一般的です。

今回は、設計 G 値：許容 G 値 $\times 0.9 = 31.5$ とします。これは、落とし方や測定バラツキを含む安全率を考慮した内容です。

尚、梱包クッションは一般的に使用される発泡倍率が40%の緩衝材である密度： $\rho = 25 \text{ (g/l)}$ として、設計値を求めます。

8. 衝撃緩衝特性「 C_f — S_{max} 線図・ G_{max} — S 線図」による設計値の決定

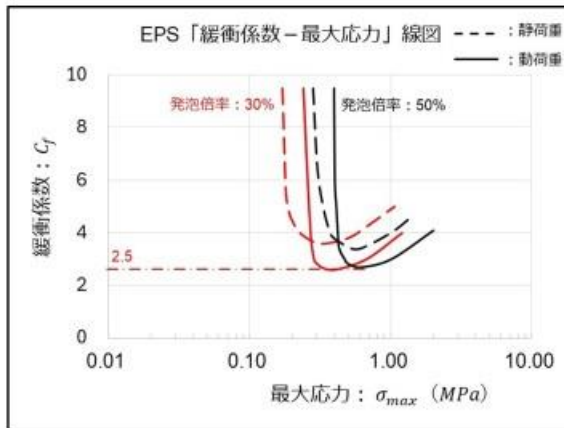
衝撃緩衝特性「 C_f — S_{max} 線図・ G_{max} — S 線図」による設計値の決定

EPSの衝撃緩衝特性からクッション厚： t と接触面積： A を求める。（落下高さ：500 (mm)、設計 G 値：31.5 (G)）

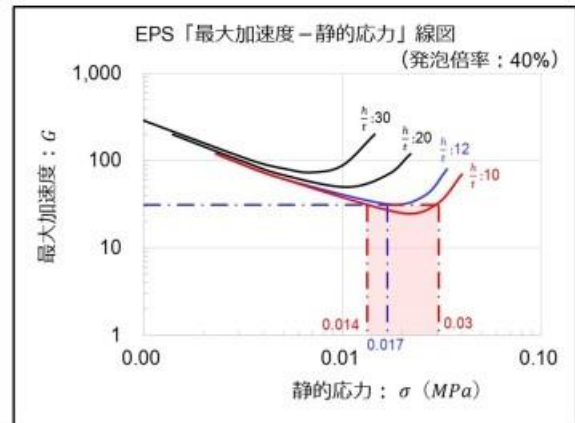
$$t = C_f \cdot \frac{h}{G} = 2.5 \times 500 / 31.5 = 40 \text{ (mm)}$$

$$\frac{h}{t} = 500 / 50 = 10 \Rightarrow \sigma \approx 0.014 - 0.03 \text{ (MPa)}$$

[h : 500 (mm)、 t : 50 (mm)]



EPS「緩衝係数－最大応力」線図



EPS「最大加速度－静的応力」線図

EPSの「緩衝係数－最大応力」線図から、発泡倍率：30%～50%では、緩衝係数： C_f は2.5であることが分かります。

これにより、落下高さ：500 (mm)、設計 G 値：31.5を保証できるクッション厚は以下になります。

$$t = C_f \cdot \frac{h}{G} = 2.5 \times 500 / 31.5 = 40 \text{ (mm)} \text{ になります。}$$

次に、発泡倍率：30%～50%のセンター値である40%のEPS「最大加速度－静的応力」線図から、設計 G 値：31.5を保証できる $\frac{h}{t}$ は12であり、 $t \approx 40$ (mm) となります。

これは、先ほど求めた値と同じになることが分かります。

しかし、実際の設計では静的応力が0.017 (MPa)の一点しか満足できない為、公差を考慮し、

$\frac{h}{t}$ を10とします。

結果としては、クッション厚： $t = 50$ (mm)となり、静的応力： $\sigma = 0.014$ (MPa)～0.03 (MPa)になります。

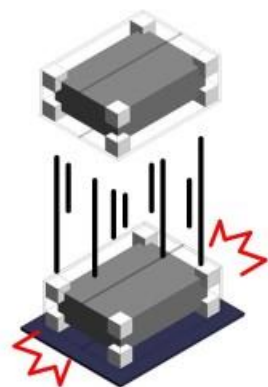
そして、接触面積： $A = W/\sigma$ なので、約1,000 (mm²)～2,140 (mm²)の範囲になります。

9. Femtet 解析事例「梱包クッション（発泡倍率：40%）の準静的構造解析」

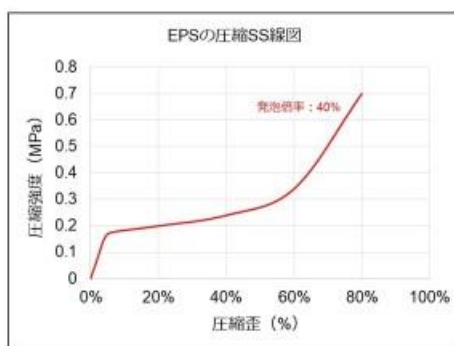
(1) 目的・概要

目的・概要

発泡倍率：40%を設計下限としたときの梱包クッション（以下クッション）応力解析事例を紹介する。
設計条件：底付き防止の為、クッション最大主歪： $\varepsilon_{max} < 0.6$ （クッション緻密化回避）とする。



梱包製品の落下



EPSの圧縮SS線図

EPSの圧縮SS線図
(仮想データ)

EPS（発泡倍率：40%）	
歪 Strain	応力 Stress
0	0
0.02	0.075
0.04	0.15
0.06	0.175
0.2	0.2
0.4	0.24
0.6	0.34
0.8	0.7

本解析の目的は、梱包材として用いる **EPS** クッションについて、輸送時に発生する落下衝撃に対して製品を確実に保護できる発泡倍率および形状条件を、定量的に設定することです。

EPS は発泡倍率の設計公差（一般に±10～20%）により密度や圧縮特性が変動し、その影響が緩衝性能に直結します。このため設計においては、公称値のみに依存せず、公差を含めた性能評価が不可欠となります。本解析では、製品の許容**G**値を満足しつつ、過剰な体積やコスト増加を抑制するための設計指針を整理しました。

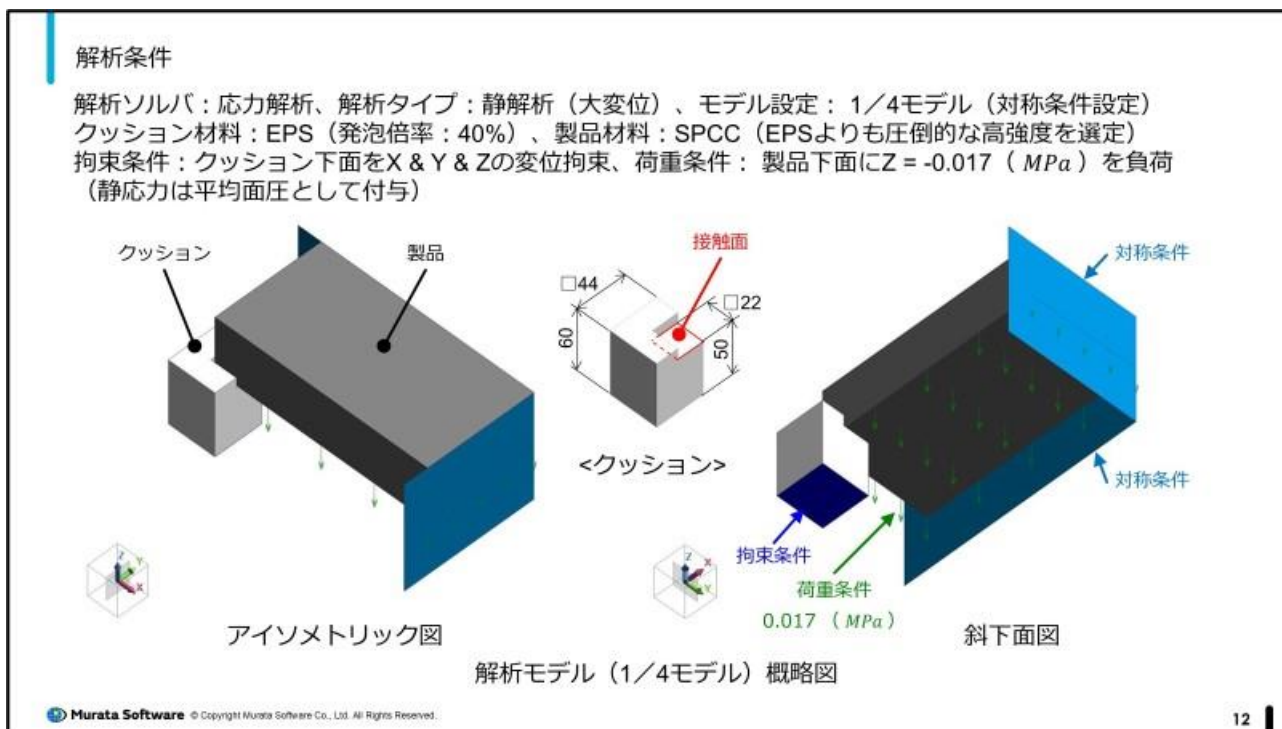
解析手法としては、**EPS** クッションの「最大加速度－静的応力」線図から設計**G**値を保証できる静的応力を求め、それを平均面圧として荷重条件に適用し、落下現象を準静的問題に置き換えた構造解析を実施しています。

材料モデルには、発泡倍率に応じた圧縮応力－ひずみ特性を*仮想設定し、2 項オグデンモデル（ μ 、 α 、 β ）により近似しています。（各係数は **Femtet** のカーブフィット機能を用いて同定する）
尚、本検討では実製品におけるばらつきを考慮し、設計下限となる発泡倍率 **40%** 条件で応力解析を行います。

*座学における「衝撃特性データ」と「**EPS** の圧縮 **SS** 線図」は仮想であることを記しておきます。

10. Femtet 解析事例「梱包クッション（発泡倍率：40%）の準静的構造解析」

(2) 解析条件



本解析は、応力解析ソルバを用いた静解析（大変位）とし、計算負荷低減の為、1/4 対称モデルを採用、クッション材料は発泡倍率 40% の EPS とし、前頁に示した仮想の圧縮応力-歪（SS）カーブに基づいて材料特性を定義しました。材料モデルは 2 項のオグデンモデルとし、各々の係数（ μ 、 α 、 β ）はカーブフィットにより同定しています。2 項モデルを選定した理由は、初期検討段階において計算の安定性を重視したためであり、また今回用いた SS カーブが仮想データであることによります。詳細設計段階で、精度の高い実測データが得られる場合は、3 項モデル適用の検討も必要ですが、計算安定性には留意が必要です。製品の材料は、クッション挙動への影響を最小化する為、EPS に対して十分に高剛性である SPCC を設定しました。拘束条件はクッション下面を X・Y・Z 方向すべて固定し、荷重条件は製品下面に対して -Z 方向に 0.0017 (MPa) の静応力を平均面圧として付与しています。

この応力値は、「最大加速度-静的応力」線図に基づき、設計 G 値を満足する条件として設定したものです。接触面積は $A = W/\sigma$ より算出し、約 1765 (mm²) に相当することから、正方形換算で一辺 22 (mm) としました。また、クッション厚さは理論計算により得られた値：50 (mm) としています。

尚、本解析は実務設計との整合を考慮し、落下現象を準静的問題として近似した評価手法を用いていることを記しておきます。

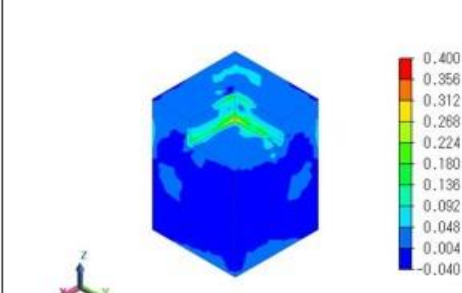
11. Femtet 解析事例「梱包クッション（発泡倍率：40%）の準静的構造解析」

(3) クッションの圧縮変位と最大主歪

クッションの圧縮変位と最大主歪

圧縮前のクッション厚は50 mmであり、圧縮変位が約20 mmとすると、最大主歪は約0.4（圧縮）である。クッション最大主歪は $0.4 < 0.6$ である為、底付きを回避できていることが分かる。尚、ミーゼス相当応力からは割れやすい箇所を知ることができて、製品の最大主応力から製品が受ける応力を予測できる。

クッションの圧縮変位、ミーゼス応力及び製品の最大主応力

対象品	クッション	
評価項目	接触面の圧縮変位	最大主歪
コンター図		
最大値	18.6 (mm)	$0.4 < 0.6$ （クッション緻密化回避）

Murata Software © Copyright Murata Software Co., Ltd. All Rights Reserved.

13

圧縮前のクッション厚は 50 (mm) であり、解析結果から圧縮変位は約 20 (mm) という結果です。このときの最大主歪は約 0.4（圧縮）となります。設計条件として設定した許容歪は 0.6 であるから、評価結果は $0.4 < 0.6$ を満足し、底付きが回避されていることが分かります。

この結果は、クッションの最大主歪コンター図からも裏付けられます。特に、製品との接触面および側壁との稜線部に最大主歪が集中しており、これらの部位が優先的に圧縮されている様子が確認できます。これは接触条件および形状効果に起因する局所的な応力集中であり、実際の挙動としても妥当であると考えられます。

更に、製品側の応力評価では、エッジ部の特異応力を除外した最大主応力を参照することで、製品に作用する代表的な応力レベルおよび高応力部位の推定が可能となります。

尚、本解析に用いたクッション材料の物性値はすべて仮想データであり、緩衝係数－最大応力線図および圧縮 SS 線図も同一材料から取得したものではない為、これらのデータ間の相関を直接評価することはできません。

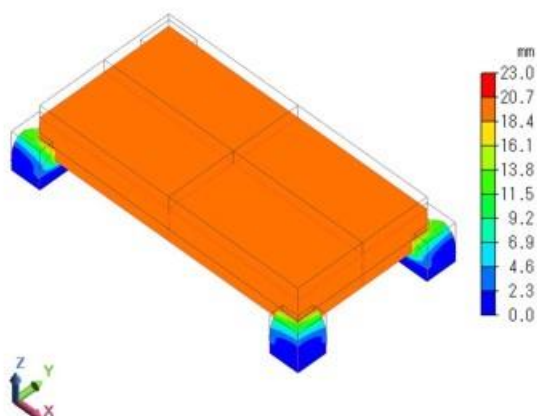
しかし、実測に基づく各種データと構造解析結果との相関関係を適切に整理・構築することで、より高精度かつ効率的な梱包設計の実現が期待できます。

12. Femtet 解析事例「梱包クッション（発泡倍率：40%）の準静的構造解析」

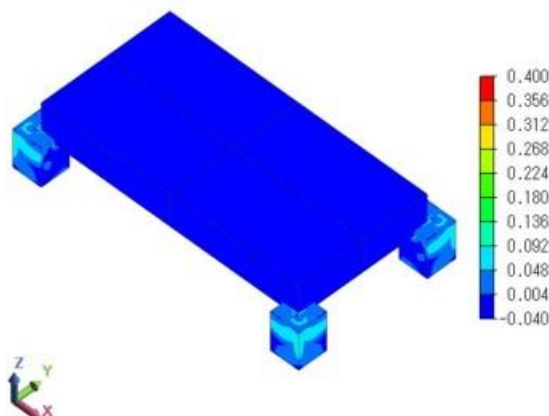
(4) 結論

結論

本解析のように、事前に梱包クッションの緩衝係数－最大応力線図、緩衝係数－最大応力線図を取得し、クッション形状及び荷重条件を見積もり、圧縮SS線図のデータからオグデン係数を自動計算で求めて、準静的構造解析を行うことで、梱包設計の良否判定が可能となる。（CAEの同定は必要）



梱包製品落下時想定の変位図



梱包製品落下時想定最大主歪図

本解析のように、事前にクッション材料の緩衝係数－最大加速度線図、「最大加速度－静的応力」線図を取得し、これらに基づいてクッション形状および荷重条件を見積もることで、解析条件を合理的に設定することができます。

更に、圧縮 SS 線図のデータからオグデン係数をカーブフィットにより自動同定し、準静的構造解析を実施することで、梱包設計構想の妥当性評価を事前検証することが可能となります。

解析結果の変位分布からは、クッション全体の変位量や局所的な潰れや変形集中の有無を確認し、最大主歪分布からは、設計条件である底付きの有無や局所的な歪増大の発生箇所を確認します。

尚、本検討では圧縮 SS 線図のみを用いてオグデン係数を算出しましたが、より高精度な材料モデル構築のためには、引張や剪断の SS 線図も併用することをお勧めします。

以上のように、①実験データ取得、②CAE モデル構築、③パラメータ同定、④実験結果との比較検証、⑤精度評価、の手順により相関関係を構築することで、材料データベースの整備と設計効率の向上が期待できるようになります。



ムラタソフトウェア株式会社

muRata

無料トライアルは弊社のホームページからお申込みいただけます。

<https://www.muratasoftware.com/trial/starter/>