

食品外装段ボール箱圧縮強さに及ぼす トップクリアランスの影響

村尾千秋*

Effect of Clearance between Top Panel of Containers and Contents on Compression Strength of Corrugated Containers for Food Products

Chiaki MURAO*

Mathematical model was studied on the compression strength characteristics of corrugated containers with contents in the previous papers. That was $C = B + \alpha D \cdots (1)$, $C = \beta A \cdots (2)$. Furthermore the characteristics of coefficient α was revealed by using the test samples of corrugated containers filled with carton boxes. In this paper compression strength study of corrugated containers filled with carton boxes is made on the effect of clearance between the top panel of corrugated containers and carton boxes by using above equation (1). Study is made on compressive creep failure tests conditioned at 20°C., 65% R.H./40°C., 90% R.H. Results indicate the optimum range of top clearance for maximizing compression strength of corrugated containers filled with carton boxes. Significant route to the optimum design for the compression strength of corrugated containers is provided by this new results.

Keywords : Corrugated container, Carton box, Top clearance, Optimum range, Compression strength, Creep failure, High temperature/high humidity conditions, Mathematical model, Optimum design

先に、中身入り外装段ボール箱の圧縮強さを表現する数式モデルとして、 $C = B + \alpha D \cdots (1)$ 、 $C = \beta A \cdots (2)$ を提案した。さらに、カートン個箱入り外装段ボール箱をモデルに、係数 α の特性を明らかにした。本報では引き続き、カートン個箱入り外装段ボール箱を対象に、上記(1)式を使用して、トップクリアランスと圧縮強さの関係を検討した。検討は、20°C 65% RH及び40°C 90% RH前処理条件で、圧縮クリープ試験を行った。その結果、カートン個箱入り外装段ボール箱の圧縮強さを最大にする、トップクリアランスの最適範囲を明らかにすることができた。これは、外装段ボール箱圧縮強さ最適設計への重要な足掛かりとなる新知見である。

キーワード : 外装段ボール箱、カートン個箱、トップクリアランス、最適範囲、圧縮強さ、クリープ潰れ、高温多湿条件、数式モデル、最適設計

* (株) ライフテクノ (〒110 東京都台東区北上野1-10-14) LIFETECHNO CORP.,10-14, Kitaueno-1, Taitoh-ku Tokyo, 110

1. 緒言

食品外装段ボール箱の圧縮強さは、外装段ボール空箱と詰め合わされる中身の圧縮強さが複合されたものである。中仕切や胴枠があれば、それらの圧縮強さ要素も付加される。

包材の圧縮強さ最適設計にさいしては、特に潰れの近傍における強さ劣化要因の定量把握が重要である。段ボール空箱が圧縮荷重を受けて変形する過程を例にとると、初期段階こそ線形近似が可能であるが、潰れの近傍では歪は非線形性が強く、カオスの様相を呈するようになる^{1)~4)}。したがって線形近似や、単純にマイクロ要素の集合体としての処理には限界がある。新しい総合的な視点からの取り組みが必要である。

筆者は、中身を含む食品外装段ボール箱圧縮強さ最適設計法の確立を目的に、既に骨格となるマクロ数式モデルを提案した。さらに、食品の代表的な包装形態であるカートン個箱入り外装段ボール箱につき、温湿度環境、クリープ時間、積付劣化のモデル条件を設定し、これら圧縮強さに影響を及ぼす代表的な外部要因の変動に対応して、全体及び構成要素の圧縮強さが変化する状況を、数式モデルの係数の特性値として把握することの有効性を示した^{5)~7)}。

本報は、この手法をさらに敷えんして、圧縮強さ設計の内部重要因子であるカートン個箱入り外装段ボール箱内の天面パネルと個箱のクリアランスが、ケース単体均一荷重圧縮強さに及ぼす影響を、係数 α の特性値として整理することを目的としている。

既存の報文で、外装段ボール箱天面クリアランスと圧縮強さの関係を、定量的に取り扱

ったのは1例があるだけである⁸⁾。そこでは中身のモデルとして、高さの異なる3種類の4角柱状段ボール紙を使用し、これを外装段ボール箱に挿入、全体及び構成要素である4角柱、外装段ボール空箱の常温常湿環境下での瞬間圧縮強さを測定している。しかし、その測定結果の一般性にはやや疑問があり、本報はその疑問の解消をも意図している。

2. 理論

カートン個箱入り外装段ボール箱をモデルに、天面のクリアランスがケース単体圧縮強さに、どのように影響するかを考察する。マクロ数式モデルは次のとおりである。

$$C = B + \alpha (\delta_0) D \dots\dots\dots (1)$$

- C : 個箱入り外装段ボール箱単体必要圧縮強さ
- B : 個箱のケース単位集合体圧縮強さ
- D : 外装段ボール空箱単体圧縮強さ
- α : 外装段ボール空箱単体圧縮強さの個箱入り外装段ボール箱単体必要圧縮強さに対する有効寄与率
- δ_0 : 無負荷状態における外装段ボール箱天面パネルと個箱上面との初期クリアランス

さらに、第1報で設定した圧縮強さに影響を及ぼす代表外部要因の変動モデル条件を使用して、 δ_0 の変化に対応する係数 α の特性を明らかにすることを考える。

その場合の(1)式は次のように表現できる。

$$C_{os} (p_{os}, 0 | C_{H, o}) = B_{os} (p_{os}, 0 | C_{H, o}) + \alpha_{os} (\delta_0) D_{os} (p_{os}, 0 | C_{H, o}) \dots\dots\dots (2)$$

$$C_{0h} (p_{0h}, 0 | C_{H,0}) = B_{0h} (p_{0h}, 0 | C_{H,0}) + \alpha_{0h} (\delta_0) D_{0h} (p_{0h}, 0 | C_{H,0}) \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{1s} (p_{1s}, t | C_{H,0}) = B_{1s} (p_{1s}, t | C_{H,0}) + \alpha_{1s} (\delta_0) D_{1s} (p_{1s}, t | C_{H,0}) \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{1h} (p_{1h}, t | C_{H,0}) = B_{1h} (p_{1h}, t | C_{H,0}) + \alpha_{1h} (\delta_0) D_{1h} (p_{1h}, t | C_{H,0}) \dots\dots\dots (5)$$

C_{0s} : 20℃ 65% RH 前処理個箱入り外装段ボール箱の初期瞬間圧縮強さ

C_{0h} : 40℃ 90% RH 前処理個箱入り外装段ボール箱の初期瞬間圧縮強さ

C_{1s} : C_{0s} がステージ1で20℃ 65% RH 環境下、クリープ時間 t を経過した後の圧縮クリープ強さ

C_{1h} : C_{0h} がステージ1で40℃ 90% RH 環境下、クリープ時間 t を経過した後の圧縮クリープ強さ

P_{0s} : ステージ0の温湿度条件 20℃ 65% RH

P_{0h} : ステージ0の温湿度条件 40℃ 90% RH

P_{1s} : ステージ1の温湿度条件 20℃ 65% RH

P_{1h} : ステージ1の温湿度条件 40℃ 90% RH

t : ステージ1のクリープ時間

$C_{H,i}$: ステージ0→ i 履歴後の C_i を表す

したがって $C_{H,0}$ は未だ流通の履歴を受けていない工場生産直後の段ボール箱詰め商品の初期瞬間圧縮強さ

$\alpha_i (\delta_0)$: 無負荷初期トップクリアランス δ_0 のステージ i における α

B_i, D_i の表記は C_i の表記に準ずる

3. 実験

3.1 測定対象

対象となる包装形態は、問題の性格上外装段ボール箱は A-1 形である。また、小型個箱の外装段ボール箱への横詰め方式は、個箱

に中身が詰まっていない状態では個箱に圧縮強さが期待できず、圧縮強さ上は外装段ボール空箱と同一であることは既に報告した⁶⁾。したがって立詰め方式が検討対象である。

そこで、個箱として中型、小型の2種類を選定し、A-1 形外装段ボール箱のトップクリアランスを、B 段段ボール紙の埋板によりそれぞれ4段階に変化させるモデルケースを設定した。

Fig. 1 に外装段ボール箱への個箱の詰め合わせ状態を、Table 1 に各モデルケースの構成仕様を示す。

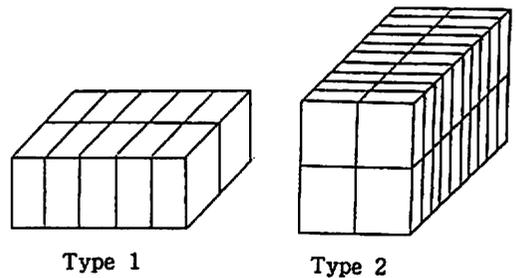


Fig. 1 Filling pattern of the carton boxes in corrugated containers

3.2 測定条件

①前処理 40~80h

レベル1: 20℃ 65% RH (標準状態)

レベル2: 40℃ 90% RH (高温多湿状態)

②測定単位

外装段ボール箱単体、個箱の外装段ボール箱単位集合体、個箱入り外装段ボール箱単体

③サンプル数

1 モデルケース 1 前処理レベル当たり $N = 50$

Table 1 Specification of test samples

Case	Filling pattern of carton boxes	Spec. of carton boxes	Spec. of corrugated containers
I	Type 1	110 × 86 × 176mm Coated paper 450g/m ²	447 × 227 × 190mm KNN220/SCP180/KNN220g/m ² A/F Regular slotted type
II	Type 2	117 × 30 × 141mm Coated paper 310g/m ²	302 × 245 × 315mm KNN180/SCP160/KNN180g/m ² A/F Regular slotted type

3.3 測定法と判定基準

①圧縮強さ測定法

TENSILON/CTM-1-5000にて、JIS包装貨物圧縮試験法及び圧縮クリープ試験法により測定

②判定基準

外装段ボール空箱については座屈強度を、個箱集合体及び個箱入り外装段ボール箱については、一定荷重でt時間の圧縮クリープをかけた後、荷重を除去し、個箱の損傷状況を目視検査する。そこで、個箱が1個でも商品性を損なうと判断される限界の塑性変形を起こす直前の荷重をもって、その個箱集合体もしくは個箱入り外装段ボール箱のt時間圧縮クリープ強さと判定

の関係を整理して示す。Fig. 10～15は、温湿度環境とクリープ時間をパラメータに、トップクリアランスと α の関係を整理した結果である。

4.2 考 察

(1) モデルケース I

- ① Fig. 2～5は、総合的には α のクリープ時間に対する定数安定性が高いことを示している。Fig. 4の高温多湿環境下の α のみが他と異なり、クリープ時間の増大に対し暫減傾向を示している。
- ② Fig. 2～5は、 α の温湿度環境変化に対する安定性も、総合的には高いことを示している。Fig. 4の高温多湿環境下の α のみが他と異なり、クリープ時間の増大とともに安定した標準状態から負の方向にかい離幅が増大する。
- ③ Fig. 10～12は、 α が δ_0 に対し実用的な範囲で、単調増加関数であることを示している。
- ④ Fig. 10～12は、 $\delta_0 = 15\text{mm}$ ではいずれも $\alpha > 1.0$ である。即ち、個箱入り外装段ボール箱の圧縮クリープ強さが、構成要素である個箱集合体及び外装段ボール

4. 結果及び考察

4.1 測定結果

C、B、Dの標準状態及び高温多湿状態における圧縮クリープ強さ測定データを基に、(1)式により α を算出した。

Fig. 2～9に、温湿度環境とトップクリアランスをパラメータに、クリープ時間と α

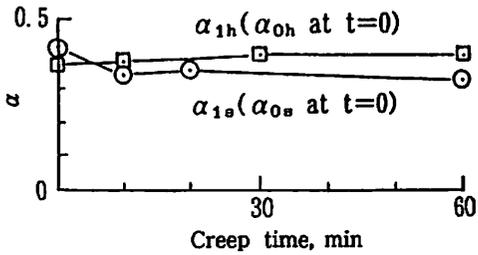


Fig. 2 Relationship between α and creep time for case I. $\delta_0 = 6\text{mm}$

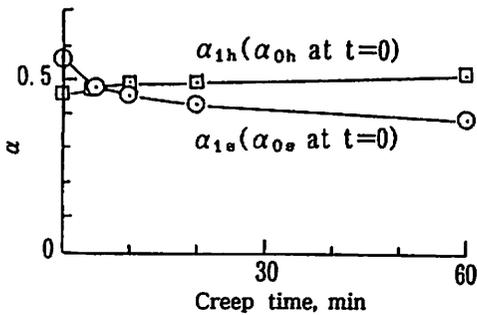


Fig. 3 Relationship between α and creep time for case I. $\delta_0 = 9\text{mm}$

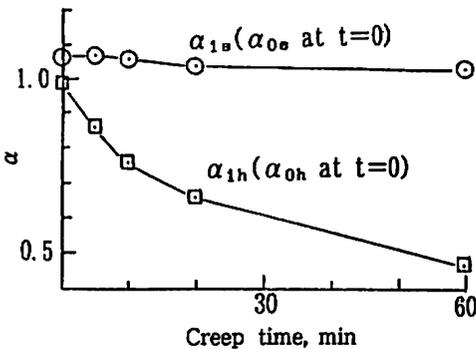


Fig. 4 Relationship between α and creep time for case I. $\delta_0 = 12\text{mm}$

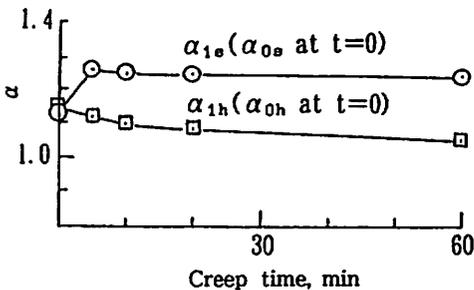


Fig. 5 Relationship between α and creep time for case I. $\delta_0 = 15\text{mm}$

空箱のそれぞれの圧縮クリープ強さの和を上回る。これは、個箱入り外装段ボール箱が殻の多層構造体として有効に機能していることを示しており、新知見である。

⑤ Fig. 10~12は、構成要素である外装段ボール空箱の圧縮クリープ強さDに対応する、初期荷重196N {20kgf} を起点とする圧縮量を d_1 とすると、 $\delta_0 = d_1$ において $\alpha = 0.4 \sim 0.6$ である。

α_{\max} に対応する δ_0 を $\delta_{0,\max}$ とすると、 $\delta_{0,\max} = d_1 + 6 \sim 7\text{mm}$ である。

(2) モデルケースII

① Fig. 6~9は、総合的には α のクリープ時間に対する定数安定性が高いことを示している。Fig. 7の高温多湿環境下のみが、クリープ時間増大に対しやや暫減傾向を示す。

② Fig. 6~9は、 α の温湿度環境変化に対する安定性も、総合的に高いことを示している。Fig. 7の高温多湿環境下の α のみが、クリープ時間増大とともにやや負の方向にかい離傾向にある。

③ Fig. 13~15は、 α が δ_0 に対し実用的な範囲で、単調増加関数であることを示している。

④ Fig. 14は、 $\delta_0 = 14\text{mm}$ では $\alpha > 1.0$ である。他方、Fig. 13では $\alpha = 1.0$ である。即ち、高温多湿環境下でのみ殻の多層構造体の有効性が現れている。

⑤ $\delta_0 = 17, 32\text{mm}$ についても α_{0s} 、 α_{0h} を測定した。対応して α 値は $1.0 < \alpha < 1.3$ を維持するものの、荷重-歪関係が不安定になり圧縮量のばらつきも拡大した。

⑥ Fig. 13~15は、モデルケースIと同様

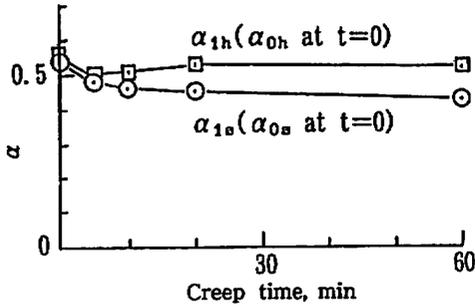


Fig. 6 Relationship between α and creep time for case II, $\delta_0 = 5\text{mm}$

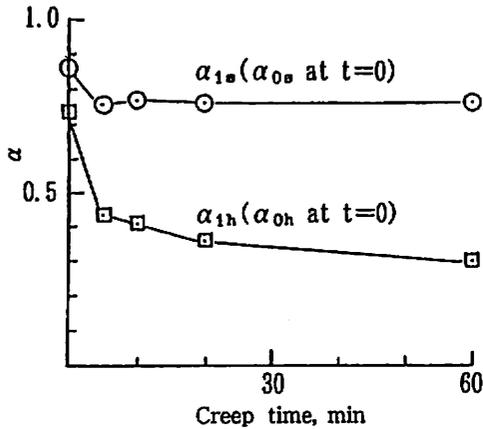


Fig. 7 Relationship between α and creep time for case II, $\delta_0 = 8\text{mm}$

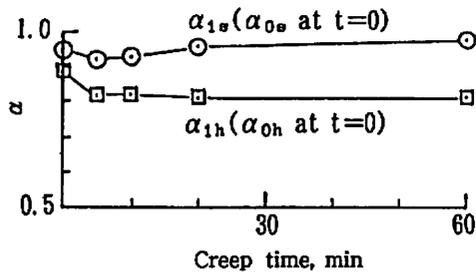


Fig. 8 Relationship between α and creep time for case II, $\delta_0 = 11\text{mm}$

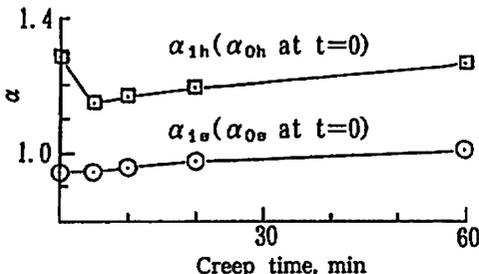


Fig. 9 Relationship between α and creep time for case II, $\delta_0 = 14\text{mm}$

の定義において、 $\delta_0 = d_1$ では $\alpha = 0.5 \sim 0.8$ であり、 $\delta_{0, \max} = d_1 + 7 \sim 8\text{mm}$ である。

5. 結 語

個箱入り外装段ボール箱単体圧縮強さに及ぼすトップクリアランスの影響を明らかにするため、中型及び小型個箱立詰めの場合の2種類のモデルを選定し、既に提案済みのマクロ数式モデルの第(1)式を使用して、温湿度環境、クリープ時間、トップクリアランスの変化に対応する係数 α の特性を通じて解析を行った。その結果、次の事項が明らかになった。

- ① α の特性は、マクロには個箱の中型、小型のサイズによる差異はなく、同一の傾向値を示した。
- ② 総合的には、 α はクリープ時間及び温湿度環境の変化に対し、定数安定性が高い。しかし、一部にはやや定数安定性を欠く場合も存在する。
- ③ α は、トップクリアランスの初期値 δ_0 に対し、実用的な範囲で単調に増加する。
- ④ α の最大値は、1.0を超える場合が多い。これは個箱入り外装段ボール箱が、殻の多層構造体として有効に機能することが多いことを示しており、従来明確な指摘がなかった現象である。1.0を超える部分は、圧縮荷重を受けて、個箱集合体と外装段ボール箱の接触側面が、変形を相互に支え合う形で強度を補完し合い、塑性変形の開始点が上昇したことを示している。数式モデルでは、形式上外装段ボール空箱の全体への強度寄与率が大きく上昇した形をとっているが、実態は詰

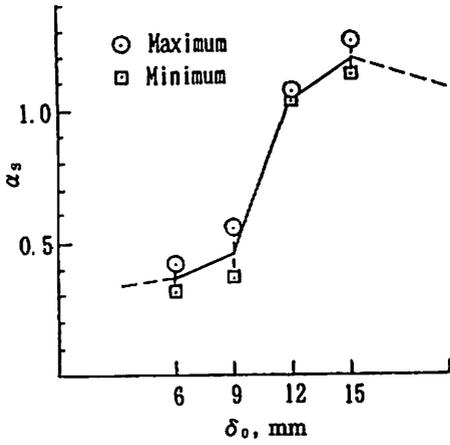


Fig. 10 Relationship between α_s and δ_o for case I

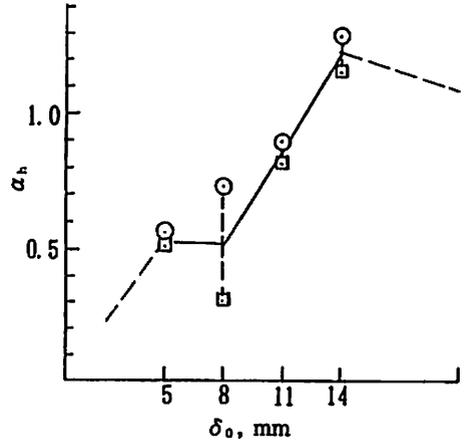


Fig. 13 Relationship between α_s and δ_o for case II

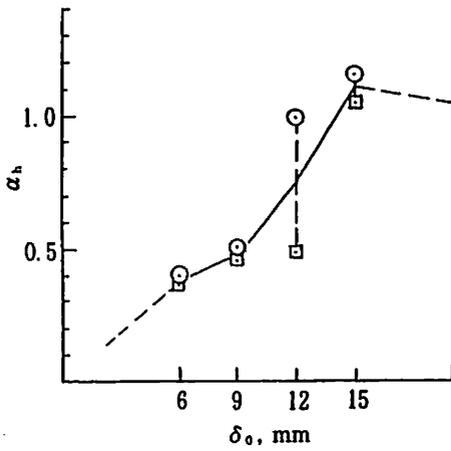


Fig. 11 Relationship between α_h and δ_o for case I

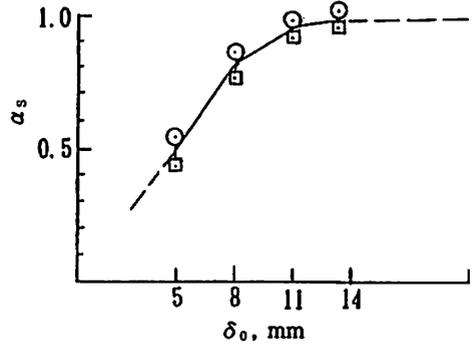


Fig. 14 Relationship between α_h and δ_o for case II

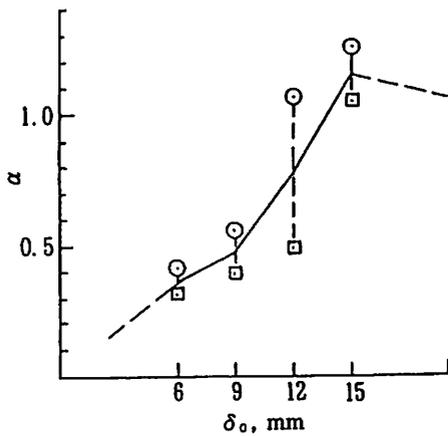


Fig. 12 Superposition of Fig. 10 and 11

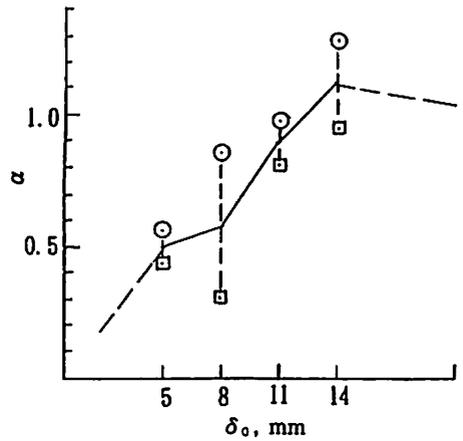


Fig. 15 Superposition of Fig. 13 and 14

め合わせ構造の総合効果を、 α に集約してモデル化した結果である。これは、一見数式モデルが正確さを欠いているように見えるが、そうではない。その理由は次の通りである。

商品の包装設計においては、個装の設計が先行する。外装設計はその後である。個装は商品そのものであるから、外装段ボール箱設計の立場からは与件と見なければならない。したがって、(1)式のB、つまり個箱のケース単位集合体圧縮強さも与件である。外装段ボール空箱圧縮強さDは、Bを補完する形で全体の最適設計を指向することになる。必要な商品圧縮強さCに対し、Bには自由度はなく、設計の自由度は全てDに集約される。結局、詰め合わせ構造の総合効果も、Dの係数 α に集約してモデル化するのが設計の主旨に沿っていることになる。

仮に詰め合わせ構造の総合効果が負であっても、それはDの設計で補完しなければならない。

⑤ δ_0 が14~15mmを超えると、 α 値も暫時1.0以上を維持するものの、荷重-歪関係が不安定になることを強く示唆するデータがえられた。さらに δ_0 が不安定域を超えて増大すると、再び $\alpha = 1.0$ の安定域に入るものと推定される。

⑥ McKee他は、常温常湿環境での瞬間圧縮強さという限定された条件下ではあるが、中身を段ボール紙の4角柱モデルで実験した結果、4角柱単独の圧縮荷重に対応する圧縮量を b_1 として、 $\delta_0 = d_1 - b_1$ において $\alpha = 1.0$ が実現したと報告している⁹⁾。

筆者の実験では、 $\delta_0 = d_1 + 3 \sim 8\text{mm}$ で $\alpha = 1.0$ となり、さらに $\delta_0 = d_1 + 6 \sim 8\text{mm}$ で α_{\max} が実現した。 α が δ_0 に対し単調増大する過程をモデル的に考察すると、 $\delta_0 = 0$ では全圧縮荷重が最初から直接個箱集合体に伝達される。一般に個箱の方が外装段ボール箱より圧縮にセンシティブなので、外装段ボール箱の圧縮強さ寄与率は小さく、 $\alpha = 0$ である。 δ_0 が0から増大するに従い、圧縮荷重の外装段ボール箱への分配率が上昇する。個箱集合体へは、外装段ボール箱の内フラップを通じて、残りの荷重が分配される。 δ がある適正な値になると、個箱集合体と外装段ボール空箱の個別の圧縮強さに比例して、圧縮荷重が両者にバランスよく分配され、 $\alpha = 1.0$ の状況が出現する。この時の δ_0 の値を $\delta_{0,1}$ とする。さらに、殻集合体としての効果が有効に機能する場合は、 $\delta_{0,\max}$ で α は1.0を超えて α_{\max} となる。

一般に、無負荷時のトップクリアランス δ_0 と負荷状態における各種圧縮量の間には、次の関係が想定される。

$$\delta_0 = d + f - b \dots\dots\dots (6)$$

d : 負荷状態での外装段ボール箱圧縮量
f : 負荷状態での圧縮されたトップクリアランス

b : 負荷状態での中身個箱集合体圧縮量
次にトップクリアランス $\delta_{0,1}$ で $\alpha = 1.0$ が実現し、負荷荷重が外装段ボール空箱均一荷重圧縮強さと中身個箱集合体均一荷重圧縮強さの比に、正確に分配された状況を考える。(6)式は次のようになる。

$$\delta_{\alpha,1} = d_1^{(c)} + f_1 - b_1^{(c)} \dots\dots\dots (7)$$

$d_1^{(c)}$: 荷重が (D+B) 時の個箱入り外装段ボール箱圧縮量

$b_1^{(c)}$: 荷重が (D+B) 時の外装段ボール箱内個箱集合体圧縮量

f_1 : 荷重が (D+B) 時の圧縮されたトップクリアランス

個箱は、外装段ボール箱の内フラップを通じて圧縮荷重の分配を受けているので、内フラップと個箱集合体は完全な密着状態ではなく、軟接触状態である。小クリアランス f_1 は軟接触状態を表現している。サンプル、測定条件が同一で、均一荷重であれば、さらに次式の成立が想定される。

$$d_1^{(c)} = d_1 \dots\dots\dots (8)$$

$$b_1^{(c)} = b_1 \dots\dots\dots (9)$$

d_1 : 荷重 D 時の外装段ボール空箱圧縮量

b_1 : 荷重 B 時の個箱ケース単位集合体圧縮量

$$\therefore \delta_{\alpha,1} = d_1 + f_1 - b_1 \dots\dots\dots (10)$$

McKee 他の文献では、 $d_1 > d_1^{(c)}$ である。これは d_1 と $d_1^{(c)}$ で条件の同一／均質性が満たされていない可能性が高い。したがって、 $\delta_{\alpha,1} = d_1 - b_1$ が成立したとされているが、(10) 式の f_1 が材質／測定の際に埋没した可能性が高く、一般性と精度に疑問がある。

一般性のあるトップクリアランスのモデル式は (6) 式であり、 $\alpha = 1.0$ が実現した時は (10) 式である。筆者が採用したサンプルモデルにおいて $\delta_{\alpha, \max}$ は、ケース I で $f_{\max} = 10 \sim 13 \text{mm}$ 、ケース II では $f_{\max} = 11 \sim 15 \text{mm}$ で成立した。

本研究により、個箱入り外装段ボール箱単

体圧縮強さに及ぼすトップクリアランスの影響が、数式モデルの係数 α の特性値として定量的に把握できることが判明した。その結果、商品段ボール箱単体均一荷重圧縮強さに、外装段ボール空箱単体均一荷重圧縮強さが 100% 寄与するトップクリアランスの最適範囲の特定が可能となり、合わせて無負荷初期トップクリアランスと負荷時の各種圧縮量の関係を定量的に表現するモデル式を提案、設計の一般的な基準を示唆する特性値を見いだした。

謝 辞

本研究につきご指導頂いた横浜国立大学矢野俊正教授、及び発表の機会を与えて頂いた味の素 (株) 館川専務、並びに測定にご協力頂いたレンゴー (株) に感謝する。

<引用文献>

- 1) Thorpe, J. L., and Choi, D., Tappi, 74 (10), 172 (1991)
- 2) Thorpe, J. L., and Choi, D., Tappi, 75 (7), 155 (1992)
- 3) 金野秀敏, “応用カオス” (合原一幸編)、サイエンス社、p.299 (1995)
- 4) 高橋智, “カオス” (合原一幸編)、サイエンス社、p.258 (1995)
- 5) 村尾千秋, 日本包装学会誌, 4 (4), 287 (1995)
- 6) 村尾千秋, 日本包装学会誌, 4 (4), 295 (1995)
- 7) 村尾千秋, 日本包装学会誌, 5 (1), 32 (1996)
- 8) McKee, R. C., and Gander, J. W., Tappi, 40 (1), 57 (1957)

(原稿受付 1995年4月 5日)

(審査受理 1995年12月20日)