Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2026-11-30

# 蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築(第2報)： 多段積み包装されたイチゴ果実の損傷発生に及ぼす繰り返し衝撃の影響

北澤, 裕明
斎藤, 勝彦

(Citation)
日本包装学会誌,23(4):277-285

(Issue Date)
2014

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003668

KOBE UNIVERSITY

一般論文

# 蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築（第 2 報）—多段積み包装されたイチゴ果実の損傷発生に及ぼす繰り返し衝撃の影響—

北澤　裕明*,**、斎藤　勝彦**

# Construction of a New Damage Estimation Theory for Fresh Produce with Consideration of Cumulative Fatigue 2. Effect of Repetitive Shock on Damage to Strawberry Fruit inside Stacked Packaging

Hiroaki KITAZAWA*,** and Katsuhiko SAITO**

蓄積疲労により損傷する物品の繰り返し衝撃による損傷発生において、衝撃 1 回あたりの損傷度（*d*）は、ピーク加速度（*PAcc*）と速度変化（*Vc*）の組み合わせにより変化する。実輸送において、包装された物品において衝撃に伴う *PAcc* と *Vc* の組み合わせが変化する状況として、多段積みされた包装における部位（段）の違いが想定された。そこで本研究では、5 段積みされた段ボール箱に梱包されたイチゴ果実の繰り返し衝撃による損傷発生に及ぼす部位の影響を調査した。その結果、任意の衝撃を印加した際における、果実の *d* は、段により異なることが明らかとなり、その理由として、ピーク加速度（*PAcc*）と対となる速度変化（*Vc*）が段によって異なることが示唆された。この結果は、多段積みされた蓄積疲労により損傷する物品を対象として、繰り返し衝撃による損傷を防止するための対策を講じるためには、任意の衝撃が印加された際に想定される段ごとの *Vc* および *PAcc* の組み合わせに対応する *d* を明らかにしておく必要性を示唆するものであった。

In products damaged as a result of cumulative fatigue with repetitive shock, the degree of damage (*d*) per shock changes owing to a combination of peak acceleration (*PAcc*) and velocity change (*Vc*). We considered a situation wherein a combination of *PAcc* and *Vc* on packaged products changed corresponding to shock during transportation; we supposed stacked packaging with multiple layers for this purpose. Thus, we investigated the effects of different layers on repetitive-shock-induced damage to strawberry fruit packaged in a five-layered corrugated fiberboard box. Our results showed that the *d* of packaged fruit varies for different box layers. It was suggested that this variation was due to the changes in the combination of *PAcc* and *Vc* corresponding to the different layers. Our results also indicated that the differences in the combinations of *PAcc* and *Vc* corresponding to different layers should be considered in order to prevent products inside stacked packaging from damage caused by repetitive shock.

**キーワード**:繰り返し衝撃、速度変化、多段積み包装、ピーク加速度

Keywords：Peak acceleration, Repetitive shock, Stacked packaging, Velocity change

* (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 食品総合研究所　〒305-8642　茨城県つくば市観音台 2-1-12
National Food Research Institute, NARO, 2-1-12, Kan-nondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642, Japan
**神戸大学　〒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, Kobe, Hyogo 658-0022, Japan
連絡先 (Corresponding author): ktz@affrc.go.jp (H. Kitazawa)

## 1．緒言

これまでに著者ら[1)]は、蓄積疲労により損傷する物品の繰り返し衝撃による損傷発生において、衝撃1回あたりの損傷度（*d*）が、衝撃印加時におけるピーク加速度（*PAcc*）と速度変化（*Vc*）の組み合わせによって、様々に変化することを、イチゴ果実を用いた損傷評価試験によって明らかにした。

また、前報[2)]では、実輸送を想定した包装条件下において、*d* が *PAcc* と *Vc* の組み合わせによって変化するかどうかを検証するために、段ボール箱に梱包されたイチゴ果実を用いた繰り返し衝撃による損傷評価試験を行った。そして、使用する緩衝材の違いにより、*d* が変化すること、およびその理由について *PAcc* と対となる *Vc* の違いが影響した可能性を提示した。

一方、実輸送中に *PAcc* および *Vc* の組み合わせが異なるその他の状況として、多段積みされた包装形態における、部位（段）の違いが想定される。中嶋ら[3、4)]は、段積みされた製品の衝撃に対する易損性を線形および非線形モデルによる数値解析により段ごとに評価している。しかし、蓄積疲労により損傷する物品を対象に段積みされた包装条件下において段ごとの損傷を評価した事例はない。著者らによる、5 段積みされた段ボール箱に梱包されたイチゴ果実を対象とした先行研究[5)]においても、5段積みされた段ボール箱のうち、最下段の箱内に梱包された果実の損傷発生における、*PAcc* および *d* の関係のみを評価しており、その他の段における *d* および *Vc* の影響については議論していない。もし、段の違いにより *PAcc* および *Vc* の組み合わせが異なるとともに、このことにともない *d* が変化するとすれば、最下段など特定の段に配置されたサンプルより得られた *d* に基づいてその他の段における損傷評価を行った場合、損傷程度を見誤る可能性が考えられる。

以上の点を踏まえ、本研究では 5 段積みされたイチゴ輸送用段ボール箱を落下させた際における段ごとの *PAcc* および *Vc* を明らかにするとともに、段の違いが *d* に及ぼす影響を調査した。

## 2．実験

### 2.1 実験の流れ

本研究では、これまで繰り返し衝撃による損傷評価の事例がある最下段と、その他の段における *d* を比較することによって、緒言で述べた仮説（段の違いにより *PAcc* および *Vc* の組み合わせが異なり、これにともない *d* が変化する）を検証することとした。試験の流れを Fig. 1 に示す。まず、最下段における、任意の落下高さ（*h*）に対応する *PAcc* および *Vc* を計測した。次にこれらの関係の数式化を試みたとともに、*PAcc* および *Vc* に対応する *d* を算出した。2〜5 段目においても *h* に対応する *PAcc* および *Vc* を計測するとともに、これらと対応する *d* を算出した。緒言で述べた仮説が支持される場合、任意の *PAcc* に対応する *d* は、最下段とその他の段において異なると想定される。そこで、この想定される差異について、最下段を対象に数式化した *h*、

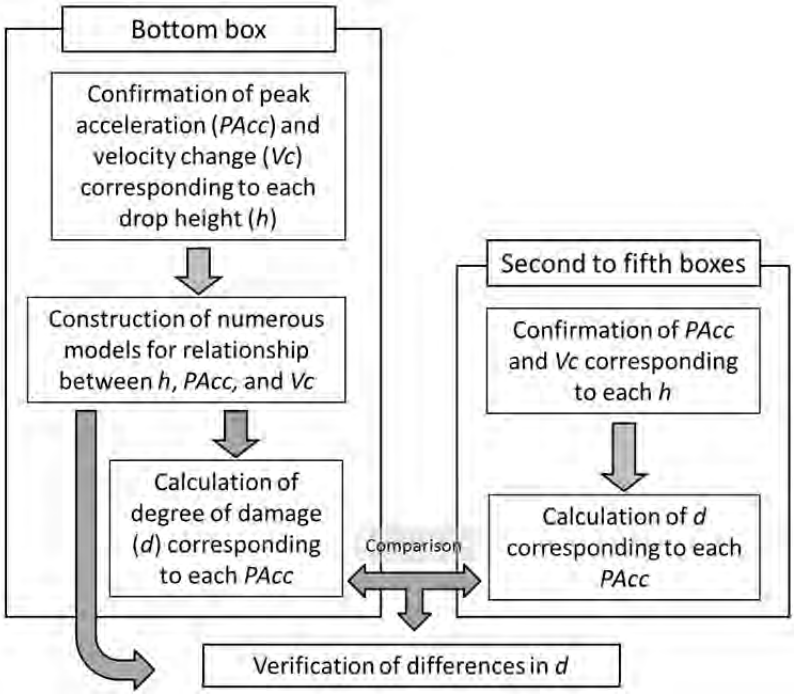


Fig.1　Test flow in this study.

*PAcc* および *Vc* の関係から考察した。

### 2.2 実験試料

茨城県内で生産されたイチゴ‘とちおとめ’を用いた。着色程度は 80～100%、果実硬度計（KM-1、藤原製作所）により測定した果肉硬度は約 6.1 N であった。

### 2.3 包装条件

以降に述べる *PAcc* および *Vc* の計測に用いた包装形態は、4 個の 300 g の粘土を詰めた PET resin 製トレー（ダミーサンプル。外寸 115 × 170 × 50 mm）を梱包した段ボール箱を 5 段積み重ね、PP バンドで結束したものであった（Fig. 2）。最下段を 1 段目、最上段を 5 段目とした。総重量は約 1.3 kg であった。




Fig.2　Form of packaging for estimation of peak acceleration (*PAcc*), velocity change (*Vc*) and fruit damage.

### 2.4 *Vc* および *PAcc* の計測方法および落下条件

トレー内底面中央部に 3 次元加速度センサー（2366W、昭和測器。8.0 × 7.0 × 5.5 mm、重量 1.2 g）を両面テープで貼り付け、*PAcc* および *Vc* を計測した。計測は、段ごとに実施した。計測条件は、計測時間 : 1 s (500 μs × 2000 pt)、トリガーレベル : 0.4%およびプリトリガ : 5%であった。*PAcc* および *Vc* の算出にあたり、3 次元（上下・前後・左右）方向の計測値を合成した。これらの条件は、加速度センターに接続された衝撃計測・解析システム（SMH-12、神栄テクノロジー）および衝撃・振動解析ソフトウェア（SMS-500、神栄テクノロジー）により設定した。

解析対象とした *h* は、0.05、0.10、0.15 および 0.20 m とした。ただし 1 段目については、これに加えて、0.03 および 0.25 m からの落下についても解析対象とした。落下面は、鋼鉄板上に敷いた 10 mm 厚のシリコンゴム板（密度 : 0.27 g/cm$^3$、25% ひずみ時における圧縮応力 : 126.1 kPa）とした。落下は手動で行った。

### 2.5 *h* と *PAcc* および *Vc* の変換（1 段目）

ここでは、前報 [2] で用いた変換手法を用いた。解析対象とした *h* の範囲内において、包装容器が線形バネ特性を有すると仮定すれば、*PAcc* と *h* の関係は、

$$PAcc = ah^b \qquad (1)$$

となり、落下高さは衝撃加速度に変換することができる。ここで、*a* および *b* は定数である。落下試験により得られた数値より、式（1）の妥当性を検証した。また、前報 [2] においては、*h* と *Vc* との関係を数式化することにより、後述する任意の衝撃 1 回当たりの損傷度（*d*）を与える *Vc* の推定を行った。本研究においても、これを応用し *h* と *Vc* の関係について数式化を試みた。

### 2.6 果実の損傷評価方法

**2.2** で示した包装形態において、各段におけるダミーサンプルの 1 つを、イチゴ果実を詰めたトレーに換え、**2.4** で示した落下高さから繰り返し落下させることにより、各段における果実の損傷発生までの繰り返し回数（*T*）を調査した。トレーに収納された果実数は 20 であり、その重量は 300～320 g の範囲にあった。損傷判定方法は前報 [2] に従った。すなわちトレー中 85%（17 個）の果実に果汁の滲出をともなうスレ傷もしくは水浸状の圧迫傷が発生した際に損傷発生と判定した。イチゴ果実において、*T* と *PAcc* との関係は、以下の式で表すことができる [2, 5]

$$T = cPAcc^{-m} \qquad (2)$$

ここで *c* および *m* は定数である。式（1）および（2）より、*h* と *T* の関係式を算出した。また、*T* 回の衝撃により損傷する物品において、*t* 回の衝撃により蓄積される損傷度（*D*）は、以下の式で表すことができる。

$$D = tT^{-1} \qquad (3)$$

式（3）より、損傷発生時を D = 1 と定義すると、衝撃 1 回あたりの損傷度を *d* は、

$$d = T^{-1} \qquad (4)$$

となる。式（1）、（2）および（4）を用いて、*PAcc* に対応する *d* を算出した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 *h* と *PAcc* および *Vc* の関係

#### 3.1.1 1段目

1段目における *h* = 0.03、0.05、0.10、0.15、0.20 および0.25 と対応する *PAcc* は、194.7、313.4、442.0、624.8、914.1 および 989.7 m/s$^2$ であった (Fig. 3A)。

この結果を式（1）へ適合させると、

$$PAcc = 2823.9h^{0.7601} \ (R^2 = 0.9847) \qquad (5)$$

で示される関係式および高い決定係数が得られた。このことから、解析対象とした *h* の範囲内において、*h* と *PAcc* は互いに変換可能であるものと判断された。また、*h* に対応する *Vc* は、それぞれ 0.94、1.49、1.87、2.22、2.56 および 3.02 m/s であった (Fig. 3B)。それらの関係は以下に示す式 (6)

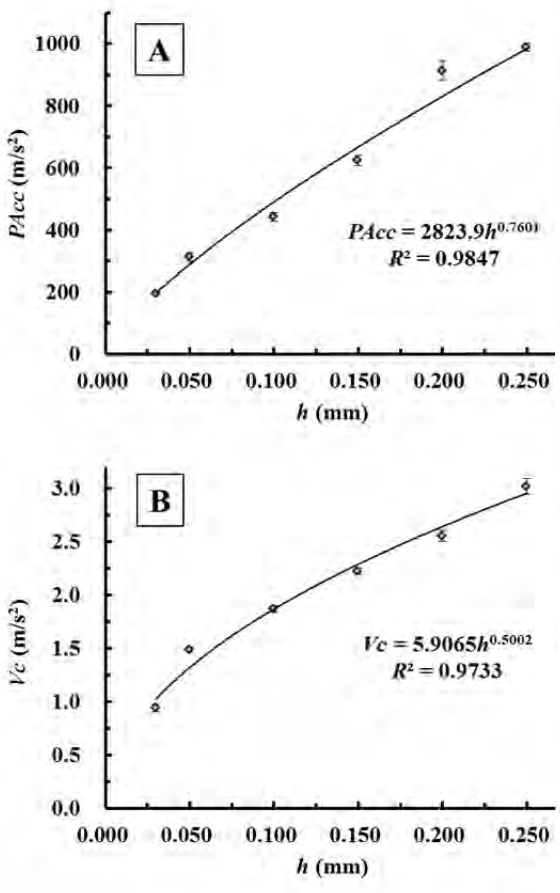


Fig. 3. Effects of differences in drop height (*h*) on the occurrence of peak acceleration (*PAcc*, A) and velocity change (*Vc*, B) at the first (bottom) layer.
Each error bar shows standard error (n = 11–12).

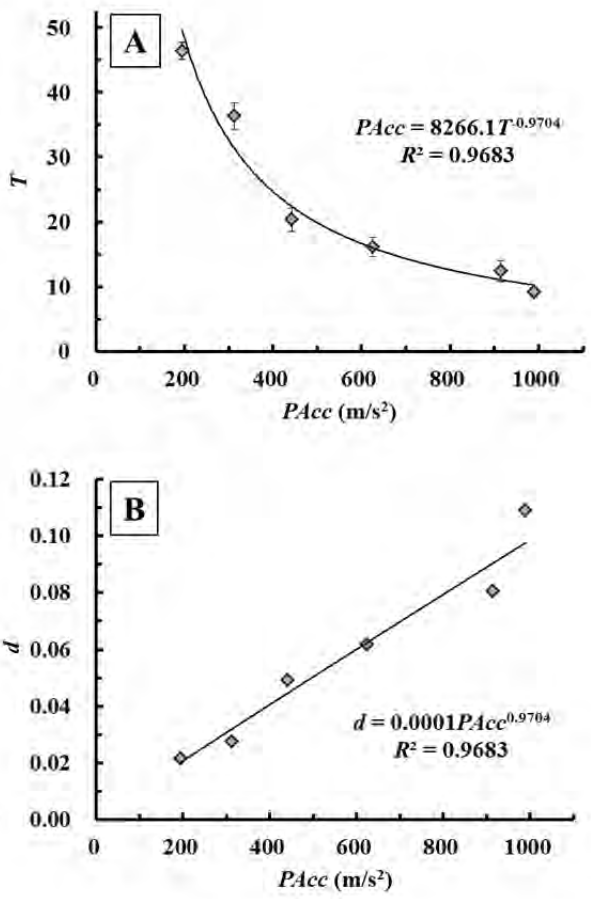


Fig. 4. Effects of differences in (*PAcc*) on the shock frequency with regard to damage (*T*, A) and degree of damage per shock (*d*, B) at the first (bottom) layer.
Each error bar shows standard error(n = 5–7).

で表すことができ、1段目のサンプルにおいては、$h$ と $Vc$ は互いに変換できるものと考えられた。

$$Vc = 5.9065h^{0.5002} \ (R^2 = 0.9733) \qquad (6)$$

### 3.1.2 2〜5段目

2〜5段目における各 $h$ に対応する $PAcc$ を Table 1 に示す。各 $h$ に対応する $PAcc$ は、1段目（Fig. 3A）と比較すると40〜78%減少しており、印加された衝撃の大半は、1段目において減衰したものと考えられた。一方で、2段目と5段目における $PAcc$ を比較すると、減少程度は最大で30%程度であり、これらの段の間における衝撃の減衰程度は小さいものと考えられた。

次に各 $h$ に対応する $Vc$ を Table 2 に示す。各 $h$ に対応する $Vc$ は、上段になるほど大きくなる傾向がみられ、5段目では1段目（Fig. 3B）と比較し、最大で1.3倍程度増加した。

## 3.2 1段目と2〜5段目における $d$ の比較

### 3.2.1 1段目の $d$

$h$ = 0.03、0.05、0.10、0.15、 0.20 および0.25 における $T$ は、それぞれ46.4、36.3、20.3、16.2、12.4 および9.2 であった（Fig. 4A）。式 (1) および (2) より、この結果は以下の式に示す関係で表すことができた。

$$T = 8266.1PAcc^{-0.97} \ (R^2 = 0.9683) \qquad (7)$$

また、 式 (4) より、それぞれの $PAcc$ に対応する $d$ は、それぞれ0.022、0.028、0.052、0.066、0.092 および0.115 と算出され（Fig. 4B）、これらの関

Table 1 Effects of different drop heights ($h$) and layers on the occurrence of peak acceleration ($PAcc$ [m/s$^2$])

| $h$ (m) | Layer | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0.05 | 139.2 ± 15.6[z] | 124.5 ± 5.3 | 107.5 ± 5.5 | 117.8 ± 7.0 |
| 0.10 | 260.9 ± 9.2 | 220.9 ± 20.5 | 210.4 ± 8.5 | 177.7 ± 9.8 |
| 0.15 | 371.6 ± 9.6 | 386.6 ± 5.4 | 340.3 ± 16.0 | 284.3 ± 3.8 |
| 0.20 | 498.6 ± 3.5 | 421.1 ± 9.4 | 450.5 ± 7.1 | 459.3 ± 6.3 |

[z]Average ± SE (n = 11–12).

Table 2 Effects of different drop heights ($h$) and layers on the occurrence of velocity change ($Vc$ [m/s])

| $h$ (m) | Layer | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0.05 | 1.48 ± 0.02[z] | 1.65 ± 0.02 | 1.68 ± 0.03 | 1.66 ± 0.05 |
| 0.10 | 1.95 ± 0.03 | 2.07 ± 0.04 | 2.14 ± 0.02 | 2.46 ± 0.03 |
| 0.15 | 2.32 ± 0.01 | 2.50 ± 0.03 | 2.77 ± 0.02 | 2.91 ± 0.02 |
| 0.20 | 2.55 ± 0.02 | 2.78 ± 0.02 | 3.06 ± 0.04 | 3.42 ± 0.02 |

[z]Refer to Table 1.

係は以下の式で表すことができた。

$$d = 0.0001PAcc^{0.9704} \ (R^2 = 0.9683) \qquad (8)$$

### 3.2.2 2〜5 段目の $d$ および 1 段目との比較

2〜5 段目における、同一の $h$ に対応する $d$ は、1 段目 (Fig. 3B) と比較し、小さかった (Table 3)。ここで、1 段目の $PAcc$ と $d$ の関係から得られた式 (8) を用いて、2〜5 段目における $PAcc$ に対応する $d$ を算出した。算出結果と実測値とを比較すると、予測値には実測値よりも値が小さくなる方向に差異が生じていること、およびその差異は、上段になるほど大きくなることが明らかとなった (Table 4)。前報[2] では、イチゴ果実の繰り返し衝撃による損傷発生において $PAcc$ が同一であっても、$Vc$ の増加により、$d$ が大きくなることを確認している。従って、本研究においても、それらの差異が生じた理由として、$Vc$ の違いによる影響が考えられた。

この点を明らかにするために、1 段目において 2〜5 段目における $PAcc$ と同等の $PAcc$ が生ずると想定される $h$ を式 (5) から算出するとともに、これにともなう $Vc$ を式 (6) により算出した。その結果、$Vc$ の値はいずれも 2〜5 段目において発生した $Vc$ (Table 2) と比較し小さいものと推定された (Table 5)。このことから、1 段目におけ

Table 3 Shock frequency with regard to damage ($T$) and degree of damage per shock ($d$) in the second to fifth boxes

| Layer | $h$ (m) | $PAcc$ (m/s$^2$) | $Vc$ (m/s) | $T$ | $d$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0.05 | 139.2 | 1.48 | 47.4 ± 2.9[z] | 0.022 |
| | 0.10 | 260.9 | 1.95 | 29.6 ± 3.9 | 0.037 |
| | 0.15 | 371.6 | 2.32 | 19.4 ± 1.1 | 0.052 |
| | 0.20 | 498.6 | 2.55 | 17.6 ± 2.1 | 0.061 |
| 3 | 0.05 | 124.5 | 1.65 | 49.2 ± 2.9 | 0.021 |
| | 0.10 | 220.9 | 2.07 | 34.8 ± 1.4 | 0.029 |
| | 0.15 | 386.6 | 2.50 | 23.8 ± 2.9 | 0.058 |
| | 0.20 | 421.1 | 2.78 | 15.0 ± 1.3 | 0.070 |
| 4 | 0.05 | 107.5 | 1.68 | 49.8 ± 0.9 | 0.020 |
| | 0.10 | 210.4 | 2.14 | 34.2 ± 3.5 | 0.031 |
| | 0.15 | 340.3 | 2.77 | 17.8 ± 1.3 | 0.058 |
| | 0.20 | 450.5 | 3.06 | 15.6 ± 2.2 | 0.070 |
| 5 | 0.05 | 117.8 | 1.66 | 36.4 ± 3.2 | 0.029 |
| | 0.10 | 177.7 | 2.46 | 29.0 ± 1.7 | 0.035 |
| | 0.15 | 284.3 | 2.91 | 21.6 ± 1.2 | 0.047 |
| | 0.20 | 459.3 | 3.42 | 13.2 ± 0.7 | 0.077 |

[z]Average ± SE (n = 5).

Table 4 Measured values of degree of damage per shock (*d*) versus predicted values calculated from the relationship between peak acceleration (*PAcc*) and *d* in the bottom box

| Layer | *h* (m) | *PAcc* ($m/s^2$) | *d* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Actual (A) | Predicted (P)[z] | Error (%)[y] |
| 2 | 0.05 | 139.2 | 0.022 | 0.012 | 43.6 |
| | 0.10 | 260.9 | 0.037 | 0.022 | 38.8 |
| | 0.15 | 371.6 | 0.052 | 0.032 | 39.7 |
| | 0.20 | 498.6 | 0.061 | 0.041 | 32.7 |
| 3 | 0.05 | 124.5 | 0.021 | 0.011 | 47.1 |
| | 0.10 | 220.9 | 0.029 | 0.019 | 34.4 |
| | 0.15 | 386.6 | 0.058 | 0.032 | 44.5 |
| | 0.20 | 421.1 | 0.070 | 0.035 | 50.1 |
| 4 | 0.05 | 107.5 | 0.020 | 0.009 | 53.1 |
| | 0.10 | 210.4 | 0.031 | 0.018 | 40.9 |
| | 0.15 | 340.3 | 0.058 | 0.029 | 49.8 |
| | 0.20 | 450.5 | 0.070 | 0.038 | 45.8 |
| 5 | 0.05 | 117.8 | 0.029 | 0.010 | 64.1 |
| | 0.10 | 177.7 | 0.035 | 0.015 | 56.3 |
| | 0.15 | 284.3 | 0.047 | 0.024 | 48.3 |
| | 0.20 | 459.3 | 0.077 | 0.038 | 50.5 |

[z]Calculated from Eq. (8).

[y]|(P-A)|/A × 100.

る *PAcc* と *d* の関係を用いて2～5段目の *d* を予測した際の差異は、*Vc* の影響を過小評価していることに起因したと考えられた。

以上より、2～5段目においてみられた *d* における差異は、*Vc* の違いによりもたらされたものと判断された。また、以上の結果は1段目の *PAcc* および *Vc* に基づいて算出した *d* を用いて、2～5段目における損傷を見積もった場合、損傷程度を過小評価する危険性を示すものといえる。

## 4. 結論

以上より、多段積みされた包装形態において、段の違いにより任意の *PAcc* に対応する *Vc* は様々に変化することが明らかとなった。また、任意の衝撃が印加された際の *d* は、段により異なることが明らかとなり、その理由として *Vc* の違いによる影響が考えられた。これらの点を踏まえると、多段積みされた、蓄積疲労により損傷する物品を対象として、繰り返し衝撃による損傷を防止するための対策を講じるためには、任意の衝撃が印加された際に想定される段ごとの *Vc* および *PAcc* の組み合わせに対応する *d* を明らかにしておく必要があると考えられた。

Table 5 Equivalent drop height (*h*) and velocity change (*Vc*) in the bottom box, corresponding to the same peak accerelation (*PAcc*) in the second to fifth boxes

| *PAcc* ($m/s^2$) | Equivalent $h^z$ | Equivalent *Vc* $(m/s)^y$ |
|---|---|---|
| 139.2 | 0.018 | 0.79 |
| 260.9 | 0.040 | 1.19 |
| 371.6 | 0.064 | 1.49 |
| 498.6 | 0.094 | 1.81 |
| 124.5 | 0.016 | 0.74 |
| 220.9 | 0.033 | 1.07 |
| 386.6 | 0.067 | 1.53 |
| 421.1 | 0.075 | 1.62 |
| 107.5 | 0.013 | 0.67 |
| 210.4 | 0.031 | 1.03 |
| 340.3 | 0.057 | 1.41 |
| 450.5 | 0.082 | 1.69 |
| 117.8 | 0.014 | 0.71 |
| 177.7 | 0.025 | 0.93 |
| 284.3 | 0.045 | 1.26 |
| 459.3 | 0.084 | 1.71 |

[z]Calculated from Eq. (5).

[y]Calculated from Eq. (6).

## ＜参考文献＞


1) 北澤裕明・佐藤達雄・長谷川奈緒子・李艶傑・石川豊、日本包装学会誌、21(2)、125–132 (2012)

2) Kitazawa, H., K. Saito and Y. Ishikawa, Packaging Technology and Science, 27(3), 221–230 (2014)

3) 中嶋隆勝・斎藤勝彦・久保雅義・寺岸義春、日本包装学会誌、8(3)、123–134 (1999)

4) 中嶋隆勝・斎藤勝彦・久保雅義・寺岸義春、日本包装学会誌、9(1)、33–46 (2000)

5) 北澤裕明・石川豊・路飛・胡耀華・中村宣貴・椎名武夫、園芸学研究、9(2)、221–227 (2010)


（原稿受付　2014 年 4 月 4 日）
（審査受理　2014 年 6 月 10 日）