

一般論文

高速度カメラを用いた包装貨物落下試験評価

川口 和晃*、斎藤 勝彦**

Evaluation of Free Fall Test for Container using High Speed Camera

Kazuaki KAWAGUCHI * and Katsuhiko SAITO**

自由落下試験装置による包装貨物落下試験は、その機構上、包装品を完全に水平に落下させることが困難である。これが包装内容品に発生する加速度に影響するために、落下試験の精度低下の原因になると考えられている。このことは JIS-Z-0202 や ASTM-D5276 にも落下試験時の包装品と衝突面との角度は 2° 以内が望ましいと記載されていることから理解できる。しかしながら、落下試験の精度に影響すると考えられている衝突角度が包装内容品に作用する衝撃加速度にどの程度影響しているかを定量的に評価した文献は少ない。

そこで本研究では、高速度カメラを用いた三次元画像解析及び包装内容品の 3 軸加速度を同時に計測し、落下試験における衝突角度の影響を評価した。結果として、衝突角度が大きくなると包装内容品に発生する加速度も小さくなることが確認できた。また包装品の質量、底面積、重心位置、試験落下高さによっても衝突角度に差があることを確かめ、さらに、落下試験時に包装内容品の 3 軸加速度を計測することによって、包装貨物落下試験の精度を確認する方法についても言及する。

The test by the free fall tester has a problem that cannot simulate perfect surface drop of the container, so it might be some influence on shock acceleration in the container, in other words, it might be lowered the precision of the test result. Moreover, it is also understood about influence of drop angle from the following contents, the regulation of the test, JIS-Z0202 and ASTM-D5276, desires no more than 2 degrees angle between the flat face of the container and the impact surface. However a few reports about the influence of the drop angle to the impact acceleration have been seen.

In this paper, the drop angle of container is analyzed by the 3D high speed camera, and the 3D accelerations inside container are also measured. In the result, it could be understood that the drop angle is caused that is decreased the peak acceleration. And it has understood that the drop angle is influenced by the position of center of gravity, mass, drop height and dropping surface area of the container. Accordingly, it has indicated that the test result has a widely error by the drop angle.

To carry out the accurate drop test, the drop angle should be estimated by using 3 axis accelerometers inside the package at the free fall test.

キーワード：落下試験、自由落下、高速度カメラ、輸送、包装

Keywords : Drop Test, Free Fall, High Speed Camera, Transport, Packaging

* 神戸大学大学院海事科学研究科博士後期課程

** 神戸大学大学院輸送包装研究室 〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1,
Kobe University, 5-1-1, Fukae minami-machi, Higashi nada-ku, Kobe-shi, Hyogo 658-0051, Japan,
TEL:078-431-6341, FAX:078-431-6364, Email:ksaito@maritime.kobe-u.ac.jp

1. 緒言

緩衝設計された包装品は、輸送過程で発生する落下衝撃に対して十分な機能を有しているかを評価するために落下試験が行なわれ、主に自由落下試験装置が用いられている。自由落下試験装置とは、一定の高さに包装品を保持したアーム部が高速回転運動する機構 (Fig.1)、あるいは水平方向にスライドする機構 (Fig.2) により、自然落下させる。その他の落下装置として、包装品を紐で吊り下げて任意の高さから切り離す落下試験装置も利用されている。

ここで、従来から自由落下試験では、自由落下した包装品が床面に衝突する際に、完全な面落下させることが事実上不可能であるため、包装内容品に発生する衝撃加速度に影響していることが指摘されている。このことは、包装品の試験方法を定めている JIS-Z-0202 包装貨物 - 落下試験方法¹⁾において、自由落下試験における包装品と床面の衝突時の角度は 2° 以内であることが望ましいと明記されていることから理解できる。さらに、同規格内には、自由落下試験装置を用いた方法 A と衝撃落下試験装置を用いた方法 B のいずれか一方を行えばよいことが明記されている。そこで、これまでに筆者らが両試験の等価性を確認するために、両試験方法による包装内容品の加速度を計測したところ、自由落下試験方法の発生加速度が小さくなる傾向にあることを確認している。この両試験の差の原因においても、上記の衝突角度が少なからず影響していると考えられる²⁾。

しかしながら、上記の自由落下試験において、落下時の角度が衝撃加速度に影響を与え

ていると考えられているにも関わらず、これらを定量的に評価した文献は少ない³⁾。そこで、本研究では高速度カメラを用いて、自由落下試験時の包装品を撮影し、撮影動画の三次元解析を行うことによって、落下姿勢と包装内容品に発生する加速度との関係を明らかにする。

さらに 3 軸加速度センサを用いて落下試験時の加速度計測を行なうことにより、落下試験が規格通り行なわれたかを判定する方法について説明する。



Fig.1 Rotation type
Free Fall Tester



Fig.2 Slide type
Free Fall Tester

2. 三次元解析原理

ここでは高速度カメラを用いた三次元画像解析処理の原理⁴⁾について述べる。

Fig.3 は撮影対象とカメラレンズ、カメラフィルムとの関係を表している。空間座標 $X-Y-Z$ 上に存在する三次元座標 $P(X, Y, Z)$ をカメラで撮影すると、映像はカメラレンズを通過し、カメラ内にある二次元のフィルム面上に投影される。このとき、カメラレンズ座標 $X'-Y'-Z'$ の中心を $O(X_0, Y_0, Z_0)$ 、カメラの傾き角度を φ, ω, κ 、フィルム面に投影された

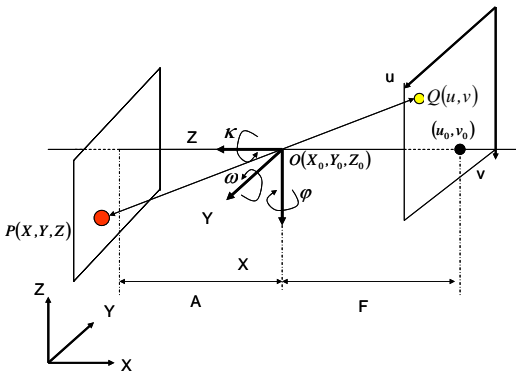


Fig.3 Relation between camera coordinates and spatial coordinates

座標を $Q(u, v)$ とする。また、フィルム面はカメラ座標 O の Z 軸の延長線上に存在しており、フィルム面と Z 軸の延長線が垂直に交差する点を $Q_0(u_0, v_0)$ とし、点 Q_0 と O との距離を F とする。このとき、 \overline{OQ} を \overline{OP} を用いて表現すると以下の式(1)、式(2)が得られる。このとき、 m_{ij} は回転マトリクスの要素であり、式(3)によって計算される。

$$u - u_0 = -F \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$v - v_0 = -F \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

$$R = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、点 P の三次元座標を求めるためには、式(1)、式(2)からなる 11 個の未知数を予め求めておく必要がある。この未知数は、予め三次元位置が定められた任意の 6 点(キャリブレーションポイント)を 2 台のカメラで撮影

し、式(1)、(2)から得られる 12 本の連立方程式を解くことで導出できる。その後、2 台のカメラで点 P を撮影すると、式(1)、(2)から 3 つの未知数 (X, Y, Z) で構成される 4 本の連立方程式を解くことによって撮影対象の三次元座標が導かれる。

3. 落下試験

3.1 試験概要

自由落下試験装置(Fig.2)を用いて、包装品のダミーを自由落下させ、床面に衝突する際の貨物の挙動を高速カメラ 2 台⁵⁾で撮影する。

またダミー包装品は、包装内容品の状況の評価するために、木箱の底面をコーナパッド発泡ポリエチレン緩衝材で固定した段ボールの上面を切り取った形を採用した。ここで落下させるダミー包装品と三次元座標の関係を Fig.4 に示す。尚、今回使用したダミー包装品と通常の包装形態での落下衝撃の差を確認したところ、包装内容品に発生する加速度に大差はなく、通常の包装品と同等であると判断した(Fig.5)。

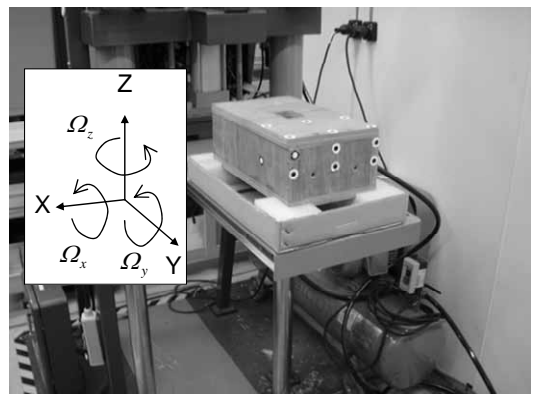


Fig.4 Dummy container on free fall tester

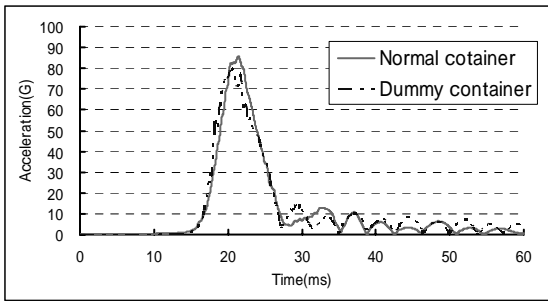


Fig.5 Comparison of composite acceleration on normal and dummy containers

3.2 試験条件 1

ここでは包装品の衝突時の角度と内部に発生する加速度の関係を評価する。試験条件として、自由落下試験の設定落下高さ 50cm、試験回数 5 回とした。さらに木箱内部の加速度を計測するために、木箱中央に 3 方向加速度ピックアップを取り付けた。高速度カメラの撮影条件は、1000 コマ/秒 (サンプリング周

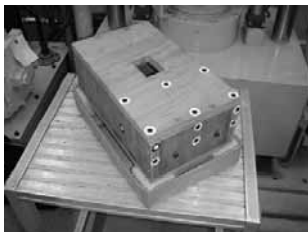
Table 1 Packaging condition for free fall test

Change point	Drop height	mass	Center of Gravity	Base area
Standard	50cm	6kg	Center of Volume	1000cm ²
Mass	50cm	3kg	Center of Volume	1000cm ²
	50cm	9kg	Center of Volume	1000cm ²
Center of Gravity	50cm	6kg	Y:+38mm from center	1000cm ²
	50cm	6kg	Y:+75mm from center	1000cm ²
Base area	50cm	6kg	Center of Volume	700cm ²
	50cm	6kg	Center of Volume	1500cm ²

Table 2 Drop height condition for free fall test

Drop Height	Drop height	mass	Center of Gravity	Base area
Drop Height	30cm	6kg	Center of Volume	1000cm ²
	80cm	6kg	Center of Volume	1000cm ²

Base area



700cm²



1000cm²



1500cm²

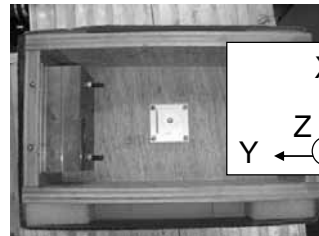
Center of gravity



Center of volume



+38mm from center



+75mm from center

Fig.6 Dummy container condition

期 1ms) に設定し、画素数は 1280 × 1024 ピクセルのものを 2 台使用した。また緩衝材の緩衝能力劣化を考慮し、予め 10 回予備落下をさせてから、落下試験を行なった⁶⁾。

3.3 試験条件 2

包装品の状態による衝突角度の変化を調査するために包装品の標準状態を、Table 1、Fig.6 のように設定し、質量、重心位置、落下面の面積に対する評価を行う。尚、試験回数、高速度カメラの条件は試験条件 1 と同様である。

3.4 試験条件 3

試験落下高さによる衝突角度の影響を確認するために、Table 2 のように、落下高さを変化させる。その他の条件は、試験条件 1 と同様である。

3.5 落下角度導出方法

ここでは、包装品の角度の算出方法について説明する。まず、Fig.7 のように点 $A(x_a, y_a, z_a)$ 、点 $B(x_b, y_b, z_b)$ 、点 $C(x_c, y_c, z_c)$ の三次元座標を、前章の方法によって導出する。次に点 A,B,C を式(4)(5)(6) に代入して、各軸まわりの回転角度 Ω_x 、 Ω_y 、 Ω_z を算出する。

$$\Omega_x = -\tan^{-1} \left(\frac{z_c - z_a}{\sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2}} \right) \quad (4)$$

$$\Omega_y = \tan^{-1} \left(\frac{z_b - z_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} \right) \quad (5)$$

$$\Omega_z = -\tan^{-1} \left(\frac{y_b - y_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}} \right) \quad (6)$$

尚、三次元解析するポイントはダミー貨物の黒丸シールを貼り付けた点(Fig.6)であり、画像により得られる黒丸の面積重心を計算し、三次元座標を導出している。

ここで、三次元解析の精度を確認するために、黒丸シール間の実測距離と、三次元解析で得た座標からの距離を比較した(Fig.7)。その結果、Table 3 に示すように、X 軸方向よりも Y 軸方向の誤差が大きく、最大で 5% 程度であることがわかる。ここで、この誤差が角

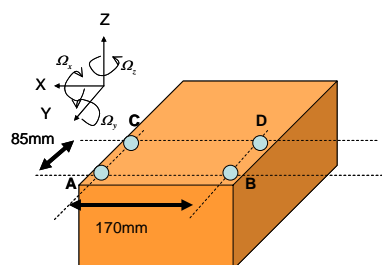


Fig.7 Dummy container distance

度導出に与える影響を考える。まず真値の距離に対して、真値(85mm) × 0.95 を解析誤差距離とする。このとき、Fig.8 のように Z(高さ)を変化させていくときの真値角度と誤差角度を Table 4 に示す。今回の解析範囲は最大 3° 程度であることから、解析距離誤差 5% が与える落下角度への影響は最大約 0.18° である。

Table 3 Error of measure and analysis angle

place	measure (mm)	Analysis (mm)	Error (%)
A-C	85	80.75	-5.00
B-D	85	80.63	-5.14
A-B	170	172.41	1.42
C-D	170	172.69	1.58

4. 試験結果

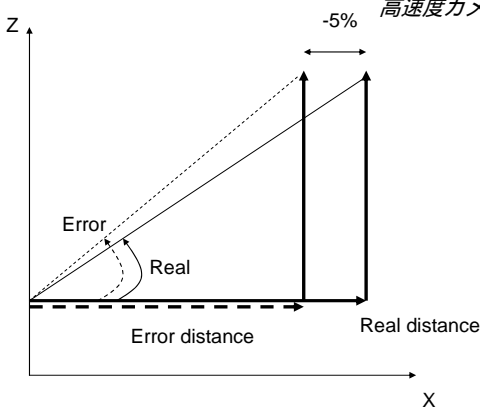


Fig.8 Outline of error and real angle

Table 4 Error of analysis angle

Z (mm)	Real angle (degree)	Error angle (degree)	Difference (degree)
0	0.00	0.00	0.00
1	0.67	0.71	0.04
2	1.35	1.42	0.07
3	2.02	2.13	0.11
4	2.69	2.84	0.14
5	3.37	3.54	0.18

4.1 落下角度と並進加速度

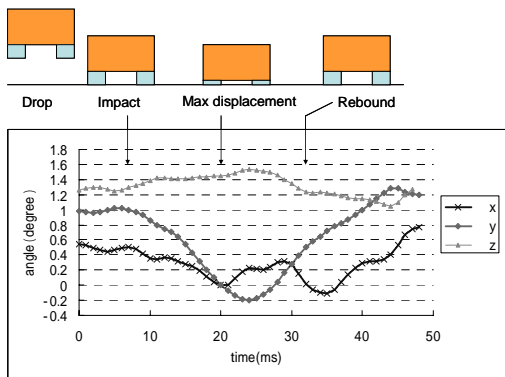


Fig.9 Time history of drop angle

Fig.9 は三次元解析によるそれぞれの角度の時刻歴の一例である。落下中の角度に大きな変化は無く、床面と衝突後、 x 、 y は負の方向に大きく回転しはじめている。また

y が極小値付近において、 x 方向軸の加速度が最大となることが確認できる(Fig.10)。 z については落下テーブルに設置した際の角度がそのまま反映されており、 x 、 y に比べて衝突後の変位量が少ない。

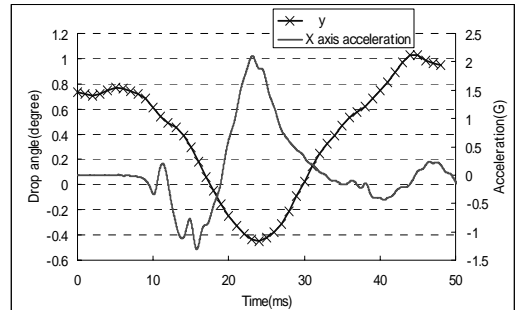


Fig.10 Time history of acceleration and drop angle

次に、床面と衝突する直前の包装品の角度を衝突角度 α_{xi} 、 α_{yi} と定義する。ここで包装内容品に発生した 3 軸合成加速度の最大値 (G_{max}) と衝突角度の関係を表した回帰式は式(7)で表すことができる。但し、 z は角度変化が小さいので、回帰式の要素として除外している。この式から、衝突角度が大きければ大きいほど、内部に発生する加速度の最大値が小さくなることがわかる。

$$G_{max} = 45.244 - 1.124 \cdot \alpha_{xi} - 1.126 \cdot \alpha_{yi} \tag{7}$$

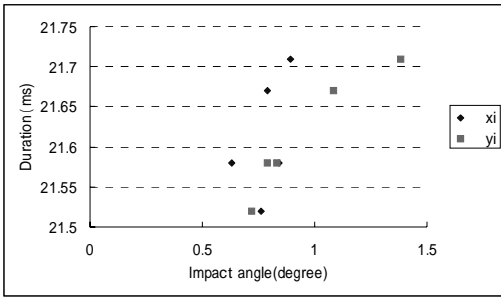


Fig.11 Relation between shock duration and impact angle

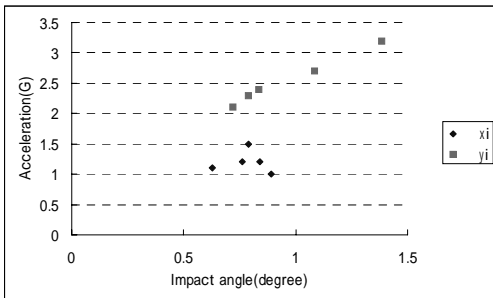


Fig.12 Relation between impact angle and peak acceleration on the other axis

ここで、衝突角度と衝撃作用時間の関係 (Fig.11)を見ると、衝突角度が大きいほど、作用時間が長くなる傾向があることが確認できる。さらに Fig.12 は x_i に対する Y 軸方向に

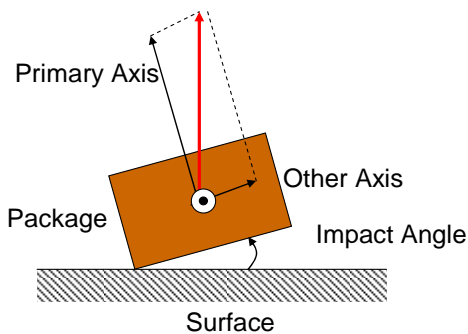


Fig.13 Image of relation between impact angle and other axis acceleration

発生したピーク加速度、及び y_i に対する X 軸方向に発生したピーク加速度の関係を表している。これより、衝突角度が大きいほど、他軸方向に発生する加速度が大きくなっている (Fig.13)。以上より、式(7)に表される包装内容品に発生する加速度が衝突角度の大きさに反比例することの原因として、衝突角度が大きくなればなるほど、完全に面落下するとき比べて、緩衝材が床面と接触する時間が長くなり、ピーク加速度も減少することと、卓越方向以外に加速度が分散することが関係していると考えられる。

さて、豊田³⁾により包装貨物落下試験の落下姿勢と角度の関係が調査されている。その事例では底面積 1600cm²の段ボール箱を使用し、落下保持テーブルの角度を変化させたときのテーブル角度と包装内容品に発生する加速度との関係を求めている。Fig.14 は横軸に衝突角度、縦軸に発生加速度の割合を表し、式(7)の x_i 、 y_i のそれぞれに角度を代入して得られた結果と、豊田の試験結果の比較である。試験方法、包装品に差があるものの、衝突角度が 2° 傾けば包装内容品の最大加速度は約 10% 減少していることが確認できる。

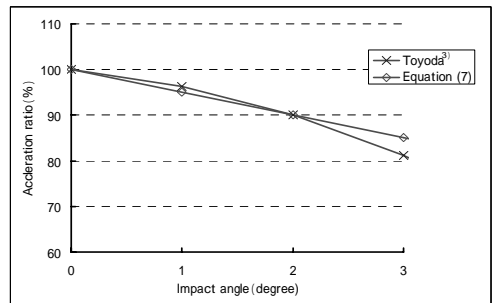


Fig.14 Relation between composite impact angle and peak acceleration ratio

4.2 包装内容品の状態が衝突角度に及ぼす影響

前章で、床面との衝突角度が包装内容品に発生する加速度に影響していることを確認した。ここでは包装内容品の状態が衝突時の角度に与える影響について述べる。Fig.15 から Fig.17 は、試験条件2で得られた結果である。

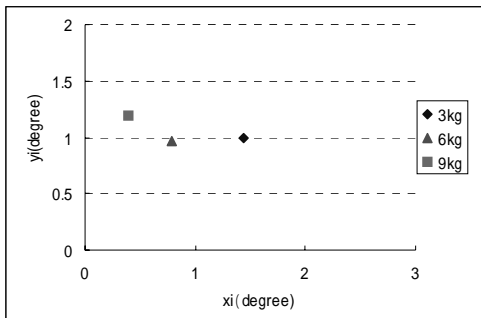


Fig.15 Impact angle by mass change

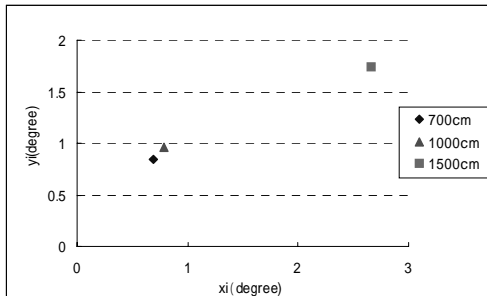


Fig.16 Impact angle by base area change

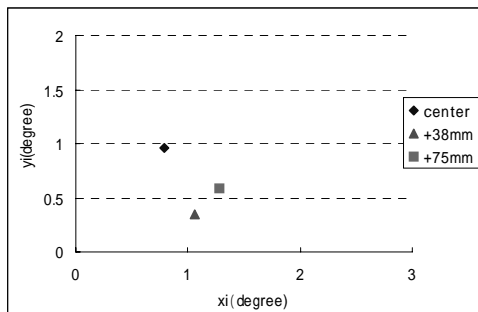


Fig.17 Impact angle by center of gravity change

縦軸に y_i 、横軸に x_i をとり、それぞれ5回の平均値を図示している。

Fig.15 は包装品の質量を変化させたときの結果で、軽量であるほど衝突時の角度が大きくなる傾向にあることがわかる。また Fig.16 は、底面積を変化させたときの結果で、底面積が大きくなれば x_i 、 y_i とともに増加する傾向にあることが確認できる。これらの原因として、試験テーブルに設置した際の段ボール底板の撓みによる胴膨れの影響が考えられる。Fig.17 は包装品の重心位置を体積中心から Y 軸性方向に重心を移動させたときの結果である。これより、重心の位置とは反対方向(x_i の符号が正)に傾いているが、この原因については不明である。

以上より、自由落下試験装置による落下試験では包装品の状態によって、落下時の姿勢に影響があることがわかった。

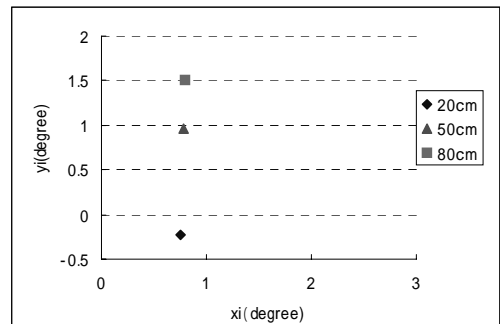


Fig.18 Impact angle by drop height Change

4.3 落下高さが衝突角度に及ぼす影響

落下高さを変化させたときの結果を、Fig.18 に示す。落下高さが高ければ、落下時間が長くなるため、包装品が一旦傾けば、その傾きが大きくなるために、 y_i が大きくなっている。

5. 落下試験の精度評価

これまでの結果で、自由落下試験において、落下時の衝突角度の大きさが包装内容品に発生するピーク加速度を減少させる原因となっていること、及び包装品の状態(質量、落下面積、重心位置)と落下高さが衝突角度に影響することを確認した。

さて、実際の自由落下試験を行なうとき、その落下試験が試験規格内に収まっているかどうか判断することができれば、落下試験精度の向上を図ることができる。4.1 で落下時の衝突角と並進加速度の間にはある程度相関があることがわかっている。これに注目して衝突角度と3軸加速度ピーク値の関係から、落下試験が規格通り実施されているかを判断する基準について述べる。

Fig.19 は横軸に包装内容品に発生した卓越軸ピーク加速度に対する他軸ピーク加速度の割合(以降、他軸比率 R とする)を表し、縦軸に x_i と y_i の絶対値を示しており、重心位置を変化させた場合の実験以外の全ての衝突角度と、それに対応(x_i は Y 軸、 y_i は X 軸)する R の関係を図示している。ここで、 R と衝突角度には包装品の状態や試験落下高さが異なっても、ある程度の比例関係があることがわかる。さて、JIS-Z-0202 に定められた衝突角度 2° 以下であるためには、Fig.19 から R はおよそ 0.1 以下であればよいことがわかる。従って、実際に落下試験を行なう際、包装内容品の3軸加速度を計測し、 R 値を算出することで、規格に沿った正しい落下試験が実施出来ているかどうかを判断する指標とすることができる。

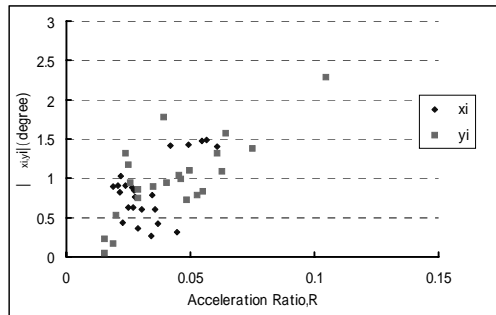


Fig.19 Estimate of impact angle and acceleration ratio

6. 結論

本研究において、高速度カメラを用い、自由落下試験状況を撮影し、三次元画像解析を行うことで、包装品の衝突角度が大きければ大きいほど、内部に発生する加速度が少なくなる傾向にあることを定量的に確認することができた。落下試験を行なう場合は衝突角度が 2° 傾けば、完全に平面落下する場合と比べて、 10% 減になる可能性があることを念頭におく必要がある。

また、落下時の衝突角度は、包装品の状態にも左右されており、特に底面積が大きいほど、衝突角度が大きくなる傾向にある。

さらに実際に包装貨物落下試験を実施する際に、3軸加速度ピックアップを利用すれば、その落下試験が規格範囲に入っているかを判断するための指標となることを示した。以上の結果より、落下試験毎のばらつき問題の解消、実輸送過程で発生する損傷の再現、衝撃落下試験との等価精度向上などが期待できる。尚、加速度ピックアップの取り付けは落下試験判定以外にも、包装設計の定量評価、緩衝効果の確認、包装課題の早期発見、品質管理の向上など多様なメリットがあることを付け

加えておく。

<引用文献>

- 1) JIS ハンドブック 2005、63 包装、
p.940(2005)
- 2) 斎藤勝彦、川口和晃、日本包装学会技術
報告、13(5)、p.303 (2004)
- 3) 豊田實、包装技術、26(10)、p.977 (1988)
- 4) 橋原孝博、小村 暁、広島大学総合科学
部紀要、6()、p.33 (1988)
- 5) ナックイメージテクノロジー カタロ
グ
- 6) 旭化成ライフ&リビング サンテック
フォーム技術資料、54

(原稿受付 2008年10月20日)

(審査受理 2009年1月16日)