

## 一般論文

## 初速度を考慮した落下高さ換算手法

波野 諭志\*、斎藤 勝彦\*\*

## Method of Drop Height Conversion considering Initial Velocity

Satoshi HATANO\* and Katsuhiko SAITO\*\*

輸送衝撃による貨物損傷を防ぐため、貨物質量、輸送荷扱いレベルごとに落下試験の落下高さが規定されている。試験高さは現場等価性が求められ、輸送環境調査結果に即して決定すべきである。落下高さ換算手法には主に FF 法、Gp 法、Vc 法があり、事前研究では圧電式加速度センサを用いた FF 法による換算の検討がなされたが、回転を伴う落下では正確な落下高さを解析出来なかった。そこで、本研究では DC 成分が計測可能な MEMS 式加速度センサを用いて自由落下の初速度を解析することで、「回転落下」時も正確な落下高さを換算する手法を提案している。その結果、FF 法による落下高さ換算手法において、自由落下の初速度の鉛直成分を加味することで、回転落下時の落下高さ換算精度が向上することを明らかにしている。また、落下高さ換算に圧電式記録計を使用すると加速度減衰が発生するため、MEMS 等の DC 成分が計測可能な計測器を使用することが望ましいことを指摘している。

To prevent product damage by impact during transport, the drop height of the drop test was specified for each cargo mass and transport handling level. The drop height must be equivalent to that in the field and should be determined based on transport environment survey results. The three main methods for drop-height conversion are Free-Fall (FF), G-peak (Gp), and Velocity-change (Vc) methods. A previous study considered conversion by FF method using a piezoelectric acceleration sensor; however, the drop height in falls with rotation could not be accurately analyzed. Therefore, the present study proposed a method to accurately convert the drop height even in “rolling fall” cases by analyzing the initial free-fall velocity using a MEMS-type acceleration sensor that can measure DC components. Results show that the drop-height conversion accuracy in rolling-fall cases is improved by considering the vertical component of the initial free-fall velocity in drop-height conversion using the FF method. Moreover, the need to use a measuring instrument that can measure DC components, such as a MEMS recorder, is shown to be desirable because using a piezoelectric recorder for drop-height conversion leads to acceleration attenuation.

キーワード：落下高さ、初速度、圧電式、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、ジャーク

Keywords : Drop Height, Initial Velocity, Piezoelectric, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), Jerk

## 1. 緒言

貨物の安全輸送を目的として製品出荷前には包装貨物評価試験が実施されており、主に落下試験、振動試験、圧縮試験がある。その中でも、輸送中の製品破損の最大要因が荷役時の衝撃であり、包装貨物落下試験が特に重要である。その際の落下高さは現場等価性が

保証されたものである必要があり、輸送環境調査の計測結果に即して決定すべきである。

落下高さの換算方法は主にフリーフォール解析法 (FF 法)、ピーク加速度法 (Gp 法)、衝撃速度変化法 (Vc 法) があり、過去に実輸送における落下高さ換算を実施した例があるが<sup>1)2)3)4)</sup>、落下高さ換算結果の妥当性について考察した例は少ない。一方、田畑らは室内試

\* 連絡者 (Corresponding author), 神栄テクノロジー(株) (〒300-2657 茨城県つくば市香取台 B47 街区 11 画地 Shinyei Technology Co., Ltd., B47-11, Katoridai, Tsukuba, Ibaraki, 300-2657, Japan)  
TEL: 029-848-3570, FAX: 029-848-3572, Email: s-hatano@stc.shinyei.co.jp

\*\* 神戸大学 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 Fukaeminami, Higashi-nada, Kobe, 658-0022 Japan)

験において FF 法を用いた落下高さ換算を実施し、落下姿勢が安定している鉛直落下においては正確に落下高さ換算ができることを示したが、輸送を想定した複雑落下の場合は、換算結果の誤差・ばらつきが大きいことを指摘しており検討課題として残されている<sup>5)</sup>。そこで本研究では、FF 法における複雑落下時の落下高さ換算精度向上を目的として、室内試験にて輸送記録計の落下試験を行い、落下時の計測加速度波形から精度良く落下高さを換算する方法を検討した。

## 2. FF 法による落下高さ換算方法

### 2.1 従来評価法

#### 2.1.1 自由落下時間に基づく落下高さ解析

FF 法による落下高さ解析では、貨物の自由落下時間を計測加速度波形より読み取ることによって落下高さを求めており、解析に用いる式は等加速度直線運動の運動方程式が基になる。そこで、物体の自由落下開始後における、鉛直方向の移動距離を表す運動方程式を式 (1) に示す (鉛直下向きを正とする)。

$$\Delta h = V_{0y} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} g \cdot \Delta t^2 \quad (1)$$

$$V_{0y} = V_0 \sin \theta \quad (2)$$

ここに、 $\Delta h$  : 鉛直方向の移動距離[m]、 $V_0$  : 自由落下時初速度 [m/s]、 $V_{0y}$  :  $V_0$  の鉛直成分 [m/s]、 $\theta$  : 俯角[rad]、 $\Delta t$  : 自由落下時間[s]、 $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]である。輸送記録計は落下時の加速度を計測するが、初速度は計測波形上に直接反映されないため、落下高さ換算には  $V_0$  を 0 とした式 (3) が用いられる。

$$\Delta h = \frac{1}{2} g \cdot \Delta t^2 \quad (3)$$

計測波形より読み取った自由落下時間を式 (3) に代入することで、落下高さが求まる。

### 2.1.2 自由落下時間解析法

#### (1) 圧電式記録計による解析

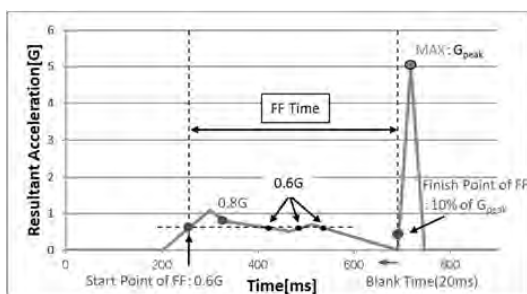
##### (a) 圧電式加速度センサの概要

圧電式加速度センサは振動・衝撃計測に最も多用され、圧電効果を応用し加速度を計測する仕組みである。圧電式は①静的感度を持たない、②広いダイナミックレンジ、③広い周波数範囲、④高い耐衝撃性などの特徴があり、特に①の特徴からセンサ姿勢による各軸発生重力加速度の変化量を補正する必要がなく、衝撃解析が容易である<sup>6)</sup>。一方、静的感度を持たないために一定加速度が検知出来ず、輸送調査においては貨物姿勢の把握、自由落下時間の統一評価ができない。そのため輸送記録計における落下高さ換算機能について、各メーカーは独自のアルゴリズムを構築しており、それが落下高さ換算結果誤差に繋がる。

##### (b) 自由落下時間解析方法 (圧電式)

圧電式加速度センサを用いた輸送環境記録計 (神栄テクノロジー(株) DER-1000, 以下、圧電式記録計) は Fig.1 のようなルールで自由落下時間を推定するようにプログラムされている。つまり、最大加速度の 10%点を自由落下終了点とし、ブランクタイム 20ms をあけて 0.8G (1G ≒ 9.8m/s<sup>2</sup>) 点を経た 0.6G 点を自由落下開始点と判定されている。また、自由落下終了点以前に 0.8G 点が無い場合、自由落下終了点からカウントした 2 回目の 0.6G 点を自由落下開始点と判定され

る。なお、自由落下終了点以前に 0.6G 点が無い場合、落下高さ換算は行われない。



**Fig.1 Estimation Method of Free Fall Time on DER-1000**

## (2) MEMS 式記録計による解析法

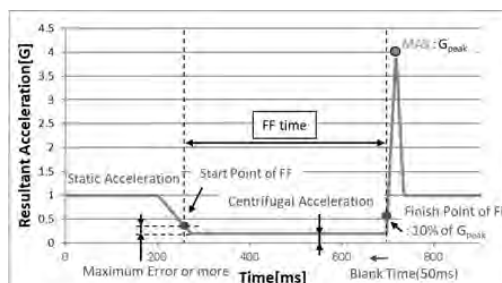
### (a) MEMS 式加速度センサの概要

スマートフォンや自動車を含む様々な製品に使用されている MEMS デバイスは、加速度センサにも応用されている。MEMS 式加速度センサは半導体微細加工などの各種ナノ・マイクロ加工技術を応用した、微小な機械要素と電気要素を 1 つの基板上に組み込んだセンサであり、デバイスの小型化、低消費電力、高性能化、ウェアレベルの一括加工による低コスト化が可能になる<sup>7)</sup>。MEMS 式加速度センサは、バネ・マス系に連結した検出素子部の変位に起因する静電容量変化・ひずみを検知するため、DC 成分を取ることが圧電式加速度センサとの違いであり、製品の傾きを検知出来る。一方、波形解析の際は各軸に作用する重力加速度や遠心加速度を考慮する必要があり、解析にはある程度の知識・技量を要する。

### (b) 自由落下時間解析方法 (MEMS 式)

Fig.2 に、MEMS 式加速度センサを備えた記録計 (以下、MEMS 式記録計) が、静止

状態から回転を伴い落下する時の合成加速度波形例を示す。静止時は静的加速度 (1G) を計測し、回転動作を経て自由落下を開始する。加速度センサが計測器筐体の重心に位置しない場合、自由落下中は計測器回転による遠心加速度が発生するが、遠心加速度の大きさは角速度と回転半径に依存するため、自由落下中の計測加速度は常に一定となる。よって、衝突前の合成加速度一定期間が自由落下期間であり、その期間を合成加速度波形より解析し自由落下時間を式 (3) に代入することで、自由落下高さを算出する。自由落下期間解析のために、ここでは合成加速度波形において最大加速度の 10% 点を自由落下終了点とし、ブランクタイム 50ms を空けた点の付近 10ms の計測加速度平均値に、記録計の最大誤差以上の任意の値 (自由落下開始時刻解析閾値) を加えた点を自由落下開始点とする。



**Fig.2 Measurement Data Example of Drop Test with MEMS Acceleration Sensor**

## 2.2 提案評価法

### 2.2.1 初速度を考慮した落下高さ換算法

式 (3) による落下高さ換算法は静止状態からの鉛直落下を想定したものであるが、その様な落下事象は実輸送においては稀で、大半の落下事象において自由落下開始時は初速度を有すると想定される。そのため、式 (3)

による落下高さ換算手法は室内試験などの落下姿勢の安定した鉛直落下の場合のみ適用可能であり、実輸送で発生する複雑落下事象では正確に落下高さを換算できない。複雑落下事象において正確な落下高さを換算するためには、自由落下時間の他に自由落下開始時の初速度の鉛直成分 ( $V_{0y}$ ) を求める必要がある。そこで、ここでは静止状態の貨物が底面の中心を通る線を軸として、パレット上より転落する状況における  $V_{0y}$  を求める方法を検討する。

## 2.2.2 自由落下時間・初速度解析法

### (1) 自由落下開始時の初速度理論値

貨物の転落における自由落下開始時の初速度理論値を算出するにあたり、一辺の長さが  $2r$  [m]、質量  $m$  [kg] の一様な立方体が、テーブルの端を軸に回転する状況を想定する (Fig.3)。回転軸 (立方体とテーブルの接点) は底面の向かい合う辺の中点を結んだ線とし、軸上では物体は滑らないものとする。なお、回転軸が重心の直下に位置する場合、物体は回転を開始しないため、ここでは物体重心を回転軸より外に僅かにずらすものとする。

自由落下開始前の貨物の回転は、接辺を軸とする重心の回転運動であり、回転半径は  $r$  [m] である。ここで、重心の円運動による遠心力が垂直抗力を上回ると貨物がテーブルから離れるため、自由落下開始時の俯角を  $\theta_0$  [rad] とすると式 (4) が成り立つ。

$$m \frac{V_0^2}{r} = mg \cdot \cos \theta_0 \quad (4)$$

また、俯角  $\theta$  [rad] における重心の速度を  $v$  [m/s] とすると、力学的エネルギー保存則より式 (6) が成り立つ。

$$mgr(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

$$v = \sqrt{2gr(1 - \cos \theta)} \quad (6)$$

式 (4)、(6) より、式 (7)、(8) が成り立つ。

$$\cos \theta_0 = \frac{2}{3} \quad (7)$$

$$\sin \theta_0 = \frac{\sqrt{5}}{3} \quad (8)$$

式 (2)、(6) より、 $V_{0y}$  は式 (9) に求まる。

$$V_{0y} = \sqrt{\frac{10}{27}gr} \quad (9)$$

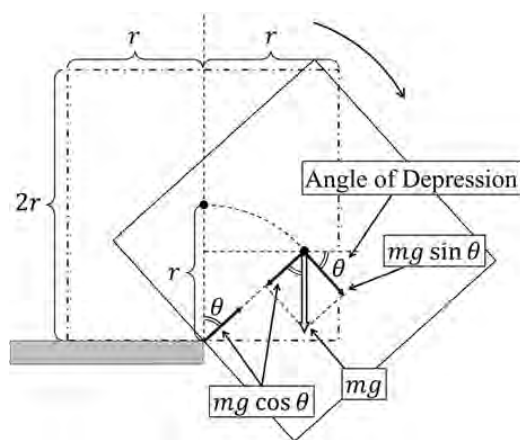


Fig.3 Acting Force in Rolling Cube

### (2) 理論計測波形と初速度相当式

落下時の物体重心の運動は大きく 4 段階に区分でき、それぞれ①「静止」、②「円運動」、③「自由落下」、④「衝突」である (Fig.4 上段)。落下高さ換算を FF 法にて実施する場合、①～③の段階の計測波形から落下状況を解析する必要があるため、加速度センサが物体の中心に位置すると仮定し、各段階における発生合成加速度理論値を次に示す。

$$\textcircled{1} \text{ 静止} : G_{(t)} = a_s \quad (10)$$

$$(0 \leq t \leq t_1)$$

$$\textcircled{2} \text{円運動} : G_{(t)} = a_s \cos \theta_{(t)} \quad (11)$$

$$(t_1 < t \leq t_2)$$

$$\textcircled{3} \text{自由落下} : G_{(t)} = \frac{r'(\frac{V_0}{r})^2}{g} \quad (12)$$

$$(t_2 < t \leq t_3)$$

ここに、 $G_{(t)}$ ：時刻  $t$  [s]における合成加速度 [G]、 $a_s$ ：発生静的加速度[G]（静止時は 1G）、 $t_1$ ：円運動開始時刻、 $t_2$ ：自由落下開始時刻、 $t_3$ ：自由落下終了時刻、 $r'$ ：重心-センサ間距離 [m]、 $\theta_{(t)}$ ：時刻  $t$ における俯角[rad]である。

### (3) 実落下計測波形からの初速度解析法

実輸送中の貨物落下は常に貨物底面の中線を軸とした回転落下とは限らないため、初速度の解析は計測波形を基に実施されるべきである。そこで、MEMS 式記録計の落下時に計測される合成加速度波形から初速度を解析する方法を検討する。回転中の物体に作用する進行方向の力は **Fig.3** において重力の分解より  $mg \cdot \sin \theta_{(t)}$  [N]であるため、初速度を生み出す加速度は  $\sin \theta_{(t)}$  [G]であり、計測合成加速度波形より求まる自由落下開始時の解析初速度  $V_0'$ は式 (13) となる。

$$V_0' = a_s g \int_{t_1}^{t_2} \sin \theta_{(t)} dt \quad (13)$$

円運動中の物体に生じる合成加速度は式 (11) であるため、計測合成加速度波形の面積を解析することで、回転落下における自由落下開始時初速度は式 (15) に求まる。

$$S = a_s \int_{t_1}^{t_2} \cos \theta_{(t)} dt \quad (14)$$

$$V_0' = gS \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sin \theta_{(t)} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \cos \theta_{(t)} dt} \quad (15)$$

ここに、 $S$ ：計測合成加速度波形の時間積分 [m/s<sup>2</sup>]である (**Fig.4** 中段)。  $t_1, t_2$ を求めるこ

とで加速度波形より  $S$ が解析可能であるが、 $t = t_1$ の合成加速度値は静止時に発生する 1G 相当の静的加速度  $a_s$ であるため、 $t_1$ の解析誤差が及ぼす  $S$ 及び  $V_0'$ の解析誤差が大きくなる。そこで、静的加速度  $a_s$ と計測加速度の積分差を代用することで、 $t_1$ の解析誤差による影響を小さくすることを目的とし、式 (15) を式 (16) に変換する。

$$V_0' = gS' \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sin \theta_{(t)} dt}{\int_{t_1}^{t_2} (1 - \cos \theta_{(t)}) dt} \quad (16)$$

ここに、 $S'$ ：静的加速度と計測加速度の積分差 [m/s<sup>2</sup>]である。また、ここでは  $\theta_{(t_1)} \cong 0$  [rad]、 $\theta_{(t_2)} = \theta_0$  [rad]であるため、式 (16) は式 (17) に変換できる。

$$V_0' \cong gS' \cdot \frac{\int_0^{\theta_0} \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_0} (1 - \cos \theta) d\theta} \quad (17)$$

式 (7) , (8) より、計測合成加速度波形より求まる自由落下開始時の解析初速度鉛直成分  $V_{0y}'$ は式 (18) に求まる。

$$V_{0y}' \cong gS' \cdot 3.48 \quad (18)$$

$S'$ の解析方法は、計測に MEMS 式記録計を用いた場合、計測データにおける区分求積法として式 (19) を用いる。

$$S'_{MEMS} = T_s \cdot \left| \sum_{k=\frac{t_1}{T_s}}^{\frac{t_2}{T_s}} (G_{(kT_s)} - G_{(t_1)}) \right| \quad (19)$$

ここに、 $S'_{MEMS}$ ：MEMS 式記録計における計測合成加速度波形面積[G・s]、 $T_s$ ：サンプリング周期[s]である。式 (19) は、計測加速度波形から  $t = t_1$  の静的加速度を減じることで静止時の加速度を 0G に補正し、 $t = t_1$  から  $t_2$  までの任意の補正加速度の絶対値にサンプリング周期を乗じた値の合計を  $S'_{MEMS}$  としている。

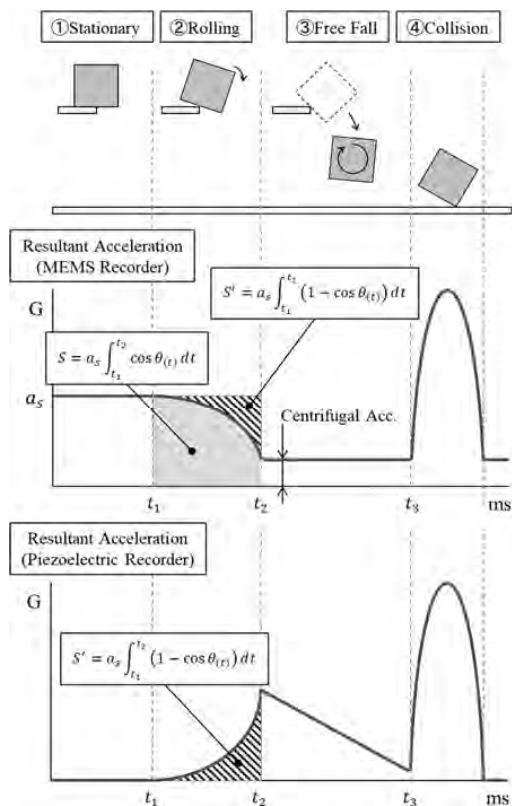


Fig.4 Resultant Acceleration on Rolling Drop with Acceleration Recorder

#### (4) ジャークによる円運動開始時刻決定

自由落下前の円運動開始時刻を決定するために、ジャークを使用する。ジャークは加速度の一階微分のため、発生加速度が一定の場合は、発生加速度の大きさを問わずジャークは  $0[\text{m/s}^3]$  となる。一方、物体に動的な力が発生するとジャークの絶対値は増加する。この特性を利用して、自由落下開始時刻以前のジャーク値が指定値以下になる点を自由落下前の円運動開始時刻とする。ジャークは加速度の平均変化率と見なせるため、時刻  $t[\text{s}]$  における合成加速度平均変化率を式 (20) で表す。

$$\frac{da}{dt}_{(p_1, p_2)} = \frac{a_{(p_2)} - a_{(p_1)}}{p_2 - p_1} \quad (20)$$

ここに、 $\frac{da}{dt}_{(p_1, p_2)}$  : 時刻  $p_1[\text{s}]$  から  $p_2[\text{s}]$  における合成加速度平均変化率  $[\text{m/s}^3]$ 、 $a_{(t)}$  : 時刻  $t[\text{s}]$  における合成加速度  $[\text{m/s}^2]$  である。円運動開始時刻を決定するジャーク値（以下、ジャーク閾値）は、ここでは指定区間における 3 区間の加速度平均変化率の平均値としている。つまり、ジャーク解析区間を  $5\text{ms}$  とし、任意の  $5\text{ms}$  区間における  $1-4\text{ms}$ ,  $2-5\text{ms}$ ,  $1-5\text{ms}$  の区間の合成加速度平均変化率の平均値をジャーク値としている。ここで、任意の  $5\text{ms}$  区間内における経過時間  $t'[\text{ms}]$  における合成加速度を  $A_{(t')}[\text{m/s}^2]$  とすると、その  $5\text{ms}$  区間におけるジャークを式 (22) として表すことが出来る。

$$\begin{aligned} \text{Jerk} &= \frac{1}{3} \left( \frac{A_{(4)} - A_{(1)}}{0.003} + \frac{A_{(5)} - A_{(2)}}{0.003} + \frac{A_{(5)} - A_{(1)}}{0.004} \right) \quad (21) \end{aligned}$$

$$= \frac{10^3}{36} \{4(A_{(4)} - A_{(2)}) + 7(A_{(5)} - A_{(1)})\} \quad (22)$$

よって、ジャーク解析基準時刻をここでは  $5\text{ms}$  区間の  $t' = 3$  とし、計測波形全体における時刻  $t[\text{ms}]$  のジャークは式 (23) に求まる。

$$\begin{aligned} \text{Jerk}_{(t)} &= \frac{10^3}{36} \{4(A_{(t+1)} - A_{(t-1)}) + 7(A_{(t+2)} - A_{(t-2)})\} \quad (23) \end{aligned}$$

ここで、ジャーク閾値を計測加速度平均偏差から決定する。自由落下中の物体に発生する加速度は一定だが、計測値には誤差によるばらつきが生じる。そこで、ここでは自由落下中の合成加速度平均偏差を振幅に加速度が変化すると仮定し、式 (23) より求まる最大ジャークをジャーク閾値とし、式 (24) に表す。

$$\text{Jerk}_{FF} = \frac{11 \cdot 10^3}{18} \cdot A_{MD} \quad (24)$$

ここに、 $\text{Jerk}_{FF}$  : ジャーク閾値  $[\text{m/s}^3]$ 、 $A_{MD}$  : 合成加速度平均偏差  $[\text{m/s}^2]$  である。円運動開始時刻  $t_1$  は、ここでは  $t_2$  以前にてジャークの絶対値が初めて  $\text{Jerk}_{FF}$  以下になる点とした。

### (5) 圧電式記録計による計測波形

圧電式加速度センサの特徴より静止時の計測加速度は 0G であるため、円運動時の計測合成加速度波形の面積は  $S'$  と等価である (Fig.4 下段)。一方、圧電式加速度センサの応答周波数領域外では周波数特性による加速度減衰が発生するため、圧電式記録計による計測加速度は MEMS 式記録計による計測加速度 (発生加速度理論値に相当) より小さくなる。そのため、圧電式記録計を用いた初速度解析の際は、式 (19) において積分範囲を拡張した式 (25) を用いる。

$$S'_{PZT} = T_s \cdot \left| \sum_{k=0}^{\frac{t_2}{T_s}} G_{(k \cdot T_s)} \right| \quad (25)$$

ここに、 $S'_{PZT}$  : 圧電式記録計における計測合成加速度波形面積[G・s]である。

### 2.2.3 落下高さ解析アルゴリズム

落下高さ解析に必要な自由落下時間及び初速度の解析法を前項にて示したが、ここで提案する落下高さ解析アルゴリズムを整理する。

#### (1) MEMS 式記録計を用いた手法

- ① 最大加速度の 10% 点が  $t_3$ 。
- ②  $t_3$  よりブランクタイム 50ms を空け、付近 10ms の平均を計算。
- ③ ②の平均加速度に自由落下開始時刻解析閾値を加えた点が  $t_2$ 。
- ④  $t_2$  以前にジャークの絶対値が初めて  $Jerk_{FF}$  以下になる点が  $t_1$  (Fig.5)。
- ⑤ 式 (19) より  $S'_{MEMS}$  算出。
- ⑥ 式 (18) の  $S'$  に  $S'_{MEMS}$  を代入し、 $V_{0y}'$  算出。
- ⑦ ①, ③より  $\Delta t$  算出。
- ⑧  $V_{0y}'$ ,  $\Delta t$ , 式 (1) より、落下高さ算出。

#### (2) 圧電式記録計を用いた手法

- ① 最大加速度の 10% 点が  $t_3$ 。
- ②  $t_3$  よりブランクタイム 20ms を空けて 0.8G 点を経た 0.6G 点が  $t_2$  (Fig.1)。
- ③ 式 (25) より  $S'_{PZT}$  算出。
- ④ 式 (18) の  $S'$  に  $S'_{PZT}$  を代入し、 $V_{0y}'$  算出。
- ⑤ ①, ②より  $\Delta t$  算出。
- ⑥  $V_{0y}'$ ,  $\Delta t$ , 式 (1) より、落下高さ算出。

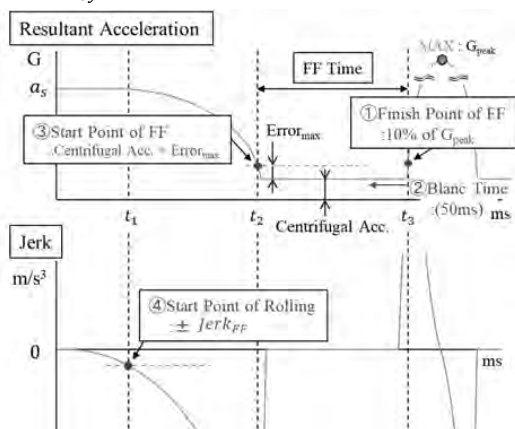


Fig.5 Estimation Method of Free Fall Time and Start Point of Rolling on MEMS Recorder

### 3. 落下試験

#### 3.1 試験方法

本試験は、包装貨物落下試験機 (神栄テクノロジー(株) DTS-80) により輸送環境記録計 (DER-1000)、MEMS 式記録計を落下させ、落下時の加速度を計測している。試験機の設定落下高さは 23, 53, 83cm とし、厚さ 1cm の発泡ポリエチレンシート (25kg/m<sup>3</sup>) を 3 枚落下下面に敷き、落下高さを 20, 50, 80cm としている。落下方法は、試験機の落下動作による「鉛直落下」と、記録計が供試品テーブル (以下、テーブル) 上より半分せり出した状態から重心を僅かにテーブルの外へずらすこ

とによる「回転落下」(Fig.6)とし、記録計のテーブル接地面は5面としている。

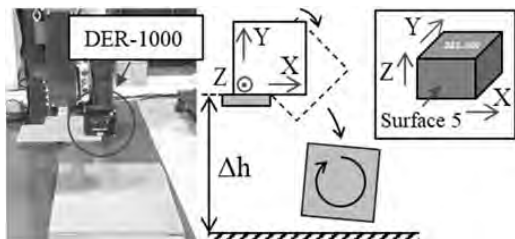


Fig.6 Rolling Drop Test(DER-1000)

### 3.2 計測設定・計測器情報

計測条件は先行研究<sup>5)</sup>に準じ、トリガレベル 5.0G、解析時のローパスフィルタは 50Hz とした (DER-1000 解析ソフトウェアによる)。なお、サンプリングレート、フレーム長、プレートリガは、圧電式記録計の場合は 0.5ms、2048pt、70%、MEMS 式記録計の場合は計測可能条件より 1ms、1024pt、50%とした。

計測器の寸法及び質量は、圧電式記録計が W121×D109×H58mm、950g、MEMS 式記録計は W78.8×D78.8×H36mm、239g であり、センサと重心の位置は異なる。また、重心位置は、圧電式記録計は筐体中心に位置するが、MEMS 式記録計は筐体中心に位置していない。

### 3.3 自由落下開始時刻解析閾値(MEMS 式)

MEMS 式記録計に使用されている加速度センサは、容量 16G、誤差範囲はフルスケールの±0.3%としている。そのため 3 軸合成加速度における最大誤差は±0.08Gとなるため、自由落下開始時刻解析閾値を 0.1G とした。

## 4. 結果

### 4.1 自由落下時間による落下高さ換算

#### (従来評価法)

50cm の高さから鉛直落下、回転落下させた時の合成加速度波形から、式 (3) を用いた FF 法により落下高さを換算した結果、圧電式記録計の場合は、鉛直落下が 48.3cm、回転落下が 30.8cm、MEMS 式記録計の場合は、鉛直落下が 46.8cm、回転落下が 36.3cm となった。

この結果は事前研究と同様、落下姿勢が安定している鉛直落下試験では FF 法の精度が良く、輸送を想定した落下時は誤差が大きいことを示している(過小評価)。なお、20、80cm の高さから落下させた場合の落下高さ換算結果平均も、同様の結果を示していることが分かる (Table1)。なお、圧電式記録計の回転落下試験結果のおよそ半数において、自由落下開始時の発生加速度が落下高さ解析条件の加速度値 (0.6G) を上回らず、落下高さ換算が行われなかった。これは圧電式加速度センサの応答周波数領域外における周波数特性による加速度減衰が要因と考えられる。

Table1 Conversion Results of Drop Test  
NOT considering Initial Velocity

(unit : cm)

	Setting D.H.	Vertical Drop		Rolling Drop	
		Con. D.H.	Relative Error	Con. D.H.	Relative Error
Piezo. Recorder	20	19.1	-5%	10.2	-49%
	50	48.3	-3%	30.8	-38%
MEMS Recorder	20	18.1	-9%	11.3	-44%
	50	46.8	-6%	36.3	-27%
	80	76.0	-5%	62.3	-22%

(Piezo. : Piezoelectric, Con. : Converted, D.H. : Drop Height)



## 4.2 初速度を考慮した落下高さ換算

### (提案評価法)

各落下試験結果より、2.2.3 に則り落下高さ換算を実施する。Fig.7 は圧電式、Fig.8 はMEMS式記録計を50cmの高さから回転落下させた時の計測加速度及び解析ジャーク波形である。ここで、ジャーク波形より円運動開始時刻を決定するために、ジャーク閾値を決定する合成加速度平均偏差を求める。Fig.8 のMEMS式記録計の計測合成加速度波形より、衝突前に加速度が一定の期間が自由落下期間と判断できる。ここでは250msから450msまでを自由落下とした場合、区間の合成加速度平均偏差 $A_{MD}$ が約 $3.2 \times 10^{-2} [m/s^2]$ であったため、式(24)より $Jerk_{FF}$ は $20 [m/s^3]$ とした。

2.3.3 のアルゴリズム通りに各時刻を加速度波形より解析した結果、衝撃発生時を自由落下終了時刻と捉え、自由落下開始時刻は、圧電式では2回目の0.6G点、MEMS式では加速度一定期間の開始点付近で捉えており、正確に自由落下区間を解析している。またFig.8では、ジャークが $20 [m/s^3]$ になる時刻で計測加速度は1Gに収束し、正確に円運動開始時刻を解析している。これら各解析時刻を積分範囲として求めた面積 $S'$ と自由落下時間 $\Delta t$ を、式

(18), 式(1)に代入して落下高さ換算を行った結果、圧電式記録計の場合は、鉛直落下が52.6cm、回転落下が51.4cm、MEMS式記録計の場合は、鉛直落下が51.0cm、回転落下が51.3cmとなり、圧電式記録計、MEMS式記録計共に精度よく落下高さ換算が実施されることが分かる。また、20cm, 80cm (MEMS式記録計のみ)の高さからの落下においても同様に解析精度は高かった (Table2)。

ここで、回転落下における実計測波形と理論計測波形を比較する。理論計測波形であるFig.4, Fig.5では、円運動開始から自由落下開始までの区間において、加速度波形は滑らかな曲線を描くが、Fig.7, Fig.8の実計測加速度波形及びジャーク波形においては、自由落下開始時刻の直前に顕著な陥没が見られる。これは記録計のテーブル上での滑落が要因として挙げられ、Fig.3の立方体回転モデルでは回転軸上で物体は滑らないと仮定している。記録計が滑りテーブルとの接点がずれると、俯角に相当する $\theta$ が大きくなり $\cos \theta$ が小さくなるため、圧電式記録計において計測加速度減少及び本試験における落下高さ未解析を助長したと考えられる。

Table2 Conversion Results of Drop Test considering Initial Velocity

(unit : cm)

	Setting D.H.	Vertical Drop		Rolling Drop	
		Con. D.H.	Relative Error	Con. D.H.	Relative Error
Piezo. Recorder	20	22.1	+10%	23.6	+18%
	50	52.6	+5%	51.4	+3%
MEMS Recorder	20	20.7	+4%	17.6	-12%
	50	51.1	+2%	51.3	+3%
	80	81.6	+2%	80.5	+1%

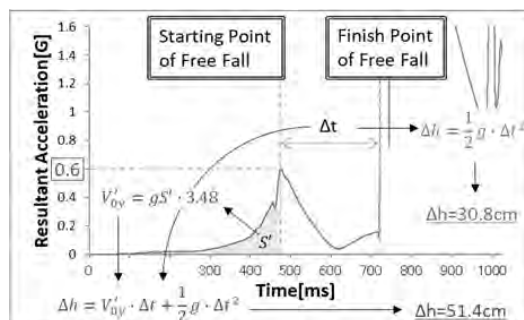
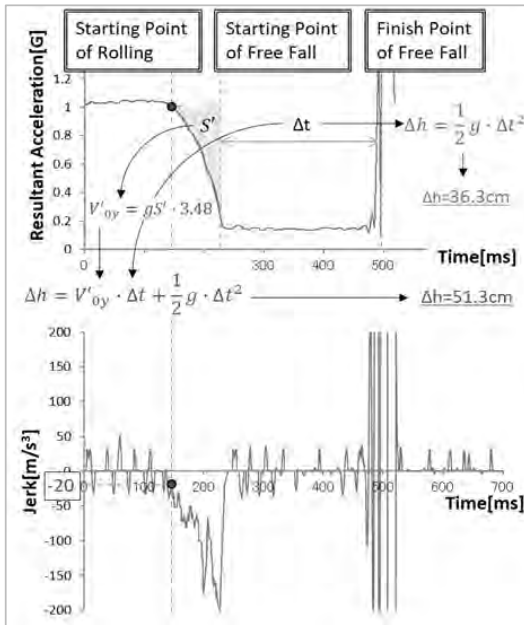


Fig.7 Resultant Acceleration of Rolling Drop from 50cm Height with DER=1000



**Fig.8 Resultant Acceleration and Jerk of Rolling Drop from 50cm Height with MEMS Recorder**

### 4.3 解析法による改善

従来評価法から新規評価法への変更により、回転落下における相対誤差絶対値について、落下高さ 20cm の場合は 32%、落下高さ 50, 80cm の場合は平均 27%減少し、初速度を考慮することで落下高さ換算精度が大幅に上昇することが分かる。なお、落下高さが 20cm の場合の換算結果相対誤差絶対値の平均は、50, 80cm の場合のそれと比べて大きい、これは記録計の落下衝突箇所による影響が考えられる (5.4 にて後述)。

鉛直落下の場合は、新規評価法への変更により圧電式記録計における相対誤差絶対値は大きくなったが、総じて換算精度は以前と同様に高い結果となった。なお、新規評価法により圧電式記録計の相対誤差絶対値が大きくなるのは、試験に用いた圧電式記録計が、鉛

直落下時に換算結果が落下高さ真値になるようプログラムされているためと推測される。

以上より、新規評価法を採用することで、鉛直落下、回転落下共に精度の良い落下高さ換算が可能であることが分かる。

## 5. 考察

### 5.1 貨物寸法と形状による影響

貨物の初速度解析には貨物の円運動開始時刻から自由落下開始時刻までの合成加速度時間積分を行うため、計測条件設定前に落下所要時間を概算する必要がある。ここに、回転角  $\theta \approx 0[\text{rad}]$  から  $\theta = \theta_0[\text{rad}]$  までの回転に要する時間  $T [\text{s}]$  は、式 (6) より式 (29) に求まる。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{r} = \sqrt{\frac{2g(1 - \cos\theta)}{r}} \quad (26)$$

$$\frac{dt}{d\theta} = \sqrt{\frac{r}{2g(1 - \cos\theta)}} \quad (27)$$

$$\therefore T = \int_0^{\theta_0} \sqrt{\frac{r}{2g(1 - \cos\theta)}} d\theta \quad (28)$$

$$= \sqrt{\frac{r}{2g}} \int_0^{\theta_0} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \cos\theta}} \quad (29)$$

式 (29) より  $T$  は回転半径  $r$  に依存するため、輸送調査の実施には貨物の大きさに合わせ計測時間を調整する必要がある。一方、輸送調査には貨物と同形状のダミー箱を用いることが通例であり、立方体の箱にて計測するとは限らない。そのため、落下時の加速度波形を計測するためには、計測対象の貨物の最長辺と直行する面における中線を軸とした回転落下試験を実施の上、計測データより解析した落下所要時間以上の時間をプレトリガ計測時間としてフレーム長を決定する必要がある。

## 5.2 ジャーク解析について

貨物の円運動開始時刻解析にジャークを用いたが、ジャークを計測する方法は一般化されていない。本論ではジャーク解析に合成加速度波形の平均変化率を用いたが、ジャークは解析周波数が高いほど感度が高まるため<sup>8)</sup>、解析方法により落下高さ換算結果が変動する可能性がある。そのため、FF法を用いた落下高さ換算精度向上には、ジャーク解析方法の検討が求められる。

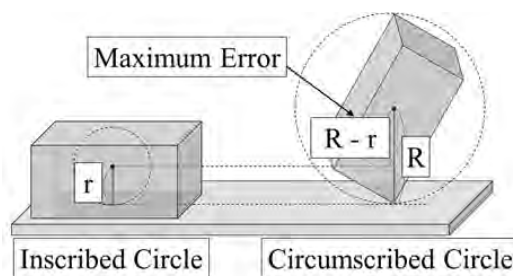
## 5.3 圧電式記録計の限界

圧電式センサを加速度計測に用いる場合、応答周波数領域外の計測値において周波数特性により加速度が減衰する。周波数特性はセンサ仕様・個体差に依存するため、任意の圧電センサにおいて同一のアルゴリズムにて初速度を解析することは困難である。また、**Fig.3**のような立方体回転モデルの場合、自由落下前の円運動時の静的加速度変化量最大値は任意の貨物において一定だが、回転所要時間は式(29)より貨物寸法の平方根に比例するため、貨物寸法が大きいほど加速度減衰が大きくなる。以上より、FF法による落下高さ換算を目的とする輸送調査に用いる輸送記録計には、MEMSセンサを含む加速度減衰を伴わないセンサを使用することが望ましい。

## 5.4 落下箇所による落下高さ補正

運動方程式を用いた落下高さ換算に必要な初速度 $V_{0y}$ 及び自由落下時間は先述のアルゴリズムにて解析可能だが、このアルゴリズムは物体の落下箇所による自由落下時間変動を考慮していない。つまり、同一高さからの落下であれ、落下衝突時の落下面と物体中心間の

距離が、落下前静止時の設置面と物体中心間の距離より大きければ、解析自由落下時間が短くなり、落下高さ換算結果が小さくなる。包装貨物落下試験高さは実落下高さ以上である必要があるため、落下試験の際は、換算落下高さ最大誤差(貨物の外接球半径 $R$ と内接球半径 $r$ の差)を落下高さ換算結果に加えた値を試験高さに採用すればよい(**Fig.9**)。



**Fig.9 Maximum Error of Drop Height for Collision Location**

## 5.5 初速度解析及びFF法の課題

本論では自由落下時間と自由落下初速度の導出に合成加速度波形を用いたが、合成加速度からは貨物姿勢・落下方向が判断出来ないため、全落下事象において正確に落下高さ換算を実施するためには、3軸加速度波形より落下面に対する貨物の落下挙動を解析する必要がある。また物流中は自由落下を伴わない衝撃事象も多々発生するため、全衝撃事象に対してはFF法による落下高さ換算ができない。よって、衝撃加速度から落下事象を判別し、落下を伴わない衝撃事象においてはFF法以外の換算方法を使用する必要がある<sup>9)</sup>。

## 6. 結言

本研究により得られた成果を次に示す。

- ① FF法による落下高さ換算では、自由落下開始時の初速度を考慮すると「回転落下」時の落下高さ換算精度が向上する。
- ② 圧電式記録計は静的感度を持たないため、輸送記録にはMEMSなどのDC成分が計測可能な計測器の使用が望ましい。
- ③ 貨物重心の円運動開始時刻決定に用いるジャークの計測方法は未確立であり、FF法による落下高さ換算精度向上にはジャーク解析方法の検討が求められる。
- ④ 落下高さ換算結果は貨物形状・落下姿勢に左右されるため、落下試験の落下高さには貨物の外接球と内接球の半径差を換算結果に加えた値を使用すべきである。
- ⑤ 任意の落下事象における正確な落下高さ換算には、落下時の3軸加速度波形より姿勢解析を実施する必要がある。
- ⑥ 物流中は落下を伴わない衝撃事象もあるため、落下事象の判別方法及び、FF法以外の正確な換算方法も求められる。

## 7. 謝辞

本研究は、日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業(課題番号 18K04608)によるプロジェクトの一環として実施している。

## <参考文献>

- 1) S. Paul Singh, Gary Burgess, Jagjit Singh, Measurement and Analysis of the Second-day Air Small and Light-weight Package Shipping Environment within Federal Express, Packag. Technol. Sci., 17 (3), p.119 (2004)
- 2) Manuel-Alfredo Garcia-Romeu-Martinez, S. Paul Singh, Vicente Agustin Cloquell-Ballester, Koushik Saha, Measurement and Analysis of International Air Parcel Shipping Environment for DHL and FedEx between Europe and United States, Packag. Technol. Sci., 20 (6), p. 421 (2007)
- 3) J. Singh, S. P. Singh, T. Voss, K. Saha, A Study of the Effect of Pictorial Markings and Warning Labels on Handling of Packages in the DHL Single-Parcel Environment, Packag. Technol. Sci., 22 (1), p.1 (2009)
- 4) Chen Zhong, Jiang Li, Kazuaki Kawaguchi, Katsuhiko Saito, Hongshen An, Measurement and Analysis of Shocks on Small Packages in the Express Shipping Environment of China, Packag. Technol. Sci., 29 (8-9), p.437 (2016)
- 5) 田畑綾華, 斎藤勝彦, 川口和晃, 包装貨物落下環境計測解析について, 日本包装学会, 第27回年次大会予稿集, p.30 (2018)
- 6) 高野覚, 圧電式加速度センサ(基本原理とロボットへの応用), 日本ロボット学会誌, 9 (7), p.918 (1991)
- 7) 平井義和, MEMS研究と応用の最新動向, 表面技術, 68 (7), p.360 (2017)
- 8) 辺見信彦, ジャーク(加加速度, 躍度)の測定法, 精密工学会誌, 80 (11), p.995 (2014)
- 9) 柳原俊二, 輸送環境データの解析技術と記録計の最新情報, 日本包装学会誌, 10 (6), p.263 (2001)

(原稿受付 2020年4月24日)

(審査受理 2020年8月3日)