

解説

## 輸送包装評価のための振動・衝撃試験

上原 雅史\*、斎藤 勝彦\*\*

### Shock on Vibration Test for Transport Packaging Evaluation

Masashi UEHARA\* and Katsuhiko SAITO\*\*

キーワード：輸送、包装、振動、衝撃

Keywords: Transport, Packaging, Vibration, Shock

#### 1. はじめに

今日、様々な形態の商取引インフラの拡充に伴い、従来の BtoB から BtoC または CtoC の取引ケースが増加している。中でもインターネット通販の利用数は急激な伸びを示し、今後さらに増えることが推測される。ほとんどの通販サイトで翌日配達（場合によっては即日配達）を謳っており、その速さも利用者増加の要因の一つとなっている。このような円滑な商取引の実現に欠かせないのが、拡充された物流網である。一方で、生産者は製品が無事に消費者

の元に届くか、事前にあらゆる物流環境を想定した試験を実施している。振動・衝撃・落下・圧縮などの試験が一般的であるが、本解説では、振動試験に焦点を当て、試験方法の変遷と著者らが提唱している振動と衝撃を組み合わせた試験方法について、これまでの研究内容を交えながら紹介する。

#### 2. 簡易振動試験

##### 2.1 加振条件の設定

包装品が物流においてある一定の耐久性を保持しているかを検証する試

\* アイデックス(株) 営業技術部(〒193-0803 東京都八王子市檜原町 594 番地 1)  
594-1 Narahara, Hachioji, Tokyo, 193-0803 Japan  
TEL: 042-626-0071, FAX: 042-624-9833, Email: m-uehara@hello-idex.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)  
5-1-1 Fukaeminami, Higashi-nada, Kobe, 658-0022 Japan

験として、JIS 規格 Z0232-2004 では、従来の正弦波振動からランダム波振動を優先するよう改訂がなされた。しかしながら、実際の輸送環境で発生する損傷の再現が十分ではない場合が少なからずあった。その要因の一つに、上下方向の 1 軸加振であることが挙げられる。輸送環境に関わらず、あらゆる場面において、物体には多方向から同時に振動が加わっている。それを再現することが最も近道であるが、一般的に多軸同時加振が可能な試験機は大規模なものにならざるを得ない。これに対して、簡易的に 3 軸同時振動を発生させる輸送包装試験機が開発された<sup>1)</sup> (図 1)。

それは独自の回転体を応用した加振機を有し、正弦波振動を発生させる



図 1 輸送包装試験機 BF-50UT

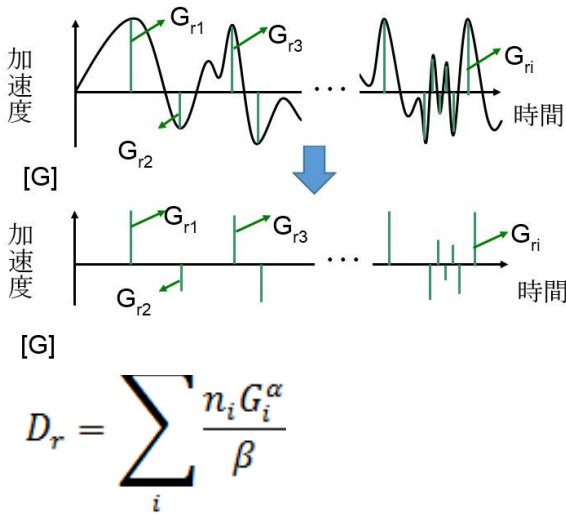
動画 : <https://youtu.be/gn0DbCUVRwo>

ものであり、3 軸の振動割合は、上下：左右：前後がおよそ 10：8：2 の割合である。周波数は自動的に可変することができるが、振幅については手動で調整する必要があるため、基本的に等振幅の周波数掃引試験となり、実輸送データを基に、周波数を 10Hz から 40Hz に掃引して行う条件を推奨している。

ここで、1 秒間に 1Hz の割合で増減する往復周波数掃引振動を 10 分間続ける場合、振動テーブル上で発生する蓄積疲労損傷度  $D_t$  を試算する。ただし、近似的に 10.5Hz から 39.5Hz までの 1Hz ごとの周波数の規則波が 1 秒間ずつ加えられるとし、周波数 40Hz の時の加速度を  $G_{40}$  とする。振動テーブル上の振動易損の S-N 特性を、 $N = \beta G^{-\alpha}$  とし、 $n$  回の加振による損傷度を  $D_t = n/N$  とする。ここに、 $G$  は加速度、 $\beta$ 、 $\alpha$  は評価対象により決まる特性値であり、 $\alpha$  の値は包装品の場合 3 から 4 程度が一般的である。さて、上記の仮定によれば、蓄積疲労損傷度  $D_t = G_{40}^{\alpha} \cdot 3180 / \beta$  であらわされる。つまり、実際の輸送で発生する蓄積疲労損傷度  $D_r$  と  $D_t$  を等価にすることで、輸送と同等の損傷を再現できることが理論上示される<sup>2)</sup>。

この時、輸送中の蓄積疲労損傷度  $D_r$  については、輸送中の振動データを計測

し、得られた加速度時系列にゼロクロスピークカウント法（図2）を用いることで算出する。



$D_r$  : 蓄積疲労損傷度  
 $\alpha$  : 振動損傷度に関する物性値  
 $\beta$  : 疲労損傷に至るまでの耐久値  
 被包装物固有の定数

図2 ゼロクロスピークカウント法

## 2.2 3軸同時振動の有効性

### 2.2.1 ボトルラベルの擦れ損

ここでは、3軸同時振動の有効性について検証を行った事例<sup>3)</sup>を紹介する。500mlのPETボトル9本を3本×3列となるように梱包し、中央のボトルに黒色印刷したラベル、他のボトルに白紙ラベル

を貼付したサンプル（図3）を用いて、実輸送と再現試験において発生した色移りを、いわゆる擦れ損と仮定し比較検証した。



図3 ボトルラベル サンプル

色移りの評価には画像解析を用い、周囲の8本のボトルの白紙ラベルについて、輝度*i*、擦れ損輝度のしきい値 $\alpha$ 、全損と判断される輝度 $\beta$ 、輝度*i*の部分面積を示す $S_i$ 、出現輝度最大値 $\gamma$ によって構成される擦れ損総合評価値CADIを求め、さらに試験前の白紙ラベルのCADIで除すことで擦れ損変化率を求めた。

$$CADI = \sum_{i=\alpha+1}^{\beta} \frac{i-\alpha}{\beta-\alpha} \times S_i + \sum_{i=\beta+1}^{\gamma} S_i$$

実輸送として、手押し台車で約700mをおよそ10分で歩行し、その時の輸送環境を計測した。再現試験として、①輸送環境と同一PSDで同じ時間振動させた試験、②テーラリング処理を行い、試験時間を半分に短縮した振動試験、③製品

の損傷度を等価にした3軸同時振動試験をそれぞれ行った。この時、①②の試験は上下方向のみの試験である。実輸送および各種再現試験で得られたラベルの擦れ損変化率を図4に示す。いずれの試験においても、実輸送と完璧な一致は見られなかったが、簡易的な3軸同時振動試験でも十分にその有効性を示すことができた。

しかしながら、この実験ではJIS規格で推奨されるような単軸のランダム波振動でも同等の損傷再現が可能であり、3軸同時振動の優位性を示す必要を感じる事となった。

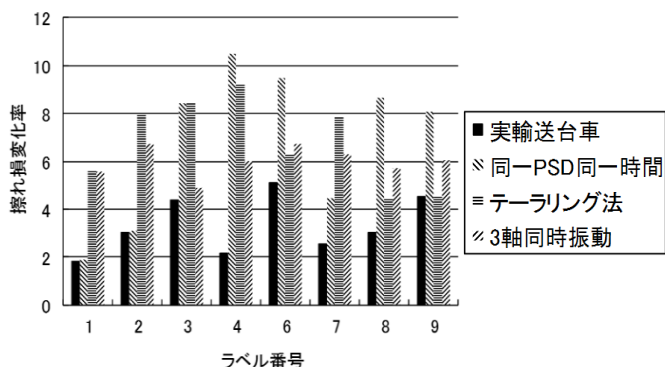


図4 擦れ損変化

### 2.2.2 ナットの変位量

次に、著者らはボルトとナットで構成された蓄積型疲労モデル（図5）を用いて、振動によるナットの緩み(変位量)を損傷に見立て、変位量比較を行った<sup>4)</sup>。

ここでは、ボルトに取り付けられたナットについて、印加される加速度が小さくなるほど、緩みが生じるまでの振動回数が増える、S-N曲線を用いたマイナー則が適用できることを確認している<sup>5)</sup>。実輸送では、前節と同様に手押し台車による10分の歩行とし、輸送環境データに基づいて、①単軸ランダム波振動試験、②3軸個別に加振する3軸切替振動試験、③損傷度が等価となる3軸同時振動試験を実施し、それぞれ変位量の比較を行った。図5に示すように、各種試験の変位量より、3軸同時振動の有効性が明らかになった。

### 3 振動と衝撃の融合

著者ら<sup>6)</sup>は、3軸同時振動の有効性を追求する一方、輸送中に製品が損傷するメカニズムについて、衝撃によって緩衝材(特に紙系緩衝材)に潰れや歪みが発生し、製品との間に隙間(ガタ)ができ、製品に加わる振動を増幅させ、結果的に損傷に繋がる可能性があることを、ダミー貨物を使った実験で明らかにしている。そこでは、ダミー貨物に衝撃を与えずに振動試験を行った場合と、落下衝撃を加えた後に同様の振動試験を行った場合で、包装品にどのような振動が加わるのかを

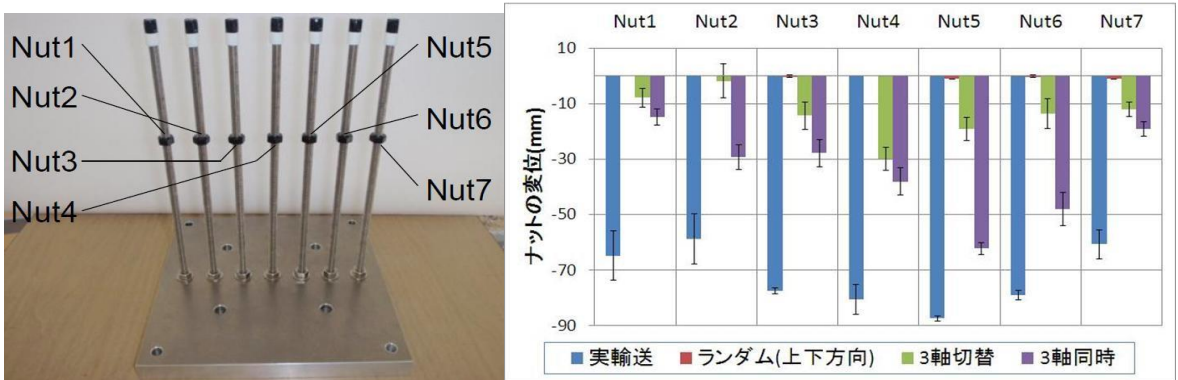


図5 擦れ損変化率蓄積型疲労モデル&各種試験の変位置比較

検証した。ガタが無い包装品とガタがある包装品の振動試験における上下方向の加速度時系列を図6に示す。なお、振動試験は10Hz~40Hzの振幅一定の周波数掃引試験を行った。

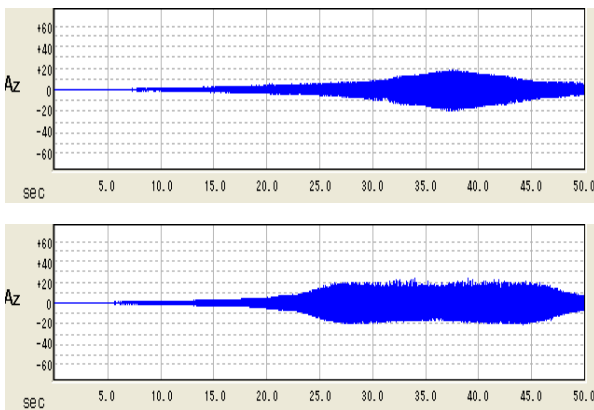


図6 加速度時系列 上-ガタ無 下-ガタ有

加速度時系列より、ガタがある場合に製品の共振によるものと思われる加速度の増幅が見られ、これは製品が破損するリスクが高くなっていることを示す。

このことから、輸送中の製品の安全を担保するには、輸送中のあらゆる事象、例えば振動と衝撃を個別に実施するだけでなく、組み合わせた一つの流れの中で実施する必要性が伺える。

前章のように、3軸同時振動の有効性は概略確認されたものの、段ボール外装箱の擦れ損については損傷再現が困難な事案があった。段ボール箱の擦れ損発生のメカニズムとして、ロッキングにより隣り合う段ボール同士にズレが生じることが挙げられる。また、ロッキングには、5Hz未満の水平振動が大きく影響を及ぼすことが報告されている<sup>7)</sup>。従来の輸送包装試験機では、周波数仕様が10-65Hzであったため、5Hz付近の振動を加えることができなかった。そこで従来の3軸同時振動と衝撃を組み合わせることで段ボール外装箱の擦れ損の再現が可能か検

証した。その結果、3 軸同時振動のみでは損傷が再現できなかつたのに対し、そこに衝撃を組み合わせた試験では損傷を再現できることを確認した<sup>8)</sup>。

この結果を受け、3 軸同時振動と衝撃を融合した輸送包装試験機が開発された(図7)。

#### 4. 振動・衝撃試験

図8は、図7の試験機による、振動のみ、衝撃のみ、振動+衝撃の加速度時系列である。図8より、振動に衝撃を組み合わせることで、トラックのサスペンションに近い5Hz未満の周波数帯の減衰挙動を示していることが分る。これは図7の試験機が振動及び衝撃をテーブル板直下に配置したスプリングで受ける機構である為である。



図 7 輸送包装試験機 BF-50SST

動画：<https://youtu.be/cleFUSbwww8>

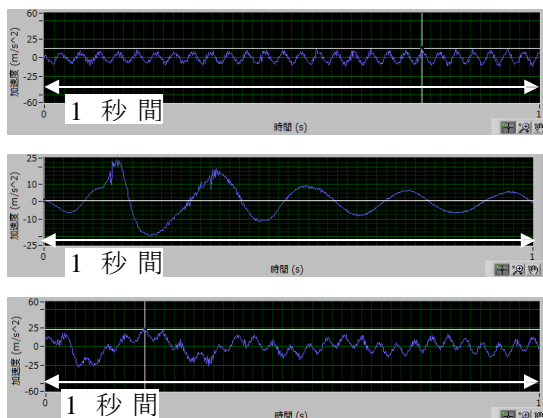


図 8 加速度時系列

上-振動,中-衝撃,下-振動+衝撃

実輸送データから振動・衝撃条件を導出するためには、まず実輸送トラックの加速度時系列から蓄積疲労度を算出し、輸送時の PSD 波形から振動と衝撃に区分し、振動と衝撃の各区分で担う蓄積疲労度を求める必要がある<sup>9)</sup>。例えば 10t トラックにて約 400 km を走行した際の加速度時系列および PSD 波形、それに基づいて算出された再現試験の加速度時系列を図9に示す。

この検証では、実輸送と再現試験において、同様のサンプルによる擦れ損度合の比較も並行して実施しており、良好な結果が得られている<sup>9)</sup>。

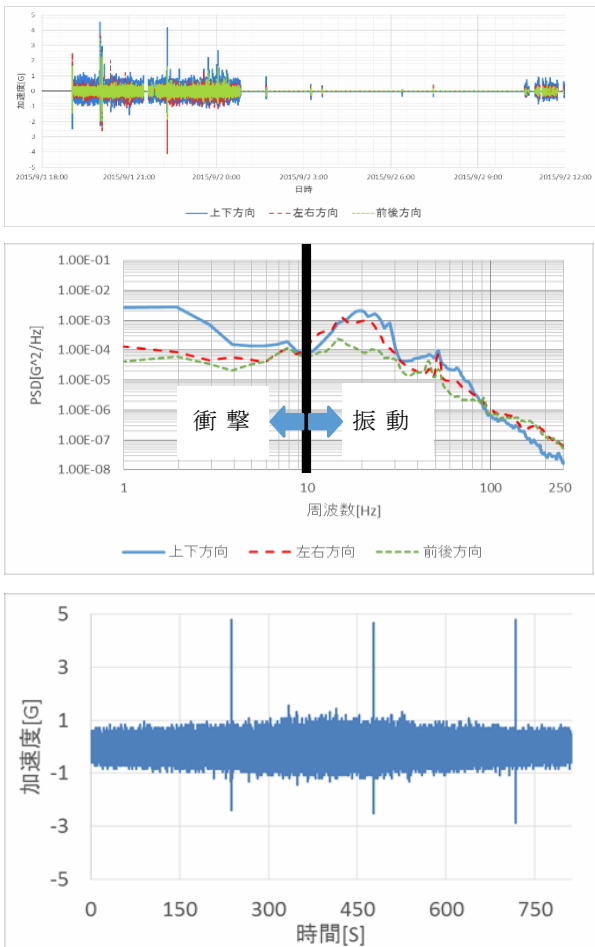


図 9 実輸送データ& 再現試験データ

上：実輸送加速度時系列  
 中：実輸送 PSD 波形と再現試験区分  
 下：再現試験(振動+衝撃)加速度時系列

## 5. おわりに

ここで紹介した、振動に衝撃を組み合わせた試験を推奨する公的な試験規格は存在しない。しかしながら、実輸送現場と照らし合わせると、振動と衝撃を組み合わせた試験が理に適っており効果的で

あることは自明の理である。本解説が今後の包装貨物試験及び包装評価を担われる読者の今後の取組みの一助となれば幸いである。

最後にこれまでの研究開発を実施していくにあたり、神栄テストマシナリー(株)には輸送環境計測等のご協力を賜ったことに対して謝意を表する。

## <参考文献>

- 1) S. Mizuguchi, H. Chida and K. Saito ; On - site Vibration Testing for Cushioning Package, 16th IAPRI World Conference on Packaging, 2008 .
- 2) 上原雅史、斎藤勝彦；簡易振動試験による実輸送擦れ損再現、第 18 回日本包装学会年次大会、2009.
- 3) 上原雅史、斎藤勝彦；ボトルラベル印刷擦れに対する各種振動試験の比較について、第 48 回全日本包装技術研究大会、2010.
- 4) 上原雅史、斎藤勝彦、高橋明成；輸送包装試験における多軸同時加振の有効性に関する考察、第 21 回日本包装学会年次大会、2012 .
- 5) 高橋明成、斎藤勝彦、上原雅史；多方向同時加振が蓄積疲労に及ぼす影響、第 21 回日本包装学会年次大会、2012 .
- 6) 上原雅史、斎藤勝彦；簡易振動試験による包装品の現場検査、第 45 回全日本包装技術研究大会、2007 .
- 7) 東山哲、古田拓；トラック実輸送にお

ける段ボール箱のロッキング挙動、第  
22 回日本包装学会年次大会、2013.

- 8) 千田詠介、斎藤勝彦；段ボール箱の擦れキズ再現試験の新たな試み、包装技術、52 巻 3 号、2014.
- 9) 上原雅史、斎藤勝彦；実輸送データに基づく振動試験条件の導出に関する考察、第 53 回全日本包装技術研究大会、2015 .

(原稿受付 2016 年 7 月 1 日)