

技術報告

垂直振動を受ける包装内容品の3次元挙動に関する研究

津田 和城*

Three-dimensional Motions of Packaged Products under Vertical Vibration

Kazuki TSUDA*

市場トラブルを未然に防止するために、出荷前に包装貨物の振動試験が行われている。しかし未だに市場トラブルが起きることがあり、試験条件は必ずしも実環境を反映しているとは言えない。これまでに実環境と等価な試験条件を導出するために、さまざまな手法が提案されてきた。しかし加振中の内容品の3次元挙動を考慮した手法は報告されていない。このような手法が構築できれば、より適正な試験が行え、市場トラブルの減少につながると考えられる。そこで、まず加振中の内容品の3次元挙動を調べるために、垂直振動を受ける包装貨物の振動実験を行った。その結果、包装貨物は垂直方向にだけ加振されているにもかかわらず、内容品は3次元に振動し、それによる疲労が加振方向以外にも蓄積されていた。このことから、実環境と等価な試験条件を導出するためには、加振中の内容品の3次元挙動を考慮する必要があることがわかった。

Vibration tests of packaged products are conducted before distribution in order to prevent troubles in markets. However, as these troubles sometimes occur, it can not necessarily be said that test conditions are represented real environment. Various test methods have been proposed in order to derive test conditions equivalent to real environment. However, these methods have not taken into account three-dimensional motions of products under vibration. If the method with three-dimensional analysis is constructed, it is considered that more proper tests can be conducted, and contributes to reduce troubles in markets. Therefore, in order to examine three-dimensional motions of products, vibration experiments of packaged products under vertical vibration have been conducted. As a result, it has been confirmed that products in a package move three-dimensionally in spite of only vertical vibration, and that fatigue due to the vibration is accumulated besides the vibration direction. By these, it has been clarified that it is necessary to take into account three-dimensional motions of products under vibration in order to derive test conditions equivalent to real environment.

キーワード: 包装貨物、振動試験、3次元挙動、疲労

Keywords : Packaged products, Vibration tests, Three-dimensional motions, Fatigue

*(地独)大阪府立産業技術総合研究所 〒594-1157 大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1 TEL: 0725-51-2712
Technology Research Institute of Osaka Prefecture, 2-7-1 Ayumino, Izumi-shi, Osaka 594-1157, Japan
著者連絡先 (e-mail: tsuda@tri-osaka.jp)

1. はじめに

市場でのトラブルを未然に防止するために、出荷前にさまざまな試験が製品および包装貨物に対して行われている。その中のひとつに振動試験があり、包装、電気、自動車、食品、医薬品など、さまざまな業界で実施されている。しかし未だに振動が原因と思われるトラブルが市場で起きることがあり、試験条件は必ずしも実環境を反映しているとは言えない。その原因として、規格の試験条件はあくまで一般的なものであり、個々の企業が直面する実環境と等価なものになっていない点が挙げられる。これまでに実環境と等価な試験条件を導出するために、さまざまな手法^{1)~3)}が提案されてきた。しかしこれらの手法においても、本来の評価対象である内容品の振動が考慮されていないという課題が残されていた。

このような背景から、著者らは内容品の動きに注目し、内容品と緩衝材の間に隙間がある場合には、加振加速度が限界入力加速度（この値は加振振動数によって異なり、 9.8m/s^2 前後に存在する可能性が高い）⁴⁾を超えると、内容品は飛び跳ね、内容品の振動が増大することを指摘してきた。さらに内容品の動きに注目して試験条件を導出するシステム⁵⁾（以下、新システムと表記する）の研究開発にも取り組んできた。しかし新システムにおいても、加振方向の内容品の動きは考慮できるものの、加振方向以外の動きまでは考慮できなかった。加振加速度が限界入力加速度を超えると、内容品の固定が不十分な場合、内容品は複雑に動き、加振方向以外にも動くことが

予想される。そのため内容品の3次元挙動を考慮した上で実環境と等価な試験条件を導出できれば、より適正な試験が行え、市場トラブルの減少や過剰包装の削減につながると考えられる。

そこで本論文では、まず試験時に加振加速度が限界入力加速度を超えることがあることを示すために、公的規格から引用した事例や実環境の振動データから導出した事例を説明する。次に加振中の内容品の3次元挙動を把握するために、垂直振動のみを加える包装貨物の振動実験を行い、内容品の3次元挙動を明らかにする。さらに、加振により内容品に蓄積される疲労を把握するために、垂直振動を受ける包装内容品の振動疲労評価を行い、振動数ごとに疲労度合を明らかにする。これらにより、実環境と等価な試験条件を導出するためには、加振中の内容品の3次元挙動を考慮する必要があるか否かについて検討する。

2. 限界入力加速度を超える試験事例

試験時に加振加速度が限界入力加速度を超えることがあることを示すために、公的規格から引用した事例や実環境の振動データから導出した事例を説明する。ただし、これまでの研究⁴⁾で限界入力加速度は 9.8m/s^2 前後に存在する可能性が高いことがわかっている。

2.1 公的規格から引用した事例

規格は業界ごとに決められている場合が多い。その規格はJIS⁶⁾、ISO⁷⁾、ASTM⁸⁾などの公的規格だけでなく、ISTA⁹⁾、IEC¹⁰⁾、JASO¹¹⁾な

どの協会もしくは団体により決められている規格もある。Fig.1 に、包装貨物の振動試験で利用されている JIS Z 0232 に記載の試験条件を示す。JIS に記載の通り、試験時の加振加速度の実効値は 5.8m/s^2 である。通常ランダム振動試験では、実効値の 3 倍を超えないように制限するため、加振加速度の最大瞬時値は 17.4m/s^2 である。このことから試験時に加振加速度は瞬間的に限界入力加速度を超えることがわかる。

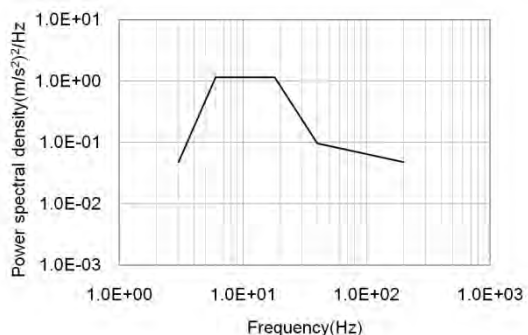


Fig.1 Test condition of JIS Z 0232

2.2 実環境の振動データから導出した事例

実環境と等価な試験条件を導出するために、これまでに幾つかの手法が提案されている。その中のひとつに IMV 株式会社の手法¹⁾があり、Table1 に示す手順で試験条件が導出される。この手法では、疲労破壊の概念¹²⁾を振動試験に応用し、繰り返し回数は振動時間、応力は振動加速度の実効値と見なしている。そして振動時間を計算（試験時間を短縮）する際、S-N 曲線（縦軸：振動加速度の振幅、横軸：内容品が損傷するまでの振動時間）が用いられている。ただし振動データとしては、

評価対象である内容品の振動ではなく、包装貨物に加わる振動（荷台振動）が用いられている。

この手法では、疲労破壊の概念を応用しているため、加振による内容品への疲労は式(1)で表現できる。次に試験環境が実環境と等価になるためには、式(2)が成立しなければならず、この等式から、試験時の加振加速度は式(3)で表すことができる。

Table 1 Procedure of deriving test condition

<p>① Creation of scenario from transport environment: It is considered that a scenario consists of some sub scenarios. Ex. Truck transport (10 hours) = Expressway (8 hours) + Ordinary road (1.5 hours) + Bad road (0.5 hours)</p>
<p>② Measurement of vibration in each sub scenario: When a truck runs on an expressway, an ordinary road and a bad road, vibrations of bed are measured.</p>
<p>③ Calculation of PSD (Power Spectral Density) in each sub scenario: PSDs of vibrations measured in ② are calculated.</p>
<p>④ Normalization of PSD in each sub scenario: RMSs in other sub scenario are arranged with the maximum RMS.</p>
<p>⑤ Creation of PSD enveloped each normalized PSD: A PSD enveloped PSDs normalized in ④ is created.</p>
<p>⑥ Further acceleration if needed: If test time is longer than preferred time, it is further accelerated by using S-N curve.</p>

$$T \times A^\alpha = \beta \quad (1)$$

$$T_{\text{real}} \times A_{\text{real}}^\alpha = T_{\text{test}} \times A_{\text{test}}^\alpha \quad (2)$$

$$A_{\text{test}} = A_{\text{real}} \times (T_{\text{real}}/T_{\text{test}})^{1/\alpha} \quad (3)$$

T : 振動時間

A : 振動加速度

α : 内容品の加速係数

β : 内容品の蓄積疲労

real : 実環境

test : 試験環境

ここで簡単のために、トラック荷台の振動データの実効値が 3m/s^2 、輸送時間が5時間のひとつのサブシナリオからなる輸送環境を想定する。ただし内容品の加速係数を3、希望試験時間を0.5時間に設定する。これらの値を式(3)に代入すると、試験時の加振加速度は約 6.5m/s^2 と算出される。このように実環境の振動データの実効値が 3m/s^2 であっても、試験時の加振加速度の実効値は約 6.5m/s^2 になり、加振加速度の最大瞬時値は約 19.4m/s^2 になる。このことから試験時に加振加速度は瞬間的に限界入力加速度を超えることがわかる。

3. 垂直振動を受ける包装内容品の3次元挙動

加振中の内容品の3次元挙動を把握するために、垂直振動を受ける包装貨物の振動実験を行い、内容品の3次元挙動を明らかにする。

3.1 実験対象

実際の内容品は多種多様であるため、包装

貨物の形態もさまざまである。ここでは、直方体の紙製箱、円筒形状のプラスチック製ボトルからなる包装貨物を対象とする。ただしボトルは緩衝材などで固定されておらず、その中には水が入った状態である。Fig.2に実験時の様子を、Table2に箱およびボトルの寸法、質量を示す。

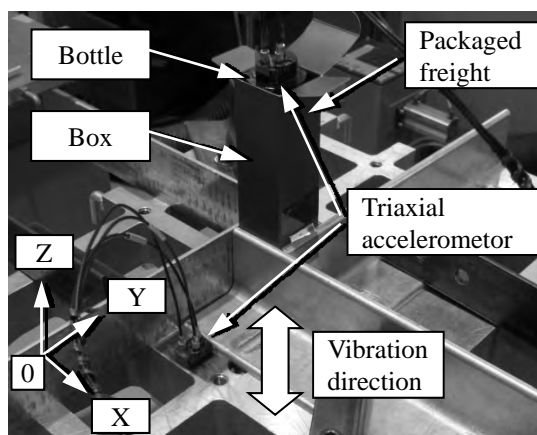


Fig.2 Condition of experiment

Table 2 Size and weight of box and bottle

	Size (mm)	Weight (g)
Box	42×41×177	13
Bottle containing water	φ 39×172	200

3.2 実験方法

試験機を用いて包装貨物の振動実験を行い、加速度測定により内容品の3次元挙動を明らかにする。ここではFig.2に示すように、箱は固定ジグや粘着テープによって振動テーブルに固定されており、振動テーブルに垂直方向の加速度を与えて、包装貨物を加振した。そして振動テーブルおよびボトルに3軸加速度

センサーを貼り付けて、それぞれの振動を 30 秒間測定した。なお測定箇所は、入力として振動テーブルの天面、応答としてボトル天面とした。また加速度波形は、内容品の基本的な動きを把握するためにサイン波、試験時の内容品の動きを把握するためにランダム波の 2 種類を用い、振動数は共振点付近の 30Hz に設定した。Table3 に加振条件の詳細を示す。さらに測定に用いたセンサーの大きさは 24×17×9mm とボトルの直径よりも小さく、質量は 13g とボトルの 7%以下であるため、その影響は小さいと考えられる。

Table 3 Details of vibration conditions

	Waveform	Acceleration m/s ² (G)	Frequency Hz
No. 1-1	Sine	7.4 (0.75)	30
No. 1-2	//	9.8 (1.0)	30
No. 1-3	//	12.3 (1.25)	30
No. 2	Random	JIS Z 0232 (Fig. 1)	

3.3 実験結果

Fig.3、4、5 に、加振条件 No. 1-1 から No. 1-3 における XYZ 各方向の振動テーブルおよびボトルの振動加速度を示す。Fig.3 より明らかなように、加振加速度が 7.4 m/s² の場合には、ボトルは Z 方向に振動テーブルと同程度に振動している。一方、振動テーブルは Y 方向に加振されていないにもかかわらず、ボトルは僅かに振動している。このことから加振加速度が限界入力加速度より小さくても、振動数によってはボトルは加振方向以外にも振動していることがわかる。

一方、Fig.4 に示すように、加振加速度が

9.8m/s² の場合には、ボトルは YZ 方向に衝突振動している。すなわちボトルは加振方向の

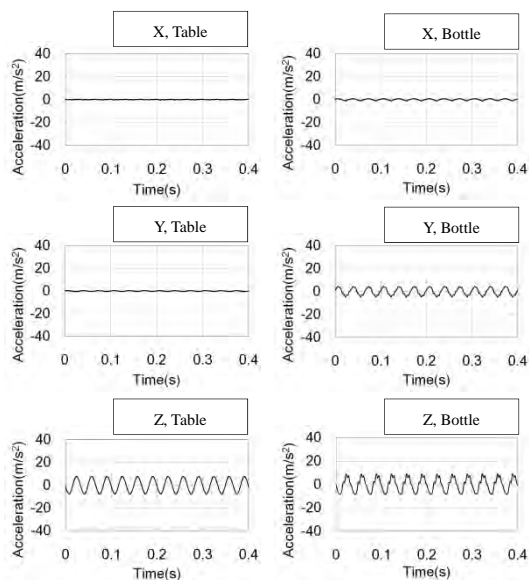


Fig.3 Vibration acceleration of table and bottle in XYZ-direction (Sine, Acceleration 7.4 m/s², Frequency 30Hz)

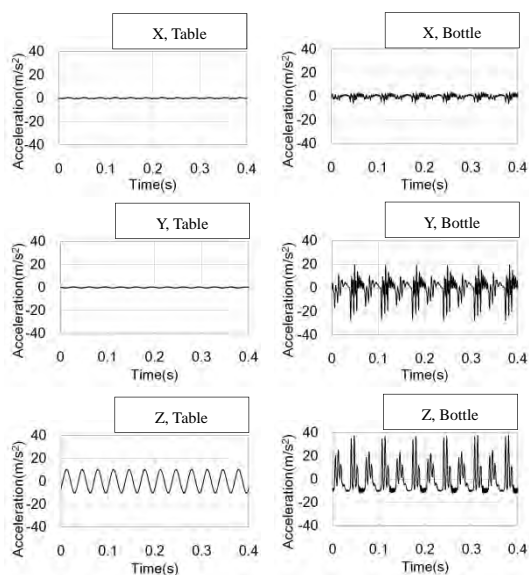


Fig.4 Vibration acceleration of table and bottle in XYZ-direction (Sine, Acceleration 9.8 m/s², Frequency 30Hz)

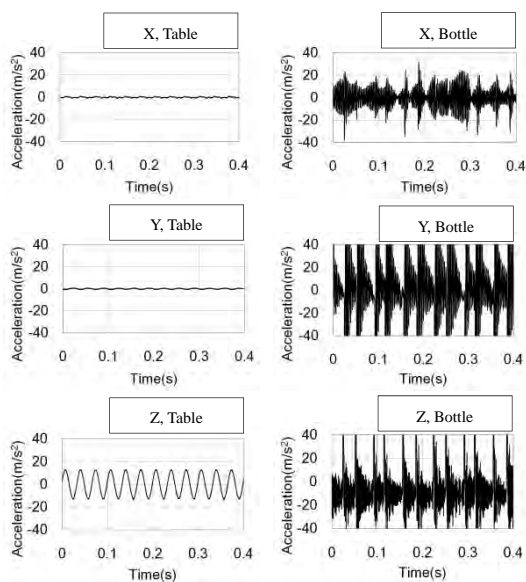


Fig.5 Vibration acceleration of table and bottle in XYZ-direction (Sine, Acceleration 12.3 m/s², Frequency 30Hz)

Z 方向に加えて、加振されていない Y 方向にも衝突振動している。さらに Fig.5 より明らかなように、加振加速度が 12.3 m/s² の場合には、その傾向はより一層強まり、ボトルは XYZ 各方向に衝突振動している。

さらに Fig.6 に、加振条件 No. 2 における XYZ 各方向の振動テーブルおよびボトルの振動加速度を示す。Fig.6 に示すように、ボトルは XYZ 各方向に衝突振動している。すなわちボトルは加振方向の Z 方向に加えて、加振されていない XY 方向にも衝突振動している。

以上の結果から、加振加速度が限界入力加速度を超えると、ボトルは加振方向以外にも衝突振動していることがわかる。

Fig.7 に、加振条件 No. 1-1 から No. 2 における、XYZ 各方向における振動テーブルおよび

ボトルの振動加速度の実効値を示す。

Fig.7 より明らかなように、加振加速度が限界入力加速度を超えると(加振条件 No. 1-2 から No. 2)、Z 方向のボトルの実効値は振動テーブルに比べて大きくなっていることがわかる。さらに、加振方向以外の XY 方向(特に Y 方向)にもボトルは振動し、加振条件によっては、その振動は加振方向と同程度になっていることがわかる(加振条件 No. 1-3 の Y 方向と Z 方向)。

3.4 限界入力加速度と3次元挙動の関係

加振加速度が 7.4 m/s² の場合には、ボトルの3次元挙動は小さいものの、加振加速度が 9.8 m/s² 以上になると、ボトルの3次元挙動は顕著に見られる。これは箱とボトルの間には隙間があるため、加振加速度が限界入力加

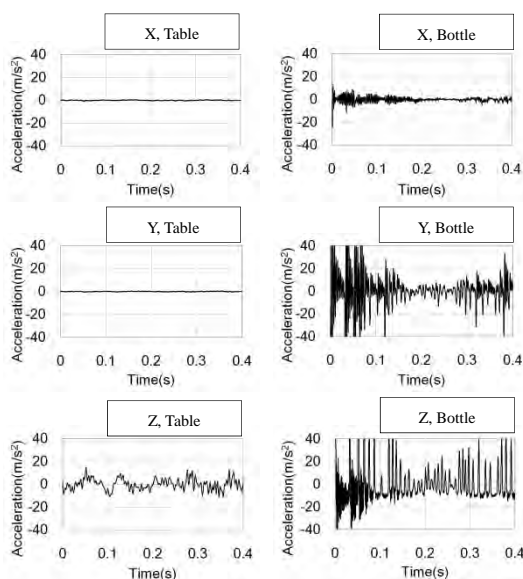


Fig.6 Vibration acceleration of table and bottle in XYZ-direction (Random, JIS Z 0232)

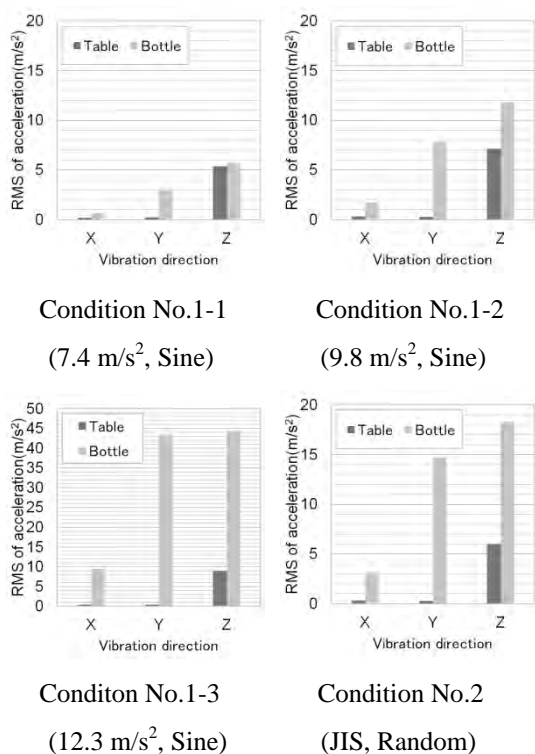


Fig.7 Root mean square of vibration acceleration of table and bottle in XYZ-direction (Random, JIS Z 0232)

速度を超えると、ボトルは飛び跳ね、ボトルと箱の衝突が繰り返される。

そしてボトルの姿勢が崩れると、ボトルは傾いた状態で衝突を繰り返し、加振方向以外にも加速度が発生すると推測できる。

このように垂直方向のみの加振によるボトルの3次元挙動は、新システムでも考慮されておらず、ボトルは想定外の方向に加振されていることになる。

4. 垂直振動を受ける包装内容品の振動疲労評価

加振により内容品に蓄積される疲労を把握

するために、垂直振動を受ける包装内容品の振動疲労評価を行い、振動数ごとに疲労度合を明らかにする。

4.1 評価方法

蓄積疲労スペクトル⁵⁾を用いて包装内容品の振動疲労評価を行い、振動数ごとに疲労度合を明らかにする。ここでは評価基準として、振動数を変数として、振動数ごとに疲労度合を算出できる蓄積疲労スペクトルを用いた。式(4)に、本スペクトルの算出式を示す。なお式(4)のPSDを算出する振動データとしては、3章で測定されたXYZ各方向のボトルの振動に加えて、振動テーブルの振動も用いた。また評価対象としては、ボトルの3次元挙動が顕著に見られた加振条件 No. 1-3 および No. 2 とした。

$$\beta(f) = f \times T \times (2 \times \text{PSD}(f))^{\alpha/2} \times \Gamma(1 + \alpha/2) \quad (4)$$

f : 振動数

Γ : ガンマ関数

4.2 評価結果

Fig.8、9に、加振条件 No. 1-3 および No. 2 において、振動テーブルおよびボトルの振動を用いて算出した、単位時間あたりにXYZ各方向に蓄積される疲労を示す。Fig.8、9より明らかのように、振動テーブルとボトルの振動は全く異なるため、それによる疲労も異なっている。このことから、どちらの振動を用いる

かにより、疲労評価が全く異なってしまうことがわかる。一方、ボトルの振動を用いた場合、ボトルは3次元に振動しているため、それによる疲労が3次元に蓄積している。さらに、加振振動数およびその整数倍の振動数だけでなく、これら以外の振動数にも疲労が蓄積している。このことから、加振加速度が限界入力加速度を超えると、加振方向や加振振動数だけでなく、これら以外にも疲労が蓄積されていることがわかる。

このように垂直方向のみの加振によるボトルへの疲労は、新システムでも考慮されておらず、想定外の負荷がボトルに加わっていることになる。このことから、実環境と等価な試験条件を導出するためには、内容品の3次元挙動を考慮する必要があると考えられる。

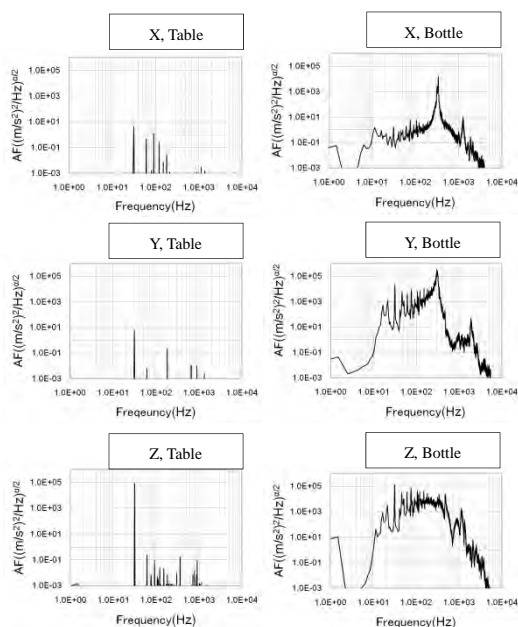


Fig.8 Accumulated fatigue of bottle in XYZ-direction (Sine, Acceleration 12.3 m/s², Frequency 30Hz) ※AF: Accumulated Fatigue

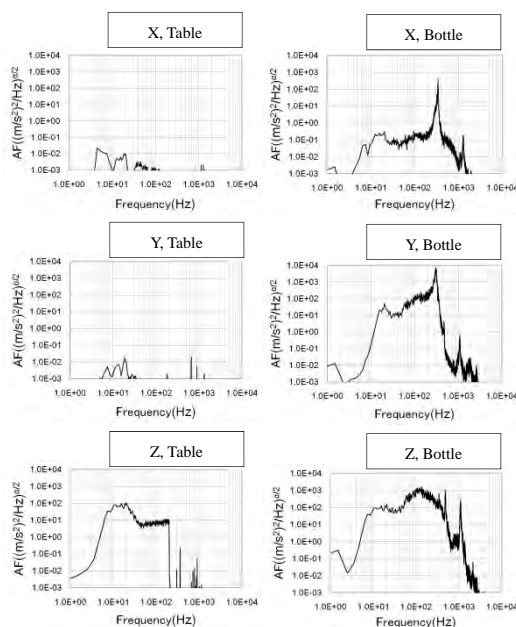


Fig.9 Accumulated fatigue of bottle in XYZ-direction (Random, JIS Z 0232)

5. おわりに

垂直振動を受ける包装貨物の振動実験および包装内容品の振動疲労評価を行い、加振中の内容品の3次元挙動および加振により内容品に蓄積される疲労を調べた。その結果、包装貨物は垂直方向（1軸）にだけ加振されているにもかかわらず、内容品は3次元（3軸）に振動し、それによる疲労が加振方向以外にも蓄積されていることがわかった。

今後、内容品の3次元挙動を考慮した試験条件導出法が構築されれば、より適正な条件で試験が行え、市場トラブルの減少や過剰包装の削減に貢献できると考えられる。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費若手研究 B

(25871239) の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

12) 日本機械学会編、機械工学便覧、A4(9.3)、p. 116(1987)

<参考文献>

- 1) IMV Corporation、振動試験仕様開発方法、TP911、(2001) (原稿受付 2014年1月10日)
(審査受理 2014年2月26日)
- 2) 萩原俊輔、荒川浩司、山崎正博、日本包装学会第17回年次大会予稿集、p. 78(2008)
- 3) 臼田浩幸、椎名武夫、石川豊、佐竹隆顕、農業施設、37(1)、3(2006)
- 4) 津田和城、中嶋隆勝、日本包装学会誌、14(1)、35(2005)
- 5) 中嶋隆勝、津田和城、川田浩二、山内佳門、日本包装学会誌、16(1)、41(2007)
- 6) JIS Z 0232, Packaged freights-Method of vibration test, (2004)
- 7) ISO 2247, Packaging-Complete, filled transport packages-Vibration tests at fixed low frequency, (2000)
- 8) ASTM D 999, Standard Test Methods for Vibration Testing of Shipping Containers, (2001)
- 9) ISTA 3A, Packaged-Products for Parcel Delivery System Shipments 70kg (150lb) or Less (standard, small, flat or elongated), (2008)
- 10) IEC 60068-2-6, Environmental testing -, Part 2: Tests -, Test Fc: Vibration (sinusoidal), (1995)
- 11) JASO D014-3-06、自動車部品—電気・電子機器の環境条件及び機能確認試験—第3部：機械負荷、(2006)

