

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：84415

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871239

研究課題名(和文) 振動試験の適正化に役立つ非加振方向の振動現象解明および試験条件導出理論の構築

研究課題名(英文) Investigation of vibration phenomenon in non-excitation direction and development of method to derive test conditions for proper vibration tests

研究代表者

津田 和城 (TSUDA, Kazuki)

地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40359435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：輸送中のトラブルを未然に防止するために、多くの業界で出荷前に包装貨物の振動試験が実施されている。その試験精度の向上を図るために、箱内の包装製品に注目し、輸送中および試験中における製品の振動挙動を調べた。試験中におけるXYZ各方向の製品振動から、試験精度の低下につながる非加振方向の製品振動の存在を明らかにした。さらに、その対策として、輸送振動から試験条件を導出する従来法に改良を加え、加振方向だけでなく非加振方向の製品振動も考慮できるようにした。

研究成果の概要(英文)：Vibration tests of packaged freights are conducted before distribution in many industries in order to prevent troubles during transportation. In order to improve the test accuracy, vibration behavior during transportation and during test was studied, focusing on packaged products in a box. By measuring the vibration of products in the x, y, and z directions during the test, the existence of the vibration of products in the non-excitation direction was clarified, which leads to deterioration of the test accuracy. As a countermeasure, a conventional method to derive test conditions from transportation vibrations was improved in order to take into account vibration of products not only in the excitation direction but also in the non-excitation direction.

研究分野：工学

キーワード：輸送包装 振動試験 試験条件 非加振方向 蓄積疲労

1. 研究開始当初の背景

輸送中の振動によって製品が破損するかどうかを調べるために、出荷前に多くの業界で包装貨物の振動試験が実施されている。しかし、試験精度は十分ではなく、試験に合格したにもかかわらず、輸送で破損してしまう事例が報告されている。そこで、試験条件の適正化による試験精度の向上を図るために、国内外での輸送環境調査とともに、調査結果を用いた試験条件の導出方法に関する研究が進められている。

これまでの導出方法では、Palmgren-Miner 則を利用しているものが多く、振幅や回数が同じであれば、製品損傷に及ぼす影響も同じと判断してしまい、製品損傷に及ぼす振動数の影響を正しく評価できない。さらに、これまでの導出方法では、テーブル振動に注目しており、評価する製品自体の振動を考慮されていない。そのため、試験精度には限界があり、適正な試験が実施できない。

そこで我々の研究では、振動数の影響を正しく評価し、加振方向の製品振動に注目した導出方法の構築について取り組んできた。試験中における製品の振動挙動を観察すると、箱内の製品固定が不十分な場合には、1 方向のみの加振にもかかわらず、製品は非加振方向にも振動し 3 次元に振動することがあることを見出した。そのため、加振方向の製品振動のみに注目した導出方法では、試験精度に限界があることから、非加振方向の製品振動も考慮した導出方法が必要になる。しかし、加振方向に加えて非加振方向の製品振動に注目した導出方法は未だに確立されていないのが現状である。

2. 研究の目的

製品自体の振動に注目して輸送中および試験中における荷台および製品の振動挙動を調べ、輸送と試験の違いを検討する。さらに、これまで見過ごされてきた非加振方向の製品振動を調査し、その発生メカニズムを明らかにする。その上で、新たに考案した蓄積疲労スペクトル (AFS: Accumulated Fatigue Spectrum) を用い、XYZ 各方向に対して輸送と試験が同じ厳しさになる「試験条件導出理論」を構築する。

これらの取り組みから、試験条件の適正化による試験精度の向上を図り、輸送と等価な試験の実現に貢献する。

3. 研究の方法

本研究では主に以下の 4 つの内容について取り組んだ。

- (1) 輸送中と試験中における製品振動の違いを調査
- (2) 非加振方向の製品振動の発生メカニズムを調査
- (3) 加振方向に加えて、非加振方向の製品振動を考慮した試験条件の導出方法を考案

(4) 輸送振動を代表する疲労等価 PSD の簡易算出方法を考案

輸送と試験の違いを検討するために、輸送環境調査と試験環境調査を行った。輸送環境調査では、包装貨物のトラック輸送を取り上げ、輸送環境記録計や 3 軸加速度センサーを用いて、輸送中におけるトラックの荷台および箱内の製品の XYZ 各方向の振動を測定した (図 1 参照)。一方、試験環境調査では、包装貨物の JIS 試験を取り上げ、試験中における試験機のテーブルおよび箱内の製品の XYZ 各方向の振動を測定した (図 2 参照)。測定された各振動データの振動特性を評価するために、PSD 解析 (Power Spectral Density: パワースペクトル密度) を行った。さらに、測定された各振動データから、JIS 試験において非加振方向の製品振動がみられるかどうかを調べた。トラック輸送には、4 トントラック (三菱ふそうトラック製) を利用し、大阪近郊の高速道路および一般道路を走行した。一方、JIS 試験には、振動試験機 (振研製) を用い、試験条件には、JIS Z 0232 を使用した。試料には、2 リットルのペットボトル 6 本入り段ボール包装貨物を用いた。



図 1 輸送環境調査 (トラック荷台)

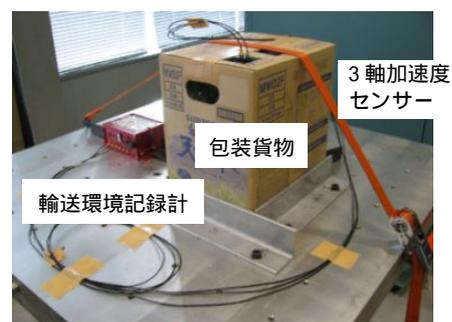


図 2 試験環境調査 (試験機テーブル)

次に、これまで見過ごされてきた非加振方向の製品振動の発生メカニズムを調べるために、高速度カメラを用いて試験中における製品の振動挙動を観察した。製品は梱包されていると、中身の製品を観察できない。そのため、箱の蓋を開いた状態で加振し、箱の上から高速度カメラを用いて製品の振動挙動を撮影した。そして、撮影された動画から、試験中に製品が非加振方向に振動している

のか、どのように製品が非加振方向に振動しはじめるのかを調べた。試験には、振動試験機 (IMV 製) を用い、試験条件には JIS Z 0232 を使用した。また撮影には、高速度カメラ (キーンズ製) を用いた。

さらに、XYZ 各方向に対して輸送と試験が同じ厳しさになる「試験条件導出理論」を構築するために、加振方向に加えて非加振方向の製品振動を考慮した試験条件の導出方法 (提案法) について検討した。提案法では、加振方向の製品振動を考慮した試験条件の導出方法 (従来法) の一部に改良を加え、非加振方向の製品振動を考慮できるようにした。具体的には、従来法では、輸送中における製品振動を用いて AFS を算出し、これに安全率を乗じて目標 AFS に設定していた。一方、提案法では、この目標 AFS を設定する際に、試験中における非加振方向の製品振動も考慮できるように改良を加えた。非加振方向の製品振動を考慮した目標 AFS を求めることにより、非加振方向の製品振動を考慮した試験条件を導出する方法を考案した。

最後に、輸送振動から試験条件を導出する際には、輸送振動 (もしくは、走行条件別の輸送振動) を代表する PSD を算出する必要がある。そこで、輸送振動の代表 PSD の簡易算出方法についても検討した。これまでは、代表 PSD として、一定時間ごとに算出される PSD の平均値もしくはピークホールド値が用いられていたが、疲労の観点から等価な (輸送振動の蓄積疲労と同じになる) PSD ではなかった。そこで、輸送振動と疲労等価な PSD を算出する方法を考案した。

4. 研究成果

(1) 輸送中と試験中における製品振動の違いを調査

輸送環境調査として、輸送中におけるトラックの荷台および箱内の製品の XYZ 各方向の加速度を測定した。図 3 に、荷台および製品の XYZ 各方向の加速度波形を示す。図 3 から、荷台と製品の加速度レベルは全く異なり、製品は荷台よりも増大している。また、荷台はすでに 3 次元に振動しているため、製品も 3 次元に振動している。さらに、加速度波形はレベルが一定ではない非定常な波形になっていることがわかる。

一方、試験環境調査として、試験中におけるテーブルおよび箱内の製品の XYZ 各方向の加速度を測定した。図 4 に、テーブルおよび製品の XYZ 各方向の加速度波形を示す。図 4 から、輸送環境調査結果と同様に、テーブルと製品の加速度レベルは全く異なり、製品はテーブルよりも増大している。また、Z 方向の 1 軸加振のためテーブルは Z 方向にのみ振動しているにもかかわらず、製品は Z 方向だけでなく、3 次元に振動している。さらに、加速度波形はレベルが一定の定常な波形になっていることがわかる。

このように、荷台と製品、もしくは、テ

ブルと製品の振動を比較すると、製品振動は、荷台やテーブルの振動と全く異なっている。さらに、加振方向だけでなく、非加振方向にも製品振動がみられることがある。ここでは、実験試料として、ペットボトル入りの包装貨物を用いたが、プラスチック製ボトル入り包装貨物を用いた実験でも同様の傾向がみられた。これらのことから、輸送中と試験中における製品振動の違いを明示することができた。すなわち、このような違いは試験精度が低下する一因になると考えられる。

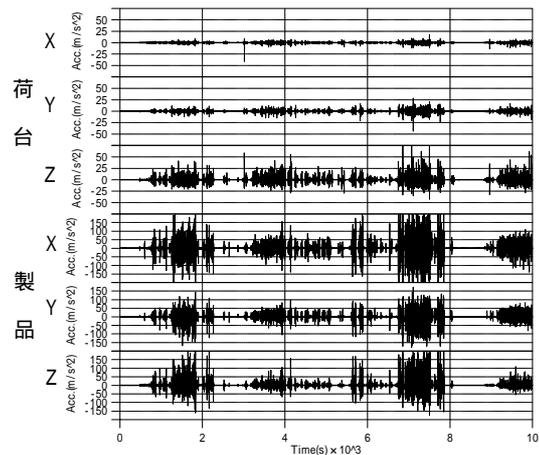


図 3 輸送中における荷台および製品の加速度波形 (荷台: 上の 3 波形、製品: 下の 3 波形)

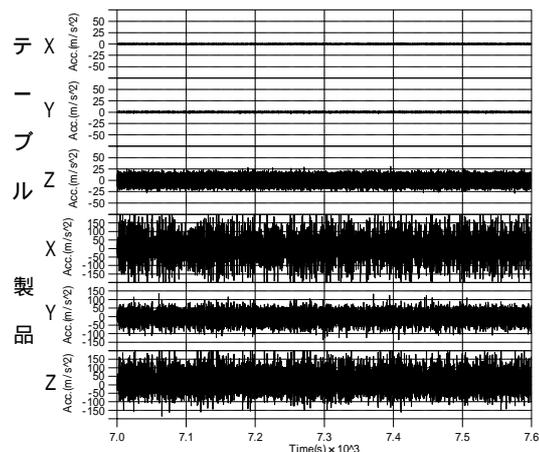


図 4 試験中におけるテーブルおよび製品の加速度波形 (テーブル: 上の 3 波形、製品: 下の 3 波形)

(2) 高速度カメラを用いた非加振方向の製品振動の発生メカニズムを調査

高速度カメラを用いて試験中における箱内の製品の振動挙動を撮影した。図 5 に高速度カメラによる撮影画像を示す。撮影された動画から、製品はテーブルとともに上下に振動しているが、途中で製品はバランスを崩して、非加振方向にも振動しはじめる様子が見られた。さらに、試験中には製品は箱底面との衝突や製品同士の衝突を繰り返すことに

より、箱内で3次元に振動している様子が観察できた。

このように、箱内の製品固定が不十分な場合には、試験中における製品バランスの崩れ、製品と箱の衝突や製品同士の衝突が、非加振方向の製品振動の発生に関係していると推測される。したがって、このような非加振方向の製品振動は、現在の試験条件の導出方法では考慮されていないため、試験精度が低下する一因になると考えられる。



図5 高速度カメラによる加振中におけるペットボトルの撮影画像

(3)加振方向に加えて、非加振方向の製品振動を考慮した試験条件の導出方法を考案

箱内で製品固定が不十分な場合には、試験中に非加振方向の製品振動がみられることがある。今回の実験では、特にZ方向の試験中において非加振方向の大きな製品振動がみられた。そこで、Z方向の試験中における非加振方向(X方向およびY方向)の製品振動を考慮した試験条件の導出方法を新たに考案した。そして提案法の効果を調べるために、Z方向の試験中における非加振方向の製品振動を「考慮しない場合」と「考慮する場合」を想定して試験条件を導出し、両条件を比較した。

まず、Z方向の試験中における非加振方向の製品振動を考慮しない場合と考慮する場合におけるX方向の目標AFSを導出した。図6にX方向の目標AFSとZ方向の試験中におけるX方向のAFSを示す。図6から、高振動数帯(約20Hz以上の振動数帯)では、Z方向の試験中におけるAFSは大きく、製品は必要以上に加振されていることがわかる。非加振方向の製品振動を考慮する場合の目標AFSは、考慮しない場合の目標AFSからZ方向の試験中におけるX方向のAFSを減じて求めている(図中の一点鎖線=点線-実線)。そのため、この目標AFSは、不要なAFSを除いた必要なAFS(約20Hzまでの振動数帯のAFS)のみになっている。

次に、非加振方向の製品振動を考慮しない場合と考慮する場合におけるX方向の試験条件を算出した。図7にX方向の試験条件を示す。非加振方向の製品振動を考慮する場合の試験条件は、必要なAFSのみとなった目標AFSから試験条件を導出している。そのため、こ

の試験条件は、不要な振動数帯のPSDを除いた必要な振動数帯のPSD(約20Hzまでの振動数帯のPSD)のみになっている。

このように、試験中における非加振方向の製品振動を考慮すると、不要な加振を除いた試験条件を導出できる。ゆえに、非加振方向の製品振動の考慮は、試験条件の適正化による試験精度の向上に役立つと考えられる。

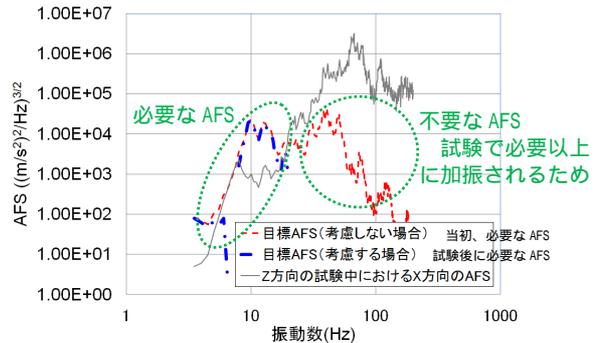


図6 非加振方向の製品振動を考慮しない場合とする場合における目標AFS(X方向)

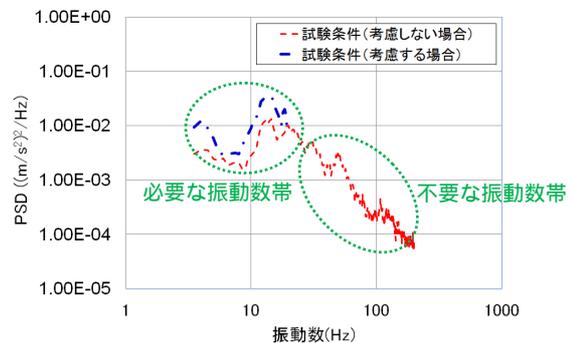


図7 非加振方向の製品振動を考慮しない場合とする場合における試験条件(X方向)

(4)輸送振動を代表する疲労等価PSDの簡易算出方法を考案

これまで輸送振動を代表するPSDとして、一定時間ごとに算出されるPSDの平均値もしくはピークホールド値が用いられていた。しかし、これらの値は疲労の観点から等価な(輸送振動の蓄積疲労と同じになる)PSDではなかった。そこで輸送振動を代表する等価なPSDの簡易算出方法を新たに考案した。図8に輸送振動の分類方法の概念図を、図9に輸送振動を分類したクラス別のAFSの算出例を示す。この算出方法では、まず、一定時間の実効値を用いて輸送振動を振動レベルごとに分類し(図8参照)、クラスごとに蓄積疲労を算出する(図9参照)。次に、式(1)を用いて輸送全体の蓄積疲労を算出し、その合計値と疲労等価になるPSDを求める(式(2)参照)。最後に、式(3)を用いてその合計値から逆算し、輸送振動を代表する疲労等価PSDを算出する。

このように、輸送振動に対して疲労等価

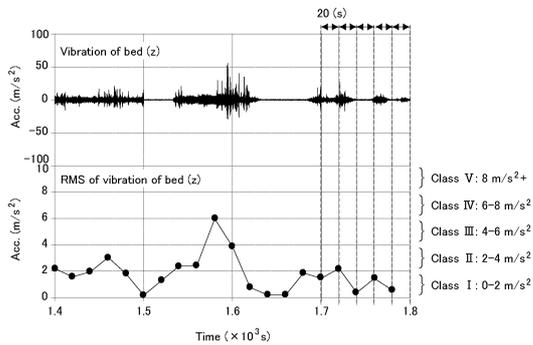


図 8 輸送振動の分類方法の概念図

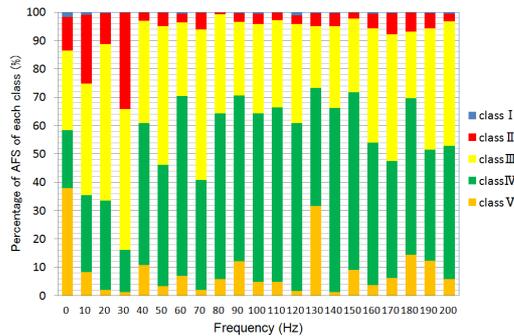


図 9 クラス別の輸送振動の AFS の算出例(一般道路)

PSD の簡易算出方法を適用すると、蓄積疲労が同じになる PSD を算出できる。すなわち、輸送振動を代表する PSD を適正かつ簡単に算出できるため、輸送振動データの有効活用に関立つと考えられる。

$$\beta(f)_{all} = \beta(f)_{1st\ class} + \beta(f)_{2nd\ class} + \dots + \beta(f)_{last\ class} \quad (1)$$

$$\beta(f)_{all} = \beta(f)_{equ} = f \times T_{equ} \times (2 \times PSD(f)_{equ})^{\frac{\alpha}{2}} \times \Gamma(1 + \frac{\alpha}{2}) \quad (2)$$

$$PSD(f)_{equ} = \left[\frac{1}{T_{all}} \times \{ T_{1st\ class} \times (2 \times PSD(f)_{1st\ class})^{\frac{\alpha}{2}} + T_{2nd\ class} \times (2 \times PSD(f)_{2nd\ class})^{\frac{\alpha}{2}} + T_{last\ class} \times (2 \times PSD(f)_{last\ class})^{\frac{\alpha}{2}} \} \right]^{\frac{2}{\alpha}} \times \frac{1}{2} \quad (3)$$

表 1 記号の定義

	:	加速係数
	:	蓄積疲労
f	:	振動数 (Hz)
T	:	振動時間 (s)
PSD	:	パワースペクトル密度 ((m/s ²) ² /Hz)
	:	ガンマ関数

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

津田和城、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、日本包装学会誌、査読有、23、3、2014、215-223 .

〔学会発表〕(計 9 件)

津田和城、細山亮、試験精度向上に役立つ非加振方向の製品振動を考慮した振動試験条件の導出、日本包装学会第 25 回年次大会、平成 28 年 7 月 7 日、神戸大学 .

津田和城、振動試験の条件適正化を目指した内容品のガタ振動調査および蓄積疲労スペクトルの活用、研究発表会、平成 27 年 12 月 1 日、大阪産業創造館 .

津田和城、被包装物のガタ振動特性および蓄積疲労スペクトル評価に関する研究、日本包装学会第 24 回年次大会、平成 27 年 7 月 3 日、東京大学 .

Kazuki TSUDA、Analysis of Transportation Vibrations and Proposal of Method to Calculate Fatigue Equivalent PSD Based on Vibration Fatigue of Packaged Products、IAPRI Symposium on Packaging 2015、平成 27 年 6 月 9 日、バレンシア .

津田和城、包装貨物の振動試験の条件適正化に向けた取り組み、近畿ポリテックビジョン 2015、平成 27 年 2 月 20 日、近畿職業能力開発大学校 .

津田和城、包装内容品の 3 次元振動に注目した輸送環境と試験環境の比較、日本包装学会第 23 回年次大会、平成 26 年 7 月 3 日、東京大学 .

細山亮、津田和城、3 軸同時振動試験のための輸送環境データの相関分析、日本包装学会第 23 回年次大会、平成 26 年 7 月 3 日、東京大学 .

津田和城、振動試験の条件適正化を目指した被包装物の 3 次元挙動に関する研究、研究発表会、平成 26 年 3 月 11 日、大阪府立産業技術総合研究所 .

津田和城、垂直振動を受ける被包装物の 3 次元振動解析、日本包装学会第 22 回年次大会、平成 25 年 7 月 10 日、東京大学 .

〔その他〕(計 1 件)

津田和城、日本包装学会奨励賞 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田 和城 (TSUDA, Kazuki)

地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40359435