

蓄積疲労振動試験システムの実用性の検討 :蓄積疲労スペクトルを活用した振動試験と 輸送環境の分析

津田 和城*、中嶋 隆勝*、山内 佳門**、井上 良隆**

Practical Use of Accumulated Fatigue Vibration Test System : Vibration Test and Analysis of Transportation Environment by using Spectrum of Accumulated Fatigue

Kazuki TSUDA*, Takamasa NAKAJIMA*, Yoshikado YAMAUCHI** and Yoshitaka INOUE**

近年、振動試験の精度向上を目的として、蓄積疲労振動試験システムが提案されている。本システムでは、蓄積疲労を表す新しい評価基準として、振動数ごとに製品にかかる負荷を把握できる蓄積疲労スペクトルが用いられている。本基準は、輸送環境と等価な振動試験の実施や輸送環境の分析に活用できると考えられる。本研究では、蓄積疲労スペクトルを用いて実際に振動試験条件を導出し、実用性を検討した。また、輸送環境の比較分析を容易にするため、蓄積疲労スペクトルの区間積分を試みた。以上の取り組みにより、蓄積疲労振動試験システムの実用性が確認できた。具体的には、蓄積疲労スペクトルの活用により、輸送や試験による製品への負荷が把握でき、試験が輸送環境と同程度の厳しさであることが確認できた。また、区間積分値の活用により、走行道路や経路ごとに製品への負荷が把握でき、どの道路や経路が製品にとって厳しいのかがわかった。

The accumulated fatigue vibration test system is proposed in order to improve the accuracy of the vibration test. In this system, the spectrum of accumulated fatigue, which represents the load to the product at each frequency, is used as a new evaluation criterion. The objective of this study is to investigate the two kinds of practical utilities of this system with the spectrum of accumulated fatigue. One is the conduction of the vibration test equivalent to the actual transportation. Another is the analysis of the transportation environment. A vibration test was conducted using the test conditions derived from the spectrum. And it has been confirmed that the severity of the test is equivalent to the transportation environment. Then the spectrum was integrated at a certain frequency range in order to analyze the transportation environment. And it has been found which road is severe to the product, because the load to the product due to the vibration of each road has been clarified by the integrated values. By the above approaches, the practical use of this system has been examined.

キーワード: 振動試験、蓄積疲労、分析、加速試験、振動伝達、パワースペクトル密度

* 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.pref.osaka.jp)

** IMV 株式会社

1. はじめに

筆者らは、振動試験^{1)~3)}の精度向上を目的として、蓄積疲労振動試験システムを提案した^{4),5)}。本システムは、輸送ルート、加速係数、安全率などを入力することにより、ランダム振動試験の条件が導出され、振動試験を実施できるシステムである。本システムでは、蓄積される疲労の新しい評価基準として、振動数ごとに製品にかかる負荷を把握できる蓄積疲労スペクトルが用いられている。

これまで、製品にかかる負荷を調べるには、Palmgren-Miner 則やピークカウント法を用いた疲労評価^{6)~8)}が行われていた。しかしこれらの方法では、振動数を考慮せずピークのみ注目して疲労を評価するため、振動数の影響を考慮した疲労評価はできなかった。換言すると、加速度が同じであれば、10Hz、100秒間の振動と100Hz、10秒間の振動は等価であると評価せざるを得なかった。しかし現実の包装貨物においては、10Hz、100秒間の振動の方が厳しい振動であることが経験的に知られており、振動数を無視した疲労評価には限界がある。そこで、これを解決する手段として本システムでは、蓄積疲労スペクトルが利用されている。

蓄積疲労スペクトルは、輸送環境と等価な振動試験の実施や輸送環境の分析に活用できると考えられている。しかし、本当に活用できるか否かについては十分検討されておらず、速報的な発表⁹⁾以外では、類似報告はない。これが明らかになれば、試験条件や輸送環境の改善（破損事故や過剰設計の削減）

に、本指標を活用できる。

そこで、実データを対象に、振動試験や輸送環境の分析に本指標を活用できるか否かを検討する。具体的には、事前に輸送中の荷台振動が調査されている輸送環境を対象に、まず、蓄積疲労スペクトルを用いて輸送や試験によって製品にかかる負荷を求め、これらが輸送と等価な振動試験の実施に活用できる否かを検討する。次に、輸送環境の比較検討を容易にするために、蓄積疲労スペクトルの区間積分を試みる。得られた値（以下、区間積分値と称す）は、ある輸送環境下で蓄積される、振動数帯域に関わる疲労を意味する。この区間積分値を用いて走行道路（一般道路や高速道路など）や経路（往路や復路など）ごとに製品への負荷を求め、これらが輸送環境の分析に活用できるか否かを検討する。

2. 蓄積疲労スペクトルを活用した振動試験

ここでは、輸送環境と等価な振動試験の実施に本指標を活用できるか否かを検討する。具体的には、事前に輸送中の荷台振動が調査されている輸送環境を対象に、本指標を用いて、輸送によって製品にかかる負荷を求める。次に、この負荷と等価になる試験条件を、本システムを用いて導出する。

2.1 荷台振動の事前調査

今回、対象とする輸送ルート走行時の荷台振動の加速度パワースペクトル密度（加速度 PSD（Power Spectral Density））を事前に調査した¹⁰⁾。輸送ルートは、往路で中央自動車道、

復路で東名高速道路を利用する輸送時間約13時間の大阪—東京間往復とした。Fig.1に荷台振動の事前調査の様子を、Fig.2に計測された荷台振動の一部として、一般道路、中央自動車道、東名高速道路の加速度PSDを示す。



Fig.1 Vibration measurement of carrier during transportation

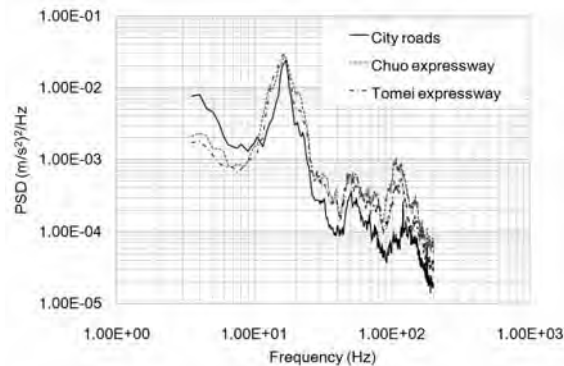


Fig.2 Power spectral density of vibration acceleration of carrier measured during transportation (City roads, Chuo expressway, Tomei expressway)

Fig.1に示すように、輸送環境記録計を荷台後部の2箇所(左は予備)に取り付け、輸送中の荷台振動を計測した。ただし記録計の計測結果は荷台の回転方向の動きに影響を受けるため、設置箇所によりその結果は異なる可能性がある。しかしここではこの点について

は今後の課題とし、荷台の後部右端を設置箇所とした。また Fig.2 に示すように、計測する荷台振動の振動数範囲は、JIS Z 0232 に記載されている試験条件と同じ 3Hz~200Hz とした。

2.2 本システムの設定条件

Table 1に本システムに設定した輸送ルートの詳細を示す。また、設定したパラメータは、製品の加速係数3、試験の安全率1(輸送と同レベル)、試験時間30分(JISの推奨最低試験時間)とした。

2.3 試験条件の導出方法

試験機の振動テーブル上に包装貨物を固定し、蓄積疲労計測用の加速度センサを製品の側面に取り付けた。事前調査時(実輸送時)には製品に加速度センサを取り付けていないため、製品の加速度は測定されていない。そこで事前調査で得られた各道路走行時の荷台振動の加速度PSDを用いて振動テーブルを振動させて、実輸送時に相当する製品の加速度を測定した。

そしてこれらの加速度と各道路の輸送時間から、輸送によって製品にかかる負荷、すなわち蓄積疲労スペクトルを算出した。その後、振動テーブルの振動を制御しながら、設定した試験時間内に、この蓄積疲労スペクトルと等価な疲労を製品に与える振動レベルを探索(振動試験条件を導出)した。Fig.3に試験の様子を示す。

Table1 Details of transportation routes

On the way to Tokyo Osaka (IMV Osaka) → Tokyo (IMV Tokyo)		
No.	Road Name	Remarks
1	City roads	IMV Osaka →
2	Meishin expressway	Toyonaka IC →
3	Tomei expressway	Kusatsu JCT →
4	Chuo expressway	Komaki JCT →
5	City roads	Sagamiko IC → IMV Tokyo
On the way from Tokyo Tokyo (IMV Tokyo) → Osaka (IMV Osaka)		
No.	Road Name	Remarks
6	City roads	IMV Tokyo →
7	Chuo expressway	Sagamiko IC →
8	Higashi-fujigoko road	Kawaguchiko IC →
9	City roads	Subashiri IC →
10	Tomei expressway	Gotenba IC →
11	Isewangan road	Toyota JCT →
12	Higashi-meihan expressway	Yokkaichi JCT →
13	Shin-meishin expressway	Kameyama JCT →
14	Meishin expressway	Kusatsu JCT →
15	City roads	Toyonaka IC → IMV Osaka

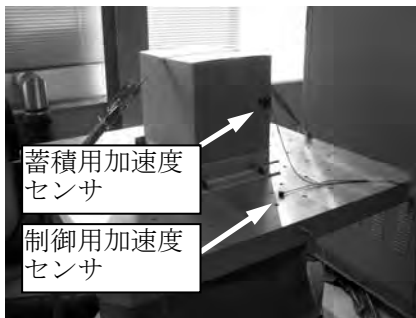


Fig.3 Vibration test

2.4 導出された試験条件

Fig.4に輸送環境と試験環境における蓄積疲労スペクトルを、Fig.5に導出された試験条件を示す。蓄積疲労スペクトル (AFS(f)) は、先の論文⁴⁾で提案された定義式 (式(1)参照) より算出される。

$$AFS(f) = fT(\sqrt{2}\sigma)^\alpha \times \Gamma(1 + \frac{\alpha}{2}) \dots(1)$$

f : 振動数(Hz)、T : 振動時間(s)、

σ : 加速度の標準偏差(m/s²)、

Γ : ガンマ関数、 α : 製品の加速係数

Fig.4に示すように、試験環境での蓄積疲労スペクトルと、輸送環境での蓄積疲労スペク

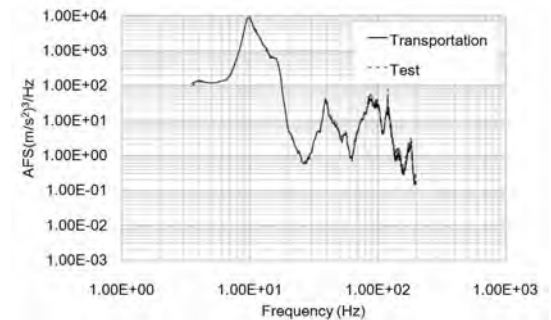


Fig.4 Spectrum of accumulated fatigue of product during transportation and vibration test
※AFS: Spectrum of Accumulated Fatigue

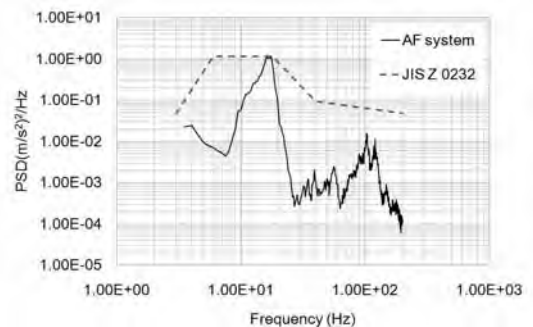


Fig.5 Power spectral density of vibration acceleration of vibration table during vibration test

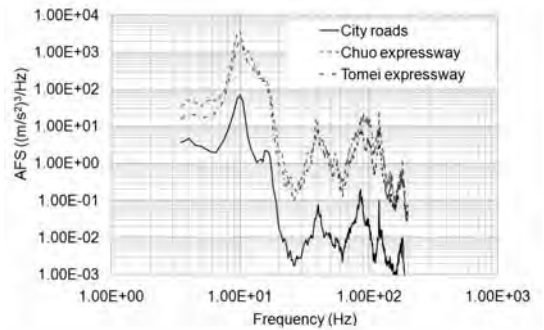
トルを比較すると、全振動数範囲に亘ってほとんど差が認められない。このことから、輸送環境で製品に蓄積される疲労を、振動数まで正確に、試験で再現できていることがわかる。またFig.2とFig.5を比較すると明らかなように、導出された試験条件はJIS規格と明らかに異なり、輸送中の荷台振動の加速度PSDを反映した（どの道路走行時においても荷台振動には18Hz付近や102Hz付近にピークがある）ものになっている。このように輸送環境と等価な振動試験の実施に本指標を活用できることがわかった。

3. 蓄積疲労スペクトルを活用した輸送環境の分析

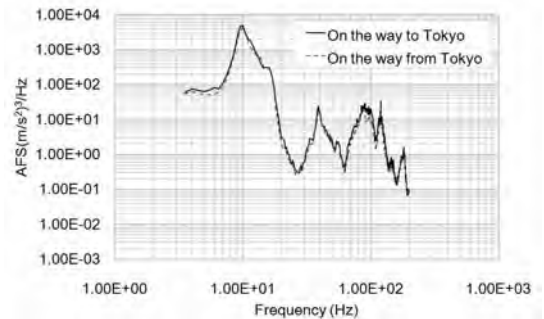
高い振動数の振動に脆弱な製品もあれば、低い振動数の振動に脆弱な製品もある。ここでは、蓄積疲労スペクトルを応用して、ある範囲の振動数の振動に対する蓄積疲労を、関数ではなく、定数で表現することにより、輸送環境の比較分析を容易にする手法を提案する。また、実データに基づいてこの手法の実用可能性の検討を行う。これにより、ある振動数帯域に注目して、道路ごとと経路ごとに製品にかかる負荷を求め比較検討が可能となる。

3.1 蓄積疲労スペクトル（振動数ごとの製品にかかる負荷）

Fig.6(a), (b)に走行道路別（一般道路、中央自動車道、東名高速道路）、経路別（往路、復路）の蓄積疲労スペクトルを示す。図より



(a) Transportation roads (City roads, Chuo expressway, Tomei expressway)



(b) Transportation routes (On the way to and from Tokyo)

Fig.6 Spectrum of accumulated fatigue by each road or each route

明らかなように、今回の輸送では、10Hz、40Hz、90Hz 付近に負荷のピークがあり、特に 10Hz 付近のピークが大きくなっている。

また、高速道路の負荷は一般道路よりも大きくなっており、往路の負荷は復路と同程度であるものの、一部、復路よりも若干大きくなっている。このように蓄積疲労スペクトルから、ある振動数に注目した形で、走行道路別に製品にかかる負荷を把握できる。これは、製品の脆弱性に関する特徴を考慮した上で、どの道路やどの経路が製品にとって厳しいのかを判断する材料になる。

このように、蓄積疲労スペクトルは、試験条件の導出や、詳細な分析には、非常に有効な解析手段となり得る。

3.2 蓄積疲労スペクトルの面積（振動数帯域ごとの製品にかかる負荷）

前節より明らかなように、蓄積疲労スペクトルは、詳細な分析には有効な解析手段である。しかしその反面、簡易な分析には不向きである。たとえば、走行道路別の蓄積疲労を棒グラフにしようとしても、指標が関数であるため、振動数をパラメータとした三次元の棒グラフになってしまい、一目瞭然とはならない。

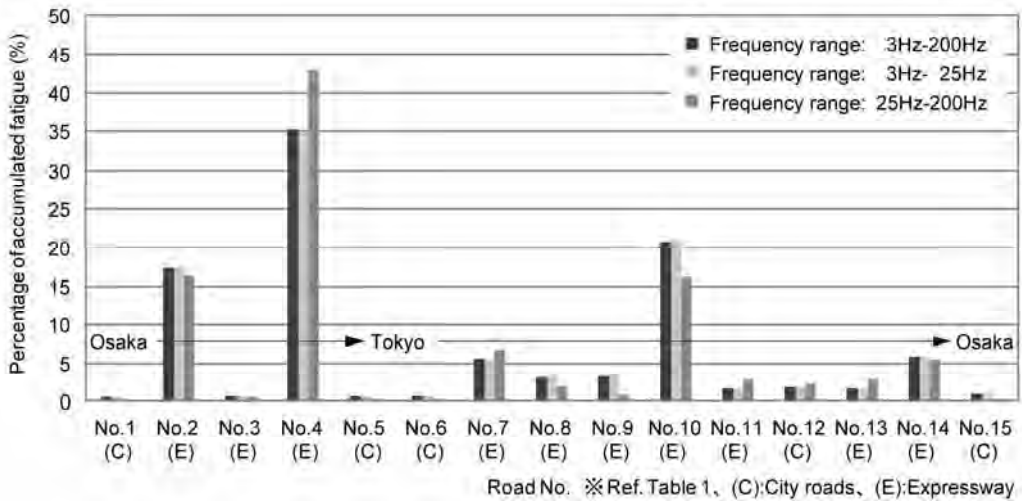
そこである振動数帯域に対して、蓄積疲労スペクトルを区間積分して（式(2)参照）、走行道路別に製品にかかる負荷を推定し、その振動数帯域に関する蓄積疲労を定数化する。これにより、走行道路や経路別に、蓄積疲労を算出でき、棒グラフなどを用いた、わかりやすい比較分析が可能となる。

$$AF_{\text{道路}} = \int_3^{200} AFS(f)_{\text{道路}} df \cdots (2)$$

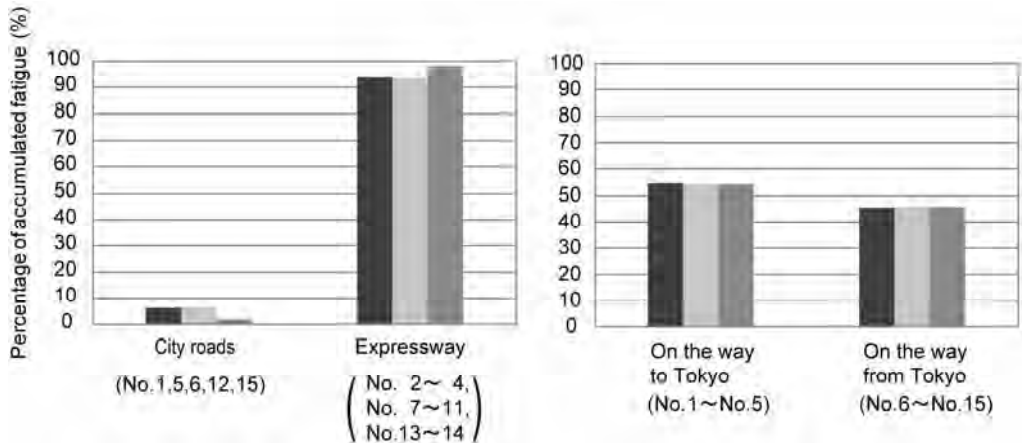
ただし、振動数帯域を全振動数帯域に広げてしまうと、従来のピークカウント法と同様、振動数の影響を無視してしまうことになる。また、蓄積疲労スペクトルの定義式は、狭帯域のランダム振動のピークの分布がレーリー分布であることを前提として、設定されている。そのため、その区間積分値に関しては、ピークの分布形状の違いなどによる誤差が

生じる可能性がある。今後、誤差を低減する手法の研究が必要である。

ここでは、全振動数帯域 3Hz～200Hz を 2 分割した、3Hz～25Hz と 25Hz～200Hz の振動数帯域に注目して、走行道路別に製品にかかる負荷を推定する。ここでは分割する振動数は、蓄積疲労スペクトルにおける 10Hz 付近と 40Hz 付近のピークの境にあたる 25Hz とした（Fig.6 参照）。Fig.7(a)、(b)、(c)に 3Hz～200Hz、3Hz～25Hz、25Hz～200Hz それぞれの振動数帯域に注目したときの、輸送全体に占める各走行道路の負荷の割合を、道路別、一般道路と高速道路別、往路と復路別に示す。Fig.7(a)より明らかなように、No.2 の名神高速道路、No.4 の中央自動車道、No.10 の東名高速道路の負荷が大きくなっている。また Fig.7(b)、(c)より明らかなように、今回の輸送では一般道路と高速道路を比較すると高速道路の負荷が大部分を占め、往路と復路を比較すると往路の負荷は復路より約 10% 大きくなっている。さらに Fig.7(a)より明らかなように、3Hz～200Hz の割合と 3Hz～25Hz の割合を比較すると同程度であるものの、3Hz～200Hz の割合と 25Hz～200Hz の割合を比較すると、No.4 の中央自動車道の割合が増加して No.10 の東名高速道路の割合が減少している。このことから、3Hz～200Hz の負荷に及ぼす影響は 3Hz～25Hz の振動の方が、25Hz～200Hz の振動よりも大きいことがわかる。このように蓄積疲労スペクトルの面積から、ある振動数帯域に注目した形で、走行道路別に



(a) Transportation roads (No.1~No.15)



(b) City roads and expressway (c) Transportation routes (On the way to and from Tokyo)

Fig.7 Percentage of accumulated fatigue

製品にかかる負荷を推定できるため、どの道路やどの経路が製品にとって厳しいのかが明らかになる。

3.1 節、3.2 節から明らかなように、蓄積疲労スペクトルおよびその区間積分値を用いれば、ある振動数あるいは、ある振動数帯域に注目した形で、輸送道路 A と輸送道路 B (同

様に、輸送経路 A と輸送経路 B、輸送形態 A と輸送形態 B、輸送環境と試験環境) のどちらが製品にとって厳しいのかが明らかになる。これらのことから、輸送環境の分析に本指標を活用できることが実験的に示された。これらの分析結果を用いれば、輸送経路や輸送形態の選定、輸送と試験の厳しさの比較な

どが可能となる。

4. 結論

実データを対象に、輸送環境と等価な振動試験の実施や輸送環境の分析に蓄積疲労スペクトルを活用できるか否かを検討した。その結果、輸送環境と等価な振動試験の実施や輸送環境の分析に本指標を活用できることが、実データを用いて示された。以下に明らかになった点をまとめる。

- (1) 蓄積疲労スペクトルから、輸送や試験によって製品にかかる負荷を把握できるため、試験が輸送環境と同程度の厳しさであることがわかった。
- (2) 蓄積疲労スペクトルおよびその区間積分値から、ある振動数あるいは、ある振動数帯域に注目した形で、走行した道路や経路ごとに製品にかかる負荷を把握できるため、どの道路やどの経路が製品にとって厳しいのかがわかった。

- 5) IMV 株式会社、蓄積疲労振動試験システムの HP : http://www.imv.co.jp/goods/vibration_test/control/k2_fatigue/
- 6) 河野澄夫、岩元睦夫、輸送シミュレーション技術、包装技術別冊 92. No.9、98-106、(1992)
- 7) 細山亮、中嶋隆勝、台車振動と試験振動における蓄積疲労の比較－確率密度分布が蓄積疲労に与える影響－、日本包装学会誌、19(2)、113-121、(2010)
- 8) 劉建楠、斎藤勝彦、手押し台車配送による包装貨物の蓄積疲労、日本包装学会誌、19(4)、297-303、(2010)
- 9) 津田和城、中嶋隆勝、山内佳門、井上良隆、試験の精度向上や可視化に役立つ蓄積疲労振動試験システムの有効性評価、日本包装学会第 19 回年次大会予稿集、134-135、(2010)
- 10) 井上良隆、森整、輸送環境記録計と活用事例、日本包装学会誌、20(2)、77-84、(2011)

(原稿受付 2011 年 8 月 18 日)

(審査受理 2011 年 10 月 25 日)

<参考文献>

- 1) JIS Z 02332:2004、包装貨物－振動試験方法
- 2) ASTM D 4728-2006, Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers
- 3) ISO 13355-2001, Packaging-Complete, filled transport packages-Vertical random Vibration tests
- 4) 中嶋隆勝、津田和城、川田浩二、山内佳門、蓄積疲労評価型振動試験システムの提案、日本包装学会誌、16(1)、41-51、(2007)