

# 蓄積疲労評価型振動試験システムの提案

中嶋隆勝\*・津田和城\*・川田浩二\*\*・山内佳門\*\*

## Vibration Test System using Accumulated Fatigue Index

Takamasa NAKAJIMA\*, Kazuki TSUDA\*, Koji KAWATA\*\* and Yoshikado YAMAUCHI\*\*

振動試験は企業の品質管理やコスト削減の目的だけでなく、安全・安心な社会実現のためにも重要な技術であり、特に包装貨物の振動試験は輸送中の破損事故防止のため広く普及されている。しかし、包装貨物の場合、振動伝達の非線形性が強いと評価精度に問題がある。そこで、振動試験の評価精度の向上を目的とし、非線形対応型の蓄積疲労による評価法、論理演算式で表現された輸送シナリオ、市場許容破損確率に応じた安全係数算出法、許容増幅率を考慮した試験条件自動導出法、ならびに蓄積疲労速度モニタリングによる破損発生時点の推定法を提案した。これらの提案に基づく新振動試験システムにより、従来法と比較して大幅な評価精度向上の可能性が生まれるだけでなく、各社各製品について固有の試験条件が自動的に導出できその根拠もわかりやすくなる。さらに、振動耐久性に関する解析・検討用データも取得できる。

Vibration Testing is an important technology in providing for a safe and secure society as well as to control the quality of products and to minimize product cost. Vibration testing for packaged-freight is wide-spread because damage during transportation must be avoided. However, in evaluating vibration durability of packaged-freight, the accuracy decreases due to the non-linear transmissibility of packaged-freight. In this study, new methods are proposed in order to improve this accuracy.

- (1) An evaluation method for non-linear transmissibility using the accumulated fatigue index
- (2) A transportation scenario using logical operations (and, or)
- (3) A method to calculate the safety factor based on an allowable percentage of damage on the market
- (4) An automatic system to derive test conditions using an allowable amplifying ratio
- (5) A monitoring system for the rate of accumulated fatigue in order to judge the time to failure without checking the inside of the specimen

The merits of the new test system using the above proposals are as follows:

- (1) The system can improve the accuracy of evaluating durability
- (2) Test conditions for each unique product can be derived automatically
- (3) Analytical data obtained by this system is achieved to scientifically improve product packaging

キーワード：振動試験システム、蓄積疲労、非線形振動、輸送シナリオ、包装、貨物、破損確率、危険率

Keywords : Vibration Test System, Accumulated Fatigue, Non-linear Vibration, Transportation Scenario, Packaging, Freight, Probability of Damage, Risk.

\*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  
Technology Research Institute of Osaka Prefecture 2-7-1 Ayumino, Izumi, Osaka 594-1157, Japan

\*\*IMV株式会社 〒555-0011 大阪市西淀川区竹島2-6-10  
IMV Co. Ltd. 2-6-10. Takeshima, Nishiyodogawa-ku, Osaka, Osaka, 555-0011, Japan

## 1. 緒言

企業の安全と安心に対する社会的ニーズ、関心が高まる中、振動試験の重要性も益々高まってきている。一方、製品出荷前に行う包装貨物振動試験の評価精度に関しては、ランダム振動<sup>1) 2)</sup>、輸送環境データに基づく試験条件の導出<sup>3) 4) 5)</sup>などの技術進展により改善しつつあるものの、未だ技術的に未解決な問題が多く残されている。たとえば、包装貨物の場合、振動伝達が非線形性となる事例が多いにもかかわらず、試験条件の導出には線形振動伝達が前提となっているのが一般的であり、非線形性振動伝達を考慮した試験方法に関する研究はあまり行われていない。また、各社独自の輸送条件に適した振動試験条件を導出するためには、輸送環境データの収集を行い、疲労寿命推定法（マイナー則）を用いて試験時間の短縮を行う必要があり、多くの労力、専門知識、経験がいる。そのため、個別な試験条件導出をあきらめ、JIS などに基づく一般的な試験条件を自社の規格として採用している企業が多い。しかし、これらの試験条件が個別な輸送条件に対応している保証はなく、振動試験合格済み製品の市場での破損や過剰包装などの問題が潜在的に存在しているのが実情である。

本研究では、これらの問題を解決する新機能を搭載した高精度振動試験システムの開発をめざし、非線形対応型の蓄積疲労による評価法<sup>6)</sup>、論理演算式で表現された輸送シナリオ<sup>7)</sup>、市場許容破損確率を考慮した安全係数算出法<sup>7)</sup>、許容増幅率を考慮した試験条件自動導出<sup>7)</sup>、ならびに蓄積疲労速度モニタリングによる破損発生時点の推定法<sup>7)</sup>を提案する。

## 2. システムの理論および新概念

### 2.1 蓄積疲労

振動試験では、一般に供試品が加振台に取付けられ、既定の振動条件、たとえば、パワースペクトル密度（以下、PSD と略称）と加振時間で加振した後、供試品損傷の有無によりその合否が判定される。しかし、この方法では、加振台から供試品の各部位への振動伝達の非線形性が考慮されていないため、包装貨物のように振動伝達に強い非線形性が存在する場合、誤った評価結果となる可能性が高い。そこで、実際に供試品の各部位にセンサーを貼付し、その部位に蓄積される疲労を指標化して耐久性を判断する試験方法を提案する。

#### 2.1.1 Palmgren-Miner の法則

疲労寿命の推定では、応力が一定でない場合、次の Palmgren-Miner 則がよく用いられる。Palmgren-Miner 則とは、応力  $S_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) がそれぞれ  $n_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) 回作用する場合、式(1)が成立すれば破壊すると考えたものである。

$$\sum_{i=1,2,\dots} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

ただし、 $N_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) は応力  $S_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) の破壊に至る回数を表したものであり、両対数グラフ上での S-N 曲線の直線性、すなわち式(2)が成立する傾向がある。

$$N_i \cdot S_i^\alpha = \beta \quad (2)$$

ただし、 $\alpha$ 、 $\beta$  は破損対象物固有の値であり、特に  $\alpha$  については  $m$  と標記される場合もある。 $\alpha$  は一般に加速係数と呼ばれている。

#### 2.1.2 蓄積疲労の指標化

応力  $S_i$  が  $n_i$  回作用したときに蓄積される疲労を  $n_i \cdot S_i^\alpha$  と定義し、蓄積疲労と呼ぶことに

する。  $n_i \cdot S_i^\alpha = \beta_i$  を式(1)に代入し、式(2)を用いて整理すると式(3)が成立する。

$$\sum_{i=1,2,\dots} \beta_i = \beta \quad (3)$$

式(3)は、式(1)と同様、破損を推定するために用いることができる。振動試験では、 $N_i$ が未知であるため、試験条件導出には式(1)よりも式(3)の方が適している。したがって、試験条件の厳しさを表す指標として  $\beta$ 、 $\beta_i$  を導入することにする。これにより、蓄積疲労  $\beta_i$  の合計  $\beta$  がある値に達したとき破損が発生すると仮定することができる。

### 2.1.3 狭帯域ランダム振動の蓄積疲労

期待振動数  $f_0$  の狭帯域定常ランダム振動の場合、ピーク値はレイリー分布<sup>8)</sup>を示し、その確率密度関数  $f_{\text{Rayleigh}}(x)$  は式(4)となる。

$$f_{\text{Rayleigh}}(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

ただし、 $x$  は S-N 曲線の応力  $S$  に相当する変数であるが、振動試験では振動応答として加速度やひずみなどを計測するのが一般的であるため、加速度やひずみを用いて蓄積疲労を算出することにする。また、 $\sigma$  は  $x$  の標準偏差である。通常、振動加速度の場合、 $x$  の平均値は 0 なので、 $\sigma$  は  $x$  の RMS 値に等しい。さらに、振動時間を  $T$  とすれば、蓄積疲労の定義式より、式(5)が成立する。

$$\beta = (f_0 \cdot T) \times \left\{ \int_0^\infty x^\alpha \cdot f_{\text{Rayleigh}}(x) dx \right\} \quad (5)$$

式(5)に式(4)を代入して整理すると式(6)となる<sup>5) 8)</sup>。

$$\beta = f_0 T (\sqrt{2}\sigma)^\alpha \times \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (6)$$

ただし、 $\alpha$  は加速係数、 $\Gamma$  はガンマ関数である。

### 2.1.4 蓄積疲労スペクトル

式(6)の  $\sigma$  を  $[\int \text{PSD}(f) df]^{1/2}$  に置き換えることにより、狭帯域ランダム振動の蓄積疲労は広帯域に拡張され、得られた  $\beta(f)$  を蓄積疲労スペクトルと呼ぶことにする。その定義式を式(7)に示す。

$$\beta(f) = f \cdot T \cdot \{2 \cdot \text{PSD}(f)\}^{\frac{\alpha}{2}} \times \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (7)$$

ただし、 $\text{PSD}(f)$  は振動応答の PSD 関数を意味する。

蓄積疲労をスペクトルすなわち周波数毎の評価値として取り扱った理由は、振動数が異なれば、同一時間の振動でも繰返し回数が大きく異なり妥当な評価ができないと考えたためである。具体的には、5Hz、10分間の振動と、50Hz、10分間の振動とでは、その回数で評価すると、50Hzの方が10倍大きな疲労が蓄積されることになる。しかし、この評価法では、現場でよく経験する結果とは一致しない場合が多い。したがって、より高精度に耐久性評価を行うためには、異なる振動数の振動を統一的に評価するのではなく、蓄積疲労スペクトルを用いて、振動数毎にそれぞれの蓄積疲労を評価すべきと考えた。さらに、単位時間当たりの蓄積疲労スペクトルの増加率、蓄積疲労速度スペクトルという概念も導入している。具体的には、式(7)の右辺を  $T$  で除すことにより算出される。

### 2.1.5 RMS 値に基づく蓄積疲労

本来、疲労寿命は S-N 曲線、すなわち応力と回数により評価されるが、振動試験では回数  $N$  の代わりに時間  $T$  が用いられることが多い。ランダム振動の RMS 値と加振時間に基づく蓄積疲労にあてはめると次式となる。

$$\beta_i = T \times \text{RMS}^\alpha \quad (8)$$

上式により、PSD の異なる振動試験規格の厳しさを定量的に比較することができる。ただし、異なる振動数成分を統一的に評価しているため、目安として用いるに止めるべきである。

## 2.2 論理演算を用いた輸送シナリオ

実輸送で供試品各部位に蓄積される疲労を推定する方法を提案する。実輸送で想定される輸送ルートおよび輸送条件を把握するため、それぞれの振動をサブシナリオとしてデータベース化し、複数のサブシナリオの論理演算式を用いた連結により、輸送シナリオを表現することにする。次に、各サブシナリオに対する各部位の振動応答を計測し、サブシナリオについての蓄積疲労を算出する。各サブシナリオの蓄積疲労を論理演算式に従って計算することにより、輸送シナリオについての

蓄積疲労を算出する。

### 2.2.1 データベースの概略

公開輸送環境計測データ、たとえば ASTM D 4728 のトラックや列車の振動データをサブシナリオとしてデータベース化する。また、ユーザー独自で実測した輸送環境データのデータベース化もできるようにする。そして、これらのサブシナリオを組み合わせ、Fig. 1 に示すような輸送シナリオを作成する。これにより、輸送環境データを保有しないユーザーでも、自社の輸送環境に近い輸送シナリオを選択するだけで簡単に試験条件が導出でき、逆に、輸送環境データを保有するユーザーは、より正確な情報に基づく輸送シナリオが作成できるため評価精度が向上する。

### 2.2.2 輸送シナリオの論理演算式

いくつかのサブシナリオ（輸送ルート）が連結して、輸送シナリオが構成されるが、そ

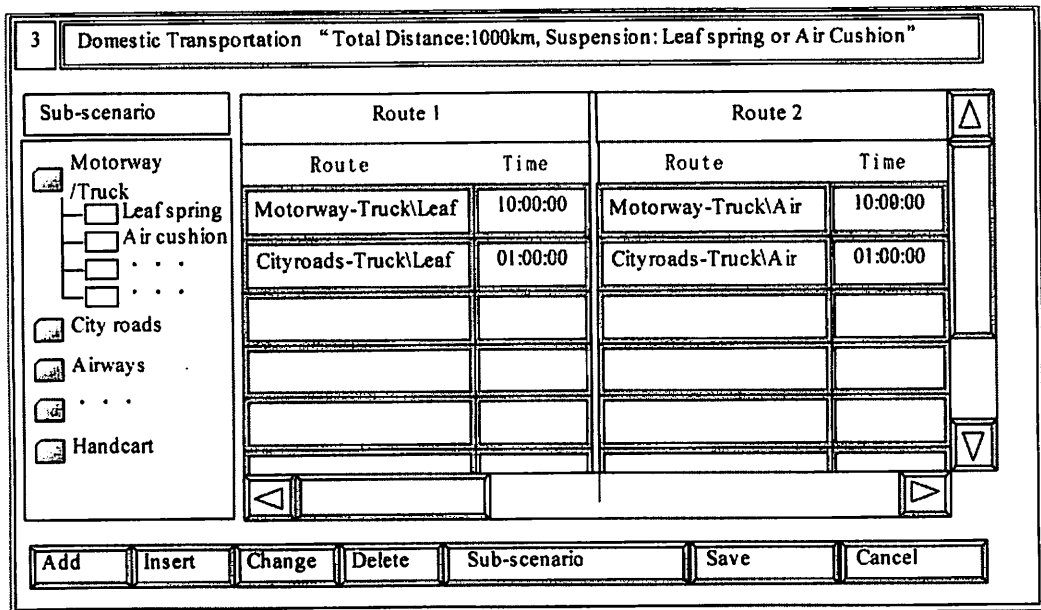


Fig. 1 Sample display of transportation scenario

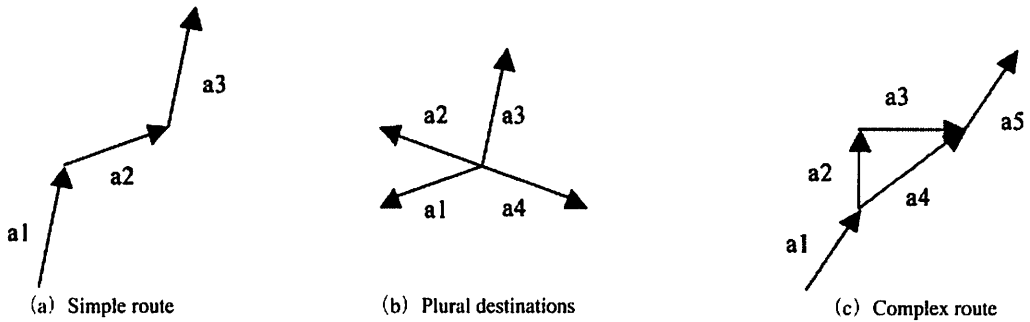


Fig. 2 Examples of transportation scenario

の典型的な連結パターンを Fig. 2 の模式図で示す。Fig. 2(a) はサブシナリオの足し合わせ（論理演算の and に相当）のみによって表現される従来型の輸送シナリオであり、Fig. 2 (b) は複数の仕向け地への輸送シナリオを表現している。また、Fig. 2(c) はある仕向け地に対して二つの輸送ルートが存在する場合の輸送シナリオを表現している。さらに、輸送シナリオを構成する各サブシナリオを  $a_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) とすると、Fig. 2 の(a)~(c)の輸送シナリオはそれぞれ次の論理演算式により表現できる。

$$a_1 \text{ and } a_2 \text{ and } a_3 \quad (9)\text{-a}$$

$$a_1 \text{ or } a_2 \text{ or } a_3 \text{ or } a_4 \quad (9)\text{-b}$$

$$a_1 \text{ and } [(a_2 \text{ and } a_3) \text{ or } a_4] \text{ and } a_5 \quad (9)\text{-c}$$

その他、輸送手段（リーフサス、エアサス、空車、満車など）や段積み位置などの違いも論理演算 or を用いて表現することができる。

### 2.2.3 市場蓄積疲労の算出

振動試験で負荷する蓄積疲労は、輸送シナリオにおいて想定される最大の蓄積疲労（以下、市場蓄積疲労と称す）に基づいて決定する。また、市場蓄積疲労は輸送シナリオの論理演算式に基づき算出する。サブシナリオが論理演算 and で連結されている場合、想定される蓄積疲労は二つのサブシナリオの蓄積疲

勞の加算  $\text{sum}()$  で算出できる。一方、論理演算 or で連結されている場合、 $\text{max}()$  で算出できる。ただし、 $\text{sum}()$  は引数の総和を返す演算を意味し、 $\text{max}()$  はすべての引数の中の最大値を返す演算を意味する。市場蓄積疲労を  $X_M$  とし、各サブシナリオでの蓄積疲労  $X_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) とすると、Fig. 2(a)~(c)の輸送シナリオに対する  $X_M$  はそれぞれ次式で算出される。

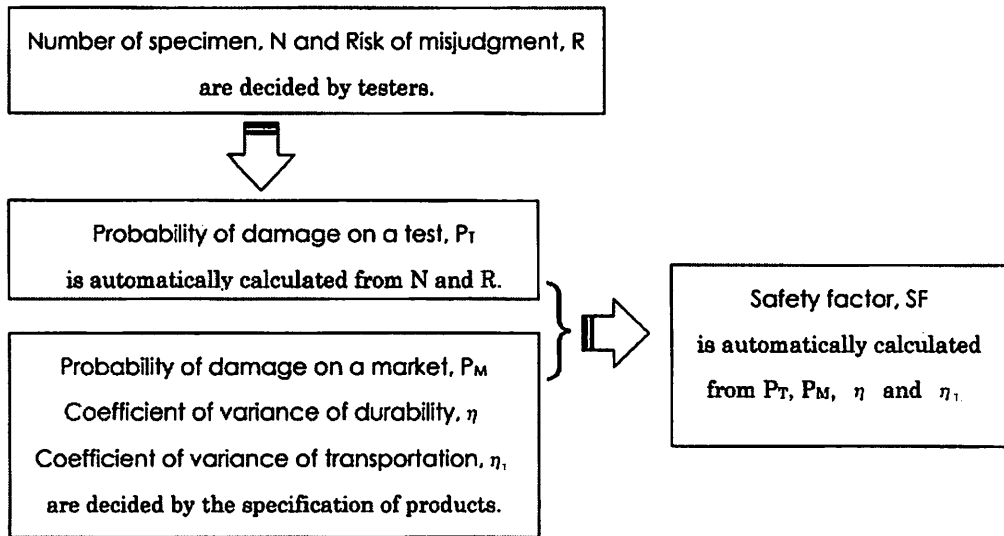
$$X_M = \text{sum}(X_1, X_2, X_3) \quad (10)\text{-a}$$

$$X_M = \text{max}(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (10)\text{-b}$$

$$X_M = \text{sum}[X_1, \text{max}[\text{sum}(X_2, X_3), X_4], X_5] \quad (10)\text{-c}$$

### 2.3 確率論による安全係数の決定

振動試験で市場蓄積疲労  $X_M$  を供試品に負荷するだけでは、数百台あるいは数千台に一台発生する市場での破損を、試験数が数点である評価試験で見つけ出すことは、その発生確率から見てほぼ不可能であり合否判定に対する危険率は非常に高い。したがって、市場で発生する破損を数少ない試験数で見出すため、市場蓄積疲労  $X_M$  に安全係数 SF を乗じた蓄積疲労（以下、試験蓄積疲労  $X_T (= SF \times X_M)$  と称す）を供試品に負荷することにより試験での破損確率（以下、試験破損確率と称

Fig. 3 Procedure of the derivation of SF from  $P_M$ , etc.

す) を高める必要がある。したがって、安全係数 SF を決定する際、供試品が市場で許容される破損確率（以下、市場許容破損確率  $P_M$  と称す）と、試験で許容される破損確率（以下、試験許容破損確率  $P_T$  と称す）が重要になる。たとえば、供試品の破損が人命にかかわるような製品の場合、市場許容破損確率を小さな値に設定しなければならない。逆に、破損しても代替品で置き換えられる場合、市場許容破損確率はそれほど小さな値にする必要はない。したがって、試料数と危険率を試験担当者が設定すれば自動的に試験許容破損確率が算出されるシステムの開発により、供試品の保証すべき信頼度に応じた適切な水準の試験が可能となる。以上の手順の概略を Fig. 3 に示し、 $P_T$  および SF の導出理論については以下で述べる。

### 2.3.1 試料数、危険率、試験許容破損確率の関係

振動試験における合格判定基準、すなわち、

市場破損確率が市場許容値以下であると判断する基準として、「試験終了後すべての試料に異状なし」を設定すると、その合格判定基準を満たしているにもかかわらず、市場破損確率が市場許容値を超えてしまう確率、すなわち、合否判定の危険率  $R$  は次式により算出できる。

$$R = (1 - P_T)^N \quad (11)$$

上式により、試験担当者が試料数と危険率を決定するだけで試験許容破損確率が算出できる。

### 2.3.2 市場許容破損確率からの安全係数の導出

供試品耐久性の確率分布がワイブル分布であると仮定すると、変動係数  $\eta$ 、市場許容破損確率  $P_M$ 、および試験許容破損確率  $P_T$  は式(12)、式(13)、式(14)により表現される。ただし、 $\alpha_w$  および  $\beta_w$  はワイブル分布のパラメータであり、それぞれ形状母数および尺度母数である。

$$\eta = \left[ \frac{\Gamma \left( 1 + \frac{2}{\alpha_w} \right)^{-1}}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{\alpha_w} \right)} \right]^{1.2} \quad (12)$$

$$P_M = 1 - \exp \left\{ - (X_M / \beta_w)^{\alpha_w} \right\} \quad (13)$$

$$P_T = 1 - \exp \left\{ - (X_T / \beta_w)^{\alpha_w} \right\} \quad (14)$$

また、安全係数 SF は市場蓄積疲労  $X_M$  と試験蓄積疲労  $X_T$  により次式で定義する。

$$SF = X_T / X_M \quad (15)$$

以上の式(12)～式(15)において、 $\eta$ 、 $P_M$ 、 $P_T$  および  $X_M$  は既知であり、 $\alpha_w$ 、 $\beta_w$ 、 $X_T$  および SF が未知数である。したがって、式の数と未知数の数が一致しておりすべての変数が決定する。

#### 2.4 非線形振動伝達対応型耐久性評価法

従来の振動試験では、供試品を振動台に取り付けた後、既定の条件で振動台を加振し、その後、損傷の有無を確認する方法が一般的であった。しかし、この方法では、振動台から供試品の各部位への振動の伝達が線形であることが前提条件となっており、非線形性が存在する供試品に対しては正当な耐久性評価ができない。この問題点は、振動試験現場で非線形現象、たとえば、ガタ振動における限界入力加速度前後の振動応答の差異<sup>9) 10) 11)</sup>を経験すれば感覚的に容易に理解できる。ここでは、数式を用いてこの問題点の存在を論理的に明らかにする。さらに、その対策として考案した蓄積疲労を用いた評価法について記述する。

##### 2.4.1 線形振動伝達の場合の従来法の妥当性 市場での蓄積疲労と等価となるよう振動台

を加振すると、供試品の各部位に伝わる蓄積疲労が、市場での各部位に伝わる蓄積疲労と等価となることを証明する。まず、市場での振動加速度を  $a_m$ 、振動時間を  $T_M$ 、蓄積疲労を  $X_M$  とし、試験時の振動台の加速度を  $a_T$ 、加振時間を  $T_T$ 、蓄積疲労を  $X_T$  とすると、蓄積疲労の定義より式(16)、式(17)が成立し、振動試験の条件  $a_T$  および  $T_T$  は式(15)' が成立するように決定される。

$$X_M = T_M \times a_m^{\alpha} \quad (16)$$

$$X_T = T_T \times a_T^{\alpha} \quad (17)$$

$$X_T = SF \times X_M \quad (15)'$$

一方、各部位  $i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) の市場蓄積疲労  $X_{Mi}$  および試験蓄積疲労  $X_{Ti}$  は振動伝達率  $\lambda_i$  により次式で表される。

$$X_{Mi} = T_M \times (\lambda_i \times a_m)^{\alpha} \quad (18)$$

$$X_{Ti} = T_T \times (\lambda_i \times a_T)^{\alpha} \quad (19)$$

式(18)および式(19)にそれぞれ式(16)および式(17)を代入して整理すると、

$$X_{Mi} = \lambda_i^{\alpha} \times X_M \quad (20)$$

$$X_{Ti} = \lambda_i^{\alpha} \times X_T \quad (21)$$

となる。式(15)'を用いて式(20)、式(21)を整理し、 $X_M$  と  $X_T$  を消去すると、

$$X_{Ti} = SF \times X_{Mi} \quad (22)$$

となる。式(15)'と比較することにより、各部位についても試験の等価性が保たれていることがわかる。

##### 2.4.2 非線形振動伝達の場合の従来法での問題点

振動伝達に非線形性が存在する場合、その定義より、振動伝達率  $\lambda_i$  は入力振動加速度に対して一定の値とはならない。すなわち、式(20)の  $\lambda_i$  と式(21)の  $\lambda_i$  は異なる値となる。その結果、式(22)は成立しないことになる。このことは、市場蓄積疲労に対して適切な安全係数を

乗じた負荷が試験で課せられないことを意味し、誤った評価結果が導かれる可能性がある。

#### 2.4.3 非線形振動伝達対応型耐久性評価法

市場での $\lambda_i$ と試験での $\lambda_i$ の差異が原因となり、評価精度の低下が引き起こされる。その対策として、供試品の各部位にセンサーを貼付し、 $\lambda_i$ を含んだ振動応答を直接計測することにより、各部位の蓄積疲労を算出する。そして、すべての部位*i*に対して、

$$X_{Ti} \geq SF \times X_{Mi} \quad (23)$$

が成立するまで試験を継続し、試験終了後、損傷の有無を確認する。ここでは、上記の方法を非線形振動伝達対応型耐久性評価法と呼ぶことにする。これにより、市場での $\lambda_i$ と試験での $\lambda_i$ の差異が振動応答に織り込まれて蓄積疲労として評価され、非線形による評価精度の低下が回避できる。

#### 2.5 試験時間と許容増幅率の関係

供試品各部位の蓄積疲労が試験蓄積疲労となるように振動試験を実施することにより、非線形性に由来する試験精度の低下は回避できるが、S-N 曲線を用いた試験時間短縮による精度低下への対策は講じていない。通常、試験時間を現実的な長さに短縮するため、疲労曲線（S-N 曲線）に基づき入力振動加速度を増幅させる。しかし、その増幅率が高ければ試験精度の低下要因となってしまう。そこで、許容増幅率を設定し、増幅率が許容値を超えない範囲で試験時間が自由に設定でき、加振条件が自動的に導出されるようにする。ただし、増幅率は、輸送シナリオで生じる最大加速度（あるいは最大 RMS 値）に対する試験で生じる応答の最大値（あるいは最大 RMS 値）の割合と定義する。たとえば、試

験時間を極端に短くしようとした場合、入力振動の加速度は大きくなり、その結果、増幅率が許容値を超える。この場合、増幅率が許容範囲内となるように入力振動が自動制御され、最短の試験時間が導出される。このとき試験時間は試験蓄積疲労を蓄積疲労速度で除した値とする。

#### 2.6 蓄積疲労速度の変化による損傷発生の推定

一般に、振動試験終了後、損傷の有無を確認するため、損傷が見出された場合、その損傷がいつ発生したのか、すなわち、蓄積疲労がどのレベルに達した時点で発生したのか判断できない。そこで、損傷発生時点の蓄積疲労を推定するため、各部位に取り付けられたセンサーによる振動応答モニタリングにより振動伝達特性あるいは蓄積疲労速度の変化を監視することにする。振動伝達特性の変化は、振動台から各部位への振動伝達経路に何らかの変化が生じたために起きる現象であり、その変化が振動伝達経路の一部の破損を意味する場合もある。また、蓄積疲労速度が増加すれば、その後、損傷が発生する可能性が高まる。

### 3. システムの構成および基本手順

#### 3.1 システムの構成

従来式の動電型振動試験装置は、Fig. 4 に示すように加振機、振動台、制御装置で構成されているのが一般的である。振動台に取り付けられたセンサーにより計測されたデータは制御装置に伝送され、振動台の振動が設定された加振条件となるように自動制御される。一方、ここで提案するシステムの一例は、



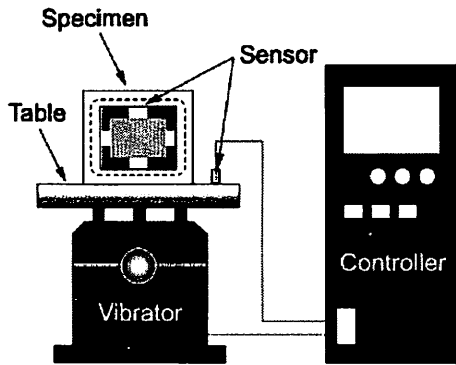


Fig. 4 Components of the present vibration test system.

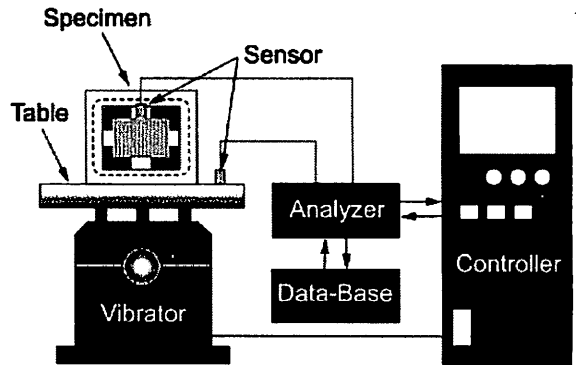


Fig. 5 Components of the proposed vibration test system.

Fig. 5 に示すように従来式と同じ加振機、振動台、制御装置に加え、解析装置とデータベースで構成され、供試品の代表的な部位にセンサーを貼付し、計測された振動応答が解析装置に伝送される。解析装置では、計測データならびにデータベースに基づく加振条件の計算が行われ、制御装置にその加振条件を伝送する仕組みになっている。その他、解析装置では計測データのモニタリングも行われ、蓄積疲労速度の変化などの条件が満たされると試験担当者へのアラームが発信され、そのときの振動条件などが自動的に記録されるようになっている。

### 3.2 試験の基本手順

ここで提案する試験は、試験仕様の設定、予備試験、本試験の三段階に分かれ、各段階での基本的な手順を以下に示す。

#### 3.2.1 試験仕様の設定

(1) 輸送シナリオの作成 予めデータベース上に作成したいくつかの輸送シナリオの中から、対象とする供試品の要件に最も近い輸送シナリオを選択する。ただし、輸送シナリオを構成するサブシナリオの追加・修正も可能であり、さらに、独自で計測した

輸送振動データをデータベースにサブシナリオとして追加し利用することができる。

(2) 試験要件値の設定 市場許容破損確率、製品耐久性の変動係数、試料数、危険率を入力（あるいは選択）すると、安全係数、試験許容破損確率が算出される。

#### 3.2.2 予備試験

(1) 振動応答の計測

供試品の主要部位にセンサーを貼付し、市場で想定されるすべての振動（サブシナリオ）に対する応答波を計測する。それぞれの PSD、蓄積疲労速度、蓄積疲労を算出し、解析・検討用のデータとして記録しておく。

(2) 市場蓄積疲労の算出

各サブシナリオに対する蓄積疲労に基づき、輸送シナリオの論理演算式にしたがって市場蓄積疲労を算出する。

(3) 試験蓄積疲労の算出

市場蓄積疲労に安全係数を乗じ試験蓄積疲労を算出する。

#### 3.2.2 本試験

(1) 試験時間と許容増幅率の設定

試験業務の効率も考慮の上、希望試験時間を設定する。一方、試験時間短縮により試験精度が大幅に低下しないよう許容増幅

率も設定しておく。

## (2) 入力振動の決定

設定試験時間で試験が終了するように入力振動を自動制御により調整し、そのときの増幅率が許容値を超えないことを確認する。ただし、増幅率が許容値を超える場合、許容範囲内となるように入力振動が自動制御される。この場合、各部位の必要試験時間は試験蓄積疲労の蓄積疲労速度に対する商として算出される。すべての部位について必要時間加振されるよう、その最大値を最終的な試験時間とする。試験担当者が試験時間の最終確認を行うことにより入力振動が最終的に決定される。決定した加振条件および増幅率を記録しておく。

## (3) 蓄積疲労速度のモニタリング

各部位の蓄積疲労速度をモニタリングし、設定値よりも大幅に変化した場合、その時刻（経過時間）、ならびに、その時点の蓄積疲労、応答波、PSD を記録する。

## (4) 試験の終了

設定した試験時間が経過した時点で試験終了となり、すべての部位について最終的な蓄積疲労、応答波、PSD、蓄積疲労速度を記録する。そして、供試品の損傷の有無について確認した後、最終的な合否判定を下す。

## 3.3 試験報告書への必要記載事項

通常、試験結果は報告書としてまとめられ、製品出荷を承認する資料として用いられる。そして、その後も保管され、破損事故発生時や試験条件見直し時の参考資料として活用される。したがって、第三者が報告書を見て、客観的に試験方法の妥当性が判断でき、かつ、その結果から安全性に関する保証レベルが理

解できる必要がある。しかし、現状の試験報告書では、基本データとして、加振時間と振動台の PSD、損傷の有無が記されているだけの場合が多く、第三者がその結果に基づき、破損事故発生の原因分析や、試験条件見直しの判断基準とすることは難しい。たとえば、現在の輸送ルートに対してその試験条件が妥当な厳しさなのか、また、安全性はどのレベルで保証されているのか、について判断できない。そこで、提案法では、従来どおりの基本データの記載に加え、試験条件の導出根拠となる輸送シナリオや市場許容破損確率などを記載する。また、供試品各部位の各サブシナリオに対する振動応答、PSD、蓄積疲労速度、蓄積疲労などを解析・検討用データとして記載する。これにより、破損事故発生時の原因分析、包装仕様の変更時の改良指針の検討などにデータが活用できる。以下、試験報告書へ記載可能な事項を整理する。

### 3.3.1 基本データ

「入力振動パワースペクトル密度 (PSD)」「加振時間」「破損発生の有無」、「(破損発生時) 破損部位および破損の状況」を報告書に記載する。以上は従来の報告書と同じ書式であり、これまでに蓄積された試験データとの比較が可能である。

### 3.3.2 試験条件導出根拠

設定した輸送シナリオを構成する全サブシナリオおよびその構造について記載する。また、安全保証のレベルを表す「市場許容破損確率」「安全係数」、そして、合否判定に関する「危険率」について記載する。さらに、安全係数の導出に用いた「製品耐久性に関する変動係数」「試験許容破損確率」も記載する。また、試験許容破損確率の導出に用いた「試

料数]、蓄積疲労の算出に必要な「加速係数」、試験時間短縮の限界を規定する「許容増幅率」についても記載しておく。

### 3.3.3 解析・検討用データ

本試験終了時点の各部位の「蓄積疲労」と「試験蓄積疲労」を記載する。試験蓄積疲労は試験で供試品に負荷する必要最小な蓄積疲労であり、実際に負荷した蓄積疲労との差異が確認できる。この差異は振動伝達の非線形性に由来し、その強弱を意味する。また、試験蓄積疲労よりも大きな蓄積疲労が負荷された部位に関しては、設定以上の安全係数が設定されたことになり、その部位に損傷がない場合、設定以上の高い安全性水準が保障される。さらに、サブシナリオについての各部位の振動応答、PSD、蓄積疲労速度、蓄積疲労を記載する。これらのデータは、輸送経路の見直しや、包装仕様の変更指針などの参考データとして活用できる。また、蓄積疲労速度の大きな変化が記録された場合、その時点の「蓄積疲労」「蓄積疲労速度」を記載しておく。これにより、当該蓄積疲労を超えると、その振動伝達経路に変化が生じ、蓄積疲労速度が増加する場合はそれ以降損傷が発生しやすくなることがわかる。

## 4. 結論

新機能を搭載した高精度振動試験システムの開発をめざし、非線形対応型の蓄積疲労による評価法、論理演算式で表現された輸送シナリオ、市場許容破損確率に応じた安全係数算出法、許容増幅率を考慮した試験条件自動導出法、ならびに蓄積疲労速度モニタリングによる破損発生時点の推定法を提案した。さ

らに、それらの提案法を採用した新システムの一例として、その構成および手順について例示した。最後に、新システムにより作成できる試験報告書の記載事項について整理することにより、従来法に比べて評価精度が向上する可能性を示しただけでなく、第三者から見ると試験条件の導出根拠がわかりやすくなり、かつ、振動耐久性に関する解析・検討用のデータが取得できることを示した。

### <参考文献>

- 1) JIS Z 0232 包装貨物－振動試験方法
- 2) ASTM D 4728-01 Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers
- 3) 長谷川、包装学会誌、13 (2)、71 (2004)
- 4) 阿部忠嗣、包装学会誌、13 (2)、91 (2004)
- 5) 河野澄夫、岩元陸夫、食糧－その科学と技術－、28、1 (1989)
- 6) 中嶋隆勝、津田和城、寺岸義春、高田利夫、(大阪府)、特願2003-424895、特開2005-181195
- 7) 中嶋隆勝、津田和城、酒井善治、上野和良、白星政和、川田浩二、山内佳門、(大阪府、IMV株式会社)、特願2006-116890
- 8) たとえば、市川昌弘、構造信頼性工学、海文堂出版、p.96 (1988)
- 9) 津田和城、中嶋隆勝、包装学会誌、14 (1)、35 (2005)
- 10) 津田和城、中嶋隆勝、包装学会誌、14 (3)、181 (2005)
- 11) 津田和城、中嶋隆勝、斎藤勝彦、日本航海学会論文集、(114)、201 (2005)

(原稿受付2006年7月18日)

(審査受理2006年9月27日)