

技術報告~~~~~

鉄道およびトラックが複合する輸送環境における ランダム振動試験のための加速度パワースペクトル密度算出方法

川口 和晃*

Calculation Method of Acceleration Power Spectral Density for Random Vibration Test in Composite Transport System of Truck and Railway

Kazuaki KAWAGUCHI*

JIS Z 0232:2020 包装貨物・振動試験方法によると、振動試験で用いる試験条件（加速度パワースペクトル密度、PSD）は、実輸送データに基づくことが望ましいとされている。これまでに筆者は、すでに計測された多数のトラックおよび鉄道の実輸送振動データをもとにして試験条件を設定する方法を提案した。これにより、振動データを持たない場合でも、実輸送データに基づいた PSD が得られる。しかしながら、本手法では、トラック輸送、鉄道輸送が複合する場合の試験条件の算出は言及されていなかった。

そこで本報告では、一連の輸送過程の中でトラック輸送と鉄道輸送が複合して発生する場合の試験 PSD を、テーラリング手法を応用することで算出する方法を検討した。

Power Spectrum Density, PSD, which is delivered from actual transport vibration data is recommended to be applied for the random vibration test according to JIS Z 0232:2020 Package-Complete, filled transport packages and unit loads-method of vibration test. Consequently, in our previous study, we proposed a new calculation method for PSD. This method utilizes multiple sets of actual vibration data which have already been collected from truck and railway transport. The aim of this method is to generate PSD from actual vibration data for random vibration test, even in the absence of actual truck or railway vibration data. However, this method couldn't calculate PSD for a composite system of truck and railway.

In this paper, a new calculation method of PSD that combines the characteristics of actual vibration data between truck and railway is considered to apply using tailoring method with customization.

キーワード： 包装設計、振動試験、加速度パワースペクトル密度、トラック輸送、鉄道輸送

Keywords： Package Design, Vibration Test, Acceleration Power Spectral Density, Truck Transport, Railway Transport

*神栄テクノロジー株式会社, SHINYEI TECHNOLOGY CO.LTD. 〒650-0047 神戸市中央区港島 6-5-2
6-5-2, Minatojima-Minamimachi, Chuo-ku, Kobe, 650-0047, JAPAN
TEL:078-304-6795, FAX:078-302-1225, Email:k-kawaguchi@stc.shinyei.co.jp

1. 緒言

JIS Z 0232:2020 包装貨物—振動試験方法によると、包装貨物ランダム振動試験の加速度パワースペクトル密度（以降、試験 PSD）は、実輸送データから得られた条件で試験することが望ましいとされている。しかしながら、実輸送データの収集は容易ではない。

これまで筆者は、実輸送データ収集が困難な場合であっても、実輸送データにもとづいた試験 PSD を容易に設定できる方法¹⁾（以降、既報）を提案した。そこでは日本国内で計測された多数の実測 PSD から、3 段階の振動強度に区分した PSD（以降、基本 PSD）を設定し、これらをもとに実輸送時間と製品の疲労特性および振動試験時間などを使用者が任意に設定するだけで、容易に実輸送データにもとづく試験 PSD を求めることができた。しかしながら、この方法はトラック輸送、鉄道輸送における単一輸送モードの試験 PSD は得られるが、鉄道輸送、トラック輸送が複合する場合には対応していなかった。

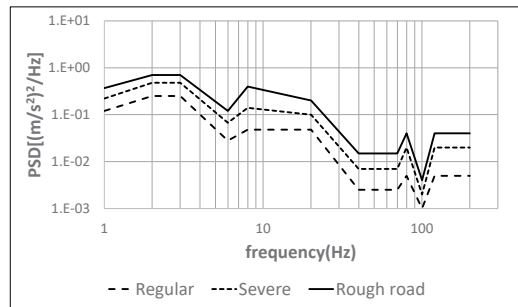
ここでは、これら輸送モードが複合する場合における試験 PSD 設定方法について検討する。

2. トラック輸送と鉄道輸送が複合する場合のパワースペクトル密度

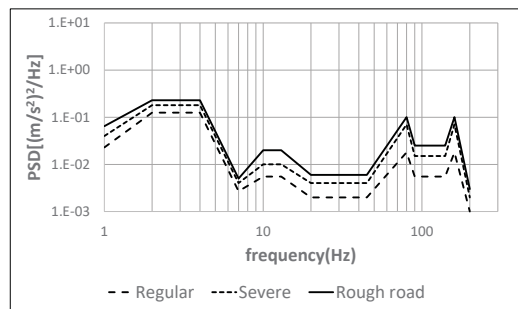
2.1 複合輸送による試験 PSD の考え方

ここでは、トラック、鉄道が複合する場合の試験 PSD の基本的考え方について述べる。

既報では、トラック輸送、鉄道輸送の複数の実測振動データによる PSD から、試験強度の異なる 3 段階の基本 PSD を定義したうえで、試験 PSD を求める手法を提案した。3 段階の



(a)



(b)

Fig.1 3types of standard PSD on vertical direction of each transport, (a)Truck, (b)Railway

振動強度の区分は、平均的な振動強度となる標準 PSD、比較的厳しい振動を意味する強振 PSD、最も振動強度が厳しい悪路 PSD で構成されている。基本 PSD は方向別に異なる条件が存在するが、ここでは垂直方向の基本 PSD を Fig.1 に例示する。水平成分の基本 PSD は既報を参照のこと。

複合輸送の試験 PSD 設定においても、これら基本 PSD の利用を考える。このとき最大で 6 種類（輸送モード 2 種×振動強度 3 段階）の試験 PSD を用いた振動試験が想定されるが、試験運用が煩雑になることが想定されるため、振動強度別に鉄道とトラックの試験 PSD を 1

Table1 Variable symbols of each intensity of PSD and time parameter

Intensity	Standard PSD $PSD_{std,ij}$		Modified PSD $PSD_{acc,ij}$		Test PSD	Actual transport time, $T_{r,ij}$		Vibration test time $T_{t,ij}$		
	Truck	Rail	Truck	Rail	Test	Truck	Rail	Truck	Rail	Total
Average	$PSD_{std,ta}$	$PSD_{std,ra}$	$PSD_{acc,ta}$	$PSD_{acc,ra}$	$PSD_{test,a}$	$T_{r,ta}$	$T_{r,ra}$	$T_{t,ta}$	$T_{t,ra}$	$T_{t,a}$
Severe	$PSD_{std,tb}$	$PSD_{std,rb}$	$PSD_{acc,tb}$	$PSD_{acc,rb}$	$PSD_{test,b}$	$T_{r,tb}$	$T_{r,rb}$	$T_{t,tb}$	$T_{t,rb}$	$T_{t,b}$
Rough Road	$PSD_{std,tc}$	$PSD_{std,rc}$	$PSD_{acc,tc}$	$PSD_{acc,rc}$	$PSD_{test,c}$	$T_{r,tc}$	$T_{r,rc}$	$T_{t,tc}$	$T_{t,rc}$	$T_{t,c}$

本に合成する。これにより、試験に用いる試験 PSD は振動強度 3 種類のみに簡易化される。

ここで、複数の輸送データから 1 つの PSD を生成する方法の一つとしてテーラリング手法²⁾³⁾が用いられており、その大まかな流れは、次のようになる。まず、複数のシナリオ（輸送車両や走行速度、貨物積載状況などが明確になった実際の輸送条件）で実測された振動データからそれぞれ PSD を算出する。次に全シナリオのなかから加速度実効値（以降、実効値）が最大となるシナリオを特定する。その後、それ以外のシナリオの実効値を、特定したシナリオの実効値になるよう PSD を増加させる（式(1)参照）。このとき、増加されたシナリオの試験時間が短縮される。その後、シナリオの全 PSD を包絡させたプロファイルが試験 PSD となる。

試験時間は、各シナリオの短縮後の時間の合計値となるが、時間短縮が不足する（振動試験時間が長すぎる）場合には、さらなる時間短縮が行われる場合もある。

$$PSD_{acc,x}(f) = PSD_{real,x}(f) \times \left(\frac{G_{rms,x}}{G_{rms,max}} \right)^{-\frac{2}{m}} \dots (1)$$

式中の $PSD_{acc,x}(f)$ はシナリオ x における時間短縮後の PSD、 $PSD_{real,x}$ はシナリオ x における実測 PSD、 f は周波数、 $G_{rms,x}$ はシナリオ x の

実効値、 $G_{rms,max}$ はシナリオ中の最大実効値、 m は製品の加速係数⁴⁾である。

このように一般的なテーラリング手法は、実効値を基準として計算させることから、比較的多くのシナリオがあり、かつその中に相対的に実効値が大きいシナリオが存在する場合には効率的な手法であるが、今回のように計算される PSD の数が少なく、また各条件の実効値に大差がない場合には計算過程が煩雑となる。

そこで本提案では、従来のテーラリング手法を応用し、実効値ではなく、時間情報をもとに試験 PSD を設定する。まず、振動強度別に振動試験時間を設定する。次に、トラックと鉄道輸送にかかる実時間と試験時間およびトラックと鉄道の基本 PSD より、式(2)から時間短縮させた PSD を算出する。その後、これら 2 つの PSD を包絡させ、試験 PSD とする。

$$PSD_{acc,ij}(f) = PSD_{std,ij}(f) \times \left(\frac{T_{t,ij}}{T_{r,ij}} \right)^{-\frac{2}{m}} \dots (2)$$

ここで $PSD_{acc,ij}(f)$ は時間短縮後の PSD、 $PSD_{std,ij}(f)$ は基本 PSD、 $T_{t,ij}$ は実輸送時間、 $T_{r,ij}$ は振動試験時間である。なお、各 PSD および時間の変数記号に含まれる添え字の i, j は、それぞれ輸送モードと振動強度である。トラックは $i=t$ 、鉄道は $i=r$ 、振動強度区分における標準は $j=a$ 、強振は $j=b$ 、悪路は $j=c$ とする。

Table2 Relationship between actual transport time and vibration test time considering with complex transport routes followed in sequence

Intensity	Ratio	Actual Transport Time (h)		Vibration Test Time (h)		
		Truck	Rail	Total	Truck	Rail
Total	$R = a + b + c$	$T_{r,t}$	$T_{r,r}$	T_t		
Standard	a	$T_{r,ta} = \frac{a}{R} \times T_{r,t}$	$T_{r,ra} = \frac{a}{R} \times T_{r,r}$	$T_{t,a} = \frac{a}{R} \times T_{test}$	$T_{t,ta} = \frac{T_{r,ta}}{(T_{r,ta} + T_{r,ra})} T_{t,a}$	$T_{t,ra} = T_{t,a} - T_{t,ta}$
Severe	b	$T_{r,tb} = \frac{b}{R} \times T_{r,t}$	$T_{r,rb} = \frac{b}{R} \times T_{r,r}$	$T_{t,b} = \frac{b}{R} \times T_{test}$	$T_{t,tb} = \frac{T_{r,tb}}{(T_{r,tb} + T_{r,rb})} T_{t,b}$	$T_{t,rb} = T_{t,b} - T_{t,tb}$
Rough road	c	$T_{r,tc} = \frac{c}{R} \times T_{r,t}$	$T_{r,rc} = \frac{c}{R} \times T_{r,r}$	$T_{t,c} = \frac{c}{R} \times T_{test}$	$T_{t,tc} = \frac{T_{r,tc}}{(T_{r,tc} + T_{r,rc})} T_{t,c}$	$T_{t,rc} = T_{t,c} - T_{t,tc}$

また試験 PSD（複数の $PSD_{acc,ij}(f)$ を包絡させた PSD）を $PSD_{test,j}$ とする。これら変数を Table1 に示す。

2.2 複合輸送の基本条件

ここでは、本報告で取り扱う輸送条件について述べる。

実際の貨物輸送経路は、トラック輸送、鉄道輸送が複数条件で様々な複合される。本提案ではこれらのうち、基本的な 2 つの輸送方法を検討対象とする。1 つは、鉄道輸送とトラック輸送の複合一貫輸送（Fig.2 Case1、以降、直列）、他方は複合一貫輸送とトラック輸送のみの両方が考えられる輸送（Fig.2 Case2、以降、並列）である。

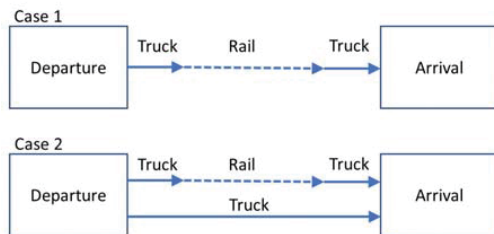


Fig.2 Basic transport method combined with truck and railway

2.3 輸送モードが直列する場合の試験 PSD

ここでは直列輸送（Fig.2 Case1）における試験 PSD の設定方法について考える。

試験 PSD の導出における基本的考え方は 2-1 に示した。ここでは、各振動強度における実輸送時間と試験時間の計算方法を示す。

まず、輸送全体のなかで各振動強度の発生割合（標準、強振、悪路をそれぞれ a 、 b 、 c と定義）を任意に設定し、トラックによる実輸送時間 $T_{r,t}$ と鉄道輸送にかかる実輸送時間 $T_{r,r}$ および振動試験時間 T_t が決まれば、各振動強度に必要な時間（トラック実輸送時間 $T_{r,tj}$ 、鉄道実輸送時間 $T_{r,rj}$ 、振動試験時間 $T_{t,j}$ ）を割り出すことができる。この時点で $T_{t,j}$ はトラックと鉄道の両方を含む合計時間となっているため、トラックの試験時間 $T_{t,tj}$ 、鉄道の試験時間 $T_{t,rj}$ にそれぞれ分解する。 $T_{t,tj}$ は、実輸送時間と振動試験時間の比率が同一であると仮定し、式(3)から求める。 $T_{t,rj}$ は、 $T_{t,j}$ と $T_{t,tj}$ の差分で得られる。これらを踏まえ、各時間にかかる計算式および試験 PSD 導出までの計算ステップを Fig.3、Table2 に各時間の計算式を示す。

$$T_{t,tj} = \frac{T_{r,tj}}{(T_{r,tj} + T_{r,rj})} T_{t,j} \cdots (3)$$

上記を反映した具体的な試験 PSD の計算手順を以下に示す。

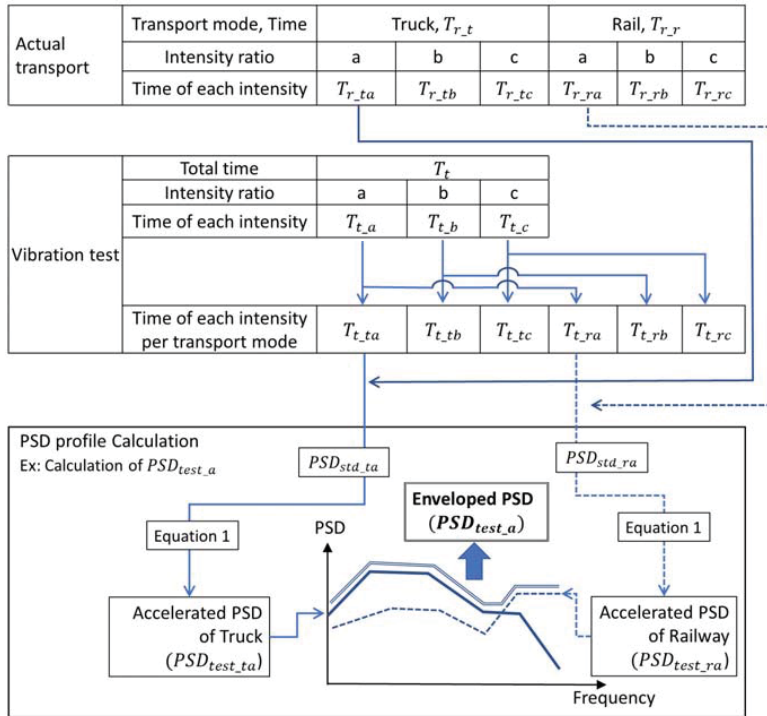


Fig.3 Calculation flow of PSD considering sequential transport of truck and railway

① 振動強度別の時間設定

輸送全体における振動強度毎の発生割合 (a, b, c) を任意に設定し、トラックの実輸送時間 $T_{r,t}$ から、各振動強度（標準、強振、悪路）の実輸送時間 $T_{r,tj}$ を計算する。同様に発生割合と鉄道輸送の総実輸送時間 $T_{r,r}$ から、振動強度毎の実輸送時間 $T_{r,rj}$ をそれぞれ求める。

次に、希望する試験時間 T_t を設定し、 a, b, c から、各振動強度に必要な振動試験時間 $T_{t,j}$ を割り出したのち、トラック、鉄道それぞれの試験時間 $T_{t,ij}$ を計算する。

② 試験 PSD の導出

前項で求めた $T_{r,tj}$ と $T_{t,tj}$ および m とトラック輸送における $PSD_{std,tj}$ （既報参照）

を式(2)に代入し、トラック輸送における振動強度別に $PSD_{acc,tj}(f)$ を求める。同様に、 $T_{r,rj}$ と $T_{t,rj}$ および m と $PSD_{std,rj}$ を式(2)に代入し、鉄道輸送の振動強度別に $PSD_{acc,rj}(f)$ を算出する。各振動強度で算出されたトラックと鉄道の2本のPSDを包絡させることで、 $PSD_{test,j}$ を求める。

③ 振動試験の実施

振動試験では、②で求めた振動強度別の $PSD_{test,j}$ を用い、①で設定した $T_{t,j}$ の時間で加振させる。

2.4 輸送モードが並列する場合の試験 PSD

ここでは並列輸送における試験 PSD の導出方法について考える。

ここでの試験 PSD の考え方は、直列輸送 (Fig.4 Channel A、2-3 と同一) と、トラック

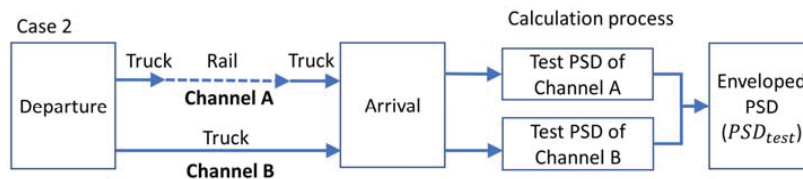


Fig.4 Conceptual process for test PSD by parallel transport channel

輸送単体（Fig.4 Channel B）を想定した試験 PSD をそれぞれ算出したのち、それらを包絡させることで求める。これにより、鉄道およびトラックの PSD から最も厳しい条件となる PSD が得られ、安全な包装設計評価となることが期待される。具体的手順を以下に示す。

① 直列輸送 PSD の算出

2-3 の①②と同様の手順にて、鉄道とトラックが直列する場合の PSD を振動強度ごとに求める。

② トラック輸送 PSD の算出

トラック単体輸送で想定される総輸送時間 T_t を設定し、上記①で設定した振動強度毎の発生割合から、トラック単体輸送における T_{r_tj} を求めたのち、トラック輸送における PSD_{std_tj} および加速係数 m を式(2)に代入し、トラック単体輸送における試験 PSD を振動強度ごとに求める。

③ 試験 PSD の導出

本手順の①と②で得られた振動強度毎の PSD を、それぞれ包絡させることで振動強度別に PSD_{test_j} を求める。

④ 振動試験の実施

振動試験では、上記③で求めた PSD_{test_j} を用い、上記①で設定した T_{tj} でそれぞれ加振させる。

3. 計算例

ここでは直列輸送（Fig.2 の Case1）に相当する場合の試験 PSD の計算例を示す。

与条件として、鉄道、トラック含めた全体の輸送距離を 2000km とし、このうち鉄道輸送距離を 1700km、トラック輸送距離を 300km とする。振動試験時間 T_t は 1h、 m は 4、加振軸は垂直方向のみとし、各輸送モードの振動強度（標準(a)：強振(b)：悪路(c)）における発生割合は 10：4：1 とする。

以上の条件をもとに、2-3 の手順に従い、 PSD_{test_j} を算出する。まず各輸送モードでの実輸送時間を割り出す。鉄道車両の平均走行速度を 68.7km/h⁵⁾ とすると、与条件（輸送距離

Table3 Calculation example of relationship between actual transport time and vibration test time when complex transport routes in sequence

PSD condition	Ratio	Actual Transport Time, T_{r_tj} (h)		Vibration test time, T_{tj} (h)		
		Truck	Rail	Total	Truck	Rail
Total	15	4.29	24.75	1.00		
Standard	10	2.86	16.50	0.67	0.10	0.57
Severe	4	1.14	6.60	0.27	0.04	0.23
Rough road	1	0.29	1.65	0.07	0.01	0.06

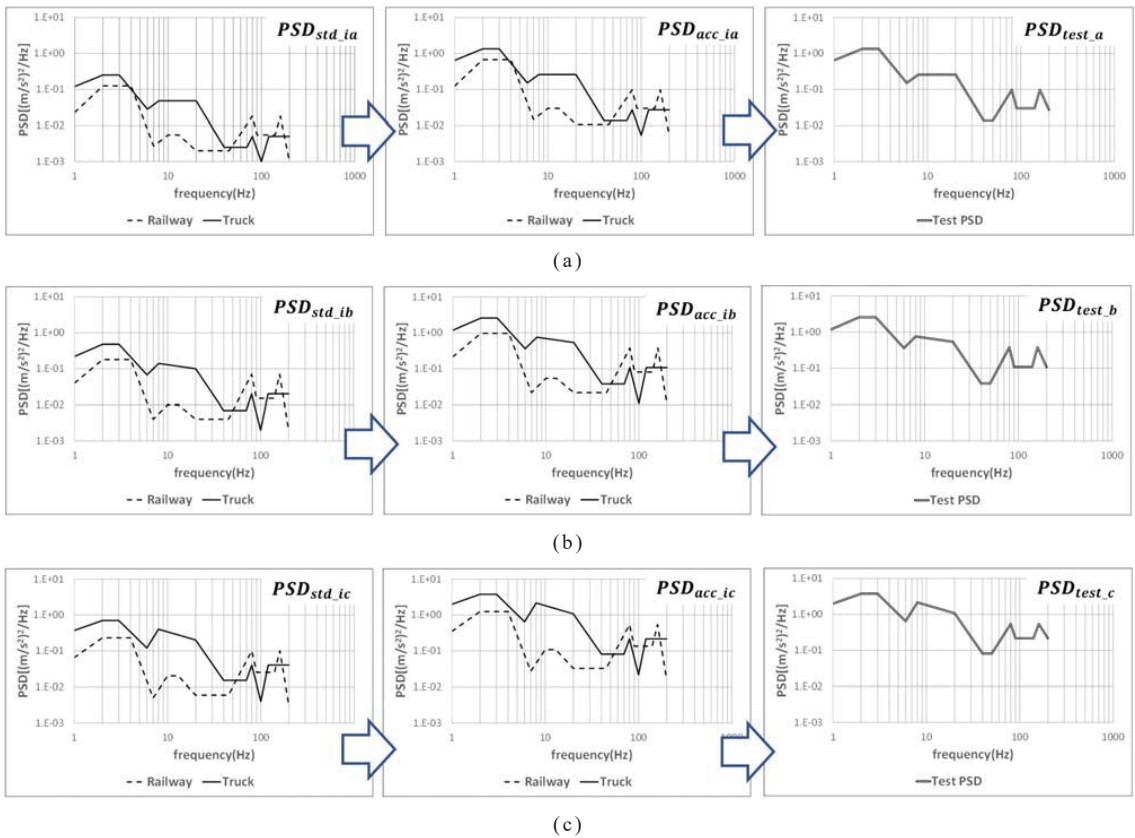


Fig.5 Calculation process for PSD profiles of each vibration intensity sequenced by truck and rail
(a)regular PSD,(b)severe PSD,(c)rough road PSD

1700km) から $T_{r,r}$ は 24.75h と求まる。同様に、トラック平均走行速度を 70km/h とすると、輸送距離 300km より $T_{r,t}$ は 4.29h となる。 T_t は与条件より 1h である。これらより、各振動強度の発生割合を考慮した $T_{r,ij}$ および $T_{t,ij}$ は、それぞれ Table3 のようになる。

次に、鉄道輸送およびトラック輸送の PSD を、振動強度毎に計算する。上記で求めた振動強度別の輸送時間と試験時間、垂直方向の $PSD_{std,ij}$ および m を式(2)に代入することで、各輸送モード別に各振動強度の PSD を算出する。その後 2 本の PSD を包絡させ、 $PSD_{test,j}$ とする。Fig.5 に各振動強度における PSD の計算結果の変遷を示す。

なお、振動試験時間は、 $PSD_{test,a}$ は 0.67h(40min.)、 $PSD_{test,b}$ は 0.27h(16min.)、 $PSD_{test,c}$ は 0.07h(4min.)となる。

5. 結論

本報告では、鉄道輸送とトラック輸送が混在する場合の試験 PSD を設定するための方法について検討した。具体的には従来のテラリング手法を応用し、時間パラメータをもとに基本 PSD を加速させ、それらを包絡することで試験 PSD を求める手順を考案した。

一方で、本提案を用いた実運用にはいくつかの課題が想定される。たとえば、振動試験装置の仕様によっては本提案の計算結果がそ

のまま利用できない状況も考えられる。この場合には、試験現場ごとに試験 PSD の調整が必要となる。また実運用前には本提案で開発された試験 PSD の妥当性評価も必要と考えられる。

最後に、本手法で算出される試験 PSD は、日本国内における複数の実輸送データを基準としているものの、日本国内の全ての輸送環境を反映していないことを念頭に利用する必要があることを付け加えておく。

<参考文献>

- 1) 川口和晃, 輸送条件および振動試験環境に応じた 3 軸加速度パワースペクトル密度の設定方法, 日本包装学会誌, 33(1), p.291 (2024)
- 2) 前田清隆, 高橋昌志, 自動車リチウムイオン電池パックの振動試験法の妥当性検証, 自動車技術会論文集 46(1), p.109 (2015)
- 3) 吉川毅ほか, ランダム振動試験による耐振性評価方法, 北海道立工業試験場報告 No.306, p.119 (2007)
- 4) 津田和城, 振動試験と加速係数, 日本包装学会誌, 18 (2), 160 (2009)
- 5) 吉岡泰亮, モーダルシフト推進の観点から見た日本の鉄道貨物輸送の機能と役割に関する考察, 政策科学, 19(1), p.67, 2011

(原稿受付 2024 年 2 月 27 日)

(採録受理 2024 年 4 月 10 日)