

ランダム振動試験による耐振性能評価方法

吉川 毅, 新井 浩成, 大村 功

Evaluation Method of Vibration Resistance Performance by Random Vibration Test

Takeshi KIKKAWA, Hironari ARAI, Isao OHMURA

キーワード：ランダム振動試験，テーラリング

1 はじめに

製品の使用時や輸送時など、実環境における振動は様々な周波数成分を含んだランダム波または衝撃波である。このため、製品開発における耐振性能評価において、自動車メーカー等の大手企業ならびに宇宙開発機関を中心に、独自の試験条件（任意波形および試験時間）によるランダム振動試験が行われている。

一方で、多くの耐振性能評価試験は依然として正弦波振動試験規格に則って行われているのが現状である。正弦波振動試験はランダム振動試験に比べて簡単かつ安価に実施できることがその大きな理由であるが、実環境では起こらない振動に対して過剰な品質を求める傾向がある。

日本工業規格(JIS)では、包装貨物 - 振動試験方法¹⁾が2004年3月に改正され、「ランダム振動試験を正弦波振動試験に優先して実施することが望ましい」こととされるなど、ランダム振動試験への移行が進められている。但し、試験条件は実環境の測定データを基にするものとされ、厳密に指定されていない。しかし、ランダム振動試験に関する研究²⁾は少なく、実環境を近似した試験条件をどのように設定するかが課題となっている。

本研究では、試験規格の正弦波試験からランダム試験への改正に的確に対応するために、テーラリング(tailoring)による振動試験開発方法に基づいて、実環境の振動測定・解析およびランダム振動試験条件の作成方法について検討を行った。

2 テーラリング

テーラリングは、製品等が使用または輸送される実環境の振動を測定・解析して、その製品に合った振動試験条件を開発することである³⁾。以下にテーラリングの手順を示す。

(1) シナリオ作成

実際の使用環境を幾つかの条件（サブシナリオ）に分け、これらのサブシナリオを組み合わせることで全体の使用条件（シナリオ）を再構成する。

(2) 振動測定

各々のサブシナリオの条件下で実際に振動を測定し、時刻歴波形として振動データを保存する。

(3) 振動解析

保存した各振動波形データを、ランダム振動試験で使用する加速度パワースペクトル密度PSD (Power Spectrum Density) に変換する。PSDは単位周波数 (1Hz) あたりのパワースペクトルであり、単位は $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ である。

(4) データ編集

全てのPSDデータを観察し、PSD形状で各サブシナリオをグループ化する。各サブシナリオを代表するPSDを求め、グループ毎に正規化する。正規化することにより、試験時間短縮すなわち加速化が図られる。

(5) 試験条件作成

正規化した各サブシナリオのPSDを包絡することにより、試験条件PSDを求める。その試験時間は、正規化により求められた各サブシナリオの試験時間の合計とする。

3 自動車輸送環境へのテーラリングの適用

JIS Z 0232 (包装貨物 - 振動試験方法)¹⁾が2004年3月か

事業名：一般試験研究

課題名：実環境を近似するランダム振動試験技術に関する研究

らランダム振動試験の実施を推奨する旨、改正された。この規格が対象とする輸送環境を具体的事例として、前項で述べたテーリングを適用した結果を報告する。なお、JIS Z 0232は垂直方向の試験実施を規定しており、本報においては荷台中央/上下方向(CH3)に相当する。したがって、荷台中央/上下方向[CH3]に関する結果を中心に述べる。

3.1 シナリオ作成

試験車両はライトバン2台(表1および図1)を使用し、輸送シナリオは表2のように、北海道内の主要道路の走行を想定して、札幌~長万部~函館間(320km, 高速道路使用)を設定した。また、サブシナリオに相当する走行条件は、一般舗装路(40km/h, 60km/h)、未舗装路(20km/h, 40km/h)および高速道路(80km/h, 100km/h)の6条件を設定した。

3.2 走行時の振動測定

次に、試験車両の振動測定部位に加速度ピックアップを設置し、表2に示したサブシナリオで走行可能な任意環境下において実際に走行し、振動加速度を測定機器に記録した。なお、サブシナリオの走行条件で走行できれば輸送シナリオ(ここでは札幌~長万部~函館間)で設定したルートを実走する必要はない。

測定時の走行速度は、車両の速度計を使用して所定速度に合わせることにした。図2に測定機器を、図3に測定の様子を、表3および図4に振動測定部位を示す。

また、測定場所を以下に示す。

- ・一般舗装路(40km/h, 60km/h)
国道275号(月形~当別), 国道337号(石狩~銭函), 道道275号(峰延~月形)
- ・非舗装路(20km/h, 40km/h)
石狩川堤防沿い(月形), 他
- ・高速道路(80km/h, 100km/h)
道央自動車道(札幌~三笠)
- ・踏切横断(10~15km/h)
JR発寒駅~琴似駅間の踏切

振動測定時の要点を以下に示す。

- (1) 測定部位を設定する
- (2) 各サブシナリオにつき、複数回の測定を行う
- (3) 1回の測定時間T(s)

$$T \geq \frac{60}{\Delta f} \quad f: \text{周波数分解能(Hz)}$$

- (4) 解析周波数レンジを設定する

(1)に関して、荷台およびタイヤハウジングは内装材を取り除いて加速度ピックアップを設置した。(2)に関して、実環境下の振動測定はデータのバラツキが大きいため、各サブ

表1 試験車両

	車両 A	車両 B
車種	トヨタスプリンターバン 1600cc AT	トヨタサクシードバン 1500cc AT
積載荷重	大人2名 + 100kg	
タイヤ	夏用	スタッドレス



車両 A 車両 B

図1 試験車両

表2 輸送シナリオの設定例

記号	サブシナリオ		走行距離 (km)	走行時間 Ts (h)
	道路状態	走行速度 (km/h)		
R40	一般舗装	40	50	1.250
R60	一般舗装	60	50	0.833
Rough20	非舗装	20	2	0.100
Rough40	非舗装	40	3	0.075
H80	高速	80	115	1.438
H100	高速	100	100	1.000
Railroad Crossing	踏切横断	10~15	—	—
輸送区間 札幌~長万部~函館			計 320	4.696 (4時間42分)
路面状態		乾燥路面		
車両		車種: ライトバン, 積載荷重: 乗員2名 + 100kg		

図2 測定機器



図3 測定の様子(車両Aで非舗装路を走行)

シナリオ毎に10回程度の測定を行い、後述のデータ編集において平均化処理を行った。(3)に関して、今回は測定機器の解析性能上、周波数分解能0.625Hzとして、測定時間は約80秒とした。(4)に関して、解析周波数レンジを500Hzとした。

表3 振動測定部位

部位	測定方向	測定CH
荷台中央	左右	1
	前後	2
	上下	3
デフギヤ上部	上下	4
右タイヤハウジング (室内上部)	左右	5
	前後	6
	上下	7
ダッシュボード	上下	8



荷台中央 (C荷台中央 (CH1~CH3))

※荷台の四隅に合計100kgのウェイトを積載している



デフギヤ上部 (CH4)

右タイヤハウジング
(室内上部, CH5~CH7)



ダッシュボード (CH8)

図4 振動測定部位 (車両A)

3.3 振動波形データの解析

測定した全ての振動波形データをPSDに変換した。PSDを求める際、適切なデータ平均化処理 (パワースペクトル加算平均) を用いた。図5および図6に、車両Aの荷台中央 / 上下方向 (CH3) の振動波形とPSD解析結果を示す。

荷台中央 (CH1~CH3) と右タイヤハウジング (CH5~CH7) の波形データは、各方向ごとにほぼ同傾向を示し、加速度実効値は荷台中央の方がやや大きかった。各サブシナリオ毎に10回程度の測定を実施しており、これら全てのデータにおいて図5、図6に示した解析を行った。また、車両Bの測定データについても同様の解析を行った。

3.4 解析データの編集

3.4.1 グループ化

全てのPSDデータを観察した結果、測定部位ごと、かつ、測定方向ごとに、全てのサブシナリオについてPSD形状が同じ傾向を示すことが分かった。したがって、各測定部位の測定方向ごとに一つのPSD形状にグループ化することとした。なお、サブシナリオの「踏切横断」は走行距離・時間が非常に短く、PSDも非舗装40km/hに包含されることから、後述のデータ編集の対象から除外した。

3.4.2 サブシナリオを代表するPSD

次に、各サブシナリオを代表するPSDrep(f)を求めた。約10回ずつ測定して得られたPSDデータに対して、振動数fごとに平均値μ(f)と標準偏差σ(f)を求め、以下の式でPSDrep(f)を求めた。

$$PSDrep(f) = \mu(f) + 1.2\sigma(f)$$

測定データが正規分布に従うと仮定して、全体の88% (1.2)) を満たす設定とした。なお、測定対象によっては95% (2)) や99% (3)) などを設定しても良い。図7に、荷台中央 / 上下方向 (CH3) の高速道路100km/h時におけるPSDrep(f)を示す。図中、太線のH100_repは代表するPSDrep(f)を、H100_1~H100_13は10回測定した各々のPSDである。

また、図8にサブシナリオを代表するPSDrep(f)の一覧を示す。図中、カッコ内の数値は加速度実効値A_rms (m/s² rms) を示している。

3.4.3 正規化

振動試験を行うためには、サブシナリオごとのPSDrep(f)を正規化して、一つの試験条件PSDにする必要がある。ここでは、最大の加速度実効値 (A_rms_max) に対して、各サブシナリオの加速度実効値 (A_rms_rep) を倍率により正規化を図った。加速度倍率は次式で求めた。

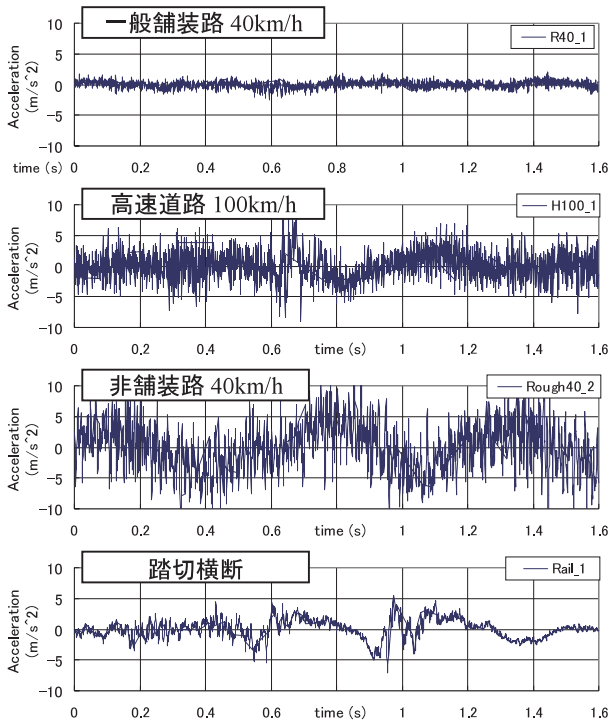
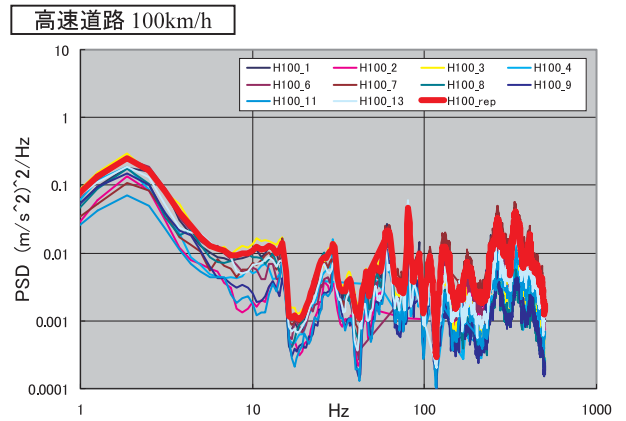
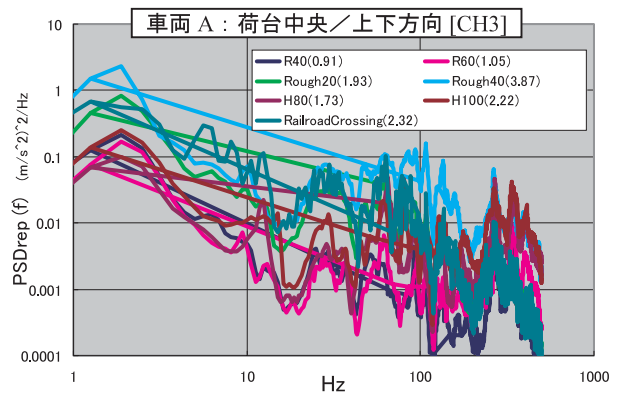


図5 振動波形 (車両 A : 荷台中央 / 上下方向 [CH3])



車両 A : 荷台中央 / 上下方向 [CH3]
図7 高速道路100km/h時を代表するPSDrep(f)



注. カッコ内の数値は加速度実効値(m/s² rms)を示す
図8 サブシナリオを代表するPSDrep(f)の一覧

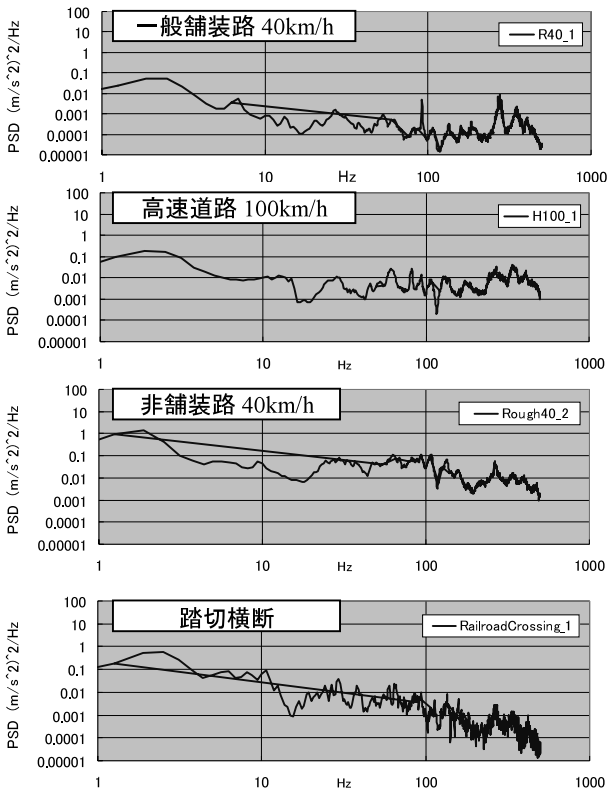


図6 PSD解析結果(車両 A : 荷台中央 / 上下方向 [CH3])

$$\alpha = \frac{A_rms_max}{A_rms_rep}$$

加速度実効値A_rms_repを倍することから、PSDは α^2 倍することになる。各サブシナリオの正規化されたPSDをNorm_PSDとして、Norm_PSDを次式で求めた。

$$Norm_PSD = \alpha^2 \times PSDrep$$

図9に正規化されたNorm_PSDを示す。なお、「踏切横断」は除外した(3.4.1を参照)。図中、サブシナリオ記号(R40, など)の前の数字は加速度倍率を示している。また、太い直線で表されたTest_Aは、全てのNorm_PSDを基に作成された試験条件PSD(後述3.5項を参照)であり、カッコ内は加速度実効値(m/s² rms)を示す。

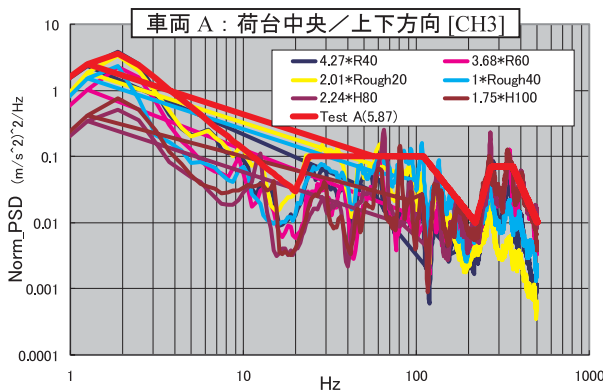


図9 正規化されたNorm_PSD

3.4.4 試験時間

正規化により各サブシナリオの加速度実効値が倍されたため、試験時間短縮すなわち加速の度合を求めた。試験時間 Tt はシナリオ時間 Ts 、時間係数 λ 、加速度倍率 α 、および加速指数 m によって次式で求められる。

$$Tt = \lambda \times Ts$$

$$\alpha^m \lambda = 1$$

加速係数 m は、車載電子機器や電機部品の例では3.5~4.5とされ、対象製品ごとに実験で求めるのが最も良いが、実験が無い場合は3.5を使うとよい、とされている。したがって、今回は $m = 3.5$ を用いた。

表4に、今回作成した輸送シナリオ(表2参照)の正規化の結果を示す。札幌~長万部~函館間のシナリオ時間が4時間42分であるのに対して、正規化を含む本方法を適用することにより、試験時間は20分に短縮されることがわかる。

表4 輸送シナリオの正規化結果

車両A：荷台中央/上下方向[CH3]の場合

サブシナリオ記号	距離 (km)	走行時間 Ts (h)	加速度倍率 α	時間係数 λ	試験時間 Tt (h)
R40	50	1.250	4.27	0.006	0.008
R60	50	0.833	3.68	0.010	0.009
Rough20	2	0.100	2.01	0.087	0.009
Rough40	3	0.075	1.00	1.000	0.075
H80	115	1.438	2.24	0.059	0.085
H100	100	1.000	1.75	0.141	0.141
輸送区間 札幌~長万部 ~函館	320	4.696 (4時間42分)		試験時間 合計	0.327 (19.6分)

3.5 試験条件作成

正規化によって得られ結果をまとめて、ランダム振動試験の試験条件を作成した。試験条件作成の要点を以下に示す。

- ・グループごと、すなわち、測定部位の測定方向ごとに試験条件を作成する。
- ・試験条件PSDは、正規化した各サブシナリオの Norm_PSD を包絡するPSDとする。通常、両対数グラフ上で複数の直線により作成する。
- ・試験条件PSDの加速度実効値 A_{rms} を参考値として求める。
- ・試験時間は、正規化された各サブシナリオの試験時間の合計である(3.4.4を参照)。

図9に作成された試験条件PSDを示す。太い直線で表されたTest_Aが試験条件PSDであり、カッコ内は加速度実効値 ($m/s^2 rms$) を示す。併せて、図10と表5に、各測定部位・方向ごとの試験条件(PSDと試験時間)を列記する。

3.6 考察

テラリングにより、図10および表5に示した様な、各測定部位かつ各測定方向ごとに最適なランダム振動試験条件が得られる。また、PSDの正規化により試験時間短縮、いわゆる加速化が図られる。

ここで、車両によるPSDへの影響について考えてみる。図11に、車両Bの荷台中央/上下方向(CH3)の正規化および試験条件PSDの結果を示す。図中のTest_Bが車両Bの試験条件PSDである。Test_Bを図9のTest_A(車両Aの試験条件PSD)と比較すると、PSD形状が異なり、加速度実効値もTest_Bが $11.42 m/s^2 rms$ で約2倍と大きく、車両Bの試験条件PSDの方が厳しい条件となった。また、最大加速度実効値 A_{rms_max} となるサブシナリオが車両Aは非舗装路40 km/hであるのに対して、車両Bは一般舗装路60 km/hであり、試験時間が車両Aの約7倍である139分を必要とする結果となった(車両Aは20分)。このような試験条件の差異は、車両振動系の違いが大きく影響を及ぼしていると考えられる。

次に、JIS Z 0232の附属書で参考提示されている試験条件と本結果を比較した結果を図12に示す。但し、周波数範囲はJIS Z 0232で示されている3~200Hzを対象とした。図中のTest_A'は車両Aの、Test_B'は車両Bの、JIS Z 0232は当該規格の試験条件PSDを示す。カッコ内の数値は加速度実効値である。なお、JIS規格は加速度実効値を $5.8 m/s^2 rms$ 、推奨最低試験時間を30分としているが、輸送車両、輸送距離および試験時間の詳細は明示されておらず、あくまで参考値である。本図から、3つの試験条件共に同様のPSD形状と加速度実効値を示していると言える。一方で、200~500Hzの周波数領域では車両Aと車両Bの特徴が現れている。試験時間の違いは、設定した輸送シナリオに対する車両振動系の影響によるものと思われる。

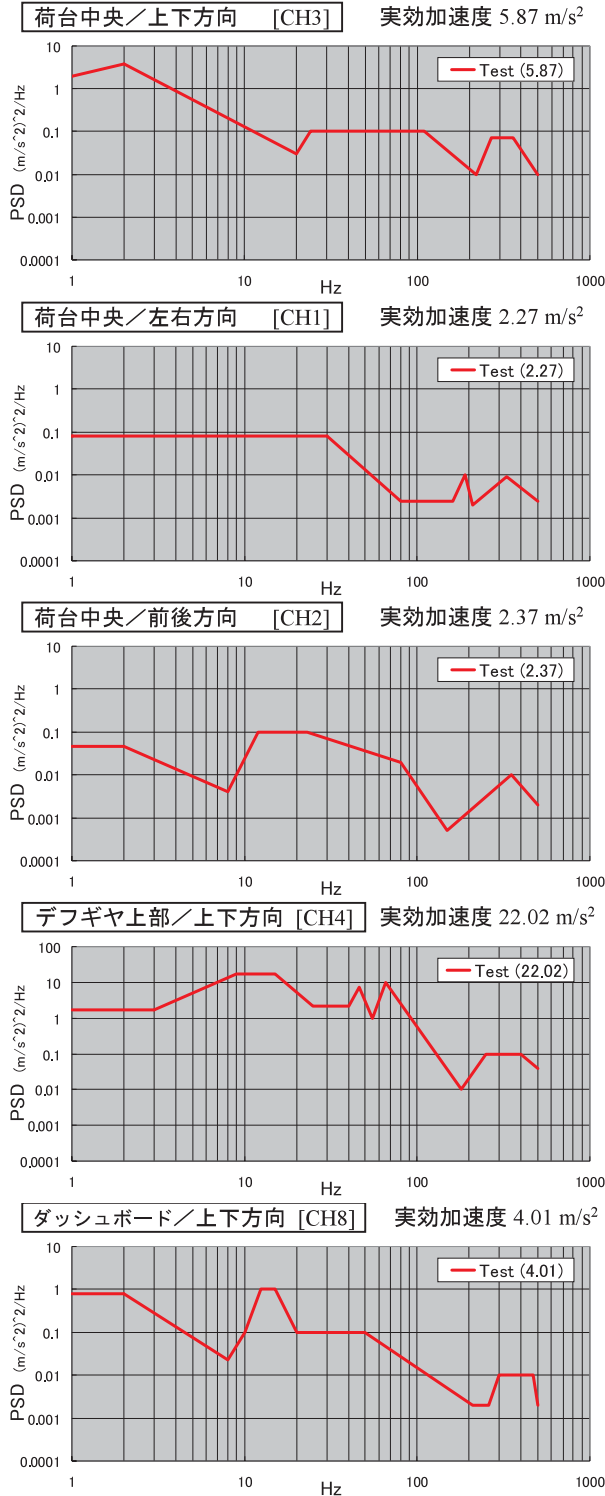
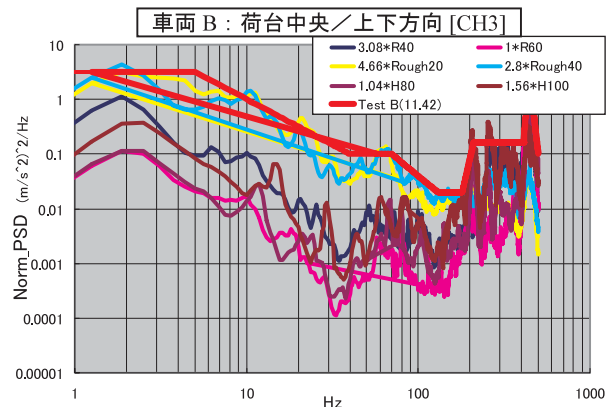


図10 試験条件PSD (車両Aの各部位・方向ごと)

表5 試験条件 (車両Aの各部位・方向ごと)

荷台中央					
上下		左右		前後	
周波数 Hz	PSD (m/s^2) ² /Hz	周波数 Hz	PSD (m/s^2) ² /Hz	周波数 Hz	PSD (m/s^2) ² /Hz
1	2	1	0.08	1	0.047
2	3.83	30	0.08	2	0.047
20	0.03	80	0.0025	8	0.004
24	0.1	160	0.0025	12	0.1
110	0.1	190	0.01	23	0.1
220	0.01	210	0.002	80	0.02
270	0.07	330	0.009	150	0.0005
360	0.07	500	0.0025	350	0.01
500	0.01	—	—	500	0.002
加速度 実効値	5.87 m/s^2 rms	加速度 実効値	2.27 m/s^2 rms	加速度 実効値	2.37 m/s^2 rms
試験時間	19.6分	試験時間	16.7分	試験時間	9.2分

デフギヤ上部		ダッシュボード	
上下		上下	
周波数 Hz	PSD (m/s^2) ² /Hz	周波数 Hz	PSD (m/s^2) ² /Hz
1	1.73	1	0.8
3	1.73	2	0.8
9	17	8	0.023
15	17	10	0.1
25	2.1	12.5	1
40	2.1	15	1
46	7.2	20	0.1
55	1	50	0.1
66	10	210	0.002
180	0.01	260	0.002
250	0.1	300	0.01
400	0.1	470	0.01
500	0.04	500	0.002
加速度 実効値	22.02 m/s^2 rms	加速度 実効値	4.01 m/s^2 rms
試験時間	8.6分	試験時間	11.5分



加速度実効値: $11.42 m/s^2$ rms 試験時間: 139.4分

図11 車両Bの正規化および試験条件PSD

これらの結果から、製品等の使用環境が特定される場合に、テラリングによって最適な試験条件を作成できることが示された。一方で、輸送環境等のように車両、道路状況、走行距離などの環境条件が多岐にわたる場合は、多くのサブシナリオを設定して測定、解析および編集を行ってデータ蓄積を図り、これらを網羅した汎用的な試験条件を作成する必要がある。

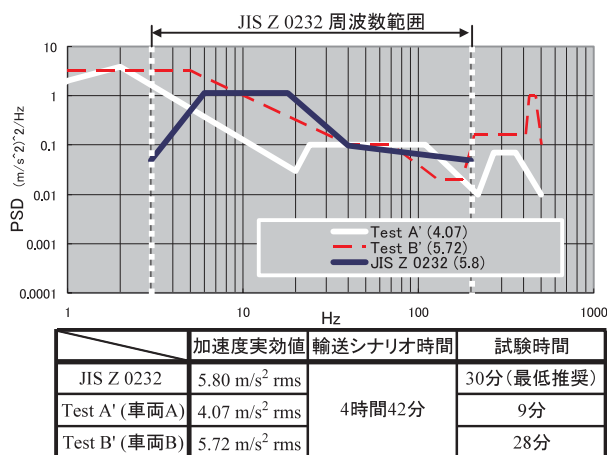


図12 JIS Z 0232 規格との比較 (垂直方向)

4 まとめ

ランダム振動試験を実施するための試験条件作成方法として、テラリングの検討を行った。ここでは、自動車の輸送環境を具体的事例としてテラリングの適用を試みた。

試験車両や走行条件などのサブシナリオと、札幌～函館間の輸送シナリオを設定し、サブシナリオに相当する走行時の振動状態を測定した。これらの測定データをPSDに変換してグループ化し、正規化を図ることによって、ランダム振動試験条件 (PSDおよび試験時間) を作成した。

また、本結果をJIS Z 0232 (包装貨物 - 振動試験方法) で参考提示されている試験条件と比較して、その妥当性と課題を示した。

本研究により、テラリングにより振動試験条件を作成する方法について技術蓄積を図った。今後、本研究の成果を利用して、製品の信頼性向上に対する取り組みを促進・支援していく。

謝辞

研究の遂行にあたり、IMV株式会社の酒井善治様にはランダム振動試験の現状およびテラリングに関する多大な助言を賜りました。ここに心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 包装貨物 - 振動試験方法, JIS Z 0232-1994
- 2) 包装貨物 - 振動試験方法, JIS Z 0232 : 2004
- 3) 中部エレクトロニクス振興会技術委員会第一分科会：実装印刷配線板信頼性に関する研究 (第四報) - 振動に関する研究 -, 中部エレクトロニクス振興会研究報告書, pp104, (1991)
- 4) 名古屋市工業研究所・中部エレクトロニクス振興会：実験報告書 (ランダム振動試験に関する研究), 中部エレクトロニクス振興会研究報告書, pp29, (1995)
- 5) 2006年「振動工学の基礎」と「振動試験」セミナー, IMV株式会社, pp17, (2006)