

大変位振動試験規格とその対応について

国際計測器株式会社
第2事業本部 深田 修

1. はじめに

本文は2020年2月17日に公益社団法人日本包装技術協会 輸送包装懇話会に於いて講演した内容を文書化したものである。

ISO13355-2001は2016年にISO13355-2016へと改訂されランダム波試験の最小周波数は2Hzからに変更された。それにともないJIS Z0232-2001—包装貨物振動試験規格は2020年2月20日に改訂され2020年版となりISO13355-2016に準拠した。またASTM D4169も2016年に改訂されて低周波領域における振動レベルは旧版に比べて高くなった。こうした振動試験規格の低周波傾向は、振動試験における振動振幅が大きくなることにつながり従来型の振動試験機では対応が困難になることが推測される。本文ではこうした振動試験規格におけるランダム振動試験の低周波数化が振動試験にどのような影響をもたらすかを解説し、またそれに対応した振動試験装置はどのようなものが適しているかを述べる。

2. 加速度、振幅、周波数と実効加速度について

輸送振動試験規格の低周波数化にともなう振動試験装置の要求仕様を記述する前に加速度、振幅、周波数の関係と実効加速度がどのような意味を持つかあらためて考察する。

図1は振動の変位、周波数、速度、加速度を示す振動線図である。仮に10Hzで1Gの正弦波振動試験を行うと、片振幅で約2.5mmの振幅が必要となる。これを10Hzより低周波数の1Hzで1Gの試験を行うと、実に約250mmの片振幅が必要となり、周波数が1/10になると振幅は約100倍必要になることがわかる。

実効加速度は全ての振動試験規格のランダム振動試験仕様に記載されており、この数値から様々な要素が読み取れる。図2はPSDランダム振動試験のプロファイルの例である。実効加速度の定義はJIS Z0232 付属書1より以下の2式(1)(2)で示される。

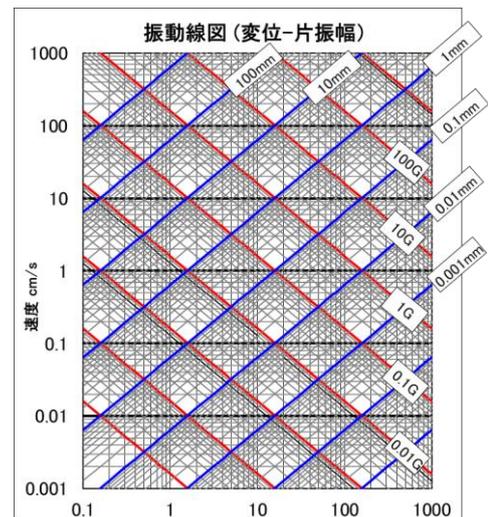


図1

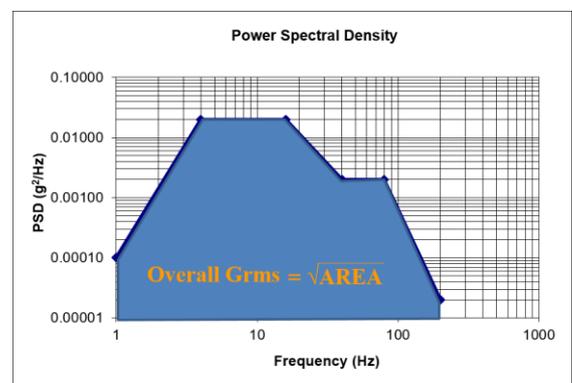


図2

(1)

$$\text{Grms} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \varphi(f) df}$$

ただし

f_1 : 下限振動数

f_2 : 上限振動数

(2)

$$\text{Grms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} A^2(t) dt}$$

ただし

t_1 : 計算対象データの始点

t_2 : 計算対象データの終点

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (A_i)^2}{T}}$$

(3)

$$\sigma(\text{標準偏差}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - a)^2}{n}}$$

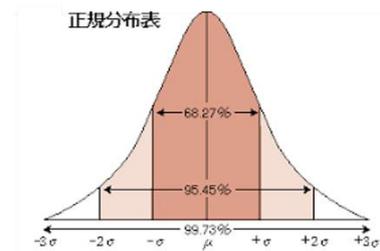
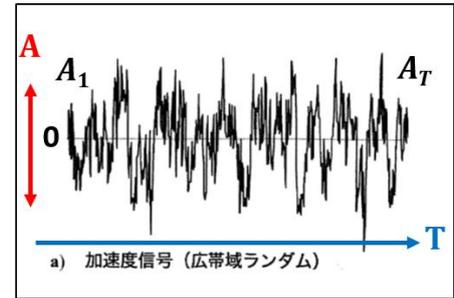


図 3

(1) 式は PSD プロファイルから算出する実効加速度である。図 2 に示す PSD ランダム振動試験プロファイルを例に解説する。PSD プロファイルは PSD 値 (G^2/Hz) に対する周波数の関数であり、実効加速度 Grms はこの下限周波数の 1Hz~200Hz までを積分して面積を求めた値の平方根である。PSD プロファイルの面積は振動のエネルギー全体に相当するため、その平方根である実効加速度は供試体にダメージを与える振動エネルギーの大小を示すことができる。

(2) 式は時刻歴加速度データから算出する実効加速度である。時刻歴加速度データは加速度に対する時刻の関数であり、図 3 上図に示すように計算対象データの始点から終点までを積分してデータの数 (T) で除した値の平方根である。ここでランダム振動試験において振動試験機の振動台上に発生する加速度発生確率密度は図 3 下図に示す正規分布であり、この平均値は 0 である。ところで統計学上の標準偏差を求める計算式は (3) 式である。またこの式で示す "a" は平均値である。しかし上述したようにランダム振動試験において振動台上に発生する加速度発生確率密度は正規分布のため平均値は 0 である。このため実効加速度の値は標準偏差値と同等であることがわかる。加速度発生確率密度が正規分布であるため正規分布上で最大加速度は 3σ となる。したがって各種振動試験のランダム振動試験規格に示された実効加速度が、 $\text{Grms} = \sigma$ (標準偏差) である時、振動台上で発生される最大振動加速度は、 3σ である。ISO 13355-2016 のランダム振動試験プロファイルを例とすれば最大ピーク加速度は、実効加速度 0.61Grms の 3 倍である 1.83G であることがわかる。

3. 大変位振動試験規格

図4に示すように ISO13355-2016 のランダム振動試験プロファイルの最低振動数は、ISO13355-2001 が 3Hz であったのに対して、2Hz からとなった。このため実効加速度は 0.59Grms から 0.61Grms へと大きくなり、同時に最大振幅は 11.76mmP-P から 21.89mmP-P へと長くなっている。さらに参考として示されている AnnexB B.2[JAPAN]では実効加速度が低下しているにも関わらず、最大振幅は 34.27mmP-P と大きくなっている。

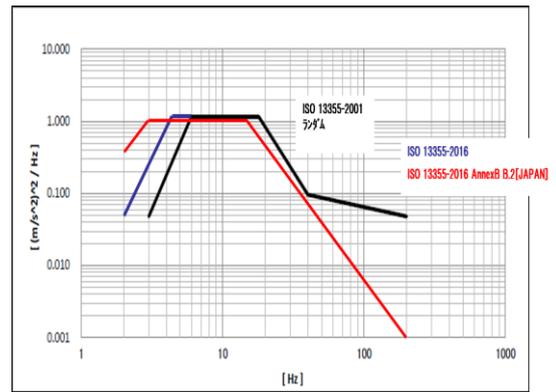


図 4

図5に示すように ASTM D4169-2016 のトラック輸送 High Level の実効加速度は 0.70Grms であり、旧版トラック輸送 Level I の 0.73Grms に比べて大きな変化はないが、低周波数範囲の PSD レベルが高いために最大振幅は旧版が 35.27mmP-P に対して、65.59mmP-P と 2 倍近い振幅が必要になっている。鉄道輸送については大きな変化はない。

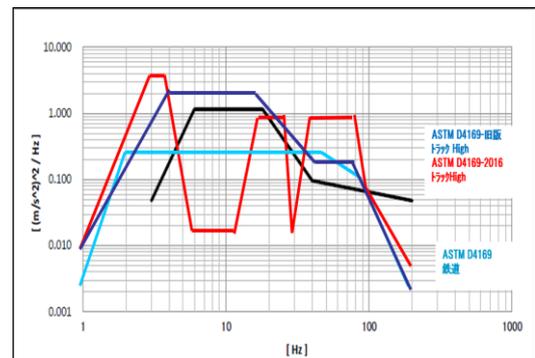


図 5

図6に示す ISTA 3A は、”Over-the-Road Trailer” ”Pick-up & Delivery Vehicle”の実効加速度はそれぞれ 0.53Grms、0.46Grms と ISO 13355 のランダム振動プロファイルより低いものであるが、低い周波数の PSD レベルが高いために”Over-the-Road Trailer”試験の最大振幅は 47.12mmP-P であり、特に宅配便貨物に適用される”Pick-up & Delivery Vehicle”試験の最大振幅は 58.72mmP-P と大きなものになっている。

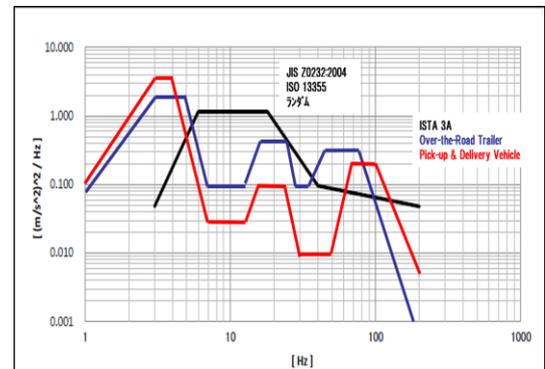


図 6

図7に示す中国の GB/T 4857.23-2012 は低い周波数範囲の PSD レベルが特に高く、実効加速度、振幅がともに高い規格である。”Level I”では実効加速度 0.82Grms、最大振幅 61.4mmP-P となっている。

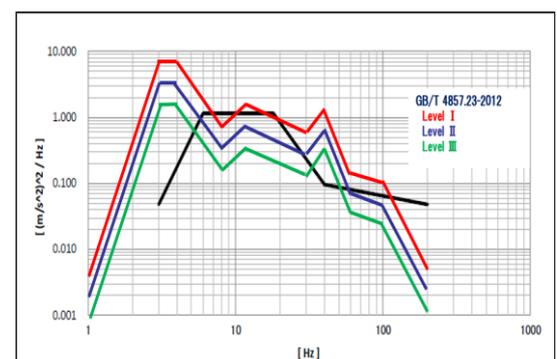


図 7

4. 大変位時刻歴加速度振動試験

時刻歴加速度振動試験については、可能であればトラック荷台の時刻歴加速度データをそのまま再現できることが理想である。しかし振動試験機の性能仕様によりデータを加工して、実際の振動試験を行うことが一般的である。

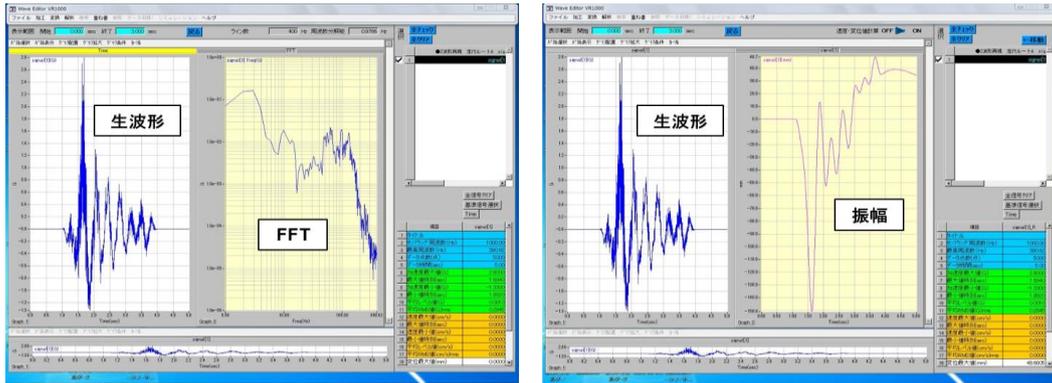


図 8

図 8 はトラック輸送時の荷台の時刻歴加速度データである。加工を行わないデータで 4 秒間最大加速度 2.8G が発生している。解析ソフトウェアにより左は周波数分析を行い、右は振幅の計算を行っている。それによると最大+48.7mm、-150.8mm の振幅である。このデータを振動試験機の振動台上で再現すると少なくとも片振幅±151mm 以上のストロークを持つ振動試験機でないと再現できない。そこで以下のような加工を行うのが一般的である。

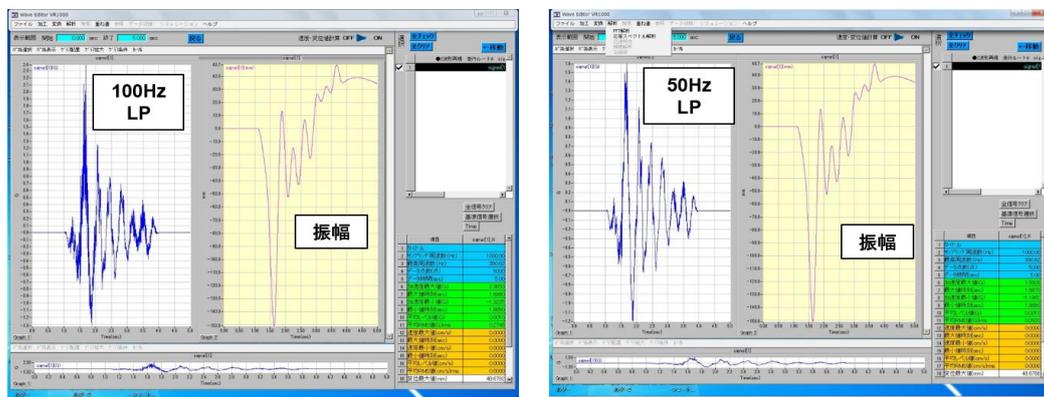


図 9

図 9 左図は、加工していない生波形に対して、100Hz のローパスフィルタ（100Hz 以上の周波数領域の成分データを削除）をかけている。それによると振幅は+48.7mm、-150.8 となり生波形と変わらない。さらに 50Hz のローパスフィルタをかけた状態が右図であるが変化はない。

図 10 左図は、1.5Hz~100Hz のバンドパスフィルタ（領域外の周波数データを削除）をかけた波形と振幅のデータである。このデータによる振動は最大片振幅+62.83mm、-50.54mm である。さらに 2.5Hz~50Hz のバンドパスフィルタをかけたデータでは、最大片振幅+17.39mm、-16.41mm となり、ここまで生波形を加工してようやく一般的な振動試験機の振幅仕様範囲になることがわかる。

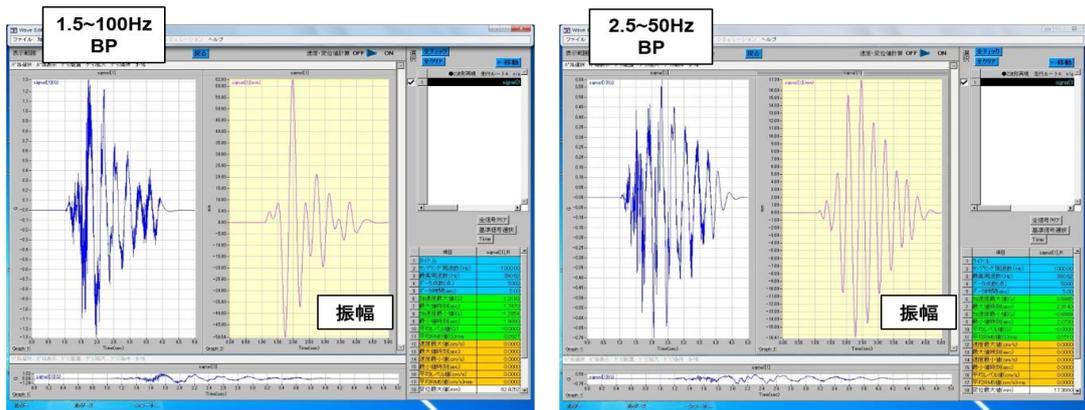


図 10

5. 大変位振動試験への対応策

図 11 に示すようにサーボモータ式振動試験機のアクチュエータは AC サーボモータとボールねじを組み合わせたものである。ボールねじに取付けられたナットがサーボモータの正転逆転の回転を直動する動作に変換して上下、または左右に移動することによって振動台を加振する。このためボールねじの長さを変更することで比較的容易に長振幅の振動試験機を製作することが可能である。これに対して図 12 に示すように一般的な動電式振動試験機は可動コイルと固定磁場を発生する固定コイルの組合せのため長振幅の振動試験機の製作にはコストがかかる。

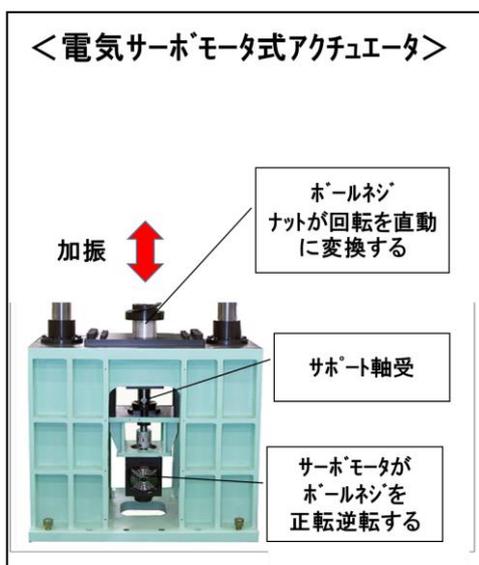


図 11

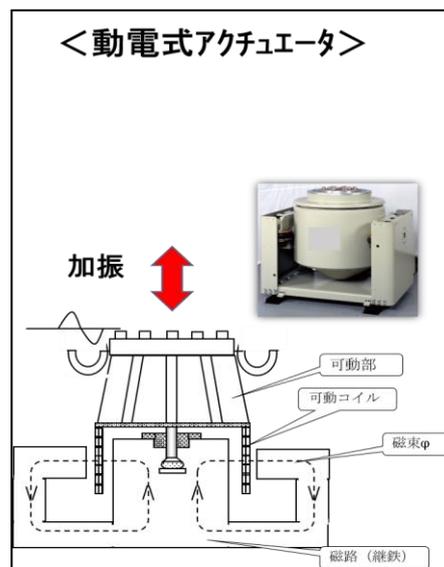


図 12

またサーボモータ式振動試験機では、AC サーボモーターを同期運転することによって振動台を加振させることができる。図 13 に示すように上下方向は 4 基のサーボモータを同期運転して振動台に荷重される供試体に偏心があっても安定して振動試験ができる。さらにリニアガイドを搭載した加振台は 3 軸同時振動試験が可能であり、上下・左右・前後の 3 軸にサーボモーターを搭載した 3 軸同時振動試験機を構成する。(図 14 参照)

6. 最後に

上述したように日本を含め世界の振動試験規格は低周波数化の傾向にある。電気サーボモータ式振動試験機は、次の 3 つの点で従来型の振動試験機に比べて優位点がある。①長振幅振動試験に優位である。②サーボモーターを同期運転することによって高加速度、高荷重に優位である。③中型・大型の偏重心を持つ供試体に対して優位である。

今後も電気サーボモータ式振動試験機の普及に努め、世界の輸送振動試験の需要に応じて包装貨物輸送の品質向上の一助としたい。

参考文献：

- [1] 「やさしく学べる統計学」石村園子著 共立出版
- [2] 「振動試験と計測の基礎」エミック株式会社

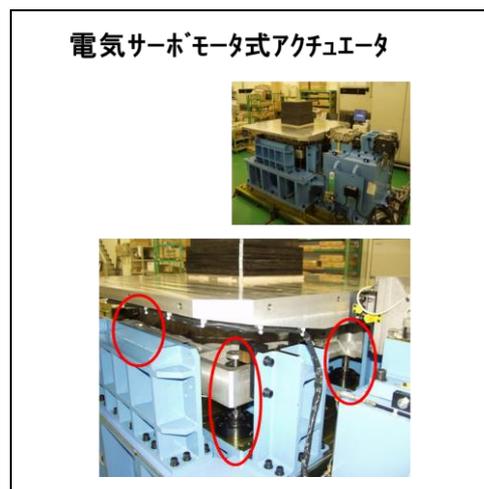


図 13

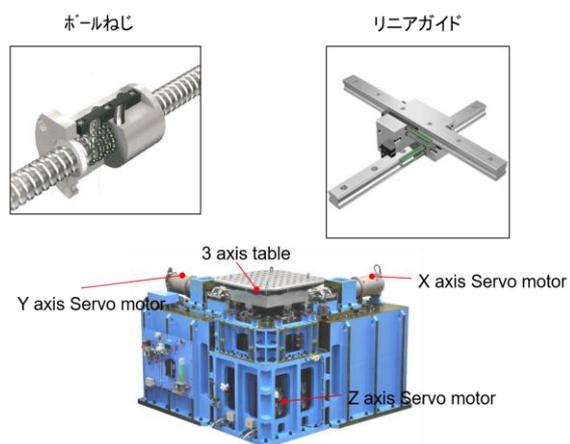


図 14