

## 6.2. 高周波衝撃 簡易試験法の紹介～小型衛星 機器試験への適用例

三菱重工業 株式会社

田原 善行 氏

# 第12回試験技術WS

## 高周波衝撃 簡易試験法の紹介 ～小型衛星機器試験への適用例～

2014/12/11

長崎研究所 構造研究室

田原 善行

三菱重工株式会社

技術統括本部 / 誘導・推進事業部

© 2014 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.



### 目次



1. 背景
2. 適用対象例
  - ジオスペース探査衛星(ERG)ミッション部
  - ミッション部搭載機器 衝撃環境条件設定
3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介
  - ラプチャーポルト方式 衝撃試験装置の構成
  - 衝撃試験装置の設計フロー
  - 衝撃印加条件調整のためのパラメータ
  - 事前解析による印加衝撃の検討
4. 試験結果(例)
  - 衝撃印加データ例
  - データ評価
5. まとめ

© 2014 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

1

# 1. 背景

## 1. 背景

### 【背景】

衛星搭載機器に対しては、一般に、衛星分離・太陽電池パドル展開等に利用される火工品の作動に起因する衝撃環境条件が適用される。

通常、それらの搭載機器に対しては、当該の衝撃条件を機械的な装置で模擬して印加するアプローチが取られるが、概して、火工品作動では、高周波領域の加速度が標定となるため、その標定レベルを達成する試験条件を形成した際、低周波側には過剰な印加レベルが設定されてしまうケース等が散見される。

この課題を解消するには、実際に火工品を作動させて衝撃を印加するという手法が考えられるが、試験費用・試験実施場所/設備の制約もあり、簡単ではないのが実情である。

そこで、弊社では、「ラプチャーボルト」を使用した衝撃試験手法を考案した。

この試験手法では、高周波領域をカバーする衝撃加速度条件を、火工品実作動よりも簡便的に印加でき、試験期間・費用も低減できるメリットがある。

## 2. 適用対象例

- ジオスペース探査衛星(ERG)ミッション部
- ミッション部搭載機器 衝撃環境条件設定

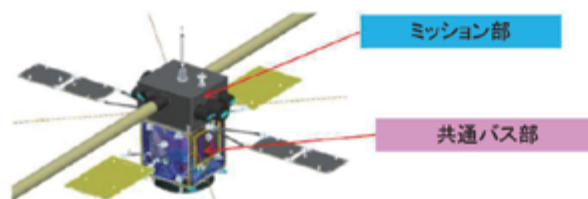
### 2. 適用対象例(1/3)

#### 【ジオスペース探査衛星(ERG)ミッション部】

本稿で紹介する衝撃試験手法の適用対象として、ジオスペース探査衛星(ERG)ミッション部の搭載機器を例に挙げる。

ERGは、地球磁気圏内における放射線帯の相対論的電子の形成過程や宇宙嵐のメカニズムを解明するため、放射線帯の中心部において、プラズマ粒子・電磁波・プラズマ波動を直接観測するための小型衛星である。

衛星共通バス部上に、観測用機器を搭載したミッション部構造を結合する形態となっており、ミッション部各機器に対する衝撃発生源は、主としてロケット/衛星分離作動衝撃加速度のバス部側からの伝達である。



ERG(Exploration of energization and Radiation in Geospace)

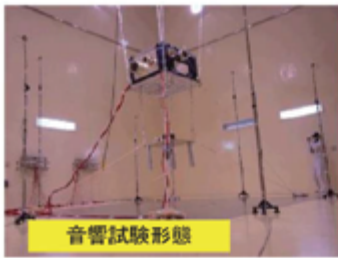
2. 適用対象例 (2/3)



【ERGミッション部搭載機器 衝撃環境条件設定】

ERGミッション部に対しては、バス部との結合インタフェース点で、衝撃レベル (SRS)が規定されている。それを基に、ミッション部搭載機器の各取付点における衝撃環境条件は、以下に示す手順で導出されている。

- MTM供試体 (音響試験終了後の吊り上げ状態)でバス部インタフェース近傍点のハンマリング試験を行い、各搭載機器取付点での応答加速度データを取得。
- 規定のインタフェースSRSと、ハンマリング試験での各点における入出力応答特性を掛け合わせ、機器ごとに取付点の衝撃環境レベルを算出。



音響試験形態



ハンマリング試験

【試験実施場所】  
筑波宇宙センター  
1600m<sup>3</sup> 音響試験設備

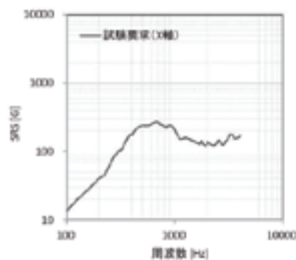
2. 適用対象例 (3/3)



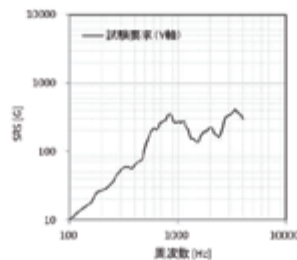
【ERGミッション部搭載機器 衝撃環境条件設定】(続き)

導出された搭載機器衝撃環境条件の一例を、以下に示す。

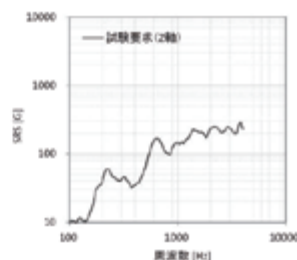
通常、前頁に示す様に得られたSRSデータは、包絡線 (X db/octの傾き線+水平レベル線)でスペック化されるが、バス部とのインタフェース規定において、既にその処置がなされており、ミッション部側で同様の処置をした場合、「スペック化マージンの二重化」となる。それを回避するため、ERGミッション部搭載機器に対する衝撃試験の一部では、得られたSRS条件を直接的に包絡するアプローチをとった。



X軸の試験要求



Y軸の試験要求



Z軸の試験要求  
(衛星機軸方向)

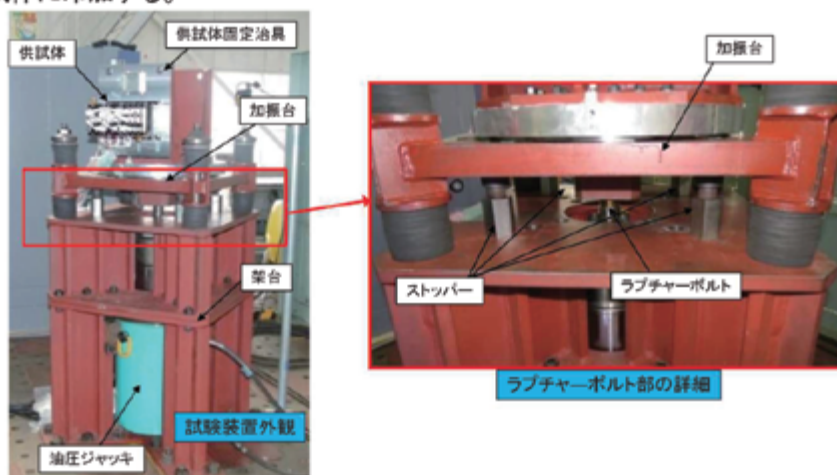
### 3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介

- ラプチャーボルト方式 衝撃試験装置の構成
- 衝撃試験装置の設計フロー
- 衝撃印加条件調整のためのパラメータ
- 事前解析による印加衝撃の検討

#### 3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介 (1/7)

##### 【ラプチャーボルト方式 衝撃試験装置の構成】

ラプチャーボルト破断時の衝撃力を、加振台および供試体固定治具を介して、供試体に印加する。

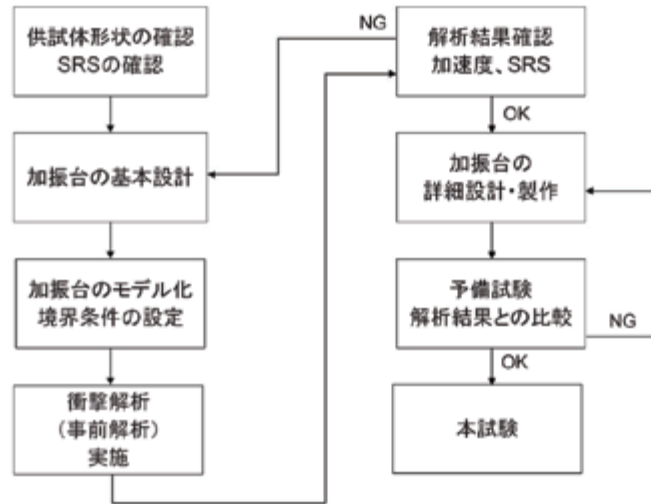


3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介 (2/7)



【衝撃試験装置の設計フロー】

事前解析を適用して基本設計を行い、予備試験で装置/試験条件詳細を決定する。



3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介 (3/7)

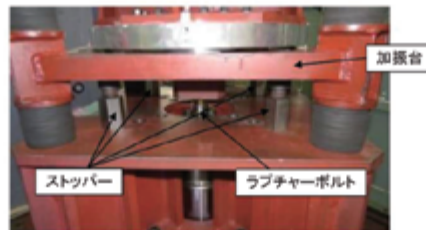


【衝撃印加条件調整のためのパラメータ】

所定の衝撃試験条件を形成するための主なパラメータは、下記の通りである。

パラメータ	大⇄印加加速度⇄小 レベル	特徴
ラプチャーボルトの直径 (破断荷重)	大 ⇄ 小	周波数全体に寄与
ラプチャーボルトの材質	硬 ⇄ 軟	主に高周波数領域に寄与
ストッパーの支持間隔	広 ⇄ 狭	主に低周波数領域に寄与

※ 加振台、固定治具の形状：試験装置系の固有振動数特性に寄与

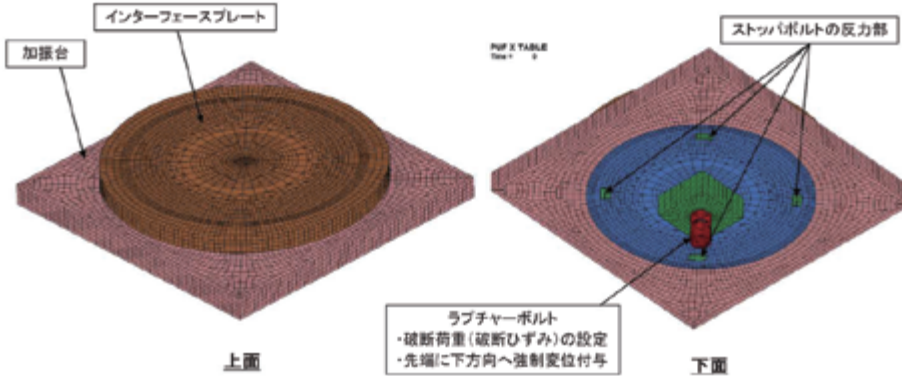


3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介 (4/7)



【事前解析による印加衝撃の検討】

- ・ インターフェースプレート、加振台、ラプチャーボルトを対象にモデル化
- ・ ラプチャーボルトに強制変位を負荷し、破断させることにより衝撃を印加



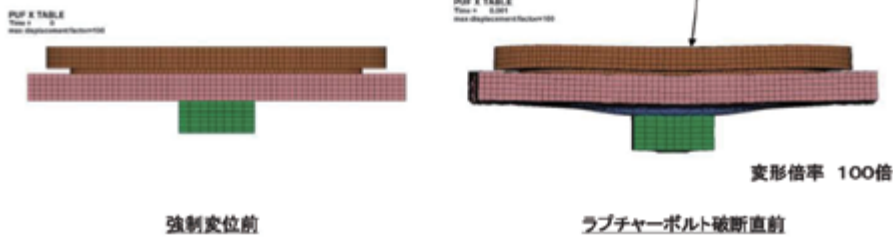
事前解析モデルの代表例 (Z軸印加ケース)

3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介 (5/7)



【事前解析による印加衝撃の検討】 (続き)

- ① ラプチャーボルト先端に、下方向の強制変位負荷
- ② 加振台中央が下方向にたわみ、ひずみエネルギーが蓄積される。
- ③ ラプチャーボルトが破断
- ④ ボルト破断により、負荷荷重が瞬時に解放され、衝撃が印加される。同時にひずみエネルギーも解放され、加振台に衝撃が印加される。



事前解析の変形図 (Z軸印加ケース)

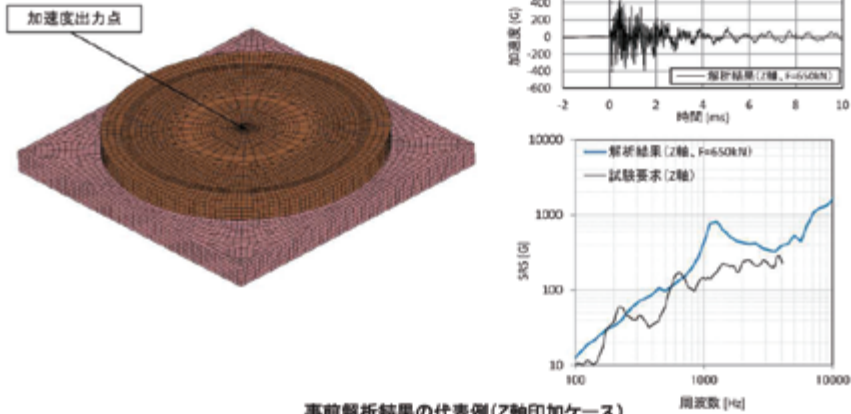


3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介 (6/7)



【事前解析による印加衝撃の検討】(続き)

供試体取り付け部の加速度時刻歴およびSRS(解析結果)を、下図に示す。  
 所定の試験要求(SRS)を包絡する条件を形成できることを確認した。  
 但し、解析では各種パラメータを仮定しており、予備試験での確認が必要である。



事前解析結果の代表例(Z軸印加ケース)

3. 衝撃試験法および装置設計事例の紹介 (7/7)

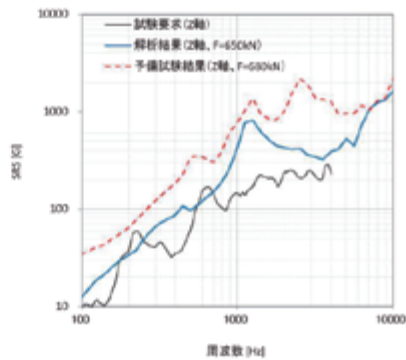


【事前解析による印加衝撃の検討】(続き)

- 予備試験結果と解析結果の傾向は一致しており、ラプチャーボルト寸法等を調整することにより、試験要求に近づけることができる。
- 本試験形態での事前確認試験を実施し、条件を最終確定させる。



予備試験外観写真



解析結果および予備試験結果のSRS比較

Z軸印加ケースの解析結果と予備試験結果の比較

## 4. 試験結果(例)

- 衝撃印加データ例
- データ評価

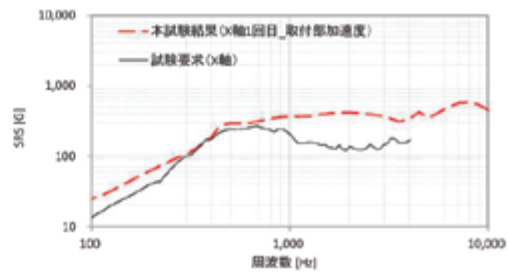
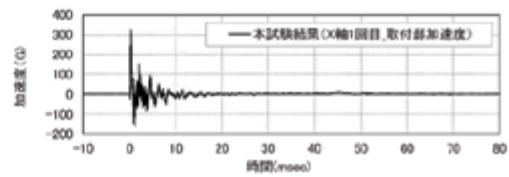
### 4. 試験結果(例)(1/4)

#### 【衝撃印加データ例 : X軸印加ケース】

下記の通り衝撃試験を実施し、要求を包含するレベルを印加できた。



X軸印加ケースの試験セットアップ外観



X軸印加ケースの試験結果

4. 試験結果(例)(2/4)

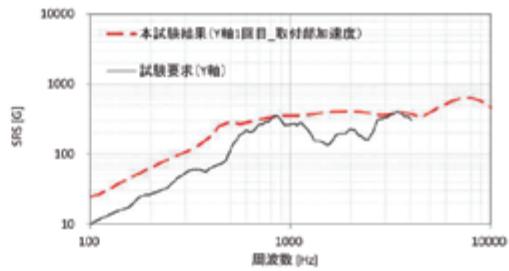
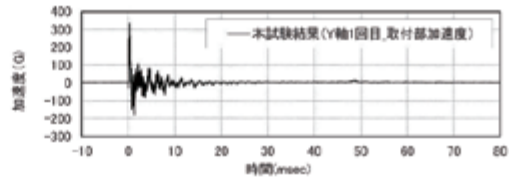


【衝撃印加データ例：Y軸印加ケース】

下記の通り衝撃試験を実施し、要求を包含するレベルを印加できた。



Y軸印加ケースの試験セットアップ外観



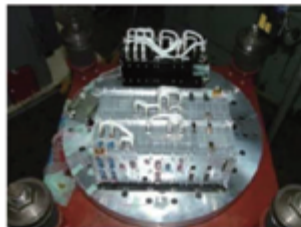
Y軸印加ケースの試験結果

4. 試験結果(例)(3/4)

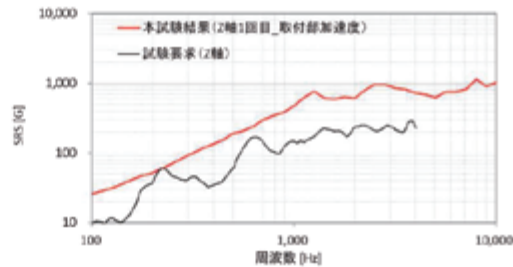
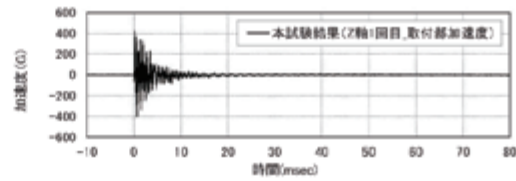


【衝撃印加データ例：Z軸印加ケース】

下記の通り衝撃試験を実施し、要求を包含するレベルを印加できた。



Z軸印加ケースの試験セットアップ外観



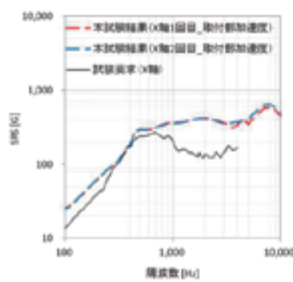
Z軸印加ケースの試験結果

## 4. 試験結果(例)(4/4)

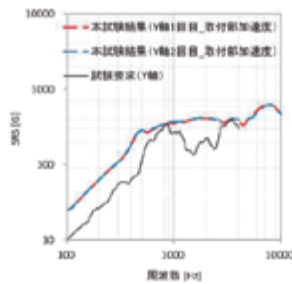


## 【データ評価】

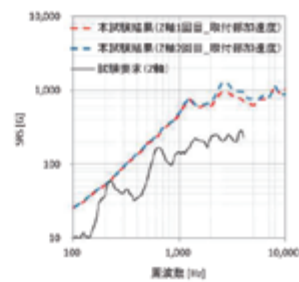
- 各軸2回ずつの衝撃印加を実施した。各軸1回目と2回目の比較し、再現性が良いことが確認できる。
- 試験装置のパラメータ設定を適切に実施したことで、低周波領域、高周波領域で、過大な衝撃加速度を印加することなく、試験要求に近いレベル(SRS)を実現することができた。



X軸印加ケースの試験結果



Y軸印加ケースの試験結果



Z軸印加ケースの試験結果



## 5. まとめ

## 5. まとめ



### 【まとめ】

- 火工品作動に起因する衝撃条件を擬似的に形成する手段として、「**ラブチャーボルト方式**」を用いた試験手法を確立した。
- この試験手法を、**小型衛星ミッション部搭載機器の衝撃試験**に適用し、その有効性が確認できた。
  - 要求値に対して**過剰負荷とならない衝撃印加**が可能
  - 衝撃印加条件の**再現性**を実現
- 試験装置における各パラメータを適切に調整することによって、**多様な衝撃SRSプロファイル**に対応できる。また、**衝撃解析**の適用により、効率的に試験パラメータを設定できる。
- 簡易的なメカニズムによる作動方式であるため、実火工品作動と比較すると、**試験期間・費用の低減化**が図れる。
- 今後は、**パラメータ感度の精緻化**や、(簡潔な)メカニズム追加により、**衝撃条件形成能力の高度化**を検討していく。



# 三菱重工

この星に、たしかな未来を

## 質疑応答

### 質問者① JAXA 環境試験技術センター 中尾様

11 ページに試験条件を設定するためのパラメータが並べられていますが、これらのパラメータを設定するために別途多くのデータを収集されているのでしょうか。

#### 発表者

本衝撃試験装置ができてからある程度時間も経過しており、これまでのデータベースは弊社の中で蓄積されています。設定する各パラメータが数値的にどの程度衝撃レベルに影響を及ぼすかは、上部に搭載される供試体の形状や重量によっても変わってくるので、数値的にパラメータを保有している訳ではありません。データベースの中から類似のものをピックアップすることで予備試験の回数を削減しています。

### 質問者② 元 JAXA 三津間様

試験結果(時刻歴)の波形が非対称であるが、もう少し対称にはできないのでしょうか。SRS だけではなく、波形依存の部品があった場合気になるところであると思われま

#### 発表者

SRS は正の SRS と負の SRS に分離することができ、試験結果には正負 SRS それぞれの最大値を取った包含線を示しています。プラス方向とマイナス方向に同様の加速度を印加するというのは少なくとも現状の衝撃試験装置では難しいと思われ、ご指摘のように今後の課題であると考えています。現状の対応としては正の SRS と負の SRS をそれぞれ評価して、プラス側の試験とマイナス側の試験を別に行うということも弊社では行っています。

### 質問者③ JAXA イプシロンロケットプロジェクトチーム 宇井様

今回の機器の条件というのは、何点かハンマリングした結果を包絡して設定されていると述べられていましたが、供試体への加振面の中心以外の点の加速度分布がどのようになっているかは把握されているのでしょうか。

#### 発表者

ご指摘の通り、加速度分布は供試体の中で存在しています。本装置は供試体に対してかなりコンパクトな設計になっており、それ故にローカルな振動が発生し供試体の取付面の中で加速度分布が生じてしまうことがあり、今回は取付断面中での加速度分布を平均化させて SRS 解析を行い評価を行っています。

質問者

実際はボルト破断による衝撃が 1 点で入力され、その衝撃が取付面全体に伝播していくということでしょうか。

発表者

はい。衝撃源としては根本の 1 点で入力されることになります。

質問者④ 九州工業大学 畑村様

発表中でハンマ式試験機のことを従来型と言ひ、従来型では低周波側が強く出やすく過負荷になりやすいということを述べられていたかと思いますが、今回の試験機に変えたことで低周波側の応答はどのように改善されたのでしょうか。

発表者

今回評価している周波数は 100Hz～10kHz の範囲であり、1kHz～10kHz の領域内で半正弦波を形成できるハンマ式や落重式の衝撃試験装置は私自身は見たことがありません。また弊社で従来型の試験装置を自作し試験を実施した経験があるが、その際は 100Hz 付近で約 100G の加速度が発生したという経緯があります。その結果に比べると今回のラプチャーボルト式試験装置の方が低周波の加速度を押さえることができたものと考えています。

質問者

例えば 100Hz 付近で約 100G の加速度でも、試験方法で実際のもの壊れやすさというのは変わってくると思われまひ。SRS 解析だけで判断するのは危険であると考えています。

質問者⑤ 産業技術総合研究所 野里様

試験結果(時刻歴)のグラフを見ると、高周波成分を含んでいるように見えるのですが、SRS 解析のグラフを見ると 4kHz 付近までしかスペクトルが表されていませんがこれには何か理由があるのでしょうか。

発表者

得られた時刻歴波形をそのまま SRS 解析した結果を示していますが、高周波成分を含んでいると見られるのはどの部分のことを仰っているのでしょうか。

質問者

時刻歴の波形を見ると数 kHz より上の高周波成分を含んでいるように個人的には思えます。サンプリングレートは 10kHz 程度を試験条件としているのでしょうか。

発表者

サンプリングは 500kHz で取得しており、そこからデータ処理の便宜のために 20kHz のローパスフィルタをかけて SRS 解析を行っています。少なくとも 10kHz 以下の高周波数成分は評価できていると考えています。

質問者

高周波成分が含まれているように見えたのもっと高い周波数成分までプロットするとどうなるのかが気になったので質問させて頂きました。

発表者

加速度センサの応答周波数が 20kHz までしかないので、それ以降は少なくとも今の計測系では評価できません。かつ、それくらいの高周波になると供試体を破壊するような振動ではないと考えているので今回は評価していません。