

## 4.2 フォースリミット振動試験 ハンドブックに関するトピック

宇宙輸送ミッション本部 試験センター

長濱 謙太 開発員

## 第6回 試験技術ワークショップ

### フォースリミット振動試験ハンドブックに関するトピック

宇宙航空研究開発機構  
JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)  
宇宙輸送ミッション本部 試験センター

長浜 謙太

#### 発表内容

1. フォースリミット振動試験ハンドブックの作成状況
2. フォースリミット振動試験ハンドブックの概要
3. フォースリミット振動試験の概要
4. フォースリミット振動試験に関するトピック その1  
フォースリミット条件の計算法について
5. フォースリミット振動試験に関するトピック その2  
フォースリミット振動試験用の治具について
6. まとめ



## 1. フォースリミット振動試験ハンドブックの作成状況

- FY17
  - フォースリミット振動試験に係る基礎検討に着手
- FY18～FY19
  - HTV搭載コンポーネントやSDS-1等へ試行
  - 『フォースリミット振動試験ハンドブック 原案』作成
- FY20
  - フォースリミット振動試験ハンドブックをJAXA共通技術文書として制定するための審議を開始
  - これまでに専門家を交えて4回の議論を実施



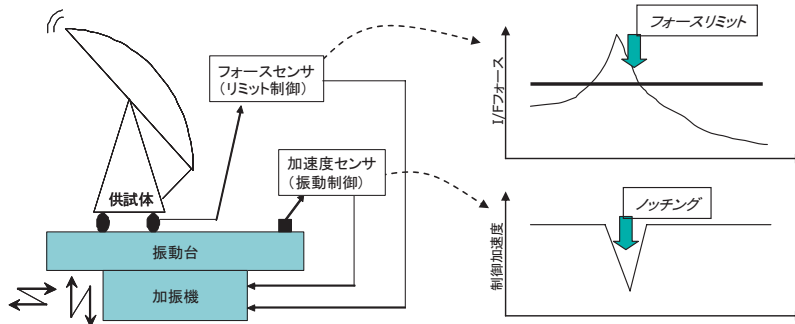
## 2. フォースリミット振動試験ハンドブックの概要

- (1項) 総則
- (2項) フォースリミット振動試験に関連する事項
  - 打上時の振動環境と地上での振動試験の違い
  - 振動試験における過負荷の低減方法の概略
- (3項) フォースリミット条件の計算方法
  - フォースリミット値の計算方法について
- (4項) フォースリミット振動試験
  - 実際にフォースリミット振動試験を実施するにあたって考慮すべき事項
    - センサの選定指針や治具の設計指針など
- Appendix
  - 本文(上記1項～4項)を補足する詳細理論・実例など

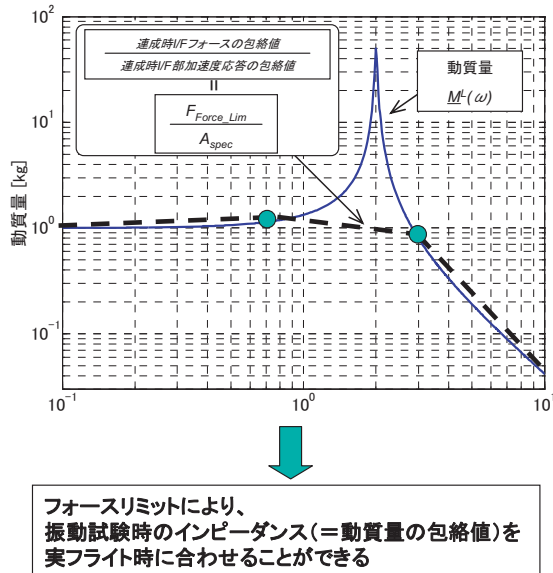
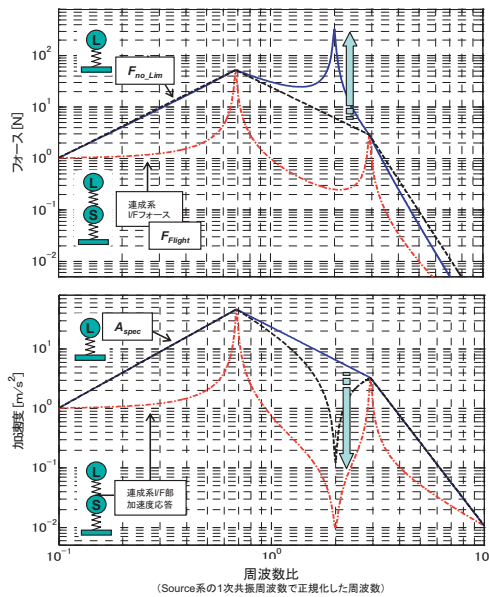


### 3.1 フォースリミット振動試験とは

- **フォースリミット振動試験法**とは、振動試験における過負荷を低減する手法
  - 加振中の供試体と加振台間のインターフェースフォースを計測し、リミット制御する振動試験法
    - ① 供試体と加振台の間に『フォースセンサ』を設置
    - ② 低次の振動モード(大きい有効質量を持つ振動モード)のリミットに有効
    - ③ 供試体の各部位に設定された加速度リミットをそのまま代替することはできない
    - ④ 規定された加速度スペックのノッチングを行う
      - 加速度スペック自体を見直すことはできない



### 3.2 フォースリミット振動試験の効果 (2自由度モデルの計算例)



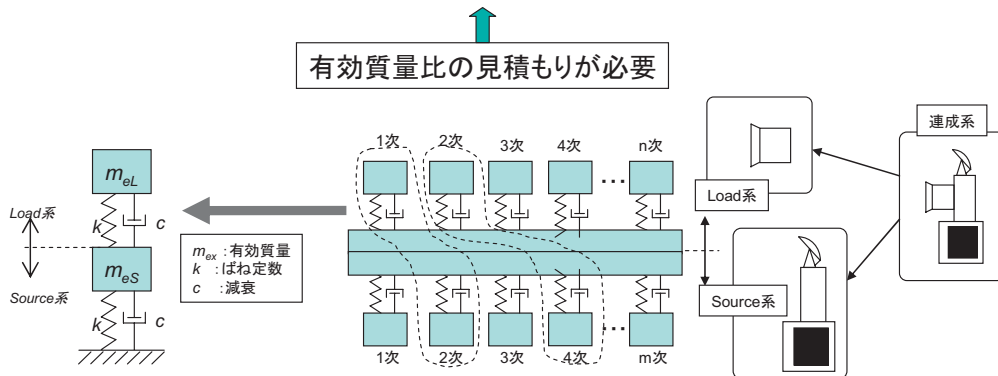
#### 4. 本で紹介するトピック(その1) —フォースリミット条件の計算法—

- フォースリミット条件の計算方法の紹介
  - 代表的な2つの方法を紹介

名称	特徴	計算に使用するパラメータ
単純2自由度法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象を2自由度モデルに近似して計算</li> <li>・計算に必要なパラメータが少ない</li> <li>・NASA Handbookをベースにした方法</li> </ul>	供試体と被搭載側構造体の有効質量比 供試体のQ値
簡易試験による計算	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計算に必要なパラメータを実測する</li> <li>・実供試体が必要</li> <li>・JAXA独自の方法</li> </ul>	供試体と被搭載側構造体の伝達関数 → 簡易実験で実測

#### 4.1 単純2自由度法(1/3) —計算法の概要—

- 単純2自由度法
  - 対象を簡単な2自由度モデルに近似
  - この2自由度系の応答を計算することでフォースリミット条件を計算
  - 計算に必要なパラメータ以下の2種類
    - 供試体の共振周波数
    - 供試体と被搭載側構造体の有効質量比@供試体の共振周波数



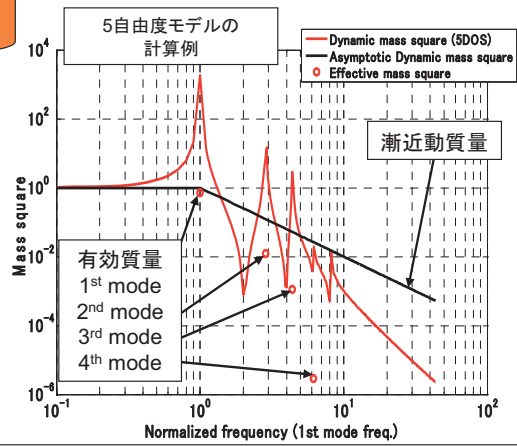
## 4.2 単純2自由度法(2/3) —有効質量の簡易見積り法—

JAXAのHDBKへ明記  
(NASA HDBKには無い方法)

### 有効質量の見積り → 漸近動質量

- 動質量の漸近解として以下を仮定
- 1次モード周波数までは、剛体質量。
  - それ以上の周波数では6dB/Octで減少

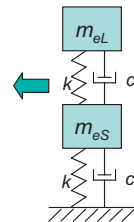
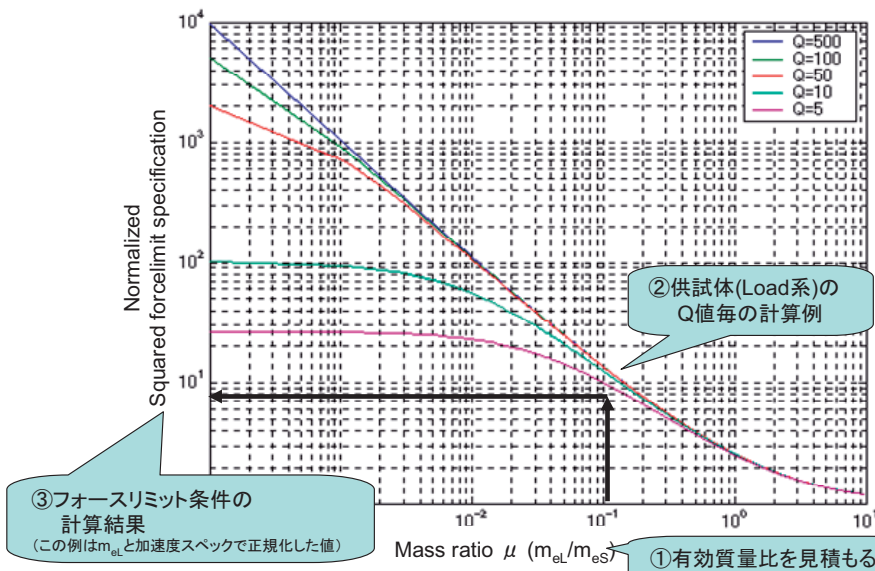
- ・高次モードまで簡単に求められる
- ・本見積りに必要なパラメータは、
  - ・搭載側と被搭載側の剛体質量
  - ・1次共振周波数



$$m_e \approx M_{ai} = \begin{cases} M_i & , \omega_{ni} > \omega_i \\ M_i (\omega_{ni} / \omega_i) & , \omega_{ni} \leq \omega_i \end{cases}$$

- $M_{ai}$  : 漸近動質量 [kg]
- $M_i$  : 剛体質量 [kg]
- $\omega_{ni}$  : 1次共振周波数 [Hz]
- $\omega_i$  : 漸近動質量を算出する周波数 [Hz]

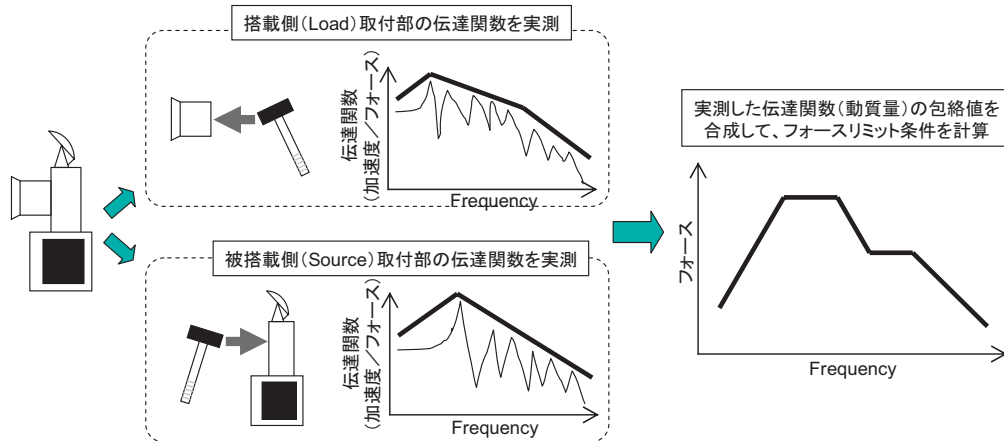
## 4.1 単純2自由度法(3/3) —計算結果(例)—



## 4.2 簡易試験による計算(1/2) ー計算法の概要ー

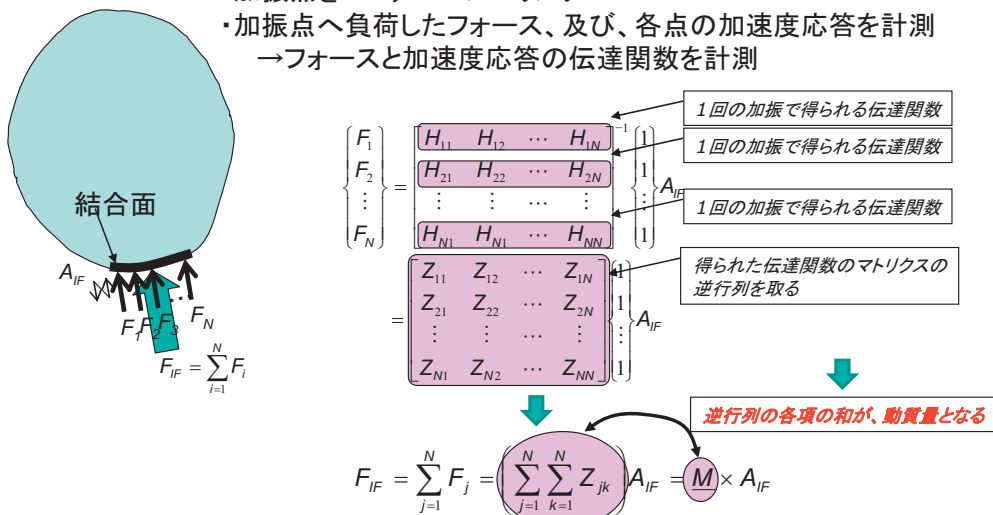
### ○ 簡易試験による計算

- ・実測値に基づくため、得られる結果の精度が高い
- ・適用にあたり搭載側(Load系)と被搭載側(Source系)の実構造体が必要
- ・JAXAが独自に検討した計算法



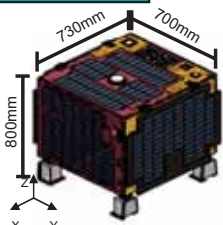
## 4.2 簡易試験による計算(2/2) ー動質量の実測方法ー

- ・結合面内の複数点を加振点として選択
- ・加振点を1つずつハンマリング
- ・加振点へ負荷したフォース、及び、各点の加速度応答を計測  
→フォースと加速度応答の伝達関数を計測



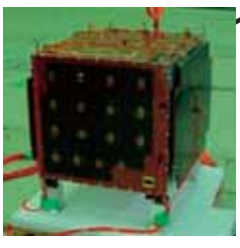
### 4.3 フォースリミット条件の計算結果の評価(1/2)

**供試体**



730mm  
700mm  
800mm


SDS-1 STM (搭載側)



Φ 1800

PAF模擬構造体 (被搭載側)

**音響試験**

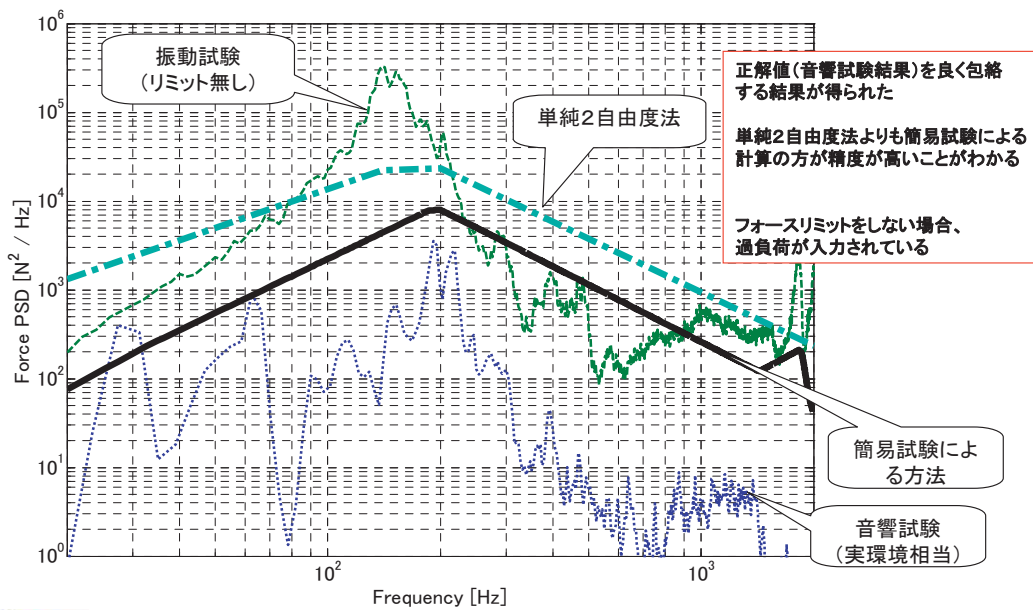


音響負荷時のランダム振動  
↓  
実環境相当と想定

→

SDS-1単体の  
ランダム振動試験

### 4.3 フォースリミット条件の計算結果の評価(2/2)





## 5. 本で紹介するトピック(その2)

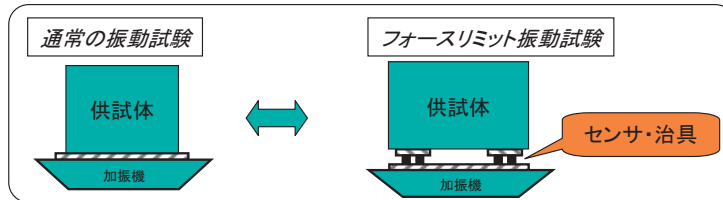
### ーフォースリミット振動試験実施時の注意事項ー

- 実際にフォースリミット振動試験を実施するにあたり注意すべき事項の1部を紹介



- **治具の設計**について

- インタフェースフォースを計測するために、フォースセンサ及び治具を供試体と加振台の間に設置
- センサ及び治具を挟むことで、治具の剛性が低下する

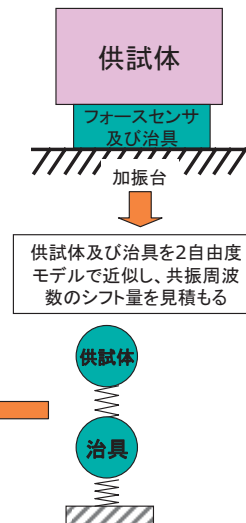
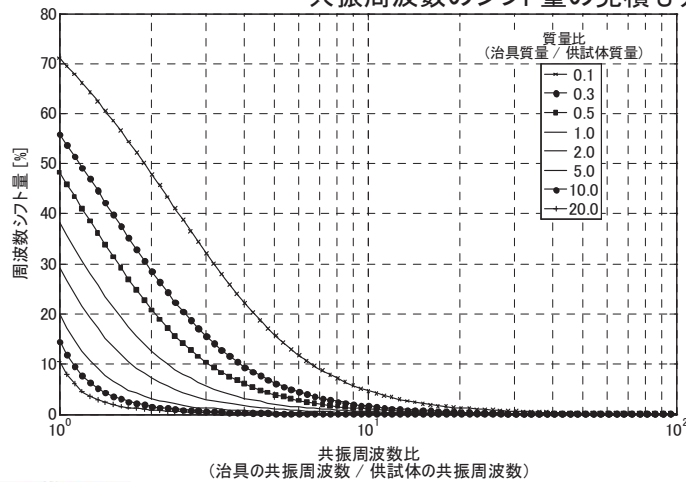


## 5.1 フォースリミット振動試験用治具の設計注意点 (1/2)

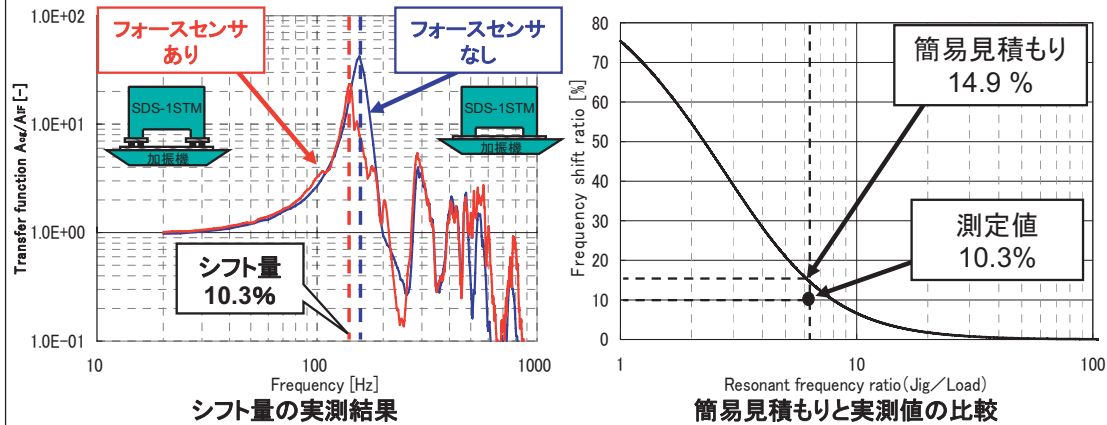
治具(及びフォースセンサ)の剛性が十分であることを確認する必要がある



治具と供試体が連成することによる共振周波数のシフト量の見積もり



## 5.1 フォースリミット振動試験用治具の設計注意点 (1/2)



簡易計算と実測値の差は-4.6% (周波数解析の分解能 4Hz)  
 → 共振周波数の140Hz付近では、約±3%は計測の誤差範囲である

概ね簡易計算式が有効であると考えられる  
 (面内の結果についても同様に評価)



Japan Aerospace Exploration Agency  
 Environmental and Structural Test Laboratory

第6回 試験技術ワークショップ  
 平成20年11月21日

16

## 6. まとめ

- ハンドブックの内容の一部を紹介した
- ハンドブックの内容について、今年度中にワーキンググループ (WG: 衛星・ロケットメカ、JAXA有識者による検討会) での審議を終える予定
- WGでの審議終了後、JAXAの標準技術文書(JERG)としてハンドブックを制定するための手続きを実施する
  - 衛星一般試験標準の下位文書の位置づけ



Japan Aerospace Exploration Agency  
 Environmental and Structural Test Laboratory

第6回 試験技術ワークショップ  
 平成20年11月21日

17

## 質疑応答

### 問1

4.3 項の表で、単純2自由度法と簡易試験法が比較してあるが、簡易試験法の方が単純2自由度法よりも必ず高い精度になると言えるのでしょうか。また、2つの手法の使い分けはどのようにすれば良いのかを教えてください。

また、各手法の計算結果を比較しているグラフの20Hzの辺りで、簡易試験法の結果が実環境よりもアンダーになっているが、それで良いのかどうか教えてください。

### 答1

簡易試験法の方がより良い精度で予測することができます。我々で、何例か計算を行っていますが、全て簡易試験法の方が精度が高い結果となっています。

簡易試験法と単純2自由度法の使い分けについては、単純2自由度法は、計算は簡単ですが、結果が実環境よりも多少大きめの値となる特徴がありますので、設計の初期段階で有効な手法と考えられます。簡易試験法は、精度は高いが実供試体が必要となりますので、開発フェーズの後期段階で適用するのに有効であると考えられます。

20Hzの件については、インパクト試験を行った時の加振点の取り方や、また、実環境として音響試験時に加速度を計測しているが、その時の計測点の配置によるバラツキが原因と考えられます。

### 問2

低周波は難しいということでしょうか。

### 答2

はい。低周波になるほど計測位置の違いによるバラツキが大きくなります。

### 問3

もうすぐフォースリミット振動試験ハンドブックが制定されるとのことですが、制定されたハンドブックを広く使ってもらうに、何か取り組みはされているのでしょうか。

### 答3

ハンドブックの内容は衛星設計標準検討委員会のワーキンググループで審議されているが、そのWGには衛星メーカー、ロケットメーカー、JAXAの有識者、JAXAプロジェクトのメンバがいます。このハンドブックの内容や意義については、そのWGの議論の中で周知されていると思います。また、試験センターではプロジェクト協力の業務も行っていますので、支援を依頼頂けば協力させて頂けると思います。

## 問 4

加速度リミットとフォースリミットという言葉の使い分けについて、2通りの意味で使い分けが必要と感じた。

1つは、試験の方法を言い表す場合に2つの言葉を使い分けられている場合がある。加速度をモニタしてリミットするので加速度リミットと呼ぶ。あるいは、フォースをモニタしてリミットするのでフォースリミットと呼ぶというような、ただ単に試験のやり方の違いを言い表す時に、2つの言葉を使い分けられている場合がある。一方、加速度に注目して制御をかけるのか、フォースに注目して制御を掛けるのか、試験法の違いを言い表すのではなく、試験に対する考え方の違いを言い表すために2つの言葉を使い分けられている場合がある。例えば、フォースリミットの考え方でリミット条件が整理されている場合でも、実際の振動試験時で、フォースと加速度の関係に着目しながら加速度でリミット制御を行う場合も有り得る。そのような振動試験を加速度リミット振動試験と呼ぶのかフォースリミット振動試験と呼ぶのか。2つの言葉の使い方には注意する必要があるのではと感じた。

それから、SDS-1の実例のところ、治具によって1次共振周波数がシフトした例を紹介したが、グラフを見るとピークがつぶれたことでシフトしたように見えるだけなのではないでしょうか。この現象は非線形現象によるものではないでしょうか。

## 答 4

前半のコメントに関しては、ご指摘ありがとうございました。後半のコメントに関しても、これは3軸加振した時のある1つの軸の例です。他の軸でも同様にピークのシフトが発生していて、ご紹介した簡易計算値と良く合う結果が得られています。今回の例については大きな非線形現象が発生しているとは考えておりません。ご紹介した周波数シフト量の簡易見積もり方法の妥当性については、この結果で確認できるのではと思います。