

発表 2.

振動試験におけるフォースリミット法及び 加速度リミット法

試験センター 長濱 謙太 開発員

振動試験における フォースリミット法及び加速度リミット法

宇宙航空研究開発機構
JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)
宇宙基幹システム本部 試験センター

長浜 謙太

1. 背景・目的

- 宇宙機の開発において実施される地上での振動試験は、実フライトの振動環境と比較して過負荷となる
- ロケットと衛星の柔結合解析(CLA解析: Coupled Load Analysis)をもとに入力加速度を制御し、振動試験時の過負荷を低減している(~100Hz)
- CLA解析が実施できない高周波領域の振動環境が定義される機器
(例: 搭載コンポーネント: 2kHzまでのランダム振動環境)
に対しては、有効な過負荷の低減方法が無い
- 海外では、試験時の過負荷を低減するため、高周波領域にも適用可能なフォースリミット振動試験法が一般的に用いられている
 - 日本では、フォースリミット振動試験の適用例が殆ど無く、一般化していない
 - フォースリミット振動試験を実施するためには、専用のセンサや治具等が新たに必要となる



加速度リミット値を見積もる簡易的な手法を検討した結果を報告

- リミット値算出に必要なパラメータは低レベル振動試験等で実測
- これまでの試験コンフィギュレーションで実施可能
(フォースリミット振動試験法のような専用のセンサや治具が、不要)

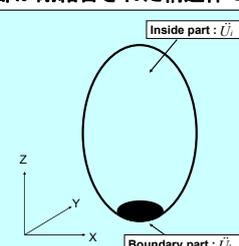


2. 理論背景

加速度リミット値の算出に、
 インタフェース部の加速度 に対する 供試体内部の加速度応答を表す伝達関数 を用いる

$$\begin{aligned} \frac{\ddot{U}_i(p)}{\ddot{U}_b} &= \phi_R(p) + \sum_{k=1}^n \phi_k(p) \ddot{q}_k \\ &= 1 + \sum_{k=1}^n \{ \phi_k(p) \} \frac{r_k^2}{(1-r_k^2) + j2\zeta_k r_k} \end{aligned}$$

一部が剛結合された構造体モデル



Inside part: \ddot{U}_i

Boundary part: \ddot{U}_b

Craig-Bampton法
 構造境界（結合）部と構造内部の関係を求める

CB変換式
 $\ddot{U}_i = \phi_L \ddot{q} + \phi_R \ddot{U}_b$

結合部と構造内部の加速度の関係
 $\ddot{q}_k = \frac{r_k^2}{(1-r_k^2) + j2\zeta_k r_k} \ddot{U}_b, (k=1,2,3,\dots,n)$



Japan Aerospace Exploration Agency
 Environmental and Structural Test Laboratory

第5回 試験技術ワークショップ
 2007.12.14(金)

3. 加速度リミット値の簡易計算法 (1/2)

Vib. Test config. → Max Value is @ $r_k=1$ ⇒ 供試体の共振周波数

$$\left| \frac{\ddot{U}_i(p)_{test}}{\ddot{U}_b} \right| = \left| \frac{\ddot{U}_i(p)}{\ddot{U}_b} \right|_{r_k=1} = 1 + \sum_{k=1}^n \phi_k(p) \frac{1}{r_k} \approx \sum_{k=1}^n \phi_k(p) Q_k$$

Flight config. → Max Value is @ $r_k = r_{cp}$

$$\left| \frac{\ddot{U}_i(p)_{flight}}{\ddot{U}_b} \right| = \left| \frac{\ddot{U}_i(p)}{\ddot{U}_b} \right|_{r_k=r_{cp_max}} = 1 + \sum_{k=1}^n \phi_k(p) \frac{1}{\sqrt{(1-r_{cp_max}^2) + (2\zeta_k r_{cp_max})^2}}$$

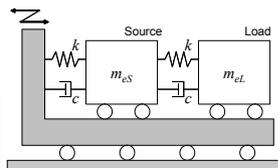
これらの式の比
 ↓
 地上試験とフライトの最大加速度応答の比
 (=実環境と比較して試験時に過負荷となる値)

ω_{cp} の見積もり

- ω_{cp} は右図の2自由度モデルで推定する
- ω_{cp} はSourceとLoadの有効質量の比の関数となる

$$r_{cp} = \left(\frac{\omega_{cp}}{\omega_0} \right)^2 = 1 + \frac{1}{2} u \pm \sqrt{u + \frac{1}{4} u^2}$$

$$u = \frac{m_{eL}}{m_{eS}}$$



Japan Aerospace Exploration Agency
 Environmental and Structural Test Laboratory

第5回 試験技術ワークショップ
 2007.12.14(金)

3. 加速度リミット値の簡易計算法 (2/2)

最終的に、
地上試験とフライトの最大加速度応答の比（=実環境と比較して試験時に過負荷となる値=加速度リミット値）は、
モードシェイプ、Q値、有効質量の関数となる

$$A_{Acc_reduction} = \frac{|\ddot{U}_i(p)_{flight}|}{|\ddot{U}_i(p)_{test}|}$$

$$= \frac{1}{\phi Q} + \frac{r_{cp_max}^2}{Q\sqrt{(1-r_{cp_max}^2) + (2\xi_k r_{cp_max})^2}}$$

第1項が十分に小さい場合
(=φQが十分に大きい場合)
は更に簡略化できる

$$\approx \frac{r_{cp_max}^2}{Q\sqrt{(1-r_{cp_max}^2) + (2\xi_k r_{cp_max})^2}}$$



Japan Aerospace Exploration Agency
Environmental and Structural Test Laboratory

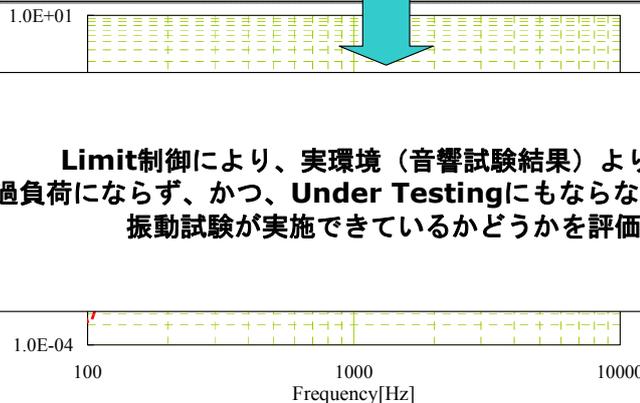
第5回 試験技術ワークショップ
2007.12.14(金)

5

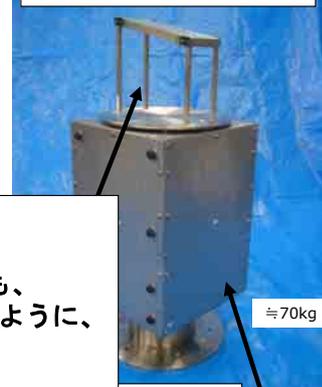
4.1 実験によるリミット手法の比較・検討

- 小型衛星模擬供試体の音響・振動試験- (1/5)

1. 結合状態で音響試験を実施
=フライトコンフィギュレーション(実環境)の加速度応答
2. 供試体単体でランダム振動試験(3通り)を実施
=Limit無し、加速度Limit、フォースLimit
3. ランダム振動条件は、取付I/Fの音響試験時の加速度応答値を包絡するように設定



音響試験コンフィギュレーション



load)
小型衛星模擬供試体
(Source)



Japan Aerospace Exploration Agency
Environmental and Structural Test Laboratory

第5回 試験技術ワークショップ
2007.12.14(金)

6

4.1実験によるリミット手法の比較・検討 - 小型衛星模擬供試体の音響・振動試験- (2/5)

加速度リミット振動試験

- ・ 低レベルの正弦波振動試験を実施して、パラメータを実測 (Q, 有効質量)
- ・ 供試体の1次共振周波数 (290Hz) における過負荷を低減する



加速度リミット値の計算結果

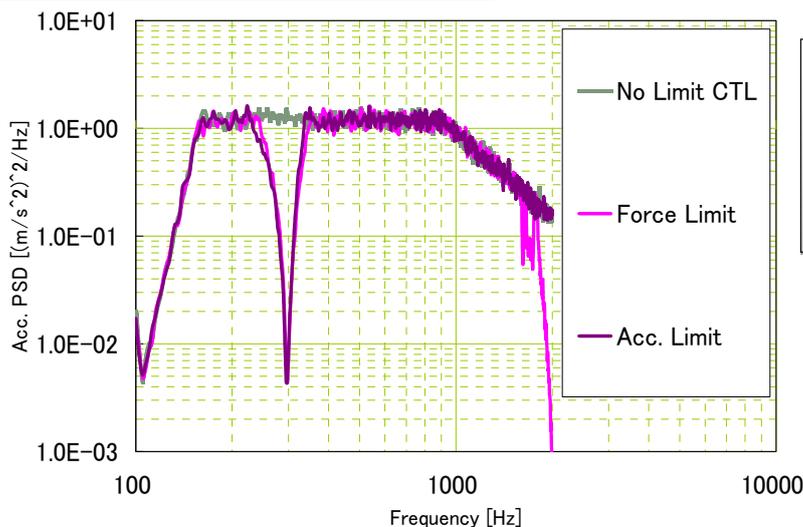
M_L [kg]	f_1 [Hz]	Q	m_{eL} [kg]
9.2	290	67	7.6
$m_{eS} (= M_s)$ [kg]	m_{eL} / m_{eS}		Acc Reduction [dB]
26	0.3		-26 dB @290Hz

フォースリミット振動試験

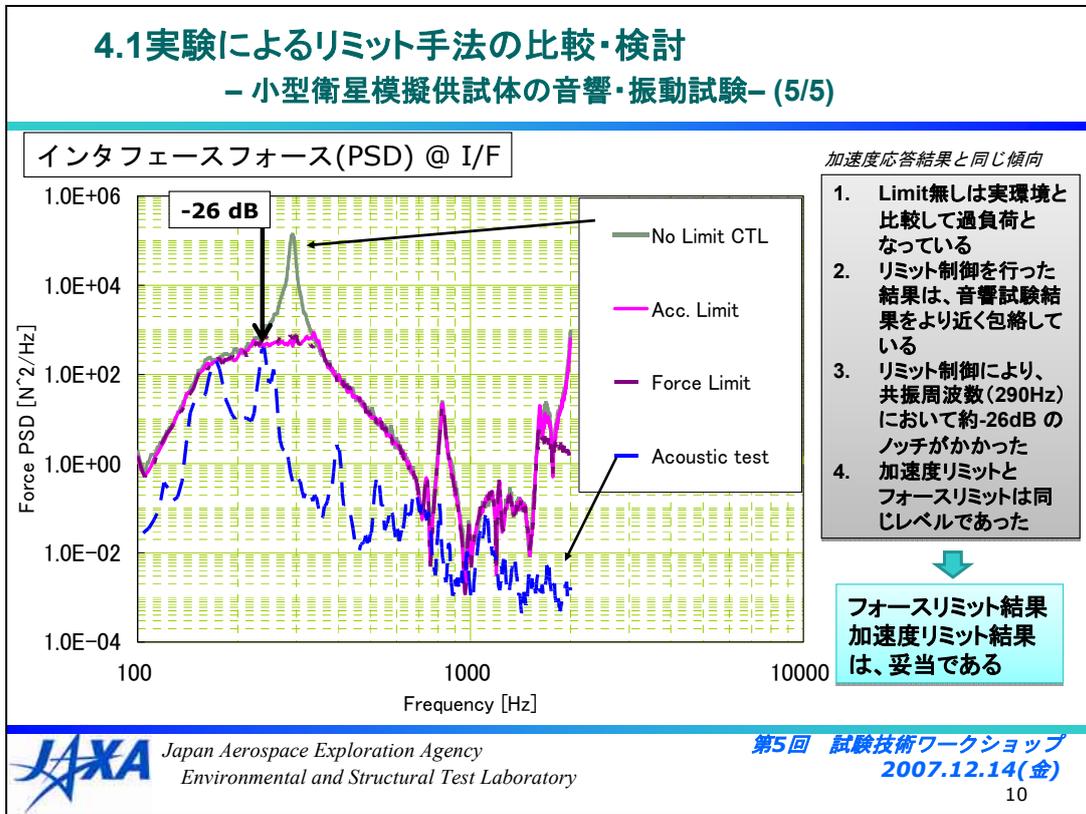
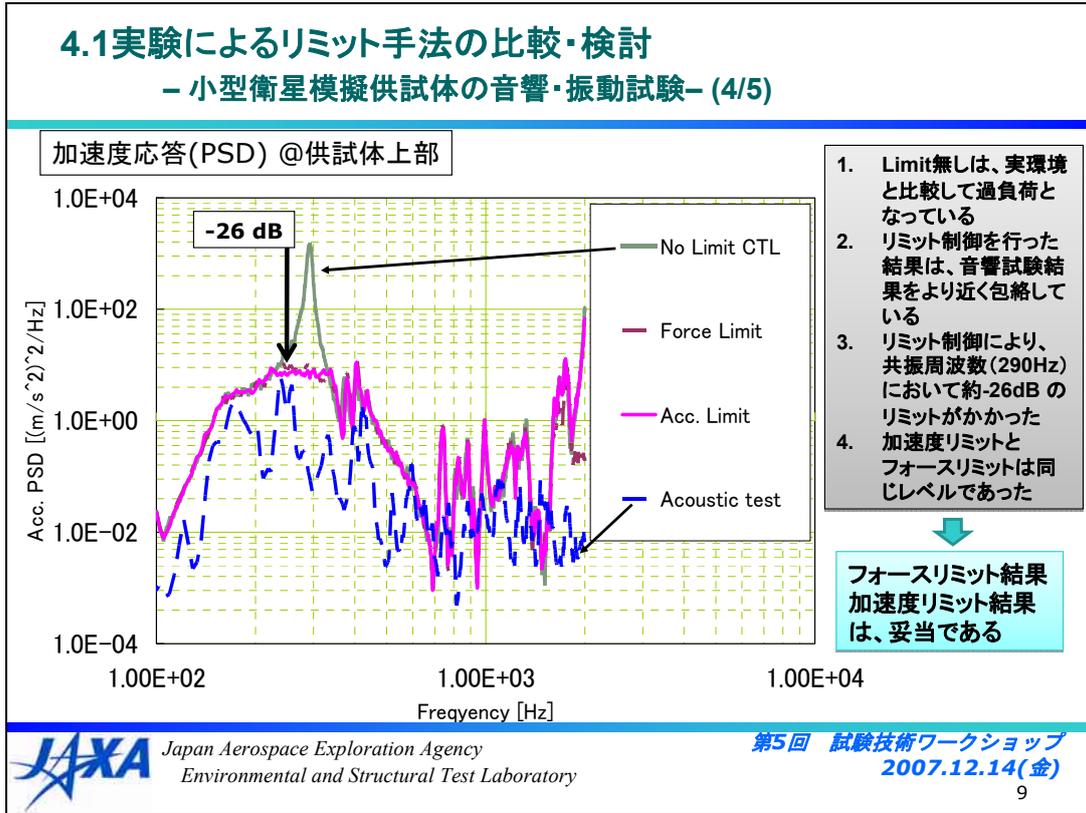
NASAのフォースリミット振動試験HDBKに規定されている方法を用いて実施

4.1実験によるリミット手法の比較・検討 - 小型衛星模擬供試体の音響・振動試験- (3/5)

加速度応答(PSD) @ I/F部(CTL Acc.)



1. リミット制御により、共振周波数(290Hz)において約-26dBのノッチがかかった
2. 加速度リミットとフォースリミットは同じレベルであった



4.2.試験結果による加速度リミット値の妥当性確認

- 衛星搭載コンポーネントの音響・振動試験 - (2/4)

Satellite-X	5,800 kg (= M_S)
Component-A	7.25 kg (= M_{La})
Component-B	54 kg (= M_{Lb})

“ m_{es} ”はFEM (~95Hz) 解析結果より求めた



ここでは、“ m_{es} ”は95Hz以上の剰余有効質量に等しいと仮定 (安全側)

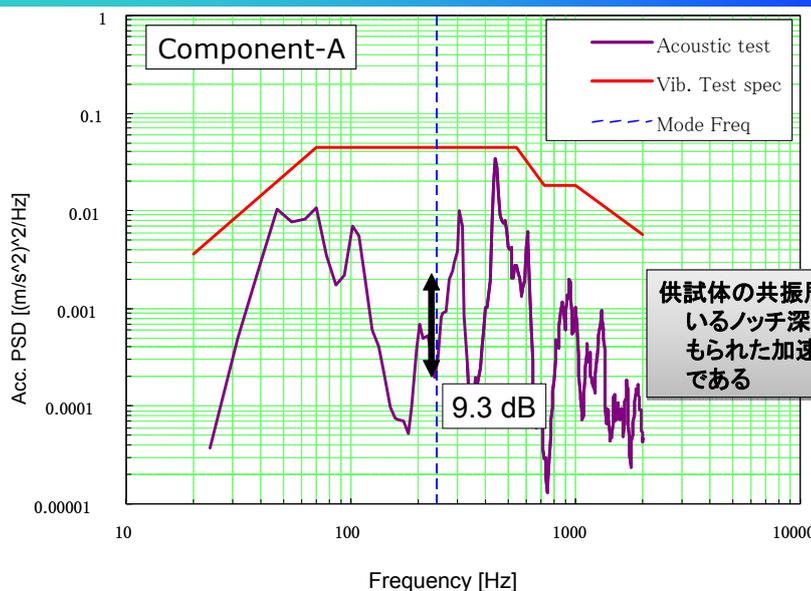
	Component-A	Component-B
f_1	95 Hz	180 Hz
Q	15	5
m_{es}	290 kg	290 kg
m_{eL} (= M_L)	7.25 kg	54 kg
m_{eL} / m_{es}	0.025	0.186
Acc Reduction	-8.9 dB	-9.38 dB

その他のパラメータは、コンポーネント単体の振動試験より実測した値を用いた



4.2.試験結果による加速度リミット値の妥当性確認

- 衛星搭載コンポーネントの音響・振動試験 - (3/4)

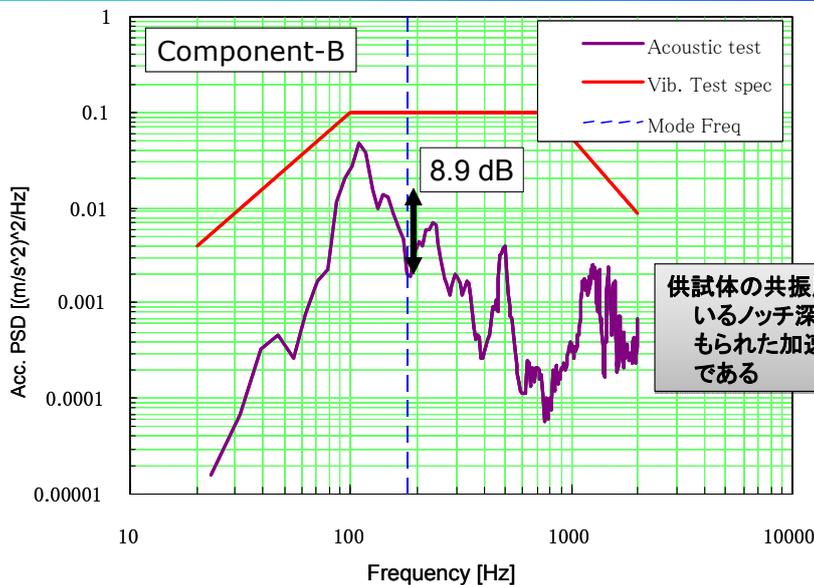


供試体の共振周波数に発生しているノッチ深さと比較して、見積もられた加速度リミット値は妥当である



4.2.試験結果による加速度リミット値の妥当性確認

- 衛星搭載コンポーネントの音響・振動試験 - (4/4)



Japan Aerospace Exploration Agency
Environmental and Structural Test Laboratory

第5回 試験技術ワークショップ
2007.12.14(金)

14

5. まとめ

- 振動試験における、簡易的な加速度リミット値の設定法を提案した
- 提案の方法により求めたリミット値の妥当性を実験的に検証した (音響試験結果(正解値)、及び、フォースリミット振動試験結果と比較)
- 提案した簡易的な加速度リミット値の設定法は、以下の特徴がある
 - CLA解析が出来ない高周波領域の振動試験に対してリミット値を定義することができる
 - フォースセンサを使用しなくても、フォースリミット振動試験法と同等の結果をえることができる(試験コンフィギュレーションが複雑にならない)
- 但し、以下の点については注意が必要である
 - 加速度リミット用の観測点として、リミットを行う振動モードの加速度応答が大きく得られる場所を選択する必要があるが、供試体の状況によっては適切な場所に加速度センサを取り付けることが出来ない可能性がある
 - 観測点以外の機器について、過負荷を低減することが出来ない可能性がある
- 本発表で提案した手法を含めた、フォースリミット振動試験ハンドブックを作成していく予定(JAXA共通技術文書として)



Japan Aerospace Exploration Agency
Environmental and Structural Test Laboratory

第5回 試験技術ワークショップ
2007.12.14(金)

15

質疑応答

質問者①

問1：背景についてお聞きしたいのですが、CLA 解析が実施できない高周波領域とありますが、高周波領域で CLA 解析が実施できない理由を教えてください。

答1：高周波になりますと、モードの数が非常に多くなりますので、計算の負荷や時間の問題、それからモデルの検証もなかなか難しい、などの理由から、高周波の解析をきっちり現実とあわせこむことが難しいのです。何らかの解析結果が出てくることは出てくるとは思いますが、それを意味のあるものにしていくというのも非常に負荷のかかる作業ですし、あまり現実的ではないと思います。もし私の説明で間違えていたらどなたかに補足していただきたいのですが。

(特に捕捉はなし)

質問者②

問2：以前何回か外部の発表で、フォースリミットの適用の対象としては、リアクションホイールのような構造物とカップリングを生じやすいコンポーネントで、かつ寿命など条件がセンシティブ（繊細）なものが、一番対象としやすいのではないかというようなことをうかがったことがあるのですが、その後、そういったことに対する対策がとられた事例はありますか。試験センターにいくつか相談がもちこまれているのではないかと思います。そういったような事例があれば積極的に対応していただいて、過負荷を加えずにフォースリミットを適用していけるような方法が確立できればいいなと思っています。

答2：はい、ありがとうございます。そういう相談があれば是非前向きに対応させていただきたいと考えております。具体的な事例につきましてはまだそれほど多くはありませんが、一部のバッテリー等に関して対応した実績はあります。リアクションホイールに関しましては実績はありませんが、今後ハンドブック等も整備していきますので、フォースリミットを一般的に適用していただけるように話を進めていきたいと思っています。

質問者：特にリアクションホイールのようなものは内部のローテータの慣性力が大きいので、一番動きを把握しなければいけないのですが、実際その中に加速度センサを取り付けて、加速度を測るといったようなやり方がかなり難しいということが分かっています。そういう意味では、フォースゲージを使って内部の応答をある程度推定するなど、結構高度なテクニックが必要だと思います。是非、画一化していただきたいと思っています。

発表者：はい、わかりました。具体的な課題を出していただきますと、進むべき方向性も見えやすくなります。今後とも宜しくお願いいたします。

質問者③

問3：素人質問で恐縮なのですが、いまの方がリアクションホイールのことをご質問をされてましたが、私も「はやぶさ」についてずっと取材をしておりましたので、はやぶさのリアクションホイールのことは大変詳しく取材をさせていただいたのですけれども、今後、例えば振動試験の立場から、実際はロケットの振動自体は低減できないかもしれませんが、リアクションホイールを改造する等、そのような具体的な案はございますでしょうか。例えば、はやぶさの場合はちょっと特殊に改造したリアクションホイールがかえって裏目に出た、ということをお聞きしておりますが、今後そういうことに生かせる方法が振動試験に関しましてなにかございましたらお教え下さい。

答3：私の知っている範囲で回答になるか自信は無いのですが、お答え致します。リアクションホイールに限らず、衛星の搭載機器に規定されている耐振動レベルに対して、システム側の設計の結果、機器を搭載する実振動環境が規定の耐振動レベルよりも高くなってしまふことが少なからず発生します。そのような場合は、 ΔQT という再振動試験を行って耐振動性を再確認したり、あるいは、機器そのものを改造して耐振動性能を向上させるといった追加の作業が必要になってきます。ここで、振動試験レベルを低減して機器に対する過大な負荷を少しでも低減することができれば、このような追加の作業が発生するリスクも低減することが出来ると思います。このような観点で、我々の業務も衛星開発へ貢献していけるのではないかと考えております。

質問者：もちろん打上げ前にいろいろ試験をされていると思いますが、従来の方ですと結構負荷がかかるような試験だったのでしょうか。私は具体的に良くは存じ上げないのですが、今後負荷の少ない、またはかからない試験方法というのは有りうるのでしょうか。

発表者：振動試験時は、打上時の搭載コンフィギュレーションよりもどうしても過負荷になってしまいます。まさにそれをなんとかしようという対策がフォースリミットであったり、今回提案して検討した方法だったり致しますので、この成果については、今後研究レベルにとどまらずに JAXA の共通の知識・技術としてまとめていきたいと考えております。

質問者：ちなみにはやぶさは旧宇宙研のミッションですけれども、いまは JAXA が一つになったので、双方が合流して、そういう科学ミッションにおけるリアクションホイールについても、今ご指摘されたような負荷の多いテスト方法の開発についてなど、少なくとも

こういう場で話し合っていらっしゃるのでしょうか。

発表者：技術ハンドブックなどを検討・審議している委員会があります。この委員会は、JAXAの科学本部や他の本部はもちろんのこと、メーカーさんも含めて皆で議論をする非常に有意義な場になっています。そういう場で議論したものが、どんどん技術文書として設定に向けて動き出しています。試験方法に関する技術的な交流というものはあるとあって良いと思います。

質問者④

問 4：「まとめ」のところで、供試体の状況によっては適切な場所が観測できない場合と書いてあるのですが、どういう状況の時に観測できないのですか。

答 4：先程の「質問者②」さんのご発言にもありましたように、リアクションホイールの内部のホイール等が有効であるような大きい具材だとしても、本当はそこに加速度センサをはってリミットを調べるのが一番なのですが、必ずしもはれない場合もあるということも考えられますし、その機器の状況によっては見たいところにセンサがはれないという場合もあります。

質問者：では、センサがはれない場所は観測できないということですか。

発表者：はい。そういう場合はやはり根元のフォースを測ってフォースリミットを適用するなど別の方策は考えられるのですが、少なくともいま検討しました加速度リミット法に関しましては、一番観測したいと思っているところに貼れないと限界があるのではないかと、ということで、そのように書いております。

質問者：ということは、センサが貼れることができれば、観測できる、と理解すればよいのですか。

発表者：できます。