

### 6.3. 衛星システム正弦波振動試験の全容と 機械環境に関する今後の課題

宇宙航空研究開発機構

第一宇宙技術部門

GCOM プロジェクトチーム

安藤 成将 氏

# 衛星システム正弦波振動試験の全容 と機械環境に関する今後の課題



第16回試験技術ワークショップ

2018/11/28

JAXA GCOMプロジェクトチーム

安藤 成将

1

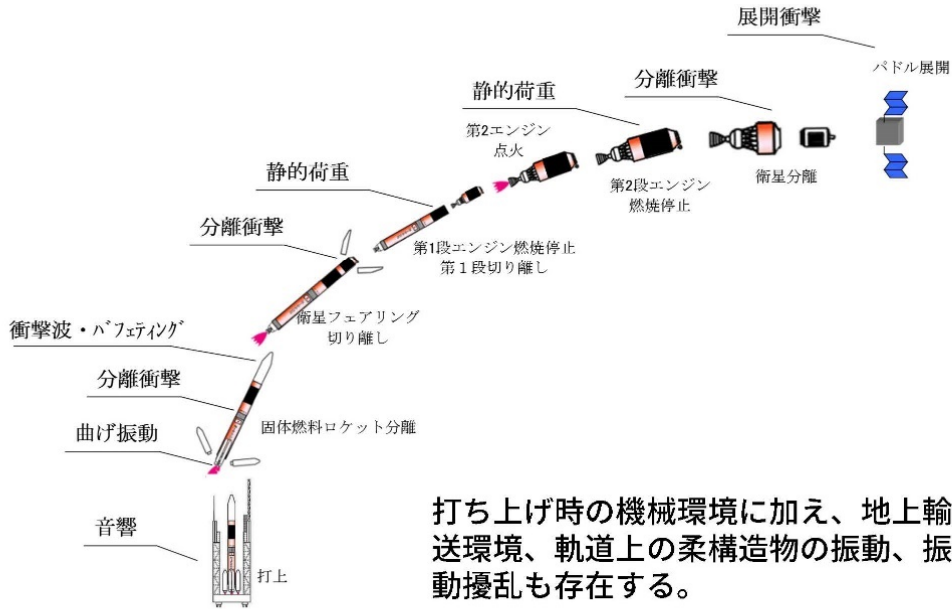
## 発表内容

2

- ▶ 人工衛星の機械環境
- ▶ 固有振動数の分離
- ▶ なぜ、正弦波振動なのか
- ▶ システム正弦波振動の試験風景
- ▶ 試験条件
- ▶ 試験の流れ
- ▶ 正弦波振動試験で検証できるもの
- ▶ 素朴な疑問1：加振方向
- ▶ 素朴な疑問2：加振波形
- ▶ Step1：CLA結果評価
- ▶ Step2：試験前解析
- ▶ Step3：試験の実施
- ▶ Step4：結果の評価
- ▶ まとめると
- ▶ 機械環境に関する今後の課題
- ▶ まとめ

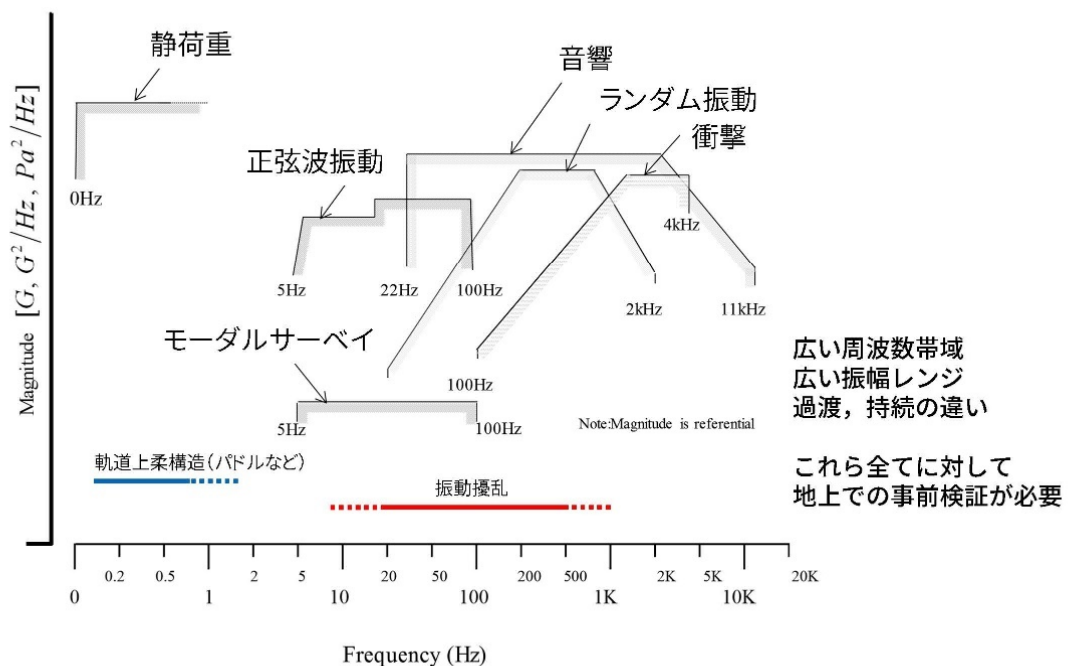
# 人工衛星の機械環境

3



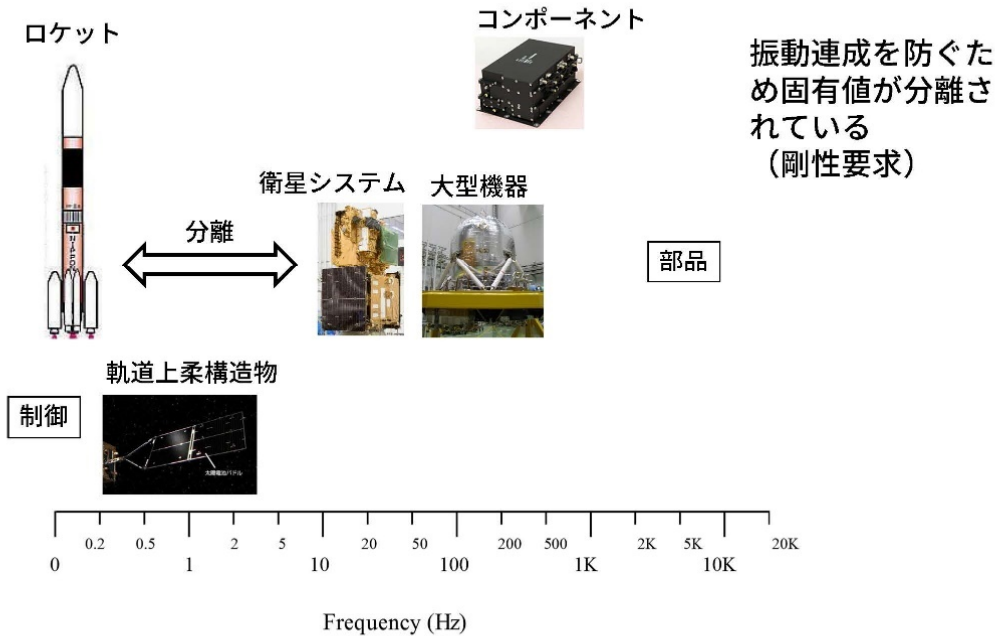
# 人工衛星の機械環境

4



## 固有振動数の分離

5



## なぜ、システム正弦波振動なのか？

6

- ▶ 機械環境試験の中で最も複雑で長い日数(2~3週間)
  - ▶ ロケット側との密なインタフェースを要する
  - ▶ 試験レベル設定と印加実績評価に解析が介入してくる
  - ▶ 加振波形が打上げ時と全く異なる
  - ▶ 打上げ時(柔)と試験時(剛)の境界条件の違いによって、完全には試験目的を完遂することが難しい
  - ▶ 供試体非線形、加振制御性の制約の中でベストエフォートを目指すという点に大きな特徴
- このことから、衛星システムの正弦波振動試験について理解が進みにくいのが現状。

## システム正弦波振動の試験風景

7



GCOM-C「しきさい」PFT正弦波

- ▶ 数十トンの加振力を持つ加振機を使用し、加振台上に設置
- ▶ モニタする加速度センサは数百チャンネル(必要に応じて歪ゲージ)
- ▶ 加振台上の加速度センサで制御するが、共振点では、衛星内部の応答を見て加振力を制限する

## 試験条件

8

H-IIAロケット正弦波振動条件(往復掃引)

(1) 機軸方向			
5 ~	30Hz	に対して	9.81m/s <sup>2</sup> <sub>0-P</sub> (1.0G <sub>0-P</sub> )
30 ~	100Hz	に対して	7.85m/s <sup>2</sup> <sub>0-P</sub> (0.8G <sub>0-P</sub> )
(2) 機軸と直角方向			
5 ~	18Hz	に対して	6.86m/s <sup>2</sup> <sub>0-P</sub> (0.7G <sub>0-P</sub> )
18 ~	100Hz	に対して	5.88m/s <sup>2</sup> <sub>0-P</sub> (0.6G <sub>0-P</sub> )

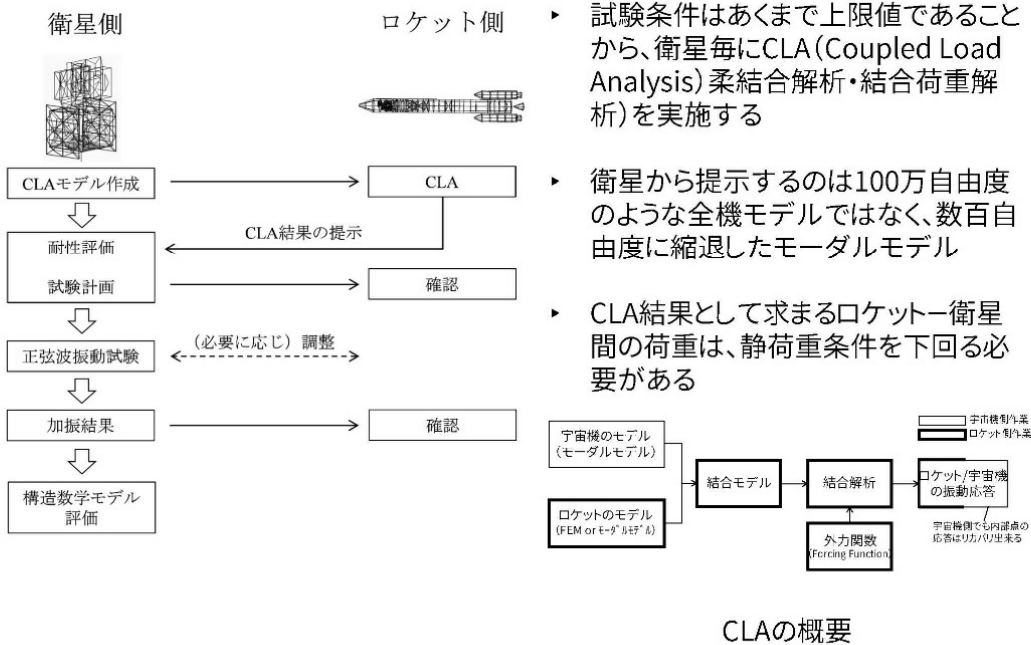
主な静荷重条件[G]		
	機軸	機軸直交
打上時	-4.0	0.5
MECO	-3.2	1.8

- ▶ この試験条件は、打上げ直後の風荷重解放、固体ロケットの点火ズレ、突風層通過時の横風等により励起されるロケット機体の曲げ振動、衛星分離時振動、及び液体推進系と構造系の連成振動などの環境を代表するもの。
- ▶ 但し、これはあくまで、様々な形態の衛星を想定した上限値なので、このレベルで加振すると衛星の主構体は破壊されてしまう

### 【簡単な見積もり計算】

衛星の1次固有振動モードにおけるみかけ質量  $M_{rig} = Q\hat{m} = 30 \times 0.3M = 9M$  (典型値)とすると、0.7Gで加振すると、 $F = M_{rig}A = 9M \times 0.7G = 6.3MG$ となって、静荷重の1.8MGをはるかに超過して壊れてしまう → **CLAやノッチングの必要性**

# 試験の流れ



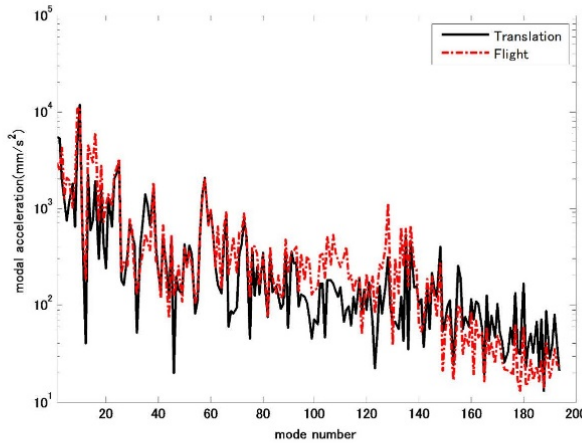
# 正弦波振動試験で検証できるもの

- ▶ セントラルシリンダやシアパネルなどの主構造(一次構造)ではなく、大型機器を支える二次構造の強度を検証する
- ▶ 太陽電池パドル、タンクなどの大型機器の耐振動性を検証する  
(静加速度 < 正弦波加速度)
- ▶ ハーネスのはいまわしや緊締具(ボルトやネジ)の締結の確認、即ち衛星システムとしての艤装認定を行う
- ▶ コンポーネントは、120Hz以上の剛性要求のため、ランダム振動の方がクリティカルで正弦波は比較的穏やか(但し、緩衝器などを有するコンポーネントや機構品は除く)

## 素朴な疑問1：加振方向

11

Q. 打上げ時は回転も含む6自由度なのに試験は単軸でよいの？



- ▶ 1つは設備の制約が原因
- ▶ CLA結果を用いて、全ケースのモード加速度包絡値と、CLA結果で得られる並進単軸加速度で衛星を加振したモード加速度包絡値を比較
- ▶ 殆どの振動モードで単軸が包絡している

→ 単軸で十分であろう

中型衛星の例

## 素朴な疑問2：加振波形

12

Q. 加振波形は打上げ時と異なってもよいのか？

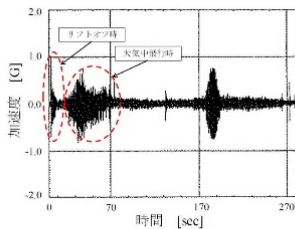
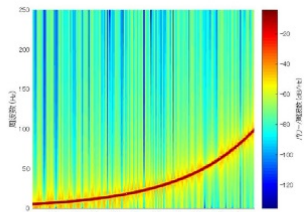


図 2-2 打上げ時計測データの一例 (DC成分除去)

打上げ時振動データ  
(振動試験ハンドブックより抜粋)



加振波形のFFT

加振波形は対数掃引

$$\text{加速度 } a(t) = a(f) \sin(2\pi f t)$$

$$\text{周波数 } f(t) = 5 \times 2^{nt/60} \text{ で往復}$$

$$n = \text{oct}/\text{min}: \text{1分あたりに周波数を} 2^n \text{倍}$$

- ▶ 対数掃引は、単位周波数当たりの振動回数が一定であるという意味を持つ。2oct/minであれば、周波数によらず、単位周波数当たり43回
- ▶ 各モードに対し均等な回数だけ加振を行い、共振モードで大型機器に荷重を印加する
- ▶ 但し、純粹正弦波ではないため、高調波を含むことに注意

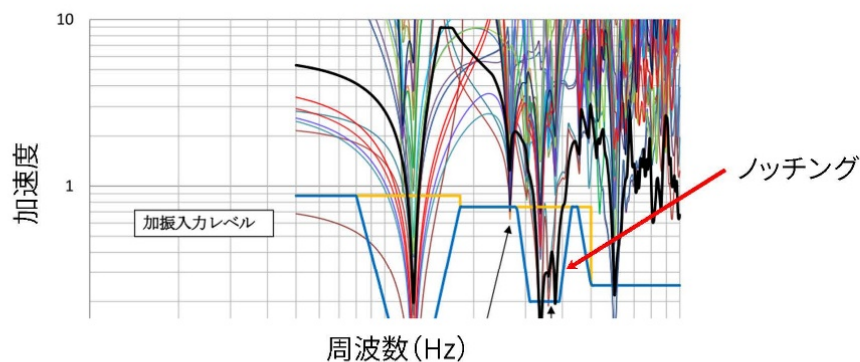
## Step1 : CLA結果評価

13

- ▶ CLAはロケット側が行い、各外力ケース毎に衛星内部点加速度の瞬時最大最小値、衛星分離部下端の加速度、荷重などが出力される
- ▶ CLA出力の大型機器の重心相当加速度(=荷重)を1.25倍し、衛星振動モードの不確定性の係数も乗じて、衛星側で耐性評価を行う。
- ▶ 搭載コンポーネントの加速度の耐性評価
- ▶ 耐性が確認出来ない場合は、衛星の全機有限要素モデルにCLA出力時系列を入力した過渡応答解析による時系列安全余裕評価にまで至るケースもある。

## Step2 : 試験前解析

14



- ▶ 衛星側の有限要素法モデルを用いて、先に示した正弦波振動条件を1.25倍し、大型機器の重心相当加速度がCLAの1.25倍を超過しないような加振プロファイルをとてる(上図)
- ▶ この加振プロファイルによる強度解析も必要(CLAと試験時の境界条件の相違による)



## Step3：試験の実施

15

- ▶ Step2で加振プロファイルは完成しているがあくまで計画。現場での伝達関数によるプロファイル作成を逐次行う。
  - 振幅に依存した伝達関数の非線形性
  - 振動試験設備の制御性(共振峰は急峻で追従困難)
- ▶ 伝達関数の非線形性のため、段階的に試験レベル上昇  
[1/2, 2/2], [1/3, 2/3, 3/3], [2/5, 4/5, 5/5]などの流派がある
- ▶ 非線形性は特に機構品に顕著(ガタを超えて突然の剛性発揮など)
- ▶ フライト品の場合は、フルレベル加振時には、打上げ時にONする機器を立ち上げた「打上げモード」に設定し試験を行う
- ▶ 各軸の最初と最後には、低レベルの特性加振(Signature Test)を行い、伝達関数を見て異常の有無を検出する。
  - 締結ネジの緩み・脱落の検出
  - 供試体の破損

## Step4：結果の評価

16

- ▶ 伝達関数に有意な変化はないか
- ▶ 大型機器の重心相当加速度の印加状況の確認
  - 重心相当加速度は直接計測出来ず、解析も使って評価
  - 1つの機器のみ目標レベルに到達し、他が未達のケース有り(ベストエフォート)
- ▶ 構造数学モデルの評価(CLAに供したモデルは妥当だったか)
- ▶ ロケット側への加振結果の報告
- ▶ 打上げ後には・・・ロケット側から加速度テレメトリの解析フライト後評価が示される。フライト結果がCLA結果に包絡されていることを確認する。

CLAに対する到達率の例

		最大到達率
A	X	87%
	Y	31%
	Z	118%
B	X	112%
	Y	31%
	Z	91%
C	X	90%
	Y	36%
	Z	41%
D	X	129%
	Y	14%
	Z	37%
E	X	106%
	Y	78%
	Z	73%
F	X	109%
	Y	90%
	Z	117%

## まとめると

17

- ▶ 正弦波振動環境は、ロケットと衛星の連成振動問題のため、CLAが必要でその解析結果を目標とする試験である。
- ▶ しかし、フライト時との境界条件の違いと単軸加振の制約から、大型機器に同時に目標加速度を印加することは極めて困難で、ベストエフォートで試験印加することが実態となっている。
- ▶ 但し、他の機械環境試験で検証出来ない大型ハーネスの艤装の検証や、大型機器 → 二次構造 → 一次構造へのロードパスの強度検証の意味は十分有している。

## 機械環境に関する今後の課題

18

### 音響とランダム振動

- ▶ 音響励起ランダム振動の予測は長年の難しい問題
  - 2000年代にSEAとFEMを融合したHybrid法が開発(量子力学のアプローチを振動音響系に適用しランダムマトリクスの理論式を活用し構築された)
  - 他分野(車、航空機)でのHybrid法の適用は進んでいるが、宇宙機分野は普及したとは言い難い
- ▶ AIの活用や、気象分野のデータ同化などが適用できないか
- ▶ コンポーネント開発で発生するランダム振動時の疲労破壊についての設計解析による未然防止

## 機械環境に関する今後の課題

19

### 衝撃

- ▶ ロケット-衛星分離機構はマルマンクランプバンドが多くなっていること、太陽電池パドル保持解放機構の低衝撃化などにより、Shock-free or Low Shockがトレンド
- ▶ 衝撃試験省略の基準の明確化が必要
- ▶ コンポーネントの衝撃試験は、ハンマリングが一般的で、試験公差の満足が難しく、試験装置の開発が急務
- ▶ 音響と同様に予測は、極めて困難なのが現状 (VMS, NASA 経験式はある)

## 機械環境に関する今後の課題

20

### アライメント

- ▶ 環境試験前後の指向軸を持つコンポーネントの変動モニタとしてのアライメント測定
- ▶ これに加え、観測センサの各画素と恒星センサ (STT) の相対アライメント値は、観測画像の画素地表位置精度の鍵
- ▶ 重要にもかかわらず、設計標準文書にアライメントに関する記述が不足している (Triad法、Euler角法など)。アライメントを含め、試験ハンドブックの一層の充実を期待。

## 機械環境に関する今後の課題

21

### 失われていく試験技術と新たな試験技術

- ▶ 衛星構体の静荷重試験、大型回転機器の動バランス試験（慣性乗積をゼロにしたい）は、昨今、非常に少なくなっている。
- ▶ 一方で、衛星への高解像度要求の高度化に伴い、振動擾乱試験、熱歪試験がシステムレベル試験として非常に重要になってきている。しかし、制御が関連したり、Mission Specificな試験が多く、一般化・標準化が難しいのも事実。一番の問題は、解析で保証できない中・高周波の擾乱問題で、構造の本来的不確定性（構造のランダム性）のため、フライト品を作るまで分からない。リスクを段階的に減らしたいプロジェクトとしては悩みの種になっている。

## ま と め

22

- ▶ 本講演では、正弦波振動試験の実態と、機械環境試験に関する今後の課題について考察した。



GCOM-C「しきさい」の撮像したバハマのCoral Reef

## 質疑応答

### 質問者① 株式会社セルスペース 世古様

機械環境の全容や今後の課題について簡潔に整理して頂きまして誠にありがとうございます。正弦波振動試験について、ご発表でもありました通り、中々分かりにくい試験という部分もありまして、正弦波振動試験で確認すべきところは何なのか、出来ることは何で出来ないことは何になるのかということを知りたいというのは非常に重要なことだと考えております。その中で、システム振動試験で出来ないところは、コンポーネントの試験で検証し、システム試験ではそのすべてをつなぎ合わせて検証するというので、そういった観点で整理するのが重要だと思います。

それから、正弦波振動では特に導波管等、中途半端に剛性を持って荷重パスになってしまうようなところに関しては、解析でも中々モデル化されていない部分で、そこは正弦波振動試験で実際に検証しなければ分からない部分になるかと思えます。また、発表でアライメントに関するお話もありましたが、正弦波振動試験前後での確認結果を基にアライメントの妥当性を確認するという部分もありますので、そこからスペクトルの関係性等を統計的に整理していけば正弦波振動の要件等もより明確になるのではないかと思います。以上コメントになります。

### 発表者

どうもありがとうございます。私の講演で足りない部分も補足頂きましてどうもありがとうございました。まさしく、正弦波振動試験は、最終形態で行うというところに非常に大きな意味があって、搭載機器でも、フラットなテーブルの上で加振してきているだけでございますから、いわゆるシステム上に搭載されてシステムモデルと連成した場合、例えば機構品であればアライメントとしての変化が変わるのかどうか等、そういった最終状態の検証というのは非常に重要だと考えております。はたまた、出来ること出来ないことがあるというのも実際のところでございます。その辺に関しては設計標準の活動等の中で、ぜひ議論を深めていきたいと考えております。

### 質問者② JAXA 環境試験技術ユニット 施様

現場の生々しい実態をご発表頂きまして誠にありがとうございます。その中に、ベストエフォートという言葉がございましたが、CLA に対する到達率が 1.25 倍に至るものや 3~4 割程度しか到達していないもの等様々なものに対してベストエフォートとして対応しているということで、JAXA の試験標準あるいは設計標準としてはもしそのような共通的な評価方法・評価ポイントがあれば皆さんとぜひ委員会で議論させて頂いて反映をしていきたいと思っていますのですがご意見いかがでしょうか。

### 発表者

中々、設計標準文書にベストエフォートと記載するというのは難しいところがあるかと思えます。やはり結果的に正弦波振動試験の性質としてベストエフォートになっている、というのがございますけれども、ベストエフォートはなぜ許されるのかという観点に立ちますと、下位のサブシステムもしくはコンポーネントで十分に検証されている、もしくは製造の工程として確立されている、というベースがあってこそベストエフォートというものが成立し得るのだと思えます。逆に、ベストエフォートの観点で言うとこれ以外の試験であるのかというのが思うところで、大体その他の試験というのは過剰な試験、ランダム振動試験に関してもそうですし音響試験に関してもそうですし、そういった意味で、本日の講演でベストエフォートの試験があるんだというのをお伝えすることが出来たかなと思えます。

### 質問者③ 三菱電機株式会社 吉田様

ご講演どうもありがとうございました。こういった正弦波試験、100Hz 以下を対象とするような試験なのですが、人工衛星がだんだん大きくなるにつれて地上の構造物というか建物に近いようなものになってきてその固有振動数もそれらに近いものになってきていますが、そういった日常構造物に比べて人工衛星は非常に高価なものであると考えております。美しい構造物を造って、そのような振動や音響に耐えられるようなものを造るというのはゴールではあると思うのですが、それに関わる試験であるとか開発に係るコスト、そういうものを考えると、地上構造物で、例えば耐振の技術等で使われているようなロケット側で免振や制振をする等、そういったことでコストを比較するとそちらの方が安くなるというような、そういったことは検討されていますでしょうか。

### 発表者

衛星側の者としましては直接的に回答するのは難しいのですが、衛星の中で言えば振動擾乱という課題が出てきていて、そこに対してアイソレータであるとかそういった装置が出てきていて、従来であれば設計解析で何とかしていたのが構体として設計で考慮していくもしくは制振していくというようなそういう時代になってきているというのは事実だと思います。ロケット側でもやはりだいたい環境の低減というところで、最近ローショックのデバイスであるとかそういったものも取り入れられてきていると思っております。