



第7回試験技術ワークショップ No.1

SEA法を用いたランダム振動予測解析

平成21年11月13日

川崎重工業株式会社
宇宙・誘導機器設計部
宇宙機器設計課

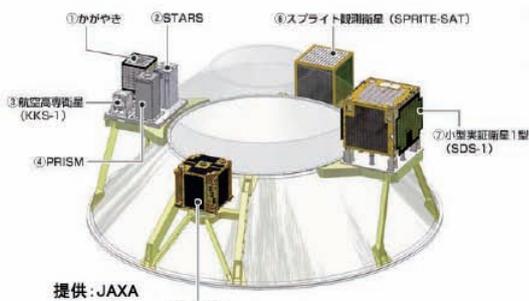
1

背景・目的(1/2)



我が国の小型衛星打ち上げ方針として、

小型副衛星は、民間企業、大学等が製作する小型衛星に対して容易かつ迅速な打ち上げ・運用機会を提供する仕組みを作り、
我が国の宇宙開発利用の裾野を広げるとともに、
小型衛星を利用した教育・人材育成への貢献を目的とし、
打ち上げ能力の余裕を活用して打ち上げるものです。
(JAXA HPより)



現在の小型衛星ランダム振動環境は厳しく、
宇宙産業への新規参入の
ハードルの一つとなっている。

ちなみに、大型衛星は
受圧面積が広いため、
内部音響標定となる。

より多くの機関に打ち上げ機会を提供するためには、
小型衛星ランダム振動環境の緩和が求められる。

2

背景・目的(2/2)



KHIではこれまで、
SEA(統計的エネルギー解析)およびFEM(有限要素法)を用いた内部音響予測手法を確立



SEAを用いた予測解析ではフェアリング内部音響およびフェアリングパネル一般部のランダム振動は精度よく予測可能
⇒設計ツールとして使用



フェアリング内部構造のランダム振動レベル予測は未実施



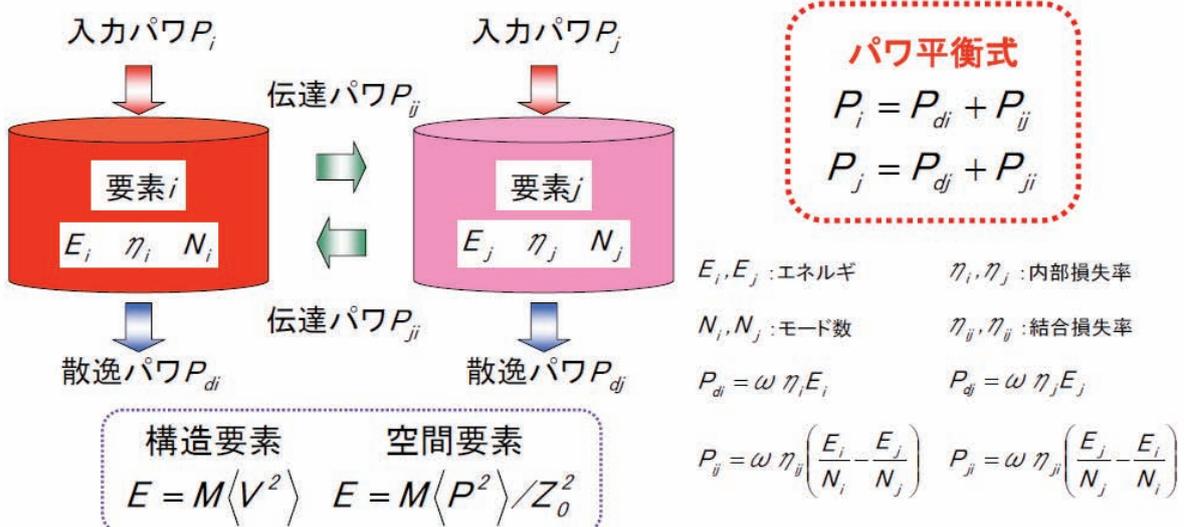
SEAを用いた『**小型衛星搭載部のランダム振動予測技術を確立する**』
ことを目的として実施したJAXA殿委託研究の成果を報告する。
また、『**小型衛星ランダム振動環境の緩和に向けた方向性**』
を明らかにする。

予備知識(SEA理論の概要)

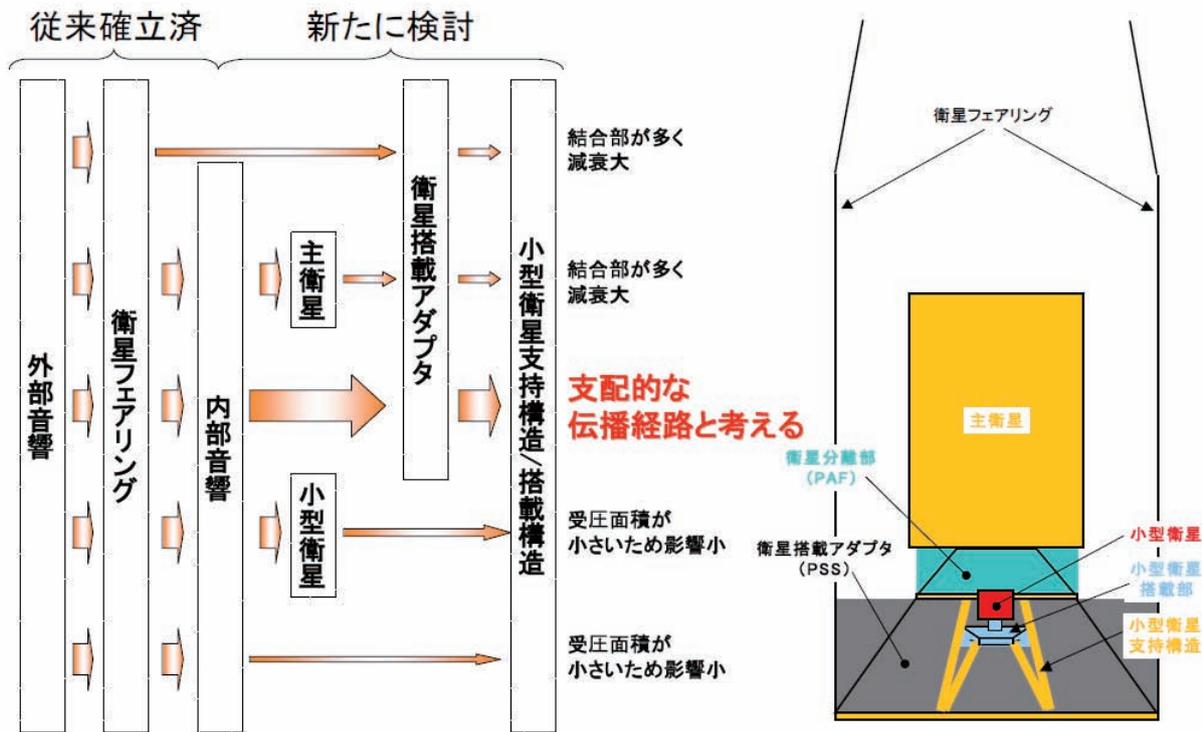


SEA(統計的エネルギー解析)法とは、系の状態を物理系に共通なエネルギーで表現し、
入力/伝達/散逸エネルギーのパワ平衡に注目し、要素間のエネルギー伝達を推定するもの。

高周波数領域の予測解析に適している



予備知識(エネルギー伝播経路)



作業フロー



下部フェアリングEPMを用いた音響試験結果を再評価し、
小型衛星ランダム振動環境に関する知見を取得



音響試験形態をSEA法を用い予測し、
試験結果との比較により各SEAパラメータの妥当性確認

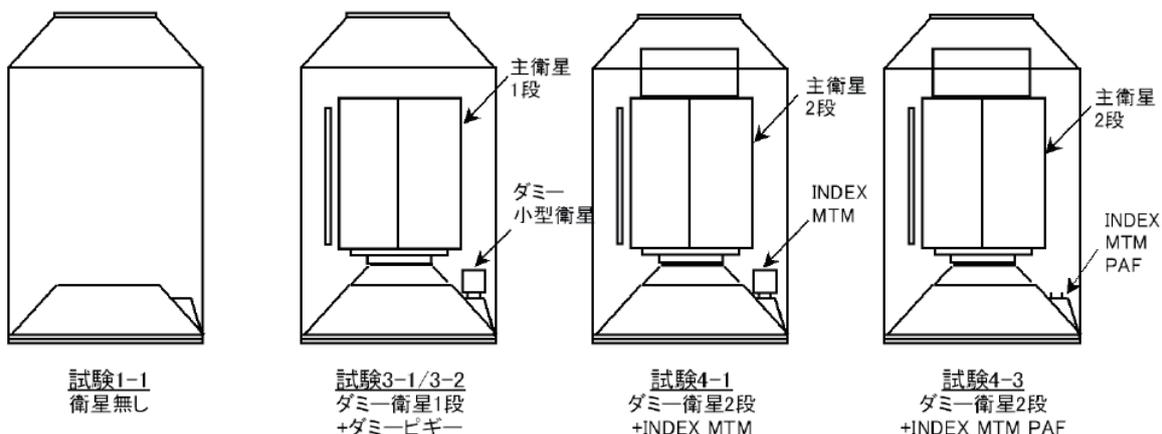


フライト形態の小型衛星ランダム振動を予測し、
現状のレベルを確認



小型衛星ランダム振動の緩和に向けた対策案を解析的に評価し、
今後の方向性を確認

音響試験概要(試験ケース)



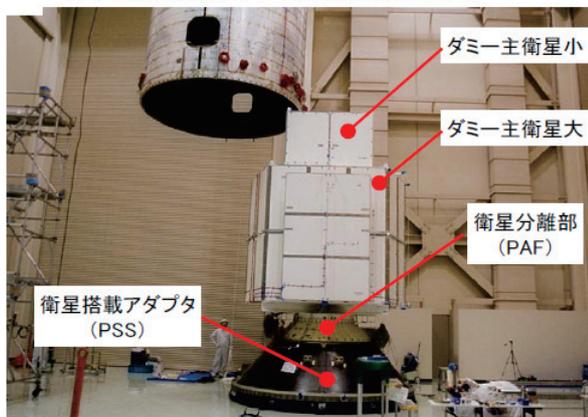
7

音響試験状況(1/3)



～全景～

- 計測項目:
- フェアリング内部音響
 - フェアリングランダム振動
 - 衛星搭載アダプタランダム振動
 - 小型衛星支持構造ランダム振動
 - 主衛星ランダム振動
 - 小型衛星ランダム振動

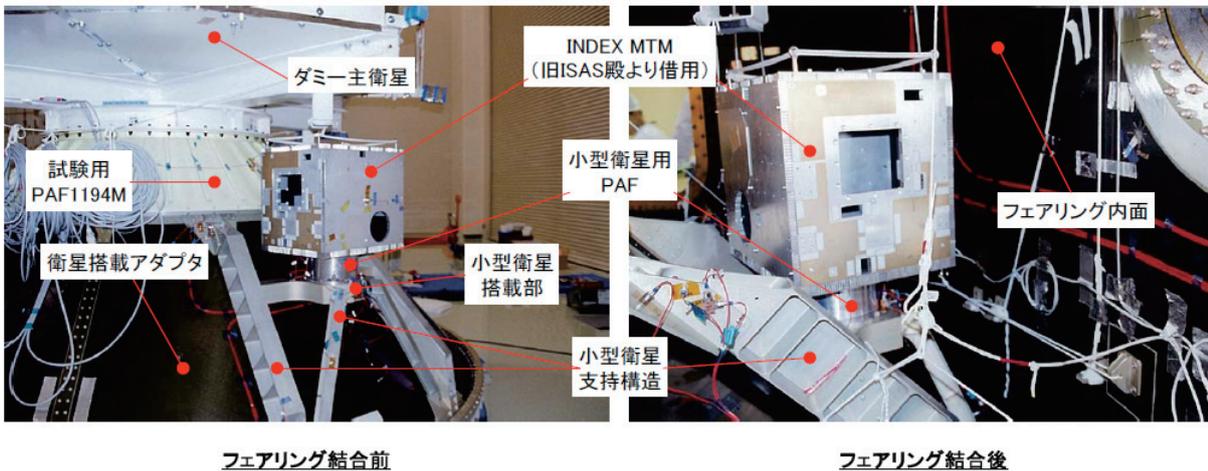


8

音響試験状況 (2/3)



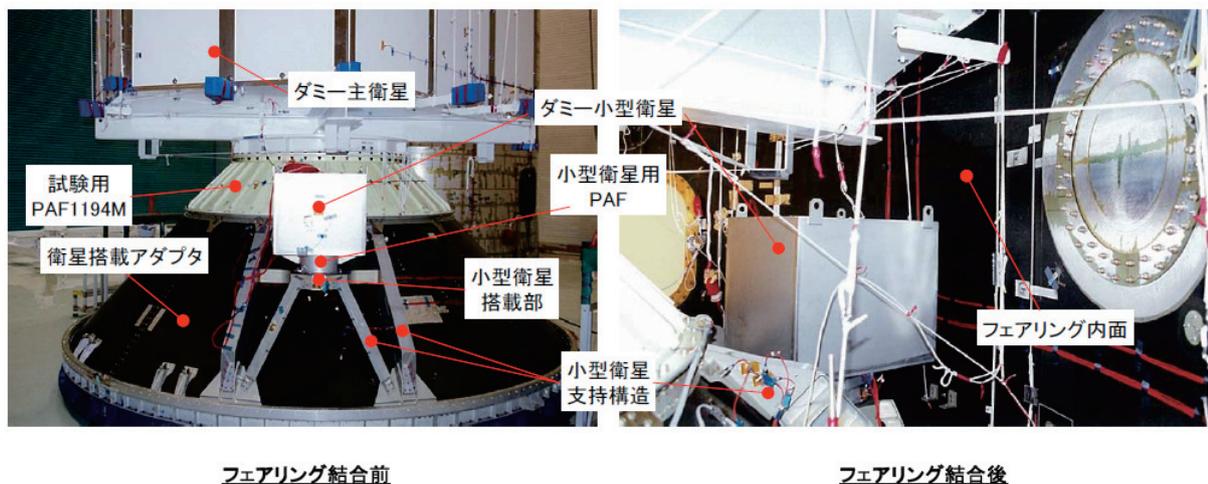
～主衛星2段+INDEX MTM搭載形態～



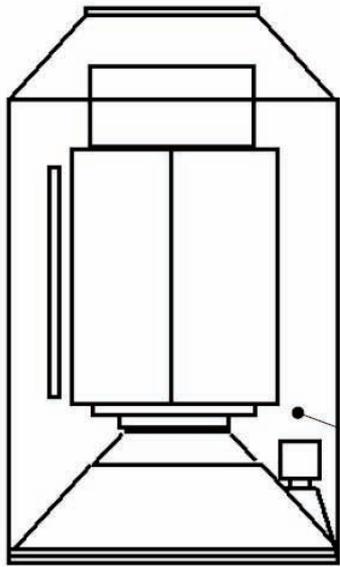
音響試験状況 (3/3)



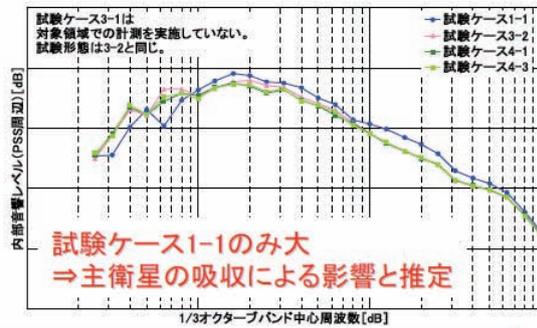
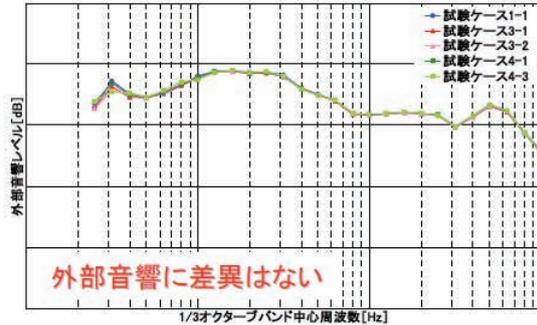
～主衛星1段+ダミー小型衛星～



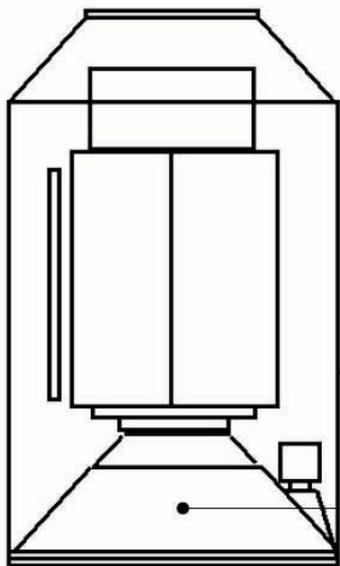
音響試験結果(1/5)



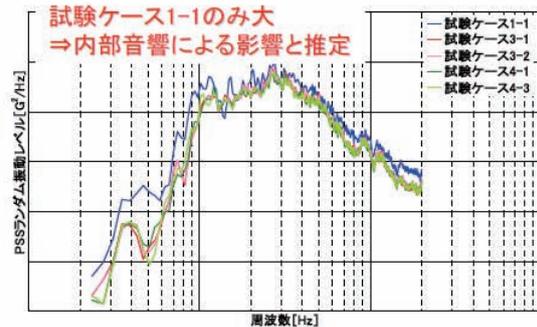
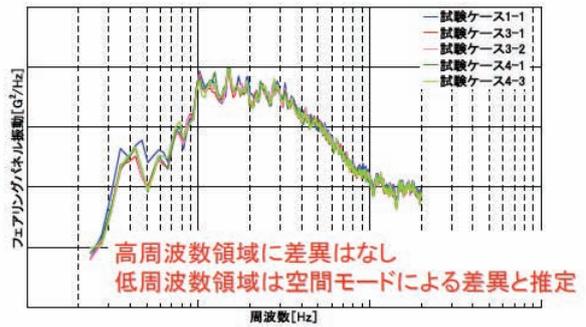
試験ケース1-1: 主衛星なし+小型衛星なし
 試験ケース3-1/3-2: 主衛星1段+ダミー小型衛星
 試験ケース4-1: 主衛星2段+INDEX MTM
 試験ケース4-3: 主衛星2段+INDEX MTM PAF



音響試験結果(2/5)



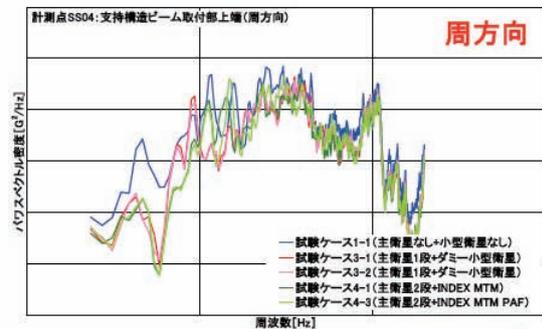
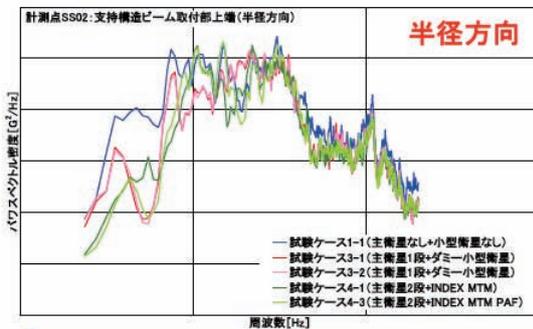
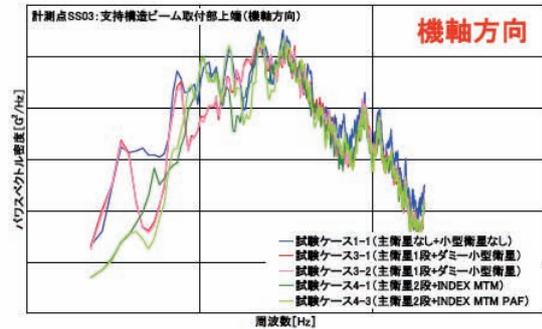
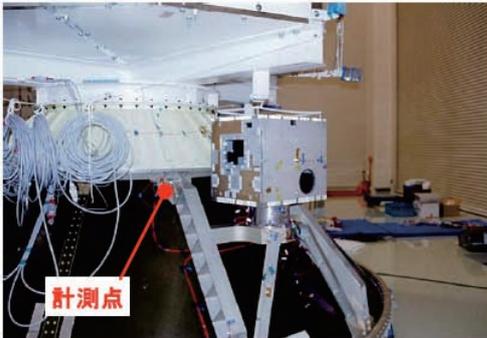
試験ケース1-1: 主衛星なし+小型衛星なし
 試験ケース3-1/3-2: 主衛星1段+ダミー小型衛星
 試験ケース4-1: 主衛星2段+INDEX MTM
 試験ケース4-3: 主衛星2段+INDEX MTM PAF



音響試験結果 (3/5)



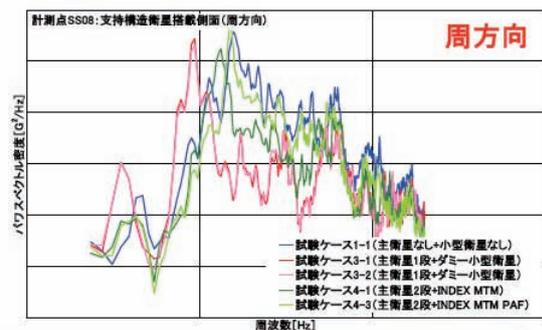
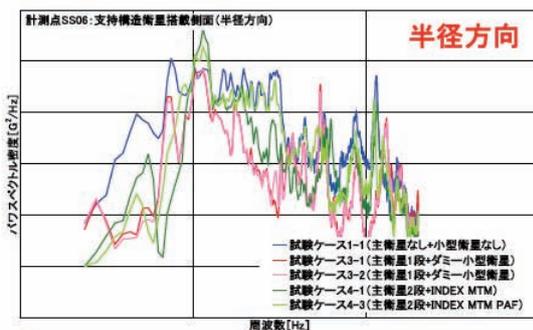
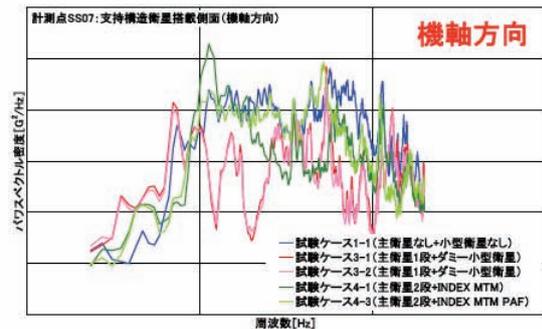
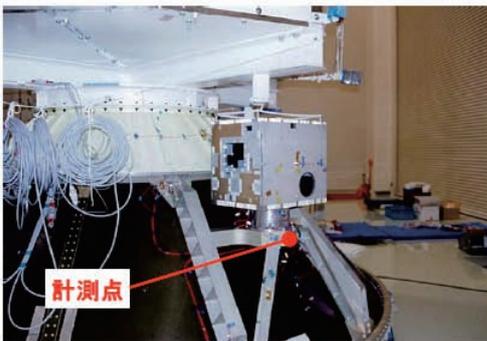
支持構造取付部はPSSパネル振動のみに依存⇒小型衛星の有無に影響しない



音響試験結果 (4/5)



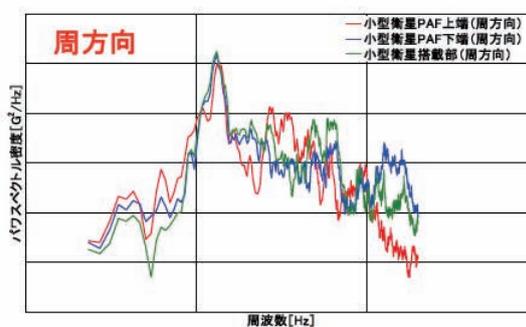
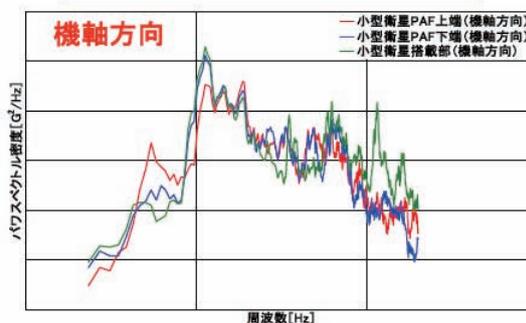
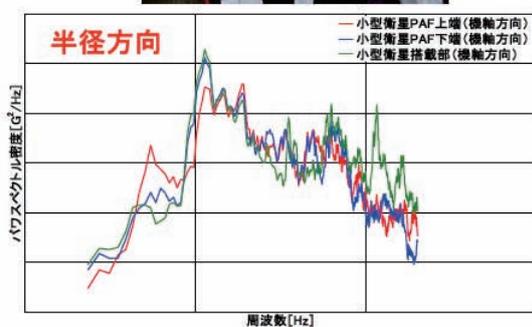
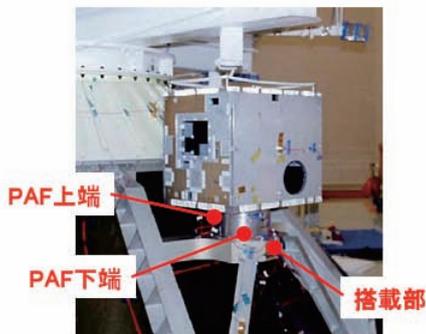
小型衛星搭載部の振動は小型衛星の有無/特性に依存



音響試験結果(5/5)



試験ケース4-1:主衛星1段+INDEX MTM



15

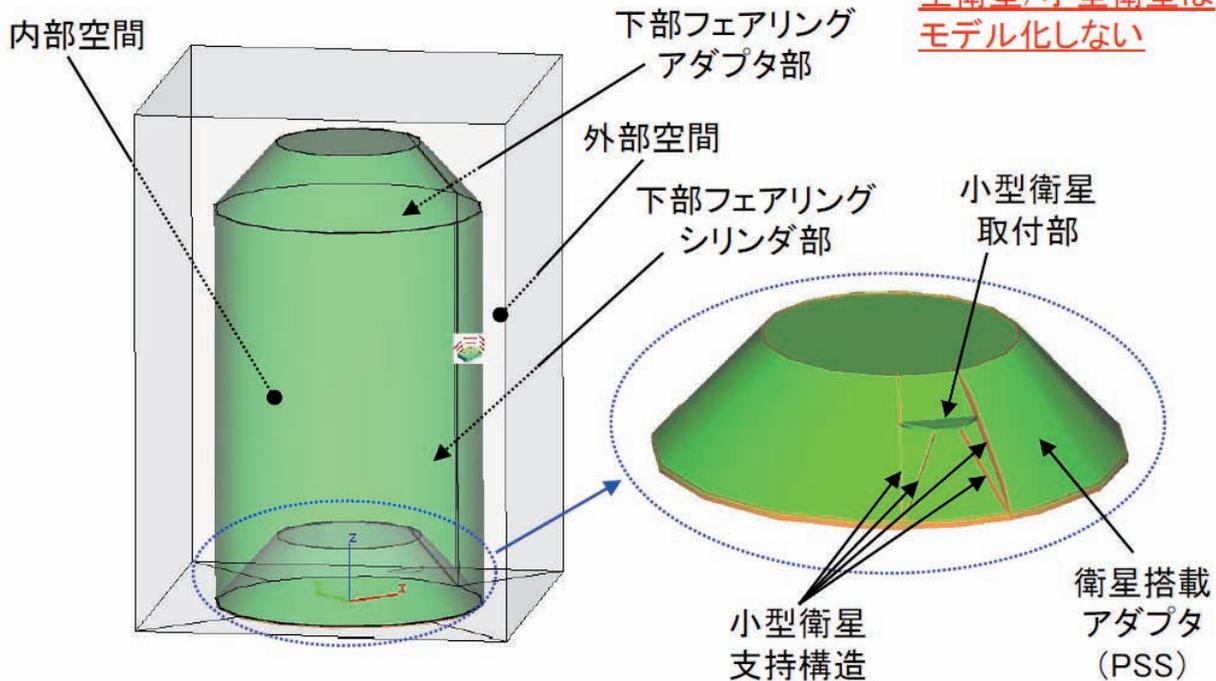
音響試験結果のサマリ



- 主衛星は若干の吸音率があるが、
1. 搭載衛星により吸音率が異なると考えられる。
解析モデルでは安全側条件として『主衛星なし』とする。
 2. 主衛星の有無はフェアリング振動に影響しない。
 3. 小型衛星支持構造取付点のランダム振動は、
衛星搭載アダプタのランダム振動に依存する。
 4. 小型衛星搭載部のランダム振動は、
小型衛星の有無/特性に大きく影響を受ける。
 5. 小型衛星搭載部のランダム振動は、
外部音響⇒フェアリング振動⇒内部音響
⇒衛星搭載アダプタ振動⇒小型衛星支持構造
の伝播経路が支配的であると考えられる。

16

SEA解析(モデルの概要)



主衛星/小型衛星は
モデル化しない

17

SEA解析(パラメータの設定)

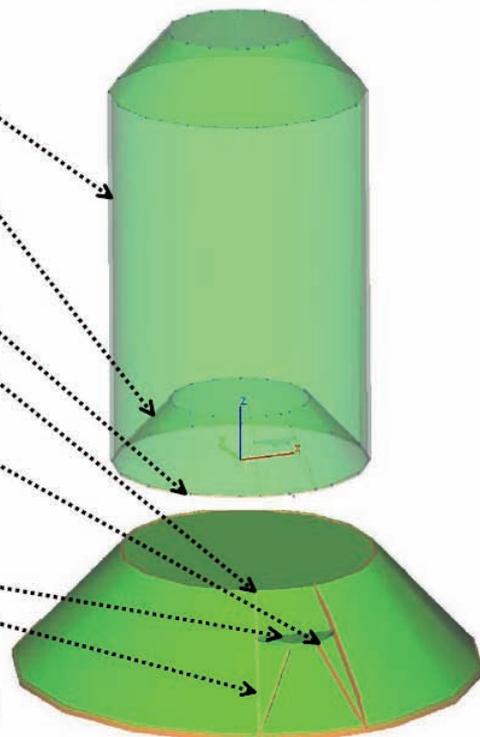


- ・ フェアリングの内部損失率およびモデル化
- ・ 衛星搭載アダプタの内部損失率およびモデル化
- 既存技術で対応可能

- ・ フェアリングと衛星搭載アダプタの結合損失率
- 本評価には大きな影響なし

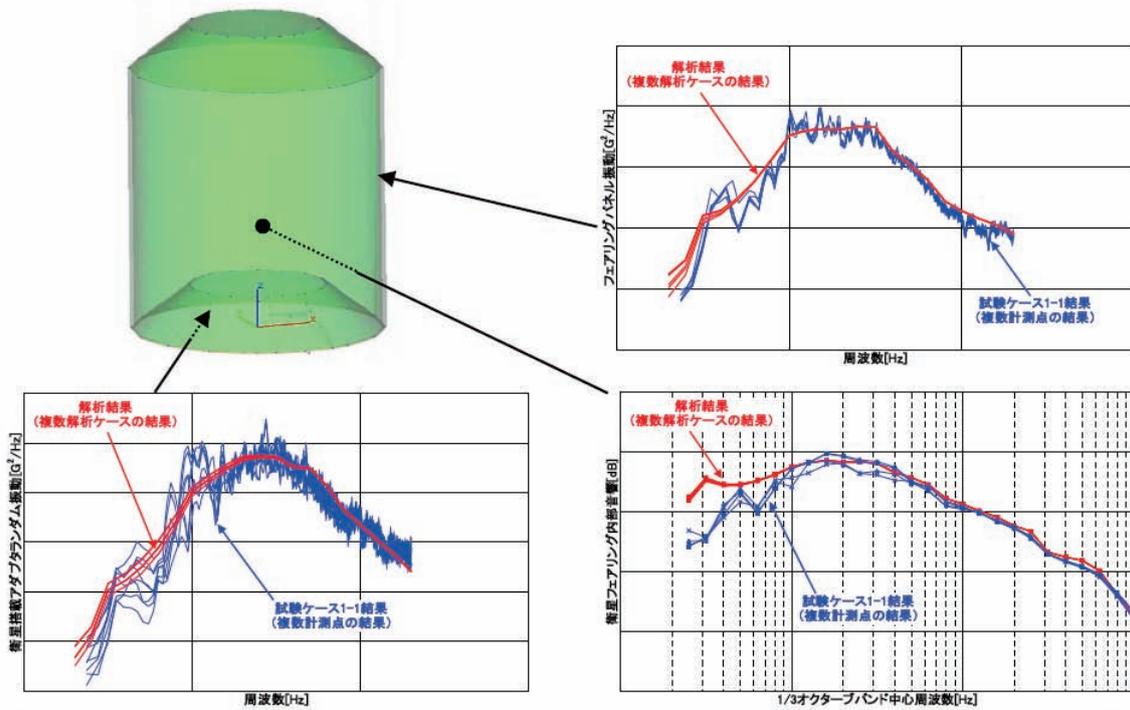
- ・ 小型衛星支持構造と衛星搭載アダプタの結合損失率
- ・ 小型衛星の支持構造と搭載部の結合損失率
- 一般的な簡易試験結果より類推
- ⇒ 実機大供試体試験による取得が望ましい

- ・ 小型衛星搭載部の内部損失率およびモデル化
- ・ 小型衛星支持構造の内部損失率およびモデル化
- 内部損失率は一般的なアルミ構造の値
- 小型衛星搭載部の板厚/密度をパラメータとし最適化
- ⇒ 試験データをベースにしてモデル化手法の検討が必要

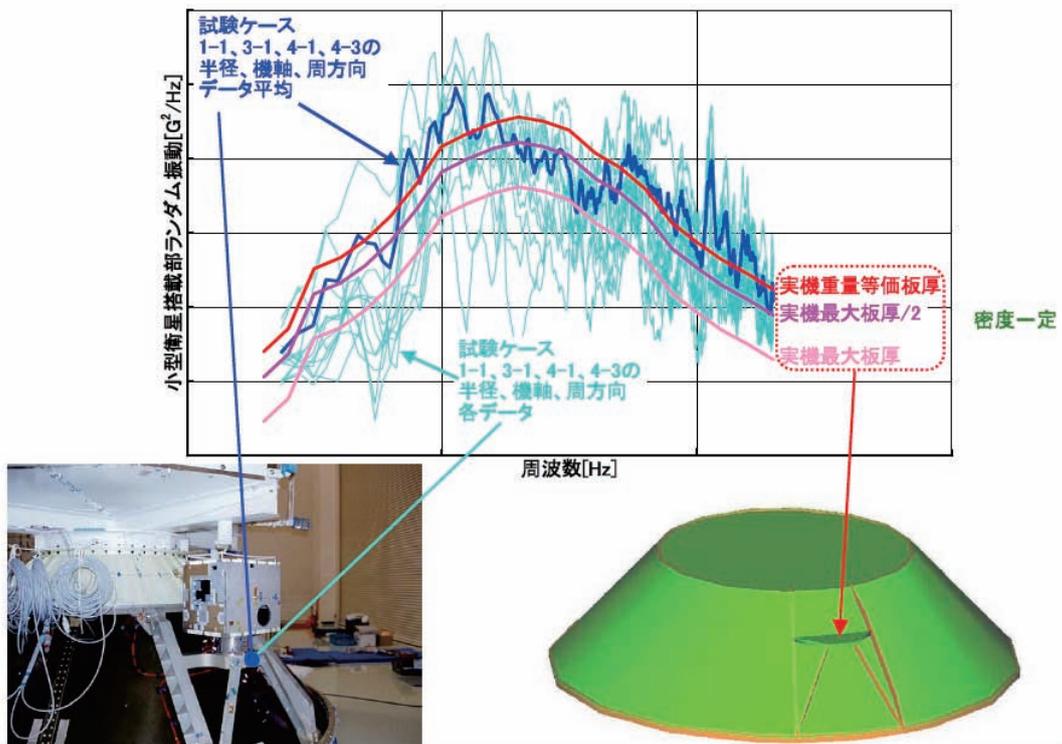


18

SEA解析結果 (1/2)



SEA解析結果 (2/2)



SEA解析の課題

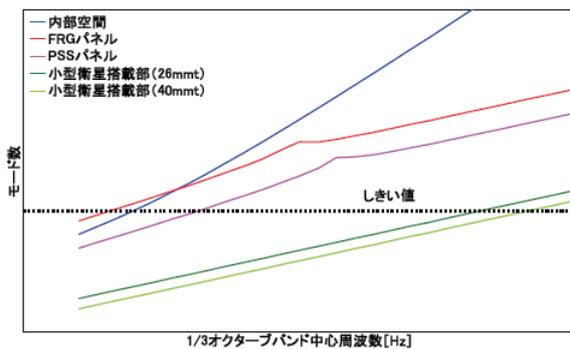


SEAは低周波数領域*1の予測精度が悪い。*1:一つの基準としてモード数がしきい値以下の周波数帯一方で、高周波数領域まで全体モデルをFEM(有限要素法)で解析するのは非現実的
 低周波はFEM、高周波はSEAで評価することもあるが、『剛』な構造物は、モード数のしきい値が高周波数側となり、全体モデルをFEMで解析できる領域ではない



上記課題の解決のため、下記のようなアプローチが考えられる

- SEAで算出した(ex. PSSパネル振動 or 内部音響etc.)をinputとして、支持構造をFEMで解析
- 支持構造のみをFEMの解析し、その結果からSEAモデルを作成



上記アプローチにより
予測精度の向上が
期待できる

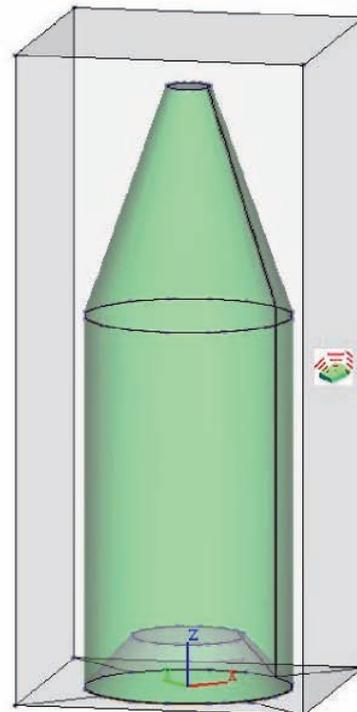
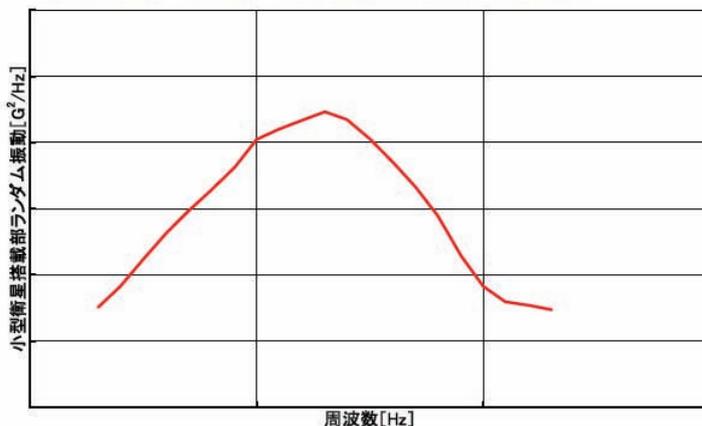
フライト形態解析



解析条件:

- 4Sフェアリング
- 外部音響はH-IIAロケットの環境条件
- フェアリング内面には防音ブランケット*1を考慮
- 主衛星/小型衛星は考慮しない
- その他は音響試験形態モデルに同じ

*1:高吸音率を有するコンポーネント、内部音響低減のために織装

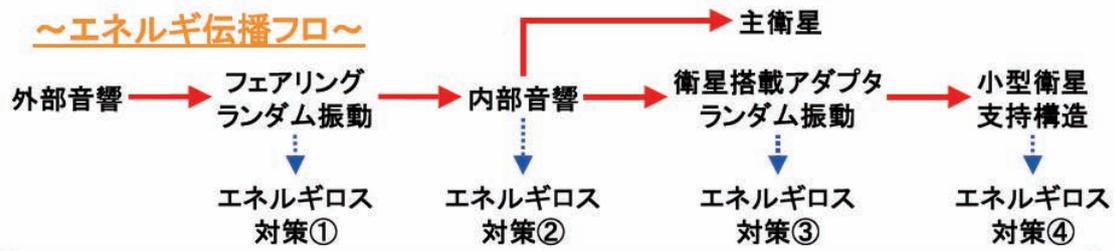


低減対策概要



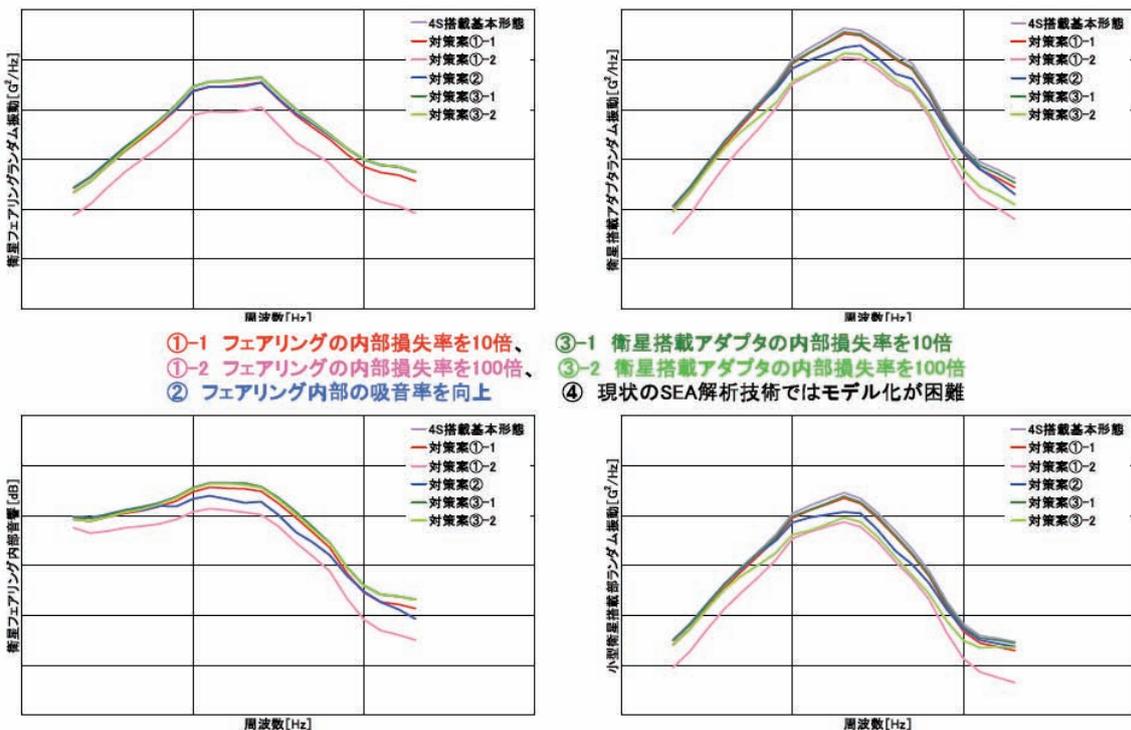
小型衛星ランダム振動の低減対策案

- 主衛星にもメリットあり
- ① 衛星フェアリングランダム振動を低減
⇒ **フェアリングパネル一般部に制振材**を貼り付ける
 - ② 衛星フェアリング内部音響を低減
⇒ **フェアリング内面に吸音材***1を貼り付ける
 - ③ 衛星搭載アダプタランダム振動を低減
⇒ **衛星搭載アダプタパネル一般部に制振材**を貼り付ける
 - ④ 小型衛星搭載部への振動伝達を抑える
⇒ **支持構造または搭載部にダンパー**を取り付ける
- *1: H-IIA/H-IIBにおいても防音ブランケットと呼ばれる高吸音率を有するものを艀装している。



23

低減対策効果



24

まとめ



成果としては・・・

- 小型衛星へのランダム振動の支配的な伝播経路を推定した。
 - SEA法によるランダム振動予測手法を確立した。
- また、その問題点/課題を明確にした。
- 小型衛星ランダム振動環境の低減効果を解析的に評価した。

今後予測精度向上のために・・・

- SEAパラメータを試験にて確認/取得
- SEAとFEMを組合わせた予測手法の確立

KHIでは、今後も主/小型衛星環境低減のため
鋭意努力していく所存でございますので、
今後とも、よろしくお願いいたします。

以上

質疑応答

質問者①

最後の結論について、振動パスの方が支配的である、というのは具体的にどこから分かるのでしょうか。

また、音響パスに比べて振動パスがどの程度支配的なのかを把握してらっしゃいますか。例えば、振動パス：音響パスが10：0なのか、7：3なのか、5：5なのか。例えば7：3だとした場合、音響パスは実は無視できないということを示しているのだと思うのですが、その点の見解を教えてくださいいただけます。

発表者

この音響試験を実施した目的は、小型衛星の振動環境を取得することが主目的ではなく、フィルエフェクトの現象を取得することが主目的でした。そのため、評価に用いるデータが不足しているというのが現状です。

PSSからの固体伝搬が支配的であると考えている理由については、PSSの上昇比率と、この黄緑の線から青い線になっていくところの比率が同等であると考えており、PSSのランダム振動が固体伝搬により励起されているのではないかと考えております。

小型衛星は直接音響加振されているのではないかと、ということについては、小型衛星単体を音響加振した結果があれば直接評価できると思いますが、現在そのようなデータはないため、そこまでの評価はできておりません。

質問者①

以前、HTVで似たような評価を行いました。HTV非与圧部に搭載する曝露パレットを対象として、音響パスがメインなのか振動パスがメインなのかを検証したことがあります。

具体的には、搭載する曝露パレットを紐で吊して単体で音響試験した場合と、非与圧部に搭載した状態（システム）で音響試験した場合にどの程度振動応答が異なるのかというのを検証しました。結果は、基本的に音響パスが支配的であり、振動応答の大部分は音響に起因するという結論に至りました。ただ、対象とした曝露パレットの重量は1.5トンであり、小型衛星とは大きく異なります。

小型衛星の場合でも、小型衛星単体で音響試験をしたときの振動応答と、PSSに搭載した状態で音響試験をしたときの振動応答を比較をしてみると、どの程度の割合で音響パスが支配的か分かるかと思えます。

このような検証を行った理由は、HTV搭載ペイロードに対する環境規定が検討課題となっているためです。具体的には、音響レベルのみを規定すればよいのか、ランダム振動のみを規定すればよいのかという点が課題となっており、現状では、HTVは両方規定しています。

ただ、音響試験と振動試験の両方を試験を検討する必要があるため、ペイロード側にとっては不親切な状況となっています。

今後、環境規定として音響レベルのみを規定すればよいのか、ランダム振動のみを規定すればいいのか、さらに、組み合わせの試験方法、という点についても検討できれば有用となると考えています。

あと、追加で伺いたいのですが、GOSAT に小型衛星が相乗りしましたが、このときのフライトデータはお持ちでしょうか。

発表者

フェアリング内部音響データはありますが、振動については計測しておりません。

HTV 曝露パレットについて質問させていただきます、曝露パレットの大きさはどの程度でしょうか。

質問者①

幅 2m×奥行 3.7m×高さ 1.7m 程度、重量は 1.5 トン程度です。

発表者

おそらく、基本的には受圧面積という考え方に基づくと考えております。

質問者①

定性的には受圧面積という考え方でよいと思いますが、振動パス：音響パスは 10：0 ではなく、ある割合で供試体に負荷されているはずで、その割合がどれくらいなのかが重要になってくると思います。

例えば、音響パス：振動パスの割合が 7：3 だったら、音響パスの 7 割のみを考慮して音響試験を行えばよいというわけではなく、振動パスの 3 割を何かしらの形で考慮しないと条件としてはおかしいのでは、と考えています。

発表者

コメント、ありがとうございました。

質問者②

大変興味深いご講演ありがとうございます。3 点質問させていただきます。

1 点目は、フェアリング内の音圧分布についてです。音響試験で得られたフェアリング内の音圧は、各ケースの音圧平均値に特段の差が見られないのですが、フェアリング内の音圧分布はどのようになっているか把握していらっしゃいますか。

2点目は、ランダム振動環境を規定するときの包絡についてです。SEAの解析結果は1/3オクターブバンドの空間平均値です。一方、実際に小型衛星に対してランダム振動環境を規定するときにはピーク値を包絡しなければなりません。この場合の包絡についての考え方を教えてください。

最後に、地上での音響試験とフライト時との違いについてですが、地上での音響試験は拡散音場で音響が負荷されます。一方、フライト時は必ずしも拡散音場ではないと思います。実施された試験の結果から、地上での音響試験とフライト時の違い、特にどちらが安全側かについて何かお分かりになることがあれば教えてください。

発表者

1点目のフェアリング内部の音圧分布については、データは取得済みで、成果報告書を提出させて頂いていますので、そちらをご確認ください。なお、今回の発表では、PSS周辺で計測した音響データのみを用いて検討を行っています。

2点目については、非常に難しい問題だと認識しており、音響試験の環境をどのように評価するかということから検討しないといけないと考えております。その上でスペックを決定する必要がありますが、KHI単独ではスペックを決めることはできないので、JAXA殿も含めて規定の考え方などについて検討できればよい、と考えております。

3点目については、H-IIA 2号機でフェアリング内の音圧を取得しており、そのデータを用いて、今後検討していきたいと考えております。

質問者③

今回の発表では、ランダム振動レベルの絶対値が示されておりました。小型衛星に対しては、ランダム振動環境条件が厳しいとのことですが、計測したデータは、厳しいと言われていた条件に対してどうだったかを教えていただけますか。

発表者

すぐに数字が出てこないのので、別途、ご連絡させていただきます。