

6.6. 宇宙輸送機の振動環境緩和に関する研究

宇宙航空研究開発機構

研究開発部門

第四研究ユニット / 第二研究ユニット

伊海田 皓史 氏 / 柳瀬 恵一 氏



宇宙輸送機の振動環境緩和に関する研究

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第四研究ユニット ○伊海田 皓史 山崎 祥弘
研究開発部門 第二研究ユニット 柳瀬 恵一 水谷 忠均

第15回試験技術ワークショップ
2017年11月22日(水)@筑波宇宙センター

発表内容

- ▶ 概要
- ▶ 振動環境緩和技術の検討
- ▶ 振動環境下の計測技術(ヘルスマモニタリング)の検討
- ▶ まとめ

概要

- 日本の輸送システムはH-IIA/H-IIBロケットおよびイプシロンロケットによって、幅広いミッションに対して打上げ成功を積み重ね、世界標準を凌駕する信頼性を獲得するに到った。
- しかし更なる宇宙利用拡大に向けて、以下の課題が顕在化している。
 - **打上げ時の機械環境条件(正弦波領域～高周波衝撃)**
- 環境条件はペイロード設計に直接的に影響する。また輸送システム自体の低コスト化や再使用化に向け、環境条件低減による搭載機器の設計条件緩和・環境試験リスクの排除は重要なポイントである。
- 本稿では、新規要素技術の適用によるペイロードおよび宇宙輸送機の機械的環境緩和の検討状況を紹介するとともに、振動環境下における新たな計測手法について検討した結果を報告する。

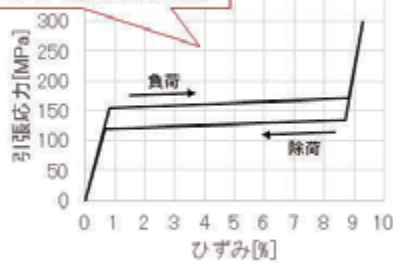
発表内容

- ▶ 概要
- ▶ **振動環境緩和技術の検討**
- ▶ 振動環境下の計測技術(ヘルスマニタリング)の検討
- ▶ まとめ

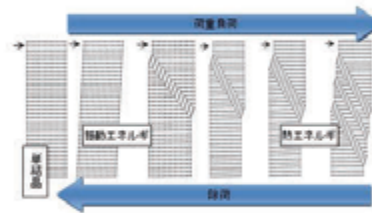
SCSMAによる振動環境緩和の試行 概要

- 振動環境緩和に向けた一つのアプローチとして、圧縮プリロード下において応力誘起マルテンサイト状態となり高いエネルギー損失特性を有する単結晶形状記憶合金 (Single Crystal Shape-Memory Alloy) (以下、SCSMA)に着目した。下図にSCSMAの応力歪曲線および荷重負荷時の結晶構造の変化を示す。
- アビオニクス機器、または小型衛星 (50kg級) 取付部への適用、およびアビオニクス機器搭載板下 (プラケット部) への適用の、2通りの設計案について制振装置の設計と試作を実施し、正弦波・ランダム振動・衝撃試験を実施して、振動環境緩和効果についてデータを取得した。

1~9%のひずみ条件下において応力誘起マルテンサイト状態となる特性



SCSMA 応力-ひずみ 曲線

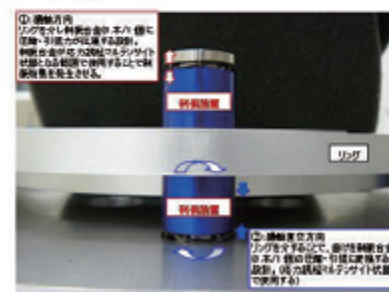
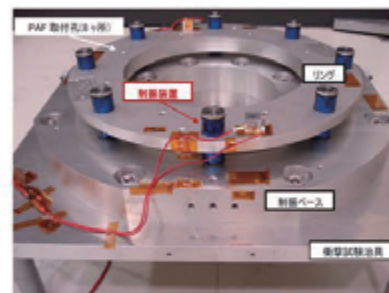
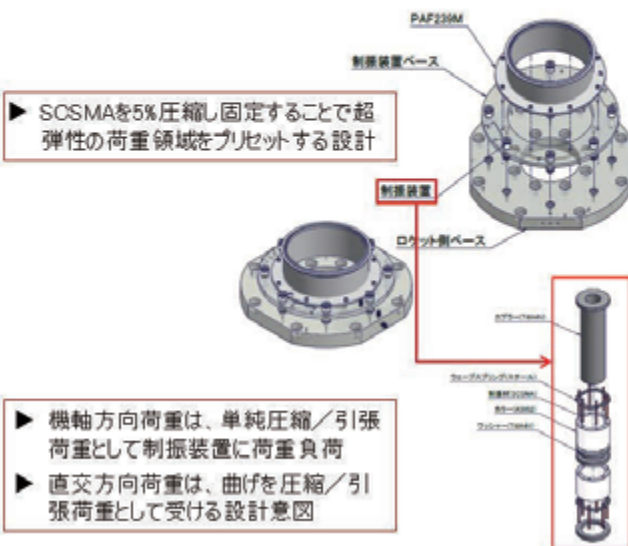


SCSMA 振動吸収メカニズム

4

SCSMAによる振動環境緩和の試行 (スペーサ方式: 設計)

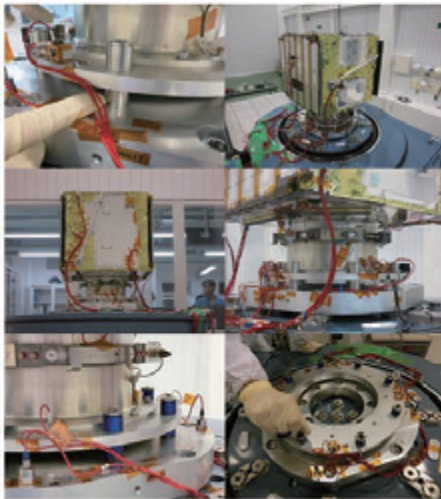
- アビオニクス機器、または小型衛星 (50kg級) への取付を想定した、SCSMAを用いた制振装置 (スペーサ方式) の設計検討を実施した。



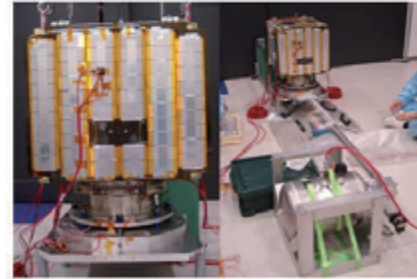
5

SCSMAによる振動環境緩和の試行（スペーサ方式：試験形態）

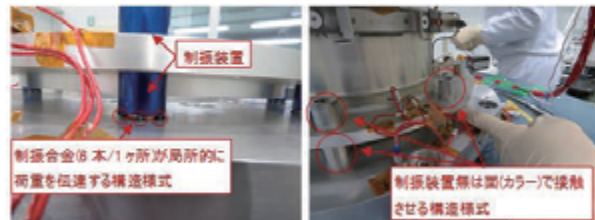
- 検証試験として、制振装置の有無をパラメータとし、50kg級の小型衛星（小型実証衛星4型：SDS-4）のSTMを制振装置上に搭載し正弦波・ランダム振動・衝撃試験の各試験を実施した。試験形態を下図に示す。



正弦波・ランダム試験形態



衝撃試験形態



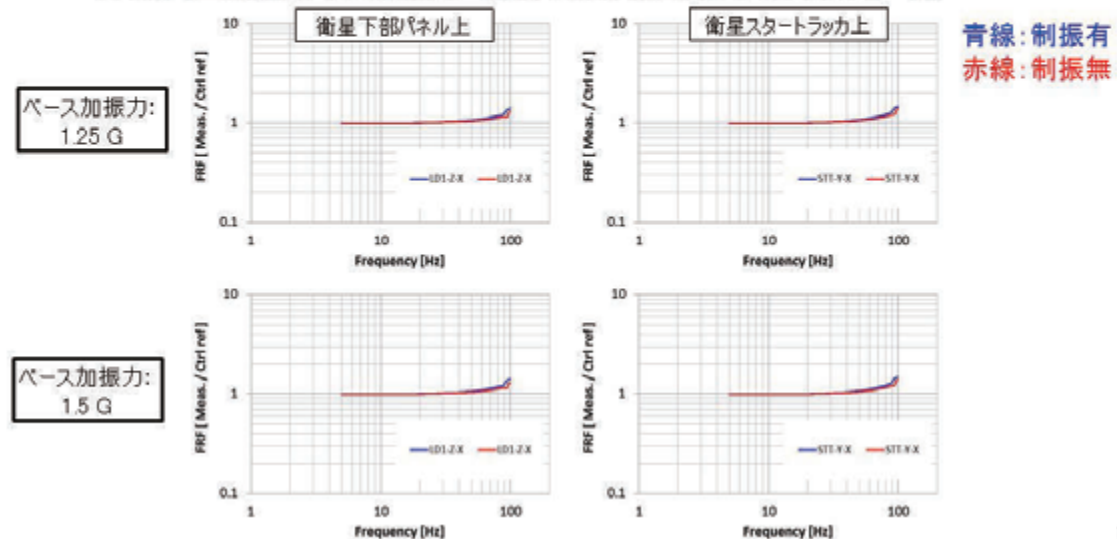
制振装置有無の比較

6

SCSMAによる振動環境緩和の試行（スペーサ方式：試験結果）

■ 正弦波振動試験

- 機軸方向は衛星固有振動数が150Hz付近であり、入力も最大1.5G程度と小さいため、5-100Hzの正弦波領域で制振装置有無の顕著な差異は確認できなかった。

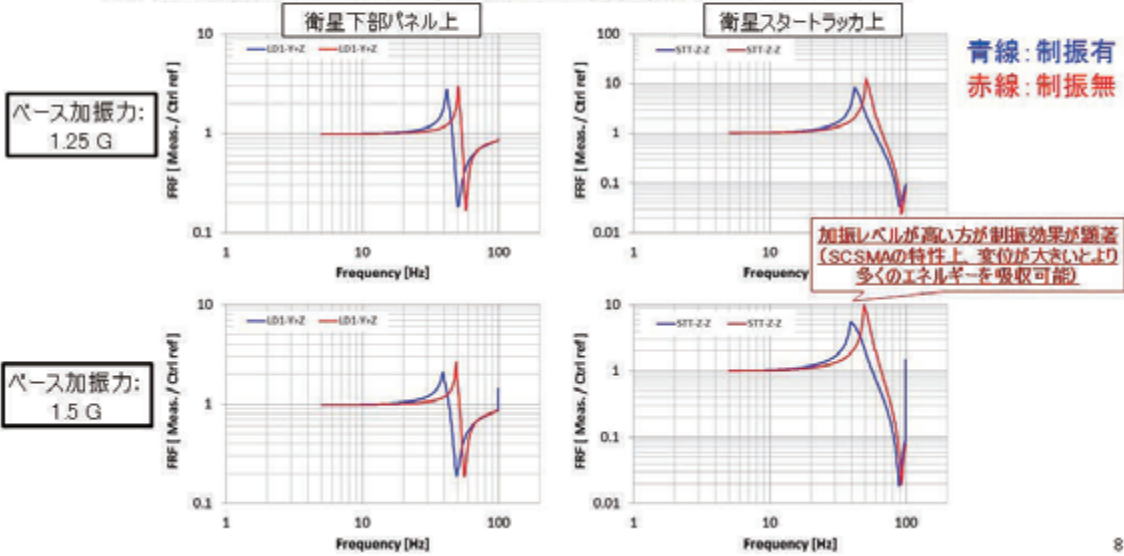


7

SCSMAによる振動環境緩和の試行（スペーサ方式：試験結果）

■ 正弦波振動試験（続き）

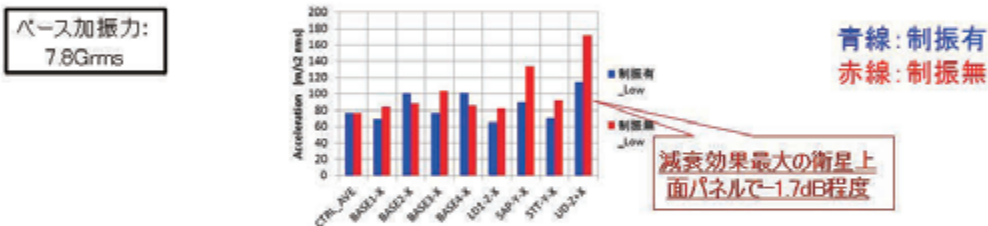
- 機軸直交方向については衛星の固有振動数が約50Hz近傍。共振周波数帯で制振装置有の場合の**応答倍率の低下、および固有振動数の低下**が確認できた。



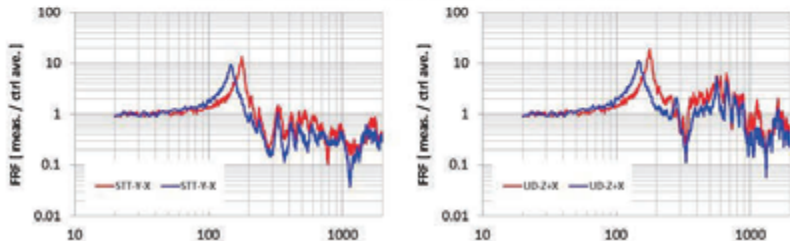
SCSMAによる振動環境緩和の試行（スペーサ方式：試験結果）

■ ランダム振動試験

- 加振周波数が20-2000Hzになることで、機軸方向固有振動数(150Hz付近)において、制振装置有の場合の**実効値低下、および固有振動数の低下**が確認できた。



制振装置有無による各部の実効値の比較（機軸方向）



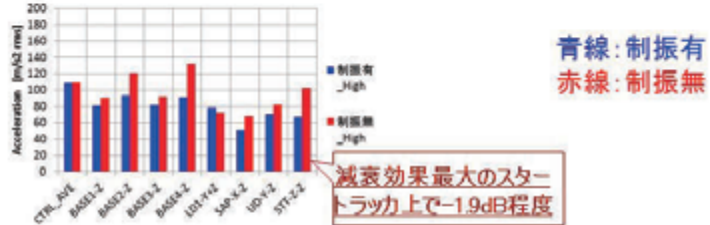
制振装置有無による衛星代表点の周波数応答の比較（スタートラッカ、および上面パネル）

SCSMAによる振動環境緩和の試行（スペーサ方式：試験結果）

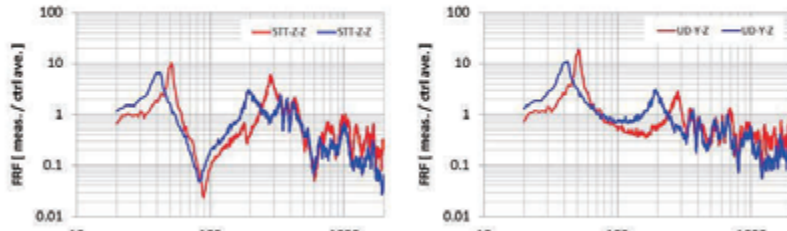
■ ランダム振動試験（続き）

- 機軸直交方向についても固有振動数(50Hz付近)において、制振装置有の場合の**実効値低下、および固有振動数の低下**が確認できた。

ベース加振力:
11.0Grms



制振装置有無による各部の実効値の比較(機軸直交方向)

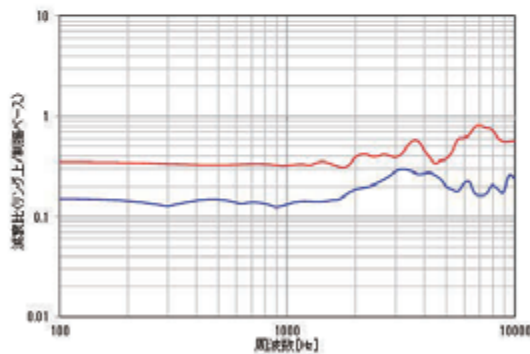


制振装置有無による衛星代表点の周波数応答の比較(スタートラッカ、および下面パネル)

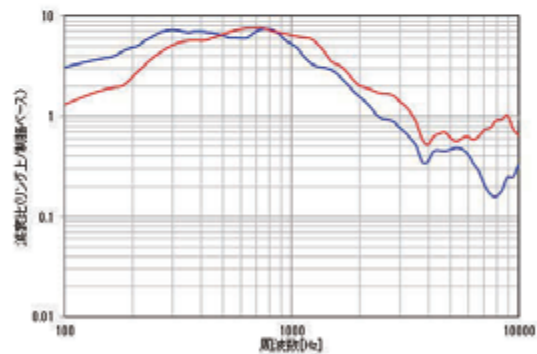
SCSMAによる振動環境緩和の試行（スペーサ方式：試験結果）

■ 衝撃試験

- 機軸方向の試験では、全周波数帯で制振機構有の減衰効果が確認できた
- 機軸直交方向については制振機構有／無の両ケースにおいて減衰比が1.0以上（衝撃伝搬先の方が応答が増大している）であり、制振機構の効果が確認できなかった
- 上記理由として、供試体上部が大きく揺れる試験形態となってしまう、機軸直交方向の減衰比を正しく測定できていなかったことが原因と推定される



機軸方向減衰比



機軸直交方向減衰比

SCSMAによる振動環境緩和の試行（スペーサ方式：まとめ）

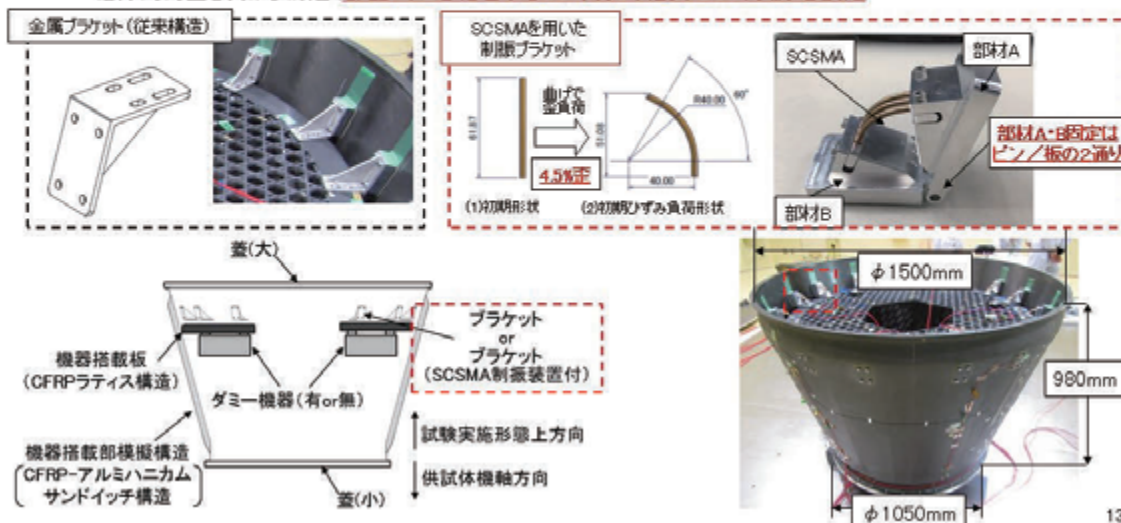
- アビオニクス機器、および小型衛星（50kg級）への取付を想定した、SCSMAを用いた制振装置（スペーサ方式）を試作し、振動環境緩和効果を確認した。
- 正弦波・ランダム振動・衝撃試験のいずれにおいても制振装置適用による環境緩和効果が確認された
- ただし以下については今後検討が必要である
 - 現行設計で制振装置にプリロードをセットするための作業性が悪い（SCSMAにねじが入る）
 - 制振装置有無の形態の差異が完全に同一でないため形態の影響を切り分ける必要（下図）



12

SCSMAによる振動環境緩和の試行（ブラケット方式：設計）

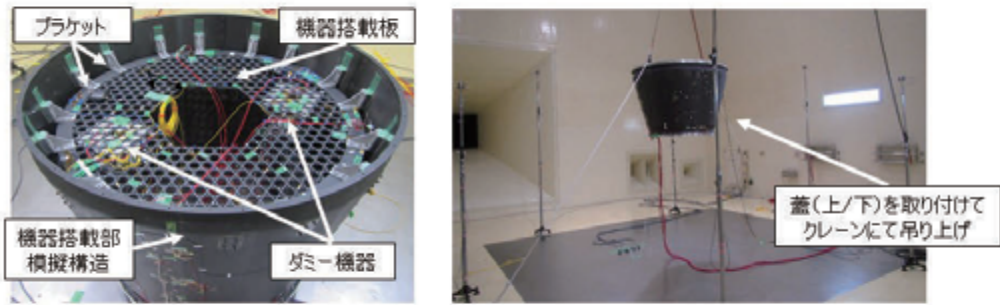
- 次に、ロケット上段のアビオニクス機器搭載板取付部に制振装置（ブラケット方式）を適用する検討を実施した。（搭載板上のアビオ機器の振動環境をまとめて低減することが狙い）
 - SCSMAに曲げによる初期ひずみを付与し、超弾性の荷重領域をプリセット。SCSMAでブラケットへ負荷される機軸方向荷重を受ける構造（部品A、Bを結合する2つの方式（ピン/SUS薄板）を設定）



13

SCSMAによる振動環境緩和の試行（ブラケット方式：試験形態）

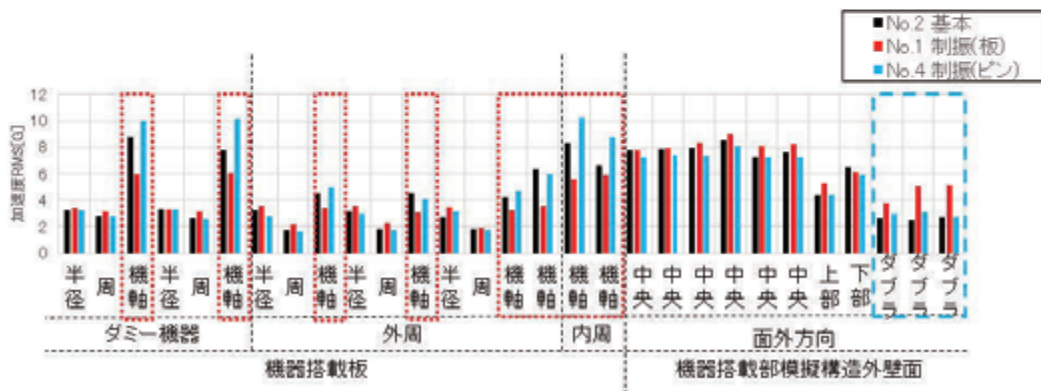
- 環境緩和効果の検証のため、音響試験（音響振動負荷）を実施し、機器搭載板上での応答について制振装置の有（ヒンジをピンで固定したもの、板で固定したものの2種類）無、およびダミー機器有無をパラメータとしてデータ取得を実施した。試験形態を下図に示す。



試験 No.	試験ケース	制振装置有無	ダミー機器有無
1	基本	無	無
2	制振(板)	有(薄板)	無
3	制振(ピン)	有(ピン)	無
4	基本	無	有
5	制振(板)	有(薄板)	有
6	制振(ピン)	有(ピン)	有

SCSMAによる振動環境緩和の試行（ブラケット方式：試験結果）

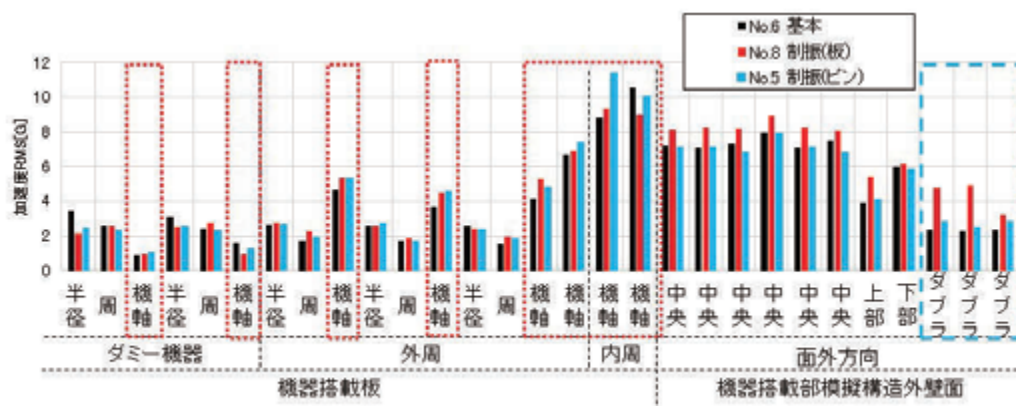
- 試験結果(ダミー機器「無」ケース)
 - 機器搭載板の機軸方向加速度の大小関係は以下の通りであった。
制振装置有(板) < 制振装置無 < 制振装置有(ピン)
 - 制振装置有(板)に関して、**搭載板上機軸方向実効値**が低下していることが確認できた
 - 半径方向、周方向に関しては、3つの試験ケースとも実効値は同等であった。



SCSMAによる振動環境緩和の試行（ブラケット方式：試験結果）

■ 試験結果(ダミー機器「有」ケース)

- 器搭載板の機軸方向加速度の大小関係は以下の通りであった。
制振装置無く制振装置有(板) < 制振装置有(ピン)
- 制振装置有(板・ピンとも)のケースで、実効値の低減効果が確認出来なかった。



16

SCSMAによる振動環境緩和の試行（ブラケット方式：まとめ）

- アビオニクス機器搭載板取付部に制振装置(ブラケット方式)を適用するSCSMAを用いた制振装置(ブラケット方式)を試作し、振動環境緩和効果を確認した。
- 音響による振動負荷を実施したが、スペーサ方式ほどの顕著な低減効果を確認することができなかった。これは音響による搭載板の振動レベルが小さく、SCSMAの変位量が小さいため、スペーサ方式ほどの制振効果が確認出来なかったことが原因と推定される。
- 以下について今後検討が必要である
 - 高い荷重レベル(正弦波振動等)での制振効果の確認
 - スペーサ方式と同様に組立性に課題があるため、設計として工夫が必要(SCSMAを曲げ状態で固定する作業性が悪い)

17

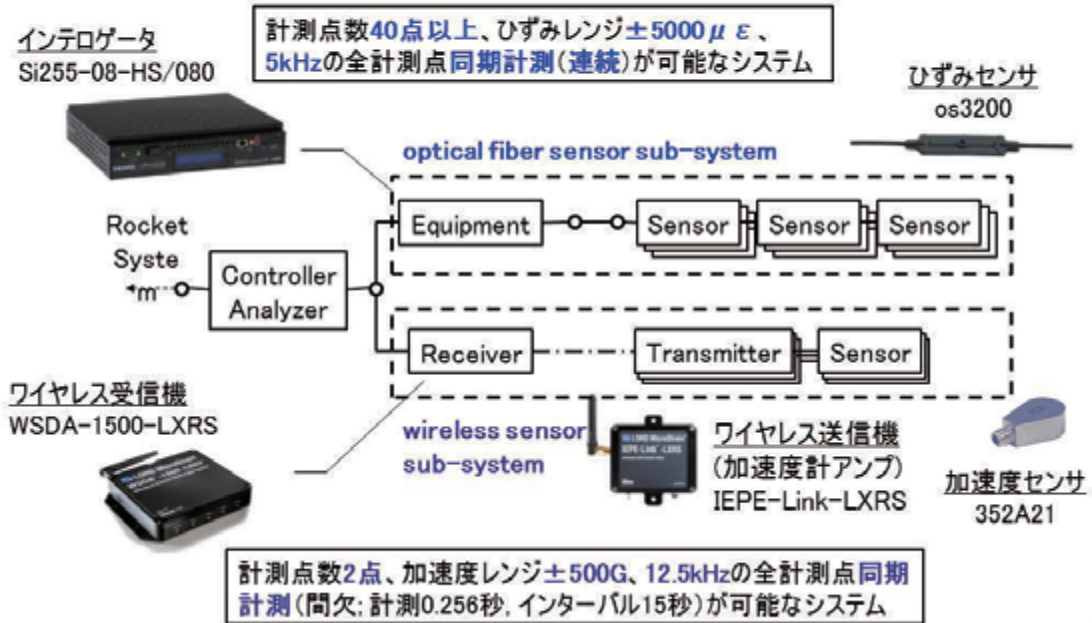
発表内容

- ▶ 概要
- ▶ 振動環境緩和技術の検討
- ▶ 振動環境下の計測技術(ヘルスマonitoring)の検討
- ▶ まとめ

振動環境下の計測技術(構造ヘルスマonitoring)の検討 概要

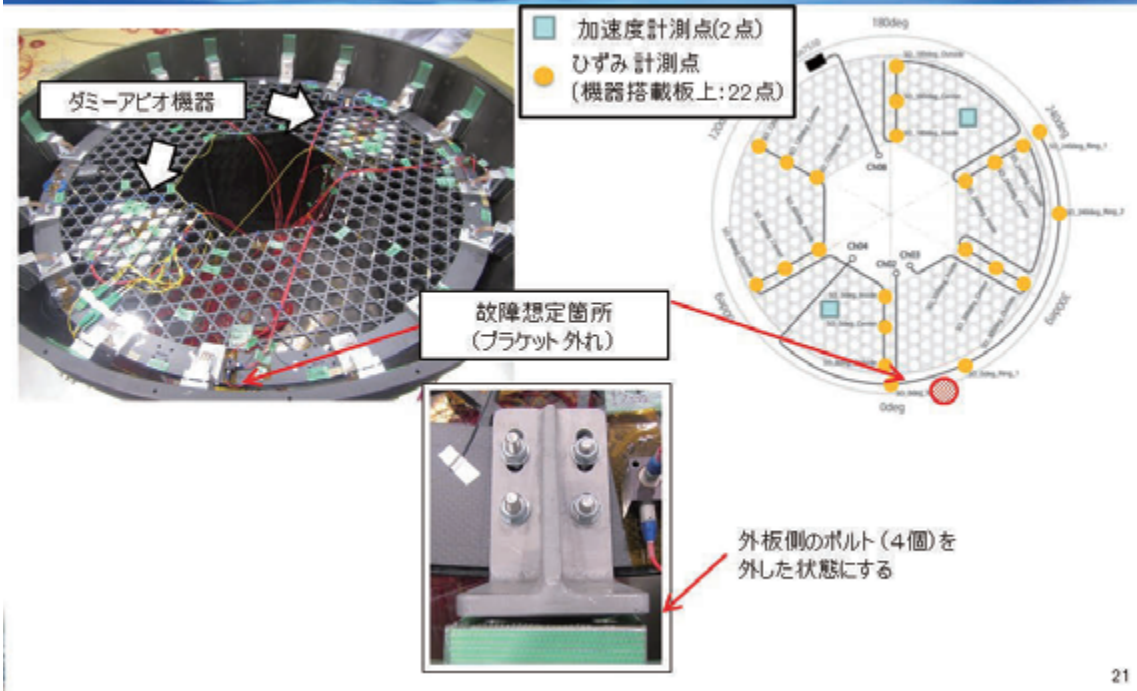
- 振動環境緩和技術の検証試験(音響試験)の機会を活用し、機器搭載構造の異常検知を実現する計測技術(ヘルスマonitoring技術)の検証を行った。
- ヘルスマonitoring技術は、以下の観点から再使用輸送系に必要な技術としてJAXA研究開発部門にて検討を実施してきたものである。
 - 再使用輸送系では、飛行継続の可否判断や地上への帰還可否判断において、機体自体が自律的な判断を行い、飛行することが想定される。従ってアビオニクス系の搭載機器の故障は、機体全損失に直結する。
 - 機器搭載構造に対し、破損に至らない不具合が発生した場合でも搭載機器の振動環境を悪化させることが想定され、搭載機器の破損につながる可能性がある。
 - 上記のような2次構造の異常検知では、加速度やひずみ等を高速かつ高い分解能で検知する計測系が必要。また計測位置は搭載機器の配置に依存するため、計測系構成を柔軟に変更可能なシステムが好ましい。
- なお本試験では、試験での計測技術向上にも関連するワイヤレスセンサを含めた計測システムでデータ取得を実施し、その実用性を確認した。

構造ヘルスマモニタリングの検討 システム構成



20

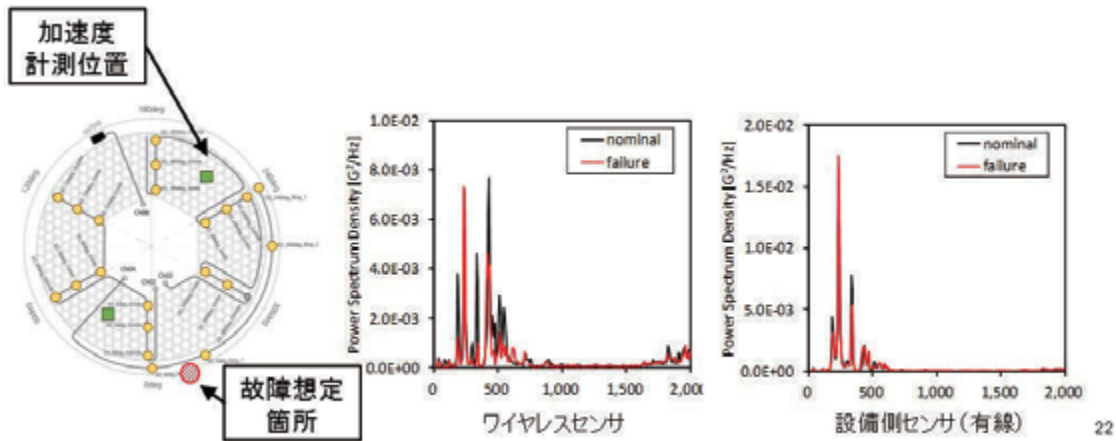
構造ヘルスマモニタリングの検討 試験形態



21

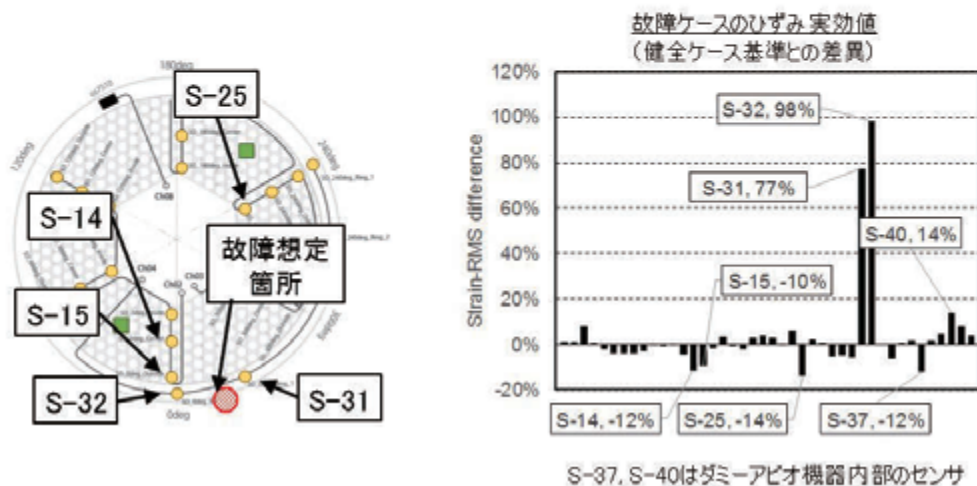
構造ヘルスマモニタリングの検討 試験結果(加速度センサ)

- 実機を想定した音響試験環境下(141.6dB)でも、加速度計ワイヤレスセンサによるデータ取得可能であることを確認した。(試験データにも問題なし)
- 故障有/無ケースにおいて、ワイヤレスセンサおよび通常のピックアップとも計測したPSDに差異がない結果であった(下図)。
⇒ ワイヤレス/有線センサとも、加速度計では故障を検知できない結果。



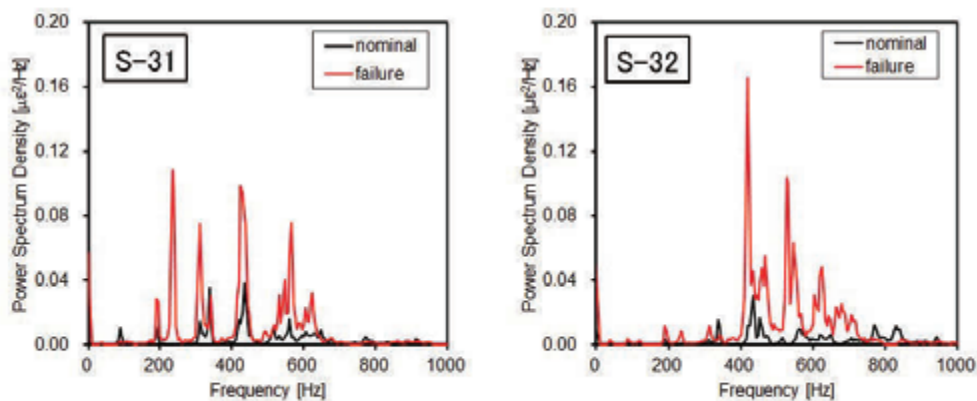
構造ヘルスマモニタリングの検討 試験結果(光ファイバ歪センサ)

- 実機を想定した音響試験環境下(141.6dB)でも、光ファイバひずみセンサによるデータ取得が可能であることを確認。
- 故障想定箇所の近傍で、ひずみ実効値の変化が大きい挙動を確認(詳細評価は次頁)



構造ヘルスマモニタリングの検討 試験結果(光ファイバ歪センサ)

- PSDにも大きな差異が発生しており、ブラケット外れが発生したことによる振動モードの変化を検知していると考えられる。⇒ **構造上の異常検知が可能。**
- 今後、数値解析等により詳細な評価を実施する予定。



24

発表内容

- ▶ 概要
- ▶ 振動環境緩和技術の検討
- ▶ 振動環境下の計測技術(ヘルスマモニタリング)の検討
- ▶ まとめ



25

まとめ

- 本稿では、新規要素技術(SCSMA)適用による宇宙輸送機の機械的環境緩和の検討状況を紹介した。
- また上記検証試験の機会を活用し、機器搭載構造の異常検知を実現する計測技術(ヘルスマonitoring技術)の検証を行い、その実用性を確認した。
- 機械的環境条件を緩和することは、**国際競争力向上や再使用の観点から、宇宙輸送系として重要な技術課題**であるため、今後も抜本的な環境緩和を達成するための研究開発を実施する。
- また本稿で紹介した構造ヘルスマonitoring技術など、環境緩和だけでなく、関連分野の新規技術の開発にも資するよう、広く関係者と検討内容を共有しながら研究を進めていく。

質疑応答

質問者① JAXA 第一宇宙技術部門 衛星利用運用センター 夏井坂様

マルテンサイト変態とは、ヒステリシスは出ているが弾性変形的な話になるということでしょうか。

発表者

そうです。あるときは金属のような特性を示して、あるひずみ条件下では”やわらかい”弾性体のような挙動を示す特性があります。負荷と除荷の経路が異なるため熱エネルギーを生み出しエネルギー損失特性を発揮します。

質問者

御伺いしたかったのは、繰り返し使用可能かという部分と、いわゆる樹脂系のダンパと比較したときにどのようなメリットがあるのか、という部分についてお聞かせいただければと思います。

発表者

はい。単結晶の合金ですので繰り返しで疲労破壊を起こすというところには確かに課題があると考えておりますが、金属材料ですので繰り返し使用することは可能になります。またメリットとしましては、金属特性を持つものですので解析で予測しやすいという点があると考えています。

質問者② 株式会社テクノソルバ 中村様

ランダム振動の応答のグラフについて、1次モードの部分が非常に効果があると分かるのですが、中-高帯域が割と効きにくいのかなという気がしました。そのあたり何かお考えありますでしょうか。

発表者

まず、いま評価できているのは1次モードの部分であるというのが現状で、中帯域以降は確かに効きにくいという点があります。先ほど課題として識別した試験コンフィギュレーションの違いもありますので、そういったところをもう少し簡単なモデルで検討していくことが必要かという風に考えております。

共同発表者 JAXA 第二研究ユニット 柳瀬様

補足とコメントをさせていただきます。低周波の方が効果的というのは変位が大きいからでして、高周波の方は変位が出ないので単純に効かなくなります。資料14,15ページの図を見

て頂くと、例えばダミー機器が搭載されている部分の加速度実効値は 3Grms 程度と非常に負荷レベルの低い試験となっています。またダミー機器を載せた搭載板が面密度が低く音響励起されにくいラティス構造という構造をしております、音響のような高周波を落とそうと思ったらそもそも揺れないようにしなければならないということが分かりましたので、そのような方向で検討を進めていくのが良いのではないかと考えているところです。

質問者③ JAXA 環境試験技術ユニット 施様

原理としてはヒステリシスを用いて減衰させ、変位が小さい部分は通常の金属と同じ剛性を示すということですが、剛体変位として働く部分に適用すれば効果がもっと現れるのではないかと思ったのですがその部分に関してお考えはありますか。また、SCSMAの加工性について、例えばコイルばねのような形状にすれば変位をかせぐことができましたアイソレータとしての機能も期待できるかと思いますが、そのあたりはどのようにお考えでしょうか。

共同発表者 JAXA 第二研究ユニット 柳瀬様

まさに仰るとおりでして、剛体変位が大きいところはやはり効きやすいです。そのため、擾乱カットに効果的で、擾乱カッターとしてこの SCSMA を適用しようという検討を進めております。また、コイルばねに関してはまさに高周波に適用するにはどうしたら良いかという部分で解決案の1つだと考えていますが、問題は SCSMA の加工性の部分でして、引出しで加工するのですが脆性を持っており熱処理が中々大変な作業になります。多結晶でこのような性能が出せるのも別途研究が進んでいるという風に聞いておまして、そういった方向でできればもっと色々な加工が可能になるのではという風に期待しております。