

6.5. 小惑星探査機「はやぶさ 2」の構造系開発

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系

奥泉 信克 氏



小惑星探査機はやぶさ2の 機械環境試験

第13回試験技術ワークショップ
2015年12月18日(金)

宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系
奥泉 信克

1



内容

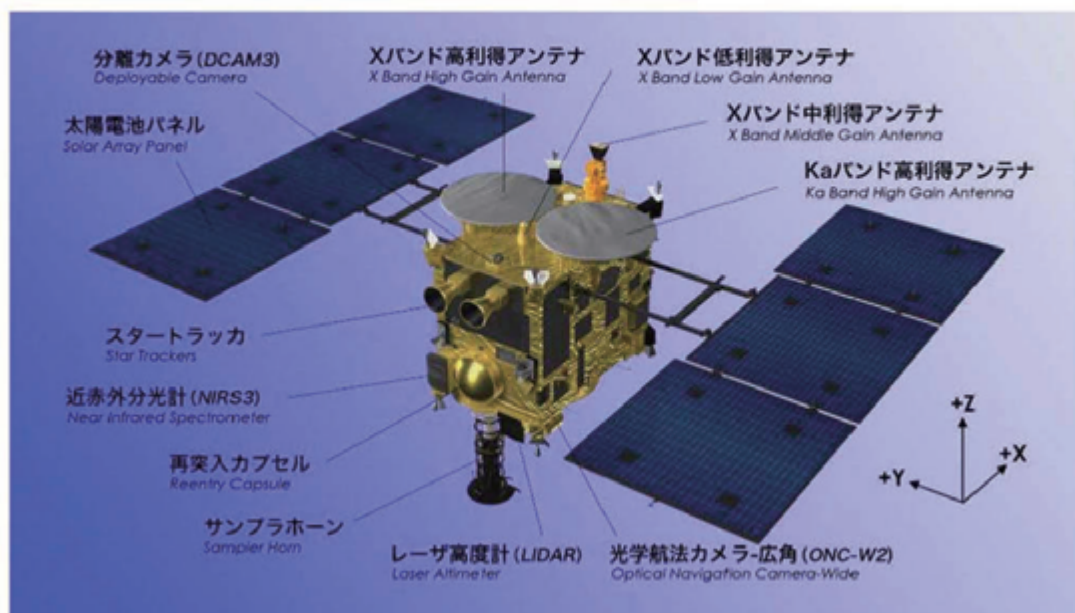


- はやぶさ2構造系概要
- はやぶさ初号機と2号機の機械環境条件比較
- 構造系開発スケジュール
- 機械環境サーベイ試験
- 衝突装置分離衝撃対策
- タンク正弦波振動試験における非線形振動
- FM機械環境試験
- おわりに

2



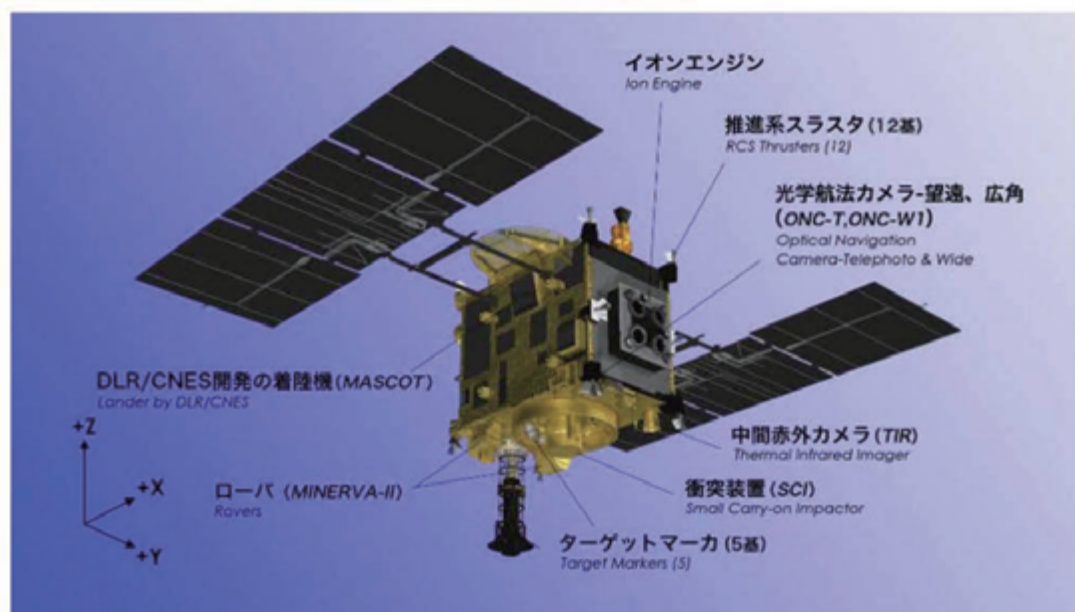
はやぶさ2概観



3



はやぶさ2概観



4



はやぶさ初号機との主な違い

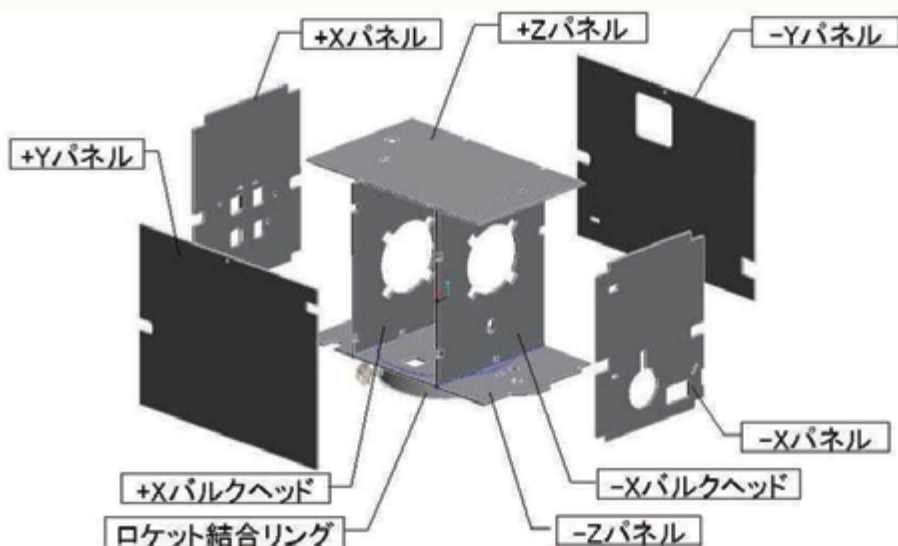


- 構体高さ増加 1m×1.6m×1.1m ⇒ 1m×1.6m×1.25m
 - 質量増加 510kg ⇒ 約600kg
 - 搭載機器・サブシステム追加変更
 - ・ X-HGA平面アンテナ化, Ka-HGA新規搭載
 - ・ MASCOT新規搭載
 - ・ 衝突装置(SCI)新規搭載
 - ・ RW追加 3台 ⇒ 4台
 - ・ 化学推進系配管系統改良
 - ・ ミッション機器改良, 新規搭載
 - ・ ターゲットマーカ追加 3個 ⇒ 5個
- など

5



構体分解図



構体パネル, バルクヘッド: アルミハニカムサンドイッチパネル
 ロケット結合リング: CFRP

6



はやぶさ初号機と2号機の機械環境条件比較



■ 準静加速度(複合荷重)条件

※QTLレベル

	機軸方向	機軸直交方向	イベント
はやぶさ	-6.25	± 8.125	1段燃焼中
	-7.5	± 2.5	2段燃焼中
	-13.75	0	3段燃焼中
	-18.75	0	4段燃焼中
	24	0	落下衝撃試験実績
はやぶさ2	機軸方向	機軸直交方向	
	-4	± 2.25	リフトオフ圧縮
	-0.125		リフトオフ引張
	-5	± 0.625	MECO直前
	1.25	± 1.25	MECO直後
	-3	± 3.5	MaxQ時
	-7.75	± 0.5	2段燃焼中圧縮
	1.875		2段燃焼中引張
比率	0.413	0.431	

7



はやぶさ初号機と2号機の機械環境条件比較



■ 音響条件

※QTLレベル

中心周波数 [Hz]	はやぶさ M-V	はやぶさ2 H-2A202
31.5	136.5	128
63	135.5	129.5
125	143	134
250	143	136
500	139.5	131.5
1000	134	128
2000	130.5	123
4000	130.5	118
8000	124.8	116
Overall	148.8	140.5
差異: 8.3dB		

■ ランダム振動

・ はやぶさ(M-V)のみ

※QTLレベル

	周波数[Hz]	PSD	Overall
機軸方向	20-40	0.08 G ² /Hz	5.4 Grms
	40-80	-12 dB/oct	
	80-364	0.005 G ² /Hz	
	364-400	11.6 dB/oct	
	400	0.0072 G ² /Hz	
	400-1130	4.4 dB/oct	
	1130	0.033 G ² /Hz	
	1180-1700	-11.4 dB/oct	
	1700-2000	0.007 G ² /Hz	
機軸直交 方向	20	0.02 G ² /Hz	6.8 Grms
	20-40	-6 dB/oct	
	40-195	0.005 G ² /Hz	
	195-450	6.1 dB/oct	
	450	0.0027 G ² /Hz	
	450-950	2.6 dB/oct	
	950-1200	0.047 G ² /Hz	
	1200-1650	-21.2 dB/oct	
	1650-2000	0.002 G ² /Hz	

8



はやぶさ初号機と2号機の機械環境条件比較



■ 正弦波振動

- はやぶさ2(H-2A)のみ

	振動数[Hz]	加速度[G]
機軸方向	5-32	1.25
	32-42	1.625
	42-100	1.0

	振動数[Hz]	加速度[G]
機軸直交方向	5-18	0.875
	18-100	0.75

※QTLレベル

■ 衝撃

- はやぶさ

- 落下衝撃試験:半波正弦波15G 10msec
- 衝撃発生イベント
PAF分離, SAP展開, サンプラホーン伸展, サンプリング部動作, プロジェクトイル
発射, ターゲットマーカ分離, MINERVA分離, カプセル分離, IESジンバル解放

- はやぶさ2

- 衝撃発生イベント
PAF分離, SAP展開, サンプラホーン伸展, サンプリング部動作, プロジェクトイル
発射, ターゲットマーカ分離, MINERVA分離, カプセル分離, IESジンバル解放,
MASCOT分離, DCAM3分離, SCI分離

9



構造系開発スケジュール



- 基本設計 2011年4～8月
- 詳細設計 2011年9月～2012年3月
- 構体製造・組み立て 2012年1～11月
- 機械環境サーベイ試験 2012年12月～2013年1月
- FM機械環境試験 2014年7～8月
- フライトオペレーション 2014年9～12月

10



機械環境サーベイ試験



- はやぶさ初号機の実績をもとに、構造モデル試験を省略して実施
- 目的:
 - ・ 構体の耐機械環境性の確認(正弦波を除く)
 - ・ 基本固有振動数が要求を満足していることの確認
 - ・ 動特性把握による構造数学モデルの確認
 - ・ 搭載機器の機械環境条件の評価
 - ・ GSEや機械環境試験設備との適合性確認
 - ・ 一部の搭載機器について、PFT環境の提供と耐機械環境性評価
- 日程: 2012年12月15日～2013年1月18日
- 場所: 相模原キャンパス飛翔体環境試験棟/筑波宇宙センター総合環境試験棟
- 試験項目

・ プロジェクタ射出衝撃試験	・ 振動特性試験
・ 衝突装置(SCI)分離衝撃試験	・ 音響試験
・ PAF分離衝撃試験	・ SAP保持解放衝撃試験

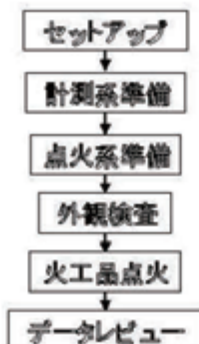
11



プロジェクタ射出衝撃



- 目的: プロジェクタ弾丸射出時に発生する衝撃環境の計測
- 方法: サンプラホーンを取り外した構体を吊り下げ、プロジェクタを作動、射出されたプロジェクタイトを保護標的で受ける(2回実施)。
- 加速度計測CH数: 約230CH
- 試験フロー



プロジェクタイト
保護標的

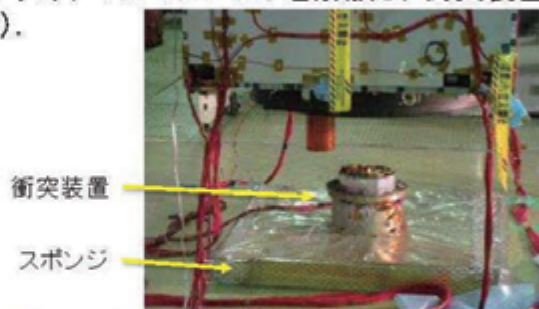
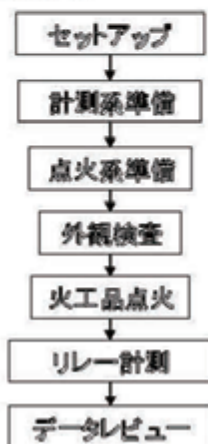
12



衝突装置分離衝撃試験



- 目的: 衝突装置(SCI)分離時の衝撃環境の計測
- 方法: SCIを取り付けた構体を吊り下げ、マルマンバンドを解放し、衝突装置をスポンジ上に落下させる(2回実施)。
- 加速度計測CH数: 約230CH
- 試験フロー



衝突装置



分離機構

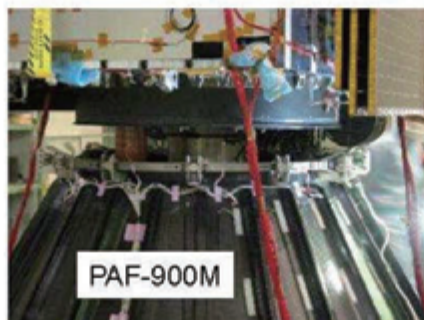
13



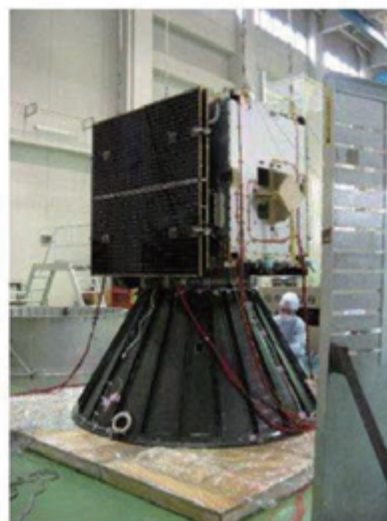
PAF分離衝撃試験



- 目的: PAF-900Mと探査機の分離時の衝撃環境の計測(2回実施)
PAF-900Mと探査機のフィットチェック
- 方法: PAF-900Mと探査機をマルマンバンドで結合して吊り下げ、バンドを解放して、PAFをスポンジ上に落下させる。
- 加速度計測CH数: 約230CH
- 試験フロー



PAF-900M



14



振動特性試験

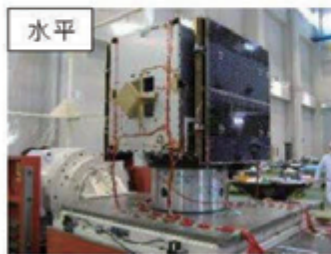


- 目的: 探査機の動特性の確認
構造数学モデルの評価
探査機と地上支援装置との適合性確認

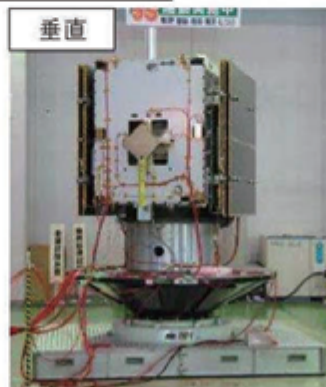
- 加振レベル(低周波ランダム振動)

加振方向	周波数 [Hz]	加速度 [G ² /Hz]	overall [Grms]	試験時間 [sec]
XYZ各軸	5~200	0.00005	0.10	30

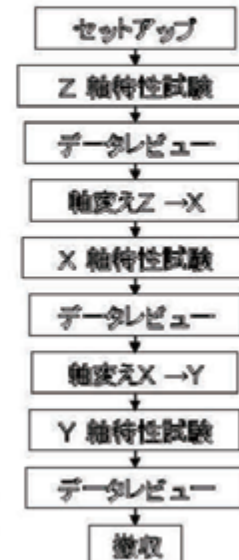
- 加速度計測CH数: 約230CH



30t大型振動試験装置(水平・垂直)



- 試験フロー(2日間で実施)



15

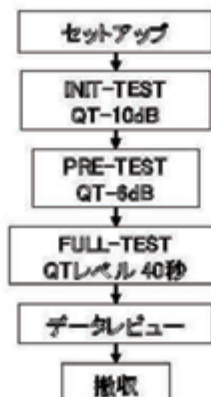


音響試験・SAP保持解放衝撃試験



音響試験

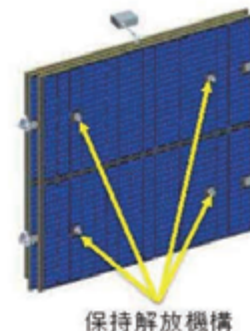
- 目的: 搭載機器のランダム振動環境計測
構体の音響に対する耐性の確認
- 加音レベル: PFT負荷(1回)
- 加速度計測CH数: 約230CH
- 試験フロー



※どちらも筑波総合環境試験棟で実施

SAP保持解放試験

- 目的: SAP保持解放時の衝撃環境の計測(2回実施)
- 方法: 構体にSAPを組み付けてクレーンをかけた状態で、2翼同時に保持ワイヤをワイヤカッターで切断
- 加速度計測CH数: 約248CH
- 試験フロー



保持解放機構

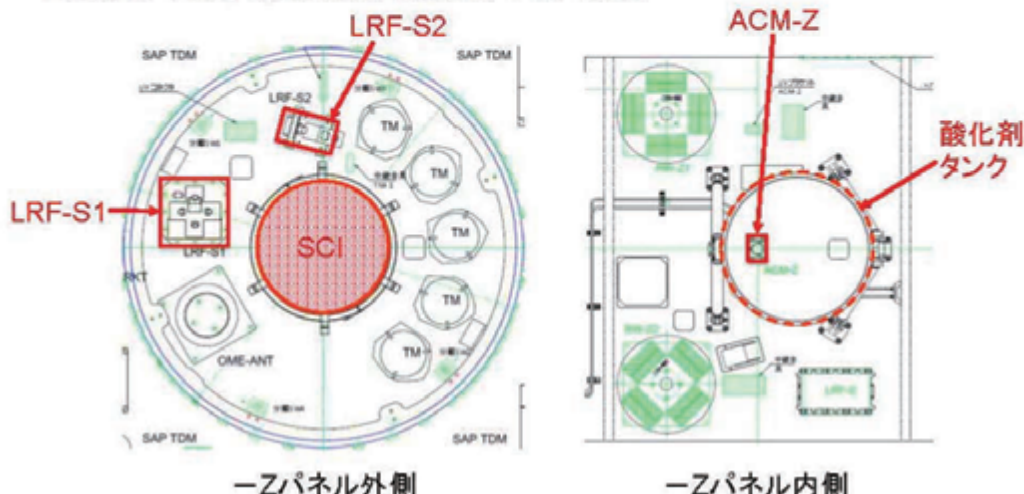
16



衝突装置分離衝撃対策



- 機械環境サーベイ試験の衝突装置(SCI)分離衝撃試験において、SCI周辺の搭載機器の衝撃レベル実測値が実績レベルを逸脱
- そのため衝撃低減策を検討し、-Z面ダミーパネルを用いた一連の評価試験を実施して衝撃環境低減を確認し、FMIに反映



17



衝突装置分離衝撃対策試験



- 衝撃低減効果評価試験
 - ロケット結合リング周辺を模擬した-Z面ダミーパネルを製作
 - SCIはダミーとし、衝撃源としてフランジボルトを使用して衝撃試験を実施
 - 再現性の高い繰り返し衝撃試験が可能となり、種々のコンフィギュレーションによる衝撃レベルを実測して比較し、ステイフナ追加と搭載位置移動による衝撃低減効果を確認
- SCI(FM)分離衝撃試験

引き続き、SCI(FM)の分離衝撃試験を兼ねて、マルマンバンドを用いた分離衝撃試験を実施、衝撃環境を実測して低減を確認
- ダミーパネル音響試験

その後、-Z面ダミーパネルを用いた音響試験も実施し、搭載機器のランダム振動環境に悪影響がないことを確認



-Z面ダミーパネル

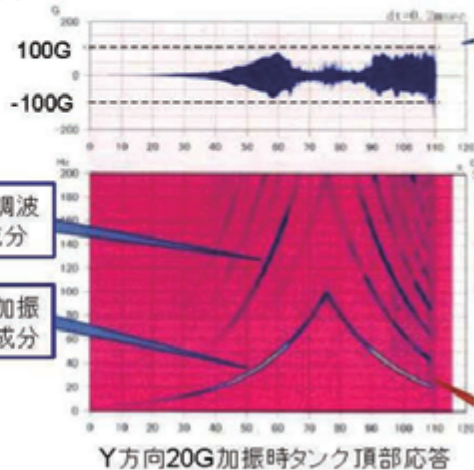
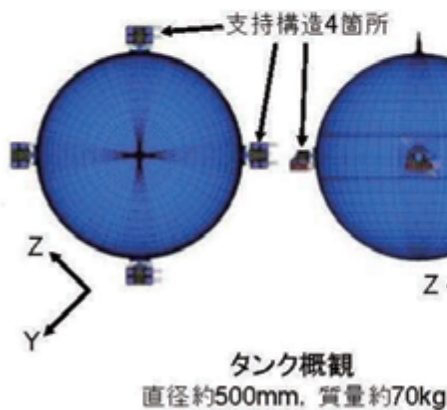
18



タンク正弦波振動試験における非線形振動



- タンク単体正弦波振動試験において、非線形振動によって過大な加速度が発生し、支持構造に過大な荷重を印加するトラブルが発生。
- はやぶさ初号機では正弦波振動試験がなかったこと、非線形振動に対する認識不足などから、適切に予測、対応できず。



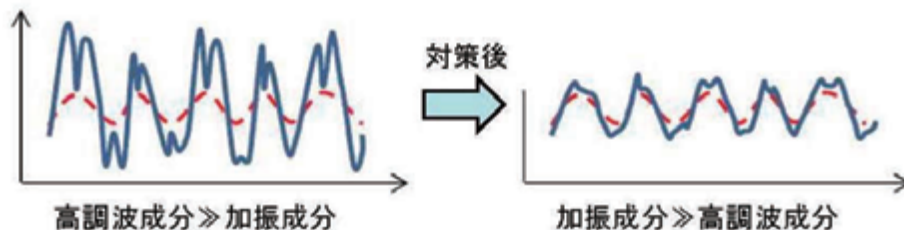
19



タンクの非線形振動の原因と対策



- ガタをできるだけ縮小する改修を実施するとともに、正弦波振動条件を緩和
- その他のタンクについても同様な対策を実施。
- これらの対策によって、非線形振動の発生が抑えられ、タンクのQT正弦波振動試験を完了



- 非線形振動は、共振点の振幅依存性だけでなく、高調波成分により大きな加速度を発生させることがあり、要注意。

20



FM機械環境試験



- 目的
 - ・ 探査機構体の機械環境耐性の確認
 - ・ 探査機の基本固有振動数の確認
 - ・ 探査機の動特性を把握、構造数学モデルの確認
 - ・ 搭載されるFM品のシステムレベルの機械環境耐性の確認
 - ・ 搭載機器の機械環境条件の評価
- 日程: 2014年7月9日～2014年8月6日
- 場所: 相模原キャンパス飛翔体環境試験棟/筑波宇宙センター総合環境試験棟
- 試験項目(構造関係)
 - ・ 質量測定、音響試験、振動試験(振動特性、正弦波)
- 結果概要
 - ・ 計画通りの機械環境を負荷し、耐性の確認、応答データ取得、構造特性の確認を行い、試験目的を達成。振動試験結果と一次固有値解析結果、正弦波応答解析結果との整合性を確認

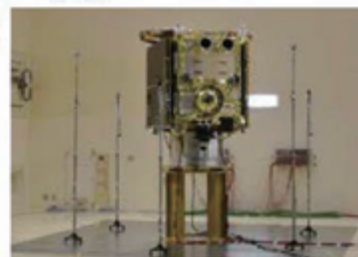
21



FM音響試験



- 音響試験(2014年7月8～13日)
- 試験目的
 - ・ 探査機構体のフライトコンフィギュレーションでの機械環境耐性の確認
 - ・ FM搭載機器のシステムレベルでの機械環境耐性の確認
 - ・ 搭載機器に規定されたランダム振動条件の評価
- 音響試験条件: PFTレベル
音圧: QT(O.A.140.5dB), 加音時間: 40sec
- 計測データ
加速度: 218CH, 音圧6CH
- 音響試験結果
 - ・ PFTの加音を正常に実施、全ての加速度データ、音圧データを正常に取得
 - ・ FM構体および搭載機器の音響耐性を確認
 - ・ 搭載機器の振動環境が、一部の機器を除いて規定したランダム振動条件内に収まることを確認。逸脱した機器についても、逸脱は軽微であり、問題ないことを確認



22



FM振動試験



■ 目的

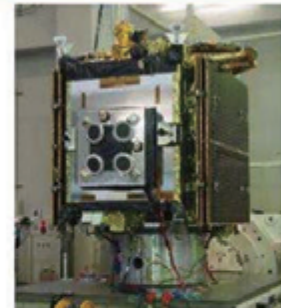
- 探査機構体の機械環境耐性の確認
- 探査機構体の基本固有振動数の確認
- 探査機構体の動特性把握, 構造数学モデルの確認
- 搭載機器FMのシステムレベルの耐環境性の確認

■ 試験条件

- 振動特性試験(低レベルランダム振動試験)

加振方向	周波数 [Hz]	加速度 [G^2/Hz]	overall [Grms]	試験時間 [sec]
XYZ各軸	5~200	X: 0.00005 Y,Z: 0.0001*	0.10 0.14	30

*ノイズの影響
低減のため



- 正弦波振動試験(PFTレベル)

	周波数 [Hz]	加速度 [G]	掃引速度 [oct/min]
機軸方向	5~30	1.25	4
	30~40	1.625	
	40~100	1.00	
機軸直交 方向	5~18	0.785	4
	18~100	0.75	

- 計測
加速度計測CH数
約200CH

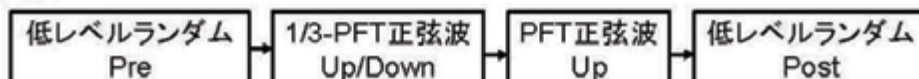
23



FM振動試験



■ 試験フロー



※1/3-PFT正弦波とPFT正弦波の加振前にノッチング条件の検討を実施

■ 主な加振およびノッチング方針(ロケット側と合意)

- 1/3-PFT正弦波振動試験でUpとDownの伝達関数に差異がないことを確認し, PFT正弦波ではUp-Sweepのみ
- 正弦波振動試験では, CLA結果に基づいてノッチングを適用

■ 振動試験結果概要

- 各軸の正弦波加振はほぼ計画通りに実施, 計測した全データを正常に取得
- 構体が機械環境耐性を有することを確認
- 探査機の基本固有振動数が要求を満足することを確認
- システム構造数学モデルの妥当性確認
- FM搭載機器のシステムレベルでの正弦波振動耐性確認

24



FM振動試験



■ 固有振動数

	要求	試験結果	解析結果	振動モード
機軸直交方向	10Hz以上	22.4Hz 24.4Hz	21.6Hz 24.0Hz	X軸横曲げ1次 Y軸横曲げ1次
機軸方向	30Hz以上	73.2Hz	75.0Hz	Z軸縦1次

■ 振動試験で生じた問題

- ・ X軸正弦波加振前後の振動特性試験の伝達関数において、1次共振点のわずかな低下やXeタンク周辺の応答の変化などがあり、念のため、探査機を部分的に分解して調査を行い、損傷や緩みなどが無いことを確認。差異の原因は、可動部を有する大型機器の非線形性や安定点の変化によるものと推定。
- ・ Z軸正弦波加振前後の振動特性試験の伝達関数において、クロストーク方向の伝達関数に差異が認められたが、加振テーブルの振動自体に差異があったため、加振機に起因するものと判断。

25



おわりに



- はやぶさ2では、はやぶさ1の実績に基づいて、構造モデル試験を簡略化して機環境試験サーベイ試験とし、FM総合試験で最終的な検証を行った。
- しかし、はやぶさ1には無かった正弦波振動試験や新規搭載機器などのため、開発中に新たな問題が発生した。
- 新規の衝撃源については、適切な時期に衝撃レベルを実測すべきだが、それが困難な場合、衝撃源やその近傍での衝撃低減策を検討しておくことが有効である。
- ガタなどの非線形性を不可避免的に有する搭載機器においては、固有値の変化や高調波成分の励起などの可能性を考慮して、設計、解析、試験を行う必要がある。特に、質量の大きな機器の場合、全機の応答にも影響を与える可能性がある。
- 非線形性が無視できない場合の構造解析の方法や試験検証の考え方を構築すべきである。
- はやぶさ2構造系開発を完了できたのは、メーカーおよびJAXAのプロジェクトメンバー各位の御尽力によるものであり、深く感謝いたします。

26

質疑応答

ワークショップ進行の都合上、質疑応答を割愛



図 6-2 ご講演の様子