

第 3 章 振動試験

3.1 適用範囲

本報告書は、FIT-SATのフライトモデル（以下、FMと称す）の振動試験について適用する。

3.1.1 試験目的

本振動試験はFIT-SATのFMについて、以下の確認を目的として実施した。

- 1) ファスナ（ネジ）の緩みがないことを確認。
- 2) 太陽電池セルのカバーガラスの破損がないこと、太陽電池等にはがれがないことを確認。
- 3) 衛星構造体及び衛星搭載部品・機器が打上げ時の振動環境に耐えることを確認。
- 4) アンテナ（リン青銅）が自発的に展開しないことを確認。
- 5) 振動試験前と試験後でバッテリーの充電・放電特性に変化がないことを確認。

3.1.2 関連文書

3.1.2.1 適用文書

以下の文書は、本文書で規定する範囲においてこの文書の一部をなす。

- 1) JMX-2011303B JEM搭載用小型衛星放出機構を利用する小型衛星への構造・フラクチャコントロール計画書
- 2) JMX-2010292A JEMペイロードアコモデーションハンドブック -Vol.8- 小型衛星放出インタフェース（技術実証ミッション用）
- 3) KAE-01001E HTV検証要求書

3.1.2.2 参考文書

本報告書は以下を参考にして作成したものである。

- 1) FIT-SAT EM 振動試験計画書・報告書
- 2) FIT-SAT 2012-001 FIT-SAT FM 振動試験計画書

3.1.3 供試体

本試験の供試体を表3.1，FMの供試体の外観図3.及び座標系を図3.1に示す。

表3.1. 供試体

番号	品目	数量	備考
1	FIT-SAT フライトモデル (FM)	1 式	

寸法：X100×Y100×Z113.5 [mm]

質量：1.33 [kg]以下



図3.1. 供試体 (FM) の外観及び座標系

3.2 試験概要

3.2.1 試験場所

九州工業大学 超小型衛星試験センター

3.2.2 試験日程

2012年5月21日

3.2.3 試験環境条件

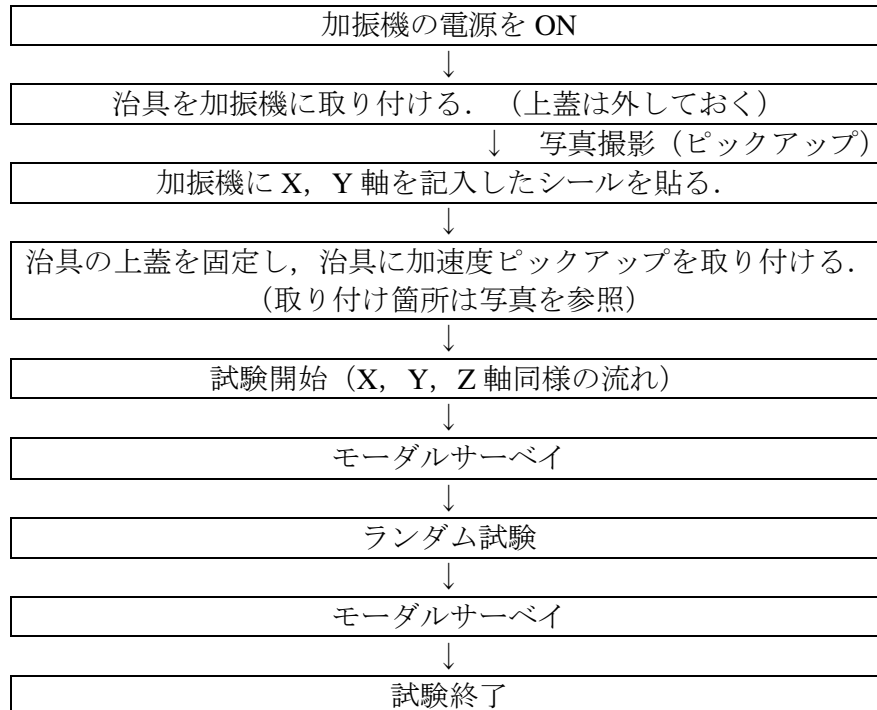
本試験の標準環境条件を以下に示す.

- 1) 温度 : 25.3度
- 2) 相対湿度 : 51%

3.2.4 試験フロー及び試験スケジュール

本振動試験の試験フロー (簡易) を表3.2に示す.

表3.2. 試験フロー (簡易)



3.2.5 合否判定基準

合否判定基準は以下に示す.

- 1) 外観検査
 - ・加振後の外観検査により, 有害な変形, 損傷等がないこと (外観目視検査).
 - ・太陽電池セルに損傷・はがれがないこと.
 - ・アンテナが展開していないこと

機能試験

- ・フライトピンを抜いて30分後衛星が起動してアンテナが展開するかどうか
- ・アンテナ展開後ビーコンを送信できるかどうか.
- ・LEDが各々60秒間点灯できるかどうか

ファスナ (ネジ) の緩み

- ・加振後トルクドライバを用い規定のトルクで締め付けられているかどうかを確認

- 2) ランダム試験
 - 規定の公差内で加振され, 有意なデータが取得されていること.
- 3) モーダルサーベイ
 - ランダム試験前後において構造特性 (固有振動数) に有意な差異がないこと.

3.3 試験方法

3.3.1 振動試験概要

供試体を、治具（剛性の高いもの）を介して振動試験機に取り付け、 x 、 y 、 z 方向に各々60秒間加振する。振動試験では以下に示す確認を行い、異常時には迅速な加振停止などの措置をとる。

- 1) 試験前の確認
 - ・振動試験前の衛星の外観，機能・性能に異常の無い事を検査・試験して結果を記録する。
 - ・加速度センサの貼り付け位置を写真記録する。
- 2) 各軸加振前の確認
 - ・試験のセットアップ状況を写真記録する。
 - ・加振前にタップチェックを行い，計測システムの健全性を確認する。
- 3) 加振時の確認
 - ・加振中は供試体の異常（破損やボルト抜けなど），加速度センサの外れや異音の発生が無い事を確認して，以上の場合は迅速に加振を停止する。
- 4) 加振後の確認
 - ・概観検査を行い，供試体に損傷やボルトの緩み・外れなどが生じていないことを検査する（検査結果を記録する）。
 - ・加振レベルデータ及び加速度センサデータのクイックレビューを行い有意なデータが取得されていること，構造特性（固有振動数など）に異常のないことを確認する。

3.3.2 振動コンフィギュレーション

加振時のコンフィギュレーションを図3.2示した。

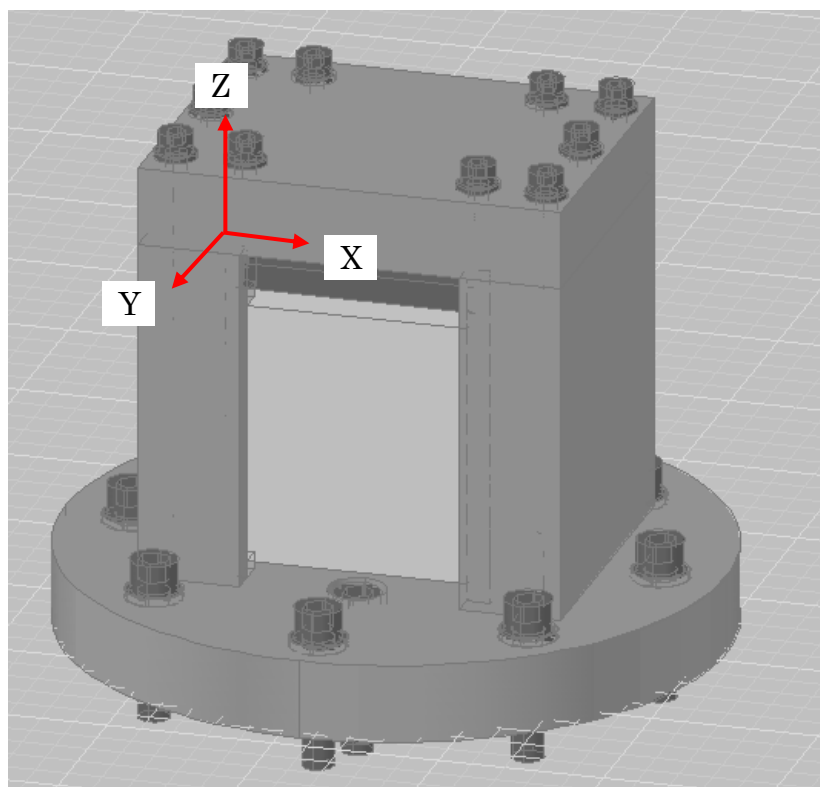


図3.2. 治具の外観図3.及び座標系

3.3.3 加振条件

- 1) ランダム振動試験環境
振動試験レベルを表3.3に示した。試験時間は，3軸方向に60秒とする。またバッテリーの健

全性検証を兼ねるため、Minimum Screening Level +3dB を振動試験レベルとした。

表3.3. 打ち上げ時のランダム振動試験レベル

周波数	PSD		
	[Hz]	[G ² /Hz]	[dB/oct]
20	0.02		
20~80			+3
80~350	0.08		
350~2000			-3
2000	0.014		
Composite	8.6 [Grms]		

※試験条件公差は、「KAE-01001E, HTV検証要求書」に準拠し、以下のとおりとする。

- ・全体実行値レベル : **±1.5dB**
 - ・パワースペクトル密度 : **+3.0dB ~ -1.0dB**
 - ・振動周波数 : ±2% または 1Hz の大きい方
 - ・負荷時間 : +10% ~ -0%
- 2) モーダルサーベイ振動試験
 ランダムのホワイトノイズ : 20~2000 [Hz]
 スペクトラム : 1.16×10^{-4} [G²/Hz] (実効値約 0.5 [Grms])

3.3.4 計測

加速度ピックアップの位置を図3.3~図3.6に示す。

- 1) 入力加速度
 治具上に加速度センサを設置して、入力加速度を計測する。

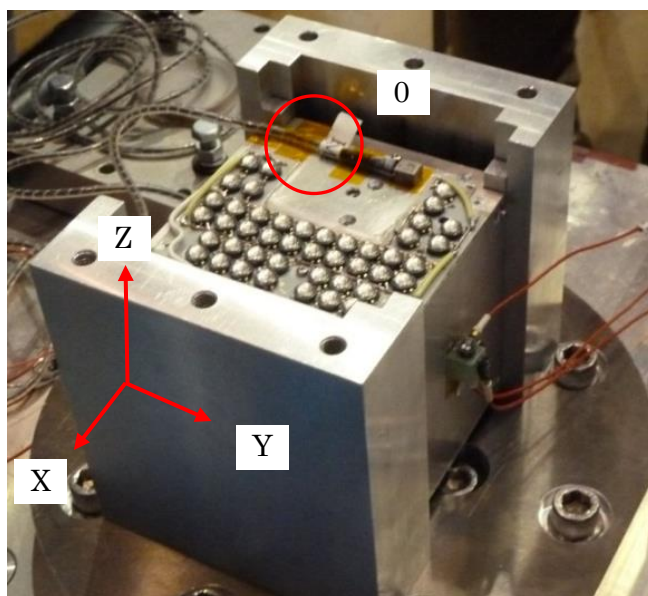


図3.3 衛星本体上の加速度ピックアップ(Ch0)の取り付け(X,Y,Z軸共有)

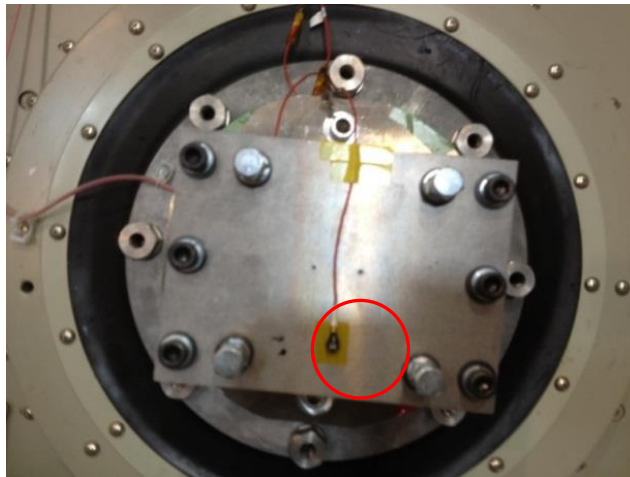


図3.4 治具の加速度ピックアップの取り付け位置 (Z軸のみ)

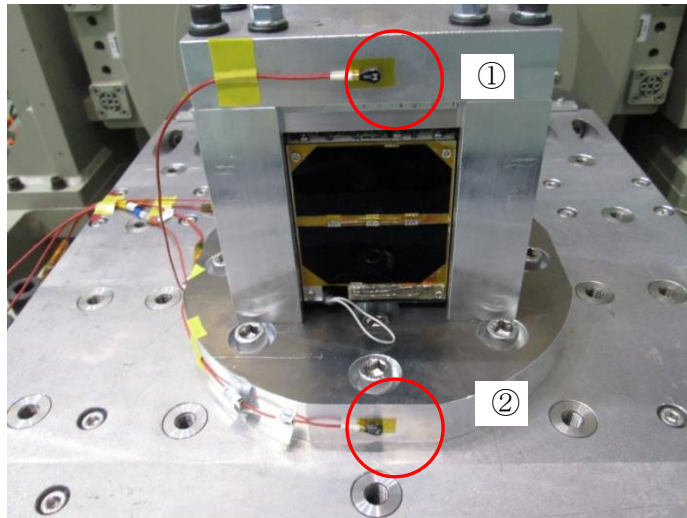


図 3.5 治具の加速度ピックアップ(Ch1~2 但し Ch3 は Ch2 の反対側)の取り付け位置 (Y 軸)

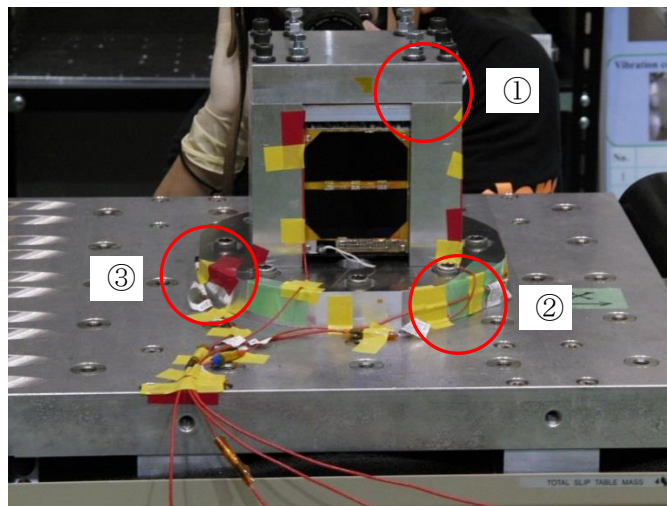


図3.6 治具の加速度ピックアップ(Ch1~3)の取り付け位置 (X軸)

表3.4. 加速度ピックアップ取り付け位置

チャンネル番号	軸	衛星の面	写真
0	Z	上面	図 3.3
1,2,3	-	治具	図 3.4~図 3.7

3.3.5 固定条件

衛星の構造体のボルト締め付けトルク，治具の固定，衛星のZ面を治具で押さえて固定する際の条件を以下に示す．固定はトルクレンチを使用する．

治具の固定

M3（ナベ頭ねじ）：0.3 [Nm]

M12（六角穴付きボルト）：80～90 [Nm]

M8（六角穴付きボルト）：10 [Nm]

1) Z面の固定（モンキーレンチを使用）

衛星と治具の上蓋の間には板厚10mmの板が入っており，六角ボルトを締めることで板を押さえつけ衛星のZ面に負荷をかけることができる．（負荷はレール一本あたり46.6 [N] 必要）

M8（六角ボルト）：強め（しっかり固定）

3.3.6 治具固定方法

治具の固定方法を図3.7に示す．

・治具の組立手順

1. ②を①に取り付ける．（下から六角穴付きボルト M8-45×6 本で固定する）
2. ①を加振機に取り付ける．（六角穴付きボルト M12-50×8 本と M12-35×4 本（中心付近）で固定する）
3. ③の衛星を②と②の間に入れる．
4. ④の板を③の上に乗せる．（試験条件を満たすため，荷重をかける必要がある）
5. ⑤で蓋をする．（六角穴付きボルト M8-60×6 本とばね座金・平座金で②を固定する）
6. ④を鉄板ごと⑤を六角ボルト M8-50×4 本で押さえる．

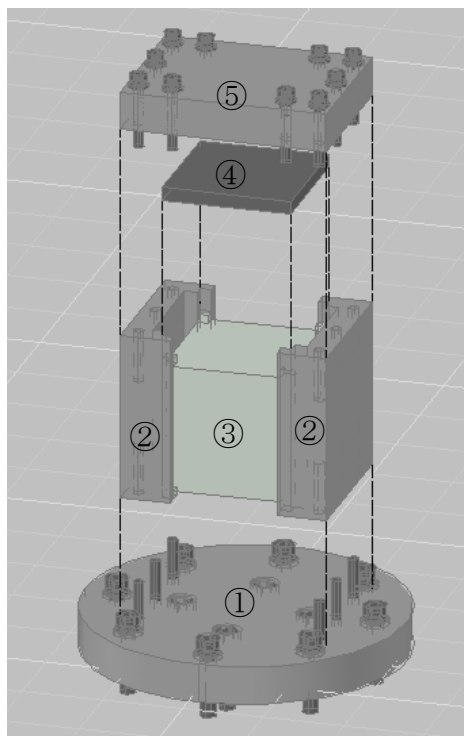


図 3.7 振動試験の治具

3.4 試験結果

試験結果を簡易フローに沿って述べる．また，全体の試験結果のまとめを述べる

3.4.1 試験結果(Z 軸)

振動試験はZ軸から行った．Z軸の試験の流れを表 3.4，試験の様子を図 3.8 に示す．

表 3.5. Z 軸の試験の流れ

		試験簡易名称
Z 軸	モーダルサーベイ	モーダル 1
	↓	
	ランダム試験	ランダム 1
	↓	
	モーダルサーベイ	モーダル 2
	↓	
	治具を外し、加振機を 90 度回転させ Y 軸に変更	

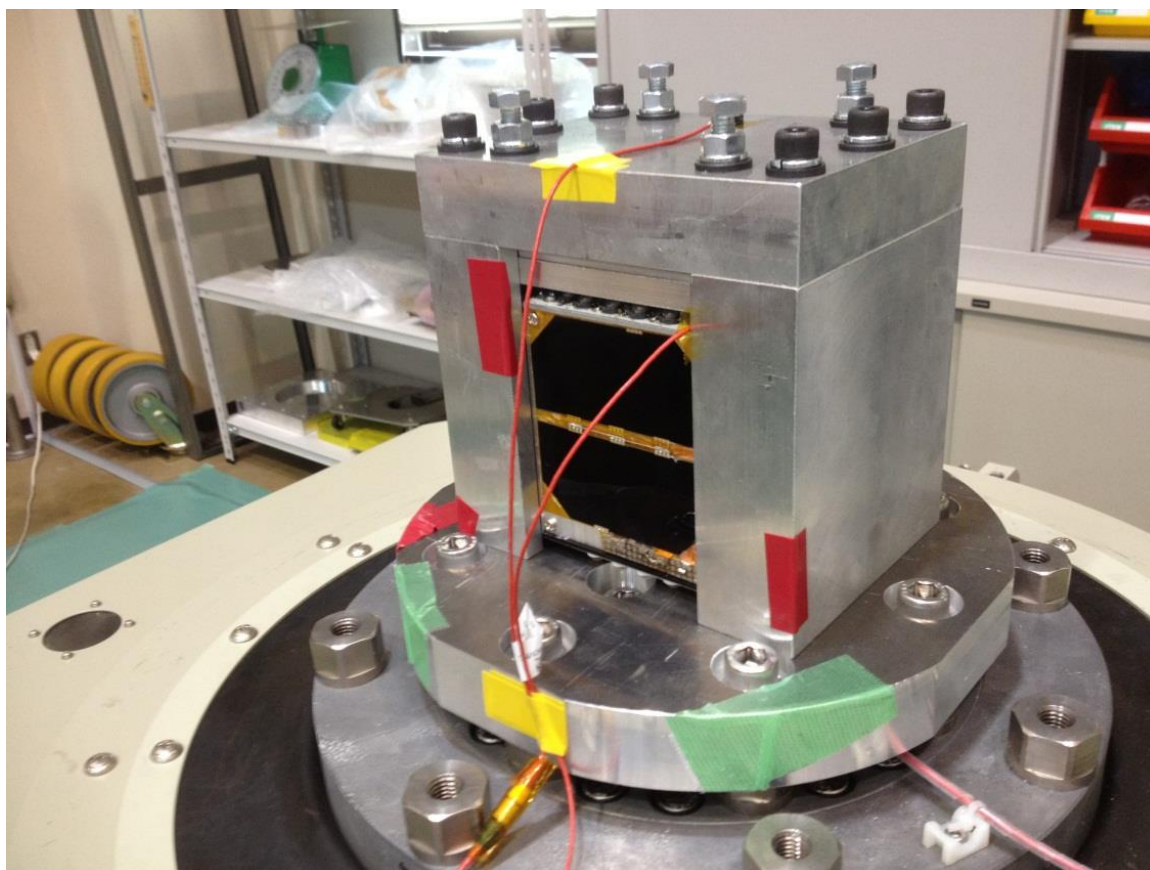


図 3.8. Z 軸の試験の様子

3.4.1.1. モーダルサーベイ試験

高速フーリエ変換 (FFT) の波形を図 3.9, 図 3.10 に示す. 加振前のモーダル 1 と加振後のモーダル 2 を比較した. 加振前と加振後のグラフには特に変化がないことを確認できた

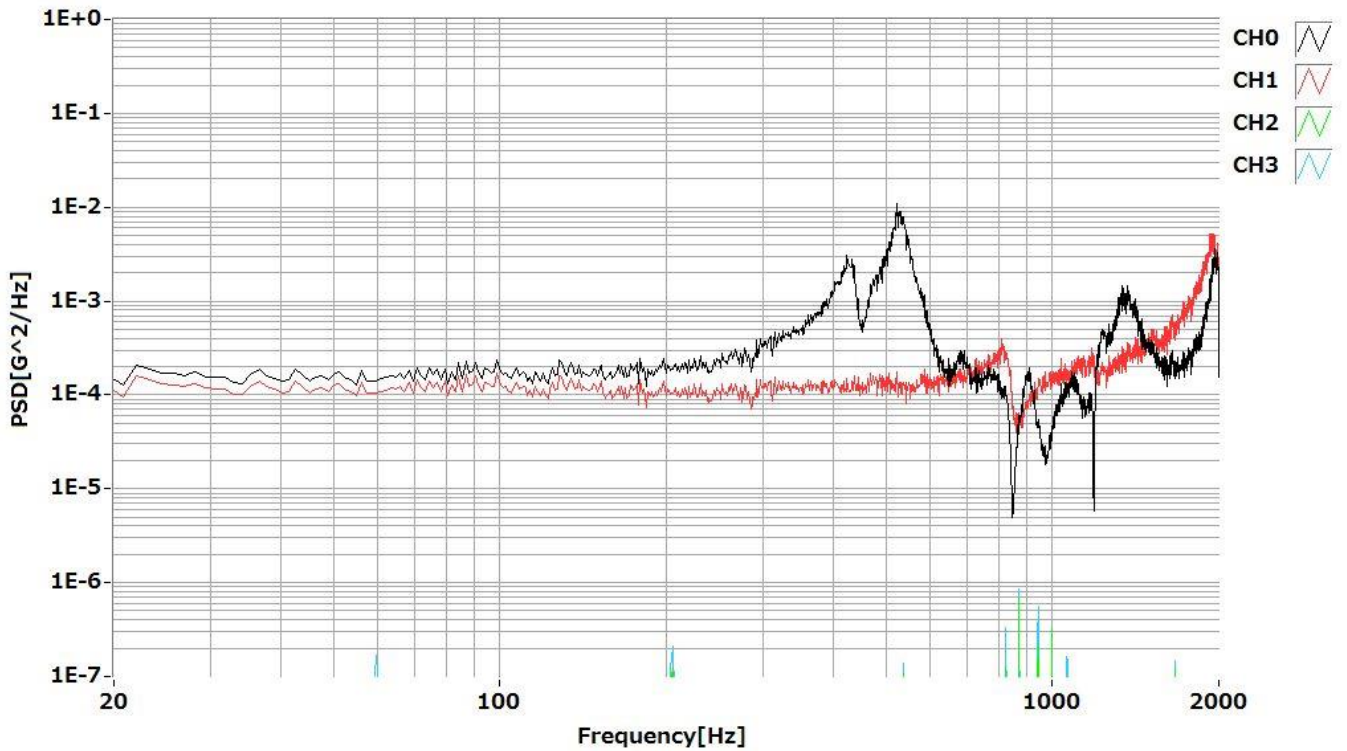


図 3.9. (Z 軸) モーダル 1 の FFT グラフ (Ch0~3)

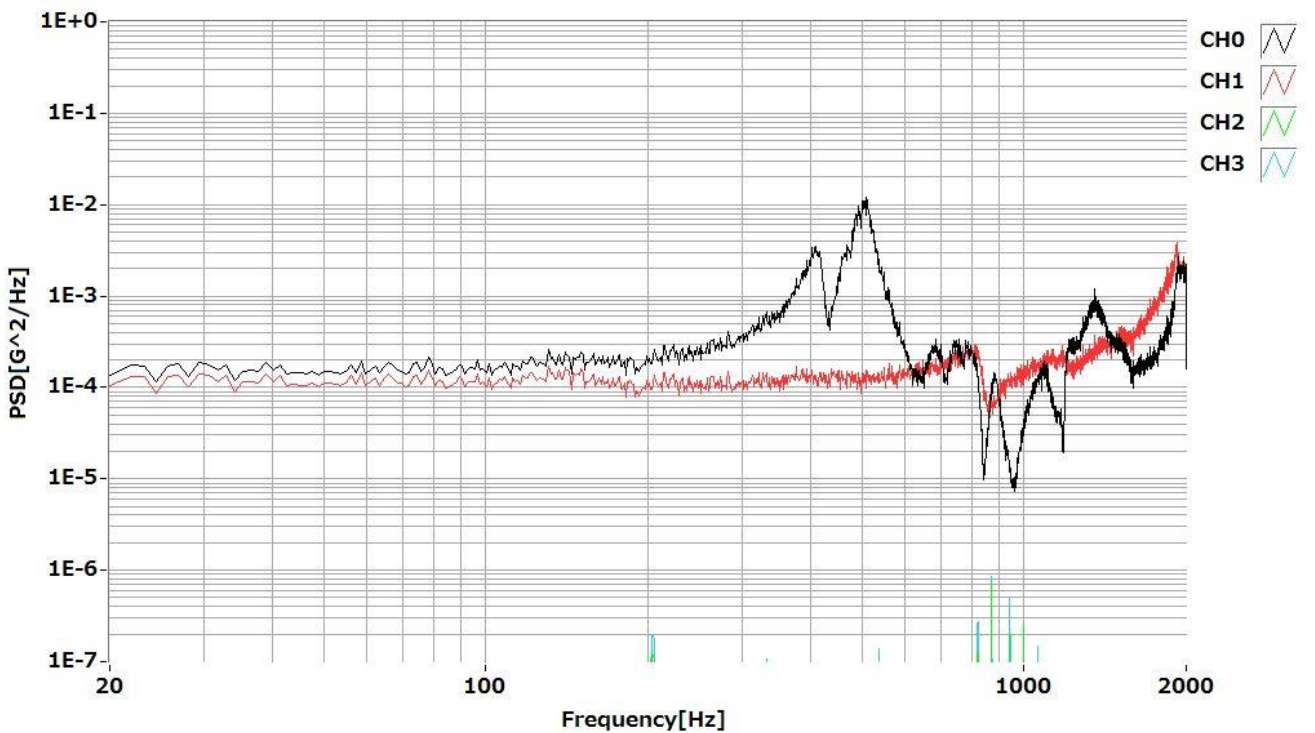


図 3.10. (Z 軸) モーダル 2 の FFT グラフ (Ch0~3)

3.4.1.2. ランダム試験

Z 軸試験時の制御用加速度ピックアップの出力波形及び制御波形を図 3.11・図 3.12 に示す。制御波形から試験レベルに制御出来ていることを示す。

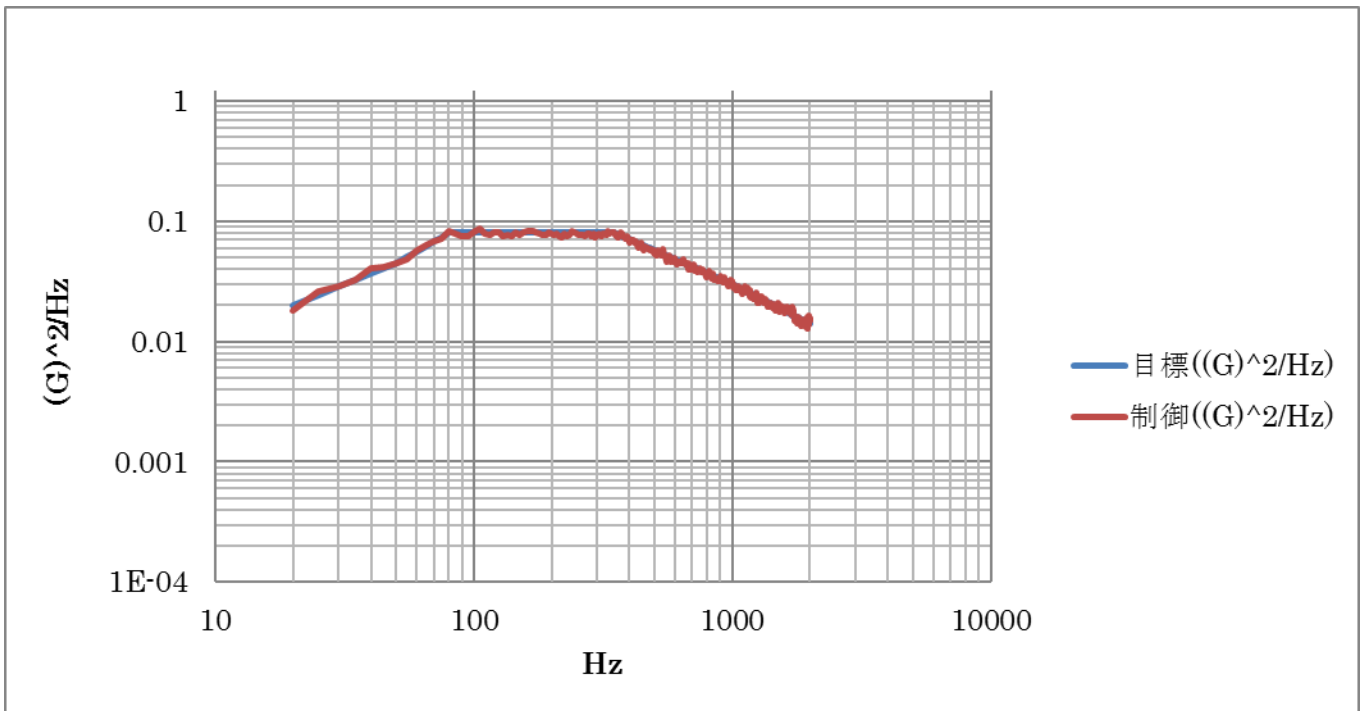


図 3.11. ランダム 1 の制御波形 (Z 軸)

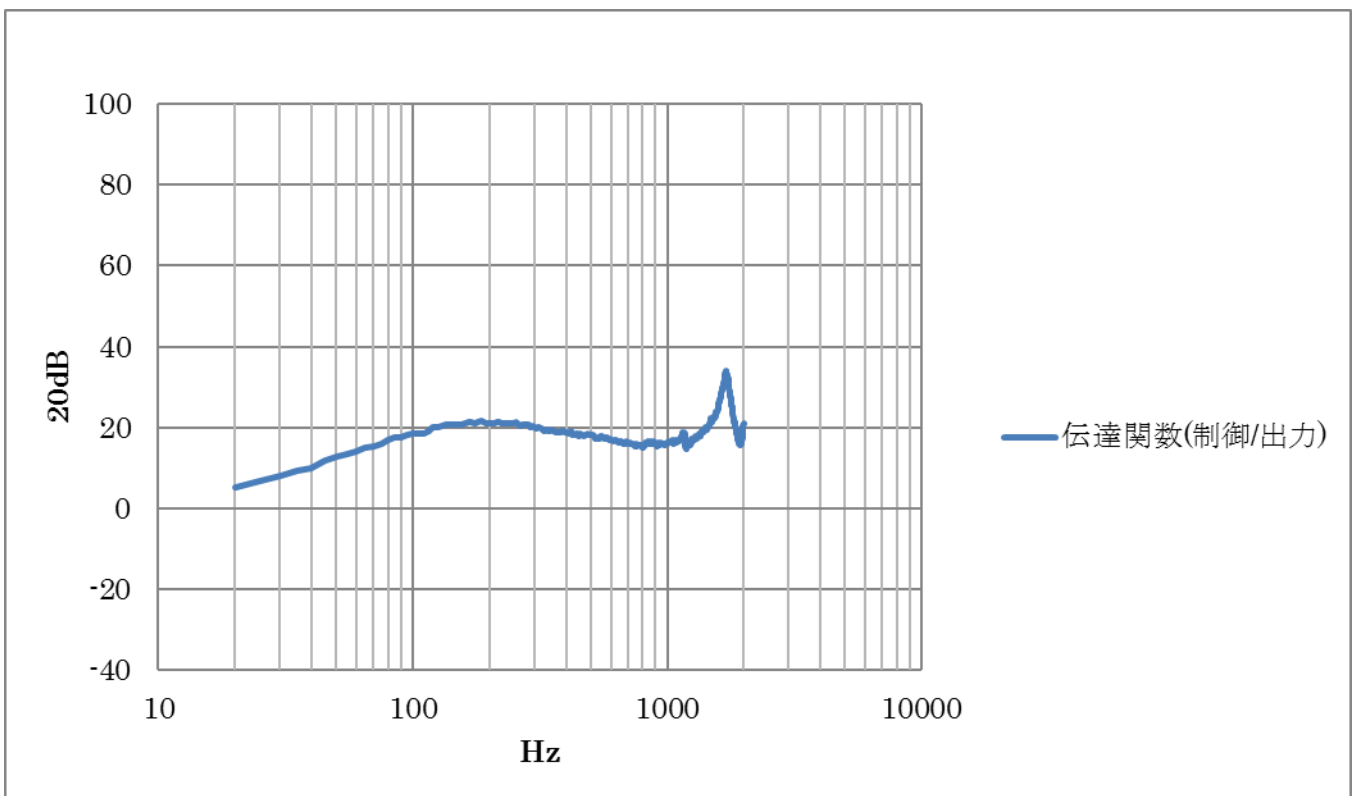


図 3.12. ランダム 1 の伝達関数 (Z 軸)

次に高速フーリエ変換 (FFT) の波形を図 3.13 に示す。

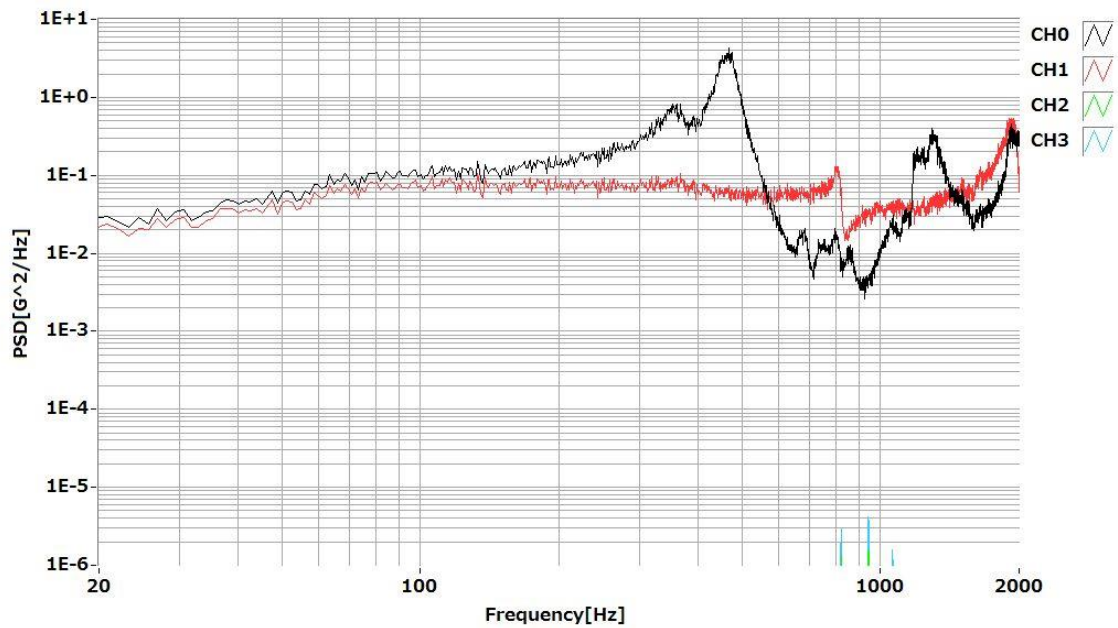


図 3.13. (Z 軸) ランダム 1 の FFT グラフ (Ch0~3)

3.4.2 試験結果(Y 軸)

Z 軸の次に Y 軸の振動試験を行った。Y 軸の試験の流れを表 3.5, 試験の様子を図 3.14 に示す。

表 3.6. Y 軸の試験の流れ

		試験簡易名称
Y 軸	モーダルサーベイ	モーダル 3
	↓	
	ランダム試験	ランダム 2
	↓	
	モーダルサーベイ	モーダル 4
	↓	
	治具を外し, 治具を 90 度回転させ X 軸に変更	

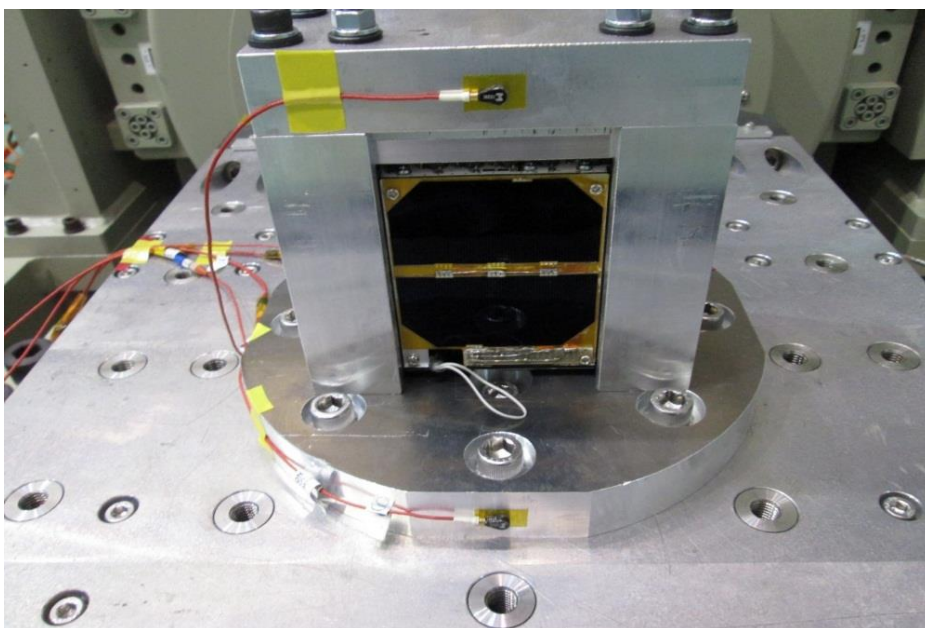


図 3.14. Y 軸の試験の様子

3.4.2.1. モーダルサーベイ試験

高速フーリエ変換（FFT）の波形を図 3.15, 図 3.16 に示す. 加振前のモーダ 3 と加振後のモーダル 4 を比較した. 加振前と加振後のグラフには特に変化がないことを確認できた

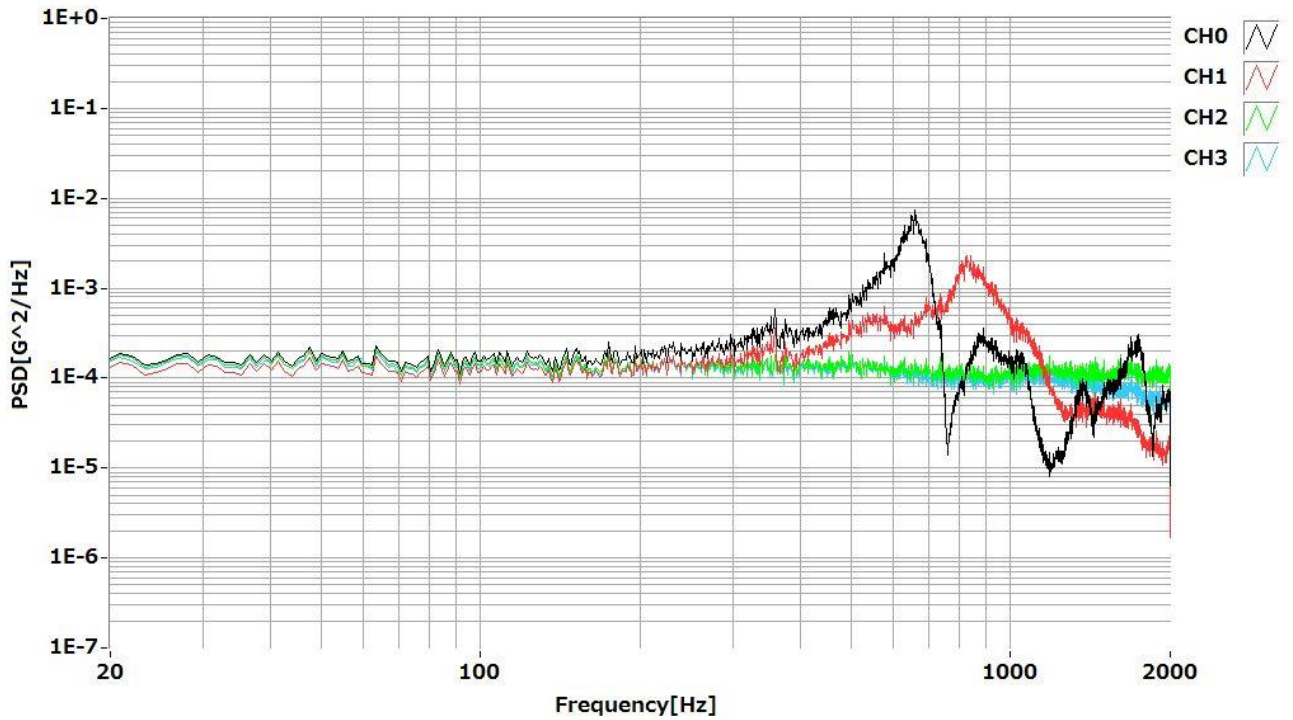


図 3.15. (Y 軸) モーダル 3 の FFT グラフ (Ch0~3)

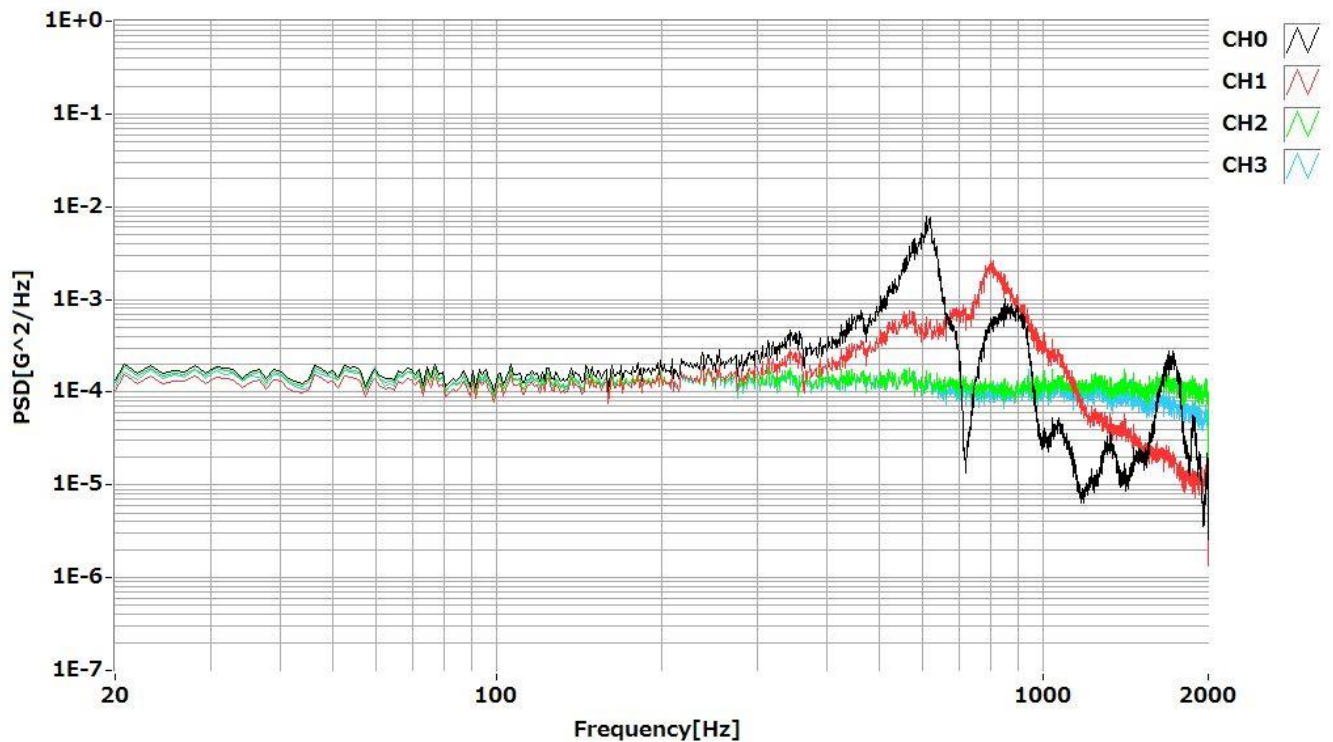


図 3.16. (Y 軸) モーダル 4 の FFT グラフ (Ch0~3)

3.4.2.2. ランダム試験

Y 軸試験時の制御用加速度ピックアップの出力波形及び制御波形を図 3.17・図 3.18 に示す. 制御波形から試験レベルに制御出来ていることを示す.

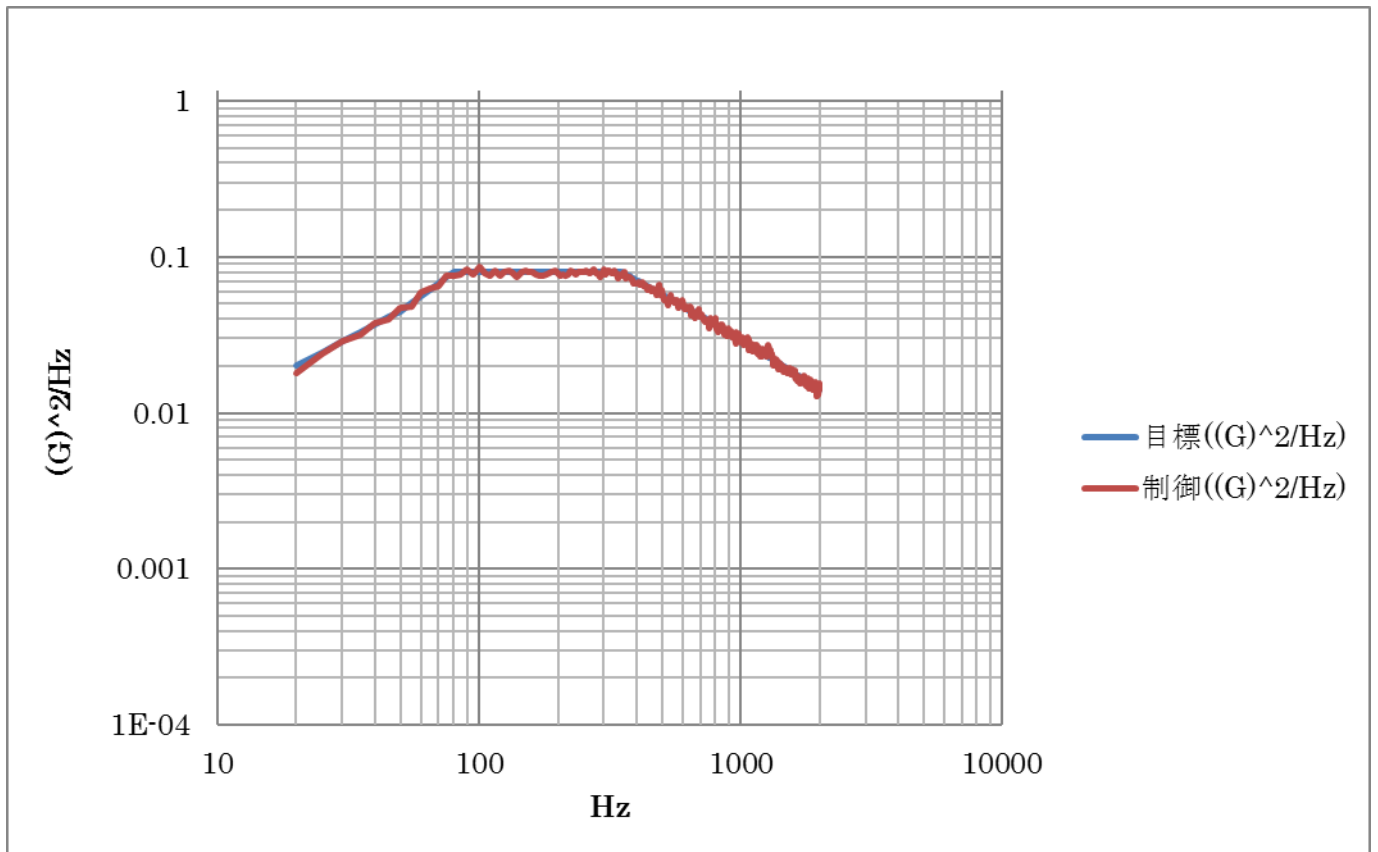


図 3.17. ランダム 2 の制御波形 (Y 軸)

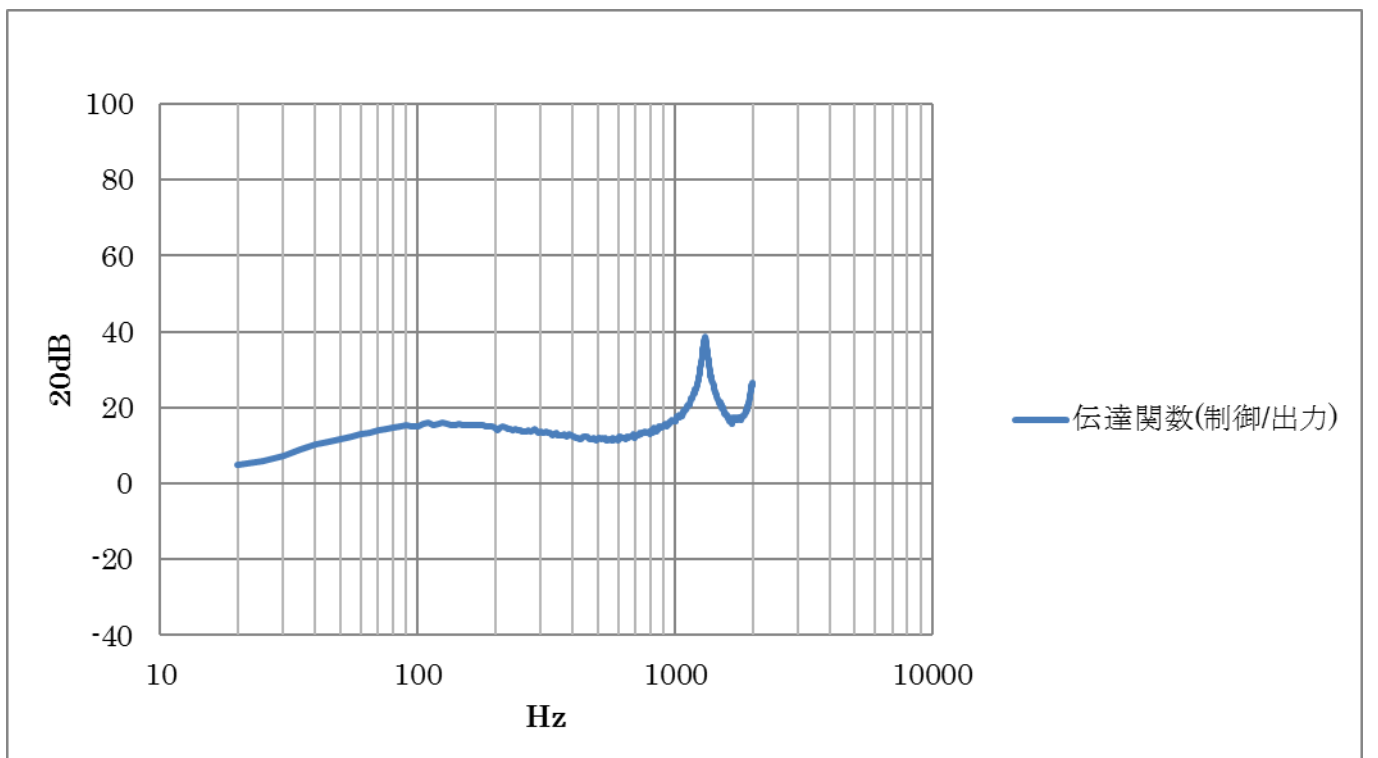


図 3.18. ランダム 2 の伝達関数 (Y 軸)

次に高速フーリエ変換 (FFT) の波形を図 3.19 に示す.

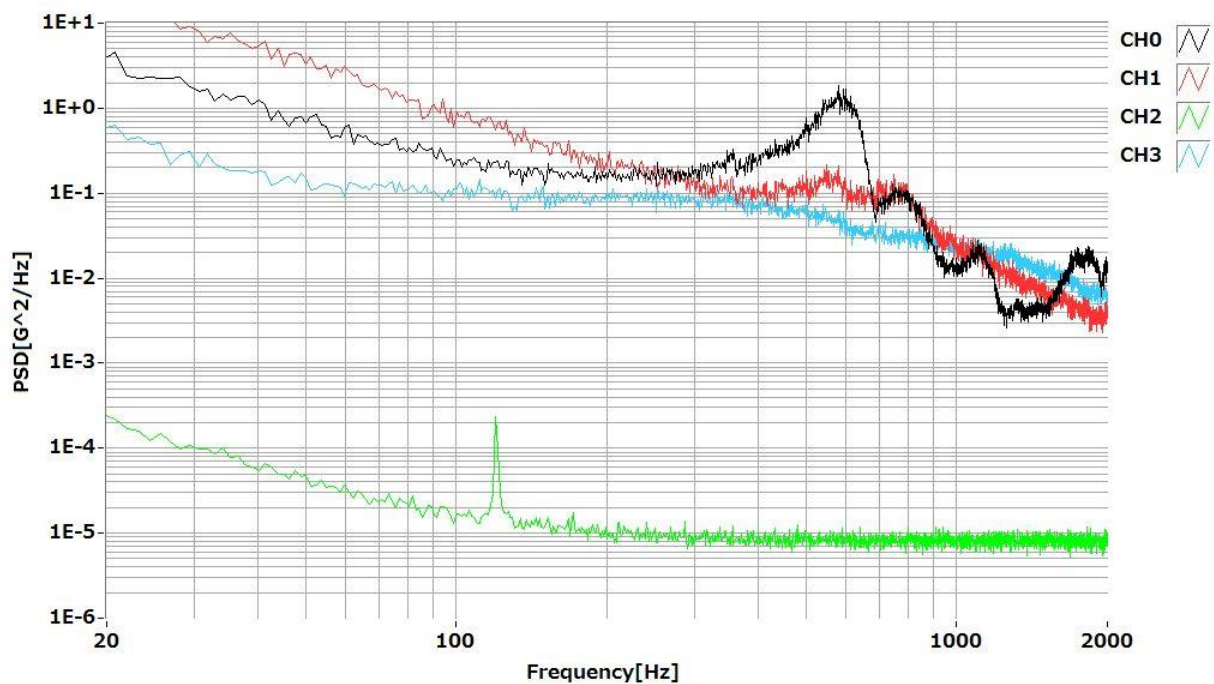


図 3.19. (Y 軸) ランダム 2 の FFT グラフ (Ch0~3)

3.4.3 試験結果(X 軸)

Y 軸の次に X 軸の振動試験を行った. X 軸の試験の流れを表 3.6, 試験の様子を図 3.20 に示す

表 3.7. X 軸の試験の流れ

		試験簡易名称
X 軸	モーダルサーベイ	モーダル 5
	↓	
	ランダム試験	ランダム 3
	↓	
	モーダルサーベイ	モーダル 6
	↓	
	終了	

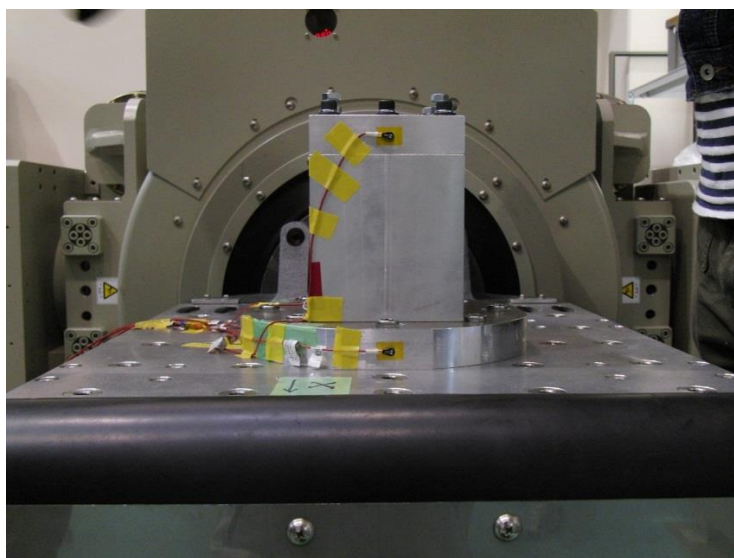


図 3.20. X 軸の試験の様子

3.4.3.1. モーダルサーベイ試験

高速フーリエ変換（FFT）の波形を図 3.21, 図 3.22 に示す. 加振前のモーダル 5 と加振後のモーダル 6 を比較した. 加振前と加振後のグラフには特に変化がないことを確認できた.

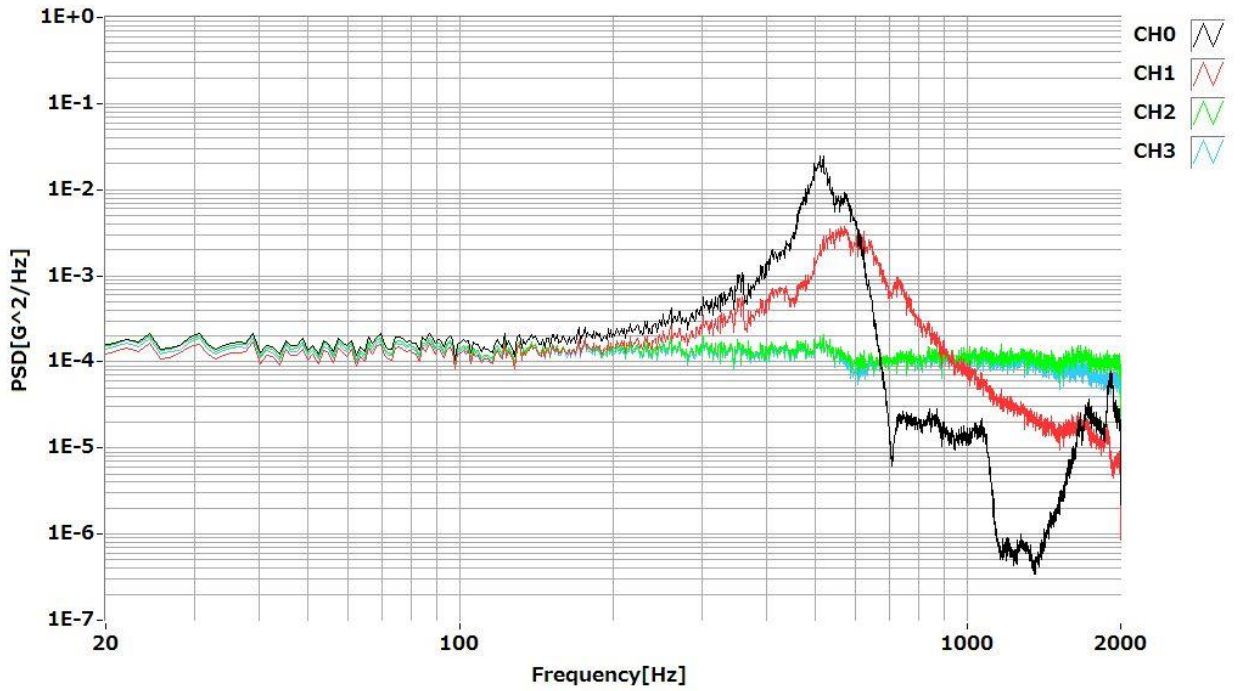


図 3.21. (X 軸) モーダル 5 の FFT グラフ (Ch0~3)

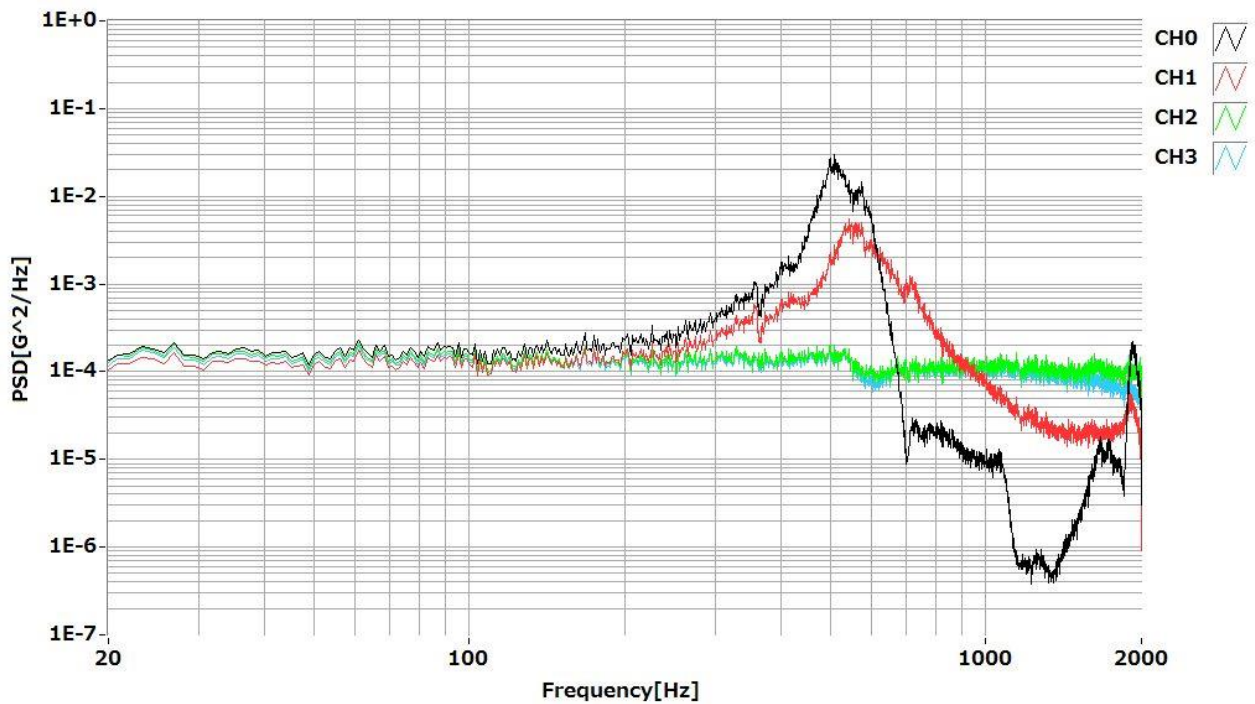


図 3.22. (X 軸) モーダル 6 の FFT グラフ (Ch0~3)

3.4.3.2. ランダム試験

Z 軸試験時の制御用加速度ピックアップの出力波形及び制御波形を図 3.23・図 3.24 に示す. 制御波形から試験レベルに制御出来ていることを示す.

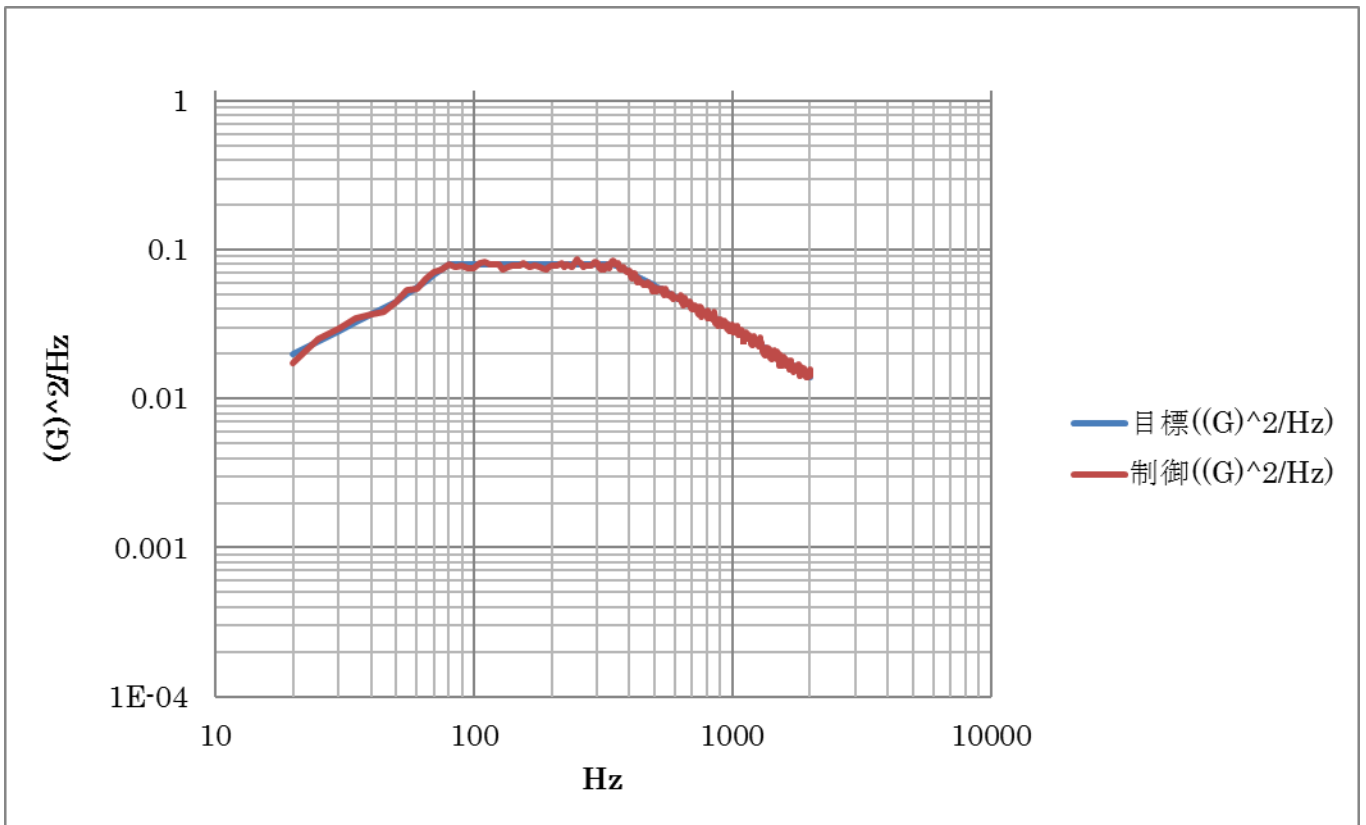


図 3.23. ランダム 3 の制御波形 (X 軸)

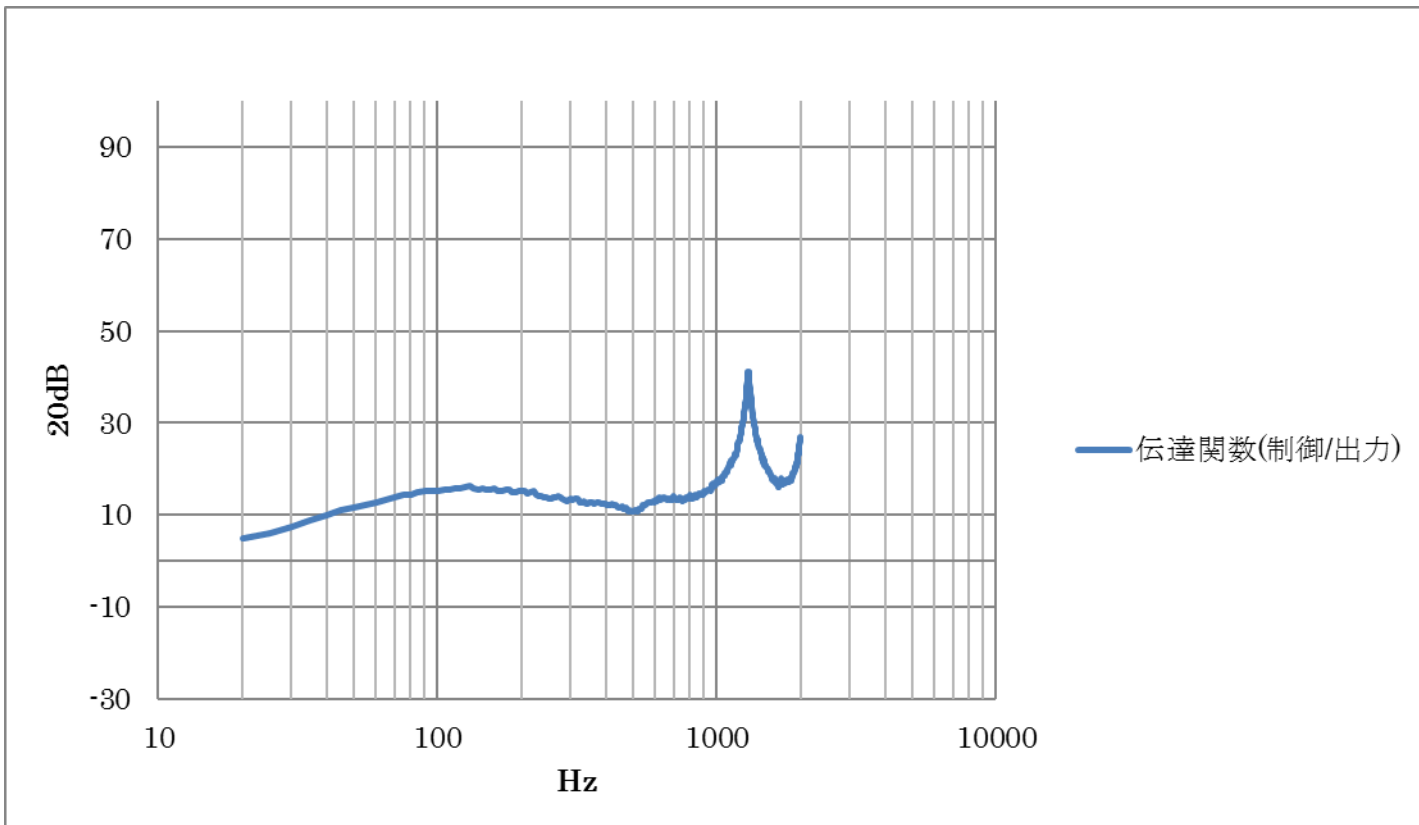


図 3.24. ランダム 3 の伝達関数 (X 軸)

次に高速フーリエ変換 (FFT) の波形を図 3.25 に示す.

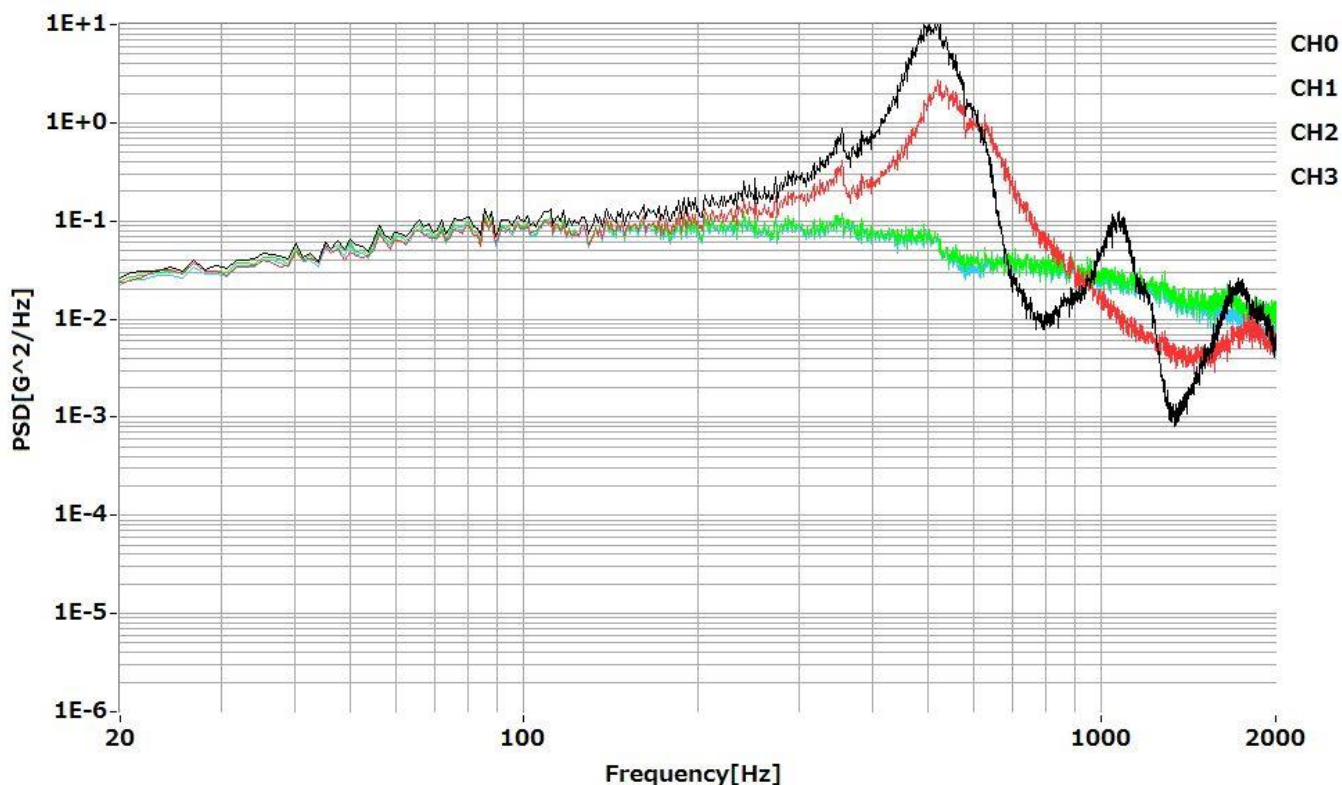


図 3.25. (X 軸) ランダム 3 の FFT グラフ (Ch0~3)

3.4.4 試験結果まとめ

今回のFMの振動試験では2.5に示した合否判定基準をもとに判定を行った。検査結果を表3.7に示した。

表3.8.検査結果

検査項目	場所	判定
有害な変形・損傷	衛星本体	なし
	治具の上蓋	なし
太陽電池パネルの損傷	-	なし

検査結果について補足する。

1) 外観目視検査

X, Y, Z軸の各試験後に外観目視検査を行ない、衛星本体並びに治具に有害な変形・損傷がない事を確認した。また、太陽電池パネルの割れ・損傷や、アンテナ展開等の異常もなかった。

2) ネジの緩み

全試験項目終了後に点検を行った。この際点検にはトルクドライバを用い規定のトルクより緩んでいないことを確認した

3) 機能試験

フライトピンを抜き 30 分後にアンテナが展開しビーコンを送信したことを確認した。またコマンドを送り LED が正常に発行できるかを試し確認できた。このことにより衛星のバッテリーの破損はなかったと考えられる。

4) バッテリーの充電・放電特性の確認

振動試験前に予めデータロガーを用いてバッテリーの充放電特性を調べ、試験後の値と変わるかどうかを比べ特性に変化がないことを確認した。

3.5 試験実施体制

表 3.9. 人的配置

試験監督	九州工業大学
振動試験機操作	九州工業大学
解析	福岡工業大学
試験後の外観チェック	福岡工業大学
カメラ, ビデオ撮影	福岡工業大学

3.6 試験設備及び試験治具

振動試験で使用する振動試験機, 加速度センサを表3.5, 試験治具, 工具などを表3.6に示す.

表3.10. 試験装置一覧

試験装置	内容
振動試験機	EMIC社製F-35000BD/LA36AP
制御用の加速度ピックアップ	EMIC社製731-A(1軸)
計測用の加速度ピックアップ	ENDEVCO社製2222C(1軸) EMIC社製710-C(1軸)

表3.11. 振動試験時に使用するもの

	品名	数量			
1	治具	1	19	工具セット	1
2	六角穴付きボルト(M8-45×6本)	6	20	モンキーレンチ	2
3	六角穴付きボルト(M8-60×6本)	6	21	FIT-SAT (FM)	1
4	六角ボルト(M8-50×4本)	4	22	解析用のパソコン	1
5	ナット(M8×4個)	4	23	ガラスエポキシ	
6	ばね座金(M8×16枚)	16	24	カプトンテープ	
7	平座金(M8×16枚)	16	25	ビニールテープ	
8	六角穴付きボルト(M12-35×4本)	4	26	ドライバ (各径)	
9	六角穴付きボルト(M12-50×8本)	8	27	データロガー	
10	ばね座金(M12×12枚)	12	28	デジタルカメラ	
11	平座金(M12×12枚)	12	29	ビデオカメラ	1
12	マジック (サインペン)	2	30	アンプ	
13	トルクマーカー (修正液)	2	31	LabView-DAQ	
14	六角レンチ	2	32	アクリルの保護板	
15	軍手	2	33	ヘルメット等の防護具	1
16	計画書	1	34	安全靴	
17	JAXA の振動試験の資料	1	35	治具締めレンチ	
18	ボルト締め付けトルク表 3.	1	36	トルクレンチ	

3.7 安全管理

試験実施期間中は作業の安全を考慮し, 下記事項を厳守の上作業を行う.

- 1) 試験実施期間中は試験実施責任者が作業の監督を行い, 作業の安全に努める.
- 2) 重量物を扱う場合は, できる限り人力によらずクレーン・台車等を用い, 取扱者に過度な負担がかからないように配慮する.
- 3) アースバンドや静電防止シートを使用し, 静電気対策を講じる.

- 4) 安全を確保する為にヘルメットや安全靴などの防護具を使用する.
- 5) 振動試験時には立入禁止区域を設定し明示する.
- 6) 本試験で使用する場所は常に整理整頓を行う.

3.8 緊急連絡系統

