

第7回試験技術ワークショップ

於 筑波宇宙センター総合開発推進棟 1階大会議室

MW(モーメントムホイール)構造モデルのフォースリミット適用例

平成21年11月13日

三菱電機株式会社 鎌倉製作所 宇宙システム部 世古博巳
三菱スペース・ソフトウェア株式会社 鎌倉事業部 高橋直幸

 三菱電機株式会社

発表内容

1. フォースリミット適用対象品の概要
2. 業務の作業フロー
3. 音響試験結果
4. フォースリミットレベルの計算
5. フォースリミット適用ランダム振動試験結果
6. まとめ

本件は現在進行中のJAXA殿調達仕様書JX-PSPC-283227「フォースリミット法を用いた振動試験の実施(そのア)」に基づいて実施している業務の内容を抜粋して報告するものです。

最終成果としてまとめられたものでないことをご了承ください。

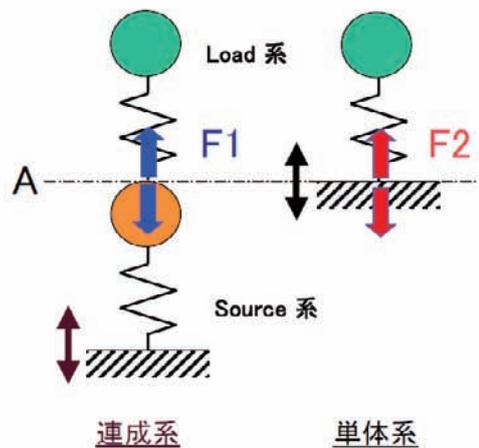
1. フォースリミット適用対象品の概要

1.1 対象品目の選定

フォースリミット適用対象品の選定時に留意した点：
 1) 構造動特性がシンプルで、フォースリミットの適用が明確化できる。
 2) ソース系とのダイナミックカップリングが大きいモードを有し、フォースリミット適用効果が大きいことが期待できる。

■評価対象品の選定
 地球観測用機器ユニットの熱構造モデルを対象品として選定し、下記のようにLoad系とSource系に区分した。
 ●Load系 : ユニットに搭載されるモーメントムホイール構造モデル(MW SM)
 ●Source系 : ユニットのMW SM以外の部分

■評価項目
 連成系の音響試験時のインタフェース荷重F1とLoad系単体ランダム振動試験時の固定点反力F2の比較評価を行った。



1.2 対象品目の諸元

地球観測用機器ユニットの熱構造モデル外観 質量: 62.2 kg (MW SM含まず)

MW SMはユニット構体のベースパネル上に搭載される

本来6点で固定されるが、本検討ではフォース計測の制約から4点のみ固定した。(右図 ● 印点)

MW SMの外観

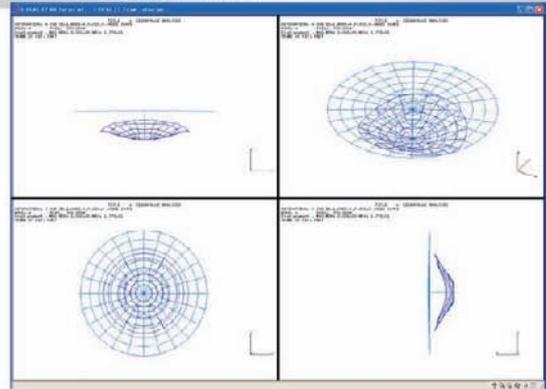
質量: 36 kg
 固有振動数: 320 Hz
 固有振動モード: Z方向並進1次モード
 当該固有モードの有効質量: 34.4 kg
 Qファクタ: 35

1.3 MW SMの振動特性

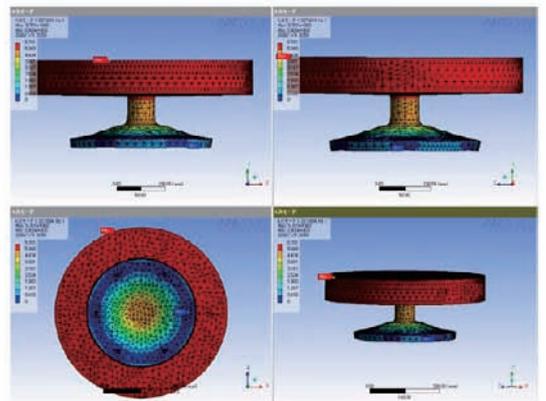
MW SMの固有振動数、固有モード

| モード No. | 固有振動数 (Hz) | モード形状 | 備考 |
|---------|------------|---------|-----|
| 1 | 95.5 | X方向曲げ1次 | |
| 2 | 103.7 | Y方向曲げ1次 | |
| 3 | 104.68 | 振り1次 | 軸周り |
| 4 | 320.9 | 並進1次 | 軸方向 |
| 5 | 418.4 | X方向曲げ2次 | |
| 6 | 443.2 | Y方向曲げ2次 | |

本検討では4次モードの軸方向並進1次モード@320.9Hz を評価対象モードとした。

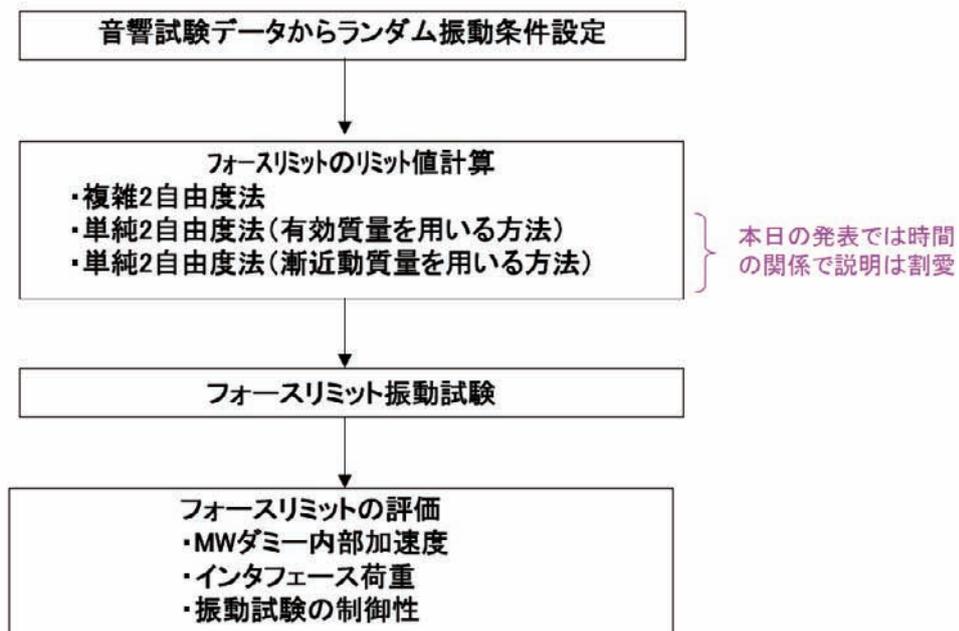


SHELL要素モデル解析結果



SOLID要素モデル解析結果

2. 業務の作業フロー



3. 音響試験結果

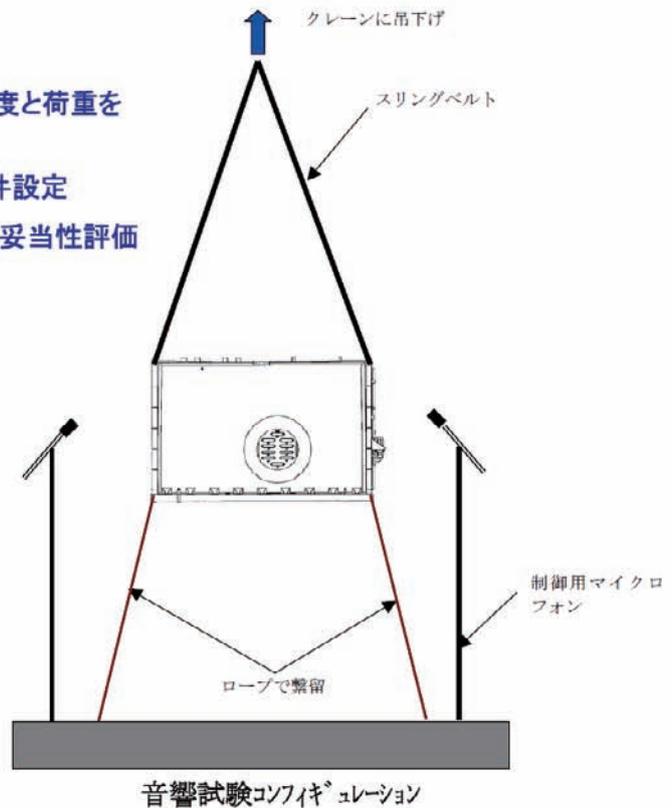
3.1 音響試験の目的と条件

音響試験にてMW SMインタフェース部の加速度と荷重を計測し、本検討に活用した。

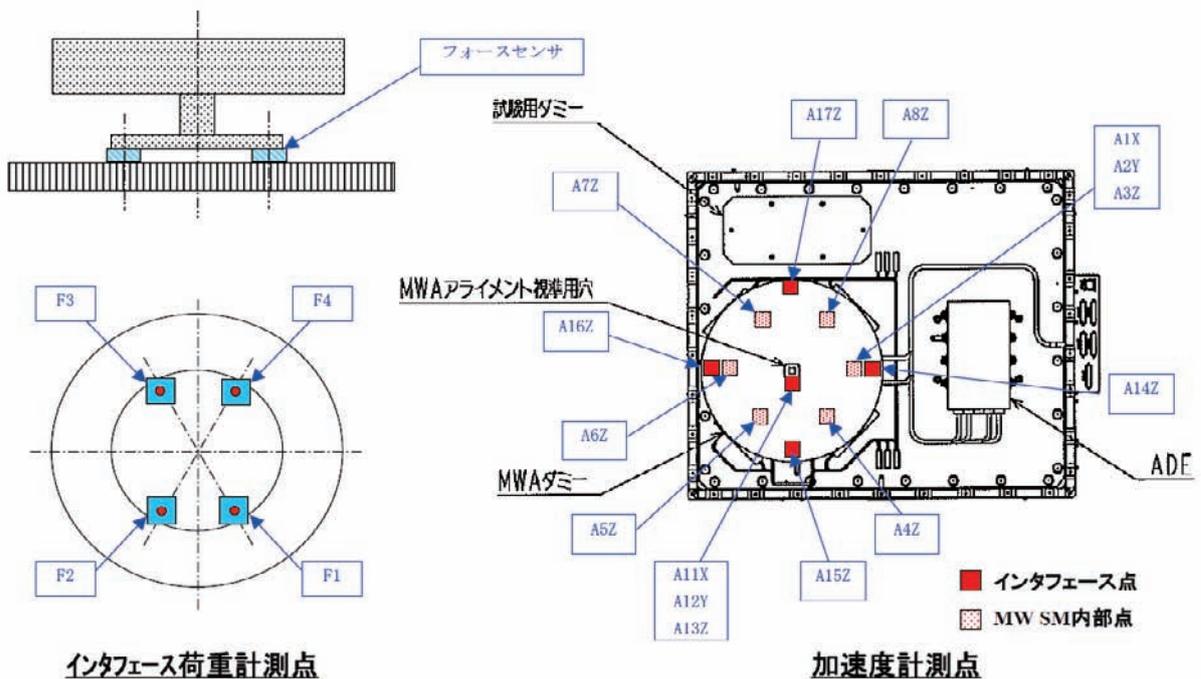
- 加速度 ⇒ 包絡レベルをランダム振動条件設定
- 荷重 ⇒ フォースリミットレベル計算値の妥当性評価

音響負荷条件

| 1/1オクターブ 中心周波数(Hz) | 音圧 (SPL) (dB) |
|-----------------------|------------------|
| 31.5 | 132.0 |
| 63 | 133.5 |
| 125 | 138.0 |
| 250 | 140.0 |
| 500 | 135.5 |
| 1000 | 132.0 |
| 2000 | 127.0 |
| 4000 | 122.0 |
| 8000 | 120.0 |
| Overall | 144.5 |



3.2 音響試験に於ける加速度／荷重計測点



3.3 MW SMインタフェース部加速度応答データ

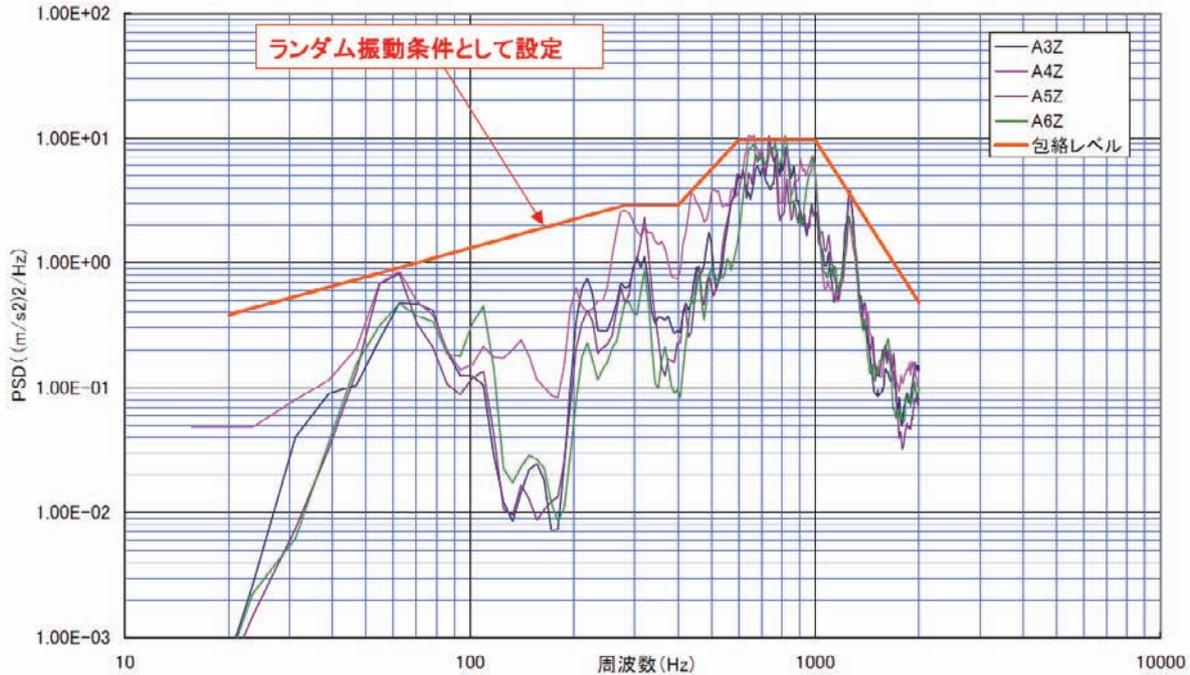


図2.4.3-1 モーメントムホイール構造モデル取付け部の加速度応答

3.4 MW SMインタフェース部インタフェース荷重応答データ

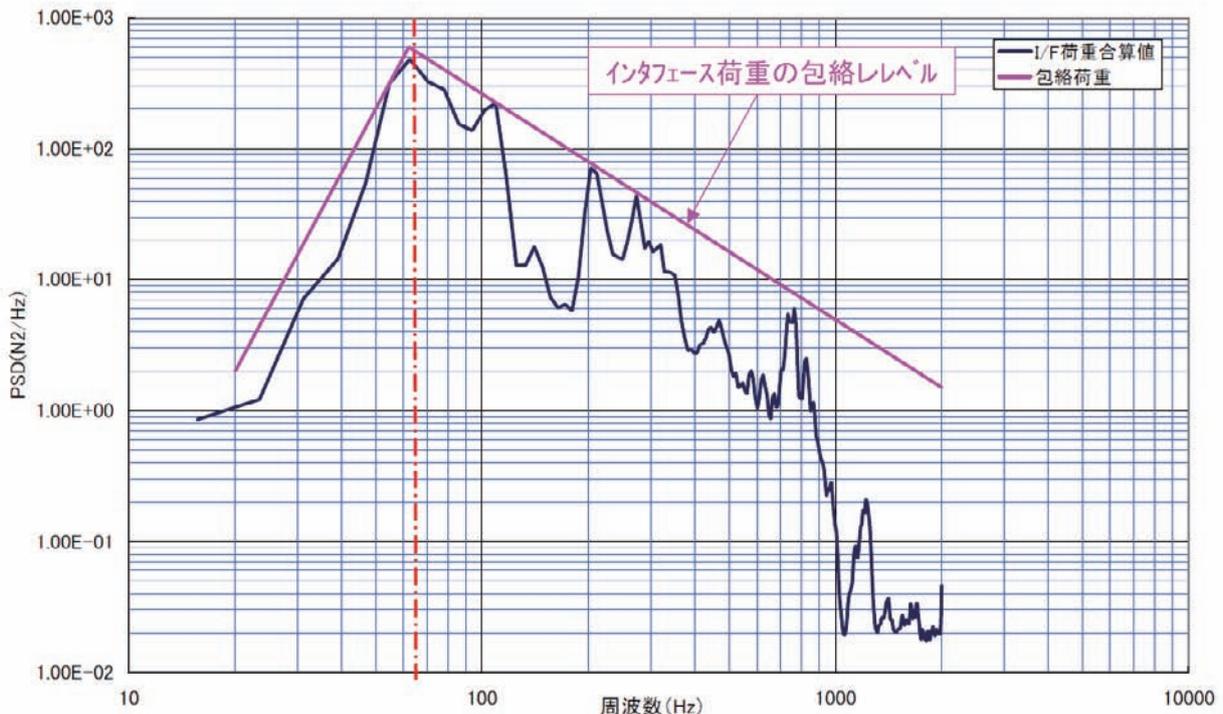
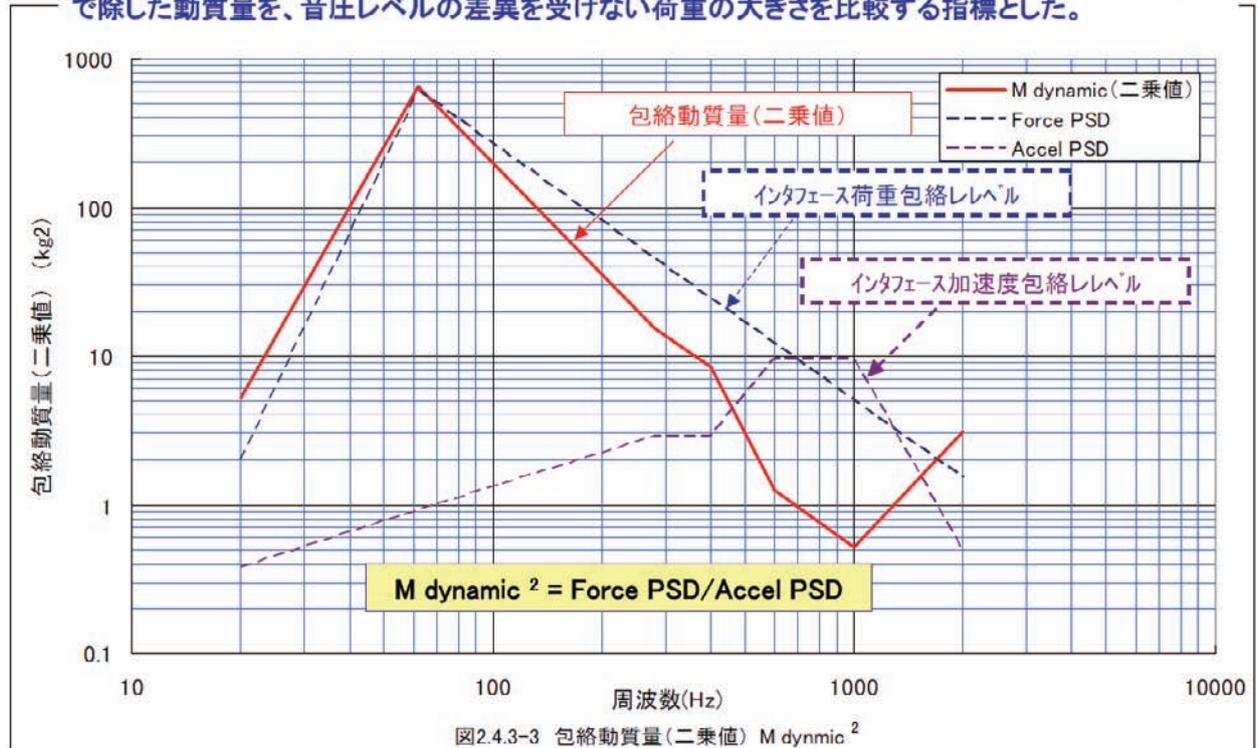


図2.4.3-2 モーメントムホイール構造モデル取付け部Z方向インタフェース荷重(合算値)

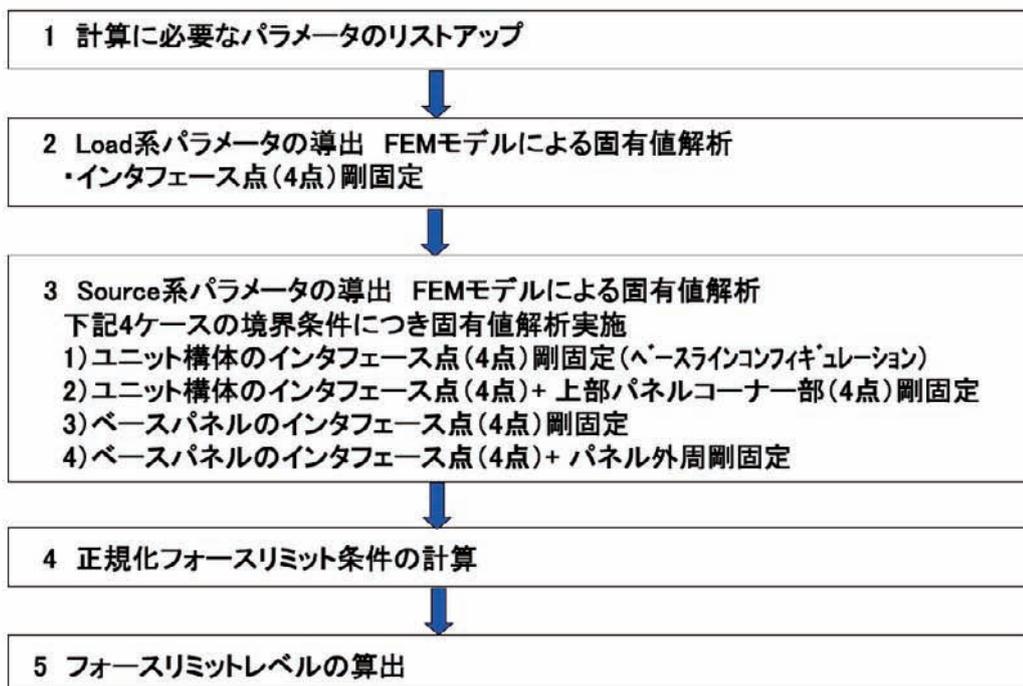
3.5 動質量の包絡レベル

加速度及び荷重応答値は周波数帯域毎の音圧レベルの差異の影響を受けるため、荷重を加速度で除した動質量を、音圧レベルの差異を受けない荷重の大きさを比較する指標とした。



4. フォースリミットレベルの計算(複雑2自由度法)

4.1 フォースリミットレベルの計算フロー

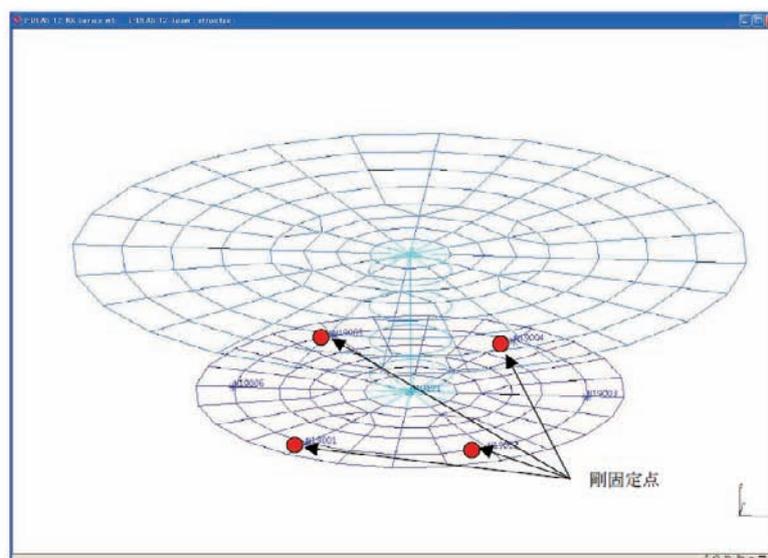


4.2 複雑2自由度法に必要なパラメータ

複雑2自由度法による計算に必要なパラメータ

| パラメータ項目 | | 記号 | 単位 |
|---|---------------------------------------|---------------|---------|
| Load系 | Source系との連成を仮定するLoad系の固有振動数 | f_{nL} | Hz |
| | Source系との連成を仮定するLoad系の円固有振動数 | ω_{nL} | rad/s |
| | 上記モードの有効質量 | m_{eL} | kg |
| | 上記モードの剰余質量 | m_{rL} | kg |
| | 上記有効質量と剰余質量の比 ($= m_{eL} / m_{rL}$) | a_L | - |
| | 減衰係数比($=1/2Q$) | ξ | - |
| | Qファクタ($=1/2\xi$) | Q | - |
| Source系 | Load系との連成を仮定するSource系の固有振動数 | f | Hz |
| | Load系との連成を仮定するSource系の円固有振動数 | ω_{nS} | rad/s |
| | 上記モードの有効質量 | m_{eS} | kg |
| | 上記モードの剰余質量 | m_{rS} | kg |
| | 上記有効質量と剰余質量の比 ($= m_{eS} / m_{rS}$) | a_S | - |
| Load系とSource系の剰余質量との比 ($= m_{rL} / m_{rS}$) | | u | - |
| Load系とSource系の固有振動数の比 ($= f_{nL} / f_{nS}$) | | Ω | - |
| Load系とSource系のインタフェース加速度 | | A_{spec} | m/s^2 |

4.3 Load系パラメータの導出(1/3)



モーメントムホイール構造モデル 固有値解析用FEMモデル図

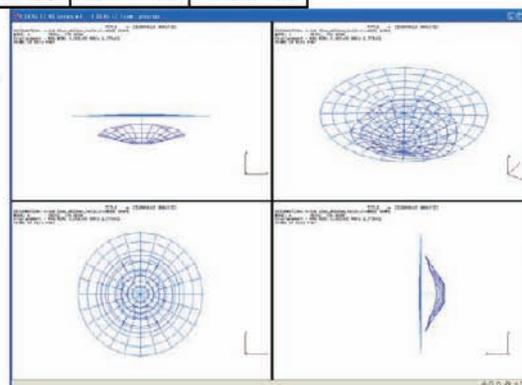
4.3 Load系パラメータの導出(2/3)

モーメントムホイール構造モデルの有効質量

| Mode | Cycles (Hz) | T1 | T2 | T3 | R1 | R2 | R3 |
|------|-------------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| 1 | 95.48 | 9.555 | 0.000 | 0.000 | 6.93E-06 | 1.06E+06 | 9.18E+05 |
| 2 | 103.66 | 0.000 | 8.708 | 0.000 | 1.03E+06 | 8.75E-09 | 5.44E+05 |
| 3 | 104.68 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 2.97E-04 | 1.29E-08 | 8.38E+05 |
| 4 | 320.90 | 0.000 | 0.000 | 34.374 | 3.30E+06 | 2.15E+06 | 8.13E-07 |
| 5 | 418.38 | 22.829 | 0.000 | 0.000 | 5.27E-06 | 1.63E+05 | 2.19E+06 |
| 6 | 443.16 | 0.000 | 23.833 | 0.000 | 1.84E+05 | 4.88E-10 | 1.49E+06 |

モーメントムホイール構造モデルの剰余質量(並進成分のみ)

| Mode | Cycles(Hz) | T1 | T2 | T3 |
|------|------------|--------|--------|--------|
| 1 | 95.48 | 26.438 | 35.994 | 35.994 |
| 2 | 103.66 | 26.438 | 27.286 | 35.994 |
| 3 | 104.68 | 26.438 | 27.286 | 35.994 |
| 4 | 320.90 | 26.438 | 27.286 | 1.619 |
| 5 | 418.38 | 3.609 | 27.286 | 1.619 |
| 6 | 443.16 | 3.609 | 3.452 | 1.619 |



4次モード形状図

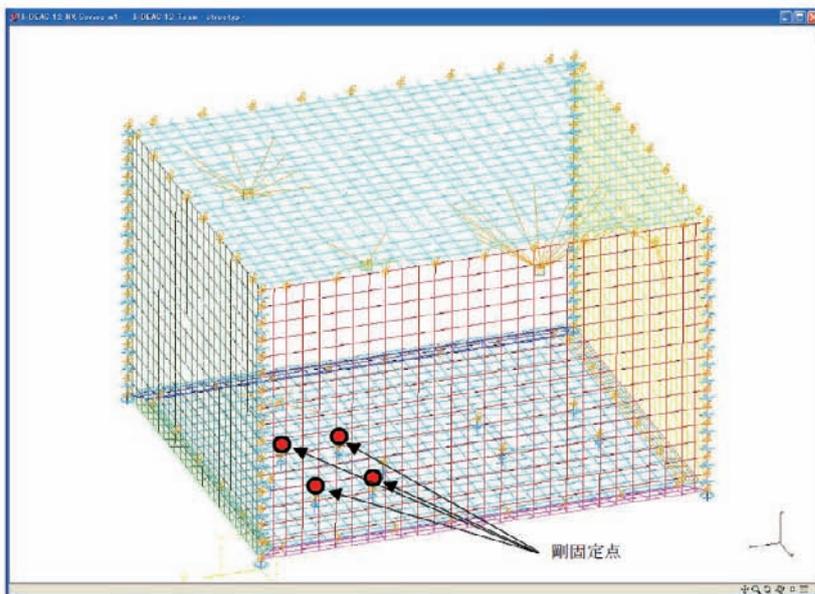
4.3 Load系パラメータの導出(3/3)

Load系パラメータ

| パラメータ項目 | 記号 | 単位 | 値 |
|--------------------------------------|---------------|-------|--------|
| Source系との連成を仮定するLoad系の固有振動数 | f | Hz | 320.9 |
| Source系との連成を仮定するLoad系の円固有振動数 | ω_{nL} | rad/s | 2016.3 |
| 上記モードの有効質量 | m_{eL} | kg | 34.4 |
| 上記モードの剰余質量 | m_{rL} | kg | 1.6 |
| 上記有効質量と剰余質量の比 (= m_{eL} / m_{rL}) | a_L | - | 21.5 |
| 減衰係数比(=1/2Q) | ξ | - | 0.0143 |
| Qファクタ(=1/2 ξ) | Q | - | 35 |

4.4 Source系パラメータの導出1(1/6)

MW SMインタフェース部4点のみを剛固定した境界条件を設定し、必要なパラメータを導出した。



地球観測用機器ユニット(MW SM除く) 固有値解析用FEMモデル図

4.4 Source系パラメータの導出1(2/6)

有効質量

| Mode | Cycles(Hz) | T1 | T2 | T3 | R1 | R2 | R3 |
|------|------------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| 1 | 7.67 | 22.490 | 0.325 | 14.657 | 2.85E+06 | 3.05E+07 | 1.80E+06 |
| 2 | 10.91 | 0.594 | 31.766 | 1.682 | 2.07E+07 | 4.69E+04 | 1.03E+07 |
| 3 | 29.14 | 7.912 | 1.475 | 42.886 | 3.25E+06 | 1.35E+06 | 1.01E+05 |
| 4 | 71.11 | 1.375 | 2.748 | 2.055 | 4.39E+05 | 2.04E+05 | 3.16E+06 |
| 5 | 91.56 | 2.190 | 1.678 | 0.161 | 3.90E+04 | 3.43E+03 | 1.35E+07 |
| 6 | 107.28 | 1.065 | 0.095 | 0.002 | 2.56E+02 | 1.47E+03 | 3.47E+04 |
| 7 | 135.51 | 0.706 | 0.133 | 0.031 | 1.09E+03 | 1.64E+02 | 6.99E+03 |
| 8 | 169.79 | 8.571 | 0.434 | 0.002 | 6.32E+02 | 9.44E+03 | 1.14E+06 |
| 9 | 192.01 | 2.251 | 5.299 | 0.001 | 7.17E+03 | 2.38E+03 | 3.16E+04 |
| 10 | 211.11 | 0.047 | 0.012 | 0.000 | 2.43E+02 | 8.81E+00 | 1.54E+01 |
| 11 | 223.23 | 0.000 | 0.454 | 0.014 | 3.13E+03 | 2.03E+03 | 2.36E+04 |
| 12 | 232.91 | 0.002 | 0.070 | 0.119 | 1.55E+04 | 2.09E+04 | 1.63E+02 |
| 13 | 245.57 | 0.224 | 0.009 | 0.001 | 9.88E+01 | 4.58E+02 | 9.69E+03 |
| 14 | 290.25 | 0.322 | 0.146 | 0.000 | 3.17E+02 | 1.80E+02 | 1.13E+05 |
| 15 | 299.75 | 0.006 | 0.000 | 0.001 | 4.30E+01 | 1.36E+02 | 4.83E+03 |
| 16 | 309.96 | 4.769 | 0.452 | 0.002 | 2.21E+02 | 7.74E+03 | 7.62E+05 |
| 17 | 332.24 | 1.752 | 1.447 | 0.016 | 5.25E+03 | 6.79E+03 | 1.13E+04 |

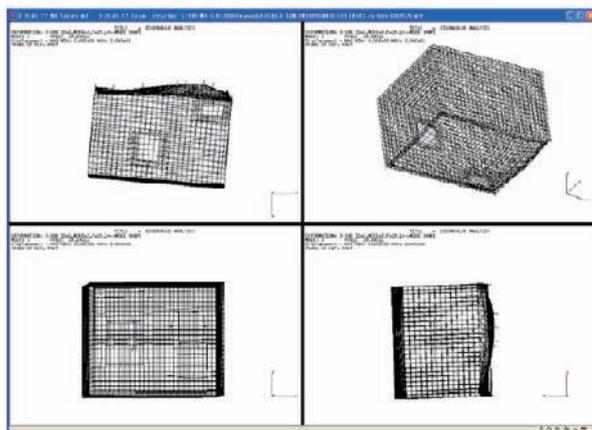
4.4 Source系パラメータの導出1(3/6)

剰余質量

| Mode | Cycles(Hz) | T1 | T2 | T3 |
|------|------------|--------|--------|--------|
| 1 | 7.67 | 39.730 | 61.895 | 47.563 |
| 2 | 10.91 | 39.136 | 30.130 | 45.881 |
| 3 | 29.14 | 31.224 | 28.654 | 2.996 |
| 4 | 71.11 | 29.849 | 25.907 | 0.941 |
| 5 | 91.56 | 27.659 | 24.228 | 0.780 |
| 6 | 107.28 | 26.594 | 24.133 | 0.778 |
| 7 | 135.51 | 25.888 | 24.000 | 0.747 |
| 8 | 169.79 | 17.317 | 23.566 | 0.745 |
| 9 | 192.01 | 15.066 | 18.268 | 0.744 |
| 10 | 211.11 | 15.019 | 18.256 | 0.744 |
| 11 | 223.23 | 15.019 | 17.802 | 0.730 |
| 12 | 232.91 | 15.017 | 17.732 | 0.611 |
| 13 | 245.57 | 14.793 | 17.724 | 0.610 |
| 14 | 290.25 | 14.471 | 17.578 | 0.610 |
| 15 | 299.75 | 14.465 | 17.578 | 0.610 |
| 16 | 309.96 | 9.696 | 17.126 | 0.608 |
| 17 | 332.24 | 7.944 | 15.679 | 0.592 |

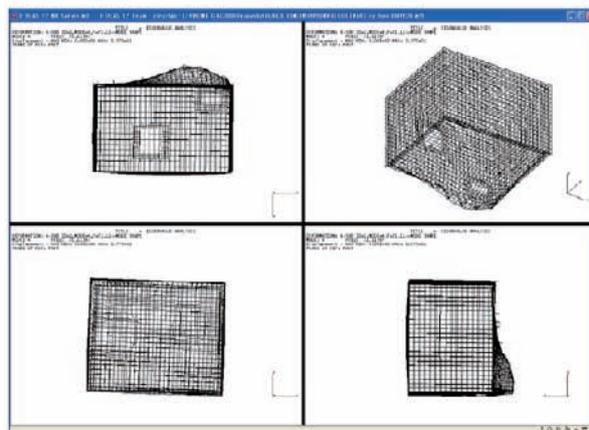
4.4 Source系パラメータの導出1(4/6)

MW SM軸方向の有効質量とモード形状(ベースパネル面外曲げ)を検討し、MW SMとの連成を生じるとされるモードを選択してパラメータを導出した。



Source系(MW部のみ剛固定)3次モード形状 (29.14Hz:Z方向全体並進1次)

【ケース1】



Source系(MW部のみ剛固定)4次モード形状 (71.11Hz:ベースパネル局所曲げ1次)

【ケース2】

4.4 Source系パラメータの導出1(5/6)

【ケース1】

| パラメータ項目 | 記号 | 単位 | 値 |
|---------------------------------------|---------------|-------|--------|
| Load系との連成を仮定するSource系の固有振動数 | f | Hz | 29.14 |
| Load系との連成を仮定するSource系の円固有振動数 | ω_{nS} | rad/s | 183.09 |
| 上記モードの有効質量 | m_{eS} | kg | 42.89 |
| 上記モードの剰余質量 | m_{rS} | kg | 3.0 |
| 上記有効質量と剰余質量の比 ($= m_{eS} / m_{rS}$) | a_S | - | 14.30 |

【ケース2】

| パラメータ項目 | 記号 | 単位 | 値 |
|---------------------------------------|---------------|-------|--------|
| Load系との連成を仮定するSource系の固有振動数 | f | Hz | 71.11 |
| Load系との連成を仮定するSource系の円固有振動数 | ω_{nS} | rad/s | 446.80 |
| 上記モードの有効質量 | m_{eS} | kg | 2.06 |
| 上記モードの剰余質量 | m_{rS} | kg | 0.94 |
| 上記有効質量と剰余質量の比 ($= m_{eS} / m_{rS}$) | a_S | - | 2.19 |

4.4 Source系パラメータの導出1(6/6)

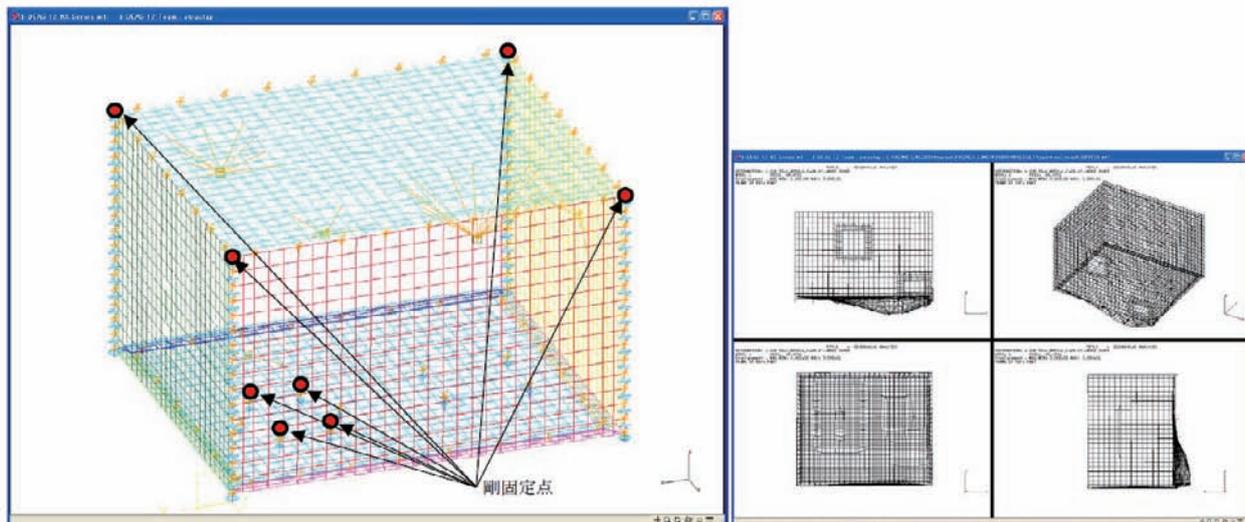
Source系の対象モードをMW SMの固有振動数 fn_L の $\pm 3dB$ の範囲に限定し、Z方向の有効質量を検討し、MW SMとの連成を生じるとされるモードを選択してパラメータを導出した。

対象範囲を fn_L の $\pm 3dB$ に限定して導出したパラメータ

| パラメータ項目 | 記号 | 単位 | 値 |
|---------------------------------------|---------------|-------|--------|
| Load系との連成を仮定するSource系の固有振動数 | f | Hz | 232.9 |
| Load系との連成を仮定するSource系の円固有振動数 | ω_{nS} | rad/s | 1463.4 |
| 上記モードの有効質量 | m_{eS} | kg | 0.119 |
| 上記モードの剰余質量 | m_{rS} | kg | 0.611 |
| 上記有効質量と剰余質量の比 ($= m_{eS} / m_{rS}$) | a_S | - | 0.19 |

4.5 Source系パラメータの導出2

MW SMインタフェース部4点と構体上部4隅点を剛固定した境界条件を設定し、必要なパラメータを導出した。

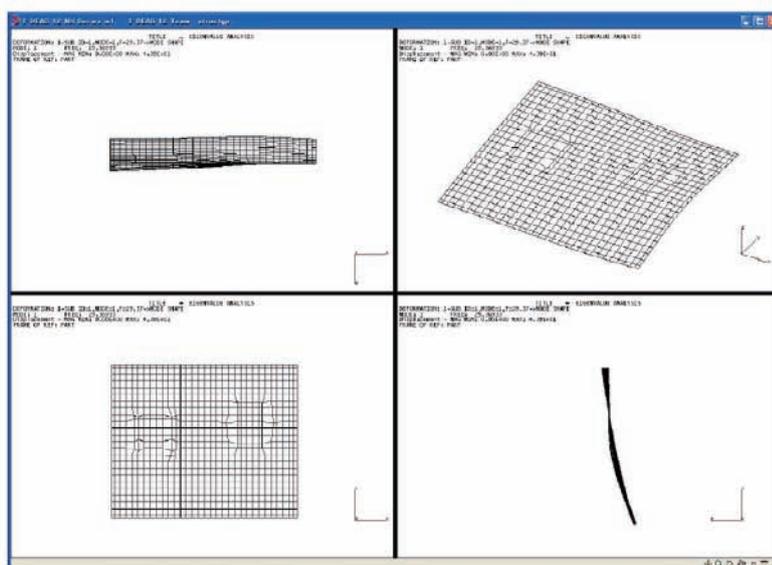


地球観測用機器ユニット(MW SM除く) 固有値解析用FEMモデル図

Source系(MW部及び構体上部4隅剛固定)
1次モード形状(68.47Hz:ベースパネル面外曲げ1次)

4.6 Source系パラメータの導出3

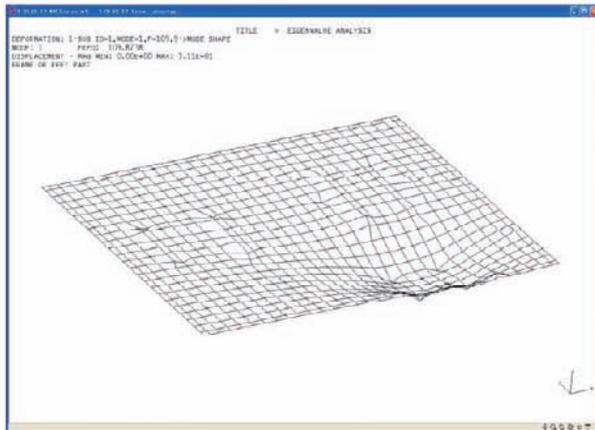
ベースパネル部のみ取り出し、MW SMインタフェース部4点のみ剛固定した境界条件を設定し、必要なパラメータを導出した。



Source系(MW部のみ剛固定)
1次モード形状(29.37Hz:ベースパネル面外曲げ1次)

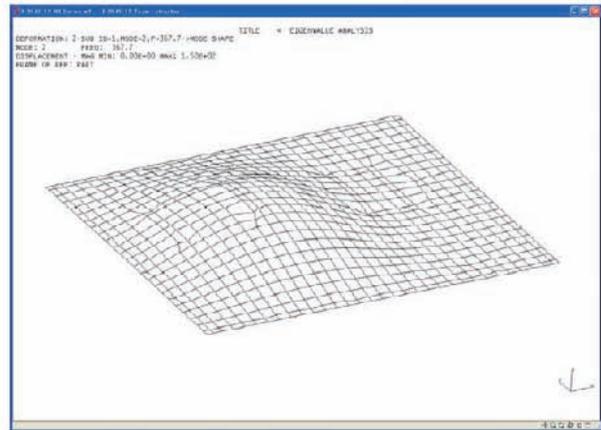
4.7 Source系パラメータの導出4

ベースパネル部のみ取り出し、MW SMインタフェース部4点と周辺を剛固定した境界条件を設定し、必要なパラメータを導出した。



Source系 (MW部及び周辺剛固定)
1次モード形状 (109.9Hz:ベースパネル面外曲げ1次)

【ケース1】



Source系 (MW部及び周辺剛固定)
2次モード形状 (367.7Hz:ベースパネル面外曲げ2次)

【ケース2】

4.8 フォースリミットレベルの計算式

2自由度のバネマス系のインタフェース部の加速度が A_{spec} になった時に生じるインタフェース荷重を求める。

$$B = -(1 + u + a_s) / \Omega^2 + (1 + u + u * a_L) / (1 + u)$$

$$C = (1 + u + a_s + u * a_L) / (\Omega^2 * (1 + u))$$

但し、 Ω はLoad系とSource系の固有振動数の比

$$(\Omega = f_{nL} / f_{nS})$$

連成系の共振周波数とLoad系単体の固有振動数 (ω_{nL})

の比 r_{nLC} は下記のように算出される。

$$r_{nLC1} = \text{SQRT}(-B - \text{SQRT}(B^2 - 4C))$$

$$r_{nLC2} = \text{SQRT}(-B + \text{SQRT}(B^2 - 4C))$$

$$r_{nLC1} = \omega_{c1} / \omega_{nL}, r_{nLC2} = \omega_{c2} / \omega_{nL}$$

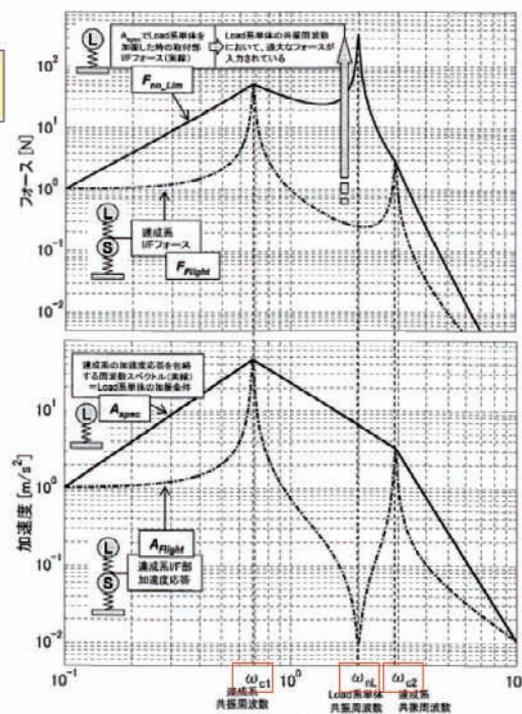
正規化フォースリミット条件 F_{bmax_norm} (PSD形式) は

次のように計算される。

$$F_{bmax_norm} = F_{Limit_spec} / (m_{eL}^2 \times A_{spec})$$

$$= \text{Max} [(m_{rL} / m_{eL} + (1 + j2\xi_L * r_{nLC}) / ((1 - r_{nLC}^2) + j2\xi_L * r_{nLC}))^2]$$

ここで、 A_{spec} はインタフェース部の加速度(PSD形式)である。



周波数比 (Source系の1次共振周波数で正規化した周波数)
 周波数比 ω_{c1} ω_{nL} ω_{c2}
 共振周波数 Load系単体 共振周波数 共振周波数
 (Source系の1次共振周波数で正規化した周波数)
 打上げ時と単体振動試験時のインタフェース荷重の計算例
 (フォースリミット振動試験ハンドブックから抜粋)

4.9 MW SM単体振動試験時の応答予測

モーメントムホイール単体に振動が負荷された時に軸方向1次モードの応答をMilesの式を用いて計算した。

■ 加速度及びインタフェース荷重の応答実効値レベル

$$A_0 = \text{SQRT}(\pi \cdot Q \cdot \text{PSD} \cdot f_{nL} / 2)$$

$$F_0 = m_{eL} \times A_0$$

■ PSD形式で表現したフォース $F_{0 \text{ PSD}}$

共振ピークの半値周波数幅 $\Delta f = f_{nL} / Q$

$$F_{0 \text{ PSD}} = F_0^2 / \Delta f = F_0^2 / (f_{nL} / Q) = m_{eL}^2 \times (\pi \cdot Q \cdot \text{PSD} \cdot f_{nL} / 2) / (f_{nL} / Q) = (\pi Q^2 / 2) \cdot m_{eL}^2 \cdot \text{PSD}$$

■ 正規化フォース

正規化フォース $F_{0 \text{ norm}}$ は以下のように求められる。

$$F_{0 \text{ norm}} = F_{0 \text{ PSD}} / m_{eL}^2 \cdot \text{PSD} = (\pi Q^2 / 2)$$

Q値: $Q=35$ とすると、

$$F_{0 \text{ norm}} = \pi \cdot 35^2 / 2 = 1924.2$$

4.10 各ケースの計算結果比較

●モードを選択した場合の最大と最小の比が1.6

| ケース No. | Source系のモード選択 | 有効質量 (kg) | 剰余質量 (kg) | Source系固有振動数 f_{nS} (Hz) | Source系とLoad系の固有振動数の比 (f_{nS} / f_{nL}) | 正規化フォースリミットレベル $F_{bmax, norm}$ | 動質量 $M_{bmax, dynamic}$ (kg ²) | フォースリミットレベル F_{bmax} (N ² /Hz) |
|---|------------------------------|-----------|-----------|----------------------------|---|---------------------------------|--|---|
| ユニット構体のLoad系インタフェース部4点のみ固定 | | | | | | | | |
| 計算1 ケース1 | 3次モード選択 | 42.89 | 3.0 | 29.14 | 0.091 | 1.132 | 1,340 | 3,858 |
| 計算1 ケース2 | 4次モード選択 | 2.06 | 0.94 | 71.11 | 0.222 | 1.212 | 1,434 | 4,131 |
| 計算1A | $f_{nL} \pm 3\text{dB}$ から選択 | 0.119 | 0.611 | 232.9 | 0.726 | 4.67 | 5,526 | 15,916 |
| ユニット構体のLoad系インタフェース部4点と構体上部4隅固定 モード選択時最大 | | | | | | | | |
| 計算2 | 1次モード選択 | 15.56 | 46.66 | 68.47 | 0.213 | 1.805 | 2,136 | 6,152 |
| 計算2A | $f_{nL} \pm 3\text{dB}$ から選択 | 5.24 | 08.46 | 340.8 | 1.062 | 78.03 | 92,338 | 265,932 |
| ベースパネルを取出し、Load系インタフェース部4点のみ固定 モード選択時最小 | | | | | | | | |
| 計算3 | 1次モード選択 | 14.45 | 2.05 | 29.37 | 0.091 | 1.120 | 1,325 | 3,817 |
| 計算3A | $f_{nL} \pm 3\text{dB}$ から選択 | 0.25 | 0.77 | 330.6 | 1.030 | 217.6 | 257,499 | 741,598 |
| ベースパネルを取出し、Load系インタフェース部4点と周辺を固定 | | | | | | | | |
| 計算4 | 1次モード選択 | 14.20 | 2.30 | 109.9 | 0.342 | 1.51 | 1,787 | 5,146 |
| 計算4 | 2次モード選択 | 0.85 | 1.45 | 367.7 | 1.146 | 10.49 | 12,413 | 35,751 |

4.11 計算結果と試験結果の比較

- 複雑2自由度法の計算結果は音響試験での応答に対して3.0dB以上のマージンを有している。
- モーメントムホイール単体試験の予測レベルは、音響試験時の応答に比べては35.4dBも過大
- 複雑2自由度法の計算結果はモーメントムホイール単体試験の予測レベルに対して、9.47dB以上緩和可能であることを示している。

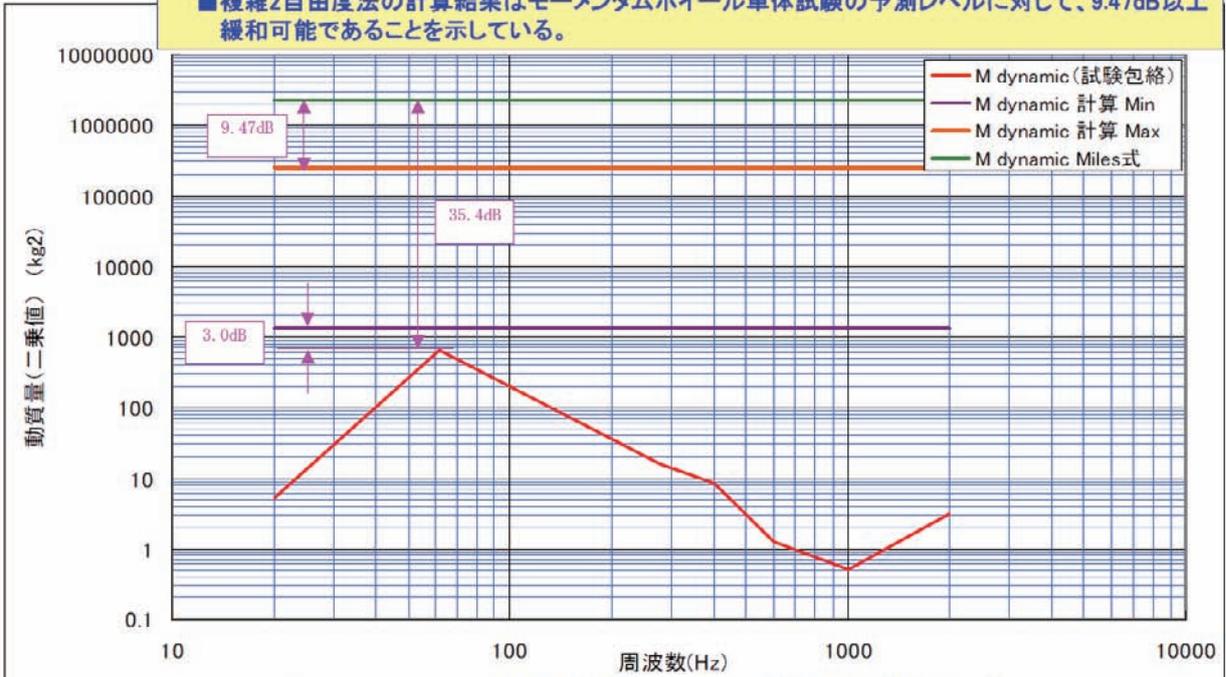
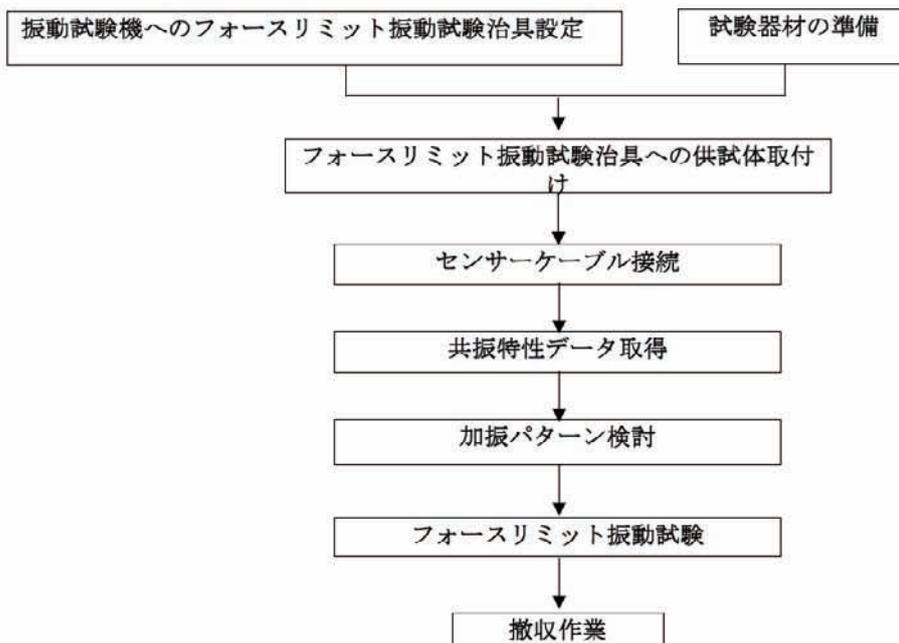


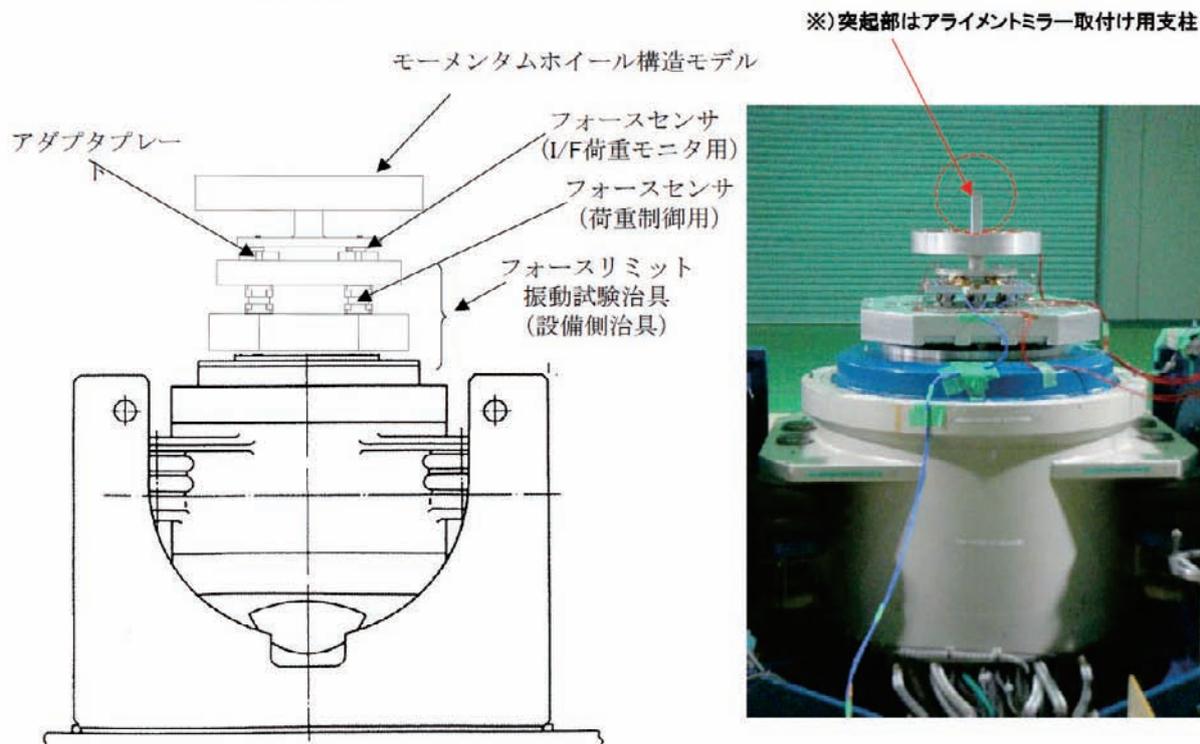
図3.2.7-1 フォースリミットに関わる動質量(二乗値)の計算結果と試験結果比較

5. フォースリミット適用ランダム振動試験結果

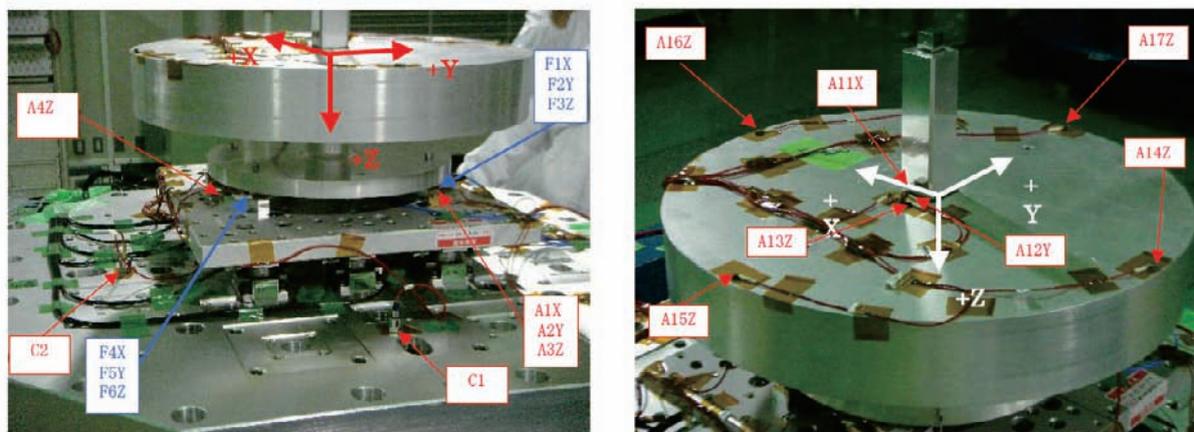
5.1 フォースリミット振動試験フロー



5.2 フォースリミット振動試験コンフィギュレーション



5.3 フォースリミット振動試験データ計測点



加速度計・フォースセンサ取付け状況：インタフェース部

5.4 MW SM共振特性データ: 中央部Z方向加速度伝達率

- 1次共振点に於ける加速度伝達率は $Q=35$
- 1次固有振動数は解析値320.9Hzに対して228Hz(?)

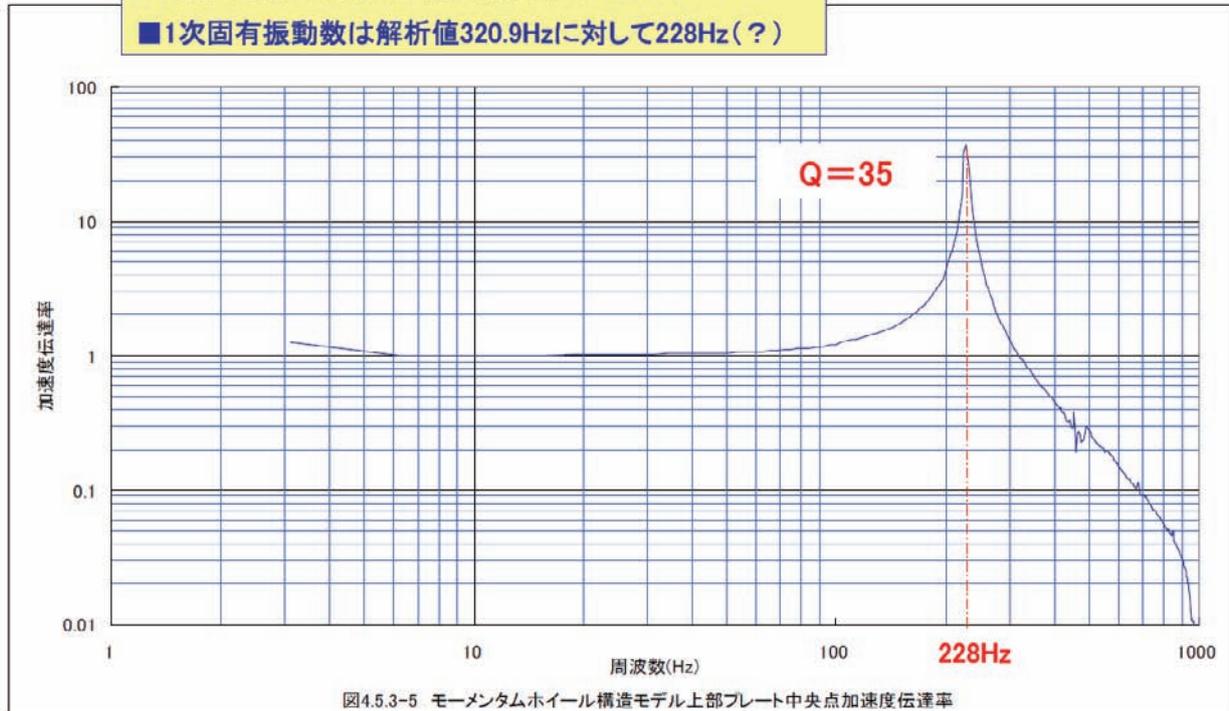


図4.5.3-5 モーメンタムホイール構造モデル上部プレート中央点加速度伝達率

5.5 フォースリミットレベル制御に対する振動試験治具質量の影響

1) 加振制御側のフォースセンサBにて計測されるフォース(合算値) $F(N^2/Hz)$:

$$F = (M^2 + Q^2 \times m_{eL}^2) \times A$$

m_{eL} : モーメンタムホイール構造モデルの1次モード有効質量

M : 振動試験治具質量

Q : モーメンタムホイール構造モデルの1次モードのQファクター

2) インタフェース荷重計測用フォースセンサAのフォース計測値(合算値)が予め決定されたリミット値 F_{LIMT} になるようにするには、加速度入力値 A は

$$F_{LIMT} = Q^2 \times m_{eL}^2 \times A$$

で決定される値に制御される。

3) 1)及び2)から、

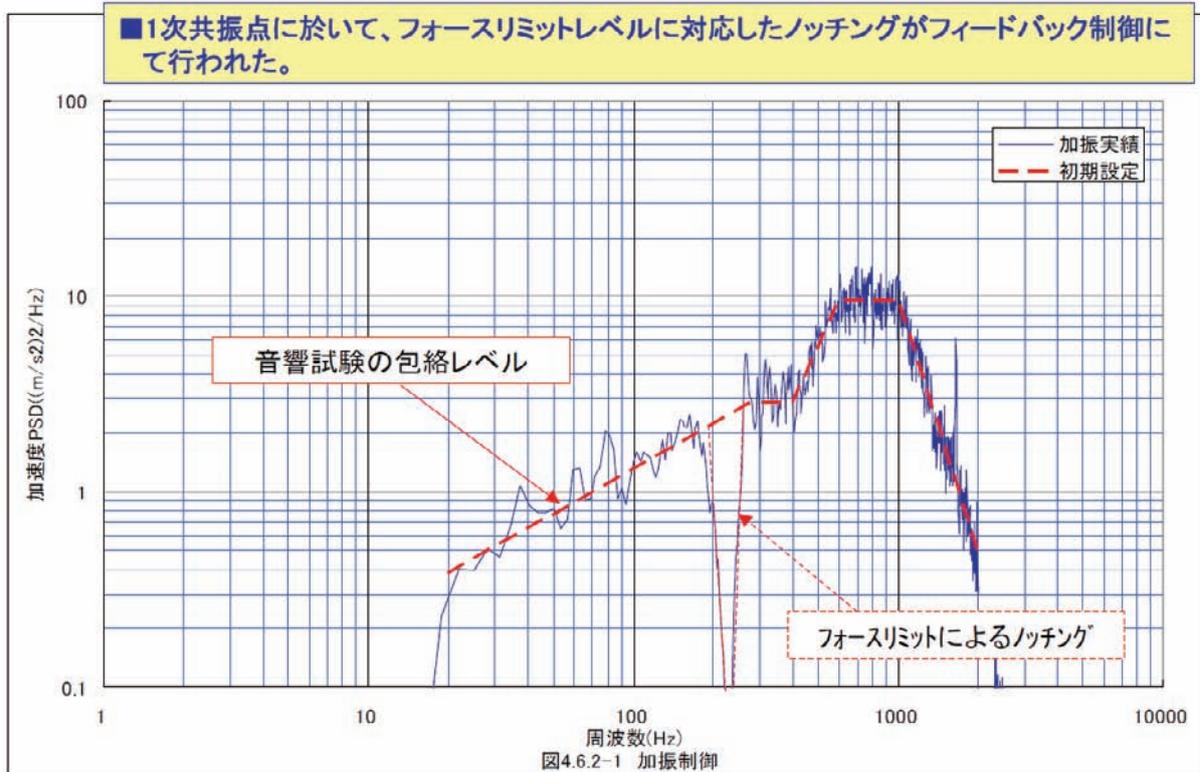
$$F = F_{LIMT} (M / (Q \times m_{eL})^2 + 1)$$

$Q=35$ 、 $M=13.12$ kg、 $m_{eL}=34.4$ kg であるので、

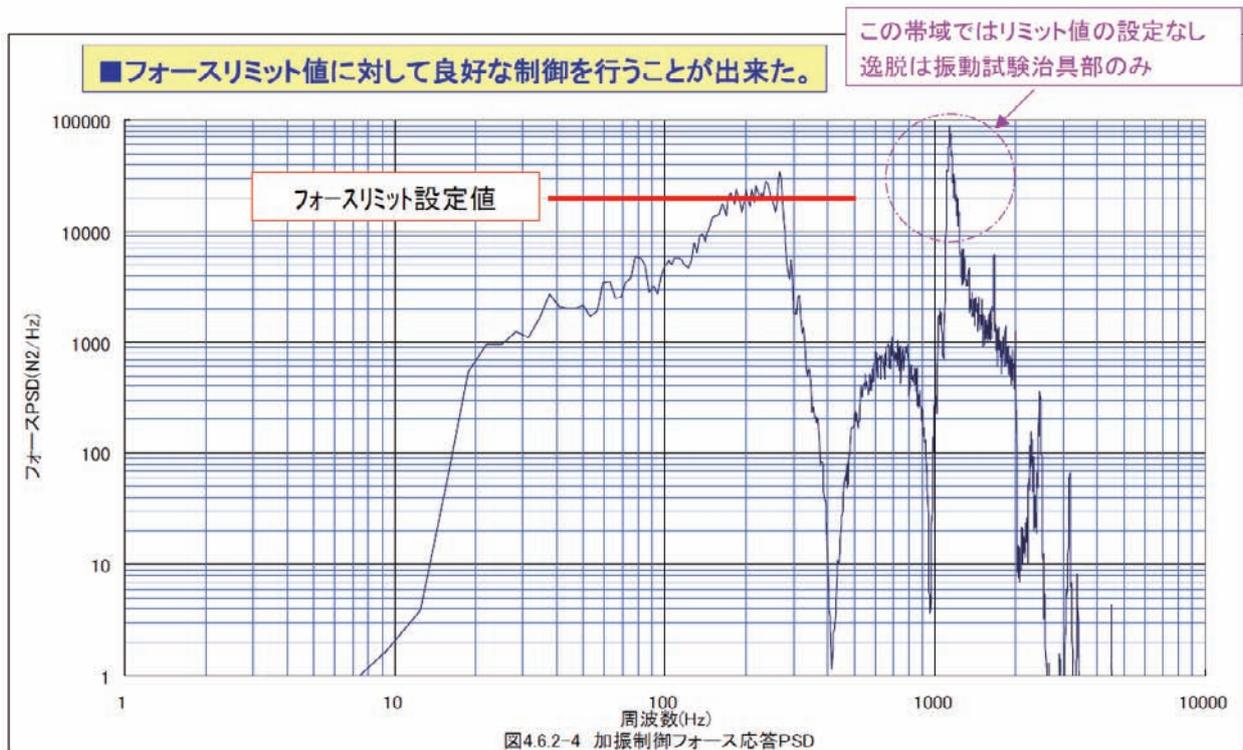
$$F = F_{LIMT} ((13.12 / (35 \times 34.4))^2 + 1) = 1.0001 * F_{LIMT}$$

4) フォースリミット値に対する加振制御に於いて、治具関連剛体質量の影響は無視することが出来る。

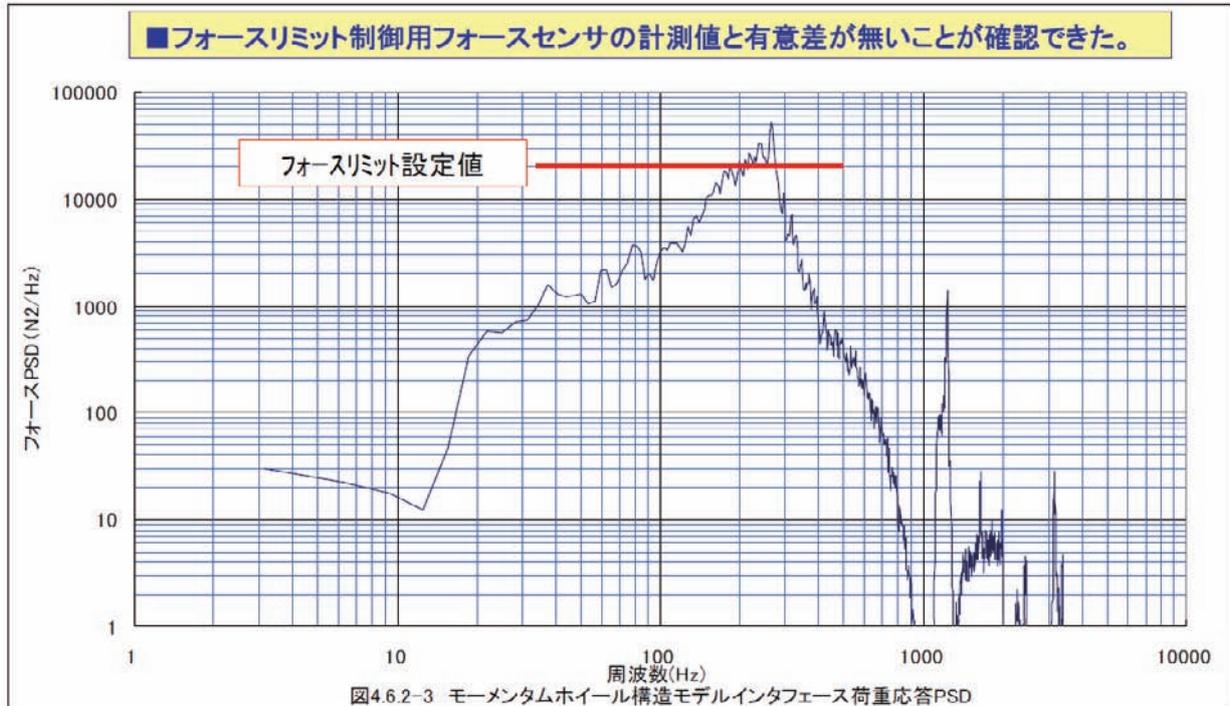
5.6 ランダム振動試験のベース入力加速度制御データ



5.7 フォースリミット制御用フォースセンサの計測データ



5.8 インタフェース荷重モニタ用フォースセンサの計測データ



5.9 1次固有振動数のズレに関する考察

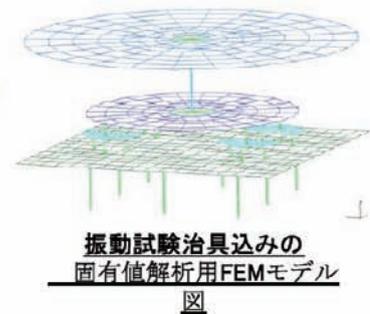
- MW SMの境界条件を剛固定ではなく単純支持にすると固有振動数の差異を説明できることが分かった。
- 振動試験治具を含めた系の固有値解析もを行い、治具剛性による影響は軽微(数%)であることも確認できた。
- 固有振動数に差異があっても有効質量に有意差が無いことが確認できた。
- 固有振動数を228Hzとしてフォースリミットレベルの再計算を行ったが、有意な差異が生じないことも確認できた。

【剛固定条件解析結果】

| Mode | Cycles(Hz) | T1 | T2 | T3 | R1 | R2 | R3 |
|------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 95.48 | 26.68% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 72.88% | 0.00% |
| 2 | 103.66 | 0.00% | 24.31% | 0.00% | 70.14% | 0.00% | 0.00% |
| 3 | 104.68 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 96.14% |
| 4 | 320.90 | 0.00% | 0.00% | 95.98% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 5 | 418.38 | 63.74% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 24.77% | 0.00% |
| 6 | 443.16 | 0.00% | 66.55% | 0.00% | 27.00% | 0.00% | 0.00% |

【単純支持条件解析結果】

| Mode | Cycles(Hz) | T1 | T2 | T3 | R1 | R2 | R3 |
|------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 90.82 | 27.90% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 74.21% | 0.00% |
| 2 | 101.21 | 0.00% | 25.03% | 0.00% | 70.90% | 0.00% | 0.00% |
| 3 | 104.68 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 96.14% |
| 4 | 247.32 | 0.00% | 0.00% | 96.28% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 5 | 409.16 | 61.96% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 23.43% | 0.00% |
| 6 | 437.12 | 0.00% | 65.77% | 0.00% | 26.21% | 0.00% | 0.00% |



6. まとめ

- (1) 本業務に於いて、音響試験に基づくランダム振動条件設定からフォースリミット振動試験実施に至る一連の作業を行うことが出来た。
- (2) 音響試験に於いて供試体のインタフェース部に作用するインタフェース荷重を直接計測し、フォースリミット振動試験ハンドブックに基づいてフォースリミットレベルと比較評価することが出来た。本業務実施の範囲内では、算出されたフォースリミットレベルは実測値に対して安全側の値を示していることが確認された。
- (3) 複雑2自由度法に於いて、ソース系パラメータを求める方法について以下の知見が得られた。
 - 1) ロード系とのカップリングを考慮して、有効質量の大きさ、モード形状を検討して決定したが、本検討の範囲では試験計測値果に近いフォースリミットレベルを提示する結果を得た。
 - 2) Load系固有振動数の $\pm 3\text{dB}$ に限定して求める場合は、1)項の結果に比べて安全側(高め)の結果を提示するが、これはLoad系とSource系の固有振動数が接近する影響が大きいためである。
 - 3) ソース側の解析対象範囲及び境界条件について4通りの組合せで検討したが、1)項の方法でモード選択した場合の結果の比率は1.6以内であった。
 - 4) 上記3)項で、ソース系解析対象をロード系とのダイナミックカップリングの影響が大きいと推定されるパネルに限定できれば解析の効率化が期待できる！
 - 5) ロード系構造動特性を求める時のロード側の境界条件を剛固定(6自由度拘束)と単純支持(並進自由度のみ拘束)で固有振動数の差異が大きい場合、締結状態を考慮すると、単純支持とする方が妥当と思われる場合もある。

質疑応答

質問者①

フォースリミット振動試験ハンドブック（以下、「ハンドブック」）に示された内容以外にも、沢山のケーススタディを行っていただいたのですが、初めてこの話を聞かれた方は、沢山計算をしなければいけないという印象を持つかもしれません。

そこで、いくつか質問をしたいと思います。

1つ目は、ハンドブックに示された方法で計算した場合、設計者としてフォースリミット条件を求める時、多大な作業量になるのでしょうか。

2つ目は、世古さんはハンドブックの委員になっていただいておりますが、そこまで詳しくない方がハンドブックに従って、リミット条件を出す時に、今回実施した試験の中で得たアドバイスがあれば、特に専門家向けではなく、初心者向けにコメントをお願いしたいのですが、よろしいでしょうか。

発表者

フォースリミット振動試験ハンドブックの検討には、私も関わらせていただいております。一応ガイドラインとしては、ハンドブックに示されているのですが、実際論としては、（説明が）無いところもございまして、（リミット条件算出のパラメータを求める解析を行う際の）境界条件をどうするか、良く見るとあまり書かれていないのです。

何パターンか、リミット条件を出して、その中で、どのくらいレベルを緩和しなければいけないかということを考えて、あまり過大にノッチをかけることの無いように、緩和し過ぎないようなやり方を選択するということが重要だと思っています。

ですから、決め打ちをせずに、いろんな（リミット条件を求める）ケースを考えて、できるだけ試験レベルに対する（安全）マージンを確保しながら、かつ、必要なレベルを緩和するのにうまいといいますか、良いところを選ぶ必要があるのではないかなと思います。

ちょっと、初心者向けには難しいかもしれませんが、それが、かなり重要なポイントではないかなと考えております。

質問者②

技術的な質問ではなくて申し訳ないのですが、フォースリミット振動試験の適用が有効であることは世古様はよくわかっていらっしゃると思うのですが、三菱電機さんの社内的にはどれくらい浸透しているというか、使えるという認識をされているのでしょうか。

おそらくコンポ屋さんがたくさんいらっしゃると思うので、たぶん彼らも苦労しているので、適用したいと思うところなのですが、もう結構動き始めているのでしょうか。

発表者

浸透はしていません。ただし、最近、フォースリミットの考え方を関係者にはこういう方法ですよ、ということは、宣伝しているというのが現状です。

今回の（発表）資料に関しても関係者に閲覧させて、これから普及させていこうというところですよ。

質問者③

たとえば、宇宙機のプログラムに限ったことで言うと、契約上の適用文書にフォースリミット振動試験ハンドブックが入っていれば、当然やりやすいですよ。

そういう意味では JAXA 側も動く余地があると言えます。

試験標準を契約の適用文書にしていれば、試験標準から呼ばれているハンドブックも間接的に提供されているということになっているはずですよ。

だから、本当は（フォースリミット振動試験を）使えるはずなんですよ。

発表者

そうですね。過去に私が関わった ETS-VIII ではモーメンタムホイールでかなり緩和しなければいけないということで大変苦労しました。

当時、フォースリミットの考え方が分かっていたら、だいぶ苦労せずに済んだのかなと思っております。

今回の検討により、有効に使えるのではないかと考えていますので、JAXA さんの中で、これが標準として、使われるという形にしていただければ、いいのではないかと思います。

質問者③

JAXA でも社内的な活動が必要だということですよ。わかりました。