

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

擾乱試験用衛星構体テストベッド

A Testbed Structure for Research on Micro-vibration Tests of Spacecraft

内田 英樹, 清水 隆三, 神谷 友裕, 小松 敬治,
安田 進, 宇都宮 真, 山脇 敏彦, 水谷 忠均

Hideki UCHIDA, Ryuzo SHIMIZU, Tomohiro KAMIYA, Keiji KOMATSU,
Susumu YASUDA, Shin UTSUNOMIYA, Toshihiko YAMAWAKI and Tadahito MIZUTANI

研究開発本部 衛星構造・機構グループ
Spacecraft Structures and Mechanisms Group
Aerospace Research and Development Directorate

2011年7月

July 2011

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

1. 緒言	2
2. 衛星模型の設計	3
2.1 全体概要	3
2.2 機能	7
2.3 擾乱源	9
2.3.1 ホイール	9
2.3.2 冷凍機用コンプレッサ	10
2.3.3 パドル駆動機構	10
2.4 付属品	10
3. 衛星模型の動的特性	11
3.1 モーダルサーベイ	11
3.2 伝達特性取得試験	29
3.3 擾乱測定試験	31
4. 有限要素モデル	35
4.1 作成方針	35
4.2 初期モデルの作成と固有値解析結果	36
4.3 0次モデルの作成	57
4.3.1 パネル端材のハンマリング試験による物性値の取得	57
4.3.2 ミッション部トラス部材のハンマリング試験による物性値の取得	60
4.3.3 構体結合フィッティング部のフォースリンクのモデル化	61
4.3.4 0次モデルの固有値解析結果	61
4.4 0次モデルのコリレーション	68
4.4.1 パネル埋め込みインサートのモデル化	68
4.4.2 各パネル単体のモーダルサーベイ	75

4.4.3 コリレーション後の有限要素モデルと固有値解析結果	85
5. 結言	110
参考文献	110
付録 1. 衛星模型の写真と図面.....	111
付録 2. 試験に用いた擾乱計測機器.....	128
付録 3. NASTRAN バルクデータ	129
付録 4. アルミフレームとパネル結合構造のモーダルサーベイと有限要素解析	145
A4.1 要約	145
A4.2 背景と目的	145
A4.3 供試体と有限要素モデル.....	146
A4.4 モーダルサーベイ	151
A4.5 有限要素モデルのパラメータ調整.....	154
A4.6 下端を固定した場合の有限要素解析.....	169

擾乱試験用衛星構体テストベッド*

内田 英樹^{*1}, 清水 隆三^{*1}, 神谷 友裕^{*1}, 小松 敬治^{*1,2},
安田 進^{*1}, 宇都宮 真^{*1}, 山脇 敏彦^{*1}, 水谷 忠均^{*1}

A Testbed Structure for Research on Micro-vibration Tests of Spacecraft*

Hideki UCHIDA^{*1}, Ryuzo SHIMIZU^{*1}, Tomohiro KAMIYA^{*1}, Keiji KOMATSU^{*1,2},
Susumu YASUDA^{*1}, Shin UTSUNOMIYA^{*1}, Toshihiko YAMAWAKI^{*1} and Tadahito MIZUTANI^{*1}

Abstract

This report describes a testbed developed to study micro-vibration testing methods of spacecraft. A structure of the testbed was design so that its load path simulated a typical bus structure. Several disturbance sources can be located on the testbed, and boundary condition to support the testbed can be chosen to simulate behavior in orbit. Then, several testing methods can be attempted as an experimental approach. On the other hand, the Finite Element Model by NX.Nastran software was developed to investigate possibility of an analytical approach. Parameters of the Finite Element Model were updated based on the results of modal survey performed on not only assembling level but also parts level. Finally, each natural frequency of the Finite Element Model was within an error of 5% up to middle range of frequency.

Keywords : Spacecraft Structures, Micro-vibration, Finite Element Model

概要

本報告書では、衛星の擾乱試験の手法を研究するために開発したテストベッドについて述べる。テストベッドの構造は典型的な衛星バスのロードパスを模擬するように設計されている。テストベッドにはいくつかの擾乱源を設置することが可能で、軌道上の状態を模擬するためにテストベッドを支持する境界条件も選択することが可能である。これにより実験的なアプローチとしての試験法の検証が可能となった。一方で、解析的なアプローチの可能性を研究するためにNX.Nastranを用いて有限要素モデルを作成した。このパラメータはテストベッドの全体構造だけでなく部品レベルでも実施したモーダルサーベイの結果を用いてアップデートした。最終的には、中間周波数帯まで固有振動数の値の誤差が5%以内の精度を有する有限要素モデルが作成できた。

* 平成23年5月10日受付 (Received 10 May 2011)

*1 研究開発本部 衛星構造・機構グループ

(Spacecraft Structures and Mechanisms Group, Aerospace Research and Development Directorate)

*2 宇宙科学研究所 宇宙構造・材料工学研究系

(Department of Space Structure and Materials, Institute of Space and Astronautical Science)

1. 諸言

衛星における微小擾乱は、ミッションの達成にとって大きな障害となる。最近の衛星の指向要求はとてもし厳しく、従来は問題にならなかった搭載機器が発生する微小擾乱を、概念設計の段階から把握し、軌道上での指向要求が満足できるよう管理していく必要がある^{[1][2]}。このような事情から、JAXA では設計基準の一つとして擾乱管理の関連マニュアル類を整備している^[3]。

フライトモデル(FM)を使った End-to-End 試験の時期まで、擾乱の定量的な把握がうまくできないのは以下の要因がある。

① 擾乱源の測定境界条件（例えば、通称キスラーテーブルと呼ばれるスイス Kistler 製多成分フォースプレートへの固定条件）と実際の搭載の境界条件が同一にできないこと

② 構造伝達が有限要素モデルで予測できないこと

が大きな要因であり、さらに、

③ 擾乱源 - 構造伝達 - 感受器（ミッション部、観測部など）までの伝達関数合成がうまくいかないこと

が擾乱管理を困難としている。また、FM による地上試験が軌道上での模擬となっていない場合が多いことも、今後解決していかなければならない問題である。

本報告書は、このような背景のもと、①と③の試験に対してのテストベッドを供給することが第 1 の目的である。実際の衛星で擾乱源や擾乱感受器の試験ができる機会は、衛星のエンジニアリングモデル(EM)あるいは FM が出来上がった時点であり、さらに、一連の擾乱伝達を End-to-End に近い形態で試験できるのはわずかな期間である。その場合でも、EM や FM の構造としての動特性が、擾乱が問題となる周波数領域で分かっていることは稀である。よって、動特性が既知のテストベッドで試験を行えば、機器単独での擾乱に対する課題がキスラーテーブルなどで行う試験よりも現実的に明確になることが期待される。

第 2 の目的としては、従来、構造側では経験的に諦められていた、「中間領域周波数（数 10Hz - 数 100Hz）での数学モデルは本当に精度不足で作れないのか」という、制御技術者からの問いに、しっかりと答えるべく、数学モデルを作り、試験結果をフィードバックして修正し、どの程度まで合わせることができ示すことである。この問題に関してはスペースシャトルで数学モデルの精度が MAC(モーダルコンフィデンスファクター、モードの直交性の指標)によって厳しく要求されていることと同じで、そこまで強制されればそのようなモデルを作らざるをえなかったが、従来のロケットで打ち上げる衛星ではそこまでの努力はしてこられなかった。今回、構体の設計と試験および有限要素モデルの作成を同一グループで行うことで精度の限界に挑戦し、その結果を広く世間に知らせるとともに、このようにして修正された有限要素モデルをテストベッドとペアで提供することが、今後の各種衛星プロジェクトの擾乱問題に役に立つと確信する。

2. 衛星模型の設計

2.1 全体概要

擾乱試験のテストベッドとして、実際の標準的な衛星と構造様式を同様にした構造模型を設計・製作した。製作は株式会社TMP（神奈川県相模原市）が行った。

図2-1に衛星模型の概観図と、図2-2に搭載可能な擾乱源を示す。図2-3に部品名称、図2-4に分解図をそれぞれ示す。また、表2-1に主要緒言、表2-2に材質等をそれぞれ示す。

衛星模型はシステムとして光学系を意識したもので、そのミッション部には大型の鏡面模擬構造を有する光学ベンチを配置している。また、構造伝達特性を可能な限り実機に近いものとするために、炭素繊維複合材料を使用している。このミッション部は取り外し可能で、取り付けのインターフェースを合わせれば、任意の構造をミッション部として搭載することができる。搭載可能な擾乱源としては、図2-2に示すようなホイールや冷凍機用コンプレッサ、および太陽電池パドル駆動機構のステッパーモータである。さらに、バス部内部には推進薬タンクを模擬した構造を配置しており、推進薬の影響を評価できるよう設計に配慮している。

なお、本報告書の付録1には衛星模型の部品の写真と質量表および図面を掲載している。

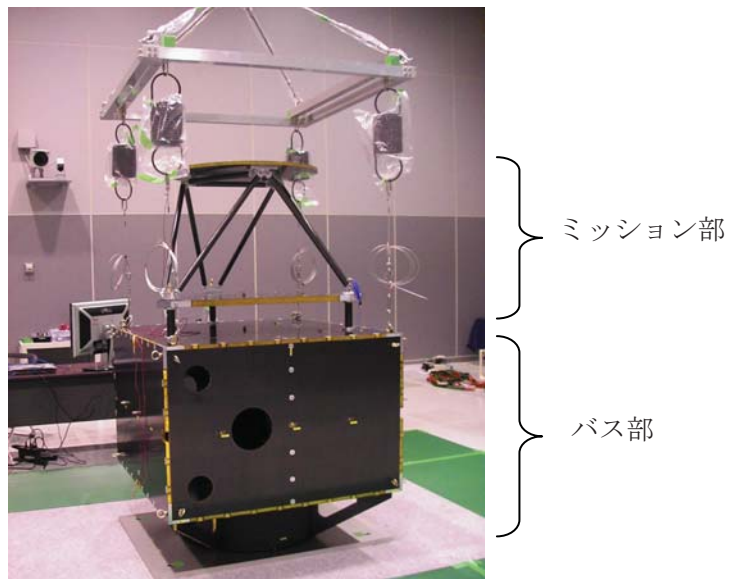
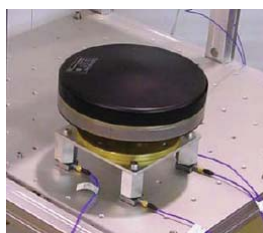


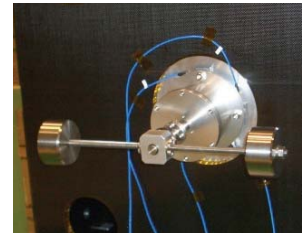
図2-1 衛星模型



(a) ホイール



(b) 冷凍機用コンプレッサ



(c) パドル駆動機構

図2-2 衛星模型に搭載可能な各種擾乱源

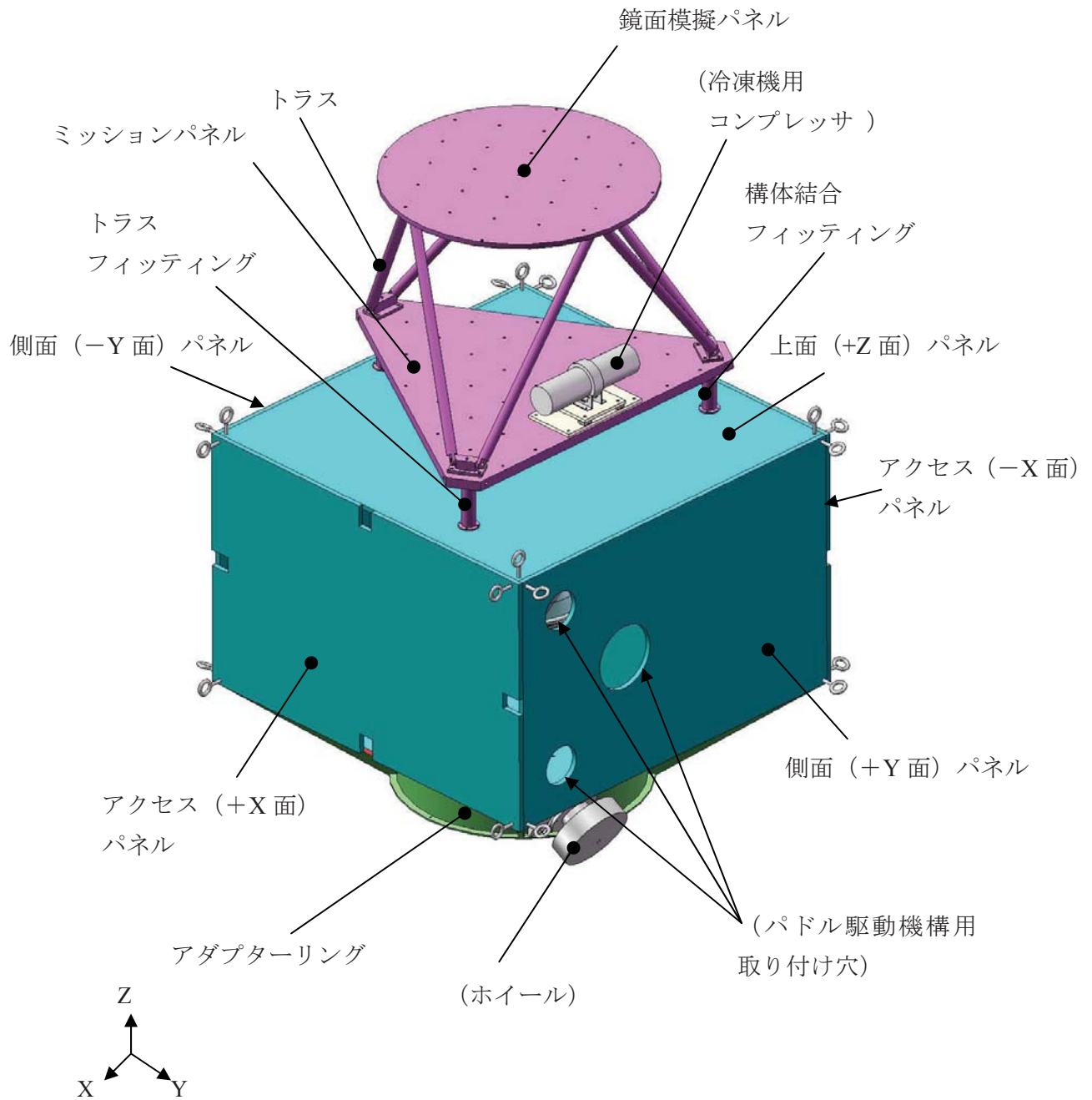


図2-3 部品名称

(側面の構体パネルのうち対称な位置にある2枚を『アクセスパネル』、残りの2枚を『側面パネル』と呼ぶ)

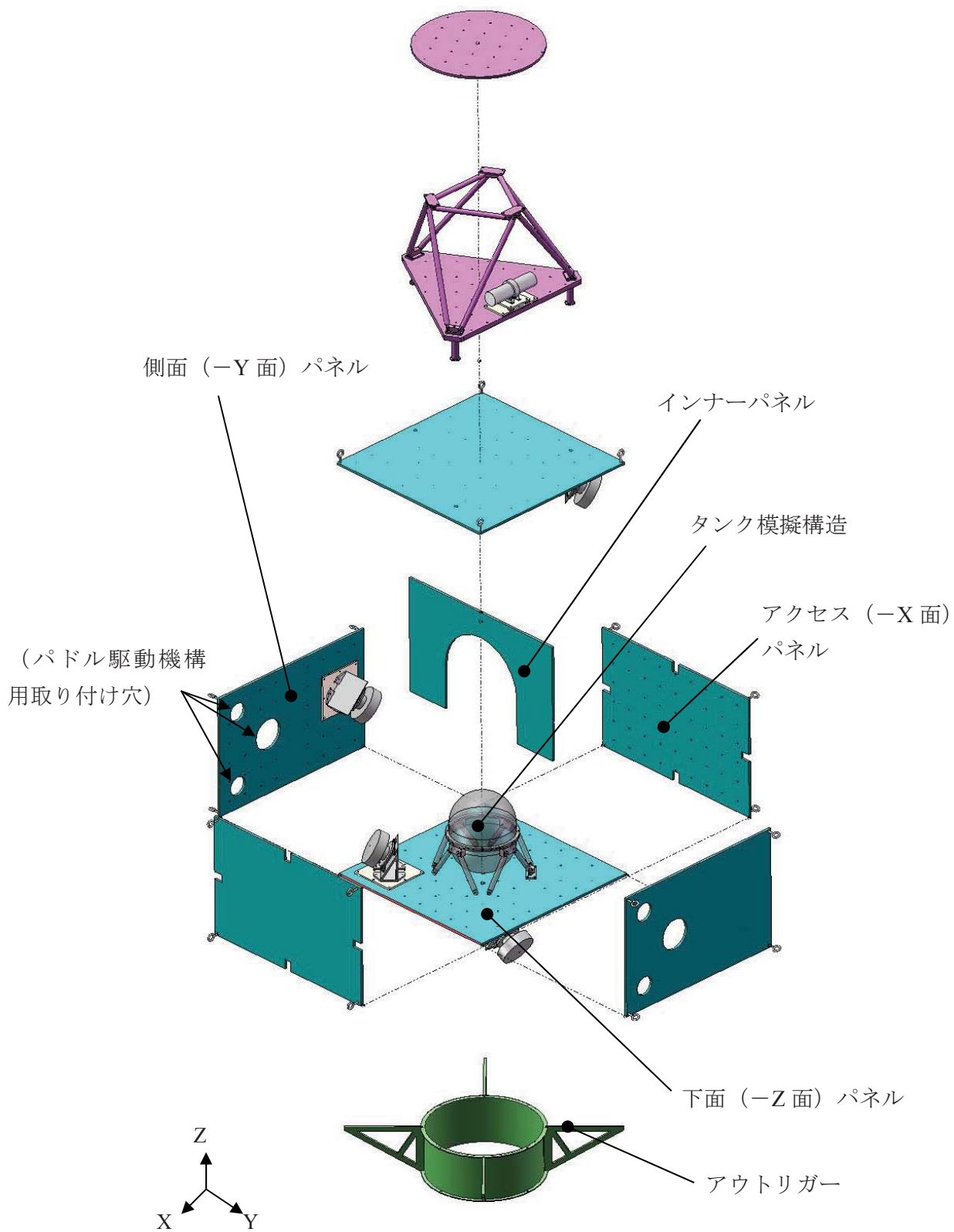


図2-4 分解図

表2-1 主要緒言

	スペック値	備考
寸法	(横) 1200mm (幅) 1200mm (高さ) 1938mm	ミッション部含む
重量	68.6kg (擾乱源未搭載時、タンク液体未充填時)	バス部 (タンク模擬構造無し) : 46.5kg タンク模擬構造 : 8.9kg ミッション部 : 13.2kg
剛性	100Hz以上	境界自由条件下 (3章、4章にて詳細を記載)

表2-2 部品表と材質

部品名称	数量	材質	備考
上面パネル	1	CFRP/ALコア	炭素繊維T300 クロス材
側面パネル	2	同上	同上
下面パネル	1	同上	同上
アクセスパネル	2	同上	同上
インナーパネル	1	同上	同上
アウトリガー	4	同上	同上
アダプターリング	1	CFRP	同上
タンク模擬構造	1	アクリル	タンクに水等を充填する際の注排水口を設けている
ミッションパネル	1	CFRP/ALコア	炭素繊維T300 クロス材
鏡面模擬パネル	1	同上	同上
ミッション部トラス (長)	6	CFRP	同上
ミッション部トラス (短)	3	同上	同上
ミッション部トラスフィッティング	6	AL	A5052

2.2 機能

図2-5の透視図から分かるように擾乱源は任意の位置に配置できるように各面にM8のネジ穴を13mmピッチ間隔で設けている。バス部には、アクセスパネルと側面パネルには内側に、上面パネルと下面パネルおよびインナーパネルには両方にこのネジ穴を設けている。ミッション部では、ミッションパネルと鏡面模擬パネルの上側にネジ穴を設けている。

擾乱試験では、軌道上を模擬する必要があるため、吊り下げ方法にはいくらか自由度を持たせている。図2-6に専用の吊り治具を示す。この治具を使い、図2-7のような3方向の吊り下げ方ができるように吊り点を補強等している。また、ミッション部単体についても同様に図2-8のように3方向の吊り下げ方ができるよう配慮している。当然ではあるが、図2-9のように板の上にミッション部を載せて全体を吊ることも可能である。

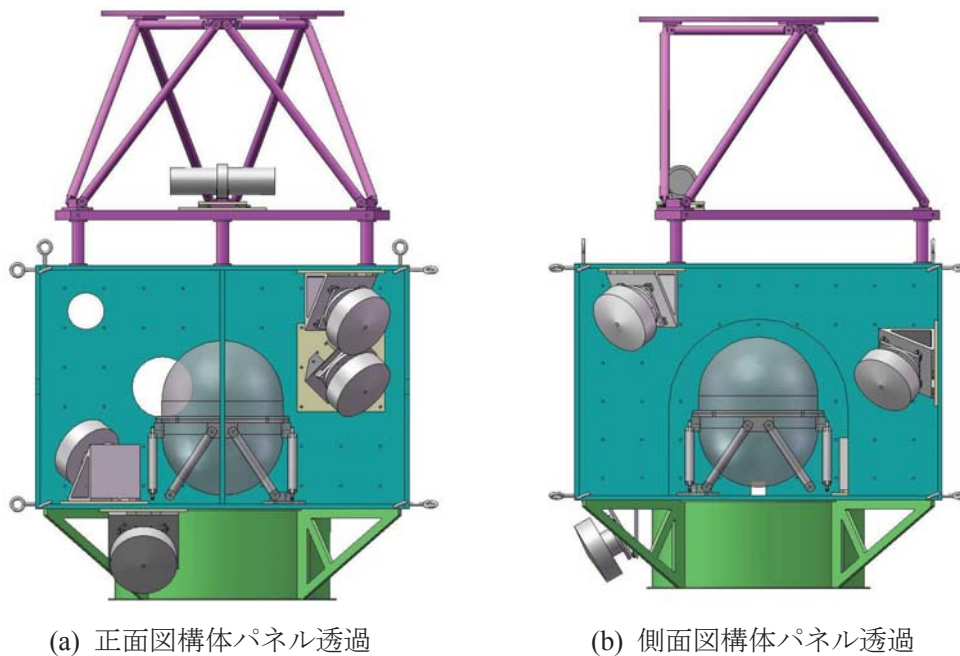


図2-5 透視図



図2-6 専用吊り治具

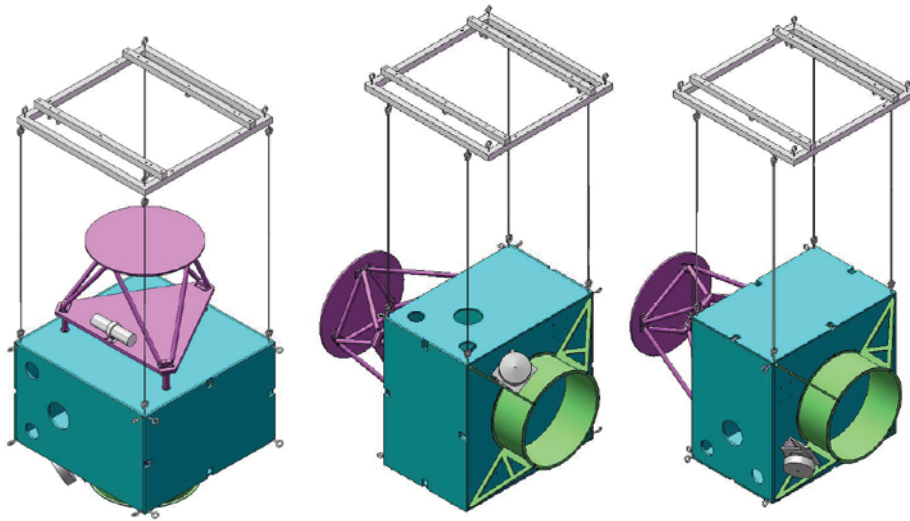


図2-7 衛星模型の吊り下げ方

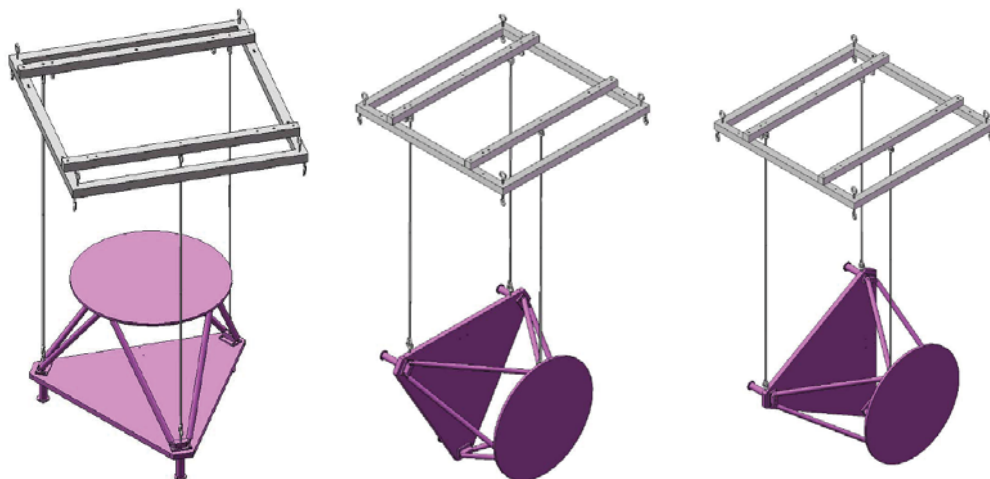


図2-8 ミッション部単体の吊り下げ方

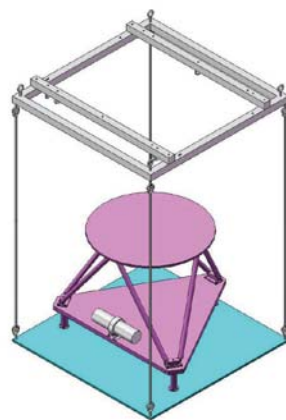


図2-9 ミッション部単体の吊り下げ方（吊り下げ用板使用時）

2.3 擾乱源

2.3.1 ホイール

衛星模型に搭載するホイールはスキュー配置ができるように、図2-10のような台座を用意している。ホイールは図2-11のようにホイールアダプタプレートと、必要に応じて3成分フォースセンサを介してホイール台座に取り付き、構体アダプタプレートを介して構体パネルに結合することができる。

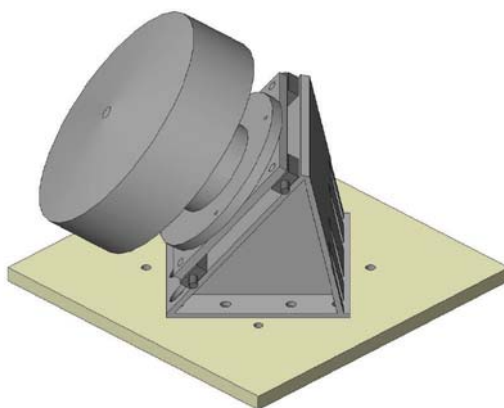


図2-10 ホイール取付時

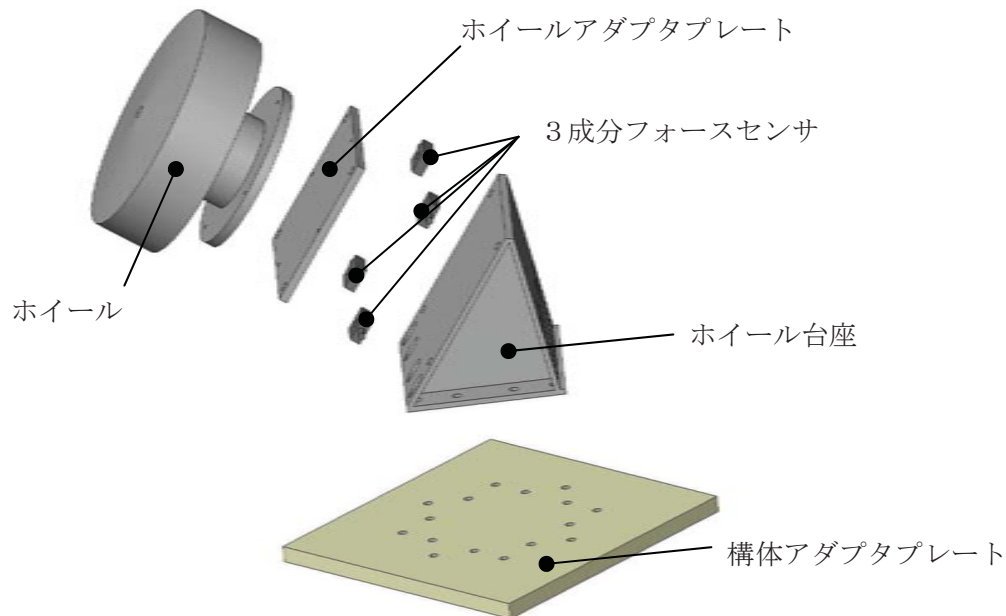


図 2-11 ホイール取付時の分解図

2.3.2 冷凍機用コンプレッサ

冷凍機用コンプレッサについてもホイールと同様で、図2-12のようにコンプレッサ構体アダプタプレートを介して、構体パネルに結合される。

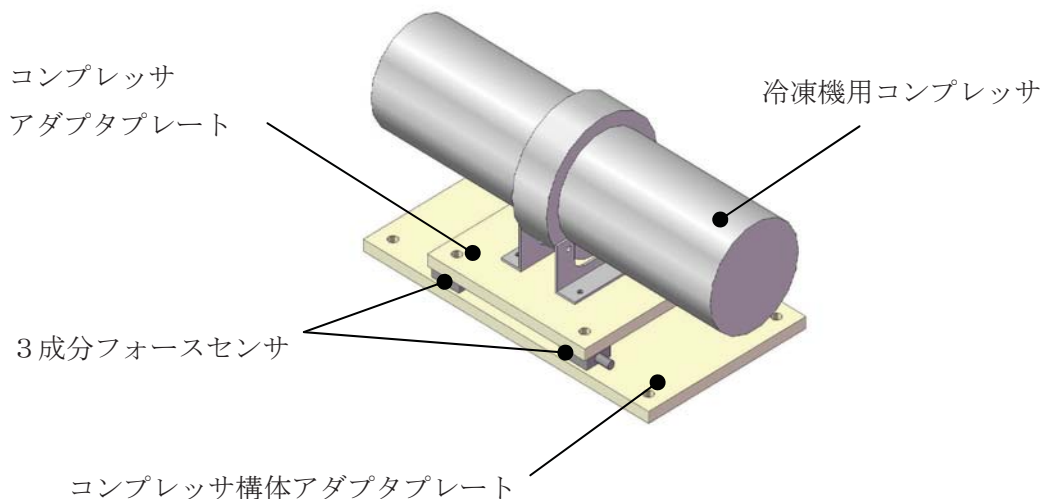


図2-12 冷凍機用コンプレッサ取付時

2.3.3 パドル駆動機構

パドル駆動機構の外観は図2-13のようであり、ステッパーモータとハーモニックドライブが直列に結合されているタイプである。先端には慣性模擬構造を装着できる構造にしている。

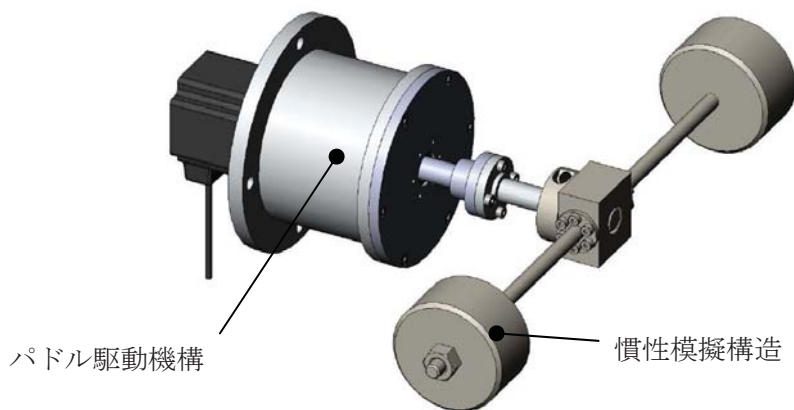


図2-13 パドル駆動機構

2.4 付属品

擾乱源を搭載した際の重心位置合わせや固有振動数の調整のために、ダミーマスを用意している。

3. 衛星模型の動的特性

3.1 モーダルサーベイ

衛星模型を図 3-1 のようにバネで吊って、モーダルサーベイを行い、350Hz までの固有振動数を同定した。このときは、ミッション部と構体を結合するために 3 成分フォースリンク(米国 PCB 製 261M09)を図 3-2 のように結合点の 3 点それぞれに設置している。

基本固有振動数 (1 次モード) は 102Hz で、100Hz 以上の剛性を有していることが分かった。表 3-1 に同定された固有振動数と、図 3-3 に固有振動数のモード形状を示す。

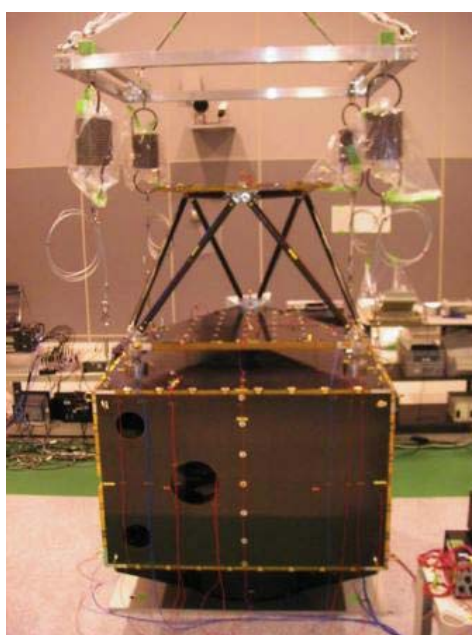


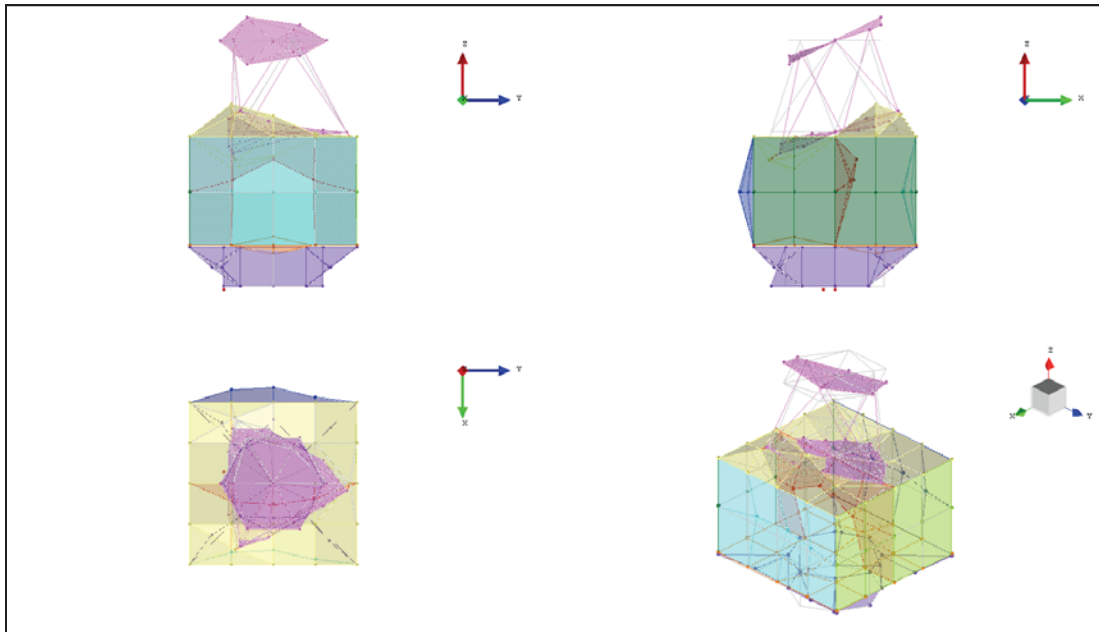
図 3-1 モーダルサーベイの様子



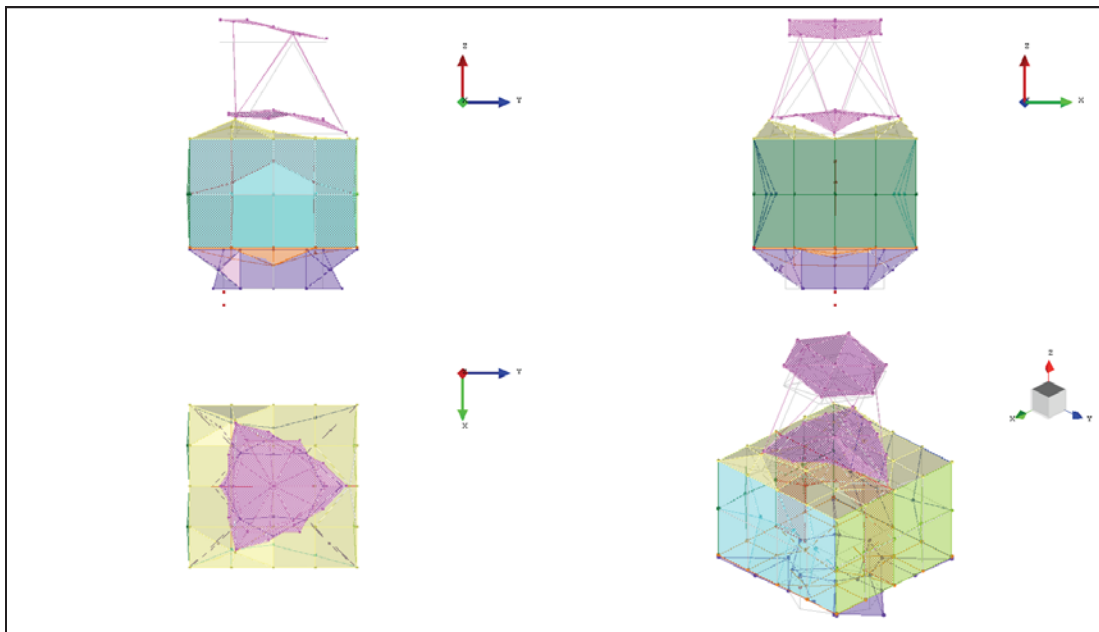
図 3-2 構体結合部のフォースリンク

表 3-1 モーダルサーベイにより得られた固有振動数

モード次数	固有振動数 [Hz]
1	102
2	114
3	121
4	135
5	143
6	143
7	156
8	159
9	151
10	163
11	178
12	190
13	203
14	217
15	227
16	234
17	242
18	247
19	249
20	256
21	264
22	269
23	276
24	290
25	296
26	309
27	315
28	325
29	329
30	333
31	347

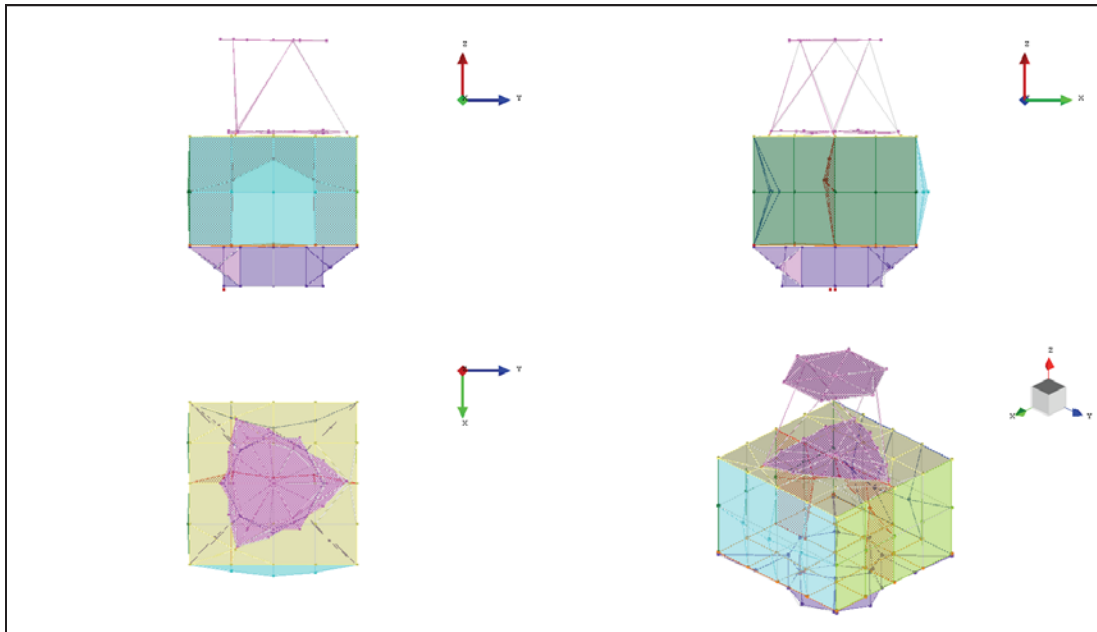


(a) 1次モード (102Hz)

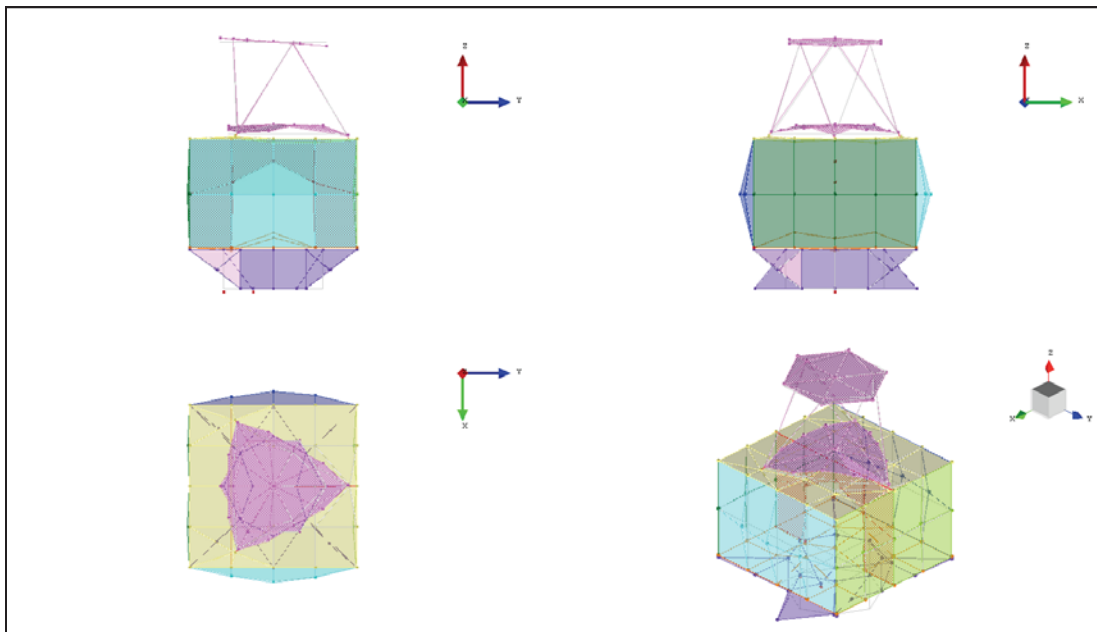


(b) 2次モード (114Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(1/16)

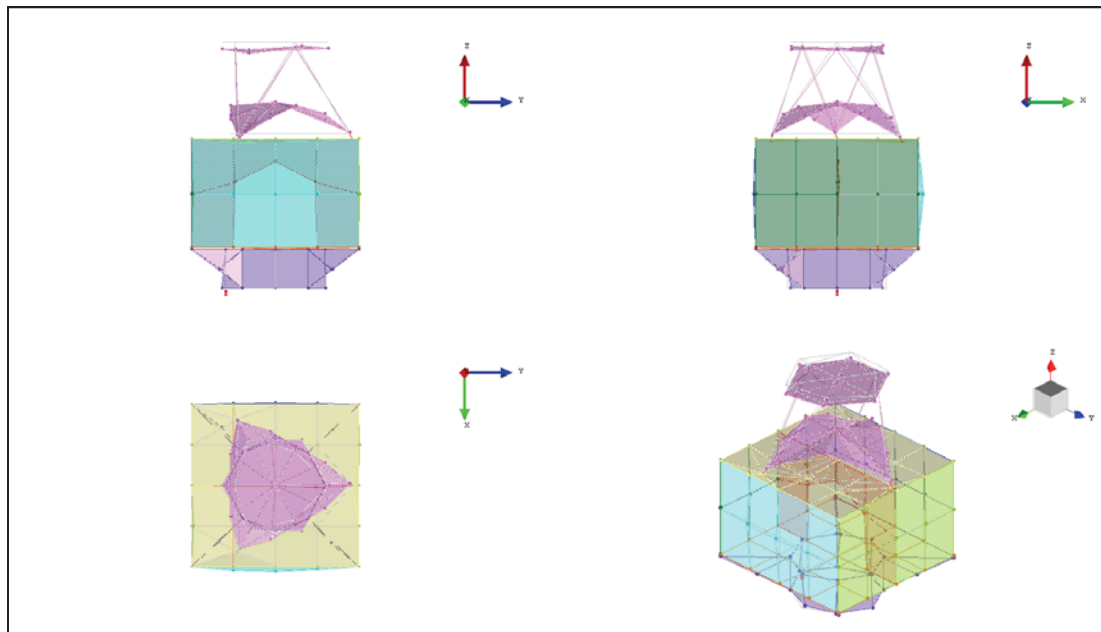


(c) 3次モード (121Hz)

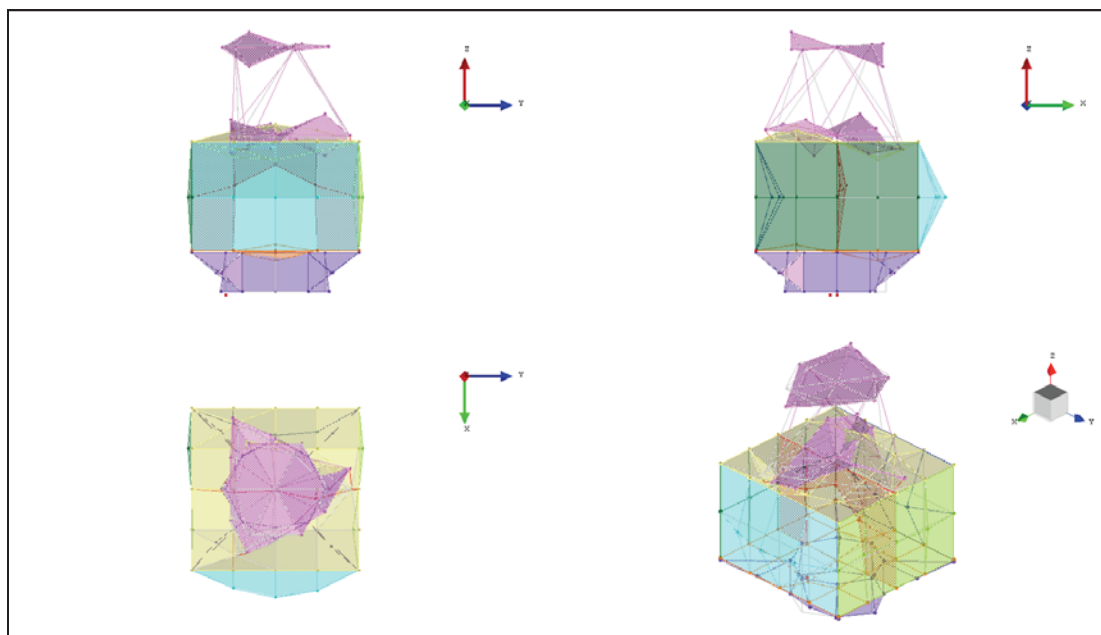


(d) 4次モード (135Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(2/16)

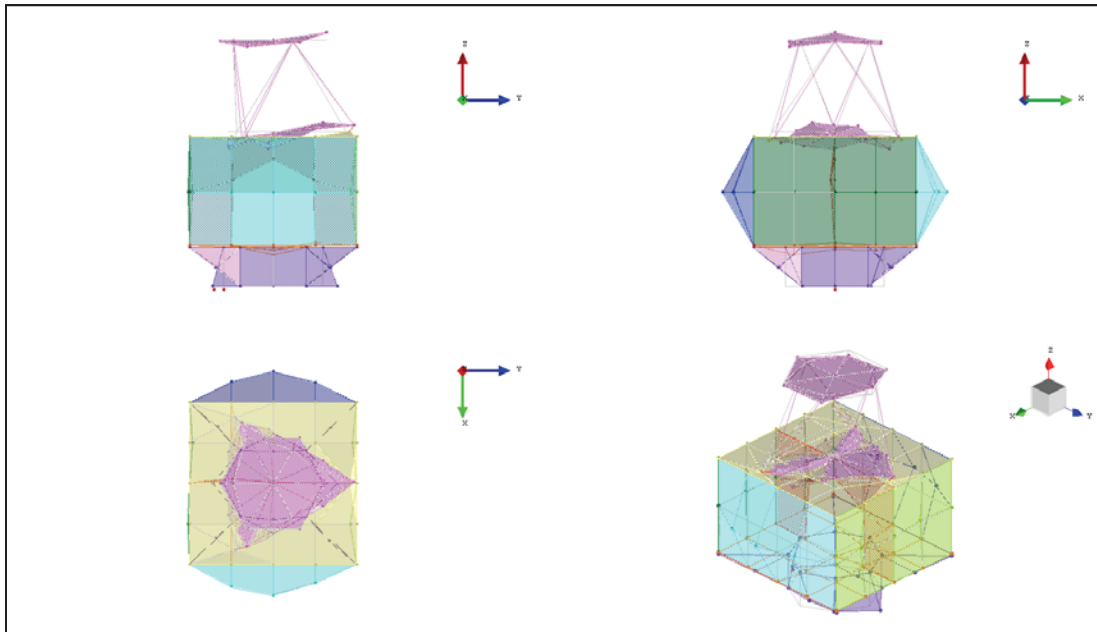


(e) 5 次モード (143Hz)

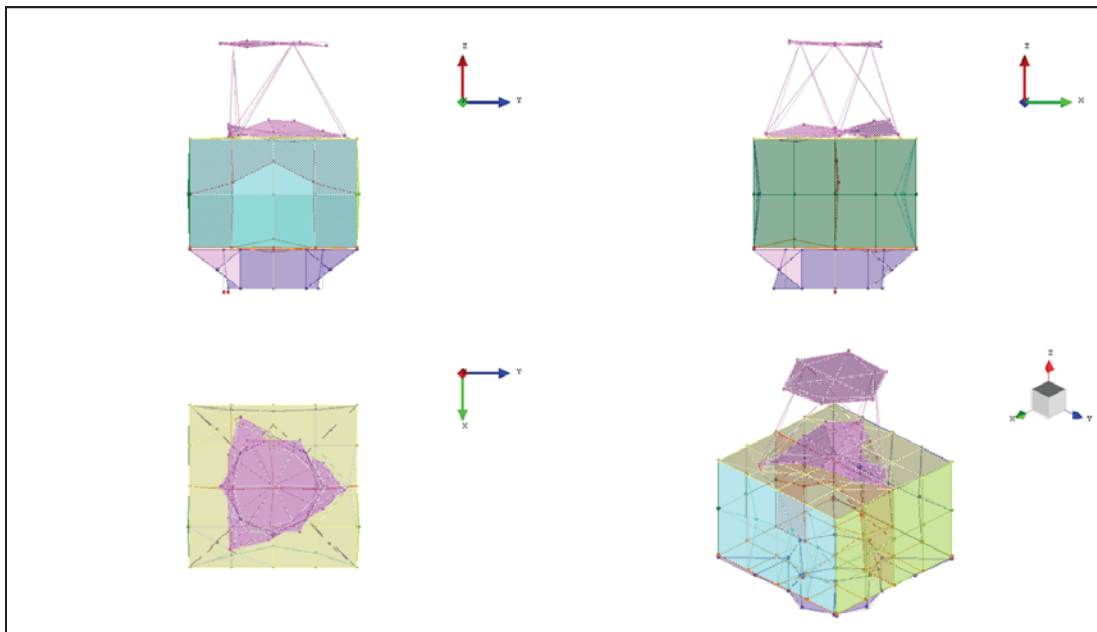


(f) 6 次モード (143Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(3/16)

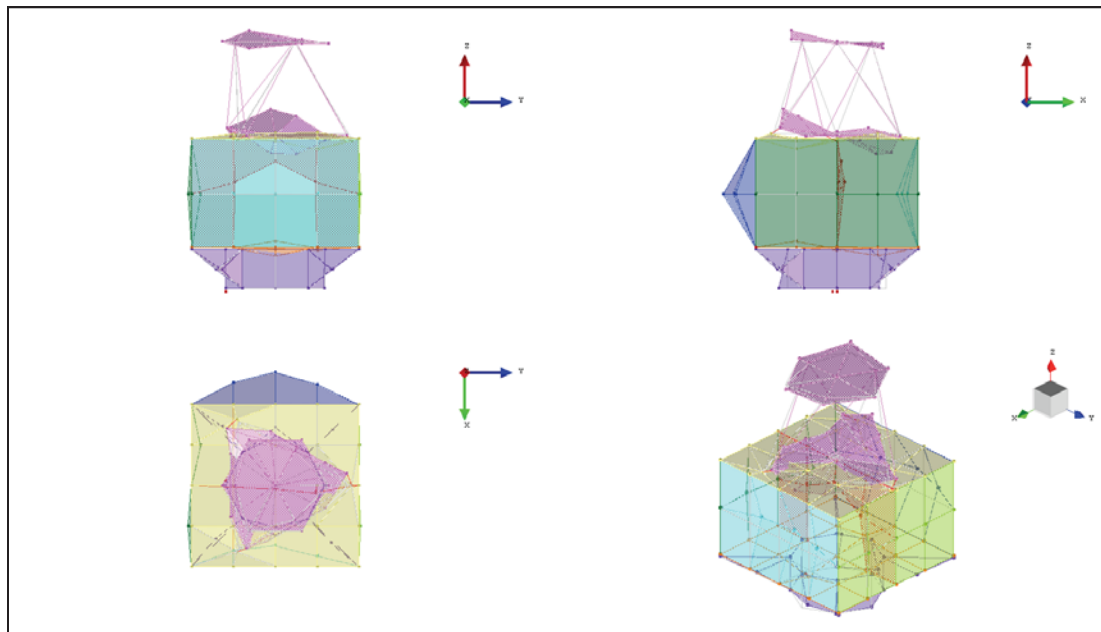


(g) 7次モード (156Hz)

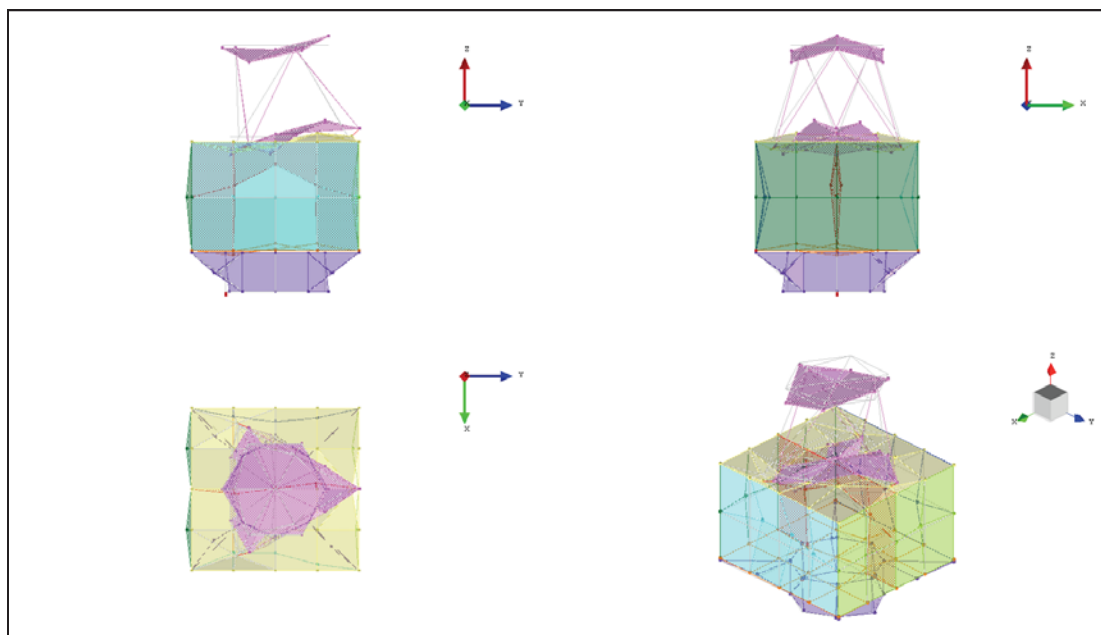


(h) 8次モード (159Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(4/16)

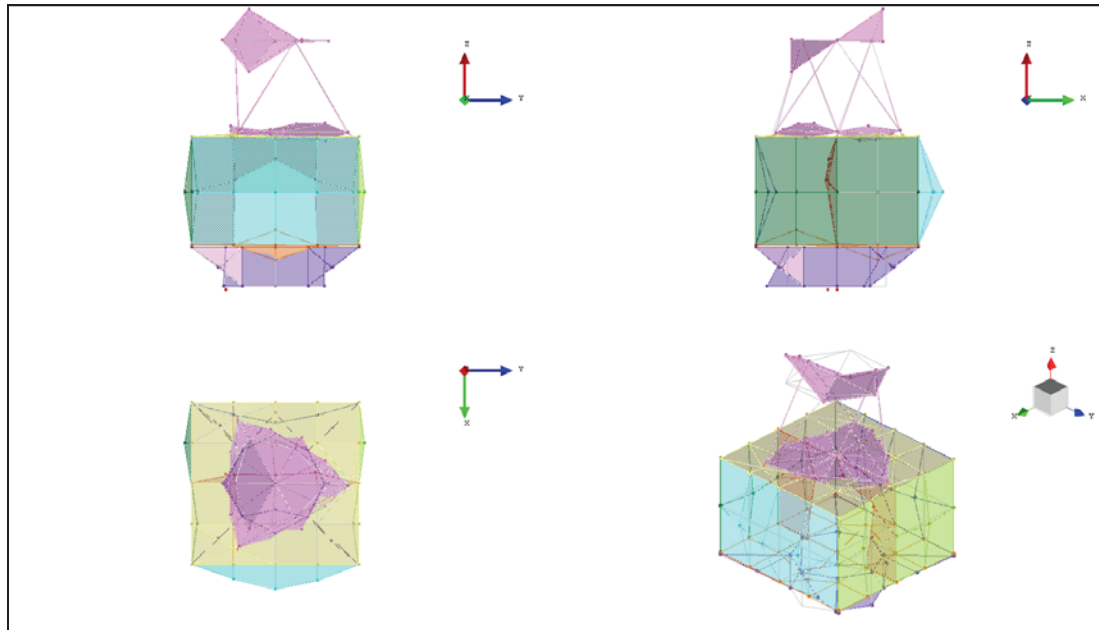


(i) 9次モード (161 Hz)

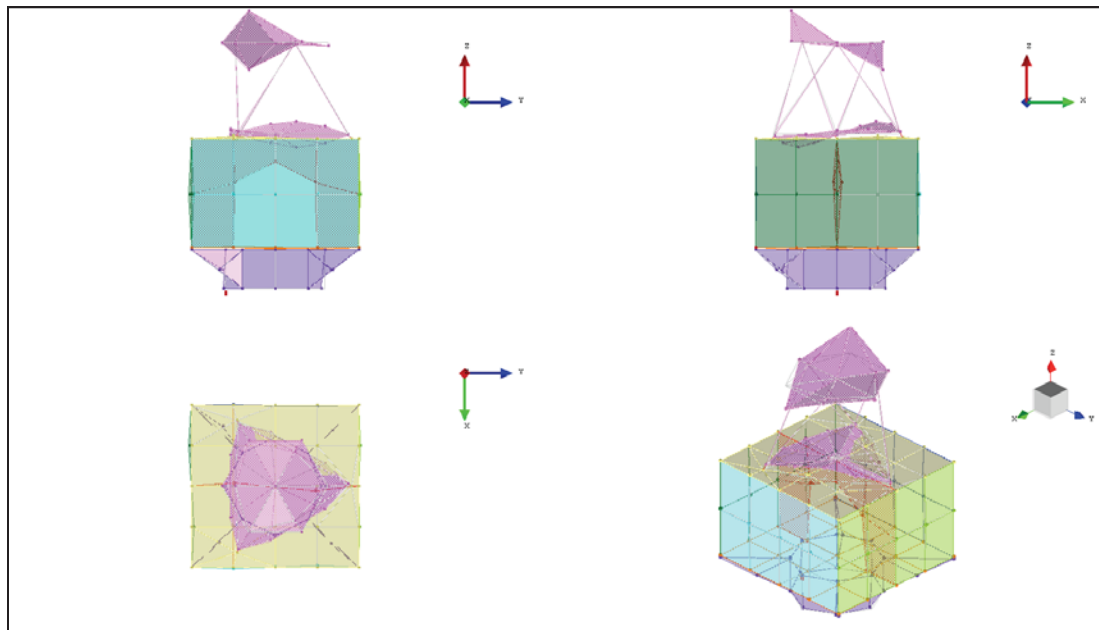


(j) 10次モード (163Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(5/16)

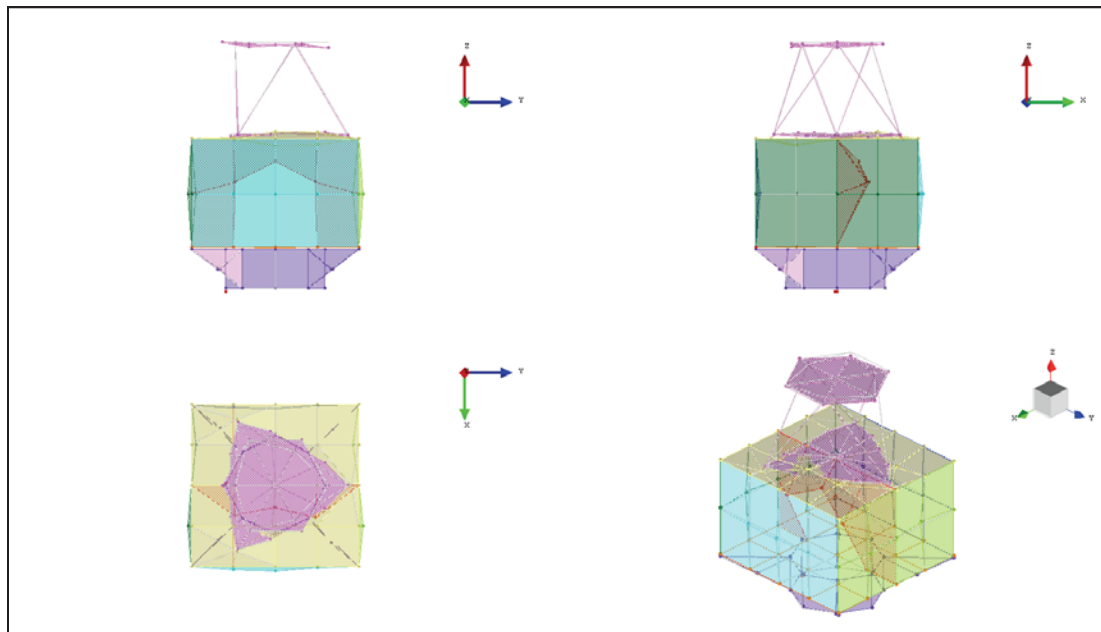


(k) 11次モード (178Hz)

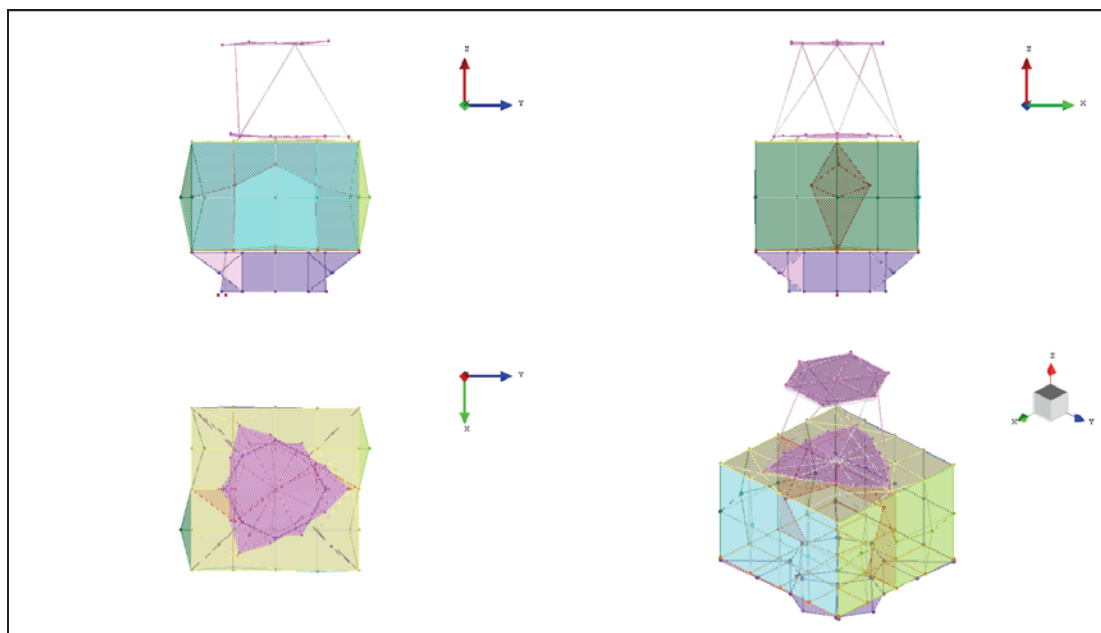


(l) 12次モード (190Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(6/16)

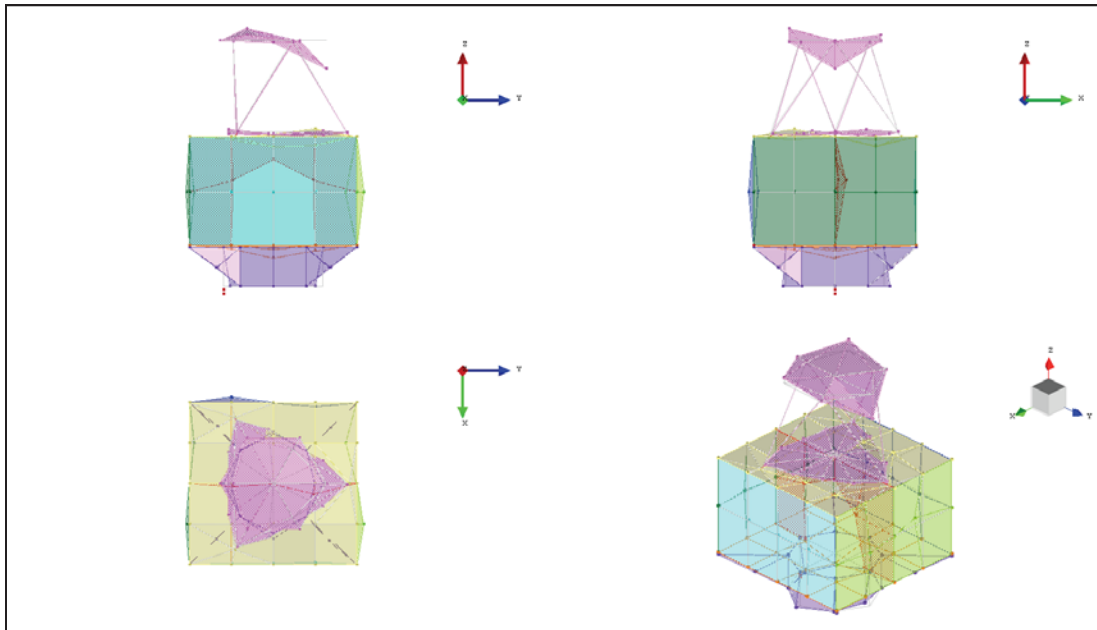


(m) 13 次モード (203Hz)

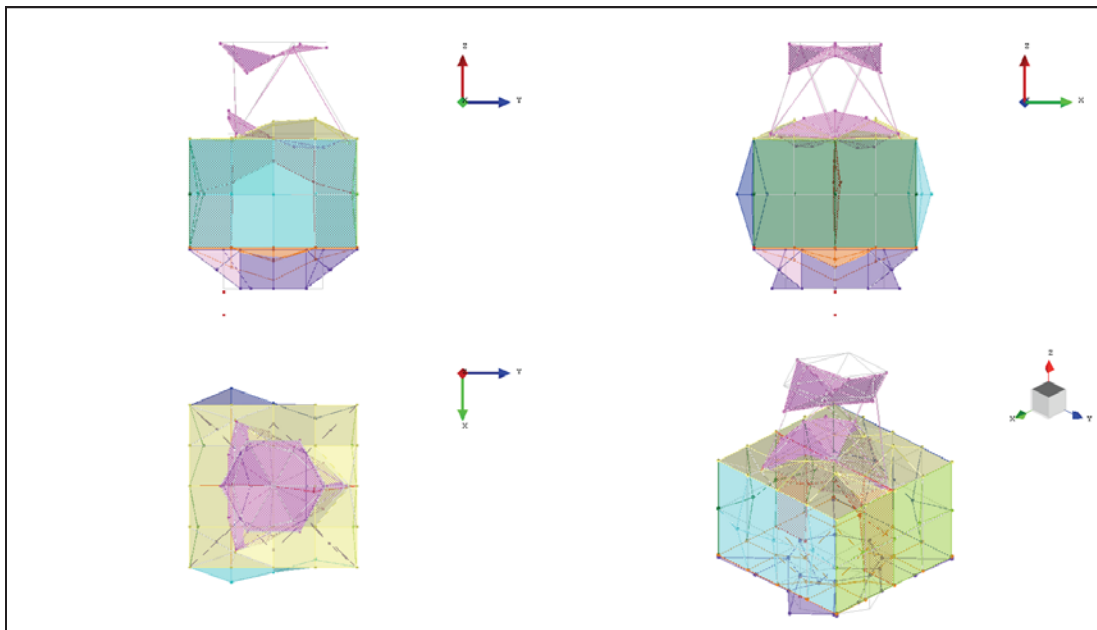


(n) 14 次モード (217Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(7/16)

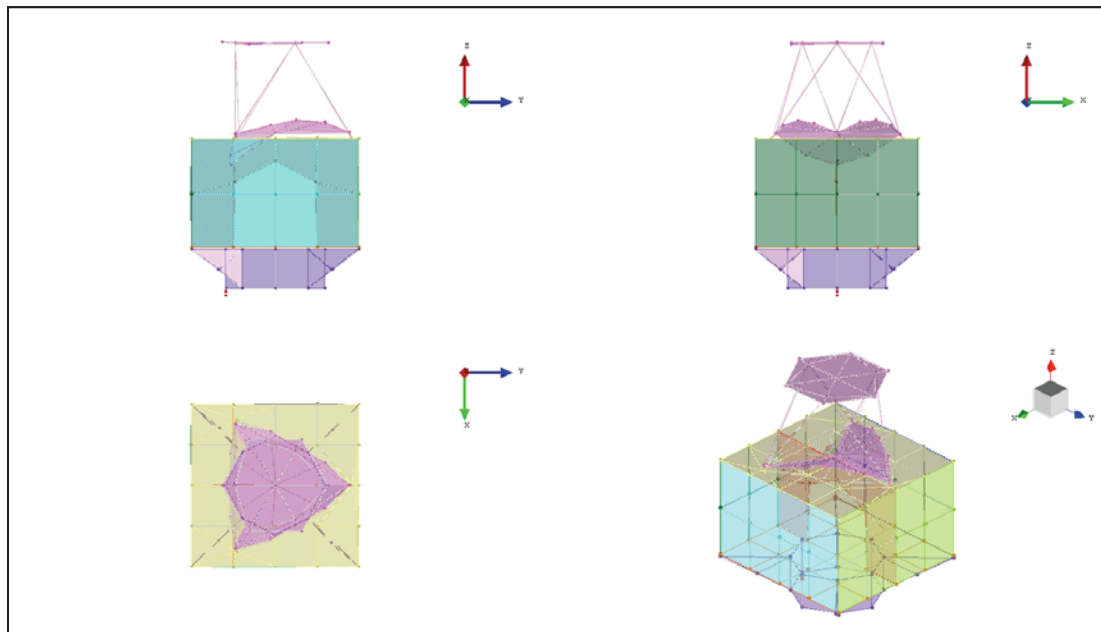


(o) 15 次モード (227Hz)

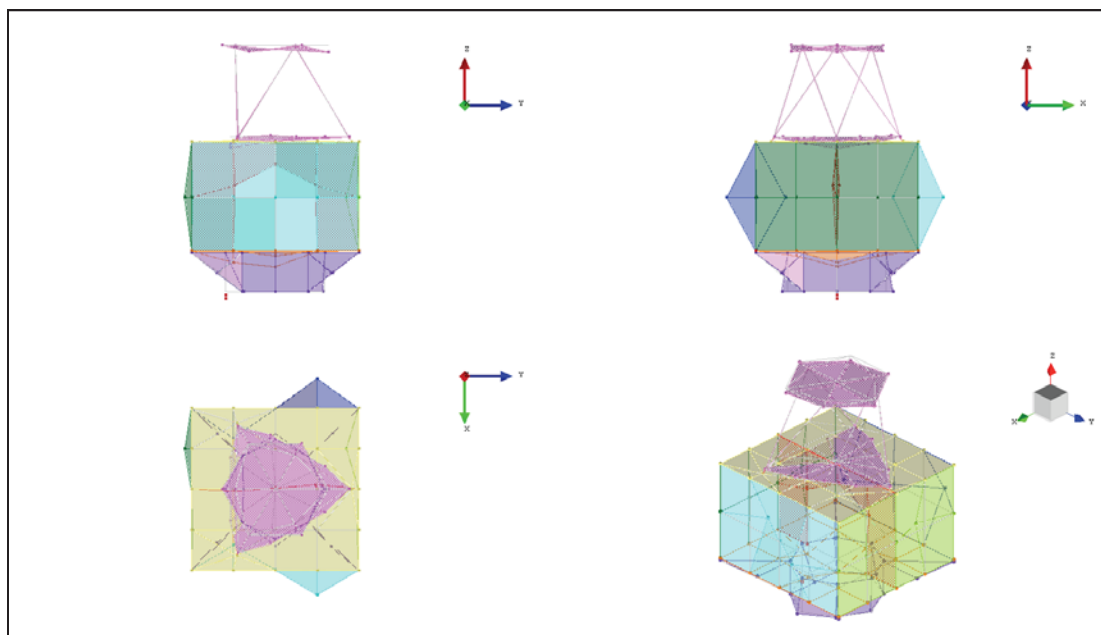


(p) 16 次モード (234Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(8/16)

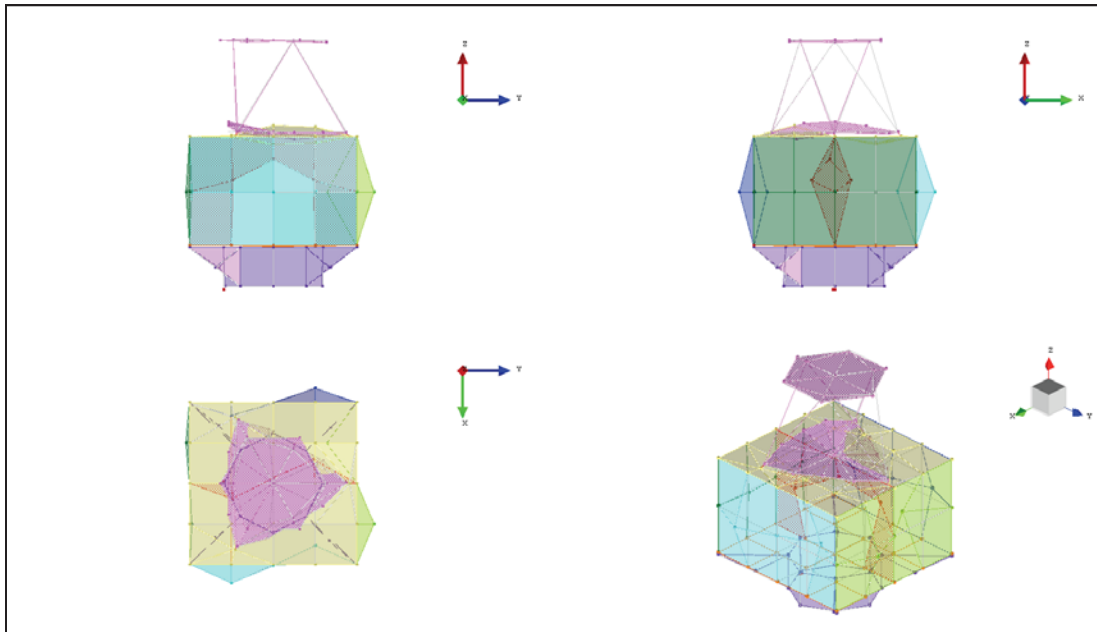


(q) 17 次モード (242Hz)

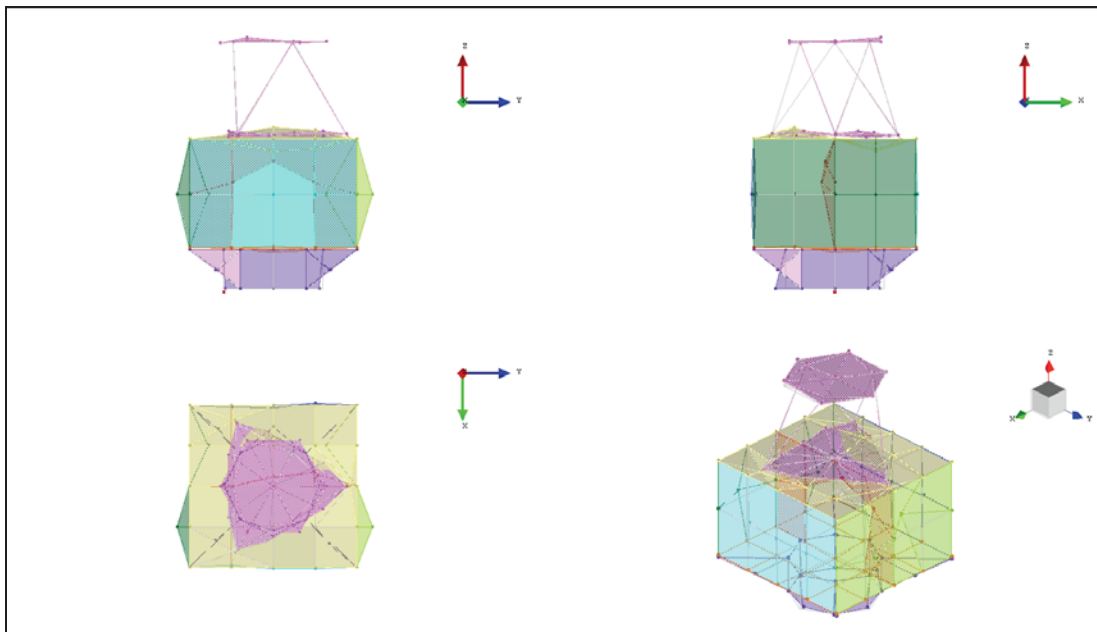


(r) 18 次モード (247Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(9/16)

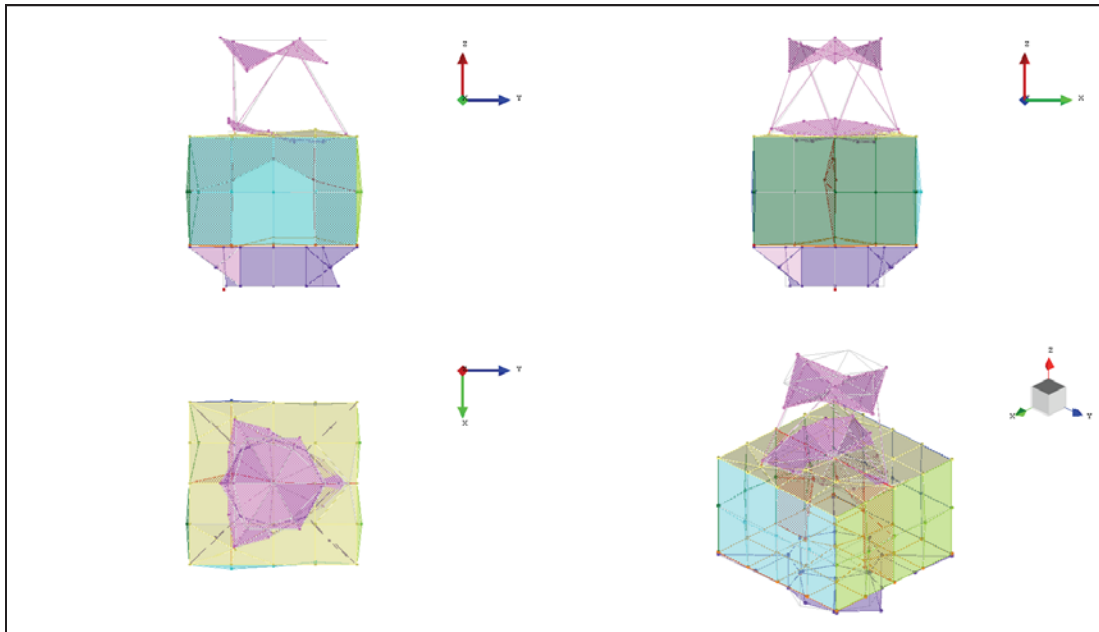


(s) 19 次モード (249Hz)

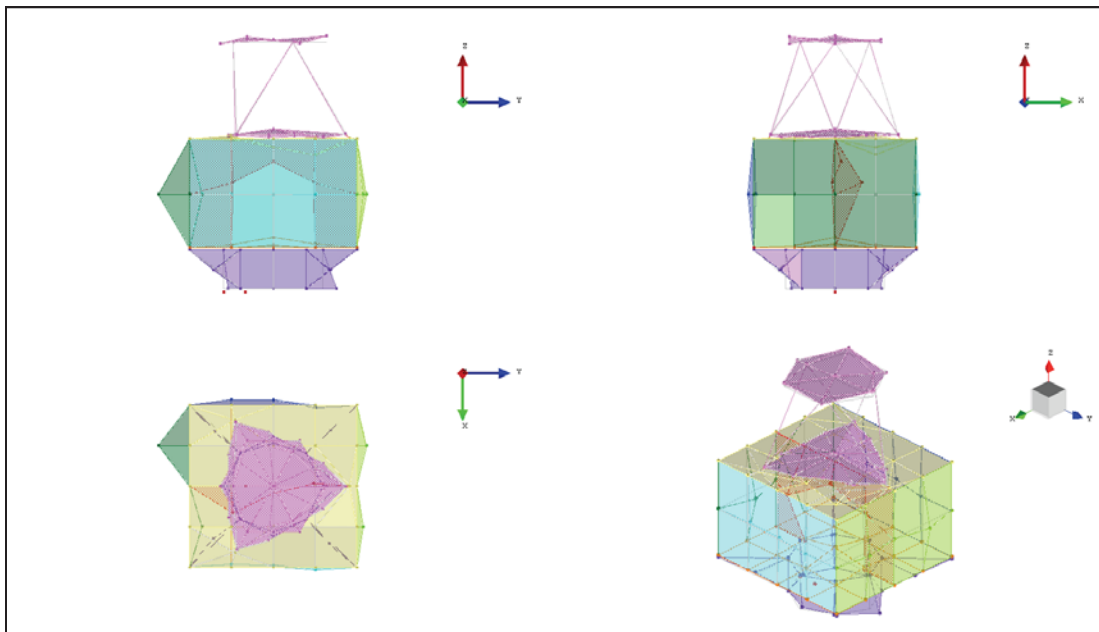


(t) 20 次モード (256Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(10/16)

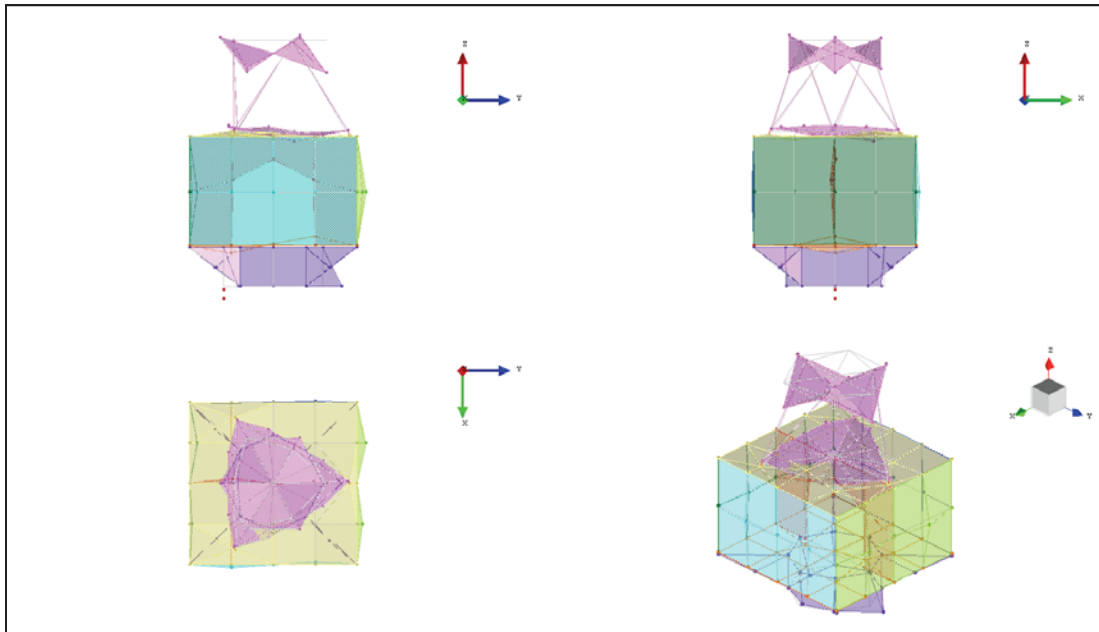


(u) 21 次モード (264Hz)

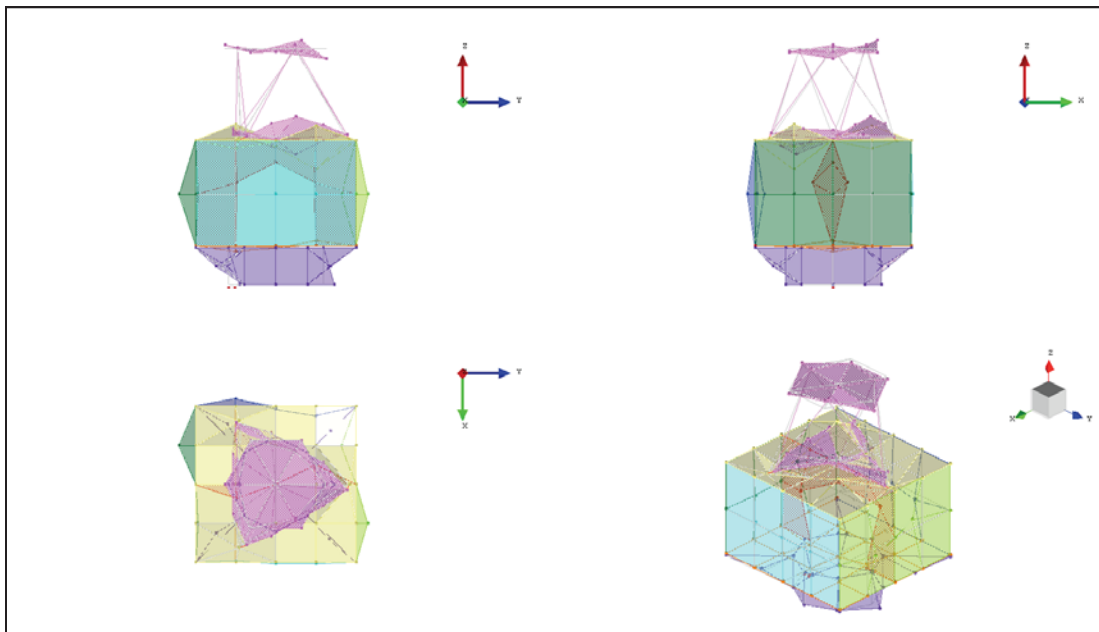


(v) 22 次モード (269Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(11/16)

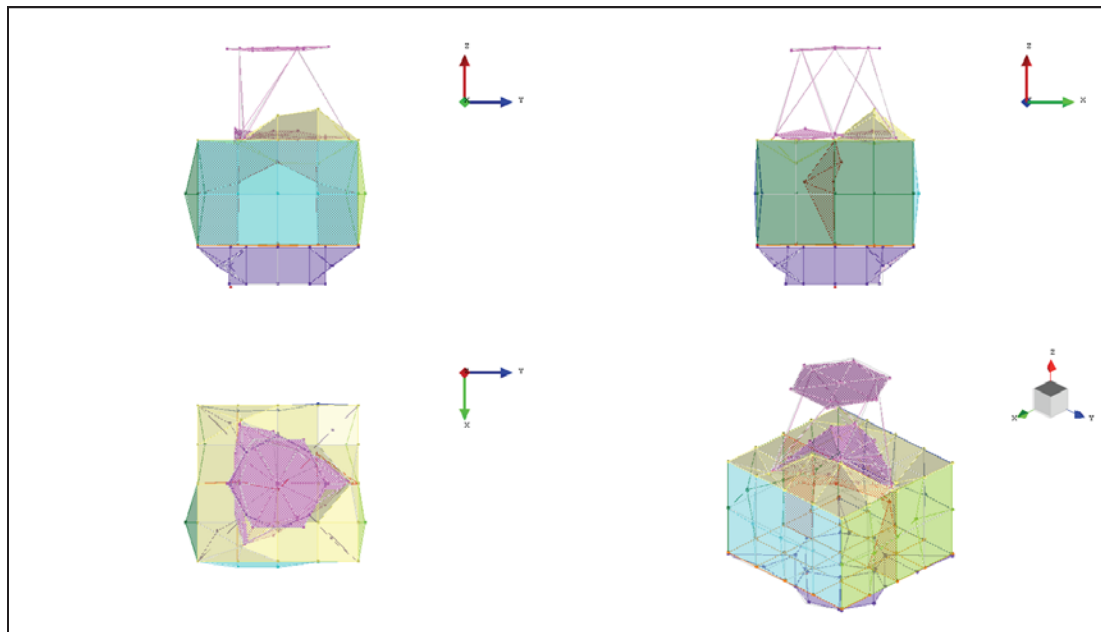


(w) 23 次モード (276Hz)

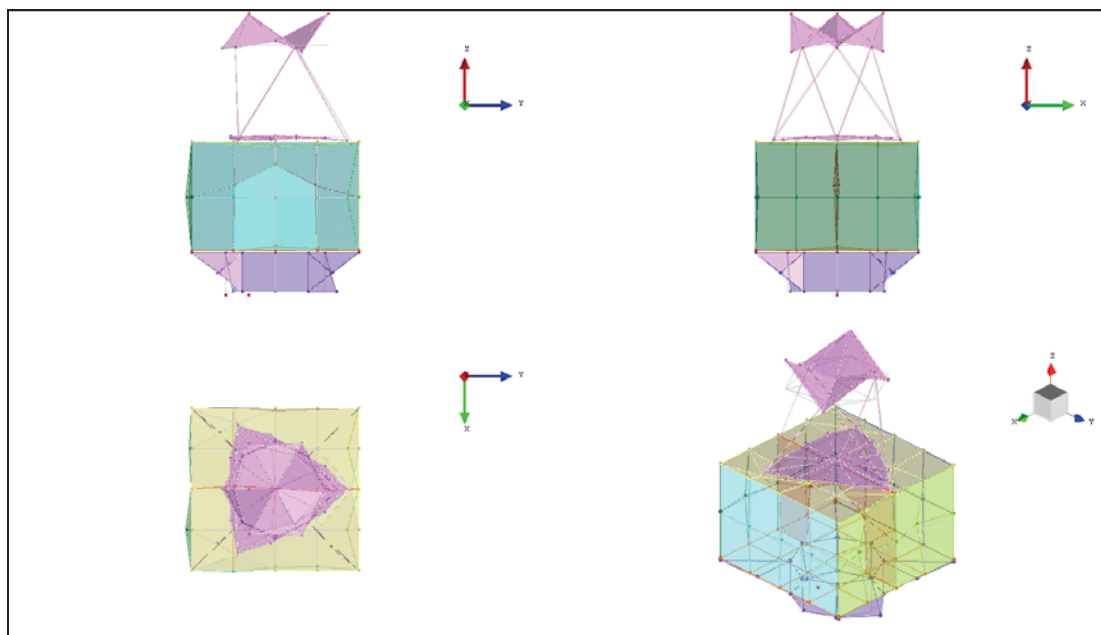


(x) 24 次モード (290Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(12/16)

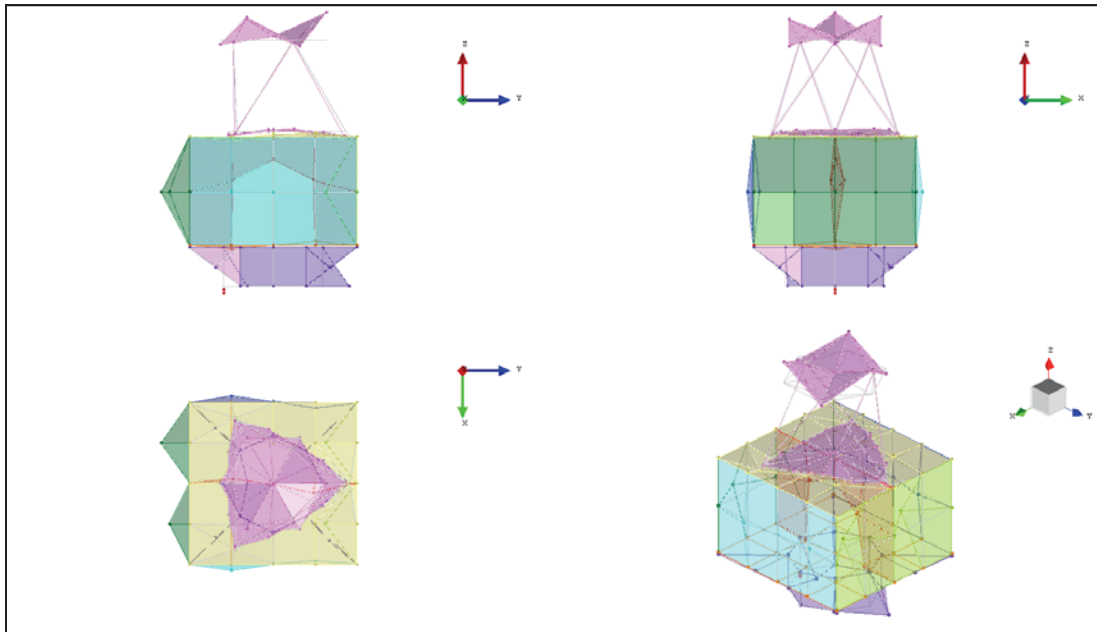


(y) 25 次モード (296Hz)

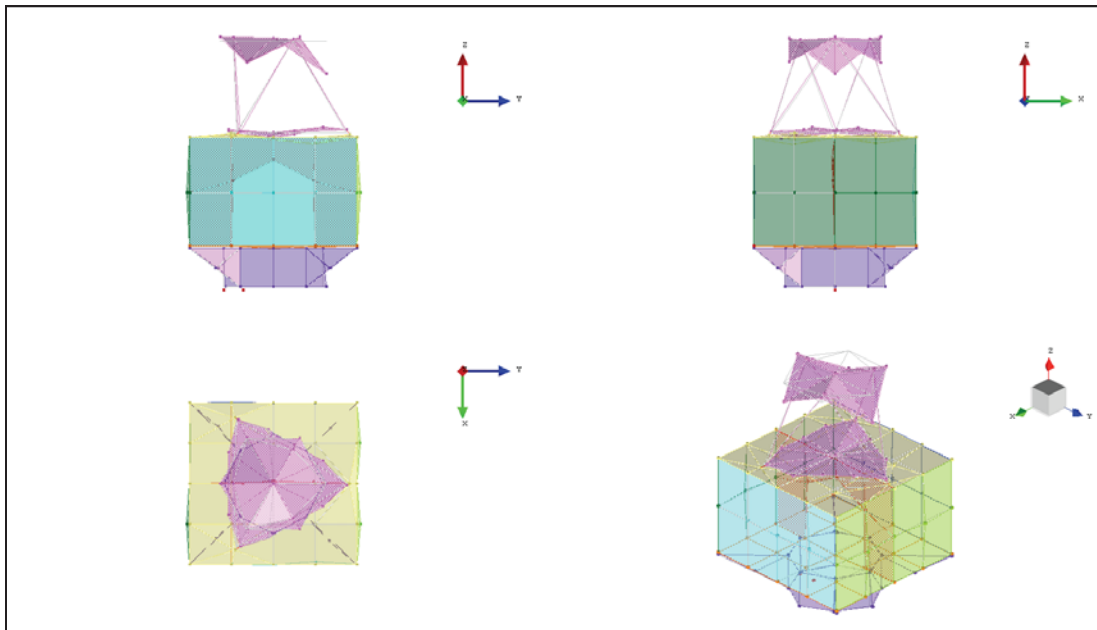


(z) 26 次モード (309Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(13/16)

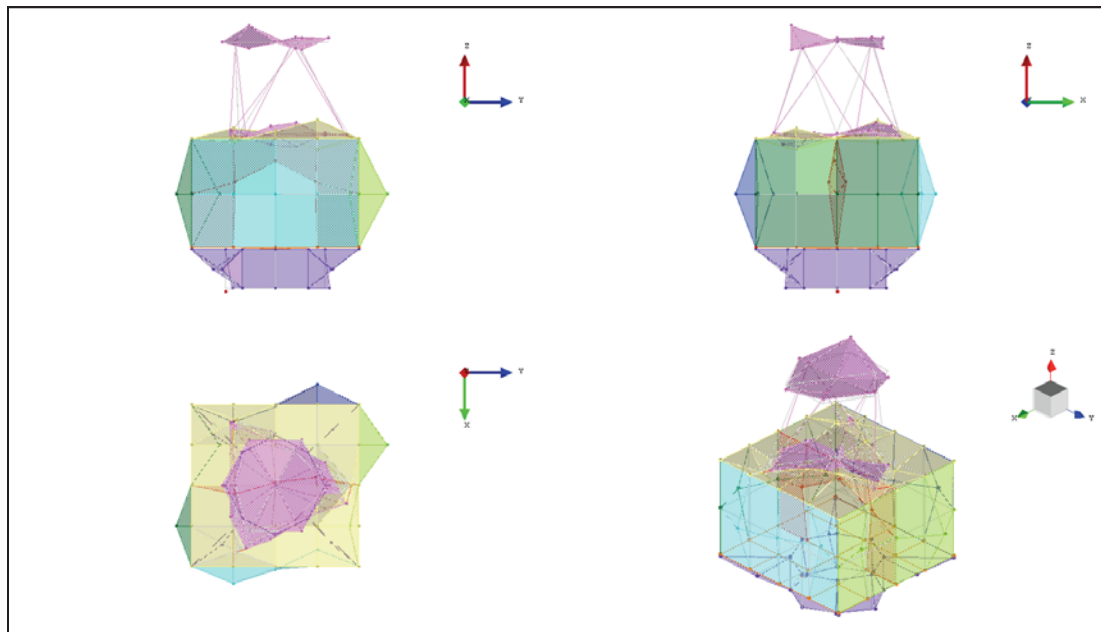


(aa) 27 次モード (315Hz)

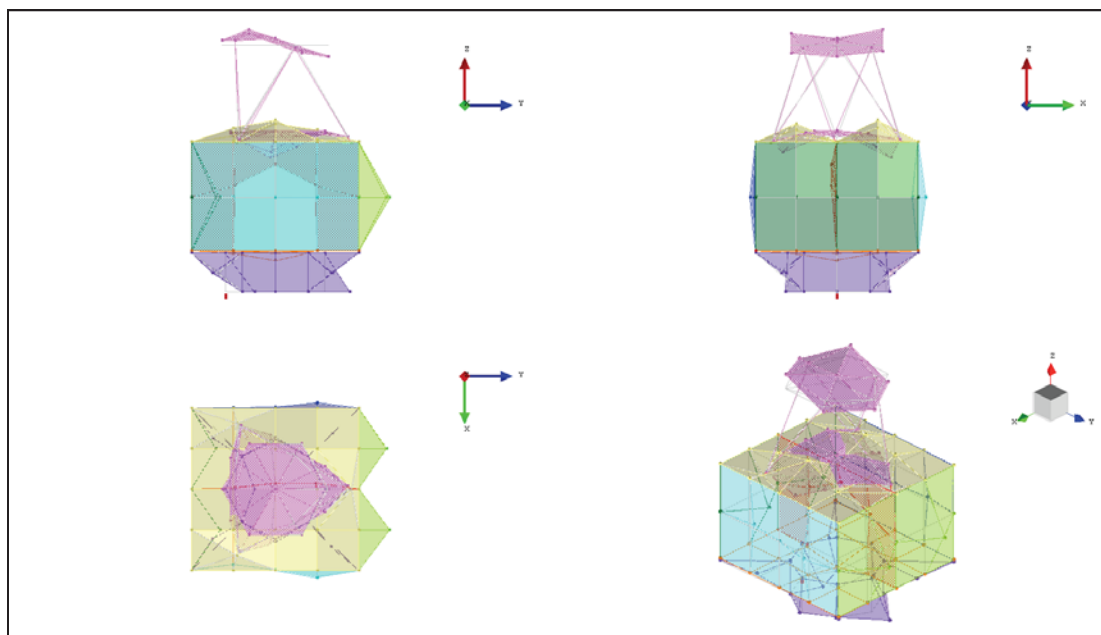


(ab) 28 次モード (325Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(14/16)

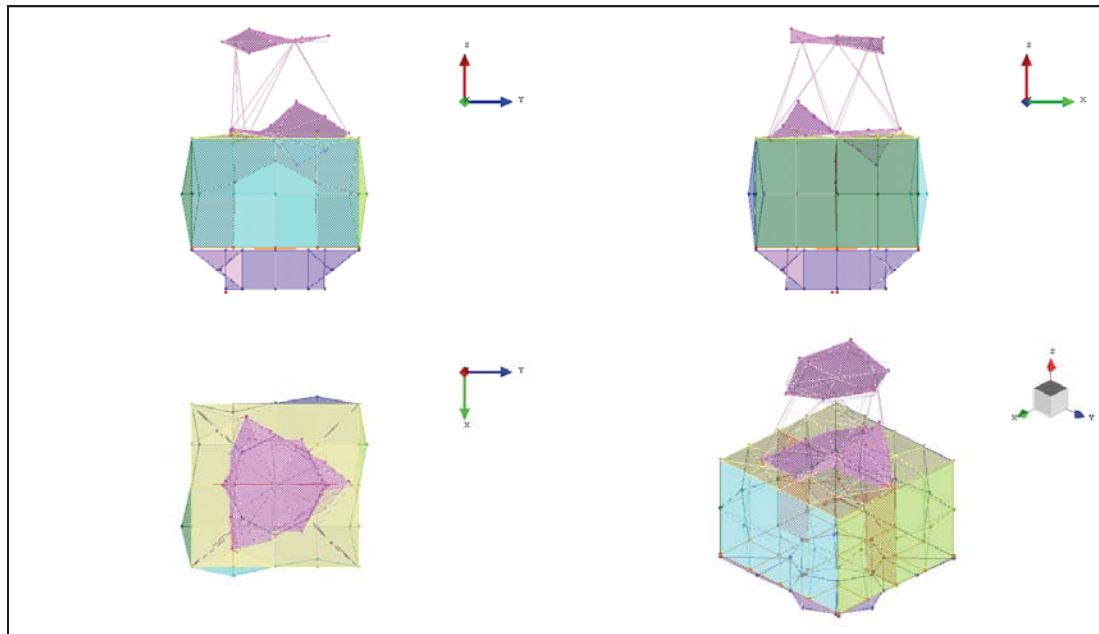


(ac) 29 次モード (329Hz)



(ad) 30 次モード (333Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(15/16)



(ae) 31 次モード (347Hz)

図 3-3 固有振動数のモード形状(16/16)

3.2 伝達特性取得試験

衛星模型を図 3-3 のように 3 つ方法で支持して伝達関数を取得し、伝達特性の比較を行った。この場合、加振点として、図 3-4 のようにバス部の中に加振ブロックと慣性型加振器を設置し、バス部の中から Z 方向を加振した。なお、3.1 節のコンフィグレーションとは異なり、ミッション部と構体を結合にはトラス部材を用いている。

図 3-5 に取得した伝達関数を示す。観測点はミッション部の鏡面模擬構造の中央 Z 方向と、バス部の上面パネル X 方向と Y 方向の合計 3 点である。境界条件の違いで基本固有振動数がある 100Hz 近傍の周波数帯で相異があることが確認できるが、高周波帯についても大きな差異が確認できる。「高周波帯は境界条件の影響を受けない」という通説が当てはまらない現象が生じていることが分かった。高周波帯の応答が変わる影響の要因として考えられることは、境界条件の影響であり、支持部の拘束の具合が影響を及ぼしていると考えられる。このような差異は実機でも十分生じ得ると考えられる。

なお、本報告書の付録 2 には使用した計測機器を掲載している。



(a) 定盤直置き (b) 宙吊りバネ支持 (c) 空気バネ支持

図 3-3 境界条件の異なる試験コンフィグレーション

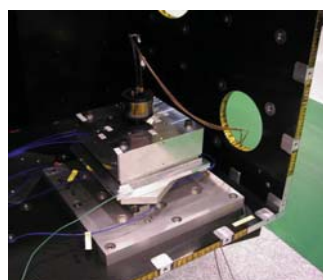


図 3-4 模型搭載の加振器

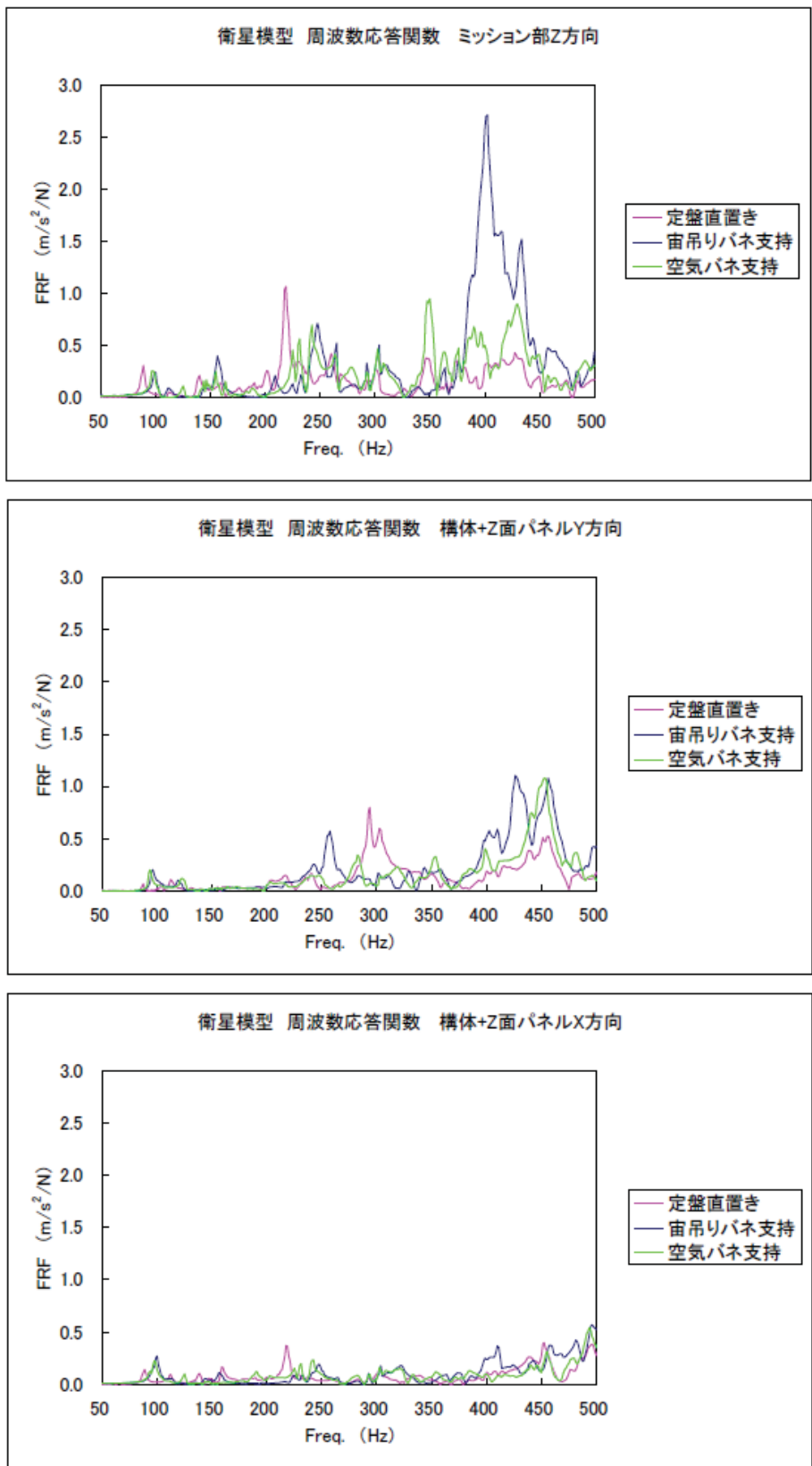


図 3-5 境界条件の違いによる伝達関数の相違

3.3 擾乱測定試験

100Hz 以下の低い周波数帯の現象も評価するために、衛星模型のミッション部を図 3-6 に示す 2 本の柔軟なビームを有する小型ミッション部に置き換えて、実際に擾乱源のホイールを搭載して擾乱応答を測定した。ここでは擾乱源が伝えるフォースの応答を測定し、評価している。

まず、ホイール単体の擾乱の大きさを測定した。回転数を 2000rpm に固定して、次の 2 つの方法で測定した。

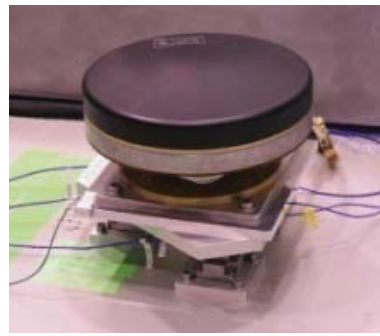
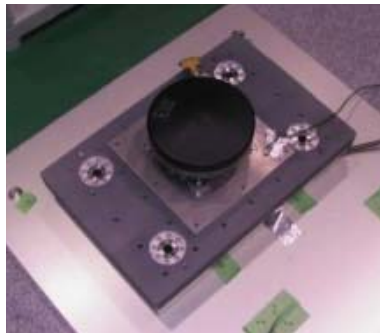
- ① キスラーテーブル使用
- ② 3 成分フォースセンサ使用

そのときの試験コンフィグレーションを図 3-7 に示す。そして、図 3-8 には測定した Z 方向のフォースを示す。300Hz 以上の高周波帯ではキスラーテーブルで測定した結果の方が 2 倍以上大きく現れていることが分かる。

次に、図 3-7(b)の 3 成分フォースセンサごとバス部に図 3-9 のように搭載して、図 3-10 のような 3 つの支持条件のもとで計測したフォースの応答を図 3-11 に示す。図 3-8(b)の単体で測定した際に比べるといずれの支持条件のときも小さくなっている。さらに、各境界条件で応答の大きさが異なることが分かる。

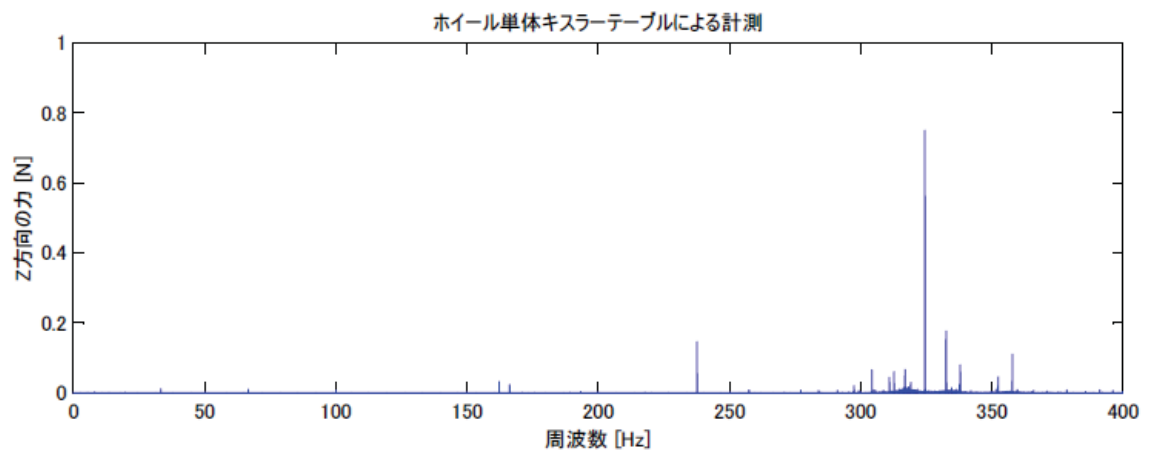


図 3-6 小型ミッション部

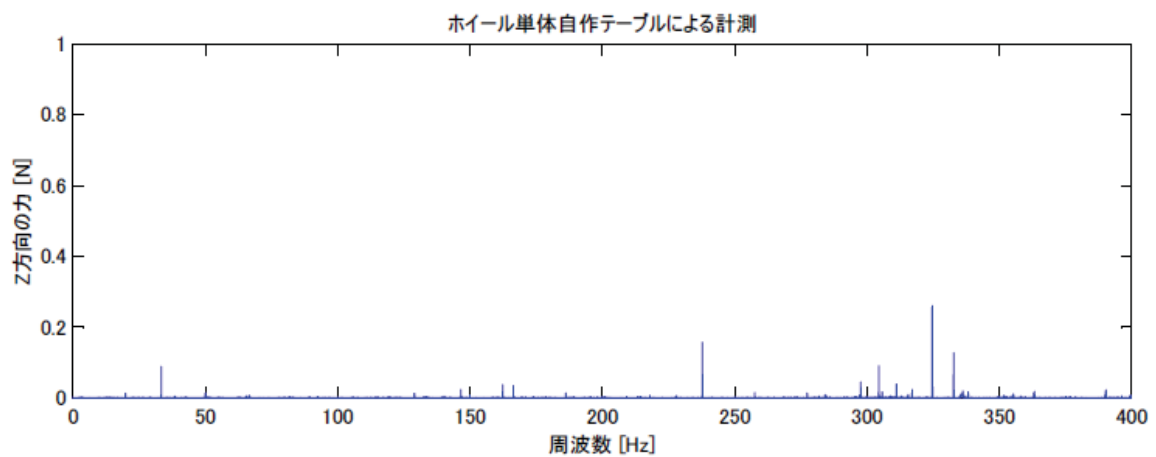


(a) キスラーテーブルによる測定 (b) 3成分フォースセンサによる測定

図 3-7 ホイール単体の擾乱測定



(a) キスラーテーブル使用



(b) フォースセンサ使用

図 3-8 ホイールの Z 方向（機軸方向）の発生フォースの比較（回転数 2000rpm のとき）

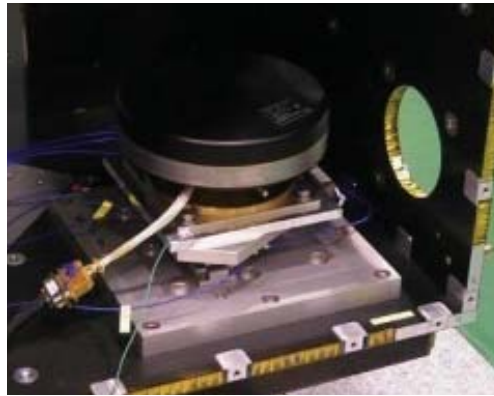
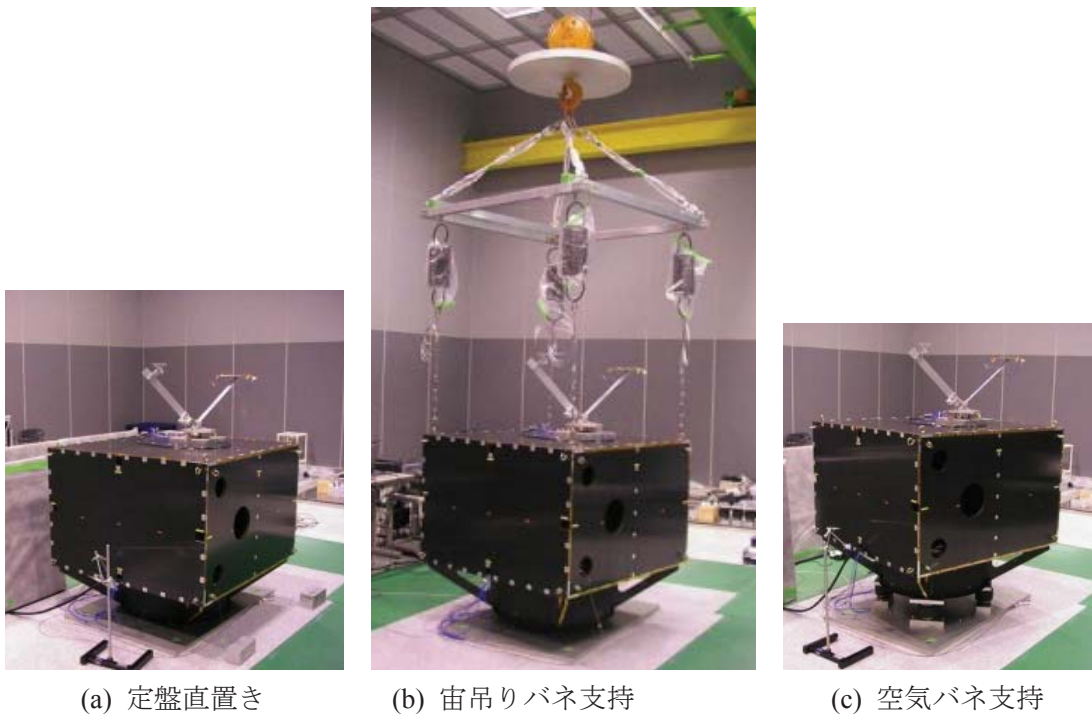


図 3-9 衛星模型内部に搭載されたホイール
(作業中のアクセラパネル開放時の様子)



(a) 定盤直置き

(b) 宙吊りバネ支持

(c) 空気バネ支持

図 3-10 境界条件の異なる試験コンフィグレーション

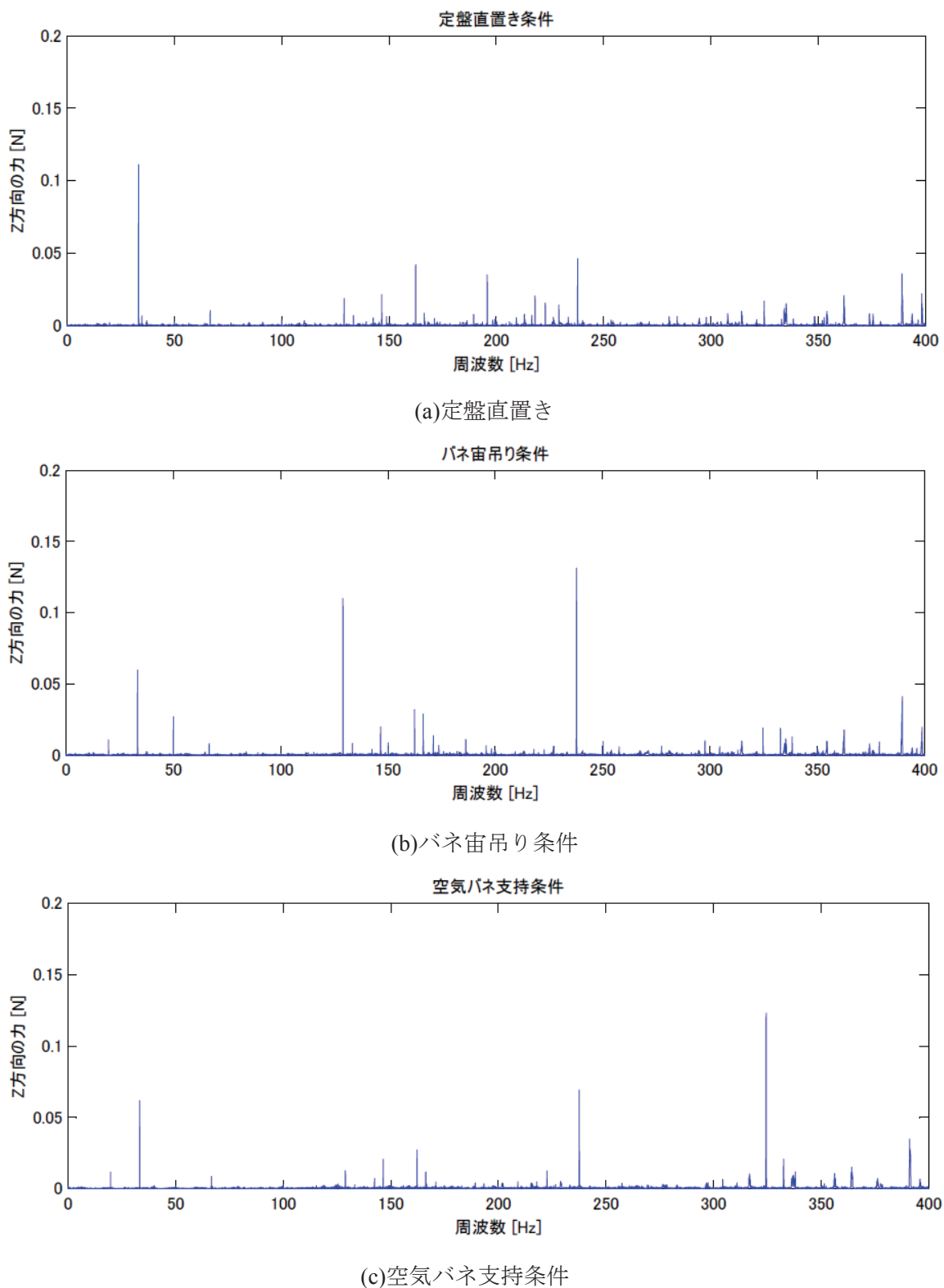


図 3-11 ホイールの Z 方向（機軸方向）の発生フォースの比較（回転数 2000rpm のとき）

4. 有限要素モデル

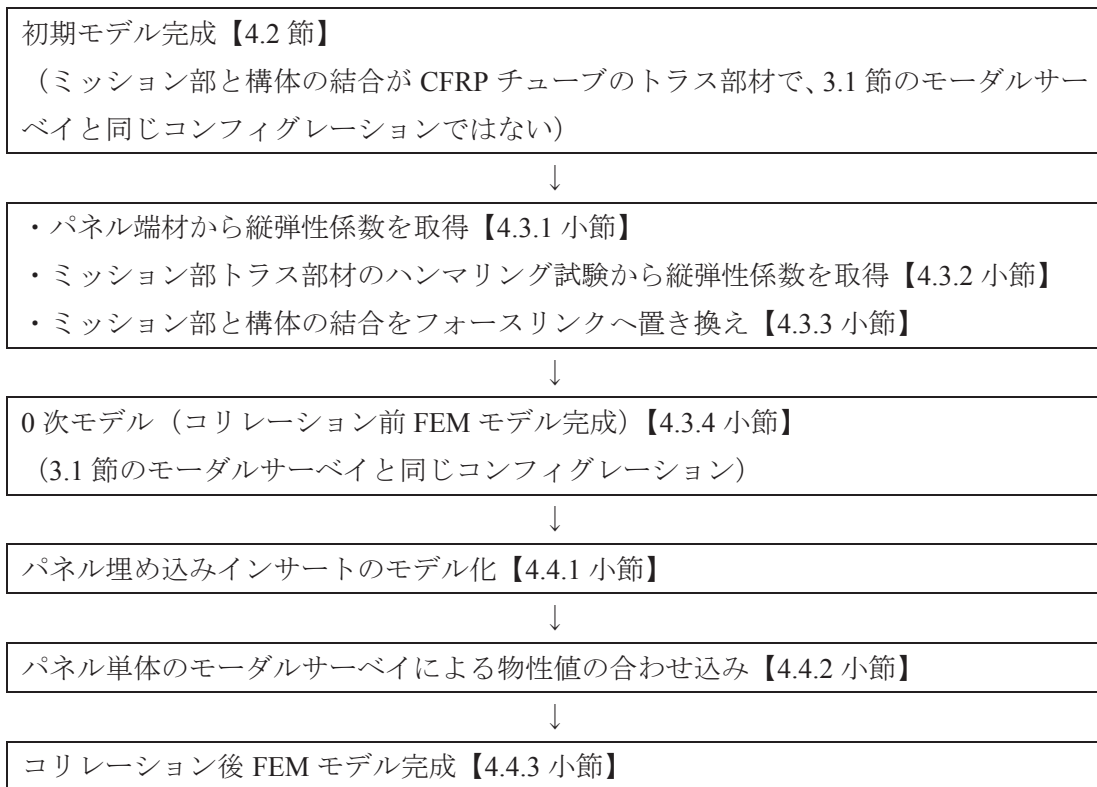
4.1 作成方針

3.1 節で述べたモーダルサーベイを行ったコンフィグレーションの衛星模型について、有限要素(FEM)モデルを作成する。この FEM モデルを作るにあたって、まずは 3.2 節のコンフィグレーションを初期モデルとして作成した。この初期モデルは表 4-1 のフローを経て、最終的にはモーダルサーベイのコンフィグレーションの衛星模型の FEM モデルが作成される。

FEM モデルは、以下の作成方針に基づいて作成した。

- FEM モデルの寸法（長さ、厚さ、締結点の位置など）と質量は、衛星模型の実測値、もしくは、3 次元 CAD モデルから求めた計算値を用いて、実際の寸法・質量を忠実に再現する。
- 実際の衛星プロジェクトにおいて作成されている FEM モデルと同等のモデルを作成する。実際の衛星プロジェクトにおいても適用可能なように、できる限り簡易なモデルとなるように努め、過度に大規模で複雑なモデルとしないようにする。
- モーダルサーベイにおける衛星模型のコンフィギュレーションと最終的には同一とする。

表 4-1 FEM モデル作成のフロー



4.2 初期モデルの作成と固有値解析結果

図 4-1 に作成した初期モデルを示す。初期モデルの概要を以下のようなものである。

ノード数 : 23,811
要素数 : 22,922
使用した要素 : 表 4-1 に示す。
モデル質量 : 62.5kg

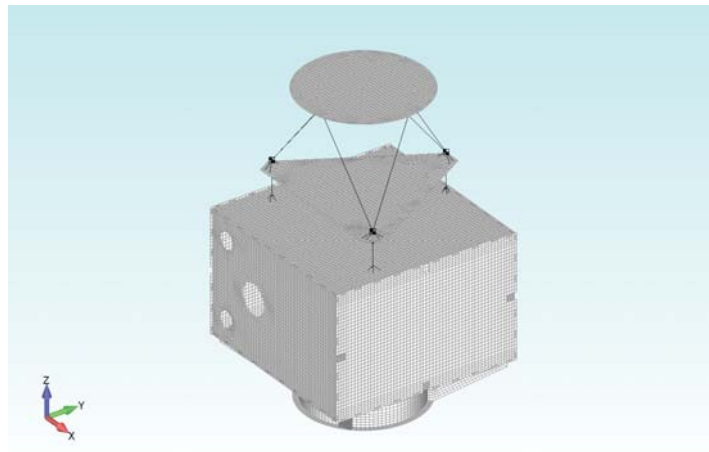
- ・ 構体パネルやミッションパネルなどのサンドイッチ板に埋め込まれているインサートの質量は、非構造質量としてパネル全体に付加した。
- ・ ミッション部トラスや構体結合フィッティングの両端に接着されている金属フィッティングの質量は、非構造質量としてそのビーム全体に付加した。
- ・ バス部の構体パネルの結合に用いているボルトの質量は、非構造質量としてパネル全体に付加した。
- ・ ミッション部トラスの結合に用いているボルトの質量は、ミッション部トラスフィッティングの質量と合わせて、質量要素とした。

使用した物性 : 表 4-2 に示す。

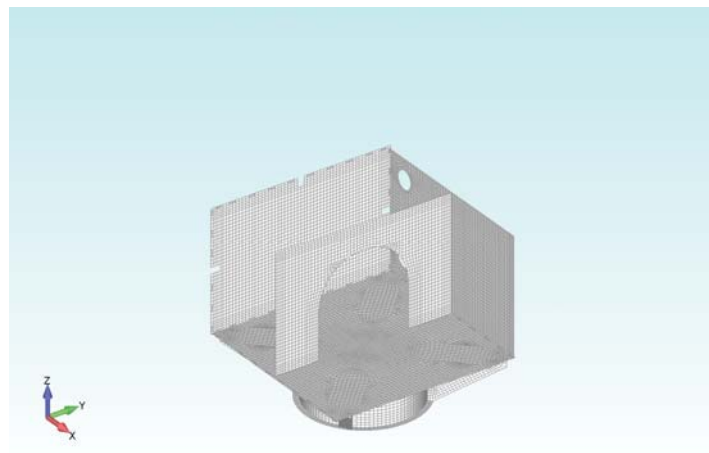
- ・ サンドイッチ板のスキンやアダプターリングやミッション部トラスに用いられている CFRP (T300/エポキシ、クロス材) の物性は、CF 繊維、樹脂の物性のカタログ値より擬似等方として計算して求めた。
- ・ 構体パネルやミッションパネルなどのサンドイッチ板の密度は、埋め込まれているインサートの質量やそのパネルに用いられている結合ボルトの質量も合わせてパネル全体に均一に負荷されるように、面積密度 (非構造質量/面積) で与えた。
- ・ サンドイッチ板は、その剛性を模擬したプレート要素でモデル化した。

まずは、この初期モデルを用いて固有値解析を行った。境界条件は自由条件とし、固有振動数は 300Hz まで求めた。その固有値解析結果を表 4-3 に示し、固有振動モード形状を図 4-2 に示す。

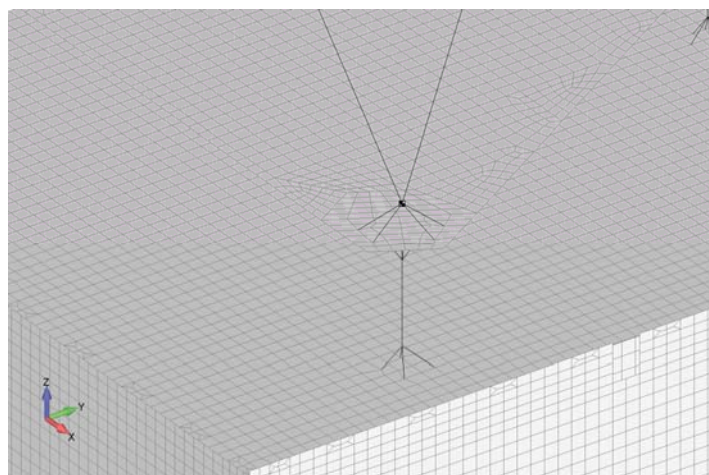
3.1 節のモーダルサーベイのコンフィグレーションと初期モデルは、ミッション部と構体の結合の仕方が異なっているので直接比較はできる訳ではないが、初期モデルはモーダルサーベイの結果と比較して全体的に固有振動数が低く、モード形状も大きく異なっている。



(a) 全体



(b) 構体内部



(c) 構体結合フィッティング

図 4-1 初期モデル

表 4-2 初期モデルに使用した要素と物性 (1/4)

部品名称	使用した要素	備考
ミッション部パネル 構体パネル アウトリガー	プレート要素	サンドイッチ板の中立面位置でモデル化 サンドイッチ板としての質量、剛性を考慮した物性を使用
アダプターリング	プレート要素	
タンク模擬構造	N/A	モーダルサーベイにおいて搭載していなかったため、モデル化は未実施
ミッション部トラス 構体結合フィッティング	ビーム要素	
ミッション部トラス フィッティング	質量要素	3次元CADより求めた正確な重心位置に配置
ボルト結合	剛体要素	接続するノードは、3次元CADより求めた正確な位置に配置

表 4-2 初期モデルに使用した要素と物性(2/4)

鏡面模擬パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	3.273
ミッションパネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	31.5
		曲げ剛性 ^{※1}	1261
		面積密度(kg/m ²)	8.423
上面パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	5.259
インナーパネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	6.024

表 4-2 初期モデルに使用した要素と物性(3/4)

アクセスパネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	5.371
側面パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	5.448
下面パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	6.173
アウトリガー： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性 (スキン)： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	2.655
アダプターリング： (CFRP 積層板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	要素物性： (プレート)	厚さ t(mm)	5
		面積密度(kg/m ²)	5.371

表 4-2 初期モデルに使用した要素と物性(4/4)

ミッション部トラス： (CFRP チューブ)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	要素物性： (ビーム)	断面積 A(mm ²)	134.3
		断面 2 次モーメント I1(mm ⁴)	13674
		断面 2 次モーメント I2(mm ⁴)	13674
		ねじり定数 J(mm ³ /rad)	27342
		線密度(kg/m)	0.3021
構体結合フィッティング： (CFRP チューブ) ※2	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	要素物性： (ビーム)	断面積 A(mm ²)	181.4
		断面 2 次モーメント I1(mm ⁴)	33666
		断面 2 次モーメント I2(mm ⁴)	33666
		ねじり定数 J(mm ³ /rad)	67318
		線密度(kg/m)	12.53
トラスフィッティング (Al 削り出し)	要素物性： (質量)	質量(kg) (上側)	0.5547
		質量(kg) (下側)	0.4079

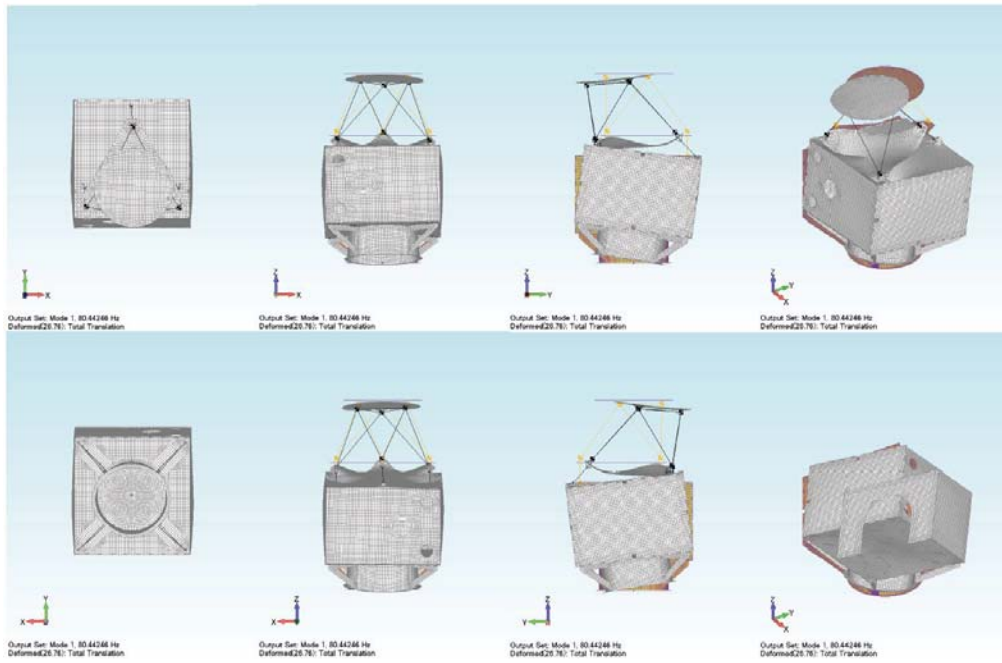
※1 曲げ剛性は、サンドイッチ板の剛性をプレート要素で模擬するための仮想的な剛性であり、以下の式で算出される。

$$\frac{H^3 - (H-t)^3}{t^3}$$

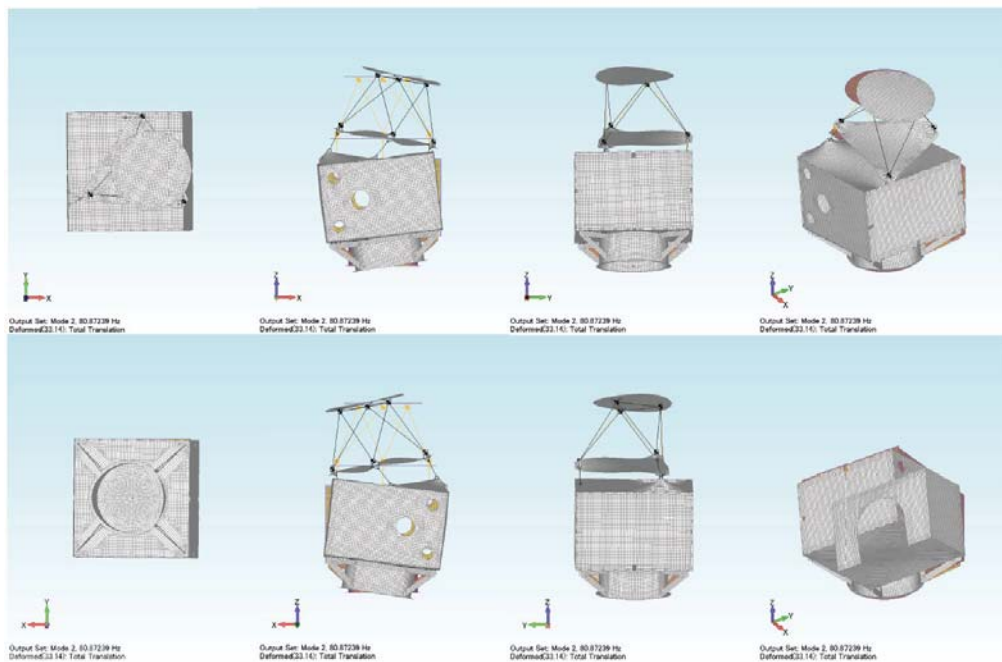
※2 3.1 節のモーダルサーベイ時にはフォースリンクとなる。

表 4-3 初期モデルの固有値解析結果

モード次数	固有振動数 (解析) [Hz]	※参考 固有振動数 (モーダルサーベイ) [Hz]
1	80	102
2	81	114
3	92	121
4	94	135
5	98	143
6	120	143
7	125	156
8	133	159
9	135	151
10	161	163
11	166	178
12	174	190
13	182	203
14	185	217
15	186	227
16	197	234
17	204	242
18	206	247
19	212	249
20	215	256
21	219	264
22	229	269
23	233	276
24	236	290
25	239	296
26	248	309
27	251	315
28	294	325
29	297	329
30	-	333
31	-	347

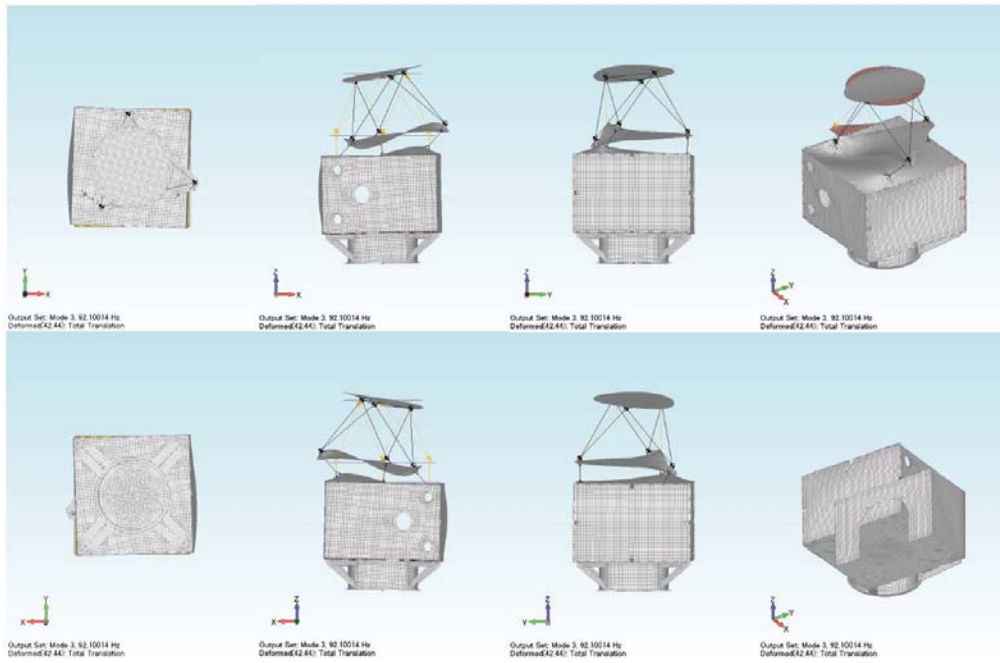


(a) 1次モード (80Hz)

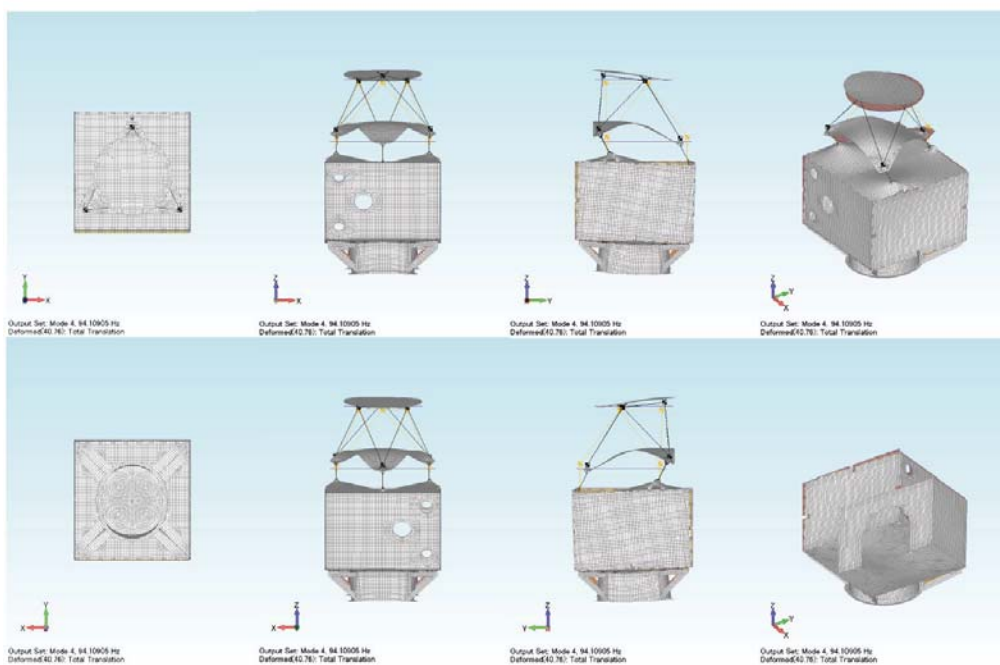


(b) 2次モード (81Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(1/15)

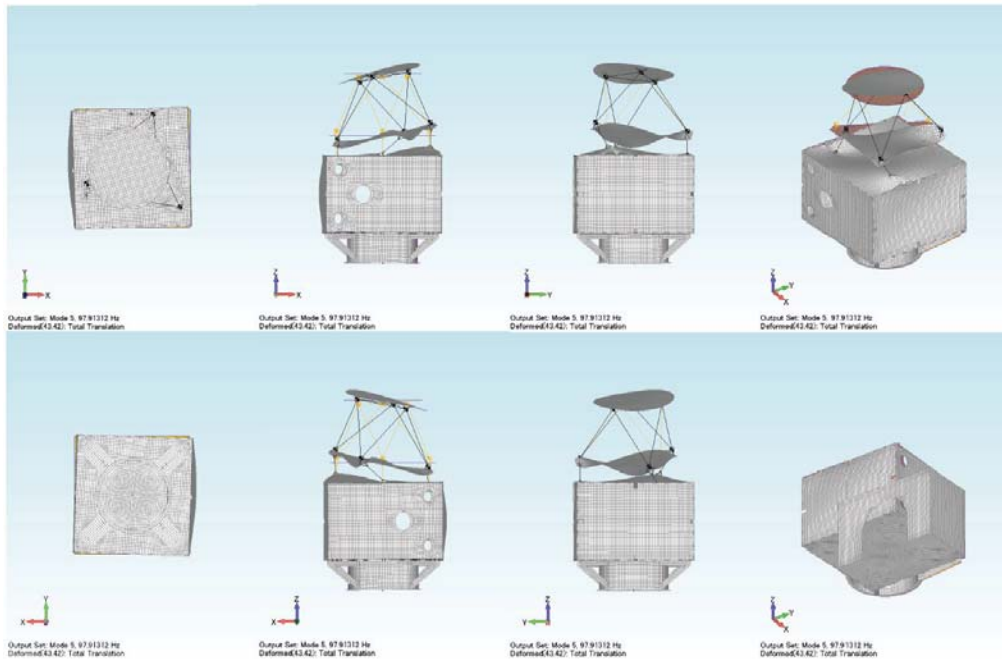


(c) 3次モード (92Hz)

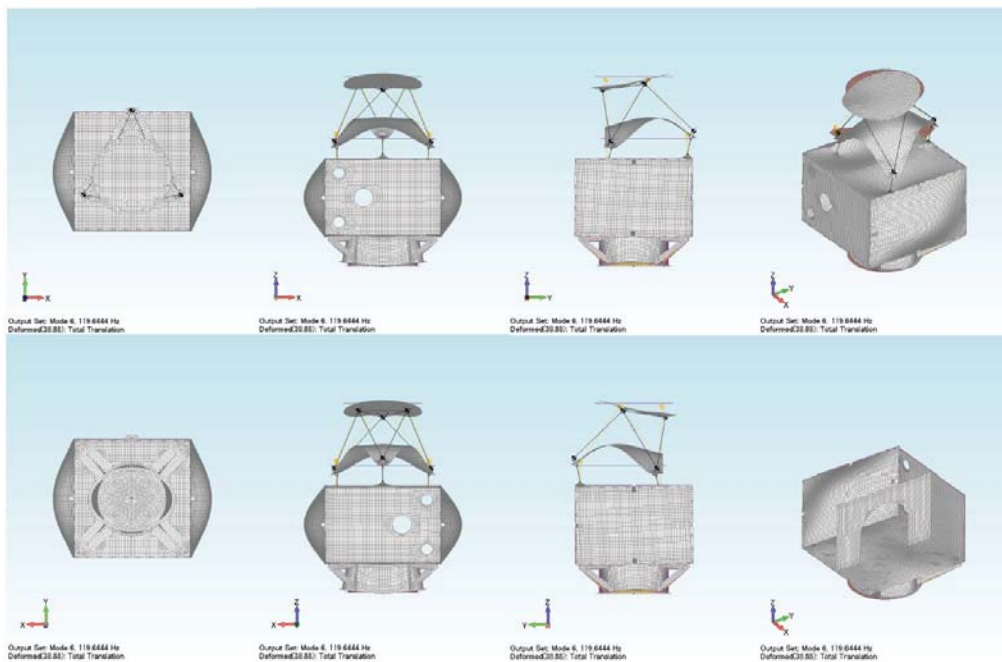


(d) 4次モード (94Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(2/15)

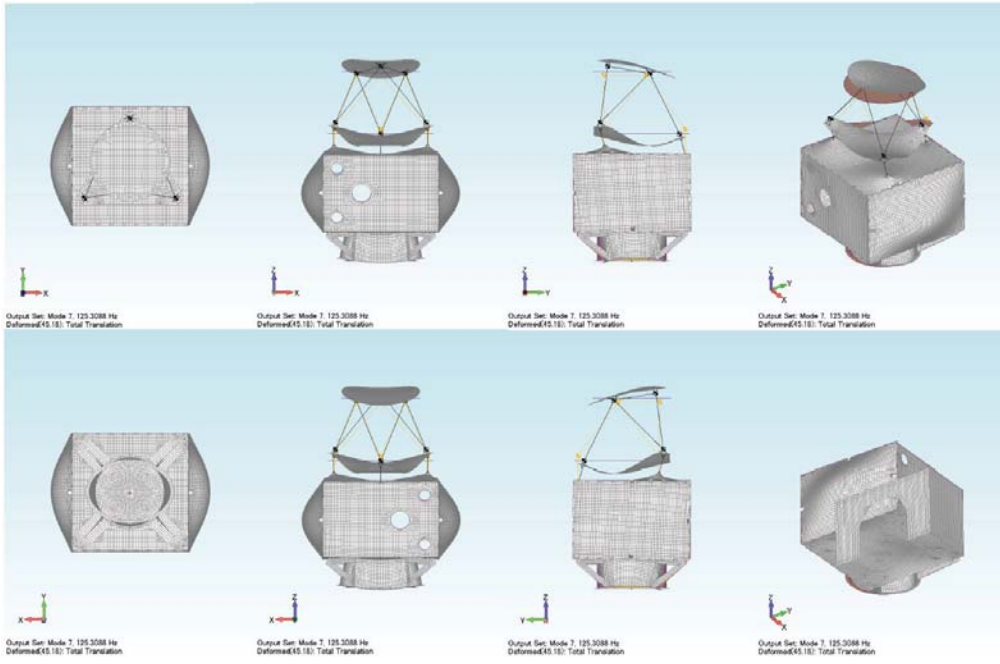


(e) 5次モード (98Hz)

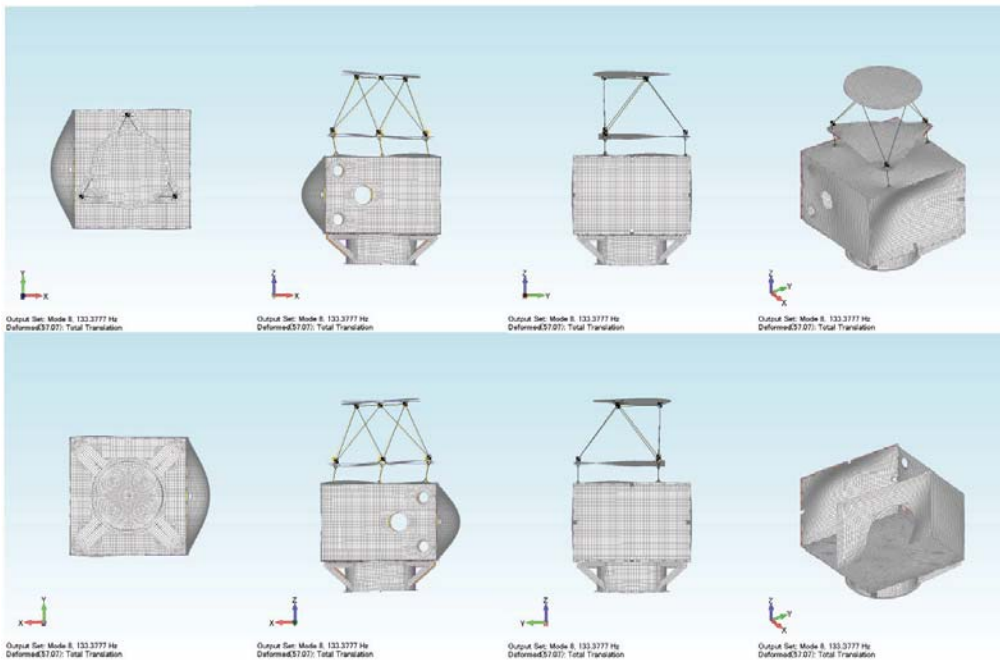


(f) 6次モード (120Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(3/15)

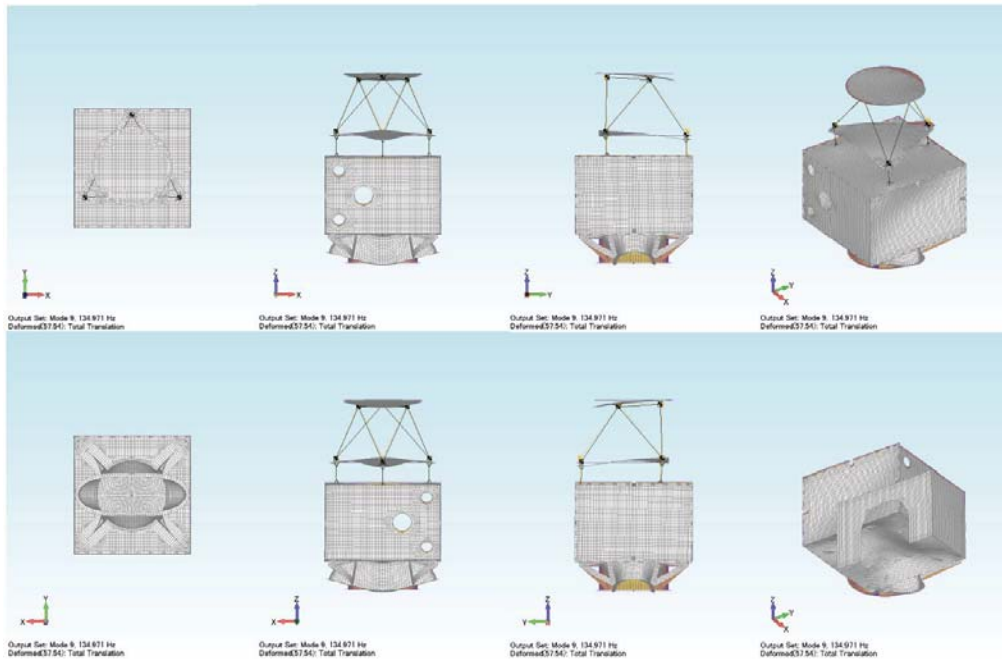


(g) 7次モード (125Hz)

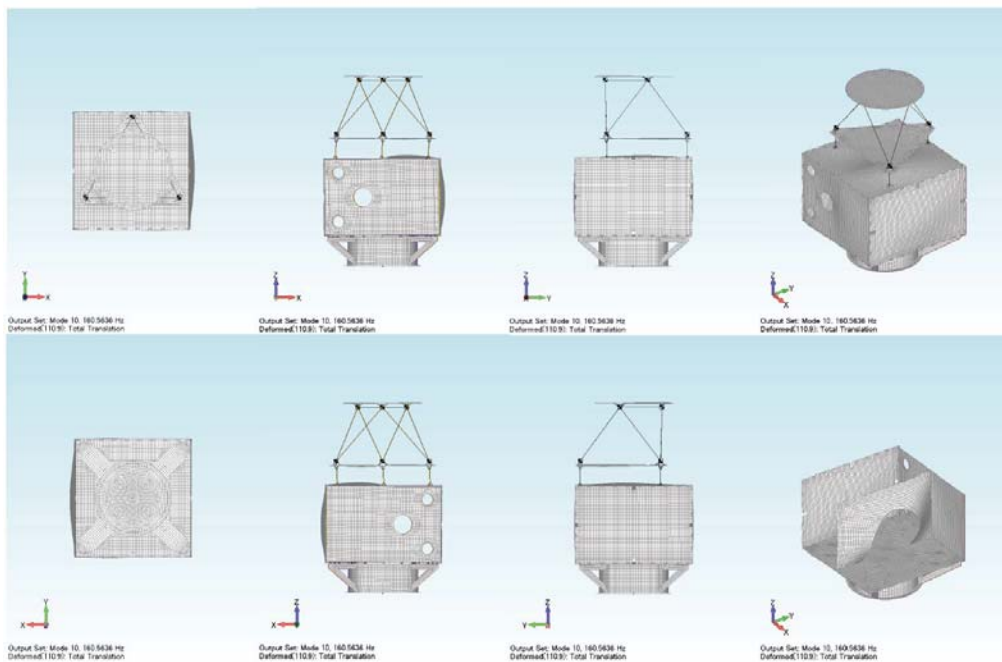


(h) 8次モード (133Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(4/15)

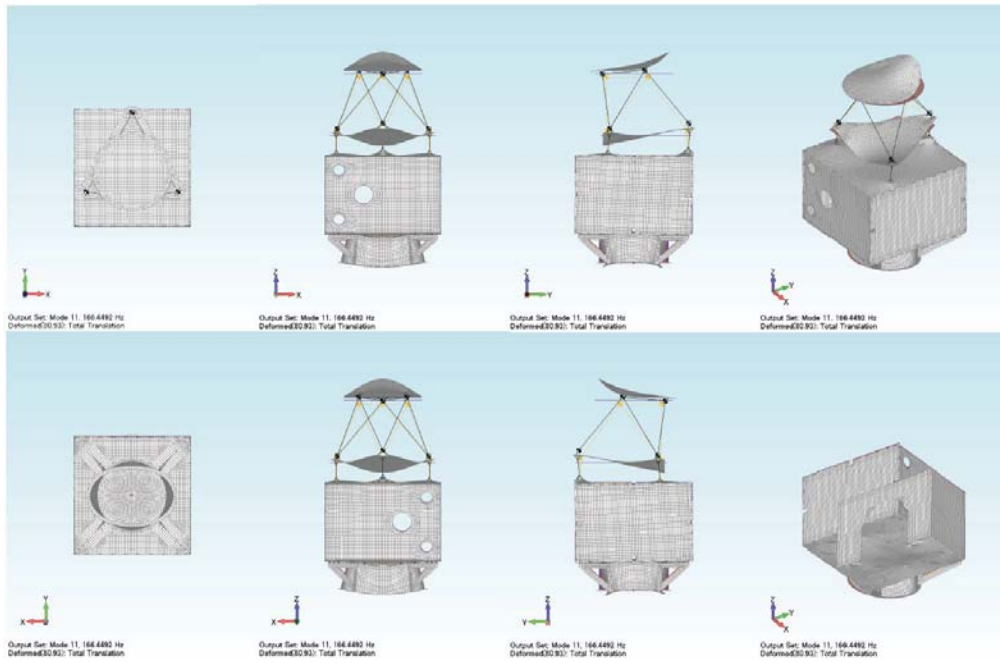


(i) 9次モード (135Hz)

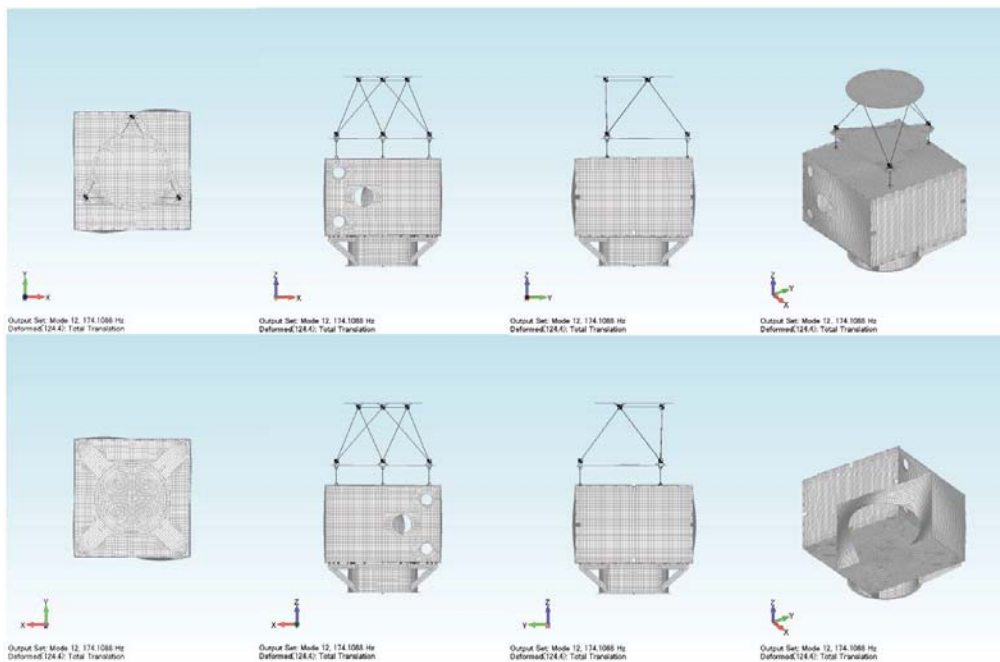


(j) 10次モード (161Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(5/15)

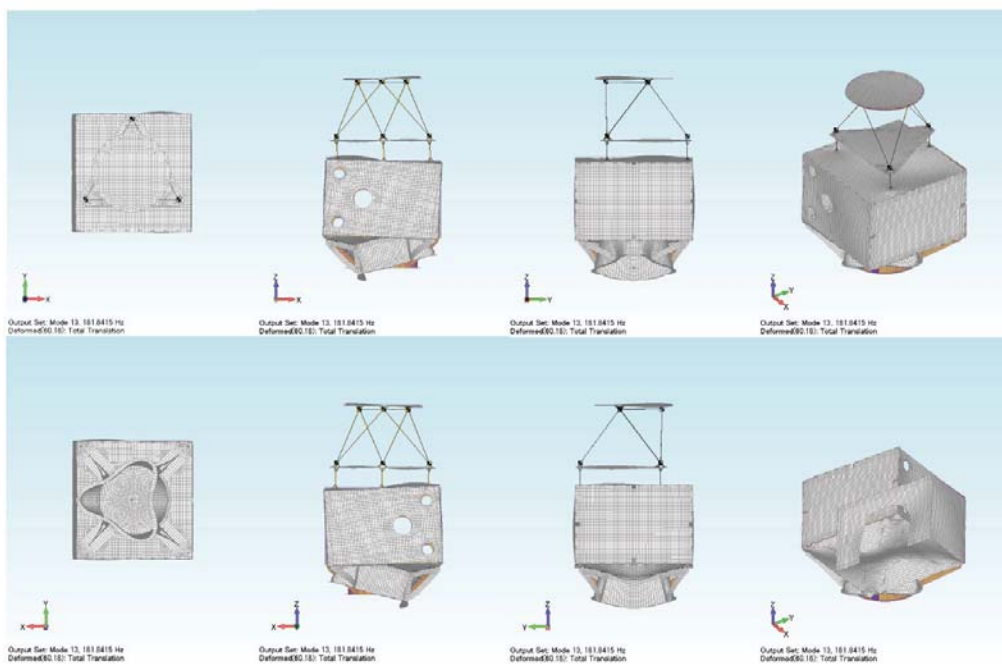


(k) 11次モード (166Hz)

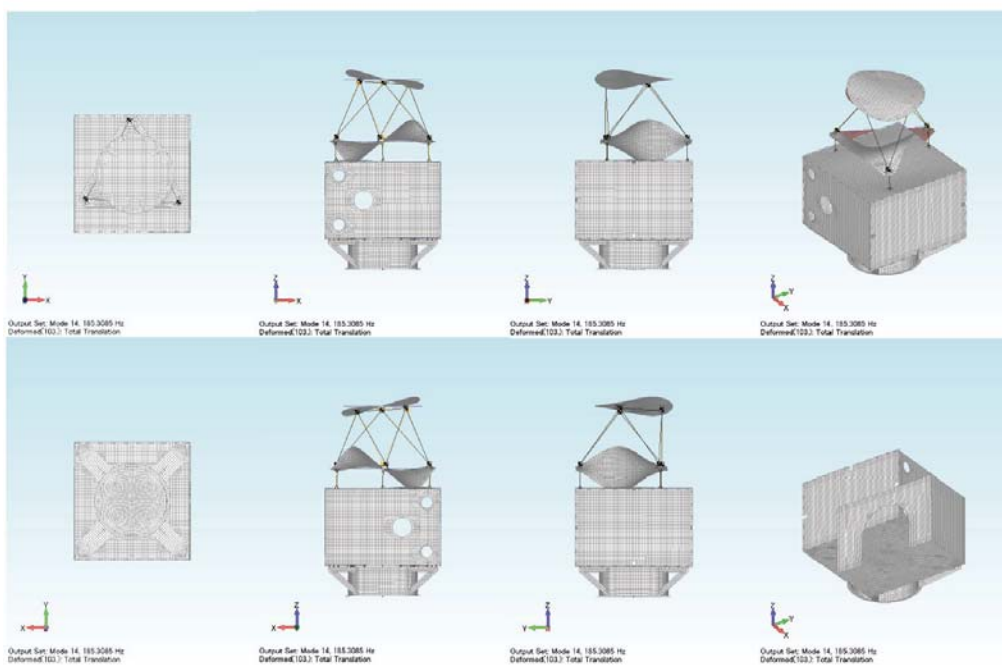


(l) 12次モード (174Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(6/15)

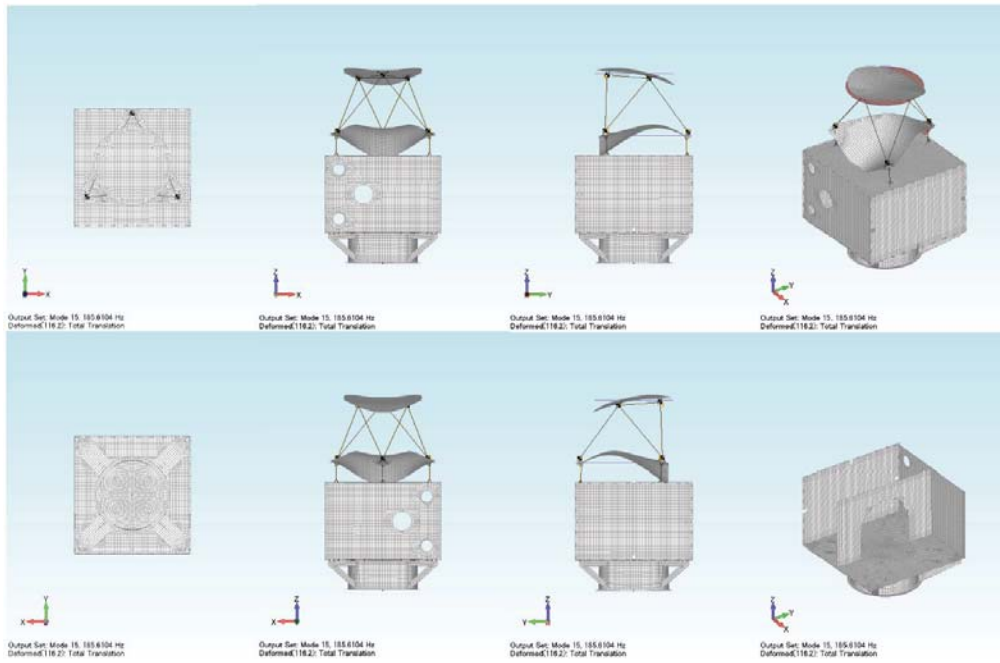


(m) 13 次モード (182Hz)

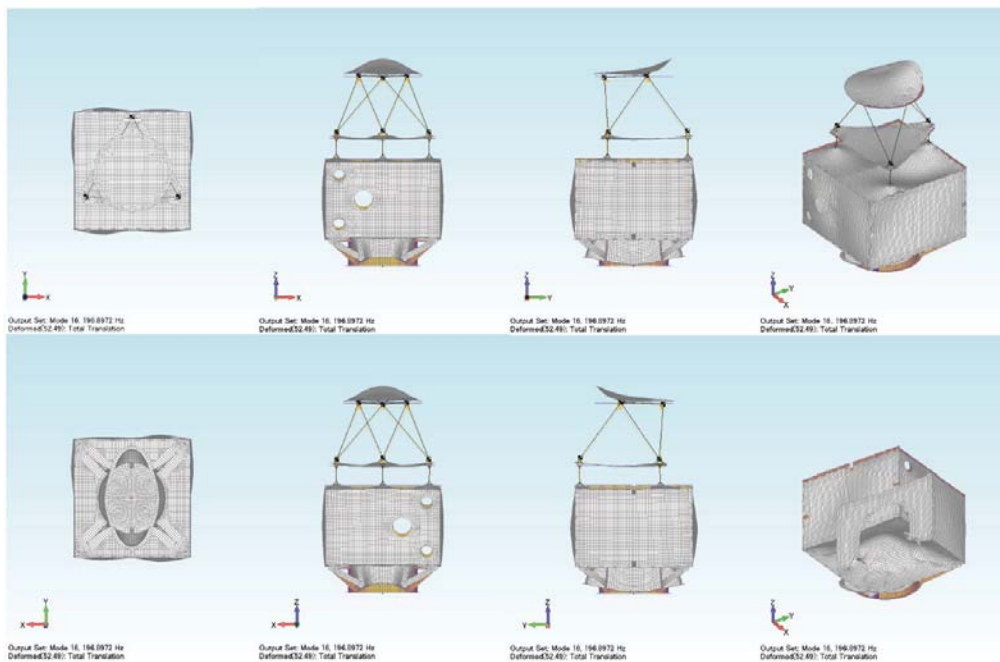


(n) 14 次モード (185Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(7/15)

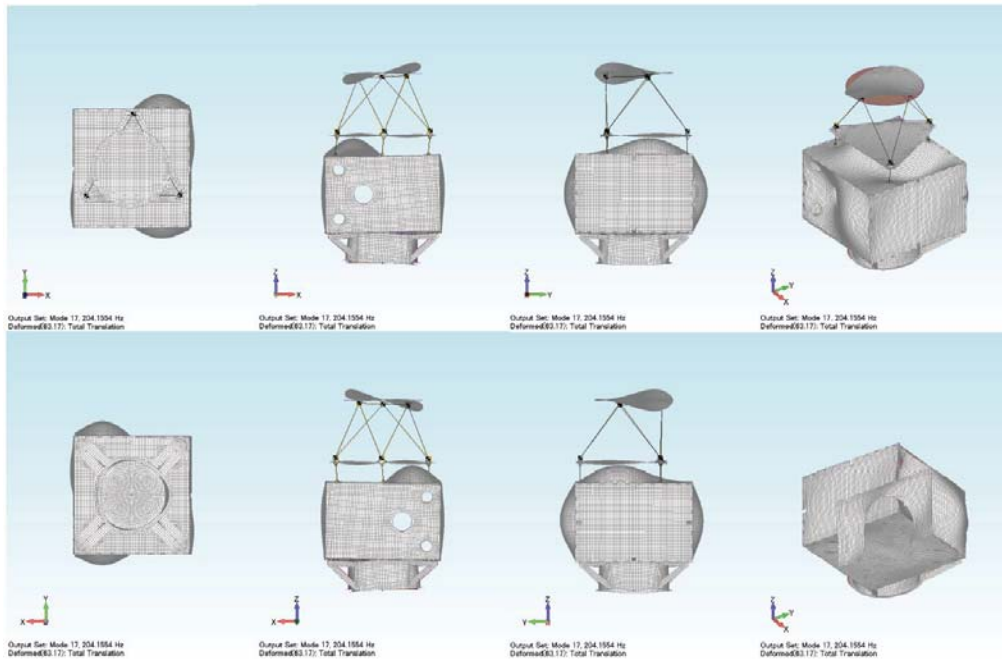


(o) 15次モード (186Hz)

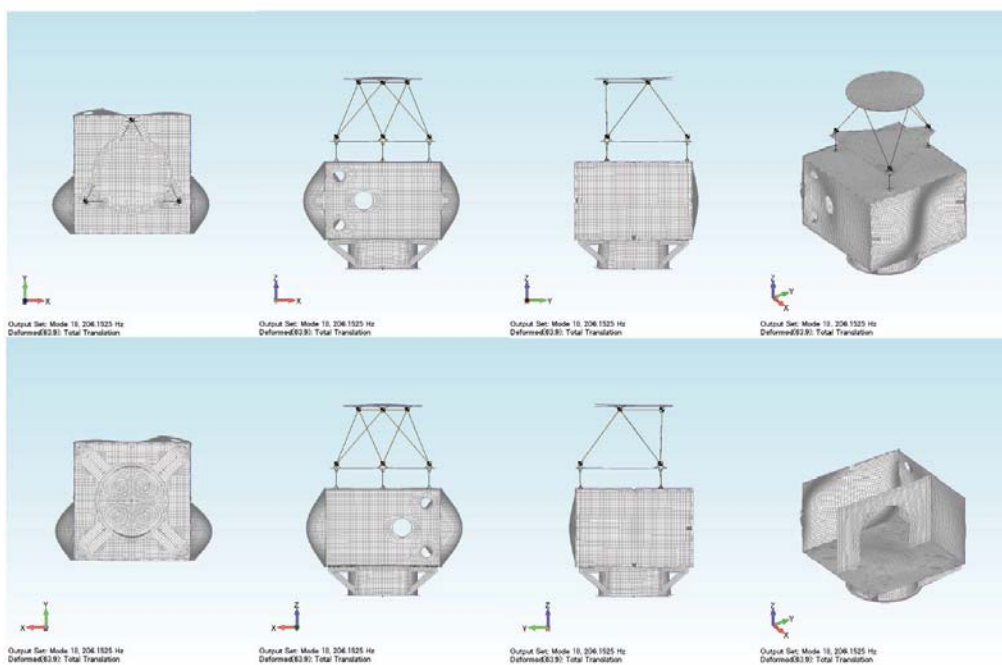


(p) 16次モード (197Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(8/15)

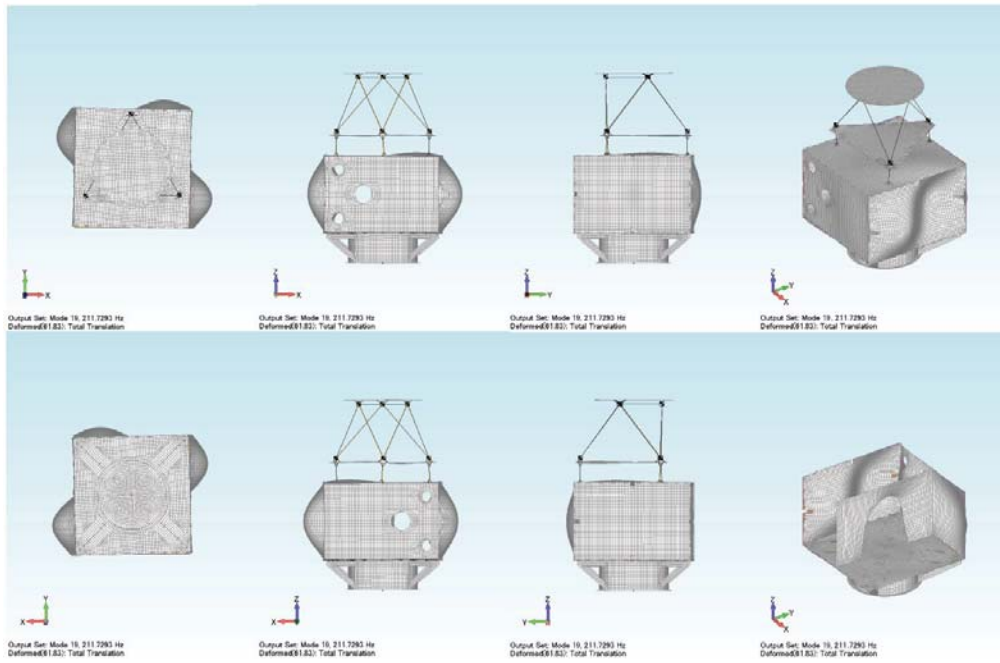


(q) 17次モード (204Hz)

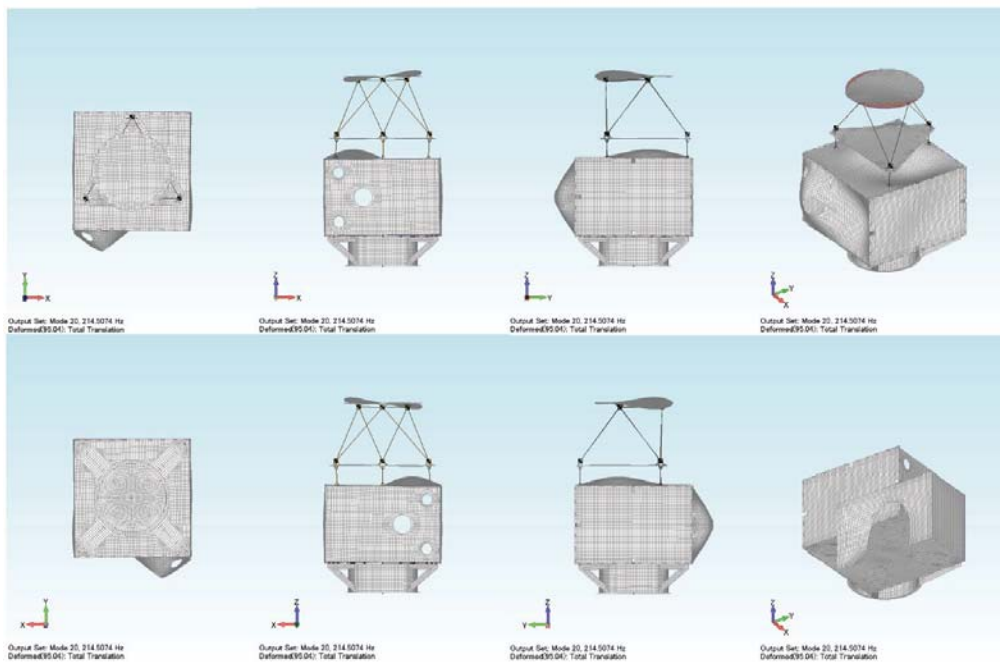


(r) 18次モード (206Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(9/15)

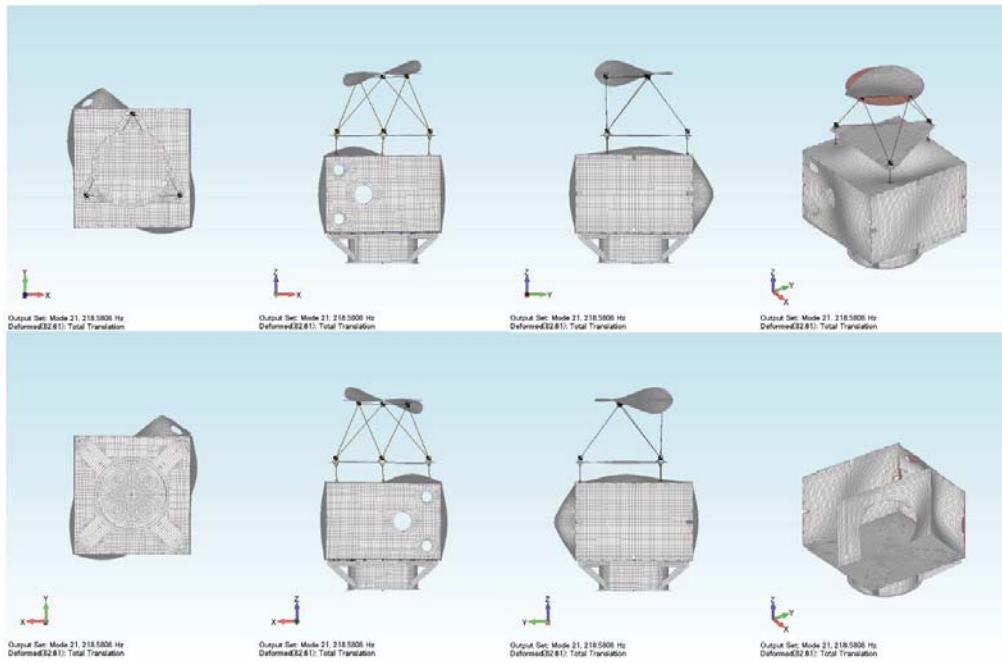


(s) 19次モード (212Hz)

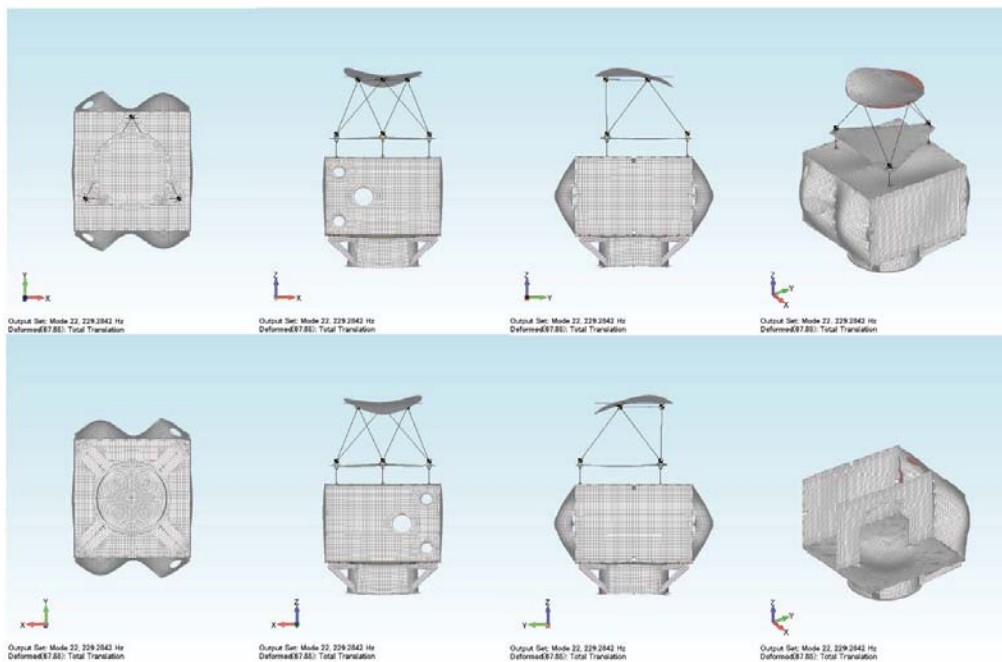


(t) 20次モード (215Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(10/15)

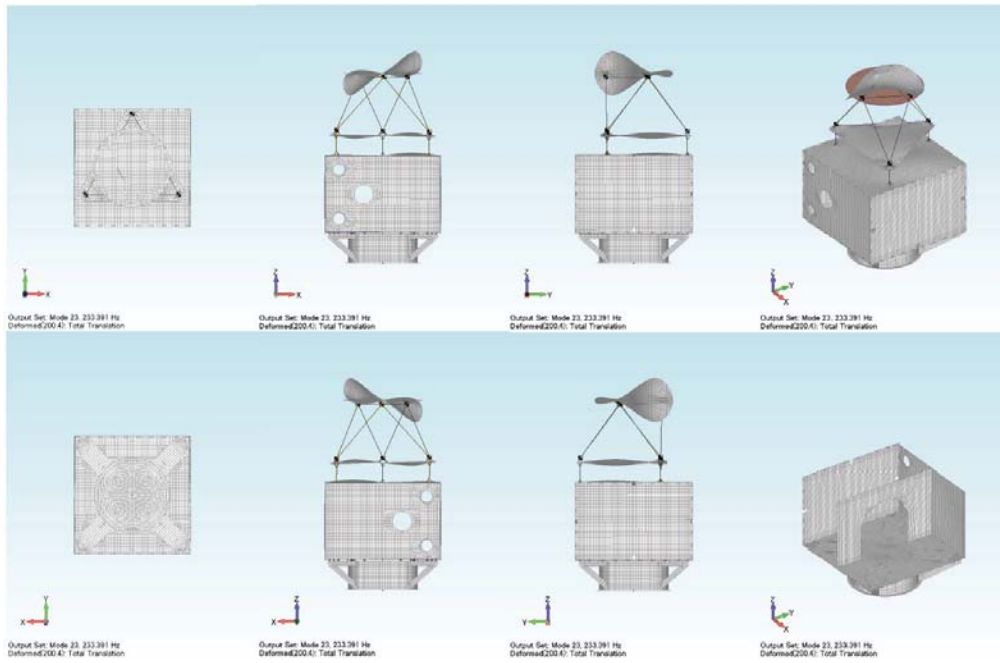


(u) 21 次モード (219Hz)

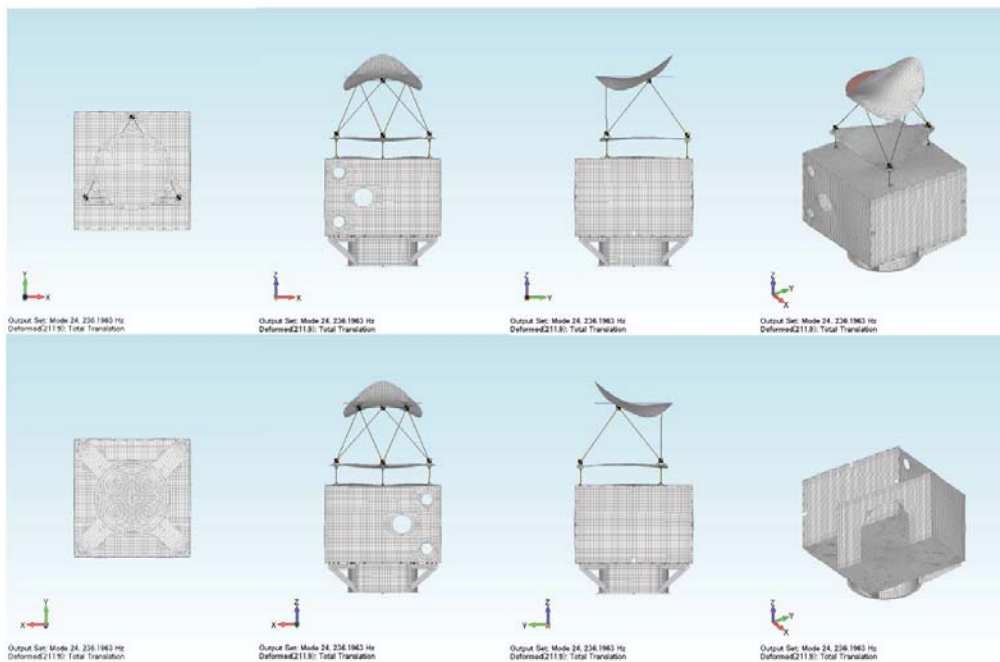


(v) 22 次モード (229Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(11/15)

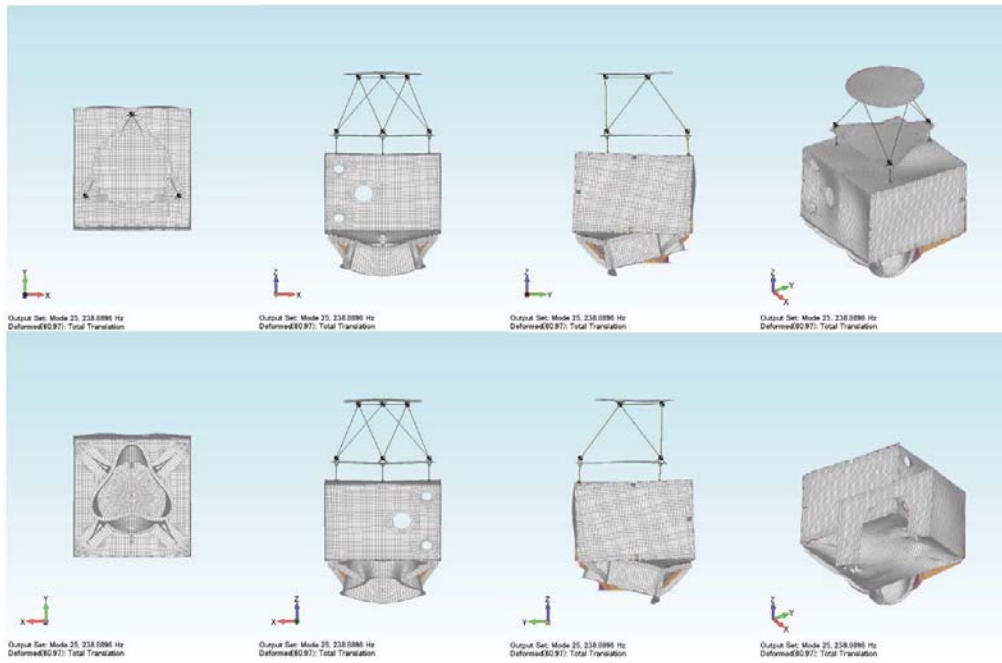


(w) 23 次モード (233Hz)

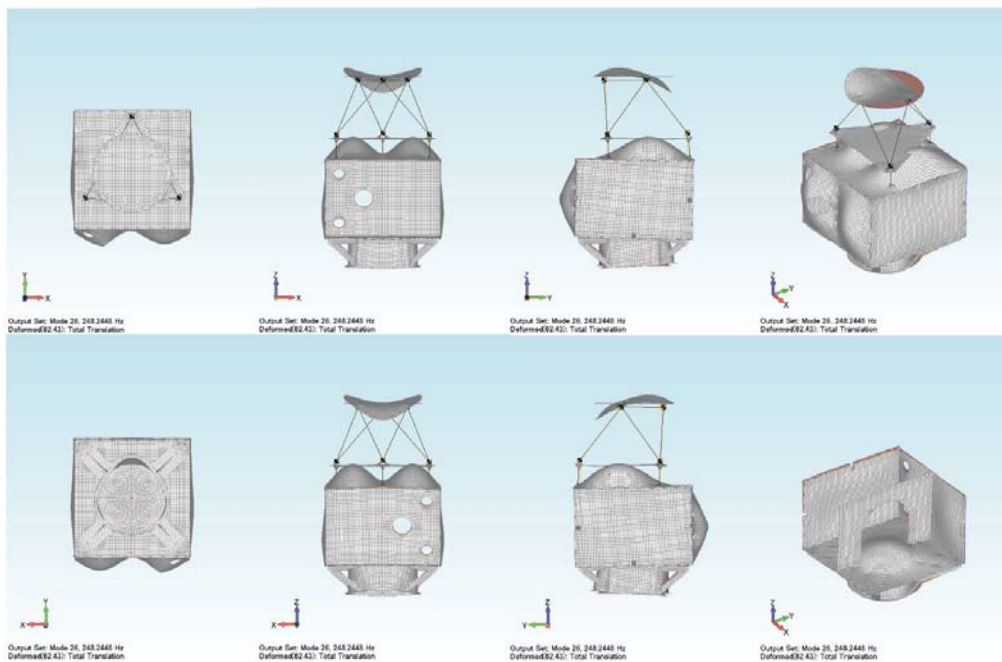


(x) 24 次モード (236Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(12/15)

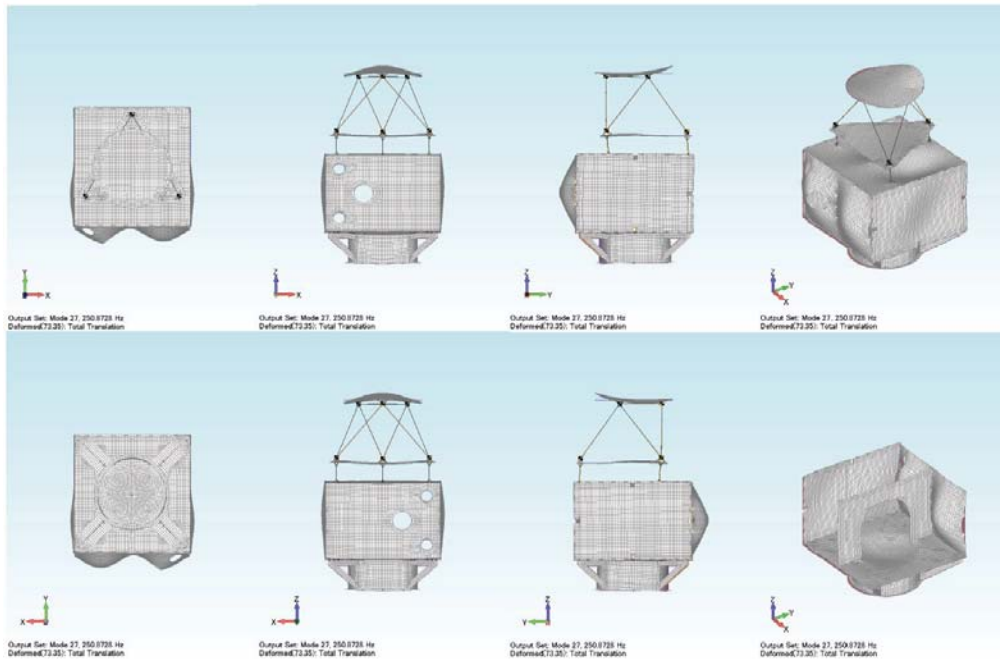


(y) 25 次モード (239Hz)

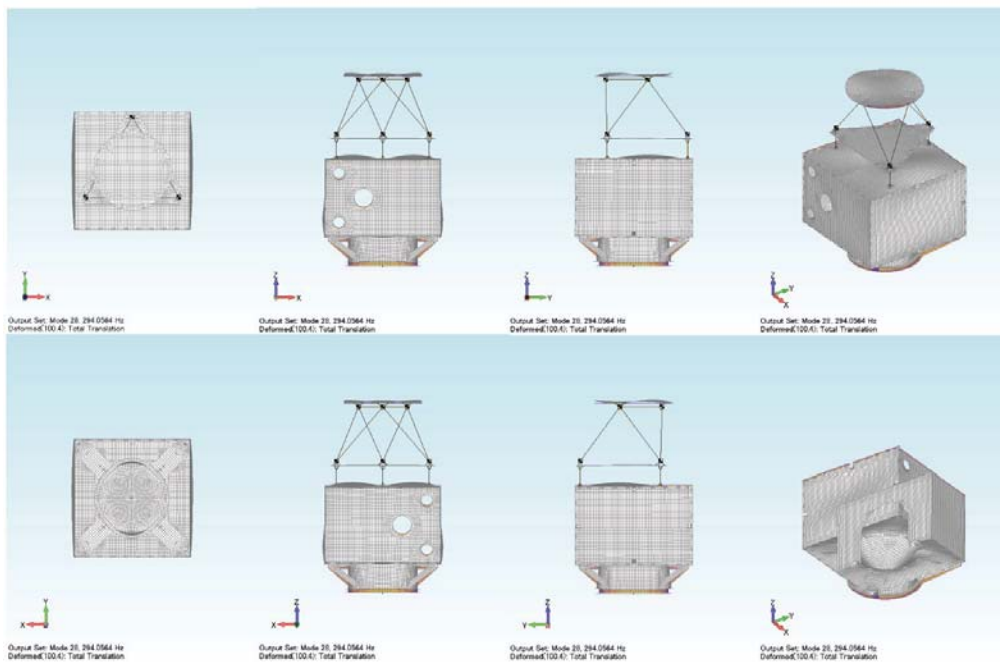


(z) 26 次モード (248Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(13/15)

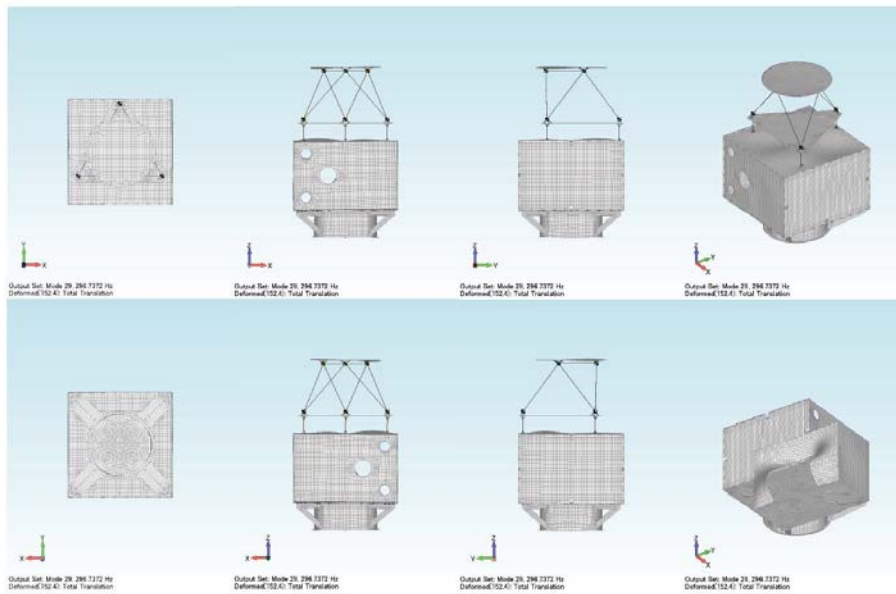


(aa) 27次モード (251Hz)



(ab) 28次モード (294Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(14/15)



(ac) 29 次モード (297Hz)

図 4-2 初期モデルの固有振動モード形状(15/15)

4.3 0 次モデルの作成

パネル製作時に機械加工でトリミングした際の端材や、ミッション部トラス部材および各パネル単体のモーダルサーベイを実施し、初期モデルを改造して、コリレーション前の 0 次モデルを作成した。

4.3.1. パネル端材のハンマリング試験による物性値の取得

まず、パネル製作においてサンドイッチ板成形後の機械加工でトリミングした際にできた端材を用いてハンマリング試験を実施して、パネルの密度と縦弾性率の合わせ込みを行った。試験に用いたパネル端材はコア厚 15mm の構体パネルを成形する際に切り出したもので、大きさは 1235mm×110mm であり、インサートは入っていない。

パネル端材の質量は 460g であったことから、面積密度は 3.3861 kg/m^2 と計算された。

ハンマリング試験の加速度センサの貼付位置を図 4-3 に示す。パネル端材の形状が横長であったため、長手方向のモードのみ考慮し、短手方向のモードやねじりモードは無視した。そのため、加速度センサは中心線上に配置している。パネル端材は十分に柔らかいゴムによって吊り、端材の中心線上の端をインパクトハンマーで加振した。ハンマリング試験の試験結果を図 4-4 に示す。これより、パネル端材の固有振動数は 1 次モード 97.5Hz、2 次モード 265Hz、3 次モード 497.5Hz であることが分かった。

次に、このパネル端材の FEM モデルを作成して、試験結果と合うように密度と縦弾性率を取得した。この FEM モデルは、衛星模型の FEM モデルと要素の大きさがほぼ同じになるように作成し、境界条件は自由とした。パネル端材の FEM モデルを図 4-5 に示す。解析結果のモード形状を図 4-6 に示す。縦弾性率をパラメータとした時の固有振動数の変化を図 4-7 に示す。このコリレーションにより、パネル端材のハンマリング試験の結果と合うパネルの縦弾性率は 68.65GPa ($=7000\text{kgf/mm}^2$) であることが分かった。

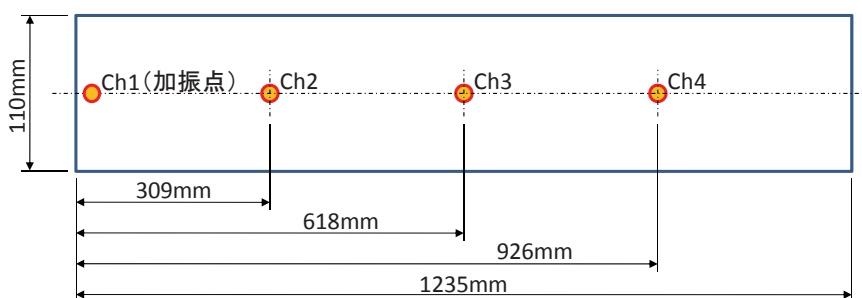


図 4-3 パネル端材 ハンマリング試験 加速度測定位置

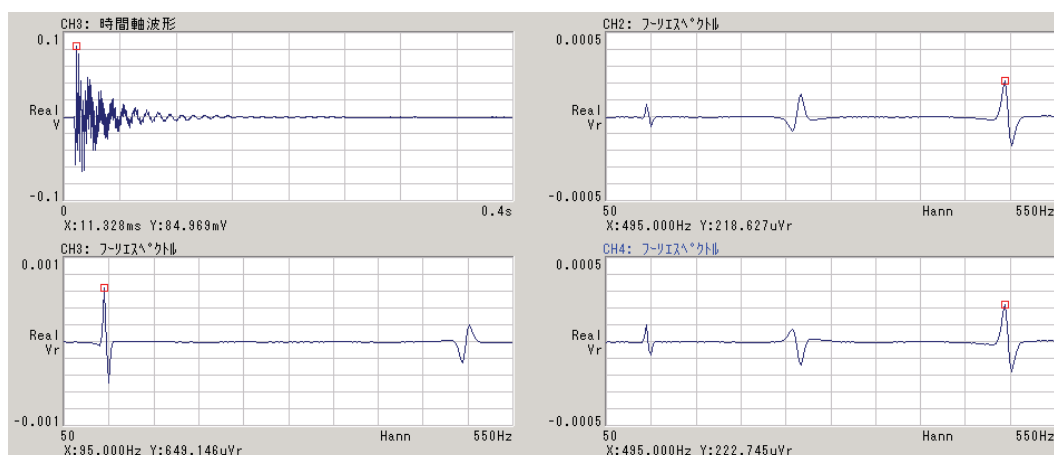


図 4-4 パネル端材 ハンマリング試験 測定結果

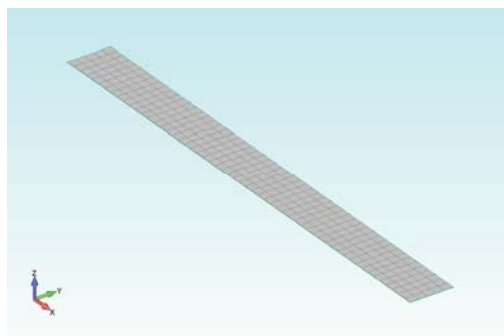


図 4-5 パネル端材 FEM モデル

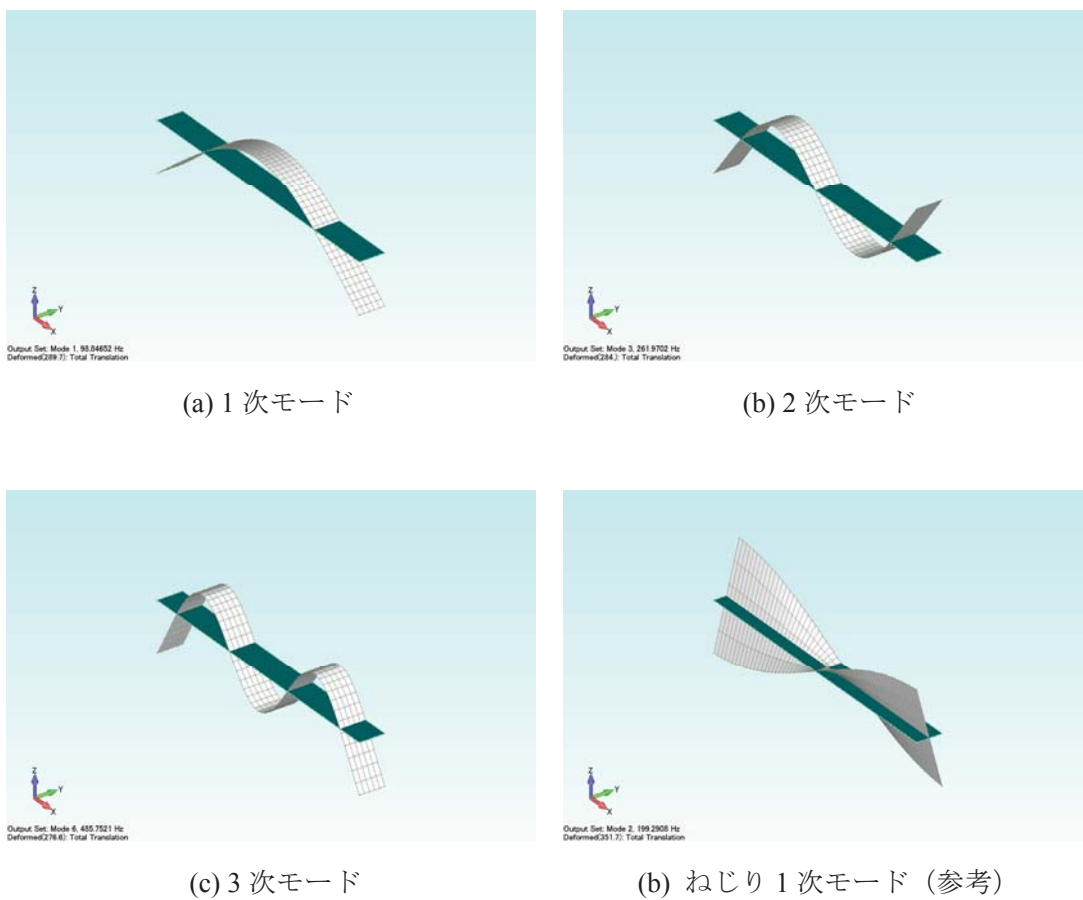


図 4-6 パネル端材のモード形状

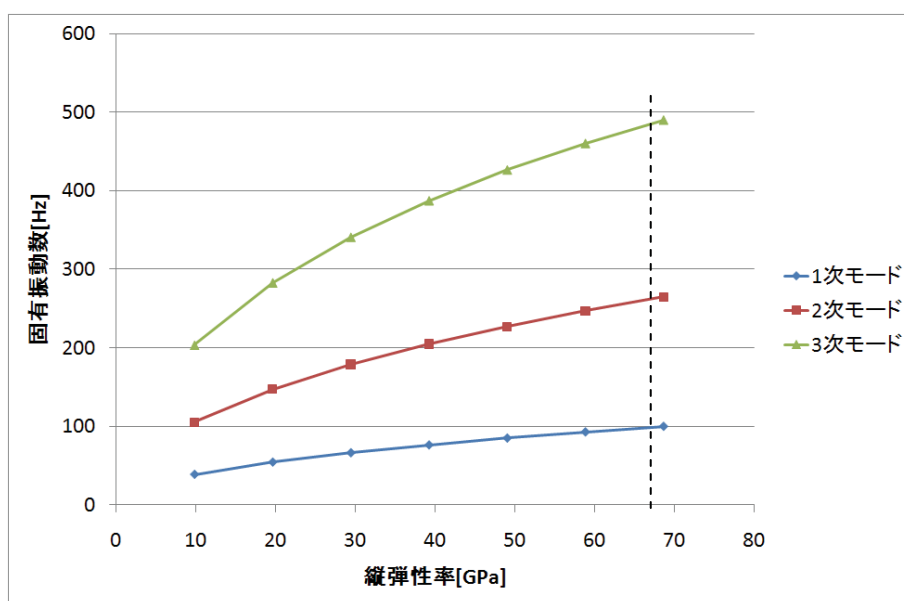


図 4-7 パネル端材の縦弾性率と固有振動数の関係

4.3.2. ミッション部トラス部材のハンマリング試験による物性値の取得

次に、ミッション部トラスに用いられているトラス部材をハンマリングして、トラスの物性値を求めた。試験に用いたトラス部材は、鏡面模擬パネルとミッションパネルをつなぐトラス部材であり、内径 27mm、外形 30mm、長さ 684.1mm の CFRP 積層パイプで、両端に金属フィッティングが接着されている。金属フィッティングの取付穴間の距離は 730mm である。

トラス部材の質量は 217g であったことから、線密度は 0.3021 kg/m と計算された。

ハンマリング試験の加速度センサの貼付位置を図 4-8 に示す。トラス部材は十分に柔らかいゴムによって吊り、トラス部材の端をインパクトハンマーで加振した。ハンマリング試験の試験結果を図 4-9 に示す。これより、トラス部材の固有振動数は 1 次モード 300Hz、2 次モード 865Hz であることが分かった。

このトラス部材の FEM モデルを作成して、試験結果と合うような縦弾性率を求めた結果、49.03GPa (=5000kgf/mm²) であることが分かった。

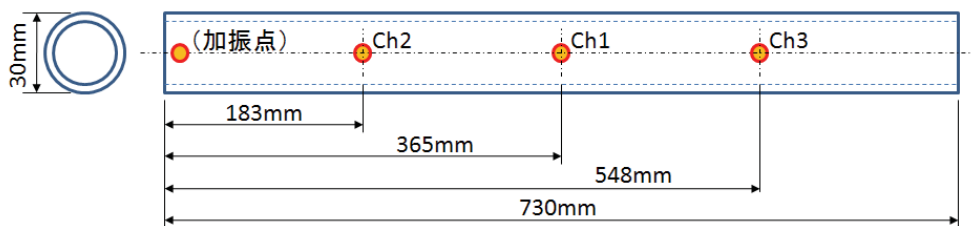


図 4-8 トラス部材 ハンマリング試験 加速度測定位置

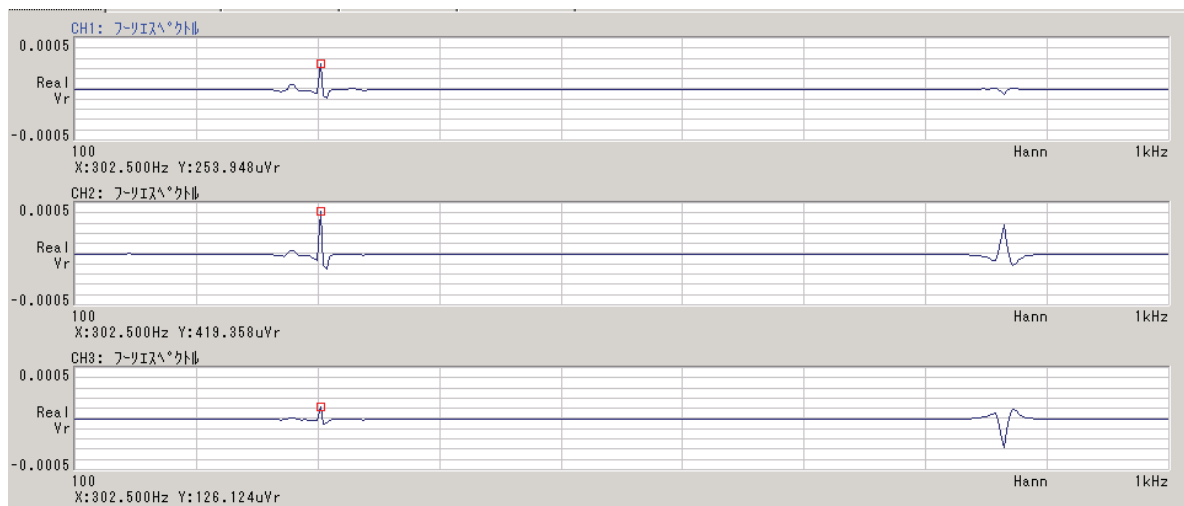


図 4-9 トラス部材 ハンマリング試験 測定結果

次に、トラス部材の両端の金属フィッティングは、ボルト 1 点結合となっているため、完全に剛な結合とは言い難い。そのため、このボルトの締結を模擬するために、トラス部材の結合は剛体要素による結合ではなく、バネ要素による結合とした。ただし、ここではバネ要素のバネ定数の合わせ込みは行わず、十分に剛なバネ乗数を設定した。トラス部材の締結部のモデル化を図 4-10 に示す。

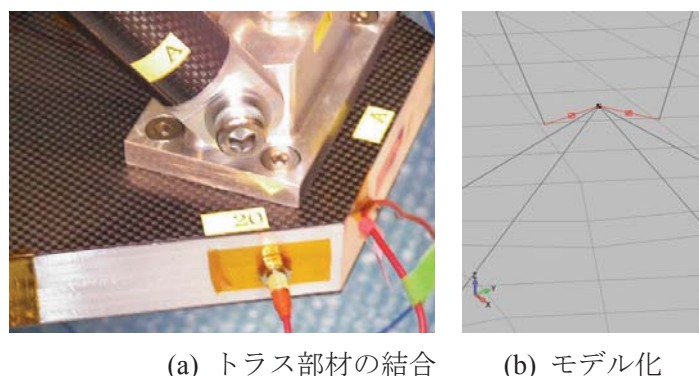


図 4-10 トラス部材結合のモデル化

4.3.3. 構体結合フィッティング部のフォースリンクのモデル化

次に、構体結合フィッティング部に設置しているフォースリンクの剛性をバネ要素でモデル化した。バネ乗数は、米国 PCB 社製フォースリンク 261M09 の剛性のカタログ値を用いた。フォースリンクのモデル化を図 4-11 に示す。

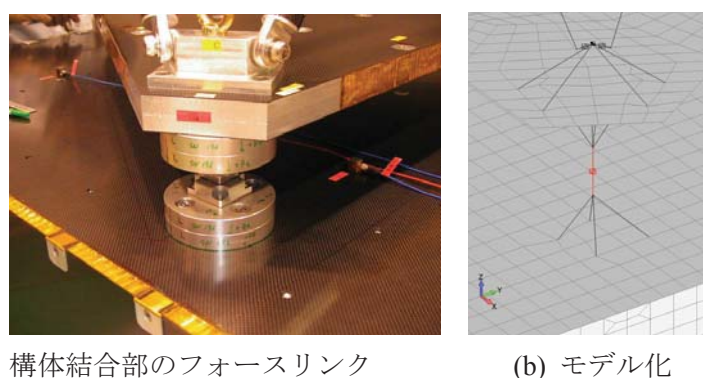


図 4-11 トラス部材結合のモデル化

4.3.4. 0 次モデルの固有値解析結果

表 4-4 と表 4-5 に 0 次モデルとして使用する物性値を示す。この物性値を用いて作成した 0 次モデルの固有値解析結果を表 4-7 と図 4-12 に示す。全体的に固有振動数はモーダルサーベイの結果に近いが、低次モードにおいてはモード形状が大きく異なっている。

表 4-4 ハンマリング試験結果から得た物性値

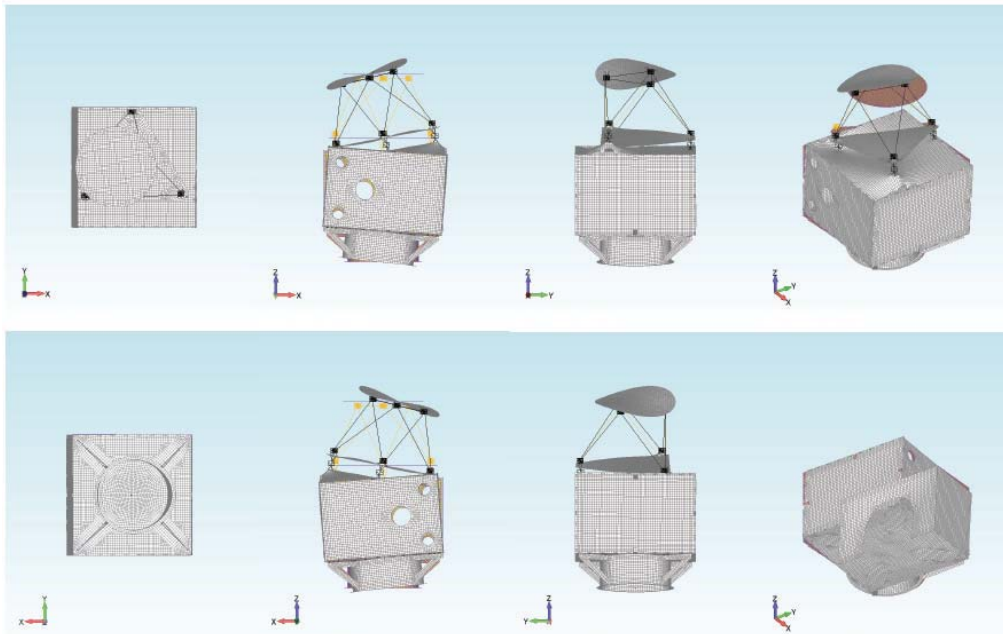
項目	物性値
鏡面模擬パネル：縦弾性率 E(GPa)	68.65
ミッションパネル：縦弾性率 E(GPa)	68.65
上面パネル：縦弾性率 E(GPa)	68.65
インナーパネル：縦弾性率 E(GPa)	68.65
アクセスパネル：縦弾性率 E(GPa)	68.65
側面パネル：縦弾性率 E(GPa)	68.65
下面パネル：縦弾性率 E(GPa)	68.65
アウトリガー：縦弾性率 E(GPa)	68.65
ミッション部トラス：縦弾性率 E(GPa)	49.03
ミッション部トラス：締結のモデル化	バネ要素による結合

表 4-5 フォースリンクのモデル化

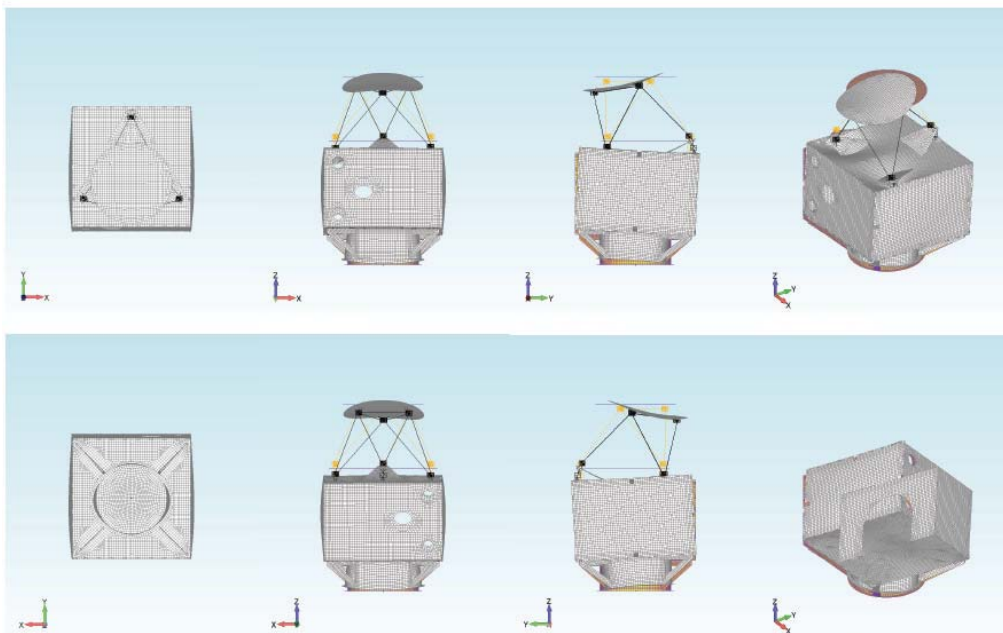
変更項目	変更前（初期モデル）	変更後
構体結合フィッティング： モデル化	ビーム要素	バネ要素 K1 : 0.7kN/ μ m K2 : 0.7kN/ μ m K3 : 1.75kN/ μ m K4 : 29.4(kN $\cdot\mu$ m)/rad K5 : 29.4(kN $\cdot\mu$ m)/rad K6 : 0.1(kN $\cdot\mu$ m)/rad

表 4-6 0次モデルの固有値解析結果

モード 次数	固有振動数 [Hz]		
	※参考 初期モデル	0次モデル	モーダルサーベイ
1	80	97	102
2	81	98	114
3	92	120	121
4	94	135	135
5	98	140	143
6	120	145	143
7	125	160	156
8	133	162	159
9	135	165	151
10	161	182	163
11	166	187	178
12	174	192	190
13	182	193	203
14	185	200	217
15	186	201	227
16	197	207	234
17	204	225	242
18	206	229	247
19	212	233	249
20	215	236	256
21	219	239	264
22	229	240	269
23	233	247	276
24	236	250	290
25	239	251	296
26	248	272	309
27	251	276	315
28	294	-	325
29	297	-	329
30	-	-	333
31	-	-	347

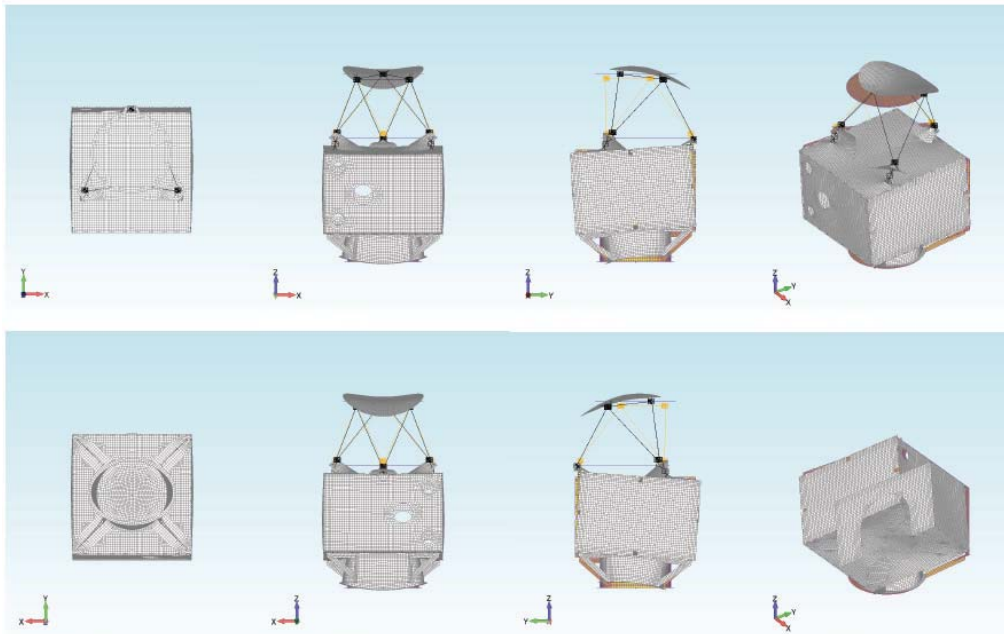


(a) 1次モード (97Hz)

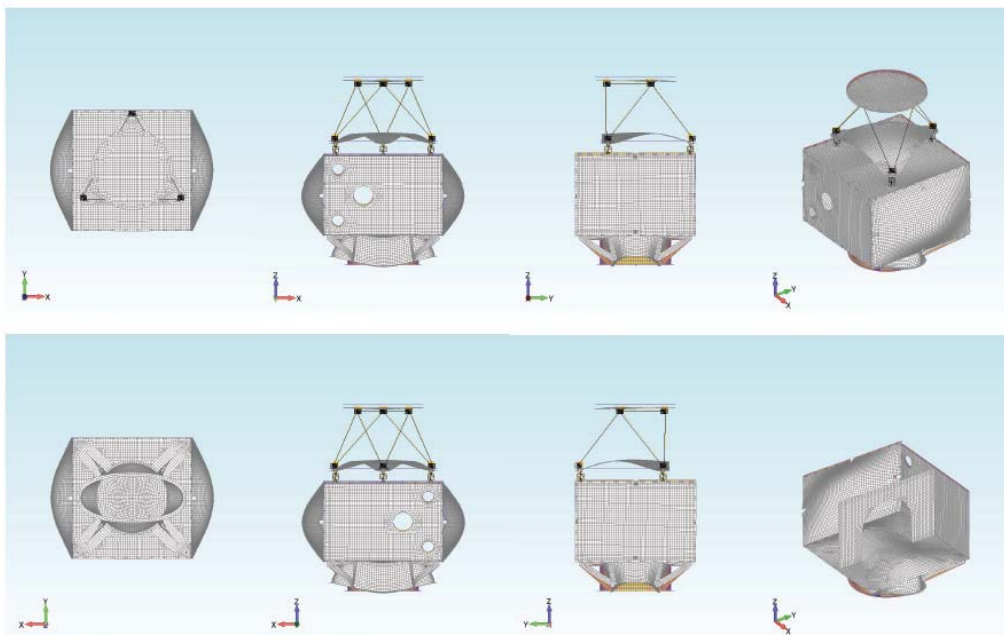


(b) 2次モード (98Hz)

図 4-12 0次モデルの固有振動数のモード形状(1/4)

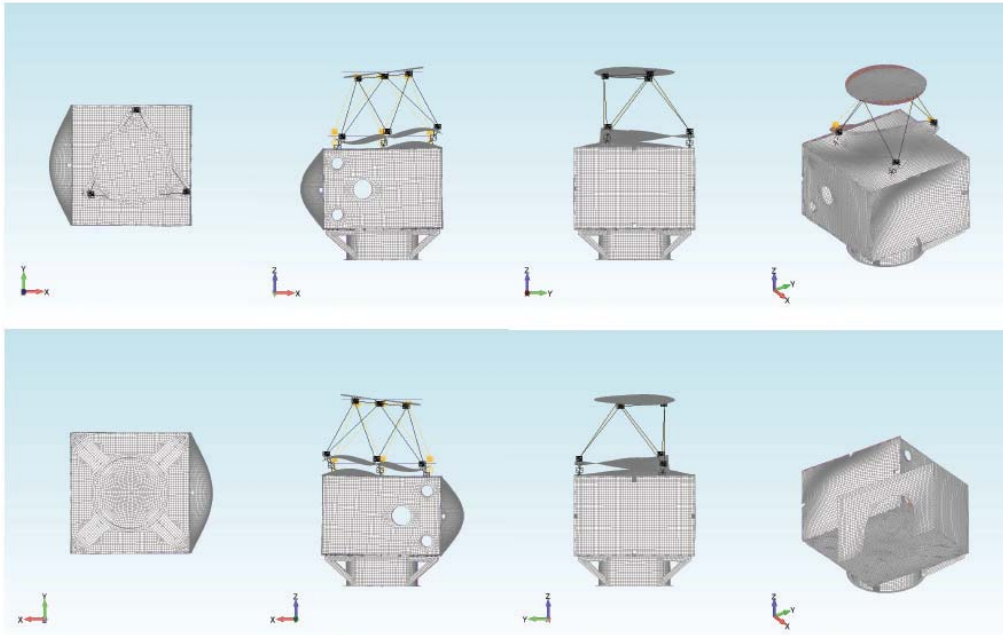


(c) 3次モード (120Hz)

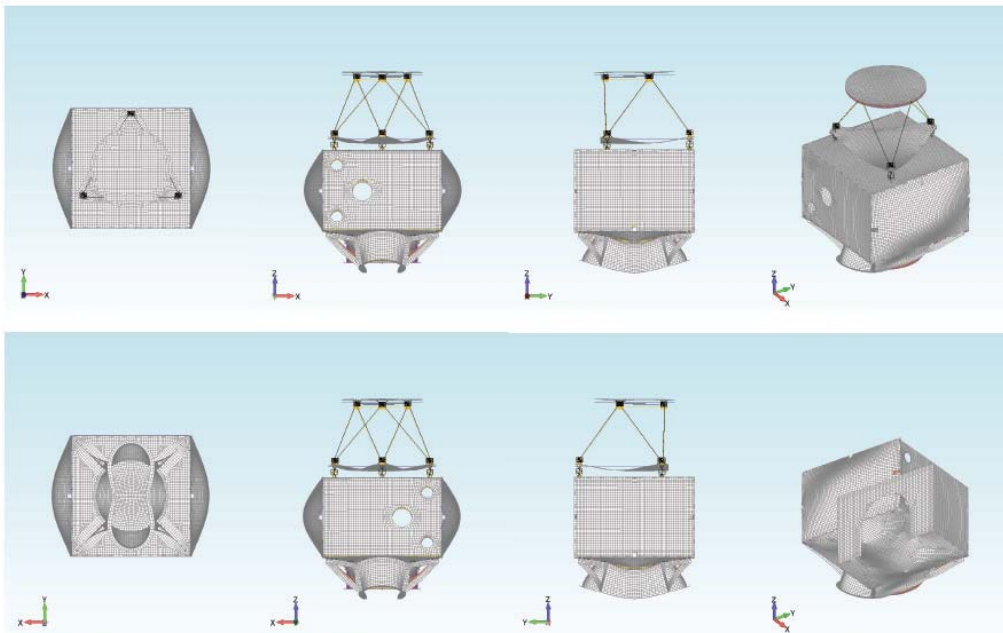


(d) 4次モード (135Hz)

図 4-12 0次モデルの固有振動数のモード形状(2/4)

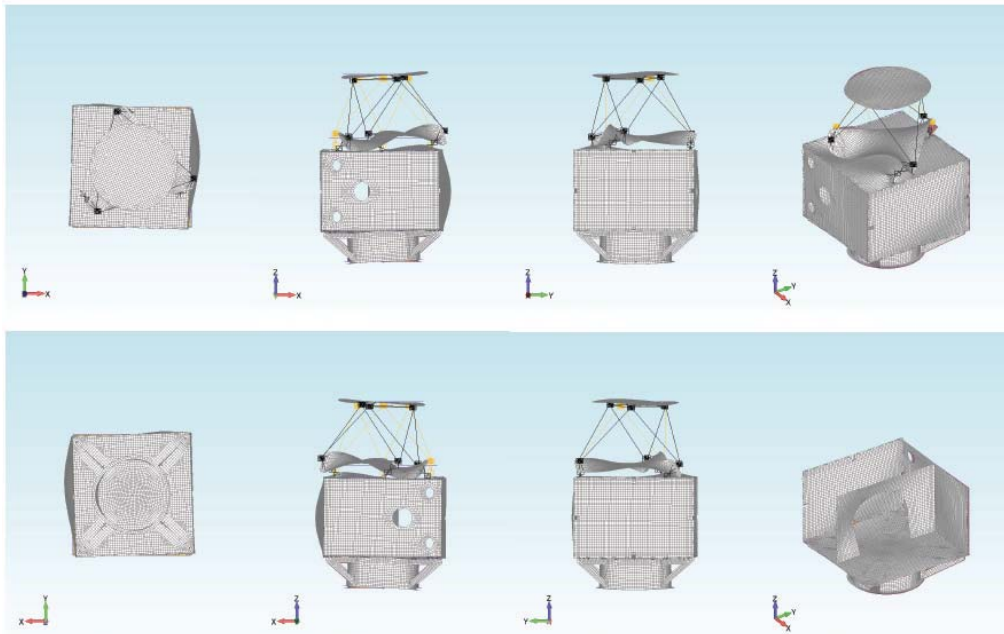


(e) 5次モード (140Hz)

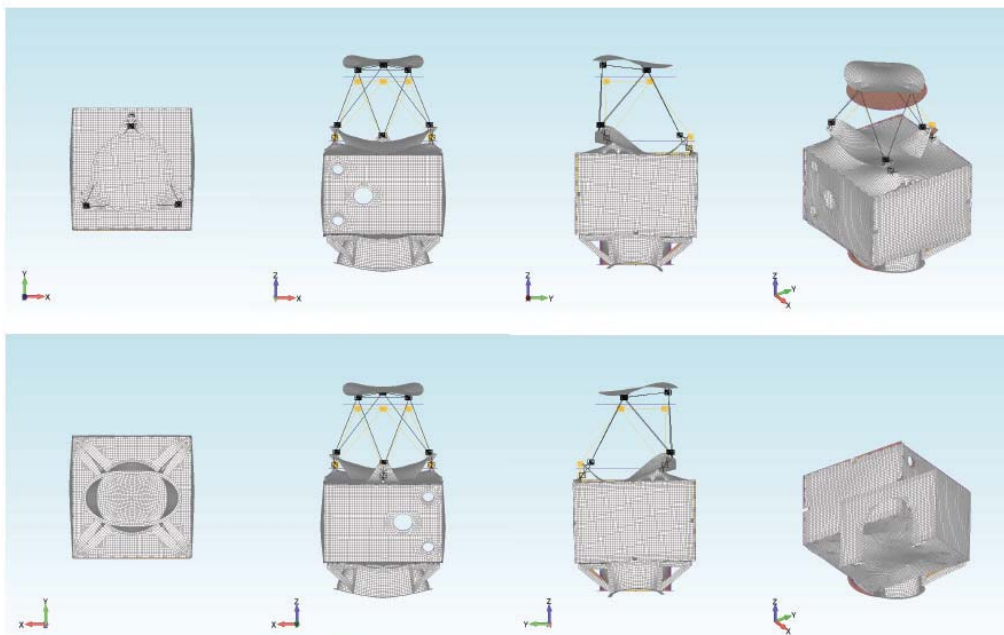


(f) 6次モード (145Hz)

図 4-12 0次モデルの固有振動数のモード形状(3/4)



(g) 7次モード (160Hz)



(h) 8次モード (162Hz)

図 4-12 0次モデルの固有振動数のモード形状(4/4)

4.4 0次モデルのコリレーション

4.4.1. パネル埋め込みインサートのモデル化

0次モデルではフォースリンクをバネ要素でモデル化したが、そのフォースリンクが結合されているミッションパネルと上面パネルで、結合点が局所的に変形している様子が図4-12から分かる。しかし、実際には構体結合部には図4-13のように先埋めインサートのブロックが埋め込まれており、局所的な変形は起こりにくい。また、大きな先埋めインサートのブロックが埋め込まれていることで、局所的な質量のアンバランスがあることも考えられる。

そこで、ミッションパネルと上面パネルについて、埋め込まれているインサートの剛性と質量をモデル化した。インサートのモデル化には、サンドイッチ板のコア物性をハニカムコアの物性からアルミブロックの物性に変更した。また、構体結合部のフォースリンク結合用のブロックも集中質量としてモデル化した。結合用インサートの物性に変更した場所を図4-14に示す。モデルの変更点を表4-7に示す。解析結果を表4-8に示す。代表的なモードの振動モード形状を図4-15に示す。

このコリレーションにより、1次・2次モードにおける固有振動数とモード形状が、モーダルサーベイの結果にほぼ合う状態までコリレーションできた。しかし、3次モード以降は固有振動数もモード形状もまだ異なっている。

表 4-7 構体結合部インサートのモデル化

変更項目	変更前	変更後
ミッションパネル（インサート部）： コアせん断弾性率 G(GPa)	0.1117	70.61
ミッションパネル（ハニカムコア部）： 面積密度(kg/m ²)	8.423	4.272
ミッションパネル（ハニカムコア部）： 面積密度(kg/m ²)	8.423	80.431
上面パネル（インサート部）： コアせん断弾性率 G(GPa)	0.1117	70.61
構体結合フィッティング（結合用ブロック）： 質量	ミッションパネル に非構造質量とし て付加	質量要素として モデル化 0.862kg×6 個

表 4-8 0次モデルの固有値解析結果とモーダルサーベイの比較

モード 次数	固有振動数 [Hz]		
	コリレーション前	コリレーション後	モーダルサーベイ
1	97	107	102
2	98	114	114
3	120	138	121
4	135	140	135
5	140	145	143
6	145	160	143
7	160	164	156
8	162	170	159
9	165	184	151
10	182	185	163
11	187	189	178
12	192	190	190
13	193	193	203
14	200	200	217
15	201	207	227
16	207	230	234
17	225	231	242
18	229	237	247
19	233	240	249
20	236	250	256
21	239	251	264
22	240	253	269
23	247	254	276
24	250	274	290
25	251	282	296
26	272	292	309
27	276	294	315
28	-	-	325
29	-	-	329
30	-	-	333
31	-	-	347

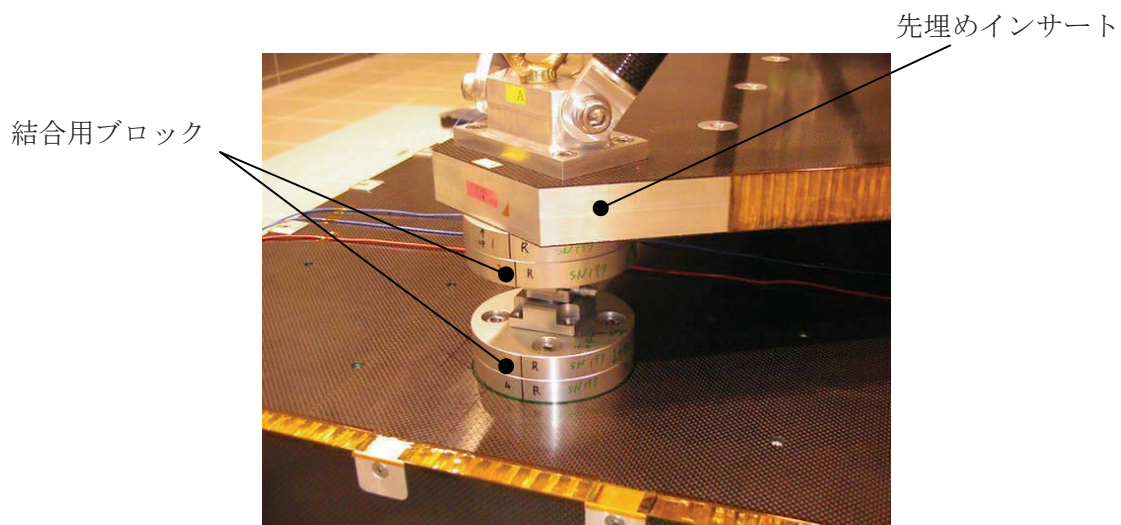


図 4-13 構体結合部の先埋めインサートおよび結合用ブロック

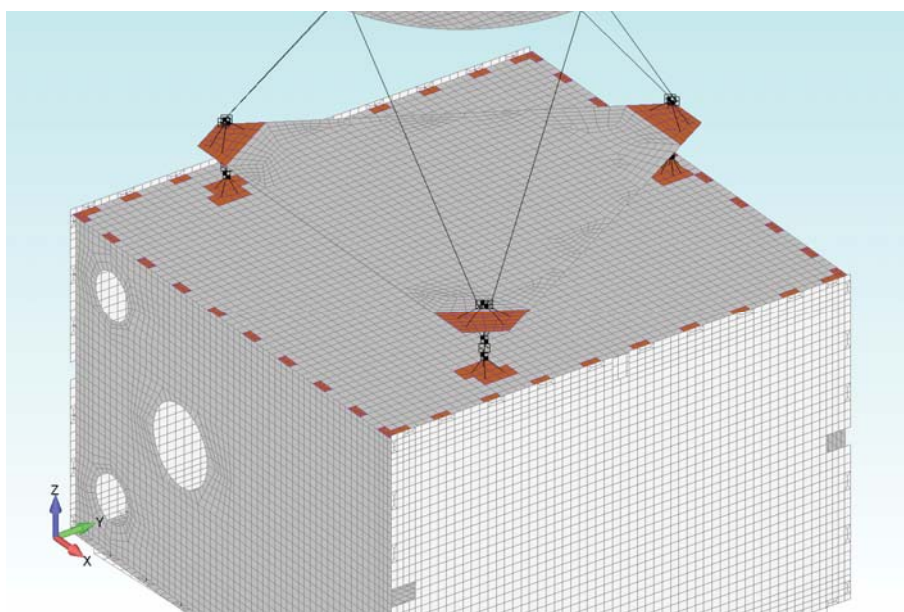
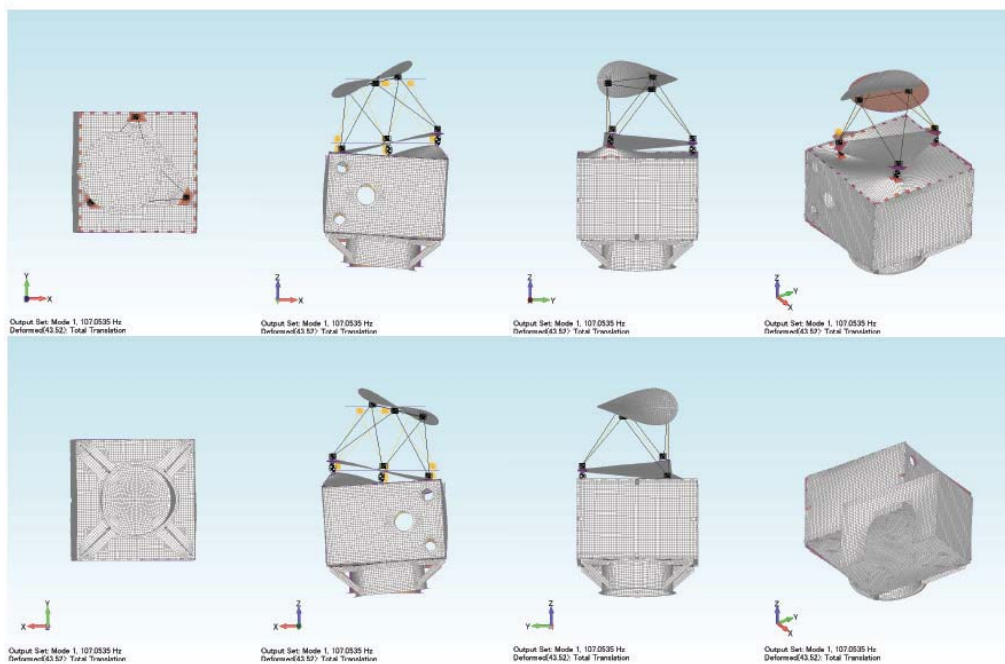
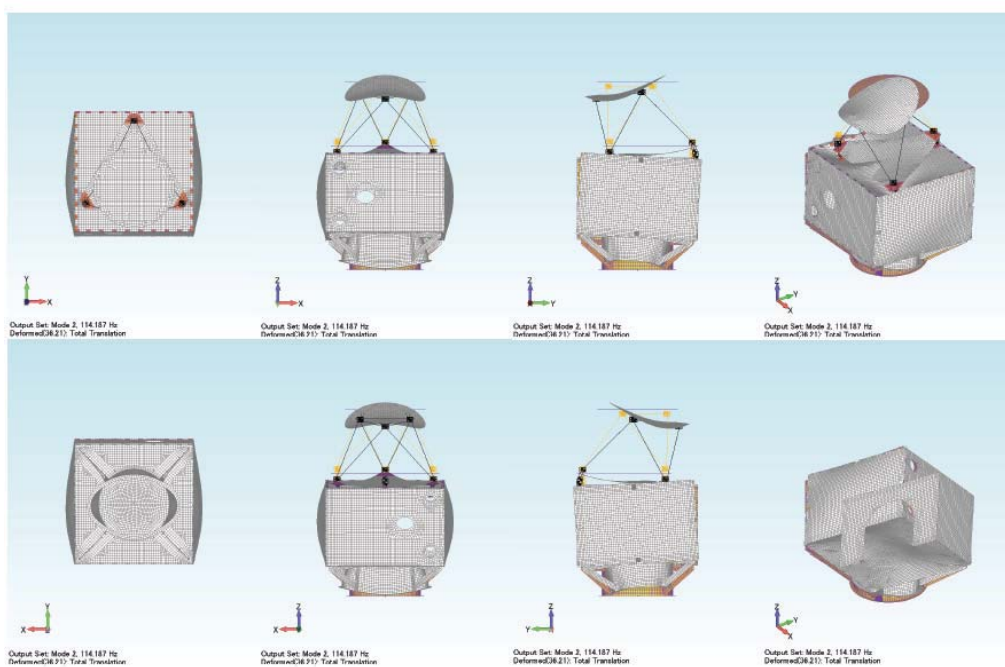


図 4-14 インサートをモデル化した場所

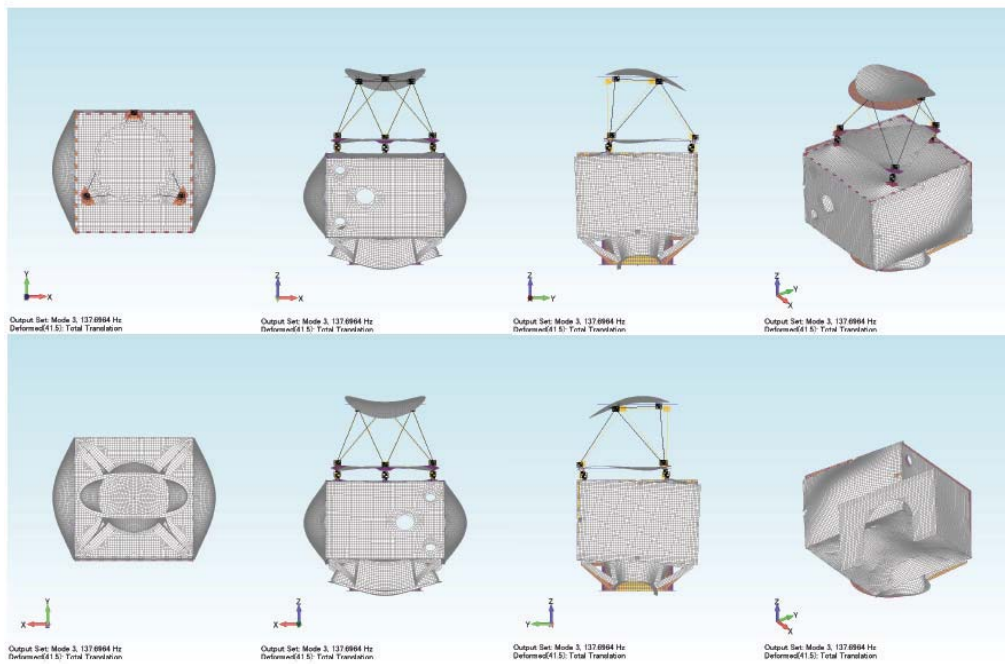


(a) 1次モード (107Hz)

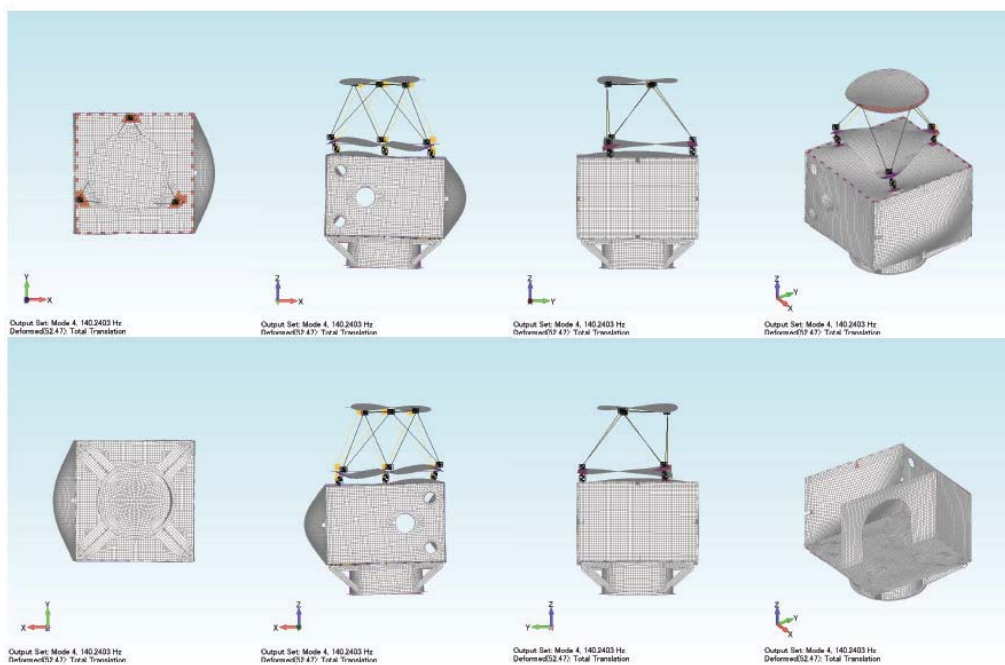


(b) 2次モード (114Hz)

図 4-15 コリレーション後 0次モデルの固有振動数のモード形状(1/4)

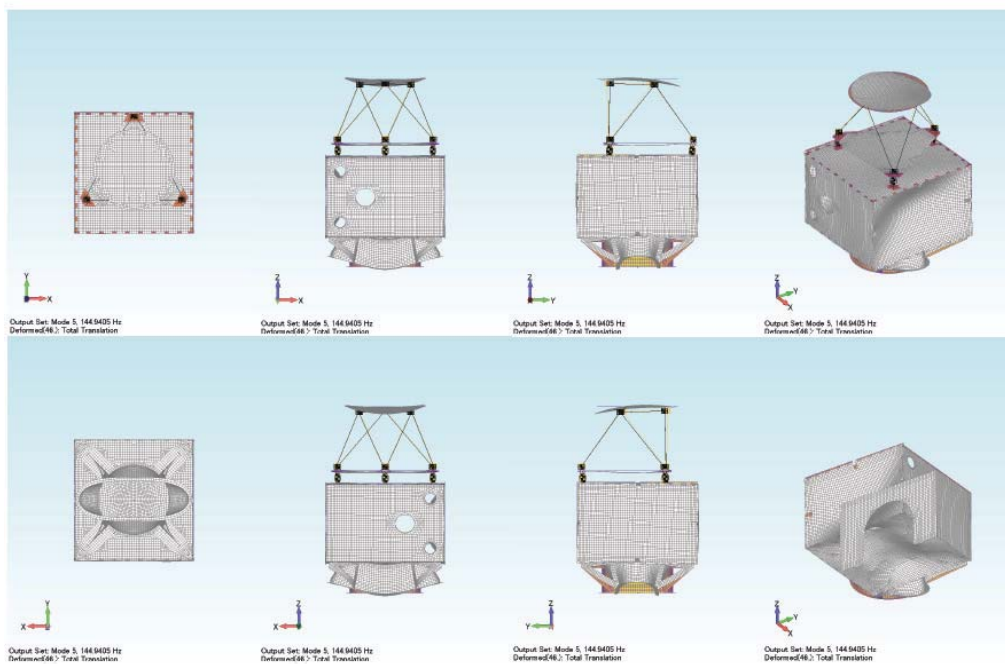


(c) 3次モード (137Hz)

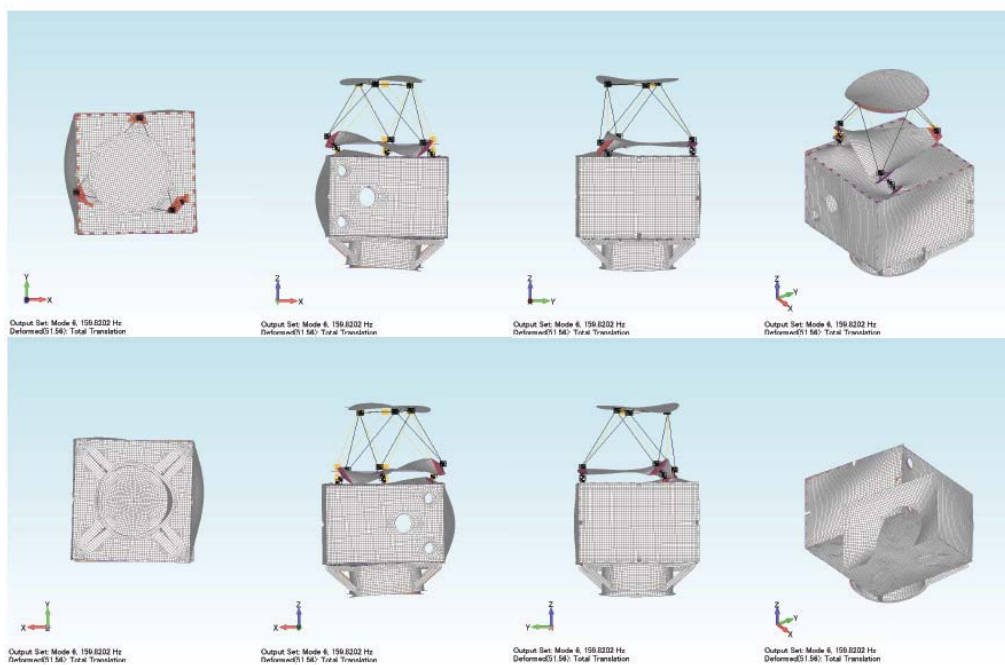


(d) 4次モード (140Hz)

図 4-15 コリレーション後 0次モデルの固有振動数のモード形状(2/4)

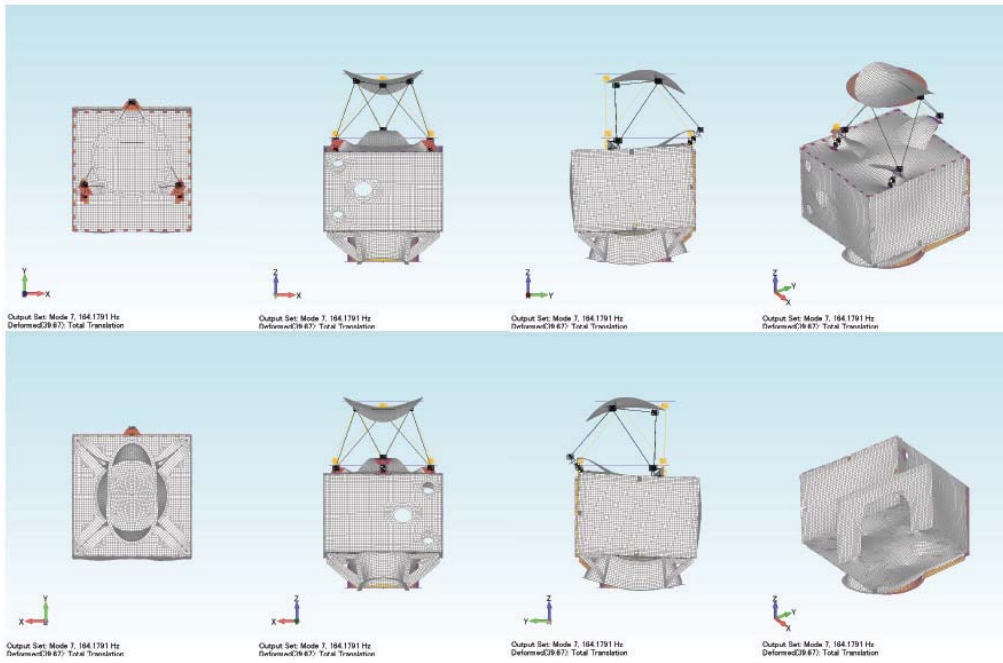


(e) 5次モード (145Hz)

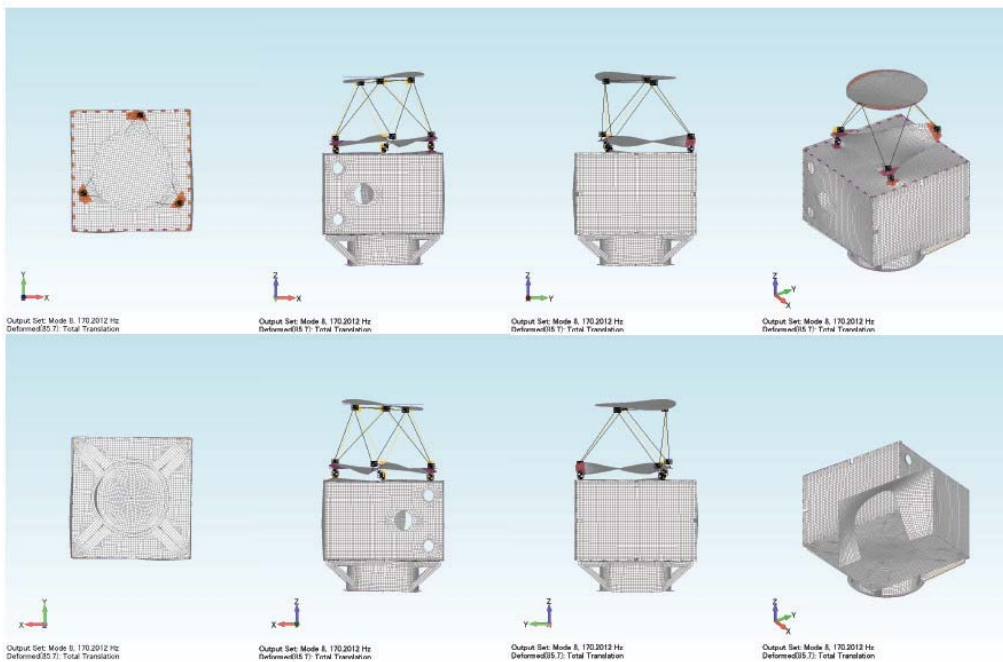


(f) 6次モード (160Hz)

図 4-15 コリレーション後 0次モデルの固有振動数のモード形状(3/4)



(g) 7次モード (164Hz)



(h) 8次モード (170Hz)

図 4-15 コリレーション後 0次モデルの固有振動数のモード形状(4/4)

4.4.2. 各パネル単体のモーダルサーベイ

これまでに個別の部材試験によるコリレーションにより、1次・2次モードは固有振動数もモード形状も合ってきているが、3次モード以降はまだ合っていない。特に、パネルのローカルなモードが支配的なモードの固有振動数が合っていないことから、パネル単体の詳細な合わせ込みがさらに必要である。そこで、衛星構体を解体し、個々のパネルごとにモーダルサーベイを実施して、固有振動数とモード形状の合わせ込みを行った。個々のモーダルサーベイは、解体が容易に行えるアクセスパネル、鏡面模擬パネル、ミッションパネルを対象とした。

(a) アクセスパネル単体のモーダルサーベイ

構体パネルのモード特性を合わせ込むために、アクセスパネル単体を用いてモーダルサーベイを行った。アクセスパネルは十分に柔らかいゴムによって吊り、インパクトハンマーで加振した。加速度センサの設置位置を図4-16に、ハンマリング試験の試験結果を図4-17にそれぞれ示す。これより、アクセスパネルの固有振動数は1次モード62Hz、2次モード72Hz、3次モード132Hzであることが分かった。

次に、アクセスパネル単体のFEMモデルを用いて、物性の合わせ込みを行った。まずは、先にパネル端材で合わせ込みを行っていた物性を用いて解析を行った。その結果、固有振動数もモード形状も、アクセスパネル単体のモーダルサーベイ結果とは一致しなかった。そこで、構体パネルのサンドイッチ板のスキンはT300/エポキシのクロス材であるので、その異方性を考慮して、直交異方性の物性として定義した。表4-9にモデルの変更点を、表4-10にコリレーション後の固有振動数をそれぞれ示す。図4-18にモード形状を示す。

表 4-9 モデル変更点 (アクセスパネル単体)

変更項目	変更前	変更後
アクセスパネル：材料物性	(等方性) 縦弾性率 E : 68.65GPa	(直交異方性) 弾性率 G11 : 45.11GPa 弾性率 G22 : 45.11GPa 弾性率 G33 : 1.96GPa

表 4-10 固有値解析結果 (アクセスパネル単体)

モード 次数	固有振動数 [Hz]		
	パネル端材の物性	コリレーション後	モーダルサーベイ
1	69	63	62
2	78	72	72
3	155	137	132
4	178	137	143

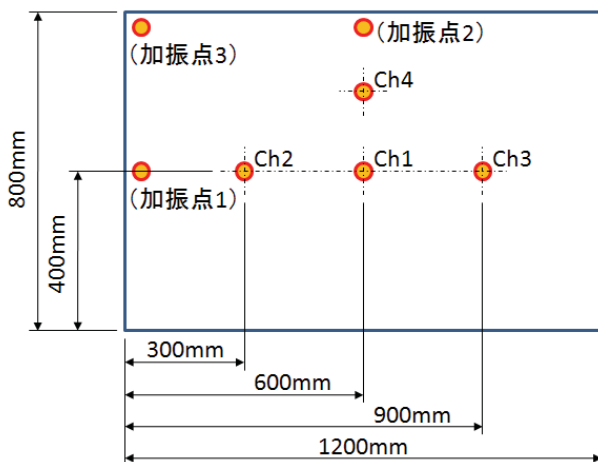
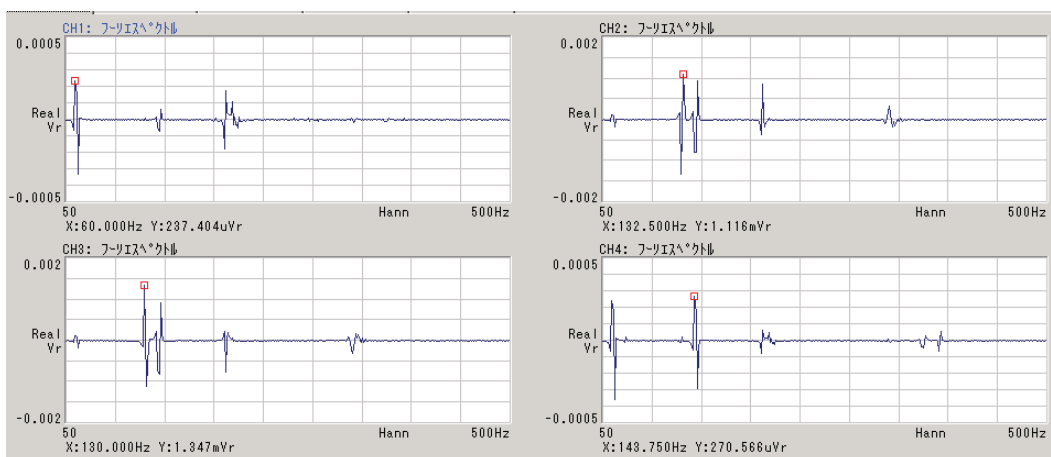
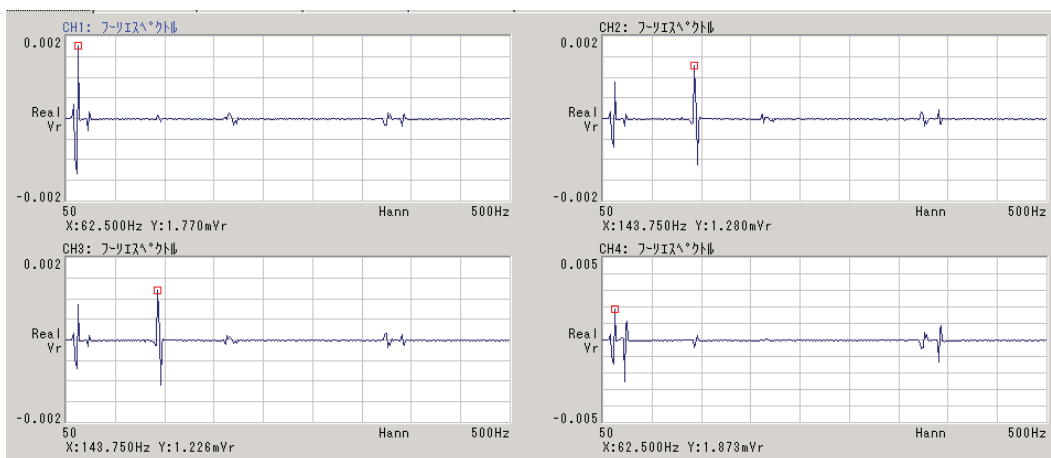


図 4-16 アクセスパネル単体のハンマリング試験時の加速度測定位置

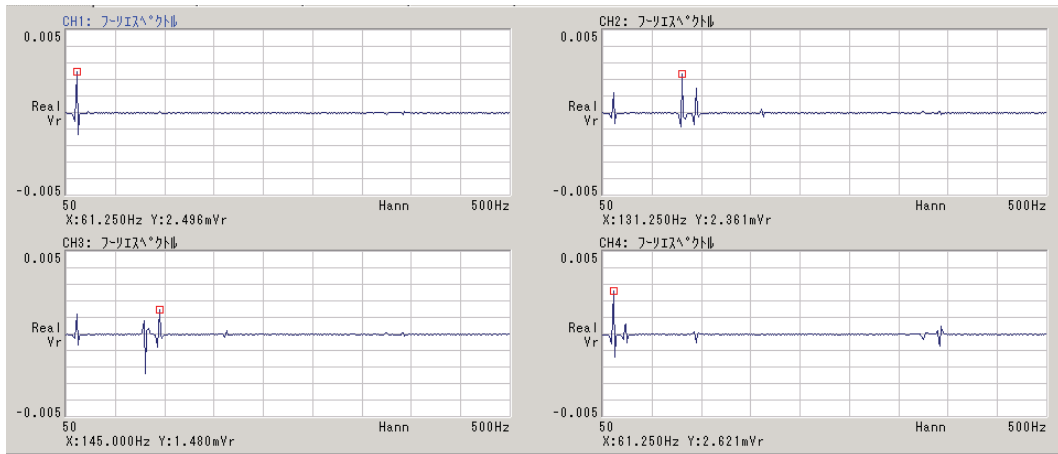


(a) 加振点 1



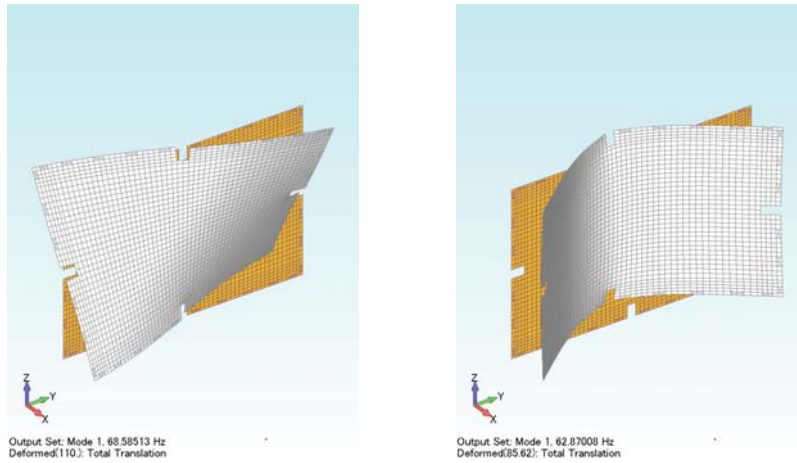
(b) 加振点 2

図 4-17 アクセスパネル単体のハンマリング試験での測定結果 (1/2)

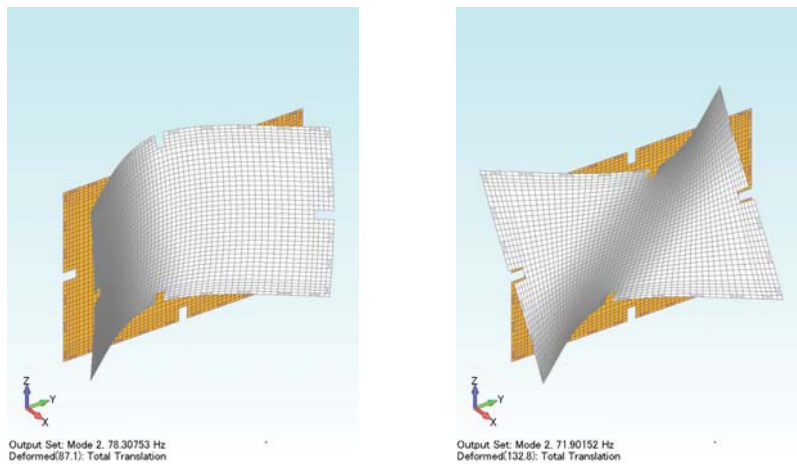


(c) 加振点 3

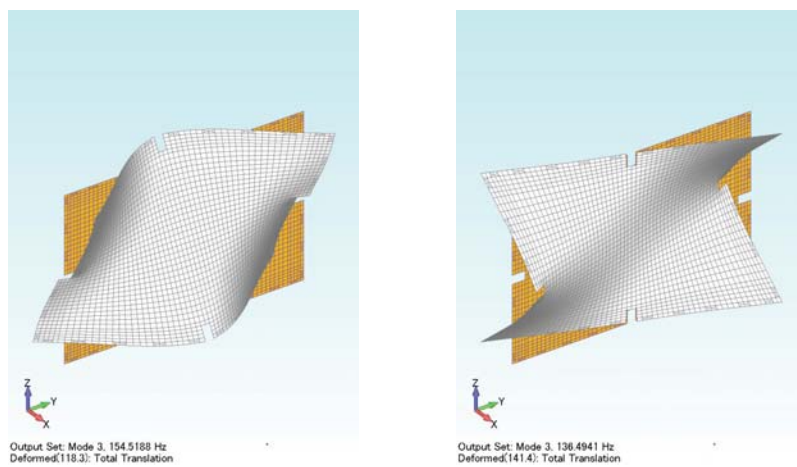
図 4-17 アクセスパネル単体のハンマリング試験での測定結果(2/2)



(a) 1次モード (左: パネル端材の物性、右: コリレーション後)



(b) 2次モード (左: パネル端材の物性、右: コリレーション後)



(c) 3次モード (左: パネル端材の物性、右: コリレーション後)

図 4-18 アクセスパネル単体のモード形状

(b) ミッションパネル単体のモーダルサーベイ

同様に、ミッションパネル単体を十分に柔らかいゴムによって吊り、インパクトハンマーで加振してモーダルサーベイを行った。加速度センサの設置位置を図 4-19 に、ハンマリング試験の試験結果を図 4-20 にそれぞれ示す。これより、ミッションパネルの固有振動数は 1 次モード 103Hz、2 次モード 118Hz、3 次モード 206Hz であることが分かった。

ミッションパネル単体の FEM モデルを用いて物性の合わせ込みを行った。アクセスパネルと同様に、等方性の物性では一致しなかったため、直交異方性の物性として定義した。表 4-11 にモデルの変更点を、表 4-12 にコリレーション後の固有振動数をそれぞれ示す。図 4-21 にモード形状を示す。

表 4-11 モデル変更点 (ミッションパネル単体)

変更項目	変更前	変更後
アクセスパネル：材料物性	(等方性) 縦弾性率 E : 68.65GPa	(直交異方性) 弾性率 G11 : 56.88GPa 弾性率 G22 : 56.88GPa 弾性率 G33 : 4.41GPa

表 4-12 固有値解析結果 (ミッションパネル単体)

モード 次数	固有振動数 [Hz]		
	パネル端材での物性	コリレーション後	モーダルサーベイ
1	158	101	103
2	219	118	118
3	220	215	206

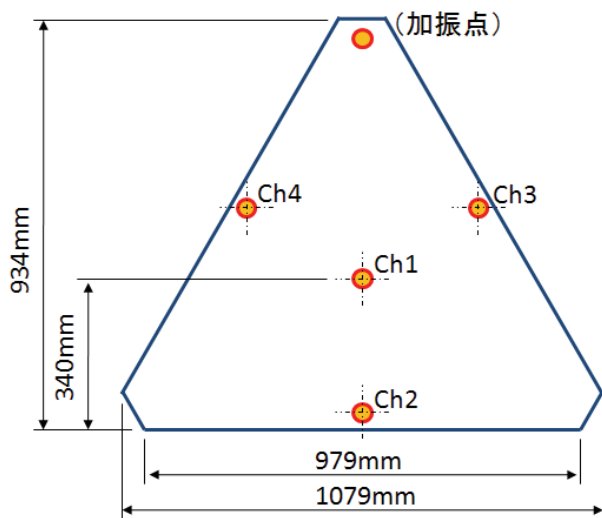


図 4-19 ミッションパネルのハンマリング試験における加速度測定位置

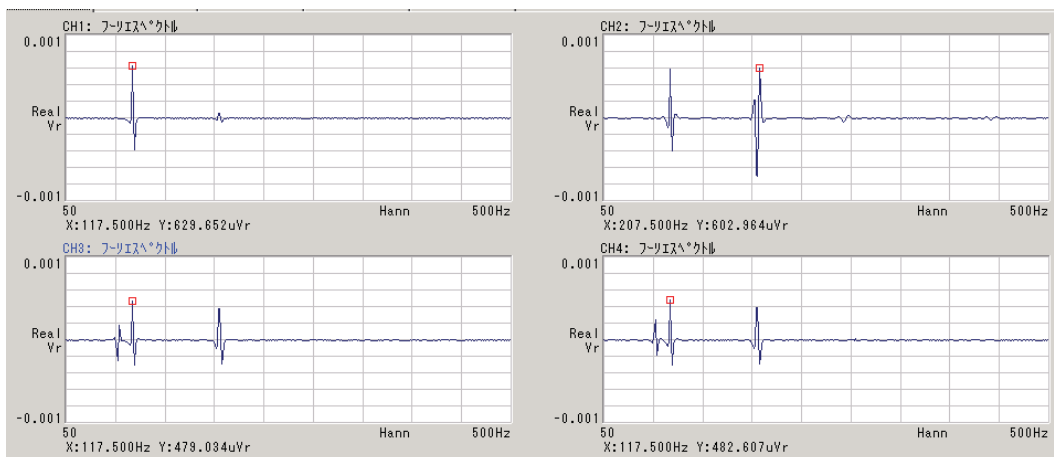
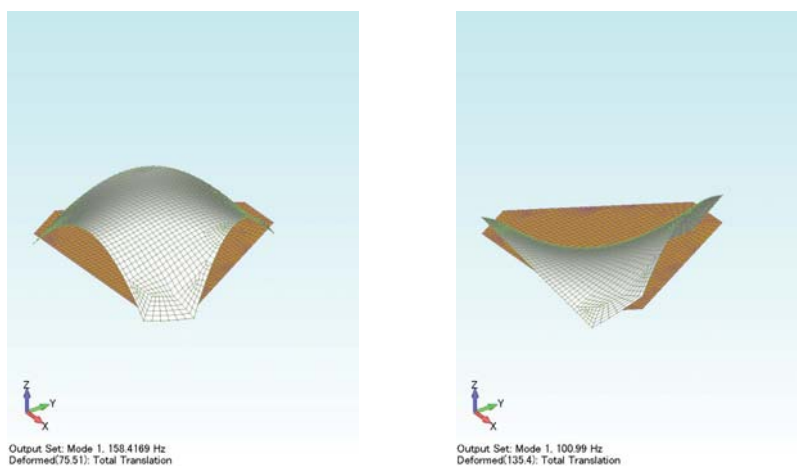
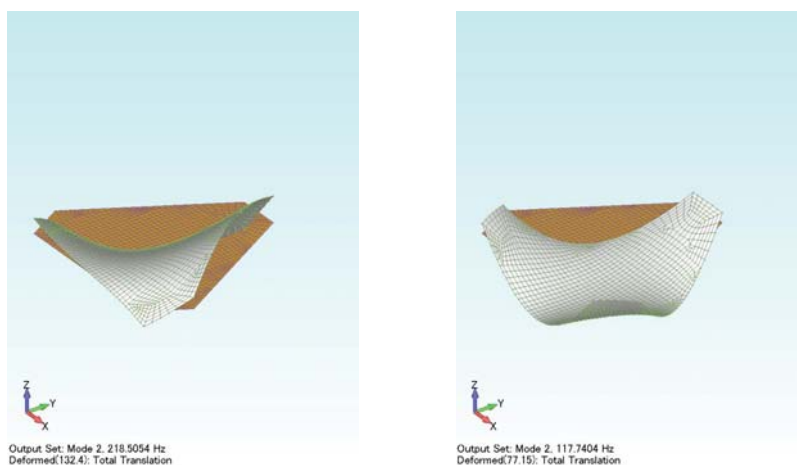


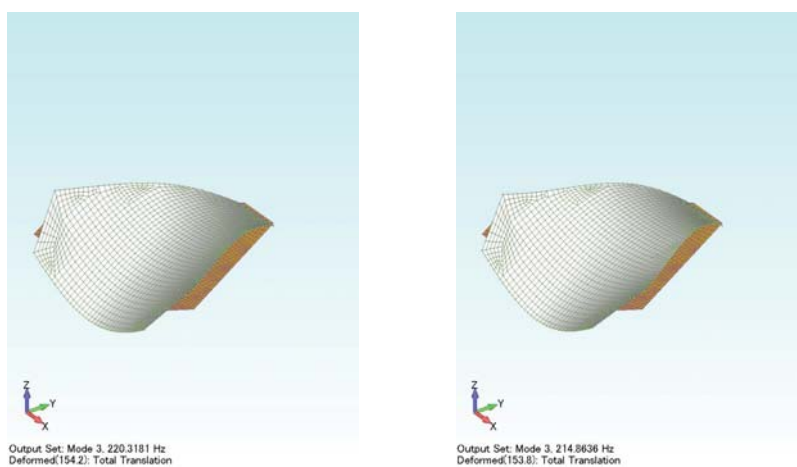
図 4-20 ミッションパネルのハンマリング試験の測定結果



(a) 1次モード (左：パネル端材の物性、右：コリレーション後)



(b) 2次モード (左：パネル端材の物性、右：コリレーション後)



(c) 3次モード (左：パネル端材の物性、右：コリレーション後)

図 4-21 ミッションパネル単体のモード形状

(c) 鏡面模擬パネル単体のモーダルサーベイ

さらに同様に、鏡面模擬パネル単体を十分に柔らかいゴムによって吊り、インパクトハンマーで加振してモーダルサーベイを行った。加速度センサの設置位置を図 4-22 に、ハンマリング試験の試験結果を図 4-23 にそれぞれ示す。これより、鏡面模擬パネルの固有振動数は 1 次モード 95Hz、2 次モード 210Hz、3 次モード 339Hz であることが分かった。

鏡面模擬パネル単体の FEM モデルを用いて、物性の合わせ込みを行った。アクセスパネルと同様に、等方性の物性では一致しなかったため、直交異方性の物性として定義した。表 4-13 にモデルの変更点を、表 4-14 にコリレーション後の固有振動数を示す。図 4-24 にモード形状を示す。

表 4-13 モデル変更点（鏡面模擬パネル単体）

変更項目	変更前	変更後
アクセスパネル：材料物性	(等方性) 縦弾性率 E : 68.65GPa	(直交異方性) 弾性率 G11 : 56.88GPa 弾性率 G22 : 56.88GPa 弾性率 G33 : 4.41GPa

表 4-14 固有値解析結果（鏡面模擬パネル単体）

モード 次数	固有振動数 [Hz]		
	パネル端材での物性	コリレーション後	モーダルサーベイ
1	212	95	95
2	212	213	210
3	359	267※	—※
4	459	349	339

※モーダルサーベイでは加振位置がこのモードの腹となる部分になり、励振されなかった。

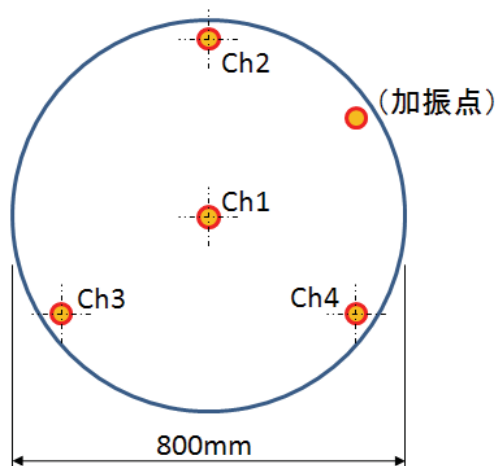


図 4-22 鏡面模擬パネルのハンマリング試験における加速度測定位置

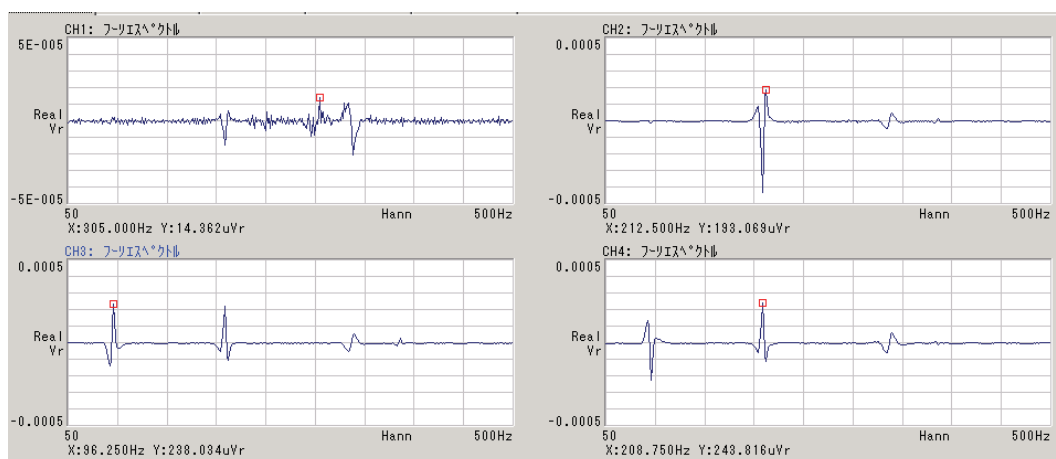
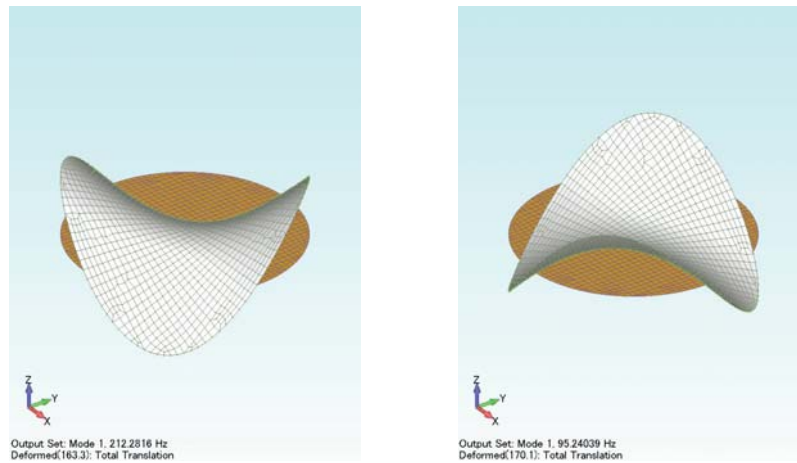
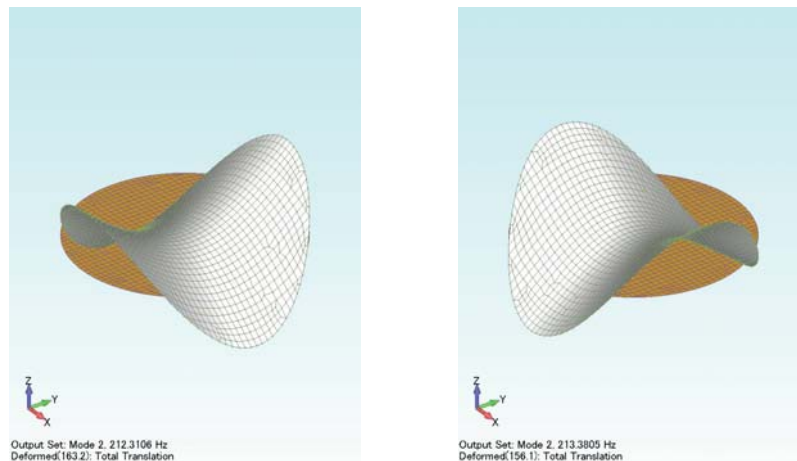


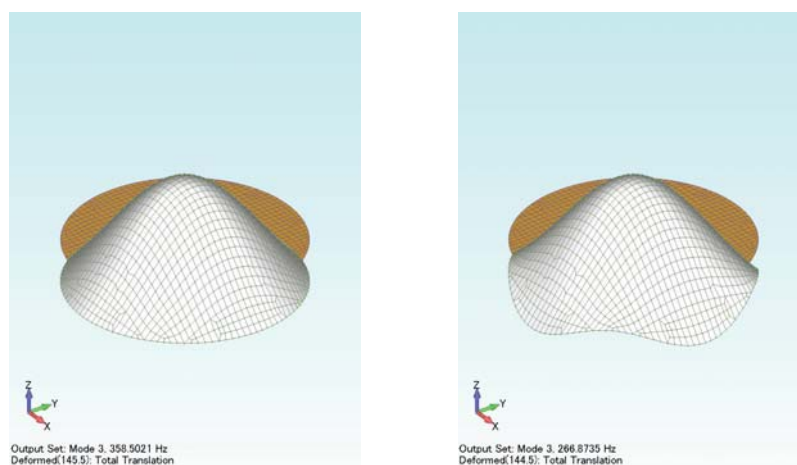
図 4-23 鏡面模擬パネルのハンマリング試験の測定結果



(a) 1次モード (左: パネル端材の物性、右: コリレーション後)



(b) 2次モード (左: パネル端材の物性、右: コリレーション後)



(c) 3次モード (左: パネル端材の物性、右: コリレーション後)

図 4-24 鏡面模擬パネル単体のモード形状

4.4.3. コリレーション後の有限要素モデルと固有値解析結果

トラス部材のハンマリング試験や各パネル単体でのモーダルサーベイのコリレーション結果を用いて、0次モデルのコリレーションを行った。各物性は個別のコリレーションで得られた結果を用いている。また、バス部の構体パネルの物性はアクセスパネルと同様に直交異方性を考慮し、モーダルサーベイの結果に合うように弾性率を合わせこんだ。各構体パネルにおいても、パネル間結合部のインサートをモデル化した。また、フィッティングやインサートのモデル化に合わせて、質量の合わせ込みも行った。

コリレーション後の FEM モデルを図 4-25 に、インサートをモデル化した部分を図 4-26 にそれぞれ示す。コリレーション後に最終的に使用している FEM モデルの要素の種類を表 4-16 に、使用している各物性を表 4-17 にそれぞれ示す。そして、コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果を表 4-18 に、モード形状を図 4-27 にそれぞれ示す。FEM モデルの固有値解析結果とモーダルサーベイ結果とのモードの対応を表 4-19 に、それぞれのモード形状の比較を図 4-28 に示す。

300Hz までのモードが固有振動数の誤差が $\pm 10\%$ 以内で同定されており、モード形状もよく一致している。一部のモードがモーダルサーベイで該当するものが無かったのは、試験でそのモードが励振されなかったためと思われる。また、モードの順番が解析と試験で入れ替わっているものがあるが、これらは各パネルのローカルなモードをさらに正確に合わせ込めば、より正確にコリレーションができると考えられる。また、ボルト結合は剛体もしくは十分に剛なバネ要素を用いてモデル化しているが、高次のモードではこの合わせこみを行うことによりさらに正確なコリレーションができると期待できる。

なお、本報告書の付録 3 にはコリレーション後の FEM モデルの源泉である Nastran 入力バルクデータの一部を掲載している。

表 4-15 FEM モデルに使用した要素と物性（コリレーション後）(1/6)

部品名称	使用した要素	備考
ミッション部パネル 構体パネル アウトリガー	プレート要素	ハニカムの中立面位置でモデル化 ハニカム板としての質量、剛性を考慮した物性を使用。CFRP クロス材の直交異方性を考慮
アダプターリング	プレート要素	
タンク模擬構造	モデル化せず	モーダルサーベイにおいて搭載していなかったため、モデル化は未実施
ミッション部トラス	ビーム要素	
ミッション部トラス フィッティング	質量要素	
構体結合フィッティング	バネ要素	構体結合フィッティング部分には、モーダルサーベイにおいてフォースリンクを挟んでいたため、そのフォースリンクの剛性をモデル化
ボルト結合	剛体要素	構体パネル同士の結合のモデル化に使用
	バネ要素	ミッション部トラスとミッション部トラスフィッティングとの結合はボルト1本で締結されており、剛には結合されていないため、バネ要素を使用

表 4-15 FEM モデルに使用した要素と物性（コリレーション後）(2/6)

鏡面模擬パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	56.88
		弾性率 G22(GPa)	56.88
		弾性率 G33(GPa)	4.41
		弾性率 G12(GPa)	0
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性（コア）：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	材料物性 (インサート)：	縦弾性率 E(GPa)	70.61
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	3.901
ミッションパネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	56.88
		弾性率 G22(GPa)	56.88
		弾性率 G33(GPa)	4.41
		弾性率 G12(GPa)	0
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性（コア）：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	材料物性 (インサート)：	縦弾性率 E(GPa)	70.61
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	31.5
		曲げ剛性 ^{※1}	1261
		面積密度(kg/m ²)：	
	(ハニカムコア部)	3.942	
	(インサート部)	84.837	

表 4-15 FEM モデルに使用した要素と物性（コリレーション後）(3/6)

上面パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	77.59
		弾性率 G22(GPa)	77.59
		弾性率 G33(GPa)	27.16
		弾性率 G12(GPa)	23.28
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	材料物性 (インサート)：	縦弾性率 E(GPa)	70.61
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	5.259
インナーパネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	77.59
		弾性率 G22(GPa)	77.59
		弾性率 G33(GPa)	27.16
		弾性率 G12(GPa)	23.28
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	材料物性 (インサート)：	縦弾性率 E(GPa)	70.61
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	6.024

表 4-15 FEM モデルに使用した要素と物性（コリレーション後）(4/6)

アクセスパネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	80.82
		弾性率 G22(GPa)	80.82
		弾性率 G33(GPa)	28.29
		弾性率 G12(GPa)	24.25
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性（コア）：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	材料物性 (インサート)：	縦弾性率 E(GPa)	70.61
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	6.005
側面パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	77.59
		弾性率 G22(GPa)	77.59
		弾性率 G33(GPa)	27.16
		弾性率 G12(GPa)	23.28
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性（コア）：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	材料物性 (インサート)：	縦弾性率 E(GPa)	70.61
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	5.448

表 4-15 FEM モデルに使用した要素と物性（コリレーション後）(5/6)

下面パネル： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	48.49
		弾性率 G22(GPa)	48.49
		弾性率 G33(GPa)	16.97
		弾性率 G12(GPa)	14.55
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	材料物性 (インサート)：	縦弾性率 E(GPa)	70.61
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
曲げ剛性 ^{※1}		331	
面積密度(kg/m ²)		6.173	
アウトリガー： (CFRP/Al コア サンドイッチ板)	材料物性： (直交異方性)	弾性率 G11(GPa)	77.59
		弾性率 G22(GPa)	77.59
		弾性率 G33(GPa)	27.16
		弾性率 G12(GPa)	23.28
		弾性率 G13(GPa)	0
		弾性率 G23(GPa)	0
	材料物性 (コア)：	せん断弾性率 G(GPa)	0.1117
	要素物性： (サンドイッチ板を 模擬したプレート)	スキン厚さ t(mm)	1.5
		全体厚さ H(mm)	16.5
		曲げ剛性 ^{※1}	331
		面積密度(kg/m ²)	3.386
アダプターリング： (CFRP 積層板)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	4500
		ポアソン比	0.3
	要素物性： (プレート)	厚さ t(mm)	5
		面積密度(kg/m ²)	8.641

表 4-15 FEM モデルに使用した要素と物性 (コリレーション後) (6/6)

ミッション部トラス： (CFRP チューブ)	材料物性： (等方性)	縦弾性率 E(GPa)	51.96
		ポアソン比	0.3197
	要素物性： (ビーム)	断面積 A(mm ²)	134.3
		断面 2 次モーメント I1(mm ⁴)	13674
		断面 2 次モーメント I2(mm ⁴)	13674
		ねじり定数 J(mm ³ /rad)	27342
		線密度(kg/m)	0.3021
構体結合フィッティング： (フォースリンク) ※2	要素物性： (バネ)	K1(kN/μm)	0.7
		K2(kN/μm)	0.7
		K3(kN/μm)	1.75
		K4((kN・μm)/rad)	29.4
		K5((kN・μm)/rad)	29.4
		K6((kN・μm)/rad)	0.1
	要素物性： (質量)	質量(kg) (6 点)	0.862×6 点
トラスフィッティング (Al 削り出し)	要素物性： (質量)	質量(kg) (上側)	0.5547
		質量(kg) (下側)	0.4079
トラス結合ボルト： (1 点締結)	要素物性： (バネ)	K1(kN/μm)	100000
		K2(kN/μm)	100000
		K3(kN/μm)	100000
		K4((kN・μm)/rad)	100000
		K5((kN・μm)/rad)	100000
		K6((kN・μm)/rad)	100000

※1 曲げ剛性は、サンドイッチ板の剛性をプレート要素で模擬するための仮想的な剛性であり、以下の式で算出される。

$$\frac{H^3 - (H-t)^3}{t^3}$$

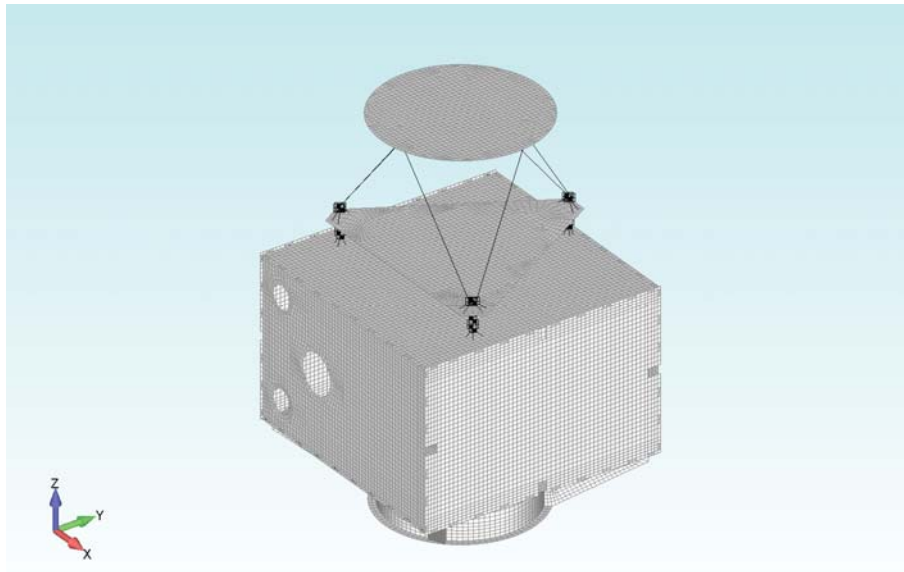
※2 初期モデルでは CRRP チューブ

表 4-16 固有値解析結果（コリレーション後）

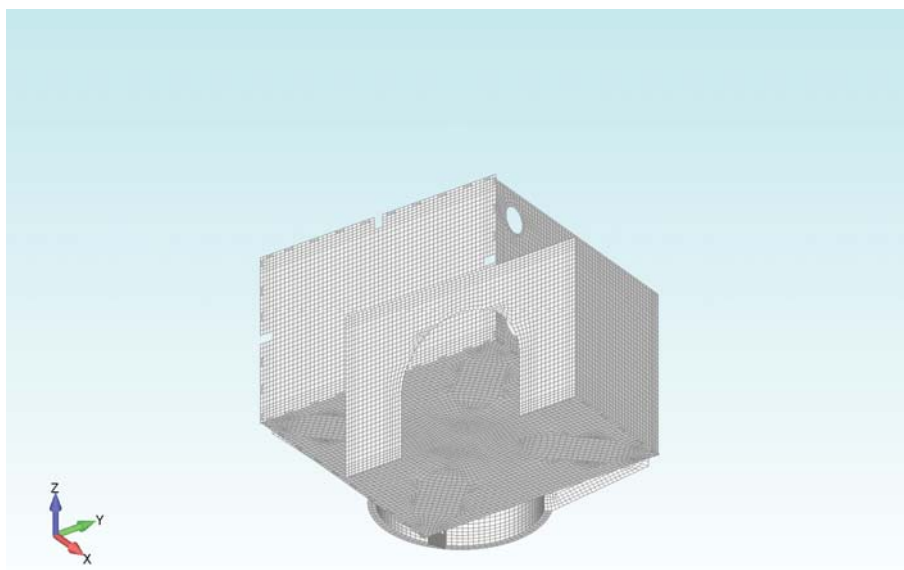
モード 次数	固有振動数 [Hz]		
	0次モデル	コリレーション後	モーダルサーベイ
1	97	98	102
2	98	113	114
3	120	115	121
4	135	131	135
5	140	139	143
6	145	143	143
7	160	147	156
8	162	148	159
9	165	159	151
10	182	160	163
11	187	182	178
12	192	183	190
13	193	188	203
14	200	199	217
15	201	212	227
16	207	228	234
17	225	237	242
18	229	240	247
19	233	242	249
20	236	245	256
21	239	251	264
22	240	254	269
23	247	262	276
24	250	269	290
25	251	284	296
26	272	288	309
27	276	292	315
28	-	-	325
29	-	-	329
30	-	-	333
31	-	-	347

表 4-17 固有値解析結果とモーダルサーベイとの対応

FEM モデル (コリレーション後)		モーダルサーベイ		誤差 [%]
モード 次数	固有振動数 [Hz]	モード 次数	固有振動数 [Hz]	
1	98	1	102	3.98
2	113	2	114	0.44
3	115	3	121	5.38
4	131	4	135	3.05
5	139	6	143(142.7)	3.02
6	143	5	143(143.4)	-0.49
7	147	7	156	5.63
8	148	8	159	6.87
9	159	10	163	2.90
10	160	9	161	0.75
11	182	該当なし	該当なし	-
12	183	11	178	-2.68
13	188	12	190	1.12
14	199	13	203	2.01
15	212	14	217	2.46
16	228	15	227	-0.35
17	237	16	234	-1.48
18	240	20	256	6.28
19	242	18	247	2.07
20	245	19	249	1.63
21	251	17	242	-3.90
22	254	該当なし	該当なし	-
23	262	該当なし	該当なし	-
24	269	24	290	7.62
25	284	26	309	8.95
26	288	27	315	9.30
27	292	29	329	12.93

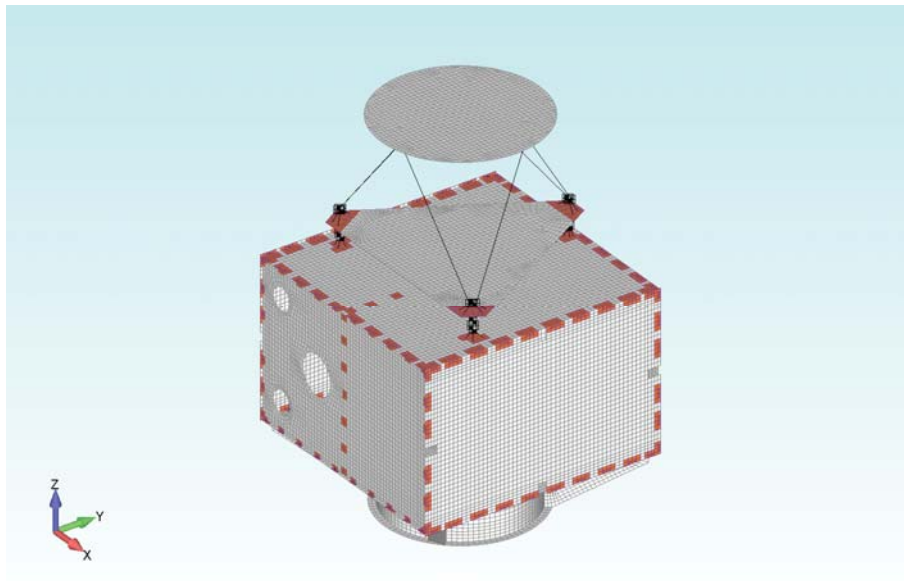


(a) 全体

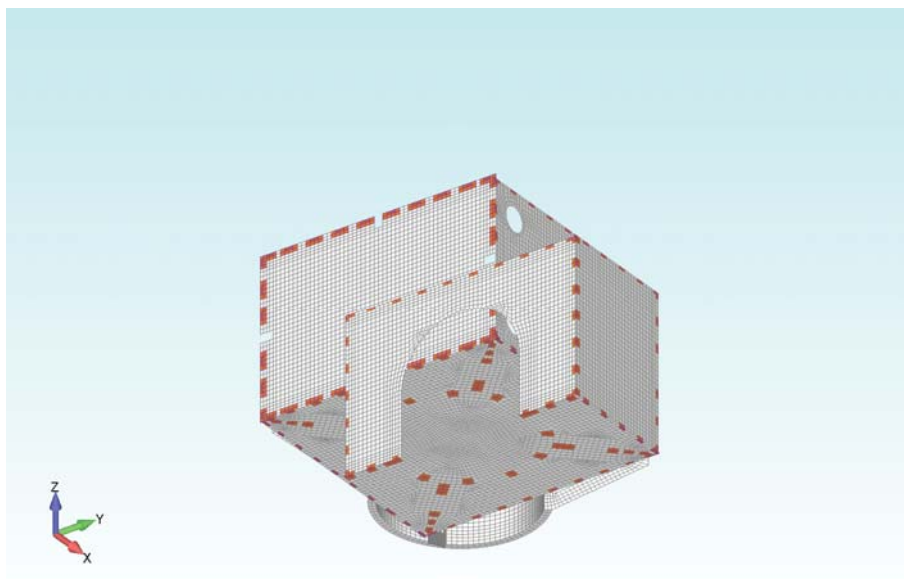


(b) 構体内部

図 4-25 FEM モデル (コリレーション後)



(a) 全体



(b) 構体内部

図 4-26 インサートの物性をモデル化した部分（オレンジ色の部分）

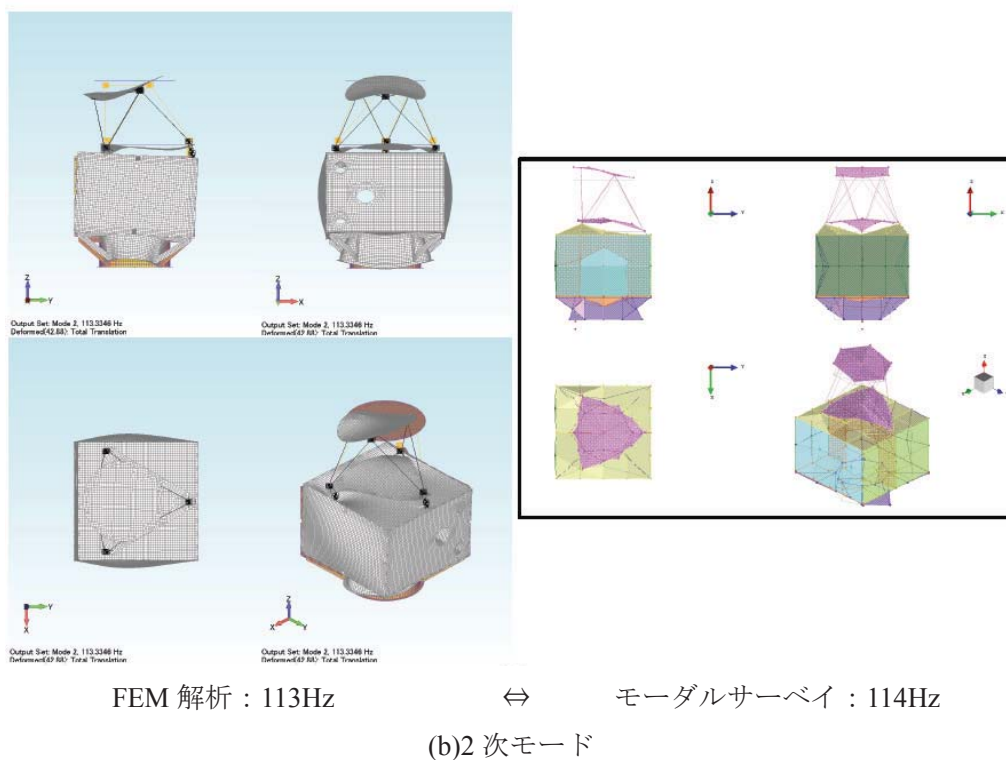
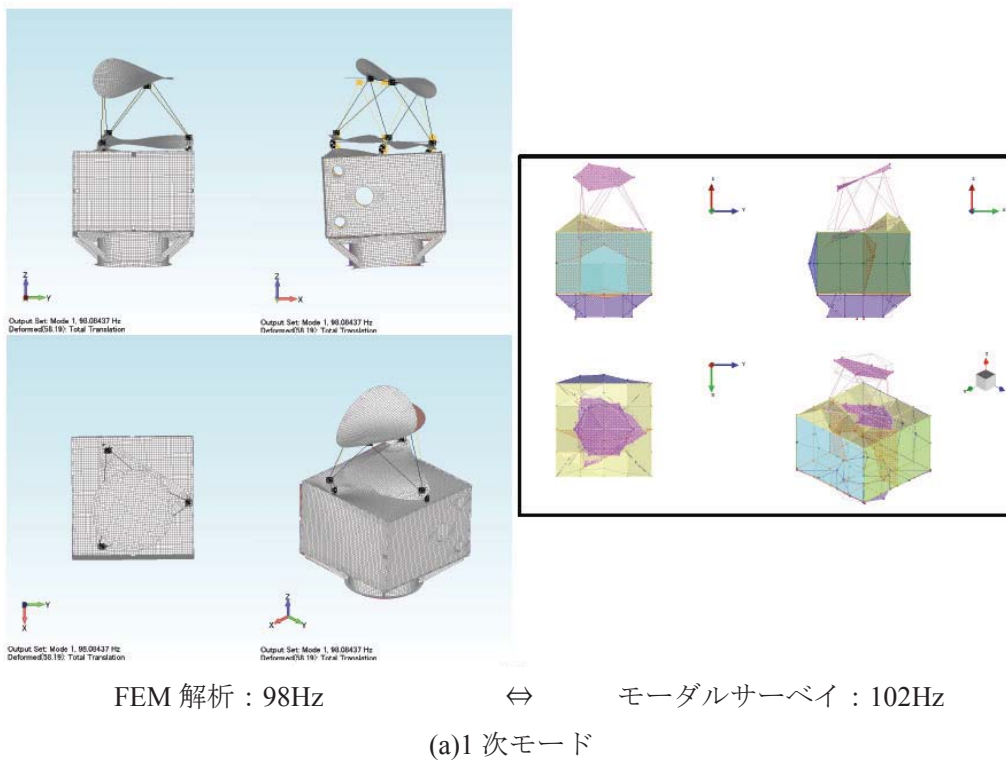
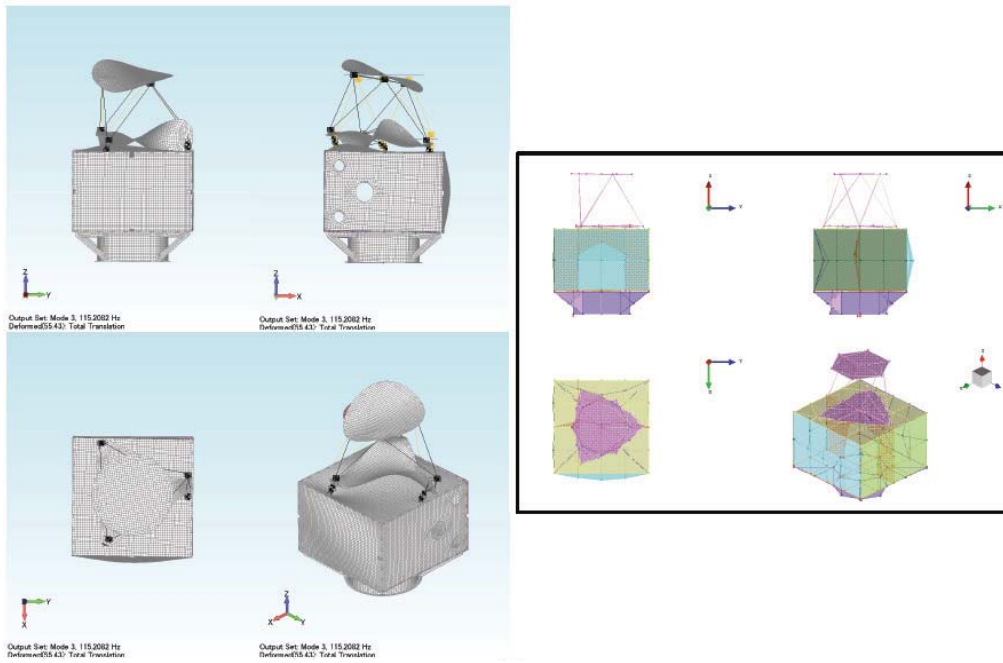


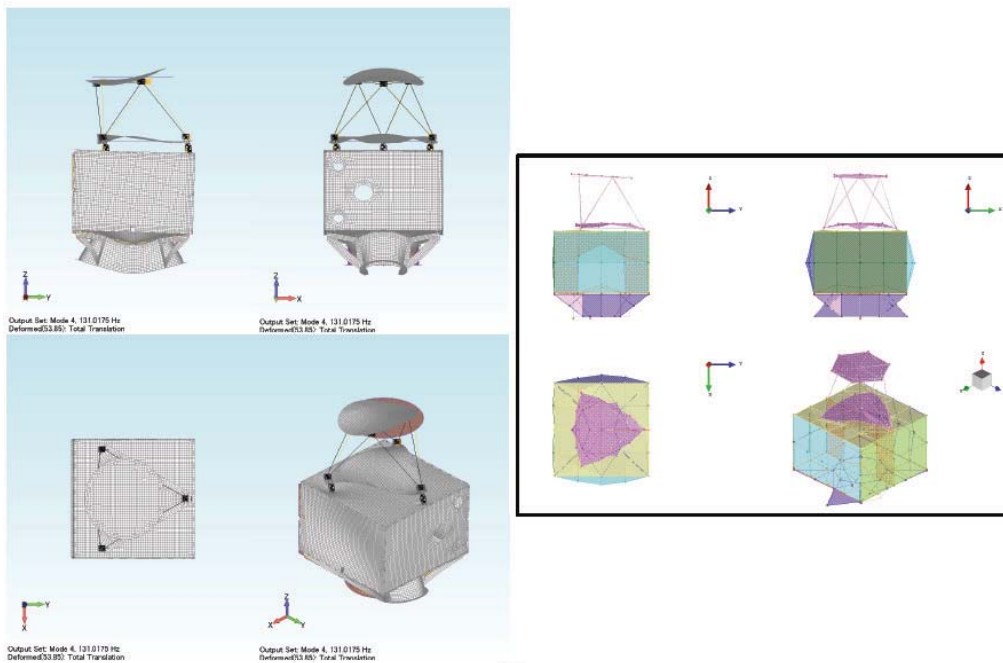
図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
 とモーダルサーベイとのモード形状の比較(1/14)



FEM 解析 : 115Hz

⇔ モーダルサーベイ : 121Hz

(c)3 次モード

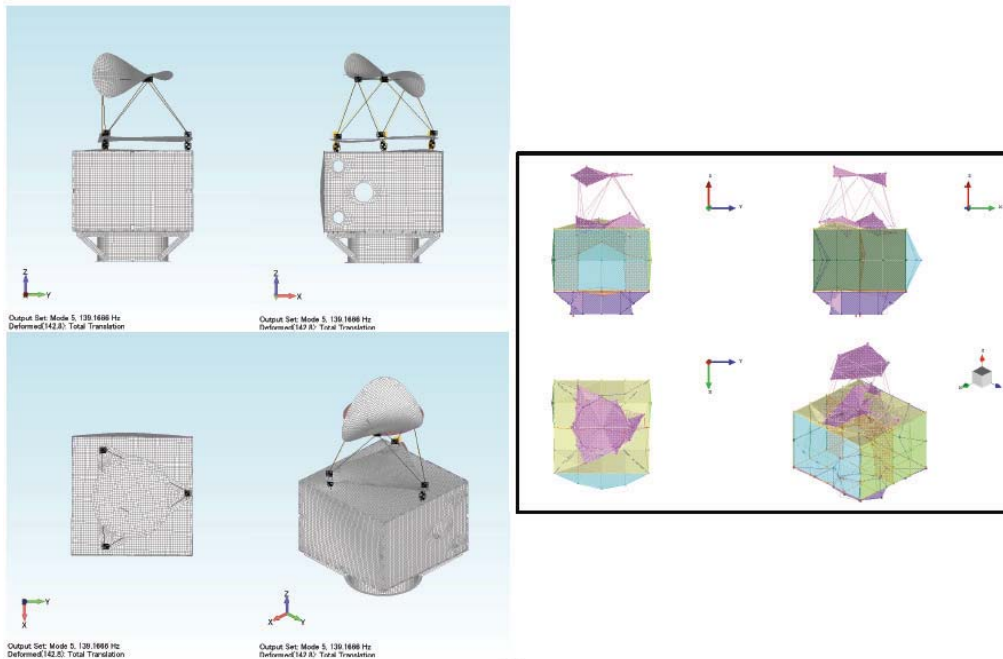


FEM 解析 : 131Hz

⇔ モーダルサーベイ : 135Hz

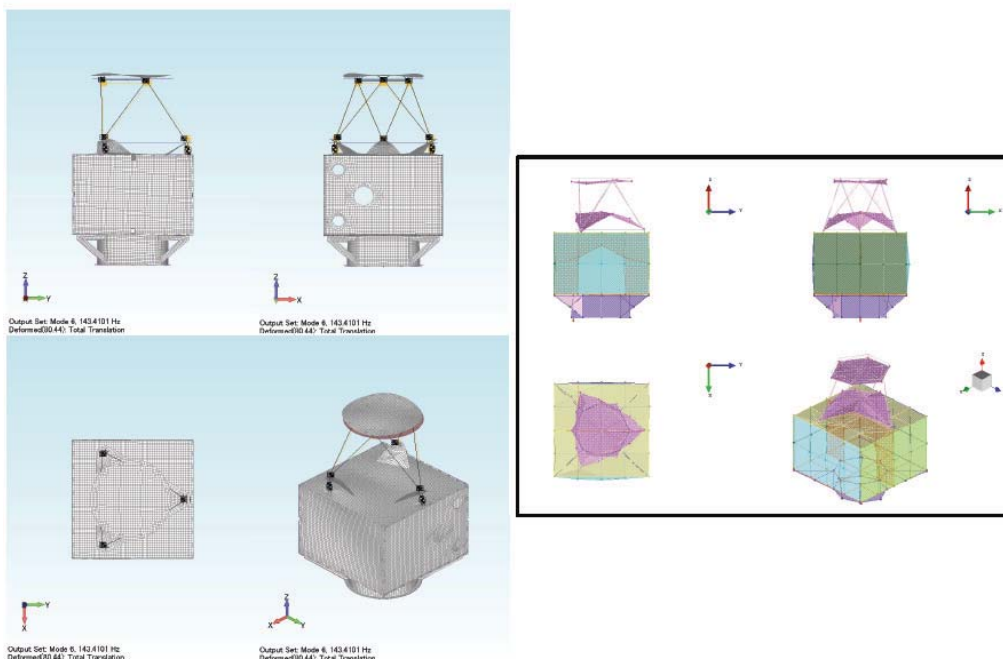
(d)4 次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(2/14)



FEM 解析 : 139Hz

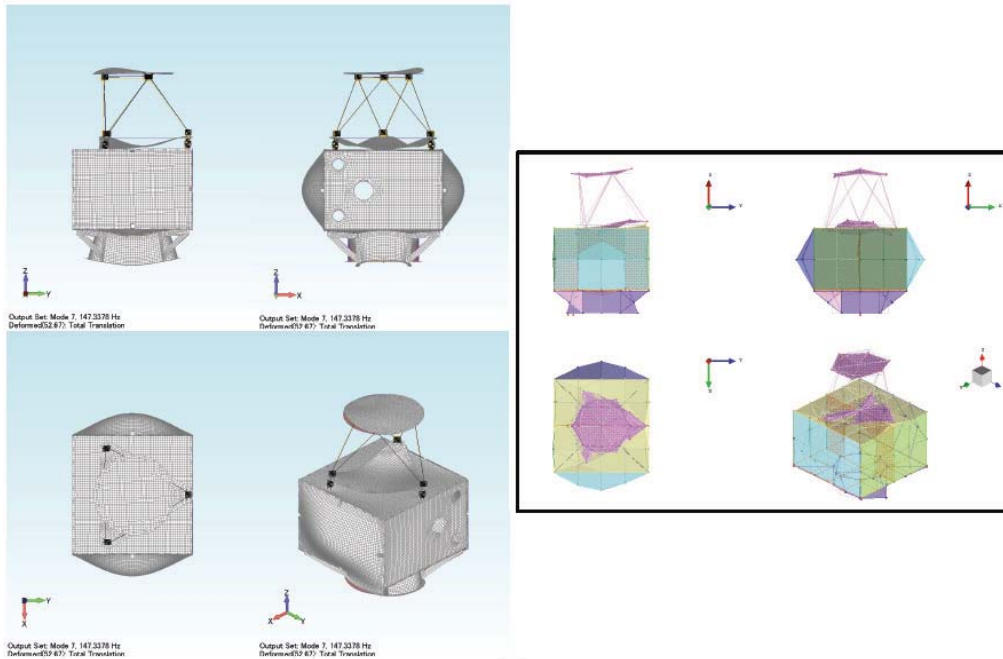
⇔ モーダルサーベイ : 143(143.4)Hz (6次モード)
(e)5次モード



FEM 解析 : 143Hz

⇔ モーダルサーベイ : 143(142.7)Hz (5次モード)
(f)6次モード

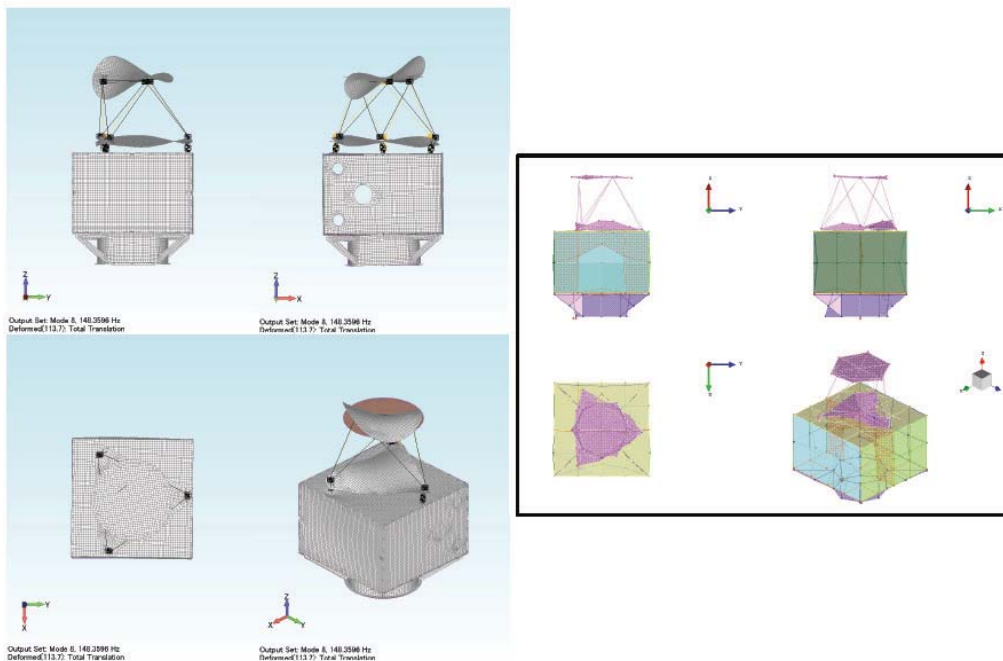
図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(3/14)



FEM 解析 : 147Hz

⇔ モーダルサーベイ : 156Hz

(g)7 次モード

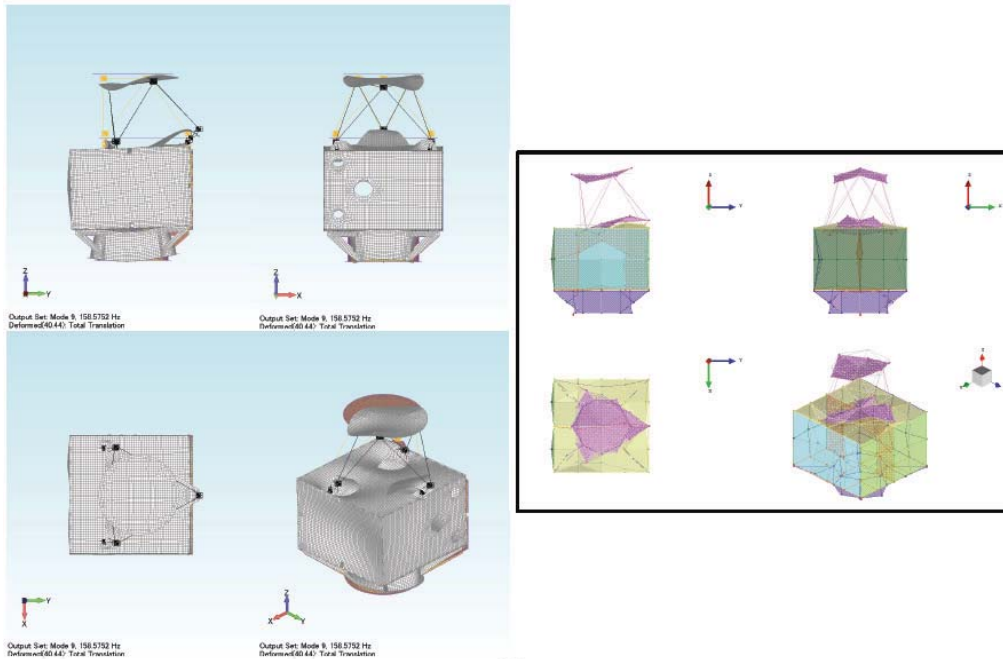


FEM 解析 : 148Hz

⇔ モーダルサーベイ : 159Hz

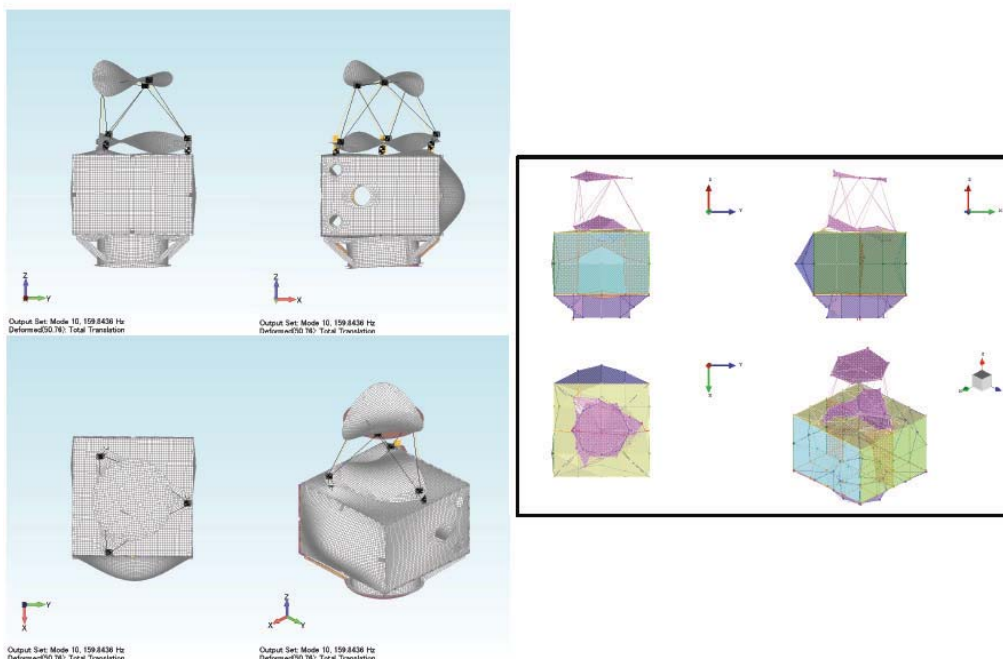
(h)8 次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(4/14)



FEM 解析 : 159Hz

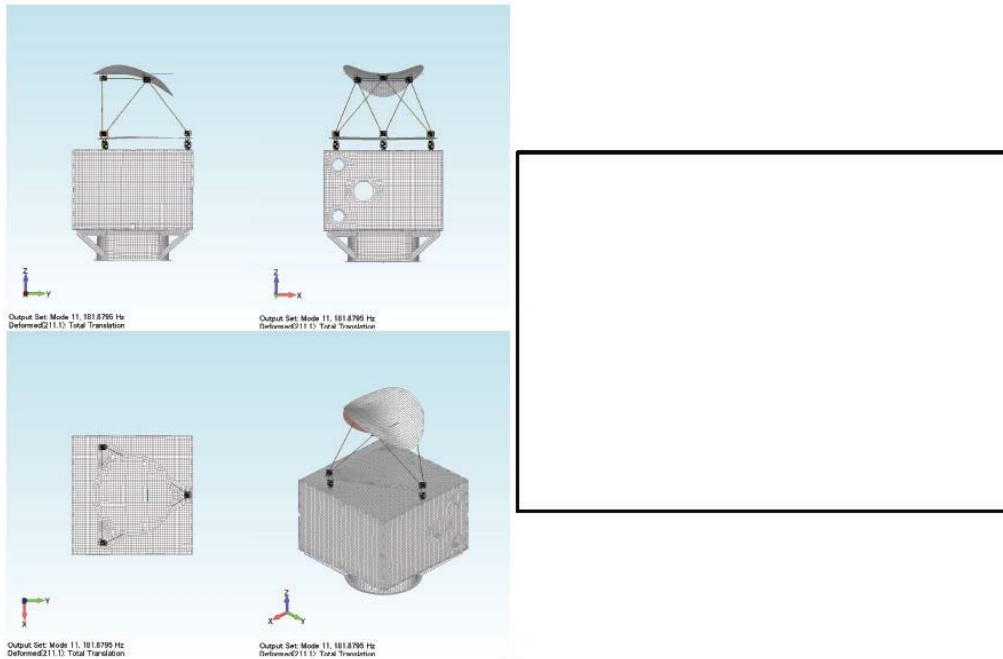
⇔ モーダルサーベイ : 163Hz (10次モード)
(i)9次モード



FEM 解析 : 160Hz

⇔ モーダルサーベイ : 161Hz (9次モード)
(j)10次モード

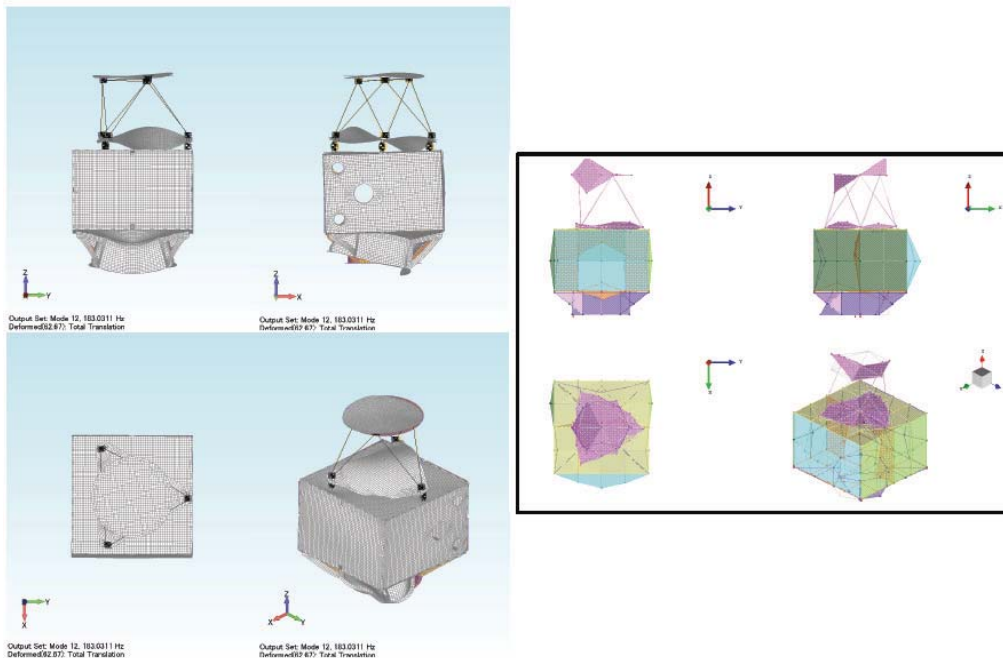
図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(5/14)



FEM 解析 : 182Hz

⇔ モーダルサーベイ : 該当なし

(k)11 次モード

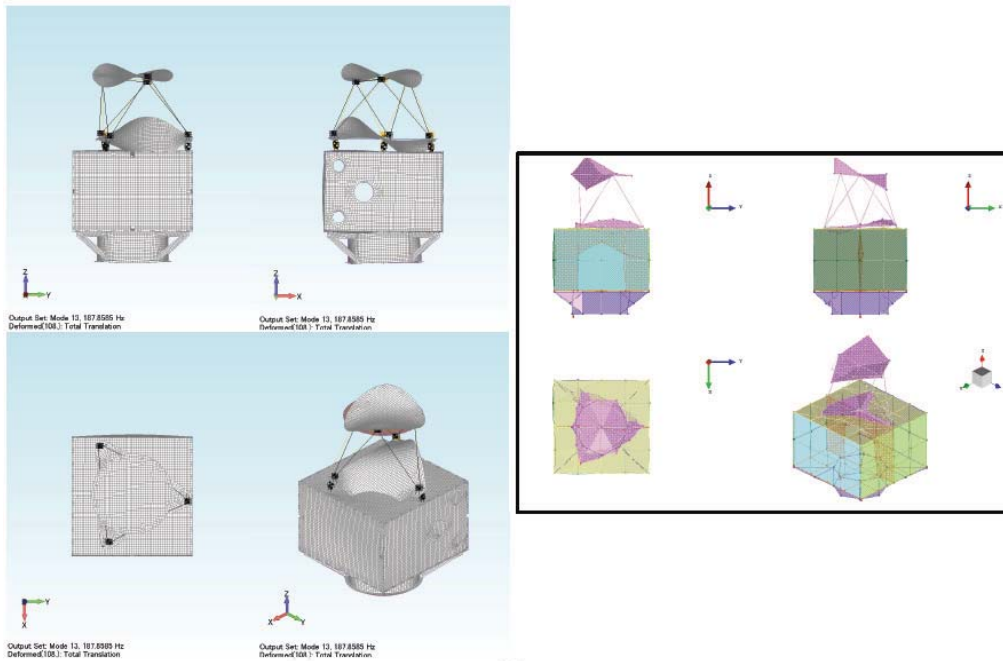


FEM 解析 : 183Hz

⇔ モーダルサーベイ : 178Hz (11 次モード)

(l)12 次モード

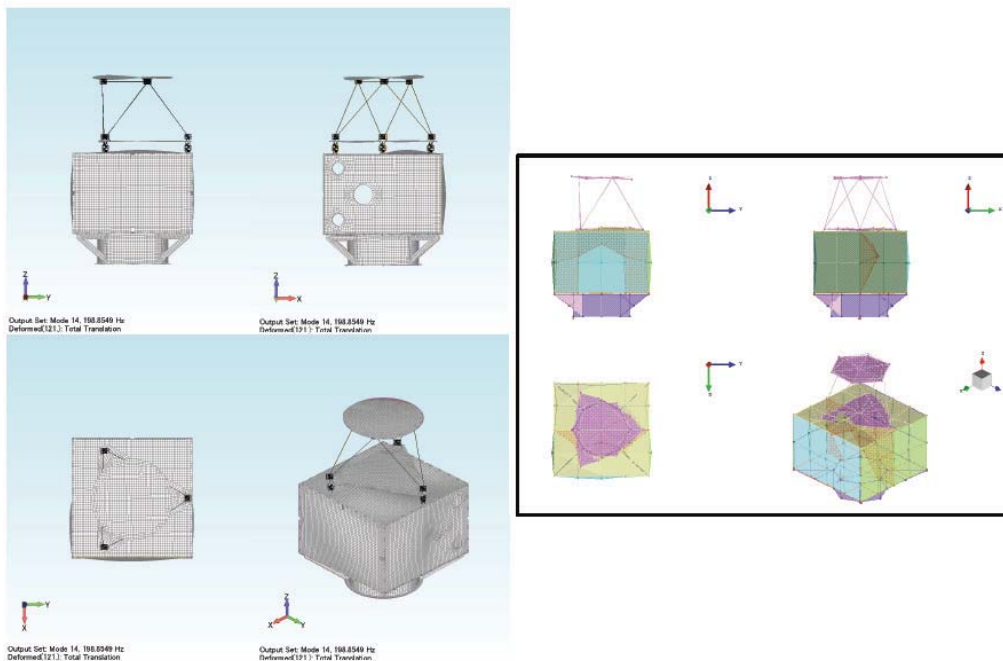
図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(6/14)



FEM 解析 : 188Hz

⇔ モーダルサーベイ : 190Hz (12次モード)

(m)13次モード

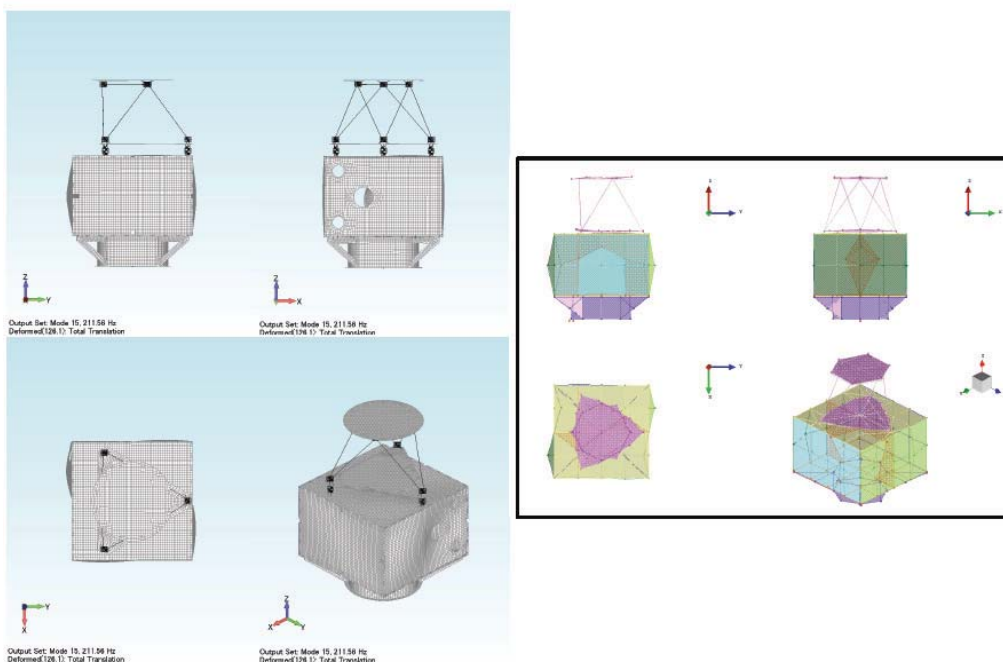


FEM 解析 : 199Hz

⇔ モーダルサーベイ : 203Hz (13次モード)

(n)14次モード

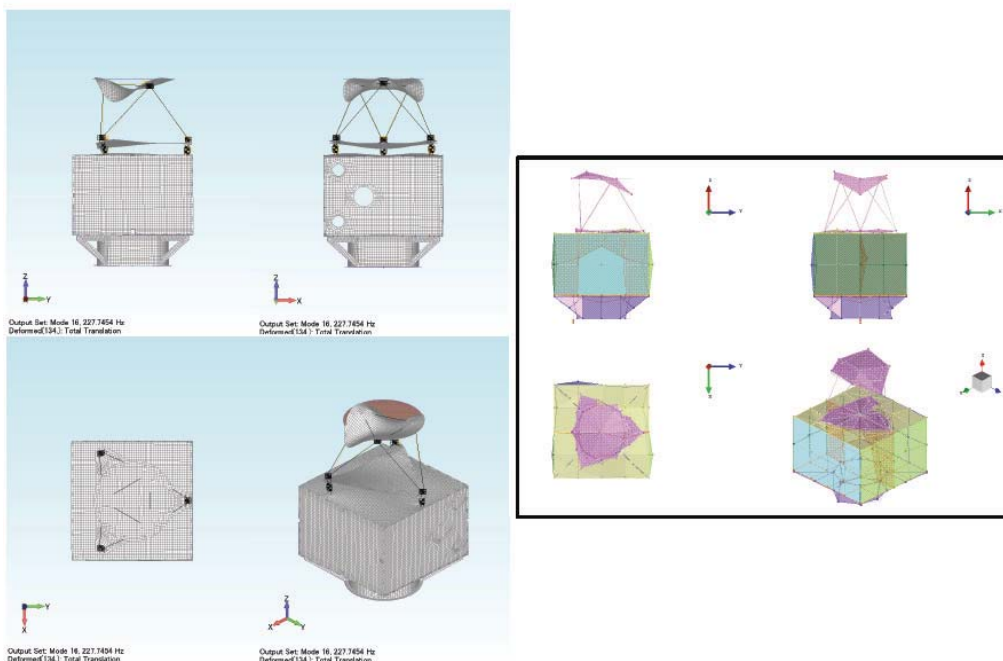
図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(7/14)



FEM 解析 : 212Hz

⇔ モーダルサーベイ : 217Hz (14次モード)

(o)15次モード

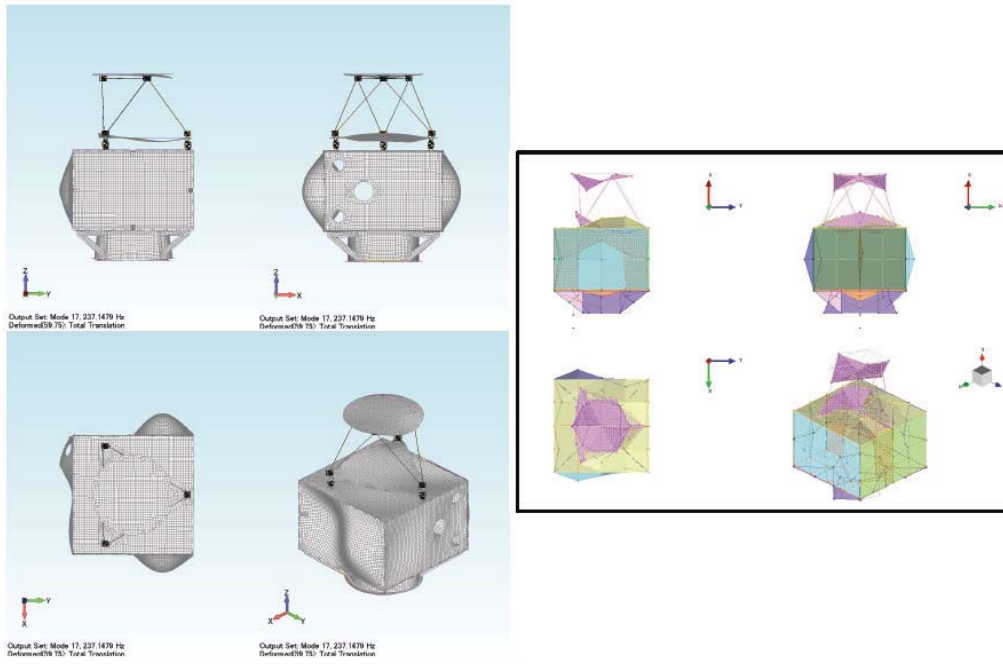


FEM 解析 : 228Hz

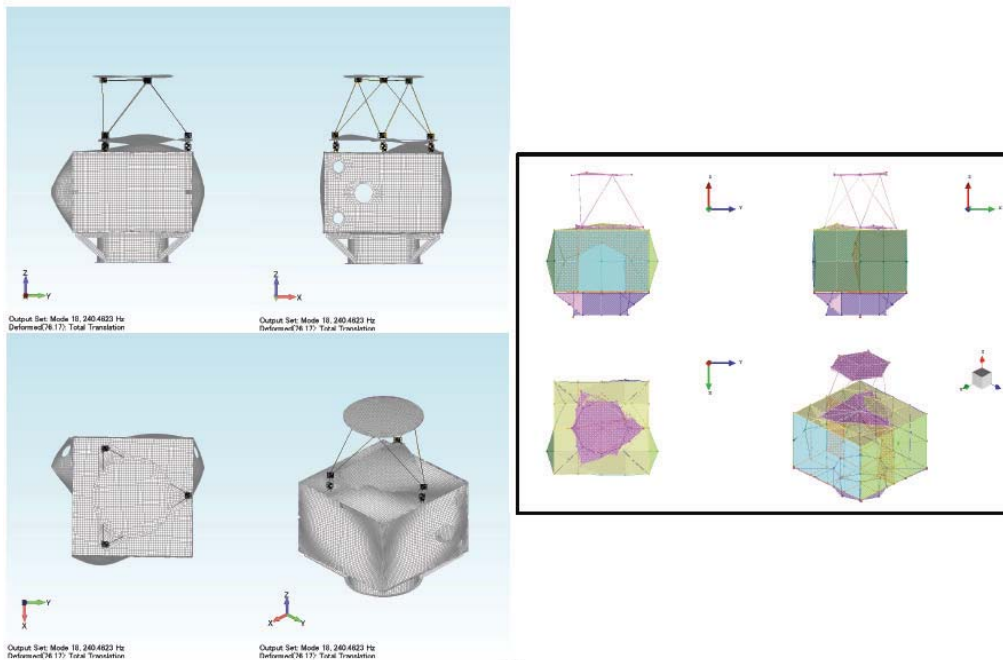
⇔ モーダルサーベイ : 227Hz (15次モード)

(p)16次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(8/14)

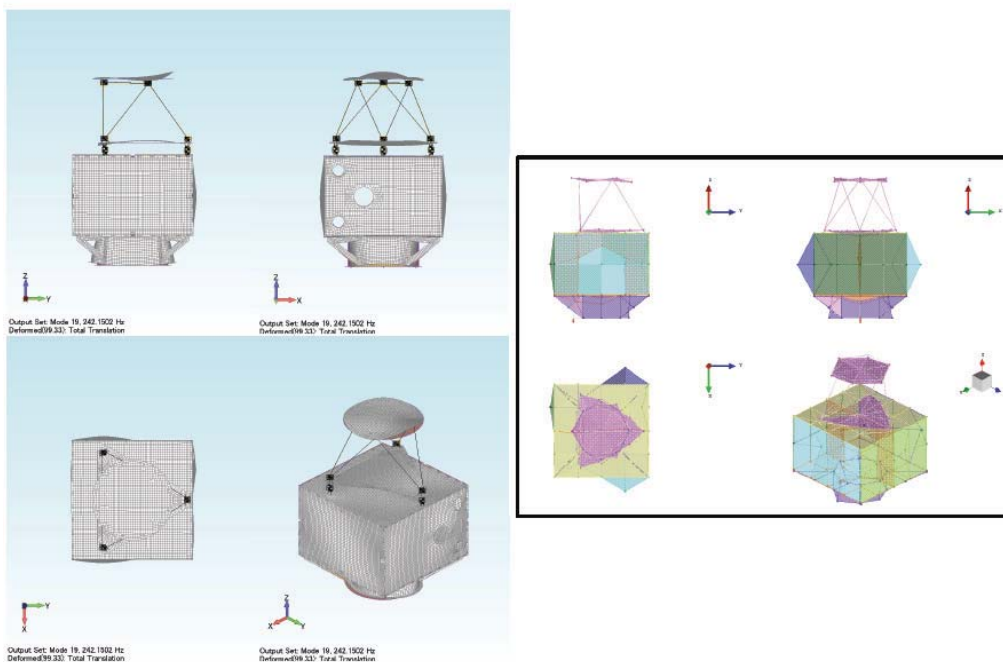


FEM 解析 : 237Hz ⇔ モーダルサーベイ : 234Hz (16 次モード)
(q)17 次モード



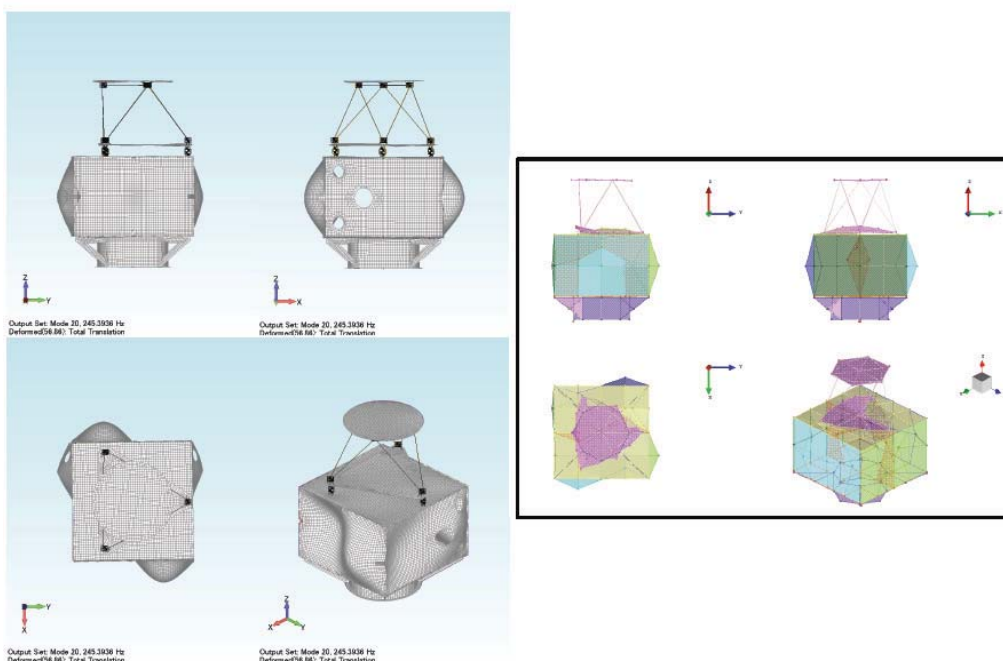
FEM 解析 : 240Hz ⇔ モーダルサーベイ : 256Hz (20 次モード)
(r)18 次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(9/14)



FEM 解析 : 242Hz

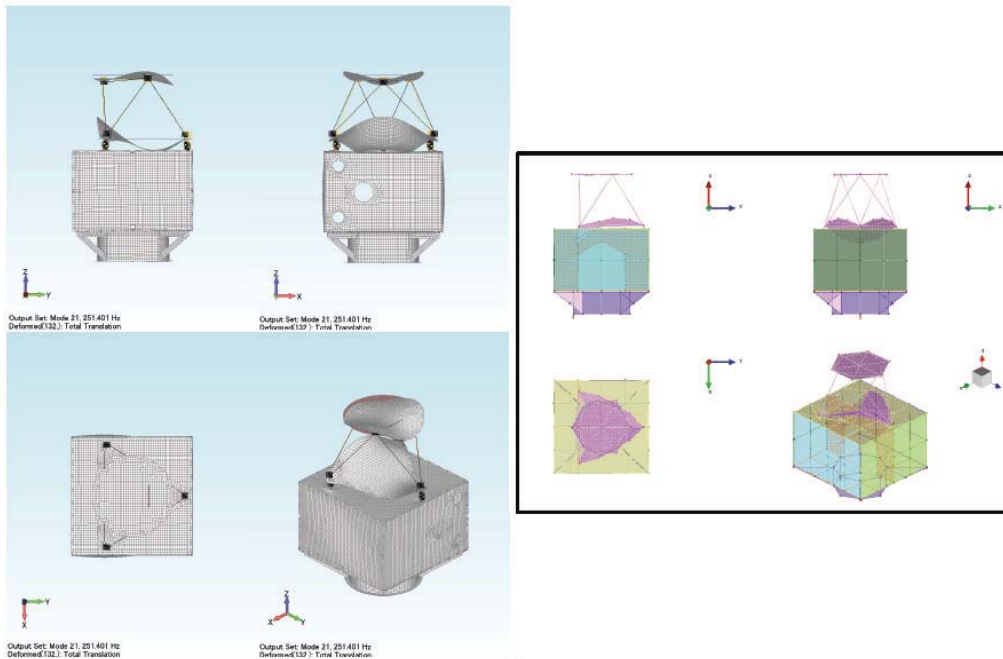
⇔ モーダルサーベイ : 247Hz (18 次モード)
(s)19 次モード



FEM 解析 : 245Hz

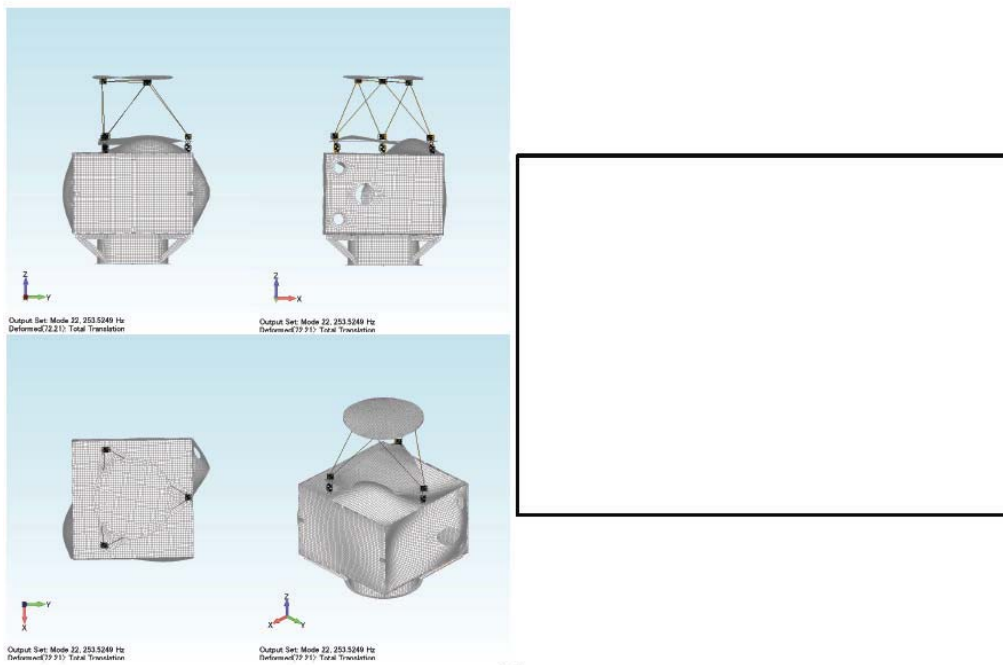
⇔ モーダルサーベイ : 249Hz (19 次モード)
(t)20 次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(10/14)



FEM 解析 : 251Hz

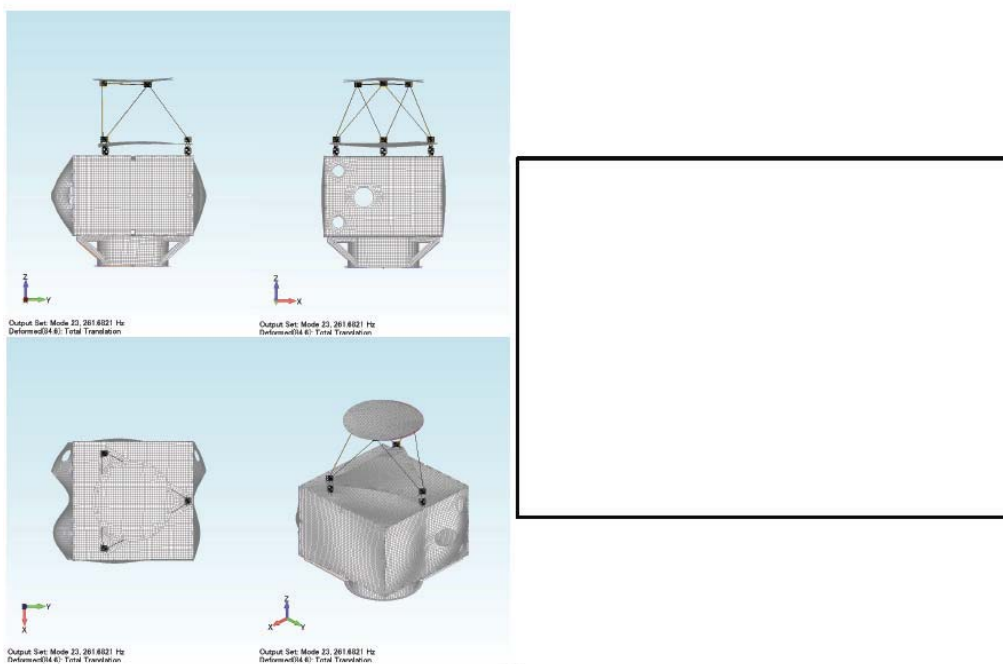
⇔ モーダルサーベイ : 242Hz (17次モード)
(u)21次モード



FEM 解析 : 254Hz

⇔ モーダルサーベイ : 該当なし
(v)22次モード

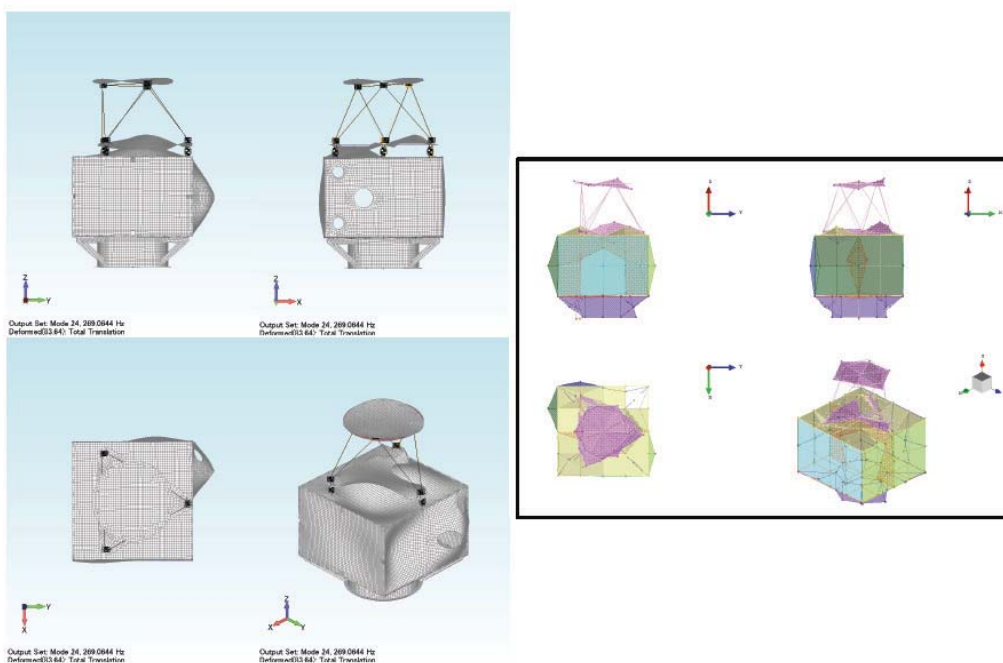
図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(11/14)



FEM 解析：262Hz

⇔ モーダルサーベイ：該当なし

(w)23 次モード

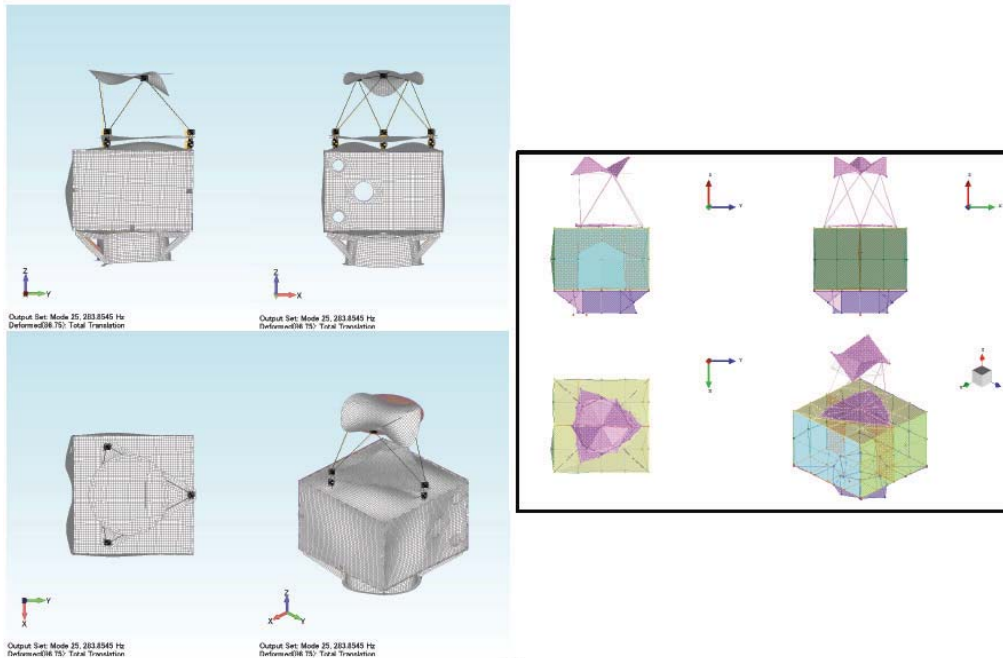


FEM 解析：269Hz

⇔ モーダルサーベイ：290Hz

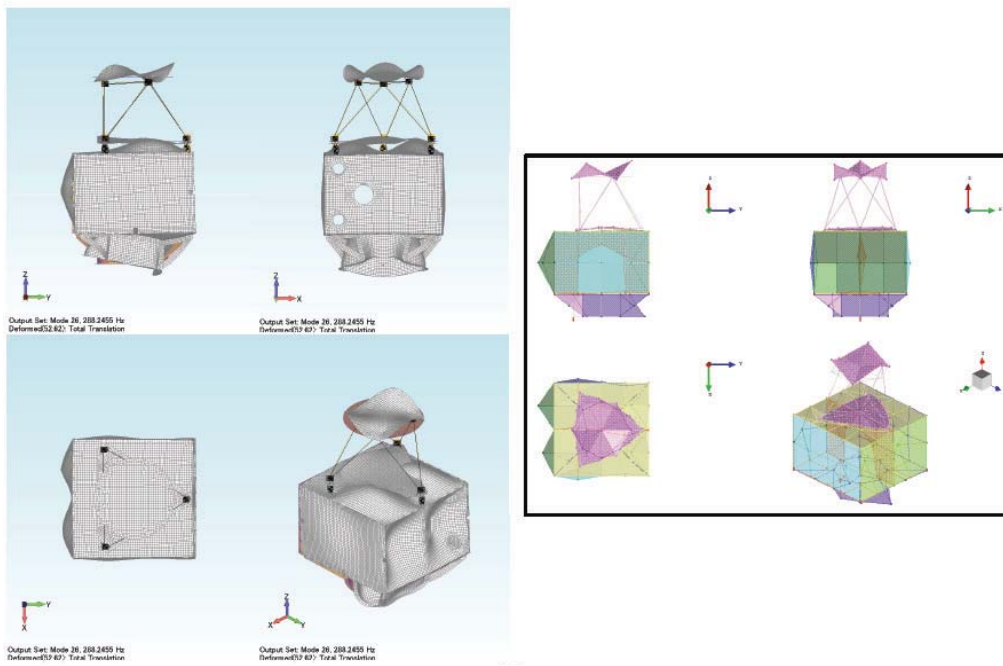
(x)24 次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(12/14)



FEM 解析 : 284Hz

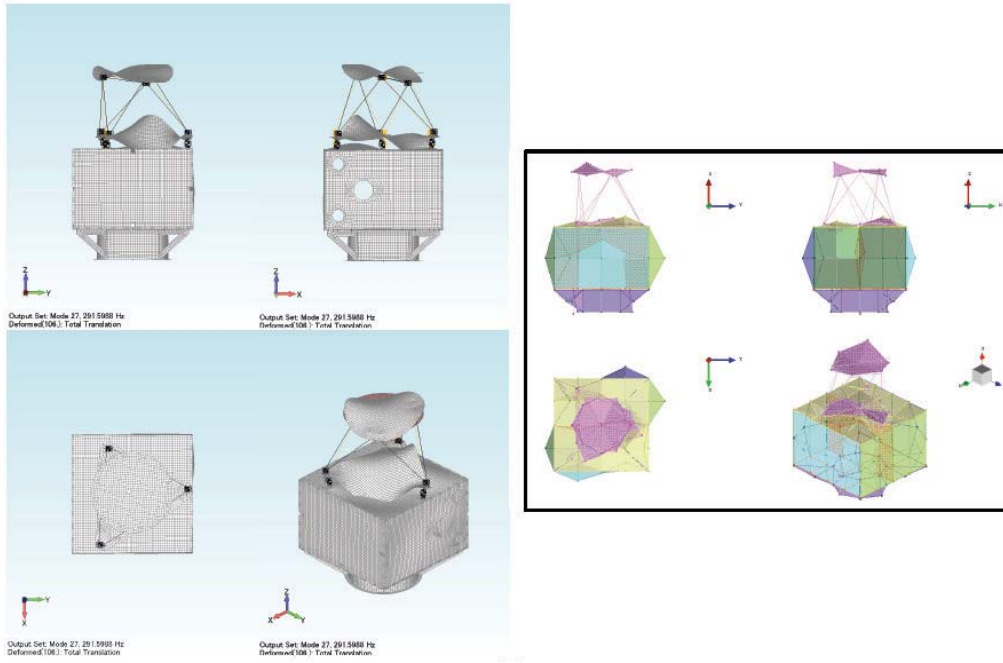
⇔ モーダルサーベイ : 309Hz (26 次モード)
(y)25 次モード



FEM 解析 : 288Hz

⇔ モーダルサーベイ : 315Hz (27 次モード)
(z)26 次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(13/14)



FEM 解析 : 292Hz ⇔ モーダルサーベイ : 329Hz (29 次モード)

(aa)27 次モード

図 4-27 コリレーション後の FEM モデルの固有値解析結果
とモーダルサーベイとのモード形状の比較(14/14)

5. 結言

擾乱管理に関するテストベッドとして、実機に同等の構造様式として衛星構造モデルを製作し、その詳細を製造図とモーダルデータ、ならびに有限要素法による数学モデルを示した。今後、このテストベッドを使って様々な擾乱発生源の単独での擾乱と衛星取り付け状態での擾乱を比較し、また、擾乱伝達を測定して衛星開発の補助としたい。

この模型を使った試験によって「高い周波数での構造の応答は衛星の支持条件に敏感である」ということが明らかになった。同様に、擾乱発生器の擾乱力も境界条件に敏感であることが分かった。実際に開発試験を行い際に、どのような境界条件で試験を行うべきか判断に困るが、当面、FEM モデルによる軌道上応答特性計算を行い、その結果に近い拘束条件を課すのが現実的であろう。

また本報告書では、中間周波数領域でのモーダルパラメタの同定を行い、表 4-19 に示したように固有振動数として 5%程度の誤差で数学モデルを測定データにコリレーションできることも示せた。軌道上の衛星構造の構造伝達に関わる中間周波数帯の数学モデルの作成ということは、これまでほとんど実施されておらず、今回のコリレーションで精度 5%の提示は今後の実衛星の擾乱管理において一つの指標になることを期待する。

なお、衛星モデルを製作する前に簡易的な実験室レベルの小型模型を用いた検証を行っており、その結果も付録 4 として参考に掲載する。

参考文献

- [1] 姿勢制御研究委員会編：人工衛星の力学と制御ハンドブック、培風館、2007、5.3 節 衛星内部擾乱
- [2] W.Ley, K.Wittmann and W.Hallmann (editors): *Handbook of Space Technology*, 2009, John Wiley&Sons, Ltd., Section 8.3.6 Special Environmental and Functional Tests
- [3] JAXA 設計標準 擾乱管理マニュアル (JERG-2-152-HB101A)

付録1. 衛星模型の写真と図面

以下に組立時の衛星模型の写真と構成部品の質量表および図面を掲載する。

表 A1-1 構成部品と質量値(1/3)

部品名	質量[g]	備考
バス部構体パネル		
上面パネル	6,976	M10 アイボルト 4 本吊り状態で測定 アイボルト分は引いた正味の質量
インナーパネル	3,276	M10 アイボルト 4 本吊り状態で測定 アイボルト分は引いた正味の質量
アクセスパネル	5,436×2 枚	パネル単体を大型電子天秤で測定
側面パネル	4,121×2 枚	M8 アイボルト 4 本吊り状態で測定 アイボルト分は引いた正味の質量
下面パネル	8,272	M8 アイボルト 4 本吊り状態で測定 アイボルト分は引いた正味の質量
アダプターリング +アウトリガー	7,504	M8 アイボルト 4 本吊り状態で測定 アイボルト分は引いた正味の質量
バス部ボルト類		
パネル結合ボルト	6.252 (837.7)	パネル結合用 M6 低頭ボルト 1 本の質量 (全使用数 134 本の質量)
アダプターリング 固定ボルト	9.027 (108.3)	アダプターリング固定用 M8 低頭ボルト 1 本の質量 (全使用数 12 本の質量)
アウトリガー 固定ボルト	3.485 (139.4)	アウトリガー固定用 M5 ボルト 1 本の質量 (全使用数 40 本の質量)
M10 アイボルト	65.99 (263.9)	構体吊り用 M10 アイボルト 1 本の質量 (全使用数 4 本の質量)
合計 (バス部単体)		
合計	46,491	バス部構体パネル

表 A1-1 構成部品と質量値(2/3)

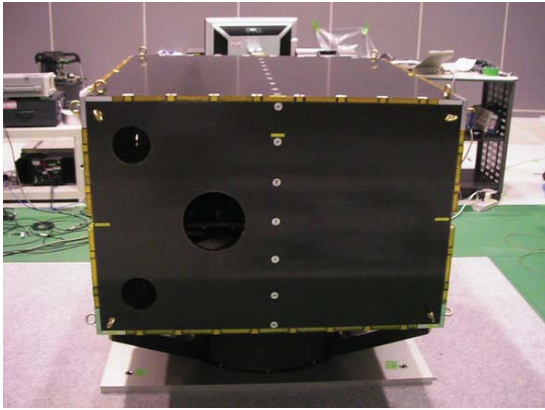
部品名	質量[g]	備考
ミッション部パネル		
ミッションパネル	5,640	パネル単体を大型電子天秤で測定 (このうち、トラスフィッティング部の先埋めインサートの質量が $1,100 \times 3 = 3,300\text{g}$)
鏡面模擬パネル	1,960	パネル単体を大型電子天秤で測定
ミッション部トラス類		
ミッション部トラス (長)	216.7 (1,300)	ミッション部トラス (長) 単体を電子天秤で測定 (全使用数 6 本の質量)
ミッション部トラス (短)	156.6 (469.8)	ミッション部トラス (短) 単体を電子天秤で測定 (全使用数 3 本の質量)
トラスフィッティング (上)	415.9 (1,248)	トラスフィッティング (上) 単体を電子天秤で測定 (全使用数 3 個の質量)
トラスフィッティング (下)	320.4 (961.3)	トラスフィッティング (下) 単体を電子天秤で測定 (全使用数 3 個の質量)
構体結合フィッティング	242.0 (725.9)	構体結合フィッティング単体を電子天秤で測定 (全使用数 3 個の質量)
ミッション部ボルト類		
トラスフィッティング固定ボルト	9.027 (216.6)	フィッティング固定用 M8 低頭ボルト 1 本の質量 (全使用数 24 本の質量)
ミッション部トラス固定ボルト	25.67 (462.1)	トラス固定用 M10 ボルト 1 本の質量 (全使用数 18 本の質量)
構体結合フィッティング固定ボルト	9.027 (216.6)	フィッティング固定用 M8 低頭ボルト 1 本の質量 (全使用数 24 本の質量)
合計 (ミッション部単体)		
合計	13,200	ミッション部
合計 (標準状態)		
合計	59,692	バス部構体パネル+ミッション部

表 A1-1 構成部品と質量値(3/3)

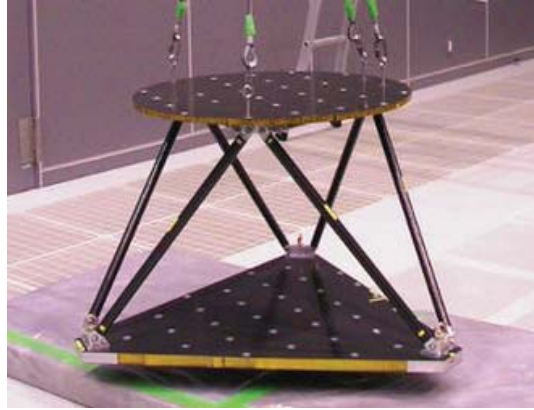
部品名	質量[g]	備考
タンク模擬構造		
タンク模擬構造	8,800	タンク+サポートトラスを含む質量
タンク模擬構造 固定ボルト	9,027 (144.4)	タンク固定用 M8 低頭ボルト 1 本の質量 (全使用数 16 本の質量)
合計 (タンク模擬構造単体)		
合計	8,944	タンク模擬構造
合計 (タンク搭載時の標準状態)		
合計	68,636	バス部構体パネル+ミッション部+タンク模擬構造

表 A1-2 附属部品と質量値

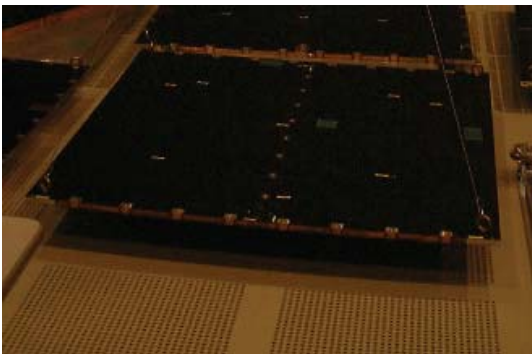
部品名	質量[g]	備考
その他 (フォースリンク、パネル端材等)		
フォースリンク	385.9 (1157.8)	構体結合フィッティング部で使用しているフォース リンクの質量. (全使用数 3 個の質量)
フォースリンク 結合ブロック	1,098 (3,295)	フォースリンクー構体パネル結合ブロックの質量 (全使用数 3 個の質量)
FL 結合ブロック固 定用ボルト	719.1	全使用数 48 本の質量
パネル端材	460	構体パネル (16.5mm 厚) のパネル端材 (1235mm×110mm、インサートなし) の質量



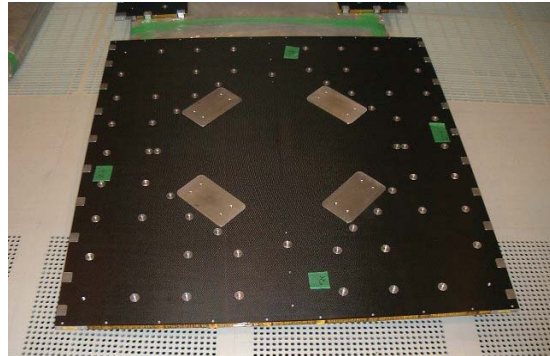
(a) バス部アッシー



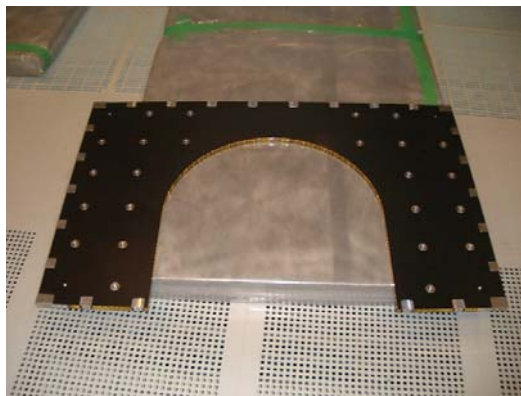
(b) ミッション部アッシー



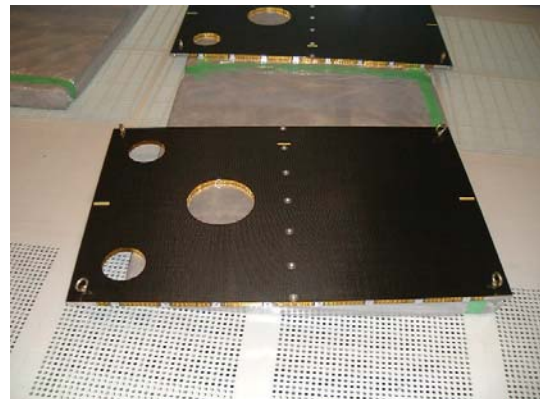
(c) バス部上面 (+Z面) パネル



(d) バス部下面 (-Z面) パネル

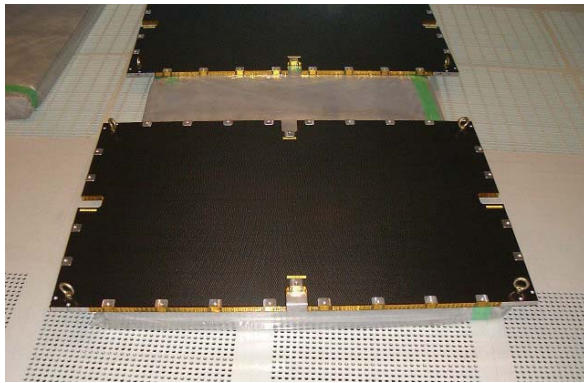


(e) バス部インナーパネル

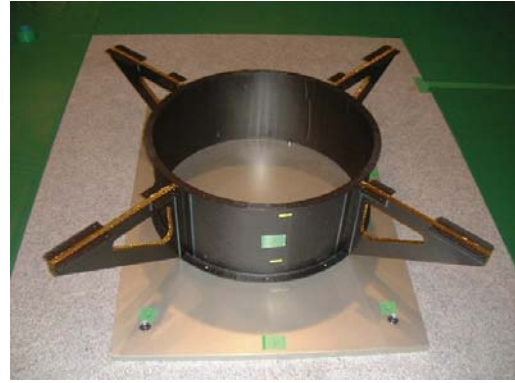


(f) バス部側面 (±Y面) パネル

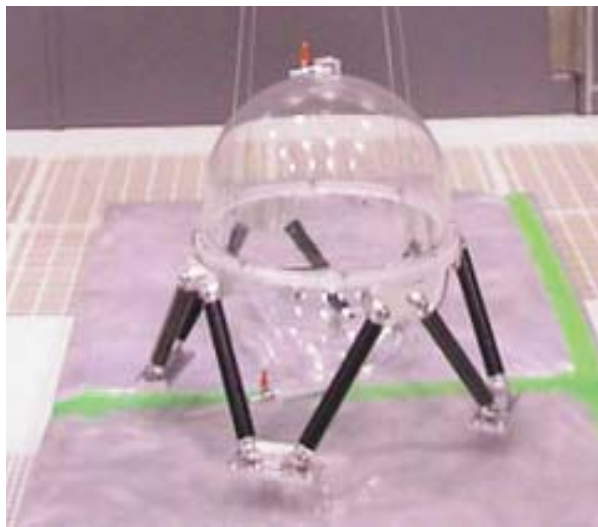
図 A1-1 衛星模型組立時の写真 (1/3)



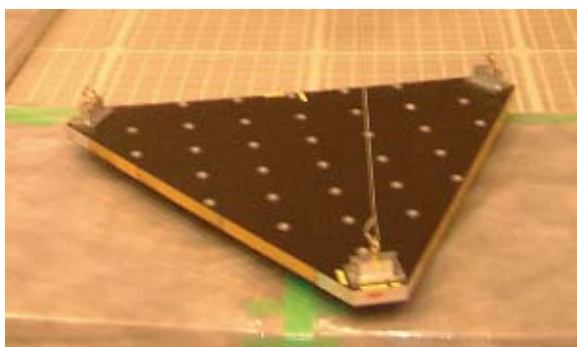
(g) バス部アクセスパネル



(h) ダプターリングとアウトリガー



(i) タンク模擬構造アッシー



(j) ミッション部鏡面模擬パネル



(k) ミッション部ミッションパネル

図 A1-1 衛星模型組立時の写真 (2/3)



(l) ミッション部トラスフィッティング



(m) ミッション部トラス部材 (長)

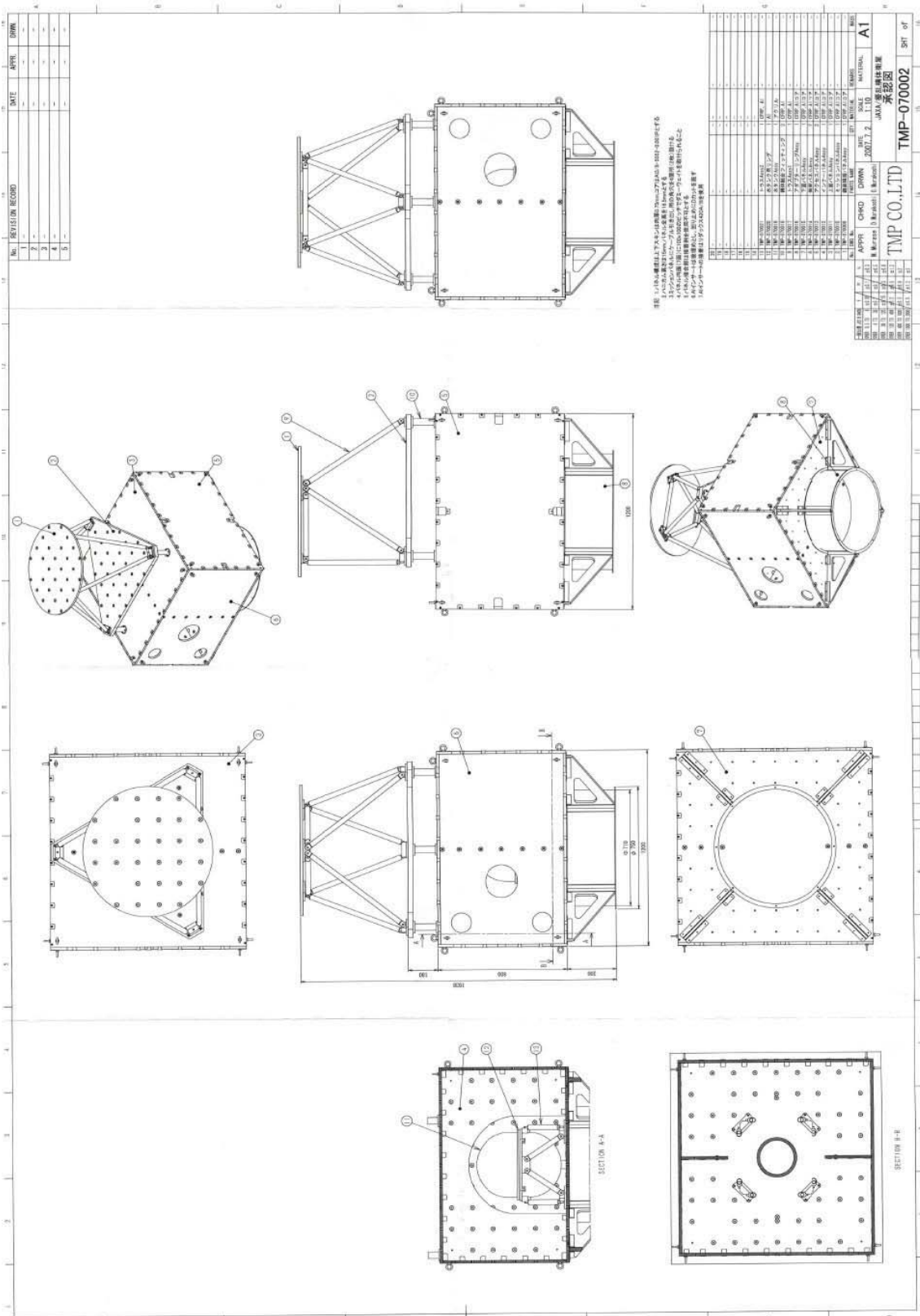


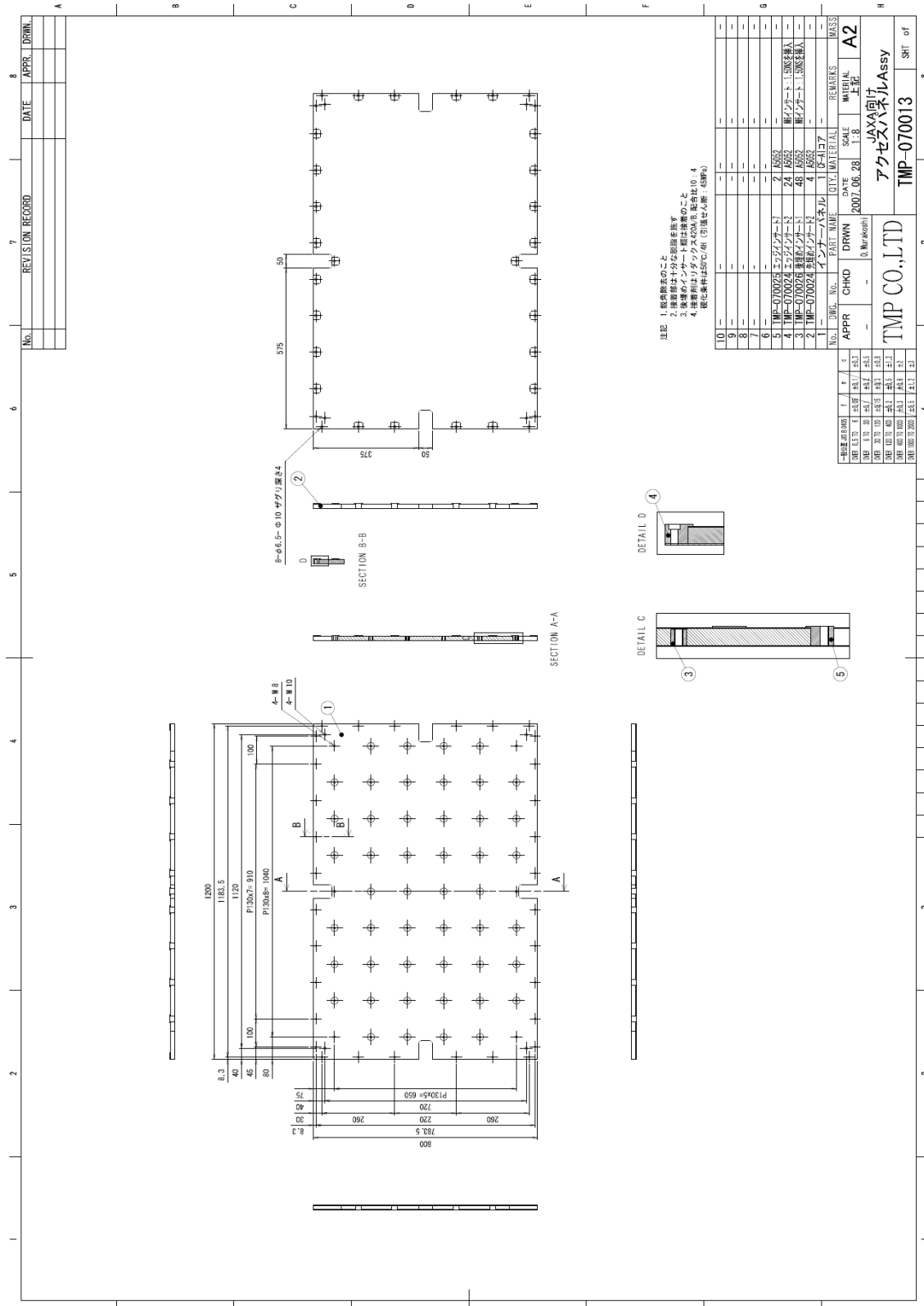
(n) ミッション部トラス部材 (短)

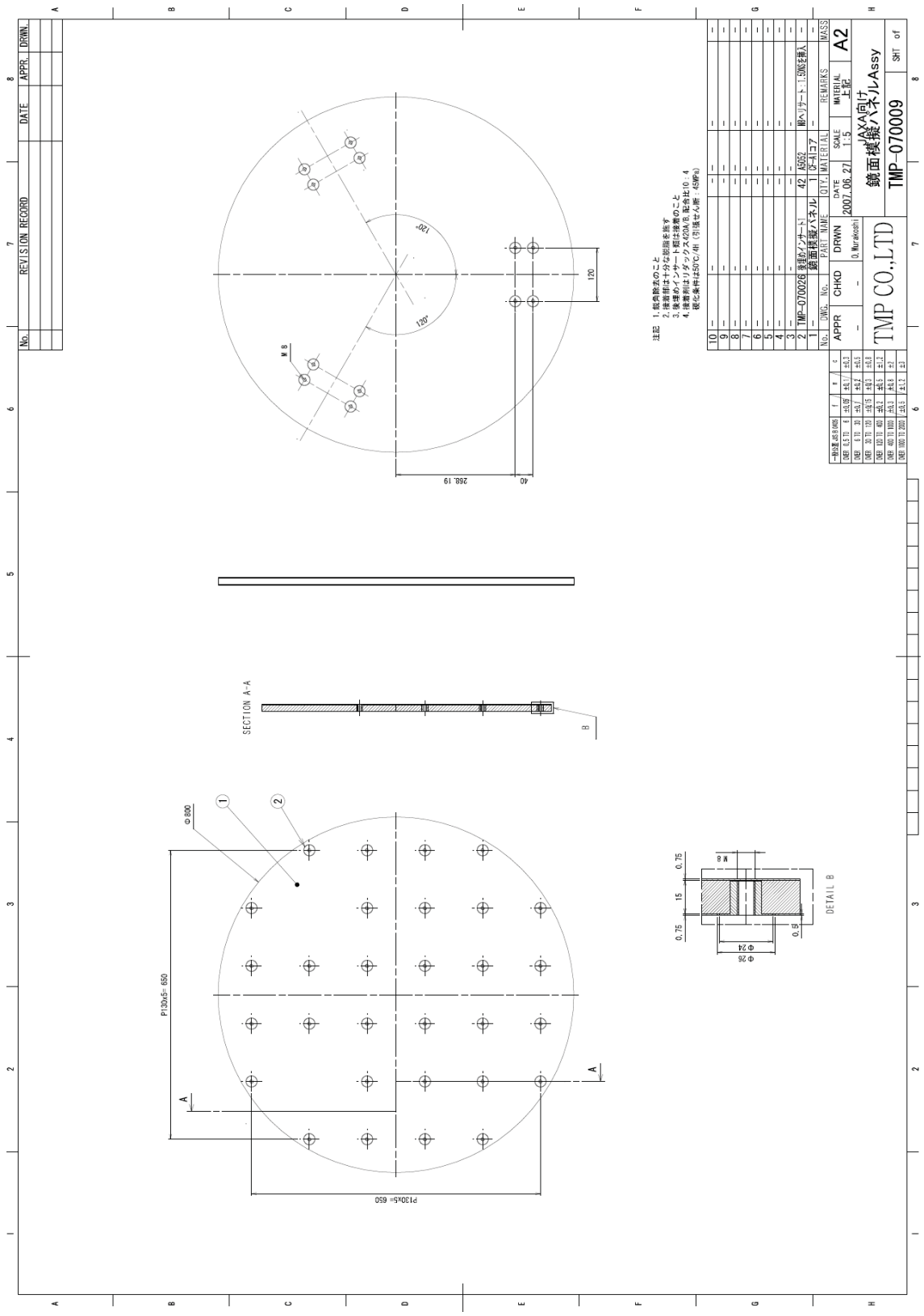


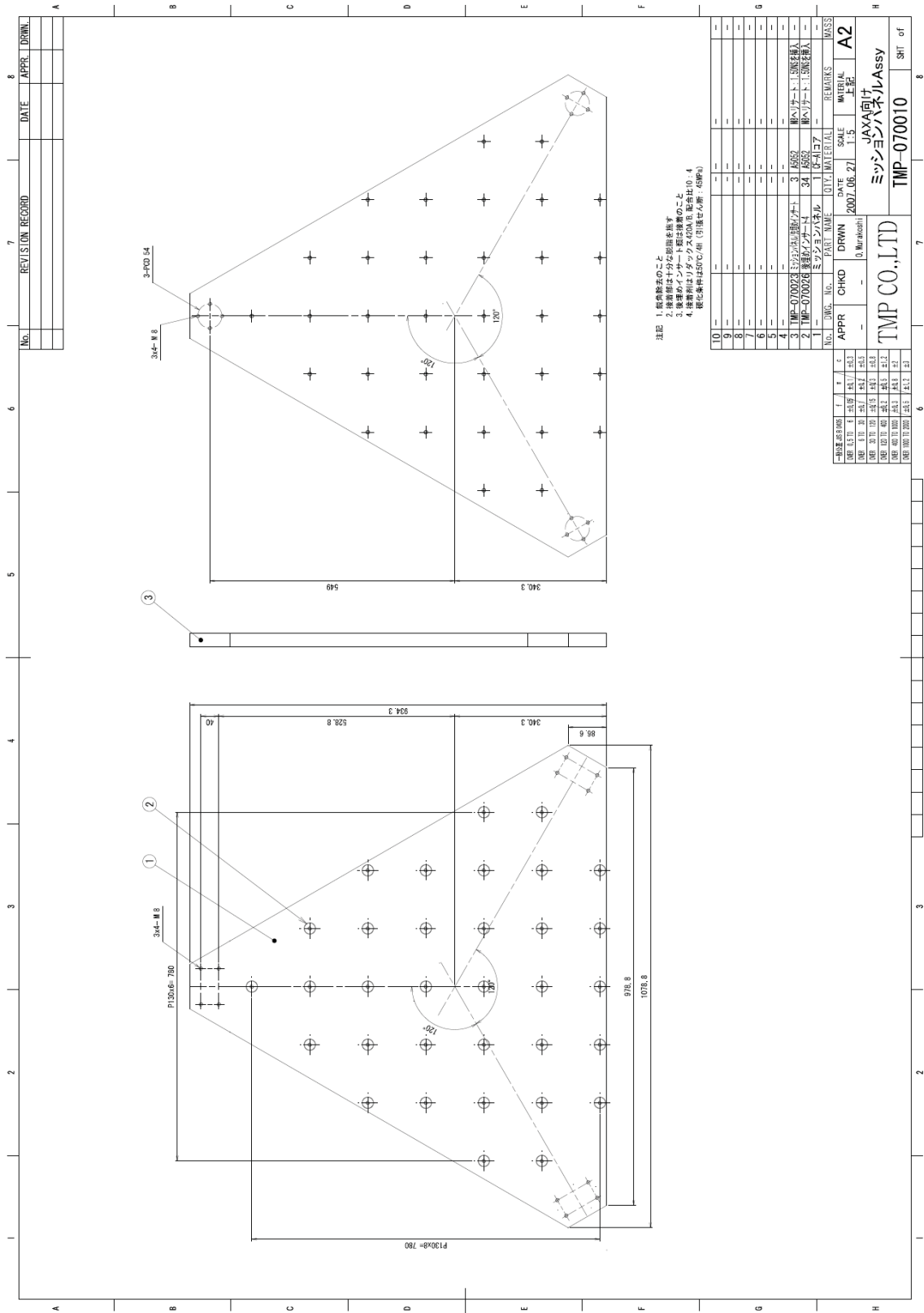
(o) ミッション部トラス部材 (取り付け足)

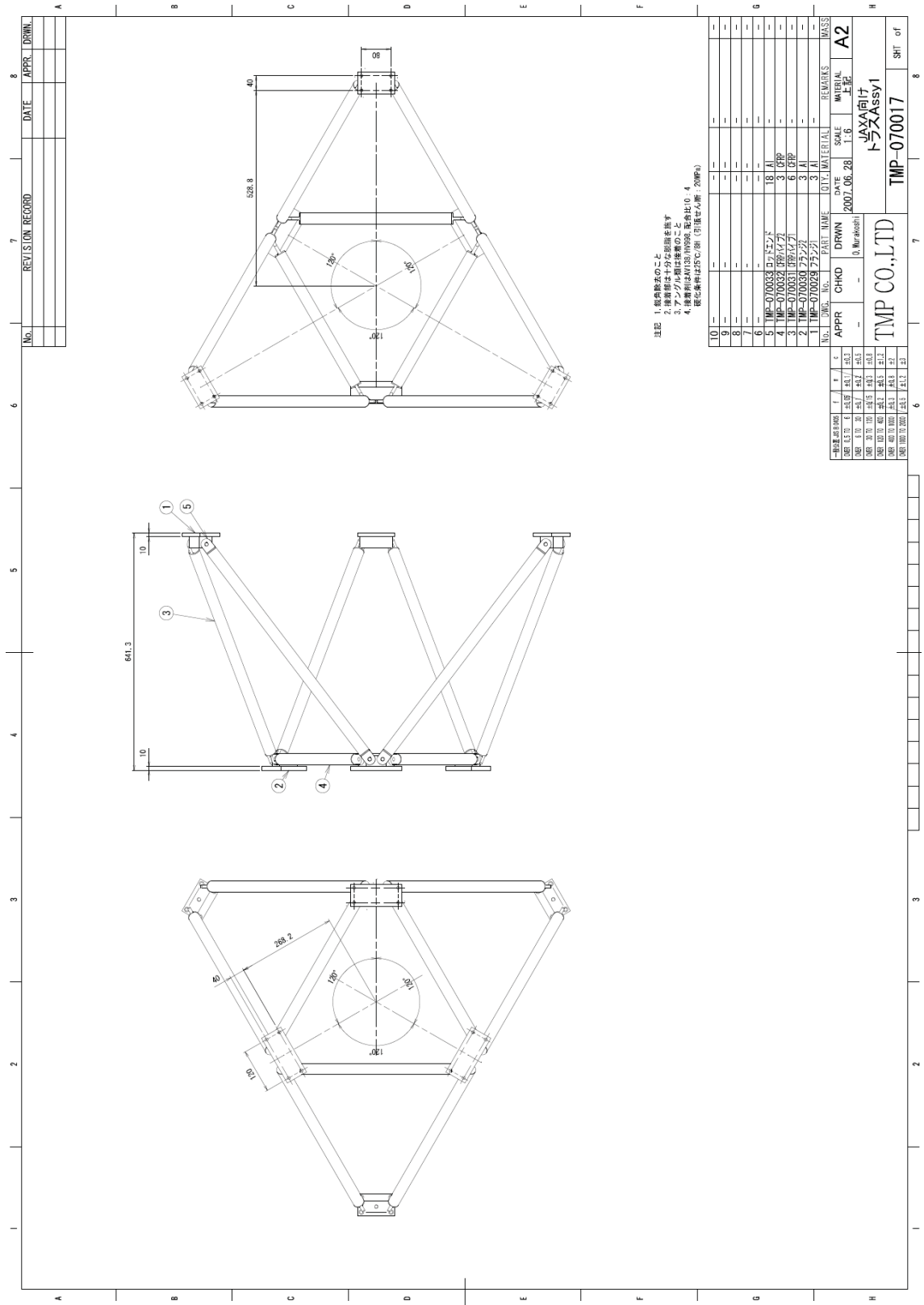
図 A1-1 衛星模型組立時の写真 (3/3)











注記 1. 検査検査のこと
 2. 検査部は十分な説明を要す
 3. アンソール部は検査のこと
 4. 検査部は25°C/28H (10分以内、20MPa)

No.	REV.	CON.	RECORD	DATE	APPR.	DRWN.
10	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
5	MP-070033	ボルトヘッド	18	Al	-	-
4	MP-070032	ボルトヘッド	3	UPP	-	-
3	MP-070031	ボルトヘッド	6	UPP	-	-
2	MP-070029	ボルトヘッド	3	Al	-	-
1	MP-070028	ボルトヘッド	3	Al	-	-

No.	QWR.	No.	PART NAME	QTY	MATERIAL	REMARKS	MASS
1	1	1	ボルトヘッド	18	Al		153.3
2	1	1	ボルトヘッド	3	UPP		153.3
3	1	1	ボルトヘッド	6	UPP		153.3
4	1	1	ボルトヘッド	3	Al		153.3
5	1	1	ボルトヘッド	3	Al		153.3

APPR.	CHKD.	DRWN.	DATE	SCALE	MATERIAL
-	-	-	2007.06.28	1:1.6	上配

TMP CO.,LTD		JAXA向け	
TMP-070017		トラスAssy1	
SHT of		8	

付録2. 試験に用いた擾乱計測機器

表 A2-1 擾乱試験に使用した計測機材の例

No.	装置名	メーカー	型番	駆動方式	備考
1	高感度加速度計	米国 PCB	333B51 333B52		感度 1V/G
2	シグナルコンディショナ	米国 PCB	442B104	DC	ゲイン付き ×1,10,100
		米国 PCB	442A101	DC	ゲイン付き ×1,10,100
3	3成分フォースリンク	米国 PCB	261M09		特殊高感度タイプ 感度 z: 22.5mV/N x,y: 112mV/N
4	慣性型加振器	米国 Wilcoxon	F3/602WA		インピーダンスヘッド付き
5	加振器アンプ	東陽テクニカ	MPA-15A	AC	
6	データロガー	ドイツ imc	CRONOS-PL/8	AC	
7	周波数分析装置	ベルギー LMS International	SCADAS-III	AC	伝達関数収集
8	多成分荷重測定台	Kistler	9253B12		キスラーテーブル
9	チャージアンプ	小野測器	CH1100 CH1200	電池	キスラーテーブルに使用

付録3. NASTRAN バルクデータ

最終的にコリレーションが完了した表 4-19 の場合の NASTRAN 入力のバルクデータを以下に示す。節点、座標値と要素の結合に関する情報は多すぎるのでそのほとんどを省略し、物性値部分のみを以下に掲載した。

テストベッドを使用する場合は、この数学モデルのフルセットが希望者に提供される。

```

INIT MASTER(S)
NASTRAN SYSTEM(319)=1
ID all,Femap
SOL SEMODES
TIME 10000
CEND
    TITLE = all
    ECHO = NONE
    DISPLACEMENT(PLOT) = ALL
    STRESS(PLOT,CORNER) = ALL
    ESE(PLOT) = ALL
    METHOD = 1
    MEFFMASS(PRINT,GRID=0,PARTFAC,MEFFM,MEFFW,FRACSUM,SUMMARY) = YES
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,OGEOM,NO
PARAM,AUTOSPC,YES
PARAM,MAXRATIO,1.+8
PARAM,GRDPNT,0
EIGRL      1      1.    500.          0          MASS
CORD2C      1      0      0.      0.      0.      0.      0.      1.+FEMAPC1
+FEMAPC1    1.      0.      1.
CORD2S      2      0      0.      0.      0.      0.      0.      1.+FEMAPC2
+FEMAPC2    1.      0.      1.
$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90101 : トラススプリング座標系 01
CORD2R      90101      0-12.9904  556.26  1341.5-562.444-395.422391.9639+CS 1XIT
+CS 1XIT1244.751-169.897  1341.5
$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90102 : トラススプリング座標系 02
CORD2R      90102      0 -488.23 -266.88  1341.5-1037.68-1218.562291.036+CS 1XIU
    
```

+CS 1XIU769.5104-993.037 1341.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90103 : トラススプリング座標系 03
CORD2R 90103 0 -475.24 -289.38 1341.5610.8784 -289.38377.3616+CS 1XIV
+CS 1XIV -475.241162.934 1341.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90104 : トラススプリング座標系 04
CORD2R 90104 0475.2401 -289.38 1341.51574.147 -289.382291.036+CS 1XIW
+CS 1XIW475.24011162.934 1341.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90105 : トラススプリング座標系 05
CORD2R 90105 0488.2305 -266.88 1341.5-61.2232684.8017391.9639+CS 1XIX
+CS 1XIX -769.51-993.037 1341.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90106 : トラススプリング座標系 06
CORD2R 90106 012.99038 556.26 1341.5-536.4631507.9422291.036+CS 1XIY
+CS 1XIY-1244.75-169.897 1341.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90107 : トラススプリング座標系 07
CORD2R 90107 0 2.5-7 -303.19 1891.5-1449.49 -303.19639.0339+CS 1XIZ
+CS 1XIZ-2.161-51612.455 1891.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90108 : トラススプリング座標系 08
CORD2R 90108 0262.5702 151.595 1891.5987.3158 -1103.73143.966+CS 1XJ0
+CS 1XJ0-1396.43-806.228 1891.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90109 : トラススプリング座標系 09
CORD2R 90109 0262.5702 151.595 1891.5987.3158 -1103.7639.0338+CS 1XJ1
+CS 1XJ1-1396.43-806.228 1891.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90110 : トラススプリング座標系 10
CORD2R 90110 0 -262.57 151.595 1891.5462.17531406.8913143.966+CS 1XJ2
+CS 1XJ21396.427-806.227 1891.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90111 : トラススプリング座標系 11
CORD2R 90111 0 -262.57 151.595 1891.5462.17531406.891639.0338+CS 1XJ3
+CS 1XJ31396.427-806.227 1891.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90112 : トラススプリング座標系 12
CORD2R 90112 0 -2.5-7 -303.19 1891.5-1449.49 -303.193143.966+CS 1XJ4
+CS 1XJ4 2.161-51612.455 1891.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90113 : トラススプリング座標系 13
CORD2R 90113 012.99038 -295.69 1891.512.99038 -295.69-23.0165+CS 1XJ5
+CS 1XJ5-1645.03661.5749 1891.5
\$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90114 : トラススプリング座標系 14
CORD2R 90114 0262.5702 136.595 1891.5262.5702 136.5953806.017+CS 1XJ6

```

+CS 1XJ6-1395.451093.854 1891.5
$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90115 : トラススプリング座標系 15
CORD2R 90115 0249.5799 159.095 1891.5249.5799 159.095-23.0165+CS 1XJ7
+CS 1XJ7 249.572-1755.42 1891.5
$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90116 : トラススプリング座標系 16
CORD2R 90116 0 -249.58 159.095 1891.5 -249.58 159.0953806.017+CS 1XJ8
+CS 1XJ8 -249.58-1755.42 1891.5
$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90117 : トラススプリング座標系 17
CORD2R 90117 0 -262.57 136.595 1891.5 -262.57 136.595-23.0165+CS 1XJ9
+CS 1XJ91395.4541093.847 1891.5
$ Femap with NX Nastran Coordinate System 90118 : トラススプリング座標系 18
CORD2R 90118 0-12.9904 -295.69 1891.5-12.9904 -295.693806.017+CS 1XJA
+CS 1XJA 1645.03661.5681 1891.5
$ Femap with NX Nastran Property 10001 : 鏡面模擬パネル 1
PSHELL 10001 10001 1.5 10001 331. 10002 10.3.978-10+PR 7PT
+PR 7PT -8.25 8.25
$ Femap with NX Nastran Property 10002 : 鏡面模擬パネル 2 インサート
PSHELL 10002 10001 1.5 10001 331. 10003 10.3.978-10+PR 7PU
+PR 7PU -8.25 8.25
$ Femap with NX Nastran Property 20001 : ミッションパネル 1
PSHELL 20001 20001 1.5 20001 1261. 20002 20.4.02-10+PR FFL
+PR FFL -15.75 15.75
$ Femap with NX Nastran Property 20002 : ミッションパネル 2 インサート
PSHELL 20002 20001 1.5 20001 1261. 20003 20.8.6509-9+PR FFM
+PR FFM -15.75 15.75
$ Femap with NX Nastran Property 30001 : 上面パネル 1
PSHELL 30001 30001 1.5 30001 331. 30002 10.5.363-10+PR N5D
+PR N5D -8.25 8.25
$ Femap with NX Nastran Property 30002 : 上面パネル 2 インサート
PSHELL 30002 30001 1.5 30001 331. 30003 10.5.363-10+PR N5E
+PR N5E -8.25 8.25
$ Femap with NX Nastran Property 40001 : インナーパネル 1
PSHELL 40001 40001 1.5 40001 331. 40002 10.6.143-10+PR UV5
+PR UV5 -8.25 8.25
$ Femap with NX Nastran Property 40002 : インナーパネル 2 インサート
PSHELL 40002 40001 1.5 40001 331. 40003 10.6.143-10+PR UV6
    
```

+PR UV6 -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 50001 : アクセスパネル+1

PSHELL 50001 50001 1.5 50001 331. 50002 10.6.123-10+PR 12KX

+PR 12KX -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 50002 : アクセスパネル+2 インサート

PSHELL 50002 50001 1.5 50001 331. 50003 10.6.123-10+PR 12KY

+PR 12KY -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 55001 : アクセスパネル-1

PSHELL 55001 55001 1.5 55001 331. 55002 10.6.123-10+PR 16FT

+PR 16FT -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 55002 : アクセスパネル-2 インサート

PSHELL 55002 55001 1.5 55001 331. 55003 10.6.123-10+PR 16FU

+PR 16FU -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 60001 : 側面パネル+1

PSHELL 60001 60001 1.5 60001 331. 60002 10.5.556-10+PR 1AAP

+PR 1AAP -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 60002 : 側面パネル+2 インサート

PSHELL 60002 60001 1.5 60001 331. 60003 10.5.556-10+PR 1AAQ

+PR 1AAQ -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 65001 : 側面パネル-1

PSHELL 65001 65001 1.5 65001 331. 65002 10.5.556-10+PR 1E5L

+PR 1E5L -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 65002 : 側面パネル-2 インサート

PSHELL 65002 65001 1.5 65001 331. 65003 10.5.556-10+PR 1E5M

+PR 1E5M -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 70001 : 下面パネル 1

PSHELL 70001 70001 1.5 70001 331. 70002 10.6.295-10+PR 110H

+PR 110H -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 70002 : 下面パネル 2 インサート

PSHELL 70002 70001 1.5 70001 331. 70003 10.6.295-10+PR 110I

+PR 110I -8.25 8.25

\$ Femap with NX Nastran Property 80001 : アダプターリング 1

PSHELL 80001 80001 5. 80001 80001 8.812-10+PR 1PQ9

+PR 1PQ9 -2.5 2.5

\$ Femap with NX Nastran Property 80002 : アダプターリング 2 補強板

PSHELL 80002 80002 1.5 80002 331. 80003 10.3.453-10+PR 1PQA

```

+PR 1PQA   -8.25   8.25
$ Femap with NX Nastran Property 90001 : ミッション部トラス
$ Femap with NX Nastran PropShape 90001 : 6,0,15.,0.,0.,0.,0.,1.5
$ Femap with NX Nastran PropOrient 90001 : 6,0,0.,1.,2.,3.,4.,-1.,0.,0.
PBAR      90001   90001134.303113673.7313673.7327341.983.0803-8      +PR 1XG1
+PR 1XG1   0.   -15.   15.   0.   0.   15.   -15.   0.+PA 1XG1
+PA 1XG1  .53296 .53296   0.
$ Femap with NX Nastran Property 90101 : トラススプリング要素 01
PBUSH     90101      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90102 : トラススプリング要素 02
PBUSH     90102      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90103 : トラススプリング要素 03
PBUSH     90103      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90104 : トラススプリング要素 04
PBUSH     90104      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90105 : トラススプリング要素 05
PBUSH     90105      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90106 : トラススプリング要素 06
PBUSH     90106      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90107 : トラススプリング要素 07
PBUSH     90107      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90108 : トラススプリング要素 08
PBUSH     90108      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90109 : トラススプリング要素 09
PBUSH     90109      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90110 : トラススプリング要素 10
PBUSH     90110      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90111 : トラススプリング要素 11
PBUSH     90111      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90112 : トラススプリング要素 12
PBUSH     90112      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90113 : トラススプリング要素 13
PBUSH     90113      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90114 : トラススプリング要素 14
PBUSH     90114      K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
$ Femap with NX Nastran Property 90115 : トラススプリング要素 15
    
```

PBUSH 90115 K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
 \$ Femap with NX Nastran Property 90116 : トラススプリング要素 16

PBUSH 90116 K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
 \$ Femap with NX Nastran Property 90117 : トラススプリング要素 17

PBUSH 90117 K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
 \$ Femap with NX Nastran Property 90118 : トラススプリング要素 18

PBUSH 90118 K 100000. 100000. 100000. 100000. 100000. 100000.
 \$ Femap with NX Nastran Property 100001 : 結合フィッティング
 \$ Femap with NX Nastran PropShape 100001 : 6,0,20.,0.,0.,0.,0.,1.5
 \$ Femap with NX Nastran PropOrient 100001 : 6,0,0.,1.,2.,3.,4.,-1.,0.,0.

PBAR 100001 100001 181.42733666.0433666.0467318.461.2775-6 +PR 255T
 +PR 255T 0. -20. 20. 0. 0. 20. -20. 0.+PA 255T
 +PA 255T.5318948.5318948 0.

\$ Femap with NX Nastran Property 100002 : 結合フィッティングスプリング要素

PBUSH 100002 K 71380. 71380. 178450.3000000. 30000. 10000.
 \$ Femap with NX Nastran Material 10001 : 鏡面模擬パネル 1

MAT2 10001 5800. 0. 0. 5800. 0. 450. 0.+MT 7PT
 +MT 7PT 0. 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 10002 : 鏡面模擬パネル 2 コア

MAT1 10002 11.39 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 10003 : 鏡面模擬パネル 2 インサート

MAT1 10003 7200. .3 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 20001 : ミッションパネル 1

MAT2 20001 5800. 0. 0. 5800. 0. 450. 0.+MT FFL
 +MT FFL 0. 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 20002 : ミッションパネル 2 コア

MAT1 20002 11.39 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 20003 : ミッションパネル 2 インサート

MAT1 20003 7200. .3 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 30001 : 上面パネル 1

MAT2 300017912.0882373.626 0.7912.088 0.2769.231 0.+MT N5D
 +MT N5D 0. 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 30002 : 上面パネル 2 コア

MAT1 30002 11.39 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 30003 : 上面パネル 2 インサート

MAT1 30003 7200. .3 0. 0. 0.

\$ Femap with NX Nastran Material 40001 : インナーパネル 1						
MAT2	400017912.0882373.626		0.7912.088	0.2769.231	0.+MT	UV5
+MT UV5	0.	0.	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 40002 : インナーパネル 2 コア						
MAT1	40002	11.39	0.	0.	0.	
\$ Femap with NX Nastran Material 40003 : インナーパネル 2 インサート						
MAT1	40003	7200.	.3	0.	0.	0.
\$ Femap with NX Nastran Material 50001 : アクセスパネル+1						
MAT2	500018241.7582472.527		0.8241.758	0.2884.615	0.+MT	12KX
+MT 12KX	0.	0.	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 50002 : アクセスパネル+2 コア						
MAT1	50002	11.39	0.	0.	0.	
\$ Femap with NX Nastran Material 50003 : アクセスパネル+2 インサート						
MAT1	50003	7200.	.3	0.	0.	0.
\$ Femap with NX Nastran Material 55001 : アクセスパネル-1						
MAT2	550018241.7582472.527		0.8241.758	0.2884.615	0.+MT	16FT
+MT 16FT	0.	0.	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 55002 : アクセスパネル-2 コア						
MAT1	55002	11.39	0.	0.	0.	
\$ Femap with NX Nastran Material 55003 : アクセスパネル-2 インサート						
MAT1	55003	7200.	.3	0.	0.	0.
\$ Femap with NX Nastran Material 60001 : 側面パネル+1						
MAT2	600017912.0882373.626		0.7912.088	0.2769.231	0.+MT	1AAP
+MT 1AAP	0.	0.	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 60002 : 側面パネル+2 コア						
MAT1	60002	11.39	0.	0.	0.	
\$ Femap with NX Nastran Material 60003 : 側面パネル+2 インサート						
MAT1	60003	7200.	.3	0.	0.	0.
\$ Femap with NX Nastran Material 65001 : 側面パネル-1						
MAT2	650017912.0882373.626		0.7912.088	0.2769.231	0.+MT	1E5L
+MT 1E5L	0.	0.	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 65002 : 側面パネル-コア						
MAT1	65002	11.39	0.	0.	0.	
\$ Femap with NX Nastran Material 65003 : 側面パネル-インサート						
MAT1	65003	11.39	0.	0.	0.	
\$ Femap with NX Nastran Material 70001 : 下面パネル 1						

MAT2	700014945.0551483.516		0.4945.055	0.1730.769	0.+MT 110H		
+MT 110H	0.	0.	0.	0.			
\$ Femap with NX Nastran Material 70002 : 下面パネル2 コア							
MAT1	70002		11.39	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 70003 : 下面パネル2 インサート							
MAT1	70003	7200.	.3	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 80001 : アダプターリング1							
MAT1	80001	4500.	.3	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 80002 : アダプターリング2 補強板							
MAT2	800027912.0882373.626		0.7912.088	0.2769.231	0.+MT 1PQA		
+MT 1PQA	0.	0.	0.	0.			
\$ Femap with NX Nastran Material 80003 : アダプターリング3 補強板コア							
MAT1	80003		11.39	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 90001 : ミッション部トラス							
MAT1	90001	5000.	.3197	0.	0.		
\$ Femap with NX Nastran Material 100001 : 結合フィッティング							
MAT1	100001	7000.	.3197	0.	0.		
GRID	10001	0	-65.	-65. 1851.75	0		
GRID	10002	0	-65.-43.3333	1851.75	0		
GRID	10003	0	-65.-21.6667	1851.75	0		
GRID	10004	0	-65.	0. 1851.75	0		
GRID	10005	0	-65.21.66667	1851.75	0		
GRID	10006	0	-65.43.33333	1851.75	0		
GRID	10007	0	-65.	65. 1851.75	0		
GRID	10008	0	-43.3333	65. 1851.75	0		
GRID	10009	0	-21.6667	65. 1851.75	0		
... (ノード座標データ)							
GRID	100001	0	0.	549. 1130.	0		
GRID	100002	0	-475.448	-274.5 1130.	0		
GRID	100003	0	475.4479	-274.5 1130.	0		
GRID	100004	0	0.	549. 1172.	0		
GRID	100005	0	-475.448	-274.5 1172.	0		
GRID	100006	0	475.4479	-274.5 1172.	0		
CQUAD4	10001	10001	10024	10025	10002	10001	-90.

CQUAD4	10002	10001	10025	10026	10003	10002	-90.
CQUAD4	10003	10001	10026	10027	10004	10003	-90.
CQUAD4	10004	10001	10027	10028	10005	10004	-90.
CQUAD4	10005	10001	10028	10029	10006	10005	-90.
CQUAD4	10006	10001	10029	10008	10007	10006	-90.
CQUAD4	10007	10001	10023	10030	10025	10024	-90.
CQUAD4	10008	10001	10030	10031	10026	10025	-90.
CQUAD4	10009	10001	10031	10032	10027	10026	-90.

... (要素データ)

CBAR	90001	90001	90101	90110.866025	.5	0.	
CBAR	90002	90001	90102	90111.866025	.5	0.	
CBAR	90003	90001	90103	90112	0.	-1.	0.
CBAR	90004	90001	90104	90107	0.	-1.	0.
CBAR	90005	90001	90105	90108.8660254	.5	0.	
CBAR	90006	90001	90106	90109.8660254	.5	0.	
CBAR	90007	90001	90113	90114	0.	0.	1.
CBAR	90008	90001	90115	90116	0.	0.	1.
CBAR	90009	90001	90117	90118	0.	0.	1.
RBE2	90010	90001	123456	20083	20079	20089	20093
RBE2	90011	90002	123456	20048	20028	20026	20046
RBE2	90012	90003	123456	20974	20954	20956	20976
RBE2	90013	90004	123456	10429	10431	10438	10436
RBE2	90014	90005	123456	10503	10647	10555	10566
RBE2	90015	90006	123456	10739	10730	10828	10687
CONM2	90016	90004	05.6561-5	0.	0.	0.	+EL 1XGG
+EL 1XGG	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
CONM2	90017	90005	05.6561-5	0.	0.	0.	+EL 1XGH
+EL 1XGH	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
CONM2	90018	90006	05.6561-5	0.	0.	0.	+EL 1XGI
+EL 1XGI	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
CONM2	90019	90001	04.8323-5	0.	0.	0.	+EL 1XGJ
+EL 1XGJ	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
CONM2	90020	90002	04.8323-5	0.	0.	0.	+EL 1XGK
+EL 1XGK	0.	0.	0.	0.	0.	0.	

CONM2	90021	90003	04.8323-5	0.	0.	0.	+EL 1XGL	
+EL 1XGL	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
CBUSH	90101	90101	90001	90101.8660254	-5	0.	90101+EL 1XIT	
+EL 1XIT	.5							
CBUSH	90102	90102	90002	90102.8660254	-5	0.	90102+EL 1XIU	
+EL 1XIU	.5							
CBUSH	90103	90103	90002	901031.9358-8	1.	0.	90103+EL 1XIV	
+EL 1XIV	.5							
CBUSH	90104	90104	90003	90104	0.	1.	0.	90104+EL 1XIW
+EL 1XIW	.5							
CBUSH	90105	90105	90003	90105-.866025	-5	0.	90105+EL 1XIX	
+EL 1XIX	.5							
CBUSH	90106	90106	90001	90106-.866025	-5	0.	90106+EL 1XIY	
+EL 1XIY	.5							
CBUSH	90107	90107	90004	90107-1.667-8	1.	0.	90107+EL 1XIZ	
+EL 1XIZ	.5							
CBUSH	90108	90108	90005	90108-.866025	-5	0.	90108+EL 1XJ0	
+EL 1XJ0	.5							
CBUSH	90109	90109	90005	90109-.866025	-5	0.	90109+EL 1XJ1	
+EL 1XJ1	.5							
CBUSH	90110	90110	90006	90110.8660254	-5	0.	90110+EL 1XJ2	
+EL 1XJ2	.5							
CBUSH	90111	90111	90006	90111.8660213-.500007		0.	90111+EL 1XJ3	
+EL 1XJ3	.5							
CBUSH	90112	90112	90004	901121.6667-8	1.	0.	90112+EL 1XJ4	
+EL 1XJ4	.5							
CBUSH	90113	90113	90004	90113-.866017.5000146		0.	90113+EL 1XJ5	
+EL 1XJ5	.5							
CBUSH	90114	90114	90005	90114-.866028.4999954		0.	90114+EL 1XJ6	
+EL 1XJ6	.5							
CBUSH	90115	90115	90005	90115-4.112-6	-1.	0.	90115+EL 1XJ7	
+EL 1XJ7	.5							
CBUSH	90116	90116	90006	90116	0.	-1.	0.	90116+EL 1XJ8
+EL 1XJ8	.5							
CBUSH	90117	90117	90006	90117.8660274.4999965		0.	90117+EL 1XJ9	
+EL 1XJ9	.5							

CBUSH	90118	90118	90004	90118.8660255.4999999	0.	0.	1.	90118+EL 1XJA
+EL 1XJA	.5							
CBUSH	100001	100002	100001	100004	0.	0.	1.	0+EL 255T
+EL 255T	.5							
CBUSH	100002	100002	100002	100005	0.	0.	1.	0+EL 255U
+EL 255U	.5							
CBUSH	100003	100002	100003	100006	0.	0.	1.	0+EL 255V
+EL 255V	.5							
RBE2	100004	100001	123456	33083	33028	32972	32918	32974+
+	33029							
RBE2	100005	100002	123456	30860	30807	30917	30970	
RBE2	100006	100003	123456	30959	30849	30906	31016	
RBE2	100007	100004	123456	20076	20087	20096	20085	
RBE2	100008	100005	123456	20039	20042	20035	20032	
RBE2	100009	100006	123456	20963	20960	20967	20970	
CONM2	100101	100001		08.7892-5	0.	0.	0.	+EL 258L
+EL 258L	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
CONM2	100102	100002		08.7892-5	0.	0.	0.	+EL 258M
+EL 258M	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
CONM2	100103	100003		08.7892-5	0.	0.	0.	+EL 258N
+EL 258N	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
CONM2	100104	100004		08.7892-5	0.	0.	0.	+EL 258O
+EL 258O	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
CONM2	100105	100005		08.7892-5	0.	0.	0.	+EL 258P
+EL 258P	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
CONM2	100106	100006		08.7892-5	0.	0.	0.	+EL 258Q
+EL 258Q	0.	0.	0.	0.	0.	0.		
RBE2	111001	82324	123456	71162				
RBE2	111009	82287	123456	71161				
RBE2	111021	82279	123456	71165				
RBE2	111026	83113	123456	71153				
RBE2	111034	83076	123456	71150				
RBE2	111046	83068	123456	71159				
RBE2	111050	80746	123456	71154				
RBE2	111058	80709	123456	71157				
RBE2	111070	80701	123456	71152				

RBE2	111074	81535	123456	71158
RBE2	111082	81498	123456	71163
RBE2	111093	81490	123456	71155
RBE2	111097	83139	123456	71352
RBE2	111099	83141	123456	71636
RBE2	111107	83149	123456	73014
RBE2	111110	83153	123456	73314
RBE2	111113	83156	123456	73570
RBE2	111115	80772	123456	71350
RBE2	111117	80774	123456	71634
RBE2	111125	80782	123456	73012
RBE2	111128	80786	123456	73312
RBE2	111131	80789	123456	73568
RBE2	111133	81561	123456	71351
RBE2	111135	81563	123456	71635
RBE2	111143	81571	123456	73013
RBE2	111146	81575	123456	73313
RBE2	111149	81578	123456	73569
RBE2	111151	82350	123456	71353
RBE2	111153	82352	123456	71637
RBE2	111161	82360	123456	73015
RBE2	111164	82364	123456	73315
RBE2	111167	82367	123456	73571
RBE2	112001	72319	123456	41591
RBE2	112002	71601	123456	41081
RBE2	112003	70977	123456	40069
RBE2	112004	70975	123456	40460
RBE2	112005	71599	123456	41052
RBE2	112006	72318	123456	40007
RBE2	113001	73622	123456	62116
RBE2	113002	73465	123456	62151
RBE2	113003	73170	123456	62143
RBE2	113004	72914	123456	62132
RBE2	113005	72680	123456	62106
RBE2	113006	72681	123456	62123
RBE2	113007	72915	123456	61790

RBE2	113008	73171	123456	62024
RBE2	113009	73466	123456	61692
RBE2	113010	73623	123456	61703
RBE2	113501	73620	123456	67116
RBE2	113502	73467	123456	67151
RBE2	113503	73168	123456	67143
RBE2	113504	72912	123456	67132
RBE2	113505	72678	123456	67106
RBE2	113506	72679	123456	67123
RBE2	113507	72913	123456	66790
RBE2	113508	73169	123456	67024
RBE2	113509	73464	123456	66692
RBE2	113510	73621	123456	66703
RBE2	114001	41604	123456	62067
RBE2	114002	41571	123456	62299
RBE2	114003	41536	123456	62693
RBE2	114004	41501	123456	61034
RBE2	114005	41466	123456	61532
RBE2	114006	41431	123456	60991
RBE2	114007	41402	123456	60654
RBE2	114501	40010	123456	67067
RBE2	114502	40109	123456	67299
RBE2	114503	40039	123456	67693
RBE2	114504	40277	123456	66034
RBE2	114505	40193	123456	66532
RBE2	114506	40422	123456	65991
RBE2	114507	40359	123456	65654
RBE2	115001	40362	123456	30195
RBE2	115002	40811	123456	30443
RBE2	115003	40692	123456	30773
RBE2	115004	41824	123456	31103
RBE2	115005	41830	123456	31433
RBE2	115006	41836	123456	31763
RBE2	115007	41842	123456	32093
RBE2	115008	42012	123456	32423
RBE2	115009	41371	123456	32753

RBE2	115010	41399	123456	33001
RBE2	116001	60718	123456	33112
RBE2	116002	60774	123456	33115
RBE2	116003	60760	123456	33118
RBE2	116004	60746	123456	33121
RBE2	116005	60700	123456	33124
RBE2	116006	60732	123456	33127
RBE2	116007	60280	123456	33130
RBE2	116008	60596	123456	33133
RBE2	116009	60151	123456	33136
RBE2	116010	60166	123456	33139
RBE2	116501	65718	123456	30057
RBE2	116502	65774	123456	30060
RBE2	116503	65760	123456	30063
RBE2	116504	65746	123456	30066
RBE2	116505	65700	123456	30069
RBE2	116506	65732	123456	30072
RBE2	116507	65280	123456	30075
RBE2	116508	65596	123456	30078
RBE2	116509	65151	123456	30081
RBE2	116510	65166	123456	30084
RBE2	117001	73606	123456	50060
RBE2	117002	73430	123456	50063
RBE2	117003	73130	123456	50066
RBE2	117004	72846	123456	50069
RBE2	117005	72612	123456	50072
RBE2	117006	72616	123456	50075
RBE2	117007	72850	123456	50078
RBE2	117008	73134	123456	50081
RBE2	117009	73434	123456	50084
RBE2	117010	73610	123456	50087
RBE2	117501	73604	123456	55060
RBE2	117502	73428	123456	55063
RBE2	117503	73128	123456	55066
RBE2	117504	72844	123456	55069
RBE2	117505	72610	123456	55072

RBE2	117506	72614	123456	55075
RBE2	117507	72848	123456	55078
RBE2	117508	73132	123456	55081
RBE2	117509	73432	123456	55084
RBE2	117510	73608	123456	55087
RBE2	118001	61705	123456	50207
RBE2	118002	61737	123456	50625
RBE2	118003	61763	123456	50985
RBE2	118004	60253	123456	51573
RBE2	118005	60218	123456	51933
RBE2	118006	60168	123456	52350
RBE2	118501	62492	123456	55207
RBE2	118502	62412	123456	55625
RBE2	118503	62378	123456	55985
RBE2	118504	61086	123456	56573
RBE2	118505	61132	123456	56933
RBE2	118506	61245	123456	57350
RBE2	119001	66705	123456	50150
RBE2	119002	66737	123456	50567
RBE2	119003	66763	123456	50927
RBE2	119004	65253	123456	51515
RBE2	119005	65218	123456	51875
RBE2	119006	65168	123456	52293
RBE2	119501	67492	123456	55150
RBE2	119502	67412	123456	55567
RBE2	119503	67378	123456	55927
RBE2	119504	66086	123456	56515
RBE2	119505	66132	123456	56875
RBE2	119506	66245	123456	57293
RBE2	120001	30194	123456	52413
RBE2	120002	30470	123456	52416
RBE2	120003	30800	123456	52419
RBE2	120004	31130	123456	52422
RBE2	120005	31460	123456	52425
RBE2	120006	31790	123456	52428
RBE2	120007	32120	123456	52431

RBE2	120008	32450	123456	52434
RBE2	120009	32780	123456	52437
RBE2	120010	33055	123456	52440
RBE2	120501	30141	123456	57413
RBE2	120502	30416	123456	57416
RBE2	120503	30746	123456	57419
RBE2	120504	31076	123456	57422
RBE2	120505	31406	123456	57425
RBE2	120506	31736	123456	57428
RBE2	120507	32066	123456	57431
RBE2	120508	32396	123456	57434
RBE2	120509	32726	123456	57437
RBE2	120510	33002	123456	57440

ENDDATA a9a45965

付録4. アルミフレームとパネル結合構造のモーダルサーベイと有限要素解析

A4.1 要約

本文に示したテストベッドの予備的検討として、より小さなモデルを製作し、数学モデルのコリレーションを行ったので、テストベッドに加えての一例としてその結果を示す。

本実験の目的は、一般的な構造体において、モーダルサーベイの結果と有限要素(FEM)解析の結果をパラメータ調整によって合わせ込むことが可能であることを示すことである。

今回、アルミフレームとアルミプレートからなる構造体について、FEMモデルのジョイント部の剛性をパラメータとすることで、モーダルサーベイの結果とFEMモデルの固有値解析結果の合わせ込みを行った。その結果、モーダルサーベイの結果とFEM解析の結果を、400Hz以下の25個のモードにおいて、モード周波数を8%以内に一致させることができた。それらの周波数のうち5%以内が23個、3%以内が18個、1%以内が8個であった。

この結果により、パラメータの合わせこみを十分に行えば20次以上のモードであってもモーダルサーベイの結果と有限要素(FEM)の結果を合わせる事が可能であることが示され、より実機に近いテストベッドにおけるFEMモデルとの合わせこみの可能性を示めすことができた。

また、境界条件の影響を調べるため、合わせ込み済みのモデルで下端の4点を固定した条件でFEM解析を行い、固有振動数の比較を行った。

A4.2 背景と目的

本報告における目的の一つは、構体の設計と試験および有限要素モデルの作成を同一グループで行うことで精度の限界に挑戦することである(本文2ページ参照)。FEMモデルを用いて構造の擾乱を予測しようとした場合、実構造体とFEMモデルの振動モードが擾乱の周波数範囲内である程度一致している必要がある。ところが、通常の構造解析においては、FEMモデルは各方向あたり2~3次程度の一致で十分とされることが多く、衛星構体等のFEMモデルで擾乱管理に必要な数100Hzのオーダーまで合わせ込みを行った例は報告されていない。

本付録では、より実機に近いテストベッドを製作する前に、より簡易な構造体においてモーダルサーベイの結果と有限要素(FEM)の結果を、パラメータ調整によって合わせる事が可能であることを示す。

仮に、この試みがうまくいかなければ、より実機に近いテストベッドを製作してもモーダルサーベイの結果とFEMの結果を合わせこむことは困難であろう。また逆に、この試みが成功した後にテストベッドの合わせこみがうまくいかなければ、その違いを検証することで原因検証の一助になることが期待できる。

A4.3 供試体と有限要素モデル

A4.3.1 供試体

今回使用した供試体は、アルミフレームをジョイントで結合し、アルミプレートを搭載した椅子のような形状をした構造体である（図 A4-1）。図中のクランプは、加振器と供試体を結合するためのものである。アルミプレート上には、各種の擾乱源を搭載できるように、格子状にタップが切っている。

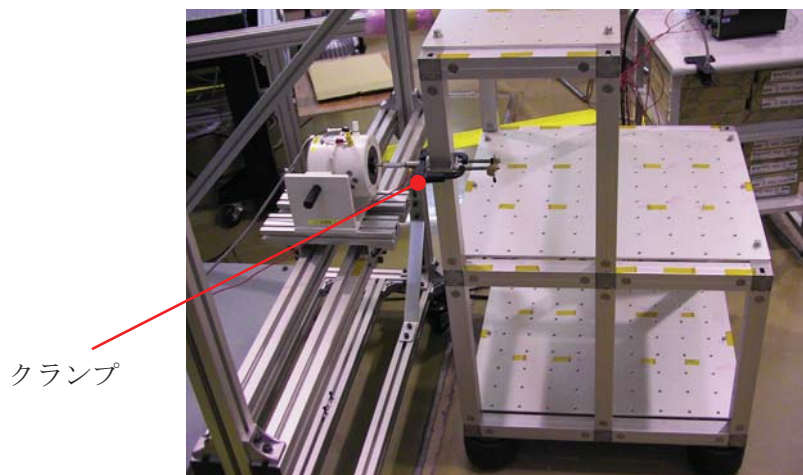


図 A4-1 供試体

A4.3.2 有限要素モデル

Femap with NX Nastran v9.2J を用いて供試体の FEM モデルを作成した（図 A4-2）。ノード数は 1225、要素数は 1132（ビーム 348、プレート 784）である。モデルの総質量は 39.74kg である。

- ・ 加振点に使用したクランプを、質点（193g）でモデル化した。
- ・ ジョイントは、ビーム要素でモデル化した（図 A4-5）。
- ・ 空気バネは、バネ要素でモデル化した。
- ・ ジョイント部の剛性（曲げ剛性 2、縦剛性 1、ねじり剛性 1 の合計 4）および空気バネのバネ定数（x,y,z 方向）を合わせ込み用のパラメータとして使用した。
- ・ 合わせ込みに用いたパラメータは計 7 個であるが、空気バネのバネ定数は、主に剛体モードに寄与し、振動モードにはあまり影響を与えない。

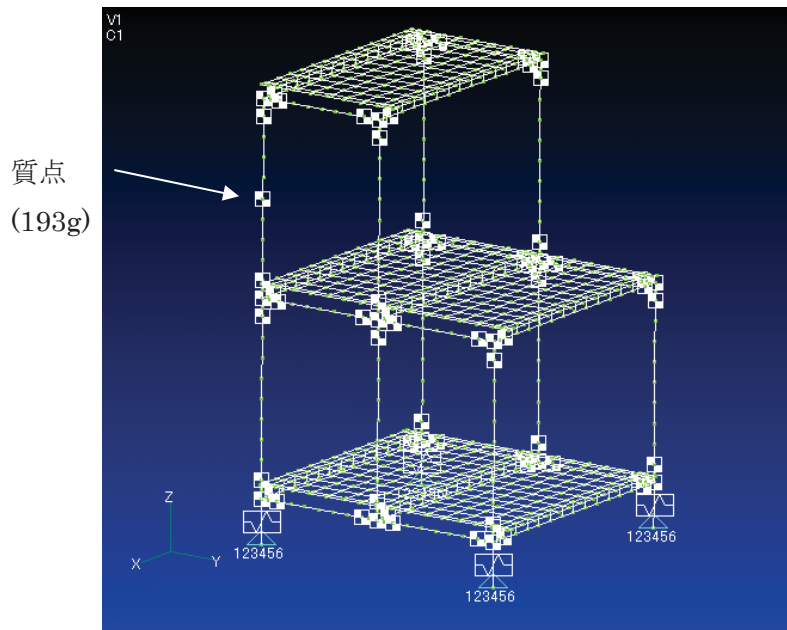
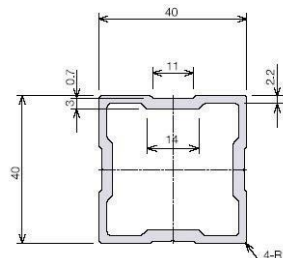


図 A4-2 FEM モデル

A4.3.3 フレーム

供試体のフレーム部材は、SUS 株式会社製の BF-P・40・40 である (図 A4-3)。これをビーム要素でモデル化した。フレーム特性値を表 A4-1 に示す。

BF-P・40・40



■価格		BF-P・40・40定尺	BF-P・40・40 長=50~4000
名称			
単価 (¥)	1~9本	3,400	0.94/mm
	10~49本	3,230	0.90/mm
	50本以上	3,060	0.85/mm
アイテムNo		BFF-412	BFF-414

■素材/技術データ	
材質	アルミ押出材 アルマイト表面処理
環境	RoHS対応品 グリーン調達
断面2次モーメント	$I_x=8.73 \times 10^4 \text{mm}^4$ $I_y=8.73 \times 10^4 \text{mm}^4$
断面係数	$Z_x=4.37 \times 10^3 \text{mm}^3$ $Z_y=4.37 \times 10^3 \text{mm}^3$
単位質量	1.06kg/m

図 A4-3 フレーム部材

表 A4-1 フレーム特性値

材質 A6N01SS-T5	密度 $\rho(\text{kg}/\text{mm}^3)$	2.71E-06
	ヤング率 $E(\text{mN}/\text{mm}^2)$	6.997E+7
	ポアソン比 ν	0.3
断面定数	面積(mm^2)	392.88
	$I1(\text{mm}^4)$	87388.2
	$I2(\text{mm}^4)$	87388.2
	ねじり定数 $J(\text{mm}^4)$	128154

A4.3.4 プレート

プレート部材の特性値を表 A4-2 に示す。

表 A4-2 プレート部材特性値

材質 A5052	密度 $\rho(\text{kg}/\text{mm}^3)$	2.68E-06
	ヤング率 $E(\text{mN}/\text{mm}^2)$	7.100E+07
	ポアソン比 ν	0.3
	厚さ $t(\text{mm})$	6

ビーム要素とプレート要素は、剛体要素によって結合した。ビーム軸周りの回転を拘束するために、ビーム上の接点1つに対して、プレート上の接点3つを結合した。

A4.4.5 ジョイント

供試体に用いたジョイントは、SUS 株式会社製の5方ブロック40キットおよび丸ナット40ジョイントキットである(5方ブロック40キャップBは未使用)。図A4-4のジョイントのモデル化は図A4-5のように行った。

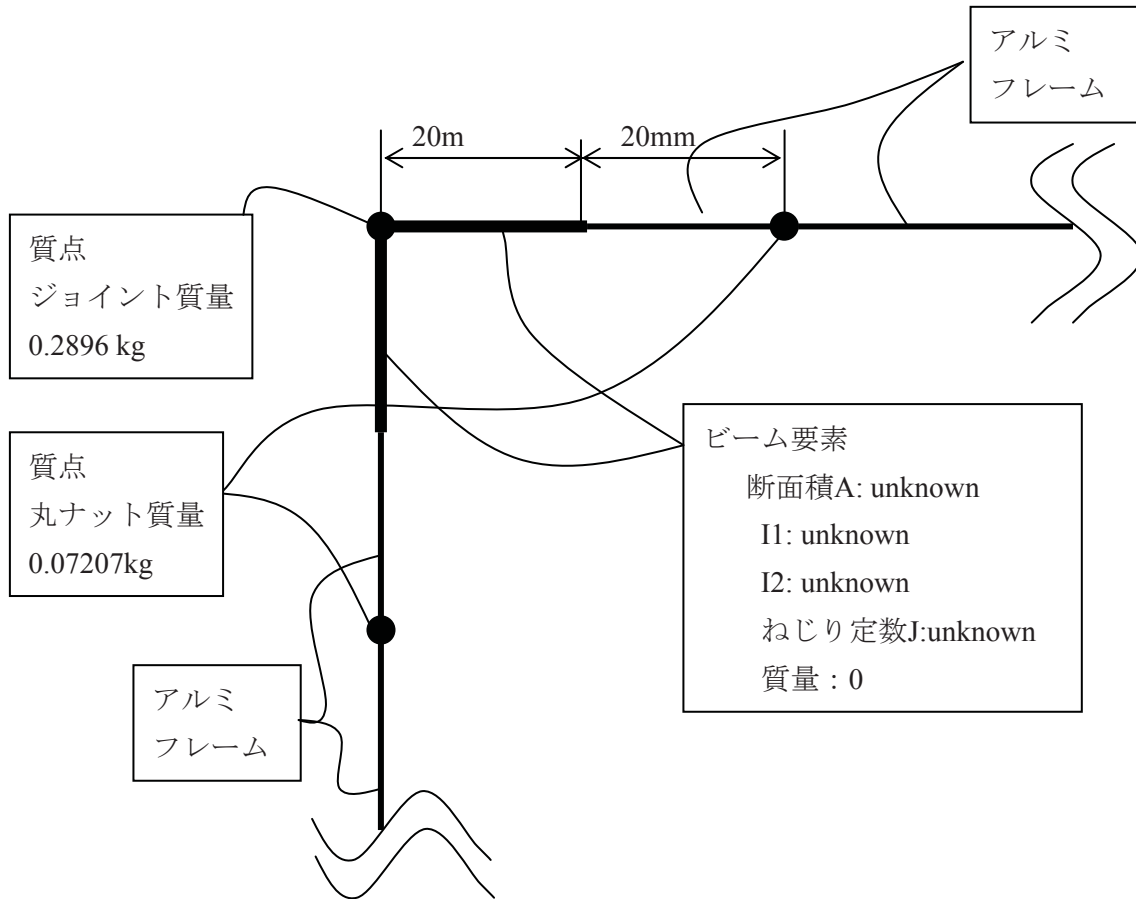


図 A4-5 ジョイント部のモデル

A4.4 モーダルサーベイ

A4.4.1 周波数応答関数の取得

図 A4-1 のクランプ部を加振し、各部の周波数応答関数(FRF)を取得した。FRF を以下に示す (図 A4-6~8)。

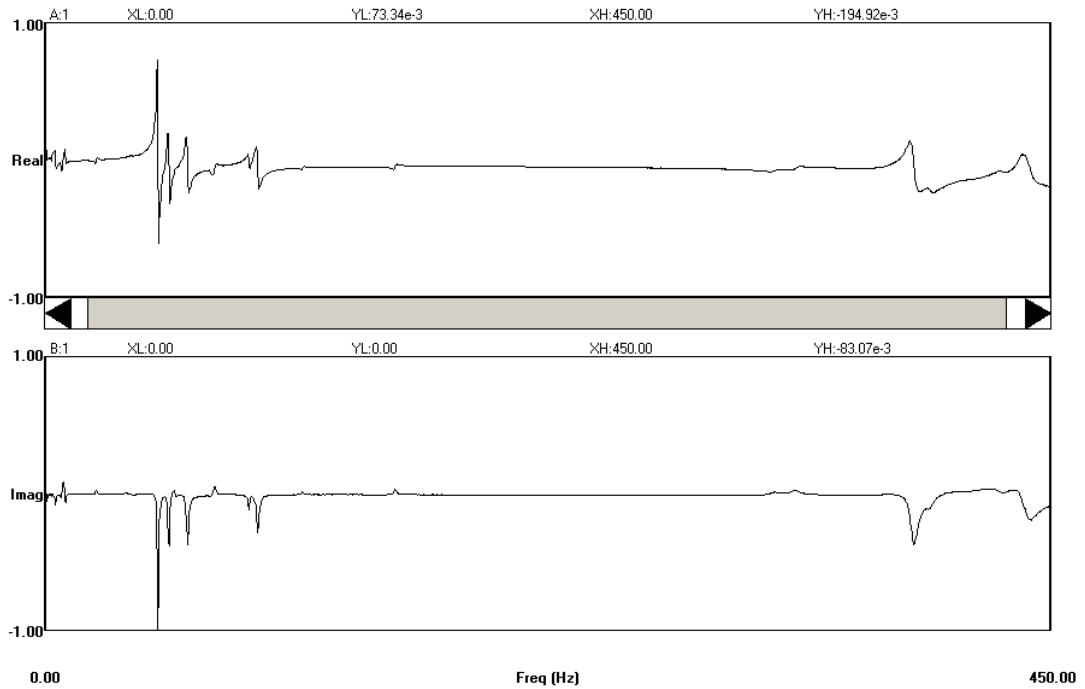


図 A4-6 点 3 (上段角) X 方向の周波数応答関数

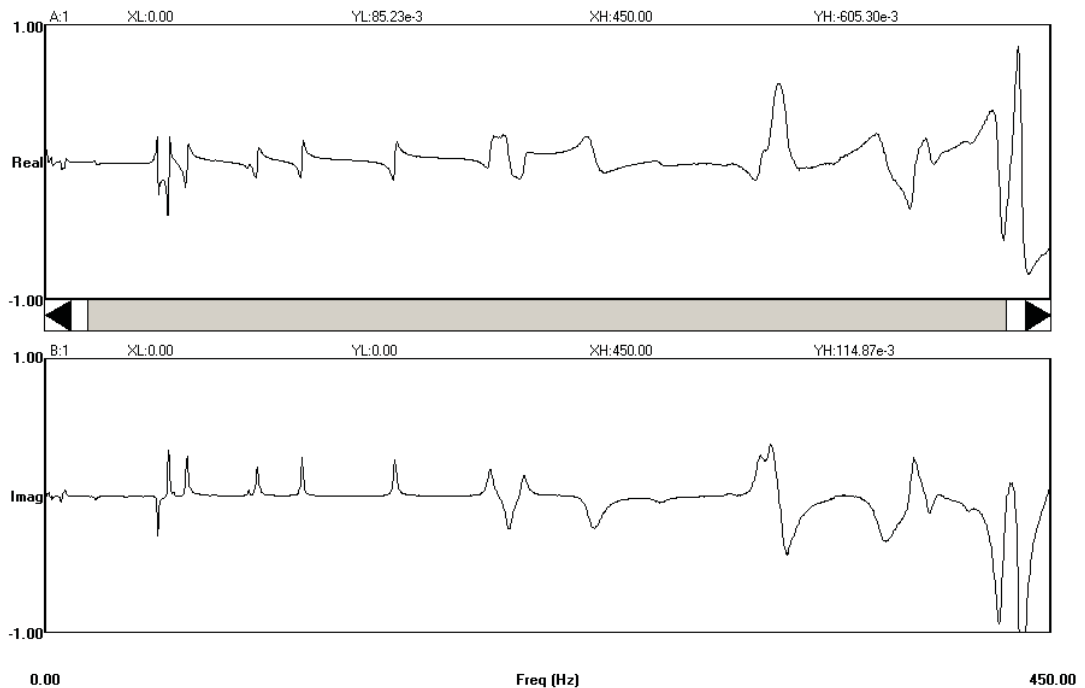


図 A4-7 点 30 (中段プレート) Z 方向の周波数応答関数

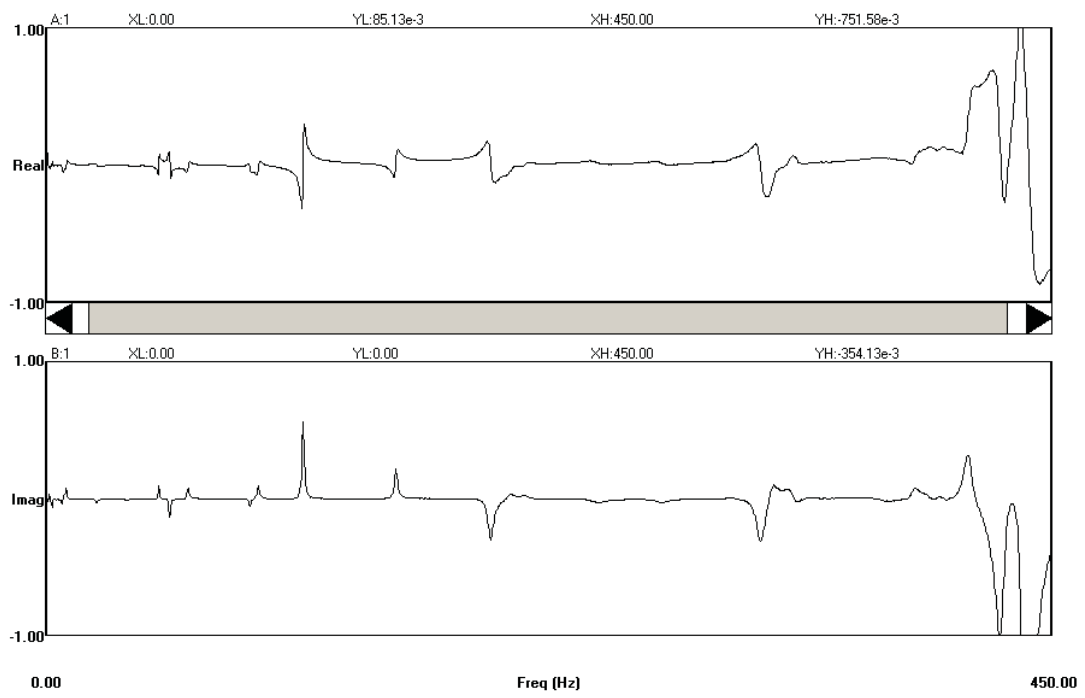


図 A4-8 点 49 (下段プレート中央フレーム上) Z 方向

A4.4.2 データ処理

STAR MODAL (SPECTRAL DYNAMICS 社製) を使用し、振動試験の結果得られた伝達関数のモード識別を行った。モード識別手法には、Global Frequency & Damping および Global Residue 法を使用した。ただし、今回の試験においては 400Hz 以上で加振力がうまく伝達されておらず、22～24 次のモードの信頼度は低い。モード識別結果を表 A4-3 に示す。

表 A4-3 モーダルサーベイのモード識別結果

次数	固有振動数 [Hz]	モード減衰比 [%]
1	2.6	3.85
2	7.9	3.96
3	9.0	4.14
4	50.3	0.59
5	55.1	0.52
6	63.3	0.88
7	75.2	1.19
8	91.0	0.51
9	94.7	0.70
10	114.9	0.44
11	156.4	0.49
12	198.8	0.74
13	207.6	0.95
14	214.0	0.76
15	245.1	1.51
16	275.2	0.95
17	320.4	0.65
18	327.6	0.78
19	335.3	0.44
20	387.9	0.51
21	395.5	0.48
22	413.0	0.53
23	427.9	0.55
24	437.6	0.42

A4.5 有限要素モデルのパラメータ調整

A4.5.1 モード形状の比較

試験時の各々の計測点における加速度振幅（x,y,z 方向）と、FEM モーダル解析の結果の変位振幅（x,y,z 方向）の相関係数を求め、モードの比較を行った。FEM モデルは、各測定点が FEM のノードになるように作成した。

モーダル測定の結果はダンピングの影響を含むため、位相角情報を持っている。そのため、モーダル測定の結果の位相角 θ が、 $90^\circ < \theta < 270^\circ$ の場合は振幅が負、さもなければ振幅が正とし、FEM モーダル解析の結果との相関係数を計算した。

相関係数 r の求め方は、次式の通りである。モードの一致度が高いほど、相関係数の絶対値は 1 に近くなる。

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}$$

$$S_{xx} = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2$$

$$S_{yy} = \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2$$

$$S_{xy} = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$$

r:相関係数

x_j :測定された加速度振幅

y_j :FEM 解析結果の変位振幅

n:測定点の数 x3

A4.5.2 パラメータ合わせこみ

ビーム要素の 4 つのパラメータ（断面積 A、断面 2 次モーメント I1、I2、ねじり定数 J）および空気バネのバネ定数（x,y,z 方向）を変化させ、各モード周波数が近くなるように合わせ込みを行った。用いたパラメータは計 7 つであるが、空気バネのバネ定数は、主に剛体モードに寄与し、振動モードにはあまり影響を与えない。合わせこみの手順を以下に示す。

1. 試験結果の各モードの周波数を $\mathbf{f}_0 = [f_{01}, f_{02}, \dots, f_{0n}]^T$ とする。

n : 試験結果のモード数
 f_{0i} : 試験結果のモード i の周波数

2. 初期パラメータ設定を行う。

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$$

m : パラメータの数

3. パラメータ \mathbf{x} に基づき、FEM モーダル解析を行う。
4. 相関係数によるモードの判定を行い、試験結果に対応する FEM モーダル解析結果の周波数を求める。

$$\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$$

f_i : 試験結果のモード i に対応する FEM モーダル解析結果の周波数

5. 誤差が許容範囲内であれば終了する。
6. f_i のパラメータ x_j に対する変化割合 $\Delta \mathbf{f}_j$ を求める (今回は各パラメータを 10% 増加させ、変化割合を求めた)。

$$\Delta \mathbf{f}_j = [\Delta f_{1j}, \Delta f_{2j}, \dots, \Delta f_{nj}]^T$$

6. 誤差の二乗和 E が最小となるような $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m]^T$ を求める。

$$E(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{0i} - f'_i}{f_{0i}} \right)^2$$

$$\mathbf{f}' = [f'_1, f'_2, \dots, f'_n]^T = \mathbf{f} + [\Delta \mathbf{f}_1, \Delta \mathbf{f}_2, \dots, \Delta \mathbf{f}_n] \Delta \mathbf{x}$$

7. 得られた $\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}$ を新たな \mathbf{x} とし、3 へ戻る。

実際には、FEM モデルのパラメータを 1 つずつマニュアルで変化させて、モーダル解析を行い、結果ファイルを読み込み、各モードを判定してエクセルファイルに書き込み、周波数の変化割合を計算し、新たなパラメータを求めるといった作業を逐次的に手作業で行った。結果ファイルの読み込みや相関係数の計算などは EXCEL の VB でマクロを作成して自動化したが、NASTRAN のパラメータ設定やモード形状の判別などは手動で行わざるを得なかった。これらの手順を市販の最適化ソフト等を用いて自動化できれば、かなりの省力化が可能になると思われる。

A4.5.3 合わせ込みの結果

表 A4-4、表 A4-5 および表 A4-6 に合わせこみ結果の最終的なパラメータ、パラメータ合わせこみ結果を示す。図 4-9 には FEM 解析結果とモーダルサーベイの結果の相関係数とモード形状をそれぞれ示す。なお、R はモード形状の相関係数である。パラメータが 7 つしか無かったにも関わらず、かなり良い精度で一致させることができた。34 次と 35 次モードについては、相関係数が小さく一致が悪いが、これは試験データの 400Hz 以上での信頼度が低いと考えられる。

表 A4-4 合わせ込み結果の最終的なパラメータ

A(mm ²)	4.376E+00
I1(mm ⁴)	5.182E+03
I2(mm ⁴)	1.626E+04
J(mm ⁴)	8.929E+03
空気バネのバネ定数 (X 方向) (mN/mm) [※]	4.652E+04
空気バネのバネ定数 (Y 方向) (mN/mm) [※]	3.226E+03
空気バネのバネ定数 (Z 方向) (mN/mm) [※]	2.373E+04

※ 空気バネは下端 4 点に設置しているが、同一製品であるので、バネ定数は 4 つそれぞれ同じものであると仮定し、バネ定数の 3 成分(X,Y,Z 方向成分)を変数とした。回転成分に関しては無視した。

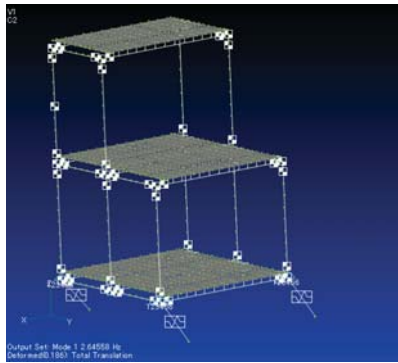
表 A4-5 パラメータ合わせ込み結果

次数	固有振動数 [Hz]		誤差 [%]	モード形状の相関係数 R
	FEM 解析	モーダルサーベイ		
1	2.6	2.6	0.2	0.72
2	4.6			
3	7.9	7.9	0.2	0.90
4	8.9	9.0	-1.1	0.73
5	10.9			
6	13.2			
7	50.3	50.3	0.1	0.82
8	55.5	55.1	0.6	0.86
9	58.4	57.6	1.5	0.94
10	65.7	63.3	3.7	0.90
11	75.1	75.2	-0.1	0.83
12	93.3	91.0	2.6	0.77
13	95.8	94.7	1.2	0.78
14	113.7	114.9	-1.0	0.95
15	150.1	156.4	-4.0	0.95
16	192.4	198.8	-3.2	0.93
17	211.2	207.6	1.7	0.94
18	222.6	214.0	4.0	0.95
19	256.9	245.1	4.8	0.91
20	283.1	275.2	2.9	0.86
21	303.8	320.4	-5.2	0.67
22	306.3			
23	330.1	335.3	-1.5	0.78
24	334.9			
25	339.6			
26	353.5	327.6	7.9	0.58
27	359.9			
28	376.7			
29	377.3	387.9	-2.7	0.61
30	399.4	395.5	1.0	0.78
31	401.5			
32	403.1	413.0	-2.4	0.74
33	417.1			
34	436.7	427.9	2.1	0.51
35	440.5	437.6	0.6	0.43
36	446.0			
37	452.9			
38	455.6			
39	473.9			
40	478.7			

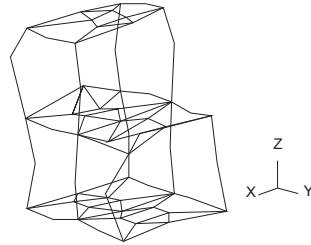
表 A4-6 FEM 解析と計測結果のモーメント形状の相関係数 R

FEM	STAR																										
	1	2	3	4	5	*	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
1	2.6	-7.9	9.0	50.3	55.1	57.6	63.3	75.2	91.0	94.7	114.9	156.4	198.8	207.6	214.0	245.1	275.2	320.4	327.6	335.3	387.9	395.5	413.0	427.9	437.6		
2	0.72	-0.18	-0.16	0.02	0.00	0.03	-0.02	0.04	0.00	0.00	-0.04	-0.01	-0.02	0.01	-0.02	-0.02	0.06	-0.01	0.01	0.04	0.06	-0.02	-0.06	0.02	-0.03		
3	7.9	-0.24	-0.90	0.01	-0.09	-0.06	-0.02	0.01	-0.02	0.05	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	-0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01		
4	8.9	0.11	0.11	0.73	-0.03	0.07	-0.01	-0.04	0.02	-0.01	-0.02	0.01	0.07	0.02	0.04	-0.02	0.01	-0.03	-0.13	0.02	-0.01	-0.07	0.02	0.13	-0.02		
5	10.9	-0.16	-0.06	0.33	0.02	0.03	0.02	0.00	0.01	-0.02	0.01	0.07	0.02	0.04	-0.02	0.01	-0.08	-0.13	0.03	-0.01	-0.10	-0.07	0.02	0.13	0.05		
6	13.2	-0.23	-0.06	0.33	-0.02	0.00	-0.16	0.04	-0.07	-0.02	0.00	-0.01	0.05	-0.01	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	-0.03	0.02	0.01		
7	50.3	0.05	0.01	0.06	-0.82	-0.46	-0.27	-0.06	0.06	-0.12	0.08	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	0.00	0.01	-0.01	0.01		
8	55.5	-0.03	-0.01	0.03	-0.47	0.86	-0.10	-0.15	-0.09	0.07	0.04	-0.04	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.08	0.00	-0.02	0.00	-0.03	0.17	-0.03	0.04	-0.10		
9	58.4	-0.08	0.00	0.04	0.25	0.09	-0.84	0.10	0.05	0.01	0.10	-0.02	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.03	0.00	0.00	0.02	-0.01	0.00	0.00	-0.05		
10	65.7	-0.03	0.01	-0.06	0.13	-0.10	-0.08	-0.90	-0.42	0.02	-0.04	0.00	0.03	0.03	0.02	0.01	0.10	-0.01	-0.03	0.03	-0.01	0.05	-0.18	0.03	0.07		
11	75.1	-0.02	0.01	-0.04	-0.03	-0.06	-0.07	0.38	-0.83	0.11	-0.14	0.08	-0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	-0.01	0.01	0.00	0.02	0.00		
12	93.3	0.03	-0.02	0.05	0.05	-0.06	0.08	0.00	-0.04	0.77	0.57	-0.04	0.01	0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.05	0.03	-0.01	-0.02	0.00	-0.02	-0.01		
13	95.8	0.01	0.02	0.08	-0.02	0.01	-0.03	-0.05	0.32	0.55	-0.78	0.15	-0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.01	0.01		
14	113.7	-0.03	-0.01	-0.03	0.01	-0.05	0.01	0.03	0.01	0.06	-0.13	-0.95	-0.15	-0.01	0.02	0.00	0.09	-0.10	0.02	0.03	0.02	0.06	-0.07	0.08	-0.14		
15	150.1	0.07	0.03	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	-0.14	0.95	0.03	0.00	-0.02	0.01	-0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.02	-0.01	-0.04		
16	192.4	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.02	-0.01	0.01	0.00	0.01	-0.03	-0.04	0.93	0.19	0.17	0.03	-0.06	-0.06	0.02	-0.09	-0.16	-0.08	-0.25	0.05	0.10	
17	211.2	0.06	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.22	-0.94	-0.14	-0.04	-0.03	-0.02	0.03	-0.04	0.11	0.04	-0.14	-0.18	0.07		
18	222.6	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	-0.09	-0.15	0.95	-0.12	0.08	0.06	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.34	-0.46		
19	256.9	0.01	0.01	-0.03	-0.05	0.08	0.00	0.09	0.06	0.01	0.00	-0.01	0.03	0.09	-0.03	0.01	-0.91	-0.11	-0.19	0.06	0.09	-0.14	0.40	-0.11	0.06	0.05	
20	283.1	0.03	0.00	0.08	0.03	-0.03	0.01	-0.05	-0.03	0.00	0.00	0.01	0.06	0.03	0.05	-0.07	0.13	0.29	-0.86	-0.26	0.03	-0.06	0.06	-0.30	0.14	-0.04	0.09
21	303.8	0.01	0.01	0.06	-0.03	0.03	-0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.05	-0.02	-0.27	-0.59	0.67	-0.15	-0.30	-0.20	0.09	-0.03	0.14	-0.07	0.00	
22	306.3	0.02	0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.02	0.02	0.00	-0.02	0.00	0.01	-0.04	-0.02	0.00	0.01	-0.02	0.06	0.37	0.06	0.01	0.02	0.11	-0.02	0.00		
23	330.1	-0.01	0.00	0.00	-0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	-0.03	-0.10	-0.06	-0.35	-0.01	-0.78	-0.16	0.03	-0.05	-0.02	0.09	0.01		
24	334.9	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	-0.02	0.00	-0.11	-0.39	0.06	0.03	-0.05	-0.10	-0.10	-0.01		
25	339.6	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	-0.01	-0.07	0.09	-0.09	0.43	0.15	-0.01	0.03	-0.07	0.03	0.00		
26	353.5	0.00	-0.01	0.01	0.00	-0.01	0.02	0.01	0.02	0.05	0.11	-0.01	0.00	0.02	0.00	-0.03	0.01	0.01	0.06	-0.58	0.35	-0.01	0.07	0.05	0.06	0.07	
27	359.9	-0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	-0.12	-0.04	-0.07	0.03	-0.07	-0.02	-0.07	0.02	-0.08	-0.27	-0.17	-0.38	-0.36		
28	376.7	0.02	-0.01	0.08	-0.03	-0.01	0.08	0.01	-0.05	0.00	-0.02	0.00	0.06	-0.04	0.04	0.06	-0.06	-0.12	0.07	-0.09	-0.13	-0.40	0.18	0.15	0.01	-0.01	
29	377.3	0.02	-0.03	-0.06	-0.01	0.00	-0.09	-0.02	0.02	0.02	-0.01	-0.02	0.02	0.08	-0.07	-0.13	0.08	0.25	-0.06	-0.02	0.08	0.61	0.10	-0.09	0.07		
30	399.4	0.00	-0.01	0.12	0.10	-0.13	0.03	-0.17	-0.09	-0.01	-0.01	0.06	0.01	0.28	0.11	0.09	0.56	-0.19	-0.04	0.03	-0.01	0.20	-0.78	0.21	-0.05	0.21	
31	401.5	0.00	0.00	0.11	-0.02	0.03	0.00	0.08	0.03	-0.01	0.02	0.15	-0.01	0.21	-0.40	-0.18	-0.16	-0.36	0.08	0.00	-0.07	-0.07	0.18	-0.10	-0.35	0.27	
32	403.1	0.05	0.00	-0.16	-0.01	0.02	0.01	-0.02	0.00	0.01	-0.18	-0.06	0.59	-0.15	-0.02	0.03	0.24	-0.01	0.01	0.01	0.01	-0.05	0.10	-0.74	0.16	0.13	
33	417.1	0.00	0.01	0.00	0.04	-0.06	0.00	-0.06	-0.03	-0.01	-0.01	0.00	0.03	-0.54	-0.44	-0.03	0.21	0.08	0.02	0.00	0.10	0.09	-0.12	-0.02	-0.12	-0.04	
34	436.7	-0.04	-0.03	-0.05	0.00	-0.04	-0.01	-0.03	0.03	-0.01	0.00	0.04	0.01	0.08	-0.11	0.38	0.01	0.04	0.08	-0.06	-0.02	0.24	-0.12	0.01	-0.51	-0.41	
35	440.5	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.01	-0.04	-0.05	0.21	-0.51	0.15	-0.04	0.03	-0.02	0.07	-0.06	0.16	0.08	0.45	0.43		
36	446.0	0.02	-0.01	0.04	-0.03	0.03	0.09	0.03	0.00	-0.01	0.05	-0.02	0.00	-0.01	-0.09	0.18	-0.11	0.07	-0.04	0.06	0.14	-0.23	-0.05	-0.05	-0.04	-0.07	
37	452.9	0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.02	-0.02	-0.07	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.01	-0.03	0.02	0.03	0.02	-0.10	0.01	-0.13	0.03	0.00	-0.21	-0.09	
38	455.6	0.07	-0.01	-0.03	0.02	-0.02	0.01	-0.03	0.00	0.01	0.02	0.06	0.02	-0.07	0.01	-0.10	0.08	0.02	0.06	0.03	0.01	-0.13	0.07	0.06	-0.49	-0.24	
39	473.9	0.03	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	-0.01	-0.01	0.02	0.03	0.03	0.08	-0.19	-0.09	-0.02	-0.07	0.01	0.00	0.03	-0.18	0.00	0.15	-0.08	-0.18	
40	478.7	-0.07	0.01	-0.03	-0.01	-0.03	0.01	0.04	-0.06	0.02	-0.03	-0.06	0.01	0.08	0.01	-0.09	-0.04	0.00	-0.02	0.01	0.00	0.00	-0.15	-0.03	-0.01	-0.03	-0.15

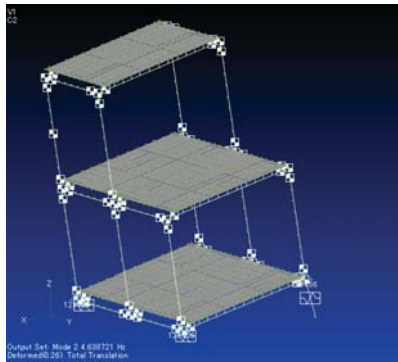
1次 (R=0.72)



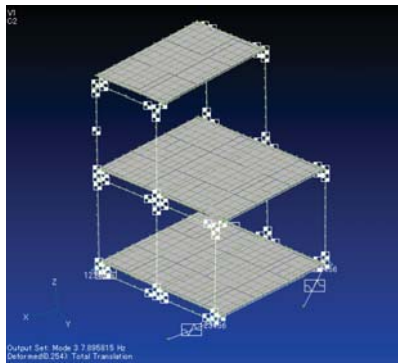
#1:264 Hz



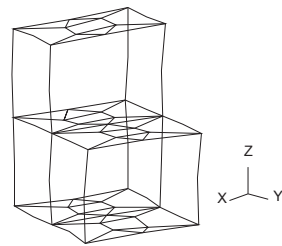
2次



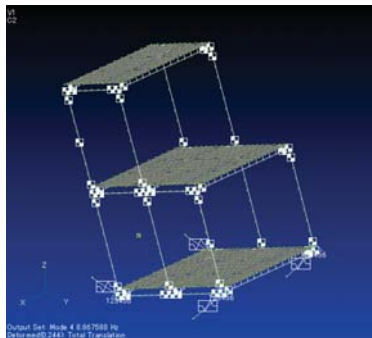
3次 (R=0.90)



#2:27.88 Hz



4次(R=0.73)



#3:8.97 Hz

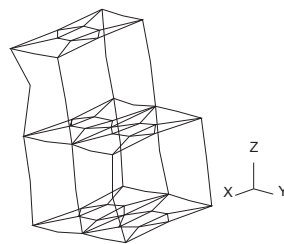
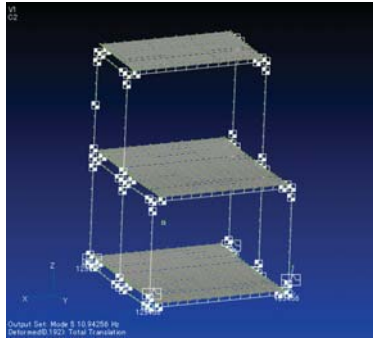
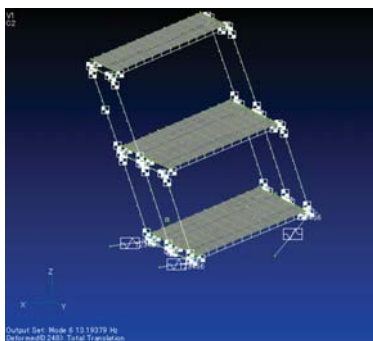


図 A4-9 モードの形状比較(1/10)

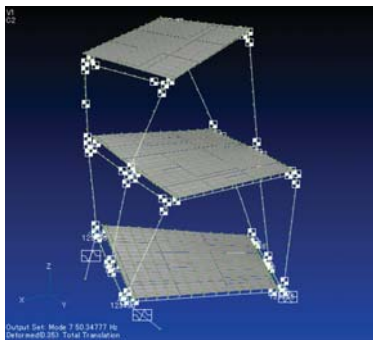
5次



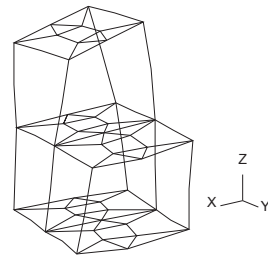
6次



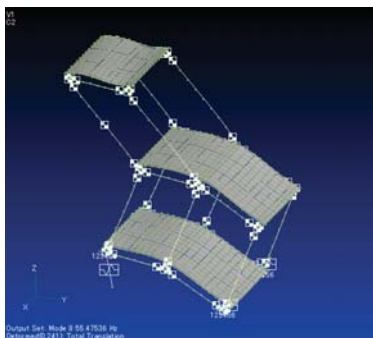
7次 (R=0.82)



#4:50.31 Hz



8次 (R=0.86)



#5:55.13 Hz

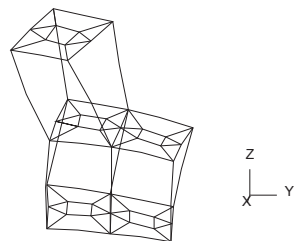
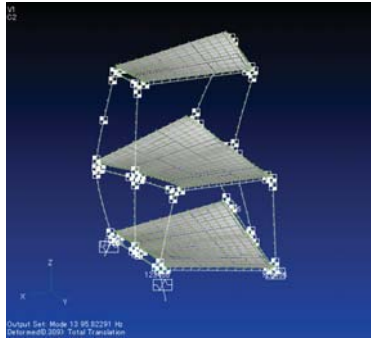
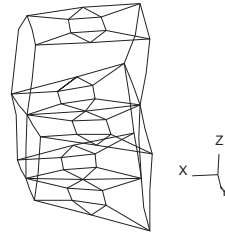


図 A4-9 モードの形状比較(2/10)

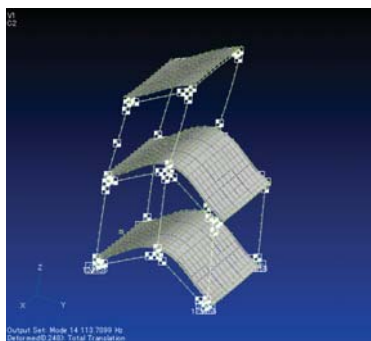
13 次 (R=0.78)



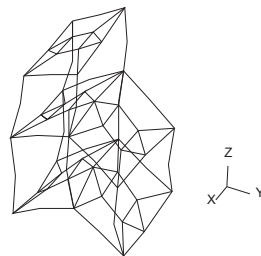
#9:94.73 Hz



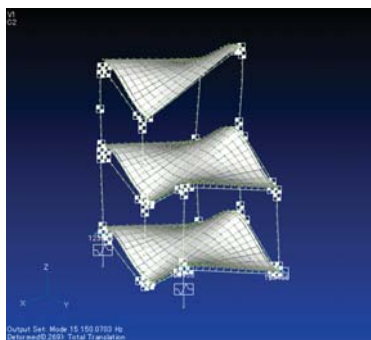
14 次 (R=0.95)



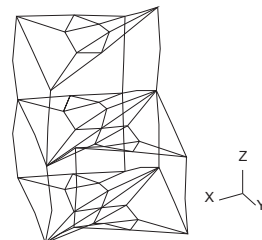
#10:114.86 Hz



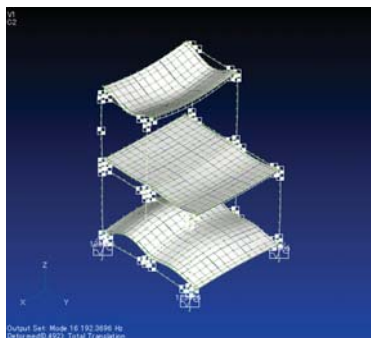
15 次 (R=0.95)



#11:156.39 Hz



16 次 (R=0.93)



#12:198.78 Hz

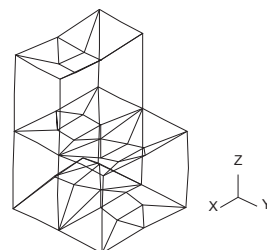
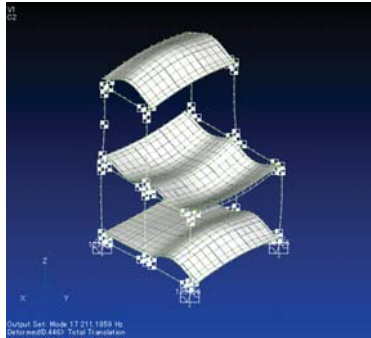
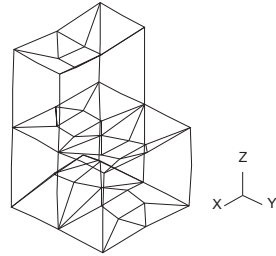


図 A4-9 モードの形状比較(4/10)

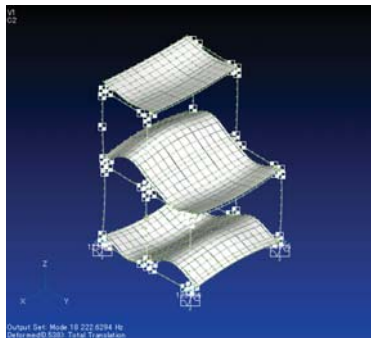
17次 (R=0.94)



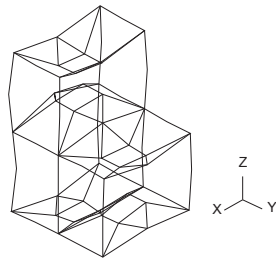
#12.198.78 Hz



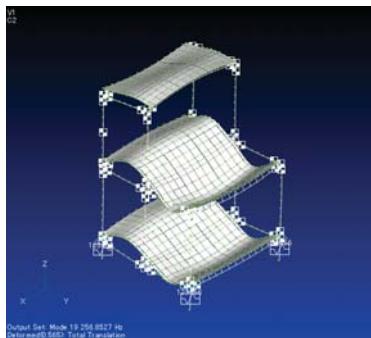
18次 (R=0.95)



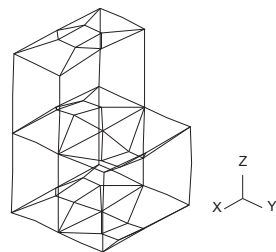
#14.213.99 Hz



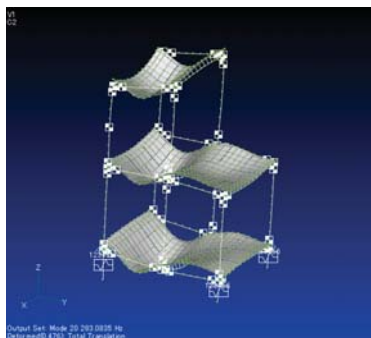
19次 (R=0.91)



#15.245.06 Hz



20次 (R=0.86)



#16.275.18 Hz

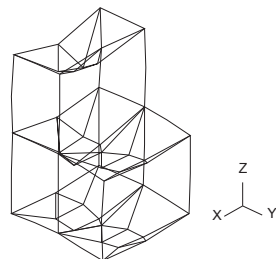
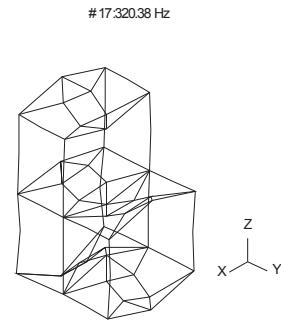
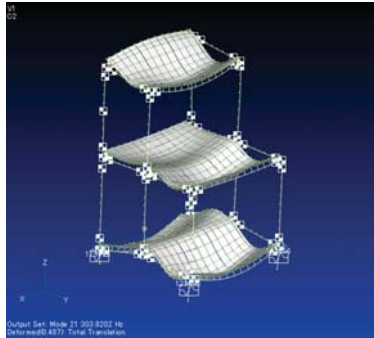


図 A4-9 モードの形状比較(5/10)

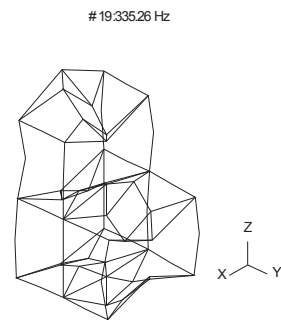
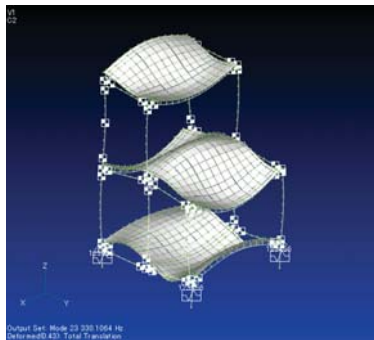
21 次 (R=0.67)



22 次



23 次 (R=0.78)



24 次

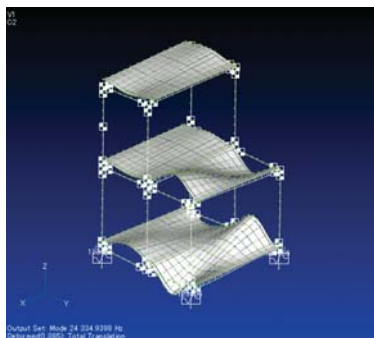
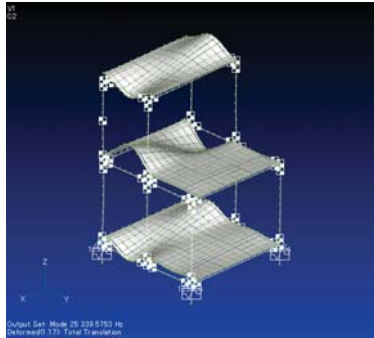
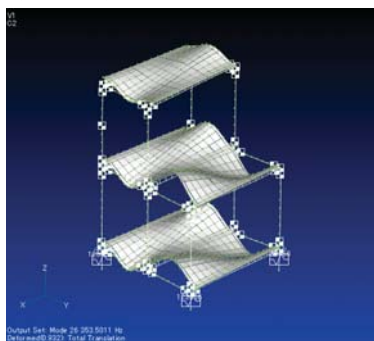


図 A4-9 モードの形状比較(6/10)

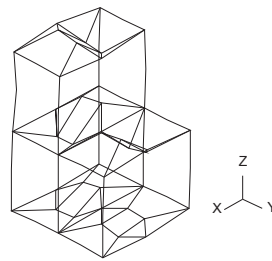
25 次



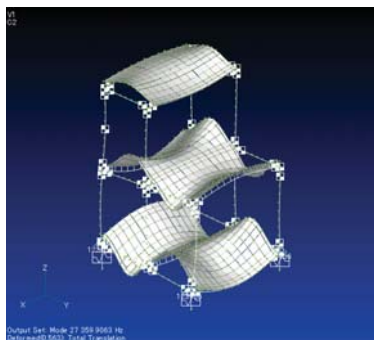
26 次 (R=0.58)



#18.32761 Hz



27 次



28 次

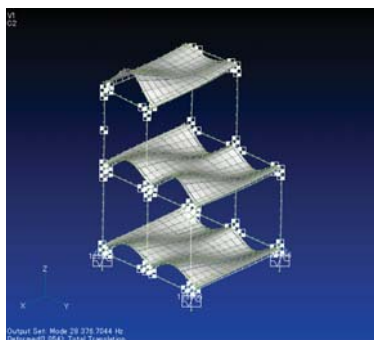
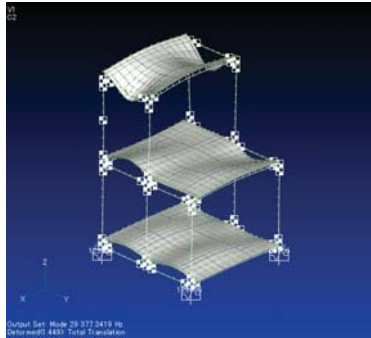
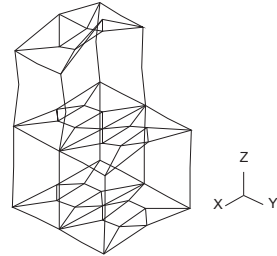


図 A4-9 モードの形状比較(7/10)

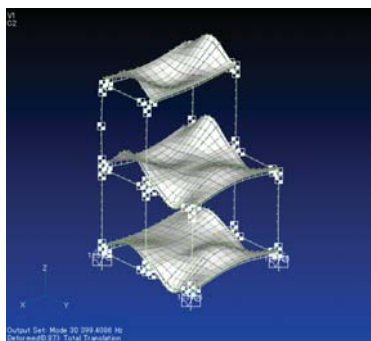
29 次 (R=0.61)



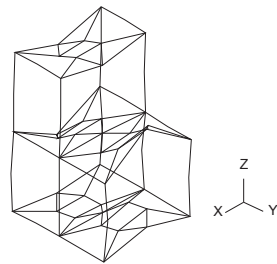
#20.38787 Hz



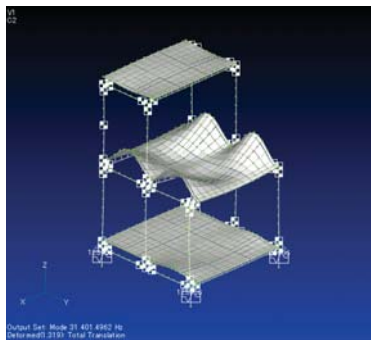
30 次 (R=0.78)



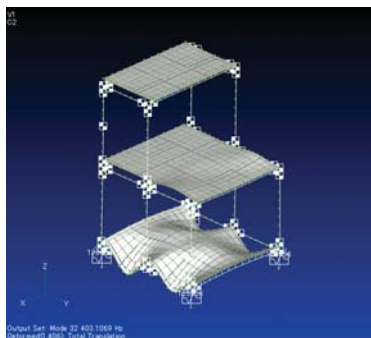
#21.39554 Hz



31 次



32 次 (R=0.74)



#22.41302 Hz

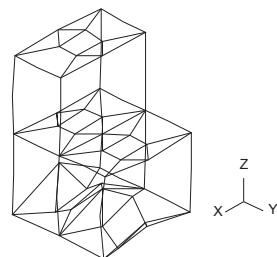
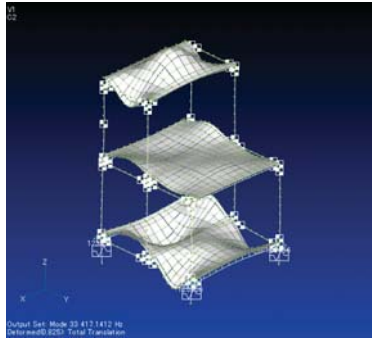


図 A4-9 モードの形状比較(8/10)

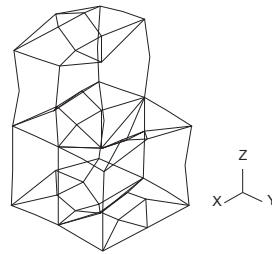
33 次



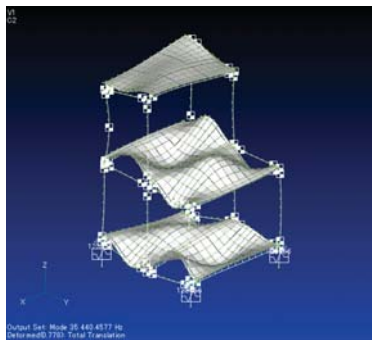
34 次 (R=0.51)



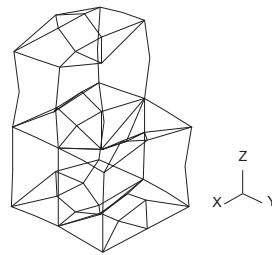
#23.427.91 Hz



35 次 (R=0.43)



#23.427.91 Hz



36 次

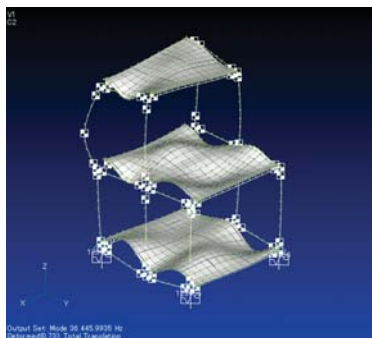
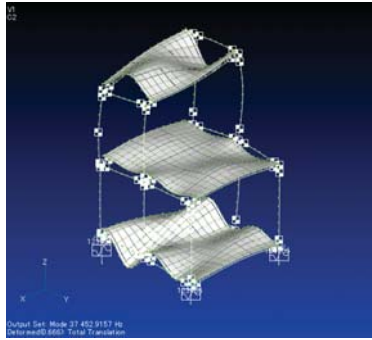
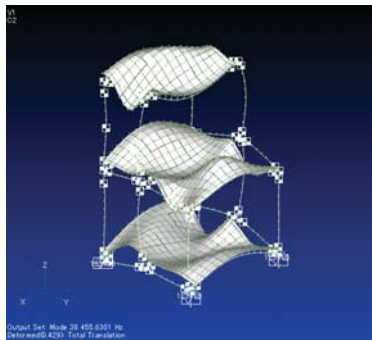


図 A4-9 モードの形状比較(9/10)

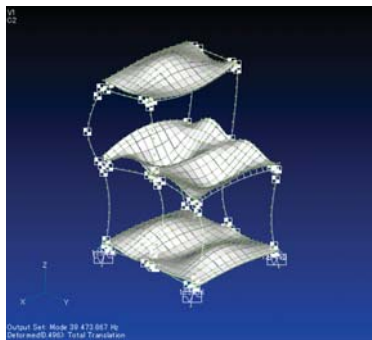
37 次



38 次



39 次



40 次

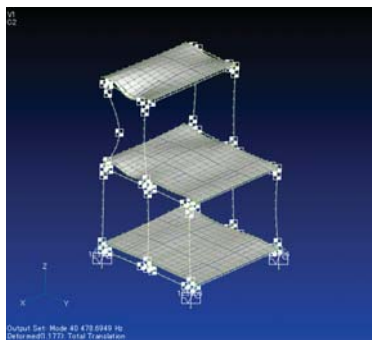


図 A4-9 モードの形状比較(10/10)

A4.6 下端を固定した場合の有限要素解析

境界条件の影響を調べるため、合わせ込み済みのモデルにおいて下端の4点を固定した条件でモード計算を行った（図 A4-10）。固定条件は、ピン固定と完全固定の2種類で行った。計算結果を表 A4-7 に示す。ピン固定と完全固定の比較では、完全固定のほうが1次では27.4%、2次では24.1%周波数が高くなるが、それよりも高次ではおおむね0~5%以内の周波数の違いにとどまっている。また、相関係数も比較的1に近いモードが多く、ピン固定と完全固定はあまり大きなモード形状の違いはない。図 A4-11 にモード形状図を示す。

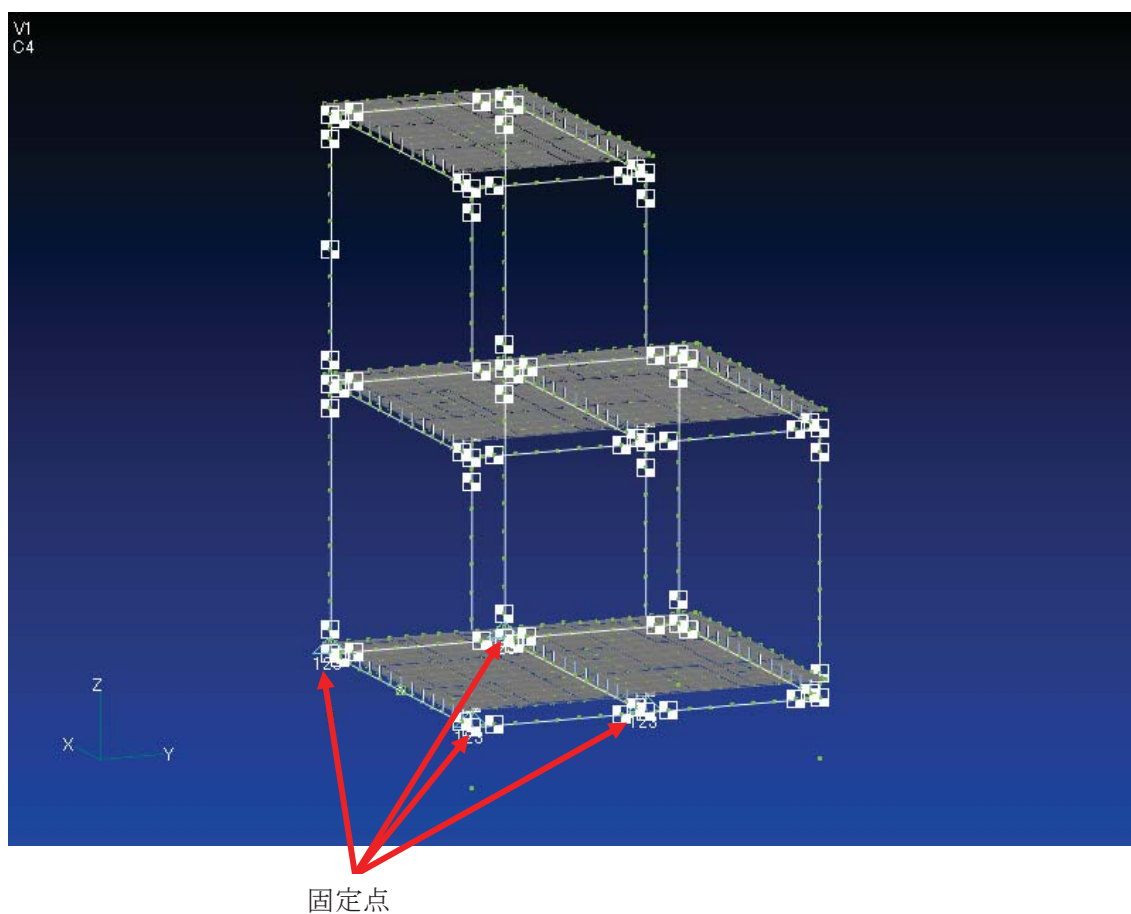
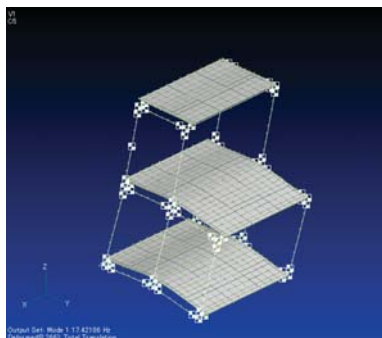


図 A4-10 下端を固定した FEM モデル

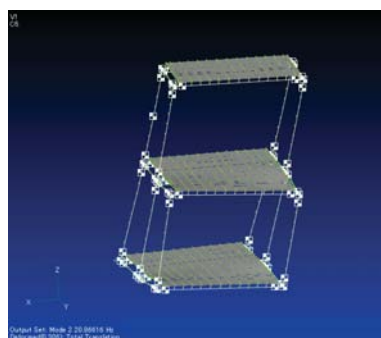
表 A4-7 下端4点固定の場合の振動モード

ピン固定		完全固定		誤差	相関係数
次数	固有振動数 [Hz]	次数	固有振動数 [Hz]		
1	17.4	1	20.4	17.4%	0.996
2	20.9	2	25.9	24.1%	-0.995
3	34.1	3	35.9	5.3%	0.999
4	52.8	4	55.6	5.3%	-0.990
5	64.6	5	66.9	3.5%	-0.985
6	68.7	6	72.0	4.7%	-0.985
7	85.1	7	91.2	7.1%	-0.985
8	96.4	8	99.9	3.6%	-0.999
9	150.6	9	150.6	0.0%	1.000
10	194.9	10	195.2	0.2%	-0.999
11	213.6	11	213.6	0.0%	1.000
12	216.8	12	217.0	0.1%	0.998
13	225.9	13	228.8	1.3%	-0.986
14	239.0	14	247.3	3.5%	-0.978
15	259.9	15	261.8	0.7%	-0.989
16	267.0	16	267.2	0.0%	1.000
17	313.9	17	313.9	0.0%	1.000
18	322.7	18	326.2	1.1%	0.999
19	330.4	19	332.2	0.5%	-0.995
20	337.4	20	337.4	0.0%	1.000
21	344.6	21	345.1	0.2%	0.999
22	353.2	22	354.9	0.5%	-0.986
23	359.2	23	360.2	0.3%	0.994
24	361.1	24	362.2	0.3%	0.990
25	373.4	26	385.4	3.2%	-1.000
26	383.1	25	383.1	0.0%	-0.961
27	388.7	27	388.9	0.1%	0.987
28	401.7	28	402.2	0.1%	-0.982
29	404.4	29	406.6	0.6%	-0.949
30	408.5	30	411.7	0.8%	-0.911
31	438.4	31	439.1	0.2%	0.992
32	444.4	32	446.6	0.5%	0.984
33	467.0	33	467.7	0.1%	0.979
34	470.6	34	473.7	0.7%	-0.835
		35	480.2		
35	473.1	36	493.1	4.2%	-0.859
36	480.8	37	497.4	3.4%	-0.833
37	485.3				
38	499.9	38	505.3	1.1%	-0.779
39	522.0	39	526.5	0.9%	0.972
40	527.2	40	532.3	1.0%	-0.949

1 次(17.4Hz)



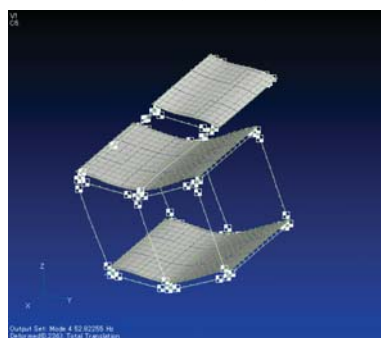
2 次(20.9Hz)



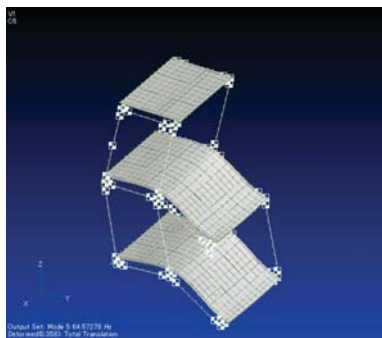
3 次(34.1Hz)



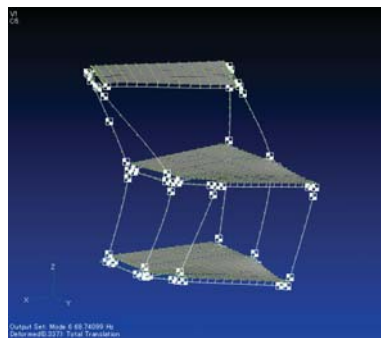
4 次(52.8Hz)



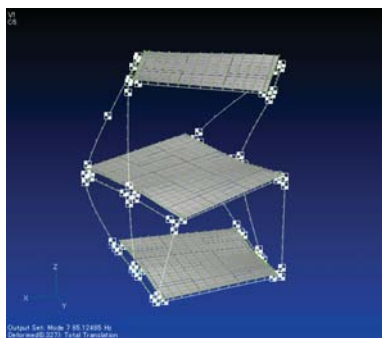
5 次(64.6Hz)



6 次(68.7Hz)



7 次(85.1Hz)



8 次(96.4Hz)

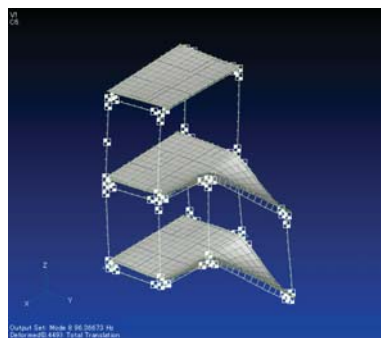
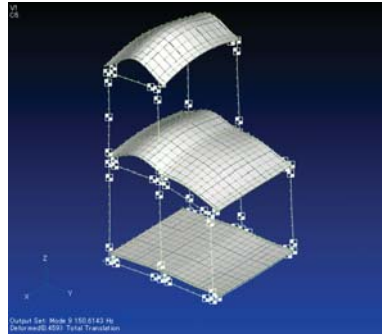
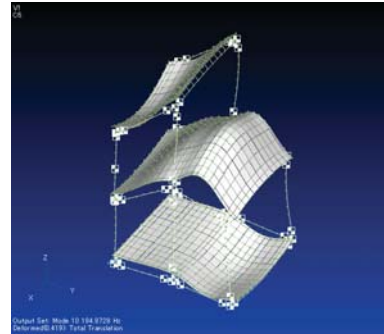


図 A4-11 下端ピン固定時の FEM モデルのモード形状(1/5)

9 次(150.6Hz)



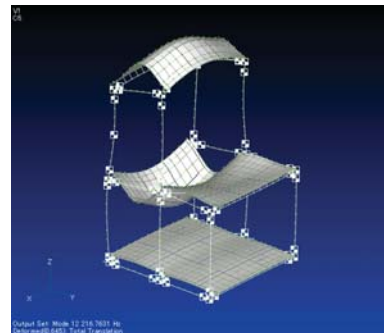
10 次(194.9Hz)



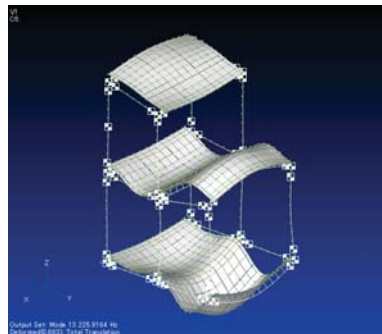
11 次(213.6Hz)



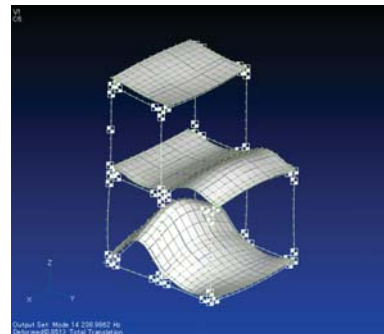
12 次(216.8Hz)



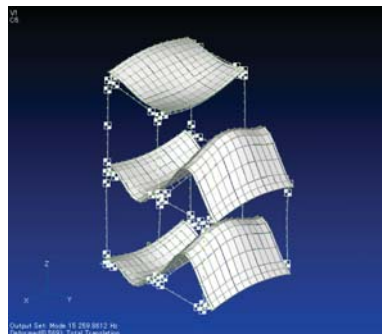
13 次(225.9Hz)



14 次(239.0Hz)



15 次(259.9Hz)



16 次(267.0Hz)

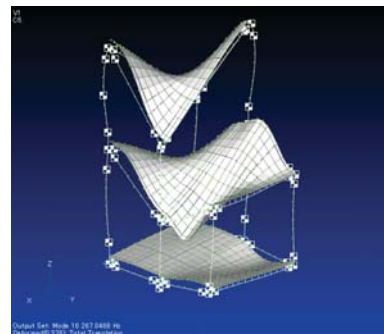
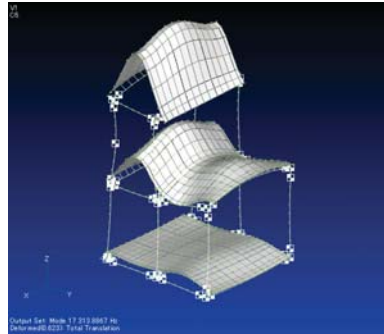
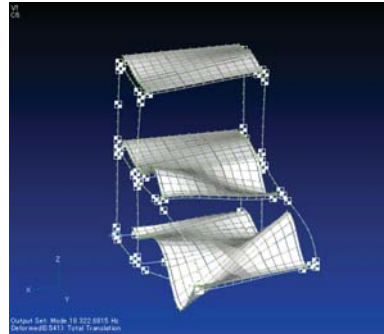


図 A4-11 下端ピン固定時の FEM モデルのモード形状(2/5)

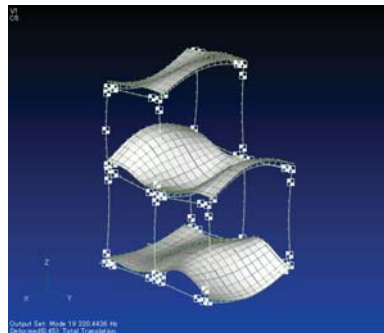
17 次(313.9Hz)



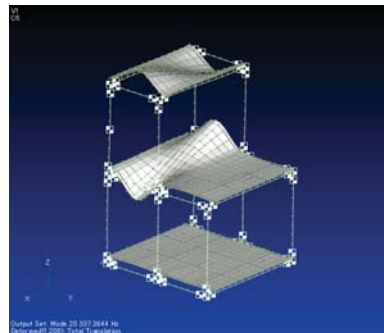
18 次(322.7Hz)



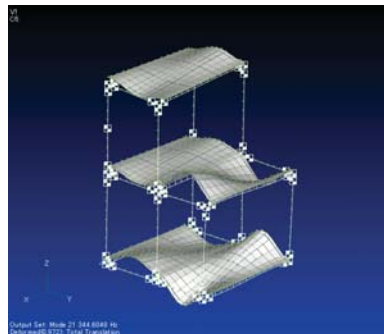
19 次(330.4Hz)



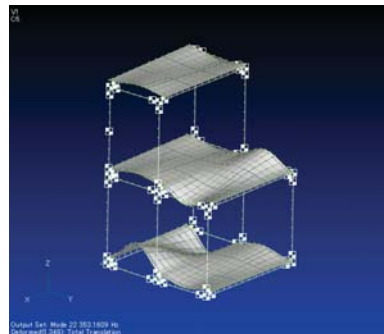
20 次(337.4Hz)



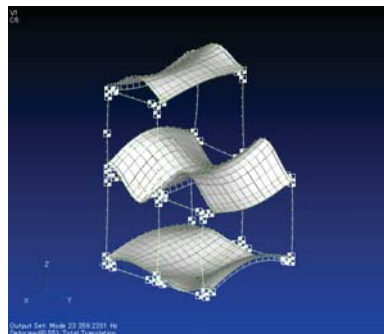
21 次(344.6Hz)



22 次(353.2Hz)



23 次(359.2Hz)



24 次(361.1Hz)

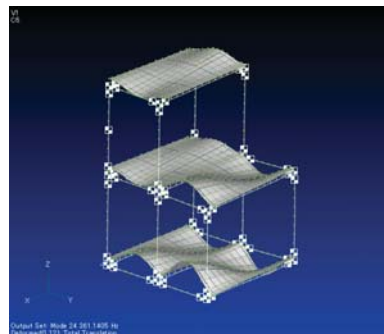
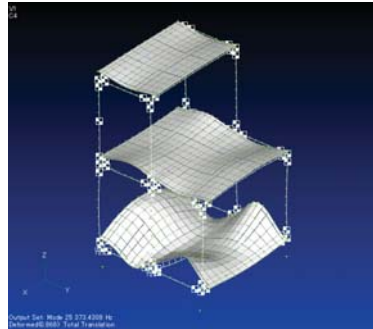
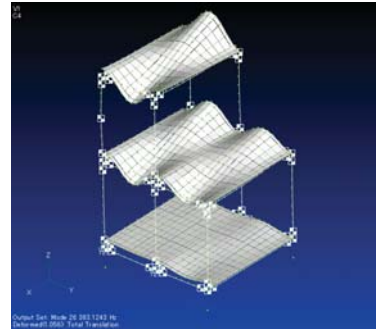


図 A4-11 下端ピン固定時の FEM モデルのモード形状(3/5)

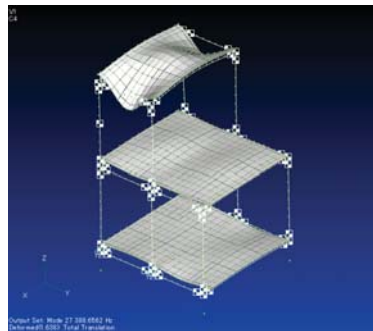
25 次(373.4Hz)



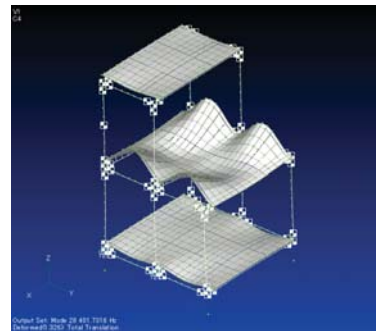
26 次(383.1Hz)



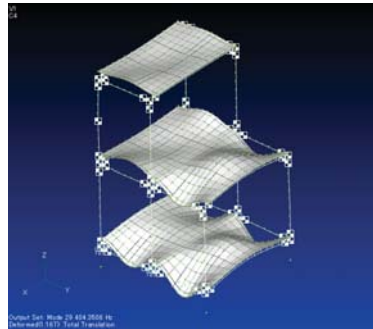
27 次(388.7Hz)



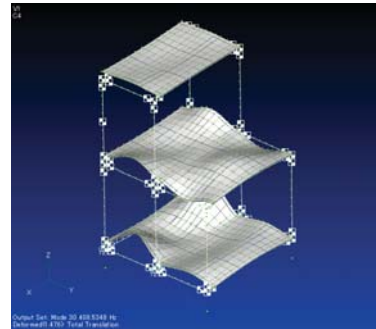
28 次(401.7Hz)



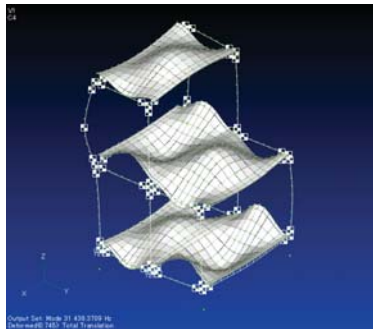
29 次(404.4Hz)



30 次(408.5Hz)



31 次(438.4Hz)



32 次(444.4Hz)

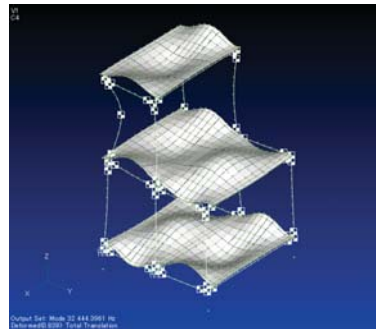
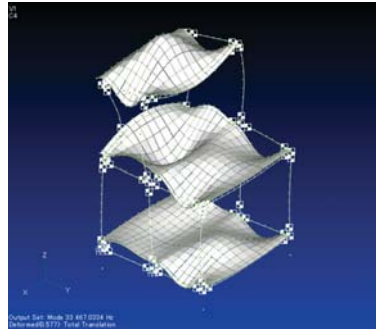
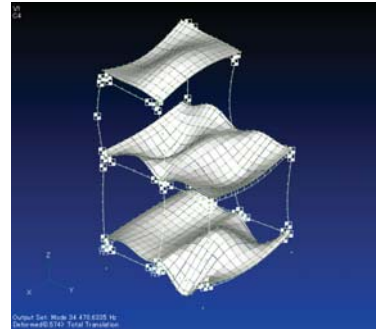


図 A4-11 下端ピン固定時の FEM モデルのモード形状(4/5)

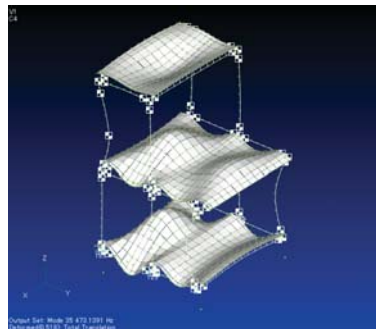
33 次(467.0Hz)



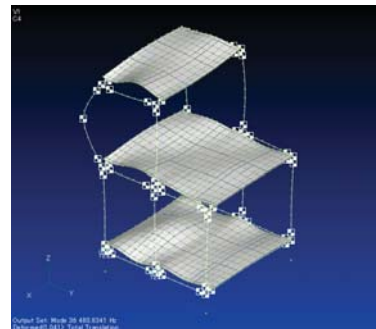
34 次(470.6Hz)



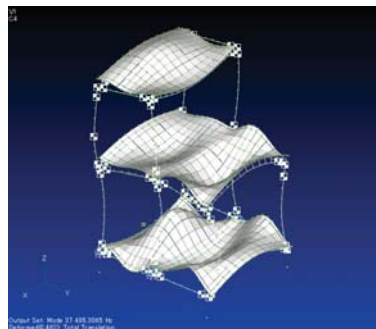
35 次(473.1Hz)



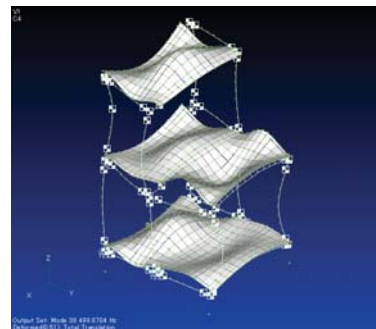
36 次(480.8Hz)



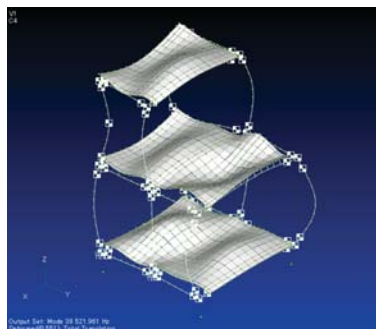
37 次(485.3Hz)



38 次(499.9Hz)



39 次(522.0Hz)



40 次(527.2Hz)

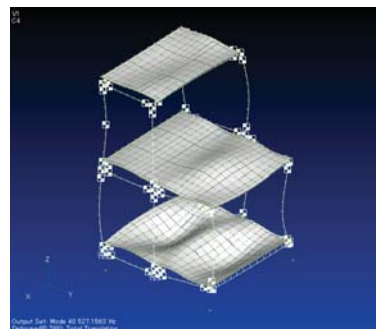


図 A4-11 下端ピン固定時の FEM モデルのモード形状(5/5)