

J A E R I - M  
92-164

I T E R 真空容器の耐震解析(1)  
—モデル化及び固有値解析結果—

1992年11月

二川 正敏・小泉 興一・清水 克祐・高津 英幸  
武藤 康・今木 敏雄\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

ITER 真空容器の耐震解析（1）  
－モデル化及び固有値解析結果－

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

二川 正敏・小泉 興一<sup>+</sup>・清水 克祐<sup>+</sup>

高津 英幸<sup>+</sup>・武藤 康・今木 敏雄\*

（1992年10月6日受理）

国際熱核融合実験炉（ITER）の大型真空容器について、1/16セクタの詳細な構造モデルを用いた固有値解析を行って真空容器のポロイダル断面内の振動挙動を調べると共に、詳細モデルによって得られた固有値解析結果に基づいてリブ付き二重壁構造体の特性を維持できる解析モデルの簡易化手法の検討を行った。さらに、簡易化したセクタモデルを1/2トーラスモデルに展開してトーラス構造体としての真空容器の低次振動挙動を検討した。得られた主な結論は、以下の通りである。

- (1) 詳細モデルにより得られた1/16セクタ真空容器の一次固有振動数は、約30Hzであった。
- (2) 補強リブ付き二重壁構造を有する真空容器一般部の振動挙動は、剛性として直交異方性を有する一枚のシェルで表わせる。
- (3) 真空容器の低次振動挙動に対しては、二重壁構造シェルの剛性、上部ポートの質量が支配的である。

---

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

+ 那珂研究所ITER開発室

\* 武田技術開発株式会社

Aseismatic Analysis of ITER Vacuum Vessel (1)

- Modeling and Eigenvalue Analysis -

Masatoshi FUTAKAWA, Koichi KOIZUMI<sup>+</sup>, Katsusuke SHIMIZU<sup>+</sup>  
Hideyuki TAKATSU<sup>+</sup>, Yasushi MUTO and Toshio IMAKI<sup>\*</sup>

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 6, 1992)

Engineering Design Activity (EDA) of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) project has been scheduled to be conducted from 1992 to 1998 under the auspices of International Atomic Energy Agency (IAEA). In this project, the Joint Central Team organized by European Community (EC), the Community of Independent States (CIS), the United States and Japan performs the detail design and analysis of the ITER. The final purpose of this project is to construct the design and material data base for the ITER, through the design, analysis and R&D works for key components. The aseismatic evaluation of reactor components is one of the key issues of the EDA. For this purpose, aseismatic analysis of the ITER vacuum vessel was carried out based on the structure designed during the Concept Design Activity (CDA) from 1988 to 1990. A 1/16 sector of the vacuum vessel was modeled and analyzed by using a finite element method (FEM) in order to obtain the vibrational behaviors in the poloidal plane. Also, a simplified FEM model of the torus structure was developed to obtain the behaviors in toroidal plane.

This report describes the results and discussion on the aseismatic analysis of the 1/16 sector, the modeling method to simplify the double-

---

<sup>+</sup> Department of ITER Project, Naka Fusion Research Establishment

<sup>\*</sup> Takeda Engineering Development

skin structure used in the vacuum vessel into orthotropic plates and the aseismatic analysis of the 1/2 torus structure of the vacuum vessel.

The major conclusions obtained by a series of analyses are as follows ;

- (1) The simplified model employing an orthotropic plate as a double-skin reinforced with ribs is useful to represent the vibrational behavior of the vacuum vessel.
- (2) The natural frequency at the first mode obtained in the analysis of the 1/2 torus structure is about 13 Hz under the free boundary condition of each port and about 50 Hz under the fixed one.
- (3) The vibrational behaviors at the lower modes are almost dominated by the stiffness of the vessel shell and the mass of the upper port.

Keywords : ITER, Vacuum Vessel, Vibrational Behavior, Aseismatic Analysis, Simplified Model, FEM, Natural Frequency.

## 目 次

1.はじめに	1
2.ITER炉心構造の概要	3
3.モデル化の手順	5
4.1/16セクタ詳細モデルの固有値解析	6
4.1二重壁構造シェル	6
4.2上部ポート	6
4.3水平ポート	7
4.4下部ダクト	7
4.5下部ポート	7
4.61/16セクタ真空容器	7
5.1/16セクタモデルの簡易化	8
5.1二重壁構造シェルのモデル化	8
5.2上部ポート	9
5.3水平ポート	9
5.4下部ダクト	9
5.5下部ポート	10
5.61/16セクタ真空容器	10
6.1/2セクタ真空容器への展開	11
6.11/2セクタモデル	11
6.2固有振動解析結果	11
6.3リブ剛性及び遮蔽材質量の振動挙動に与える影響	12
7.まとめ	13
参考文献	14

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Core Structure of ITER .....	3
3. Procedure of Modeling .....	5
4. Eigenvalue of a Detailed 1/16 Sector Model .....	6
4.1 Double-skin Shell .....	6
4.2 Upper Port .....	6
4.3 Horizontal Port .....	7
4.4 Lower Duct .....	7
4.5 Lower Port .....	7
4.6 1/16 Vacuum Vessel .....	7
5. Simplification of 1/16 Sector Model .....	8
5.1 Double-skin Shell .....	8
5.2 Upper Port .....	9
5.3 Horizontal Port .....	9
5.4 Lower Duct .....	9
5.5 Lower Port .....	10
5.6 1/16 Sector Vacuum Vessel .....	10
6. 1/2 Sector Vacuum Vessel .....	11
6.1 1/2 Sector Model .....	11
6.2 Eigenvalue Analysis .....	11
6.3 Effect of Rib Stiffness and Shield Mass on Vibrational Behavior .....	12
7. Conclusions .....	13
References .....	14

## 1. はじめに

国際熱核融合実験炉ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)<sup>(1)</sup> は、核融合の科学的、技術的可能性を実証することを目的として、国際原子力機関IAEAのもとにヨーロッパ共同体(EC)、米国、CIS、及び日本の四極が共同で開発研究を進めているトカマク実験装置である。ITER計画は、1988年から1990年に実施された概念設計段階(CDA; Concept Design Activity)を経て、本年度より工学設計活動(EDA; Engineering Design Activity)が開始される。本作業は、上記の四極が国際共同チームを組織し、6年計画で装置の詳細設計を実施するものであり、設計解析作業と並行して各局のホームチームが主要機器のR & Dを分担・実施し、核融合実験炉の建設判断に必要となる全てのデータベースを整備することを目的としている。

上記の現状を踏まえ、日本原子力研究所(以下原研)では、EDAへの準備段階であった1991年より核融合実験炉に適用すべき構造設計基準の検討に着手している。ITERの構造設計の基盤となる構造設計指針を作成するためには、静的な強度評価と同時に地震時に各構成機器に作用する荷重の影響をあらかじめ定量的に評価することが重要である<sup>(2)</sup>。このため、地震時に各構造物に発生する変形、応力を動的解析によって評価する必要があるが、ITERの炉心構造物は、大型でかつ複雑な構造を有するために各機器の静的解析のために作成した有限要素法(FEM)解析モデルをそのまま動的解析に採用することは、計算効率の観点から非現実的である。

従来、建築構造物の耐震解析ではバネ・マス系モデルによる動的解析を中心であるが、卓越した振動モードが現れにくいITERの構造機器に対して、耐震解析の初期段階からバネ・マスモデルを採用してモデル化を進めることは困難である。従って、核融合実験炉の炉心構造物の動的解析を実施する場合には、工学的有意性を保持しつつ如何に解折を行うかが重要な課題となる。同様な観点から、JT-60においても簡易化されたモデルにより耐震解析が実施された<sup>(3-5)</sup>。JT-60真空容器の耐震解析では、①真空容器が一重壁の構造体であること、及び②ベローズにより周方向で分断できる、という構造上の特徴を活かしてモデル化がなされている。これに対して、ITER真空容器では、容器一般部のシェル構造体にボロイダル方向に連続したリブで補強された薄肉二重壁構造を採用しており、ベローズ等によりトーラス方向に分割する構造は採用していない。このため、JT-60真空容器に採用された簡易化の手法を直接適用して解析を進めることは困難であり、ITER真空容器独自のモデル化が必要である。

本報は、ITER耐震解析の第一段階として実施したプラズマ真空容器の振動解析について、モデル化と固有値解析結果について報告するものであり、真空容器の形状・寸法は、日本が提案している遮蔽一体・均一抵抗型真空容器の構造設計概念<sup>(6)</sup>に基づいている。

ITERのプラズマ真空容器は、ブランケット、ダイバータ板等の炉内構造物が内部に設置される幅7m、高さ15mのトーラス構造体であり、プラズマに対する真空境界の形成と燃料であるトリチウム封じ込めの第一壁としての役割を分担する格納容器である。しかし、真空容器は、炉内に設置される機器の炉内への据え付けと炉外への搬出及び各種冷却配管、配線等の引き出し

の他、プラズマ加熱装置や真空容器排気装置の取付のために周囲には上部ポート、水平ポート及び下部ダクトが接続され、多くの開口部を有する複雑な構造となる。耐震性の観点からは、特に低周期の振動挙動、すなわち大型構造物である真空容器全体の振動挙動を把握し、それによって局所的に発生する応力を定量的に評価する必要がある。そこで、真空容器の局所応力の評価を有限要素法により行うことを前提として、動的解析のためのモデル化、すなわち如何に複雑な構造物を簡略化して要素数の低減化を行うかに検討の重点を置いた作業を進めた。モデル化に対しては以下の点に留意した。

- ・低次振動モードの再現性
- ・リブ付き二重壁構造のモデル化
- ・詳細な部分要素モデルから簡易な全体モデルへの展開

なお、本報告書で述べる振動解析モデルを用いた時刻歴応答解析結果並びに発生する応力の評価については、別途報告する。これらの検討結果は、ITER構造設計基準に十分反映できるものと期待される。

## 2. ITER 炉心構造の概要

ITER 炉心構造の概要を図 2.1 に示す。炉心構造は以下に示す主要機器により構成される。

- 1) プラズマを閉じ込める真空容器
- 2) 燃料トリチウムの製造と核融合反応によって生成される熱エネルギーの外部への取り出しを行うブランケット構造体
- 3) プラズマ中の不純物を排気するダイバータ構造体
- 4) プラズマの閉じ込め磁場を発生するトロイダル磁場コイル
- 5) プラズマ電流の立ち上げ、位置制御を行うポロイダル磁場コイル
- 6) 上記 4), 5) の超電導コイルの真空断熱を行うクライオスタット
- 7) 上記の炉内構造物の重量支持及び構造物間の荷重支持を行う支持構造物

図 2.1 に示すように炉心全体は、直径約 30m、高さ約 25m の円柱状の大型構造体であり、構成機器の総重量は 24,000ton に達する。主要機器は、図 2.2 に示すようにトロイダル方向に 16 分割されたセクタ構造体を基本構成単位として構成されており、さらに各セクタは分解組立が用意に行えるよう複数個のモジュールに分解可能な構造を採用している。

ITER の真空容器に要求される機能をまとめ、表 2.1 に示す。真空容器は、プラズマに対する真空雰囲気（通常  $10^{-8}$  Torr）を提供すると共にトリチウム拡散防止の第一次格納容器としての役割を担っており、内部にはブランケット及びダイバータ等の炉内構造物が設置される。真空容器は、他の機器と同様に分解組立の観点からトロイダル方向に 16 分割されたセクタ構造体から構成されており、本体は、幅約 7m、高さ約 15m の D 型断面を有するドーナツ型構造体である。

炉心構造体の 1/16 セクタを図 2.2 に示す。真空容器構造体には、上部ポート、水平ポート等各種ポートが接続される。各開口部の用途は下記の通りである：

- ・上部ポート：ブランケットの分解組立及び炉内構造物の各種冷却配管の取り出し、
- ・水平ポート：プラズマ加熱装置と計測機器の取付、及びダイバータ、第一壁アーマタイル等の交換・保守作業遠隔機器のアクセス、
- ・下部ポート：下側ダイバータ板及びブランケットモジュールの冷却配管の取り出し、
- ・下部ダクト：プラズマの真空排気。

また、表 2.1 に示すように真空容器に設置されるブランケット及びダイバータ等の炉内構造物の自重は、全て真空容器に伝えられ、真空容器下部の重力支持脚によって支持される。このため、支持脚に負荷される死荷重は 1/16 セクタあたり約 750 トンに達する。

表 2.1 に示す諸機能を満足する真空容器の概念は、トロイダル一周抵抗の観点から集中抵抗型と均一抵抗型に大別できる。前者は、プラズマ電流立ち上げに必要なトロイダル一周抵抗を部分的に高抵抗ペローズ等の集中抵抗体を配置することによって確保する方式であるが、厚肉構造と集中抵抗体の組み合わせにより良好な遮蔽性能と高い機械強度が確保できる反面、①接続部の構造が複雑、②プラズマ異常消滅時に集中抵抗体に発生するジュール発熱除去が困難、③

プラズマ異常消滅時に、集中抵抗体によって接続部に鞍型電磁力が発生するため、接続部に高いせん断応力が作用し、接続部の信頼性確保が困難等、多くの問題点が指摘されている。このため、本解析では、集中抵抗型の問題点を解決する方式として提案されている均一抵抗型真空容器（日本案）<sup>(6)</sup> を検討の対象とした。

均一抵抗型真空容器（日本案）の構造概念図（1／16セクタ）を図2.3に示す。構造の特徴は下記の通りである。

- (1) 壁間にリブを設置することにより補強された薄肉二重壁構造を採用し、電磁力に対する曲げ合成と内・外圧に対する機械的強度を確保している。
  - (2) 二重壁間を遮蔽材のための空間として利用し、遮蔽板を積層する方式、またはペベル型遮蔽球を挿入する方式（図2.4）によりトロイダル磁場コイルに必要な遮蔽性能を確保する。
- なお、真空容器及び内部構造物の1／16セクタにおける各構成要素の重量を表2.2に示す。

### 3. モデル化の手順

ITERのような大型で複雑な構造体に対して地震応力の評価を実施する場合、一般構造物の応力評価の手段として有効である有限要素法を用いて構造を忠実に表した解析モデルを作成して耐震解析（動的解析）を行うことは、計算資源と計算効率の面から非現実的である。このため、地震荷重の影響と時刻歴応答を解析するための解析モデルと構造物の局部応力の評価に用いられる解析モデルとは適宜目的に応じて使い分ける必要がある。すなわち、動的解析は振動特性に関する工学的有意性を維持しつつ、可能な限り簡略化されたモデルにより実施し、得られた時刻歴応答値（加速度、変位等）を基に実際の構造物を忠実に表した応力解析モデルを用いて局部応力の評価を行うという手順が必要となる。

プラズマ真空容器の動的解析に用いた解析手順を図3.1に示す。本解析手順の詳細は以下の通りである。真空容器の動的解析を実施するためには、二重壁構造の特性を如何に簡略化したモデルで表現できるかが課題となる。そこで、本解析では真空容器の対称性を考慮してトーラス構造体の1/16セクタについて二重壁構造を再現した詳細モデルを作成する。次に、この詳細モデルに対して固有値解析を実施し、固有振動数及び固有振動モードを求める。この結果を基に、ポートを除く二重壁構造部（以下「一般部」）を一重壁に簡略化した1/16セクタモデルを作成し、この簡略モデルに対しても固有値解析を行い、両者の結果について比較検討しながら、簡略モデルに採用する一般部一重壁モデルの各部分の物性値、要素分割等の妥当性を確認する。同時に、真空容器に接続される各種ポート及び下部ダクトについても簡略化を行う。次に、一般部とポート部の簡略化したモデルを一体化した1/16セクタ簡易モデルを作成した後、簡易モデルを真空容器全体（トーラス方向）に展開した簡易全体モデルによる固有値解析を行い、トーラス構造体としての特性を解析する。さらに、簡略化の可能性を検討した後、簡易全体モデルを用いて設定地震波を荷重条件とする過渡応答解析を行い、加速度、変位等の時刻歴応答から真空容器各部に局部的に作用する地震荷重を求める。この地震荷重を前述の1/16セクタ詳細モデルに採用した応力解析を実施し、耐震安全性の評価を行う。

以上、真空容器の耐震解析に対して本解析で採用した解析手順を示したが、次章からは各構造物の固有値解析結果とモデル化の検討結果について具体的に述べる。なお、本報では簡易モデルによる真空容器の固有値解析結果について述べ、地震波を用いた過渡応答解析及び地震荷重に対する局部応力の解析評価は次報にて報告する予定である。また、本報で述べる一連の解析には、武田技術開発㈱が開発した汎用有限要素法構造解析プログラム“FENIX<sup>(7)</sup>”を使用した。

## 4. 1/16 セクタ詳細モデルの固有値解析

図4.1に真空容器1/16セクタの詳細モデルを示す。モデルの総要素数及び総節点数は約4149, 及び約2960である。詳細モデルには、各部の局所応力の評価に適用できるよう各種ポートと真空容器一般部の二重壁構造が再現されている。以下に各構成要素の固有値解析結果を述べる。

### 4.1 二重壁構造シェル（一般部）

図4.2に二重壁構造シェルの詳細モデルを示す。解析モデルは、アウター・スキン（総要素数：1340）、インナー・スキン（総要素数：1340）及び二重壁間の補強リブ（総要素数：1396）より構成される。解析によって得られた5次までの固有振動数を表4.1、代表的な固有振動モードを図4.3に示す。二重壁構造シェルの第一次固有振動数は約35Hzである。また、二重壁構造シェルの振動モードには、上部ポート及び水平ポートの接続される近傍の変形が支配的であることがわかる。なお、100Hzまでの固有振動モードには二重壁内側（インボード側）の変形モードは見られなかった。

### 4.2 上部ポート

上部ポートの詳細モデルを図4.4に示す。モデルの総要素数は、292である。実際の上部ポートには、ブランケットの炉心搬出作業時のトリチウム拡散防止を目的とした境界板が二重に取り付けられる計画であるため、本解析ではこれらの影響についても検討を行った。表4.2に、①境界板の無い場合、②境界板が1枚の場合、及び③境界板が2枚の場合の3ケースについて第5次までの固有振動数の結果を示す。代表的な固有振動モードとして各ケースの一次固有振動モードを図4.5に示す。なお、各ケースの境界条件は、全て同一で二重壁構造シェルとの接続部で完全固定としている。

表4.2に示すように上部ポートの固有振動数に対しては境界板の影響が顕著であり、境界板が無い場合には1次固有振動数が約10Hzとなる。この値は二重壁シェルの一次固有振動数（約35Hz）よりも低いことから、境界板の無い場合では真空容器全体の低次固有振動に対して上部ポートの振動挙動が支配的になることが予想される。また、低次固有振動が地震波と同様のスペクトラムである20Hz程度以下の領域に存在することは耐震安全性の観点から元来好ましくない。このため、今回の解析では1枚の境界板が設置されている場合の上部ポート（一次固有振動数：35Hz）を解析対象モデルとした。但し、①実際の境界板は、ブランケット及びダイバータの冷却配管の貫通のために多孔板であり、さらに着脱可能な構造となるため本解析モデルと異なること、②境界板の固有振動数に与える影響が大きいことを考慮すると、境界板のモデル化については今後十分検討する必要があるものと考えられる。

#### 4.3 水平ポート

図4.6に水平ポートの解析モデルを示す。モデルの総要素数は210であり、二重壁構造シェルとの境界は完全固定としている。低次の固有振動数及び固有振動モードを表4.3及び図4.7に示す。水平ポートは、一次モードの固有振動数が約50Hzであることから、耐震構造上剛であると考えられる。このため、水平ポート独自の振動挙動が真空容器全体の低次振動挙動に及ぼす影響は少ないと考えられる。但し、水平ポートの真空容器に対する付加質量としての効果は無視できない。

#### 4.4 下部ダクト

下部ダクトの詳細モデルを図4.8に示す。モデル総要素数は138である。二重壁構造シェルとの境界及び底部支持境界が完全固定となっている。下部ダクトはプラズマの真空排気の他に真空容器の自重を支持する機能も持っており、他のポートに比べて板厚が350mmと厚く、高い剛性を有している。このため、下部ダクトは、比較的大きな構造物ではあるが、表4.4に示すように一次固有振動数が約100Hzであることから、耐震上真空容器に対しては十分剛な構造物として取り扱えることが分かる。なお、図4.9に固有振動モードを示す。

#### 4.5 下部ポート

下部ポートの詳細モデルを図4.10に示す。モデルの総要素数は91であり、他のポートと同様、二重壁との境界が完全固定となっている。低次の固有振動数、固有振動モードを表4.5と図4.11に示す。下部ポートは、一次振動数が82Hzとなっているため、下部ダクトと同様に耐震上は真空容器に対して剛構造物として取り扱うことが可能である。

#### 4.6 1/16セクタ真空容器

1/16セクタ真空容器の固有値解析を図4.1に示した詳細モデルにより行った。実際には各種ポート出口にベローズが接続されるが、その剛性については今後のR & Dにより評価される予定である。このため、ここでは各種ポートの境界を完全固定とした場合と、自由境界とした場合とで解析を行い、ポート境界条件による真空容器の振動挙動の変化について調べた。なお、いずれの場合においても下部ダクト底部は完全固定であり、真空容器断面は回転対称の境界条件となっている。

各ポート端部の境界を完全固定とした場合の固有振動数及び固有振動モードを表4.6及び図4.12に示す。一次の固有振動数は54.5Hzであり、低次の固有振動には、上部ポート側壁の変形が支配的である。

表4.7及び図4.13にポート端部を自由境界としたときの解析結果を示す。前述したように、上部ポートには一枚の境界板が取り付けられている。固有振動数は各ポート完全固定に比べて4割程度低下して33.5Hzとなっている。図4.13の固有振動モードより、低次では二重壁構造シェルの水平ポートとの接続部近傍及び上部ポートの側壁の変形が支配的となることが分かる。

## 5. 1/16 セクタモデルの簡易化

簡易化に当たって、二重壁構造を如何に一重壁シェルで表すかに重点をおいた解析検討が行われた。その結果、図5.1に示すような1/16セクタ簡易モデルを作成した。本解析モデルの総要素数及び総接点数はそれぞれ277,321である。以下に各構成要素ごとに検討結果を述べる。

### 5.1 二重壁構造シェルのモデル化

二重壁構造シェルは、二重壁間に設置される縦、横リブにより補強された構造を採用している。このリブを忠実に表現すると1/2セクタあるいは全体に展開したモデルでは膨大な要素数を要する。このため、リブ補強された二重壁構造シェルを、それと同等の剛性と質量を持ちながら要素数を極力抑えた一重壁シェルにモデル化することが必要となる。詳細モデルの二重壁構造シェルから一部を取り出した板モデルを用いた固有値解析結果より、リブ付き二重壁の簡易化方式を検討した。すなわち、図5.2に示す二重壁板モデルを一枚シェルから成る一重壁板モデルに簡易化することを試みた。

二重壁構造を一重壁シェルすなわち均一な厚さを有する一枚のシェルにモデル化するためには、曲げと面内力に対する剛性を両モデル間で等しくする必要がある。

まず、曲げ剛性に関しては、

$$E_{wx} I_{wx} = E_{sx} I_{sx} \quad (1)$$

$$E_{wy} I_{wy} = E_{sy} I_{sy} \quad (2)$$

また、面内力に対する剛性としては、

$$A_{wx} E_{wx} = A_{sx} E_{sx} \quad (3)$$

$$A_{wy} E_{wy} = A_{sy} E_{sy} \quad (4)$$

が成立する必要がある。ここで、E：ヤング率、I：断面二次モーメント、A：断面積、添え字w：二重壁、s：一重壁である。すなわち、面内軸方向（X、Y軸方向）に異なったヤング率を有する直交異方性材料として一重壁シェルを取り扱う。なお、一重壁シェルに関する座標軸は、二重壁の幾何中央面上に設定するものとする。質量については、各要素ごとに質量が両モデル間で等しくなるように密度を調整することで、一重壁シェルの総質量が二重壁シェルのものと一致するようにした。上記の方法により得られた板モデルに対する固有振動数の結果を表5.1、及び固有振動モードの比較を図5.3に示す。固有振動数及び振動モードにおいて両者の一致性は良好である。これより、リブ付き二重壁構造の振動挙動は直交異方性材料として取り扱った一重壁シェルで十分表せることが分かる。

さらに、一重壁シェルで構築された板モデルに対して要素数低減による簡易化を試みた。要素数低減に対する感度解析を行ったモデルケースを表5.2に示す。同表には1/16セクタおよび全体モデルに展開したときの予想総要素数も示した。要素分割数による固有振動数の変化を図5.4にまとめて示す。簡易度の増大、すなわちに要素数の低減に従って高次モードの再現が困難

となり、各固有振動数は増加する傾向が見られる。全体モデルに展開した場合の総要素数は、計算効率を考慮すると2000要素程度に抑える必要がある。さらに、5次程度(300Hz程度)までの固有振動数の一一致性を期待すると、約3.6%程度の簡易化が適当であると考えられる。図5.5に詳細モデルと簡易モデルの固有振動モードの比較を示す。簡易モデルによっても振動変形は十分再現できることが分かる。

そこで、前述した過程に従って1/16セクタモデルの簡易化を行った。すなわち、リブ付き二重壁構造を一重壁シェルに置き換えた後、その初期の一重壁モデルの総要素分割数を3~4%程度に低減して簡易モデルを作成した。図5.6に簡易モデルを示す。モデルの総要素数は152である。リブの形状と数が設置位置により異なるため、二重壁構造シェルは共通なりブを有する10の領域に分割された。一重壁モデルの材料物性値は各領域ごとに求められた。

図5.7に簡易モデルと詳細モデルの固有振動数の比較を示す。簡易モデルの固有振動数は各モードとも詳細モデルに比べて幾分高めとなった。また、図5.8に固有振動モードの比較例を示すが、両者は良く一致しており一重壁シェルの簡易モデルによって二重壁構造シェルの変形を十分表せることが分かる。

## 5.2 上部ポート

図5.9に上部ポートの簡易モデルを示す。二重壁構造シェルに対する簡易モデルの要素分割に合わせ、シェルとの接続部における要素分割は決定された。さらに、詳細モデルによる変形モードを考慮しながら、要素数の低減を図った。簡易モデルの総要素数は55であり、詳細モデルの1/6程度のモデルとなっている。固有振動数及び振動モードについて簡易モデルと詳細モデルの比較結果を図5.7及び図5.10に示す。簡易モデルの固有振動数は詳細モデルに比し全体的に高めの傾向を示す。両者の固有振動モードはほぼ一致しており、変形については簡易モデルにより十分再現できるといえよう。

## 5.3 水平ポート

図5.11に水平ポートの簡易モデルを示す。モデルの総要素数は42である。水平ポートの要素分割は、二重壁構造シェルの簡易モデルにおけるポートとの接続境界部での分割と一致するように決定された。図5.7、図5.12に簡易モデルによって得られた固有振動数及び振動モードの詳細モデルとの比較を示す。簡易モデルの固有振動数には要素数低減に伴った振動数の増加が認められる。

## 5.4 下部ダクト

下部ダクトの簡易モデルを図5.13に示す。モデルの総要素数は19である。他のポートに比べて要素数の低減率は高くなっている。これは、詳細モデルを用いた解析によれば下部ダクトの固有振動数は他の要素に比較して十分高いため、下部ダクトが真空容器の低次振動モードに与

える影響は少ないということから、要素数低減化を行った結果である。図5.7、図5.14に簡易モデルにより得られた固有振動数及び振動モードの詳細モデルとの比較を示すが、簡易モデルによる固有振動数は詳細モデルの約2倍となり著しく高い。しかしながら、前述した理由により、この差異が真空容器全体の振動挙動に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。

### 5.5 下部ポート

図5.15に簡易モデルを示す。下部ダクト同様、他の構造要素に比較して剛構造物としての取扱いが可能であるために大幅に簡易化を行っており、総要素数は8となった。図5.7、図5.16に簡易モデルから得られた固有振動数及び振動モードの詳細モデルとの比較結果を示す。両者の1、2次の固有振動数は良く一致しているが、3次以降ではかなり高めの値となる。しかしながら、下部ダクトと同様にモデルによる差異が真空容器に与える影響はほとんどないと考えられる。

### 5.6 1/16セクタ真空容器

図5.1に示した1/16セクタの固有値解析は、前述した詳細モデルと同様に、各種ポート端部及び下部ダクト端部を完全固定とした場合と、下部ダクト底部のみ固定した場合の2種類の境界条件下で行った。前者の場合における固有振動数及び振動モードの簡易モデルと詳細モデルとの比較結果を図5.17及び図5.18に示す。固有振動数には要素数低減化に伴う振動数の増加が顕著に認められるが、変形はほぼ簡易モデルにより再現できることが分かる。

一方、後者の場合での結果を図5.17、図5.19に示すが、低次固有振動数の詳細モデルとの差異は数%以内に収まっている。境界条件が剛に近づくほど固有振動数が増加すると共に局所的変形が低次モードに現れ易くなる。このため、要素数低減による固有振動数の増加が各ポート固定条件下で顕著となったといえる。

耐震安全性に関する評価という観点からは、低周波数領域（地震波主要周波数領域である約20Hz以下）で発生する振動挙動に対する耐震解析モデルの再現性が重要となる。したがって、各種ポート端部を完全固定とした場合に生じた比較的高い周波数領域における固有振動数の簡易モデルと詳細モデルとの差異は、簡易モデルによって耐震性の評価を行う場合にはほとんど無視できるものと考えられる。

## 6. 1/2 セクタ真空容器への展開

1/16セクタの簡易モデルを基にトーラス方向に展開した1/2セクタモデルを用いて固有振動解析を行い、トーラス構造体としての真空容器の固有振動挙動を検討すると共に、低次振動に与えるリブ剛性及び二重壁間に挿入される遮蔽材の質量の影響について考察した。以下に、1/2セクタ真空容器のモデル及び解析結果を述べる。

### 6.1 1/2セクタモデル

1/2セクタ真空容器の解析モデルを図6.1に示す。本解析モデルは、図5.1に示した1/16セクタモデルを8体トーラス方向に接続している。モデルの総要素数は2352、総節点数は2415である。上部ポート端部には一枚の境界板が取り付けられている。解析は、各種ポートの端部と下部ダクトの底部を完全固定とした場合、及び下部ダクト底部のみを完全固定とした場合の2種類の境界条件下で行った。計算効率を考慮して真空容器の1/2モデルとしているが、本モデルによりトーラス構造体としての真空容器全体の低次振動挙動について、対称軸を中心とした回転振動モードを除き、把握できる。

リブ剛性及び二重壁間に挿入される遮蔽材の質量（SUSのペブル型遮蔽球あるいは積層遮蔽板が考えられており、重量は1/16セクタ当たり約50tonになる。）の影響については、振動モード及び計算効率を考慮して図6.2に示す真空容器シェルのモデルを用いて調べた。リブ剛性については、①ポロイダル方向に一周する41本（1/2セクタ当たり）のリブの幅を40mm（現行設計値<sup>(6)</sup>）から100mmに変化させてリブ剛性を増した場合、②上部ポート、水平ポートとの接続部近傍でトロイダル方向に一周する4本のリブの幅を40mmから100mmに変えた場合、③両者を同時に行った場合、の3ケースについて調べた。遮蔽材質量の影響については、SUS材の体質率を考慮してシェル壁の平均密度を約2倍として調べている。

### 6.2 固有振動解析結果

図6.3に境界条件による固有振動数の変化について示す。一次固有振動数は、各ポート端部と下部ダクトを完全固定とした場合に57Hzであったが、下部ダクト底部のみ固定とした場合には13.8Hzと大きく低下した。したがって、トーラス構造体としての真空容器の振動挙動は、各ポート端部の拘束条件により大きく影響されることが分かる。図6.4及び図6.5に両境界条件下での代表的な固有振動モードを示す。これからも、特に上部ポート端部での変位が低次振動モードに支配的であることが確認できる。実際には、ポート端部はベローズを介してクライオスタッドに接続されるため、その境界での拘束を期待することは可能である。しかし、現時点ではベローズの特殊な構造の剛性を定量的に把握し、その効果を考慮した解析を行うことは困難である。この点に関しては、今後のR&Dを通して十分評価されるものと期待される。

### 6.3 リブ剛性及び遮蔽材質量の振動挙動に与える影響

まず、リブ剛性により真空容器の固有振動数を増加させることを試みた。前述したように、図6.2に示した真空容器シェルのモデルにおいて、リブ幅を変えることにより各方向のリブ剛性を増加させた。固有振動数の解析結果を図6.6に示す。ボロイダル方向、トロイダル方向、及び両方向のリブ幅に現設計における最大可変値100mmを与えた場合でも、一次の固有振動数は約13Hzであり、リブ方向によらず低次の固有振動数はほとんど変化しないことが分かる。これは、リブ幅による剛性増加を図ったために、剛性と共に質量も増加し、互いの振動数に与える効果が相殺したことによると考えられる。但し振動数増加の効果はトロイダル方向のリブ剛性を増したときに幾分大きくなることが認められる。

同様に、図6.6に遮蔽材質量を考慮したときの結果も示す。リブ幅に比べて遮蔽材が固有振動数に与える影響は顕著であり、低次の固有振動数は遮蔽材質量の増加により約3割程度低下した。

図6.7から図6.11に各ケースの代表的な固有振動モードを示す。リブ剛性及び遮蔽材質量による変形モードの差異は3次以上で僅かに認められるが、1、2次モードはほぼ同一であるといえる。また、1、2次モードには局所変形が見られないことから、真空容器シェルを一層単純化できるものと考えられる。この点に関しては今後の課題としたい。

以上の結果を踏まえて、再び遮蔽材の質量を考慮して1/2セクタ真空容器モデルに対して行った固有値解析の結果を図6.3及び図6.12に示す。遮蔽材質量による一次固有振動数(12.2Hz)の低下は約1割程度であり、固有振動モードにはその影響はほとんど見られない。線形振動の場合、固有振動数に対する質量の影響は、

$$f_1/f_2 = \sqrt{m_2/m_1} \quad (5)$$

で表される。ここで、 $f_1$ は質量 $m_1$ のときの固有振動数である。これより、遮蔽材を有する真空容器と無い場合の質量比が約8/7(1/16セクタ当たり400ton/350ton)であるから、その振動数の変化率は約1割であることが理解できる。

また、二重構造壁シェルは大型構造物であるのにかかわらず表2.2に示すように比較的その質量は小さくかつ固有振動数も低いことから、その剛性は他の構造物に比べて小さいと考えられる。さらに、上部ポートの質量は、二重壁構造シェルの質量の2倍以上あることから、真空容器の振動挙動は二重壁構造シェルの剛性と上部ポートの質量にほとんど支配されると考えられる。この点からも、さらに簡易化を図ることが可能と思われる。

## 7. ま　と　め

核融合実験炉のような大型で複雑な構造物に対して耐震解析を実施する場合、各機器の構造を忠実にモデル化した解析モデルを用いて解析を行うことは、計算効率の観点から非現実的である。このため、要求される解析精度と工学的有意性を保持しつつ如何に解析モデルの簡略化を図るかが重要な課題である。本報では、この観点から国際熱核融合実験炉（ITER）の大型真空容器について、 $1/16$ セクタの詳細な構造モデルを用いた固有値解析を行って真空容器のポロイダル断面内の振動挙動を調べると共に、詳細モデルによって得られた固有値解析結果に基づいてリブ付き二重壁構造体の特性を維持できる解析モデルの簡易化手法の検討を行った。さらに、簡易化したセクタモデルを $1/2$ トーラスモデルに展開したトーラス構造体としての真空容器の低次振動挙動を検討した。その結果、ITER真空容器（日本案）について以下の特性が明かとなった。

- (1) 詳細モデルによって得られた $1/16$ セクタ真空容器の一次固有振動数は、約30Hzであった。また、二重壁構造シェル（真空容器一般部）に接続される各種ポートの一次固有振動数は、それ以上になることが確認できた。
- (2) 上部ポートの固有振動挙動には端部に取り付けられる境界板が大きく影響し、一次固有振動数は、境界板の無い場合が約10Hz、一層の境界板がある場合が約35Hzとなる。しかし、実際の境界板は冷却配管の貫通のために多孔構造となる上に、ポート本体と境界板との接続部にも複雑な着脱構造が要求される。したがって、これらの条件を考慮した詳細な検討が今後の課題である。
- (3) 補強リブ付き二重壁構造を有する真空容器一般部の振動挙動は、剛性として直交異方性を有する一枚のシェルで表すことができる。この簡易化手法により $1/16$ セクタモデルの総要素数は、詳細モデルの場合の4%以下に低減することができた。
- (4) トーラス構造体としての真空容器の低次振動挙動には、各種ポート端部における境界拘束条件が影響する。ポート端部での拘束が構造上期待できない場合には、真空容器の一次固有振動数は13Hz程度になる。
- (5) 真空容器の低次振動挙動に対しては、二重壁構造シェルの剛性、上部ポートの質量が支配的である。

以上、真空容器の耐震解析の第一段階として、真空容器の固有振動数と振動モードを本報に示した簡易モデルで明かにすることことができた。しかしながら、トーラス構造体としての地震時の時刻歴応答を解析するためには、さらにモデルを単純化する手法の確立が必要である。今後は、本解析作業によって得られた知見を基にさらに簡略化を図りたい。

## 参 考 文 献

- (1) 原研, 核融合研究開発の現状, 1991。
- (2) 日本溶接協会, 核融合実験炉構造設計指針に関する調査報告書, 1991。
- (3) 高津, 他, JT-60 の耐震解析 (1), JAERI-M 8155 (1979)。
- (4) 高津, 他, JT-60 の耐震解析 (2), JAERI-M 8350 (1979)。
- (5) H.TAKATSU and M.SHIMIZU, Dynamic analysis method for a large complicated structure and application to a fusion device, NED 60 (1980), 297-309。
- (6) 清水, 他, 遮蔽一体・均一抵抗型真空容器の構造設計及び部分試作試験, JAERI-M 92-135。
- (7) 武田技術開発(株), FENIX 使用説明書, 1992。

表 2.1 プラズマ真空容器に対する要求機能

- 
1. プラズマ真空の保持機能:  $10^{-8}$  Torr 以下
  2. トリチウム閉じ込めの第一隔壁
  3. プラズマ電流立ち上げの一周期抵抗の確保:  $\sim 2.0$  マイクロ・オーム
  4. トロイダル磁場コイルに対する放射線遮蔽及び生体遮蔽への寄与
  5. プラズマ異常消滅時の電磁力の支持機能
  6. 炉内構造物の重量・電磁力の支持機能
- 

表 2.2 1/16セクタにおける各機器の質量

	Component	Mass (t)
Vacuum vessel component	Double skin shell	50
	Shield material	50
	Upper port	110
	Horizontal port	30
	Lower duct	150
	Lower port	10
	<u>Total 1</u>	<u>400</u>
Inner structure	Out-board blanket	175
	In-board blanket	65
	Shield plug	60
	Divertor	25
	Coil support	25
	<u>Total 2</u>	<u>350</u>
<u>Total ( 1 + 2 )</u>		<u>750</u>

表 4.1 二重壁構造 シェルの固有振動数

Mode No.	Frequency (Hz)
1	34.9
2	46.1
3	50.1
4	55.7
5	59.1

表 4.2 上部ポートの固有振動数

Mode No.	Frequency (Hz)		
	Without a boundary plate	A single boundary plate	Double boundary plates
1	10.5	35.5	61.7
2	15.9	40.0	68.0
3	25.6	50.6	84.9
4	32.3	65.2	87.9
5	35.2	65.4	91.4

表 4.3 水平ポートの固有振動数

Mode No.	Frequency (Hz)
1	50.3
2	54.8
3	95.5
4	117.6
5	123.5

表 4.4 下部ダクトの固有振動数

Mode No.	Frequency (Hz)
1	106.9
2	234.5
3	254.1
4	263.6
5	314.9

表 4.5 下部ポートの固有振動数

Mode No.	Frequency (Hz)
1	82.5
2	118.9
3	216.4
4	258.8
5	299.5

表 4.6 1/16セクタ真空容器の固有振動数  
(各種ポート及び下部ダクト完全固定)

Mode No.	Frequency (Hz)
1	54.5
2	59.0
3	76.4
4	90.5
5	93.4

表 4.7 1 / 16 セクタ真空容器の固有振動数  
(下部ダクト底部完全固定)

Mode No.	Frequency (Hz)
1	33.5
2	35.1
3	37.9
4	38.5
5	45.5

表 5.1 二重壁モデルと一重壁モデルの固有振動数の比較

Mode No.	Frequency (Hz)	
	Double-skin	Single-skin
1	183.8	189.7
2	187.9	208.9
3	211.3	221.3
4	242.8	249.3
5	256.4	306.0

表 5.2 板モデルにおける要素数

Model	Horizontally divided number	Vertically divided number	Total number	Decreasing rate (%) (SPM/DPM)*	Predicted number in 1/16 sector	Predicted number in 1/1 sector
DPM1	6	32	674	-	4149	66384
SPM1	6	32	192	28.5	1182	18911
SPM2	4	32	128	19.0	788	12608
SPM3	4	16	64	9.5	394	6303
SPM4	4	11	44	6.5	271	4334
SPM5	4	8	32	4.8	197	3152
SPM6	3	8	24	3.6	148	2364
SPM7	3	6	18	2.7	111	1773
SPM8	3	4	12	1.8	74	1182

\* SPM : Single-skin plate model, DPM : Double-skin plate model

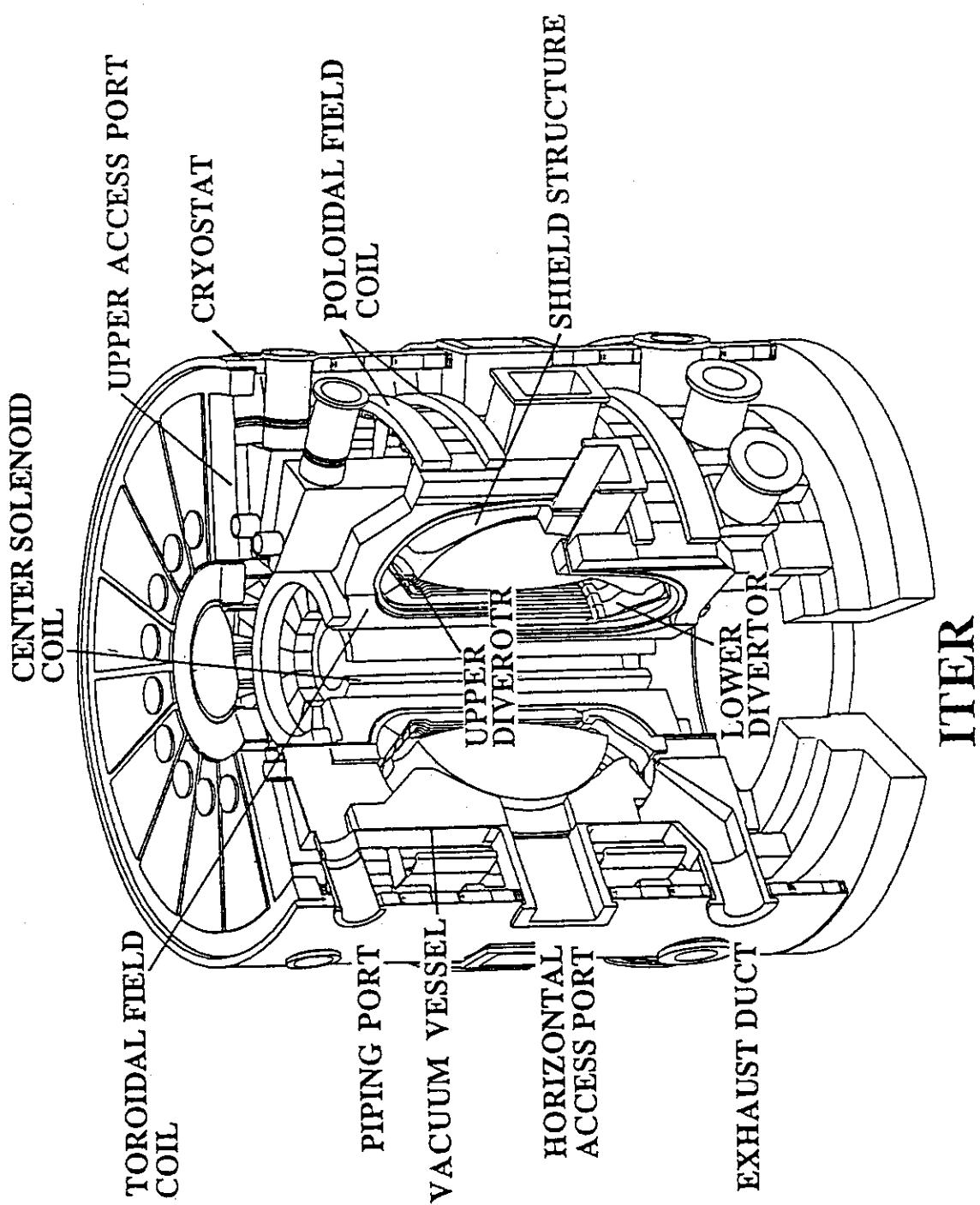


図 2.1 ITER の炉心構造の概要

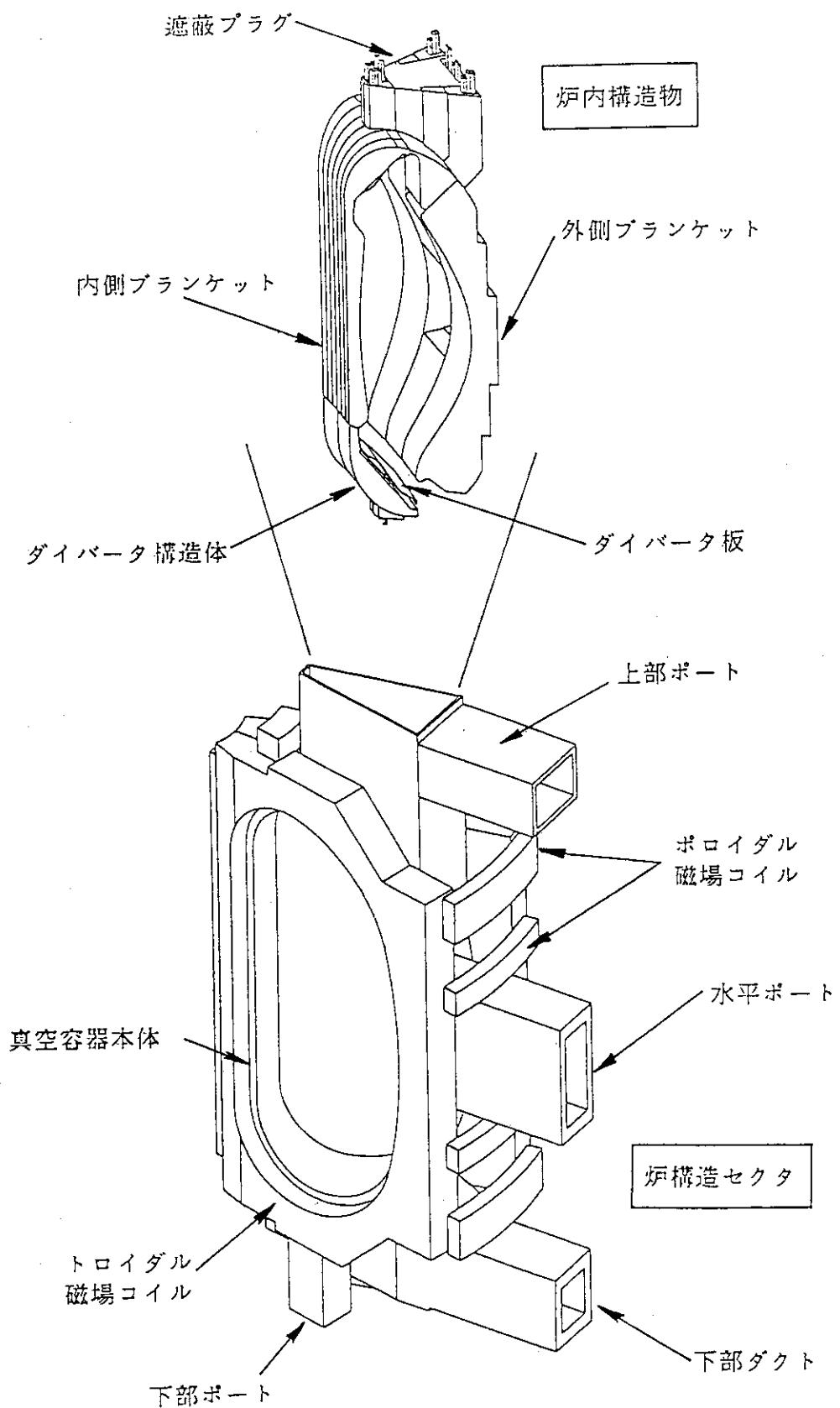


図 2.2 炉心の 1 / 16 セクタ構造体

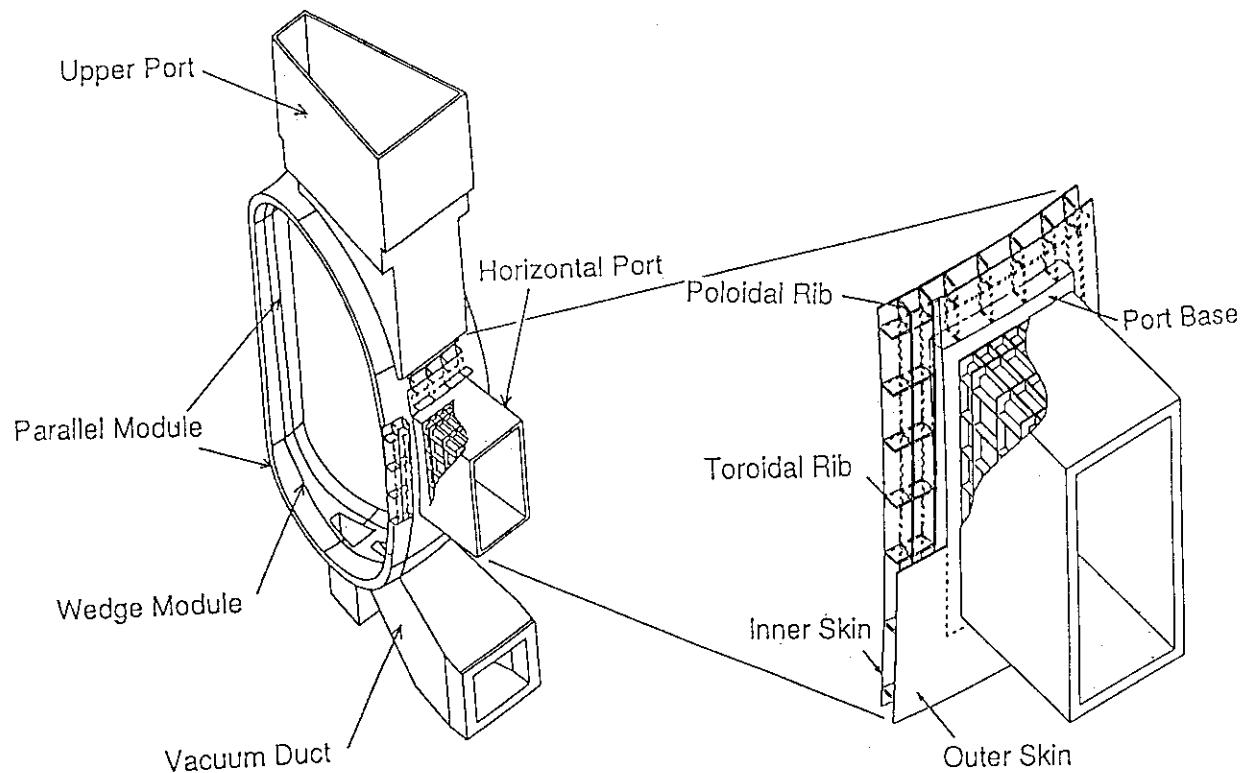


図 2.3 均一抵抗型真空容器（日本案）の構造概念

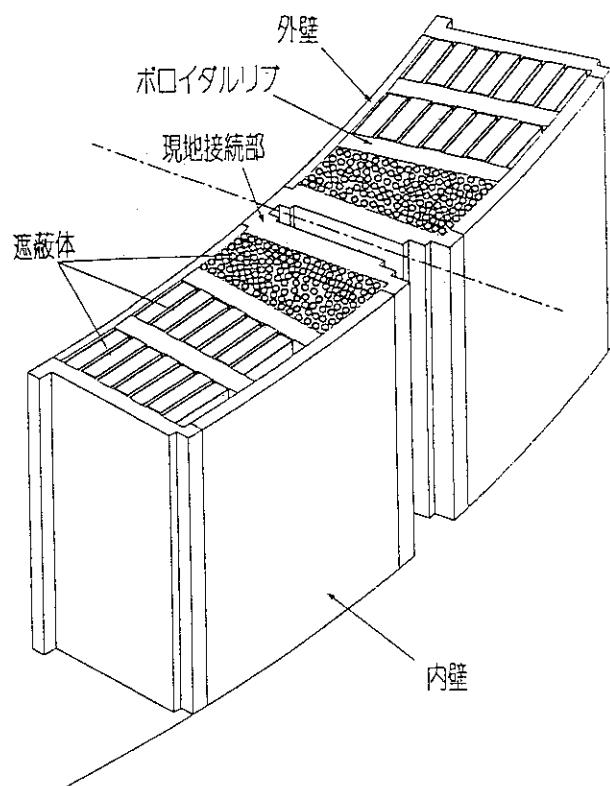


図 2.4 遮蔽一体・均一抵抗型真空容器の断面図

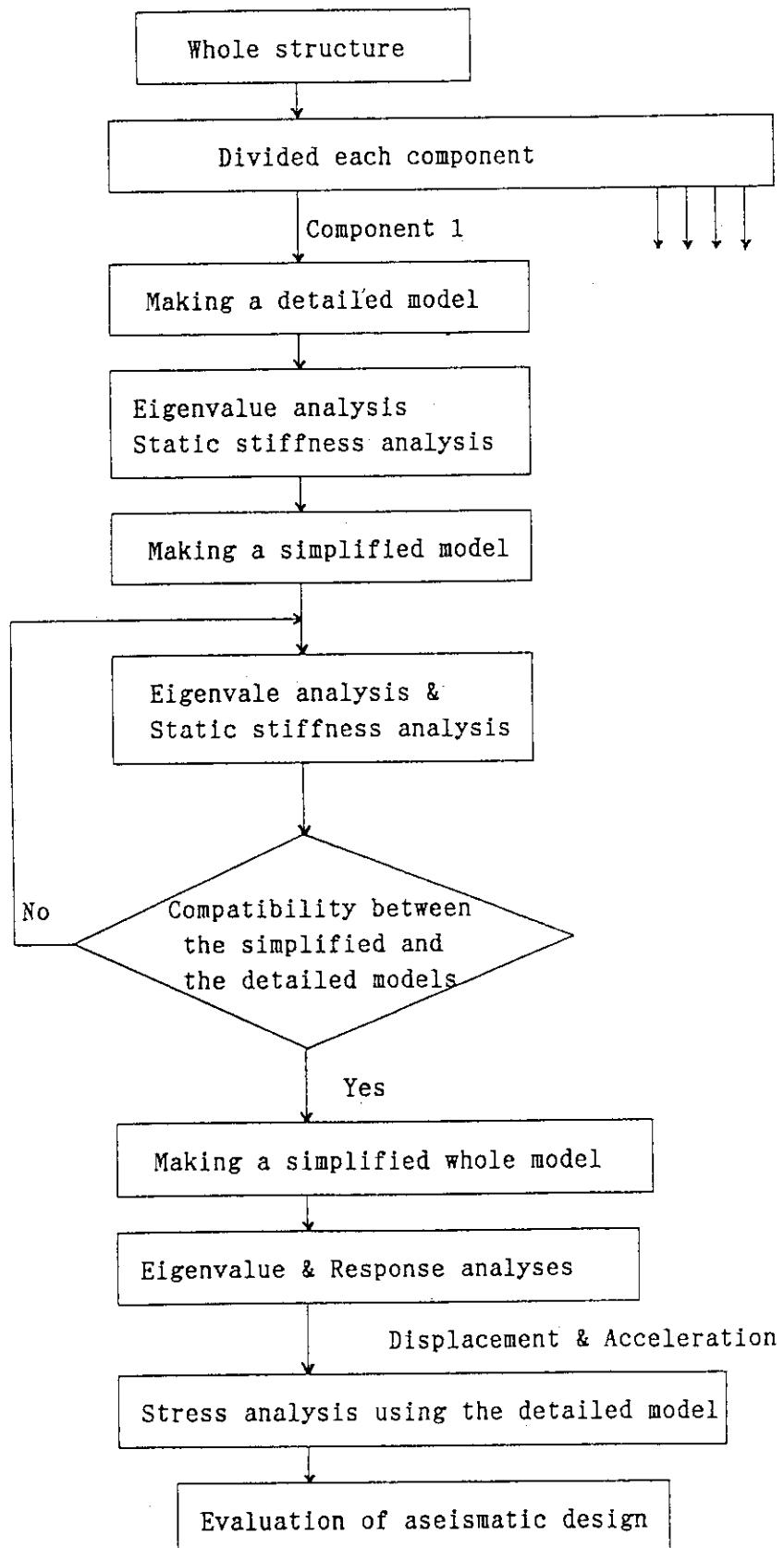


図3.1 解析手順の流れ

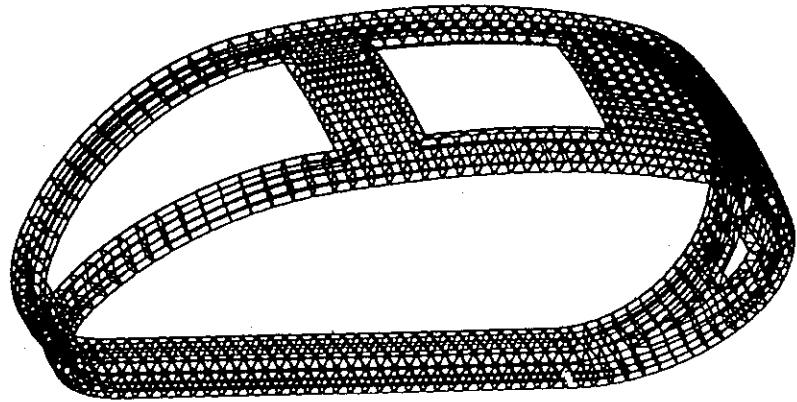


図 4.2 1 / 16セクタにおける二重壁構造シェルの詳細モデル

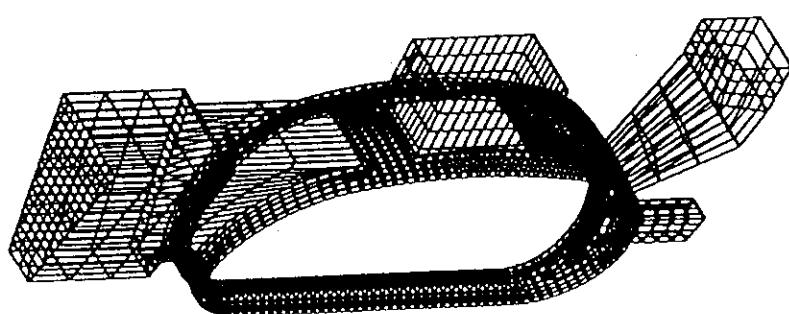


図 4.1 1 / 16セクタ構造体の詳細モデル

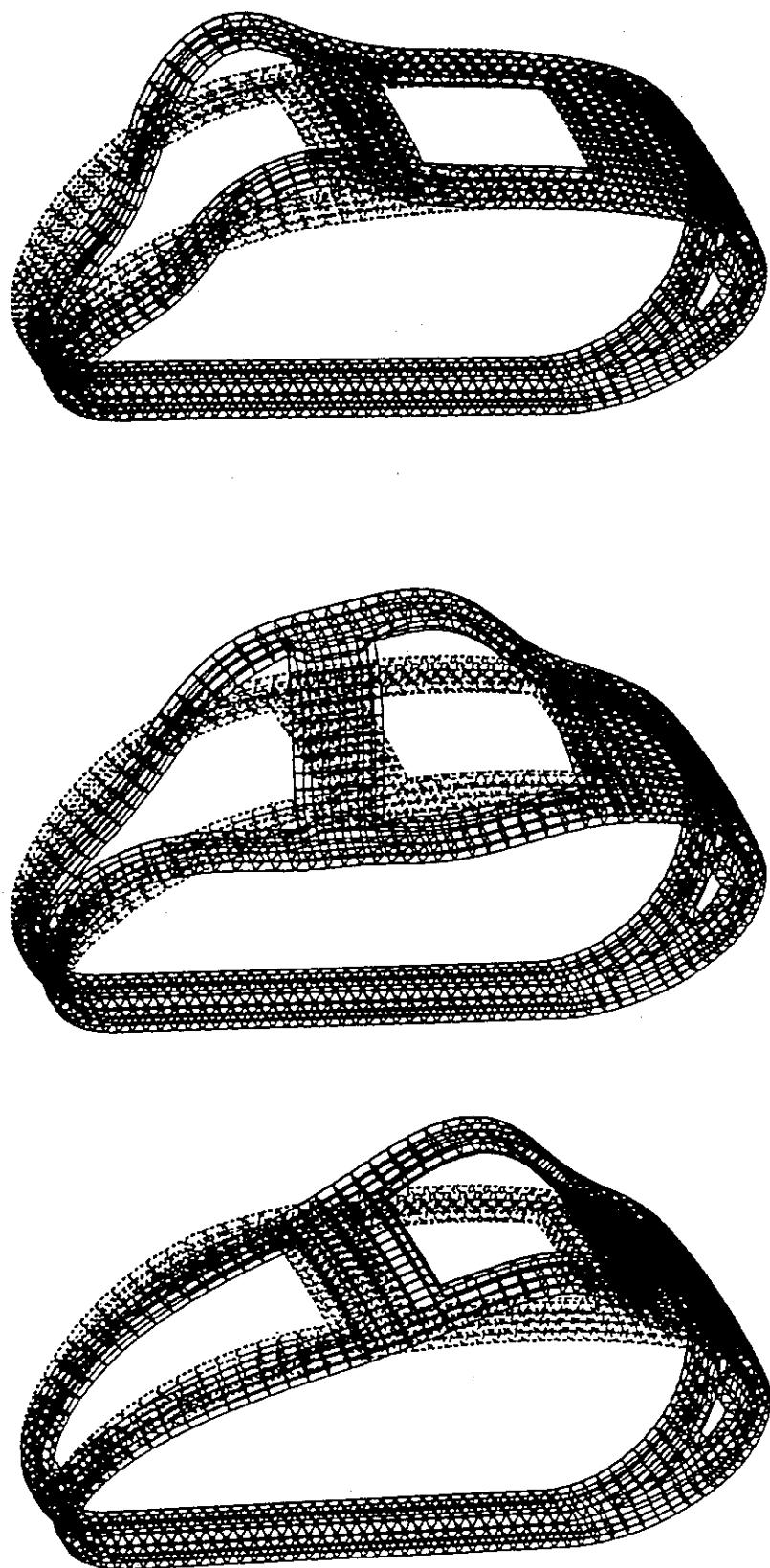
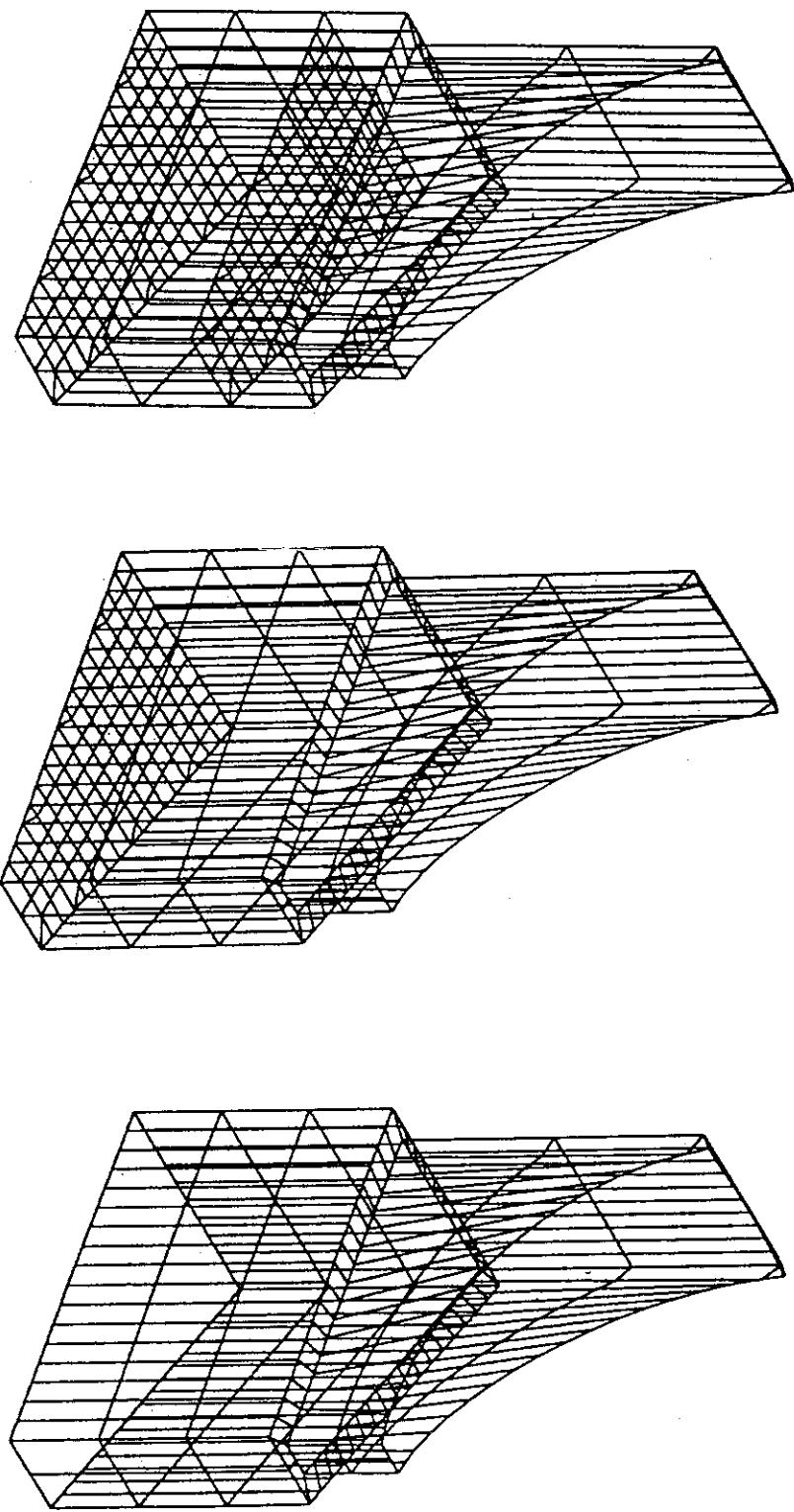


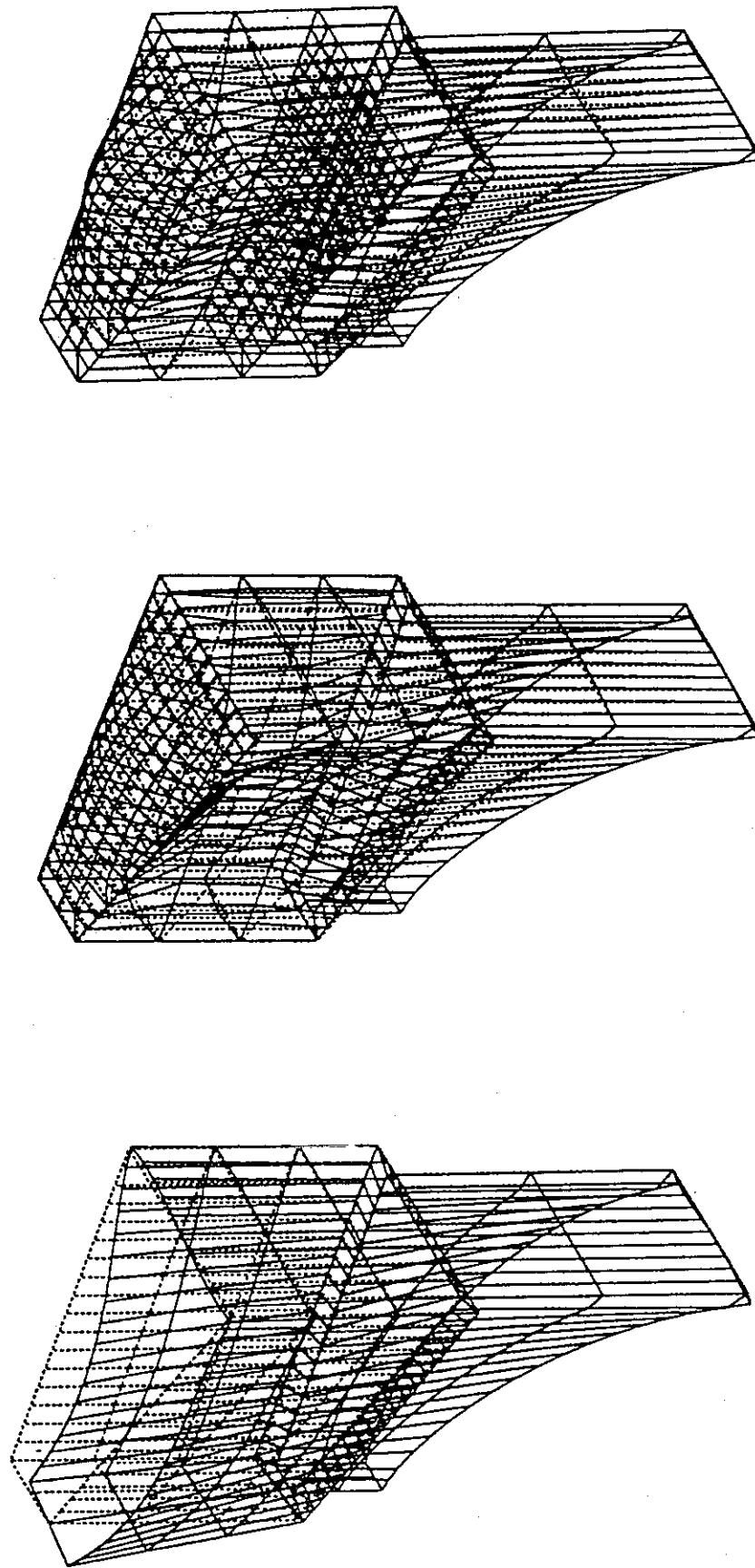
図 4.3 二重壁構造シェルの固有振動モード

1st 34.9 Hz  
2nd 46.1 Hz  
3rd 50.1 Hz



(a) without a boundary plate (b) with single a boundary plate (c) with double boundary plates

図 4.4 上部ポートの詳細モデル



(a) 1st mode 10.5 Hz  
without a boundary plate  
(b) 1st mode 35.5 Hz  
with a single boundary plate  
(c) 1st mode 61.7 Hz  
with double boundary plates

図 4.5 上部ポートの固有振動モード

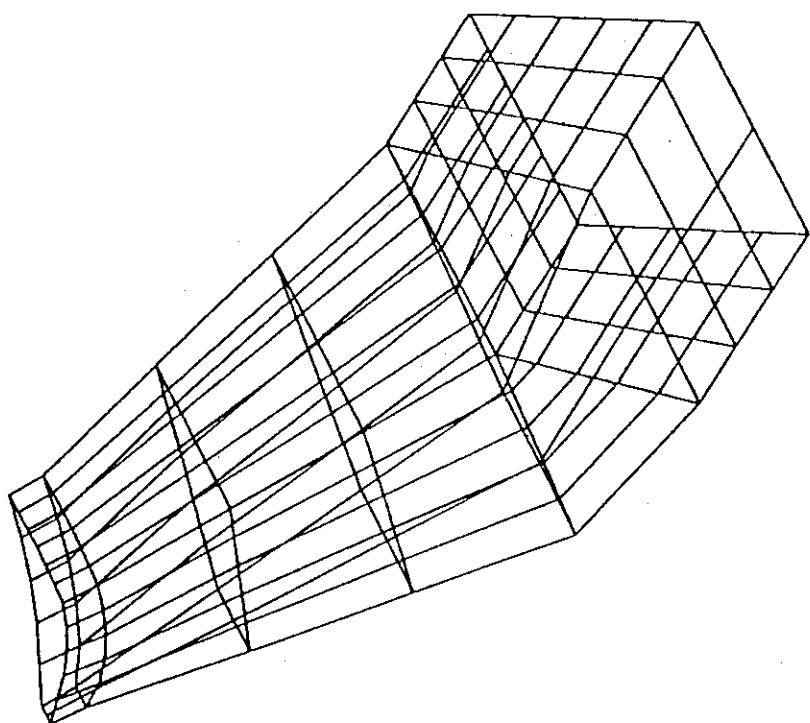


図 4.8 下部ダクトの詳細モデル

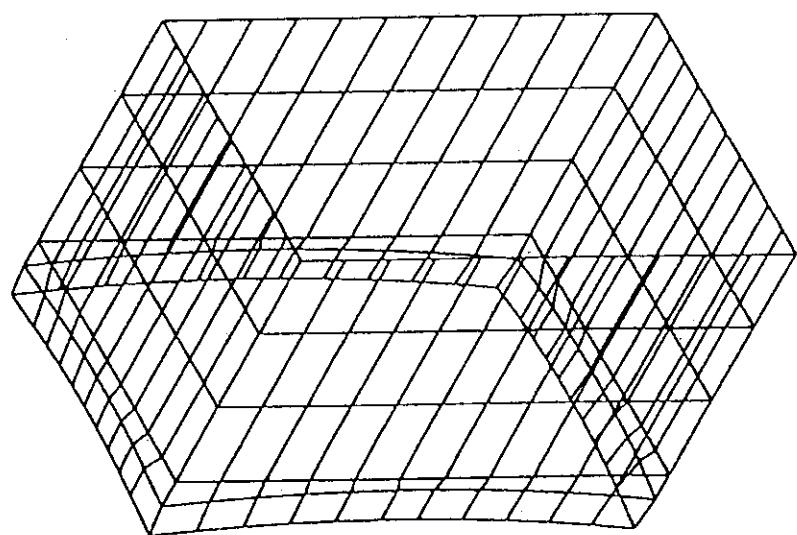
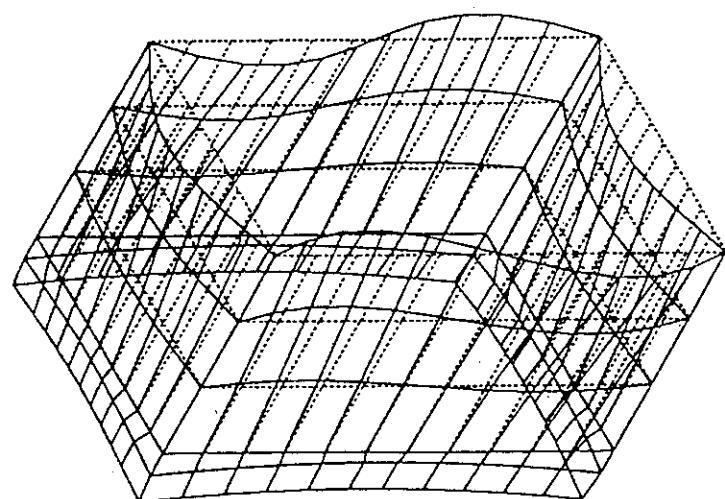
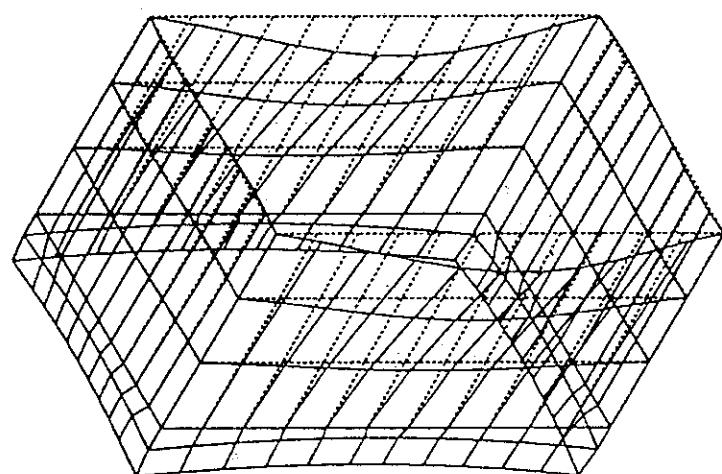


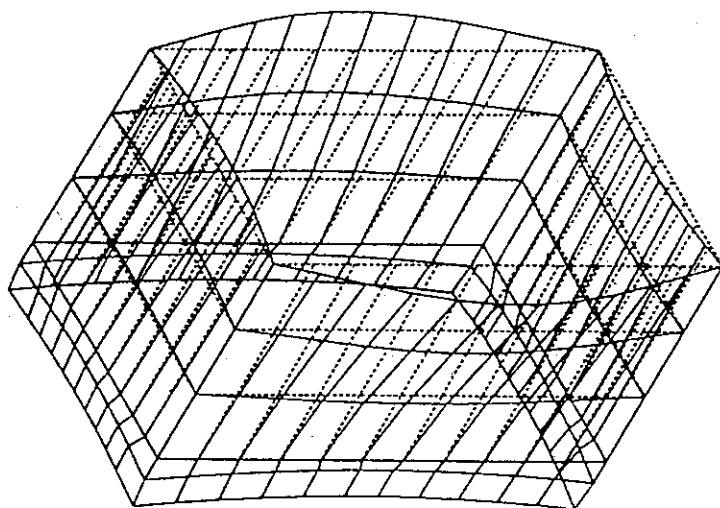
図 4.6 水平ポートの詳細モデル



3rd 95.5 Hz



2nd 54.8 Hz



1st 50.3 Hz

図 4.7 水平ポートの固有振動モード

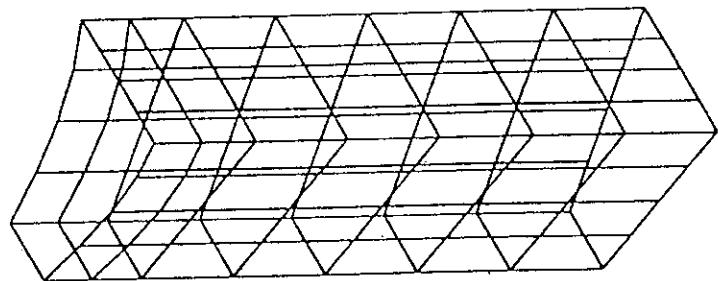
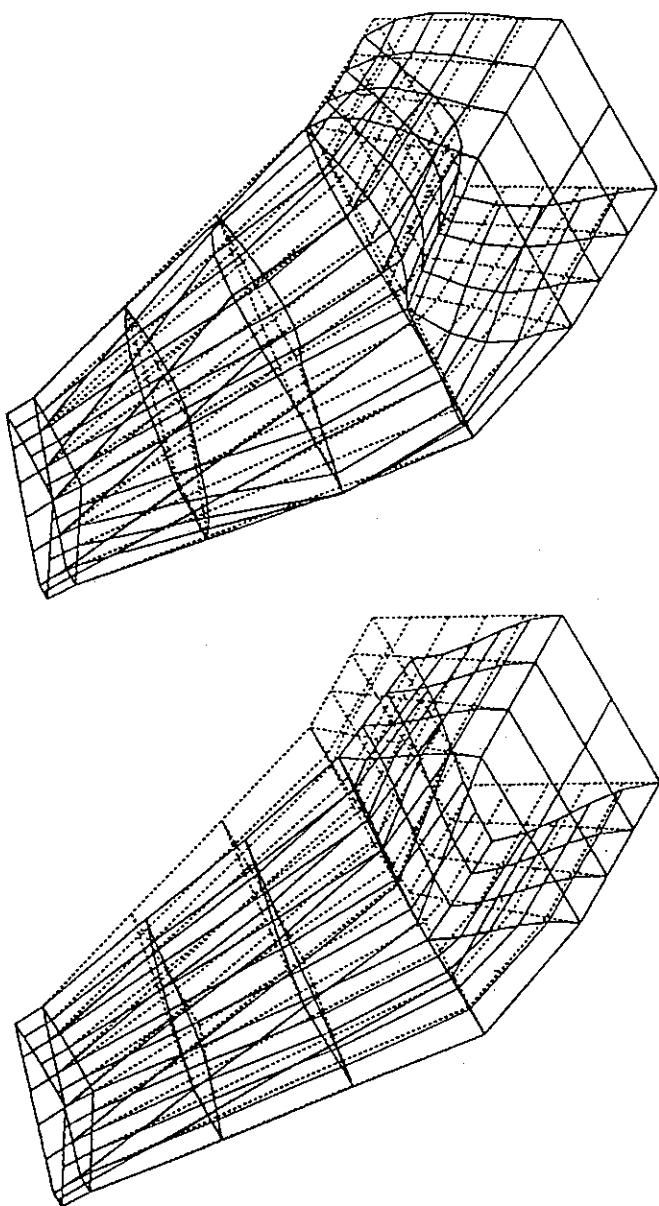


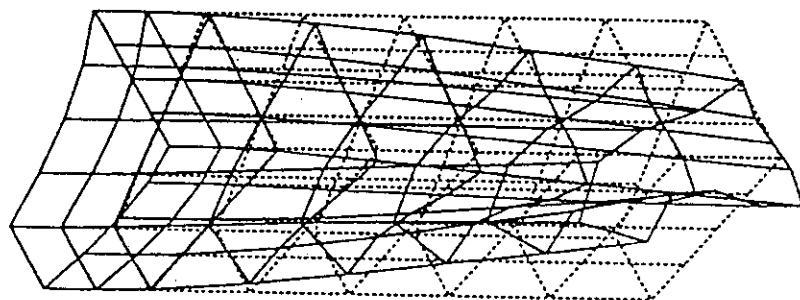
図 4.10 下部ポートの詳細モデル

1st 106.6 Hz      2nd 234.5 Hz

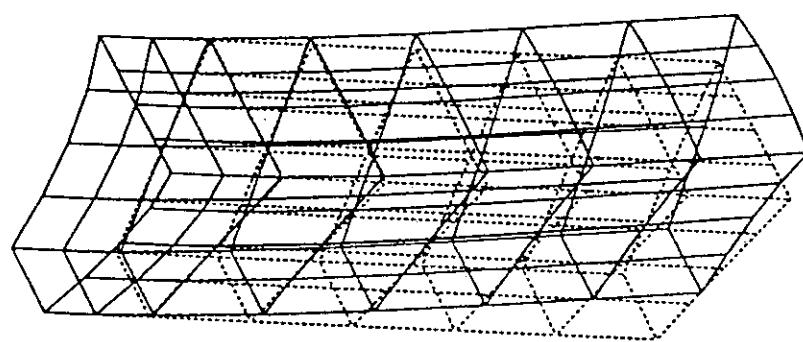
図 4.9 下部ダクトの固有振動モード



3rd 216.4 Hz



2nd 118.9 Hz



1st 82.5 Hz

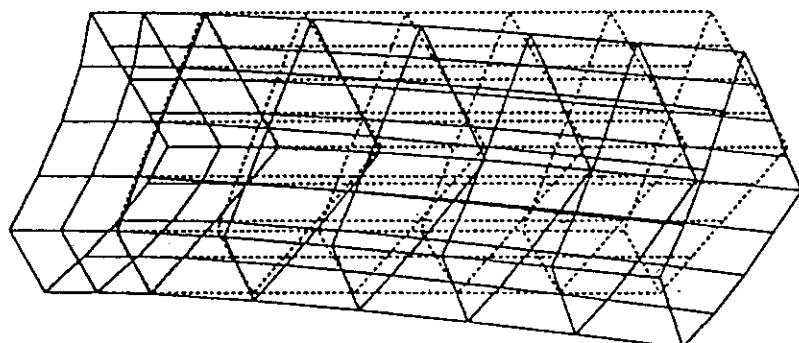


図 4.11 下部ポートの固有振動モード

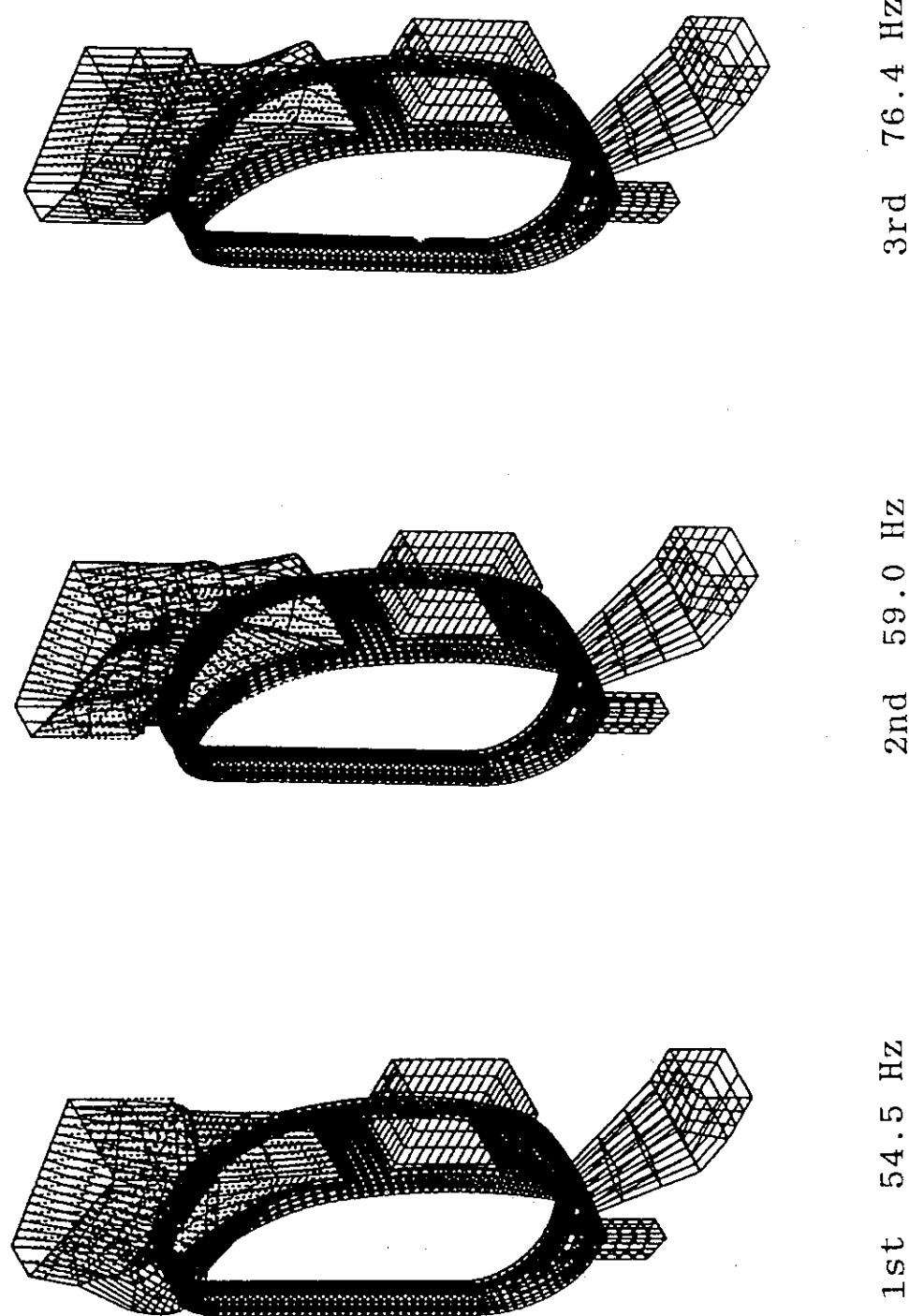


図 4.12 1 / 16 セクタ構造体の固有振動モード（各種ポート端部と下部ダクト底部完全固定）

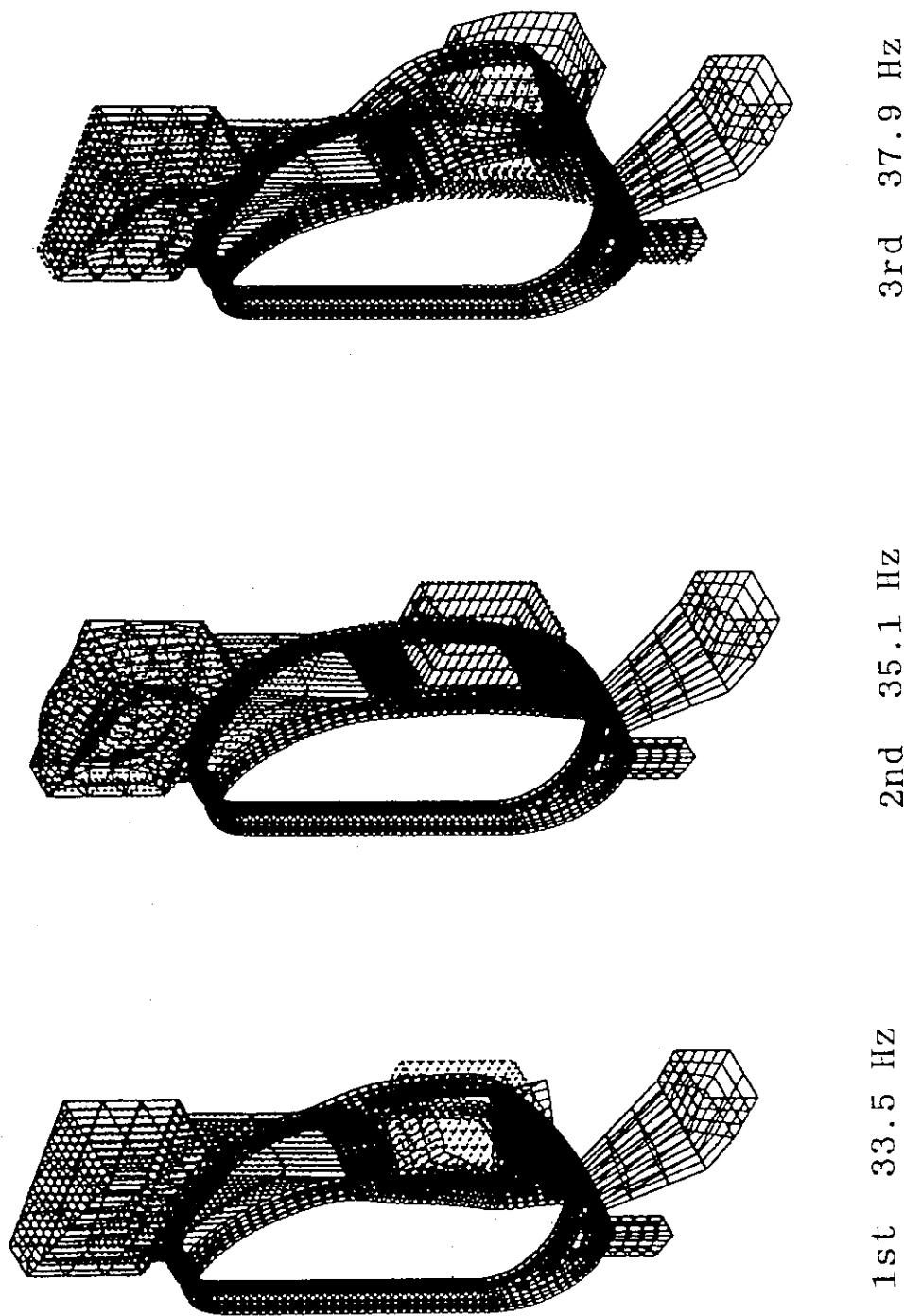


図 4.13 1 / 16セクタ構造体の固有振動モード（下部ダクト底部完全固定）

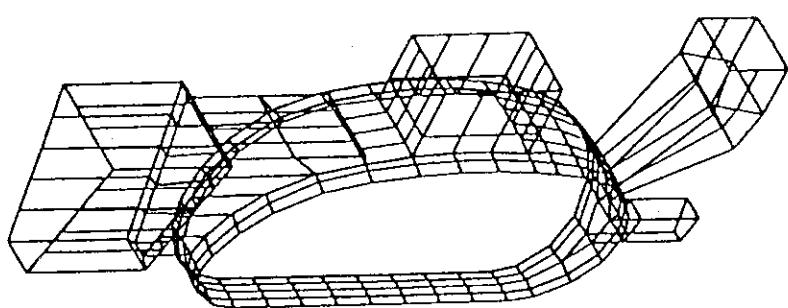


図 5.1 1 / 16 セクタ構造体の簡易モデル

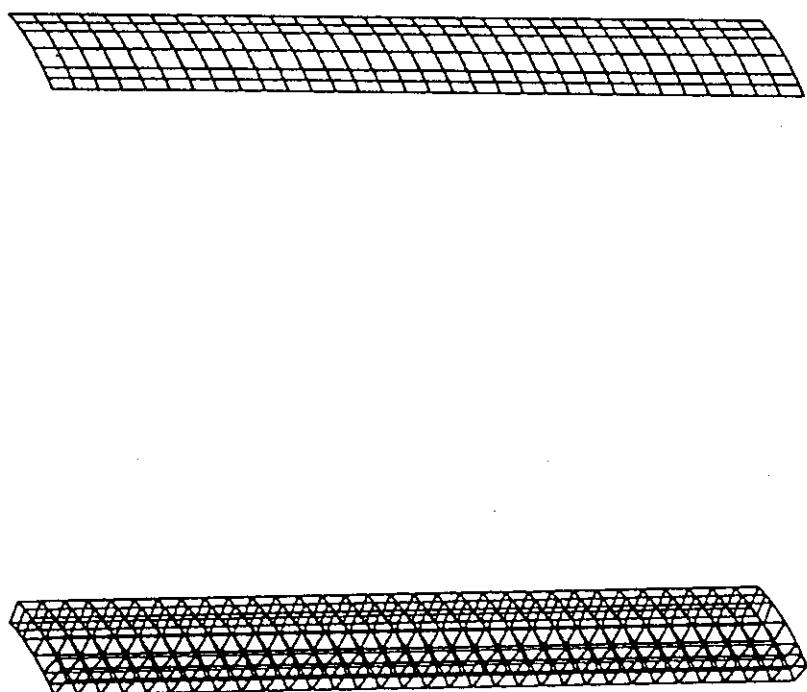


図 5.2 二重壁構造と一重壁構造の板モデル

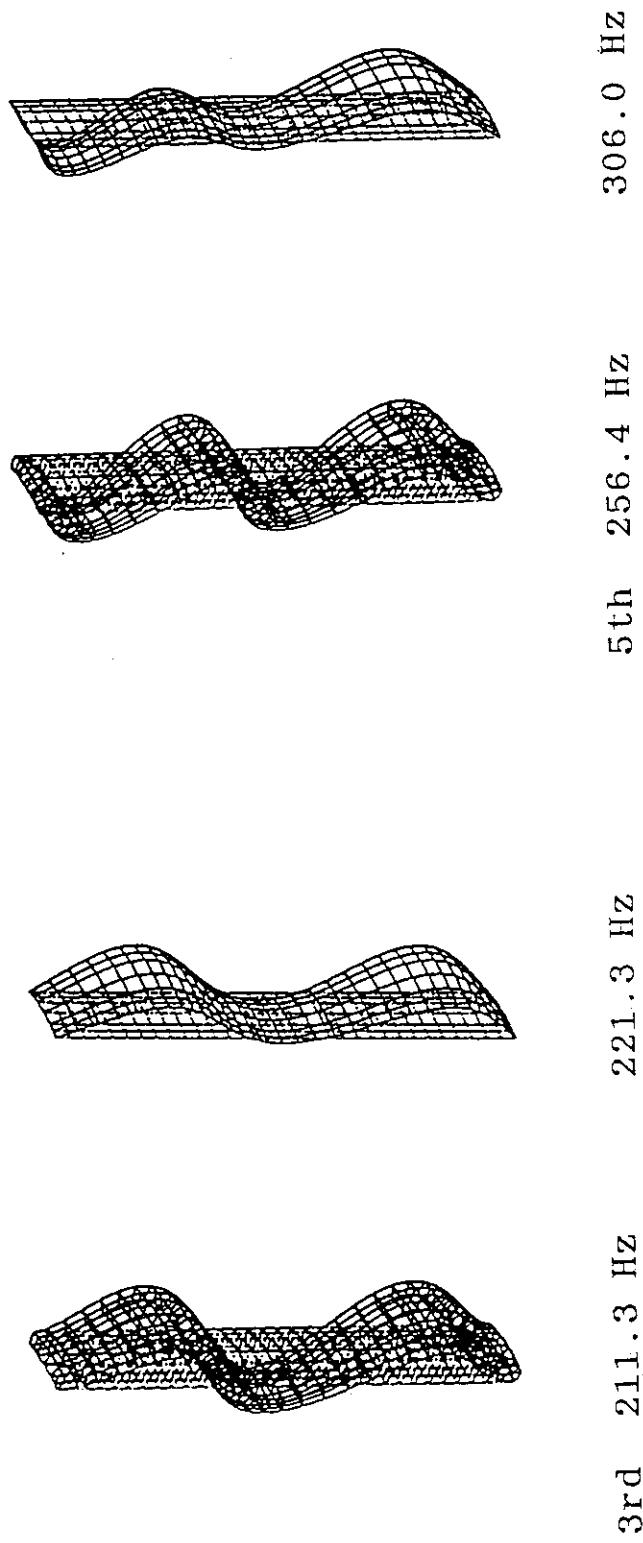


図 5.3 二重壁構造と一重壁構造の板モデルの固有振動モード

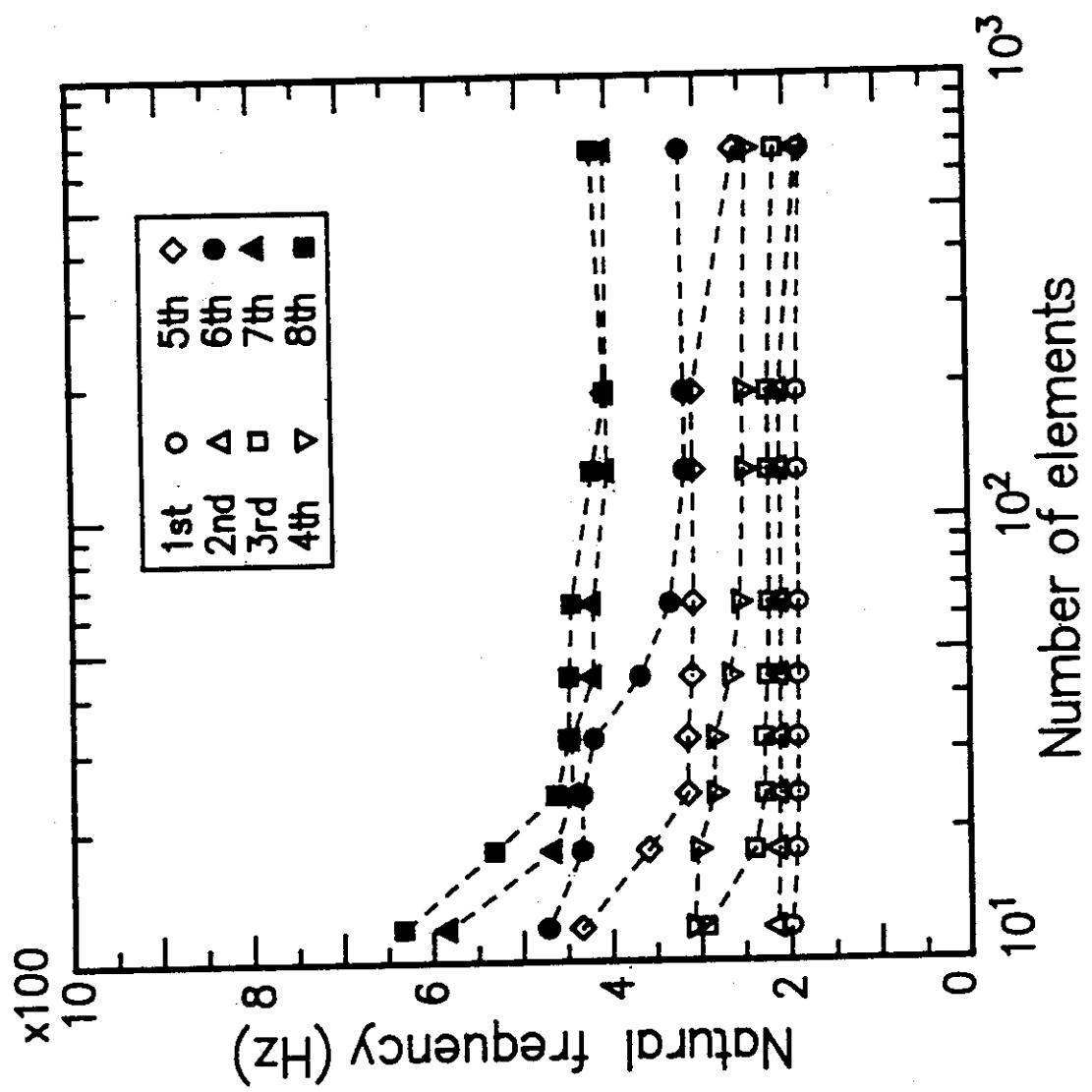
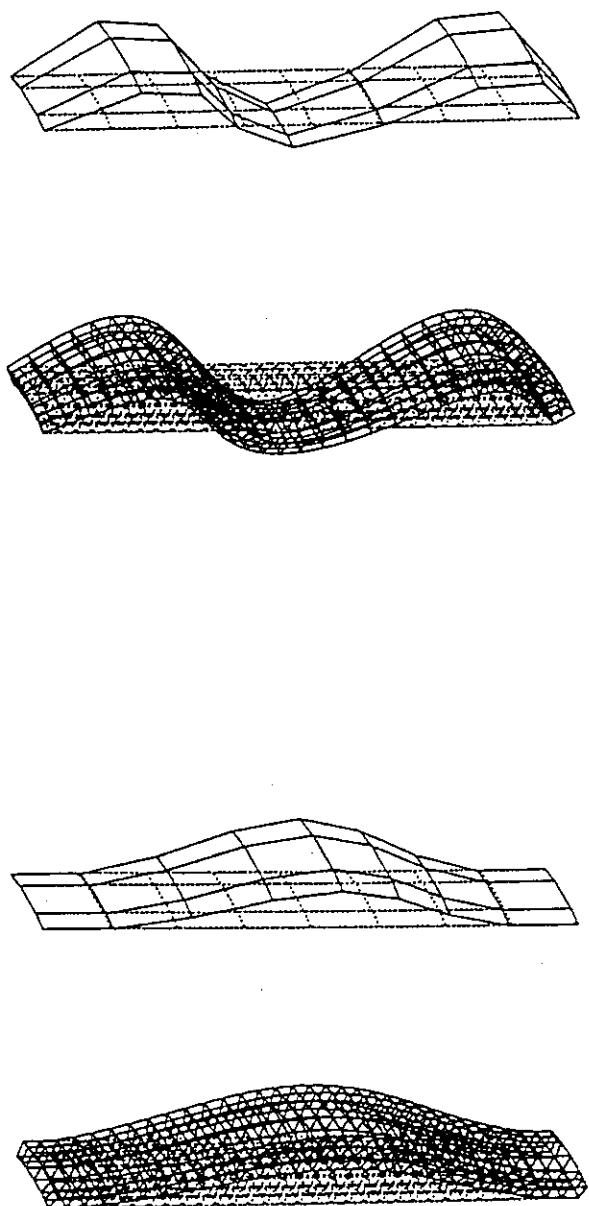


図 5.4 板モデルの要素数による固有振動数の変化



2nd 183.8 Hz 211.7 Hz 3rd 200.7 Hz 228.8 Hz

図 5.5 板モデルの固有振動モード

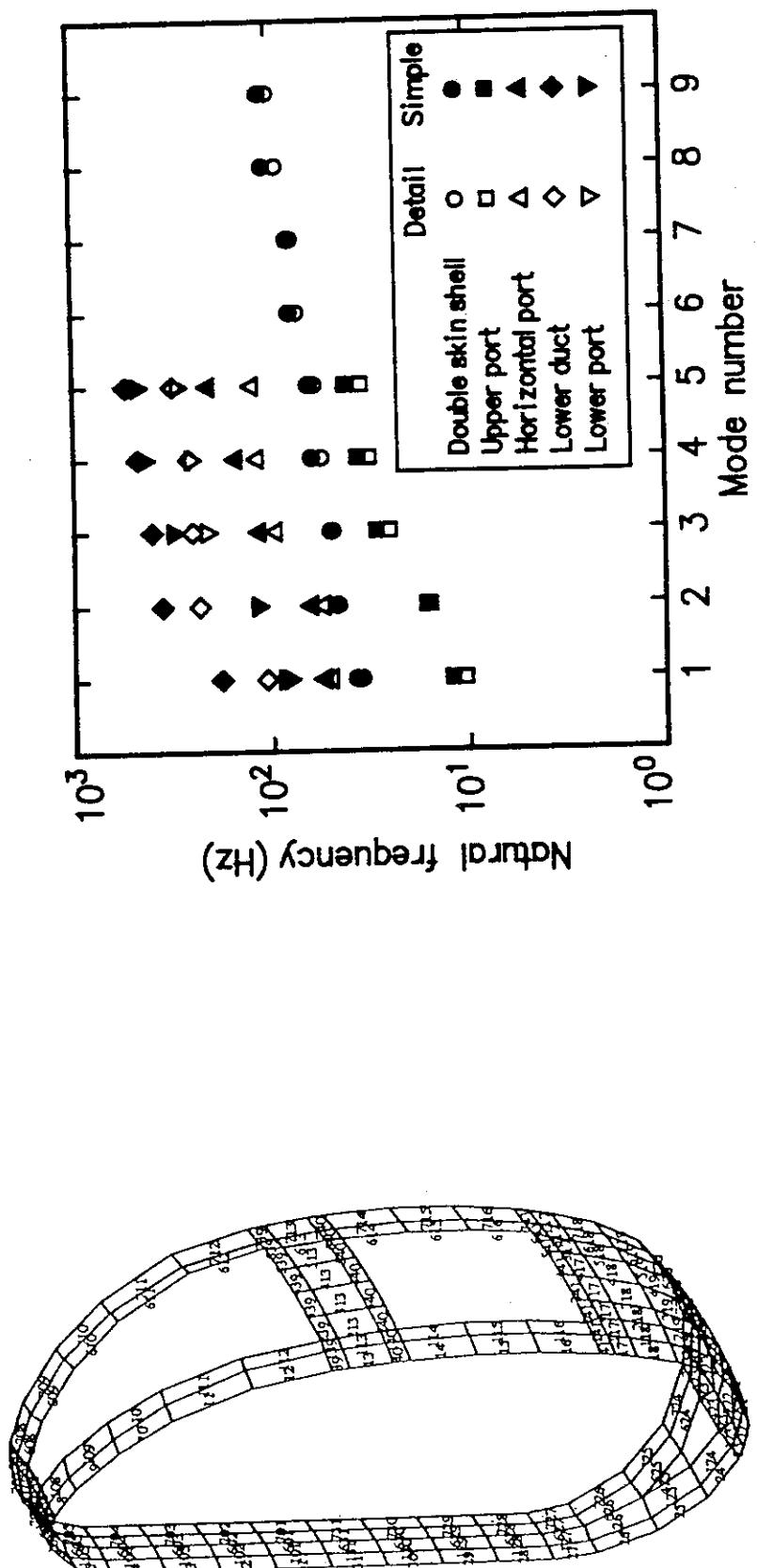


図 5.6 真空容器シェルの簡易モデル

図 5.7 各構成機器の詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動数

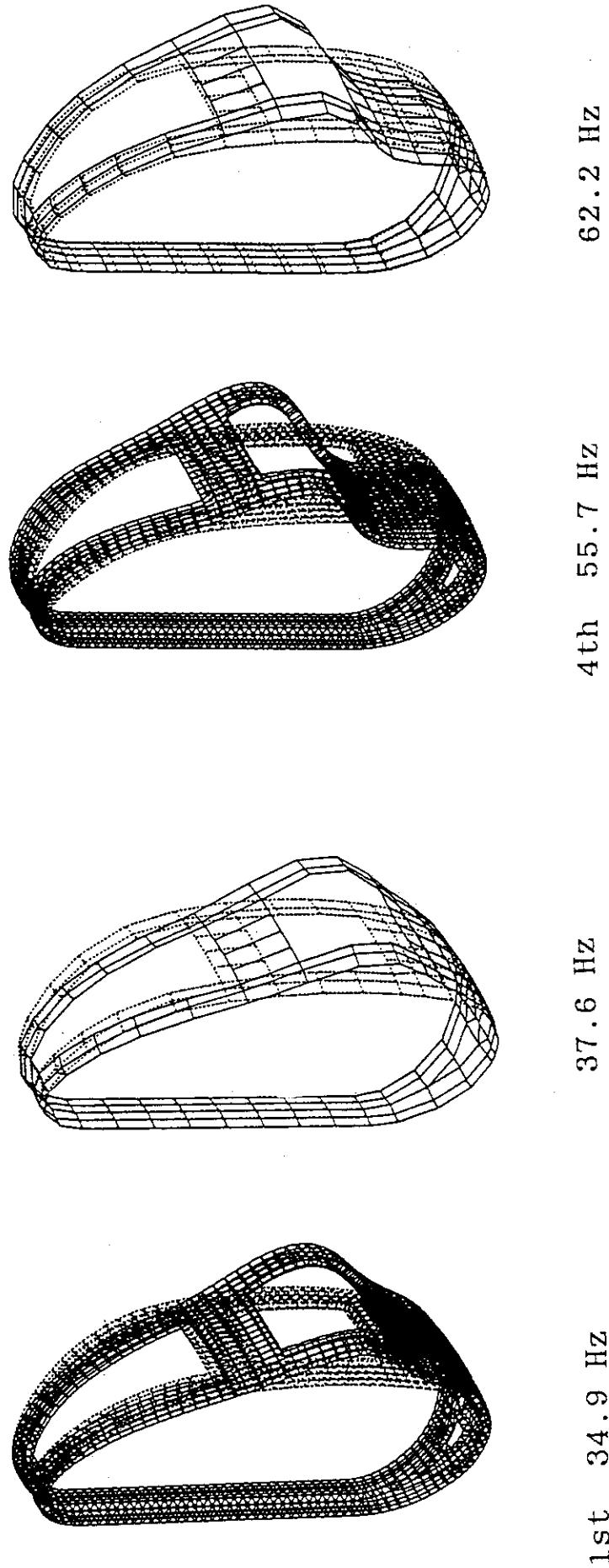


図 5.8 真空容器シェルの詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動モード

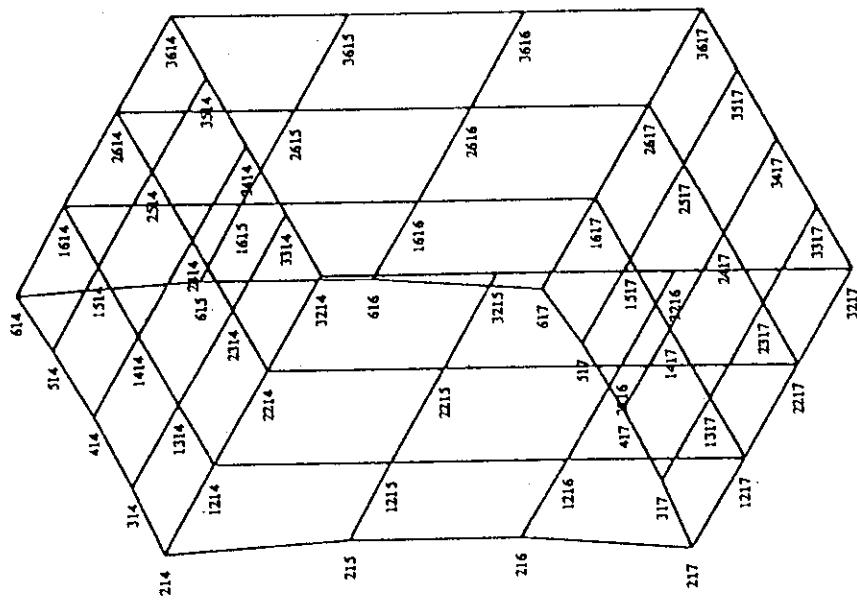


図 5.11 水平ポートの簡易モデル

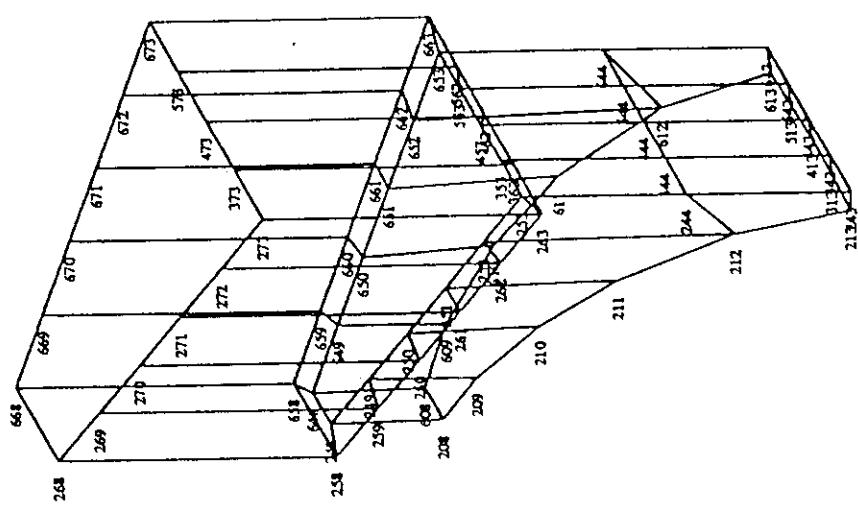


図 5.9 上部ボートの簡易モデル

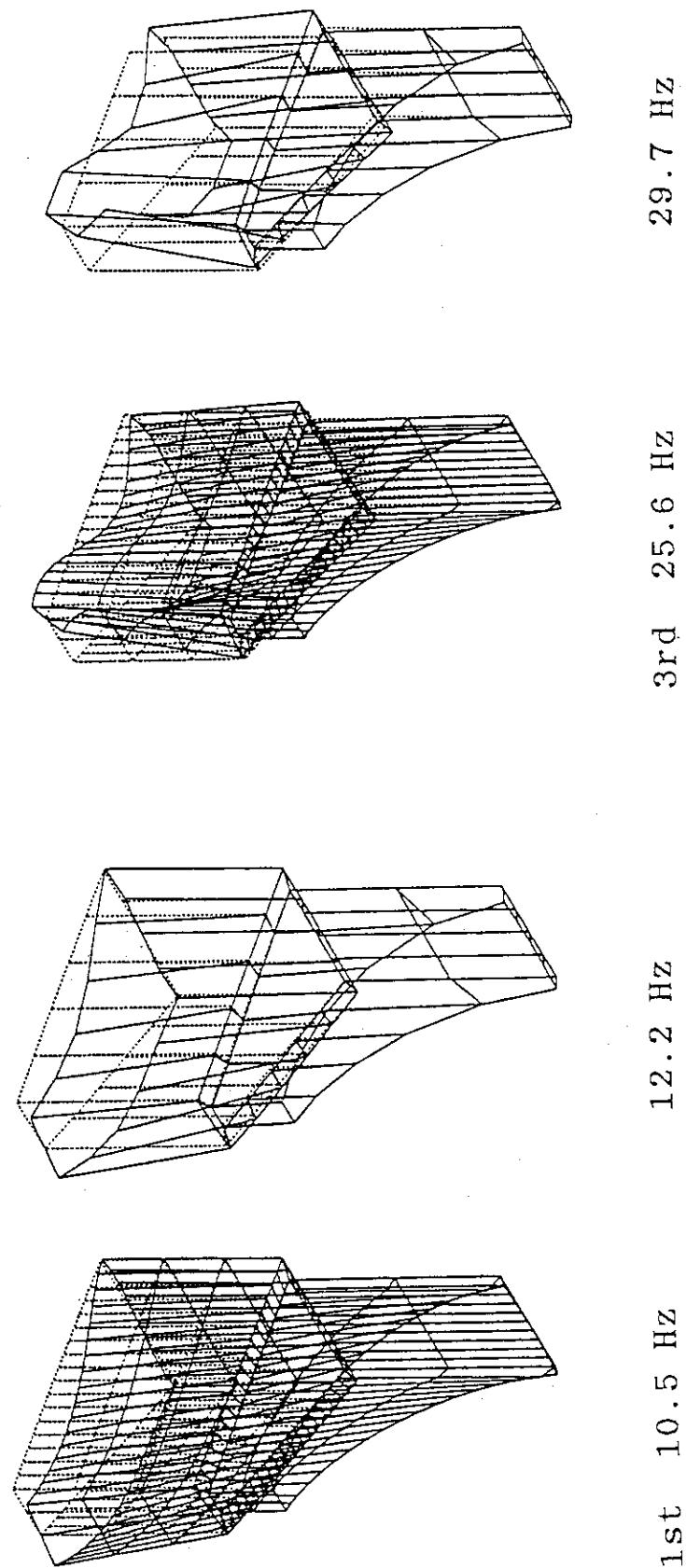


図 5.10 上部ポートの詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動モード

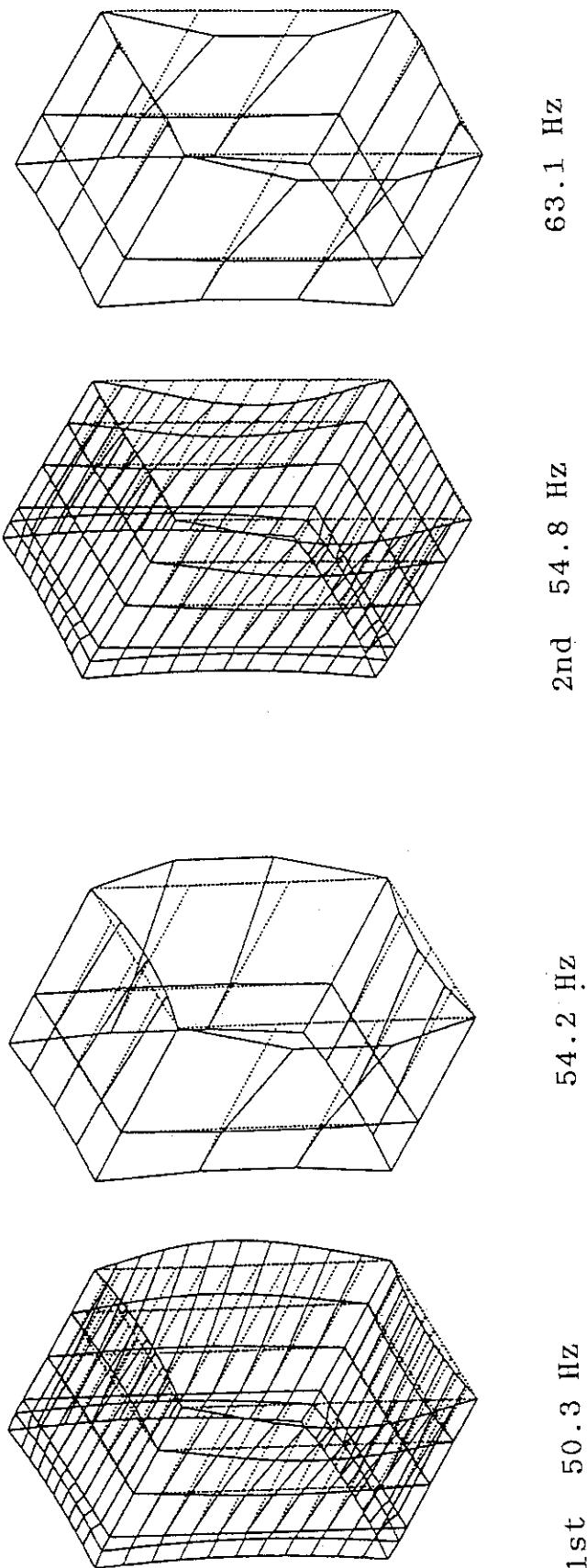


図5.12 水平ポートの詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動モード

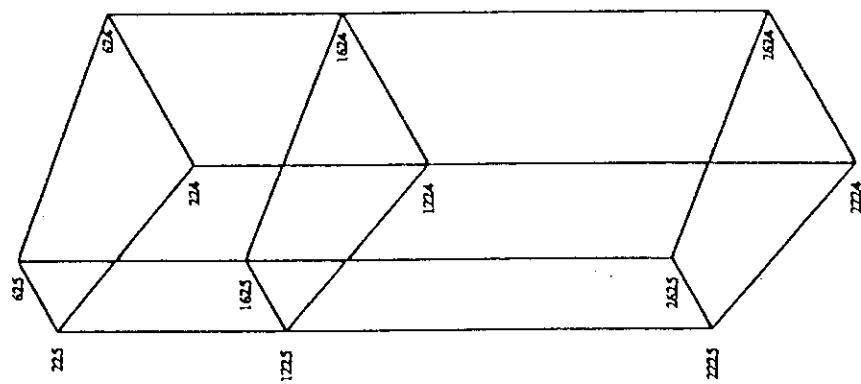


図 5.15 下部ボートの簡易モデル

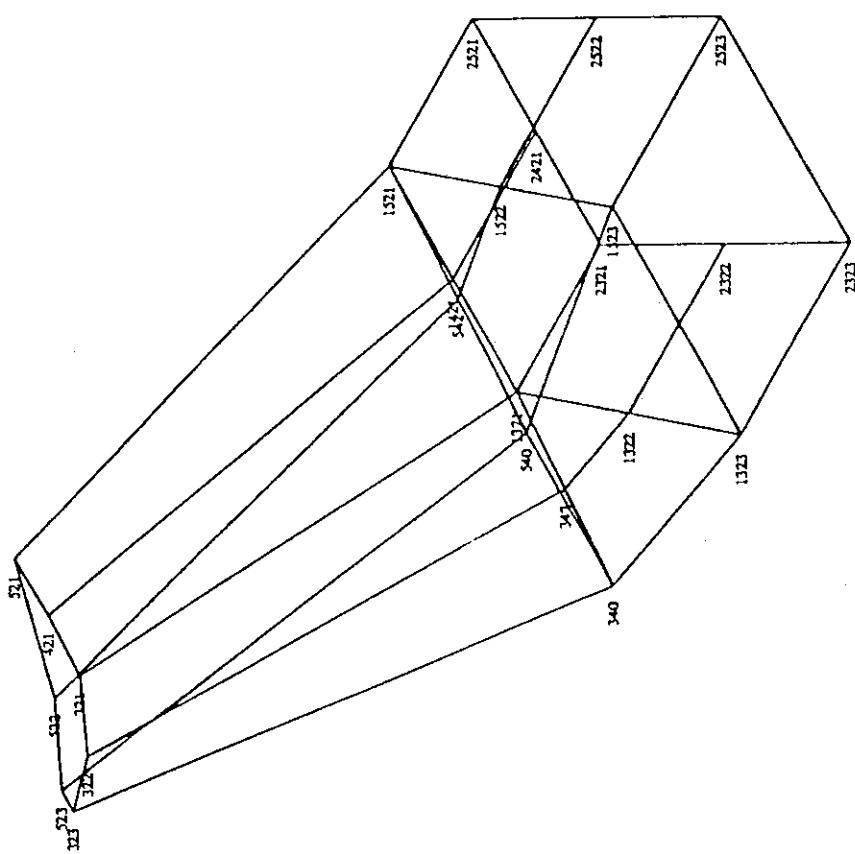


図 5.13 下部ダクトの簡易モデル

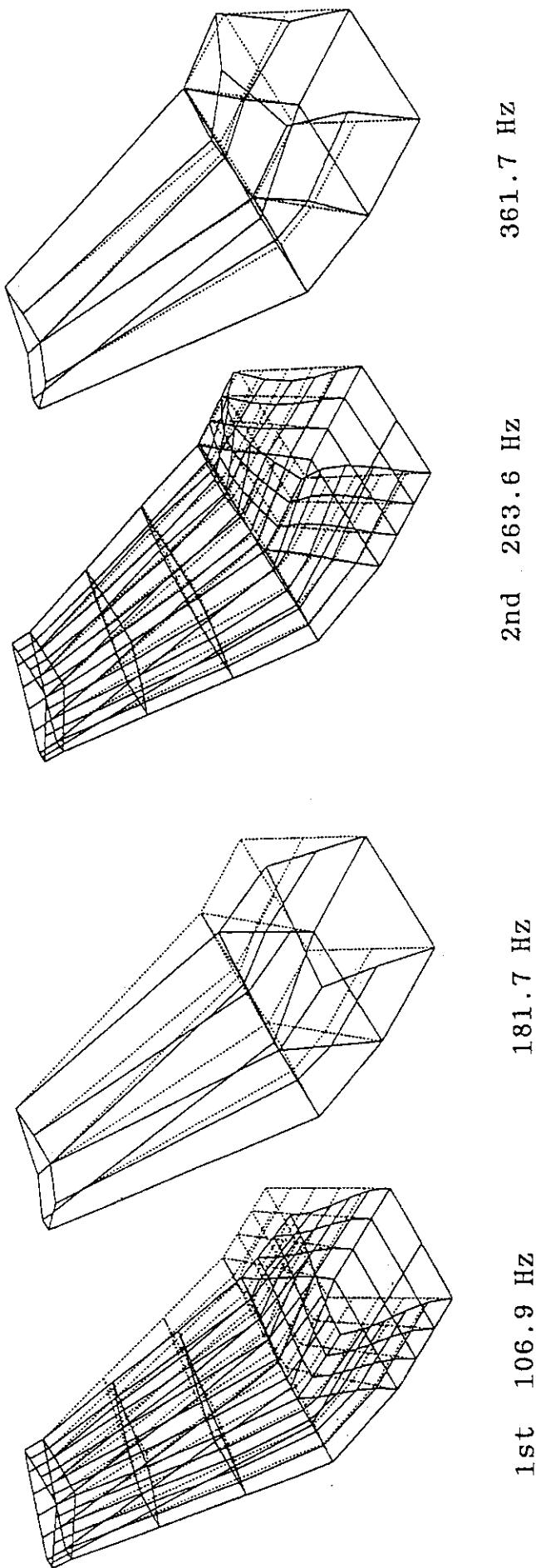


図 5.14 下部ダクトの詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動モード

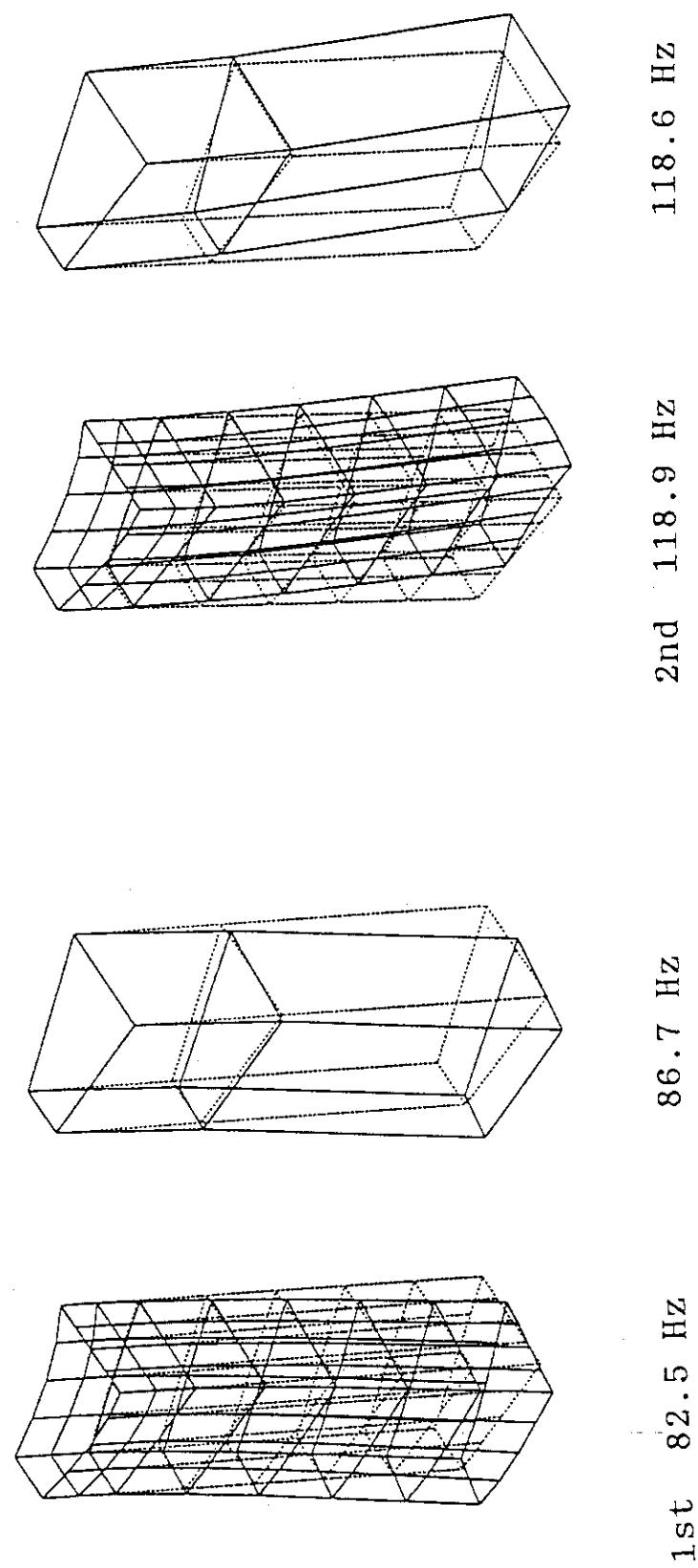


図 5.16 下部ボートの詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動モード

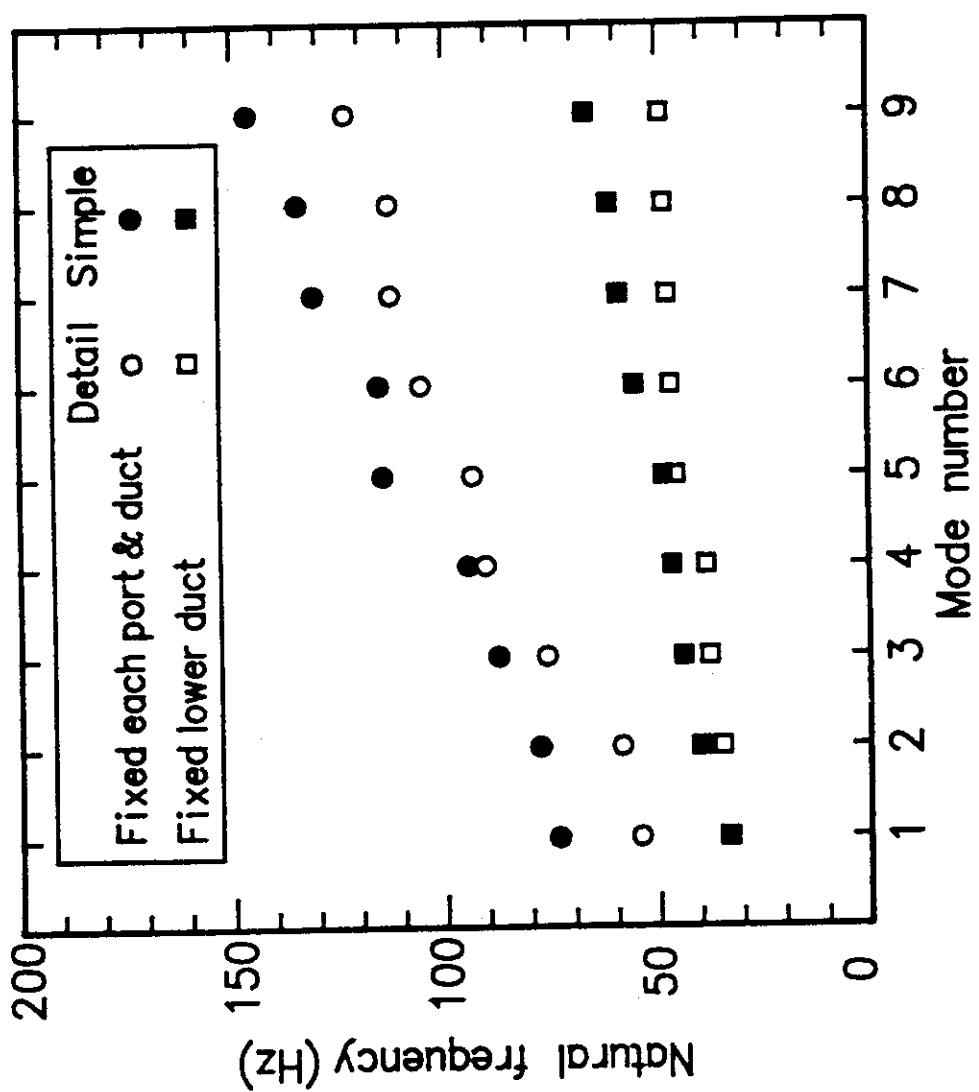


図 5.17 1 / 16 セクタ構造体の詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動数

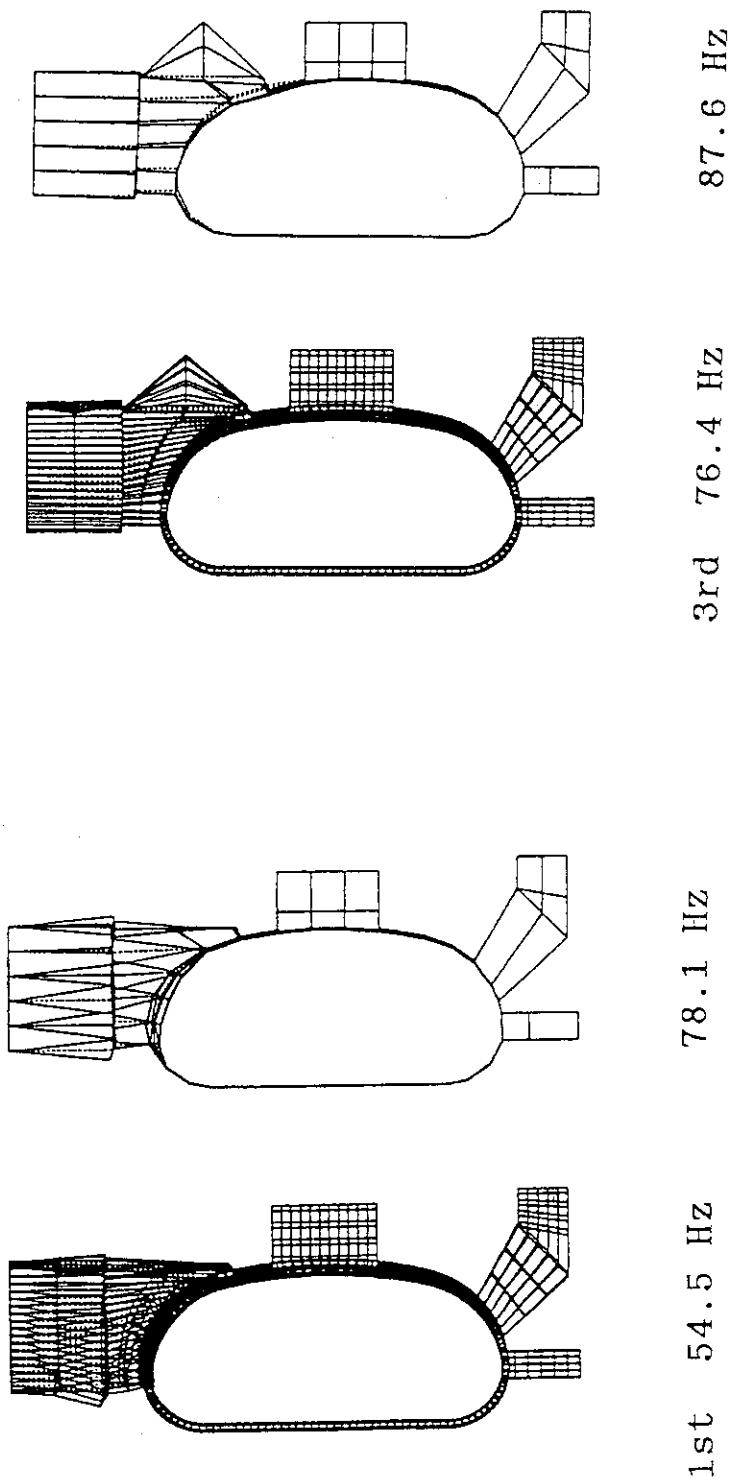


図 5.18 1／16セクタ構造体の詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動モード  
(各種ポート端部と下部ダクト底部完全固定)

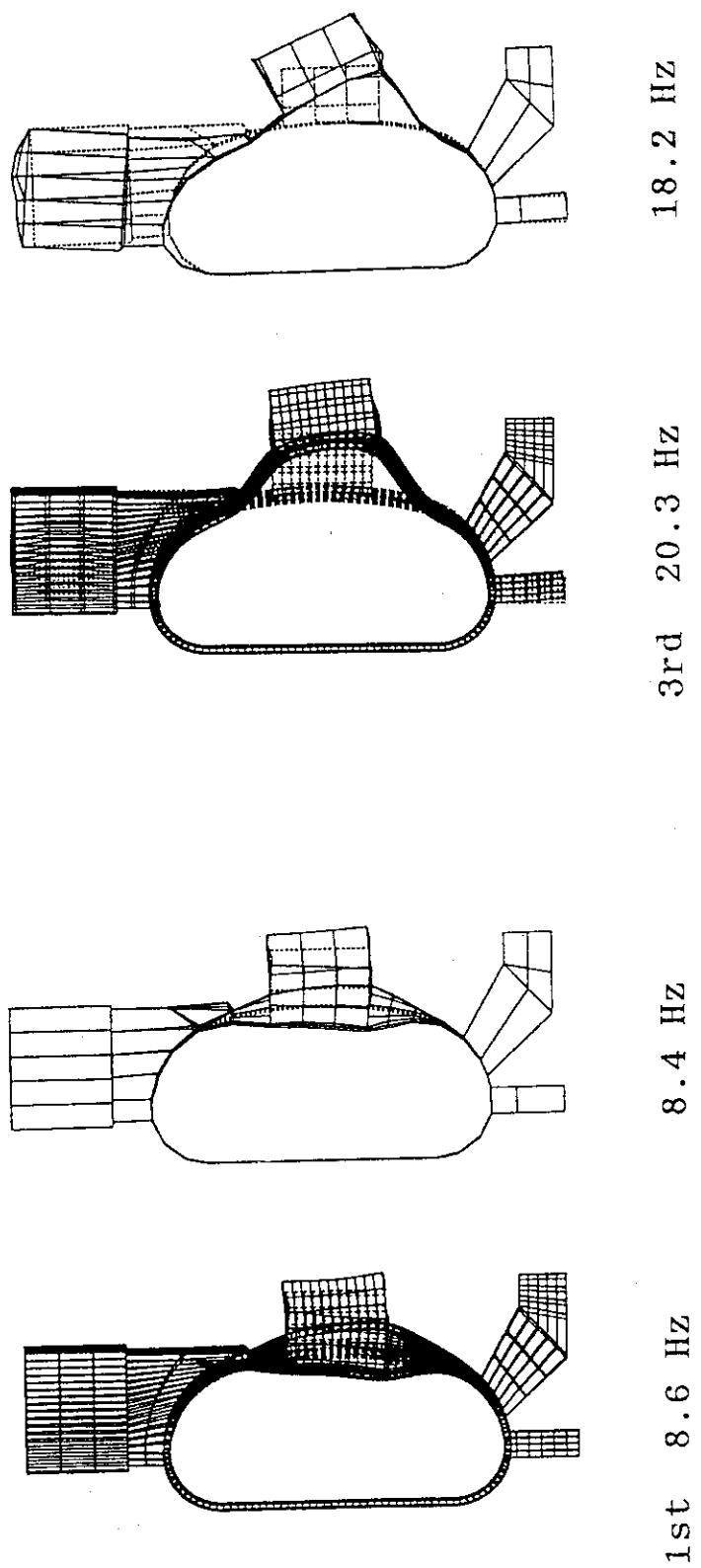
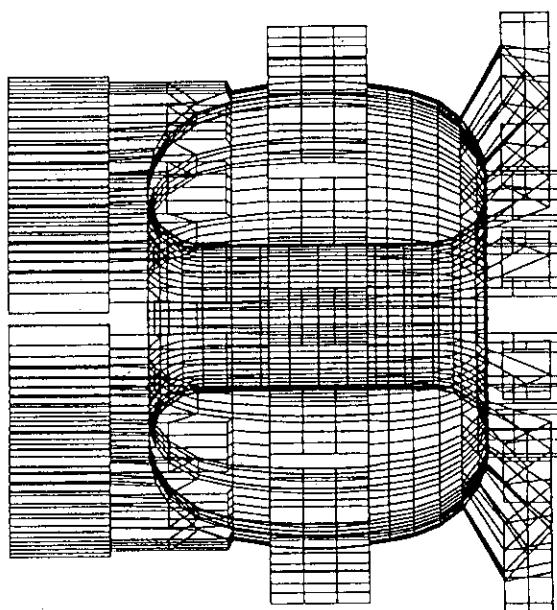
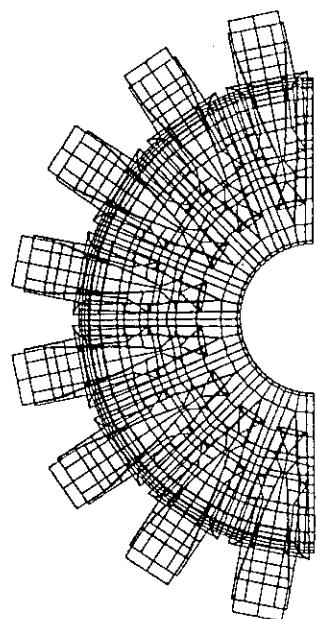
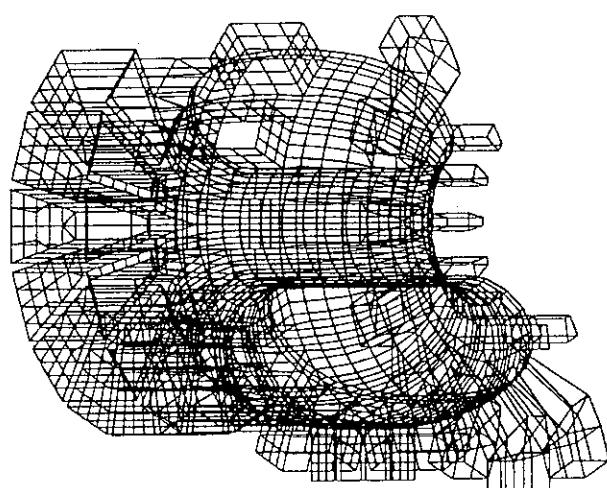


図 5.19 1 / 16 セクタ構造体の詳細モデル及び簡易モデルによる固有振動モード  
(下部ダクト底部完全固定)



VACUUM-VESSEL(WHOLE-MODEL)



VACUUM-VESSEL(MIDDLE)

図 6.1 (a) 1 / 2 セクタ構造体の簡易モデル

図 6.1 (b) 1 / 2 セクタ構造体の簡易モデル

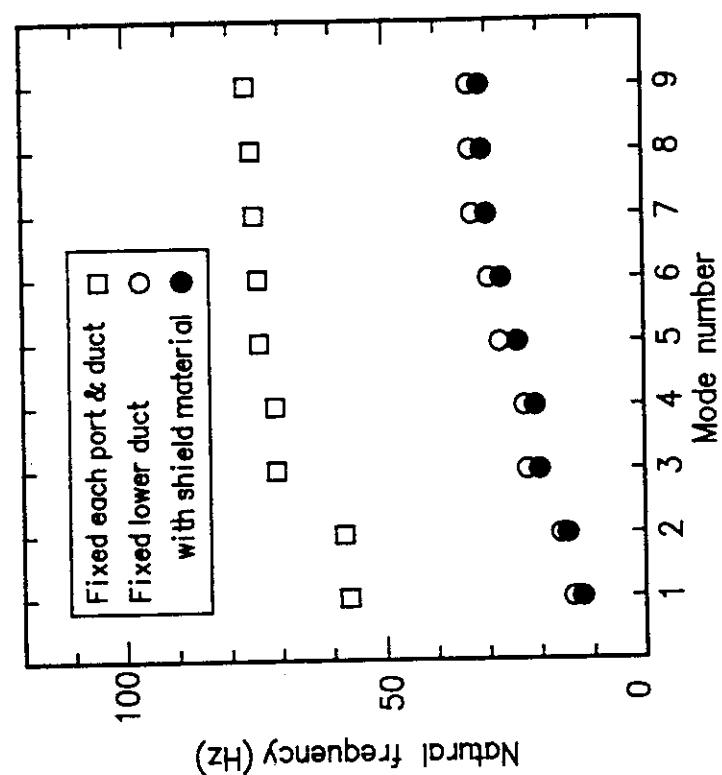
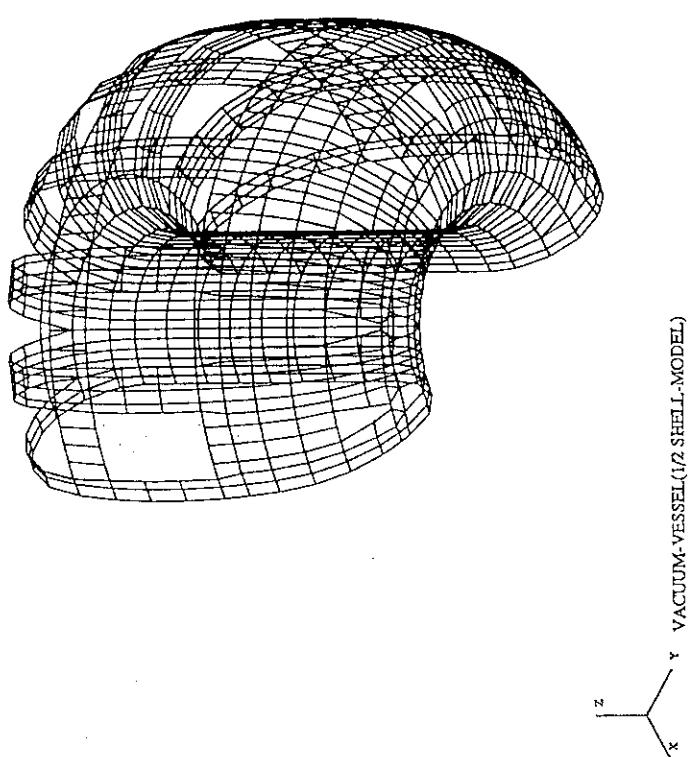


図 6.2 二重壁構造 シェルの簡易モデル  
図 6.3 1 / 2 セクタ構造体の固有振動数



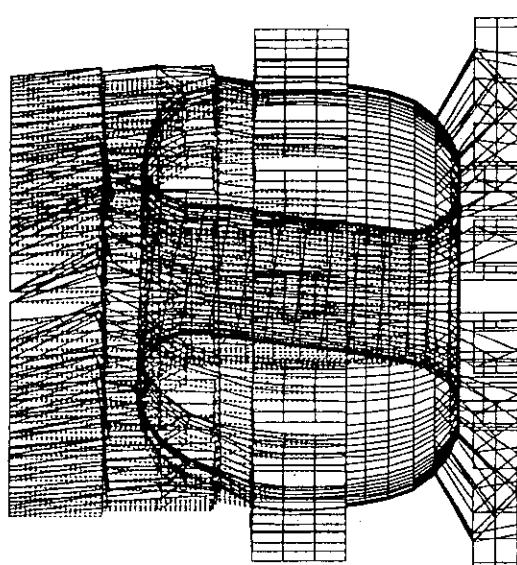
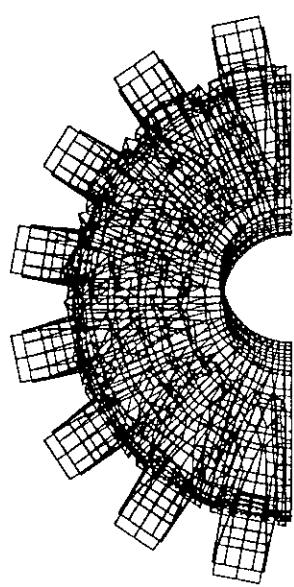
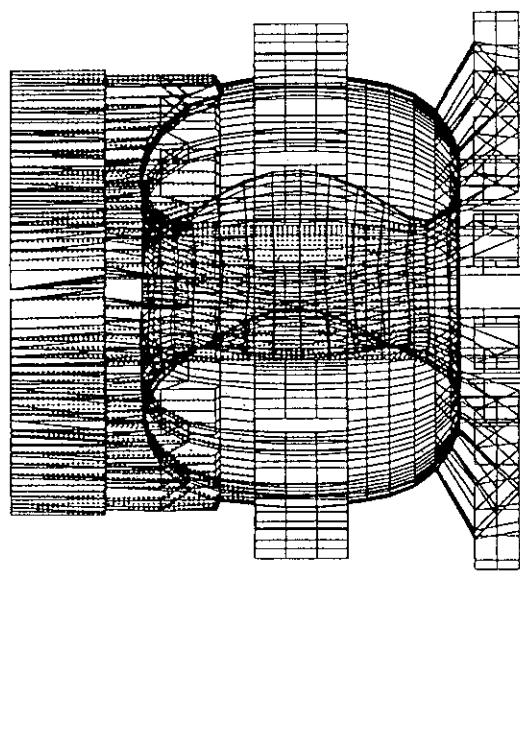
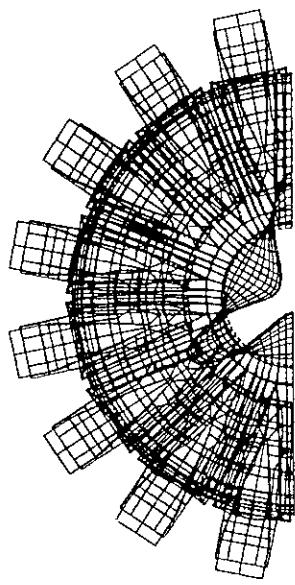


図 6.4 (a) 1 / 2 セクタ構造体の固有振動モード  
(各種ポートと下部ダクト底部完全固定)

図 6.4 (b) 1 / 2 セクタ構造体の固有振動モード  
(各種ポートと下部ダクト底部完全固定)



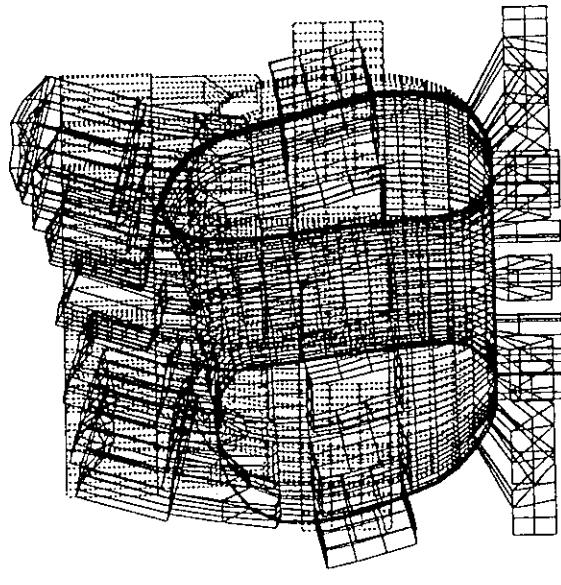
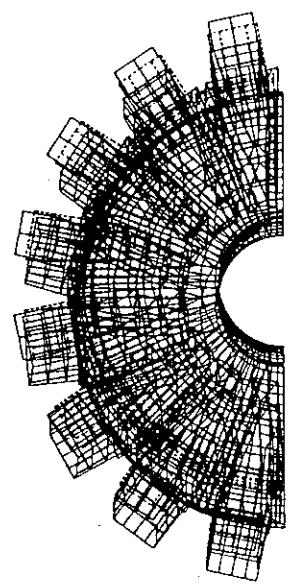
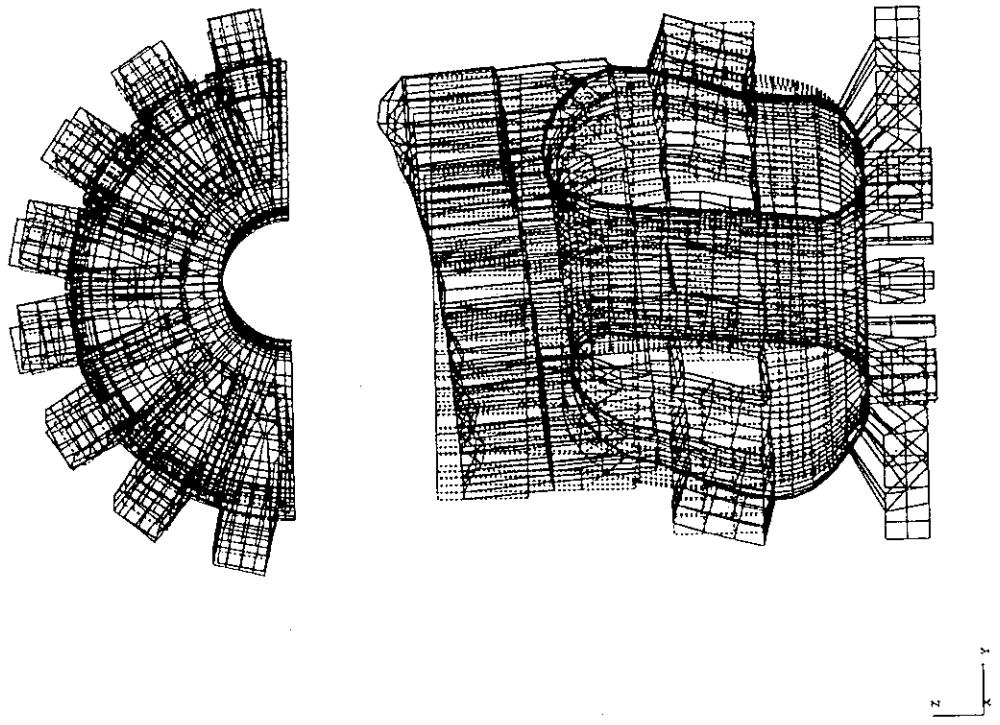


図 6.5 (a) 1 / 2 セクタ構造体の固有振動モード  
(下部ダクト底部完全固定)

図 6.5 (b) 1 / 2 セクタ構造体の固有振動モード  
(下部ダクト底部完全固定)



3rd 22.6 Hz

VACUUM-VESSEL(WHOLE-MODEL)

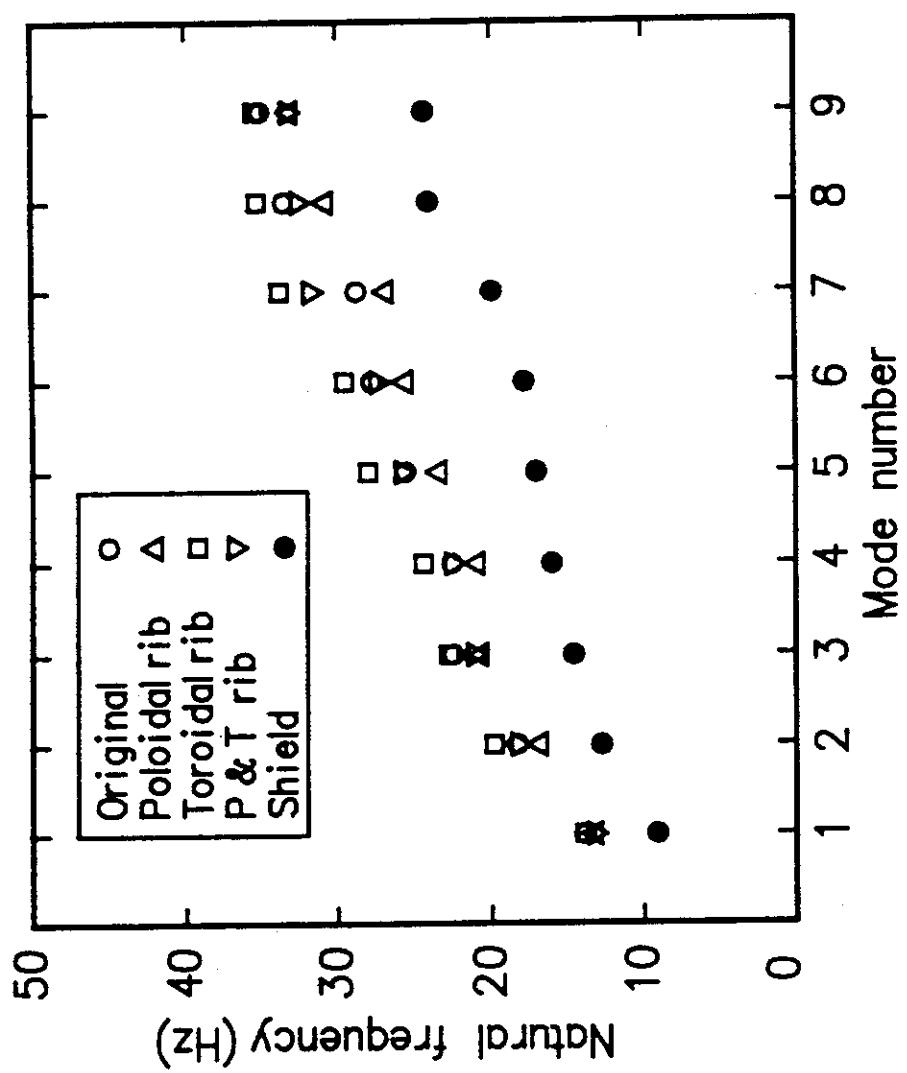


図 6.6 1 / 2 セクタ 真空容器シェルの固有振動数

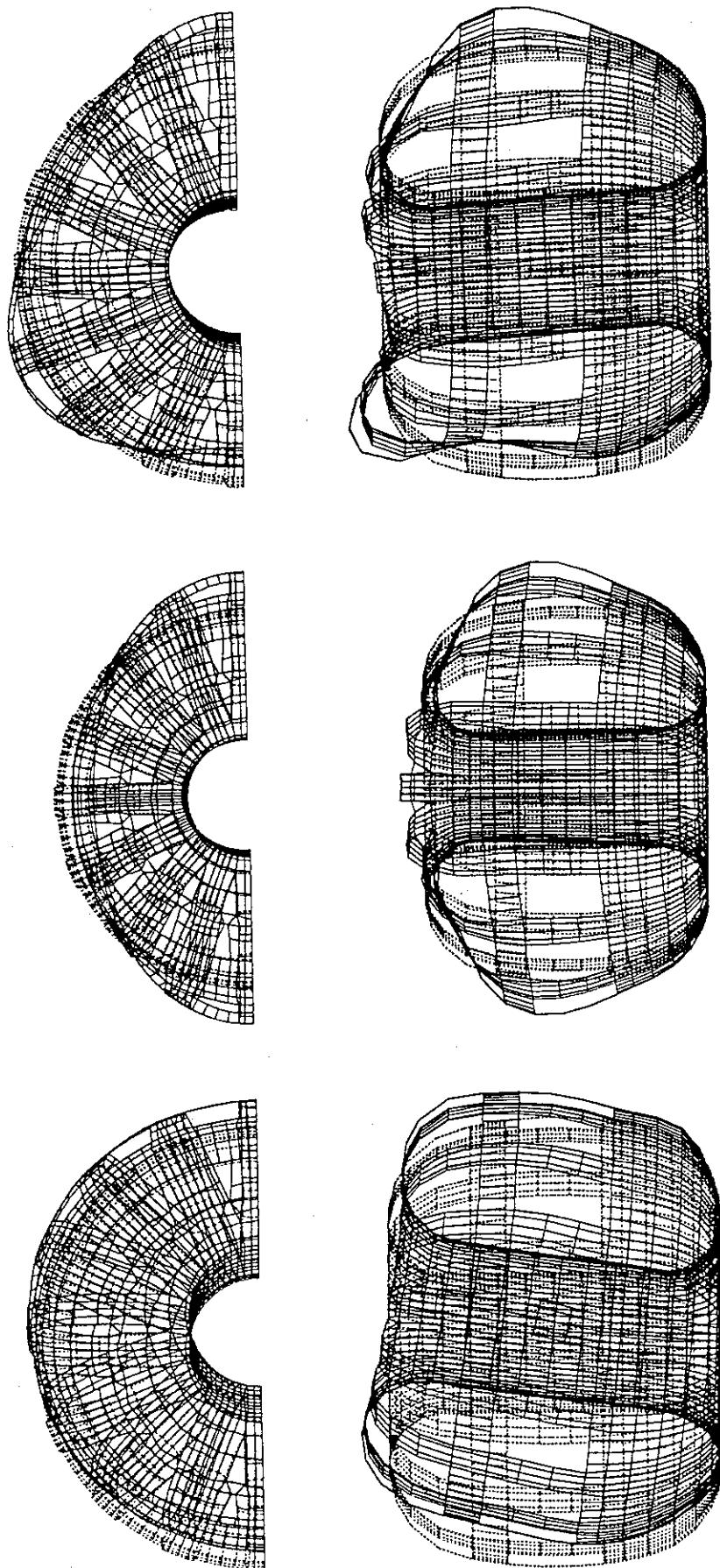


図 6.7 1 / 2 セクタ真空容器シェルの固有振動モード（基本モデル）

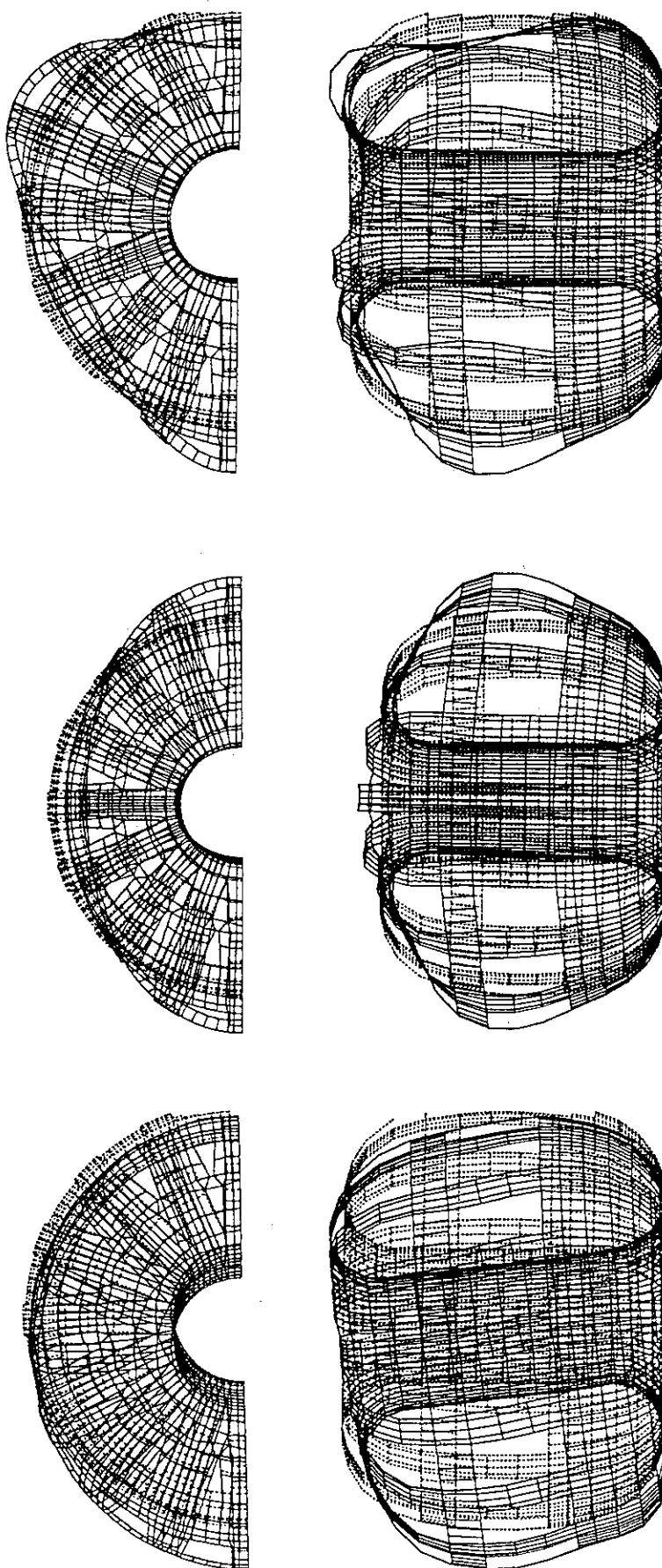
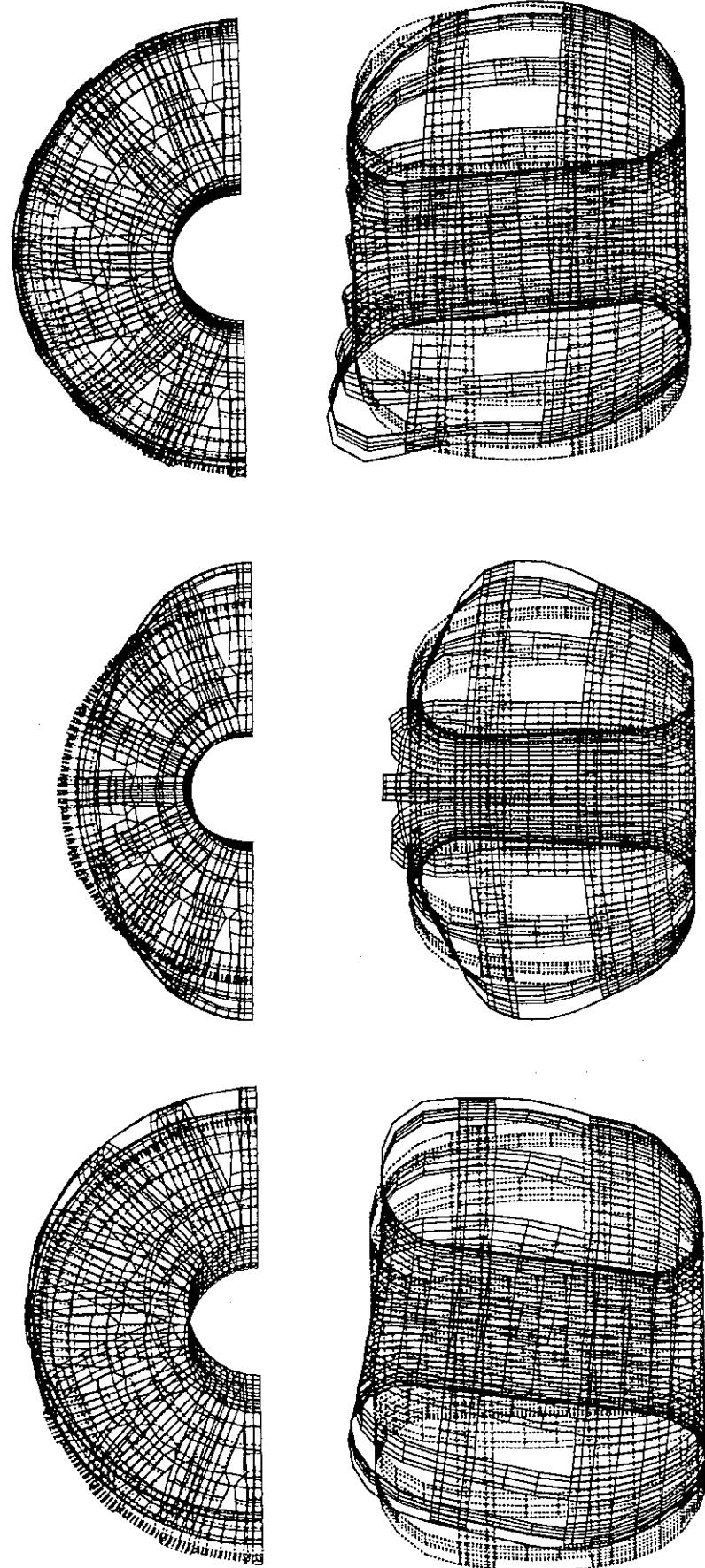


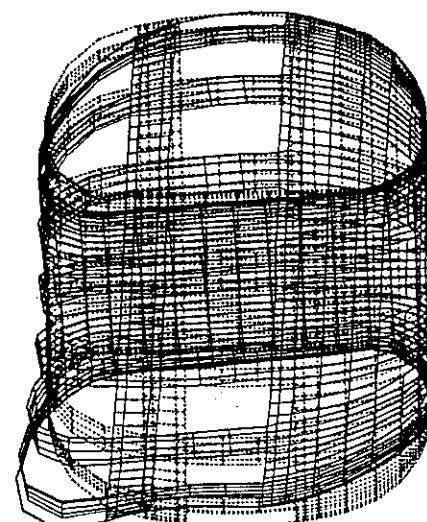
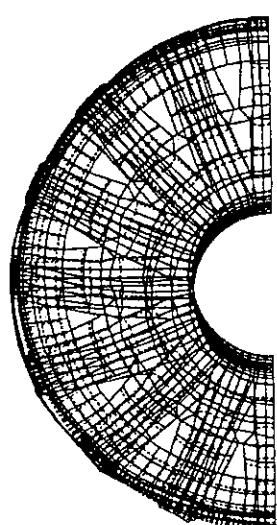
図 6.8 1 / 2 セクタ真空容器シェルの固有振動モード  
(ポート方向リブ剛性増加)

1st 13.2 Hz      2nd 16.8 Hz      3rd 20.7 Hz

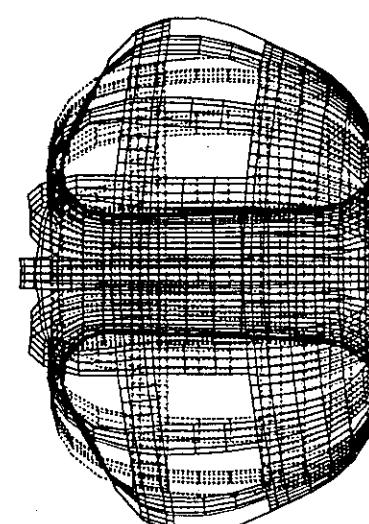
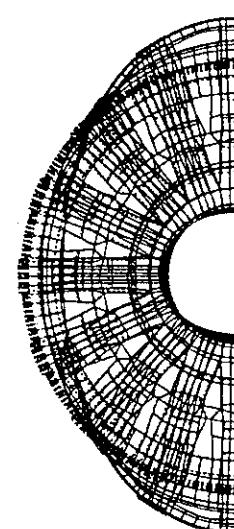


1st 13.9 Hz      2nd 19.8 Hz      3rd 22.8 Hz

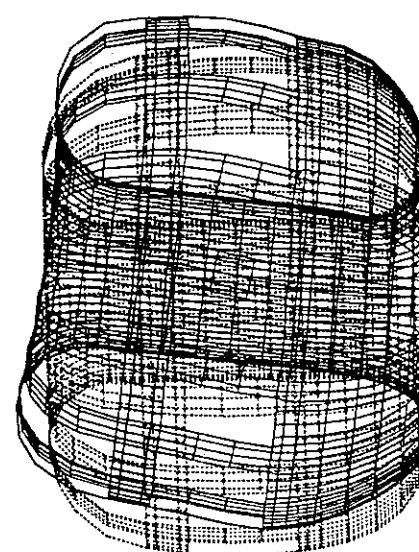
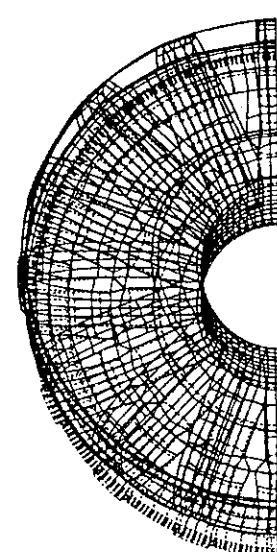
図 6.9 1 / 2 セクタ真空容器シェルの固有振動モード  
(トロイダル方向リブ剛性増加)



3rd 21.2 Hz



2nd 18.3 Hz



1st 13.3 Hz

図 6.10 1 / 2 セグタ真空容器シェルの固有振動モード  
(ボロイダル方向リブ剛性増加)

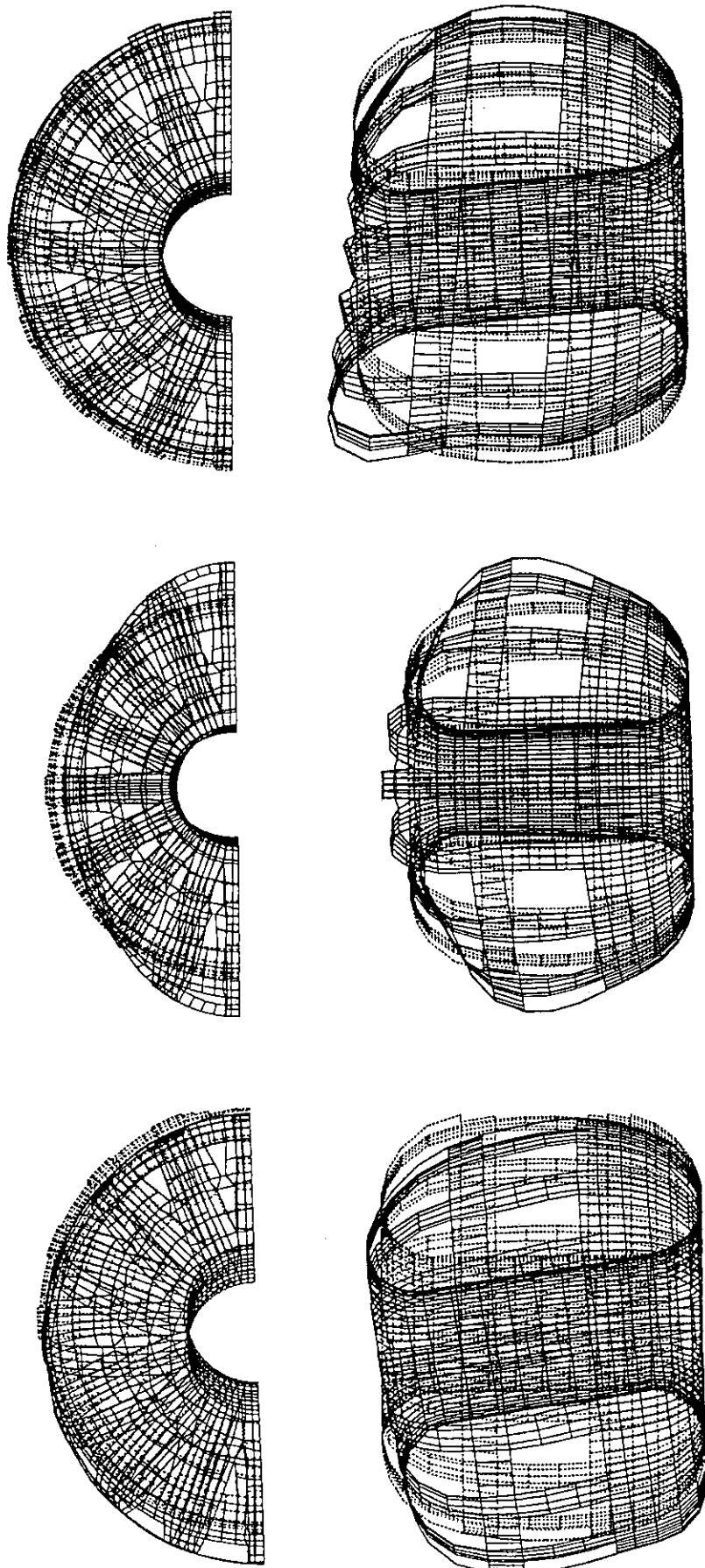


図 6.11 1 / 2 セクタ 真空容器シェルの固有振動モード  
(トロイダル及びポロイダル方向リブ剛性増加)

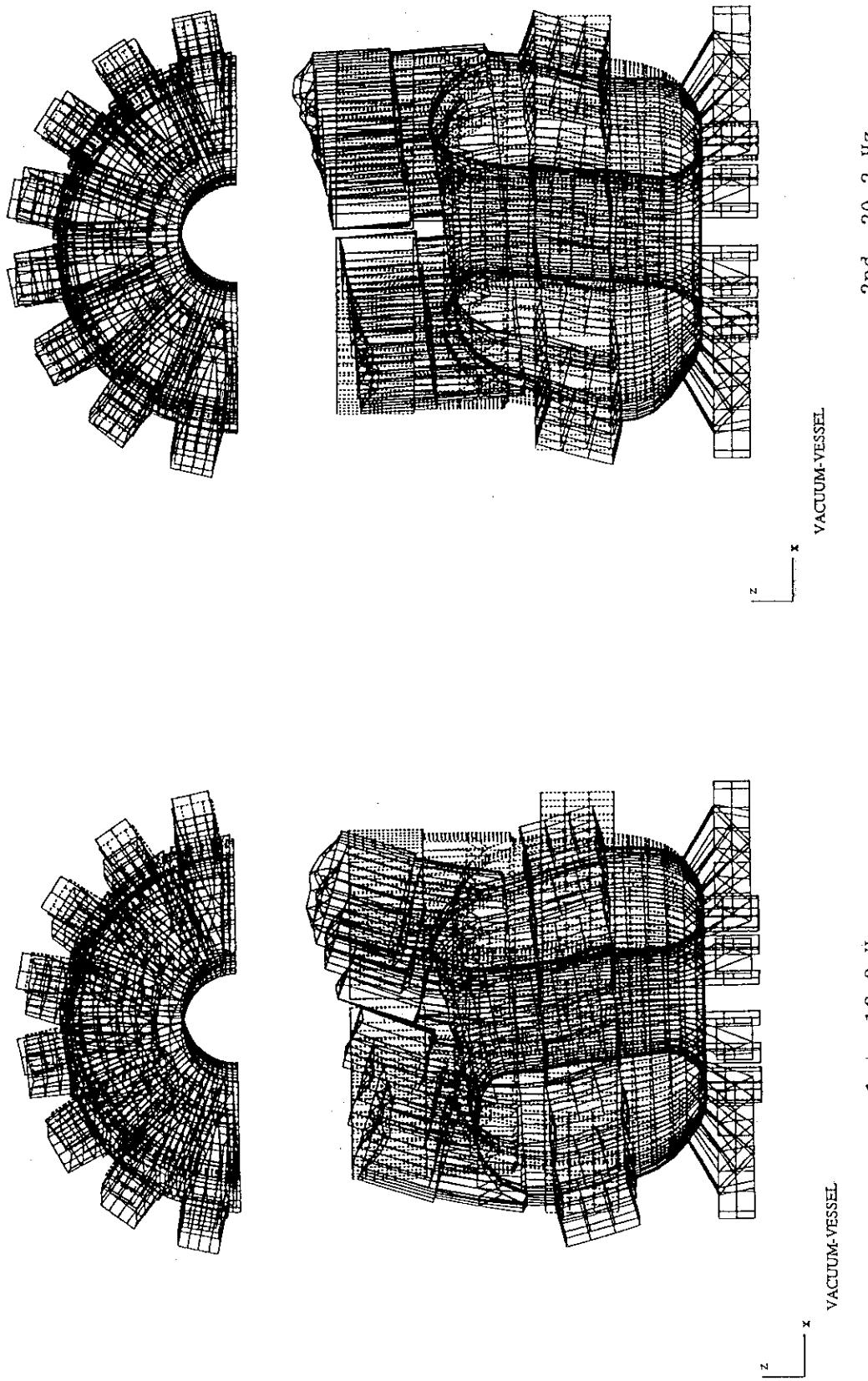


図 6.12(a) 1 / 2 セクタ真空容器シェルの固有振動モード  
(遮蔽材質量付加)

図 6.12(b) 1 / 2 セクタ真空容器シェルの固有振動モード  
(遮蔽材質量付加)