

JAERI-M  
8155

J T—60の耐震解析 (I)  
—解析手法及び固有値解析—  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・66)

1979年3月

高津 英幸・清水 正亜・奥村 光男\*・川上 誠\*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

J T - 6 0 の 耐 震 解 析 ( I )  
— 解 析 手 法 及 び 固 有 値 解 析 —  
( 臨 界 プ ラ ズ マ 試 験 装 置 設 計 報 告 ・ 6 6 )

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部  
高津 英幸・清水 正亜・奥村 光男\*・川上 誠\*

( 1 9 7 9 年 2 月 5 日 受 理 )

本報告書は、現在原研で建設を進めている臨界プラズマ試験装置(JT-60)の地震時の健全性を調べる目的で行った耐震解析のうち、新たに開発した解析手法と装置の振動特性(固有値解析)の検討結果についてまとめたものである。

本解析に用いた手法は、装置全体を構成要素に分割し、各要素毎に工学的に適切にモデル化された“簡略モデル”を作成し、これらを組み合わせて装置全体モデルを構築するというものである。“簡略モデル”は、装置の形状を忠実に表現した“詳細モデル”の振動特性を十分良く近似すると同時に、できる限り節点数を抑えたモデルであり、これらによって構築される全体モデルは、各要素の局所的な振動モードを含み、かつ節点数をある程度抑える事ができるという特徴を有している。この手法はJT-60の様な大型複合構造物に特に適した手法であり、また、解析は従来用いられて来た汎用構造解析プログラムで十分である。

JT-60へ適用した結果、主要要素に関して第1~10次迄、固有周期、固有振動モード共に詳細モデルをよく近似した簡略モデルが作成され、約800節点の全体モデルが構築された。建家も含めた全体モデルの固有値解析の結果、装置の1次固有周波数は4.5 Hz、第1~4次は真空容器40°セクタの水平面内の振動が卓越するモードである事が判った。また、これから、真空器40°セクタの支持柱の設計の一部に再検討を要する事が明らかとなった。

---

\* 機構造計画研究所

Seismic Analysis of the JT-60 ( I )  
— Analysis Method and Eigenvalue Analysis

Hideyuki TAKATSU, Masatsugu SHIMIZU,  
Mitsuo OKUMURA\*, Makoto KAWAKAMI\*

Division of Large Tokamak Development  
Tokai Research Establishment, JAERI

( Received February 5, 1979 )

Seismic analysis of JT-60, a tokamak machine under construction in JAERI, was carried out in order to confirm machine integrity in earthquakes in connection with any aseismic design changes. Described are an analysis method newly developed for seismic analysis of JT-60 and the results of eigenvalue analysis of the machine.

For analysis, the machine model comprises "simple models" of respective components constituting the machine. Each simple model is based on the engineering criterion that it should have as similar dynamic characteristics to those of a "detailed model", which is faithful to the real component structure and further as few nodal points as possible. So, analysis of the machine model gives information of not only overall behavior of the machine but also local vibration of each component with few nodal points. The analysis method is thus useful especially for large complex structures such as JT-60.

The method was applied to JT-60; the machine model with about 800 nodal points is constructed of simple models of respective components having eigenmodes and frequencies similar to those of the detailed models up to the 10th mode. Eigenvalue analysis of the machine model showed that JT-60 has the 1st natural frequency of 4.5 Hz and distinguished horizontal vibration mode of the vacuum vessel ( 40° sector ); which indicates the necessity of design change of the support structure of the vacuum vessel.

Keywords: JT-60 Tokamak, Seismic Analysis, Eigenvalue Analysis,  
Mode Shape, Frequency, Mechanical Vibration, Vacuum Vessel

---

\* Kozo Keikaku Engineering Inc.

## 目 次

I. 序 論	
1. はじめに	1
2. 解析手法及び装置構造概要	3
2.1 解析手法	3
2.2 装置構造概要	4
II. 主要コンポーネントの簡略モデルの作成	
1. トロイダル磁場コイル	11
1.1 詳細モデルの固有値解析	11
1.1.1 モデル化概要	11
1.1.2 固有値解析	12
1.2 簡略モデルの固有値解析	13
1.2.1 モデル化概要	13
1.2.2 固有値解析	14
2. ポロイダル磁場コイル	18
2.1 詳細モデルの固有値解析	18
2.1.1 モデル化概要	18
2.1.2 固有値解析	19
2.2 簡略モデルの固有値解析	21
2.2.1 モデル化概要	21
2.2.2 固有値解析	22
3. 真空容器 40°セクタ	25
3.1 詳細モデルの固有値解析	25
3.1.1 モデル化概要	25
3.1.2 固有値解析	27
3.2 簡略モデルの固有値解析	29
3.2.1 モデル化概要	30
3.2.2 固有値解析	30
4. 真空容器 60°セクタ	32
4.1 詳細モデルの固有値解析	32
4.1.1 モデル化概要	32
4.1.2 固有値解析	33
4.2 簡略モデルの固有値解析	34
4.2.1 モデル化概要	34
4.2.2 固有値解析	34

5. ま と め	35
Ⅲ. 装置全体モデル，建家モデルの構築及びその固有値解析	88
1. 装置全体モデル	88
1.1 主要コンポーネントの装置全体モデル組込用モデル	88
1.1.1 トロイダル磁場コイル	88
1.1.2 ポロイダル磁場コイル	89
1.1.3 真空容器	90
1.2 他の構造コンポーネントのモデル化	91
1.2.1 上・下架台	91
1.2.2 支持柱	93
1.2.3 可動リミタ	94
1.3 装置全体モデル	94
1.3.1 装置全体モデルの規模	94
1.3.2 装置全体モデルの重量	94
2. 建家モデル	95
2.1 建家モデルのモデル化概要	95
2.2 地盤バネ定数の算出	98
3. 固有値解析	102
3.1 固有値解析の結果	102
3.2 検 討	104
3.2.1 ST (装置・星形トラス付き) モデル	104
3.2.2 S (装置・星形トラスなし) モデル	106
3.2.3 BST (建家-装置・星形トラス付き) モデル	107
3.2.4 BS (建家-装置・星形トラスなし) モデル	107
4. ま と め	108
謝 辞	109
参考文献	109

## Contents

I. Introduction	
1. Introduction .....	1
2. Analysis method .....	3
2.1 Analysis method .....	3
2.2 General description of JT-60 machine .....	4
II. Simple model of main components	
1. Toroidal field coil .....	11
1.1 Detailed model .....	11
1.1.1 Outline of detailed model .....	11
1.1.2 Eigenvalue analysis .....	12
1.2 Simple model .....	13
1.2.1 Outline of simple model .....	13
1.2.2 Eigenvalue analysis .....	14
2. Poloidal field coil .....	18
2.1 Detailed model .....	18
2.1.1 Outline of detailed model .....	18
2.1.2 Eigenvalue analysis .....	19
2.2 Simple model .....	21
2.2.1 Outline of simple model .....	21
2.2.2 Eigenvalue analysis .....	22
3. Vacuum vessel ( 40° sector ) .....	25
3.1 Detailed model .....	25
3.1.1 Outline of detailed model .....	25
3.1.2 Eigenvalue analysis .....	27
3.2 Simple model .....	29
3.2.1 Outline of simple model .....	30
3.2.2 Eigenvalue analysis .....	30
4. Vacuum vessel ( 60° sector ) .....	32
4.1 Detailed model .....	32
4.1.1 Outline of detailed model .....	32
4.1.2 Eigenvalue analysis .....	33
4.2 Simple model .....	34
4.2.1 Outline of simple model .....	34
4.2.2 Eigenvalue analysis .....	34
5. Conclusions .....	35

## Contents ( continued )

III. Machine and building model .....	88
1. Machine model .....	88
1.1 Modified simple model for machine model .....	88
1.1.1 Toroidal field coil .....	88
1.1.2 Poloidal field coil .....	89
1.1.3 Vacuum vessel .....	90
1.2 Models of the other components .....	91
1.2.1 Support structure .....	91
1.2.2 Support column .....	93
1.2.3 Fast movable limiter .....	94
1.3 Machine model .....	94
1.3.1 Outline of machine model .....	94
1.3.2 Weight of machine model .....	94
2. Building model .....	95
2.1 Outline of building model .....	95
2.2 Spring constant of ground .....	98
3. Eigenvalue analysis .....	102
3.1 Results of eigenvalu analysis .....	102
3.2 Discussions .....	104
3.2.1 ST model .....	104
3.2.2 S model .....	106
3.2.3 BST model .....	107
3.2.4 BS model .....	107
4. Conclusions .....	108
 Acknowledgement .....	 109
References .....	109



## 表タイトル一覧

## 第 II 編

第 1.1 表	トロイダル磁場コイル詳細モデル入力モデル規模
第 1.2 表	トロイダル磁場コイル使用材料物性値
第 1.3 表	トロイダル磁場コイル導体部の等価縦弾性係数及び密度
第 1.4 表	トロイダル磁場コイル簡略モデル中の梁要素の断面性能
第 1.5 表	トロイダル磁場コイル簡略モデルにおける等価縦弾性係数の算出
第 1.6 表	補強枠の梁断面性能
第 2.1 表	ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおけるコイルのグルーピング
第 2.2 表	ポロイダル磁場コイル詳細モデル入力モデル規模
第 2.3 表	ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおける境界条件
第 2.4 表	ポロイダル磁場コイル使用材料物性値
第 2.5 表	ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおける各コイル群の梁断面性能
第 2.6 表	補強枠中の梁要素の断面性能
第 2.7 表	ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおけるコイルのグルーピング
第 2.8 表	ポロイダル磁場コイル簡略モデル入力モデル規模
第 2.9 表	ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおける境界条件
第 2.10 表	ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおける各コイル群の梁断面性能
第 2.11 表	ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおける各節点質量
第 2.12 表	支持柱モデル化検討に用いた梁断面性能
第 2.13 表	ポロイダル磁場コイル簡略モデルに用いる梁要素の梁断面性能
第 3.1 表	真空容器 40°セクタ詳細モデル入力モデル規模
第 3.2 表	境界条件
第 3.3 表	真空容器使用材料物性値
第 3.4 表	真空容器 40°セクタ詳細モデル要素断面性能
第 3.5 表	真空容器 40°セクタ簡略モデル入力モデル規模
第 3.6 表	真空容器 40°セクタ簡略モデル要素断面性能
第 4.1 表	真空容器 60°セクタ詳細モデル入力モデル規模
第 4.2 表	真空容器 60°セクタ簡略モデル入力モデル規模
第 5.1 表	各主要コンポーネントの詳細モデルと簡略モデルの比較

第 III 編
---------

第 1.1 表	トロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの支持梁の断面性能
第 1.2 表	ポロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの支持柱の断面性能
第 1.3 表	真空容器装置全体モデル組込用モデルにおける支持アームの梁断面性能
第 1.4 表	装置全体モデルの規模
第 2.1 表	建家モデル付加重量一覧
第 2.2 表	建家モデルの規模
第 2.3 表	建家-装置モデルの規模
第 3.1 表	STモデルの固有周期
第 3.2 表	STモデルの固有周期
第 3.3 表	BSTモデルの固有周期
第 3.4 表	BSモデルの固有周期

## 図 タ イ ト ル 一 覧

## 第 I 編

- 第 1.1 図 JT-60 本体の鳥瞰図  
 第 2.1 図 解析手順  
 第 2.2 図 JT-60 装置モデル化要領  
 第 2.3 図 JT-60 実験棟断面図  
 第 2.4 図 JT-60 実験棟平面図

## 第 II 編

- 第 1.1 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル鳥瞰図  
 第 1.2 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル正面図及び平面図  
 第 1.3 図 トロイダル磁場コイル外枠の板厚  
 第 1.4 図 トロイダル磁場コイル導体部のモデル化  
 第 1.5 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル固有周期  
 第 1.6 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード，プロッタ出力図  
 第 1.7 図 "  
 第 1.8 図 "  
 第 1.9 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル 1，2 次固有振動モード，模式図  
 第 1.10 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル 3，4 次固有振動モード，模式図  
 第 1.11 図 トロイダル磁場コイル簡略モデル  
 第 1.12 図 補強枠の梁断面性能の決定  
 第 1.13 図 補強枠のモデル化における剛域の評価  
 第 1.14 図 補強枠のモデル化における平面保持の効果  
 第 1.15 図 トロイダル磁場コイル簡略モデルの固有周期  
 第 1.16 図 トロイダル磁場コイル簡略モデル 1，2 次固有振動モード  
 第 1.17 図 トロイダル磁場コイル簡略モデル 3，4 次固有振動モード  
 第 2.1 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおけるコイルのグルーピング  
 第 2.2 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル鳥瞰図  
 第 2.3 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル正面図及び平面図  
 第 2.4 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル固有周期  
 第 2.5 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル固有振動モード模式図（対称境界条件）

- 第 2.6 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 2.7 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 2.8 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 2.9 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 2.10 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 2.11 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル模式図
- 第 2.12 図 支持柱のモデル化
- 第 2.13 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル固有周期 ( 対称境界条件 )
- 第 2.14 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル固有周期 ( 逆対称境界条件 )
- 第 2.15 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 2.16 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 2 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 2.17 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 3 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 2.18 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1 ~ 3 次固有振動モード模式図 ( 対称境界条件 )
- 第 2.19 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 2.20 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 2 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 2.21 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 3 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 2.22 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1 ~ 3 次固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 3.1 図 真空容器 40°セクタ詳細モデルプロッタ出力図 ( 平面図 )
- 第 3.2 図 真空容器 40°セクタ詳細モデルプロッタ出力図 ( A 部断面図 )
- 第 3.3 図 真空容器 40°セクタ詳細モデルプロッタ出力図 ( A' 部断面図 )
- 第 3.4 図 真空容器支持アーム部モデル図
- 第 3.5 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有周期
- 第 3.6 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図 ( 対称境界条件 )

- 第 3.7 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 3.8 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 3.9 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 3.10 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 3.11 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 3.12 図 厚肉リングとペローズの 2 質点バネ・マスモデル
- 第 3.13 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル模式図 ( 平面図 )
- 第 3.14 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル模式図 ( 断面図 )
- 第 3.15 図 真空容器支持アームのモデル化
- 第 3.16 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有周期
- 第 3.17 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有周期 ( 一般振動モード )
- 第 3.18 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル 1 ~ 3 次固有振動モード模式図 ( 対称境界条件 )
- 第 3.19 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 3.20 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 4.1 図 真空容器 60°セクタ詳細モデルプロッタ出力図
- 第 4.2 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有周期
- 第 4.3 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図 ( 対称境界条件 )
- 第 4.4 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 4.5 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 4.6 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 4.7 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 対称境界条件 )
- 第 4.8 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )
- 第 4.9 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル, プロッタ出力モデル図 ( 平面図 )
- 第 4.10 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル, プロッタ出力モデル図 ( 断面図 )

- 第 4.11 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有周期  
 第 4.12 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有周期 (一般振動モード)  
 第 4.13 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル 1~3 次固有振動モード模式図 (対称境界条件)  
 第 4.14 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有振動モード模式図 (逆対称境界条件)  
 第 4.15 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有振動モード模式図 (逆対称境界条件)  
 第 4.16 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)  
 第 4.17 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)  
 第 4.18 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (逆対称境界条件)

## 第 III 編

- 第 1.1 図 トロイダル磁場コイル簡略モデルと装置全体モデル組込用モデルの支持梁の位置関係  
 第 1.2 図 トロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの固有周期  
 第 1.3 図 ポロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの固有周期 (対称境界条件)  
 第 1.4 図 ポロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの固有周期 (逆対称境界条件)  
 第 1.5 図 真空容器 40°セクタ装置全体モデル組込用モデルの固有周期  
 第 1.6 図 真空容器 60°セクタ装置全体モデル組込用モデルの固有周期  
 第 1.7 図 ポート, ボックス重量の再配置要領  
 第 1.8 図 ポート重量と分配重量  
 第 1.9 図 上架台平面図  
 第 1.10 図 下架台平面図  
 第 1.11 図 架台モデル化の要領  
 第 1.12 図 ポロイダル磁場コイル支持柱に結合される梁要素  
 第 1.13 図 架台剛性検討部分モデル抽出範囲  
 第 1.14 図 架台剛性検討部分モデル—詳細モデル  
 第 1.15 図 架台剛性検討部分モデル—簡略モデル  
 第 1.16 図 架台詳細部分モデルの解析条件及び結果  
 第 1.17 図 架台簡略部分モデルの解析条件及び結果  
 第 1.18 図 支持柱のプロッタ出力図

- 第 1.19 図 中心支柱とトロイダル磁場コイルの接触部のモデル化
- 第 1.20 図 可動リミタのモデル化
- 第 1.21 図 トロイダル磁場コイル全体モデルプロッタ出力図
- 第 1.22 図 ポロイダル磁場コイル全体モデルプロッタ出力図
- 第 1.23 図 真空容器全体モデルプロッタ出力図
- 第 1.24 図 上・下架台，支持柱，可動リミタ全体モデルプロッタ出力図
- 第 2.1 図 装置—建家モデル概念図
- 第 2.2 図 開口壁の等価壁厚
- 第 2.3 図 2 枚シェル要素の重ね配置
- 第 2.4 図 RF, 5 F の床板厚
- 第 2.5 図 4 F, 3 F の床板厚
- 第 2.6 図 2 F, 1 F の床板厚
- 第 2.7 図 1 F の床板厚 (部分拡大図)
- 第 2.8 図 BF の床板厚
- 第 2.9 図 BF の床板厚 (部分拡大図)
- 第 2.10 図 1 フレームの壁板厚
- 第 2.11 図 2 フレームの壁板厚
- 第 2.12 図 3 フレームの壁板厚
- 第 2.13 図 4 フレームの壁板厚
- 第 2.14 図 5 フレームの壁板厚
- 第 2.15 図 1 軸の壁板厚
- 第 2.16 図 2 軸の壁板厚
- 第 2.17 図 3 軸の壁板厚
- 第 2.18 図 4 軸の壁板厚
- 第 2.19 図 5 軸の壁板厚
- 第 2.20 図 集中バネ系と分布バネ系との対応
- 第 2.21 図 各節点の分担バネ定数
- 第 3.1 図 S, STモデルの固有周期
- 第 3.2 図 BS, BSTモデルの固有周期
- 第 3.3 図 STモデル第1次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.4 図 STモデル第2次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.5 図 STモデル第3次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.6 図 STモデル第4次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.7 図 STモデル第5次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.8 図 STモデル第6次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.9 図 STモデル第7次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.10 図 STモデル第8次固有振動モード・プロッタ出力図
- 第 3.11 図 STモデル第9次固有振動モード・プロッタ出力図

第 3.12 図	STモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.13 図	STモデル第11次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.14 図	STモデル第11次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.15 図	STモデル第12次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.16 図	STモデル第12次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.17 図	STモデル第1～12次固有振動モード模式図
第 3.18 図	BSTモデル第1次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.19 図	BSTモデル第2次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.20 図	BSTモデル第3次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.21 図	BSTモデル第4次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.22 図	BSTモデル第5次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.23 図	BSTモデル第5次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.24 図	BSTモデル第5次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.25 図	BSTモデル第5次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.26 図	BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.27 図	BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.28 図	BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図
第 3.29 図	BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図



# I. 序 論

## 1. はじめに

現在、原研で建設を進めている臨界プラズマ試験装置（JT-60）は、第1.1図に示す様にトロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、真空容器、上・下架台、支持柱等多くの質量及び剛性の異なるコンポーネントが複雑に結合された複合構造物である。JT-60の各構造コンポーネントに対する静的な応力解析は既に行われており<sup>(1)(2)</sup>、十分設計に反映されている。一方、各コンポーネントの動的解析も含めた装置全体の耐震解析は、製作担当メーカーでは、現時点において未完了である。

JT-60はあくまで実験装置であるが、その装置規模及び製作費用から考えて、原子炉等と同程度の重要構造物と考えられ、その耐震安全性の検討は必要不可欠である。更に、各構造コンポーネントには、プラズマの挙動に関連して、非常に時定数の短い動的荷重<sup>(2)</sup>が作用するが、これらに対する各コンポーネントの健全性を評価する際にも、各コンポーネントの振動特性を把握しておく事が肝要となる。

ところで、本装置の如き複雑な構造物の地震時の動的挙動を解析する場合、解析対象を形状に忠実な有限要素モデルとして取り扱う事は、節点数を膨大なものにしてしまい、解析に当っては莫大な計算時間を要し実用的でない。更には、データ・エラーの可能性の増大、或いは数値計算上の誤差の累積により、計算結果の信頼性の低下を招く場合もあり、対象構造物の局所的な振動特性までが把握できるという有限要素モデルの長所を生かす事ができない。そこで、JT-60の様に複雑な構造物の場合、その対象構造物のある程度簡略化した数値解析モデルに置き換えて、これによる数値解析を行うのが一般的である。ここで問題となるのは、簡単な解析モデルを如何に決定するかと言う点である。

従来よく用いられて来た手法は、対象構造物の剛性、重量を比較的大胆な仮定の下にバネ・マス系モデルに置換する手法である。この手法は、数少ない節点数で比較的容易に対象構造物の全体的な挙動を把握する事ができるという長所を持つ反面、重量、剛性の算出に当ってはそのバランスに殆んど注意が払われず、対象構造物の振動特性が保証される事は稀である。土木・建築構造物に見られる様な比較的単純な構造物ならば、その様な大胆な置換方法によってもさ程極端な誤差は生じない<sup>(3)</sup>かもしれないが、JT-60の様に複雑な構造物に対しては、大胆な仮定の下に決められた単純なモデルによる数値解析は、極めて大きな誤差を含む要因が内在している。

更に、バネ・マス系モデルにおいては、対象構造物の各構成要素の局所的な振動特性は殆んど把握できない。JT-60の各構造コンポーネントの振動特性は、各コンポーネント毎にかなり異った性質のものであると考えられる。一般に、複合構造物の振動特性としては、コンポーネントの組み合わせにより初めて現われる全体としての特性の他に、個々のコンポーネント毎の局所的な特性も現われる。従って、複合構造物の振動特性を評価する上で、個々のコンポーネント毎の振動特性を把握する事が重要である。

本解析においては、JT-60全体が、いくつかの構造コンポーネントから構成されている事に着目して、各コンポーネント毎に、形状に忠実な有限要素を作成してその局所的な振動特性を評価すると共に、それを基にして、工学的に適切なモデル化を行いより簡略化された数値モデルを作成し、それらを組み合わせて装置全体モデルを構築するという新しい手法を開発した。この手法は、簡略数値モデルの決定に当って、各コンポーネントの振動特性をできる限り忠実に表現できるという有限要素モデルの長所を有すると共に、節点数をある程度抑える事ができるというバネ・マス系モデルの長所も併せ持ち、かつ特殊な解析用プログラムを必要とせず、汎用構造解析プログラムと工学的知識だけで十分である等、JT-60の様に複雑な構造物の動的解析に対して有効な解析手法であると考えられる。

本報告書においては、先ず第I編においてJT-60の構造概要に触れ、その耐震解析用に新たに開発した手法を述べる。第II編においては、第1～4章において、各々JT-60の主要コンポーネントであるトロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、真空容器40°及び60°セクタに関して、形状に忠実な有限要素モデル—“詳細モデル”—を作成し、その固有値解析を行って、各コンポーネントの基準となる振動特性を把握する。更に、工学的に適切なモデル化を行った“簡略モデル”を作成する。これは基準となるべき詳細モデルの振動特性を良く表現していなければならない。そして第II編において、先ず第1章において、第II編において作成された主要コンポーネントの簡略モデルに一部修正を加えて“装置全体モデル組込用モデル”を作成すると共に、他の構造コンポーネント、即ち上・下架台、支持柱、可動リミタのモデル化を行い、それらを全て組み合わせて“装置全体モデル”を構築する。一方、第2章においては、装置の振動特性に与える影響の大きい建家及び地盤のモデル化を、現在入手し得る設計及びデータ<sup>(4)</sup>を基にして行い、“建家モデル”を作成する。そして第3章において、装置全体モデルと建家モデルを組み合わせた4つの構造モデルに対して固有値解析を行い、装置全体の振動特性を把握し、同時に、応答解析において合成すべきモード次数の検討も行う。

なお、本報告書は、JT-60の耐震解析に新たに開発した解析手法の紹介と、装置主要コンポーネント及び装置全体の振動特性の把握に重点を置いており、これらを基にして行った地震時の応答解析の結果<sup>(5)</sup>に関しては別報告書に譲るものとする。これらの検討内容は、装置製作担当メーカーの耐震解析に方針を与え、その解析結果のクロス・チェックに資するのみならず、より早く積極的に構造設計に反映できるバック・データを与えるものとする。

## 2. 解析手法及び装置構造概要

本章では、先ず第1節において本解析に用いた解析手法について述べ、第2節において、解析対象となるJT-60の装置概要を構造的な面から述べる。

### 2.1 解析手法

既に第1章で述べた様に、JT-60の様に複雑な構造物の振動解析を行うに当って、その対象構造物を形状に忠実な有限要素モデルとして取り扱い事は、節点数を膨大にし、解析に要する計算時間が莫大になるばかりか、数値計算上の誤差も無視できない場合もある。

一方、比較的単純な構造物の動的解析に従来よく用いられてきたバネ・マス系モデルに置換する方法は、数少ない節点数で構造物全体の挙動が把握できるという長所を持つ反面、今回の解析の目的の一つでもある各構造コンポーネントの局所的な振動特性が現れないという欠点を有し、更に、剛性及び質量の算定に際しては、それらのバランスに注意を払わなければ適切なモデル化にはなり得ず、JT-60の様な複雑な構造物に対しては大きな誤差を生ずる可能性がある。

本解析においては上記の様な種々の問題点を解決する為新たな手法を提案する。ここでは、まず、構造全体をいくつかの構造コンポーネントに分け、各コンポーネント毎に工学的に適切なモデル化を行ったコンポーネント簡略モデルを作成する。この際、簡略モデルは、各コンポーネントの振動特性の基準となるコンポーネント詳細モデルの振動特性をよく表わす様に配慮する。この簡略モデルを組み合わせて装置全体モデルを構築するという新しい手法を開発した。第2.1図に、その解析のフロー・チャートを示す。これに基づいて、解析手法の概説を行う。

先ず、JT-60装置全体を構造コンポーネントに分割する。構造コンポーネントのうち、比較的複雑な挙動を示すと予想され、そのモデル化に検討を要すると思われると同時に、その振動特性を把握する必要がある下記4つを主要コンポーネントとして抽出する。

- (i) トロイダル磁場コイル単体
- (ii) ポロイダル磁場コイル単位ユニット
- (iii) 真空容器40°セクタ単位ユニット
- (iv) 真空容器60°セクタ単位ユニット

これらのコンポーネントはトロイダル方向に周期的な構造である為、単位ユニットのモデル化を行う事により他の同一コンポーネントのモデル化が可能であるという利点を有する。

主要コンポーネントの各々の振動特性をより正確に評価する為に、対象構造をできる限り忠実に表現した有限要素モデルを作成し、詳細モデルとする。この詳細モデルに対して固有値解析を行って、各コンポーネントの振動特性(固有周期及び固有振動モード)を把握すると共に、これを各コンポーネントの簡略モデルの作成に際して基準となる振動特性とする。

次に、各主要コンポーネント毎に、工学的に適切にモデル化された簡略モデルを作成する。

簡略モデルは、できる限り節点数を抑えたモデルであると同時に、できる限り詳細モデルで得られた対象構造物の振動特性を表現し得るモデルとして定義される。作成された簡略モデルに対しても固有値解析を行い、振動特性を求める。

ここで簡略モデルの振動特性と詳細モデルのそれとの比較を行う。前者が後者の振動特性を十分に表現できていない場合には、前者のモデルに修正を加えて再び固有値解析を行って後者との比較を行う。簡略モデルの振動特性が十分に詳細モデルのそれを表現し得る迄、上記作業を繰り返す。なお、ここで簡略モデルの修正は、剛性に関するもののみに着目して行い、重量は当然の事乍ら変更しない。

この様にして完成された各主要コンポーネントの簡略モデルと、他の構造コンポーネント

(v) 上・下架台

(vi) 支持柱

(vii) 可動リミタ

のモデルとを組み合わせ、JT-60装置全体の振動特性を評価し、地震応答計算をする為のモデルである装置全体モデルを構築する。全体モデル作成において、(v)~(vii)の構造コンポーネントは比較的構造的に単純であり、主要コンポーネント(i)~(iv)で行った簡略モデル作成のモデル化手順を踏まらずに簡略モデルを作成した。但し、上・下架台に関しては、その装置全体の振動特性に与える影響が大きい為、詳細モデルを作成して簡略モデルの剛性のチェックを行った。

以上が本解析手法における装置全体モデル作成手順の概略であるが、一方、本装置は施設建家の基礎上に設置され、更に上架台アームが建家3階床位置の側壁に星形トラスによって連結されている為、装置の振動特性に与える建家の影響は無視する事はできない。従って、装置全体モデルの構築とは別に、建家の壁、床をシェル要素から成る有限要素にモデル化して建家モデルを作成する。ここでは、建家基礎と地盤の相互作用も考慮して地盤バネもモデルに含めている。

以上の様に作成された装置全体モデルと建家モデルとの組み合わせにより4つの構造モデルを完成させ(第III編第3章参照)、その各々に対して固有値解析を行って装置全体の振動特性を把握すると共に、建家及び星形トラスが装置の振動特性に与える影響の検討を行う。また、固有値解析の結果から、次に行う応答解析の解析モード次数の検討も行う。

なお、本解析には汎用構造解析プログラムSAP-V<sup>(6)</sup>を用いた。

## 2.2 装置構造概要

JT-60装置本体の概要に関しては、既に多くの報告があるが、第1.1図の鳥瞰図からわかる様に、質量及び剛性の異なる多くの構造コンポーネントが空間的に複雑に配置された複合構造物である。

本体の構造上の主な構成要素はここで再びまとめると、下記のものである。

(i) トロイダル磁場コイル

(ii) ポロイダル磁場コイル

- (iii) 真空容器
- (iv) 上・下架台
- (v) 支持柱
- (vi) 可動リミタ

以下に各コンポーネントの構造概要を記す。

#### (1) トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは箱型断面を有するリングであり、真空容器を取り囲んでトロイダル方向に等間隔に18個設置される。その断面は、非磁性鋼からなる外枠とコイル導体である銅及び絶縁材のFRPから構成され、中実断面と見做せる。

隣接コイル間は、コイル上下でスペーサにより連結されており、コイル全体としては、下架台上に設置されるとともに、スペーサを介して上架台とも連結される。トラス中心軸には中心支柱が存在するが、トロイダル磁場コイルはこれとも接触している。

#### (2) ポロイダル磁場コイル

ポロイダル磁場コイルは真空容器に添ってトロイダル方向に一周するコイル群であり、真空容器外に設置される空心変流器コイル、垂直磁場コイル、水平磁場コイル、四重極磁場コイルと、真空容器内に設置される磁気リミタコイルに分けられるが、ここでは前者に着目し、後者は真空容器内付加重量物として取り扱う。

真空容器外の各ポロイダル磁場コイルは、支持枠によって支持されている。支持枠は真空容器のまわりをポロイダル方向に一周し、ポロイダル磁場コイル支持柱により上下の架台に固定されている。ポロイダル磁場コイル及びその支持枠、支持柱のいずれも、トロイダル磁場コイル、真空容器とは構造的には接触していない。

#### (3) 真空容器

真空容器は厚肉リングとベローズが各8個、交互に配置されてドーナツ形状を構成している。更に厚肉リングは40°セクタ6個と60°セクタ2個に分けられ、又、剛性を増す為、周囲に補強リブが設置されている。ベローズは成形による平行ベローズであり、接線方向の剛性に比べ軸方向の剛性が極端に小さい特殊構造物である。真空容器内部には、ライナ、固定リミタ、磁気リミタ板、外部には、ポート、温度制御層等が設置されるが、これらは付加重量物として取り扱う。

各厚肉リングセクタは、支持柱から張り出した真空容器支持アームにより支持される。支持柱は3種類計10本設置され、そのうち6本は上・下架台に固定されているが、4本は下架台にのみ固定されている構造である。

#### (4) 上・下架台

上架台には、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル支持柱、可動リミタ及び支持柱等が連結されており、その重量は中心支柱及び周囲の支持柱により下架台に伝わる。

また、装置全体のねじれ(トロイダル磁場コイルに作用する電磁力に起因する<sup>(1)</sup>)を防止する為、水平の連結アームから星形トラスを介して建家に連結されている。

下架台にも、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル支持柱及び支持柱等が連結され

ており、基礎に固定される事によりそれらの重量を支持する役割を果たす。

(5) 支持柱

支持柱としては、中心支柱、真空容器支持柱があり、その構造的な役割は既に述べている。

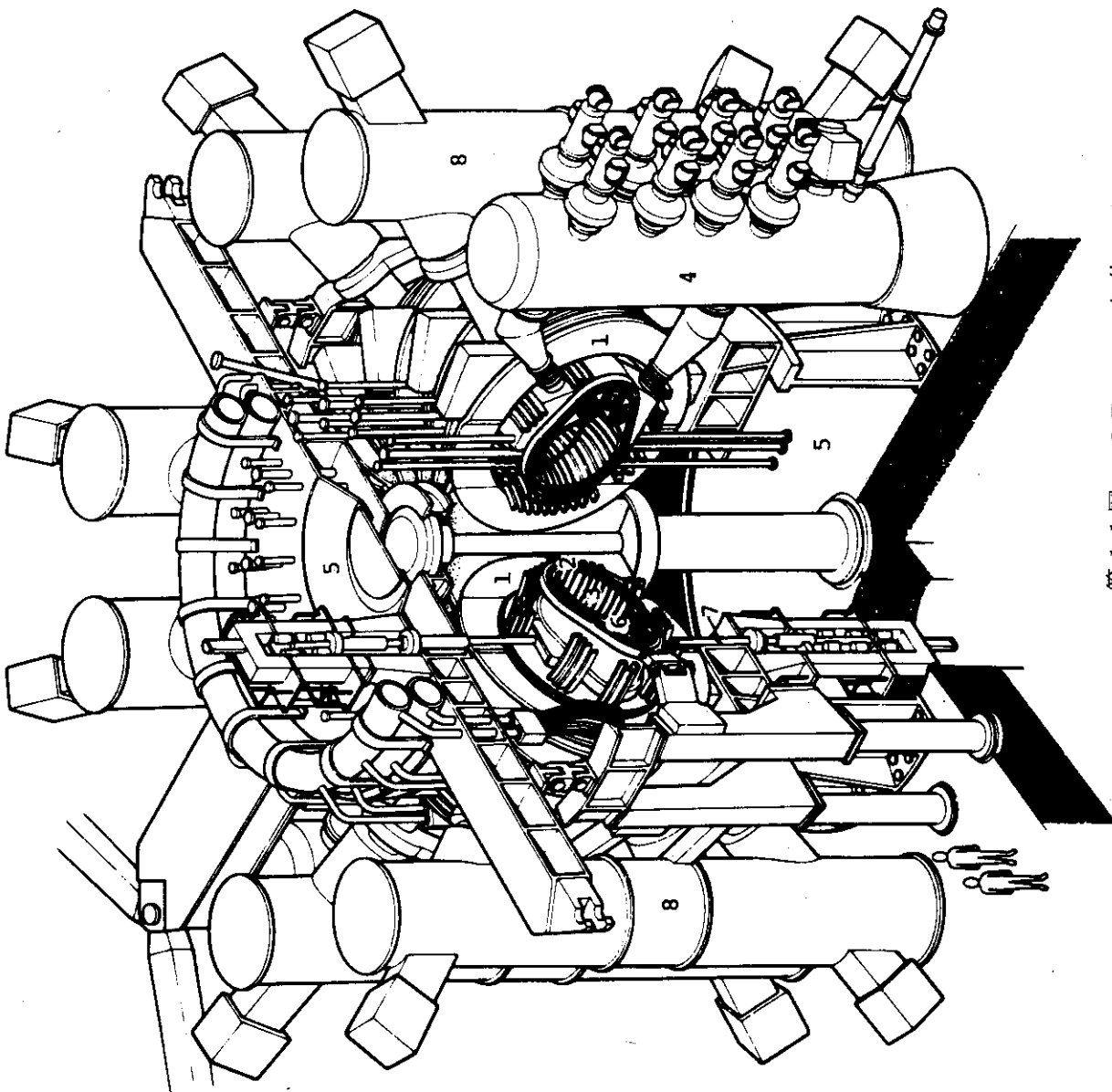
(6) 可動リミタ

一個の真空容器60°セクタに上下一対設置される。各々、上下架台に支持されており、他の構造コンポーネントとは連結されていない。

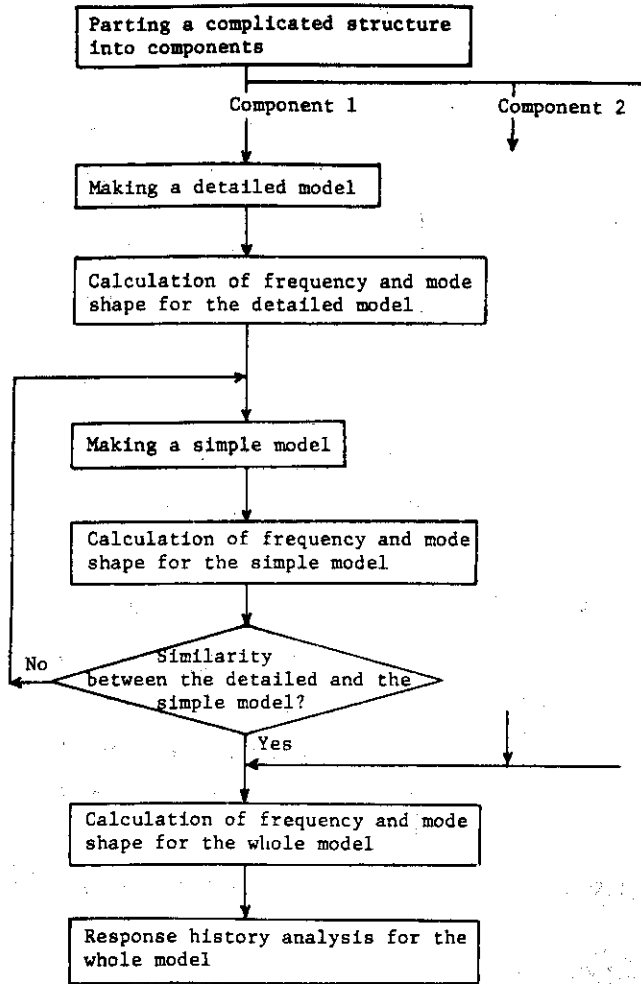
以上述べた各コンポーネントのモデル化要領の概略を第2.2図に示す。

JT-60装置本体が設置される建家は、第2.3図及び第2.4図に示す様な長大スパン型式鉄筋コンクリートである。JT-60装置本体は、建家1階床上に設置され、上架台アームは建家3階床位置側壁に、星形トラスによって連結されている。

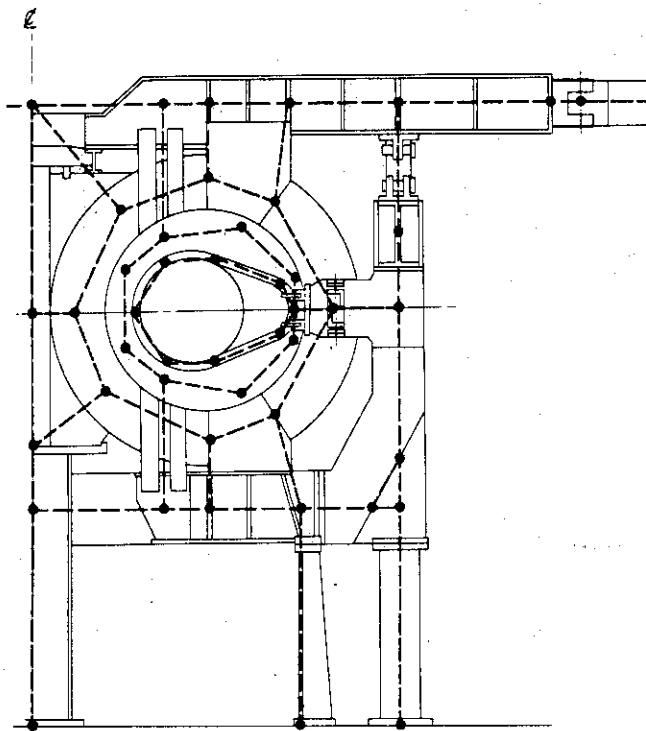
1	Toroidal Field Coil
2	Poloidal Field Coil
3	Vacuum Vessel
4	Vacuum Pumping System
5	Support Structure
6	Magnetic Limiter
7	Movable Limiter
8	Neutral Beam Injector



第1.1図 JT-60 本体の鳥瞰図

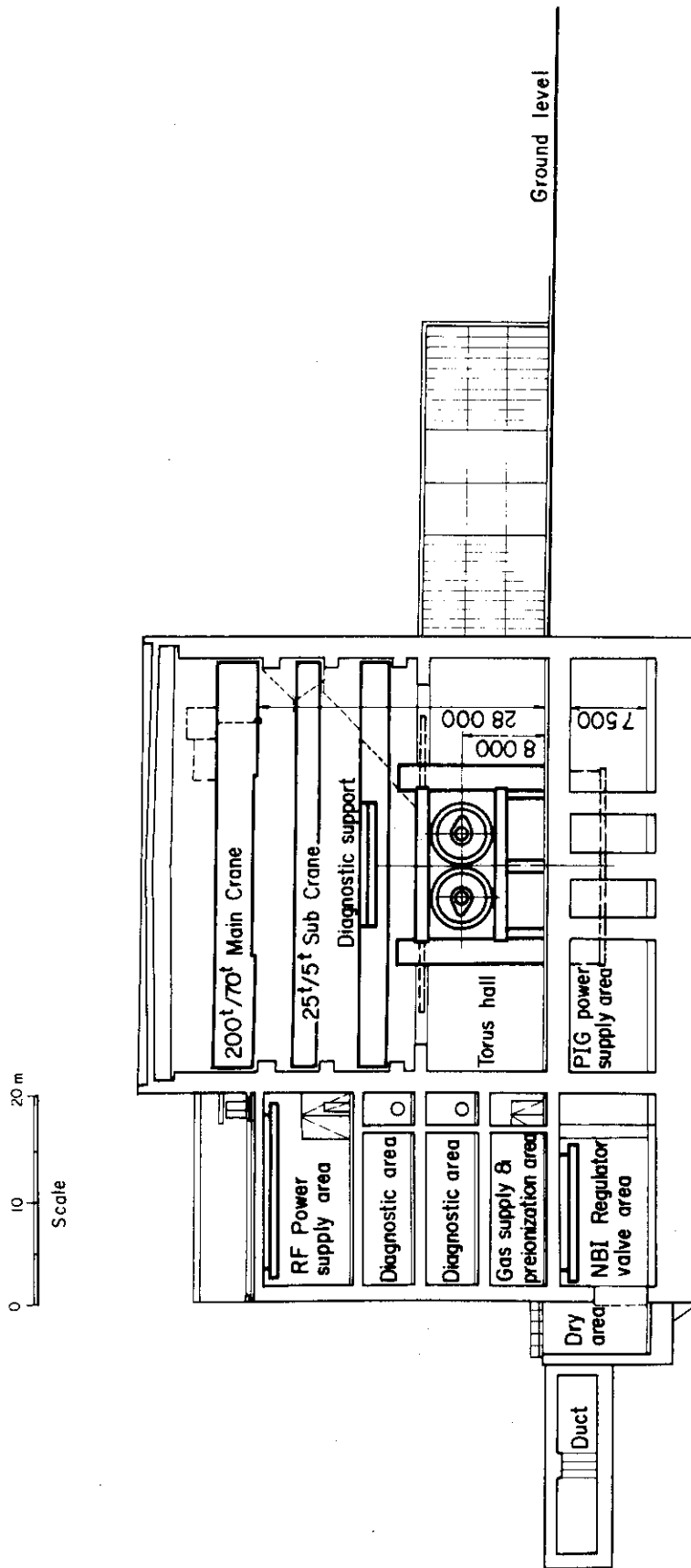


第 2.1 図 解析手順

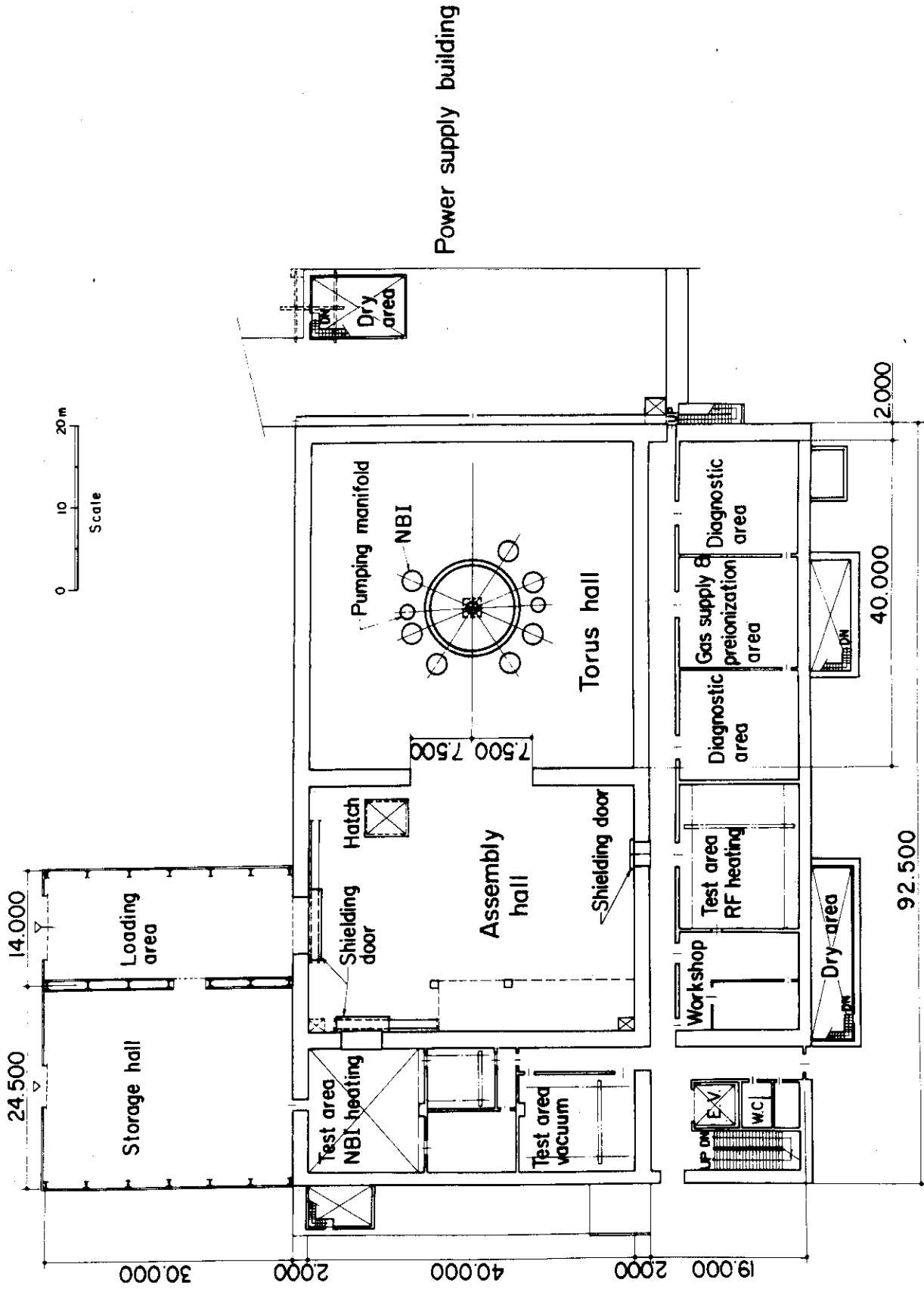


第 2.2 図 JT-60 装置モデル化要領





第 2.3 図 JT-60 実験棟断面図



第 2.4 図 JT-60 実験棟平面図

## II. 主要コンポーネントの簡略モデルの作成

### 1. トロイダル磁場コイル

本章では、JT-60装置のトロイダル方向に等間隔に配置されている18個のトロイダル磁場コイルの1個を取り出して解析対象としている。

#### 1.1 詳細モデルの固有値解析

本節では、その解析モデルの原形状にできる限り忠実な詳細モデルを構築して固有値解析を行い、次節で作成する簡略モデルの振動特性の基準を設定する事が目的である。

##### 1.1.1 モデル化概要

###### (1) 要素分割

トロイダル磁場コイルの導体部は、中実の長方形断面を有する円環形をしており、有限要素としては8節点固体要素に置き換える。分割数は、トロイダル方向(トロイダル磁場コイル円周方向)24分割、トロイダル方向(厚み方向)2分割、トーラス副半径(半径方向)3分割とし、そのモデルの鳥瞰図を第1.1図に、正面図、平面図を第1.2図に示す。トロイダル磁場コイル最外周に巻かれた外枠と側面に取り付けられる側板(以下外枠と側板を“外枠”と呼ぶ)は非磁性鋼厚板からなり、曲げ剛性も大きい為、シェル要素で置換する。またトロイダル磁場コイルを上・下架台に支持固定する補強枠も同様にシェル要素で置換され、外枠のシェル要素と回転自由度を連結させている。

尚、コイル導体の周囲に巻かれている絶縁材は、その剛性及び占有体積から最外層以外は無視し、最外層の絶縁材を含む8節点要素に対してのみ本節(3)で述べる等価剛性等を考慮した。更に、特殊な要素として境界要素を使用した。これはシェル要素の面内回転拘束と支持点反力の算出を目的としている。

本解析に用いた入力モデルの規模を第1.1表に示す。

###### (2) 境界条件

トロイダル磁場コイルは、その補強枠が下架台にボルト止めされており、また中心支柱柱頭部から張り出しているフックで支持されているが、いずれも完全固定の効果はなく、基本的には、中心支柱、下架台、下架台中心柱に単純に乗せられているだけの構造であるから、3つの支持点はいずれも $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の変位のみ固定のピン支持と考えられる。

###### (3) 材料諸元

トロイダル磁場コイルに使用されている材料の物性値を第1.2表に示す。

コイル外枠、補強枠は非磁性鋼の均質なシェル要素である。但し、コイル導体に作用する電磁力をある程度外枠及び補強枠で支持する必要がある為、強度上の要請から板厚は必ずしも均一ではなく、第1.3図に示す様に与えている。

コイル外枠内部は第 1.4 図に示す様に、導体と絶縁材から構成されている。この為、導体部を半径方向に 3 分割している 8 節点固体要素のうち、内側 2 層は導体の均質な要素であるが、最外周の 1 層は次式による等価な縦弾性係数及び密度を持つ固体要素とした。

$$\bar{E} = \frac{l_c E_c + l_i E_i}{l_c + l_i} \quad (1)$$

$$\bar{\rho} = \frac{l_c \rho_c + l_i \rho_i}{l_c + l_i} \quad (2)$$

ここで  $l_c, l_i$  は各要素の平均的な値を用いた。計算結果を第 1.3 表に示す。

固有値解析に必要な節点重量は本トロイダル磁場コイル詳細モデルが、原構造物の剛性及び重量分布を損う事なくその形状、寸法をモデル化している事から、各要素の密度を入力すれば使用プログラムの内部で自動計算される。尚、解析モデルの総重量は約 96 ton である。

## 1.1.2 固有値解析

### (1) 解析結果

トロイダル磁場コイル詳細モデルの固有値解析の結果を第 1.5 図から第 1.10 図にまとめる。解析は固有値次数 1 次から 10 次迄行った。

第 1.5 図には、各次数の固有周期を示す。1 次の固有周期は 0.12 sec (固有周波数 8.06 Hz) である。また 1 次固有モードのプロッタ出力図を第 1.6 図から第 1.8 図に示す。なお、プロッタ出力図においては破線が原形状、実線が振動モード図を表わす。

### (2) 検討

第 1.6 図等に示す固有モード図は非常に複雑であり、その図から直接モードの特性を把握するのは困難である為、トロイダル磁場コイルの軸線に着目し、軸線の変形、軸線近傍の節点の変位分布を調べる事により、モデルの大局的な変形性状を把握する。モデルの変形モードを調べる代表点は、簡略モデルの検討を考慮して選んだ。

第 1.9 図から第 1.10 図に 1 次から 4 次迄の固有モード図を示す。但し、x, z 方向変位は y 方向変位に比べて  $10^{-16}$  以下の無視し得る値であるのでモード図には y 方向変位のみを示してある。本モデルの 1 次から 4 次迄のモードはコイル構面外へ曲げ変形を受けるモードが極端に支配的であり、そのモード性状は面外変位のみに着目して論ずる事ができる。

1 次モードは第 1.9 図に示す様に、左上支点と右下支点とを結ぶ直線を反転軸を持つ変位分布を示す。最大変位は補強枠のない右上部で生じ、補強枠のある左上支点から右下支点迄の領域はほとんど変位しない。2 次モードは 1 次モードの反転軸にほぼ平行な反転軸を持つ変位分布を示し、最大変位は反転軸に関して 1 次モードの場合と反対側、即ち左下部に生じる。

3 次モードは、第 1.10 図からわかる様に 1 次、2 次モードの反転軸にほぼ直交する反転軸を持ち、最大変位は右下部に現われる。4 次モードは、反転軸を 4 本持つ変位分布となり最大変位は左下部で生じる。

## 1.2 簡略モデルの固有値解析

本節では、前節で設定した詳細モデルの固有値解析結果と類似する簡略モデルを構築する事が目的である。

### 1.2.1 モデル化概要

#### (1) 節点及び要素

トロイダル磁場コイルの導体及び外枠は、断面形とリング長さとの比率から判断して梁要素で十分置換が可能である。また、補強枠は広がりを持った板であるが、装置全体モデルへの組込を考慮して、これも梁要素で置き換える。

節点座標は、装置全体モデルにこの簡略モデルを組み込む事を考慮して、トロイダル磁場コイルと装置全体との結合関係から決定し、節点数は必要最小限とし8節点とする。節点及び要素の配置図を第1.11図に示す。ここで節点9, 1, 6は各々下架台支持点, 下架台中心柱支持点, 中心支柱柱頭部支持点であり、節点8は補強枠を介して下架台に結合され、また節点8, 5はスペーサを介して下架台と結合される。節点2, 4, 7は各々補強枠を介して、下架台中心柱, 中心支柱, 中心支柱柱頭部に結合され、節点10, 12はスペーサを介して上架台と結合される。節点11は他点との釣合から図示の位置に採る。

#### (2) 境界条件

第1.11図における節点1, 6は、詳細モデルでは、いずれも3方向変位のみ拘束の1点支持であるから、簡略モデルにおいても同じ条件を与える。これに対し節点9は、詳細モデルでは、3方向変位のみ拘束の点が2点ある為、回転拘束の効果があり、簡略モデルでは面外方向の回転拘束も考慮する。

#### (3) 材料諸元

本簡略モデルで使用する物性値は、第1.2表に示す値を使用する。

簡略モデルで使用する梁要素のうち、コイル導体部及び外枠の断面性能は、詳細モデルの導体部及び外枠の断面が有する性能をそのまま評価する。コイル導体部及び外枠の形状及び断面性能を第1.4表に示す。

補強枠は詳細モデルではシェル要素としてモデル化している為、簡略モデルでのビームへのモデル化は容易ではない。ビームの断面性能は、トロイダル磁場コイル簡略モデル全体の固有周期及び振動モードの検討を行った上で決定した。結果は1.2.2において述べる。

トロイダル磁場コイル簡略モデルは、詳細モデルを簡単な梁要素に置換している為、形状が原構造と一致しておらず、密度入力による節点重量の算出というプログラムの所有する機能を用いる事ができない。従って詳細モデルと同重量となる様に、節点重量を配置する必要がある。

節点重量の算出は、詳細モデルの各節点の節点重量を基に、簡略モデルの各節点が支配する領域内にある詳細モデルの各節点の重量の総和を算出して行う。第1.11図には、各節点の節点重量も示してある。

### 1.2.2 固有値解析

ここでは、1.2.1で述べたトロイダル磁場コイル簡略モデルの固有値解析を行い、詳細モデルの固有値解析の結果と類似するモデルを見出すのが目的であるが、その作業は以下に述べるいくつかの検討の結果を踏まえた上で行った。

簡略モデルの検討では、下記の5点を基本条件と考えた。

- (i) 節点位置は変更しない。
- (ii) 節点重量は変更しない。
- (iii) 要素は全て梁要素を用いる。
- (iv) コイル導体及び外枠の梁要素断面性能は変更しない。
- (v) 支持点位置は詳細モデルのそれに一致させる。

従って、簡略モデルの固有値、固有モードを調整するパラメータは剛性に関するものであり、ここでは、

- (i) コイル導体と外枠を含めた等価縦弾性係数
- (ii) 支持条件
- (iii) 補強枠の梁断面性能

をパラメータに採る。以下に上記パラメータの効果を検討する。

#### (1) コイル導体と外枠を含めた等価縦弾性係数

コイル導体と外枠をモデル化した梁要素(第1.11図中の要素番号4~11)は、その占有体積は導体(銅)が支配的であるが、外枠(非磁性鋼)の縦弾性係数が導体のそれの約2倍ある為、これを無視すると剛性を過小評価する事になる。従って、外枠も含めた梁の縦弾性係数は次式で定義する。

$$\bar{E} = \frac{E_c J_c + E_s J_s}{J_c + J_s} \quad (3)$$

ここで、

$\bar{E}$  ; 等価縦弾性係数

$E_c$  ; 導体の縦弾性係数

$E_s$  ; 外枠の縦弾性係数

$J_c$  ; 導体の断面性能

$J_s$  ; 外枠の断面性能

$\bar{E}$ の値は、各要素に対して第1.5表中の図に示す3軸成分が求まるが、このうち固有モード1~4次を支配しているコイルの構面外曲げに対して最も効果の大きい2軸方向の $\bar{E}$ を導体を外枠をモデル化した梁要素の等価縦弾性係数とする。結果を第1.5表にまとめる。

#### (2) 支持条件

既に1.2.1(2)で述べた様に、右下補強枠の支持条件は、詳細設計においては、x, y, z方向の変位のみ拘束のピン支持としたが、支持点がトロイダル(x)方向に2点並んでいる為、実質的にはコイル構面外への回転も拘束する効果がある。従って第1.11図の節点9は、x, y, z方向拘束に加えてy, z軸まわりの回転も拘束の条件を与える。

拘束条件もあわせて第 1. 11 図に示す。

### (3) 補強枠の梁断面性能

補強枠の梁断面性能の算出に際しては、その梁断面、梁の剛域の考慮及び 2 枚の補強枠（第 1. 11 図で要素番号 2）の平面保持を考慮しなければならない。

梁の断面は、第 1. 12 図に示す様に本モデルの重心及び剛心と支持点を結ぶ線に直交する断面  $S_1-S_1$ ,  $S_2-S_2$ ,  $S_3-S_3$  を採用した。これはモデルの各梁に直交する断面  $S'_1-S'_1$ ,  $S'_2-S'_2$ ,  $S'_3-S'_3$  と比較すると、 $S_1-S_1$  は  $S'_1-S'_1$  の約 1.2 倍、 $S_2-S_2$ ,  $S_3-S_3$  は  $S'_2-S'_2$ ,  $S'_3-S'_3$  に各々ほぼ等しい。

補強枠をモデル化している梁要素は、そのモデル化の都合上、第 1. 13 図に示す様に、コイル導体部も含んでいる。しかるにコイル導体部は補強枠に比べ剛性が高いため、この領域は剛域と考えられ、梁要素の断面性能を割り増す必要がある。

今、長さ  $l$ 、縦弾性係数  $E$ 、断面性能  $J$  の片持梁の自由端に集中荷重  $P$  が作用する場合、自由端での変位  $\delta$  は、

$$\delta = \frac{l^3}{3EJ} P \quad (4)$$

で与えられる。これに対して梁の長さが  $l_0$  に対して同一集中荷重で同一変位を生じるには、断面性能  $J_0$  を次式で与える必要がある。

$$J_0 = \alpha^3 J \quad (5)$$

$$\alpha \equiv \frac{l_0}{l}$$

ねじりに対しては、(4)式と同様に、横弾性係数  $G$  の梁にトルク  $T$  が作用する場合、ねじり角  $\theta$  が

$$\theta = \frac{l}{GJ} T \quad (6)$$

で与えられる事から、長さ  $l_0$  の梁に同一トルクを作用して同一ねじり角  $\theta$  を得る為には、断面性能  $J_0$  は次式で与えられる。

$$J_0 = \alpha J \quad (7)$$

以上の考察に従い、補強枠をモデル化した梁要素（第 1. 11 図中の要素番号 1, 2, 3）の断面性能は、ねじり、曲げに対して各々次式に従った割り増しを行う。

$$\begin{Bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha^{-1} \\ \alpha^{-3} \\ \alpha^{-3} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} J_1^* \\ J_2^* \\ J_3^* \end{Bmatrix} \quad (8)$$

但し、 $J_1, J_2, J_3$  は、簡略モデルの解析データとして用いる断面性能であり、 $J_1^*, J_2^*, J_3^*$  はモデルの梁長さから算出された断面性能である。剛域を考慮する係数 $\alpha$ は第 1.6 表に与えられる。

右下の補強枠（第 1.11 図で要素番号 2 の梁）は、実構造は 2 枚の支持板からなり、詳細モデルでは 2 枚のシェル要素にモデル化した。これを梁要素にモデル化する場合、2 枚の要素の平面保持を考慮する必要がある。即ち、第 1.14 図のモデルを考えた場合、その断面の断面二次モーメントは

$$J = \frac{1}{12} b t^3 \times 2 + b t l^2 \quad (9)$$

で与えられるが、完全に平面保持される場合、(9)式第 2 項の距離効果が大きい為、全く平面保持がない場合と剛性が約 2 桁異なる。この梁要素の剛性値は、固有周期、固有モードに大きく影響を与える為、その決定は慎重に行う必要がある。

解析の結果、完全に平面保持されるとすると剛性を高く見積り過ぎ、平面保持を全く考慮しないと剛性を低く評価し過ぎである事がわかった為、平面保持が成立するとした場合の剛性の 10% の値を採用する。

以上の様にして決められた補強枠の梁要素の断面性能を第 1.12 表にまとめる。

#### (4) 解析結果

上記(1)~(3)で述べた検討の結果得られたトロイダル磁場コイル簡略モデルの固有値解析の結果を第 1.15 図から第 1.17 図に示す。

第 1.15 図には各次数の固有周期を詳細モデルの値と一緒に示してある。簡略モデルの固有周期は、1 次~4 次で各々、130, 62, 25, 18 msec であり、3.1.2 で述べた簡略モデルのそれらと比較して、各々、108, 96, 66, 93% であり、固有周期に関する限り詳細モデルの比較的良い近似モデルが得られている事がわかる。

固有周期に対しては、支持条件及び補強枠の梁断面性能が大きく影響を与える。コイル導体と外枠を含めた等価縦弾性係数は、導体だけの場合に比べ、約 1.3 倍であるが、固有周期  $T$  は剛性値  $K$  の平方根に反比例する事から、等価縦弾性係数を用いた場合、導体だけの値を用いた場合に対して約 10% 程度の固有周期低下しか与えない。また、支持梁の有効長さを簡略モデルの節点間の長さで採るか、周囲の剛域（この場合はコイル導体部）を考慮するかで支持梁剛性に 4 倍の差が生じ、固有周期にして 2 倍もの差が生じる事は重要である。この事は一般に簡略なモデルを得ようとする時に、その簡略化の判断をどう行うかで固有周期の大きく異った構造に置換されてしまうという事を示している。

次にモード形の検討を行う。第 1.16 図及び第 1.17 図に 1 次から 4 次迄の固有モードのモード図を示す。ここで 4 次固有周期以上のモードは、次数が高くなる程構造の変化による影響が少なくなっており、モデルの振動特性に与える影響度も低いため、以後の検討は 1 次~4 次に絞る。1 次~4 次モードは、詳細モデルと同様に、コイル構面外への曲げ変形を受けるモードが極端に支配的であり、1 次~4 次に関する限り面外変位のみに着目してそのモード性状を論ずる事ができる。



## (i) 1次モード

第 1.16 図に示す簡略モデルの 1 次モードは、第 1.9 図に示す詳細モデルの場合に類似している。最大変位は節点 12 で生じており、これは(1)~(3)に述べた等価縦弾性係数、支持条件、補強枠梁断面性能のいずれを修正しても同じ傾向を示した。

補強枠梁要素 1 の剛性が低いと支持梁のコイルに対する拘束効果が小さく節点 2 の変位が大きくなるが、この要素の剛性を単純に上げるだけであるとモードは詳細モデルに近づくが固有周期は低下して好ましくない。この場合には他の部分の剛性を低下するなど全体のバランスに注意を払う必要がある。なお、1 次モードは、反転軸と直交方向の位置の拘束度に敏感であり、補強枠梁要素 1 の拘束効果は大きい。

## (ii) 2次モード

簡略モデルの 2 次モードも第 1.16 図に示す。これは第 1.9 図に示す詳細モデルの 2 次モードと比べて反転軸がややずれている事を除くとほぼ類似の傾向を示している。反転軸のずれは、簡略モデルの各部材の剛性のバランスが詳細モデルのそれと多少異なる事に起因すると考えられる。また、2 次モードもその性状から判断して 1 次モードと同様に補強枠梁要素 1 の拘束効果が大きく影響する。

## (iii) 3次モード

簡略モデルの 3 次モードを第 1.17 図に示すが、これは第 1.10 図に示す詳細モデルの 3 次モードと比較的良く一致している。但し、詳細モデルでは下方右側の補強枠付近が最大変位を示すのに対して、簡略モデルでは下方右側の支持梁付近では比較的小さな変位であり、最大変位は節点 11 で生じる。これは補強枠梁要素 2 の剛性を過大評価し過ぎている為であると考えられる。1 次から 4 次迄のモードの中で、3 次モードが最も梁要素 2 の支持効果の影響を受け、(3)でも述べた様に、梁断面性能算出に当って 2 枚の補強枠の持つ断面 2 次モーメントの距離効果を完全に含むとすると剛性値の過大評価となり、3 次モードの固有周期は低下し、この部分の変位は小さく抑えられる。従って本モデルでは、2 枚の補強枠の平面保持の効果は小さいとして梁要素の剛性評価を行っている。

反転軸は、簡略モデルと詳細モデルとは良く一致している。

## (iv) 4次モード

第 1.17 図に示す簡略モデルの 4 次モードも、第 1.10 図に示す詳細モデルのそれと良く一致している。4 次モードは、変位の方向の反転位置が補強枠梁要素の設置位置の近傍であり、補強枠梁要素の拘束の影響が少なく、振動特性はコイル導体部そのものの剛性に依る所が大きい。

## (5) まとめ

以上の検討より、剛性パラメータが簡略モデルの固有値、固有モードに及ぼす影響として以下の事が明らかとなった。

(i) 支持梁を、ピン支持から固定にすると、固有値は低下し、固有モードにおける固定位置の変位が減少する。

(ii) 剛性の大きく異なる場所にある梁要素には、剛域を考慮する必要がある。

(iii) 平面保持の効果の少ない梁要素に対して完全な平面保持を仮定すると、断面性能は過大評

価となる。

(v) 詳細モデルの固有モードの特性を十分に把握する事は、簡略モデルを決定するに当り、効果的な剛性変更の判断の大きな助けとなる。

また、トロイダル磁場コイルの詳細モデルと簡略モデルの近似性については、両者の固有周期が1次から10次まで比較的良い一致がみられ、固有モードに関しても1次から4次迄良い近似性が認められる事から、十分な近似性があると判断できる。

## 2. ポロイダル磁場コイル

本章では、JT-60装置のトロイダル方向に巻かれたポロイダル磁場コイル及びそれを支えるポロイダル磁場コイル支持枠—これは各トロイダル磁場コイル間に1個設置され上下架台にポロイダル磁場コイル支持柱を介して支持されている—を解析対象として、その周期性から支持枠を中心として $\pm 10^\circ$ を解析モデルとしている。

### 2.1 詳細モデルの固有値解析

本節の目的は、1.1節と同様に、解析モデルの原形状にできる限り忠実な詳細モデルを構築して固有値解析を行い、次節で作成する簡略モデルの振動特性の基準を設定する事である。

#### 2.1.1 モデル化概要

##### (1) 解析モデルと実形状の相異点

解析モデルの作成に当っては、装置実形状にできる限り近似させる様試みた。しかし、局部的に形状が複雑な箇所は解析モデルの煩雑化をもたらし、更に計算時間にも大きく影響する為、モデル化には一部実形状の修正を行った。

##### (i) 各種コイル群のグルーピング

ポロイダル磁場コイルは、空心変流器コイル26本、垂直磁場コイル18本、水平磁場コイル6本、四重極磁場コイル10本及び磁気リミタコイル3本にわけられ、このうち前4者が真空容器とトロイダル磁場コイルの間の空間に存在し本章での解析の対象とするコイルであり計60本存在する。これらのコイルを全て1つ1つ解析モデルに反映させる事は現実的でない為、第2.1図に示す様に数本のコイル群をグルーピングしてモデル化した。

この場合、解析モデル上でのコイルの座標位置はグルーピングしたコイルの図心を採用した。グルーピングしたコイルの重心位置を第2.1表にまとめる。

##### (ii) 支持枠部分形状のモデル化

第2.1図に示すコイル支持枠のトーラス主半径内周部(支持枠A部と称す)は、支持枠のトーラス主半径外周の両翼部(支持枠B部と称す)に比べて2枚の板の隔たりが小さい事、また形状が複雑である事から第2.2図のモデル図に示す様に1枚のシェル要素に置換した。

なお、当該部分には、ポロイダル磁場コイル支持柱の先端が挿入されており、また部分的に

補強材が取り付けられている事、及び多くのコイル群が貫通しており、プログラム内では支持枠のシェル要素とコイル群のビーム要素の面積及び重量が重複する事等を考慮すると、厳密な等価厚みを算出する事が困難である為、代表的な箇所の厚みを採用する事とした。

(2) 要素分割

第 2.3 図にポロイダル磁場コイル詳細モデルのプロッタ出力図を示す。モデル化においては、各種コイル群及び支持枠補強材を梁要素に置換し、コイル支持柱及び支持枠をシェル要素で置換した。

入力モデルの規模を第 2.2 表に示す。

(3) 境界条件

解析モデルの境界条件は、ポロイダル磁場コイルが全体装置の中に位置する場合に振動モードとして留意すべき、対称条件及び逆対称条件の 2 つを設定する。これらの境界条件を第 2.3 表にまとめる。

(4) 材料諸元

ポロイダル磁場コイルを構成する各コンポーネントの材料及び物性値を第 2.4 表にまとめる。

解析モデルで用いる要素は(2)で述べた様に梁要素及びシェル要素であるが、シェル要素は等方性である事から材料マトリックスは次式の様に与えられる。

$$\begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E\nu}{1-\nu^2} & 0 \\ & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ \text{SYM.} & & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.16 \times 10^6 & 6.49 \times 10^5 & 0 \\ & 2.16 \times 10^6 & 0 \\ \text{SYM.} & & 7.58 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

但し、ここで E,  $\nu$  は、各々材料の縦弾性係数、ポアソン比である。

各種コイルは第 2.1 図に示す如くグルーピングを行っているが、そのグループ毎の梁断面性能を第 2.5 表に示す。また支持枠を補強している各種梁要素の断面性能を第 2.6 表にまとめる。

固有値解析に必要な節点重量は、本ポロイダル磁場コイル詳細モデルが、原構造物の剛性及び重量分布をほぼ損り事なく形状、寸法をモデル化している事から、各要素の密度を与える事によりプログラム中で自動的に生成される。尚、解析モデルの総重量は約 14 ton である。

2.1.2 固有値解析

(1) 解析結果

前節迄に述べた解析条件により行ったポロイダル磁場コイル詳細モデルの固有値解析の結果を第 2.4 図から第 2.10 図に示す。解析は固有値次数 1 次から 10 次迄行った。第 2.4 図には、対称条件及び逆対称条件における 1 次から 10 次迄の固有周期を示す。第 1 次固有周期は、対称条件、逆対称条件で各々、0.020, 0.282 sec であり、対称条件の固有周期は、逆対称条件のそれに比べて約 1/14 であり、対称条件の 1 次周期は逆対称条件の 3 次以下の短周期である。従って、ポロイダル磁場コイル全体の振動特性としては、逆対称条件によるモードの影響が支

配的であると考えられる。

第2.5図及び第2.6図には、対称条件及び逆対称条件における各次数における振動モードの概略を示す。また1次モードに関しては、第2.7図及び第2.8図に対称条件、第2.9図及び第2.10図に逆対称条件のモードのプロッタ出力図を示す。これからわかる様に、1次モードでは、対称条件は支持棒B部の面内変形モードが大きく、逆対称条件では、ポロイダル磁場コイル支持柱と支持棒A部の面外変形及び支持棒B部の面外変形が大きい。

これらより、各種コイル群をモデル化した梁要素の面外拘束の有無が固有周期の値に大きく影響している事がわかる。また、両境界条件の固有周期の比が非常に大きい事から、装置全体モデルにおけるポロイダル磁場コイルの振動特性としては、対称境界条件での面外変形モードは低次では発生せず、逆対称境界条件での変形モードが重要であると考えられる。

## (2) 検 討

ポロイダル磁場コイルの振動モードを調べると、低次の振動モードが、シェル要素の複合体にもかかわらず各次数及び次数間の推移について可成りはっきりした定性的な把握がなし得る。第2.5図及び第2.6図に示した振動モードの概略図は、各振動モードにおいて各軸成分の大小から各々2軸を抽出してその支配的な変形モードの概略をプロットしたものである。

以下、この各々の変形モード及びそれと固有周期との関連について検討する。

### (i) 対称境界条件

1次から9次迄の振動モードは2つのグループに分けられる。即ち、1次、5次～7次の面内( $y-z$ 平面)変形モードと、2次～4次、8次、9次の支持柱の局所的な面外変形モードのグループである。

1次モードは(1)でも述べた様に、支持棒B部が鉛直方向( $y$ 軸方向)に同位相で振れる変形モードである。2次モードは支持棒Aの面外変形モードである。8次以降に支持棒Bの面外変形モードが現れるが、支持棒Aが支持棒Bに比して長い為、より小さい次数で現われたものと考えられる。2次モードでは上下支持棒Aの位相は逆位相である。

3次モードは2次と同様に支持棒Aの面外変形であるが、上下支持棒Aは同位相を呈している。4次モードは2次モードが逆転したモードである。これら2次～4次での固有周期はいずれも極めて近い値を示しており、その比は1:0.993:0.975である。

5次モードからは再び支持棒B部の振動モードが現われる。5次モードは水平方向( $z$ 軸)の並進的な変形モードであり、6次は2軸( $y-z$ 軸)の変形モードである。7次になると支持棒B部は面外及び面内の合わさった変形モードを生じる。今、これらの固有周期の推移を調べると、漸次減少の傾向を示しており、2次～4次の固有周期とは異り、支持棒B部は漸次複雑な変形モードに移行している事がわかる。ちなみにその比は、1:0.960:0.876である。

8次、9次モードでは、支持棒Bの面外変形が現われる。ここでは支持棒Aに生じた2次～4次モードとは位相の順序が相異しており、先に同位相、次に逆位相が生じている。2次～4次と同様、両者の固有値は近い値を示しており、9次は8次の0.996倍である。

対称境界条件では上述の如く面内の振動モードと支持柱の局所的な振動モードのいずれかとなって現われている。全体モデルへの組込み等を考える場合、全体モデルに生じる固有周期から考えても、この局所的なモードは無視しても支障ないものと考えられる。

## (ii) 逆対称条件

1次から9次迄のモードを調べると、4つのグループに分けられる。即ち、1次～3次及び5次、6次の支持棒B部の面外(x方向)変形モード、4次及び7次の支持柱及び支持棒A部の面外(x方向)モード、8次の支持棒B部の面内(y-z平面)変形モード及び9次のコイル群の変形モードである。

1次モードは(1)でも述べた様に、支持棒B部の面外(y方向)への変形モードである。2次モードでは支持棒B部が2次変形を呈している。また、この時支持棒B部の変形を調べると、平面保持は成立していない。3次モードでは支持柱の変形が大きくなっている。

4次モードでは、支持棒B部の変形はほとんど生じず、支持柱と支持棒A部の変形が大きいモードとなる。これは単純梁の2次モードに匹敵するモードである。

5次モードは、再び支持棒B部の変形が大きく、単純梁の3次モードに近いモード型を呈する。6次モードでは、2次モードと位相が逆転した形となっているが、支持棒B部と支持柱及び支持棒A部の変形比が異っている。

7次モードでは、支持柱及び支持棒A部が、等断面均質な単純梁の3次モード型に似た変形を示している。8次モードは支持棒B部の面内(y-z平面)振動モードであり、9次モードは、コイル群の支持端部分の変形が大きい振動モードとなる。

## (3) まとめ

以上の検討により、ポロイダル磁場コイルの振動特性を以下の様にまとめられる。

(i)対称境界条件による固有周期は逆対称境界条件の固有周期に比較して圧倒的に小さい。即ち、対称条件の1次固有周期は、逆対称条件の1次固有周期の約1/14であり、これは逆対称条件の4次程度に相当する。従って、ポロイダル磁場コイルの振動としては、逆対称境界条件による振動、即ち面外振動が支配的であると結論づけられる。

(ii)対称境界条件の固有周期の中に、支持柱の部分の局所的な面外振動が現われているが、これは対称、逆対称の両境界条件を通じて全体のモードとして可成り高次の部分であり無視して支障ないと考えられる。

## 2.2 簡略モデルの固有値解析

本節では、前節で設定したポロイダル磁場コイル詳細モデルの固有値解析結果と類似する簡略モデルを構築する事が目的である。

## 2.2.1 モデル化概要

## (1) モデル化の方針

簡略モデルでは、各コンポーネントを全て梁要素に置換する。即ち、支持棒A、B部を梁要素から成るリングに置換し、支持柱A、Bは1本の梁に置換する。また詳細モデルで37にグルーピングしたコイル群を更に簡略化して8グループに分ける。ここでモデル化には節点、要素数を極力抑え、なお且つ振動特性が十分把握できる様配慮した。

コイル群のグルーピングは以下の要領で行った。先ず詳細モデルでグルーピングした37の

コイル群を、その位置関係から8グループに分け、各グループのコイルの図心位置を算出し、その点を節点とした。支持柱と支持枠の接合部の位置と、それに最も近いコイル群を示す節点が十分な精度で一致している事を確認した上で、当該節点を支持柱の一方の端とした。グルーピングしたコイル群の図心位置を第2.7表にまとめる。

#### (2) 要素分割

ポロイダル磁場コイル簡略モデルのモデル図を第2.11図に示す。モデル化は(1)に述べた方針で行い、各コンポーネントは全て梁要素に置換した。また、モデルの規模を第2.8表に示す。

#### (3) 境界条件

簡略モデルの境界条件は、詳細モデルで試みた対称境界条件及び逆対称境界条件に合わせる様留意した。全て梁要素に置換した為、支持柱先端での面内回転成分及びねじれ回転成分の取り扱いに注意して、対称、逆対称の各々に対し、第2.9表にまとめる境界条件を設定した。

ここで支持柱の先端は、詳細モデルにおいては3方向変位のみ拘束の境界条件であるが、支持柱は2本あり、その位置関係から面内回転及びねじれ回転に対しては拘束の効果があると考えられ、簡略モデルでは第2.9表に示す様に $\theta_0$ ,  $\theta_2$ も拘束とした。

#### (4) 材料諸元

本簡略モデルで使用する物性値は、第2.4表に示す値を使用する。モデルは全て梁要素から成るが、そのうち支持柱及び支持枠をモデル化した梁要素の断面性能の算出にはある程度の検討が必要であり、2.2.2で詳しく述べる。

8つにグルーピングされたコイル群の各梁要素の断面性能を第2.10表にまとめる。ここで面外曲げ $J_2$ 、面内曲げ $J_3$ 剛性は距離効果を考慮している。

簡略モデルの各節点重量は、詳細モデルの各節点重量を、簡略モデルの各節点の支配面積で配分して得ている。結果を第2.11表にまとめる。尚、支持柱先端部に関しては、詳細モデルでは拘束条件を与えた節点の重量のみ解析から除かれているに過ぎず、簡略モデルで残りの全ての節点重量を支持柱と支持枠の接合部節点(第2.11図で節点3, 18)に与える事は重量の過大評価であり、形状から判断して、詳細モデルにおける支持柱中央の要素の半分迄を節点3, 18に重量として与えた。

### 2.2.2 固有値解析

ここでは、2.2.1で述べたポロイダル磁場コイル簡略モデルの固有値解析を行い、前節で述べた詳細モデルの固有値解析の結果と類似するモデルを見出すのが目的である。ここでも1章と同様に、簡略モデルの固有値、固有モードの検討を行うパラメータとしては剛性に関するもののみを選び、モデルにおけるこれ以外の基本条件は固定とした。

剛性に関するパラメータとしては

(i)支持柱面外曲げ剛性

(ii)支持枠B部の面外曲げ剛性

を考える。以下(1)(2)において検討を行う。

#### (1) 支持柱面外曲げ剛性

支持柱の面外曲げ剛性の評価においては、剛域及び支持柱有効長さの2項目を検討する必要

がある。

支持枠の面外曲げ剛性は支持柱のそれに比べ約1.7倍であり、簡略モデルにおける支持柱のうち詳細モデルの支持枠部に該当する箇所は剛域と考えられ、この補正を行う。補正方法は1.2.2(3)で述べた手法に準じる。剛域を考慮した場合、支持柱の面外曲げ剛性は、剛域を考慮しない場合の約2倍である。

支持柱の面外曲げ剛性の評価で更に検討を要するのは支持柱有効長さである。即ち、詳細モデルで2つのシェル要素としてモデル化している支持柱を、簡略モデルでは1つの梁要素に置換しているが、2つのシェル要素は断面性能、長さが異なるうえに、剪断力の分担も異なる。従って簡略モデルにおける梁要素においては、断面性能は両者の和を用いるが、有効長さは剪断力の分担比を考慮して決定する必要がある。

支持柱長さは第2.12図に示すモデルで検討を行った。即ち同図(a)に示す詳細モデル形状と同図(b)に示す様にモデル化する。即ち、支持柱は第2.12表に示す断面性能を有する梁要素に置換し、支持枠部は剛材とする。ここで剛材にy方向の強制変位を与えて両支持柱の剪断力の分担比を求める。SAPを用いた解析結果によれば、支持柱AとBの分担剪断力の比は1:2.5であり、支持柱Bが剪断力の多くを受け持っている事がわかる。従って簡略モデルの支持柱長さは、支持柱Bの長さを用いる。以上により得られた支持柱の梁断面性能を第2.13表に示す。

## (2) 支持枠B部の面外曲げ剛性

1.2.2で述べたトロイダル磁場コイルの補強枠のモデル化で検討した平面保持の問題が、本モデルにおいても支持枠B部の面外曲げ剛性の評価においても重要となる。

第2.2図に示す様に、トロイダル磁場コイル支持枠B部は2枚の薄板から成るが、詳細モデルの解析の結果、この2枚のシェル要素は完全な平面保持は成立していない。しかし、支持枠B部にはコイル群及びウェブの役割を果たす接合板があることから、この平面保持の効果はある程度あると考えられる。一方、平面保持の効果は、(9)式における距離効果 $bt l^2$ として示されるが、この効果がある場合とない場合でその面外剛性は2~3桁異なる為、平面保持の効果を定量的に把握する事は難しい。本解析では、簡略モデルの作成が、あくまで詳細モデルに近似したモデルを構築する事が目標である事を踏まえて、物理的に意味のある範囲内でパラメトリックな検討を行い、各要素に対して以下に示す面外曲げ剛性を得た。

$$\text{要素3} \quad I_0 + 0.03 \cdot bt l^2 \quad (\approx 5.0 I_0)$$

$$\text{要素4} \quad I_0 + 0.003 \cdot bt l^2 \quad (\approx 3.0 I_0)$$

$$\text{要素6} \quad I_0 + 0.003 \cdot bt l^2 \quad (\approx 4.0 I_0)$$

以上により得られた支持枠B、及びA部の梁断面性能を第2.13表にまとめる。

## (3) 解析結果

以上の検討の結果得られたトロイダル磁場コイル簡略モデルの固有値解析の結果を第2.13図から第2.22図に示す。

第2.13図及び第2.14図には、対称境界条件及び逆対称境界条件における各次数の固有周期を、詳細モデルの結果と合わせて示してある。対称境界条件の場合、1次~3次周期は、27.8, 9.9, 8.6 msecであり、各々詳細モデルのそれに対して1.37, 1.25, 1.13倍と、いずれも長周期となり剛性を過少評価している。しかし、前節で述べた様に、対称境界条件の1次

固有周期が逆対称境界条件のそれの約 $1/14$ であり、ポロイダル磁場コイルの振動としては、逆対称条件による振動が支配的である事、及び後で検討する固有モードから判断して各要素間の剛性のバランスに関する限りほぼ妥当であると思われる事により、本モデルによる解析結果でモデル化は十分であると考えられる。

第2.14図に示す逆対称境界条件による固有周期は、詳細モデルのそれと極めて良い一致を示し、1次～3次固有周期は292, 48, 37msecであり、各々詳細モデルに対し、1.03, 0.98, 1.38倍である。

対称境界条件における固有モードを第2.15図から第2.18図に示す。第2.15図から第2.17図は、1次～3次の固有モードのプロッタ出力図であり、第2.18図に模式図を示す。1次、2次、3次モードは、詳細モデルの1次、5次、6次と対応するが、いずれも良く一致しており、この事から各要素間の剛性のバランスは十分近似できていると考えられる。なお、詳細モデルで現われた支持柱の面外変位モードは当然現われない。

逆対称境界条件における固有モードを第2.19図から第2.22図に示す。第2.19図から第2.21図は、1次～3次の固有モードのプロッタ出力図であり、第2.22図に模式図を示す。逆対称境界条件における振動モードは、特に低次において面外振動モードが卓越しており、(1)(2)で検討した各梁要素の面外剛性が固有周期及び固有モードに大いに影響を与える。第2.6図と第2.22図を比較すると明らかな様に、1次～3次の固有モードは詳細モデルの1次～3次に極めて良く一致している。

#### (4) まとめ

以上の検討により次の結論を得る。

(i)複雑な構造物を簡単なモデルに置換する場合、原構造では現われる固有振動モードが簡略モデルでは現われない事がある。従って、モデル化に際しては、原構造に忠実な詳細モデルで固有モードの特性を十分に把握して、振動特性に与える影響の大きい低次モードを簡略モデルが含む様配慮が必要である。

(ii)複数の構造要素(例えば2つのシェル要素)を1つの構造要素(例えば1つの梁要素)にモデル化する場合、その剛性評価は、元の構造要素の分担剪断力を知った上で行うのが有効である。

(iii)1.2.2(5)(ii)～(iv)で述べた事項は、ポロイダル磁場コイルのモデル化においても確認された。また、ポロイダル磁場コイルの詳細モデルと簡略モデルの近似性については、卓越する逆対称境界条件における振動において、両者の固有周期は1次から10次迄極めて良い一致がみられ、固有モードに関しても、検討した1次から3次迄良い近似性を示している。また、逆対称境界条件に比して短周期である対称境界条件においても、固有周期、固有モードのいずれも良い一致を示している。

以上より、本簡略モデルは詳細モデルに対し十分な近似性があると結論できる。



### 3. 真空容器 40°セクタ

J T-60装置の真空容器は、トロイダル方向に交互に配された8個のセクタ状厚肉リングと8個の平行ベローズから成る。厚肉リングは6つの40°セクタと2つの60°セクタから構成されており、各々は支柱に取り付く支持アームにより支持されている。

本節では、40°セクタの1個を取り出し、それをはさむ両側のベローズ及び支持アームを含めて解析対象としている。

#### 3.1 詳細モデルの固有値解析

本節の目的は、1.1節及び2.1節と同様に、解析対象の実形状にできる限り忠実なモデルを構築して固有値解析を行い、次節で作成する簡略モデルの振動特性の基準を与える事である。

##### 3.1.1 モデル化概要

###### (1) 要素分割

モデル化の対象となるのは、真空容器厚肉リング40°セクタ、真空容器ベローズ、厚肉リング補強リブ及び真空容器支持アームである。ベローズはその構造の対称性から、トロイダル方向の長さは半分とした。

解析モデルのプロッタ出力図を第3.1図から第3.3図に示す。モデルは上下方向(y方向)には完全対称であり、トロイダル方向(x方向)に関しては、厚肉リング、ベローズ及び補強リブ部から成る真空容器本体部は完全対称であるが、支持アーム部は第3.1図及び第3.4図からわかる様にA部とA'部で一部非対称である。これは、J T-60の運転モードの1つであるベーキング(500°C)及び高温運転(400°C)に際し、真空容器厚肉リングの熱膨張をトロイダル方向に逃がしてベローズで吸収するという設計である為、第3.1図に模式的に示す様に、厚肉リングの1セクタを支える2本の支持アームのうち、一方は1ヶ所y軸まわりの回転自由であるのに対し、他方は2ヶ所回転自由としている事による。

使用要素としては、厚肉リングを等方性シェル要素、ベローズを異方性シェル要素、厚肉リング補強リブを梁要素、支持アームをトラス、梁、メンブレン要素の組み合わせとしている。入力モデルの規模を第3.1表に示す。

###### (2) 境界条件

解析モデルの境界条件としては、2章と同様に対称境界条件及び逆対称境界条件の2つの場合を考える。ベローズ境界部及び支持アーム先端部の境界条件を第3.2表にまとめる。

###### (3) 材料諸元

真空容器の各コンポーネントは全てインコネル625から成る。本解析で用いるインコネル625の物性値を第3.3表にまとめる。

使用する要素は、(1)で述べた様にトラス、梁、メンブレン、シェル及び境界要素の5種類で

ある。境界要素は、1.1.1で述べた様に解析の便宜上使用する要素であり物性値は持たない。トラス、梁の断面性能、及びシェル、メンブレンの板厚を第3.4表にまとめる。ここで、各要素番号は第3.4図による。

シェル要素の材料マトリックスは、厚肉リング及び補強リブの一部をモデル化する等方性シェルに対しては、(10)式と同様に

$$\begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E\nu}{1-\nu^2} & 0 \\ & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ \text{SYM.} & & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 230 \times 10^6 & 6.89 \times 10^5 & 0 \\ & 2.30 \times 10^6 & 0 \\ \text{SYM.} & & 8.04 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

で与えられる。一方、ペローズに対しては、次式に示す異方性シェル<sup>(7)</sup>の材料マトリックスを適用する。

$$\begin{bmatrix} \frac{bt^3}{12I} E / \left\{ (1-\nu^2) \left( 1 - \frac{b^2 t^3 \nu^2}{12I b_w} \right) \right\} & \frac{bt^3}{12I} E \nu / \left\{ (1-\nu^2) \left( 1 - \frac{b^2 t^3 \nu^2}{12I b_w} \right) \right\} & 0 \\ & \frac{b_w}{b} E / \left( 1 - \frac{b^2 t^3 \nu^2}{12I b_w} \right) & 0 \\ \text{SYM.} & & \frac{b}{2b_w} E / (1+\nu) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.60 \times 10^2 & 4.79 \times 10 & 0 \\ & 1.75 \times 10^7 & 0 \\ \text{SYM.} & & 9.60 \times 10^4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

但し、ここで各記号は以下の通りである。

- E ; 縦弾性係数  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
- $\nu$  ; ポアソン比 0.30
- b ; ペローズ・ピッチ 2.0 cm
- $b_w$  ; ペローズ1ピッチ長さ 16.7 cm
- t ; ペローズ板厚 0.2 cm
- I ; ペローズ1ピッチの断面2次モーメント  $19.2 \text{ cm}^4$

本モデルの節点重量のうち、剛性を考慮している部材に関するものは、3.1.1及び4.1.1と同様にプログラム中で自動的に算出される。しかし、JT-60の真空容器内部に設置される固定リミタ、ライナ、ライナサポート、ペローズサポート、磁気リミタコイル及び磁気リミタ板については、追加重量として相当節点に振り分ける必要がある。これらの全重量は以下の通りである。

(i)固定リミタ	11.1 ton
(ii)ライナ	9.1 ton
(iii)ライナ・サポート	7.7 ton
(iv)ベローズ・サポート	1.1 ton
(v)磁気リミタコイル	15.5 ton
(vi)磁気リミタ板	5.9 ton

上記6項のうち(i)~(iv)は、全て本体部分の内部全面にほぼ一様に取り付いているので、本体部分の内部の全節点に支配面積比で振り分ける。また(v)~(vi)は、本体部分のトラス外周部に設置されるため、それらの節点に集中的に重量を分配する。ちなみに、1個の真空容器40°セクタの追加重量は、

(i)~(iv)	3.2 ton
(v)~(vi)	2.4 ton

であり、合計5.6 tonである。また、真空容器40°セクタの全重量は14.5 tonである。

### 3.1.2 固有値解析

#### (1) 解析結果

真空容器40°セクタ 詳細モデルの固有値解析結果を第3.5図から第3.11図に示す。解析は固有値次数1次から10次迄行った。第3.5図に、対称条件及び逆対称条件における1次から10次迄の固有周期を示す。第1次固有周期は、対称境界条件及び逆対称境界条件に対して、各々187, 100 msec であり、前者は後者の約2倍である。1次から10次迄においても、各次数とも対称境界条件の方が逆対称境界条件より約2~3倍大きく、後者の1次固有周期は前者の9次固有周期より小さい。対称境界条件においては、固有周期は2~4次、6~9次の間でほとんど減少しない事が特徴である。

次に、第3.6図から第3.8図に各次数における固有振動モード図を示す。第3.6図には、対称境界条件における固有振動モードの模式図である。1次モードは、厚肉リング上半分が圧縮、下半分が引張りで、かつ+y方向へ変位する振動モードであり、支持アームも回転しており、ベローズ先端もy, z方向に移動している。5次モードも1次モードとほぼ同様であるが、ベローズ先端の振動は1次モードと逆に発生する。2次~4次、6~9次はいずれもベローズ先端のみがy, z方向(特にy方向)へ振動するモードである。このベローズ先端の一部分の振動に支配される振動モードを“局部振動モード”と呼ぶ。局部振動モードにおいては、既に見た様にほとんど固有周期に変化はない。10次モードは、厚肉リング部分が+x方向に平行移動する振動モードである。この様に対称境界条件の時、局部振動モードを除く一般振動モードが現われるのは1, 5, 10次のモードのみである。ここで1次と5次の固有周期の比は92%であり、振動モードが同様である事から共振現象と考えられ(2)で検討を行う。

第3.7図及び第3.8図には、逆対称条件の固有振動モードの模式図を示す。逆対称条件では、局部振動モードは発生しないが、1, 2次の振動モードは、ベローズ先端のみの振動に支配されている局所的な振動モードである。また5次モードは支持アームの回転のみで支配される振動モードであり、一般振動モードが現われるのは6次迄では3, 4, 6である。3次モードは

厚肉リング部分が +x 方向に平行移動する振動モードであり、4次モードは +y 方向に、6次モードは -z 方向に移動するモードである。

なお、第3.9図及び第3.10図は対称境界条件における1次振動モードのプロッタ出力であり、第3.11図は逆対称境界条件における1次振動モードのプロッタ出力である。

## (2) 局部振動モードの検討

真空容器40°セクタにおいては、対称境界条件において一般振動モードを示す第1, 2番目の固有周期(1次と5次)の間で次の様な特徴がある。

- (i) 固有値の比が92%と近い値を示す。
- (ii) 振動モードはほぼ等しい。
- (iii) 振動モードはベローズ先端の局部振動の影響が強く出ている。
- (iv) 但し、両者でベローズ先端のy方向振動は逆となっている。
- (v) 2~4次の局部振動モードをはさんで、1次、5次の固有周期が+4, -5%の僅差に現われている。

従って上記現象は、厚肉リングとベローズの共振現象と解釈する事が可能である。ここで簡単の為、第3.12図に示す様な厚肉リングとベローズのパネ・マスモデルを考える。一質点系と考えると、厚肉リング及びベローズの角振動数  $\omega_R, \omega_B$  は、

$$\omega_R^2 = \frac{k_R}{m_R} \quad (13)$$

$$\omega_B^2 = \frac{k_B}{m_B} \quad (14)$$

で表わされる。但し、ここで  $k_R, m_R$  は厚肉リングのパネ定数及び質量であり、 $k_B, m_B$  はベローズのパネ定数及び質量である。

一方、厚肉リングとベローズの連成系の振動は、図に示す様に  $m_R, m_B, k_R, k_B$  で表わされる2質点系で表わす。今、 $\omega_R = \omega_B$  即ち、

$$m_B = m_R/n \quad (15)$$

$$k_B = k_R/n \quad (16)$$

とすると、連成系の固有値は次式で示される。

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \frac{k_R}{m_R} \left( 1 + \frac{1}{2n} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{n} + \frac{1}{n^2}} \right) \\ &= \omega_R \left( 1 + \frac{1}{2n} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{n} + \frac{1}{n^2}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

真空容器40°セクタの全質量は15.0 ton であるのに対し、ベローズ共振部分の質量は0.15 ton であり、nはほぼ100と考えられる。(17)式において  $n=100$  とすると

$$\omega = 1.05\omega_R, 0.95\omega_R$$

となり固有値解析の結果と良く一致する。

更に、2質点系の振動における変位 $X_R$ ,  $X_B$ は

$$\begin{Bmatrix} k_R + k_B - m_R \omega^2 & -k_B \\ -k_B & k_B - m_B \omega^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_R \\ X_B \end{Bmatrix} = 0 \quad (9)$$

で示されるが、 $n = 100$ である事から

$$\frac{X_B}{X_R} = 11.0, -9.0$$

なる関係のある事がわかる。一方、固有値解析の結果を基に、共振現象の発生している部分における厚肉リングとベローズの変形量を調べると、

$$\text{1次モード} \quad \frac{X_B}{X_R} = 10.2$$

$$\text{5次モード} \quad \frac{X_B}{X_R} = -7.3$$

であり、2質点系振動方程式の理論解とほぼ良い一致を示す。これは、厚肉リング部分は、1, 5次でほとんど同じ変形値であり、ベローズ部分は、1, 5次で逆方向の変形が生じ、かつその絶対値は近い値であるという振動モードを現わしている。

以上の検討から、真空容器40°セクタにおいて、対称境界条件の時、一般振動モードを示す1, 2番目の固有モード(1次と5次)は、その固有周期、固有振動モードから判断して、厚肉リングとベローズの共振現象であると結論づける事ができる。

### (3) まとめ

真空容器40°セクタ詳細モデルの固有値解析の結果は次の様にまとめられる。

(i) 局部振動モードを含め、対称境界条件、逆対称境界条件共、ベローズの振動に支配される振動モードが多いが、この原因は、ベローズのトロイダル方向の剛性が厚肉リングのそれに比べて約4桁小さい為である。

(ii) 対称境界条件では、局部振動モードが生じるが、これは、厚肉リングとベローズの共振現象であると結論できる。

(iii) 一般振動モードに着目すると、その最低次数のモードは、対称境界条件では1次で、支持アームのねじれ剛性の影響が大きく、逆対称境界条件では3次で、支持アームの面外剛性の影響が大きいと思われる。

## 3.2 簡略モデルの固有値解析

本節では、前節で設定した真空容器40°セクタ詳細モデルと類似する簡略モデルを構築する事が目的である。

### 3.2.1 モデル化概要

#### (1) 要素分割

解析モデルは、詳細モデルの特徴を壊さず、かつ最も簡略化できる点を節点とした。モデル図を第3.13図及び第3.14図に示す。モデルは、3.1.1でも述べた様に上下は完全な対称構造物であるが、トロイダル方向には支持アーム部で一部非対称部が存在する。

使用要素は、厚肉リング部、ペローズ部は、各々等方性シェル、異方性シェル要素であり詳細モデルと同じであるが、支持アーム部は梁要素のみに簡略化している。また、厚肉リング補強リブは最終的に梁要素にモデル化している。

入力モデルの規模を第3.5表にまとめる。

#### (2) 境界条件

ここでも境界条件は、対称、逆対称境界条件の2つを考える。ペローズ端部及び支持アーム先端部の境界条件が第3.2表に与えられている。

#### (3) 材料諸元

構成材料は全てインコネル625であり、その物性値は第3.3表にまとめられている。

使用する要素は、梁、シェルの2種類であり、その各々に対して種別、材料定数を第3.6表にまとめる。またシェルの材料マトリックスは、厚肉リング及びペローズで、各々(1)、(2)式に示す値を用いる。

簡略モデルにおける節点重量は、詳細モデルで算出された各節点重量を、簡略モデルの各節点が支配している面積比で振り分けて与える。

### 3.2.2 固有値解析

本節の目的は、真空容器40°セクタの詳細モデルに可能な限り近似した簡略モデルの作成にあるが、その作業は前章と同様、剛性に関する下記のパラメータの検討を行い、それらを踏まえた上で行った。

#### (i) 厚肉リング補強リブ

#### (ii) 支持アーム

##### (1) 厚肉リング補強リブのモデル化

詳細モデルにおいては、厚肉リング補強リブをシェル及び梁要素でモデル化した。一方、簡略モデルにおいては、節点数の増加を抑える目的から、補強リブ部を梁要素に置換し、厚肉リングのシェル要素と節点を共有させる。梁要素の断面性能は第3.6表にまとめられている。

##### (2) 支持アームのモデル化

支持アームのモデル化においては、第3.15図に示す梁要素 $B_3$ の等価なねじり慣性モーメントの算出が重要である。

今、 $M_p$ なるねじりモーメントを先端に加えた場合、詳細モデルの回転角 $\theta_d$ と、簡略モデルの回転角 $\theta_s$ は次式で与えられる。

$$\theta_d = \frac{M_p l^3}{6 a^2 E I_y} \left( 1 + \frac{3 E I_y}{l^2 G A} \right) \quad (9)$$

$$\theta_s = \frac{M_p l}{G I_p}$$

(2)

但し、ここで

E : 縦弾性係数

G : 剪断弾性係数

A : 断面積

$I_y$  : 断面 2 次モーメント

$I_p$  : ねじり慣性モーメント

今、梁要素  $B_3$  を BOX 構造と考えると、サン・ブナンの中空断面のねじり定数を与えて数値計算を行うと  $\theta_d$  と  $\theta_s$  には約 3.1 倍の開きが生じる。これは、サン・ブナンの値が厳密には、円形中空断面に適用されるものであり、梁要素  $B_3$  の様に細長い BOX 形の場合には、ある程度の低減が必要であるからであり、上記計算結果を用いてサン・ブナンの値を 3.1 で除した値を用いる。

### (8) 解析結果

以上の検討の結果得られた真空容器 40°セクタ簡略モデルの固有値解析の結果を第 3.16 図から第 3.20 図に示す。第 3.16 図には、対称境界条件及び逆対称境界条件における各次数の固有周期を詳細モデルの結果と合わせて示してある。ところで、詳細モデルにおいてはペローズの振動が卓越するモードが多く現われたが、装置全体の振動を考える場合、その剛性及び重量から厚肉リングの振動が与える影響の方がはるかに大きい。また、対称境界条件時にペローズ部に発生する局所振動モードは、簡略モデルにおいては要素分割が粗い為生じない。従って、詳細モデルと簡略モデルの振動特性の比較は、一般振動モードに着目して行うのが妥当である。

第 3.17 図に、第 3.16 図から抽出した一般振動モードの固有周期の比較を示す。また、第 3.18 図に対称境界条件時における 1 次～3 次モードの模式図を、第 3.19 図及び第 3.20 図に逆対称境界条件時における 1 次～6 次モードの模式図を示す。

対称境界条件の時、詳細モデルにおいては局部振動モードが 10 次迄で 7 次現われているが、これらについては前述の理由により検討から除外する。簡略モデルにおける 1 次固有周期は詳細モデルのその約 86% であり、モードも第 3.18 図でみる様に類似している。また、詳細モデルにおける 2 番目の一般振動モード (5 次) は、既に (2) で述べた様に厚肉リングとペローズの共振現象で生じたモードであり、これも簡略モデルの 1 次モードに対応するが、約 94% である。簡略モデルの 2 次モードは、詳細モデルの 3 番目の一般振動モード (10 次) に対応し、その固有周期は後者の約 106% である。

逆対称境界条件における 1, 2 次の振動モードは、詳細モデル、簡略モデルのいずれもペローズの振動で支配されるモードであり、その固有周期の比は、約 105, 104% である。1 番目の一般振動モードを示す 3 次の振動モードは詳細モデルの 3 次モードにほぼ等しいモードであり、固有周期の比も約 106% である。簡略モデルの 4 次及び 5 次振動モードは、詳細モデルの 6 次及び 4 次の振動モードと近似しており、それらの固有周期を比較すると約 102, 78% である。簡略モデルの 6 次振動モードはペローズの振動が支配的なモードである。

## (4) まとめ

以上の検討の結果次の結論を得る。

(i)真空容器40°セクタモデルにおける厚肉リングとベローズの様に、剛性の大きく異なる複数の要素から成る構造物をモデル化する場合、剛性の低い要素(ベローズ)の振動特性の方がモデル化に対して敏感である。一方、装置全体(JT-60全体モデル)の振動を考えた場合、剛性及び重量の大きい要素(厚肉リング)の方が与える影響が大きい。従って、本解析の様に、簡略モデルを組み合わせて装置全体モデルを構築し、その振動特性を検討する事が目標である様な場合、簡略モデルのモデル化においては、剛性の低い要素の振動特性に惑わされる事なく、全体の振動特性を把む事が肝要である。

(ii)詳細モデル対称境界条件時に、ベローズの局部振動モード(2~4次)をはさんで1次と5次に類似の振動モードが現われたが、これは厚肉リングとベローズの共振現象である事が2質点モデルで確認された。

また真空容器40°セクタの詳細モデルと簡略モデルの近似性に関しては、1次~10次迄の検討を行い、その中で重要と思われる一般振動モードについて、対称、逆対称境界条件とも固有周期及び振動モードの良好一致をみた。よって、本簡略モデルは詳細モデルの振動特性を十分に近似していると結論できる。

## 4. 真空容器60°セクタ

本章では、JT-60装置の真空容器を構成する要素のうち、厚肉リング60°セクタ1個を取り出し、それをはさむ両側のベローズ及び支持アームを含めて解析対象としている。

### 4.1 詳細モデルの固有値解析

本節の目的は、3.1節等と同様に、解析対象の実形状にできる限り忠実なモデルを構築して固有値解析を行い、次節で作成する簡略モデルの振動特性の基準を与える事である。但し、本モデルは、前章で解析対象とした真空容器40°セクタに類似しており、モデル化等もこれを参考とする。

#### 4.1.1 モデル化概要

##### (1) 要素分割及び境界条件

本解析の対象となるのは、真空容器厚肉リング60°セクタ、真空容器ベローズ、厚肉リング補強リブ及び真空容器支持アームである。解析モデルのプロッタ出力図を第4.1図に示す。モデルの対称性及び使用要素は真空容器40°セクタと同じである。また、境界条件も第3.2表に準ずる。

入力モデルの規模を第4.1表にまとめる。



## (2) 材料諸元

真空容器60°セクタを構成する要素も全てインコネル625から成り、その物性値は第3.3表の通りである。

使用要素は、(1)で述べた様に真空容器40°セクタと同じである。シェル要素の材料マトリックスは、厚肉リング及び補強リブの一部をモデル化する等方性シェルに対しては(11)式、ベローズをモデル化する異方性シェルに対しては(12)式を適用する。また、梁要素の断面性能も第3.4表に示されている。

本モデルの節点重量のうち、剛性を考慮している部材に関してはプログラム中で自動的に算出されるが、固定リミタ、ライナ、ライナサポート、ベローズサポート、磁気リミタコイル及び磁気リミタ板の非構造部材については、追加重量として相当節点に振り分ける必要がある。この追加重量の算出方法は3.1.1に準じ、ここでは結果のみを記す。

前4者の重量 4.8 ton

後2者の重量 3.6 ton

従って、真空容器60°セクタ1個に対する追加重量は8.4 tonである。ちなみに、本モデルの全重量は20.9 tonである。

## 4.1.2 固有値解析

### (1) 解析結果

真空容器60°セクタ詳細モデルの固有値解析結果を第4.2図から第4.8図に示す。解析は固有値次数1次から10次迄行った。第4.2図に、対称境界条件及び逆対称境界条件における1次から10次迄の固有周期を示す。固有値は、真空容器40°セクタと同様、各次数とも対称境界条件の方が逆対称境界条件に比べて2~3倍大きく、例えば1次固有周期で、前者は0.208、後者が0.105 secであり、その比は約2倍である。対称境界条件において、2~5次、7~10次の固有周期はほとんど同じであるが、これは前章でみた局部振動モードである。逆対称境界条件の1次の固有周期は、対称境界条件の5次の固有周期より小さい。また、逆対称境界条件では局部振動モードは発生しない。

第4.3図には対称境界条件、第4.4図及び第4.5図には逆対称境界条件の各次の振動モードの模式図を示す。更に、第4.6、4.7図には対称境界条件、第4.8図には逆対称境界条件の1次固有振動モードのプロッタ出力図を示す。対称境界条件において一般振動モードが生じるのは1次から10次では、1次、6次の2次のみであり、残りは全てベローズの局部振動モードである。1次モードは5.1.2における1次及び5次モードと同じ振動モードであり、6次モードは5.1.2における10次モードに匹敵する。但し、厚肉リング自身の固有周期が40°セクタとは異なる事により、3章でみた厚肉リングとベローズの共振現象は生じない。

逆対称境界条件で一般振動モードが生じるのは1次から6次迄で1, 3, 4, 6次モードである。1, 3次モードが5.1.2における3次モードに、4次モードが4次モードに、6次モードが6次モードに対応している。2次モードはベローズの振動が支配的なモードであり、5次モードは支持アームの回転が支配的なモードである。

## (3) まとめ

真空容器 60°セクタ詳細モデルの固有値解析の結果は次の様にまとめられる。

(i)真空容器 60°セクタの振動特性も、3章でみた 40°セクタと同様に、ベローズの振動に支配されるモードが多い。

(ii)厚肉リングとベローズの重量及び剛性のバランスが変わる為、3章でみた厚肉リングとベローズの共振現象は生じない。

## 4.2 簡略モデルの固有値解析

本節では、前節で設定した真空容器 60°セクタ詳細モデルと類似する簡略モデルを構築する事が目的であるが、ここでも 3.2 節に準じてモデル化等を行う。

## 4.2.1 モデル化概要

## (1) 要素分割及び境界条件

解析モデルは、詳細モデルの特徴を十分表わし、かつ最小の節点数という事から第 4.9 図及び第 4.10 図に示す要素分割とし、モデルの対称性及び境界条件に関しては 3.2 節と全く同じである。

使用要素は、厚肉リング部、ベローズ部は、各々等方性シェル、異方性シェル要素であり詳細モデルと同一要素に置換しているが、支持アーム部及び厚肉リング補強リブ部は梁要素にモデル化している。

入力モデルの規模を第 4.2 表にまとめる。

## (2) 材料諸元

構成要素は全てインコネル 625 であり、その物性値は第 3.3 表にまとめられている。

使用する要素は、梁、シェル要素であり、シェルの材料マトリックスは、厚肉リング、ベローズに対して、各々 (11), (12) 式に示す値を用いる。また梁要素の断面性能も第 3.4 表にまとめられている。

簡略モデルにおける節点重量は、詳細モデルで算出された各節点重量を、簡略モデルの各節点が支配している面積比で振り分けて与える。

## 4.2.2 固有値解析

本節の目的は、真空容器 60°セクタ詳細モデルに、可能な限り近似した簡略モデルの作成にあるが、本モデルは 3.2 節で検討を行った真空容器 40°セクタの簡略モデルと類似しており、モデル化の検討はそれと同様である為、ここでは記述を略し、解析結果についてのみ記す。

## (1) 解析結果

真空容器 60°セクタ簡略モデルの固有値解析の結果を第 4.11 図から第 4.18 図に示す。第 4.11 図には、対称境界条件及び逆対称条件における各次数の固有周期を詳細モデルの結果と合わせて示してある。真空容器 60°セクタモデルにおいても、ベローズの振動が卓越するモードが多いが、全体モデルへの組み込みと考えると一般振動モードに着目する。第 4.11 図に示し

た各モードから一般振動モードを抽出してその固有周期を示したのが第 4.12 図である。第 4.13 図には、対称境界条件、第 4.14 図及び第 4.15 図には逆対称境界条件における振動モードの模式図を示す。更に、第 4.16 図及び第 4.17 図に対称境界条件の、第 4.18 図には逆対称境界条件の 1 次固有振動モードのプロッタ出力図を示す。

対称境界条件では、1 次固有周期は詳細モデルの約 92% であり、振動モードも良く近似されている。更に、2 次モードは、詳細モデルにおける 2 番目の一般振動モード (6 次) に相当し、固有周期の比が約 105% であり、振動モードも良く近似されている。簡略モデルの 3 次モードは、厚肉リングが  $+z$  方向に移動する振動モードであるが、詳細モデルでは 1~12 次迄で一般振動モードが 2 つしかない為比較は不可能である。

逆対称条件では、一般振動モードを示す 1, 2 番目の固有周期 (1, 3 次) は、詳細モデルの 1, 3 次と比較して、各々 105, 104% であり、振動モードもほぼ等しい。2 次モードは、詳細モデル同様ベローズの振動が支配的なモードである。一般モードを示す 3, 4 番目の固有周期 (4, 5 次) は、詳細モデルの 6, 4 次の振動モードに対応し、固有周期も約 100, 78% である。

## (2) まとめ

以上の検討の結果次の結論を得る。

(i) 真空容器 60°セクタモデルは、前章で検討を行った真空容器 40°セクタと同様、厚肉リングとベローズという剛性の大きく異なる要素から成り、その振動モードはベローズの振動に支配されるモードが多い。詳細モデルから簡略モデルへのモデル化に際しては、装置全体モデルの構築を考慮して一般振動モードに着目した。

(ii) 振動モードは真空容器 40°セクタと同様であるが、厚肉リングの重量が変わる事から前章で見た厚肉リングとベローズの共振現象は現われなかった。

また、真空容器 60°セクタの詳細モデルと簡略モデルの近似性に関しては、1 次~10 次迄の検討を行い、その中で重要と思われる一般振動モードについて、対称、逆対称境界条件とも固有周期及び振動モードの良い一致をみた。よって、本簡略モデルは詳細モデルの振動特性を十分に近似していると結論できる。

## 5. ま と め

JT-60 の主要コンポーネントであるトロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、真空容器 40°及び 60°セクタの各々の振動特性を把握すると共に、その簡略モデルを作成した。各コンポーネントの詳細モデルと簡略モデルの、モデル規模、使用要素、第 1 次固有周期を第 5.1 表にまとめる。但し、ここで  $\tau_d$ ,  $\tau_s$  は、各々、詳細モデル、簡略モデルの第 1 次固有周期を表す。各コンポーネントの簡略モデルは、第 5.1 表からもわかる様に、節点数を極力抑え、かつ第 1~4 章の検討においても見た様に、第 1~10 次迄の次数において、固有周期、固有振動モードも詳細モデルと良い近似性を有しており、装置全体モデルを構築する各コンポーネントの簡略モデルとして十分条件を満たしていると考えられる。

第 1.1 表 トロイダル磁場コイル詳細モデル入力モデル規模

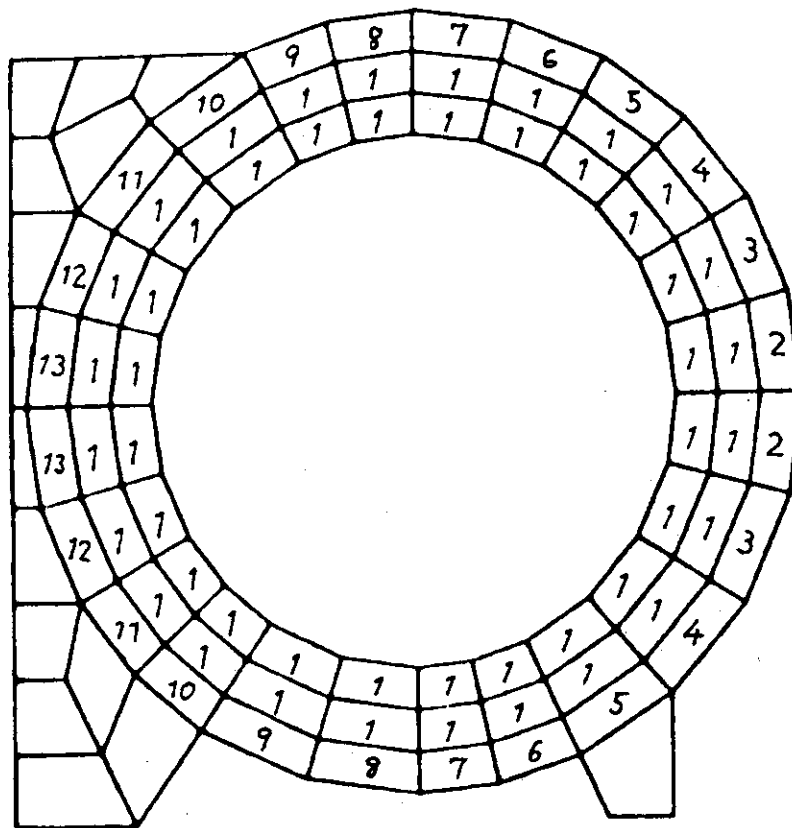
Number of node	324
Number of element	564
Number of	
solid element	144
shell element	257
boundary element	163

第 1.2 表 トロイダル磁場コイル使用材料物性値

Component	Conductor	Casing	Insulator
Material	Copper	Non-mag. steel	FRP
Young's mod. ( ton/cm <sup>2</sup> )	1.1x10 <sup>3</sup>	2.0x10 <sup>3</sup>	0.7x10 <sup>3</sup>
Poisson's ratio	0.3	0.3	-
Density ( g/cm <sup>3</sup> )	8.9	7.9	2.2

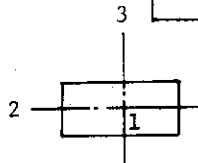
第 1.3 表 トロイダル磁場コイル 導体部の等価縦弾性係数及び密度

Material number	$\ell_2$ ( cm )	$\bar{\rho}$ ( g/cm <sup>3</sup> )	$\bar{E}$ ( $\times 10^3$ ton/cm <sup>2</sup> )
1	0	8.90	1.10
2	11.03	6.52	0.96
3	10.06	6.73	0.97
4	9.10	6.93	0.98
5	8.15	7.14	0.99
6	7.19	7.35	1.01
7	6.23	7.55	1.02
8	5.27	7.76	1.03
9	4.31	7.97	1.04
10	3.35	8.18	1.06
11	2.40	8.38	1.07
12	1.44	8.59	1.08
13	0.48	8.80	1.09



第 1.4 表 トロイダル磁場コイル簡略モデル中の梁要素の断面性能

Element number		Solid	Shell	Total
4	A	3.62	1.28	4.89
	J <sub>1</sub>	1.35	0.60	1.94
5	J <sub>2</sub>	0.51	0.38	0.88
	J <sub>3</sub>	2.61	2.10	4.70
	A	6.10	2.55	8.65
6	J <sub>1</sub>	4.94	1.38	6.32
	J <sub>2</sub>	2.19	1.53	3.72
11	J <sub>3</sub>	4.40	3.45	7.85
	A	6.10	2.84	8.95
	J <sub>1</sub>	4.94	1.68	6.62
7	J <sub>2</sub>	2.19	2.37	4.56
	J <sub>3</sub>	4.40	3.48	7.88
10	A	6.10	1.60	7.70
	J <sub>1</sub>	4.94	1.27	6.21
	J <sub>2</sub>	2.19	1.11	3.30
8	J <sub>3</sub>	4.40	2.39	6.79
	A	6.10	1.60	7.70
9	J <sub>1</sub>	4.94	1.27	6.21
	J <sub>2</sub>	2.19	1.11	3.30
9	J <sub>3</sub>	4.40	2.39	6.79



A : Cross section (  $\times 10^3 \text{ cm}^2$  )  
 J<sub>1</sub> : Second moment of area around axis 1 (  $\times 10^6 \text{ cm}^4$  )  
 J<sub>2</sub> : Second moment of area around axis 2 (  $\times 10^6 \text{ cm}^4$  )  
 J<sub>3</sub> : Second moment of area around axis 3 (  $\times 10^6 \text{ cm}^4$  )

第 1.5 表 トロイダル磁場コイル簡略モデルにおける等価縦弾性係数の算出

Element number	$E_c$ ( $\text{t/cm}^2$ )	$E_s$ ( $\text{t/cm}^2$ )	$J_c$ ( $\text{cm}^4$ )	$J_s$ ( $\text{cm}^4$ )	$\bar{E}$ ( $\text{t/cm}^2$ )
4,5	$1.08 \times 10^6$	$1.97 \times 10^6$	$0.51 \times 10^6$	$0.38 \times 10^6$	$1.46 \times 10^6$
6,11	$1.04 \times 10^6$	$1.97 \times 10^6$	$2.19 \times 10^6$	$1.53 \times 10^6$	$1.43 \times 10^6$
7,10	$1.01 \times 10^6$	$1.97 \times 10^6$	$2.19 \times 10^6$	$2.37 \times 10^6$	$1.51 \times 10^6$
8,9	$0.97 \times 10^6$	$1.97 \times 10^6$	$2.19 \times 10^6$	$1.11 \times 10^6$	$1.31 \times 10^6$

第 1.6 表 補強枠の梁断面性能

Element number	1	2	3
$\alpha$	0.62	0.62	0.61
A ( $\text{cm}^2$ )	$1.67 \times 10^3$	$1.65 \times 10^3$	$2.08 \times 10^3$
J <sub>1</sub> ( $\text{cm}^4$ )	$8.65 \times 10^4$	$8.22 \times 10^4$	$1.10 \times 10^5$
J <sub>2</sub> ( $\text{cm}^4$ )	$5.91 \times 10^4$	$7.61 \times 10^5$	$7.37 \times 10^4$
J <sub>3</sub> ( $\text{cm}^4$ )	$1.64 \times 10^7$	$3.97 \times 10^6$	$3.20 \times 10^7$

第 2.1 表 ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおけるコイルの  
グルーピング

Group number	Coil number	R ( m )	Y ( m )	$\Delta X$ ( m )	$\Delta Y$ ( m )	R ( cm )	Y ( cm )	$\theta$ ( ° )
1	Q1	5.040	0.660	0.070	0.192	503.3	60.6	4.854
	F1	5.020	0.495	0.110	0.060			
2	V1	4.855	0.680	0.170	0.148	485.5	68.0	4.662
3	H1	4.235	1.600	0.055	0.069	408.3	154.0	3.641
	V2	4.115	1.580	0.070	0.208			
	Q2	4.005	1.480	0.070	0.192			
4	F2	3.884	1.568	0.100	0.195	383.1	155.8	3.217
	V3	3.759	1.545	0.070	0.208			
5	F3	2.760	1.515	0.110	0.180	276.0	151.5	0.0
6	H2	2.760	1.360	0.055	0.069	276.0	136.0	0.0
7	Q3	2.632	1.400	0.070	0.128	263.2	140.0	0.0
8	F4	2.300	1.315	0.110	0.180	230.0	131.5	0.0
9	V4	2.300	1.116	0.100	0.148	230.0	111.6	0.0
10	F5	2.000	1.125	0.110	0.120	200.0	112.5	0.0
11	F6	1.830	0.887	0.160	0.138	182.0	88.7	0.0
12	H3	2.006	0.799	0.055	0.069	194.6	69.0	0.0
	V5	1.950	0.707	0.100	0.074			
	V6	1.910	0.617	0.100	0.074			
13	F7	1.725	0.725	0.160	0.092	169.5	66.5	0.0
	F8	1.664	0.605	0.160	0.092			
14	Q4	1.850	0.515	0.060	0.072	183.7	46.3	0.0
	V7	1.830	0.433	0.100	0.074			
15	F9	1.616	0.490	0.160	0.092	159.8	43.4	0.0
	F10	1.580	0.378	0.160	0.092			
16	V8	1.795	0.343	0.100	0.074	178.0	31.1	0.0
	Q5	1.755	0.255	0.060	0.072			
17	F11	1.556	0.269	0.160	0.092	154.8	21.6	0.0
	F12	1.540	0.162	0.160	0.092			
18	V9	1.755	0.130	0.100	0.148	175.5	13.0	0.0
19	F13	1.531	0.061	0.160	0.092	153.1	0.0	0.0

第 2.2 表 ポロイダル磁場コイル詳細モデル入力モデル規模

Number of node	612
Number of	
shell element	192
beam element	114
boundary element	441

第 2.3 表 ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおける境界条件

Component Boundary condition	Support rod ( Shell )						Coil ( Beam )					
	r	$\theta$	z	$\theta_r$	$\theta_\theta$	$\theta_z$	r	$\theta$	z	$\theta_r$	$\theta_\theta$	$\theta_z$
Symmetric	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Anti-symmetric	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0

0 : Free      1 : Fixed

第 2.4 表 ポロイダル磁場コイル使用材料物性値

Component	Material	Young's mod. ( ton/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Density ( g/cm <sup>3</sup> )
Support rod Support frame	Non-mag. steel	2.0x10 <sup>3</sup>	0.3	7.9
O.H. coil V.F. coil H.F. coil Q.F. coil	Copper	1.1x10 <sup>3</sup>	0.3	8.9

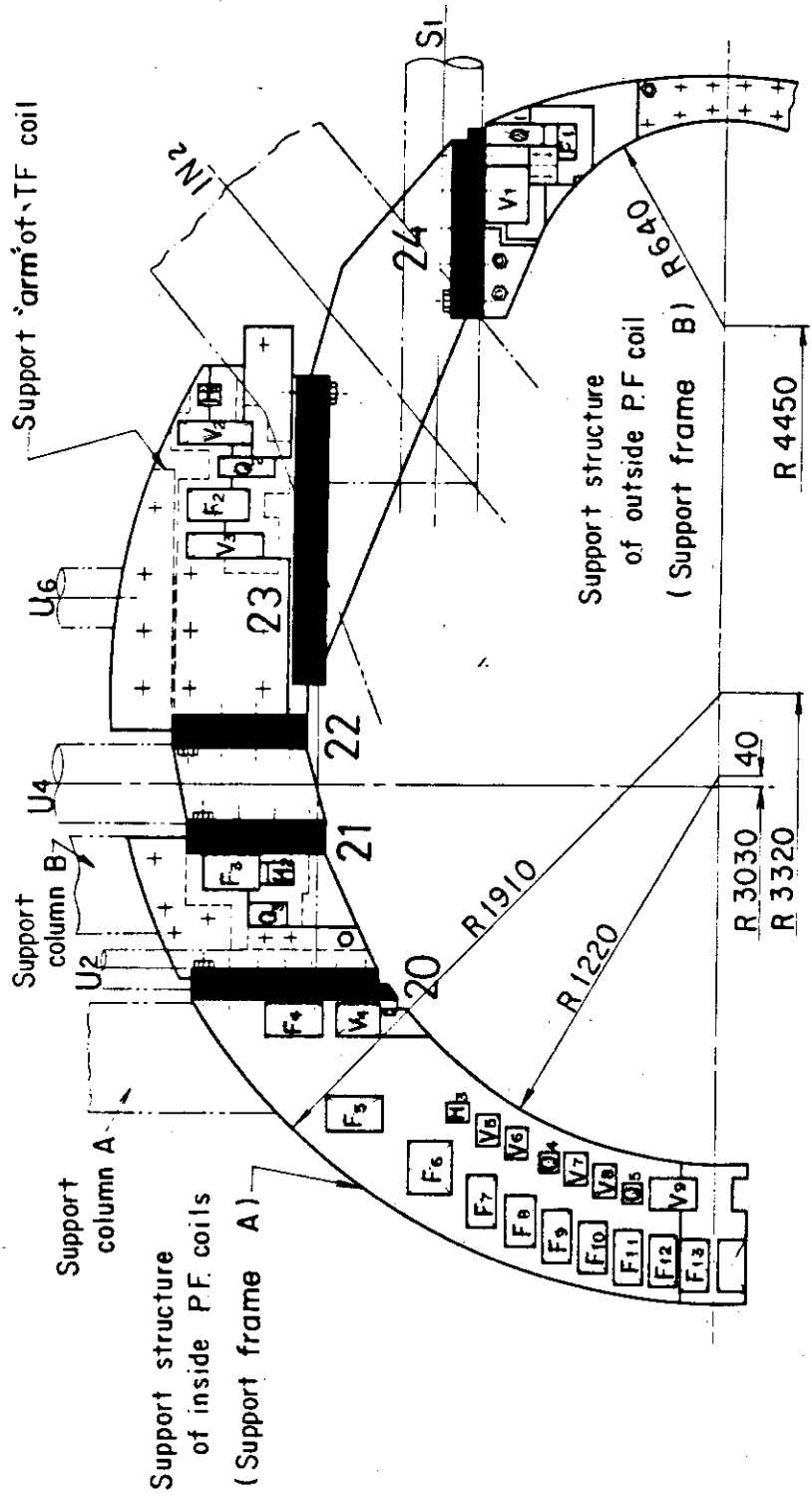
第 2.5 表 ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおける各コイル群  
の梁断面性能

Group number	A ( cm <sup>2</sup> )	J <sub>14</sub> ( cm <sup>4</sup> )	J <sub>24</sub> ( cm <sup>4</sup> )	J <sub>34</sub> ( cm <sup>4</sup> )
1	200.4	2213.6	16378.0	1391.4
2	251.4	8777.0	4592.5	6059.4
3	318.0	3763.2	19675.0	18063.0
4	340.6	6286.6	11869.0	15244.0
5	198.0	4947.1	5346.0	1996.5
6	38.0	197.0	150.6	95.7
7	89.6	963.0	1223.3	365.9
8	198.0	4947.1	5346.0	1996.5
9	148.0	2869.8	2701.5	1233.3
10	120.0	2430.3	1584.0	1331.0
11	220.8	6751.5	3504.1	4710.4
12	186.0	1670.5	3666.5	9492.1
13	294.4	5324.6	12675.0	9019.2
14	117.2	993.9	2358.4	855.4
15	294.2	5324.6	11309.0	7234.4
16	117.2	993.9	2636.6	1182.7
17	294.4	5324.6	10503.0	6468.9
18	148.0	2869.8	2701.5	1233.3
19	147.2	5324.6	13031.0	3140.3



第 2.6 表 補強枠中の梁要素の断面性能

Element number	A (cm <sup>2</sup> )	J <sub>1</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>2</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>3</sub> (cm <sup>4</sup> )
20	100.0	1408.0	29733.0	3333.0
21, 22	106.0	3097.0	18842.0	1546.0
23, 24	100.0	1408.0	6458.0	833.0



第 2.7 表 ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおけるコイルのグルーピング

Group number in simple model	Group numbers in detailed model	Y ( cm )	R ( cm )
1	1, 2	493.4	64.7
2	3, 4	395.2	154.9
3	5, 6, 7, 8, 9, 10	242.9	131.1
4	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	171.1	47.0

第 2.8 表 ポロイダル磁場コイル簡略モデル入力モデル規模

Number of node	74
Number of	
beam element	26
boundary element	48

第 2.9 表 ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおける境界条件

Component \ Boundary condition	Support rod ( Beam )						Coil ( Beam )					
	r	$\theta$	z	$\theta_r$	$\theta_\theta$	$\theta_z$	r	$\theta$	z	$\theta_r$	$\theta_\theta$	$\theta_z$
Symmetric	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1
Anti-symmetric	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0

0 : Free      1 : Fixed

第 2.10 表 ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおける各コイル群の梁断面性能

Group number	A (cm <sup>2</sup> )	J <sub>14</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>24</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>34</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	452.0	10990	56470	13610
2	658.6	10050	136100	33850
3	791.6	25020	590200	192000
4	1820.0	31920	357100	1186000

第 2.11 表 ポロイダル磁場コイル簡略モデルにおける各節点質量

Node number	Weight (ton)	Node number	Weight (ton)	Node number	Weight (ton)
2	0.152	10	0.136	18	1.591
3	1.591	11	0.236	19	0.152
4	0.152	12	1.138	20	0.093
5	0.236	13	0.236	21	0.932
6	1.138	14	0.093	22	0.093
7	0.236	15	0.932	23	0.136
8	0.136	16	0.093	24	1.656
9	1.656	17	0.152	25	0.136

第 2.12 表 支持柱モデル化検討に用いた梁断面性能

Element number	A (cm <sup>2</sup> )	J <sub>14</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>24</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>34</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	262.5	4.26x10 <sup>3</sup>	1.23x10 <sup>4</sup>	2.68x10 <sup>4</sup>
2	225.0	3.55x10 <sup>3</sup>	1.06x10 <sup>4</sup>	1.69x10 <sup>4</sup>
3	1.0x10 <sup>10</sup>	1.0x10 <sup>10</sup>	1.0x10 <sup>10</sup>	1.0x10 <sup>10</sup>

第 2.13 表 ポロイダル磁場コイル簡略モデルに用いる梁要素の梁断面性能

Element number	A (cm <sup>2</sup> )	J <sub>1</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>2</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>3</sub> (cm <sup>4</sup> )
1, 2	4.88x10 <sup>2</sup>	7.81x10 <sup>3</sup>	5.40x10 <sup>3</sup>	4.37x10 <sup>4</sup>
3, 4, 9	7.72x10 <sup>2</sup>	6.60x10 <sup>3</sup>	1.97x10 <sup>4</sup>	1.25x10 <sup>5</sup>
5, 6	6.08x10 <sup>2</sup>	4.80x10 <sup>3</sup>	6.33x10 <sup>3</sup>	1.87x10 <sup>5</sup>
7, 8	4.63x10 <sup>2</sup>	3.60x10 <sup>3</sup>	4.82x10 <sup>3</sup>	8.27x10 <sup>4</sup>
10	1.77x10 <sup>2</sup>	1.21x10 <sup>3</sup>	1.84x10 <sup>3</sup>	4.62x10 <sup>3</sup>

第 3.1 表 真空容器 40°セクタ詳細モデル入力モデル規模

Number of node	414
Number of	
truss element	6
beam element	104
membrane element	26
shell element	214
boundary element	225

第 3.2 表 境 界 条 件

Component Boundary condition	Support arm						Bellows					
	r	θ	z	θ <sub>r</sub>	θ <sub>θ</sub>	θ <sub>z</sub>	r	θ	z	θ <sub>r</sub>	θ <sub>θ</sub>	θ <sub>z</sub>
Symmetric	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
Anti-symmetric	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0

0 : Free    1 : Fixed

第 3.3 表 真空容器使用材料物性値

Component	Material	Young's mod. ( ton/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Density ( g/cm <sup>3</sup> )
Rigid ring Bellows Support arm	Inconel 625	2.1x10 <sup>3</sup>	0.3	8.4

第 3.4 表 真空容器 40°セクタ詳細モデル要素断面性能

Element number	A ( cm <sup>2</sup> )	J <sub>1</sub> <sup>4</sup> ( cm <sup>4</sup> )	J <sub>2</sub> <sup>4</sup> ( cm <sup>4</sup> )	J <sub>3</sub> <sup>4</sup> ( cm <sup>4</sup> )	Component
B1	33	82	333	25	Rib
B2	48	127	1024	36	Rib
B3	54	145	1458	41	Rib
B4	140	693	14292	187	Support arm
B5	220	4421	11458	1420	Support arm
B6	223	963	9421	11511	Support arm
B7	90	354	4688	97	Support arm
B8	140	693	14292	187	Support arm
B9	140	693	14292	187	Support arm
B10	140	693	14292	187	Support arm
B11	77	435	62261	31	Support arm
T	140	0	0	0	Support arm
	t ( cm )				
M1	3.6				Support arm
M2	4.4				Support arm
S1	4.0	Isotropic			Rigid ring
S2	2.0	Isotropic			Rib
S3	0.2	Orthotropic			Bellows

B : Beam element                      T : Truss element  
M : Membrane element                S : Shell element

第 3.5 表 真空容器 40°セクタ簡略モデル入力モデル規模

Number of node	106
Number of	
beam element	28
shell element	32
boundary element	48

第 3.6 表 真空容器 40°セクタ簡略モデル要素断面性能

Element number	A ( $\text{cm}^2$ )	$J_1$ ( $\text{cm}^4$ )	$J_2$ ( $\text{cm}^4$ )	$J_3$ ( $\text{cm}^4$ )	Component
B1	$6.83 \times 10^2$	$2.92 \times 10^3$	$1.91 \times 10^4$	$9.14 \times 10^5$	Support arm
B2	$6.47 \times 10^2$	$2.76 \times 10^3$	$1.91 \times 10^4$	$7.02 \times 10^5$	Support arm
B3	$5.58 \times 10^2$	$1.06 \times 10^5$	$1.06 \times 10^5$	$6.24 \times 10^5$	Support arm
B4	$4.20 \times 10$	$1.11 \times 10^2$	$3.36 \times 10^2$	$2.31 \times 10^3$	Rib
B5	$6.30 \times 10$	$1.64 \times 10^2$	$1.03 \times 10^3$	$6.41 \times 10^3$	Rib
B6	$7.30 \times 10$	$1.87 \times 10^2$	$1.46 \times 10^3$	$1.02 \times 10^4$	Rib
B7	$7.30 \times 10$	$1.87 \times 10^2$	$1.46 \times 10^3$	$1.02 \times 10^4$	Rib
	t ( cm )				
S1	4.0	Isotropic			Rigid ring
S2	0.2	Orthotropic			Bellows

B : Beam element  
S : Shell element

第 4.1 表 真空容器 60°セクタ詳細モデル入力モデル規模

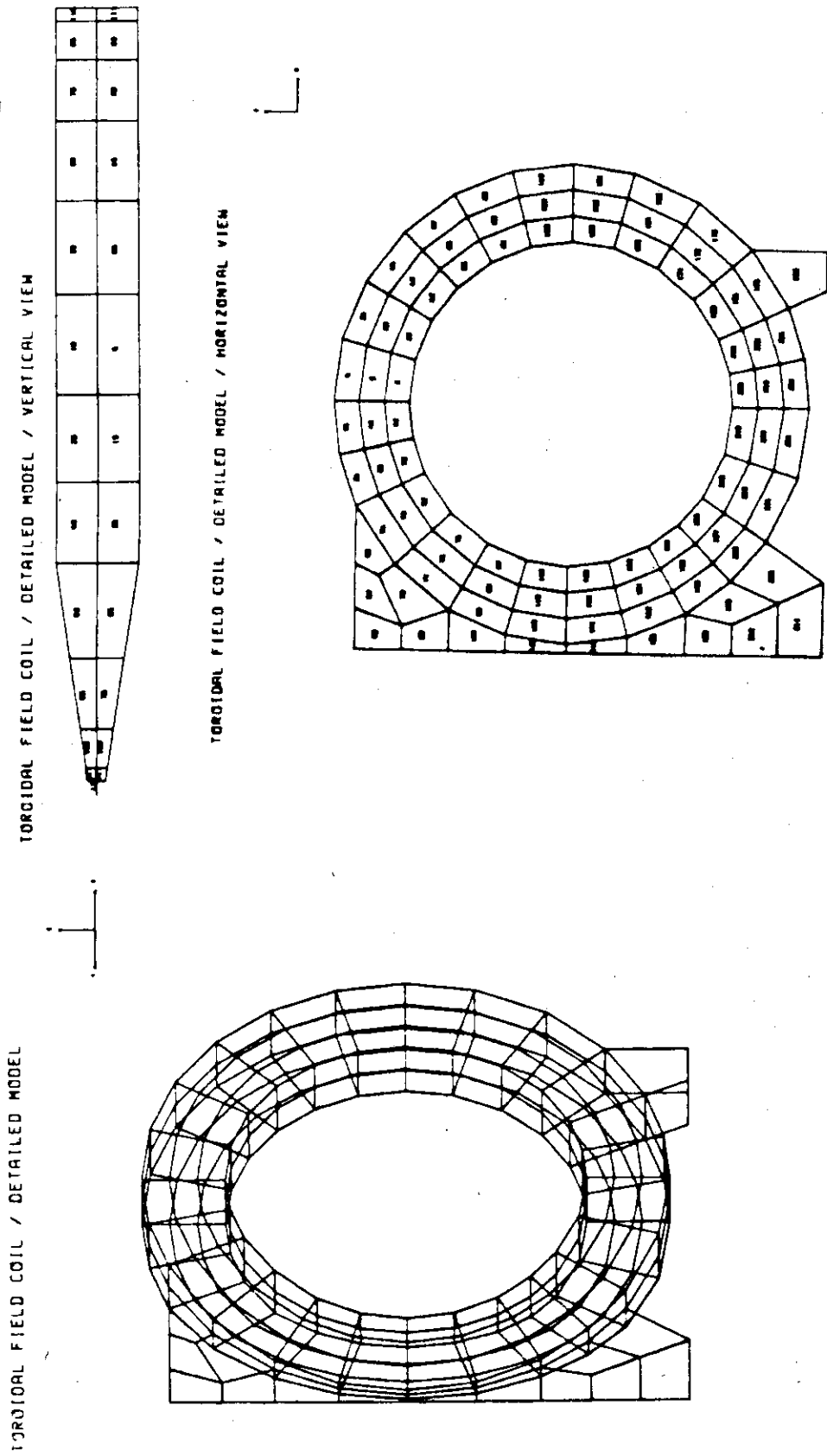
Number of node	481
Number of	
truss element	6
beam element	122
membrane element	26
shell element	280
boundary element	254

第4.2表 真空容器60°セクタ簡略モデル入力モデル規模

Number of node	106
Number of	
beam element	28
shell element	32
boundary element	48

第5.1表 各主要コンポーネントの詳細モデルと簡略モデルの比較

	Detailed model			Simple model			$\tau_d/\tau_s$
	Types of element	Number of nodes	$\tau_d$ (sec)	Types of element	Number of nodes	$\tau_s$ (sec)	
Toroidal field coil	Solid Shell	324	0.124	Beam	11	0.134	0.925
Poloidal field coil	Shell Beam	612	0.282	Beam	74	0.292	0.966
Vacuum vessel (40° sector)	Truss Beam	414	0.187	Beam	106	0.160	1.169
Vacuum vessel (60° sector)	Shell Membrane	481	0.208	Shell	106	0.190	1.095

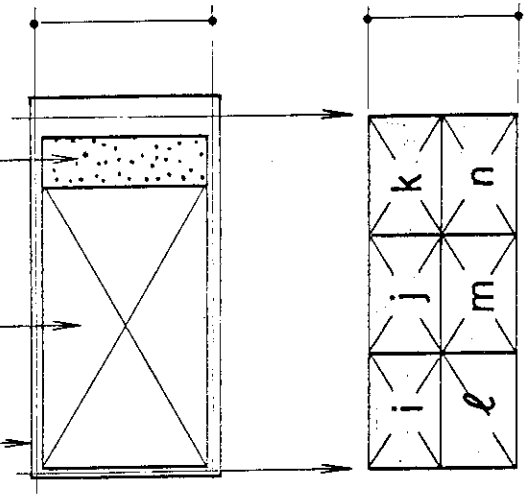


第 1.1 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル鳥瞰図

第 1.2 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル正面図及び平面図

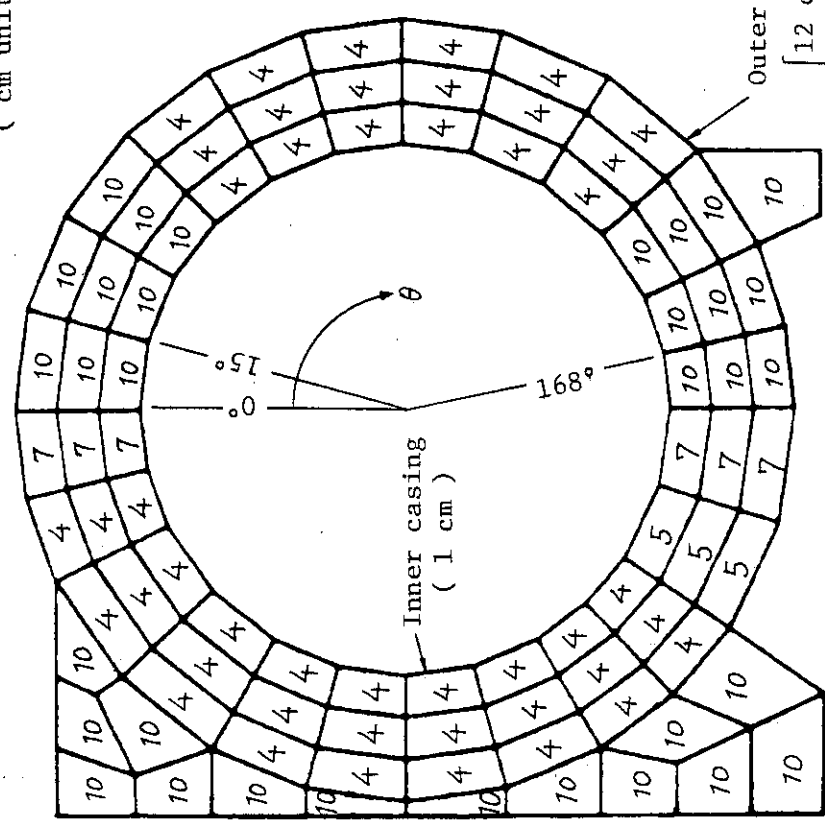


Casing Conductor Insulator



Cond.	Ins.	Material
$l_c$	$l_i$	Width
$E_c$	$E_i$	Young's mod.
$\rho_c$	$\rho_i$	Density

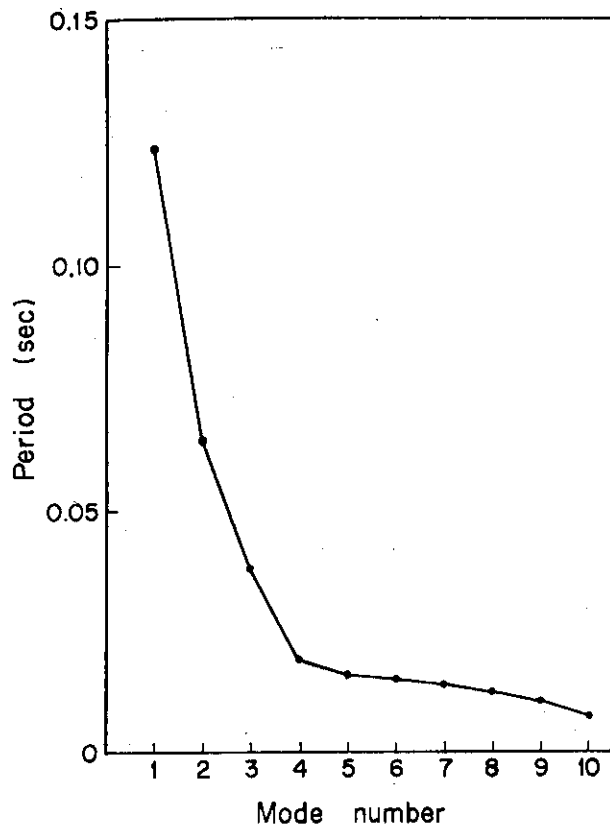
( cm unit )



Outer casing  
 [ 12 cm for  $15^\circ < \theta < 168^\circ$   
 18 cm for  $0^\circ < \theta < 15^\circ$   
 and  $168^\circ < \theta < 360^\circ$  ]

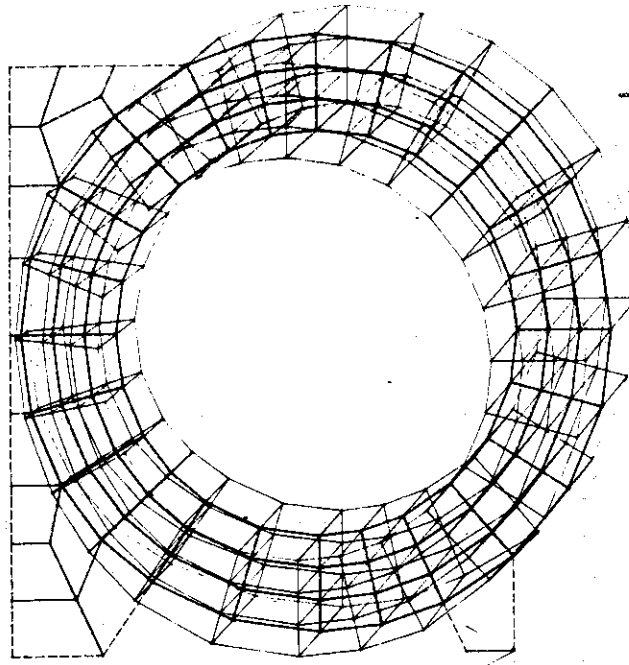
第 1.3 図 トロイダル磁場コイル外枠の板厚

第 1.4 図 トロイダル磁場コイル導体部のモデル化



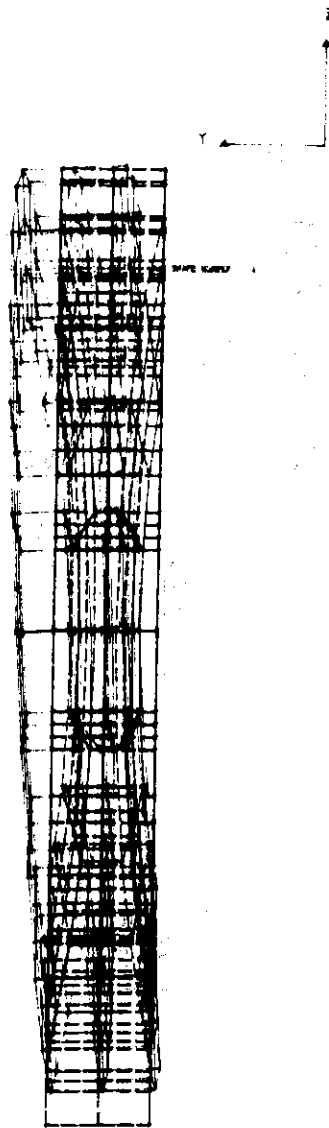
第 1.5 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル固有周期

TOROIDAL FIELD COIL EIGENVALUE



第 1.6 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード，プロッタ出力図

TOROIDAL FIELD COIL EIGENVALUE



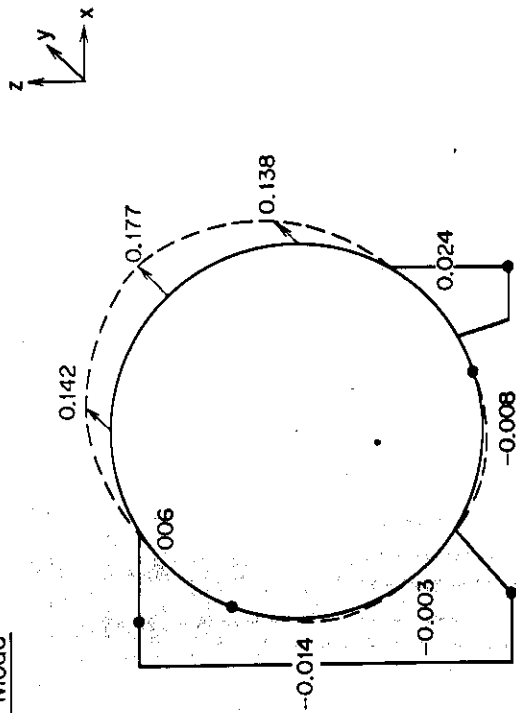
第 1.7 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード，プロッタ出力図

TOROIDAL FIELD COIL EIGENVALUE

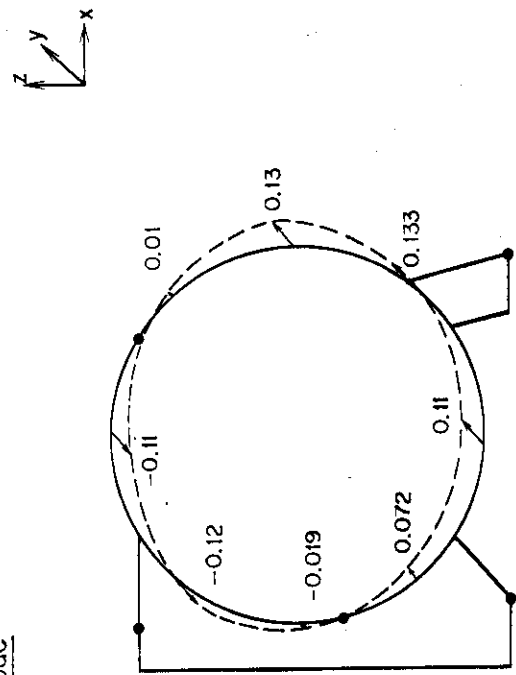


第 1.8 図 トロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード，プロッタ出力図

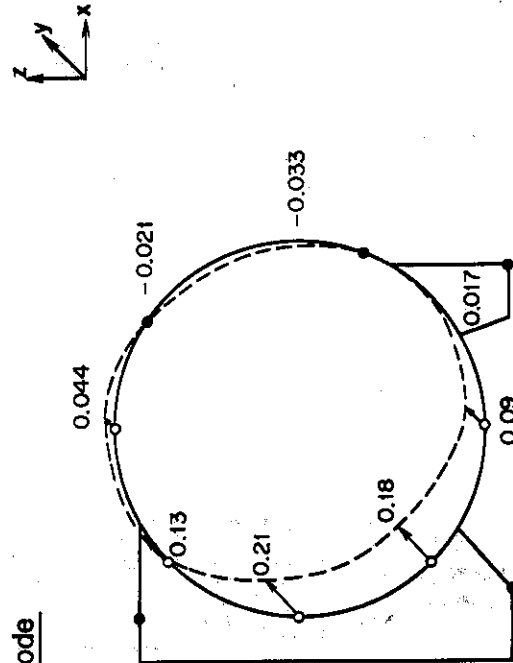
1st Mode



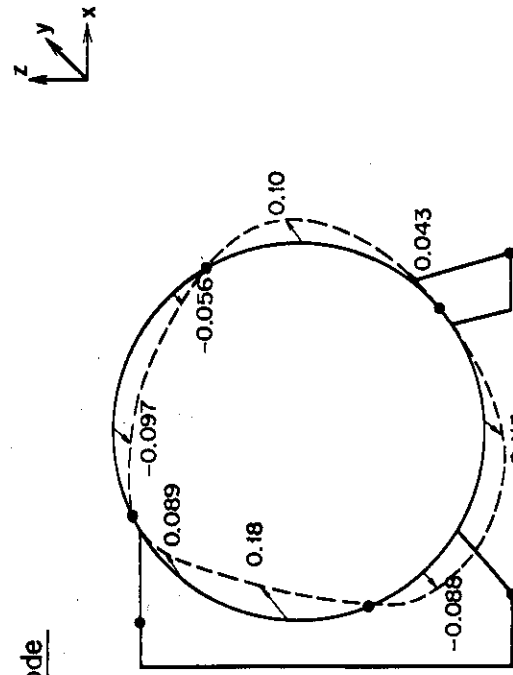
3rd Mode



2nd Mode

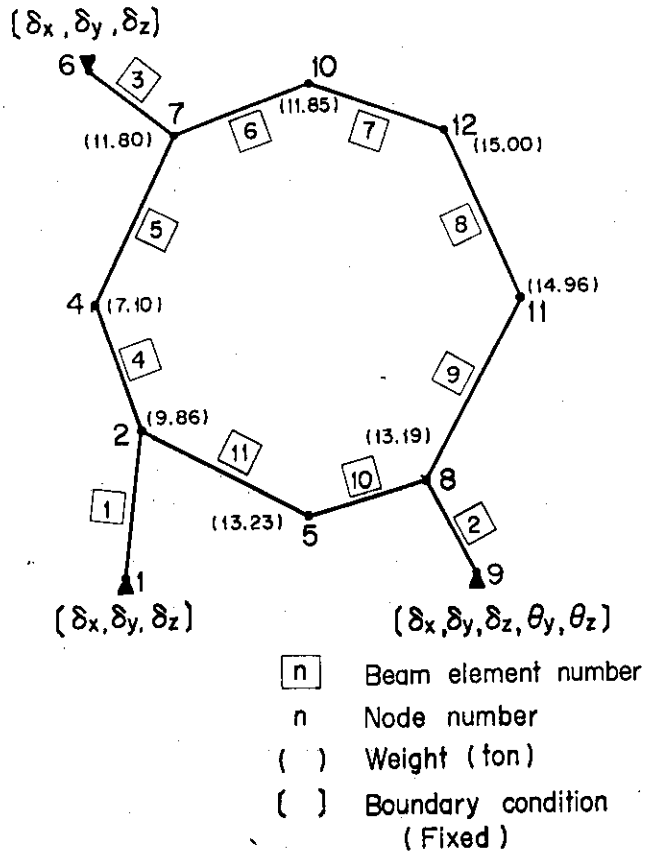


4th Mode

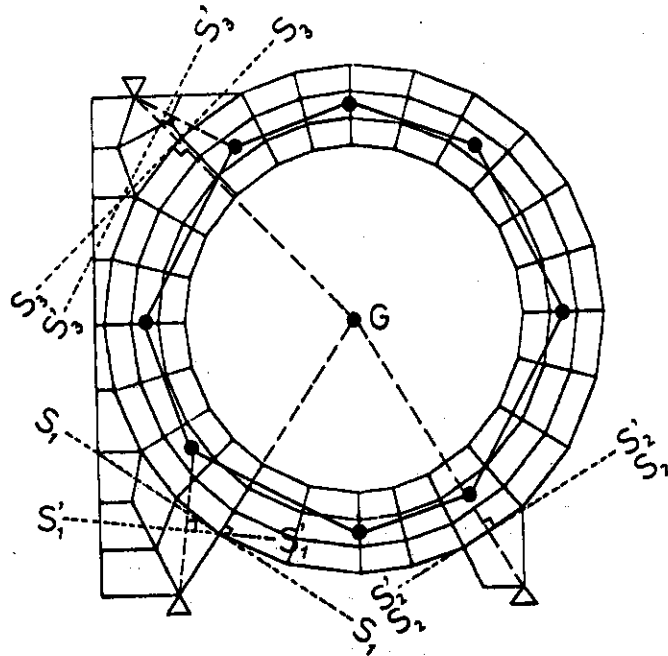


第1.9図 トロイダル磁場コイル詳細モデル1, 2次固有  
振動モード, 模式図

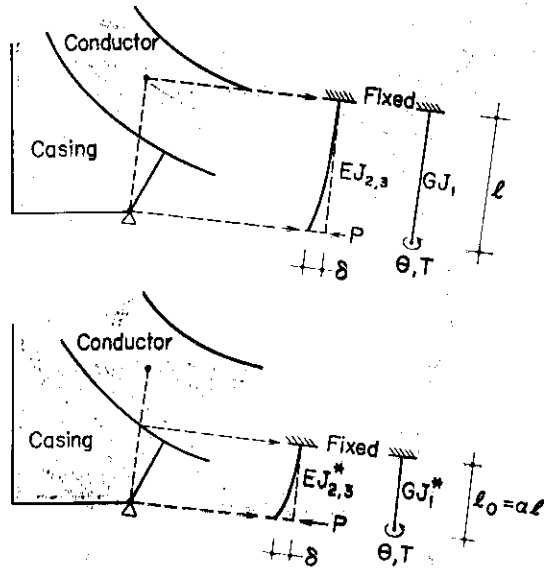
第1.10図 トロイダル磁場コイル詳細モデル3, 4次固有  
振動モード, 模式図



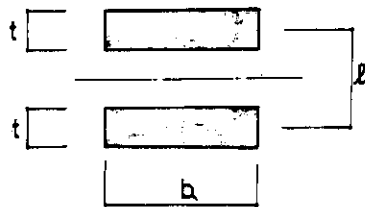
第 1.11 図 トロイダル磁場コイル簡略モデル



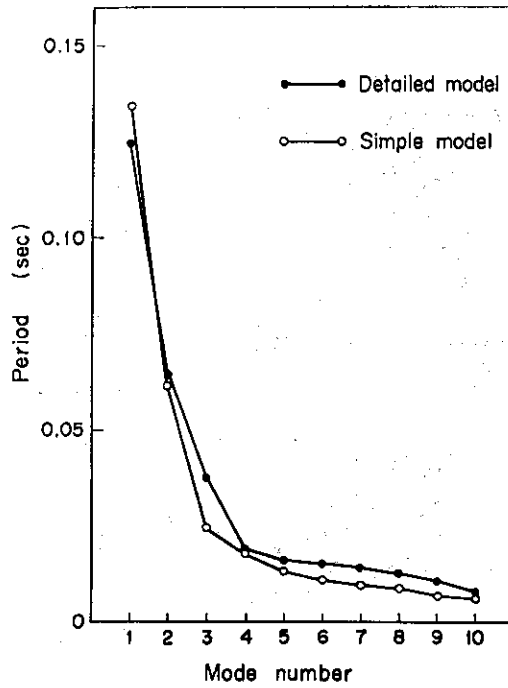
第 1.12 図 補強棒の梁断面性能の決定



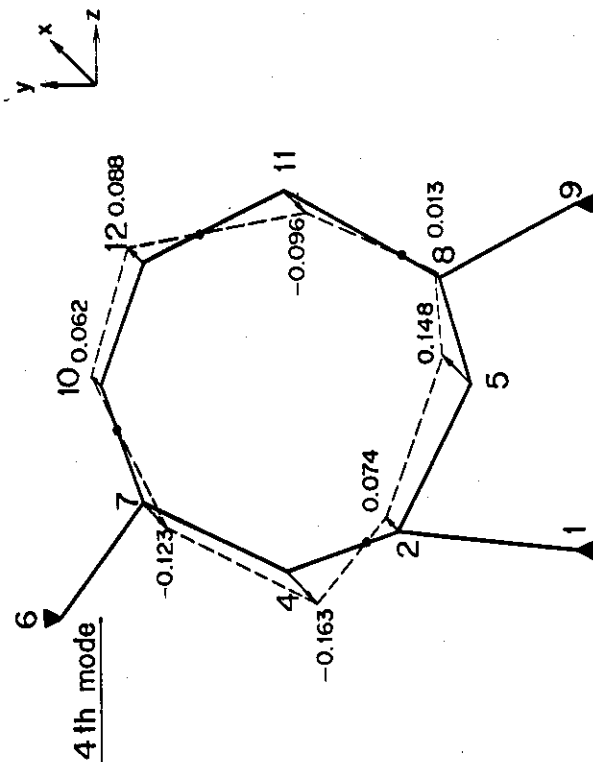
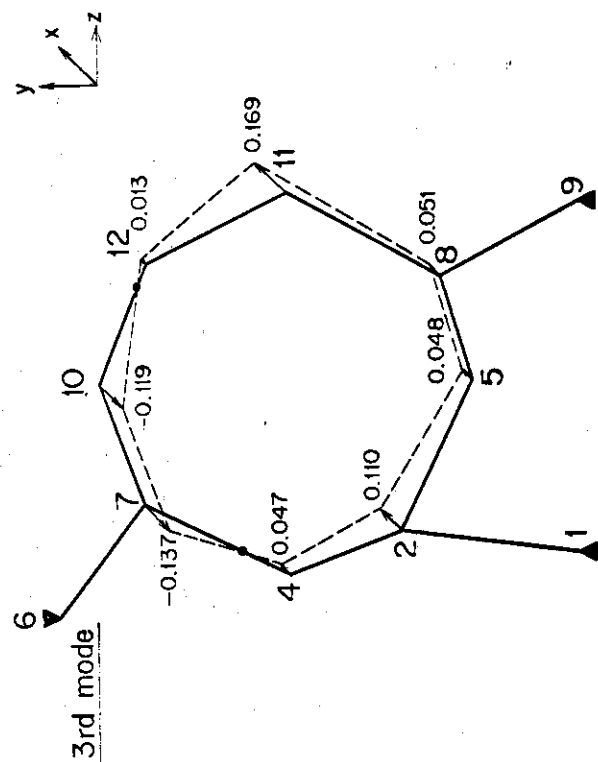
第 1.13 図 補強棒のモデル化における剛域の評価



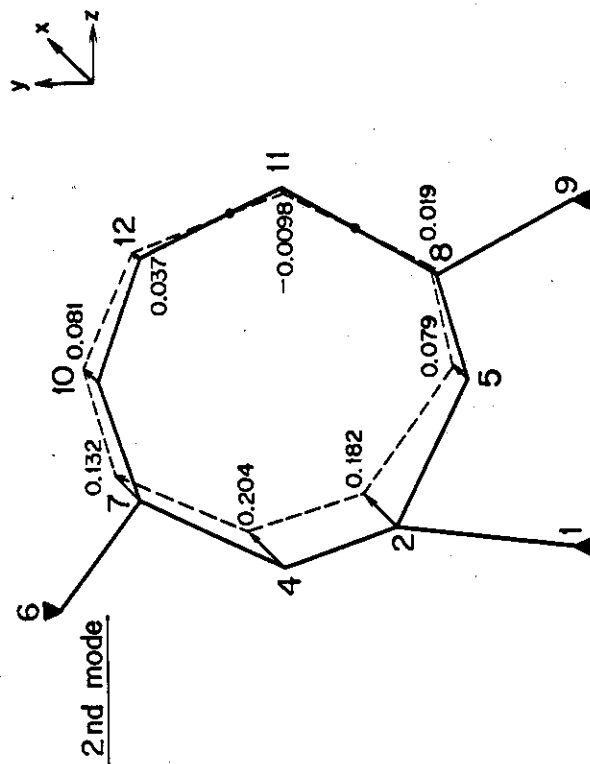
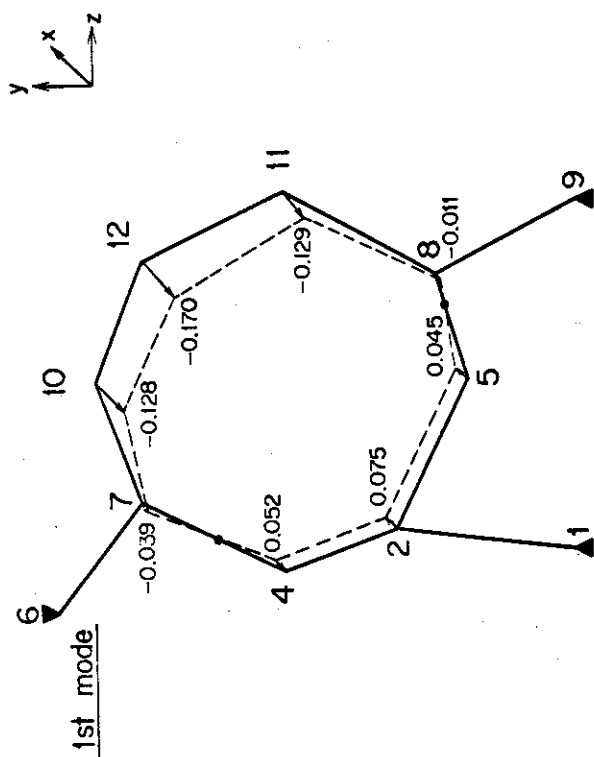
第 1.14 図 補強棒のモデル化における平面保持の効果



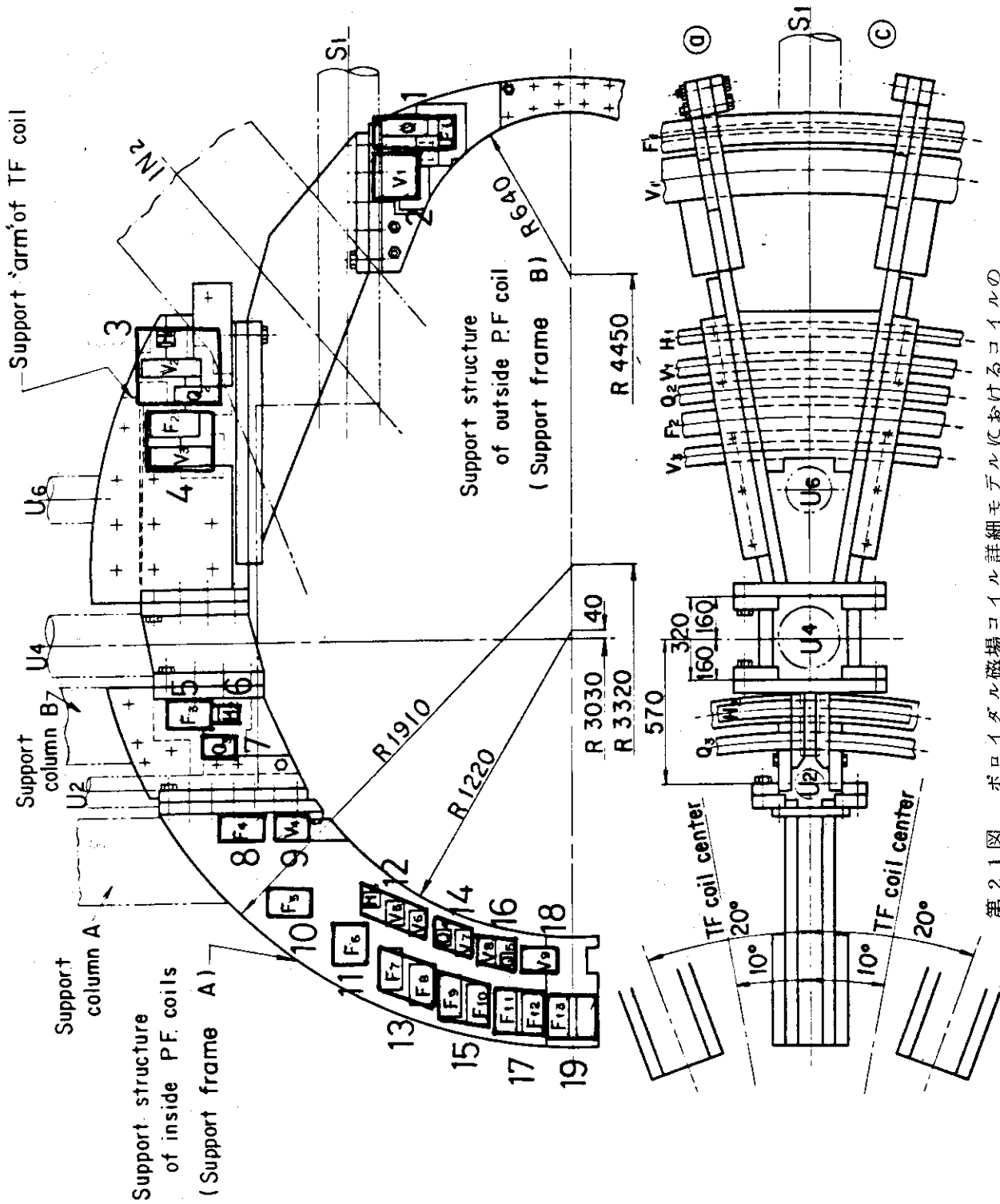
第 1.15 図 トロイダル磁場コイル簡略モデルの固有周期



第 1.17 図 トロイダル磁場コイル簡略モデル 3, 4 次固有振動モード



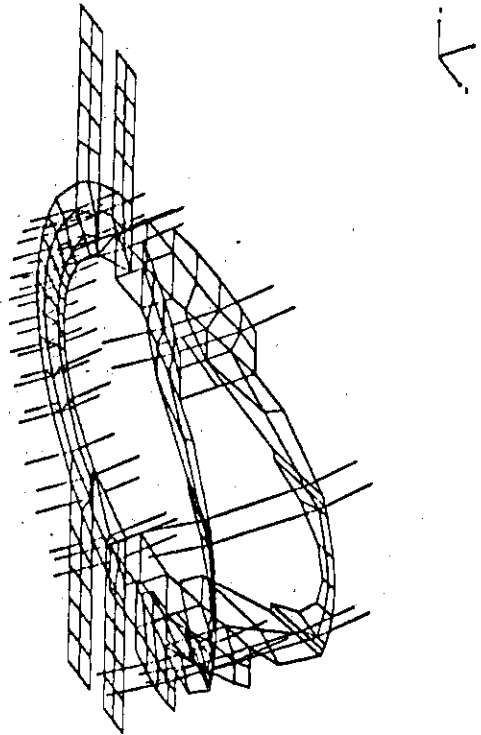
第 1.16 図 トロイダル磁場コイル簡略モデル 1, 2 次固有振動モード



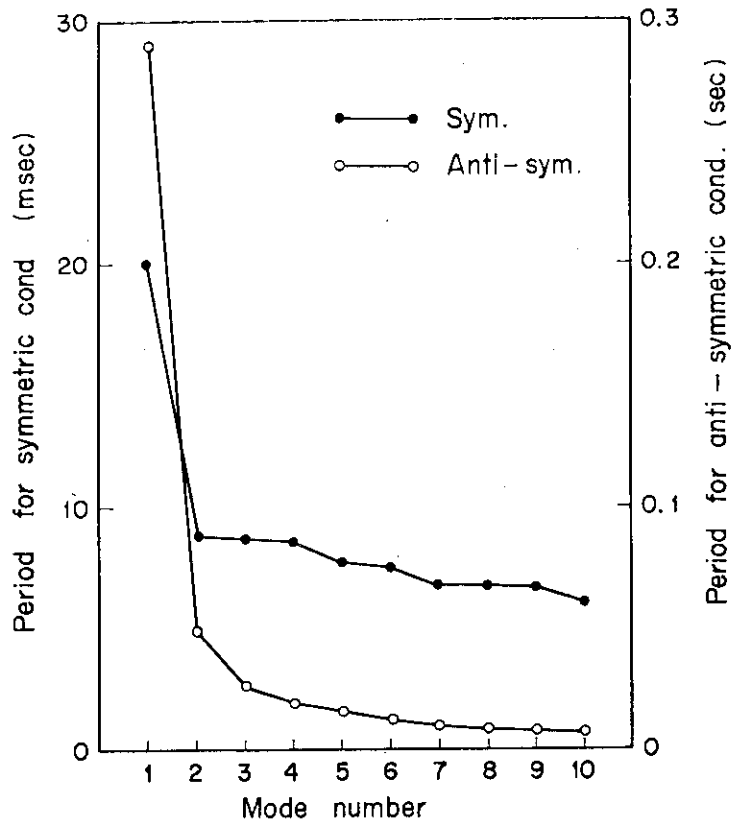
第 2.1 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデルにおけるコイルの  
グルーピング



POLOIDAL FIELD COIL / DETAILED MODEL / BIRD'S-EYE VIEW

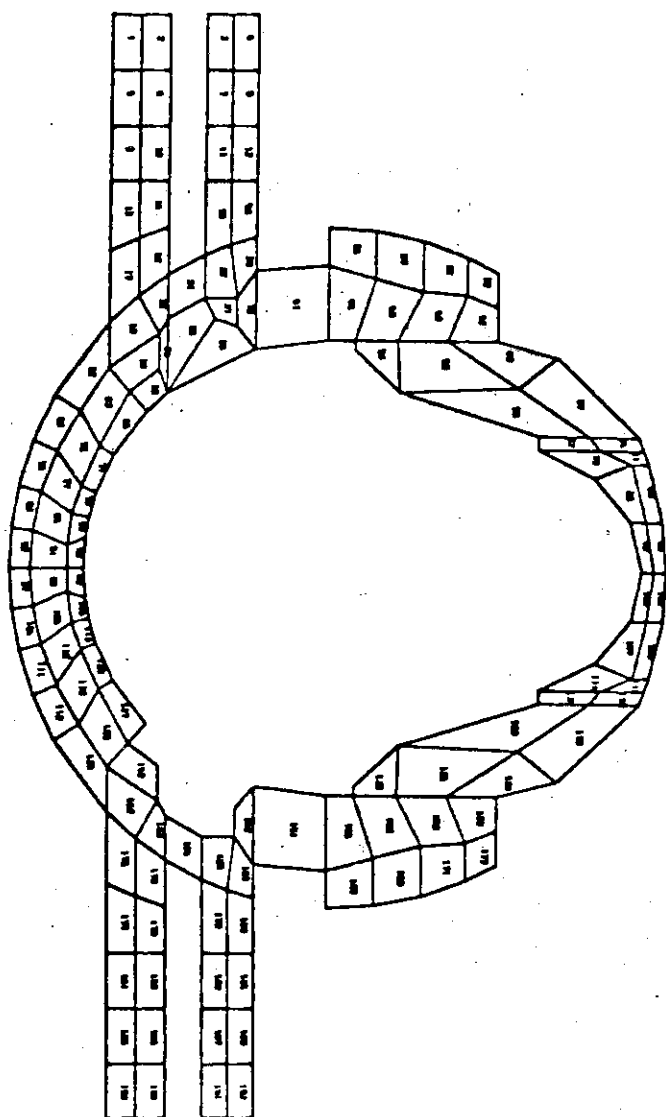
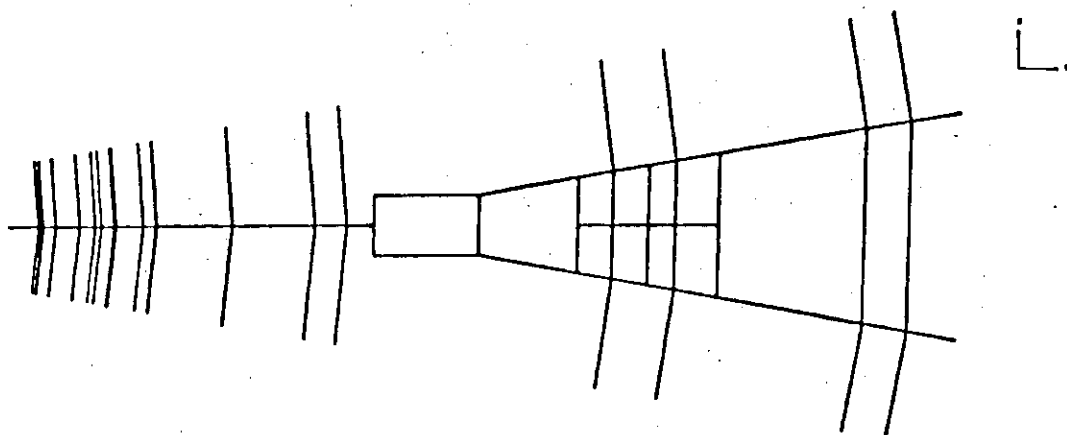


第 2.2 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル鳥瞰図



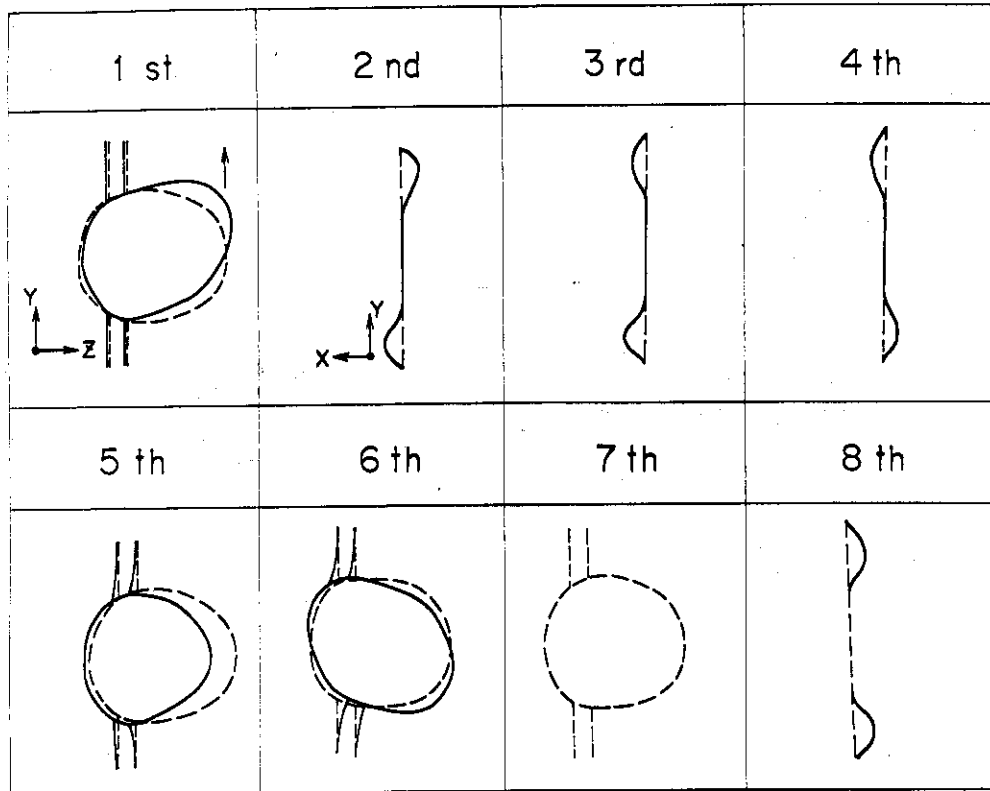
第 2.4 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル固有周期

POLOIDAL FIELD COIL / DETAILED MODEL / VERTICAL VIEW

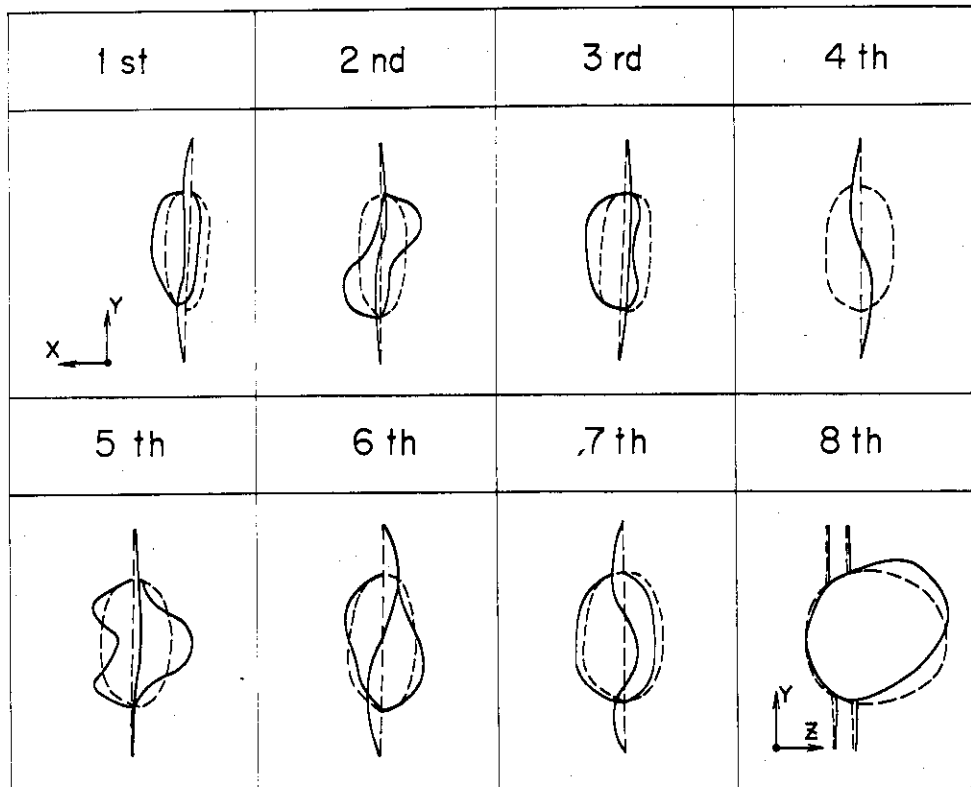


POLOIDAL FIELD COIL / DETAILED MODEL / HORIZONTAL VIEW

第 2.3 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル正面図及び平面図

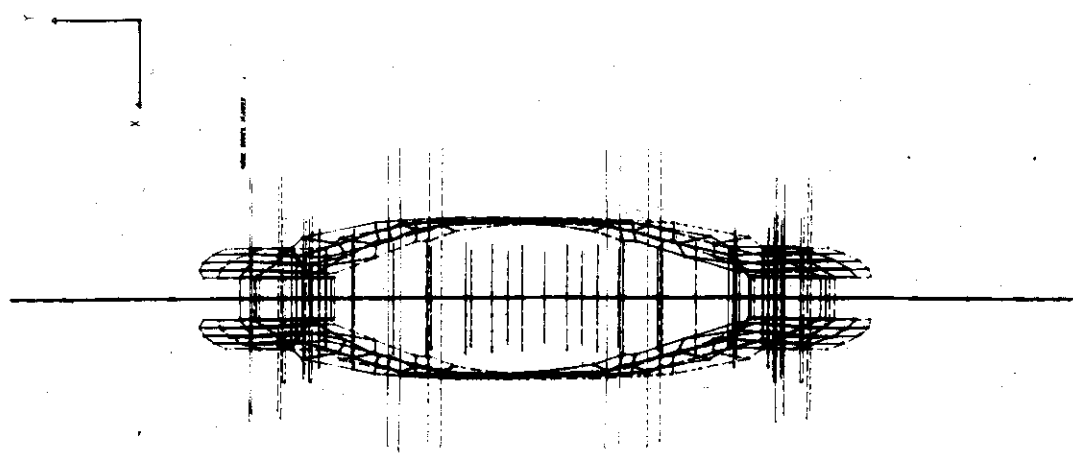


第 2.5 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル固有振動モード模式図 (対称境界条件)



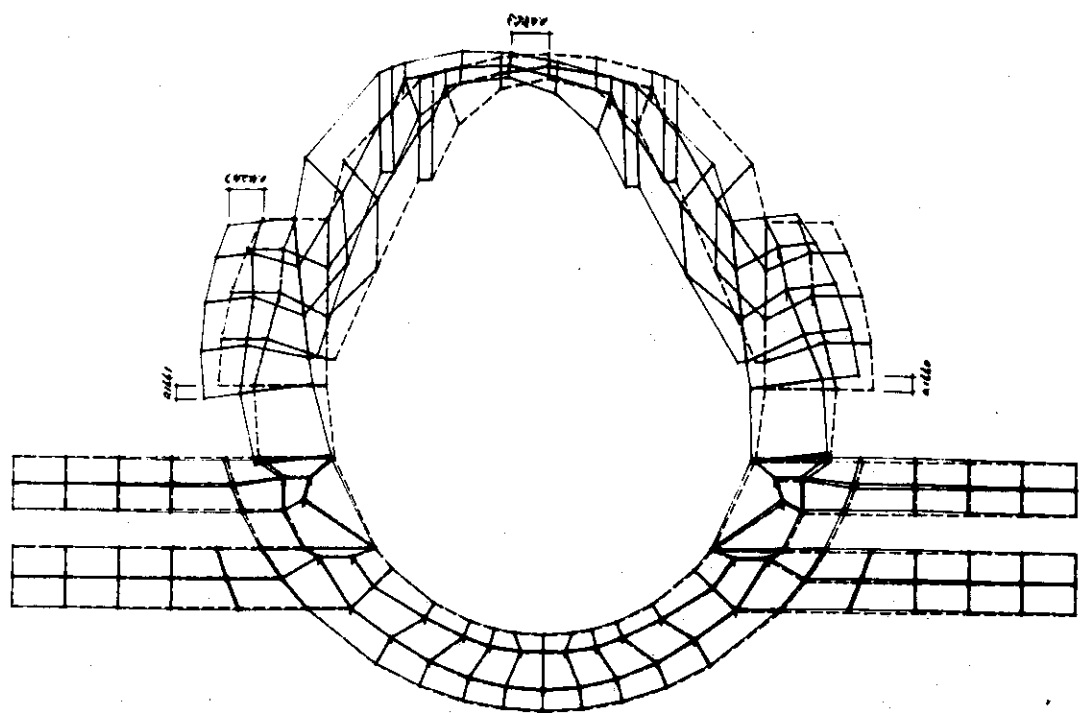
第 2.6 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル固有振動モード模式図 (逆対称境界条件)

POLOIDAL FIELD COIL EIGENVALUE



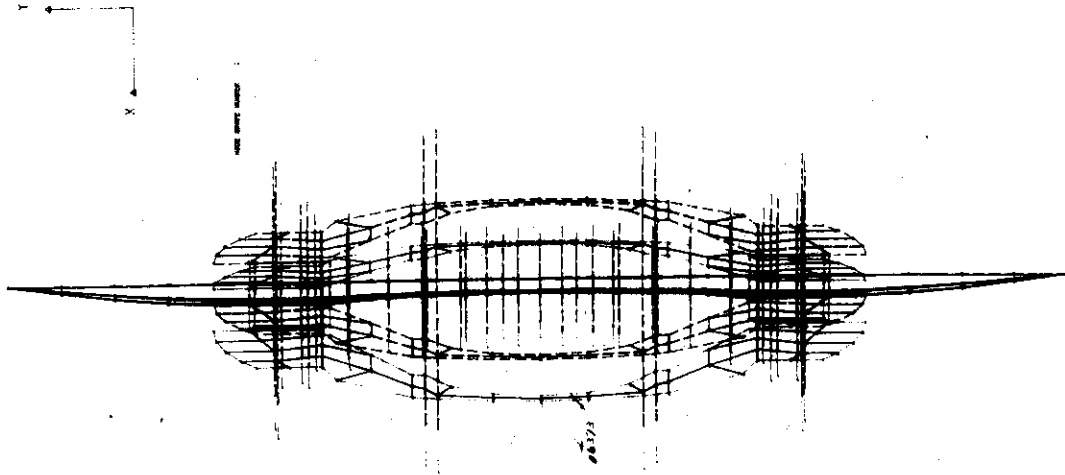
第 2.8 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)

POLOIDAL FIELD COIL EIGENVALUE



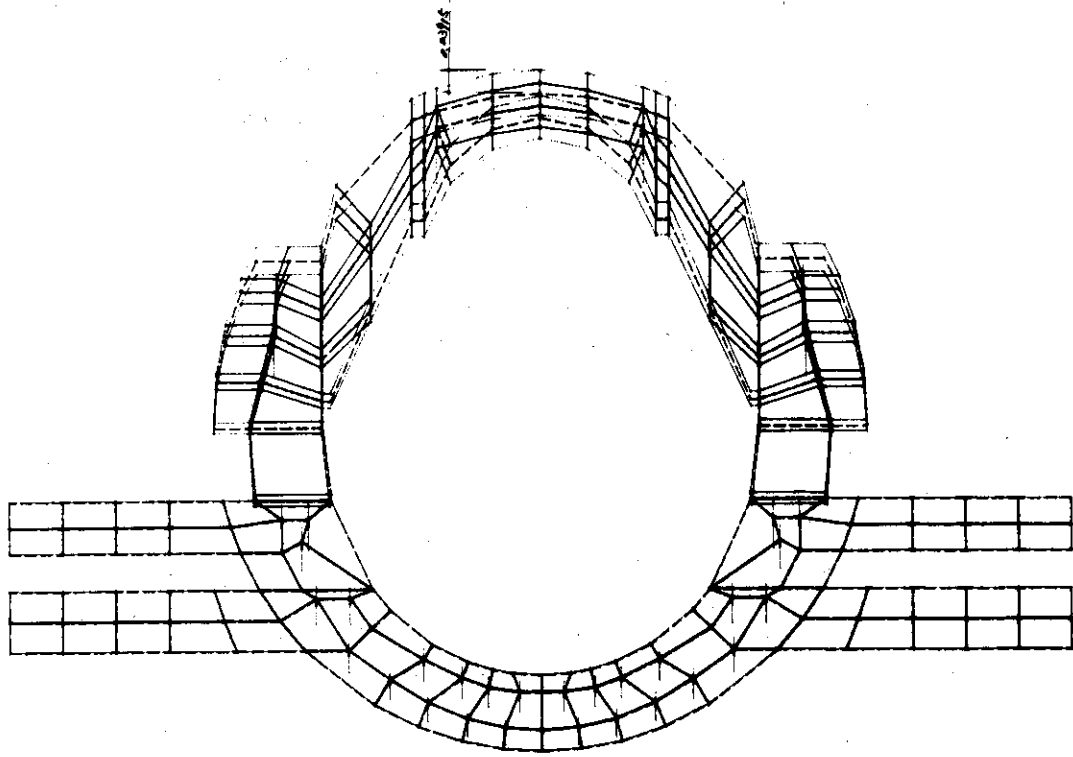
第 2.7 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)

POLOIDAL FIELD COIL EIGENVALUE

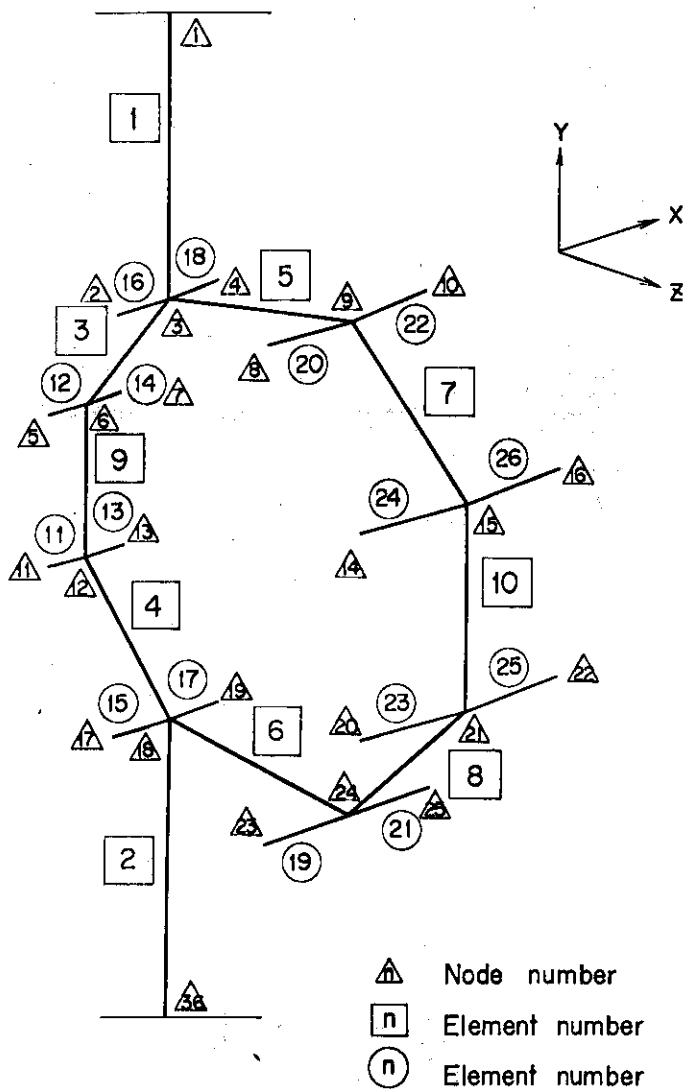


第 2.10 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )

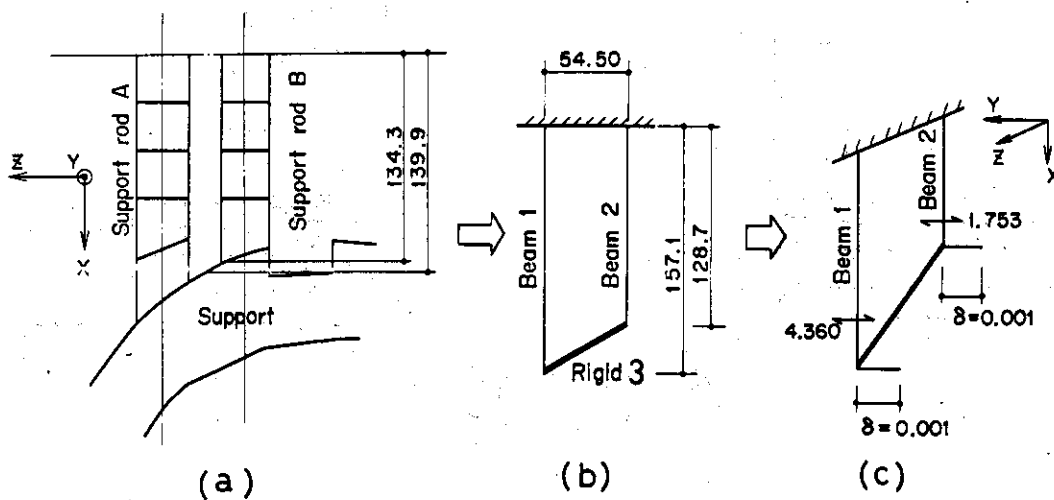
POLOIDAL FIELD COIL EIGENVALUE



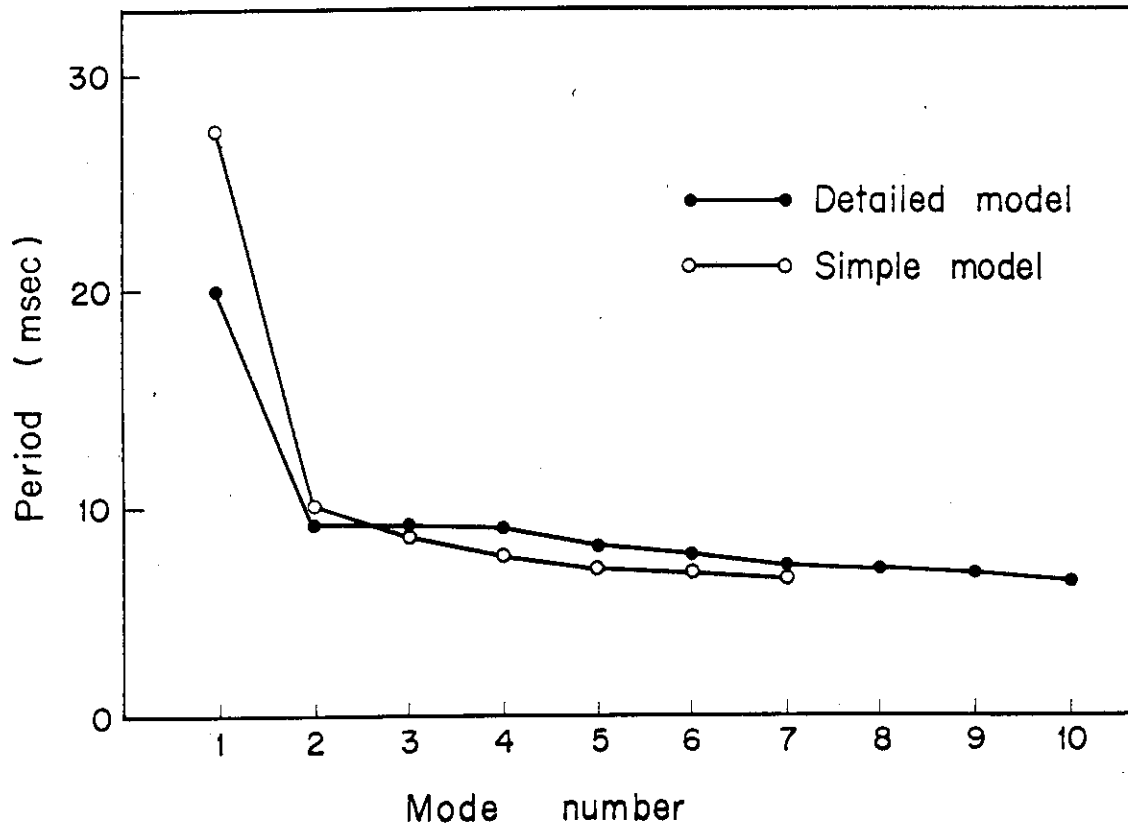
第 2.9 図 ポロイダル磁場コイル詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )



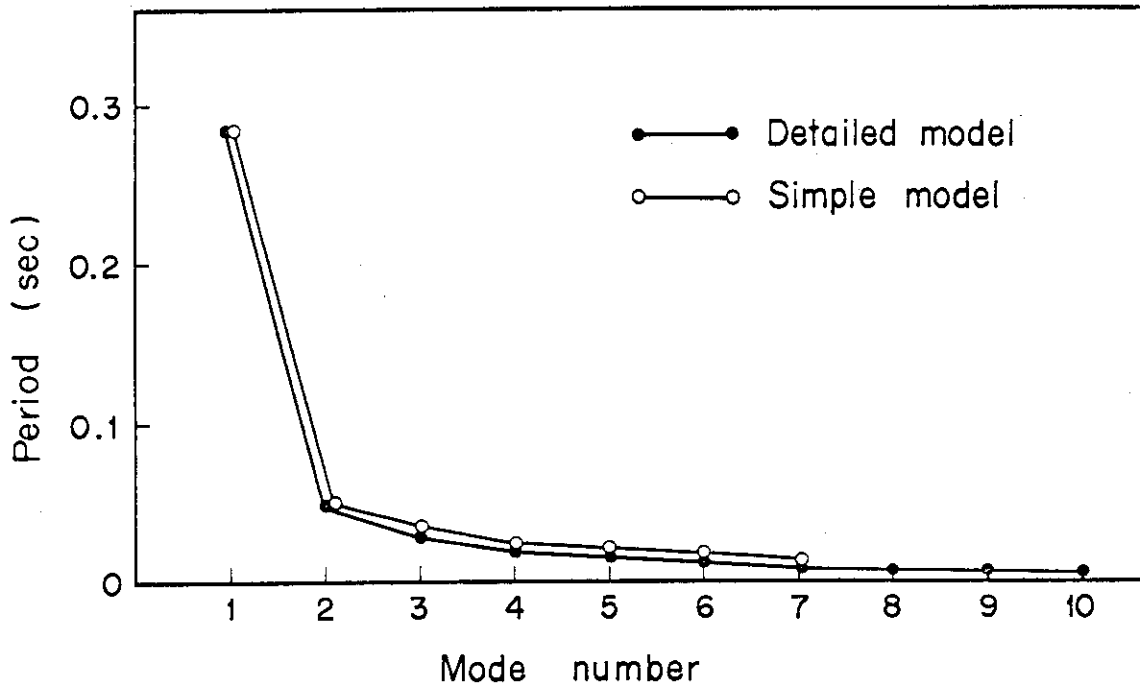
第 2.11 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル模式図



第 2.12 図 支持柱のモデル化

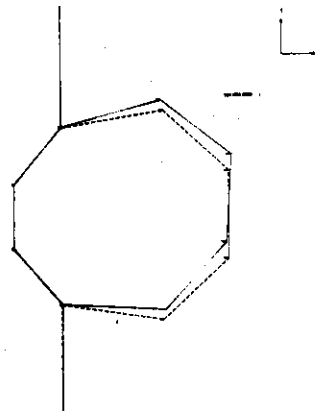


第 2.13 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル固有周期  
(対称境界条件)



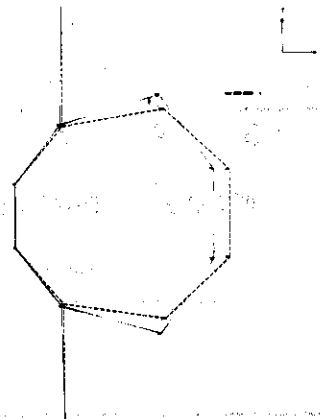
第 2.14 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル固有周期  
(逆対称境界条件)

POLIGONAL COIL SIMPLE MODEL



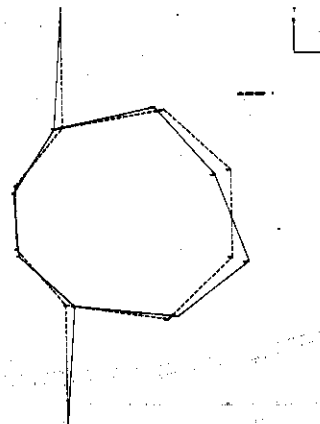
第 2.15 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)

POLIGONAL COIL SIMPLE MODEL



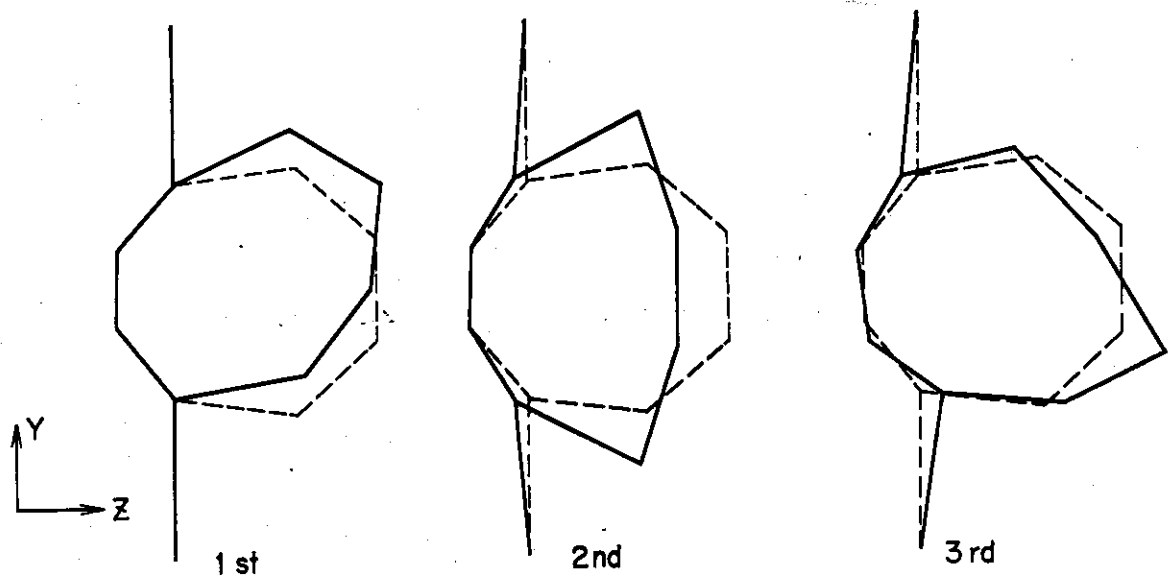
第 2.16 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 2 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)

POLIGONAL COIL SIMPLE MODEL



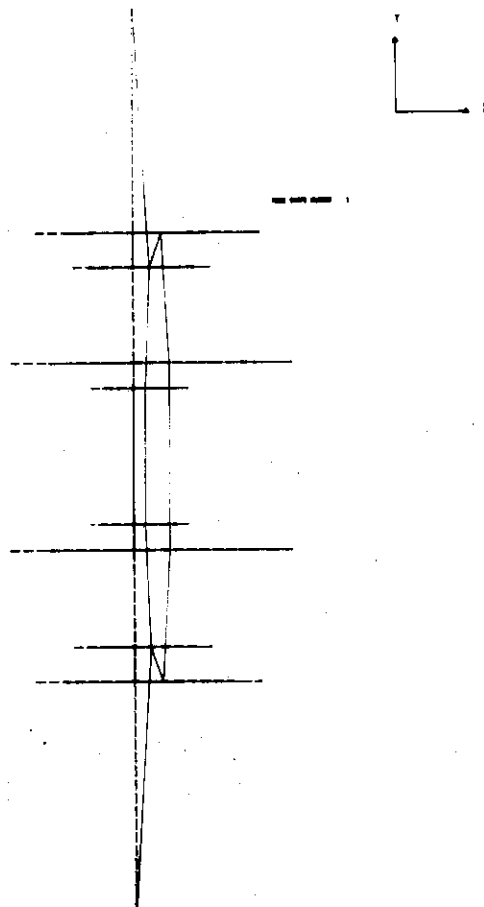
第 2.17 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 3 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)





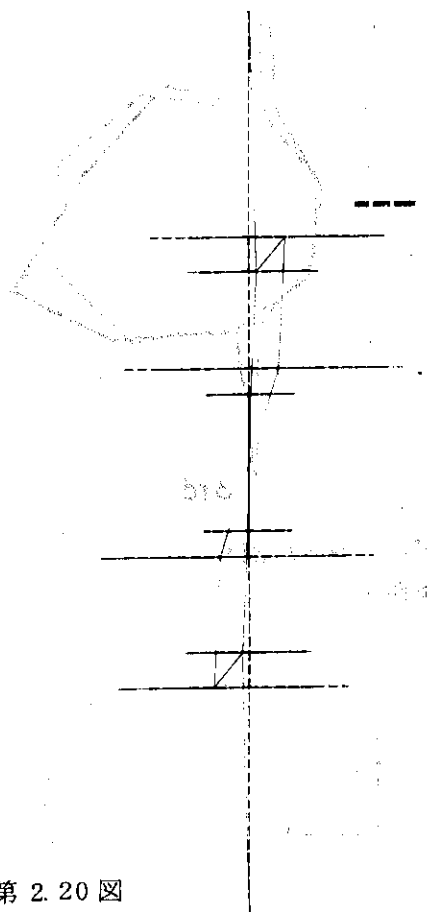
第 2.18 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1～3 次固有振動モード模式図 (対称境界条件)

POLOIDAL COIL SIMPLE MODEL



第 2.19 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (逆対称境界条件)

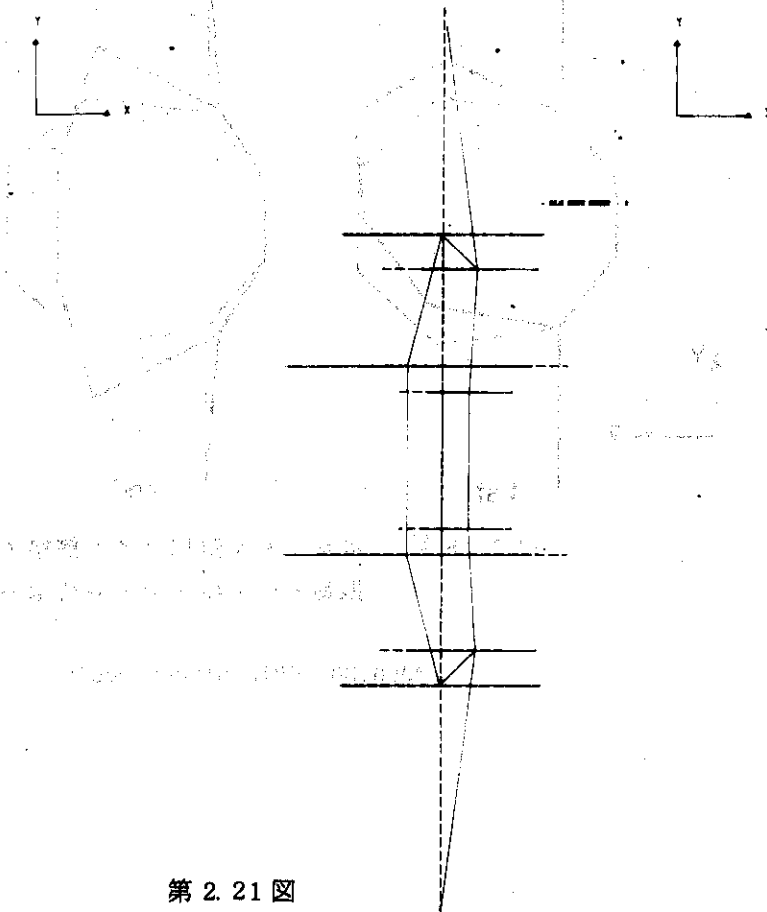
POLOIDAL COIL SIMPLE MODEL



第 2.20 図

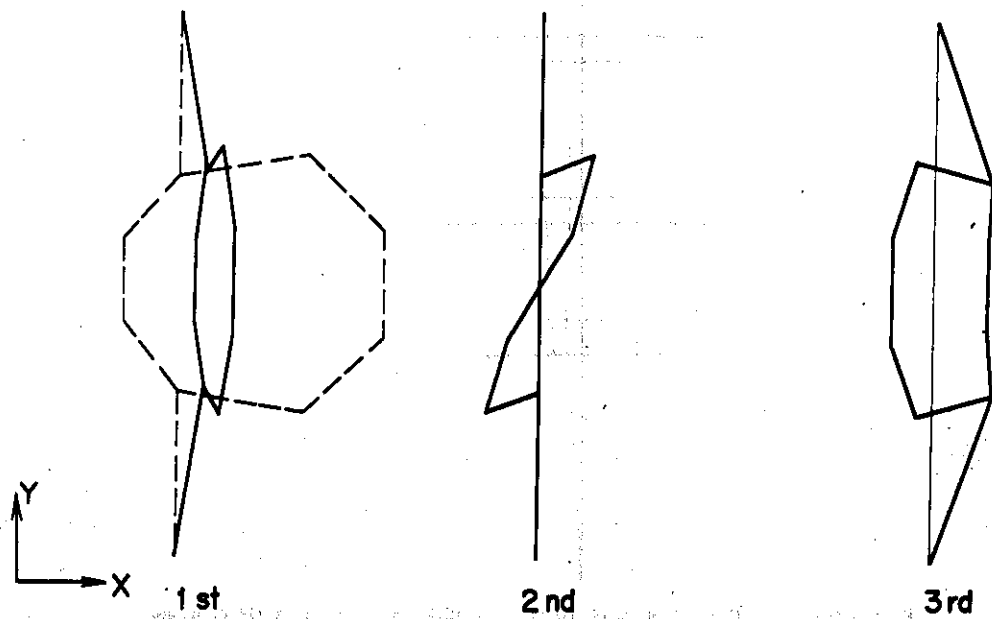
ポロイダル磁場コイル簡略モデル 2 次固有振動モード，プロッタ出力図（逆対称境界条件）

POLOIDAL COIL SIMPLE MODEL

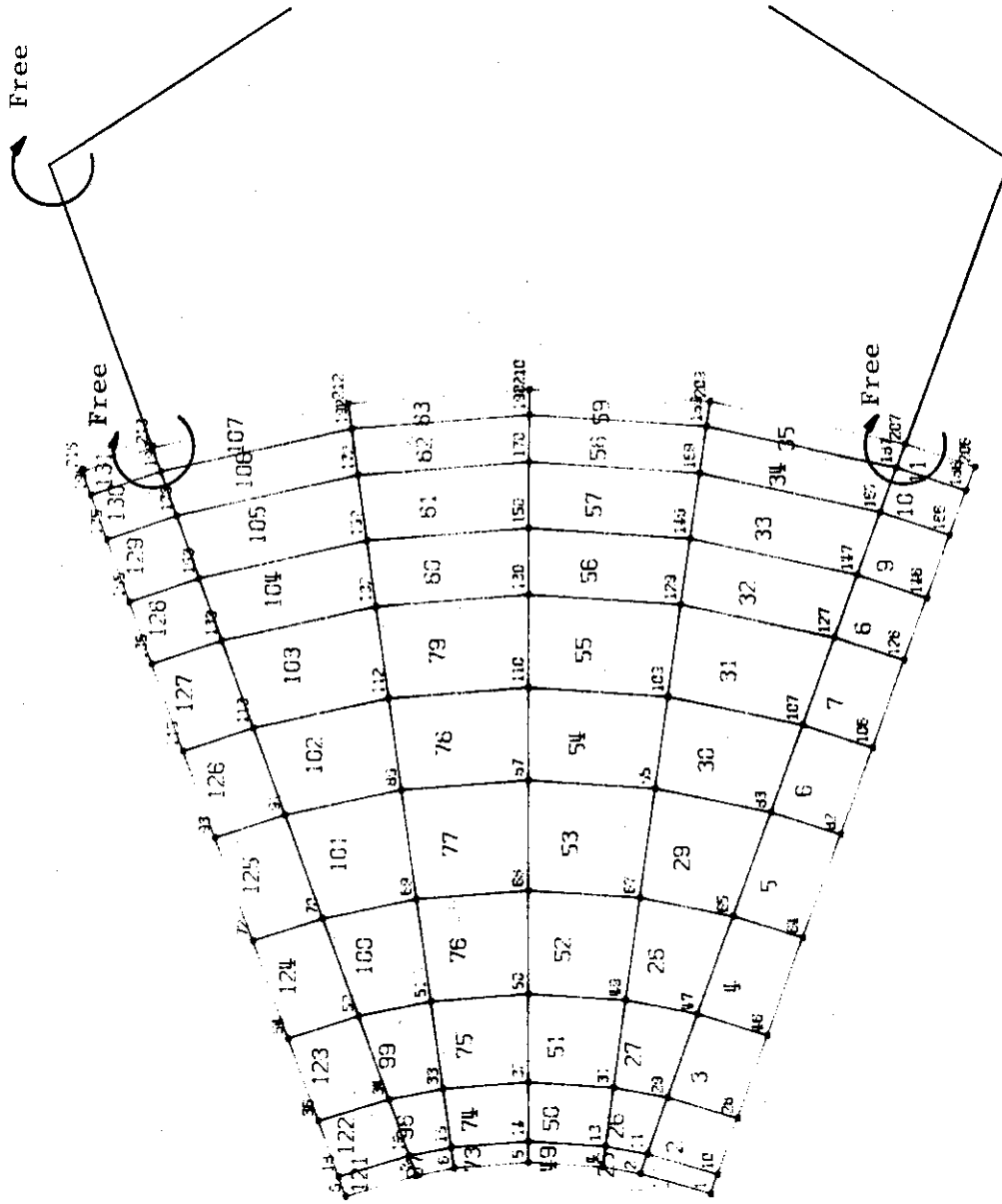


第 2.21 図

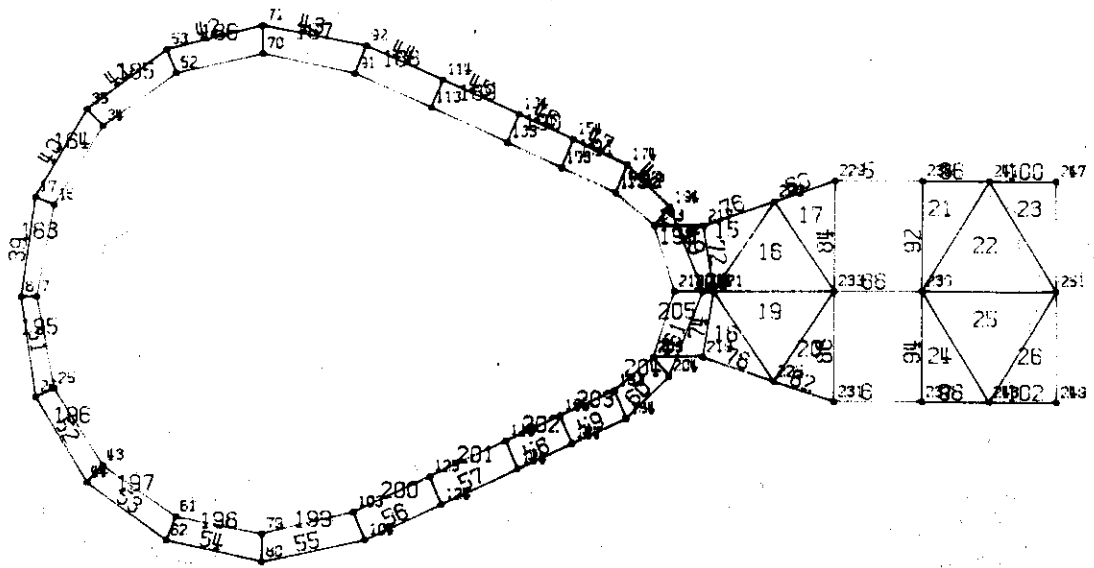
ポロイダル磁場コイル簡略モデル 3 次固有振動モード，プロッタ出力図（逆対称境界条件）



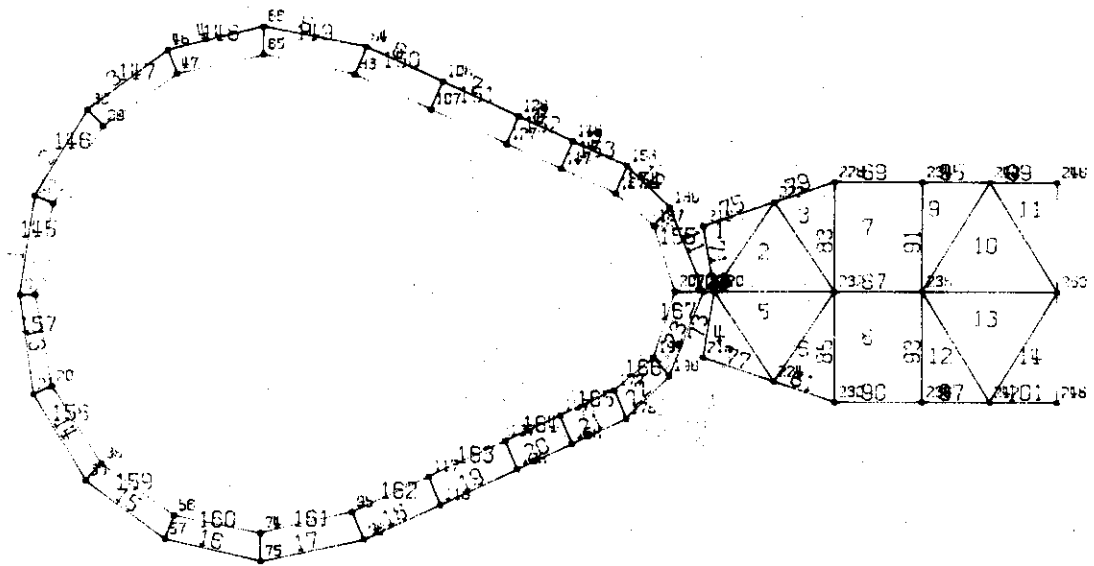
第 2.22 図 ポロイダル磁場コイル簡略モデル 1～3 次固有振動モード模式図（逆対称境界条件）



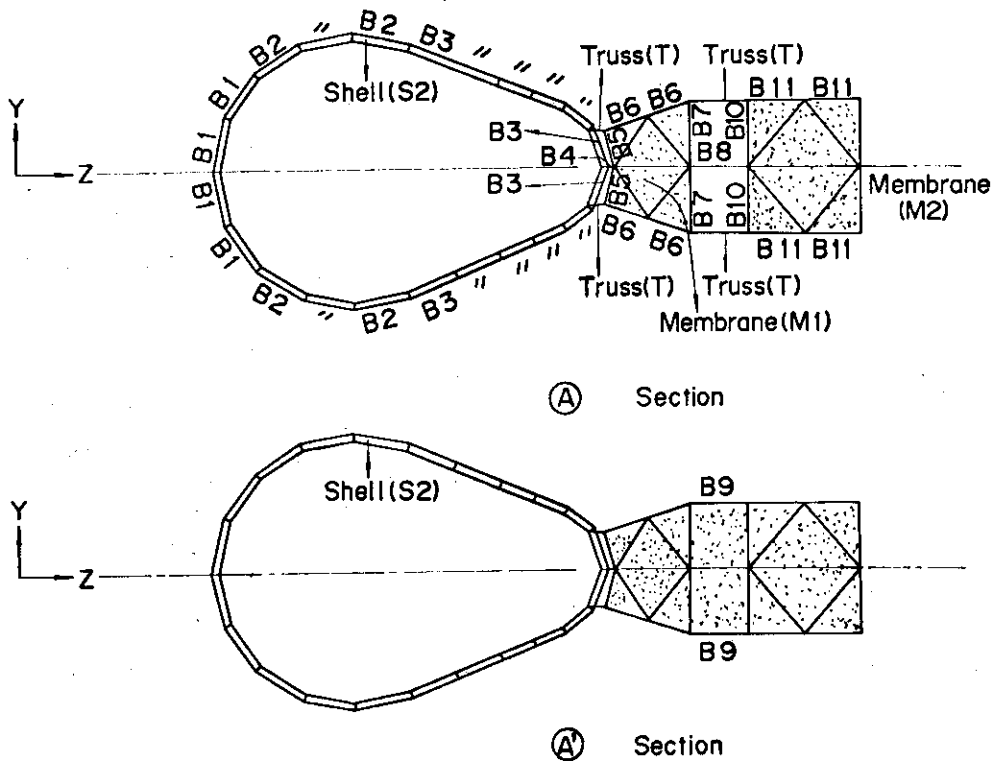
第 3.1 図 真空容器 40°セクタ詳細モデルプロット出力図  
(平面図)



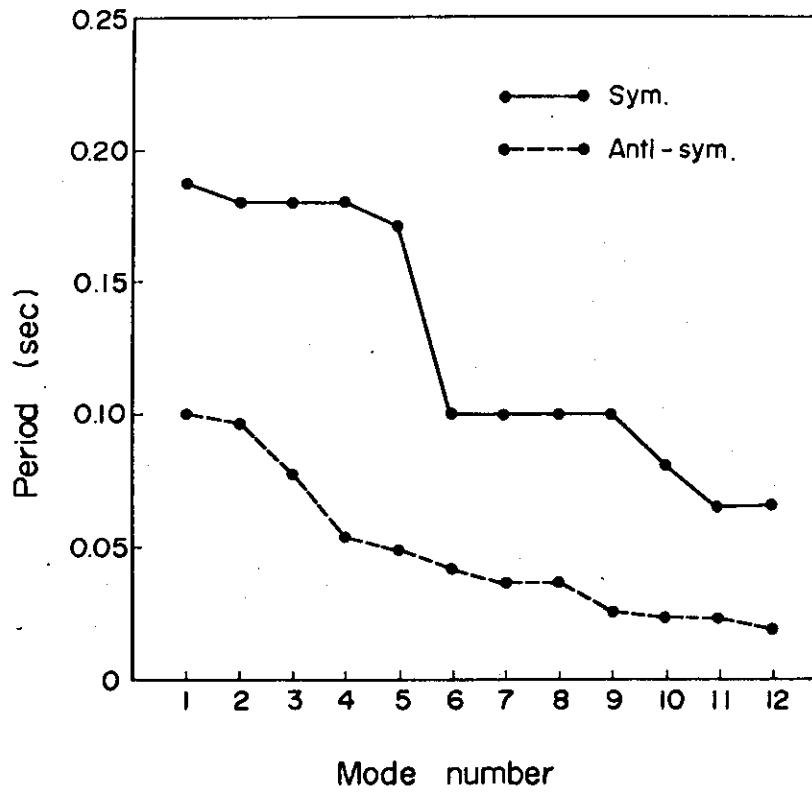
第 3.2 図 真空容器 40°セクタ詳細モデルプロッタ出力図  
( A 部断面図 )



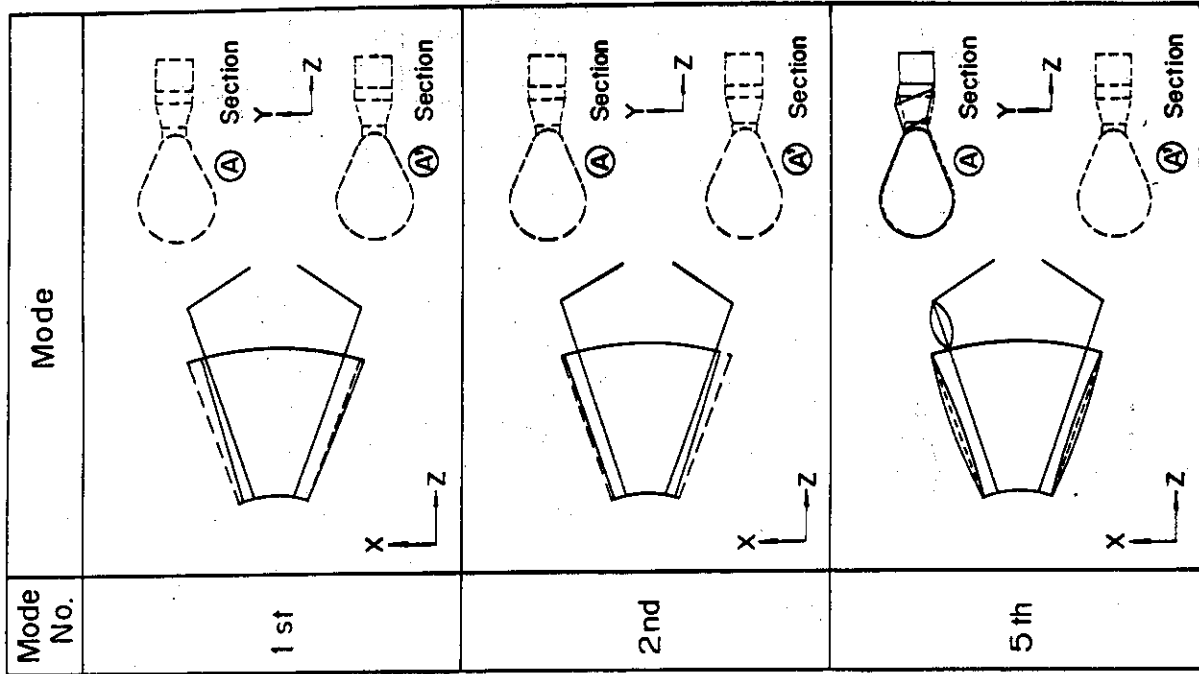
第 3.3 図 真空容器 40°セクタ詳細モデルプロッタ出力図  
( A' 部断面図 )



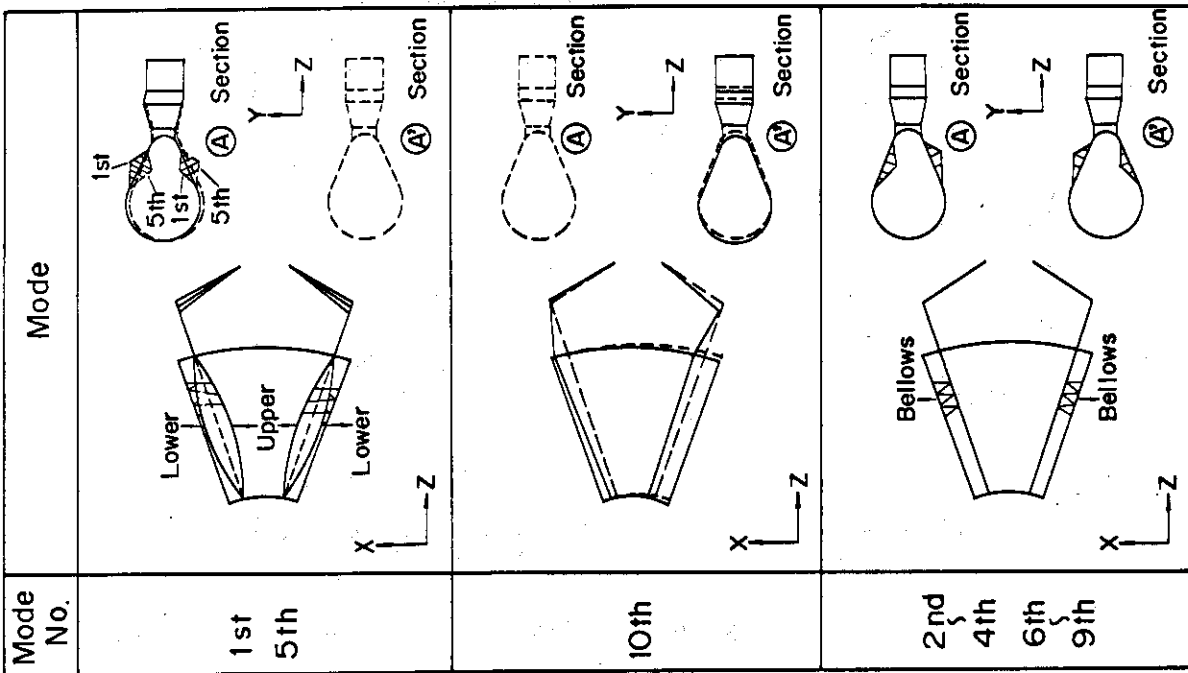
第 3.4 図 真空容器支持アーム部モデル図



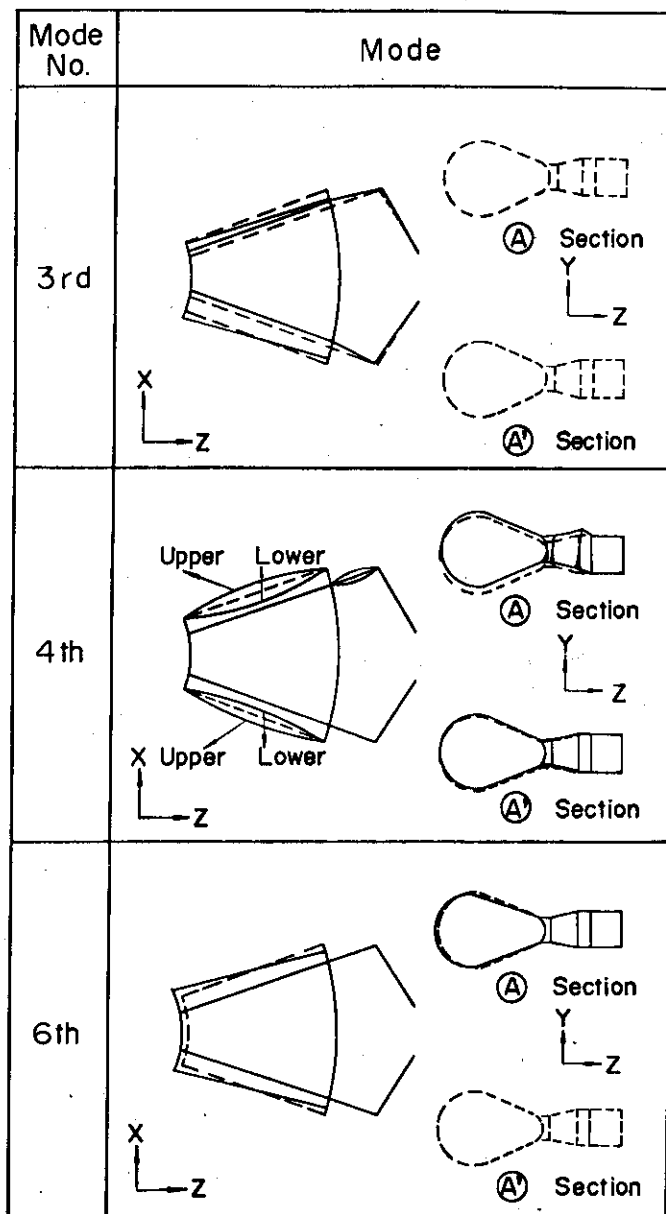
第 3.5 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有周期



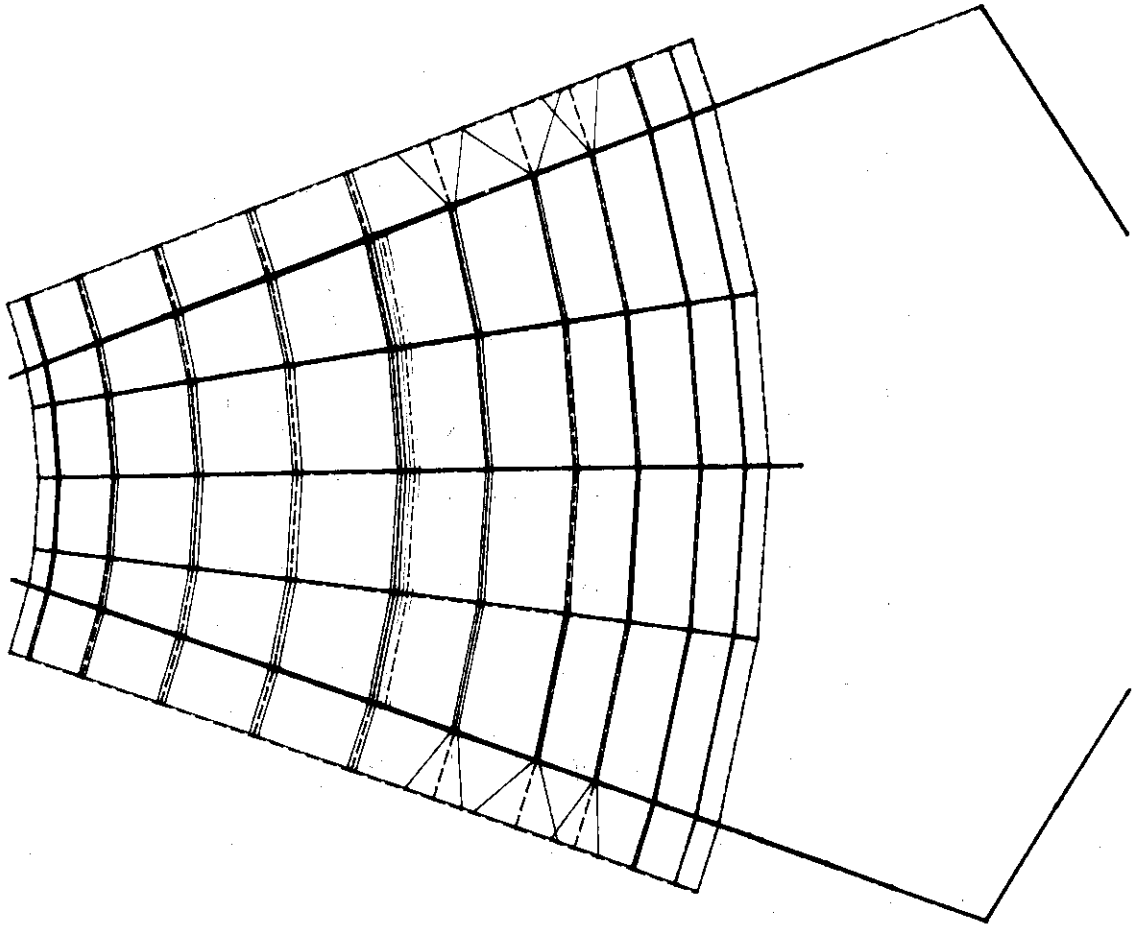
第 3.7 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図  
( 対称境界条件 )



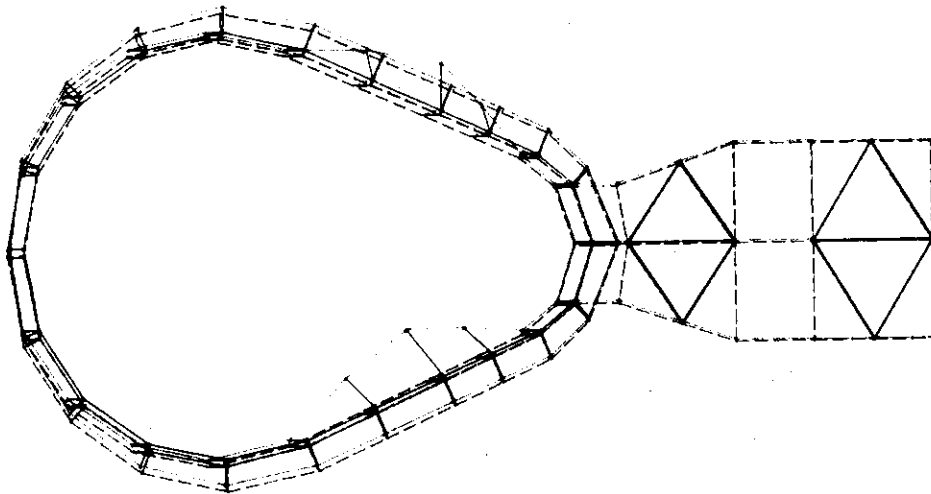
第 3.6 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図  
( 対称境界条件 )



第 3.8 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル固有振動モード模式図  
( 逆対称境界条件 )

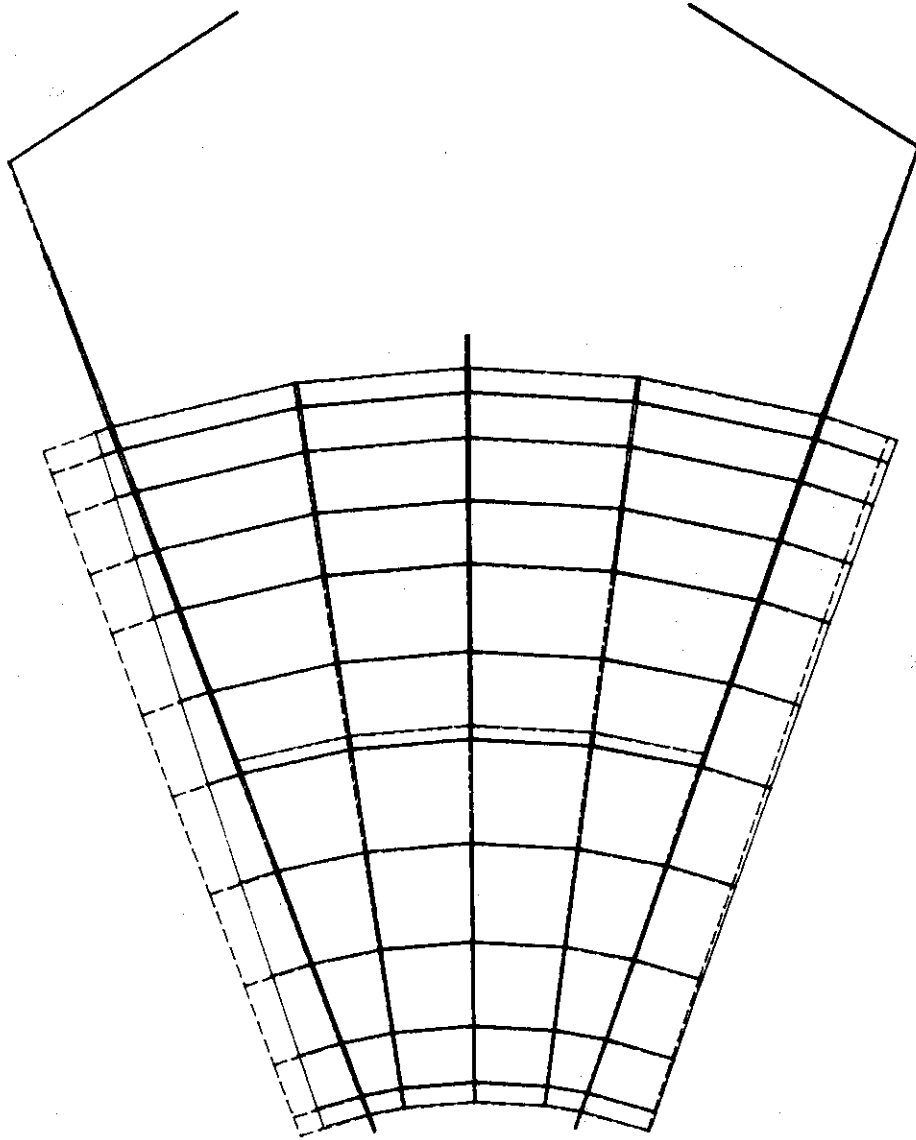


第 3.9 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード,  
プロッタ出力図 (対称境界条件)



第 3.10 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード,  
プロッタ出力図 (対称境界条件)

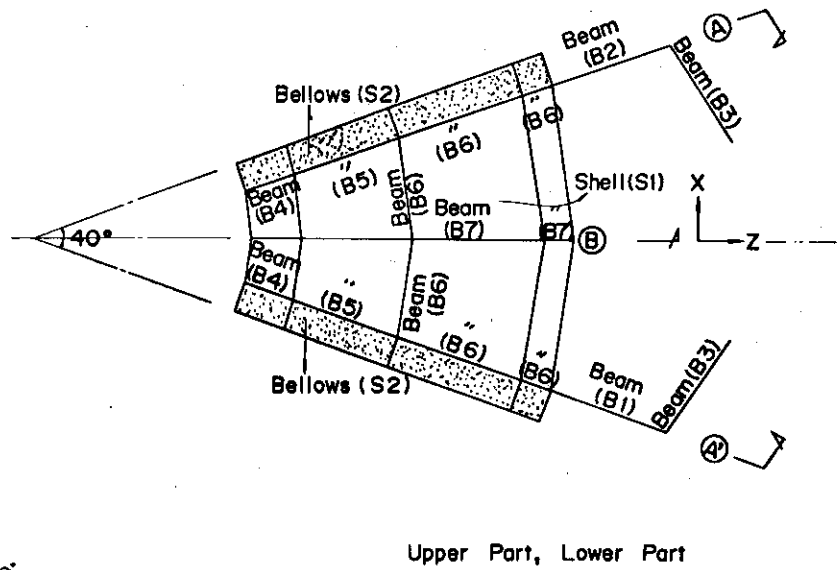




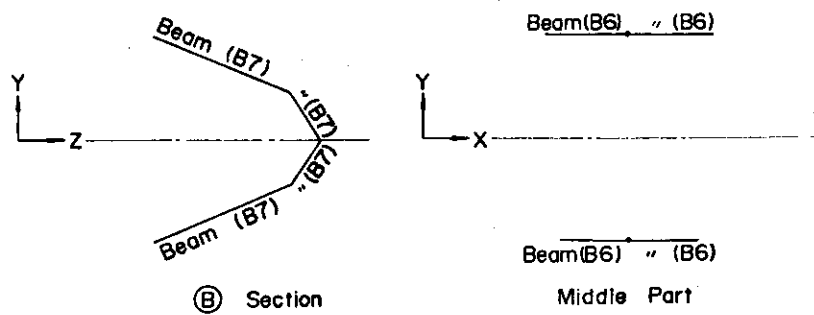
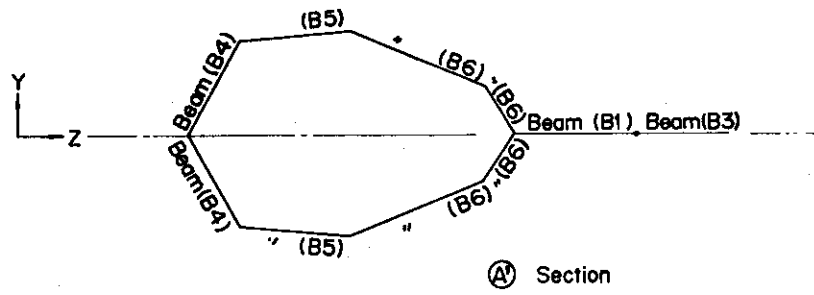
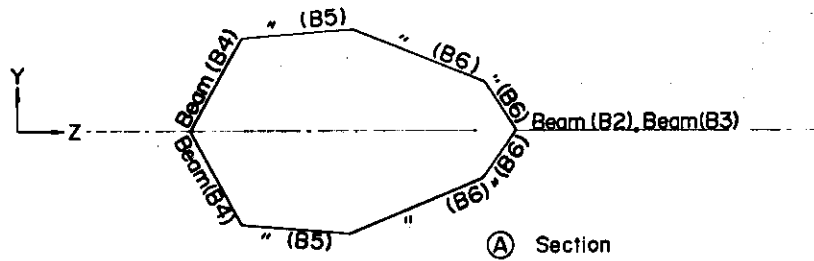
第 3.11 図 真空容器 40°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード、  
プロッタ出力図 ( 逆対称境界条件 )



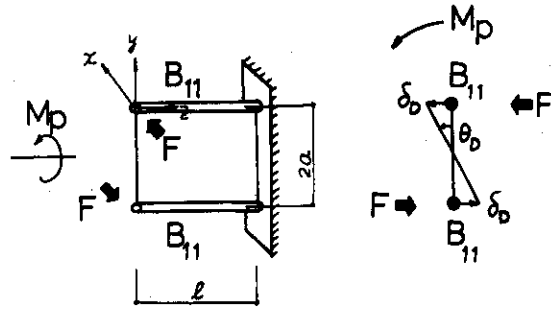
第3.12図 厚肉リングとベローズの2質点バネ・マスモデル



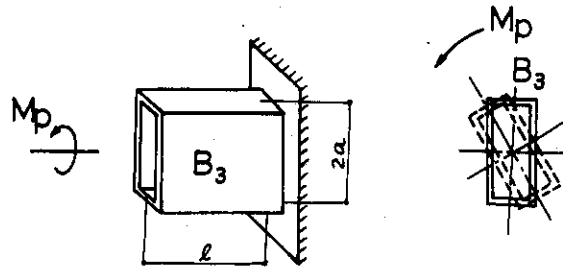
第3.13図 真空容器40°セクタ簡略モデル模式図(平面図)



第3.14図 真空容器40°セクタ簡略モデル模式図(断面図)

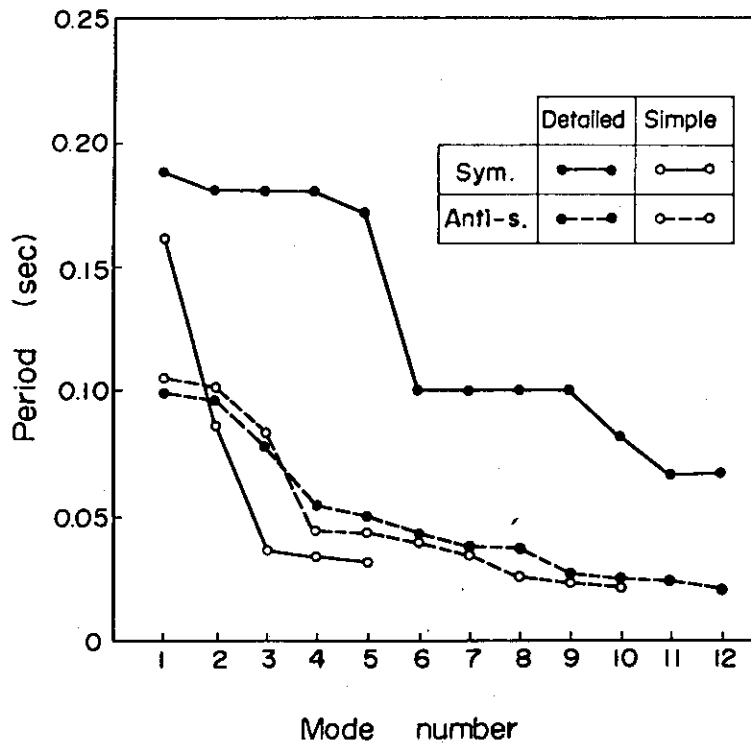


(a) Detailed model

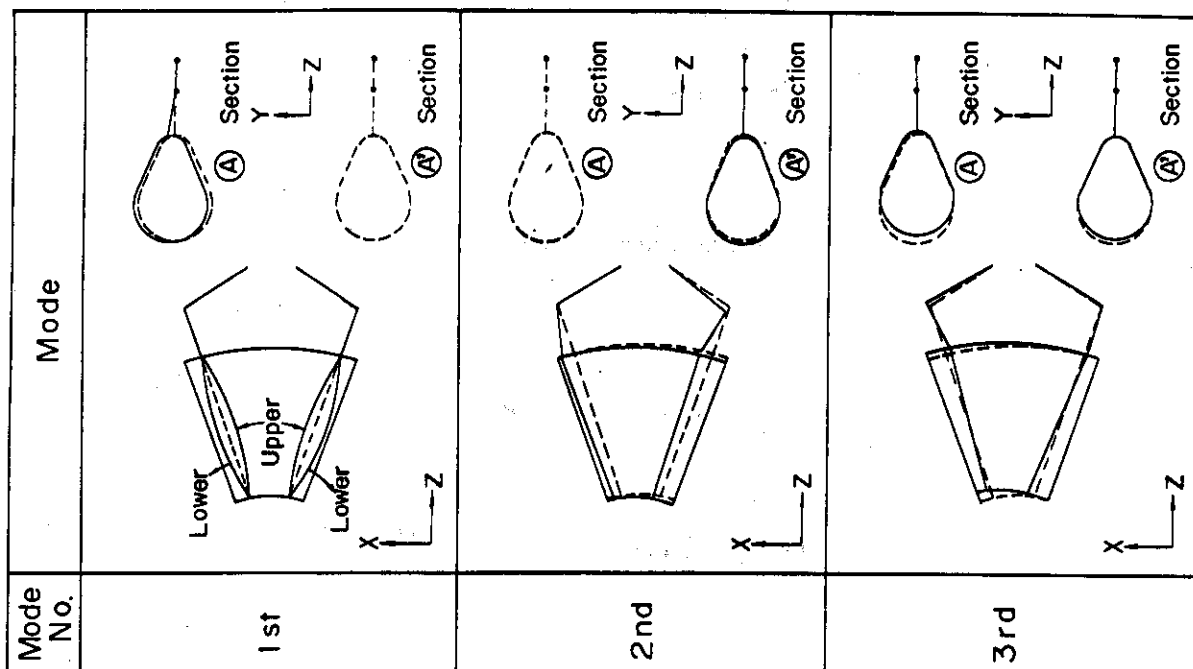


(b) Simple model

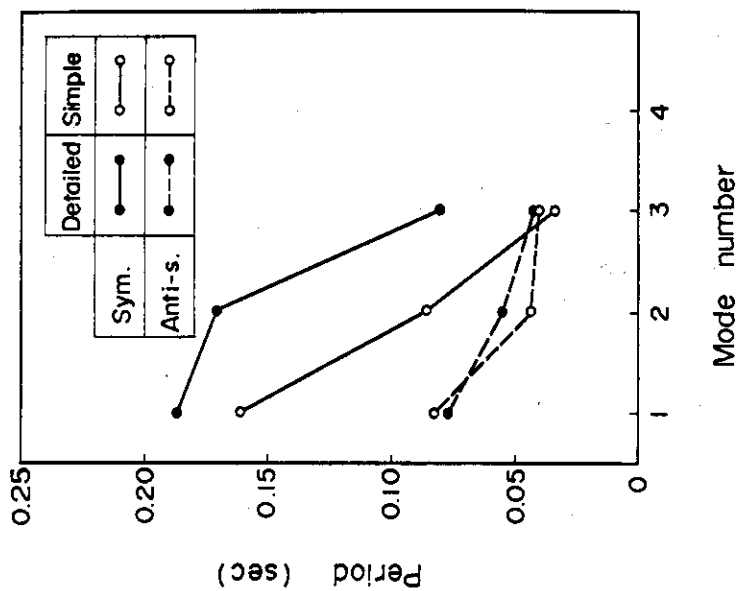
第 3.15 図 真空容器支持アームのモデル化



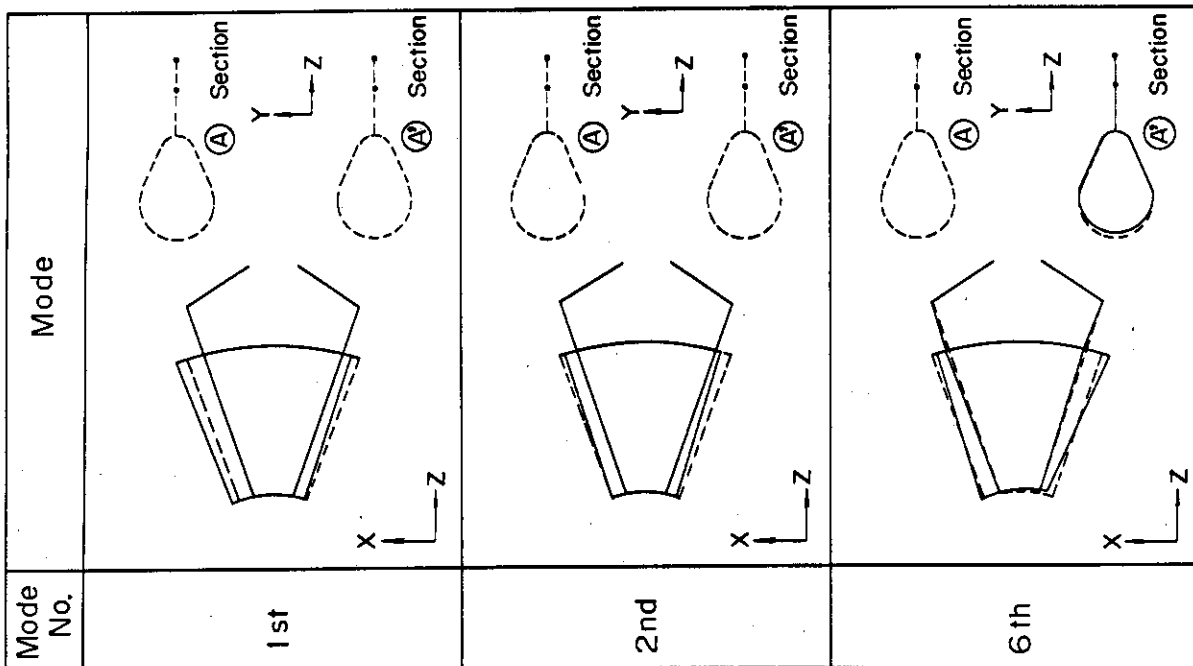
第 3.16 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有周期



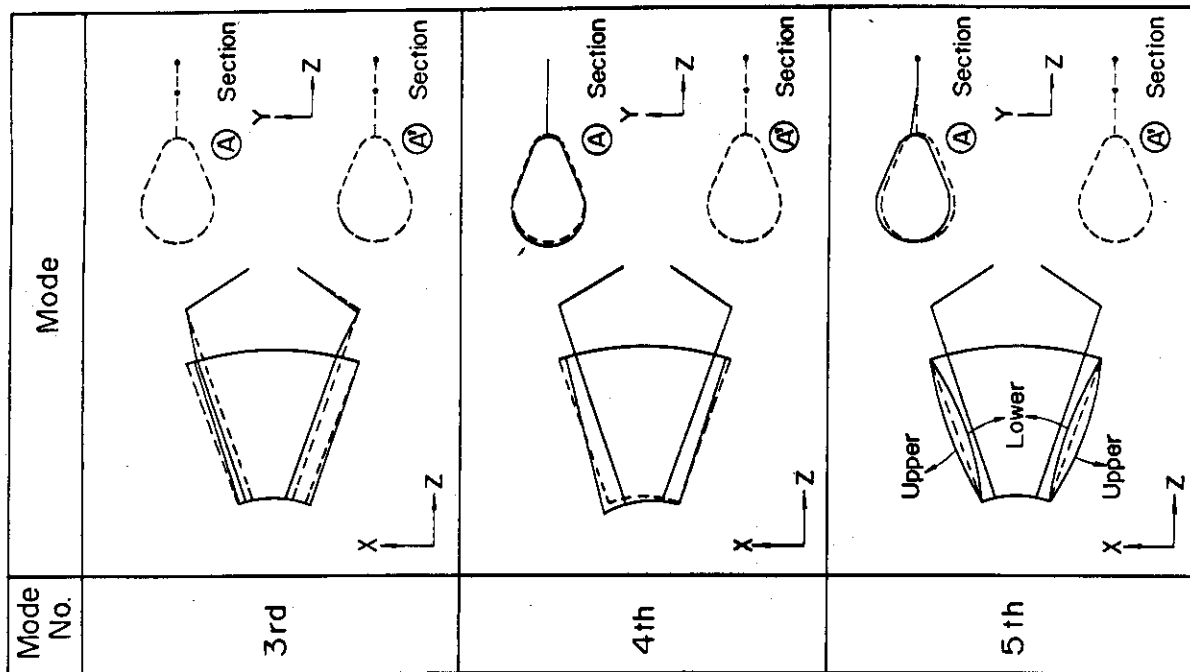
第 3.18 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル 1~3 次固有振動モード模式図 (対称境界条件)



第 3.17 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有周期 (一般振動モード)

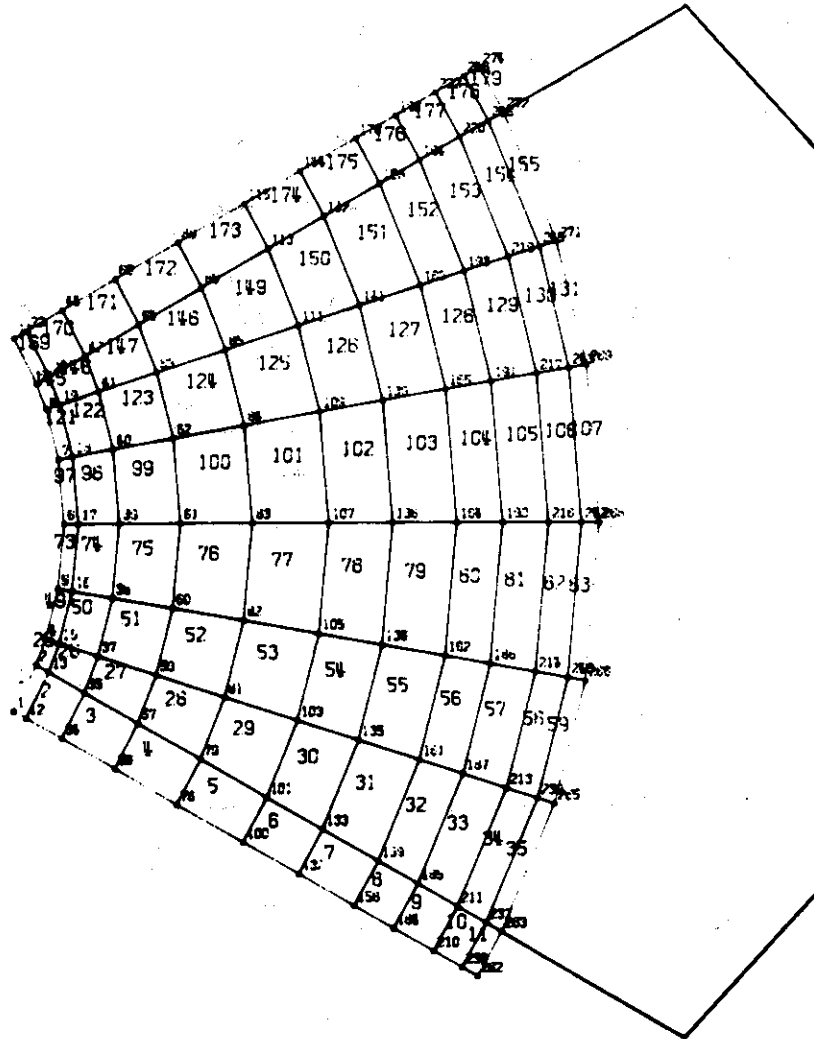


第 3.19 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有振動モード  
模式図 ( 逆対称境界条件 )

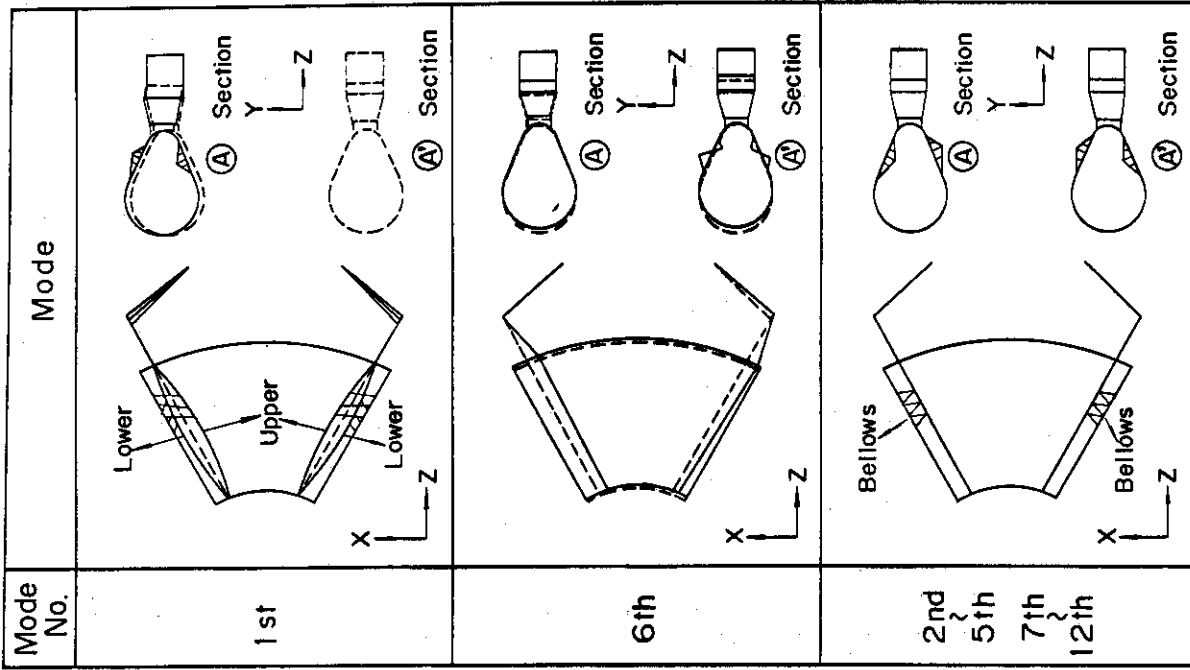


第 3.20 図 真空容器 40°セクタ簡略モデル固有振動モード  
模式図 ( 逆対称境界条件 )

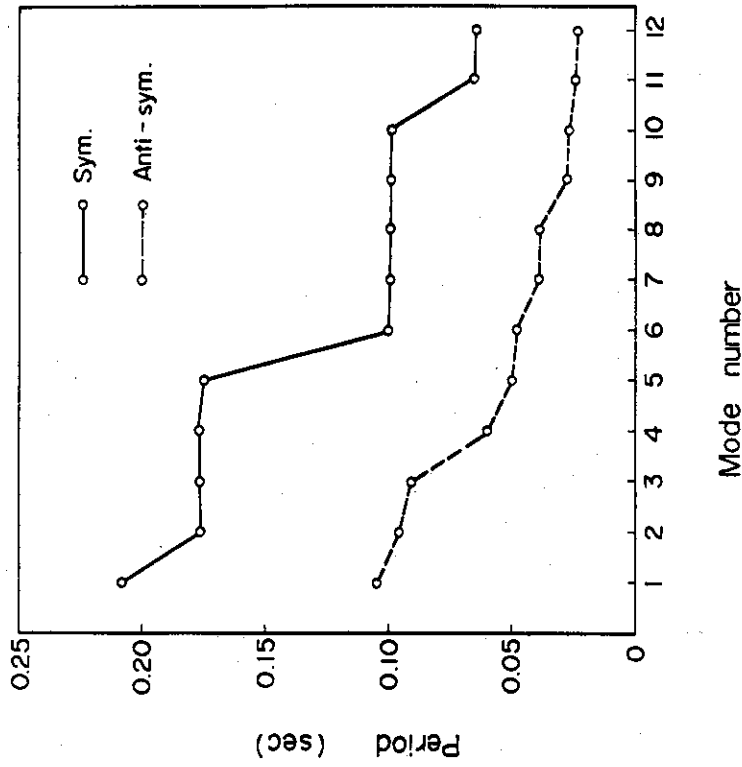
VACUUM VESSEL 60 DEG. / DETAILED MODEL / UPPER PART



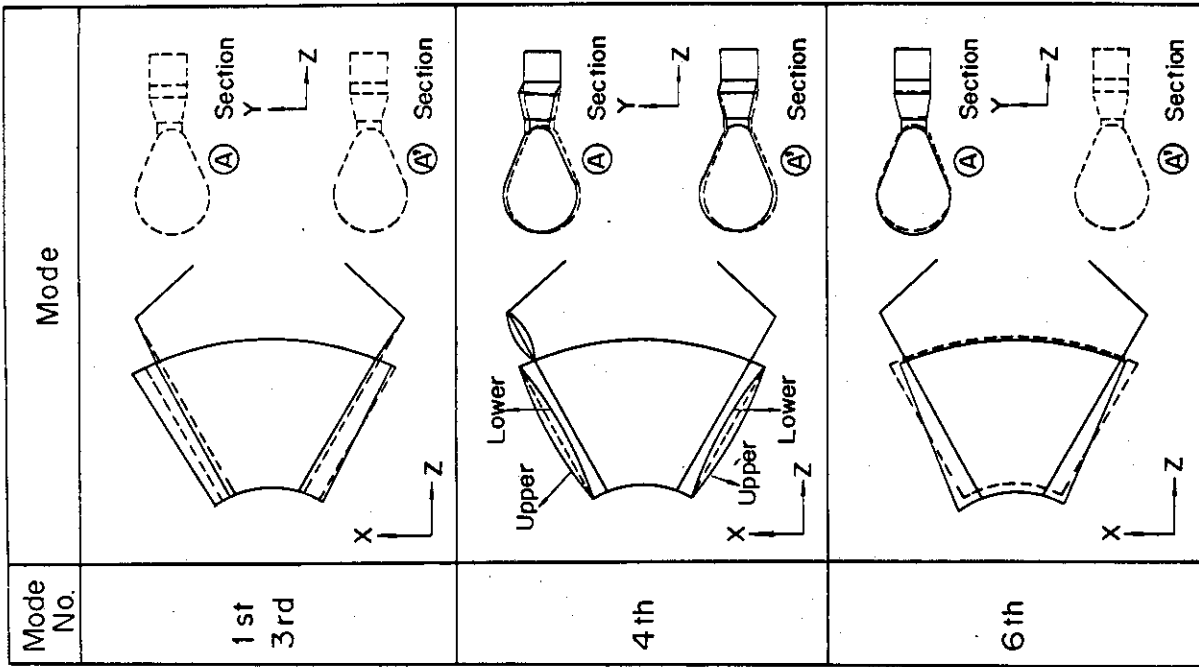
第 4.1 図 真空容器 60°セクタ詳細モデルプロッタ出力図



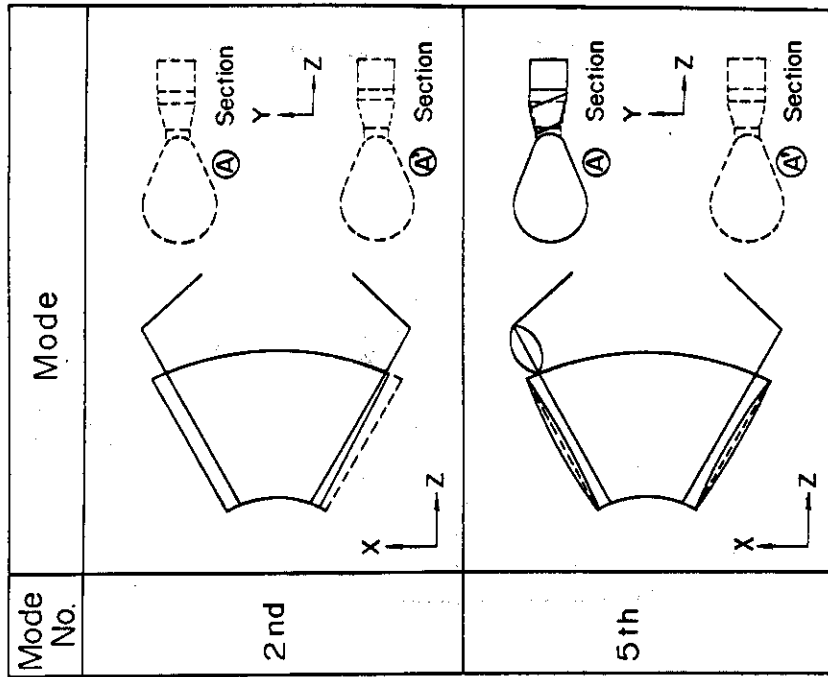
第 4.3 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有振動モード  
模式図 (対称境界条件)



第 4.2 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有周期

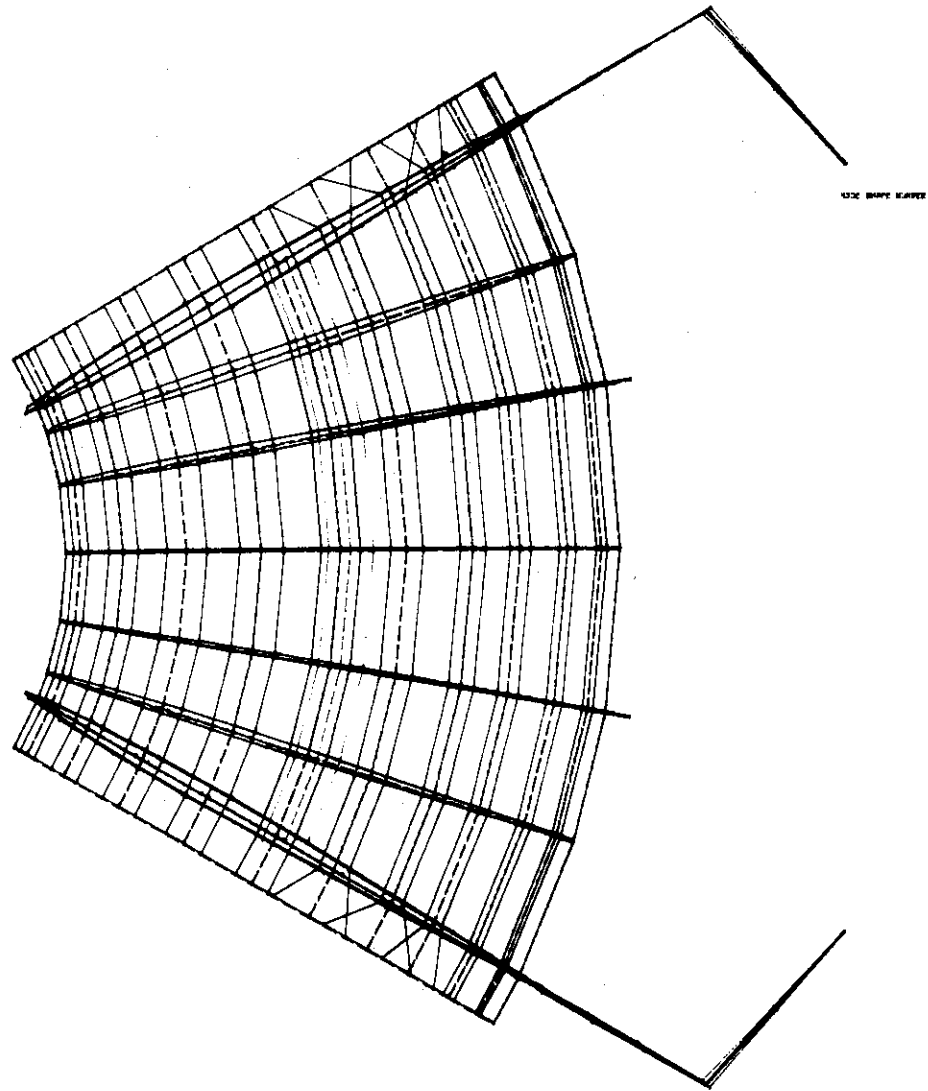


第 4.4 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有振動モード  
模式図 ( 逆対称境界条件 )

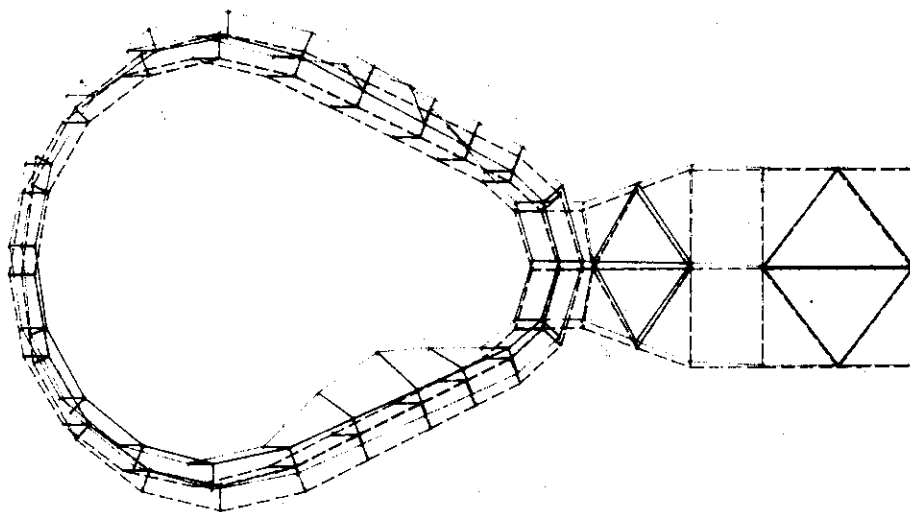


第 4.5 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル固有振動モード  
模式図 ( 逆対称境界条件 )

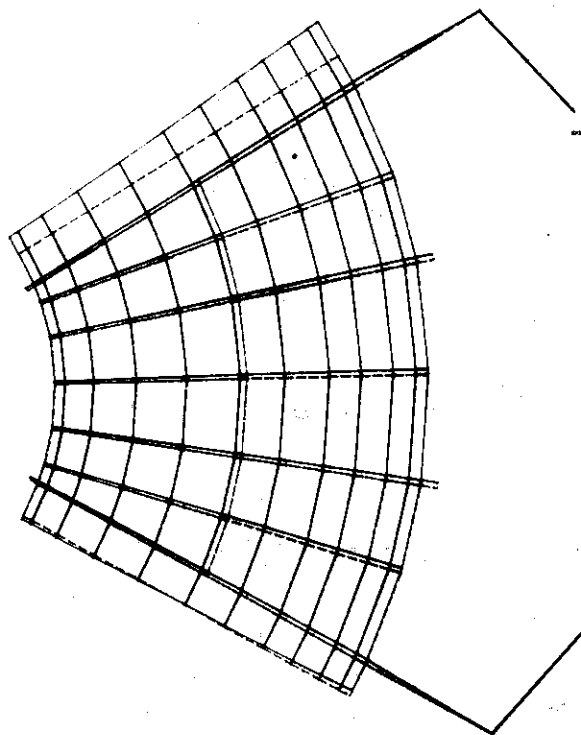




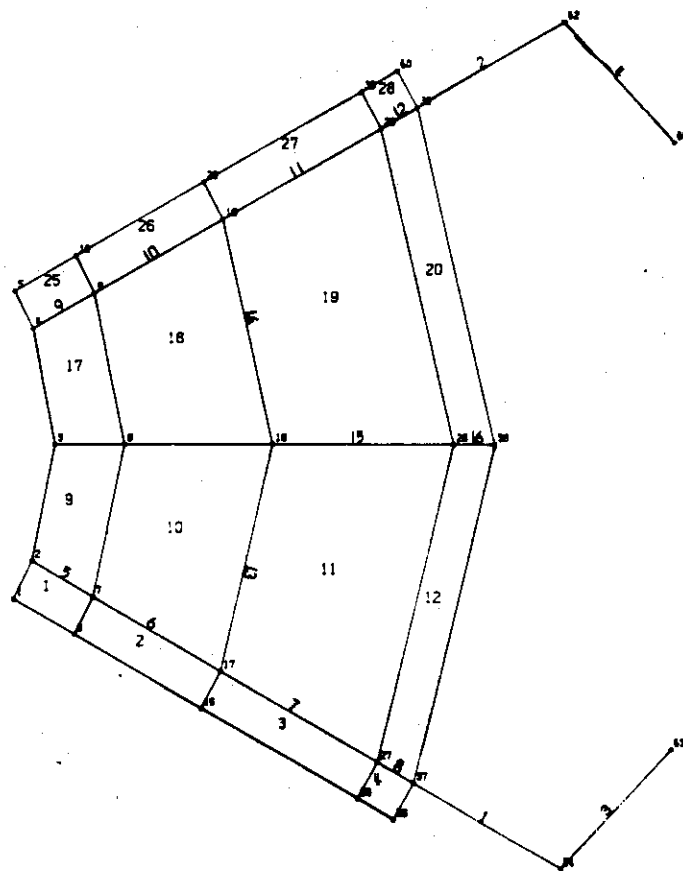
第 4.6 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)



第 4.7 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)

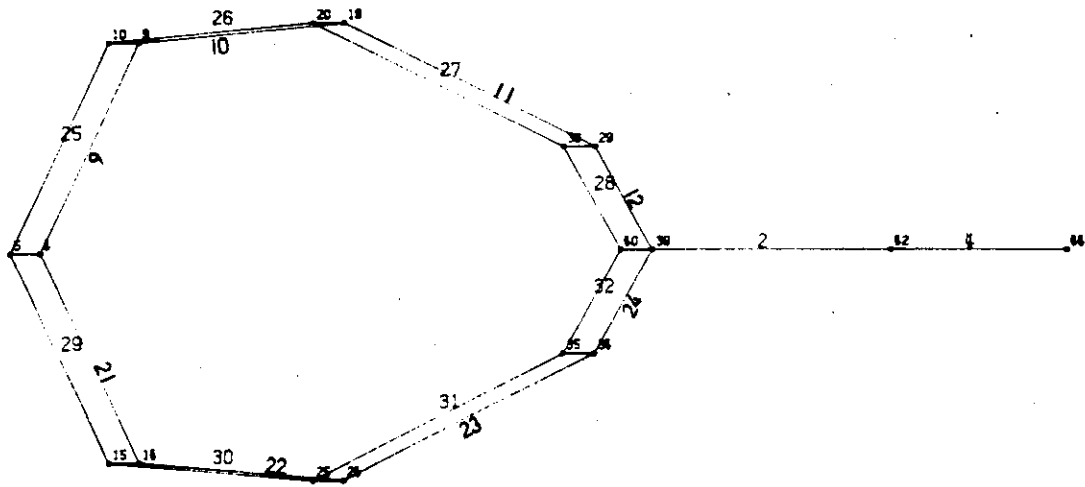


第 4.8 図 真空容器 60°セクタ詳細モデル 1 次固有振動モード，プロッタ出力図（逆対称境界条件）

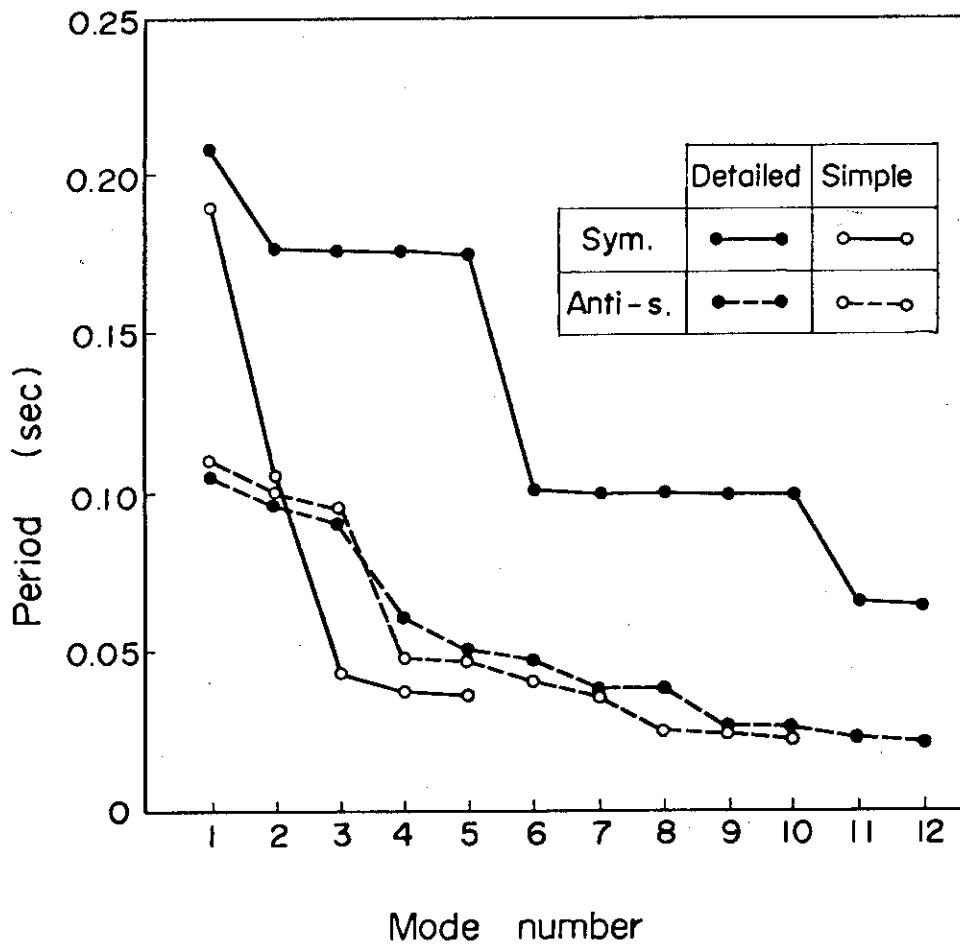


第 4.9 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル，プロッタ出力モデル図（平面図）

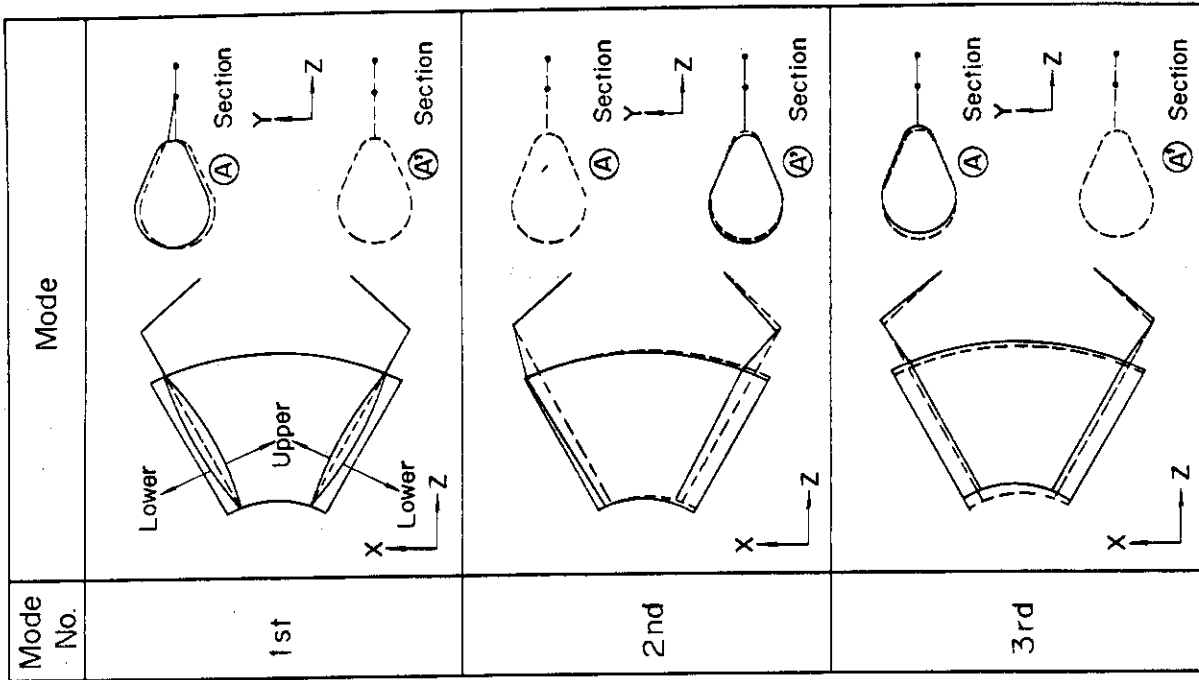
VACUUM VESSEL 60 DEG. / SIMPLIFIED MODEL / A SECTION



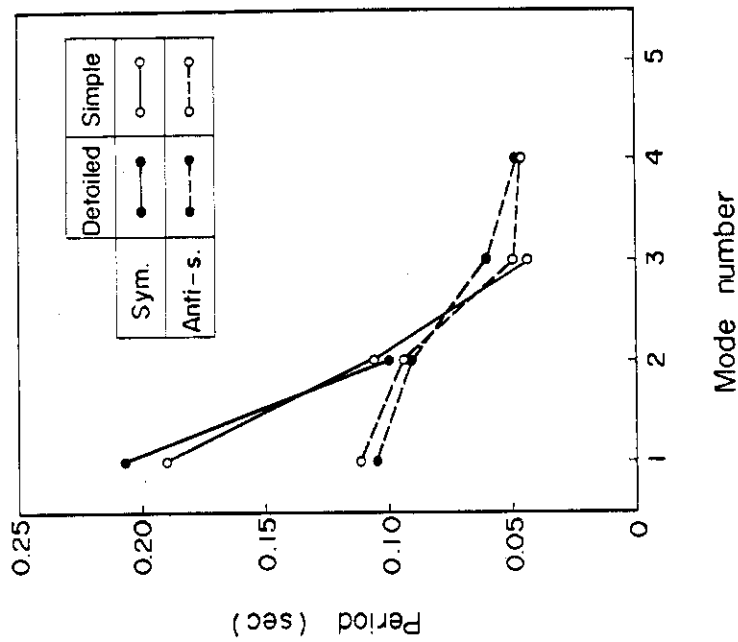
第 4.10 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル, プロッタ出力モデル図 (断面図)



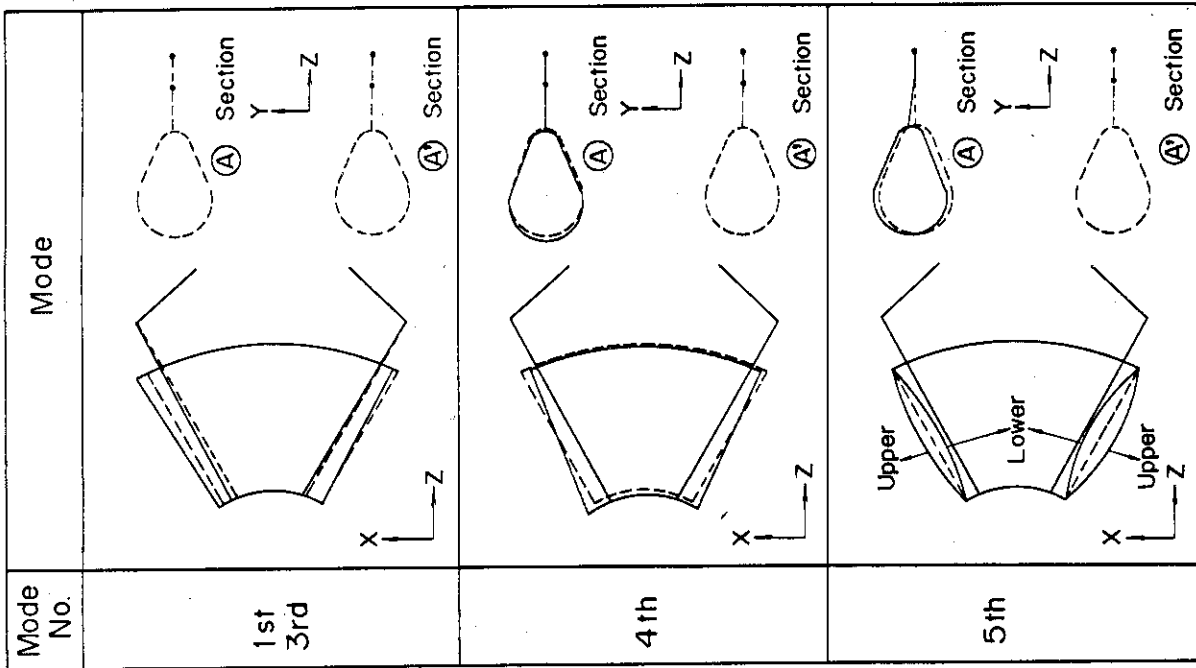
第 4.11 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有周期



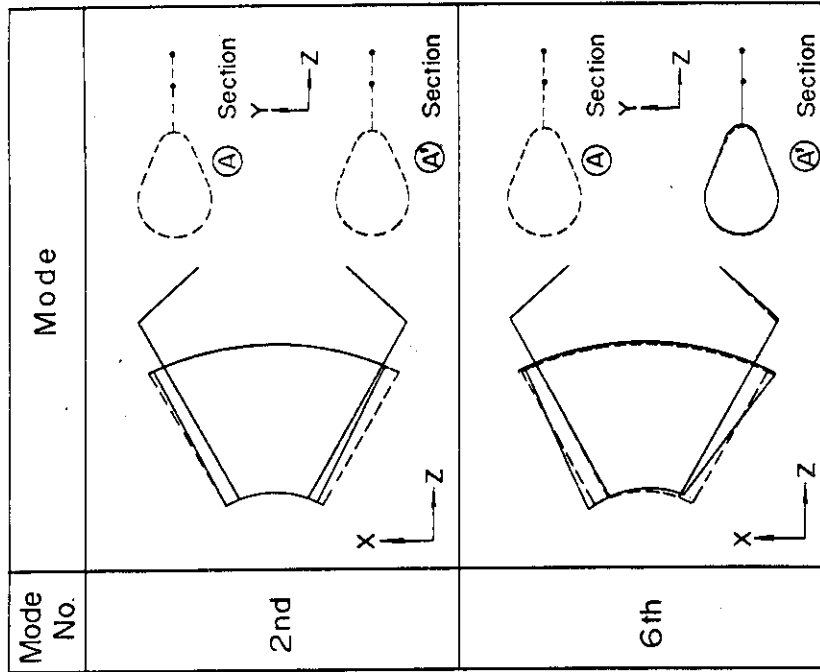
第 4.13 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル 1~3 次固有振動モード模式図 (対称境界条件)



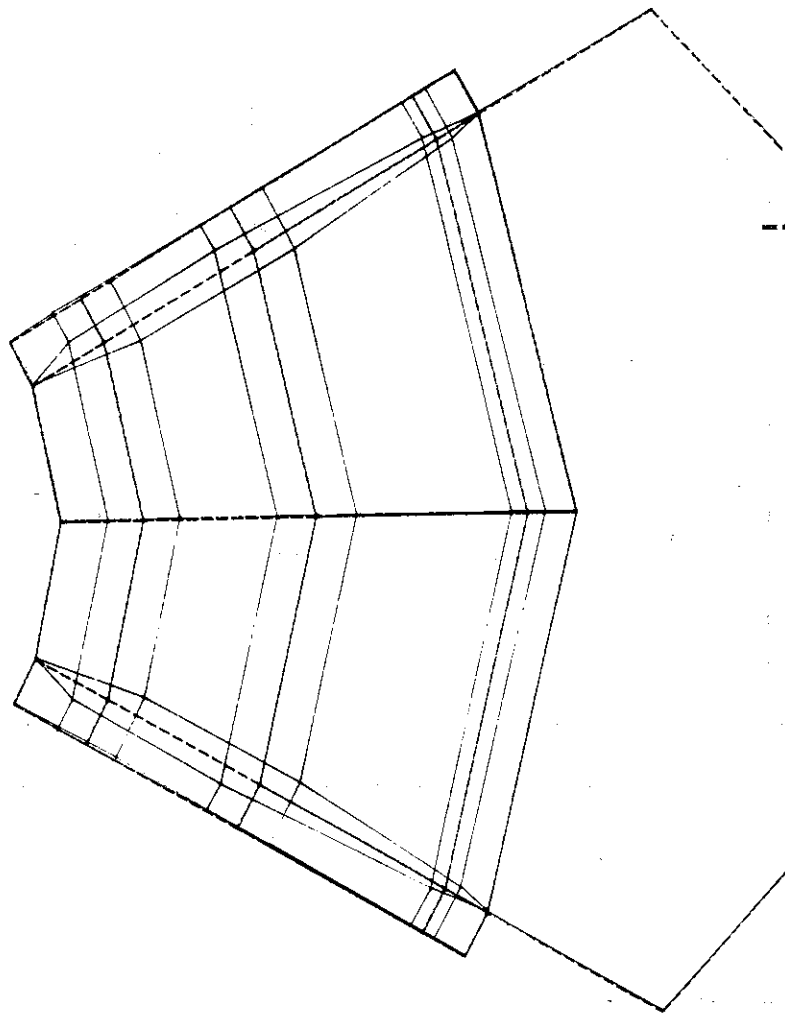
第 4.12 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有周期 (一般振動モード)



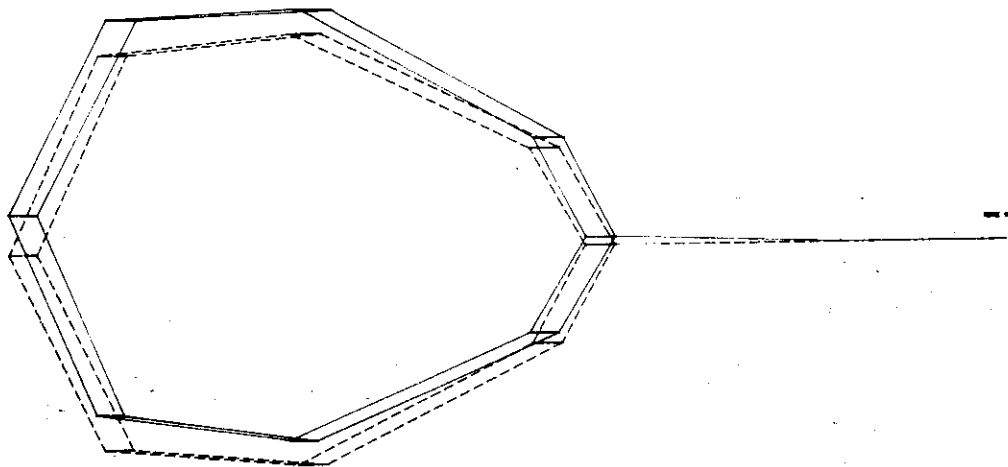
第 4.14 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有振動モード  
模式図 ( 逆対称境界条件 )



第 4.15 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル固有振動モード  
模式図 ( 逆対称境界条件 )

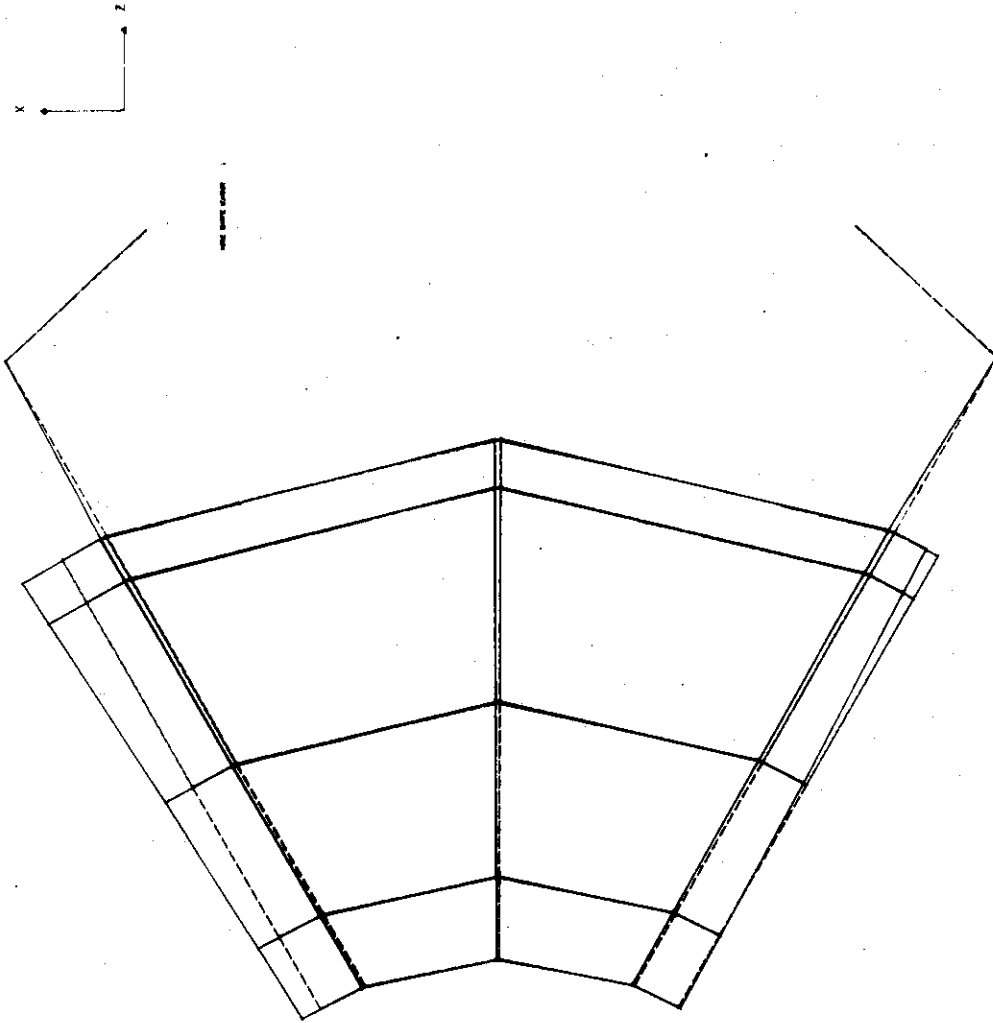


第 4.16 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)



第 4.17 図 真空容器 60°セクタ簡略モデル 1 次固有振動モード, プロッタ出力図 (対称境界条件)

VACUUM VESSEL 60 DEG. / SIMPLIFIED MODEL / UPPER AND LOWER PART  
KYOKU-TRISHO JOKEN / ST MODE



第 4.18 図 真空容器 60°セクタ 簡略モデル 1 次固有振動  
モード, プロット出力図 ( 逆対称境界条件 )

### Ⅲ. 装置全体モデル，建家モデルの構築及びその固有値解析

#### 1. 装置全体モデル

本章では，第1節において第Ⅱ編で作成した主要コンポーネント（トロイダル磁場コイル，ポロイダル磁場コイル，真空容器40°，60°セクタ）の簡略モデルの一部に修正を加えて，装置全体モデル組込用モデルを作成するとともに，第2節においては，その他の構造コンポーネント（上・下架台，支持柱，可動リミタ）のモデル化を行ってJT-60装置全体モデルの構築を行う。最後に第3節で，本モデルの規模をまとめる。

##### 1.1 主要コンポーネントの装置全体モデル組込用モデル

第Ⅱ編において，JT-60装置の主要コンポーネントである，トロイダル磁場コイル，ポロイダル磁場コイル及び真空容器40°，60°セクタの簡略モデルを，予め設定した詳細モデルに可能な限り近似した振動特性を有し，かつ可能な限り節点数を抑えたモデルという基準のもとに作成した。

一方，これらの簡略モデルを組み合わせて装置全体モデルを構築する際，モデル化の都合により，各コンポーネントの一部の部材の寸法が変更される。従って，この簡略モデルが詳細モデルを近似する振動特性を有する為には，当該部材の剛性を修正する等モデル化に多少の修正を必要とする。

以下各節において，各コンポーネント毎に装置全体モデル組込を考慮した簡略モデルの修正を行い，装置全体モデル組込用モデルを作成する。

##### 1.1.1 トロイダル磁場コイル

###### (1) 装置全体モデル組込用モデル

第Ⅱ編第1章において作成されたトロイダル磁場コイルの簡略モデルを装置全体モデルに組み込む場合，第1.1図に示す様に支持梁の支持点位置を変更する必要が生じる為，簡略モデルの振動特性が変わる。このモデルの振動特性を詳細モデルのそれに合わせるには何らかの簡略モデルの修正が必要であり，ここでは支持梁の剛性のみに着目し，他の解析条件は第Ⅱ編第1章と同一とする。

第Ⅱ編第1章で作成した簡略モデルと，装置全体モデル組込用モデルの支持梁長を $l_s$ ， $l'_s$ とすると，梁の断面性能 $A$ ， $J_1 \sim J_3$ は次式で与えられる。

$$\beta = \frac{l'_s}{l_s} \quad (1)$$



$$\begin{aligned}
 A : A'_s &= \alpha \beta A_s \\
 J_1 : J'_1 &= \alpha \beta J_1 \\
 J_2 : J'_2 &= \alpha \beta^3 J_2 \\
 J_3 : J'_3 &= \alpha \beta^3 J_3
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

但し、 $\alpha$ は梁の実効断面の変位等に伴う補正係数で0.78を与える。

上式で与えられる梁断面性能を第1.1表にまとめる。

## (2) 固有値解析

第Ⅱ編第1章で得られた簡略モデルに対して、(1)で述べた修正を行った装置全体モデル組込用モデルの固有値解析の結果を第1.2図に示す。

固有周期は、詳細モデルの値に比べて、1次で97%であり、2次以降もほとんど差はみられない。更に、固有振動モードも詳細モデルのそれに良く近似しており、本節での修正は妥当であると判断でき、これを装置全体モデル組込用モデルとする。

### 1.1.2 ポロイダル磁場コイル

#### (1) 装置全体モデル組込用モデル

第Ⅱ編第2章において、ポロイダル磁場コイル簡略モデルを作成したが、このモデル化に際しては、1ユニットのポロイダル磁場コイルを抽出するのに、その本体を支える上下支持柱の先端位置を、支持柱が支えられる架台の表面にとった。これは、架台の剛性が支持柱のそれに比して十分に大きい為である。

一方、装置全体モデルにおいては、架台を軸線上の梁及びメンブレン要素に置換した為、結果的に支持柱の材長を長く評価し過ぎる事となる。これを、支持柱の剛性を上げる事により補正する。

支持柱の補正は、1.1.1と同様に曲げ剛性が材長の3乗に、またねじれ剛性が材長に逆比例する事を用いて行う。(2)式における $\beta$ は、上支持柱、下支持で各々1.95、1.85であり、第1.2表に示す支持柱断面性能が得られる。

#### (2) 固有値解析

得られた装置全体モデル組込用モデルの固有周期を、対称境界条件に対して第1.3図に、逆対称境界条件に対して第1.4図に示す。ポロイダル磁場コイルの卓越する振動モードである逆対称境界条件においては、固有周期は詳細モデルに極めて近い値となり、1次、2次、3次固有周期は詳細モデルに比して102%、98%、138%であり、4次以降も良好な近似となっている。また固有振動モードについても、詳細モデルと良く類似したモード性状となっている。

一方、対称境界条件においても、全体的なモード性状は一致しており、固有周期も詳細モデルに比して、1次、2次、3次で各々、121%、104%、91%であり、比較的良い近似と言える。

以上から支持柱の補正による影響は、固有振動モードの性状に大きな変更をもたらさず、かつ固有周期も詳細モデルのそれに極めて近い。従って本節でのモデルの修正は妥当であると判断でき、これを装置全体モデル組込用モデルとする。

### 1.1.3 真空容器

#### (1) 装置全体モデル組込用モデル

第Ⅱ編第3, 4章で作成された真空容器40°, 60°セクタ簡略モデルは, そのモデル化においては, 支持アーム先端位置を支持柱と支持アームの接点としたが, 装置全体モデル組込用モデルにおいては, 支持柱を1本の梁要素で置換する為, 支持アーム先端位置は支持柱の中心となり簡略モデルとは支持アームの材長が異なる。従って1.1.1と同様に材長の違いを剛性値で補正するモデルの修正を行う。

なお, 真空容器40°セクタと60°セクタでは, 支持アームの長さ, 断面等が共通であるので本節においてまとめて示す。

(2)式における $\beta = 2.10$ であり, 1.1.1と同様に, 断面積, 振り慣性モーメントについては簡略モデルの $\beta$ 倍, 断面2次モーメントについては $\beta^3$ 倍する。得られた梁断面性能を第1.3表にまとめる。

#### (2) 固有値解析

第Ⅱ編第3, 4章で得られた真空容器40°, 60°セクタ簡略モデルに対して(1)で述べた修正を行った装置全体モデル組込用モデルの固有値解析の結果を40°セクタに対して第1.5図に, 60°セクタに対して第1.6図に示す。

40°セクタ対称境界条件では, 第Ⅱ編第3章で示した簡略モデルと本モデルとは1~3次の固有振動モードはほぼ等しく, また固有周期も2次を除く1~5次において前者の98~102%の間にあり, 非常に良い近似を得ている。また, 2次固有周期は, 前者の87%であるが, 詳細モデルの2番目の一般振動モード(10次)の固有周期と比較すると93%であり良い近似である事がわかる。

40°セクタ逆対称境界条件においても第Ⅱ編第3章で求められた簡略モデルと比較して, 1~5次迄固有振動モードはほぼ等しく, また, 固有周期も3次を除く1~5次で98~101%と極めて良い近似が得られ, 3次固有周期も前者に比べて89%であるが, 詳細モデルの1番目の一般振動モード(3次)のそれと比べると94%であり良い近似であると言える。

一方, 60°セクタ対称境界条件では, 第Ⅱ編第4章で示した簡略モデルと本モデルとは, 1~3次の固有振動モードはほぼ等しく, また固有周期も2次を除く1~5次において前者の98~100%の間にあり非常に良い近似を得ている。また, 2次固有周期は, 前者の87%であるが, 詳細モデルの2番目の一般振動モード(6次)の固有周期と比較すると92%でほぼ良く近似している。

更に, 60°セクタ逆対称境界条件においても, 第Ⅱ編第4章で求められた簡略モデルと比較して, 1~5次迄固有振動モードはほぼ等しく, また固有周期も1~5次迄前者の93~100%にあり, 良い近似と言える。

以上より, 40°, 60°セクタの対称, 逆対称境界条件のいずれにおいても, 本モデルは第Ⅱ編第3, 4章で得られた簡略モデルの振動特性を正しく評価している。従って本モデルは, 各々, 詳細モデルを良く近似しており, これを装置全体モデル組込用モデルとする。

#### (3) 付加重量

真空容器に設置される付加重量物(固定リミタ, 磁気リミタコイル, ライナ等)は既に簡略

モデル作成時に考慮されているが、これ以外に真空容器には各種のポートが取り付けられている。各々のポートの先端はベローズ構造となっており、外部から真空容器への影響は無視する事ができる。しかしながら、その重量は無視し得ない程度である為、これを付加重量として真空容器上の節点に配置する。また、真空容器から突出したポートの回転慣性モーメントの効果も真空容器上の節点に含める。

以下に付加重量、回転慣性モーメントの配置法、算定法を記す。

(i) ポートボックスの重量を第 1.7 図に示す要領で真空容器の節点に振り分ける。ポートボックスは、分配節点のほぼ中央にあるため、分配率は等分とする。

(ii) 第 1.8 図に示す様に、分配された重量  $m$  がポートの付け根  $N$  点を通る 3 軸回りに形成する回転慣性モーメント  $I_M$  を算出する。

(iii) 第 1.8 図に示す様に、ポート重心  $G$  上の重量  $M$  が 3 軸回りに形成する回転慣性モーメント  $I_G$  を算出する。

(iv)  $I_M$  と  $I_G$  とを各成分 ( $x, y, z$ ) 毎に比較し  $I_M < I_G$  ならば  $\Delta I = I_G - I_M$  だけの追加慣性モーメントを該当節点に等分配する。一方、 $I_M > I_G$  なら  $\Delta I = I_M - I_G$  の値は無視し、既に分配されている質量  $m$  の値を優先させる。

## 1.2 他の構造コンポーネントのモデル化

第 II 編及び本編 1.1 において、JT-60 装置の主要コンポーネントのモデル化は完了した。残された構造コンポーネントは、上・下架台、支持柱及び可動リミタである。ここで、後 2 者が、比較的単純な梁構造であるのに対し、前者は箱形断面を有する構造で、節点数の制限と相まってモデル化には注意を要する為、部分構造を抽出して詳細モデル（形状に忠実なモデル）と簡略モデル（本モデル化手法によるモデル）を作成し、剛性の検討を行っている。

以下に、上・下架台、支持柱及び可動リミタのモデル化について記す。但し、これらの構造コンポーネントは構成要素の数が多いため、ここではモデル化手法に重点を置き、各要素の部材定数等には触れない。

### 1.2.1 上・下架台

上・下架台は、非磁性鋼板により構成された箱形断面を持つ構造であり、上架台は、トロイダル磁場コイルスペーサを介してトロイダル磁場コイルに作用する電磁力を支え、そのねじれを防ぐ為、水平の連結アームで建家に連結されている。その重量は、中心支柱及び周囲の支持柱により下架台に伝わる。一方、下架台は、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル支持柱、真空容器支持柱等を支持し、基礎に固定される。

#### (1) モデル化概要

上・下架台は箱形断面を有する構造であり、半径方向及び円周方向に対しては第 1.9 図及び第 1.10 図に示す様に規則的な構造である。ここでは、この構造各部の分担剛性領域を定め、その各々の部分に対して、第 1.11 図に示す様に、面内剛性をメンブレン要素の面内剛性及び梁要素の軸剛性に置換し、面外剛性を梁要素の曲げ剛性に置換する。但し、この手法は梁の方

向が架台の半径方向或いは円周方向を向いているものみに適用でき、それ以外の梁要素については(2)で検討を行う。

第 1.11 図に模式的に示す手法を以下に述べる。

(i) 上下平板(厚さ  $t_1, t_2$ )を、 $t = t_1 + t_2$  の厚さを持つメンブレン要素に置換する。

(ii) 剛性分担領域  $\alpha, \beta, \gamma$  が①軸廻り(ねじれ)、②軸廻り(面外曲げ)に持つ回転剛性を、梁  $\alpha, \beta, \gamma$  の回転剛性に等置する。

(iii) ③軸廻り(面内曲げ)の剛性は、架台面内の剛性であり、大局的にはメンブレン要素が有する。然し、プログラムの制限から、断面積、断面性能を 0 とする事はできないので、梁要素に対しては微小値を与える。但し、例外を次の(v)(v)に示す。

(v) 架台のウェーブ(第 1.9 図及び第 1.10 図の注で示している部分)の位置が、モデル置換する梁の位置と一致しない時は、梁位置を軸とした時のウェーブが有する断面 2 次モーメントを③軸廻りの剛性  $J_3$  として与える。

(v) ポロイダル磁場コイル支持柱の先端と結合している架台内の梁(第 1.12 図に示す  $B_m$ )の面内曲げ剛性を微小値とすると、ポロイダル磁場コイル支持柱のねじれを拘束する効果がなくなる為、梁  $B_m$  の面内曲げ剛性は、 $B_m$  と結合する梁  $A_m$  のそれと同じ値を採用し、面内曲げ伝達のバランスを計った。

(vi) 剛性分担領域内にウェーブがある場合には、ウェーブの断面積が梁断面積となり、ウェーブがない場合には微小値を与える。

(2) ポロイダル磁場コイル支持柱の柱脚に結合する梁

(1)(v)で述べた様に、第 1.12 図に示す梁  $B_m$  は、半径方向、円周方向のいずれの方向にも向いていない為、その断面性能は(1)で示した手法を採る事ができない。そこで次に示す手法により断面性能を決定する。

(i) 剛性分担領域が半径方向、円周方向に持つ断面性能を各々計算する。この算出方法は(1)と同じである。

(ii) 半径方向、円周方向の断面性能を用いて、下式により斜方向梁  $B_m$  の断面性能を計算する。

$$J_1 = L / \left( \frac{l_R}{J_{1R}} \sin^2 \varphi + \frac{l_\theta}{J_{1\theta}} \cos^2 \varphi \right) \quad (3)$$

$$J_2 = L / \left( \frac{l_R}{J_{2R}} \sin^2 \varphi + \frac{l_\theta}{J_{2\theta}} \cos^2 \varphi \right) \quad (4)$$

$$A = L / \left( \frac{l_R}{A_R} \sin^2 \varphi + \frac{l_\theta}{A_\theta} \cos^2 \varphi \right) \quad (5)$$

なお、ここで  $J_1, J_2, A$  は、ねじり、面外曲げ、軸力に対する断面性能であり、 $R, \theta$  は各々主半径方向、大周方向を表わす。また  $\varphi$  は、大周方向と斜方向梁のなす角度である。

(iii) 架台面内曲げ剛性  $J_2$  は、(1)の(v)項で既に述べている。

(3) 上・下架台モデルの剛性検討

(1)(2)で述べた様にモデル化したメンブレン要素+梁要素構造の剛性の検討を行う。ここで上・下架台は同一のモデル化手法によっているので、重要度の高い上架台について検討する。

第 1.13 図に示す。中心角  $20^\circ$  分の部分構造を抽出し、この単位構造に対して、詳細部分モデルと簡略部分モデルを作成する。そのモデル図を第 1.14 図及び第 1.15 図に示す。これらのモデルに対して第 1.16 図及び第 1.17 図に示す面外剛性の検討を行った。即ち、一端を固定として他端に  $y$  方向の荷重を与える。± $10^\circ$  境界面は、隣接部分構造の影響を考慮して対称境界条件を設定した。

解析結果もあわせて第 1.16 図及び第 1.17 図に示す。両者の先端の変位  $\delta_D$  (詳細モデル)、 $\delta_S$  (簡略モデル) の比は、

$$\frac{\delta_S}{\delta_D} = \frac{-0.0027}{-0.0023} = 1.17$$

である。これは詳細モデルと簡略モデルの比を与え、更に、固有周期の比は  $1.17^{-0.5} \approx 0.92$  であるから、他の主要コンポーネントの簡略モデルの近似レベルと同程度の比較的良好な近似モデルが得られていると判断できる。

## 1.2.2 支持柱

J T-60 装置の支持柱は中心支持及び真空容器支持柱に分けられる。前者は上下架台を連結するとともに、トロイダル磁場コイルの電磁力(求心力)を支持する役割を有し、装置中心に 1 本設置される。一方、後者は真空容器の支持が主な役割で、装置の周囲に 10 本設置される。支持柱の種類及び配置を第 1.18 図のプロッタ出力図に示す。後者は第 1.18 図からわかる様に構造的に 3 種類に分けられる。

支持柱 A : 上・下架台をつなぐ柱で、真空容器  $40^\circ$  セクタを支える。(2 本)

支持柱 B : 下架台から伸びる 2 本の柱が途中で連結されて 1 本となって上架台につながっている柱で、真空容器  $60^\circ$  セクタを支える。(下 4 本, 上 2 本)

支持柱 C : 下架台から L 字形に伸びる柱で上架台とは連結されていない。真空容器  $40^\circ$  セクタを支える。(4 本)

なお、上・下架台は、トロイダル磁場コイルスペーサを介してトロイダル磁場コイルと連結されているが、運転時にコイルに働く転倒力のためトロイダル方向逆方向にねじりが働く。これを吸収する為、上・下架台を連結する支持柱 A 及び B には、ヒンジ構造が設けられている。

### (1) モデル化概要

支持柱は上記ヒンジ部を除いて全て梁要素で置換する。支持柱 A, B のヒンジ部は 1 方向回転自由の構造であるが、他の回転に対しても、その他の構造物に比して固定度は低いと考えられる為、ピン結合のトラス部材に置換する。

### (2) 中心支柱回りの組積ブロック

中心支柱の回りには第 2.11 図に示す様に、トロイダル磁場コイル補強枠との反力をとる為に組積ブロックがある。これは第 1.19 図に示す様にトラスでモデル化し、その断面 A は次式で与える。

$$A = K \cdot \frac{L}{E} \quad (6)$$

但し、

$$K = k_1(l_{11} + l_{12}) + k_2(l_{21} + l_{22}) + k_3(l_{31} + l_{32})$$

$L$  ; トラス要素の長さ

$E$  ; 非磁性鋼縦弾性係数

$k_1 \sim k_3$  ; バネ定数

ここで、 $k_1 = 2 \times 10^7$ ,  $k_2 = 5 \times 10^6$ ,  $k_3 = 1 \times 10^7$  kg/cm であるから、 $A = 4.04 \times 10^5$  cm<sup>2</sup> と求められる。

### 1.2.3 可動リミタ

可動リミタの構造は基本的に柱梁構造であり、梁要素への置換で十分と思われる。第 1.2.0 図に示す位置にある柱、梁を構造体と考え、他の部分は重量のみ考慮する。

## 1.3 装置全体モデル

1.1 及び 1.2 で各構造コンポーネントが作成され、それらを組み合わせて装置全体モデルが構築された。本節では、作成された装置全体モデルの規模の確認と、重量データの配置について述べる。

### 1.3.1 装置全体モデルの規模

1.1 及び 1.2 で作成された構造コンポーネントのモデルを全て組み込んで構築された装置全体モデルの規模を第 1.4 表にまとめる。ここで S, ST モデルとは各々、星形トラスなし装置モデル、星形トラス付き装置モデルを表わす。

また、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、真空容器及び上・下架台、支持柱、可動リミタの各モデルのプロッタ出力図を第 1.21 図から第 1.24 図に示す。

### 1.3.2 装置モデルの重量

装置モデルは、原構造物の形状を簡単な有限要素に置換している為、その重量が、モデルの形状と単位重量からプログラム内部で計算する事のできる部分は極めて少ない。従って、ほとんどの重量は節点重量の形で入力する必要がある。

主要コンポーネントの重量は第 II 編で算出されている為、ここではそれ以外の重量に着目して節点重量を定める。但し、ここでは算出要領に重点を置き、具体的な数値には触れない。

#### (1) トロイダル磁場コイル

簡略モデルで各節点に配置していた節点重量をそのまま装置モデルのトロイダル磁場コイル本体を構成する節点に配置する。簡略モデルの支持点が生担する重量は、コイル部節点に算入してある為、上・下架台の接続接点に対するトロイダル磁場コイル側からの重量付加はない。

また、トロイダル磁場コイルの渡り線、巻き戻し線は装置モデルに対して付加重量となり、18 個のトロイダル磁場コイル、10 本の支持柱に、支配中心角に比例して配分する。

## (2) ポロイダル磁場コイル

ポロイダル磁場コイル簡略モデルは、 $\pm 10^\circ$ の境界面上に節点を有するが、装置全体モデル組込用モデルは、隣接支持柱間を結ぶ梁要素に中間接点がないので、境界面上の節点が分担する重量は支持柱上の節点に再配置する。

また、簡略モデルにおける上下支持柱の支持点の分担重量は、上・下架台との接続節点に付加する。

## (3) 真空容器

真空容器 $40^\circ$ 及び $60^\circ$ セクタ簡略モデルは、各々 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ の境界面上に節点を有するが、装置全体モデル組込用モデルには、隣接厚肉リング間を結ぶベローズ（異方性シェル要素）に中間節点がない為、境界面上の節点が分担する重量は支持柱上の節点に再配置する。

また、簡略モデルの支持アーム先端の支持点分担重量は、真空容器支持柱との接続節点に付加する。

## (4) 上・下架台及び可動リミタ

上・下架台の各部位の重量は、相当節点に節点重量として組み込む。

可動リミタの主構造部分は、梁、柱の断面積、長さ、単位重量を忠実に反映した梁要素でモデル化している為、その部分の重量はプログラム内で自動的に算出される。主構造以外の2次部材は相当節点に付与する。

トロイダル磁場コイルスペーサは、8節点固体要素でモデル化している為、単位重量に補正を加えた等価単位重量 $\rho_e$ により入力する。

$$\rho_e = \rho_0 V_0 / V \quad (7)$$

但し、 $\rho_0$ ；原スペーサ密度  
 $V_0$ ；原スペーサ体積  
 $V$ ；8節点要素の体積

## 2. 建家モデル

第1章において、JT-60装置全体モデルを完成した。本章では引き続き、JT-60装置全体モデルの振動特性に大きな影響を与える建家のモデル化を行う。ここでは、先ず第1節において、建家モデルのモデル化概要について述べ、第2節では、地盤の効果を考慮する為の各種の地盤バネ定数の算出を行う。

## 2.1 建家モデルのモデル化概要

JT-60装置本体は、第I編の第2.3図及び第2.4図に示す様に建家の1F床に設置されており、上架台アーム先端4ヶ所は同図に示す様に8本の星形トラスにより、建家3Fレベルの水平リブ床に連結されている。従って、装置全体モデルの振動特性の検討には、建家の影響

を考慮する事が必須となる。

また、建家はその基礎埋込み深さが-16mにも達する為、地盤の影響も考慮する必要がある。

本解析では、この建家の床、壁をシェル要素からなる有限要素モデルに置換し、装置モデルと建家モデルとを組合わせた連成系モデルを設定する。更に、地盤と建家基礎との相互作用を考慮して、建家モデルの床面全域に地盤バネを設定する。即ち、建家-装置モデルの全体概念は第2.1図の様になる。

建家-装置モデルのうち装置モデルは第1章で作成されており、ここでは建家のモデル化概要を記す。

#### (1) 建家のモデル化概要

節点の位置は、原則として主要構造(壁、床)の軸線の交点を選んだ。但し、例外として、解析モデルの1F、3Fの高さは各々装置モデルの下架台下端、上架台(星形トラス)水平軸線の位置に一致させ、また階段室屋根の高さはJT-60試験装置設置室屋根の高さに一致させた。

建家の壁、床は全て構造板厚を持つシェル要素に置換する。但し、節点配置の制限から原構造の壁位置を移動し、複数枚の壁を1枚のシェルで表現する箇所があるが、これらの壁は2次壁であり、建家全体の構造バランスに与える影響は極めて小さいと考えられる。

開口部のある壁は、水平剪断面積による開口低減を行った。即ち第2.2図から

$$t_e = \left( \frac{L-l}{L} \right) t = \beta t \quad (8)$$

として等価板厚 $t_e$ を与える。但し、

$L$  ; 軸線間距離

$l$  ; 開口幅

$t$  ; 板厚

$\beta$  ; 有効断面積率

階段室床厚も、エレベータ開口による低減を行う。即ち、

$$t_e = \beta t \quad (9)$$

$$\beta = (A - A_0) / A$$

で与える。但し、

$A$  ; 該当シェル要素面積

$A_0$  ; エレベータ開口面積

1F、BFの試験装置下架台領域内にある床は、節点配置の制限から第2.3図に示す様なシェル要素分割をする事により2枚のシェル要素を重ね配置する箇所がある。これらのシェル要素の板厚は次式によって算出した。

$$t_e = \frac{t A}{A_i + A_j}$$



但し、 $A_i$  ; 第 2.3 図中の四角形 1-2-3-5 の面積  
 $A_j$  ; 第 2.3 図中の四角形 5-2-3-4 の面積  
 $A$  ; 第 2.3 図中の五角形 1-2-3-4-5 の面積  
 $t$  ; A 部分の原構造床厚

第 2.4 図から第 2.9 図には各階床の板厚，第 2.10 図から第 2.14 図には各フレームの壁厚，第 2.15 図から第 2.19 図には各軸の壁厚を要素番号とともに図中に示してある（単位は cm）。

## (2) 材料諸元

建家は長大スパンの厚肉鉄筋コンクリート壁構造という特殊な構造であり，その剛性に対する鉄筋の影響を無視する事はできない。ここでは，建家全体に渡って平均配筋率 1% を想定し，下式によってコンクリートの等価縦弾性係数  $E_e$  を算出する。

$$\begin{aligned} E_e &= E_c + 0.01 E_s \\ &= 2.3 \times 10^2 \text{ ton/cm}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

但し、 $E_c$  : コンクリートの縦弾性係数  $2.1 \times 10^2 \text{ ton/cm}^2$   
 $E_s$  : 鉄筋の縦弾性係数  $2.1 \times 10^3 \text{ ton/cm}^2$

である。

ポアソン比  $\nu$  及び単位重量  $\rho$  は，一般に用いられているコンクリートの値を用いる。

$$\begin{aligned} \nu &= 0.17 \\ \rho &= 2.4 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

なお，建家の重量データは(3)において述べる。

## (3) 建家重量

建家の設計は現時点では完全には終了していないが，現段階の設計及び従来の経験から建家重量の算出を行う。算出重量は，躯体重量，仕上重量，積載荷重，特殊荷重を考える。

躯体重量とは，剛性を考慮している床及び壁の重量であり，これは解析プログラム内で自動的に算出される。仕上重量は，建家の設計が終了していないので，正確な仕上重量は求まらないが，一応予定されている仕上の仕様に従って，仕上重量の概算を行う。また積算荷重も概算ではあるが，一応予定されている床の地震用積載荷重にて重量を求める。特殊荷重としては，クレーン，計測用架台，クレーン・タワー等の特殊荷重の重量を概算にて求める。

剛性として考慮しない付加重量である後 3 者の各階毎の重量をまとめると第 2.1 表の如くなる。入力としては，この各階の重量を，節点の支配面積に従って節点重量を求め，その値を入力する。ちなみに，建家モデルの全重量は，約 22.4 万 ton であるから，上記付加重量は建家モデル全体の約 10.8% を占めている事になる。

## (4) 建家モデルの規模

以上によって作成された建家モデルのモデル規模を第 2.2 表にまとめる。

更に，建家モデルが装置モデルと組み合わせられた建家-装置モデルの入力規模を第 2.3 表にまとめる。ここで BS，BST モデルは，各々星形トラスなし建家-装置モデル，星形トラス付き建家-装置モデルを表わす。

## 2.2 地盤バネ定数の算出

### (1) 分布バネ定数の定め方

構造物基礎の地盤に対する振動形態は、水平動、ねじれ動、上下動及びロッキングの4形態が考えられ、その各々に対して集中バネが設定できる。一方、集中バネと分布バネとは第2.20図に示す対応関係を持つため、集中バネ定数と等価な分布バネ定数を算出する事ができる。但し、第2.20図中のA', B'に共通の水平伸縮バネ $k_H$ はA, Bの両者に対応し、C', D'に共通の鉛直伸縮バネ $k_V$ はC, Dの両者に対応している為、ここでは水平動とロッキングを重視し、AとA'との対応、DとD'との対応関係を等価に置換した算定を行う。

なお、各節点の伸縮バネ定数は第2.21図に示す様に、その支配面積分だけの値を採る。

### (2) バネ定数の算出法

単位面積当りの分布バネ定数を求める為に、先ず集中バネ定数を算出する。建家モデルに於ける集中バネ定数の値は、建家モデル底面全域に渡る分布バネ定数の積分値を意味する。即ち、

$$K_H = \int_A k_H dA = k_H \cdot A \quad (12)$$

$$K_\theta = \int_A k_V \cdot r^2 dA = k_V \cdot J \quad (13)$$

但し、  
 A ; 基礎底面積  
 $K_H$  ; 水平集中バネ定数  
 $k_H$  ; 水平分布バネ定数  
 $K_\theta$  ; ロッキング集中バネ定数  
 $k_V$  ; 鉛直分布バネ定数  
 J ; 基礎断面二次モーメント

以下(2)において集中バネ定数の算出を行う。

### (2) 集中バネ定数の算出

集中バネ定数の算出は資料8<sup>(8)</sup>に則って行う。

先ず、接地応力分布は、水平動に対しては等分布応力、ロッキングに対しては三角分布応力を仮定する。これは、地盤に対する基礎盤の剛性が剛基礎ではなく(地盤が非常に剛である為)、また柔基礎でもなく(基礎も可成り剛である)中間規模の剛性であると考えられるからである。

等分布応力を仮定すれば、矩形基礎の集中水平バネ定数 $K_H$ は、

$$K_H = \frac{2\pi b\mu}{2-\nu} B_x \cdot \bar{K}_x \quad (14)$$

で求まる<sup>(8)</sup>。但し、

b, c ; 矩形基礎の2辺の長さ  
 $\nu$  ; ポアソン比

$\mu$  ; 地盤の剪断剛性率

$$\mu = \rho V_s^2$$

$\rho$  ; 密度

$V_s$  ; 横波伝播速度

$B_x$  ;  $b, c$  より決定される形状係数

$\bar{K}_x$  ; 基礎が地中に埋め込まれている効果を表わす係数で,  $\nu, D, a$  より定められる。

$D$  ; 基礎埋込み深さ

$a$  ; 等価半径

$$a = 0.55 \sqrt{S} \quad (15)$$

従って, 単位面積当りのバネ定数  $k_H^0$

$$k_H^0 = K_H / S \quad (16)$$

で与えられるから,  $x, y$  方向の水平バネ定数  $k_x, k_y$  は上式の算定を  $x, y$  方向別々に行つて得る事ができる。

一方, 鉛直バネ定数  $k_z$  は, ロッキング・バネ定数として, 矩形基礎及び等価円形基礎の両者に対して行う。これは, 矩形基礎の場合のロッキング・バネ定数が, 短辺方向と長辺方向で異なるため, 長辺方向ロッキング・バネ, 短辺方向ロッキング・バネ, 円形基礎ロッキング・バネの3者を比較してバネ定数を決定する為である。

三角分布応力を仮定すれば, 矩形基礎の集中鉛直バネ定数  $K_V$  は

$$K_V = \frac{\pi b^3 \mu}{2(1-\nu)} B_\phi \cdot \bar{K}_\phi \quad (17)$$

で求まる。<sup>(8)</sup> 但し,

$B_\phi$  ;  $b, c$  より決定される形状係数

$\bar{K}_\phi$  ; 基礎が地中に埋め込まれている効果を表わす係数で,  $\nu, D, a$  より定められる。

従って, 単位面積当りの鉛直バネ定数  $k_V^0$  は,

$$k_V^0 = K_V / J_R \quad (18)$$

で与えられる。但し,  $J_R$  は, 矩形基礎の断面2次モーメントである。これより,  $x, y$  軸回りのロッキングに対して別々に鉛直バネ定数を算出する。

等価円形基礎の集中鉛直バネ定数  $K_V$  は, 同様に, 三角分布応力を仮定すれば,

$$K_V = \frac{\pi a^3 \mu}{2(1-\nu)} \bar{K}_\phi \quad (19)$$

で求まる。従って, 単位面積当りのバネ定数  $k_V^0$  は,

$$k_V^0 = K_V / J_0 \quad (20)$$

で与えられる。但し,  $J_0$  は円形基礎の断面2次モーメントで  $\pi a^4 / 4$  で与えられる。

## (3) 基礎及び地盤の諸元

(2)の各式の算出に必要な諸元を与える。

## (i) 基礎底面形 (b, c)

建家基礎は  $b = 92.5\text{m}$ ,  $c = 63.8\text{m}$  であるから(1)式より, 等価半径は  $a = 42.2\text{m}$  と与えられる。

## (ii) 基礎埋込み深さ (D)

建家の設計及び地盤データから

～ -16m	建家基礎
-16m～-20m	Man-made-rock
-20m～-26m	砂レキ層
-26m～	土丹層

であるから,  $D = 20\text{m}$  を与える。

(iii) 横波伝播速度 ( $V_s$ )

弾性波探査より  $V_s = 400\text{m/s}$  という値が得られている。<sup>(4)</sup>これは微小歪  $\epsilon = 10^{-6} \sim 10^{-5}$  下において得られた値である。地震時においては, 地盤は弾塑性々状 ( $\epsilon = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ ) を示していると考えられるので, これにより剪断剛性の低減を行う。 $\epsilon = 5 \times 10^{-4}$  程度で  $\mu_s / \mu_t \cong 0.5$  <sup>(9)</sup>である事から,  $V_s \propto \sqrt{\mu}$  を用いて

$$V_s = 400 \sqrt{0.5} = 283 \cong 300 \text{m/sec}$$

を得る。但し, 本地盤は砂レキ層より剛な土丹層が支配的であるので高めの値を採用する。

(iv) 密度 ( $\rho$ )

現在のところ JT-60 サイトの土質試験結果は未知であるが, 本地盤の様に比較的締った砂レキ, 砂岩の密度は, 一般的に  $\rho = 1.9 \sim 2.1 \text{g/cm}^3$  程度と考えられるので, ここでは平均的な値として

$$\rho = 2.0 \text{g/cm}^3$$

を採用する。

(v) ポアソン比 ( $\nu$ )

これも上質試験結果が未知である為, 砂レキのポアソン比として平均的な値

$$\nu = 0.45$$

を用いる。

参考値として標準貫入試験結果である

$$N \text{値} = 75 \text{ (砂レキ)}, 125 \text{ (土丹)}$$

及び  $V_s = 400\text{m/sec}$  の関係から  $\nu$  を推測すると,  $\nu = 0.40 \sim 0.43$  程度で可成り幅のある値である。また砂レキでは  $\nu = 0.45 \sim 0.48$  程度の報告が多い。しかし,  $\nu$  の差異による地盤バネ定数への影響は小さい。

## (4) 地盤バネ定数

(3)で得られた地盤の諸元を(2)の各式に代入する事により, 本建家モデルの地盤バネ定数の算出を行う。算出結果を以下に記す。

## (i) 水平バネ定数

$$K_x = 4.65 \times 10^7 \text{ kg/cm}$$

$$k_x = 0.788 \text{ kg/cm/cm}^2$$

$$K_y = 5.34 \times 10^7 \text{ kg/cm}$$

$$k_y = 0.905 \text{ kg/cm/cm}^2$$

## (ii) 鉛直バネ定数

矩形基礎：

x 軸回りロッキング

$$K_R = 2.00 \times 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$k_V = 2.21 \text{ kg/cm/cm}^2$$

y 軸回りロッキング

$$K = 7.42 \times 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$k_V = 1.76 \text{ kg/cm/cm}^2$$

等価円形基礎：

x, y 軸回りロッキング

$$K = 5.12 \times 10^{14} \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$k_V = 2.06 \text{ kg/cm/cm}^2$$

x, y 両軸に共通な値として中間値

$$k_V = 2.06$$

を採用する。

## (iii) 各節点のバネ定数

各節点のバネ定数は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} {}_i K_x \\ {}_i K_y \\ {}_i K_z \end{Bmatrix} = {}_i A \times \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

但し,  ${}_i K_x$ ,  ${}_i K_y$ ,  ${}_i K_z$  は, 節点  $i$  のバネ定数の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  成分,  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  は単位面積当りのバネ定数の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  成分,  ${}_i A$  は節点  $i$  の支配底面積である。

### 3. 固有値解析

既に第1章においてJT-60装置全体モデルが構築され、また、第2章において、装置全体モデルに影響を与える建家のモデル化を行った。これらをもとに、JT-60装置の振動特性を把握する為、下記4つのモデルに関して固有値解析を行った。

- (i) Sモデル……装置モデル，星形トラスなし。

装置基礎入力によって、装置単独の振動特性を調べるモデルである。775節点。

- (ii) STモデル……装置モデル，星形トラス付き。

装置基礎及び星形トラス端同位相入力により、建家が非常に剛な場合の装置の振動特性を調べるモデルである。779節点。

- (iii) BSモデル……建家-装置モデル，星形トラスなし。

装置の振動特性に与える地盤建家の影響を考慮するモデルである。但し、星形トラスのない場合、もしくは地震時に星形トラスが座屈し、装置に対して拘束効果を持たなかった場合を想定している。991節点。

- (iv) BSTモデル……建家-装置モデル，星形トラス付き。

装置の振動特性に与えると考えられる全ての影響（建家，星形トラス，地盤）を考慮するモデルであり、実機の条件に最も近いモデルである。991節点。

以下、第1節においては、以上4つの解析ケースについての固有値解析の結果をまとめ、第2節において、その振動特性に関する検討を行う。

#### 3.1 固有値解析の結果

前記4つのモデルに対して各々以下の次数迄固有値解析を行った。ここでBS，BSTモデルは，S，STモデルの固有値，固有モードを十分に含む範囲である様留意した。

Sモデル	20次迄
STモデル	20次迄
BSモデル	30次迄
BSTモデル	30次迄

4つのモデルに対する固有値解析の結果を第3.1図及び第3.2図にまとめる。第3.1図には、S，STモデルの固有周期，第3.2図には、BS，BSTモデルの固有周期を図示する。各々低次モードについては、その振動モードは卓越する主要コンポーネントの動きによって特徴づけられる。第3.1表から第3.4表に、各モデルにおける各次の固有周期，固有周波数及び卓越した振動を示すコンポーネントをまとめる。

振動モードについては、装置の各部分が振動するモードは上記4モデルを通じて殆んど共通であるので、代表として、STモデルについて概説する。

第3.3図から第3.16図に、STモデルの第1～12次迄の固有振動モードのプロッタ出力

図を示し、第 3.17 図にそれらの模式図をまとめる。

第 1～4 次モードは、全て  $50^\circ$ 、 $130^\circ$  方向の真空容器  $40^\circ$  セクタの水平面 ( $x-z$  平面) 内の振動が卓越するモードである。また第 5 次は、全て真空容器の上下動 ( $y$  方向振動) が卓越する振動モードである。

第 6 次モードにおいて、初めてポロイダル磁場コイル (支持棒) のねじれ振動 (円周方向振動) が現われるが、第 7～10 次モードは再び真空容器の動きが卓越するモードとなる。

第 7～8 次モードは、真空容器  $60^\circ$  セクタの水平面 ( $x-z$  平面) 内の振動が主要な動きであり、また、第 9～10 次モードは、 $90^\circ$  方向にある真空容器  $40^\circ$  セクタの水平面 ( $x-z$  平面) 内の振動が卓越するモードである。

第 11～12 次モードにおいて装置全体の振動モードが現われる。第 11 次は、装置全体の  $x$  方向の振動であり、第 12 次は同じく装置全体の  $z$  方向の振動が卓越するモードである。

第 13 次以降、解析を行った第 20 次迄は各コンポーネントの複合的な振動モードである。但し、第 18 次モードにおいて装置全体のねじれ振動がみられる。

S モデルの固有周期及び固有振動モードは、既に述べた様に ST モデルのそれに類似しているが、星形トラスの無い効果が現われて、装置全体の振動モードの固有周期に影響を与えている。

S モデルの固有周期及び固有振動モードの一覧を第 3.2 表に示すが、第 1～6 次は ST モデルのそれに全く一致する。しかし第 7 次に、ST モデルで第 18 次と高次モードであった装置全体のねじれ振動モードが現われている。これは星形トラスによるねじれ抑制の効果が S モデルではない為である。

第 8～11 次モードは、ST モデルの第 7～10 次モードが 1 次ずつ高次となって現われており、固有周期も全く等しい。

第 12～13 次モードには、ST モデルで第 11～12 次モードで現われた装置全体の  $x$ 、 $z$  方向振動モードが現われているが、これも星形トラスの無い効果で、ST モデルのそれらに比べて、固有周期はやや長い値となっている。

建家—装置モデルの固有周期及び固有振動モードは、BST、BS モデルに対して、各々第 3.3 表と第 3.4 表に示してある。BST モデルについて、その固有振動モードの概略を示すと以下の様である。

第 1～4 次は第 3.18 図から第 3.21 図のプロッタ出力図からわかる様に建家屋上面の面外振動であり、第 5 次において建家の  $x$  方向 (弱軸) の振動モードが現われる。第 3.22 図から第 3.25 図にその固有振動モードのプロッタ出力図を示す。これは建家本体の第 1 次固有振動モードであると言える。

第 6～9 次においては、ST モデルの第 1～4 次モード、即ち  $50^\circ$ 、 $135^\circ$  方向の真空容器  $40^\circ$  セクタの水平面 ( $x-z$  平面) 内の振動が卓越するモードである。

第 10 次において、建家の  $z$  方向 (強軸) の振動が現われる。第 3.26 図から第 3.29 図にその固有振動モードのプロッタ出力図を示す。これは建家本体の第 2 次固有振動モードである。(第 5 次及び第 10 次が、建家本体の弱軸及び強軸の各第 1 次固有振動モードであると言える。)

第 11 次及び第 12 次は、ST モデルの第 5 次及び第 6 次モード、即ち全ての真空容器の上

下動 ( y 方向振動 ) が卓越する振動モード, 及びポロイダル磁場コイル ( 支持棒 ) のねじれ振動モードである。

第 13 次以降, 解析を行った 30 次迄は各コンポーネント及び建家の複合モードとなっている。

BS モデルの振動特性は, BST モデルと殆んど変わりがないが, 星形トラスの無い効果が装置全体の振動モードには影響を及ぼす。即ち, 第 1 ~ 12 次モードは全て BS モデルと同じであるが, 第 5, 10, 12 次の, 建家 x 方向振動, 建家 z 方向振動及びポロイダル磁場コイル ( 支持棒 ) の円周方向ねじれモードの固有周期が BS モデルに比べてやや長周期となっている。

第 13 次以降, 解析を行った第 30 次迄は BS モデル同様各コンポーネント及び建家の複合モードとなっている。但し, 第 14 次に, BS モデルでは現われなかった装置全体のねじれ振動が現われている。これも, 星形トラスの無い効果と考えられる。

## 3.2 検 討

固有値解析において, 構造モデルとして S, ST, BS, BST モデルの 4 つの複合モデルを取り上げているが, それら相互間の比較検討及びこれらと各簡略モデルでの各コンポーネント解析との比較を行うに際しては, 各々のモデルで以下に記す点に留意して考察を行った。

ST モデルでは, 各コンポーネント及び装置全体の振動特性を調べると共に, 応答計算で合成するモード次数についても検討する。ここでは, 各主要コンポーネント毎に作成した簡略モデルの振動特性も参考とする。

S モデルでは, 星形トラスの有無による振動モードの影響を, ST モデルと比較する事により調べる。

次に, BST モデルでは, 建家が装置の振動特性に与える影響について, ST モデルと比較する事により調べる。また, 建家固有の振動モードを調べ, 更に応答計算で合成するモード次数についても検討を行う。

最後に, BS モデルにおいてトラスの有無により建家が装置の振動モードに与える影響を, BST モデルと比較する事により検討を行う。

### 3.2.1 ST ( 装置・星形トラス付き ) モデル

ST モデルの第 1 ~ 20 次の固有振動モードは, 第 3.3 図から第 3.16 図にその一部プロッタ出力図を示したが, 以下にその概要をまとめる。

- |            |   |
|------------|---|
| 第 1 ~ 4 次  | ± 50° 及び ± 130° に取り付く真空容器 40° セクタの x - z 平面 ( 水平面 ) 振動モード |
| 第 5 次      | 全ての真空容器の y 方向 ( 鉛直方向 ) 振動モード                              |
| 第 6 次      | 全てのポロイダル磁場コイル ( 支持棒 ) の大周方向の面外振動モード                       |
| 第 7 ~ 8 次  | 真空容器 60° セクタの x - z 平面 ( 水平面 ) 振動モード                      |
| 第 9 ~ 10 次 | ± 90° に取り付く真空容器 40° セクタの x - z 平面 ( 水平面 ) 振動モード           |



- 第11～12次 上架台の全体並進振動モード  
 第13～17次 真空容器の部分的なy方向振動等が複合された振動モード  
 第18次 上架台の全体的なねじれ振動モード  
 第19～20次 真空容器の部分的なy方向振動等が複合された振動モード  
 次に各コンポーネントの振動特性を調べる。

## (i) 真空容器

第1～4次迄は $\pm 50^\circ$ 及び $\pm 130^\circ$ に取り付く真空容器 $40^\circ$ セクタのx-z平面(水平面)振動モードである。それらの固有周期は、 $\tau_1 = 0.222 \sim \tau_4 = 0.209 \text{ sec}$ であり、簡略モデルでの同じ振動モードの固有周期  $\tau = 0.081 \text{ sec}$  に比して極めて長周期となっている。これは、簡略モデルでは、支持アームの境界条件を支持柱のフェースで固定としていた為、真空容器本体に対する固定度は極めて高いのに対し、装置全体モデルでは、支持柱も評価されている為、全体としての固定度が可成り低下した事に起因している。特に $\pm 50^\circ$ 及び $\pm 130^\circ$ 方向の真空容器の場合、支持柱は第1.18図に見る支持柱Cであり、下架台からL字形に張り出した片持ち梁になっており上架台とは接続されておらず、他の支持柱がいずれも上・下架台に接続されているのに比して固定度は低い。

同様の傾向は第9～10次モード、即ち $\pm 90^\circ$ に取り付く真空容器 $40^\circ$ セクタのx-z平面振動にも現われている。但し、この場合は、支柱の柱頭が上架台に連結されている為、真空容器支持アームの取付位置の節点の並進運動は少ない。これらのモードでの真空容器の変形パターンは支持のねじれによるものと解釈される。

第5次モードは、全真空容器のy方向(鉛直方向)振動モードである。 $\tau_5 = 0.187 \text{ sec}$ であり、簡略モデルの同振動モードも $40^\circ$ セクタで $\tau = 0.160 \text{ sec}$ 、 $60^\circ$ セクタで $\tau = 0.190 \text{ sec}$ と近い値を示している。振動モードから、支持アーム部分の面外曲げ(鉛直方向)変形が極めて顕著であり、支持アーム先端が取り付く支持の変形は少ない事がわかる。

## (ii) ポロイダル磁場コイル

第6次に、全てのポロイダル磁場コイルの支持枠部分が円周方向にねじれる振動モードを示している。固有周期は $\tau_6 = 0.163 \text{ sec}$ である。一方、簡略モデルでは $\tau = 0.292 \text{ sec}$ である。この固有周期の差は、簡略モデルにおいては支持柱先端の面外回転を自由として解析を行っているが、装置全体モデルに組み込まれた場合、当該箇所を梁要素に固定され、面外回転に対してある程度の拘束効果が生じた事が理由と考えられる。

ポロイダル磁場コイルの簡略モデルにおいて現われた第2次モード以下の振動モードは、本解析の第20次迄に生じていない。簡略モデルの第2次モードは $\tau = 0.048 \text{ sec}$ であり、装置全体モデルに組み込んだ場合、ある程度固定度は上がる為、更に短周期となるのに対し、本STモデルの解析の第20次固有周期は $\tau_{20} = 0.069 \text{ sec}$ である為、この範囲内には存在しない。

## (iii) トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは、装置全体モデルに組み込まれた場合、コイル間スペーサの存在により、その簡略モデルに比べて固定度は可成り高くなり、解析範囲内ではトロイダル磁場コイルの局所的な振動モードは発生しない。

逆に、装置全体モデルでは、トロイダル磁場コイルが支柱と共に上架台を支持する主要構造を形成しており、特に上架台の面内の動きに対しては、中心支柱以外の支柱の支持効果は無く、トロイダル磁場コイルと上・下架台の結合がその役割の殆んどを果たしている。

#### (V) 上架台

第11次において、上架台、トロイダル磁場コイルを含め、装置全体がx方向に変位するモードが現われており、更に次の第12次では装置全体がz方向に変位するモードが生じている。固有周期は、各々  $\tau_{11} = 0.094 \text{ sec}$ ,  $\tau_{12} = 0.093 \text{ sec}$  である。

第18次において装置全体のねじれモードが生じる。その固有周期は  $\tau_{18} = 0.074 \text{ sec}$  である。

以上の検討により、地震応答解析で合成するモード次数は、下記の各事項から判断して第1～20次で十分であると結論できる。

先ず、真空容器は、支持アーム部分の境界条件が全体モデルと簡略モデルで変わる為、その出現する振動モードの固有周期も変わるが、第20次迄に、真空容器の各ユニットは、いずれも水平及び鉛直方向に振動モードを含んでいる。

また、トロイダル磁場コイルは、簡略モデルの逆対称境界条件の第1次振動モードのみが第20次迄に入っている。しかし、第2次以下のモード及び対称境界条件における振動モードは、いずれもその固有周期の大きさから見て装置全体モデルでは可成り高次に相当するものであり、応答に与える影響は小さいと考えられる。

更に、トロイダル磁場コイルは、そのモデルの形状及び剛性から判断して、上架台を支持する主要構造物であり、装置全体が変形するモードが含まれていれば十分であると考えられる。なお、第20次迄に、装置全体がx又はz方向に振動するモードと全体がねじれるモードが含まれている。

#### 3.2.2 S (装置・星形トラスなし) モデル

Sモデルの固有周期は第3.1図及び第3.2表に示してある。これからもわかる様に、Sモデルの固有周期及び振動モードはSTモデルのそれと殆んど同じと言える。第1～20次迄で、Sモデルの固有周期と振動モードで、STモデルと同一で無いのは第7, 12, 13次のみである。

第7, 12, 13次モードは、各々、装置全体のねじれモード、装置全体のx方向変形、装置全体のz方向変形でモード形としては、STモデルの第18, 11, 12次に対応している。

星形トラスの無いSモデルでは、上架台全体のねじれ変形モードに対する拘束が小さくなり、その固有周期がSTモデルのそれに比して1.80倍と長くなり第7次で出現している。

一方、Sモデルの装置全体のx方向或はz方向への変形モードは、固有周期がSTモデルのそれに比して5%程度の増加に留まっている。これは、x, z方向並進モードに対しては、ねじれ変形モードに比べてトラスの拘束効果が小さい為と思われる。

以上見た様に、SモデルはSTモデルに比べて、上架台のねじれ変形の固有周期が大きく変動するとともに、x, z方向の並進モードの固有周期も多少変わるが、他の固有周期は全く同

一である事がわかった。

### 3.2.3 BST ( 建家-装置・星形トラス付き ) モデル

当初, BSTモデルにおいても, その固有値解析次数は第20次迄行った。各々の振動モードの概略を述べると以下の通りである。

- 第1～4次 建家屋上面の面外振動モード
- 第5次 建家x ( 弱軸 ) 方向のロッキング・スウェイ振動モード
- 第6～9次  $\pm 50^\circ$  及び  $\pm 130^\circ$  に取り付く真空容器  $40^\circ$  セクタの x-z 平面振動モードであり, STモデルにおける第1～4次モードに対応する。
- 第10次 建家z ( 強軸 ) 方向のロッキング・スウェイ振動モード
- 第11～12次 全真空容器のy ( 鉛直 ) 方向の振動及び全ポロイダル磁場コイル支持枠の円周廻りの面外振動モードであり, 各々STモデルの第5, 6次モードに対応する。
- 第13～14次 各々, 建家のx, y方向の変位モードである。
- 第15～20次 建家と装置の複合した振動モードである。

BSTモデルにおける第1～20次迄の振動モードを調べると以下の事が言える。

第1～4次は建家の屋上面の面外振動モードであり建家全体で考える限り, これらは局所的なモードである。建家の全体的な振動モードは, 第5次 ( x方向 ), 第10次 ( z方向 ), 第13次 ( x方向 ), 第14次 ( y方向 ) で生じている。第15次以降は, そのモード性状の把握が難しい。

装置部分の振動モードは, STモデルでの第10次程度の振動モード迄が見い出される。STモデル第11, 12次で生じた装置全体の変位モードは第20次迄に入っていない。

以上の様に, BSTモデルにおいては, 屋上面の局所的な面外変形振動や建家全体のロッキング・スウェイ等のモードが長周期であった為, 本来の目的である装置の振動を検討するのに重要と考えられる装置全体の振動モードが第20次迄に入らなかった。この為, 建家と装置とを連成するモデル ( BST, BSモデル ) では, 合成するモードの次数は第20次迄では不足であると考えられる。そこで, BSTモデルの固有値解析を第30次迄行った。

第30次迄の解析結果によれば, 第30次迄にSTモデルの第19次迄のモードが含まれており, これより装置の可成り複雑なモードも十分に含まれていると考えられ, 建家が入るモデルの応答解析は第30次迄合成して行い事とする。

### 3.2.4 BS ( 建家-装置・星形トラスなし ) モデル

BSモデルの固有周期は第3.2図及び第3.4表に示してある。これからもわかる様に, BSモデルの固有周期及び固有振動モードはBSTモデルのそれと殆んど同じである。第1～20次迄でBSモデルとBSTモデルが同一で無いのは第14, 16次モードのみである。

第14次モードは, 上架台の全体ねじれ変形モードであり, STモデルで第7次モードとして現われているモードである。これはSモデルにおいても見た様に, 星形トラスが無いと低次

に現われる振動モードである。また、第16次モードは、装置のy（鉛直）方向の振動モード及び真空容器60°セクタの横ずれ等の複合モードである。

以上の様に、BSモデルはBSTモデルと殆んど同一の振動性状を示し、応答解析で合成するモード次数はBSTモデル同様、第30次迄で十分と考えられる。

#### 4. ま と め

以上の検討により、JT-60の装置全体としての振動特性が把握でき、また、それに与える建家の影響の検討も行った。

全体として、JT-60は真空容器の振動が卓越するモードが優位を占め、装置に生じる振動モードの第1～5次を占めている。即ち第1～4次は±50°、±130°方向の真空容器40°セクタの水平面内の振動で、 $\tau_1 \sim \tau_4 = 0.222 \sim 0.209 \text{ sec}$ であり、5次は全ての真空容器の鉛直振動モードで、 $\tau_5 = 0.187 \text{ sec}$ である。

JT-60においては、真空容器の振動が卓越するモードである事は、その支持方法から当然予想されていたが、特に±50°、±130°方向の真空容器40°セクタの振動モードが低次に現われるという事は、これらの支持方法—第1.18図で示す支持柱の型Cであり、支持柱の固定度は最も低い—の再検討を要するものと思われる。

ポロイダル磁場コイルは、装置モデルの第6次にのみ支持枠のトロイダル方向のねじれモードが現われており、 $\tau_6 = 0.163 \text{ sec}$ である。本解析では、ポロイダル磁場コイル支持枠は上下の支持柱にて支持する方式を採っているが、この方式では運転時にトロイダル磁場コイルに作用する転倒力が、上・下架台を介してポロイダル磁場コイル支持枠に作用し、それによる支持枠のねじれ変形を避ける事ができない為、現在、下支持柱のみによりポロイダル磁場コイル支持枠を支持する設計が進められているが、この方式では支持枠の面外振動に対する拘束力が弱く、ポロイダル磁場コイルの固有振動モードは更に低次に現われるものと思われる。ポロイダル磁場コイル支持枠及び支持柱の設計は、この点に十分留意して行いべきである。

本解析では、最後に応答解析で合成するモード次数の検討を行い、装置モデルに対しては第20次迄、装置—建家モデルに対しては第30次迄で十分という判断を行った。なお、JT-60の地震時の応答解析<sup>(5)</sup>については別報告書にその内容を譲る。

## 謝 辞

本報告書を作成するに当り、終始有益な御意見、御指導を戴いた吉川允二JT-60計画室長、飯島勉JT-60第2開発室長、太田充本体開発グループ・リーダーに深く感謝致します。

また、建家、地盤のモデル化に関して御意見を戴いた建設部核融合施設室鈴木偉之氏、解析データの作成等多くの作業に御協力戴いたJT-60第2開発室及び(株)構造計画研究所の各位に対しても深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 大型トカマク開発部 JT-60開発室；臨界プラズマ試験装置詳細設計(1977)内部資料。
- (2) 高津英幸，清水正亜，山本正弘，太田充；JAERI-M 8017 (1978)。
- (3) 例えば Muto, K., Hayashi, T., Omatsuzawa, K., Ohta, T., Uchida, K., Kasai, Y. ; Nucl. Eng. Des. 27 (1974) 220-227.
- (4) 鈴木偉之；私信。
- (5) Takatsu, H., Shimizu, M., Okumura, M., Kawakami, M. ; To be published.
- (6) Wilson, E. L., Bathe, K. J., Peterson, F. E., Dovey, H. H. ; Nucl. Eng. Des. 25 (1973) 257-274.
- (7) 森下宗，高津英幸，高嶋哲夫，山本正弘，太田充，吉井明彦，鈴木充；JAERI-M 6822 (1976)。
- (8) 高圧ガス保安協会；コンビナート保安防災技術指針，(1974)。
- (9) 石原研而；“土質動力学の基礎”，鹿島出版会，東京，(1976)。

## 謝 辞

本報告書を作成するに当り、終始有益な御意見、御指導を戴いた吉川允二JT-60計画室長、飯島勉JT-60第2開発室長、太田充本体開発グループ・リーダーに深く感謝致します。

また、建家、地盤のモデル化に関して御意見を戴いた建設部核融合施設室鈴木偉之氏、解析データの作成等多くの作業に御協力戴いたJT-60第2開発室及び(株)構造計画研究所の各位に対しても深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 大型トカマク開発部 JT-60開発室；臨界プラズマ試験装置詳細設計(1977)内部資料。
- (2) 高津英幸，清水正亜，山本正弘，太田充；JAERI-M 8017 (1978)。
- (3) 例えば Muto, K., Hayashi, T., Omatsuzawa, K., Ohta, T., Uchida, K., Kasai, Y. ; Nucl. Eng. Des. 27(1974) 220-227.
- (4) 鈴木偉之；私信。
- (5) Takatsu, H., Shimizu, M., Okumura, M., Kawakami, M. ; To be published.
- (6) Wilson, E. L., Bathe, K. J., Peterson, F. E., Dovey, H. H. ; Nucl. Eng. Des. 25(1973) 257-274.
- (7) 森下宗，高津英幸，高嶋哲夫，山本正弘，太田充，吉井明彦，鈴木充；JAERI-M 6822 (1976)。
- (8) 高圧ガス保安協会；コンビナート保安防災技術指針，(1974)。
- (9) 石原研而；“土質動力学の基礎”，鹿島出版会，東京，(1976)。

第 1.1 表 トロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの  
支持梁の断面性能

Element number	1	2	3
A (cm <sup>2</sup> )	1.40x10 <sup>3</sup>	1.94x10 <sup>3</sup>	3.69x10 <sup>3</sup>
J <sub>1</sub> (cm <sup>4</sup> )	7.26x10 <sup>4</sup>	9.65x10 <sup>4</sup>	1.95x10 <sup>5</sup>
J <sub>2</sub> (cm <sup>4</sup> )	5.74x10 <sup>4</sup>	2.03x10 <sup>6</sup>	6.72x10 <sup>5</sup>
J <sub>3</sub> (cm <sup>4</sup> )	1.59x10 <sup>7</sup>	1.06x10 <sup>7</sup>	2.91x10 <sup>8</sup>

第 1.2 表 ポロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの  
支持柱の断面性能

Component	Upper support rod	Lower support rod
A (cm <sup>2</sup> )	9.49x10 <sup>2</sup>	9.03x10 <sup>3</sup>
J <sub>1</sub> (cm <sup>4</sup> )	1.52x10 <sup>4</sup>	1.45x10 <sup>4</sup>
J <sub>2</sub> (cm <sup>4</sup> )	1.69x10 <sup>4</sup>	1.46x10 <sup>4</sup>
J <sub>3</sub> (cm <sup>4</sup> )	3.22x10 <sup>5</sup>	2.78x10 <sup>5</sup>

第 1.3 表 真空容器装置全体モデル組込用モデルにおける支持  
アームの梁断面性能

Element	A <sub>1</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>2</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>3</sub> (cm <sup>2</sup> )	J <sub>1</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>2</sub> (cm <sup>4</sup> )	J <sub>3</sub> (cm <sup>4</sup> )
	1.17x10 <sup>3</sup>	6.98x10 <sup>2</sup>	2.89x10 <sup>2</sup>	2.23x10 <sup>5</sup>	1.15x10 <sup>6</sup>	5.77x10 <sup>6</sup>

第 1.4 表 装置全体モデルの規模

Model	ST	S
Number of node	779	775
Number of		
truss element	30	22
beam element	1212	1212
membrane element	198	198
solid element	36	36
shell element	230	230
boundary element	12	12
Number of freedom	4512	4512

第 2.1 表 建家モデル付加重量一覧

Floor	Weight ( ton )
RF	$3.71 \times 10^3$
5F	$1.45 \times 10^3$
4F	$1.26 \times 10^3$
3F	$1.07 \times 10^3$
2F	$1.09 \times 10^3$
1F	$4.20 \times 10^3$
B1F	$1.14 \times 10^4$
Total	$2.42 \times 10^4$

第 2.2 表 建家モデルの規模

Number of node	216
Number of	
beam element	1
shell element	331
boundary element	196

第 2.3 表 建家—装置モデルの規模

Model	BST	BS
Number of node	991	991
Number of		
truss element	30	22
beam element	1213	1213
membrane element	198	198
solid element	36	36
shell element	561	561
boundary element	208	208
Number of freedom	5874	5874



第 3.1 表 ST モデルの固有周期

Mode number	Frequency ( Hz )	Period ( sec )	Mode
1	4.50	0.222	V.V.( 40° sector )
2	4.55	0.220	V.V.( 40° sector )
3	4.73	0.212	V.V.( 40° sector )
4	4.79	0.209	V.V.( 40° sector )
5	5.35	0.187	V.V.
6	6.12	0.163	P.F.C.
7	8.41	0.119	V.V.( 60° sector )
8	8.63	0.116	V.V.( 60° sector )
9	9.34	0.107	V.V.( 40° sector )
10	9.47	0.106	V.V.( 40° sector )
11	10.64	0.094	S.S.
12	10.80	0.093	S.S.
13	11.51	0.087	*
14	12.37	0.081	*
15	12.65	0.079	*
16	13.34	0.075	*
17	13.56	0.074	*
18	13.61	0.073	*
19	14.39	0.070	*
20	14.42	0.069	*

V.V. Vacuum Vessel  
P.F.C. Poloidal Field Coil  
S.S. Support Structure  
\* Compound Mode

第3.2表 Sモデルの固有周期

Mode number	Frequency ( Hz )	Period ( sec )	Mode	Mode number in ST model
1	4.50	0.222	V.V.( 40° sector )	1
2	4.55	0.220	V.V.( 40° sector )	2
3	4.73	0.212	V.V.( 40° sector )	3
4	4.79	0.209	V.V.( 40° sector )	4
5	5.35	0.187	V.V.	5
6	6.05	0.165	P.F.C.	6
7	7.44	0.134	S.S.	-
8	8.40	0.119	V.V.( 60° sector )	7
9	8.62	0.116	V.V.( 60° sector )	8
10	9.28	0.108	V.V.( 40° sector )	9
11	9.48	0.105	V.V.( 40° sector )	10
12	10.13	0.099	S.S.	-
13	10.38	0.096	S.S.	-
14	11.43	0.088	*	13
15	12.35	0.081	*	14
16	12.65	0.079	*	15
17	13.34	0.075	*	16
18	13.54	0.074	*	17
19	14.39	0.070	*	19
20	14.42	0.069	*	20

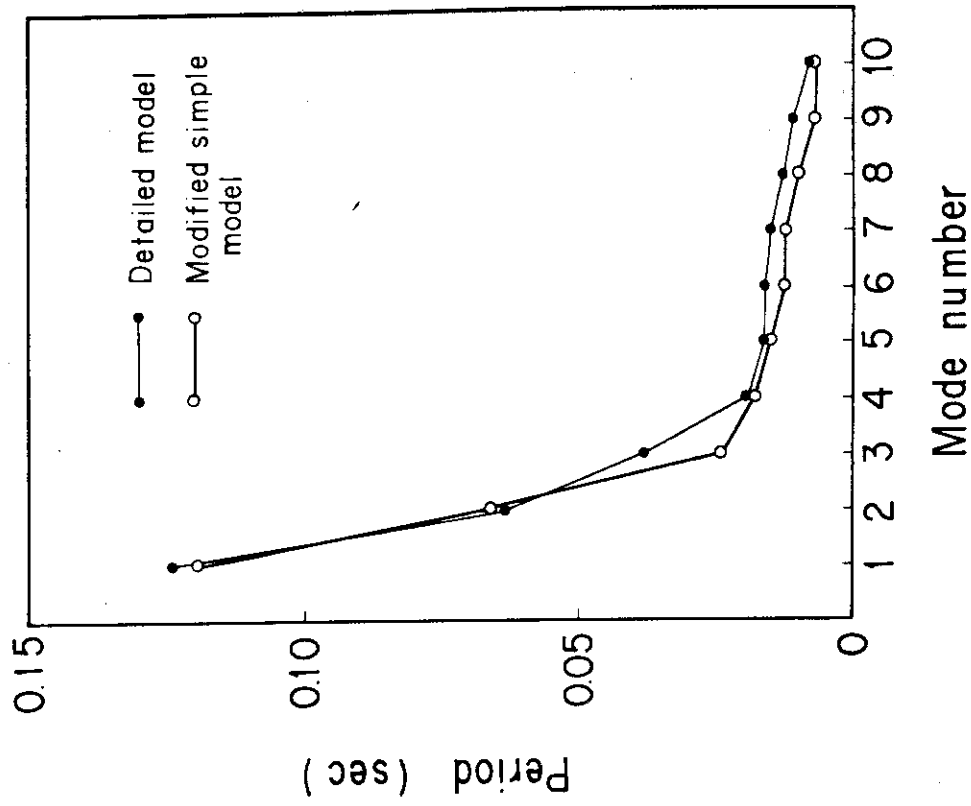
第 3.3 表 BST モデルの固有周期

Mode number	Frequency ( Hz )	Period ( sec )	Mode	Mode number in ST model
1	1.09	0.919	B.( RF )	-
2	1.49	0.670	B.( RF )	-
3	2.38	0.420	B.( RF )	-
4	2.57	0.389	B.( RF )	-
5	4.33	0.231	B.	-
6	4.47	0.224	V.V.( 40° sector )	1
7	4.55	0.220	V.V.( 40° sector )	2
8	4.75	0.211	V.V.( 40° sector )	3
9	4.79	0.209	V.V.( 40° sector )	4
10	4.91	0.204	B.	-
11	5.33	0.188	V.V.	5
12	6.12	0.163	P.F.C.	6
13	6.73	0.149	*	-
14	7.69	0.130	*	-
15	8.34	0.120	*	7
16	8.57	0.117	*	8
17	8.75	0.114	*	-
18	9.02	0.111	*	-
19	9.47	0.106	*	-
20	9.68	0.103	*	-
21	10.38	0.096	*	-
22	10.57	9.47	*	-
23	11.37	8.80	*	-
24	12.32	8.12	*	-
25	12.57	7.95	*	-
26	12.63	7.92	*	-
27	13.08	7.65	*	-
28	13.33	7.50	*	-
29	13.51	7.40	*	-
30	14.37	6.96	*	-

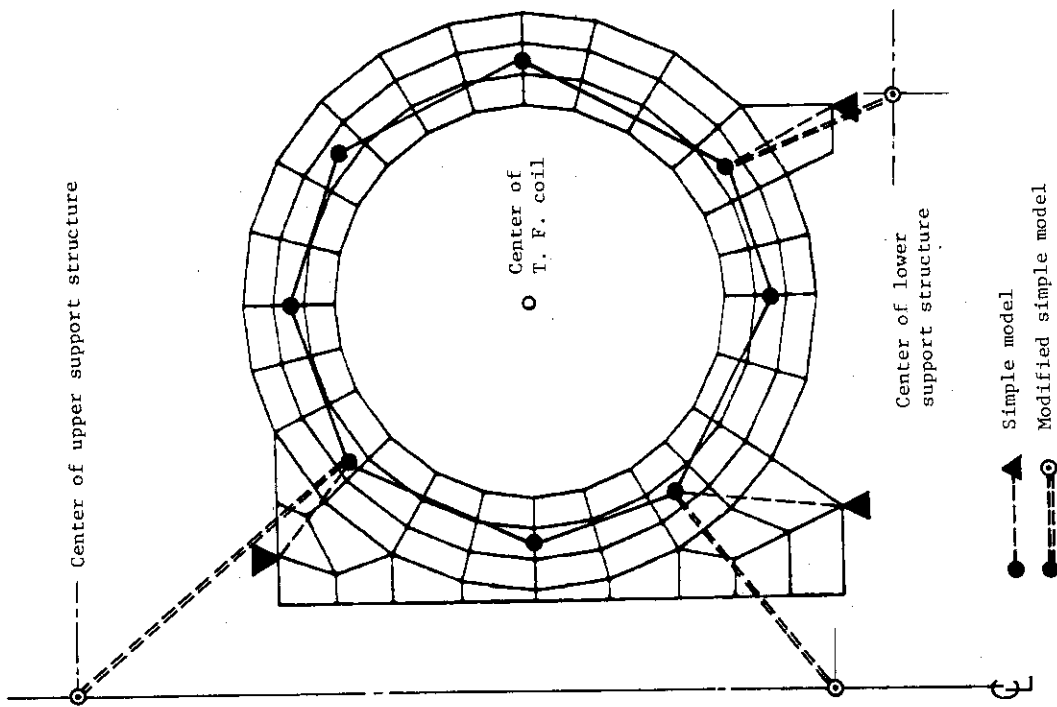
B. Building

第 3.4 表 BS モデルの固有周期

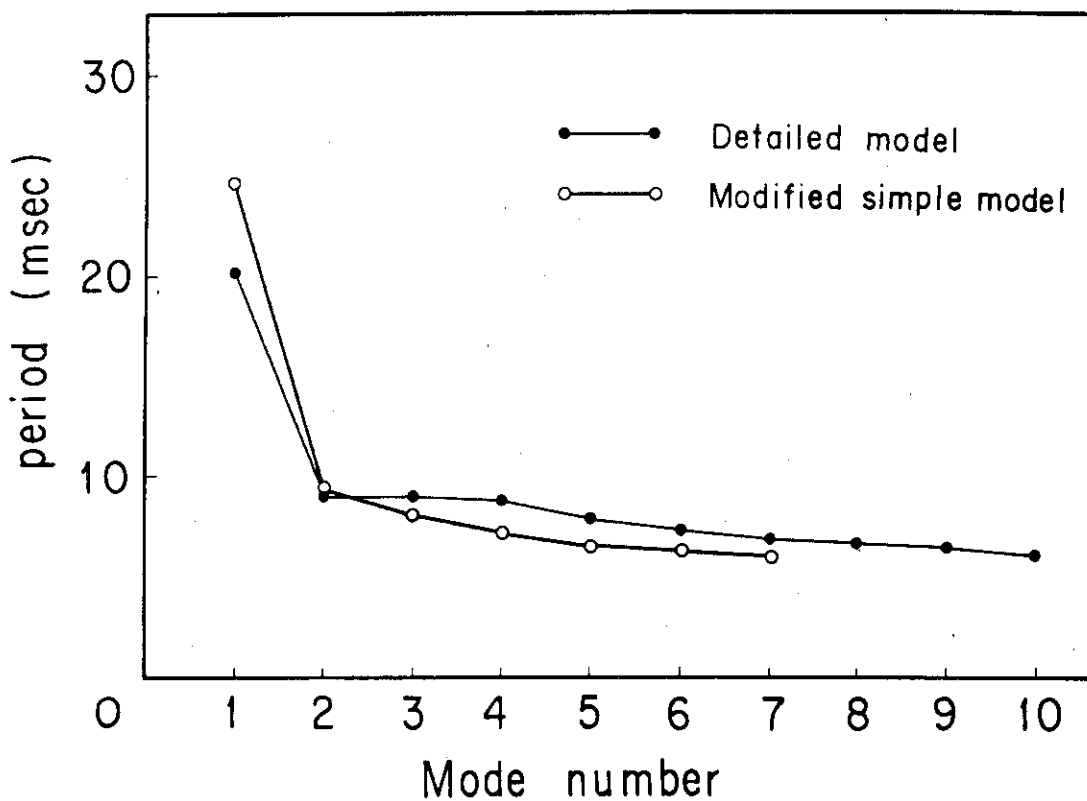
Mode period	Frequency ( Hz )	Period ( sec )	Mode	Mode number in ST model
1	1.09	0.919	B.( RF )	-
2	1.49	0.670	B.( RF )	-
3	2.38	0.420	B.( RF )	-
4	2.57	0.389	B.( RF )	-
5	4.28	0.234	B.	-
6	4.46	0.224	V.V.( 40° sector )	1
7	4.55	0.220	V.V.( 40° sector )	2
8	4.74	0.211	V.V.( 40° sector )	3
9	4.79	0.209	V.V.( 40° sector )	4
10	4.84	0.207	B.	-
11	5.33	0.188	V.V.	5
12	6.03	0.166	P.F.C.	6
13	6.63	0.151	*	-
14	7.21	0.139	S.S.	-
15	7.59	0.132	*	-
16	8.19	0.122	*	-
17	8.46	0.118	*	-
18	8.57	0.117	*	-
19	8.75	0.114	*	-
20	9.47	0.106	*	-
21	9.59	0.104	*	-
22	10.19	0.098	*	-
23	10.53	0.095	*	-
24	11.36	0.088	*	-
25	12.32	0.081	*	-
26	12.57	0.080	*	-
27	12.63	0.079	*	-
28	13.33	0.075	*	-
29	13.50	0.074	*	-
30	14.37	0.070	*	-



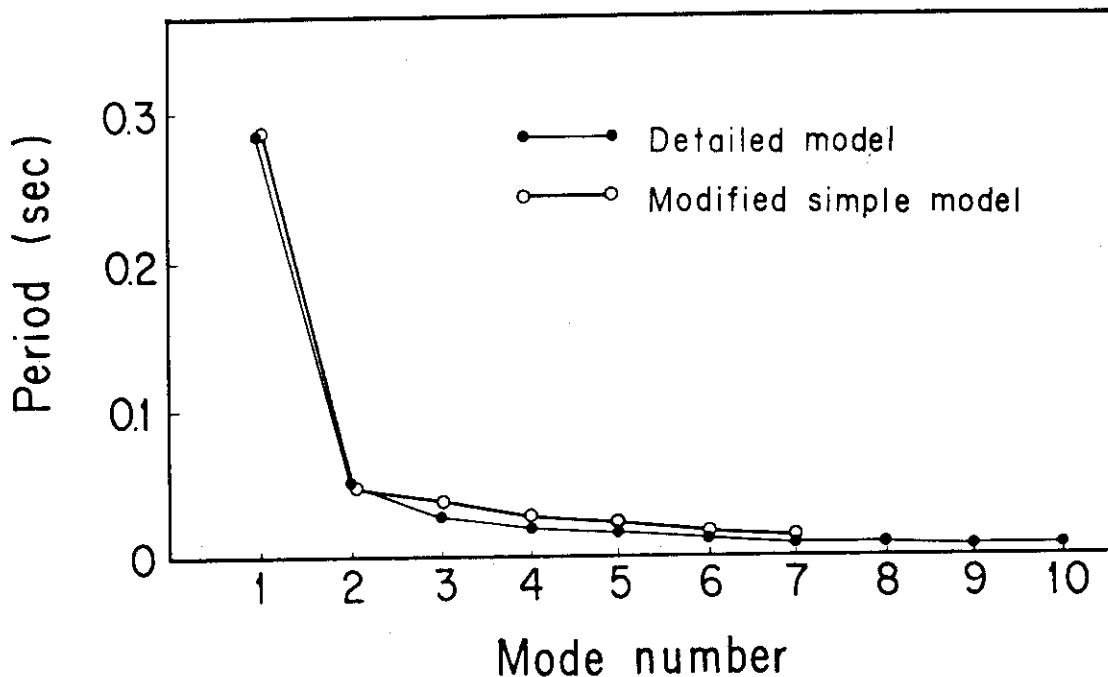
第 1.2 図 トロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用モデルの固有周期



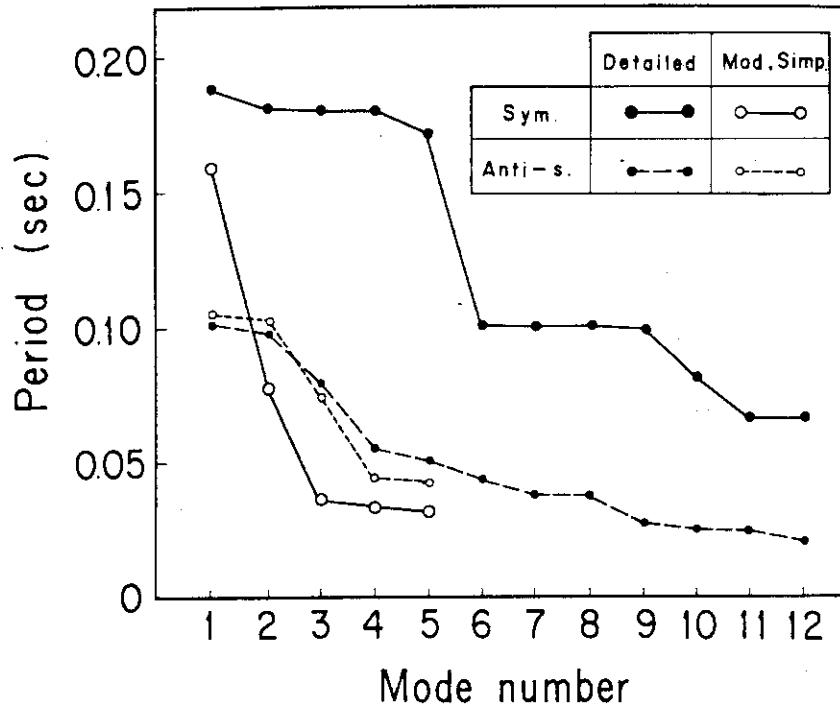
第 1.1 図 トロイダル磁場コイル簡略モデルと装置全体モデル組込用モデルの支持梁の位置関係



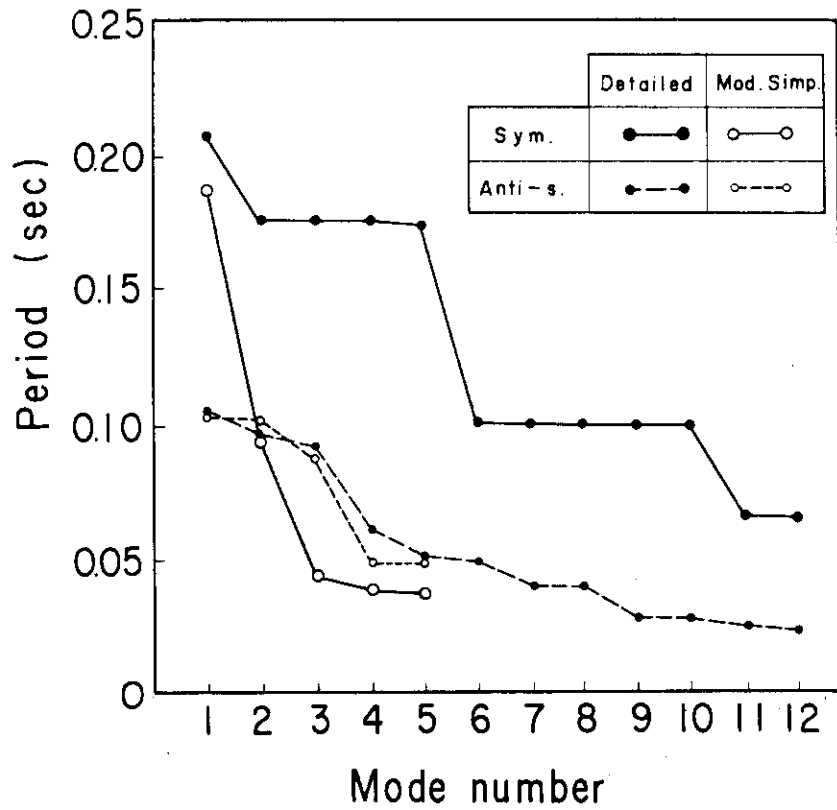
第 1.3 図 ポロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用  
モデルの固有周期 (対称境界条件)



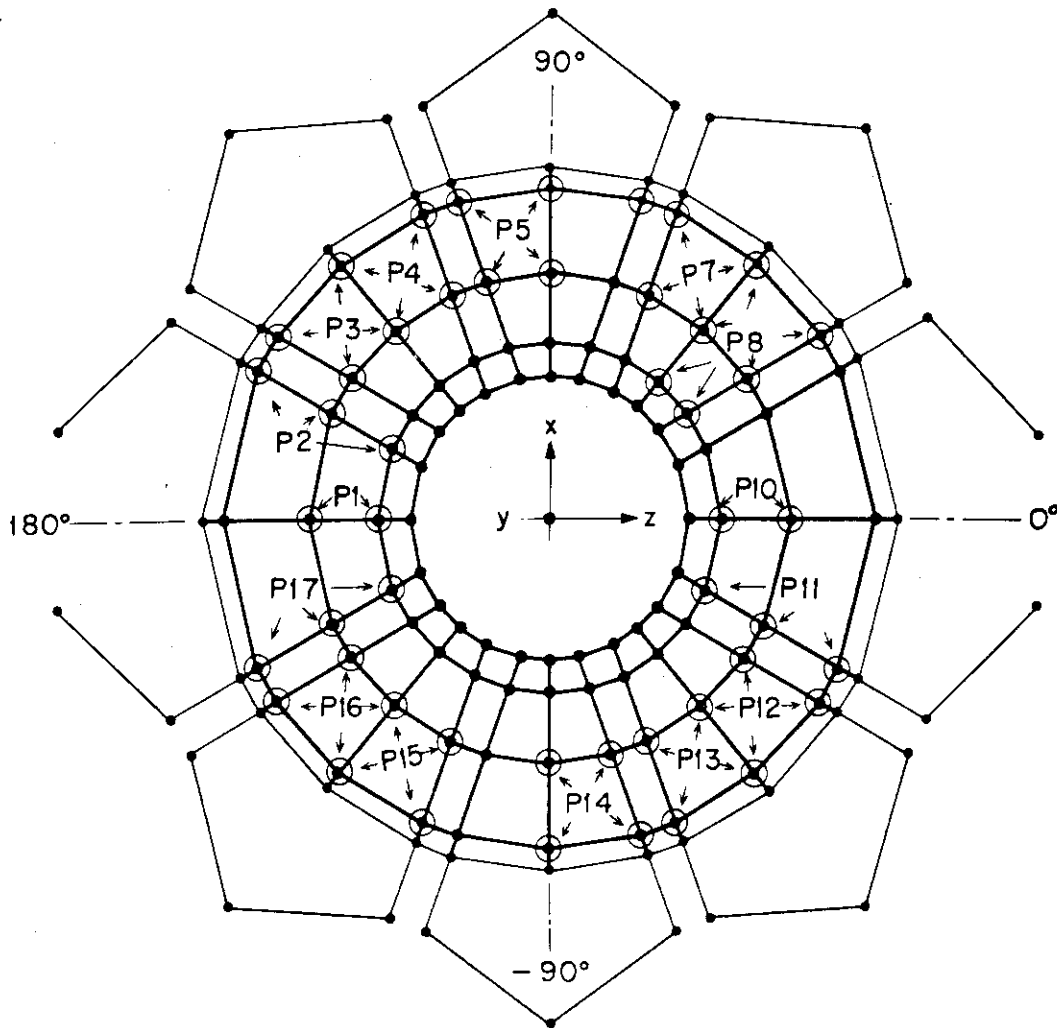
第 1.4 図 ポロイダル磁場コイル装置全体モデル組込用  
モデルの固有周期 (逆対称境界条件)



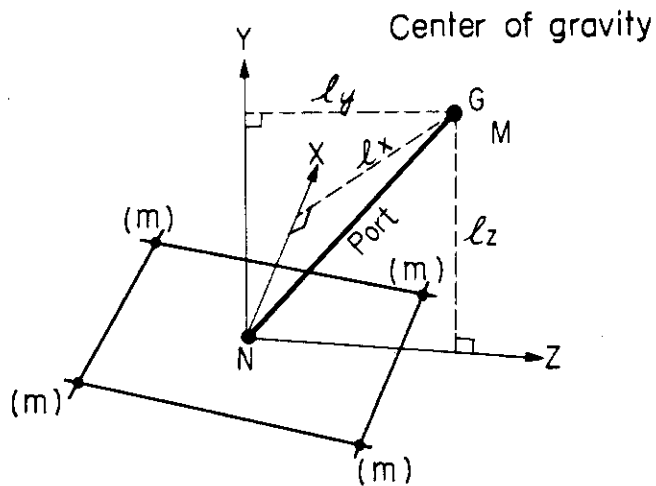
第 1.5 図 真空容器 40°セクタ装置全体モデル組込用モデルの固有周期



第 1.6 図 真空容器 60°セクタ装置全体モデル組込用モデルの固有周期

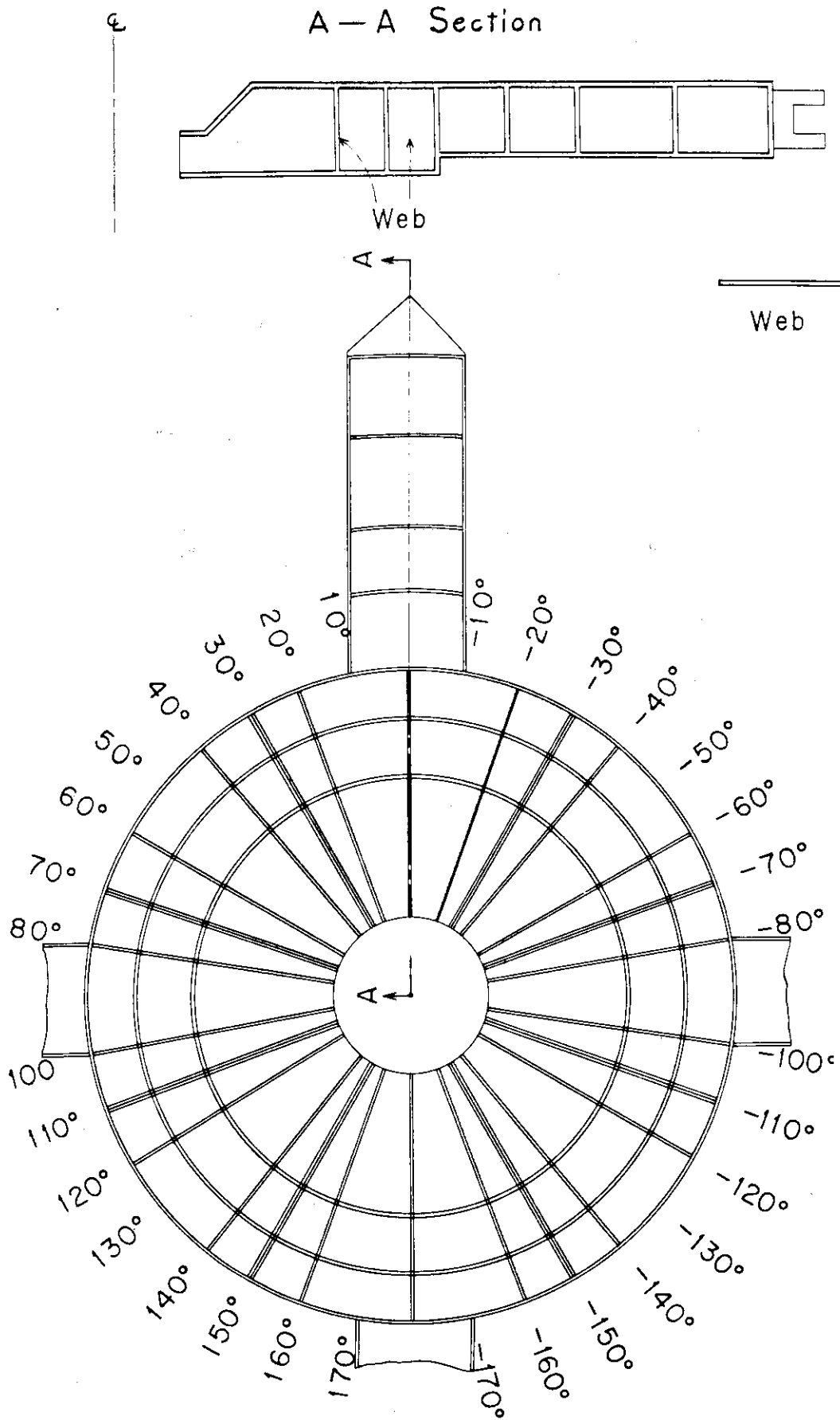


第 1.7 図 ポート，ボックス重量の再配置要領

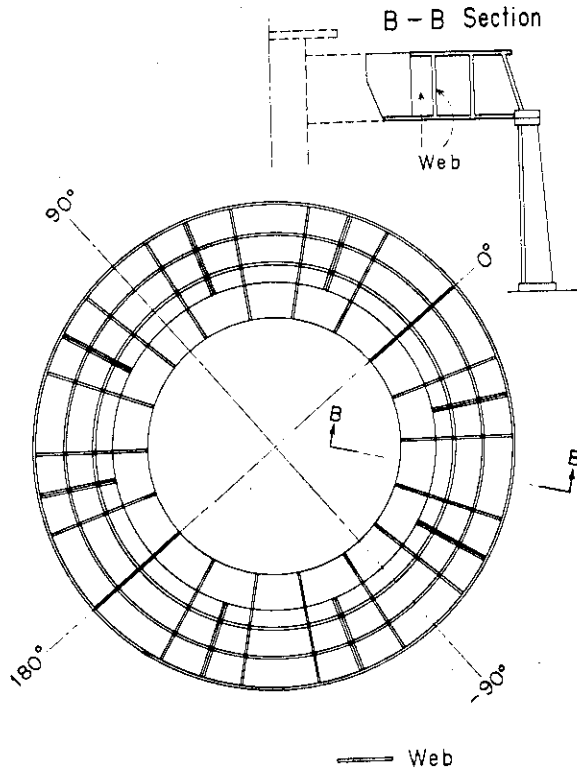


第 1.8 図 ポート重量と分配重量

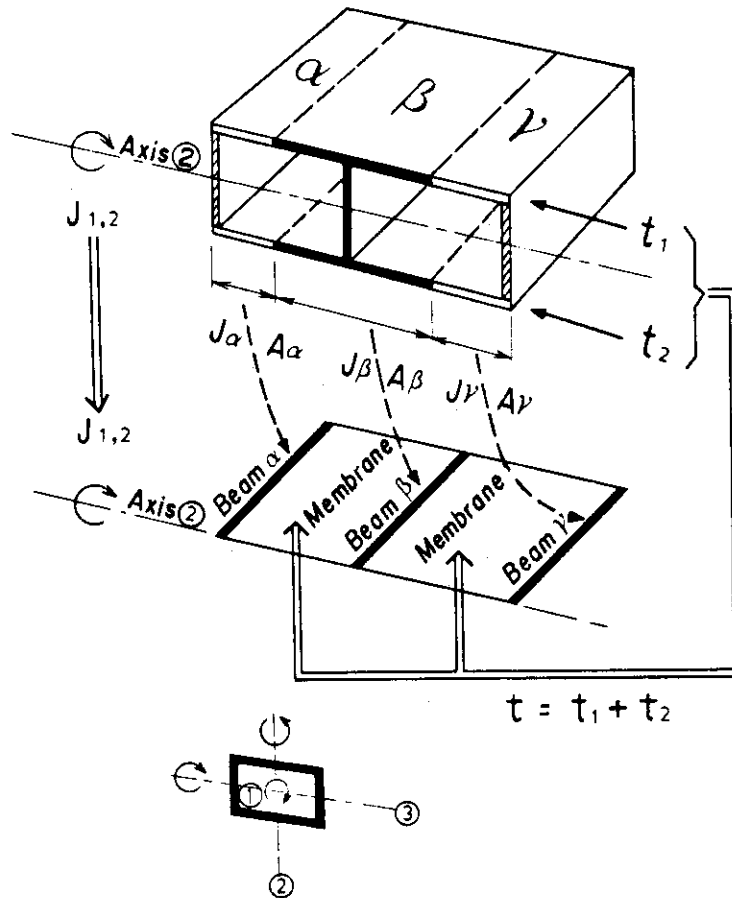




第1.9图 上架台平面图

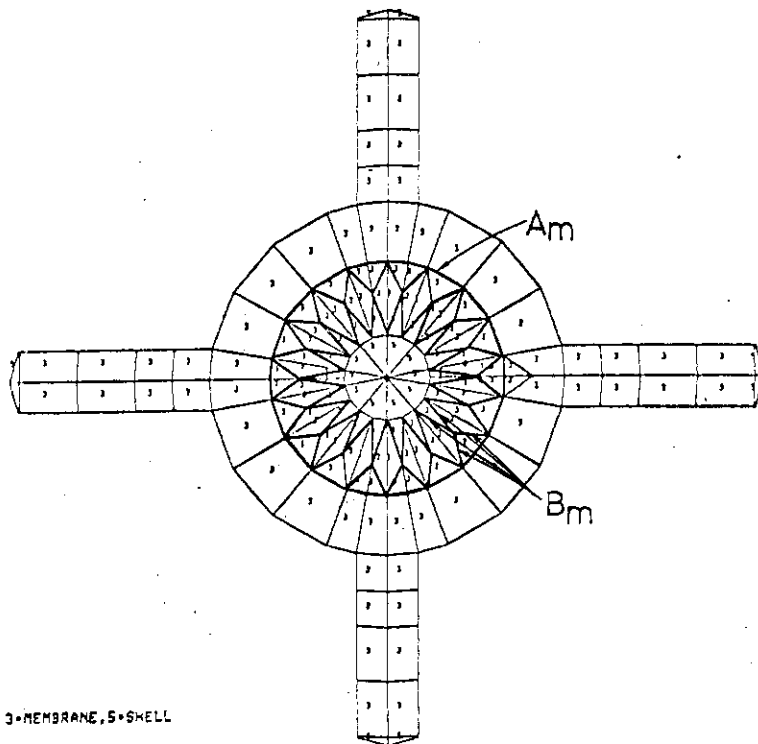


第 1.10 図 下 架 台 平 面 図



第 1.11 図 架 台 モ デ ル 化 の 要 領

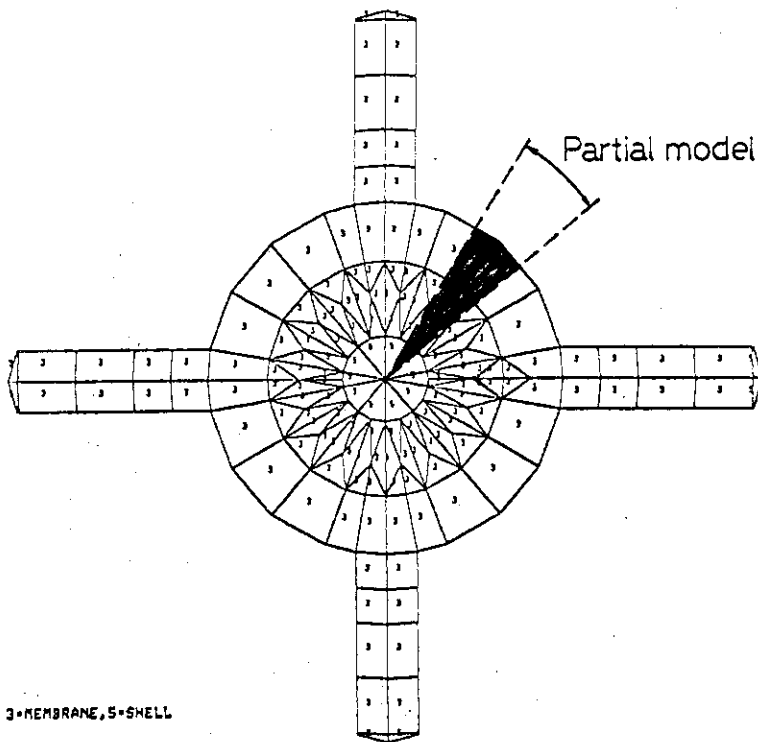
TOTAL MODEL / UPPER FLOOR / MEMBRANE.SHELL



3-MEMBRANE,5-SHELL

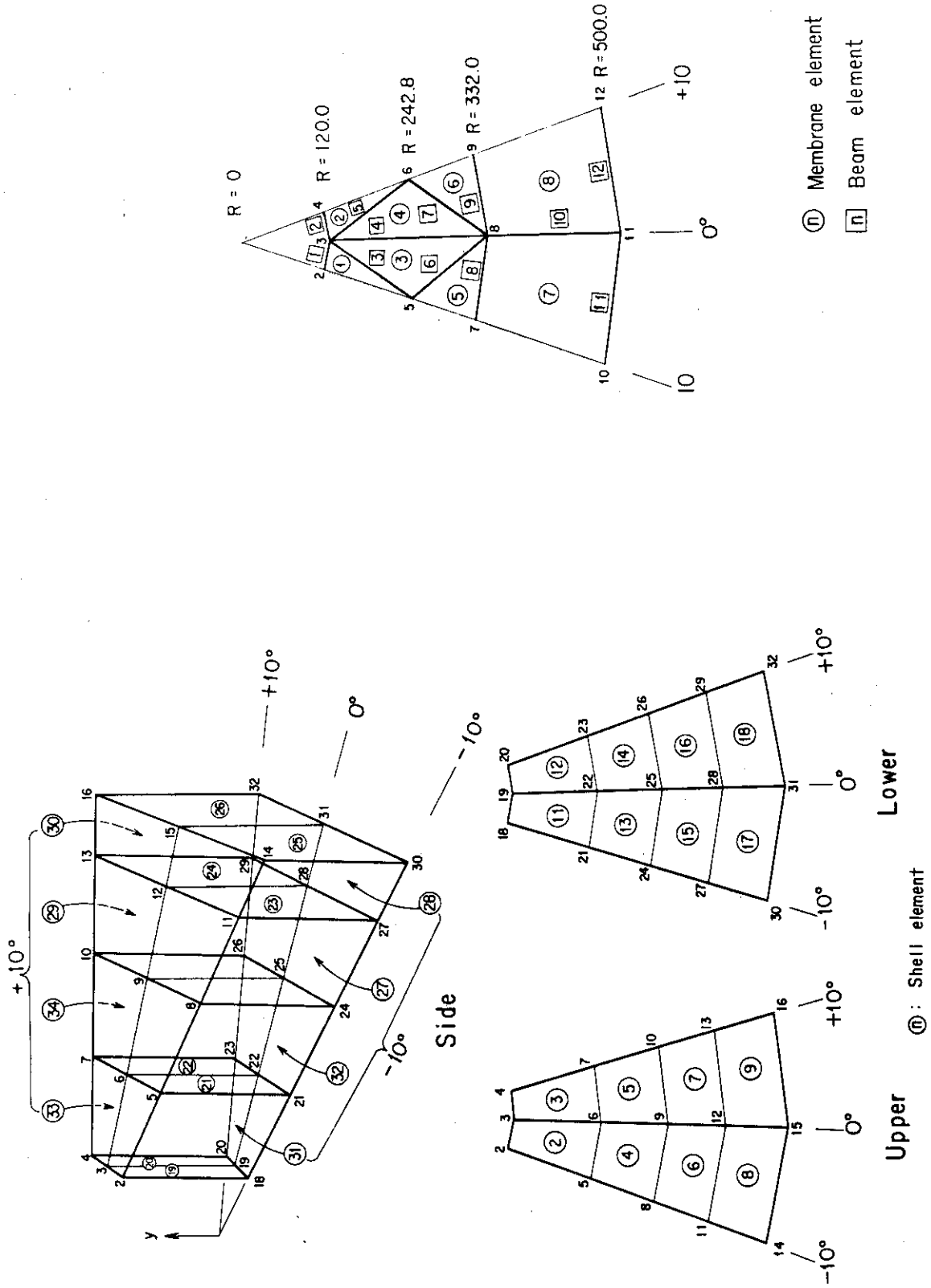
第 1.12 図 ポロイダル磁場コイル支持柱に結合される梁要素

TOTAL MODEL / UPPER FLOOR / MEMBRANE.SHELL



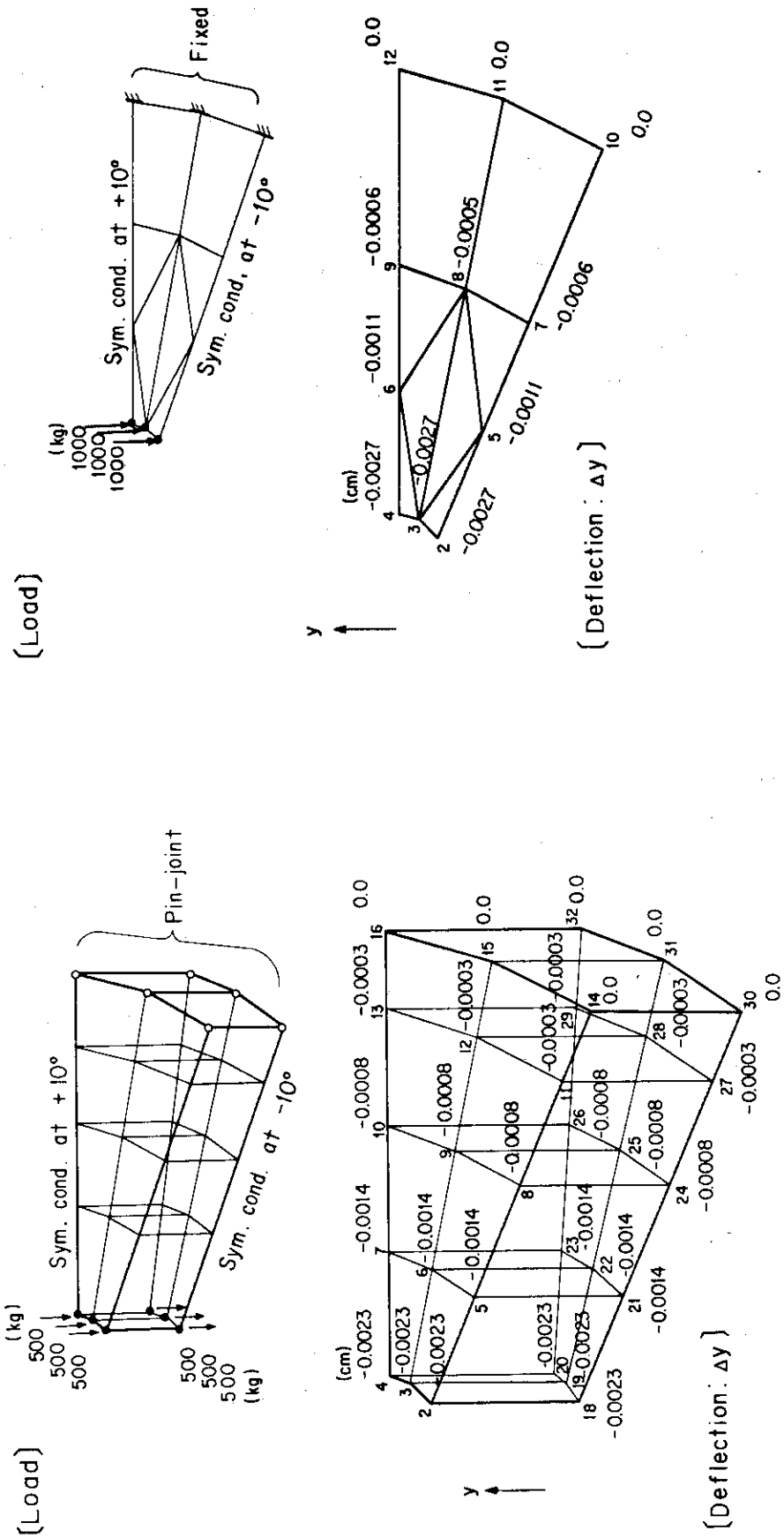
3-MEMBRANE,5-SHELL

第 1.13 図 架台剛性検討部分モデル抽出範囲



第 1.15 図 架台剛性検討部分モデル—簡略モデル

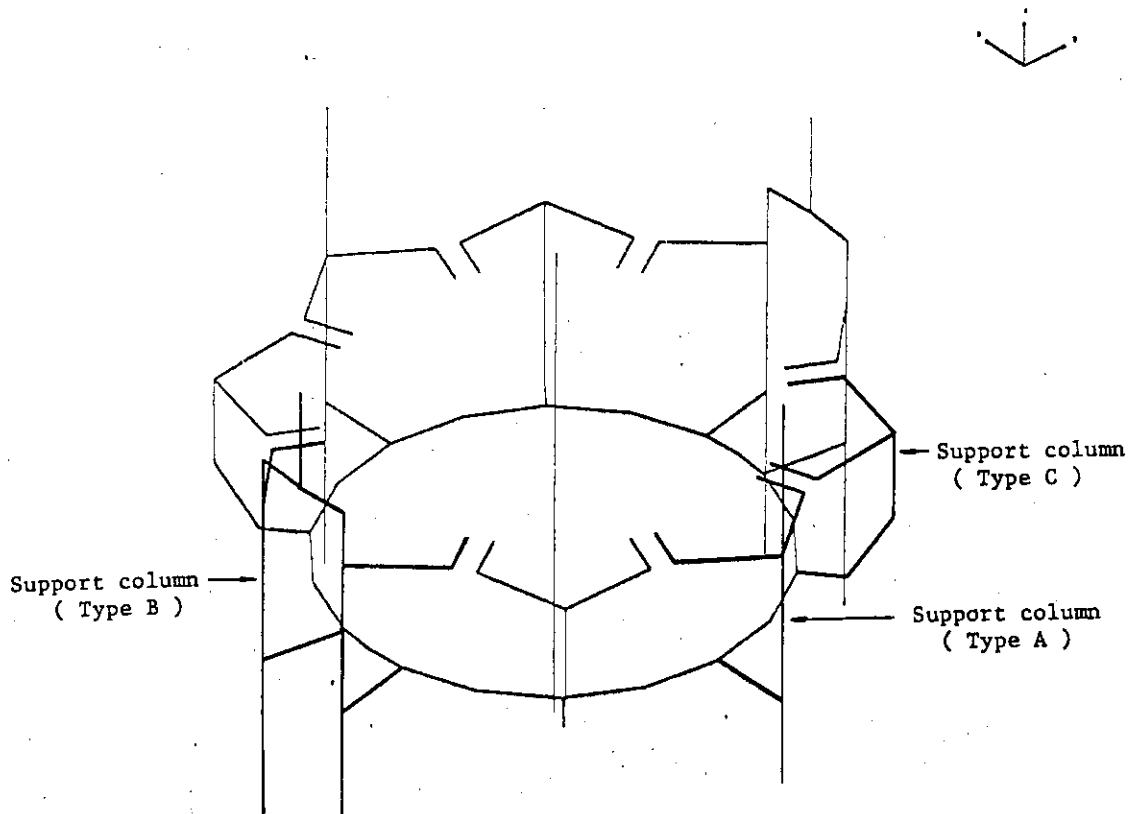
第 1.14 図 架台剛性検討部分モデル—詳細モデル



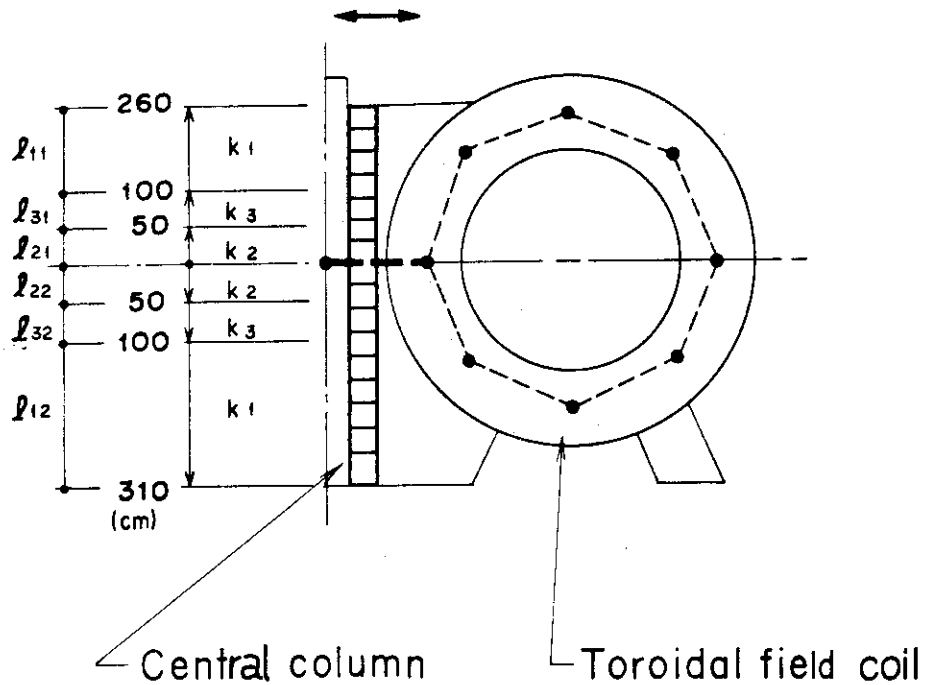
第 1.16 図 架台詳細部分モデルの解析条件及び結果

第 1.17 図 架台簡略部分モデルの解析条件及び結果

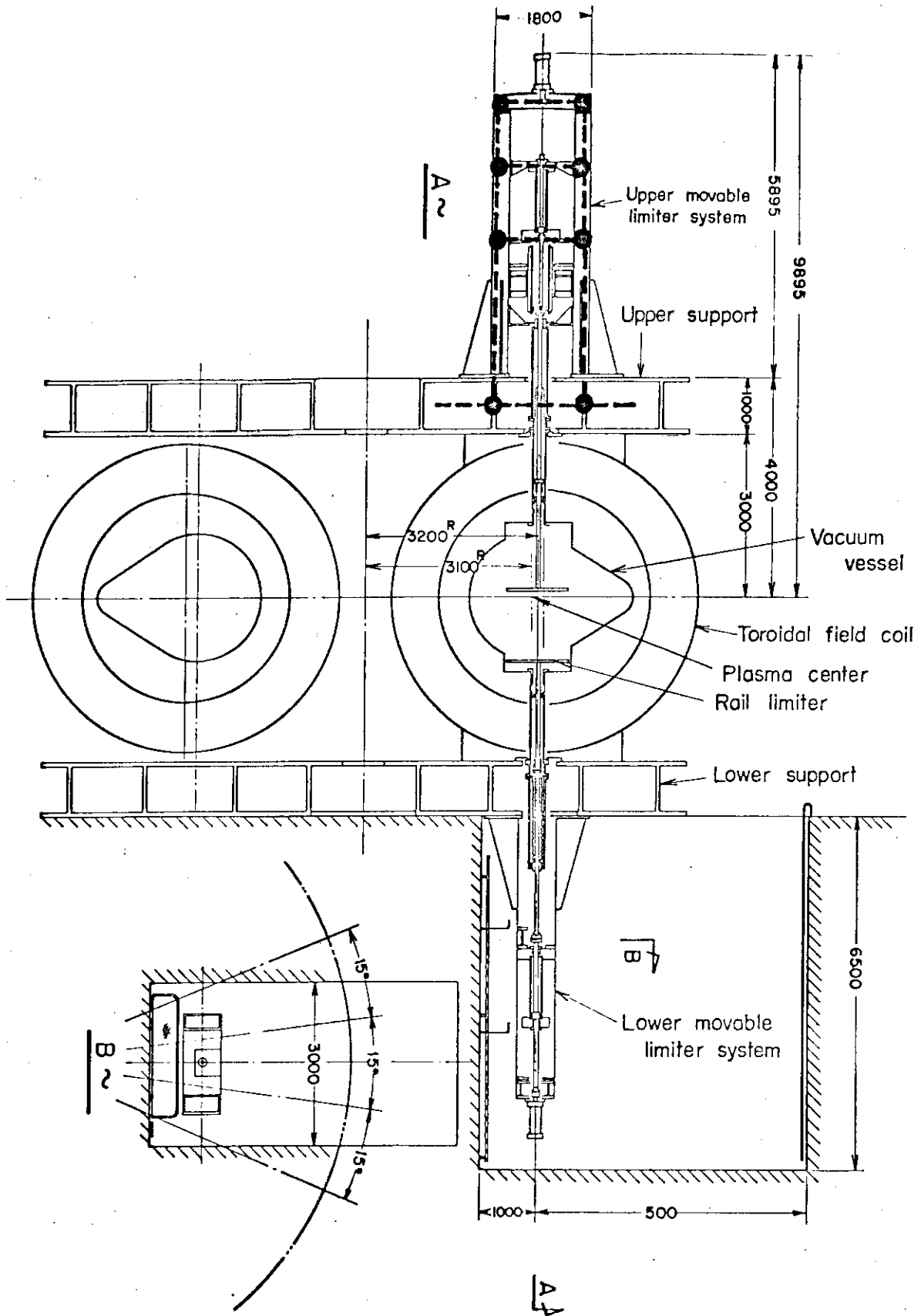
TOTAL MODEL / SUPPORT COLUMN, ARM / BEAM, TRUSS.



第 1.18 図 支持柱のプロッタ出力図

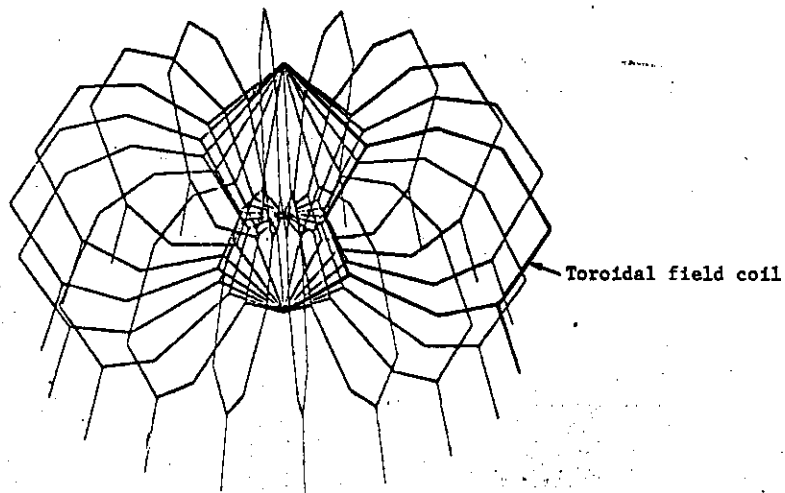
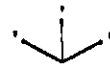


第 1.19 図 中心支心とトロイダル磁場コイルの接触部のモデル化



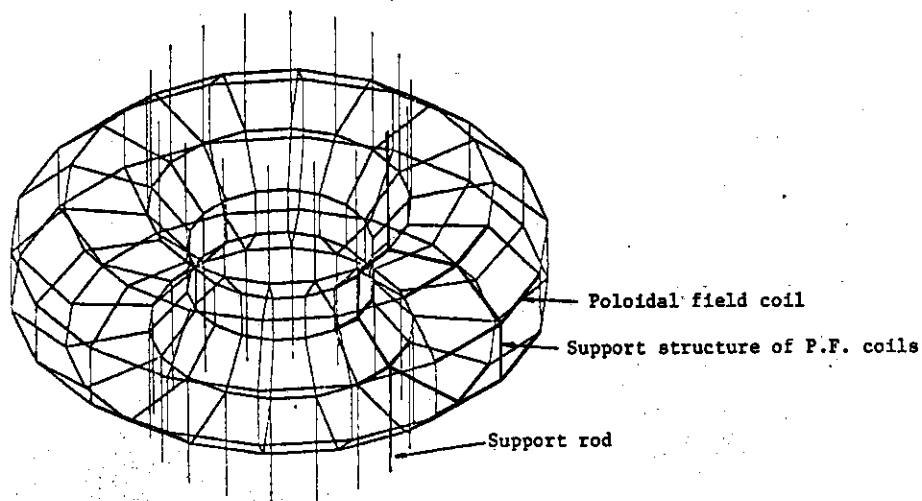
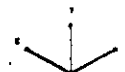
第 1.20 図 可動リミタのモデル化

TOTAL MODEL / TOROIDAL COIL / BEAM, TRUSS



第 1.21 図 トロイダル磁場コイル全体モデルプロッタ出力図

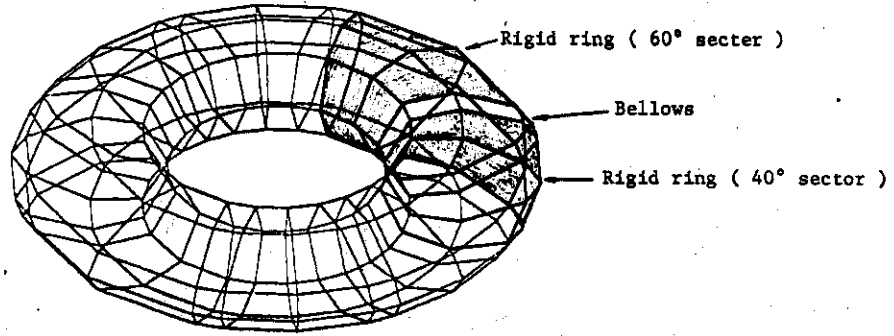
TOTAL MODEL / POLOIDAL COIL / BEAM



第 1.22 図 ポロイダル磁場コイル全体モデルプロッタ出力図

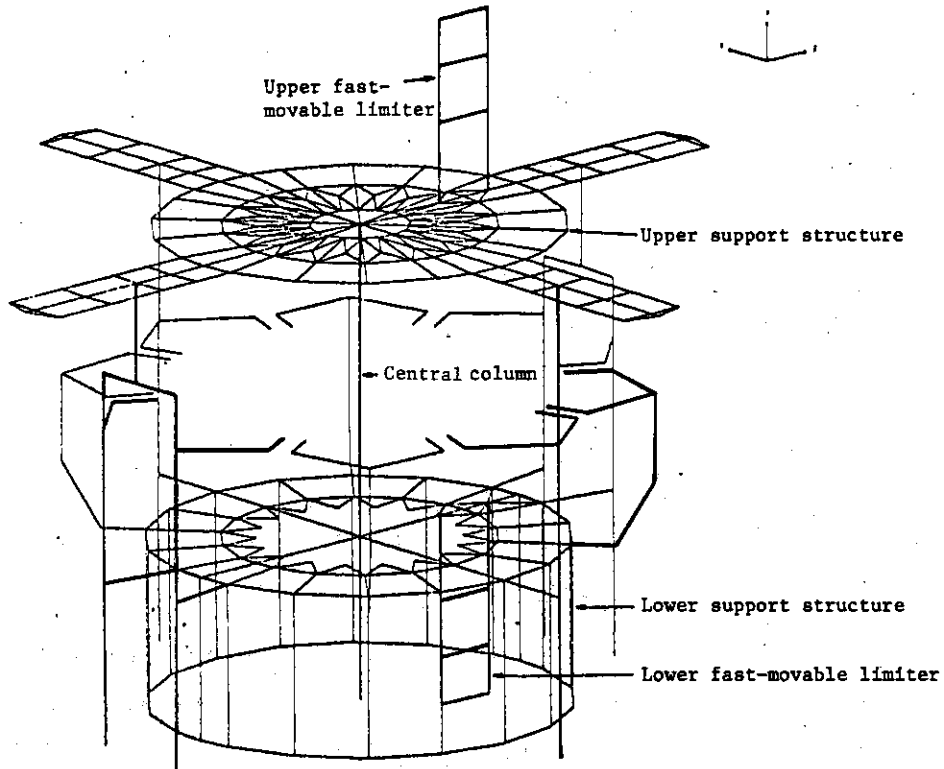


TOTAL MODEL / VACUUM VESSEL / SHELL

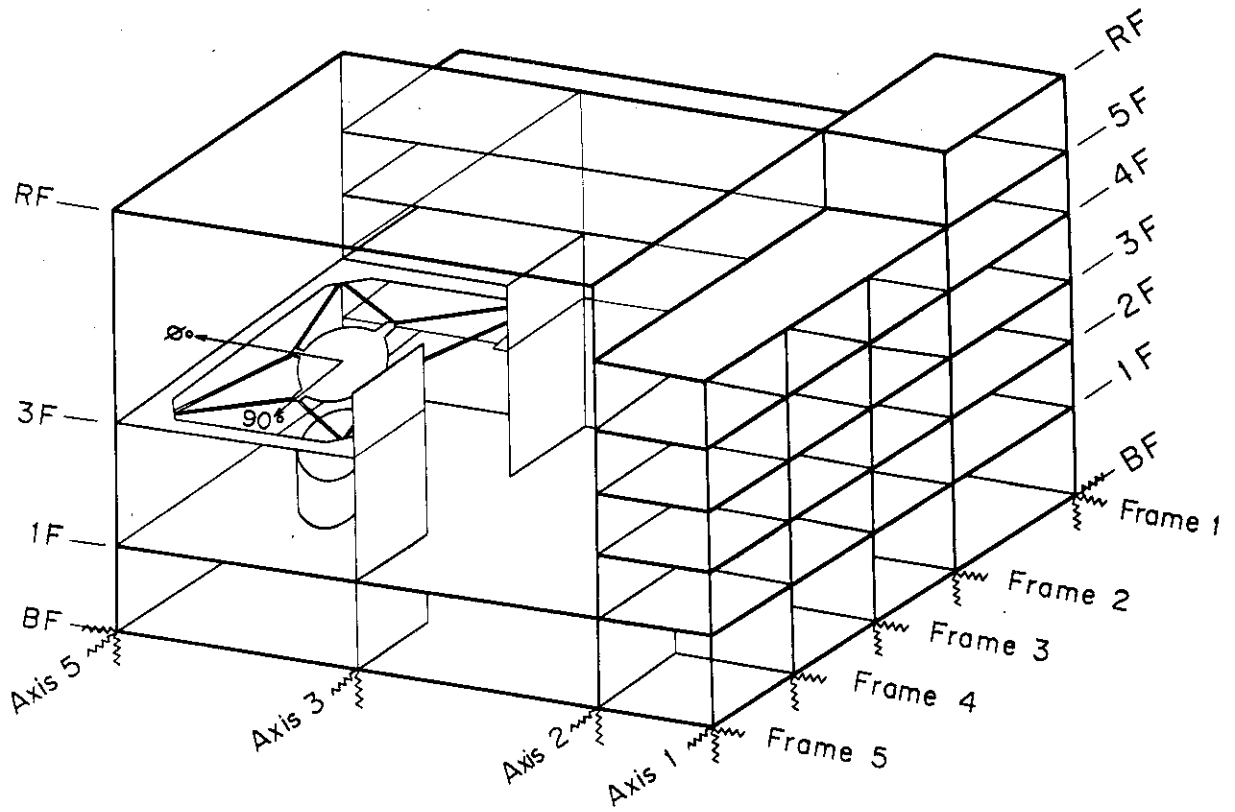


第 1.23 図 真空容器全体モデルプロッタ出力図

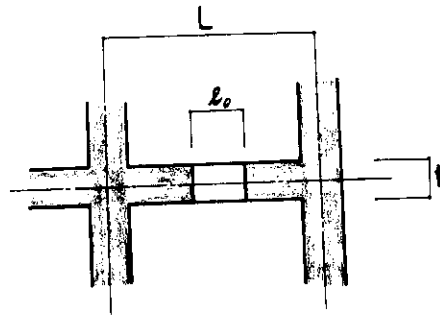
TOTAL MODEL / UPPER, LOWER FLOOR



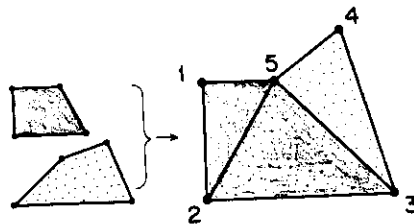
第 1.24 図 上・下架台，支持柱，可動リミタ全体モデル  
プロッタ出力図



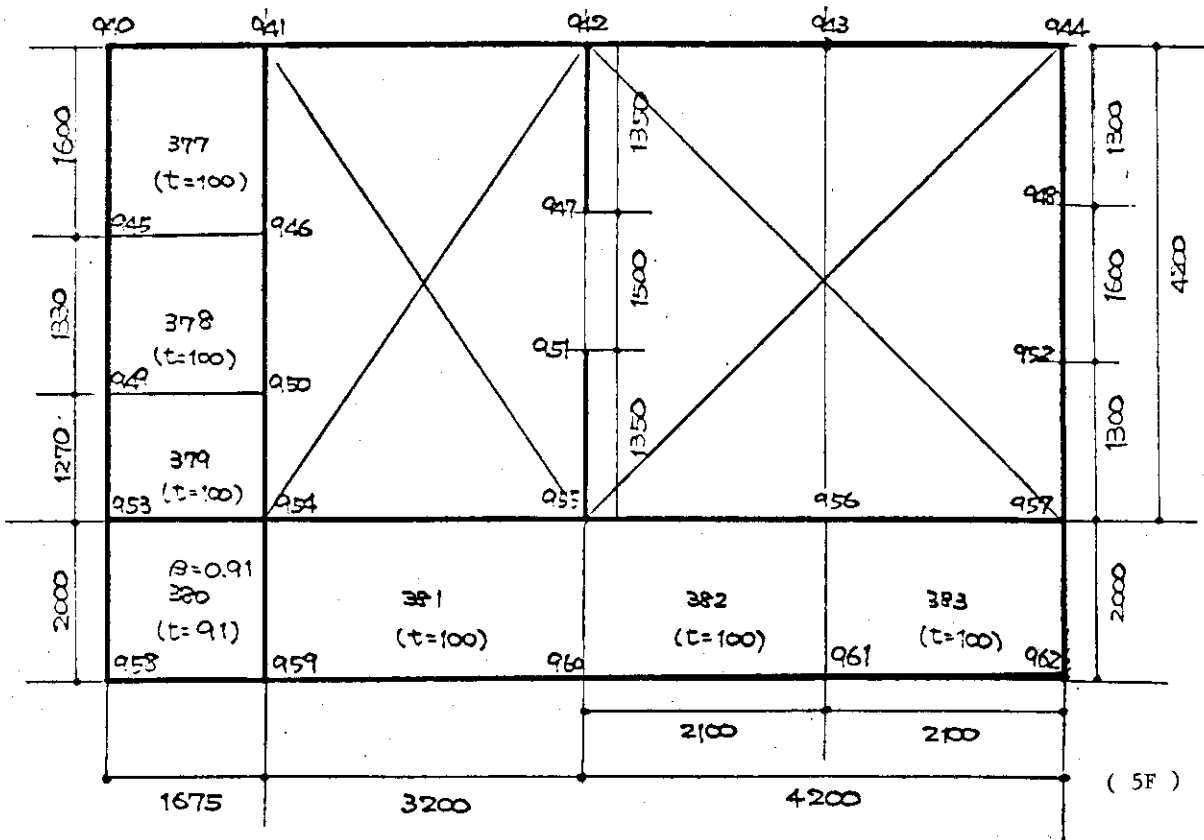
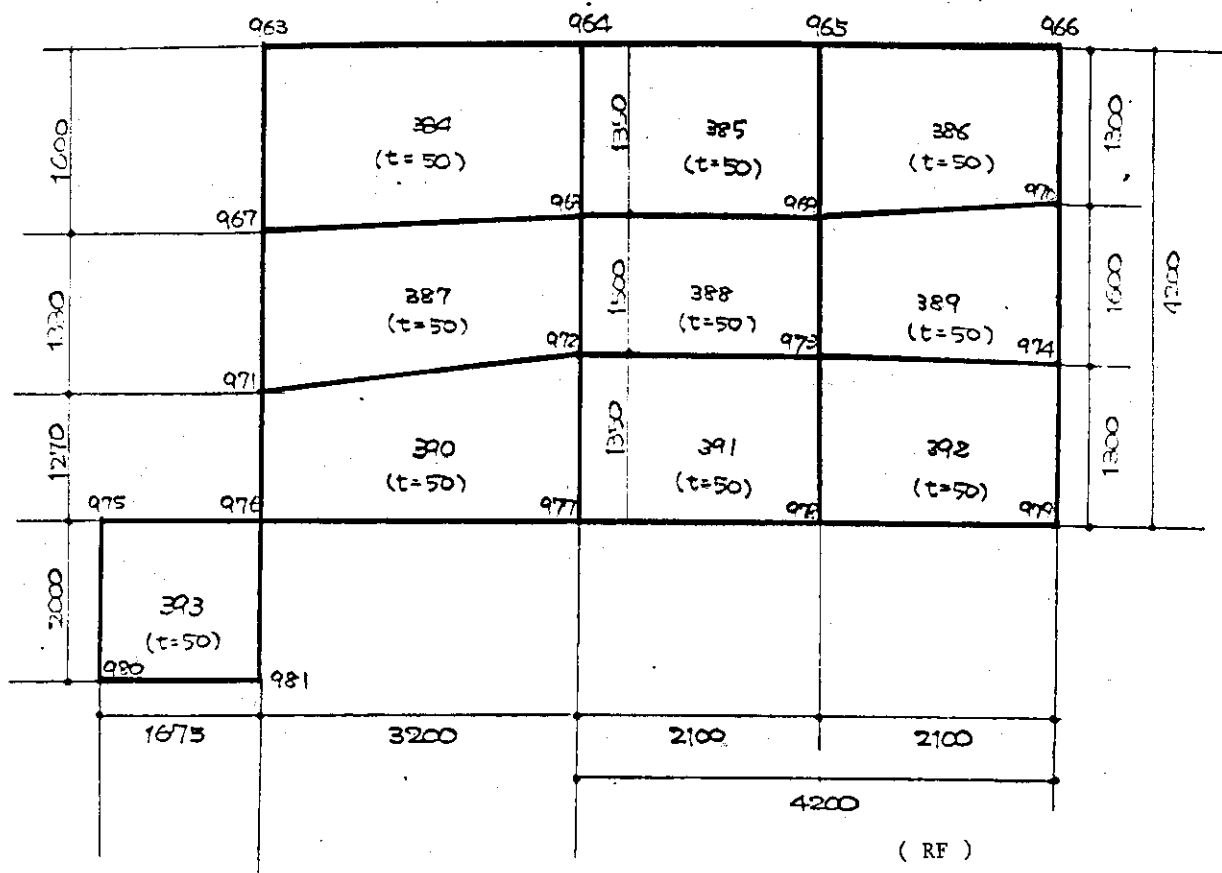
第 2.1 図 装置—建家モデル概念図



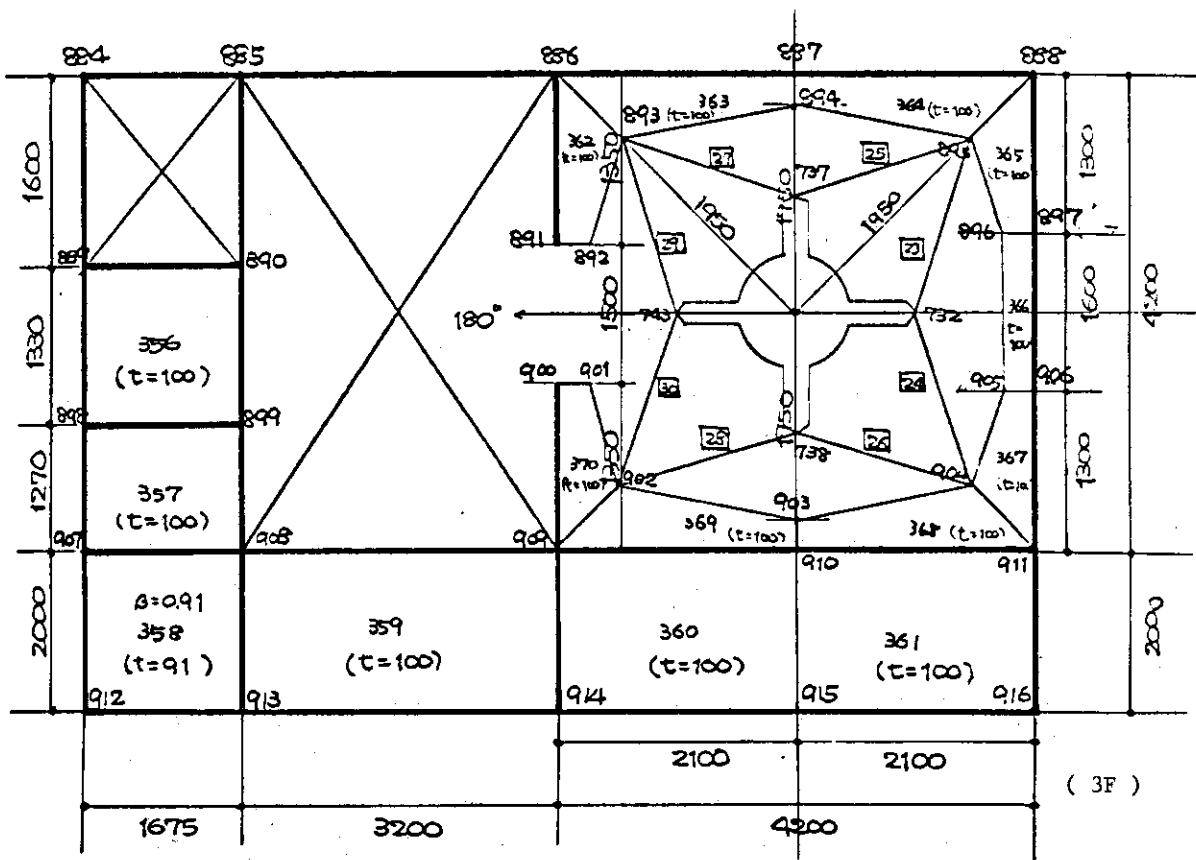
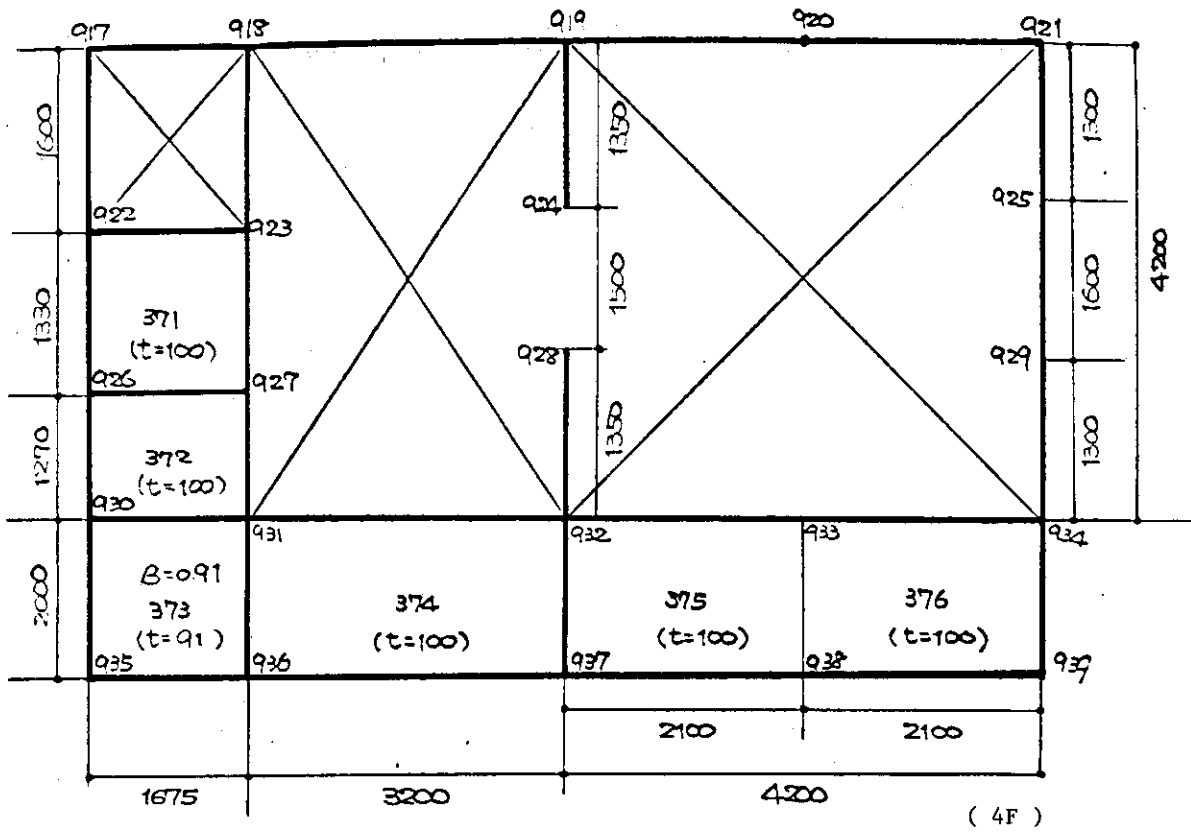
第 2.2 図 開口壁の等価壁厚



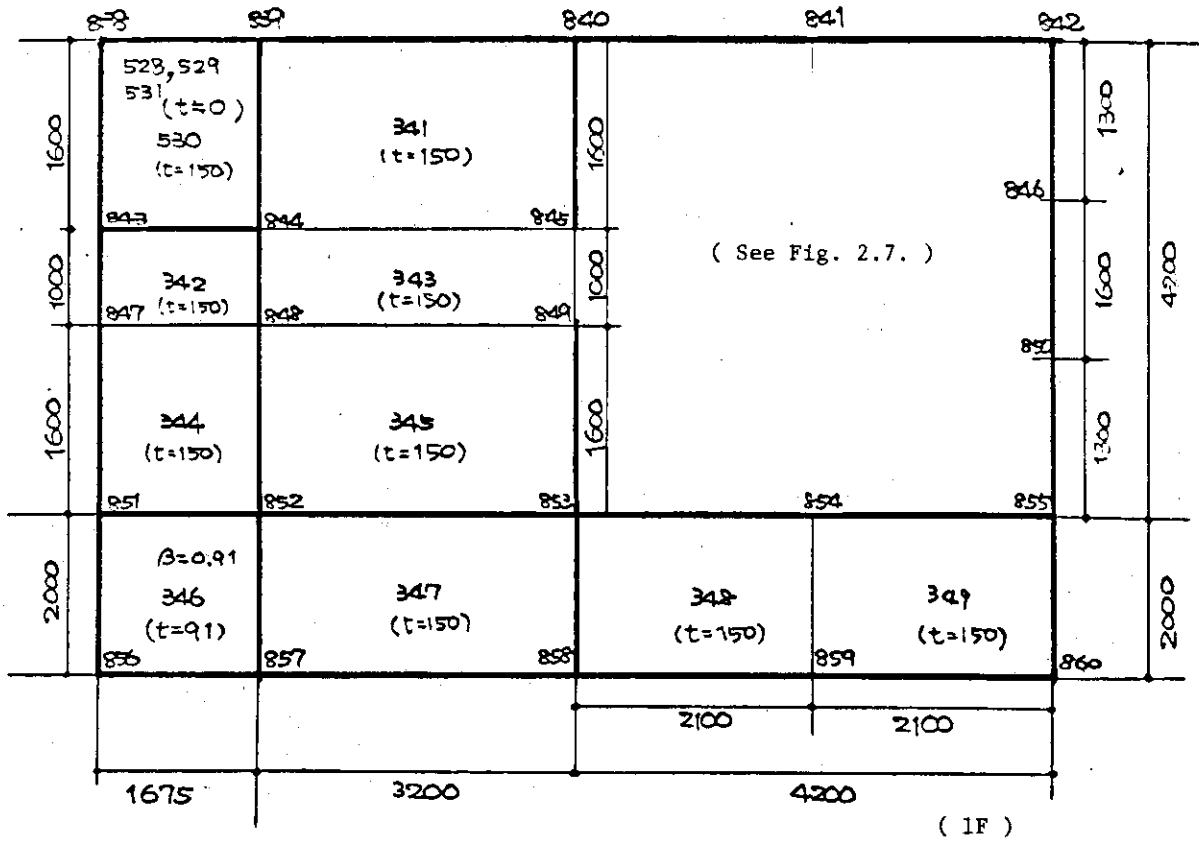
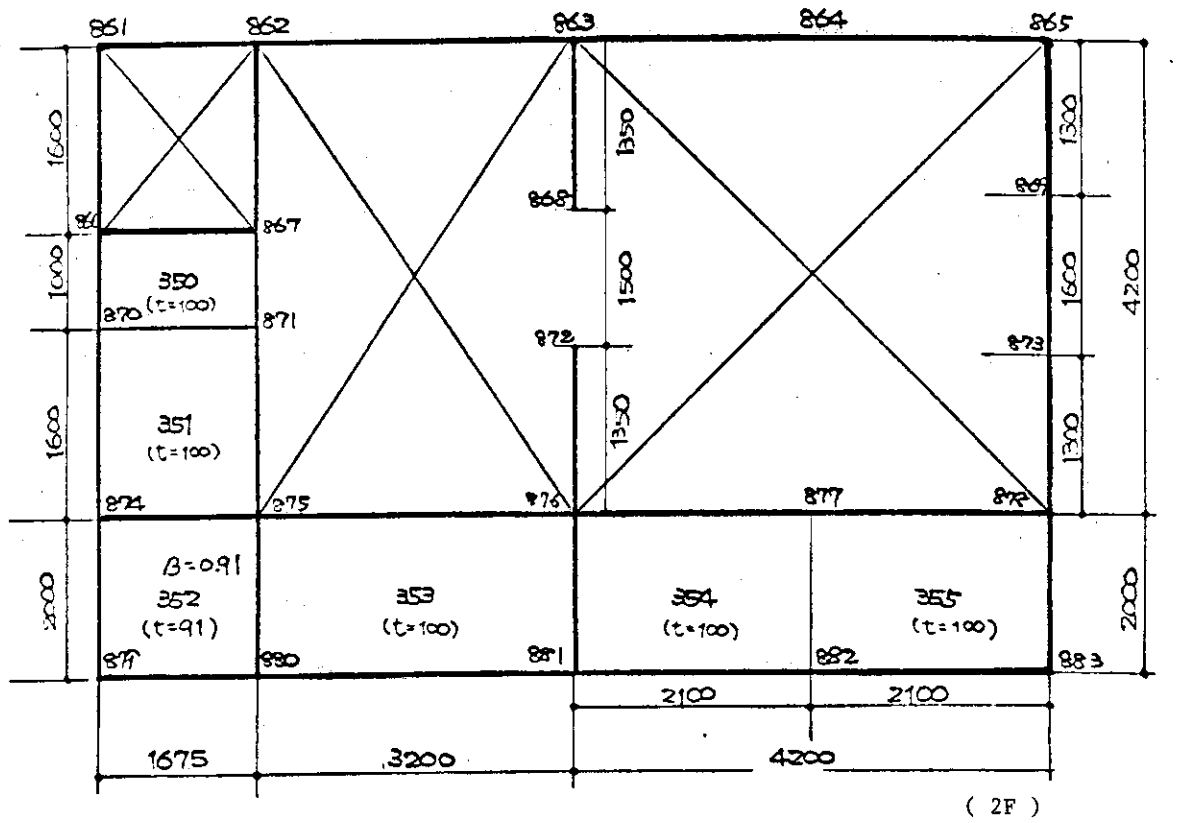
第 2.3 図 2 枚シェル要素の重ね配置



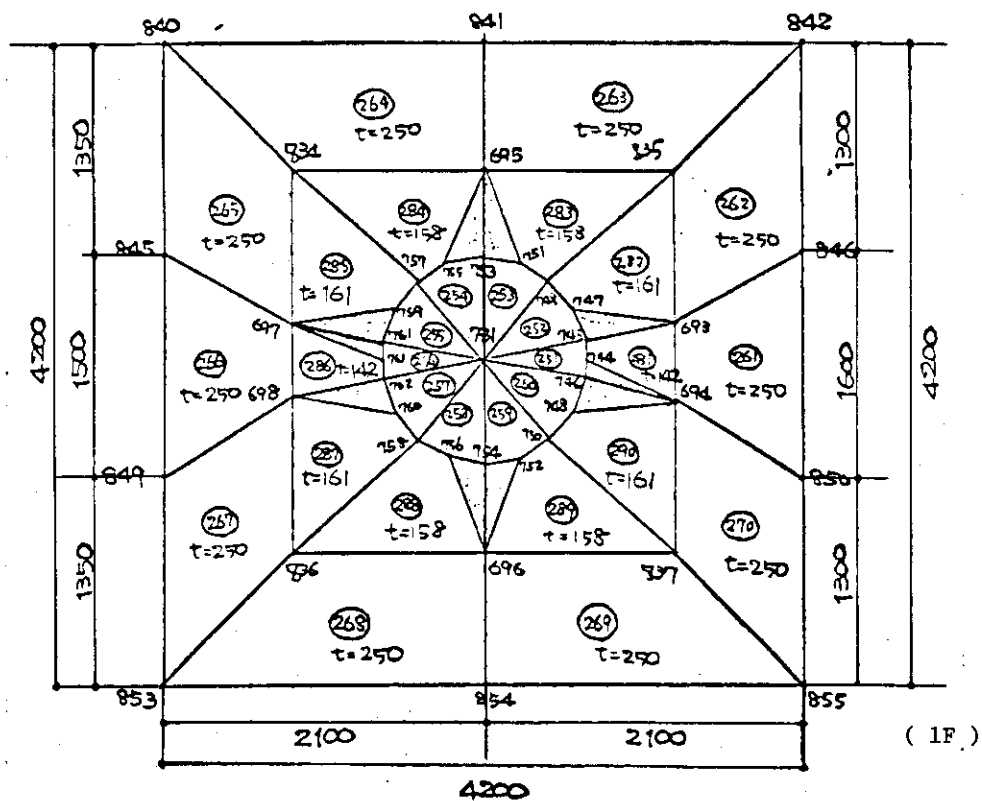
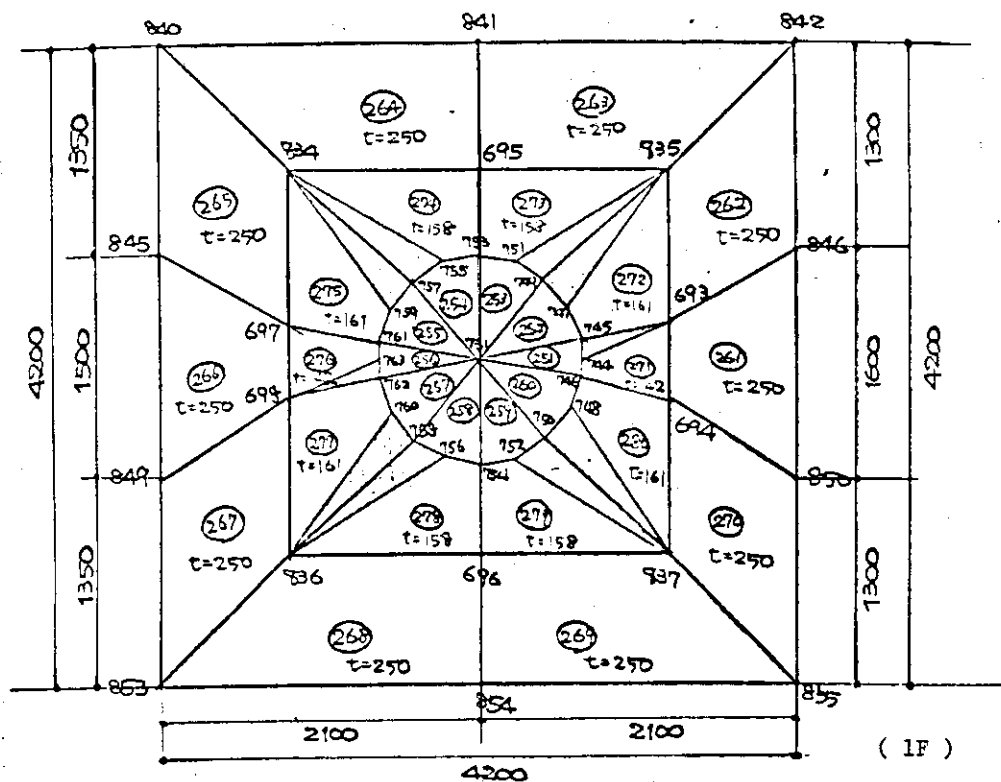
第 2.4 図 RF, 5F の床板厚



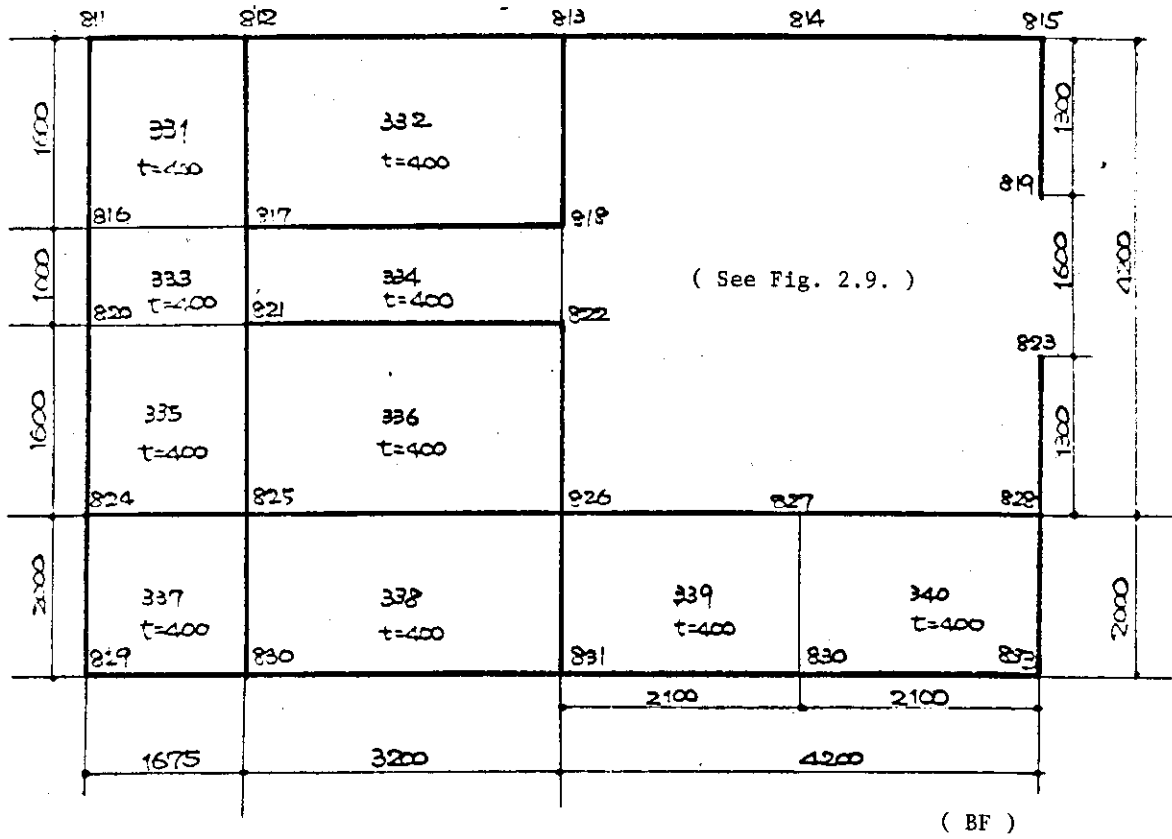
第2.5図 4F, 3Fの床板厚



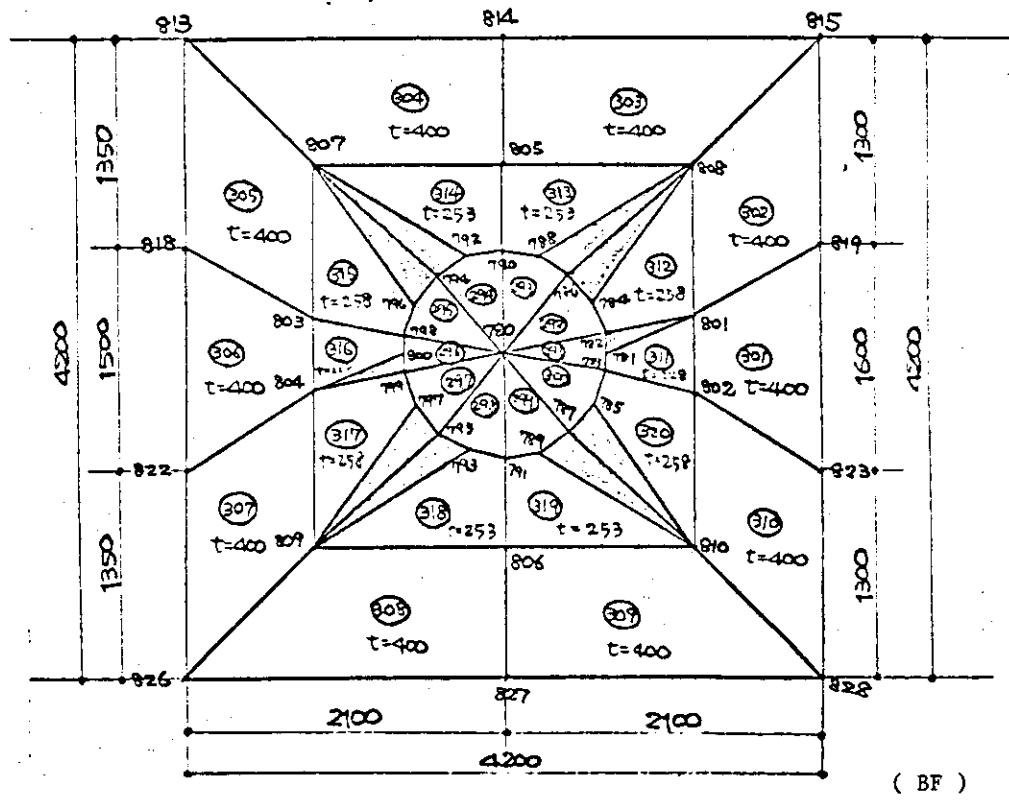
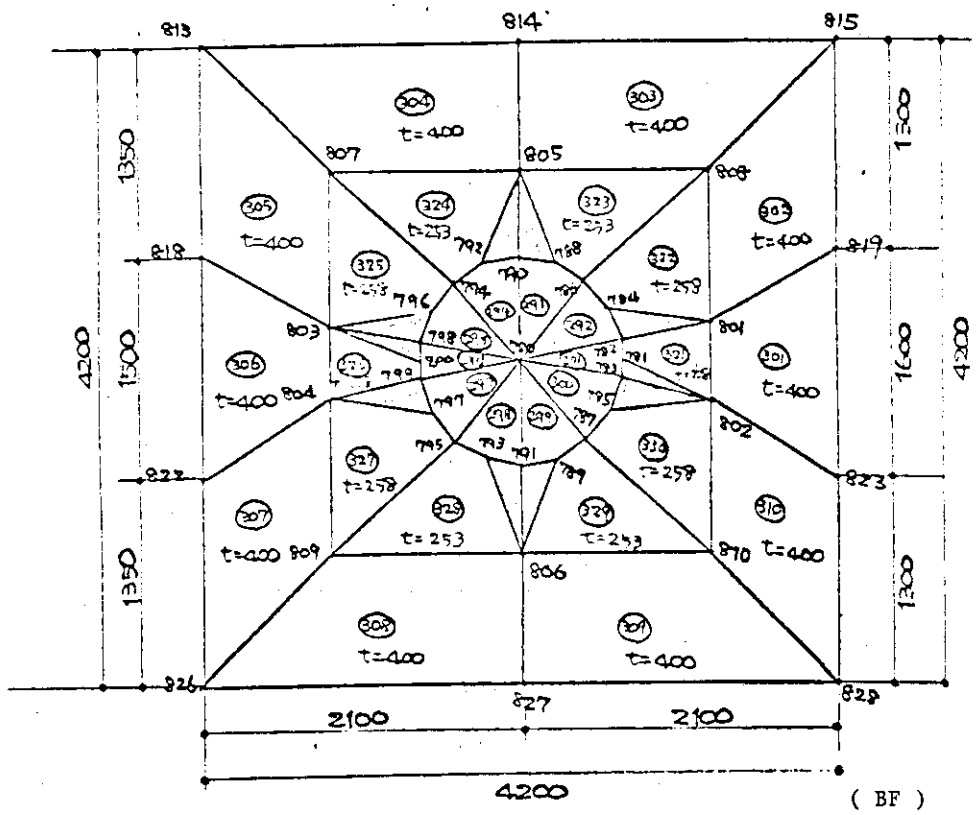
第 2.6 図 2 F, 1 F の床板厚



第 2.7 図 1 F の床板厚 (部分拡大図)

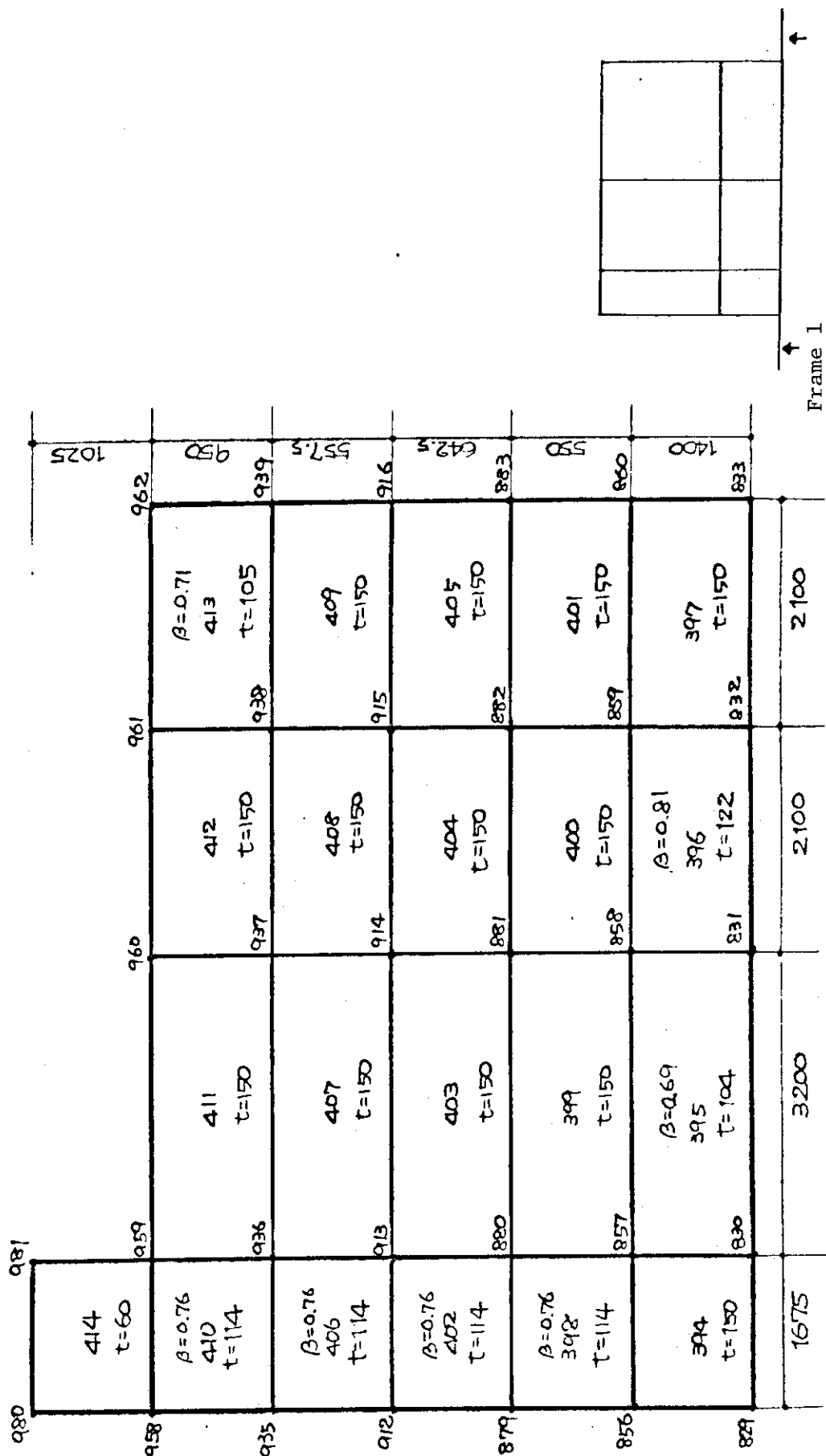


第 2.8 図 B F の 床 板 厚

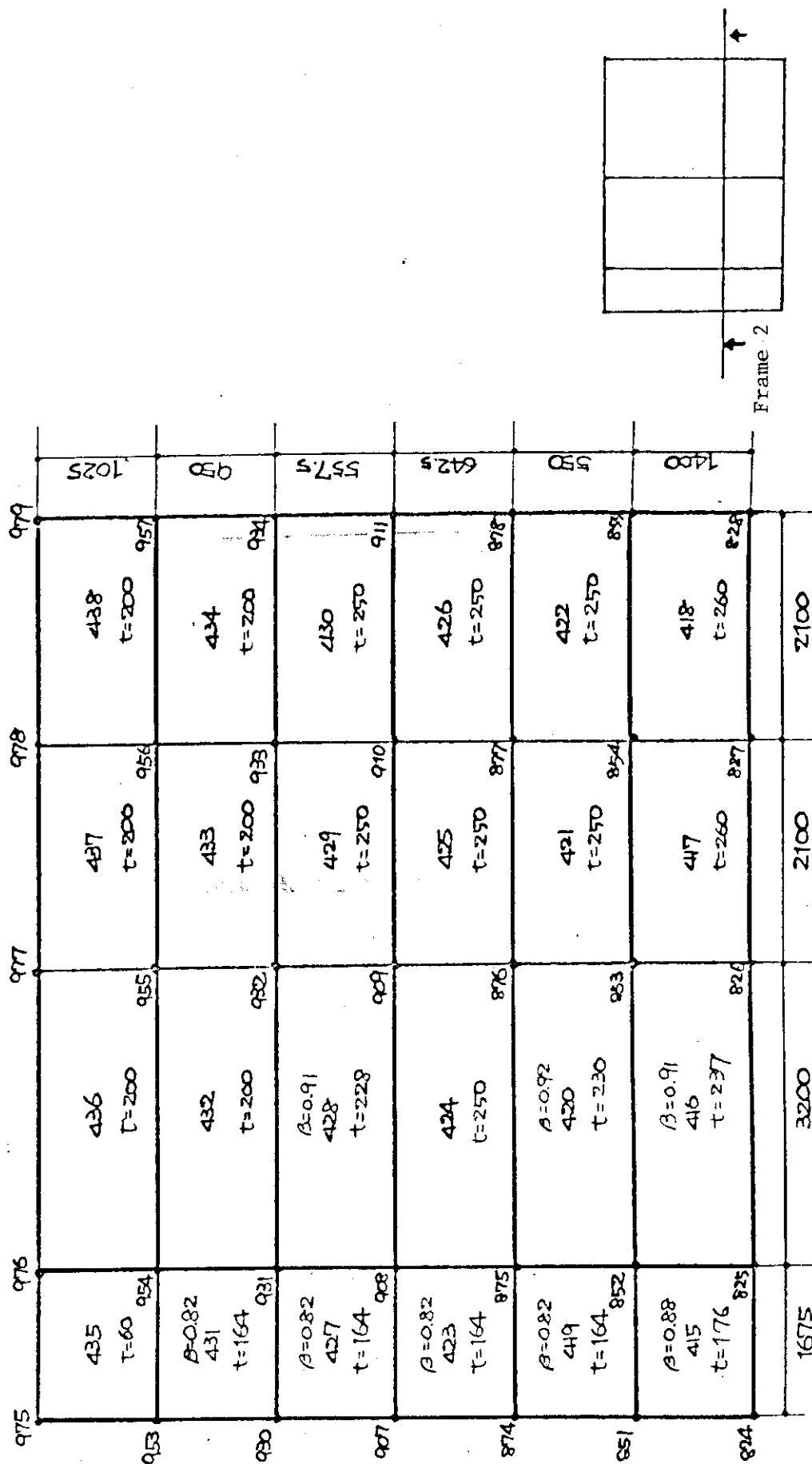


第 2.9 図 B F の床板厚 (部分拡大図)

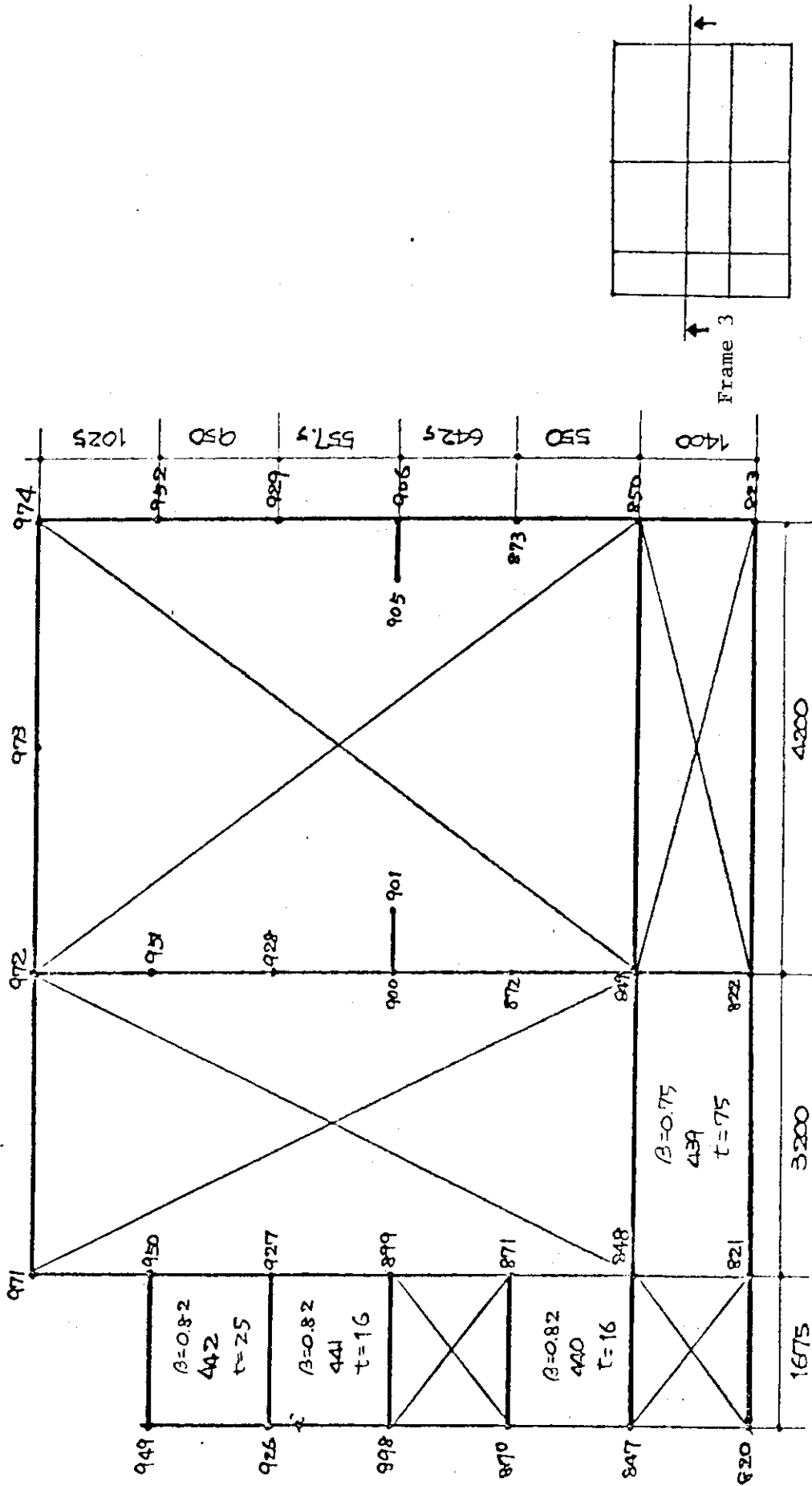




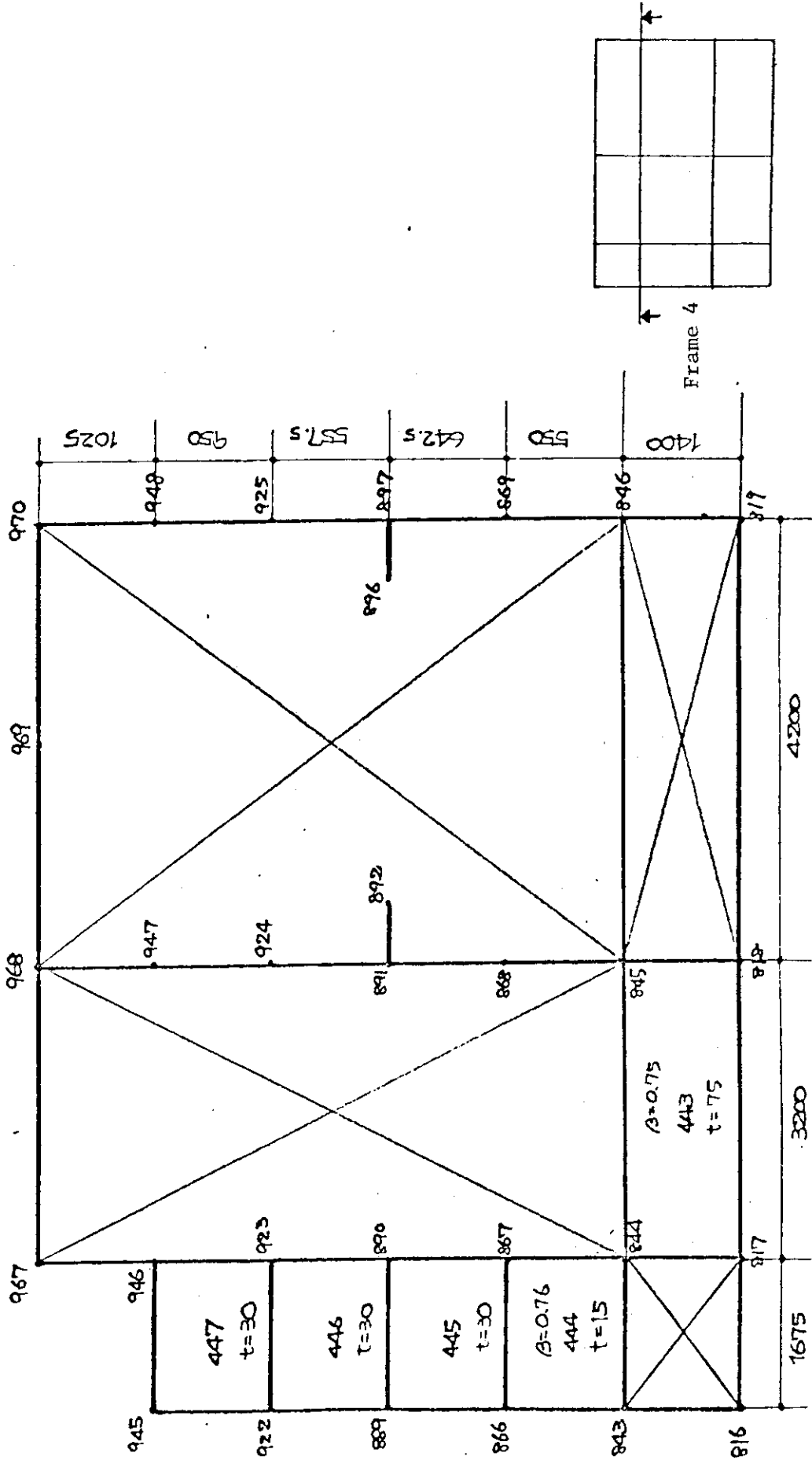
第2.10図 17レベルの壁板厚



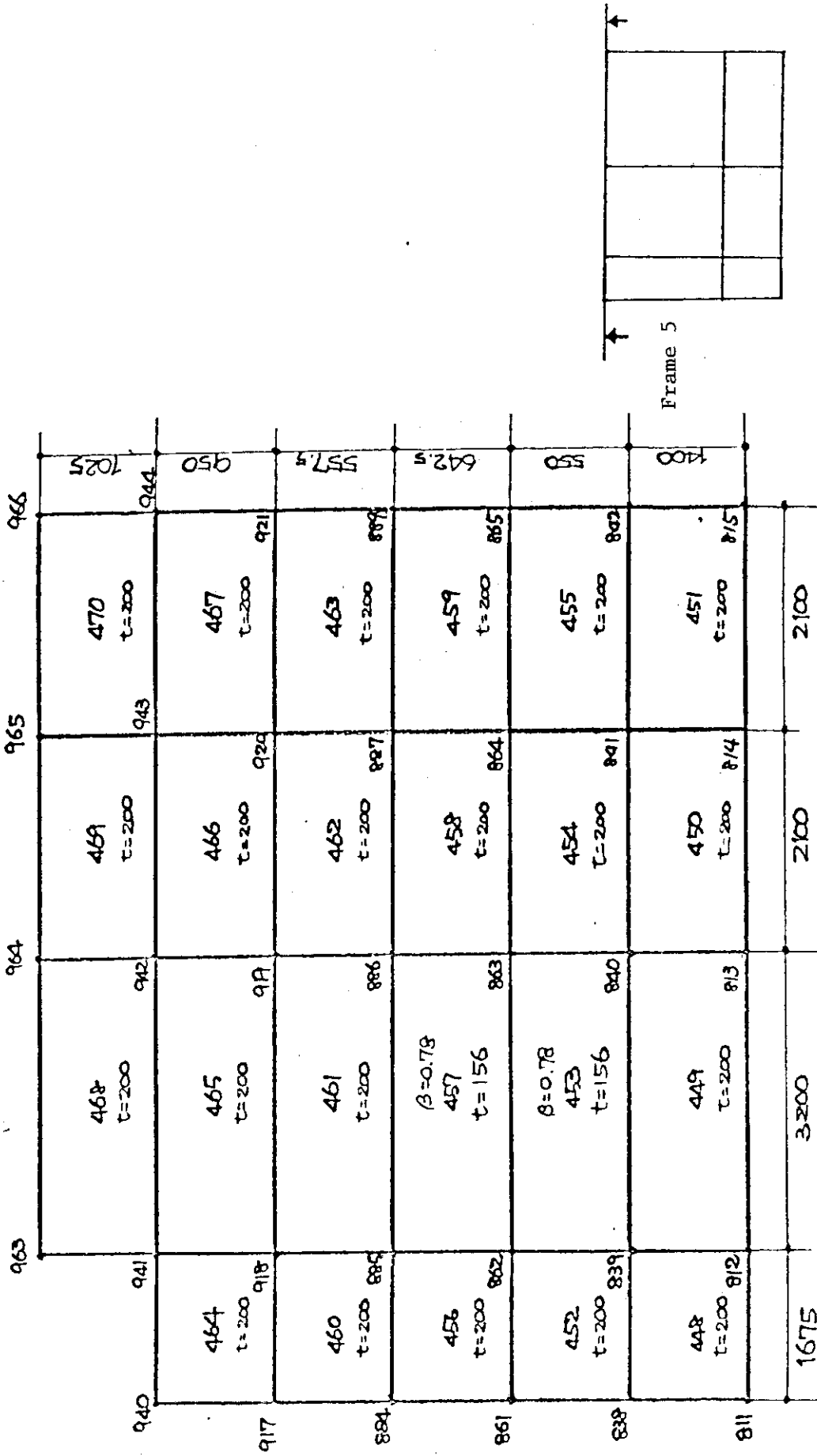
第2.11図 2フレームの壁板厚



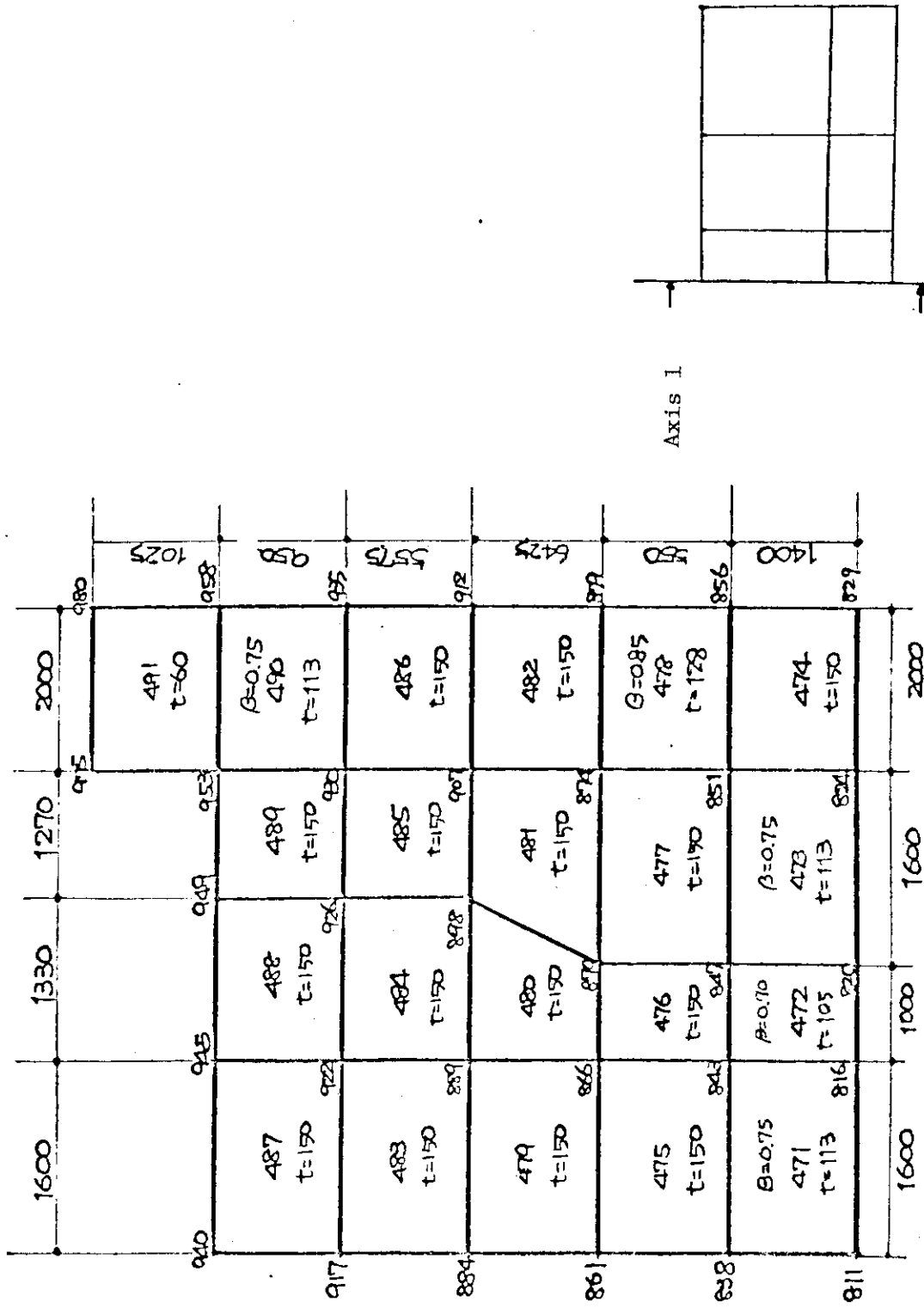
第2.12図 37レベルの壁板厚



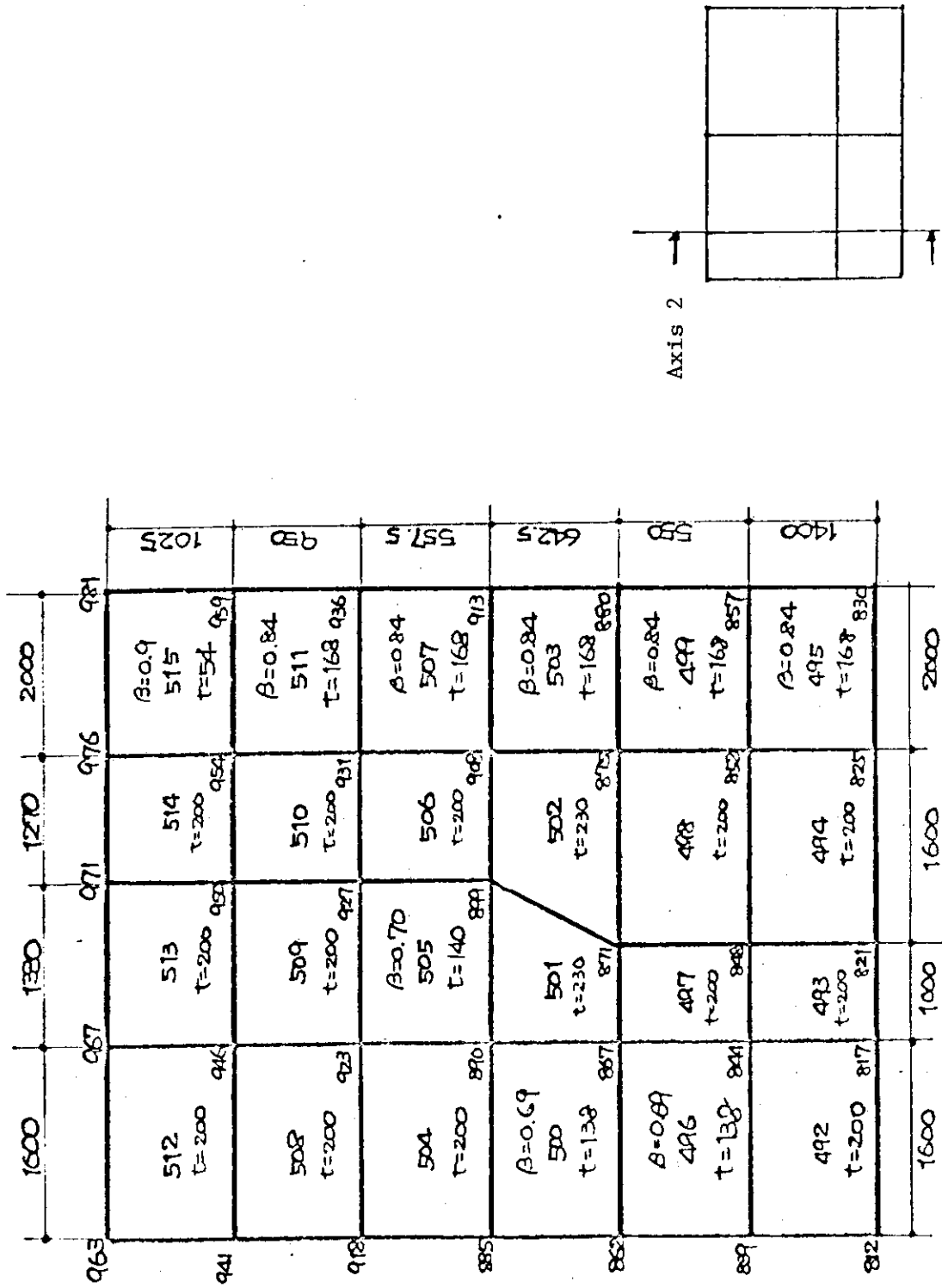
第 2.13 図 4 フレームの壁板厚



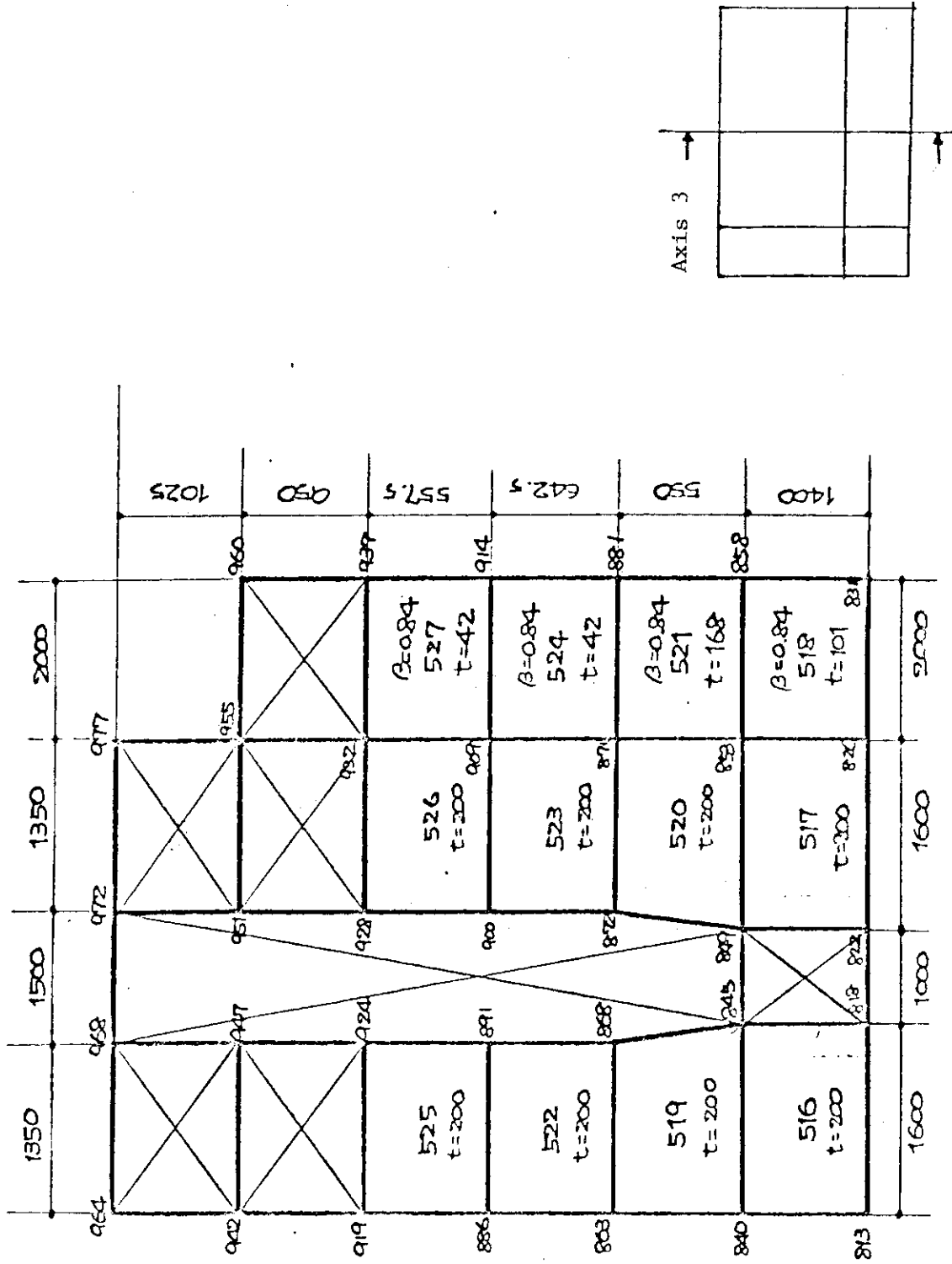
第2.14図 57レベルの壁板厚



第2.15図 1軸の壁板厚

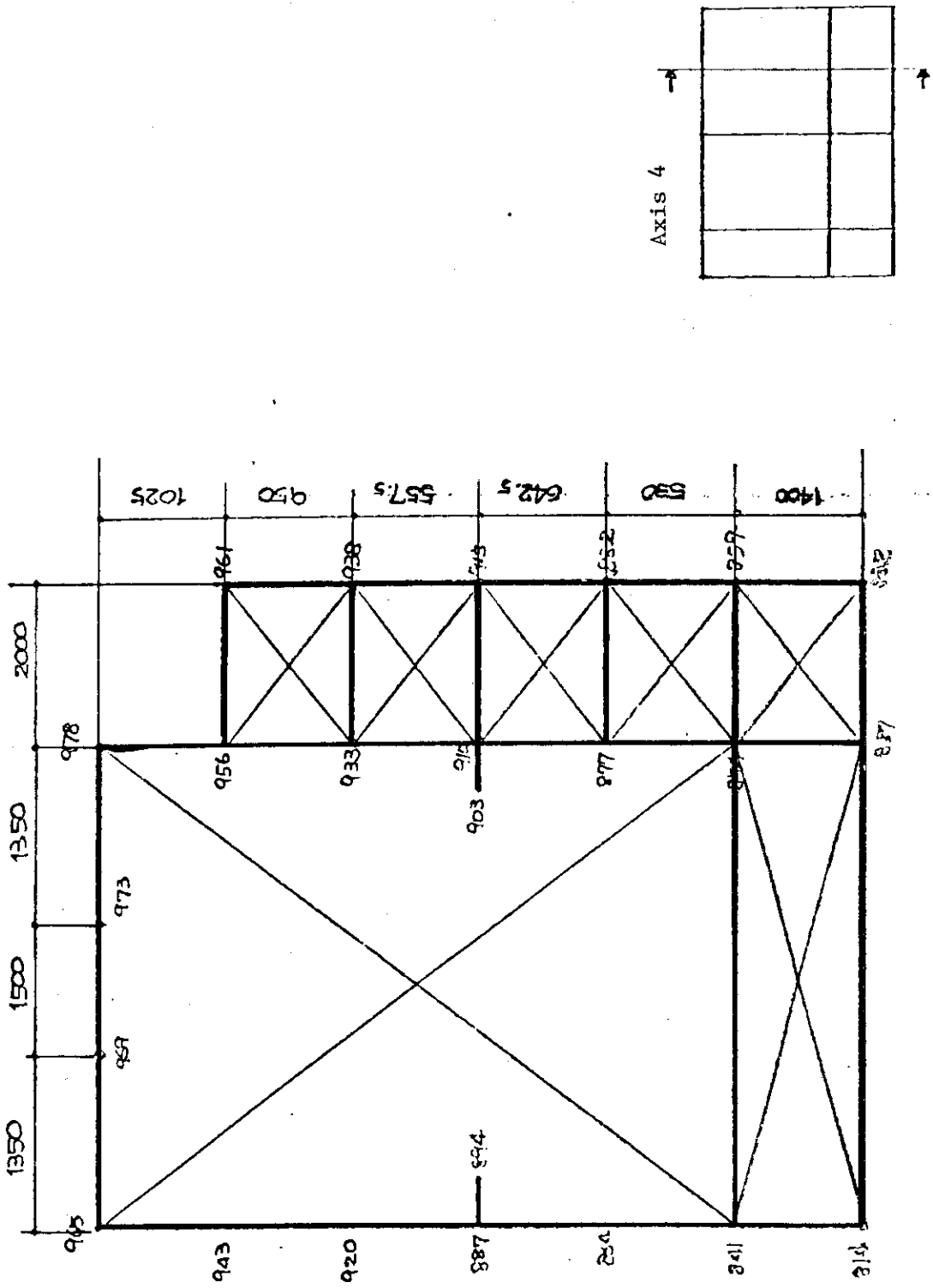


第2.16図 2軸の壁板厚

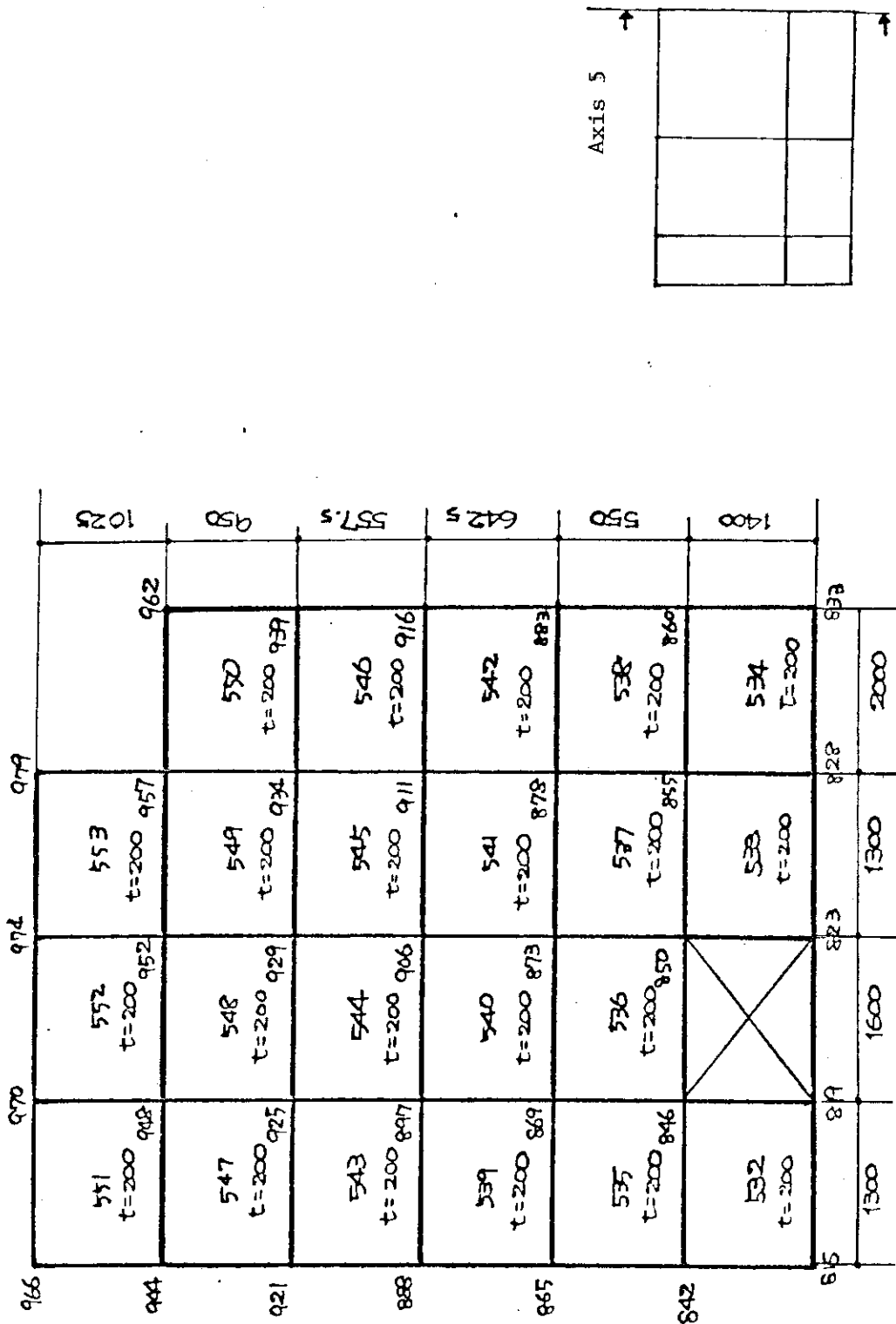


第 2.17 図 3 軸の壁板厚

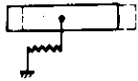
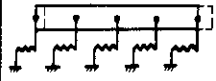
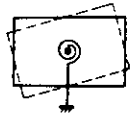
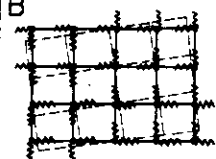
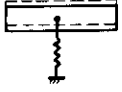
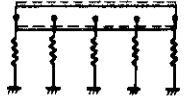
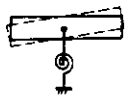
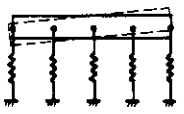




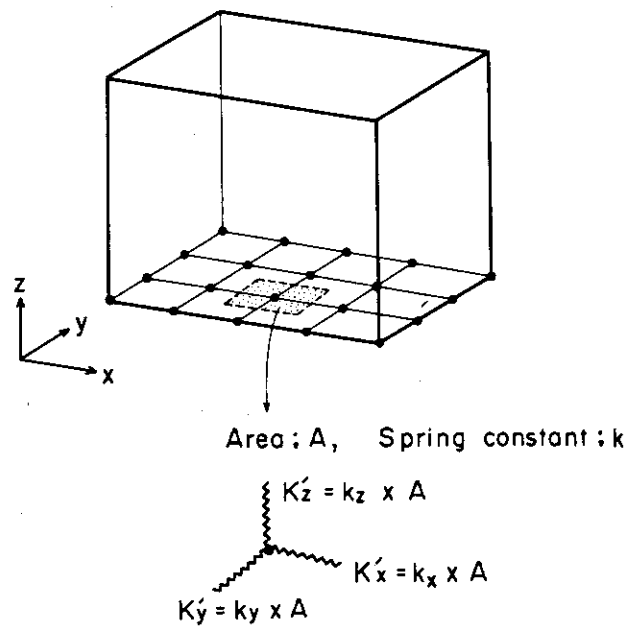
第 2.18 図 4 軸の壁板厚



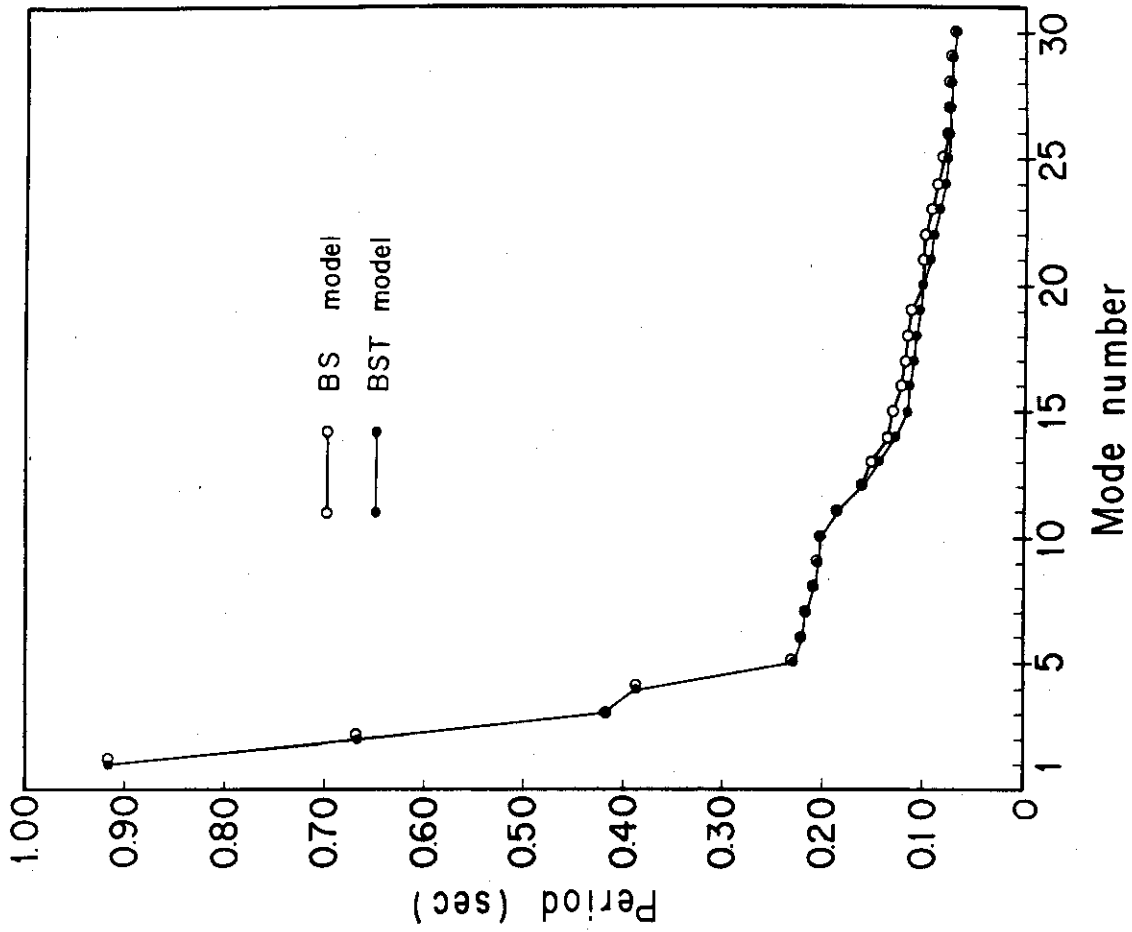
第 2.19 図 5 軸の壁板厚

Concentrated		Distributed	
A 	↔	A' 	$k_H$
B 	↔	B' 	
C 	↔	C' 	$k_V$
D 	↔	D' 	

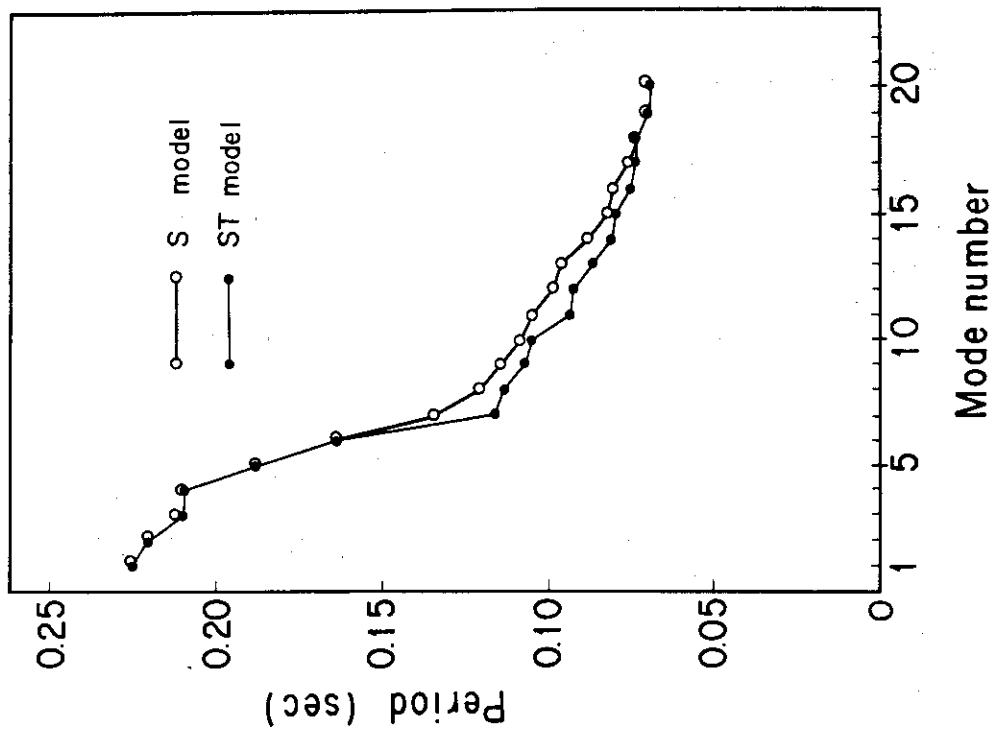
第 2.20 図 集中バネ系と分布バネ系との対応



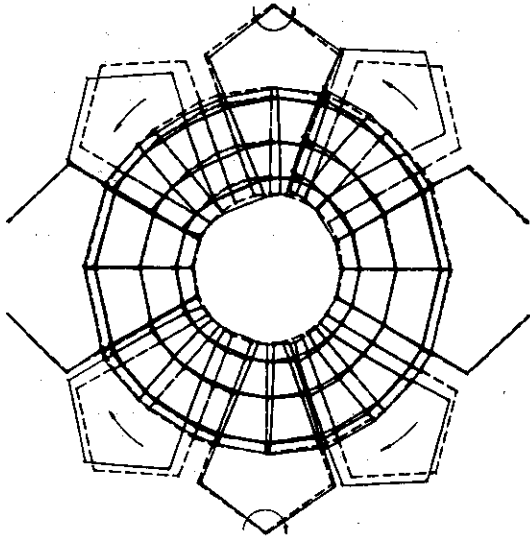
第 2.21 図 各節点の分担バネ定数



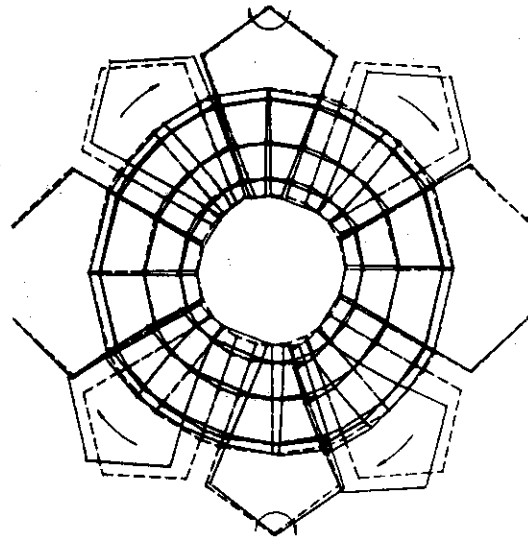
第3.2図 BS, BSTモデルの固有周期



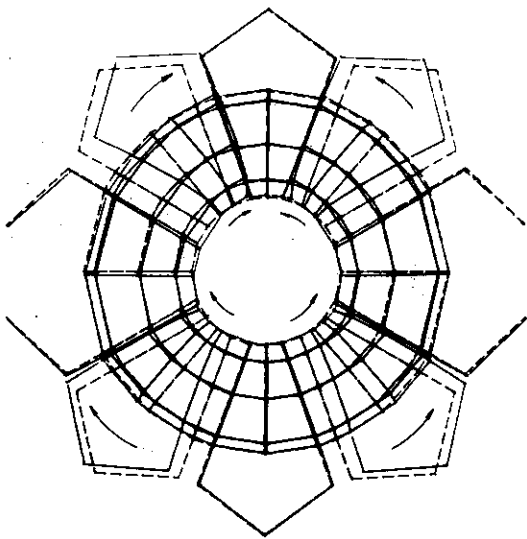
第3.1図 S, STモデルの固有周期



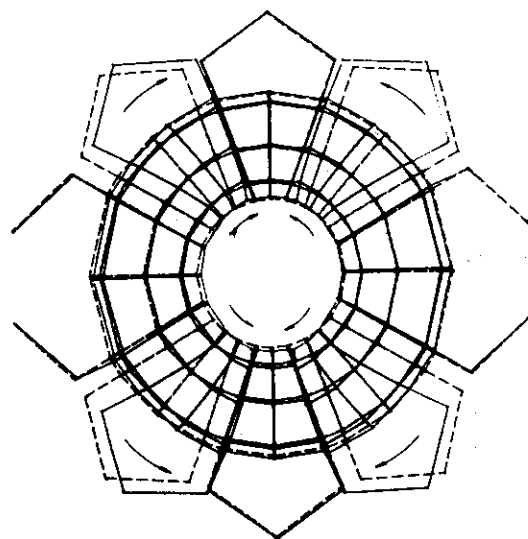
第 3.3 図 STモデル第 1 次固有振動  
モード・プロッタ出力図



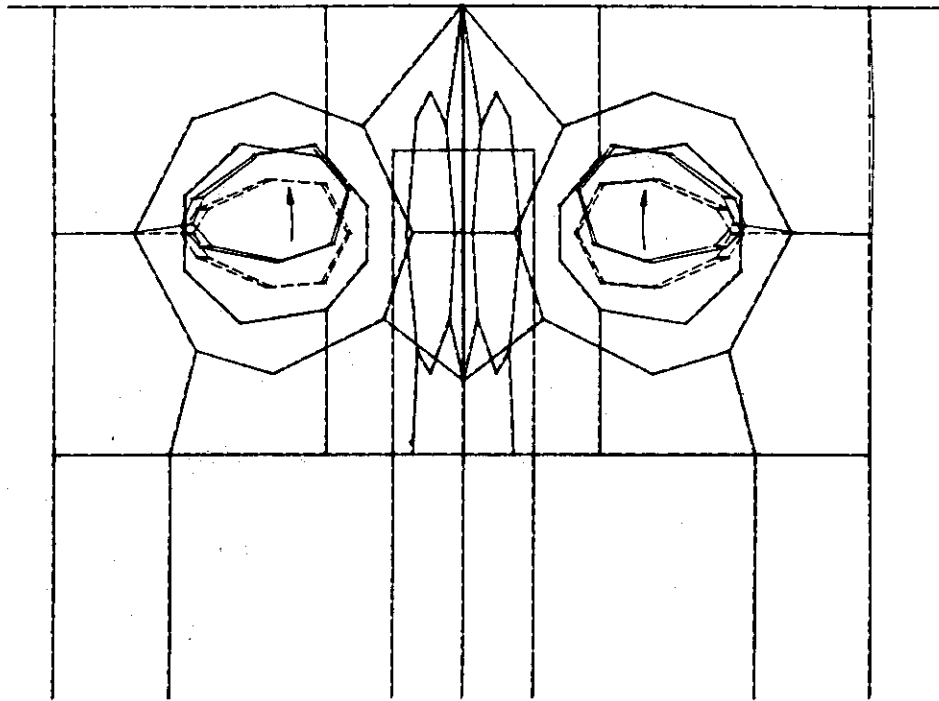
第 3.4 図 STモデル第 2 次固有振動  
モード・プロッタ出力図



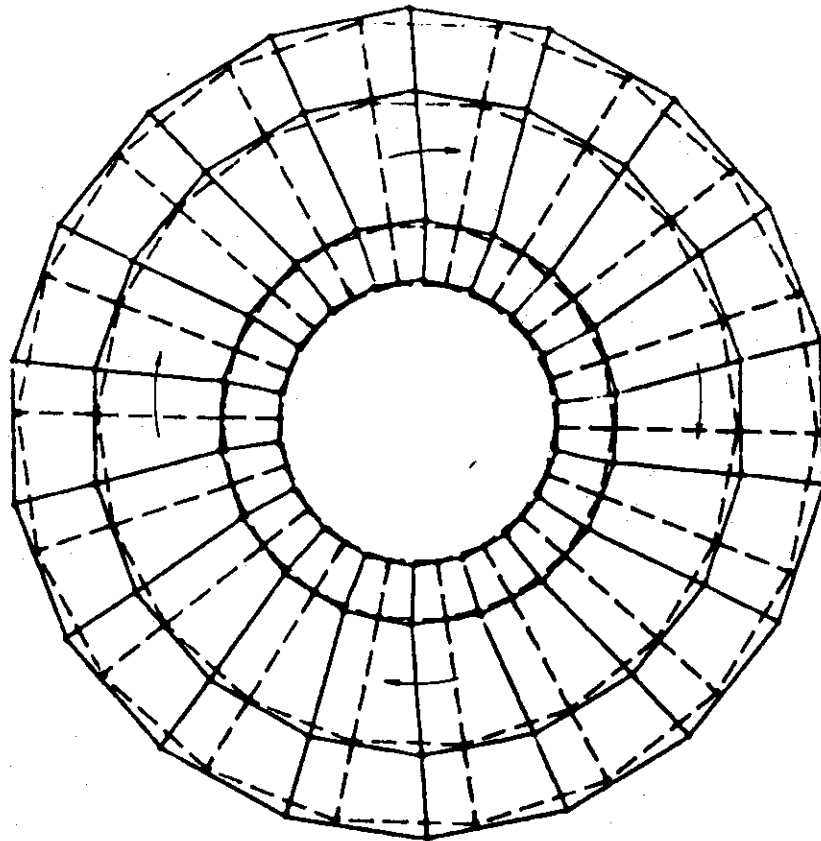
第 3.5 図 STモデル第 3 次固有振動  
モード・プロッタ出力図



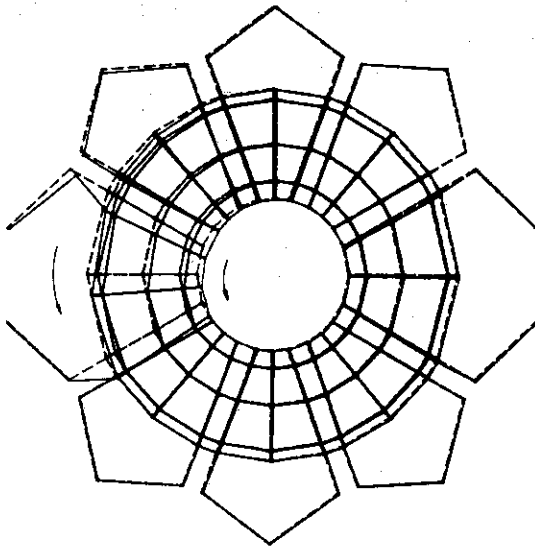
第 3.6 図 STモデル第 4 次固有振動  
モード・プロッタ出力図



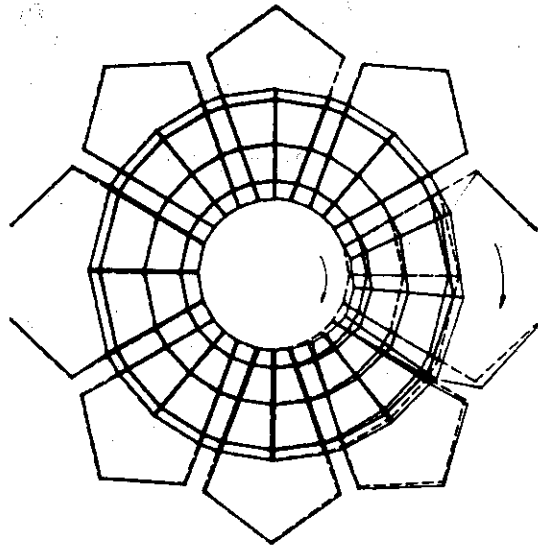
第 3.7 図 STモデル第 5 次固有振動モード・プロッタ出力図



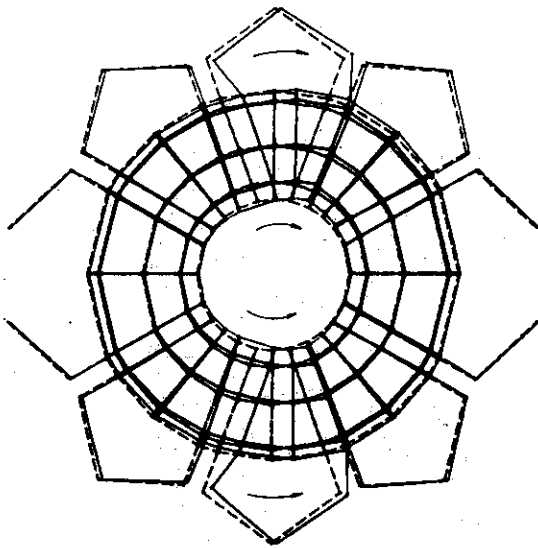
第 3.8 図 STモデル第 6 次固有振動モード・プロッタ出力図



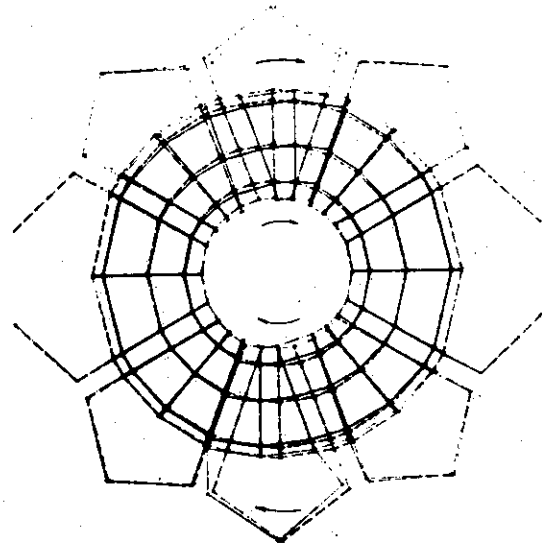
第 3.9 図 STモデル第7次固有振動  
モード・プロッタ出力図



第 3.10 図 STモデル第8次固有振動  
モード・プロッタ出力図



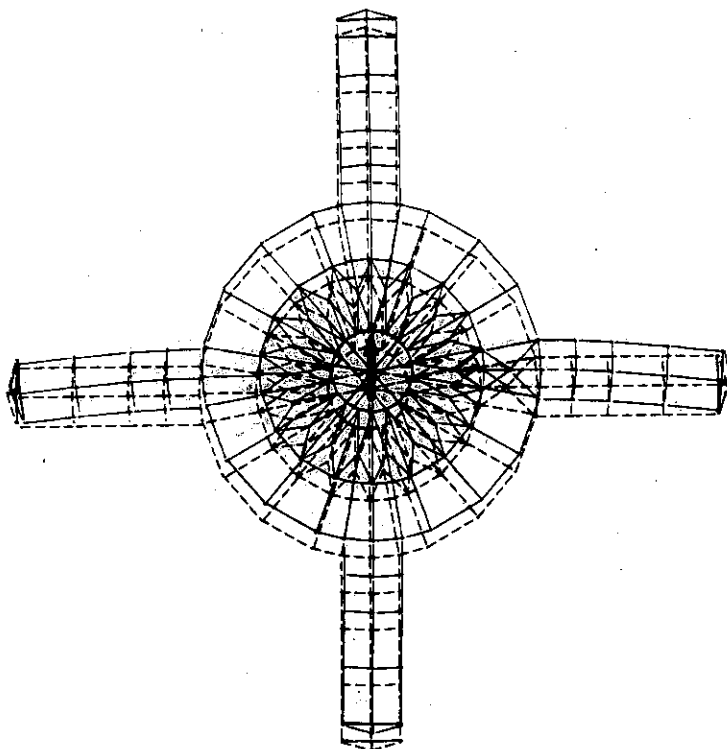
第 3.11 図 STモデル第9次固有振動  
モード・プロッタ出力図



第 3.12 図 STモデル第10次固有振動  
モード・プロッタ出力図

WITH TRUSS

ST //

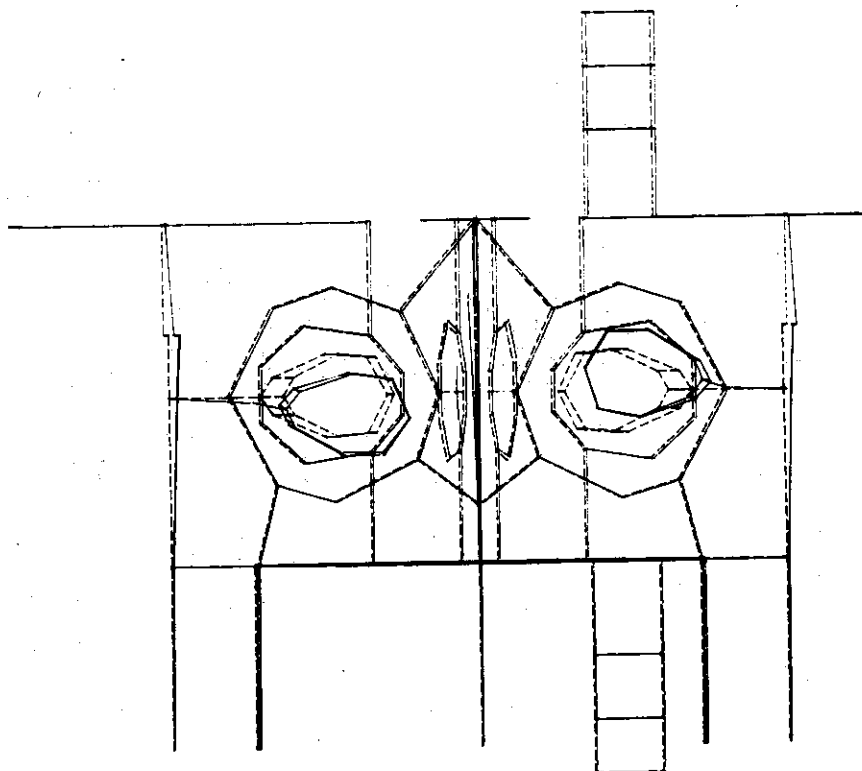


第 3.13 図 STモデル第11次固有振動モード・プロッタ出力図

INTEGRATED MODEL / 0-180 SECTION / MODE 11

WITH TRUSS

ST //

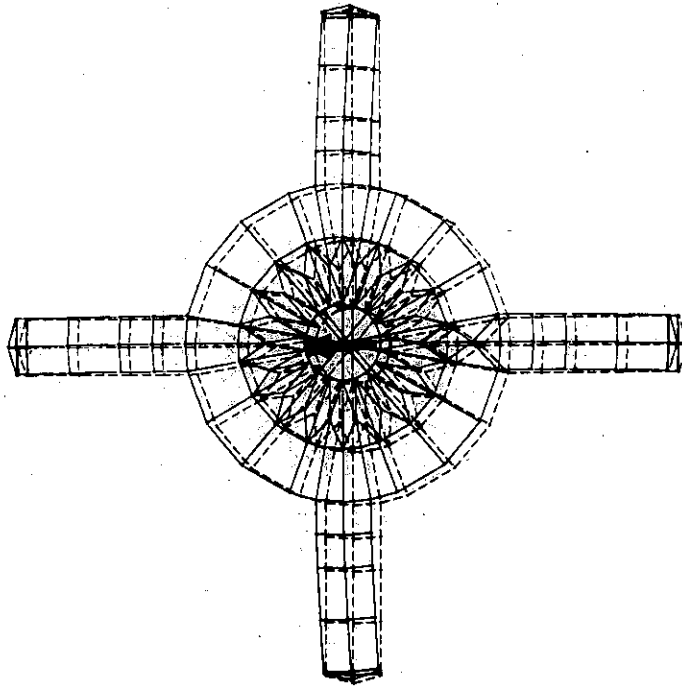


第 3.14 図 STモデル第11次固有振動モード・プロッタ出力図



INTEGRATED MODEL / UPPER FLOOR / MODE 12  
WITH TRUSS

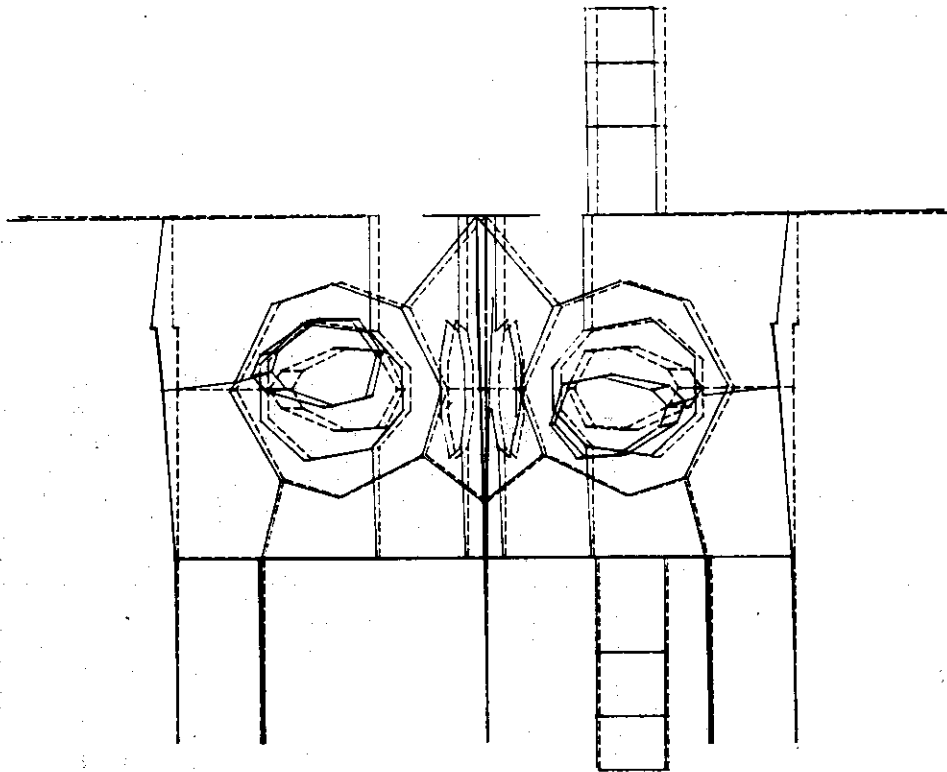
57/2



第 3.15 図 STモデル第12次固有振動モード・プロッタ出力図

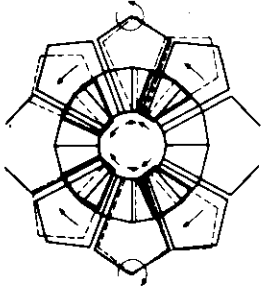
INTEGRATED MODEL / 0-180 SECTION / MODE 12  
WITH TRUSS

57/2

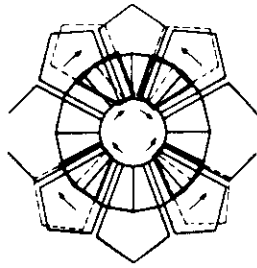


第 3.16 図 STモデル第12次固有振動モード・プロッタ出力図

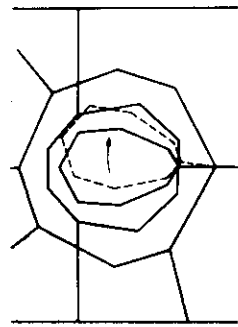
1st mode



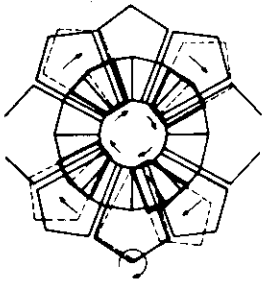
3rd mode



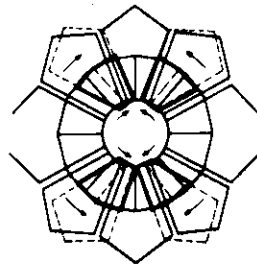
5th mode



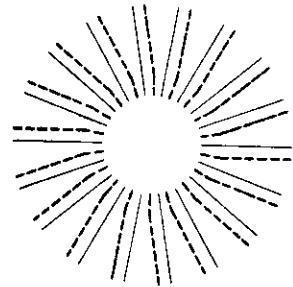
2nd mode



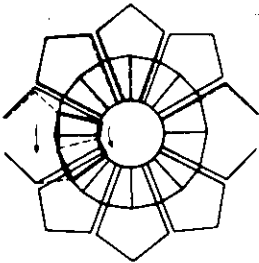
4th mode



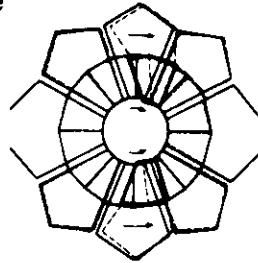
6th mode



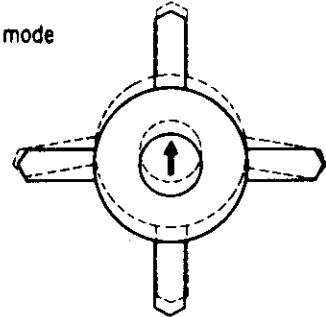
7th mode



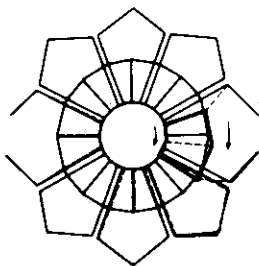
9th mode



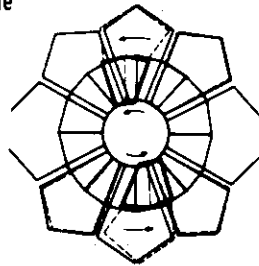
11th mode



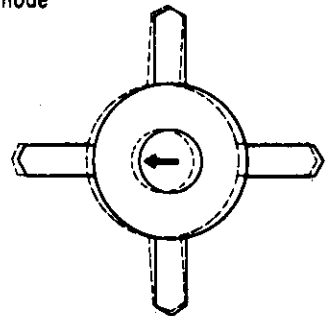
8th mode



10th mode

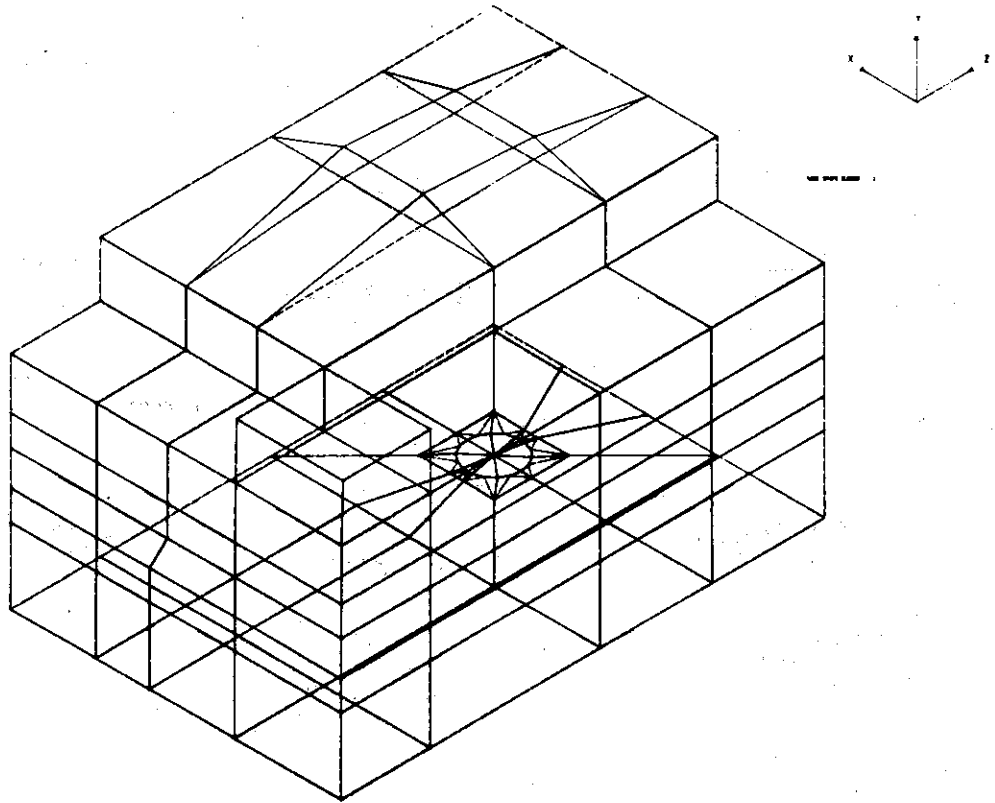


12th mode



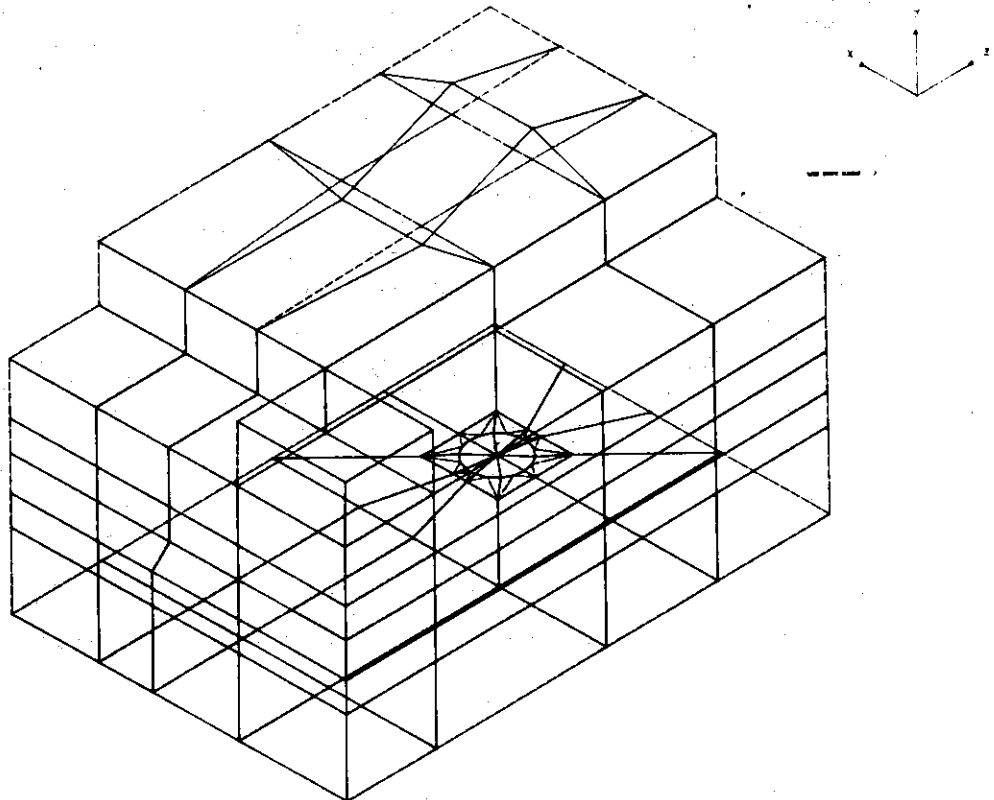
第 3.17 図 STモデル第1~12次固有振動モード模式図

BST / BUILDING AND APPARATUS WITH TRUSS / MODE 1



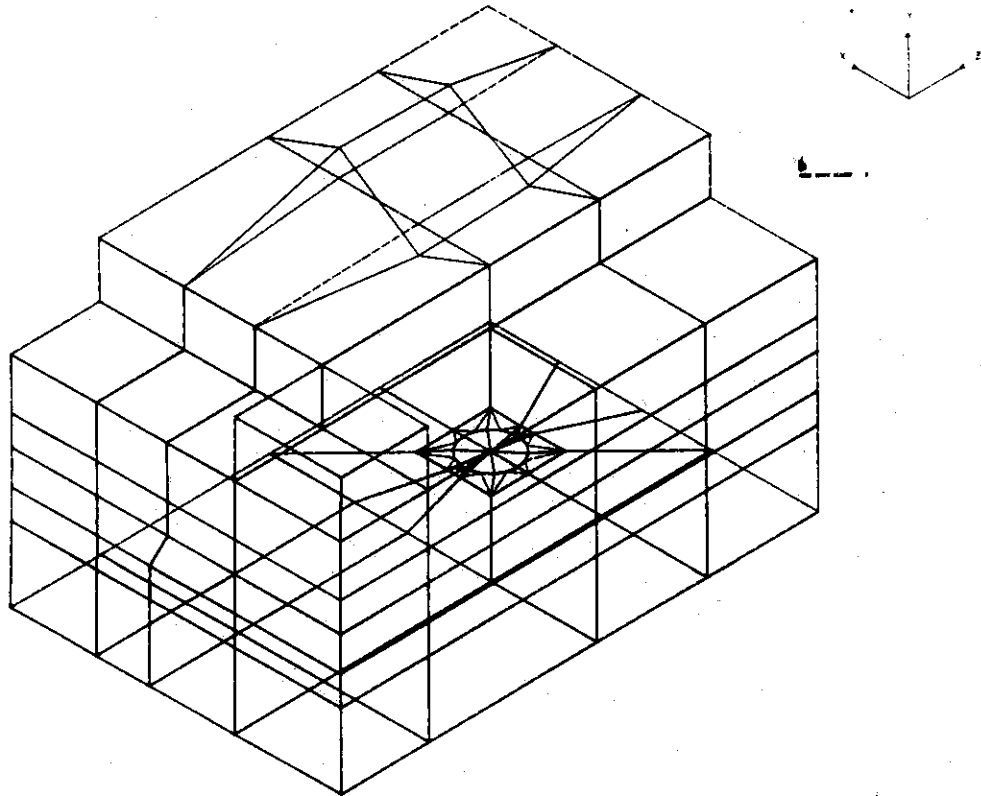
第 3.18 図 BSTモデル第1次固有振動モード・プロッタ出力図

BST / BUILDING AND APPARATUS WITH TRUSS / MODE 2



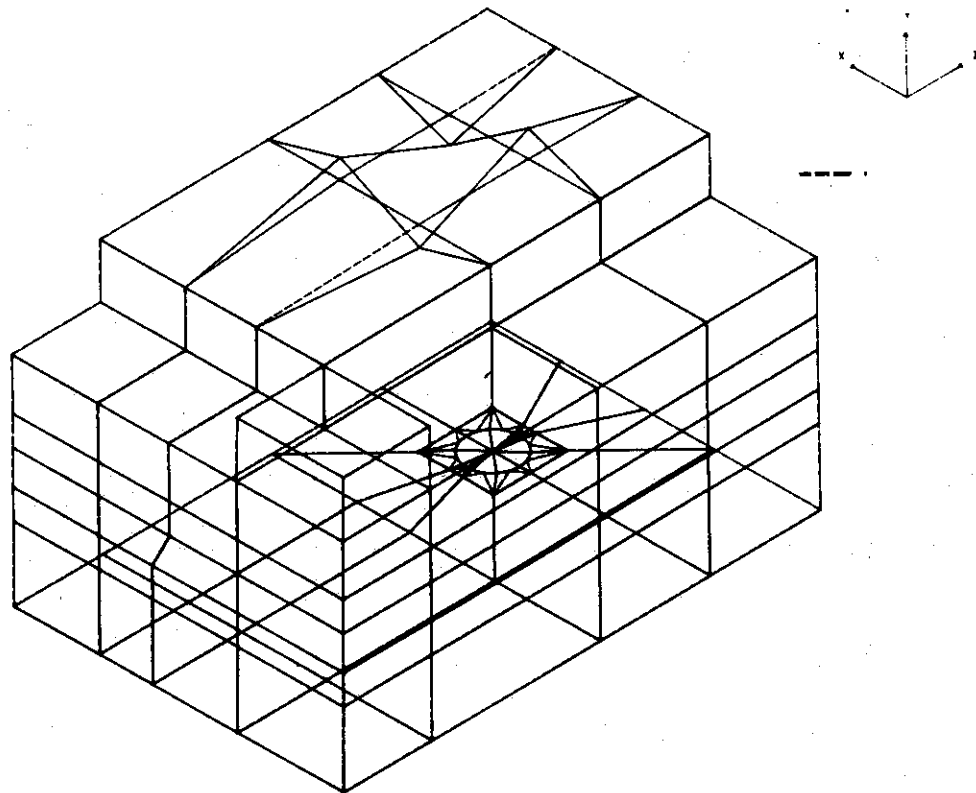
第 3.19 図 BSTモデル第2次固有振動モード・プロッタ出力図

BST3 BUILDING AND APPARATUS WITH TRUSS / MODE 3



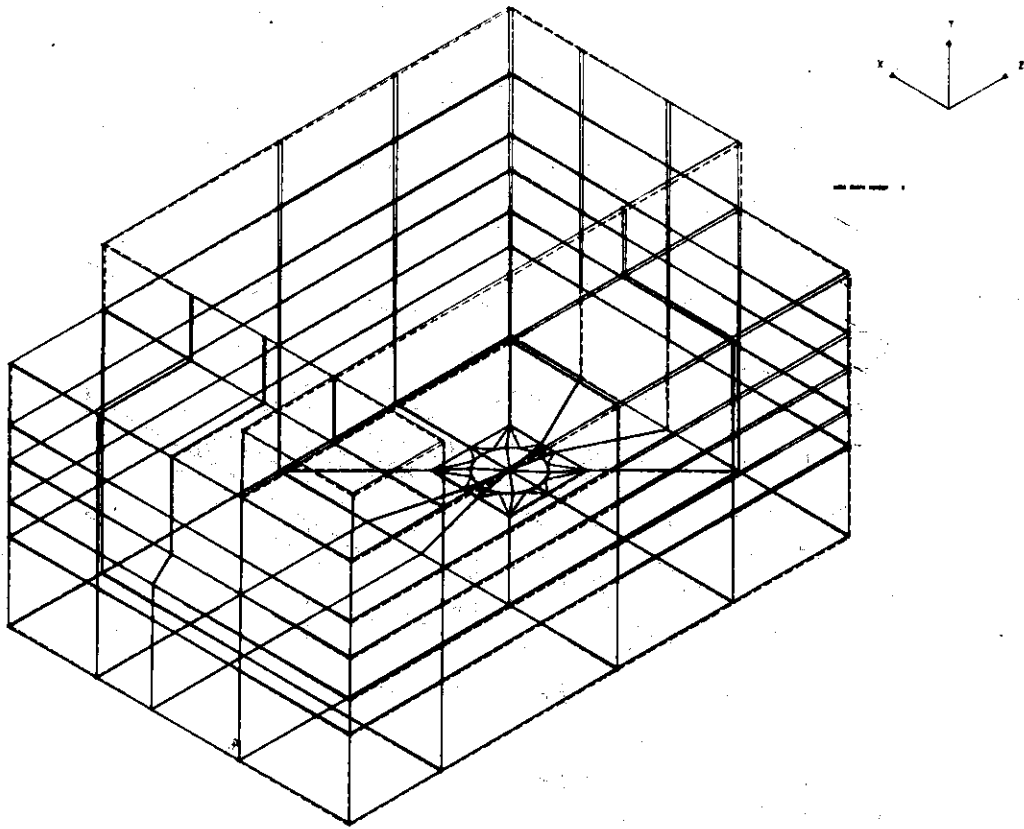
第 3. 20 図 B S Tモデル第 3 次固有振動モード・プロッタ出力図

BST4 BUILDING AND APPARATUS WITH TRUSS / MODE 4



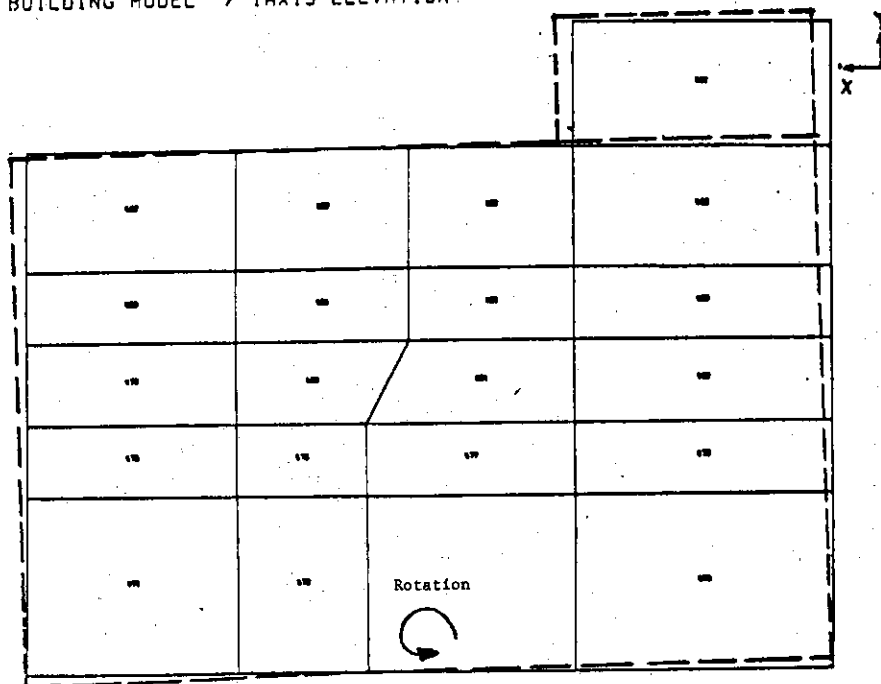
第 3. 21 図 B S Tモデル第 4 次固有振動モード・プロッタ出力図

BUILDING AND APPARATUS WITH TRUSS / MODE 5

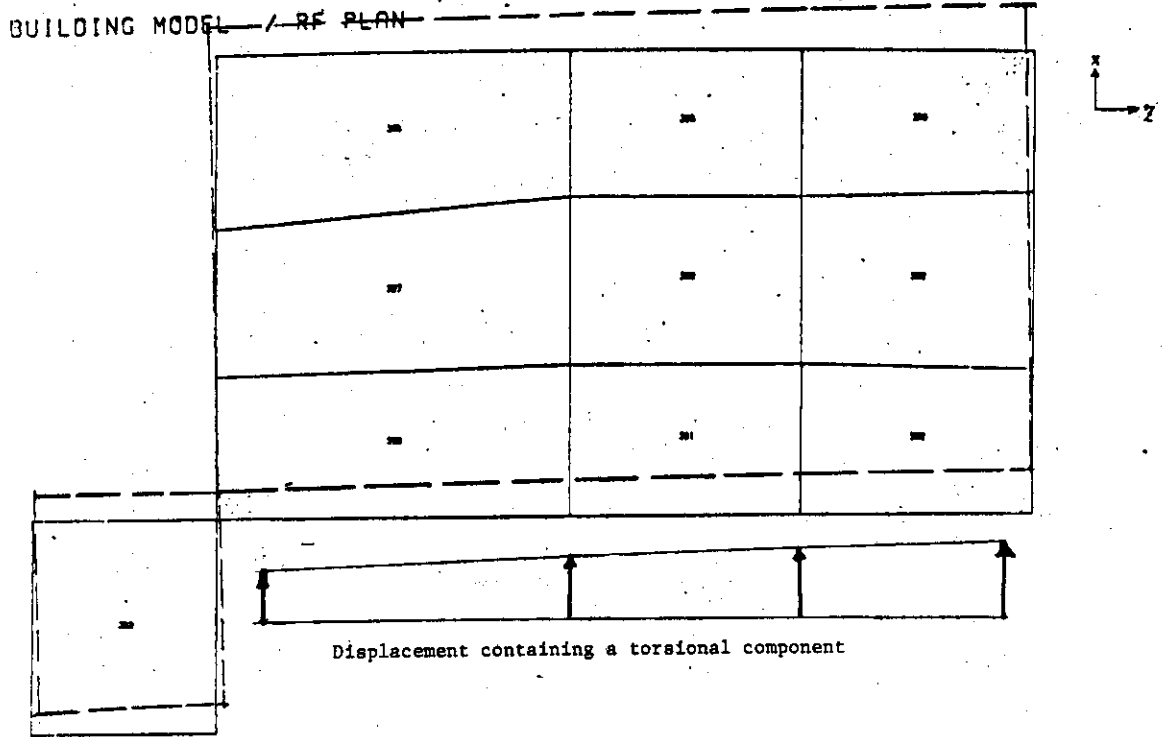


第 3.22 図 B S Tモデル第 5 次固有振動モード・プロッタ出力図

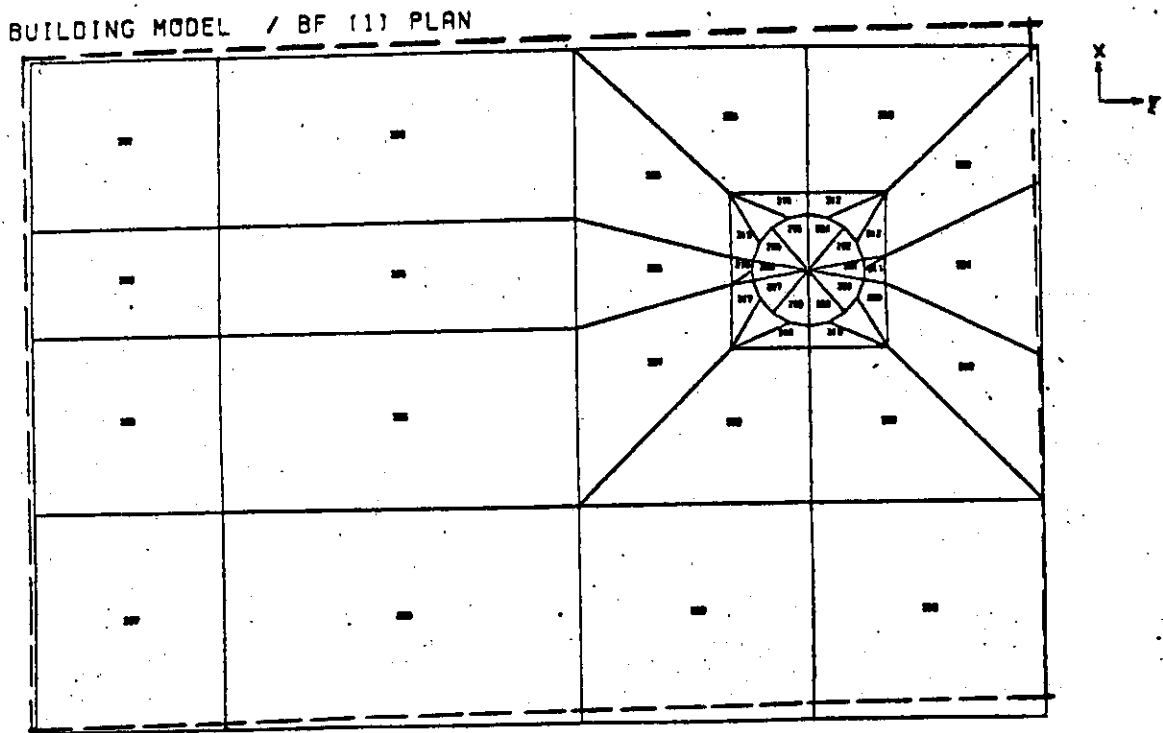
BUILDING MODEL / IAXIS ELEVATION



第 3.23 図 B S Tモデル第 5 次固有振動モード・プロッタ出力図

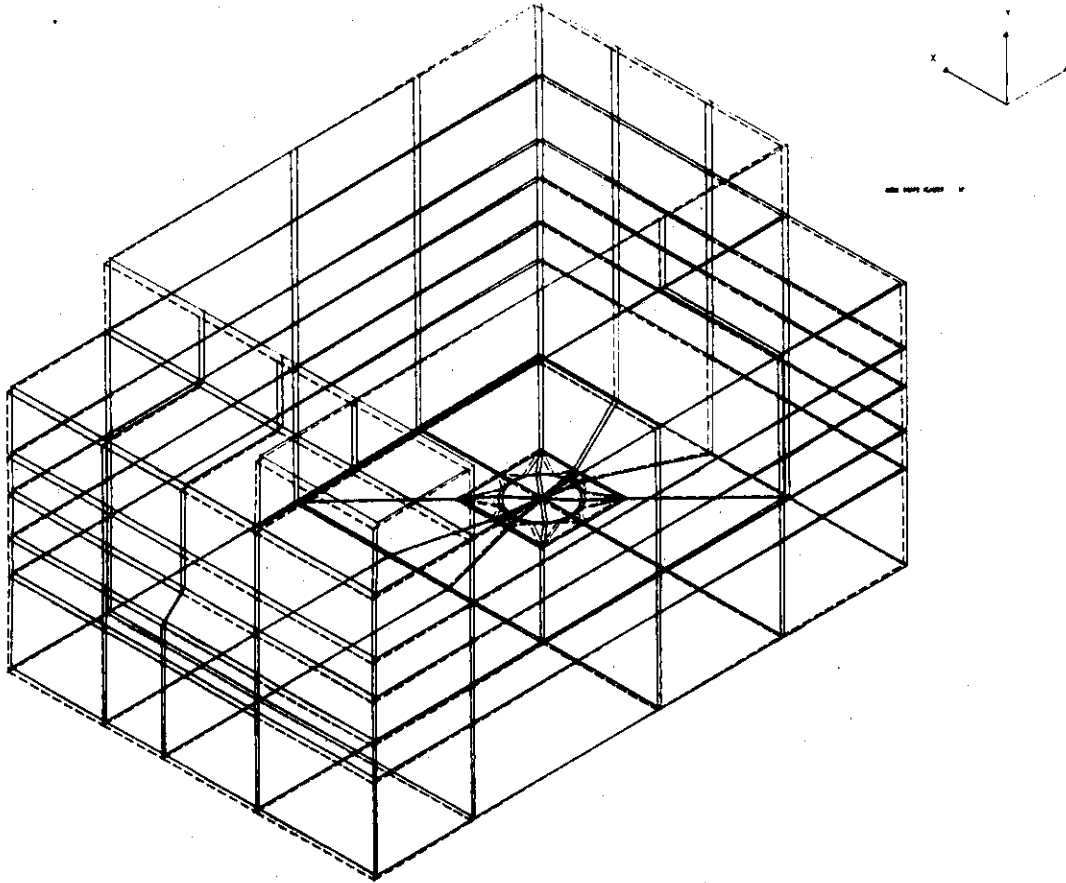


第 3. 24 図 B S T モデル第 5 次固有振動モード・プロッタ出力図



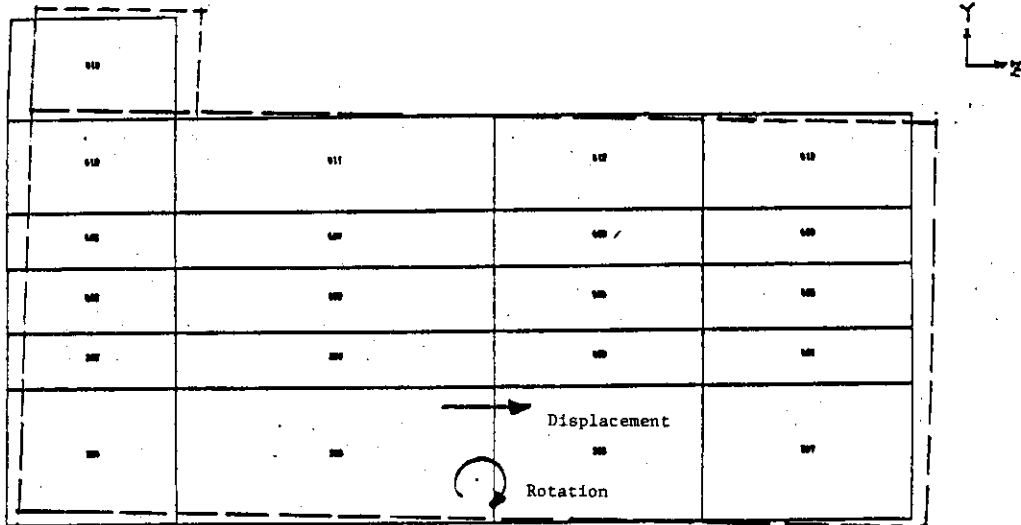
第 3. 25 図 B S T モデル第 5 次固有振動モード・プロッタ出力図

BUILDING AND APPARATUS WITH TRUSS / MODE 10



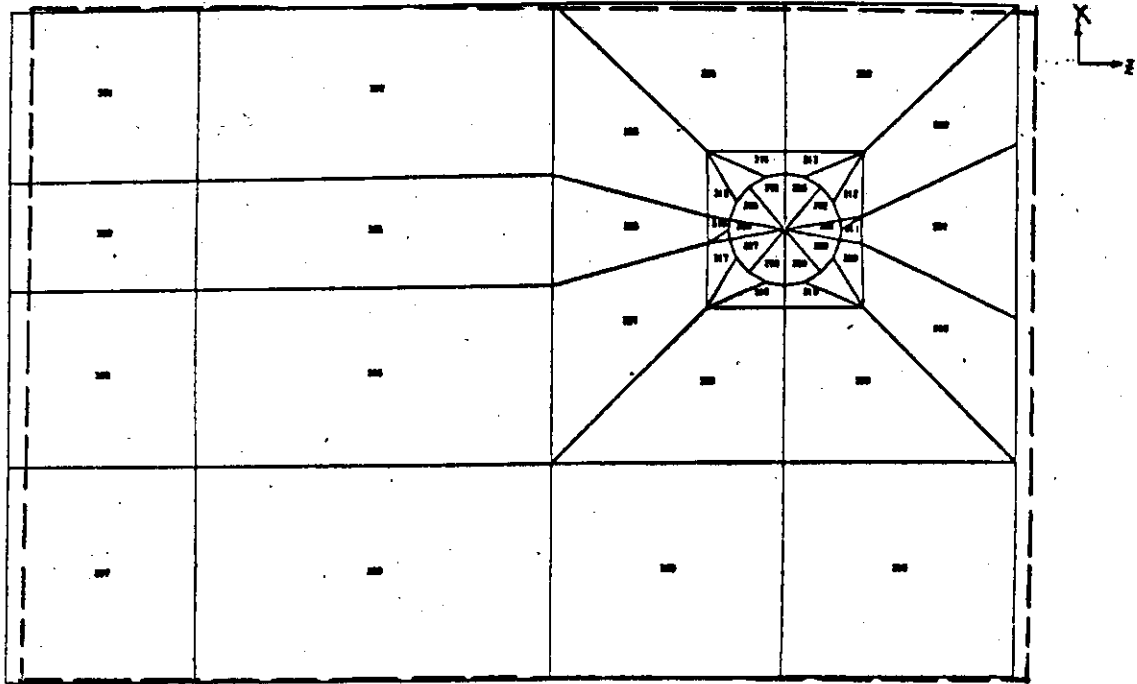
第 3.26 図 BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図

BUILDING MODEL / 1FRAME ELEVATION



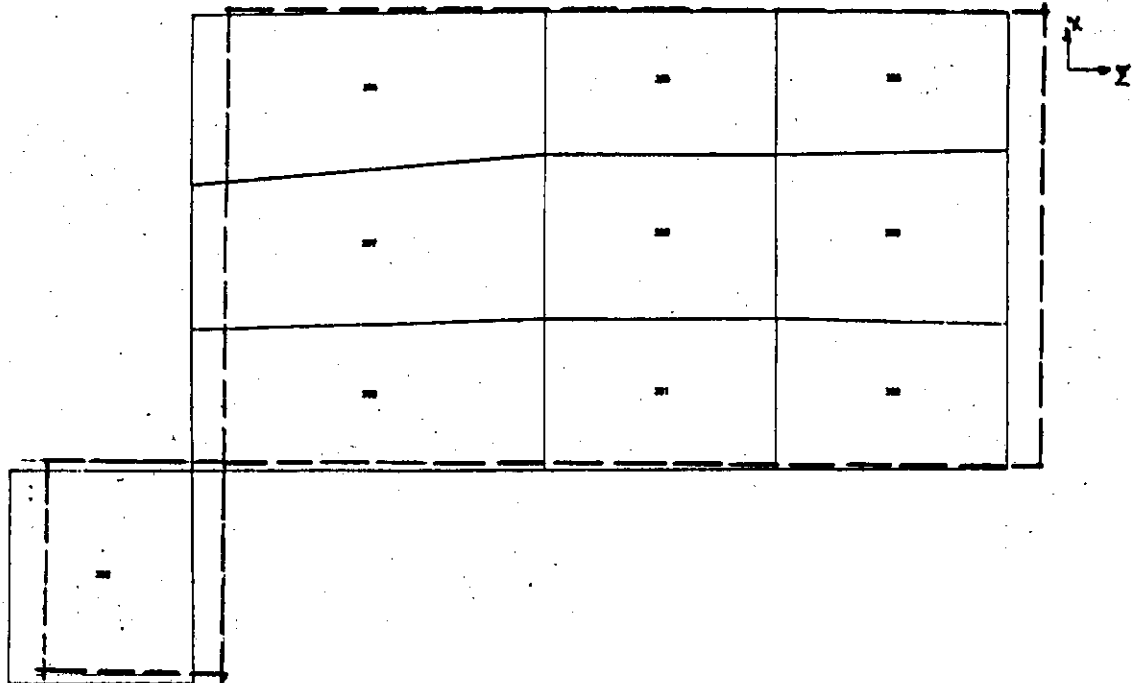
第 3.27 図 BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図

BUILDING MODEL / BF (1) PLAN



第 3.28 図 BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図

BUILDING MODEL / RF PLAN



第 3.29 図 BSTモデル第10次固有振動モード・プロッタ出力図