

ナトリウム炉配管の構造解析(2)

一大形炉ホットレグ配管の固有値解析—

(研究報告)



2002年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

ナトリウム炉配管の構造解析（2）

一大形炉ホットレグ配管の固有値解析－

(研究報告)

古橋一郎*、笠原直人**

要旨

実用化戦略調査研究 Phase I で検討されたアドバンストループ炉のホットレグ配管を対象に、通常の配管解析に使用するビーム要素モデルと、薄肉大口径特有モードの評価を目的とした三次元シェル要素によるモデルを用いて固有値解析をおこない、以下の結果を得た。

- 1 次固有振動については、ビーム解析およびシェル解析とも共通の振動モードが得られた。1次固有振動モードの摘出にはビーム解析が適用出来る。
- せん断変形を無視したビーム解析ではシェル解析と比較して固有振動数が最大 14% 大きくなつた。せん断変形を考慮するとシェル解析に近い結果となつた。

ビーム解析 B2 (せん断無視)	ビーム解析 B2B (せん断考慮)	シェル解析 S2 (せん断考慮)
---------------------	----------------------	---------------------

水平X方向面内 1次振動	13.47Hz	12.03Hz	11.84Hz
水平Y方向面外 1次振動	13.51Hz	12.06Hz	11.82Hz
鉛直Z方向上下 1次振動	46.33Hz	45.33Hz	43.75Hz

- 水平1次振動はYピース部が振り子のように水平に振動し、曲げ剛性が小さいエルボがヒンジのように振舞うモードとなつた。外筒の曲げおよびせん断剛性が支配要因であることがわかつた。
- 鉛直1次振動は内筒と外筒の鉛直部が上下軸方向に引張圧縮ピストン振動し、水平配管が片持ち梁のように上下振動し、エルボがヒンジのように振舞うモードとなつた。外筒の軸方向引張剛性が支配要因であることがわかつた。
- シェル特有の振動モードは有効質量および刺激係数とも小さいことがわかつた。

* (株)CRCソリューションズ

** 核燃料サイクル開発機構、大洗工学センター、構造信頼性研究Gr

Structural Analyses on Piping Systems of Sodium Reactors (2)
-Eigenvalue Analyses of Hot-leg Pipelines of Large Scale Sodium Reactors-

Ichiro FURUHASHI* and Naoto KASAHARA**

Abstract

Two types of finite element models analyzed eigenvalues of hot-leg pipelines of a large-scale sodium reactor. One is a beam element model, which is usual for pipe analyses. The other is a shell element model to evaluate particular modes in thin pipes with large diameters.

Summary of analysis results:

- (1) A beam element model and a shell element model evaluated the same mode for the first order natural frequency. A beam element model is available to get the first order vibration mode.
- (2) The maximum difference ratio of beam mode natural frequencies was 14% between a beam element model with no shear deformations and a shell element model. However, its difference becomes very small, when shear deformations are considered in beam element.

	Beam analysis Shear ignored	Beam analysis Shear considered	Shell analysis Shear considered
The first order X-directional horizontal mode	13.47Hz	12.03Hz	11.84Hz
The first order Y-directional horizontal mode	13.51Hz	12.06Hz	11.82Hz
The first order Z-directional vertical mode	46.33Hz	45.33Hz	43.75Hz

- (3) In the first order horizontal mode, the Y-piece acts like a pendulum, and the elbow acts like the hinge. The natural frequency is strongly affected by the bending and shear rigidities of the outer supporting pipe.
- (4) In the first order vertical mode, the vertical sections of the outer and inner pipes moves in the axial-directional piston mode, the horizontal section of inner pipe behaves like the cantilever, and the elbow acts like the hinge. The natural frequency is strongly affected by the axial rigidity of outer supporting pipe.
- (5) Both effective masses and participation factors were small for particular shell modes.

* CRC Solutions Corp.

** Structural Mechanics Research Group, Advanced Technology Division, OEC, JNC

目次

1. 緒言	1
2. 解析	2
2. 1 解析モデル	2
2. 2 ビームモデル解析	2
2. 3 シエルモデル解析	3
2. 4 解析結果の検討	4
3. 結言	6
参考文献	6

表リスト

表 2.1 解析ケース一覧.....	7
表 2.2-1 ビーム解析結果	9
表 2.3-1 シェル解析結果.....	16
表 2.4-1 ビーム解析とシェル解析の対応	24
表 2.4-2 ビーム解析 B2 による刺激係数および有効質量	25
表 2.4-3 シェル解析 S2 による刺激係数および有効質量	27
表 2.4-4 静解析による変位と反力の比較.....	29

図リスト

図 2.1 ホットレグ配管の固有値解析モデル.....	8
図 2.2-1 配管ビーム要素による解析モデル.....	10
図 2.2-2 ビーム要素FEM粗分割モデル	11
図 2.2-3 ビーム要素FEM細分割モデル	12
図 2.2-4 水平面内 1 次振動モード(ケース B2、Mode-1)	13
図 2.2-5 水平面外 1 次振動モード(ケース B2、Mode-2)	14
図 2.2-6 鉛直上下 1 次振動モード(ケース B2、Mode-6)	15
図 2.3-1 シェル要素FEM粗分割モデル	17
図 2.3-2 シェル要素FEM細分割モデル	18
図 2.3-3 水平面外 1 次振動モード(ケース S2、Mode-1)	19
図 2.3-4 水平面内 1 次振動モード(ケース S2、Mode-2)	20
図 2.3-5 鉛直上下 1 次振動モード(ケース S2、Mode-16)	21
図 2.3-6 シェル特有の振動モード(ケース S2、Mode-6)	22
図 2.3-7 シェル特有の振動モード(ケース S2、Mode-13)	23

1. 緒言

実用化戦略調査研究 Phase I [1]において、ナトリウム炉の経済性向上を目的とする設計概念の成立性を左右する構造として、原子炉容器液面近傍、ホットレグ配管および IHX 管板が摘出された。これらの部位は、もんじゅおよび実証炉の構造設計においてもクリティカルであり、高速炉では原理的に高熱応力が発生する普遍的構造と考えられる。従って、実用化戦略調査研究 Phase II における設計の詳細化の段階でも、継続した検討が必要になると考えられる。

ループ型高速炉 1 次系ホットレグ配管の短縮化は、プラント配置のコンパクト化および建屋を含む物量削減に大きく寄与することから、その努力が続けられてきた。配管系に使用されるエルボ数は、もんじゅ 9、実証炉 2 であり、有望な実用化概念であるアドバンストループ炉では 1 が計画されている。またアドバンストループ炉では、圧力条件が配管口径を制限しないことに着目して、冷却ループの大容量化とループ数削減を計画しており、配管は大口径となっている。この結果、以下の動的問題が新たに顕在化する可能性があり、設計にあたり健全性を評価する必要性が生じた。

第一の課題は、ホットレグ配管が薄肉大口径で短尺であることから、容器シェルとしての特性が現れることである。これをビームと見なした通常の振動解析で十分であるのか、あるいはシェルと見なした振動解析が必要であるのか、確認する必要がある。第二の課題は、配管長の短縮化と IHX・ポンプ合体機器の採用がポンプと配管を近接設置することになり、地震に加えてポンプを励振源の一つと考える必要性が生じたことである。シェルモードも含めて配管とポンプが共振しないことを確認する必要がある。本報告では、第一の課題に対応するために、ビーム解析と三次元シェル解析の比較をおこなう。第 2 の課題に対しては、3 次元シェル解析により各振動モードの固有振動数と刺激係数を評価する。

なおホットレグ配管の詳細構造、特に支持管とルーフデッキの接続構造、支持管と内管の Y ピース接続構造および IHX ノズル構造はまだ設計検討段階にある。本報告では解析モデル境界（支持管上部のルーフデッキ下面位置および内管水平部の IHX ノズルとの接続位置）を固定境界とした。接続部の剛性をバネで含めた場合は固有振動数が本報告よりも低下することに注意されたい。本報告の主眼は上記の課題に対応した検討解析であり、耐震成立性の確認評価を目的としたものではない。

2. 解析

2. 1 解析モデル

配管の材質、形状および境界条件は Phase I [1]で検討された以下のものを対象とした。解析モデルを図 2.1 に示す。

主配管（内管） 50B 外径 $D = 1270\text{mm}$ 、板厚 $t = 15.9\text{mm}$
エルボ曲げ半径 $R = 1270\text{mm}$

支持管（外管） 60B 外径 $D_s = 1524\text{mm}$ 、板厚 $t = 15.9\text{mm}$

材質 12Cr 系鋼、550°C の値を使用した。

ヤング率 $E = 1.66E5 \text{ N/mm}^2 = 1.66E8 \text{ kg/mm sec}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.306$

密度 $\rho = 7.86E-6 \text{ kg/mm}^3$

解析ケース一覧を表 2.1 に示す。支持管の上端および内管水平部右端は固定境界とした。

配管の内部は Na で満たされており、また支持管は外部を Na に囲まれている。このため流体の存在が振動特性に与える効果を近似するため、解析ケース B2N および S2N 以外の解析では、主配管内部の Na 重量および支持管が排除する Na 重量を付加考慮して、各部の密度を割増し補正した。

Na の密度 (550°C) $= 8.20E-7 \text{ kg/mm}^3$

解析コードは FINAS を使用した。

2. 2 ビームモデル解析

配管ビーム要素による解析モデルを図 2.2-1 に示す。解析ケース B1 の FEM 粗分割モデルを図 2.2-2 に示す。解析ケース B1 以外の FEM 細分割モデルを図 2.2-3 に示す。解析ケース B1, B2 および B2N では半径および板厚が変化する Y ピース部を PIPE3 要素で忠実にモデル化し、半径および板厚が一定の直管およびエルボ部は PIPE2 要素でモデル化した。解析ケース B2A および B2B では Y ピース部も PIPE2 要素でモデル化し、平均半径および平均板厚を使用した。解析ケース B2C ではエルボ部以外は SBEAM2 を使用した。

解析ケース B2N 以外の解析では、主配管内部の Na 重量および支持管が排除する Na 重量を付加考慮して図 2.2-1 に示すように、各部の密度を割増し補正した。

エルボは ASME. Code Sec. 3 NB-3600 による撓性係数 [2] を仮定して $K_f = 32.128$ として、その曲げ変形挙動を模擬した。これは同長の直管に同じモーメントを

加えた場合の撓み角変位の倍率を表す（曲げ剛性が直管の1/32.128）。

解析ケースB1,B2,B2NおよびB2Aではせん断変形を無視した。解析ケースB2BおよびB2Cではせん断変形を考慮した。PIPE2要素を用いたケースB2Aではせん断係数=2.0とし、SBEAM2要素を用いたケースB2Cでは有効せん断面積=実断面積/2として、せん断変形を考慮した。これは同一断面積の矩形断面梁の2倍のせん断変形を仮定したことと相当する。

[補足] Yピース結合部に水平変位を与える静的解析を別途実施した（表2.4-4）。静的解析によると、ビーム解析で2倍のせん断変形を考慮した場合に、シェル解析に近い結果が得られることが分かったからである。

ビームモデル解析結果を表2.2-1に示す。解析ケースB2による水平面内1次振動モードを図2.2-4に示す。水平面外1次振動モードを図2.2-5に示す。鉛直上下1次振動モードを図2.2-6に示す。

2.3 シェルモデル解析

FINASの三次元シェル要素QFLA4Sによる解析である。解析ケースS1のFEM粗分割モデルを図2.3-1に示す。解析ケースS2,S2N,S2AのFEM細分割モデルを図2.3-2に示す。解析ケースS1,S2およびS2NではYピースの板厚変化を忠実にモデル化し、解析ケースS2Aでは平均板厚を使用した。解析ケースS1,S2およびS2Aでは、主配管内部のNa重量および支持管が排除するNa重量を付加考慮して、前節の図2.2-1に示したように各部の密度を割増し補正した。解析ケースS2NではNa重量を無視した。

シェルモデル解析結果を表2.3-1に示す。解析ケースS2による水平面外1次振動モードを図2.3-3に示す。水平面内1次振動モードを図2.3-4に示す。鉛直上下1次振動モードを図2.3-5に示す。シェル特有の振動モードを図2.3-6および図2.3-7に示す。

2. 4 解析結果の検討

ビーム解析ケースB2およびB2Bとシェル基準解析ケースS2の対応を表2.4-1に示す。これから固有1次振動モードはほぼ共通の結果となることが分かる。ビーム解析によるモード1～6に対応した振動モードがシェル解析でも現れている。シェル解析のモード1～20のうち、ビーム解析に対応しない14個のモードはシェル特有の振動モードとなることがわかる。ビーム基準解析ケースB2の各モードの刺激係数および有効質量の計算結果を表2.4-2に示す。シェル基準解析ケースS2の各モードの刺激係数および有効質量の計算結果を表2.4-3に示す。ビーム解析結果と対応しないシェル特有のモードについては刺激係数および有効質量とも非常に小さいことが分かる。

[補足]モード*i*の自由度番号*j*に対する刺激係数 β_{ij} および有効質量 m_{ij} は次式で与えられる[3]。

$$\beta_{ij} = (\mathbf{x}_i^T \mathbf{M} \mathbf{I}_j) / (\mathbf{x}_i^T \mathbf{M} \mathbf{x}_i)$$

$$m_{ij} = (\mathbf{x}_i^T \mathbf{M} \mathbf{I}_j)^2 / (\mathbf{x}_i^T \mathbf{M} \mathbf{x}_i)$$

ここに \mathbf{x}_i はモード*i*の固有ベクトル、 \mathbf{M} は質量マトリクス、 \mathbf{I}_j は自由度番号*j*に対応した成分のみ1とし他を0とした単位ベクトルである。 β_{ij} は全節点の自由度*j*変位を1とした併進変位ベクトルを各モードの和に分解する係数であり、固定境界に*j*方向の変位(*j*方向地動に相当)が作用した場合に各モードが刺激される割合を表している。 m_{ij} は各モードを1質点振動で置き換えた場合の等価質量である。一般に高次の振動ほど刺激係数および有効質量が小さくなり、小さな振動となる傾向がある。

- ・ ビーム解析およびシェル解析とも、要素分割を細かくすると全体の変形自由度が増すので、より多くのモードが現れる。
- ・ 固有1次振動は、ビーム解析およびシェル解析とも共通の振動モードが得られた。刺激係数および有効質量が大きく、主要な振動となることが予想される固有1次振動の評価では通常のビームモデル解析で十分であろう。
- ・ せん断変形を無視したビーム解析ではシェル解析と比較して固有振動数が最大14%大きくなつた。せん断変形を考慮するとシェル解析に近い結果となつた。

	ビーム解析 B2 (せん断無視)	ビーム解析 B2B (せん断考慮)	シェル解析 S2 (せん断考慮)
水平X方向面内1次振動	13.47Hz	12.03Hz	11.84Hz
水平Y方向面外1次振動	13.51Hz	12.06Hz	11.82Hz
鉛直Z方向上下1次振動	46.33Hz	45.33Hz	43.75Hz

- ・ 水平1次振動はYピース部が振り子の錘のように、外筒が下向きの片持ち梁のように両者が水平に振動し、曲げ剛性が小さいエルボがヒンジのように振舞うモードとなった。外筒の曲げ剛性およびせん断剛性が支配要因となり、内筒の剛性の寄与は小さいことが推察される。
- ・ 鉛直1次振動は内筒と外筒の鉛直部が上下軸方向に引張圧縮ピストン振動し、内筒の水平部が片持ち梁のように上下振動し、エルボがヒンジのように振舞うモードとなった。外筒の軸方向引張剛性が支配要因となるが、内筒鉛直部の引張剛性と内筒水平部の曲げ剛性およびせん断剛性にも少し影響されると推察される。

[補足]Yピース結合部に水平X方向に1mm の変位を与える静的解析を別途おこなった。静的解析による変位および反力を表 2.4-4 に示す。これからビーム解析でせん断変形を考慮するとシェル解析に近づくことが分かる。同一断面積の矩形断面梁の約2倍のせん断変形を考慮するとシェル解析に近い結果となることが分かる。また内筒の反力が外筒の反力に比べて十分に小さく、内筒の剛性の寄与が小さいことが確認された。なお結果は省略するが、外筒と同じ条件として内筒の剛性のみを変化させた場合、全体の結果に与える影響が小さいことを、固有値解析および静的解析で確認済みである。

- ・ 本ケースのような薄肉大口径配管を梁で近似する場合、せん断変形を無視した通常の配管解析では、全体のせん断曲げ剛性を過大評価し、固有振動数を少し大きめに評価する可能性がある。
- ・ 本ケースの配管形状ではせん断係数 2.0 (有効せん断面積/実断面積=0.5) 程度のせん断変形を考慮することで詳細シェル解析に近い結果が得られた。
- ・ シェル解析によりシェル特有の振動モードが現れる。ただし刺激係数および有効質量とも小さく、大きな振動とはならないであろう。

3. 結言

実用化戦略調査研究 Phase Iにおいて検討されたアドバンストループ炉の逆 L 字型ホットレグ配管を対象に、振動固有値解析をおこない、以下のような結果を得た。

- 要素分割を細かくすると全体の変形自由度が増すので、より多くのモードが現れるが、固有1次振動モードについては、ビーム解析およびシェル解析とも共通の振動モードが得られた。
- 主要な振動である固有1次振動モードの抽出には通常のビームモデル解析で十分であると考えられる。
- ビーム解析でせん断変形を無視した場合、シェル解析と比較して固有振動数に最大14%程度の差異が表れた。せん断変形を考慮することでシェル解析に近い結果が得られた。
- エルボは十分に柔でヒンジに近い挙動となる。エルボを含む内筒の剛性が全体に与える影響が小さいことがわかった。
- 特に本配管系の固有1次振動は外筒の剛性に強く支配されていることがわかった。
- シェル解析では、ビーム解析では現れないシェル特有の振動モードが現れる。
- シェル特有の振動モードは、刺激係数および有効質量とも小さく、大きな振動にはならないと考えられる。

本報告で得られたこれらの知見は、Phase II 詳細設計での有効な活用が期待できる。

参考文献

- [1] 三原隆継、他、'FBRシステム技術検討書－平成12年度報告－'，JNC, TY9400 2001-012, (2001)
- [2] ASME (1995), 'ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Nuclear Components', New York
- [3] 志賀敏男, '構造物の振動' 共立出版, 1986年, 初版6刷

表 2.1 解析ケース一覧

解析 ケース	解析内容				固有1次振動数(Hz)			
	要素分割	使用要素	Na重量	せん断	面内X	面外Y	鉛直Z	
B1	Beam粗	PIPE2 (Yピース部はPIPE3 でテーパ有り)	考慮	無視	13.47	13.51	46.42	
B2					13.47	13.51	46.33	
B2N					23.78	23.84	84.72	
B2A		(Yピース部もPIPE2 でテーパ無し)	考慮	考慮	13.42	13.45	46.30	
B2B					12.03	12.06	45.33	
B2C		SBEAM2(エルボPIPE2)			12.03	12.06	45.33	
S1	Shell粗	QFLA4S (Yピース部の テーパ有り)	考慮	考慮	11.81	11.79	43.88	
S2					11.84	11.82	43.75	
S2N		(テーパ無し)	無視		20.86	20.88	79.94	
S2A					11.84	11.82	43.82	

注1 PIPE2要素でせん断を考慮する場合、せん断係数2.0とした。

注2 SBEAM2要素でせん断を考慮する場合、有効せん断面積=実断面積/2 とした。

注3 これらは等価条件であり、矩形断面の理想梁の2倍のせん断変形に相当する。

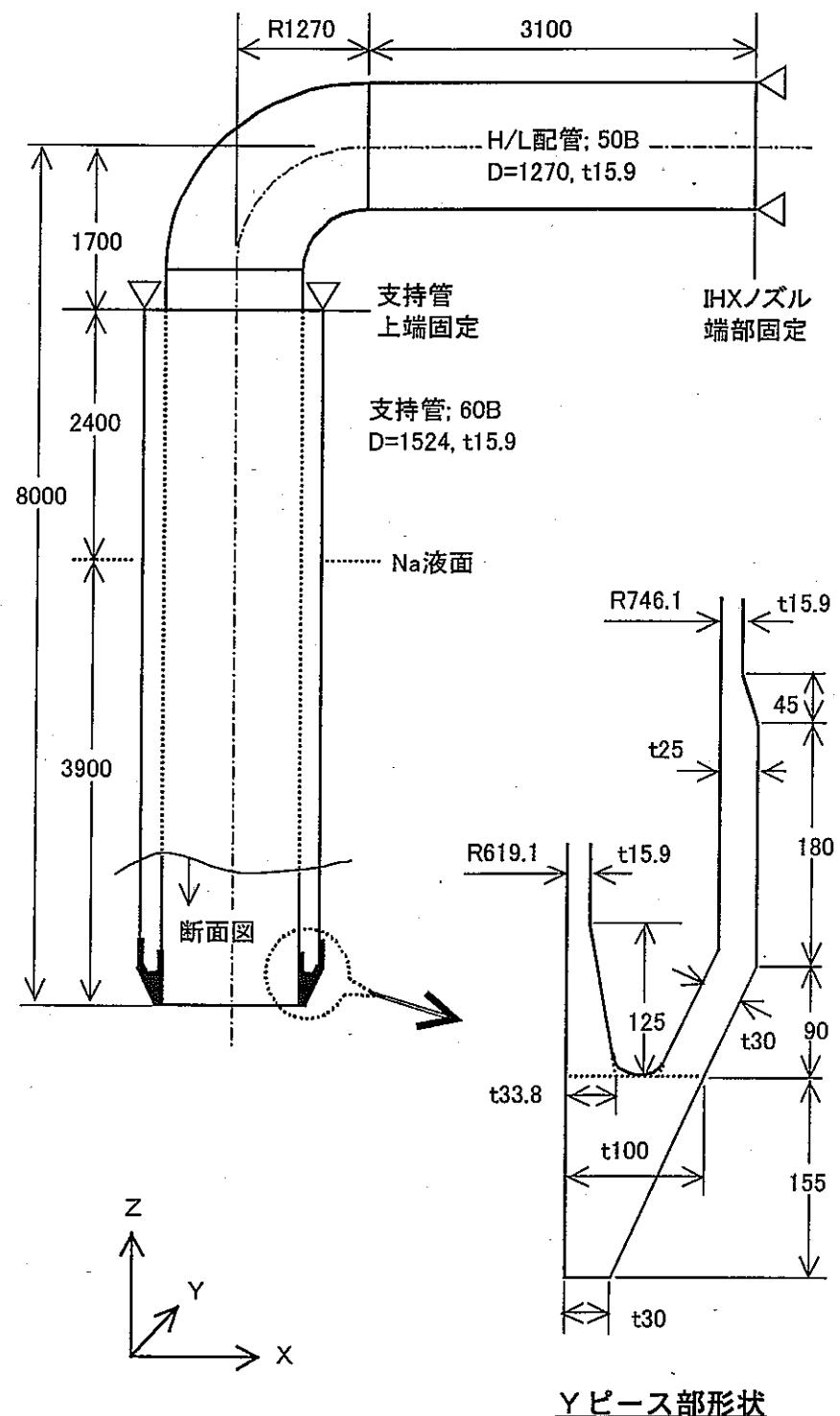


図2.1 ホットレグ配管の固有値解析モデル

表 2.2-1 ピーム解析結果

Case→	B1 (粗分割)		B2 (細分割)		B2N	B2A	B2B	B2C	
Mode ↓	f (Hz)	成分	f (Hz)	成分	f (Hz)	f (Hz)	f (Hz)	f (Hz)	成分
1	13.47	X	13.47	X	23.78	13.42	12.03	12.03	X
2	13.51	Y	13.51	Y	23.84	13.45	12.06	12.06	Y
3	21.60	Y	20.51	Y	37.76	20.50	18.92	18.92	Y
4	36.99	X	38.26	X	70.09	38.23	34.18	34.18	X
5	43.67	Y	43.77	Y	79.44	43.76	41.49	41.49	Y
6	46.42	Z	46.33	Z	84.72	46.30	45.33	45.33	Z
7	61.20	Y	59.48	Y	108.26	59.42	52.00	52.00	Y
8	78.78	Z	79.98	Z	145.69	79.87	66.75	66.75	Z
9	82.86	Y	85.28	Y	153.76	85.22	75.17	75.17	Y
10	104.16	Y	101.12	Y	183.54	101.07	77.97	77.97	X
11	113.95	X	114.27	X	196.96	113.96	78.26	78.27	Y
12	120.71	Y	117.49	Y	200.90	117.22	96.23	96.23	Y
13	122.84	X	119.49	X	213.41	119.36	100.70	100.70	Z
14	153.02	Z	144.75	X	263.09	144.65	121.02	121.02	Y
15	177.01	X	156.88	Y	280.38	156.87	127.51	127.51	X
16	198.13	X	161.80	X	297.40	161.77	134.40	134.40	Z
17	219.57	Y	173.71	Y	316.97	173.65	141.92	141.92	Y
18	228.22	Y	194.31	Y	334.88	194.28	153.56	153.56	X
19	246.83	X	221.87	X	400.83	221.70	157.73	157.73	Y
20	278.20	Z	227.35	Y	406.46	227.25	163.86	163.87	X

注1 解析ケースB2N以外は内部Naおよび支持管が排除するNaの重量を考慮した。

注2 最大変位成分のXは水平面内、Yは水平面外、Zは鉛直方向を表す。

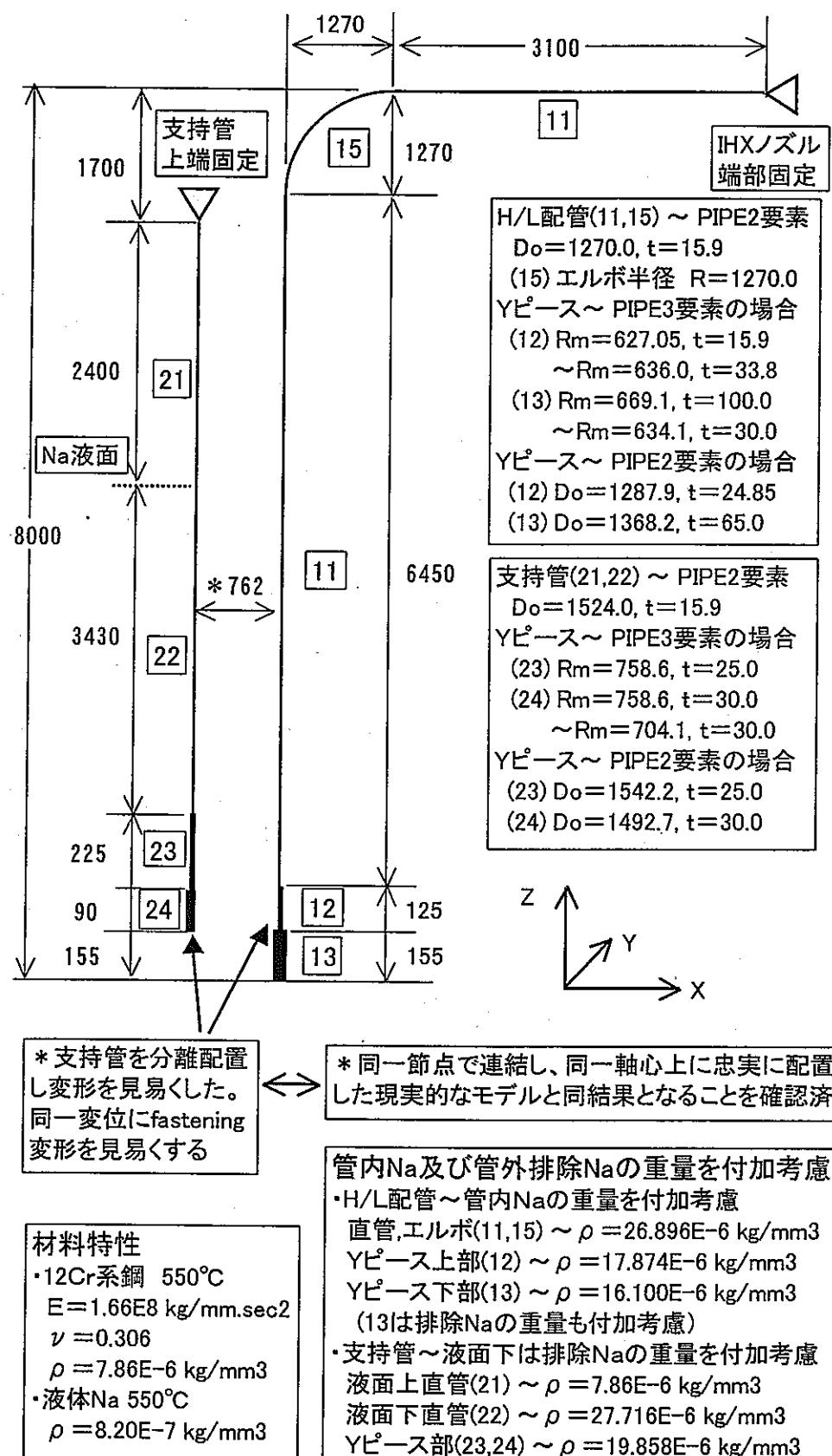


図2.2-1 配管ビーム要素による解析モデル

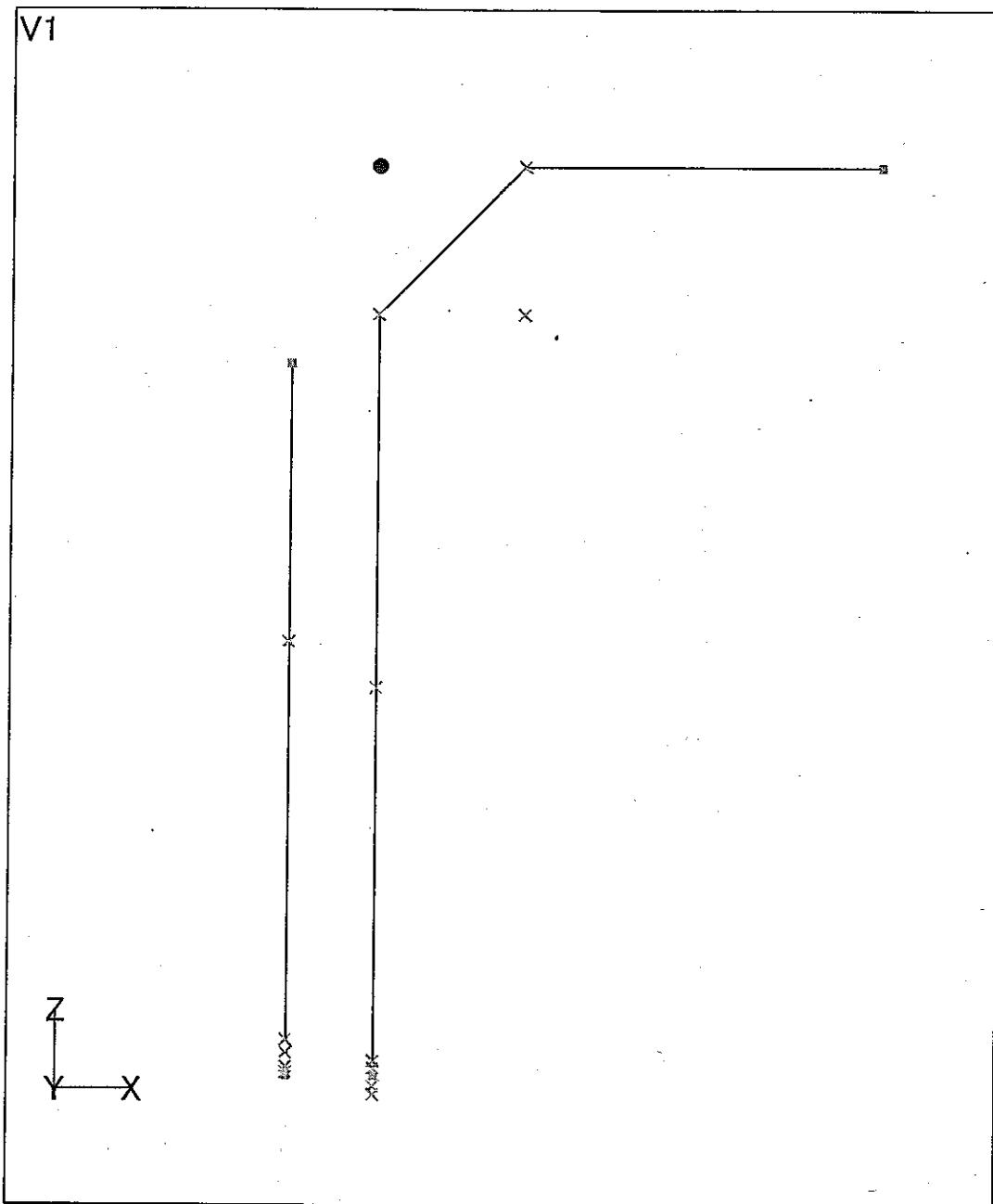


図 2.2-2 ビーム要素FEM粗分割モデル

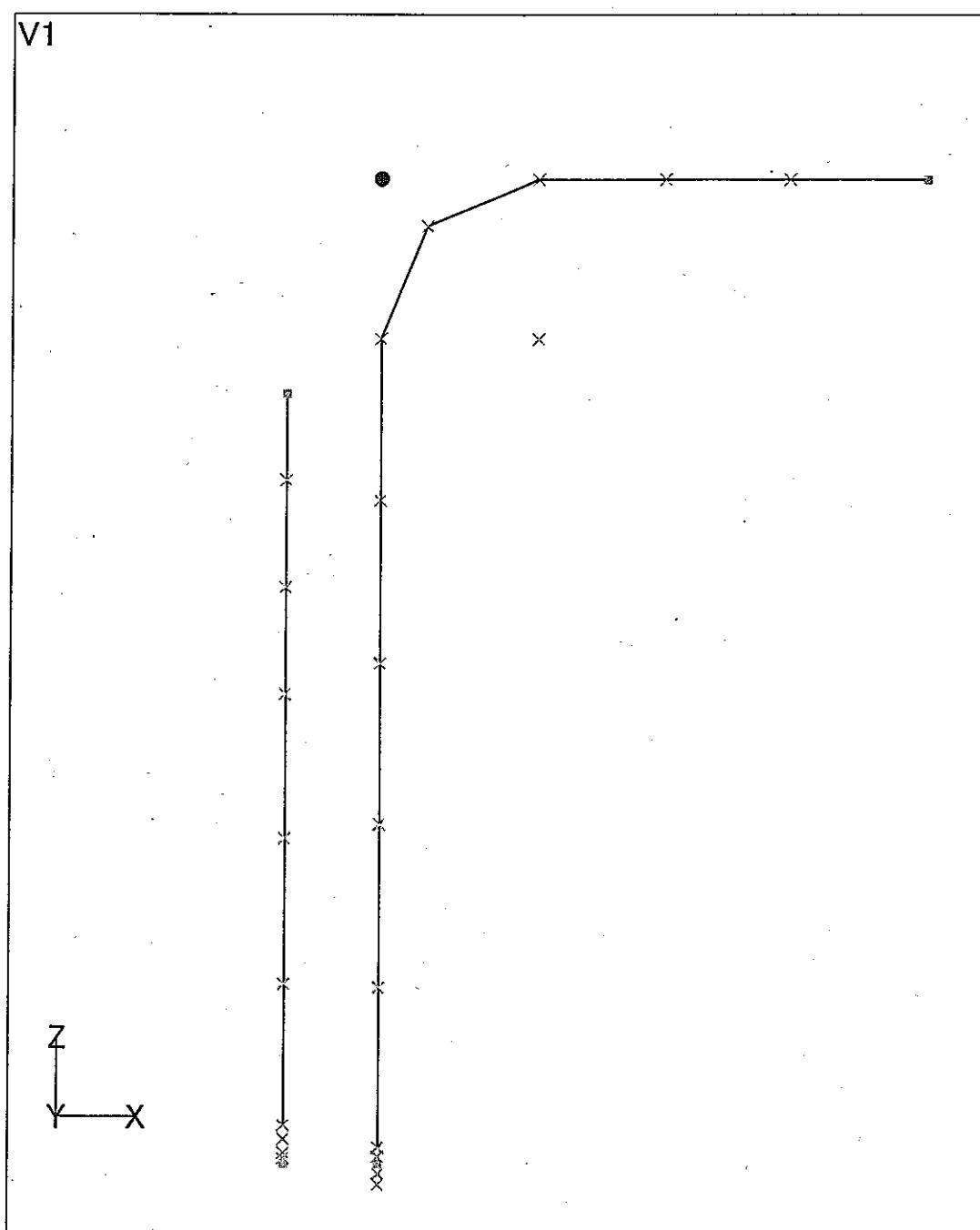


図 2.2-3 ビーム要素FEM細分割モデル

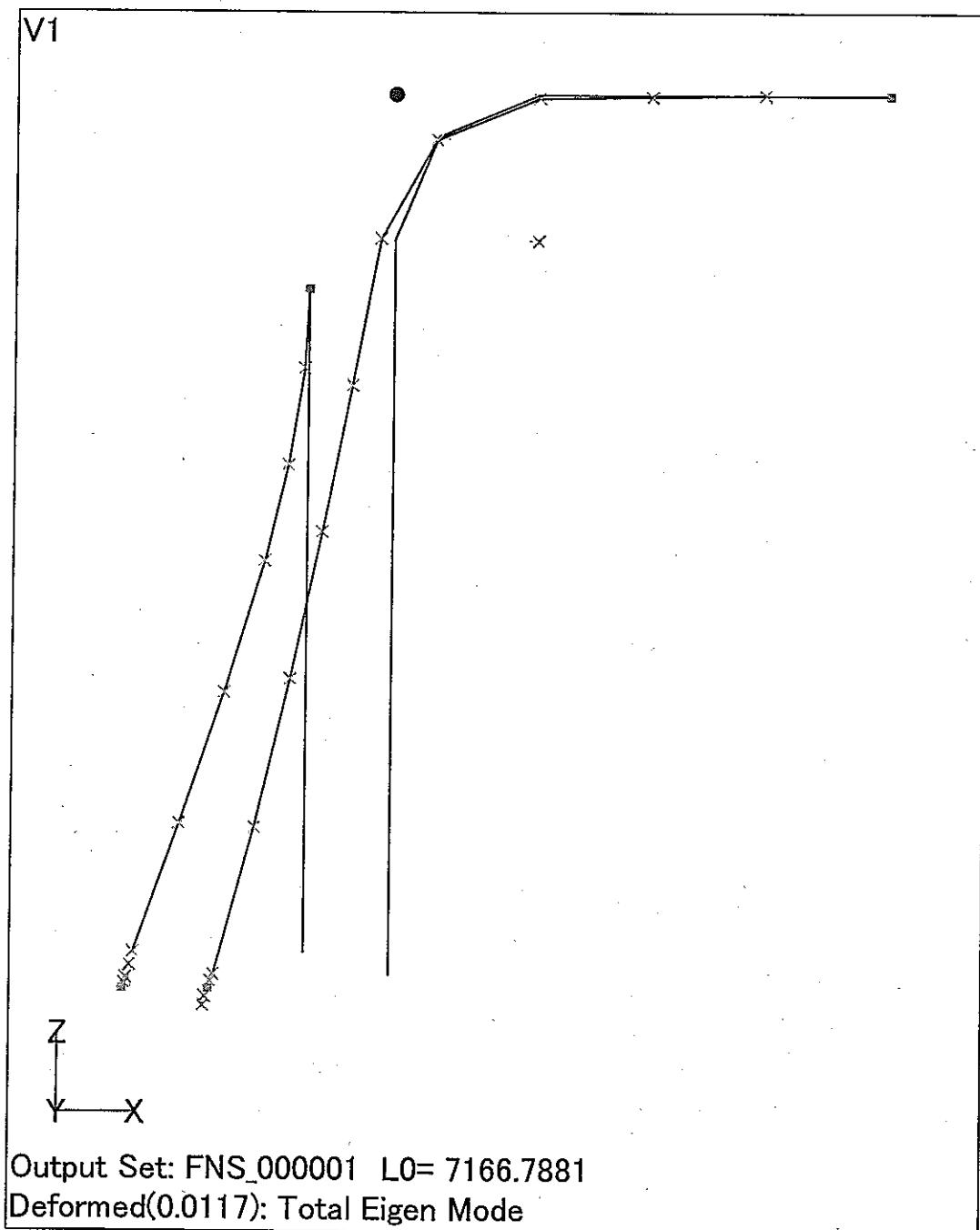


図 2.2-4 水平面内 1 次振動モード(ケース B2、Mode-1)

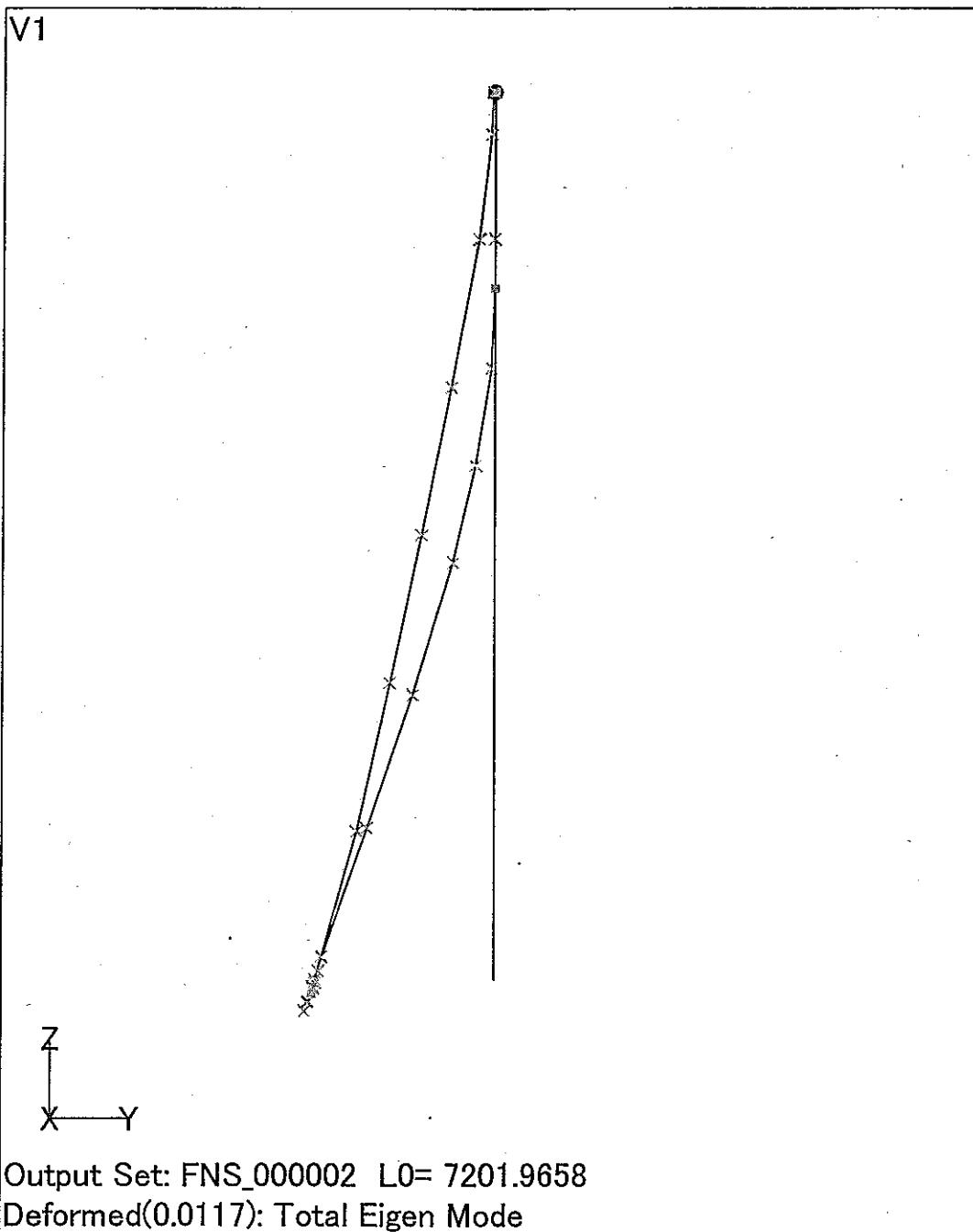


図 2.2-5 水平面外 1 次振動モード(ケース B2、Mode-2)

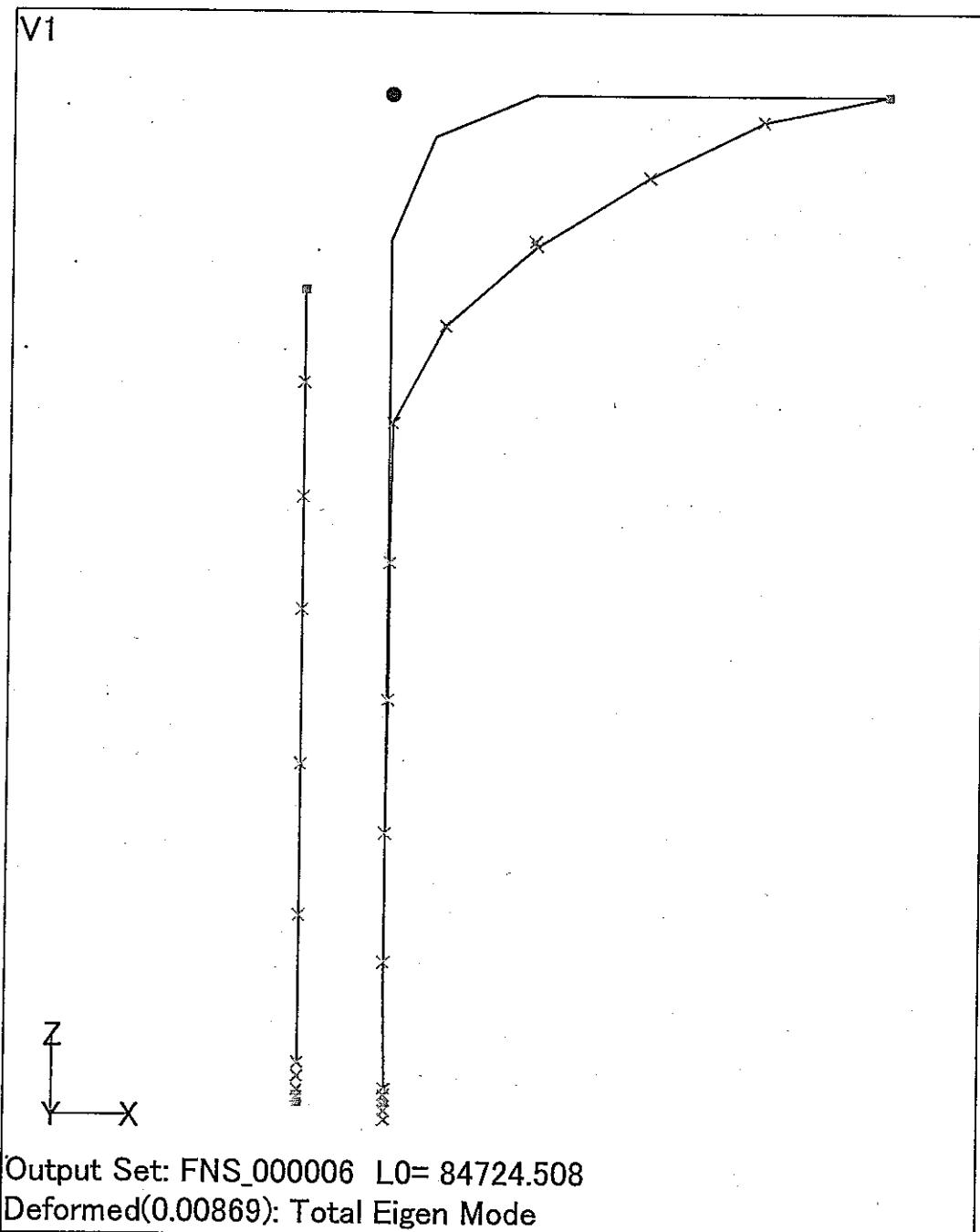


図 2.2-6 鉛直上下 1 次振動モード(ケース B2、Mode-6)

表 2.3-1 シェル解析結果

Case →	S1 (粗分割)		S2 (細分割)		S2N	S2A
Mode ↓	f (c/s)	成分	f (c/s)	成分	f (c/s)	f (c/s)
1	11.79	Y	11.82	Y	20.86	11.82
2	11.81	X	11.84	X	20.88	11.84
3	18.85	Y	18.56	Y	34.21	18.54
4	19.29	X	18.72	X	34.54	18.69
5	20.10	Y	19.86	Y	36.46	19.85
6	29.12	X	28.44	X	50.48	28.37
7	29.29	Y	28.63	Y	50.75	28.55
8	33.49	Y	31.01	X	55.15	30.99
9	33.49	X	31.01	Y	55.15	30.99
10	37.12	Y	36.11	X	65.70	36.02
11	37.20	X	36.16	Y	66.09	36.12
12	39.61	X	39.14	Y	71.20	39.10
13	40.99	Y	39.15	X	71.86	39.13
14	42.54	X	39.31	X	72.49	39.29
15	42.68	Y	40.34	Y	73.28	40.14
16	43.88	Z	43.75	Z	79.94	43.82
17	48.09	Z	45.62	Z	83.12	45.48
18	49.79	Y	46.70	Y	85.63	46.69
19	50.17	Y	48.29	Z	87.19	48.13
20	51.35	X	49.55	Y	88.69	49.46

注1 解析ケースS2N以外は内部Naおよび支持管が排除するNaの重量を考慮した。

注2 最大変位成分のXは水平面内、Yは水平面外、Zは鉛直方向を表す。

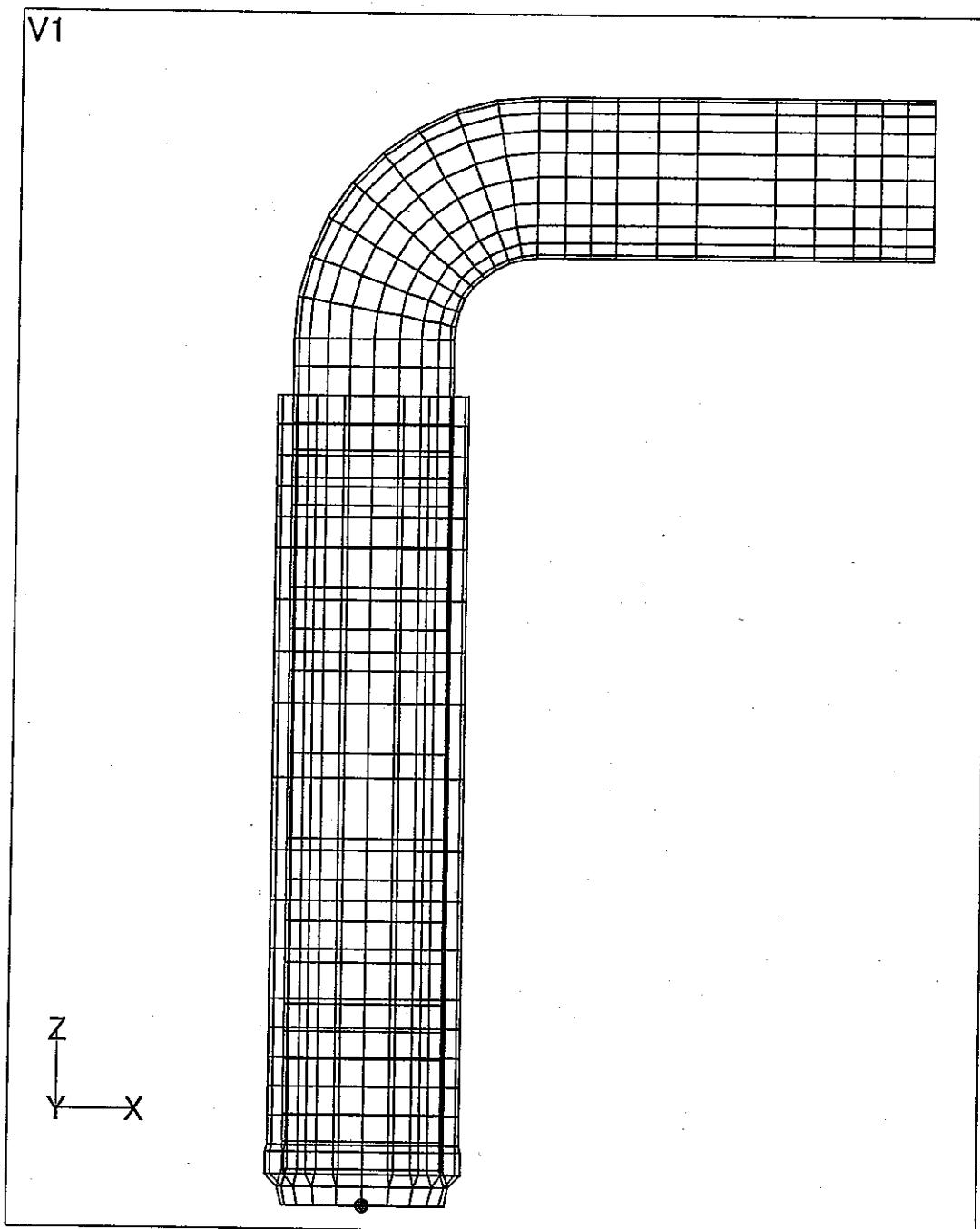


図 2.3-1 シェル要素FEM粗分割モデル

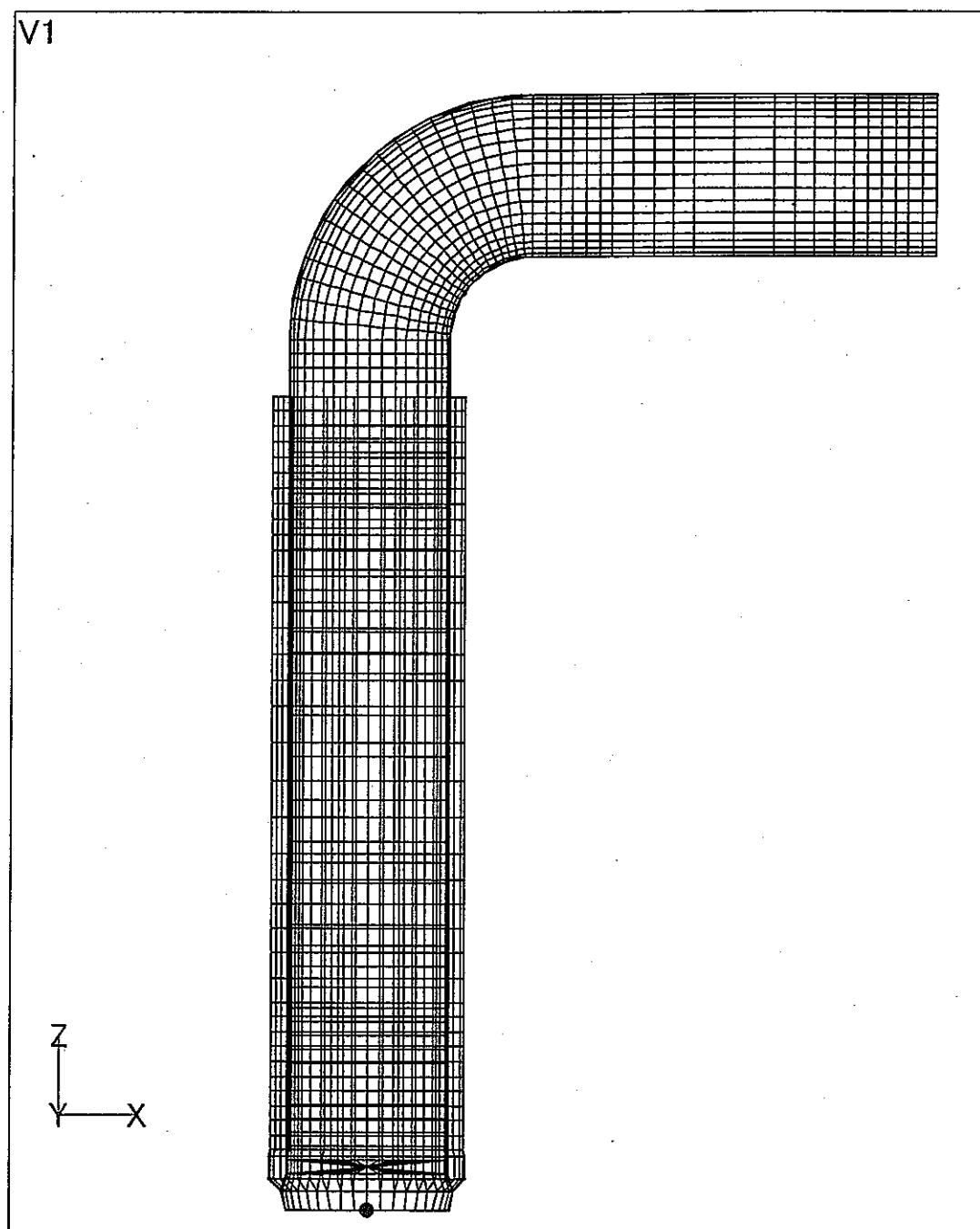


図 2.3-2 シェル要素FEM細分割モデル

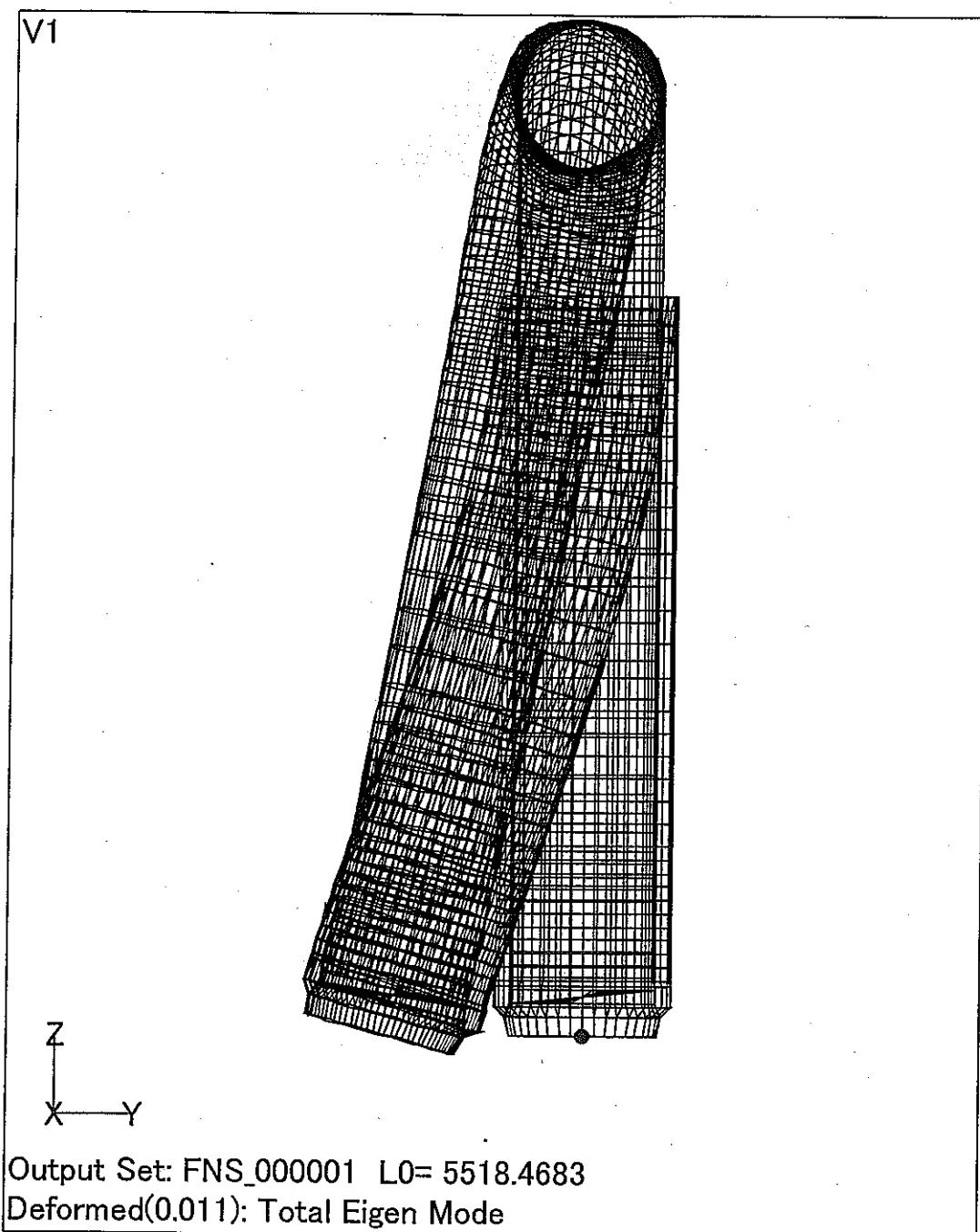


図 2.3-3 水平面外 1 次振動モード(ケース S2、Mode-1)

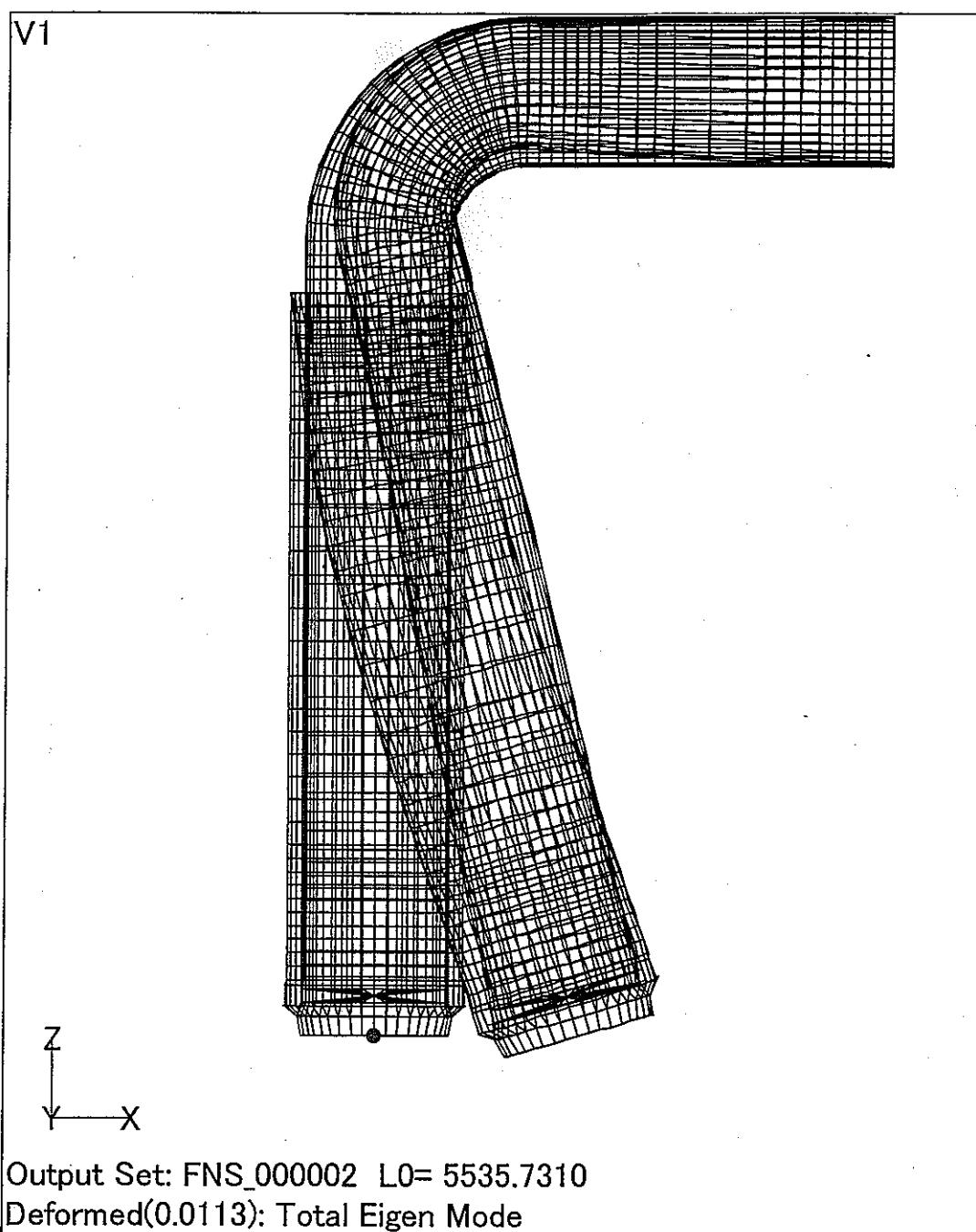


図 2.3-4 水平面内 1 次振動モード(ケース S2、Mode-2)

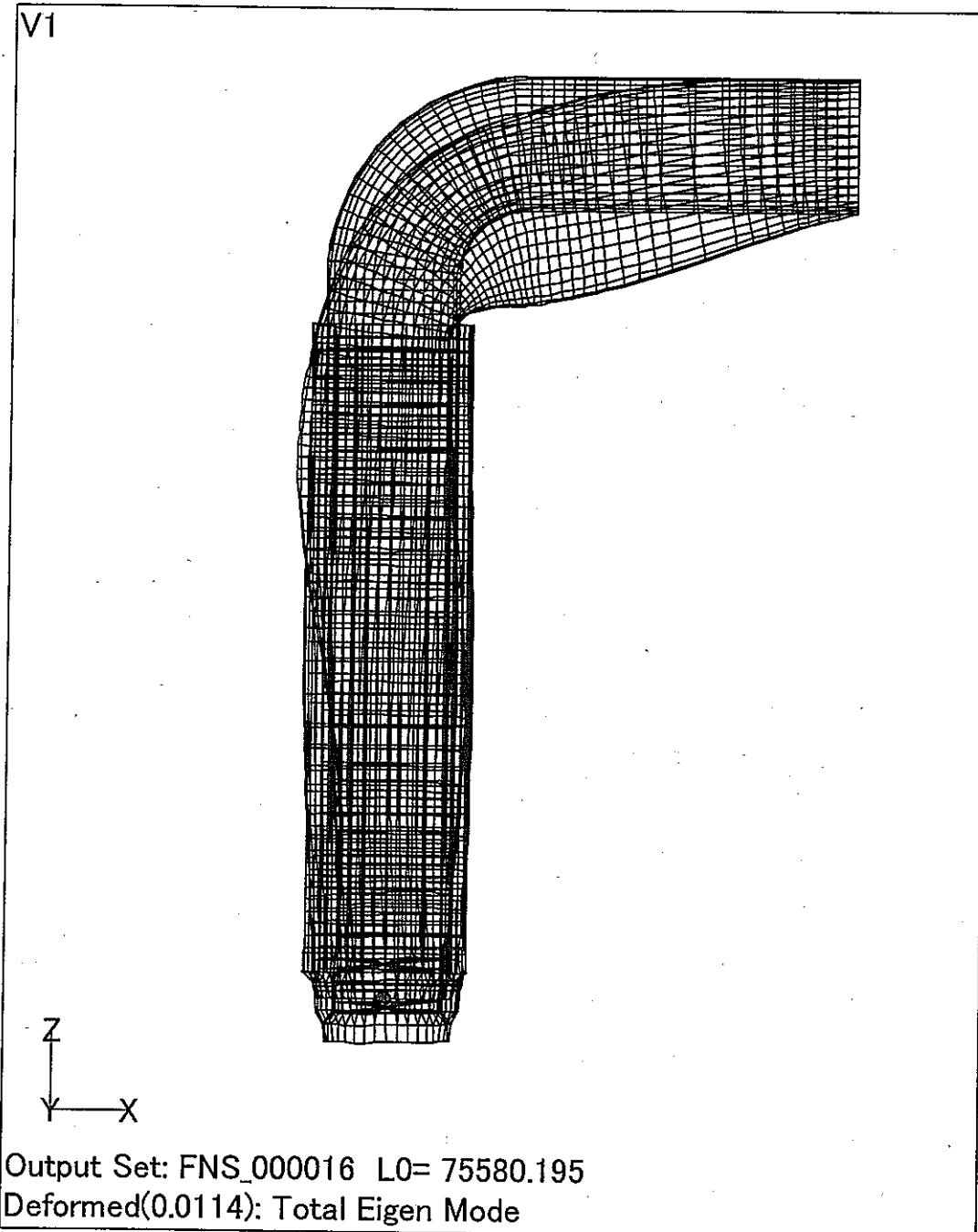


図 2.3-5 鉛直上下 1 次振動モード(ケース S2、Mode-16)

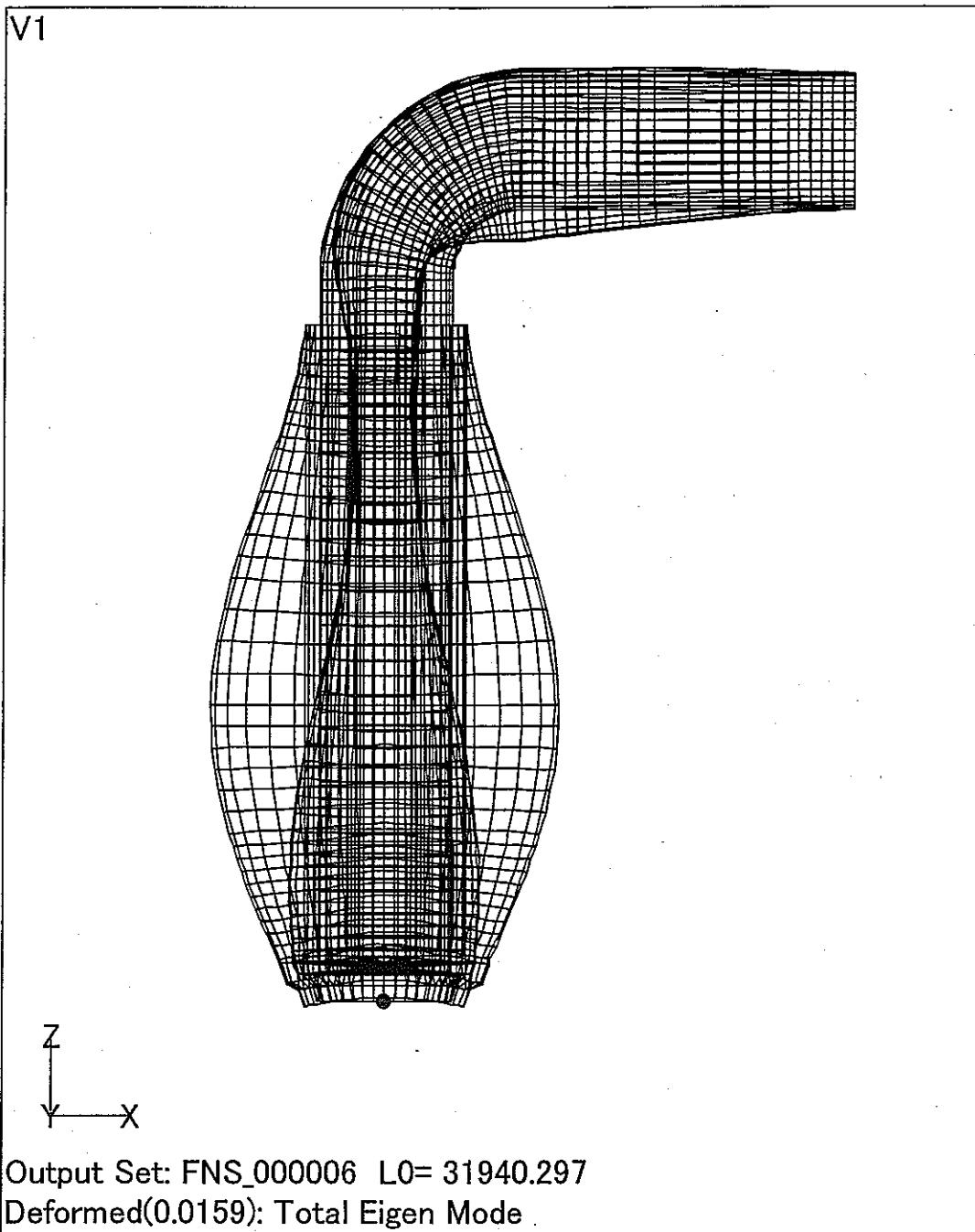


図 2.3-6 シェル特有の振動モード(ケース S2、Mode-6)

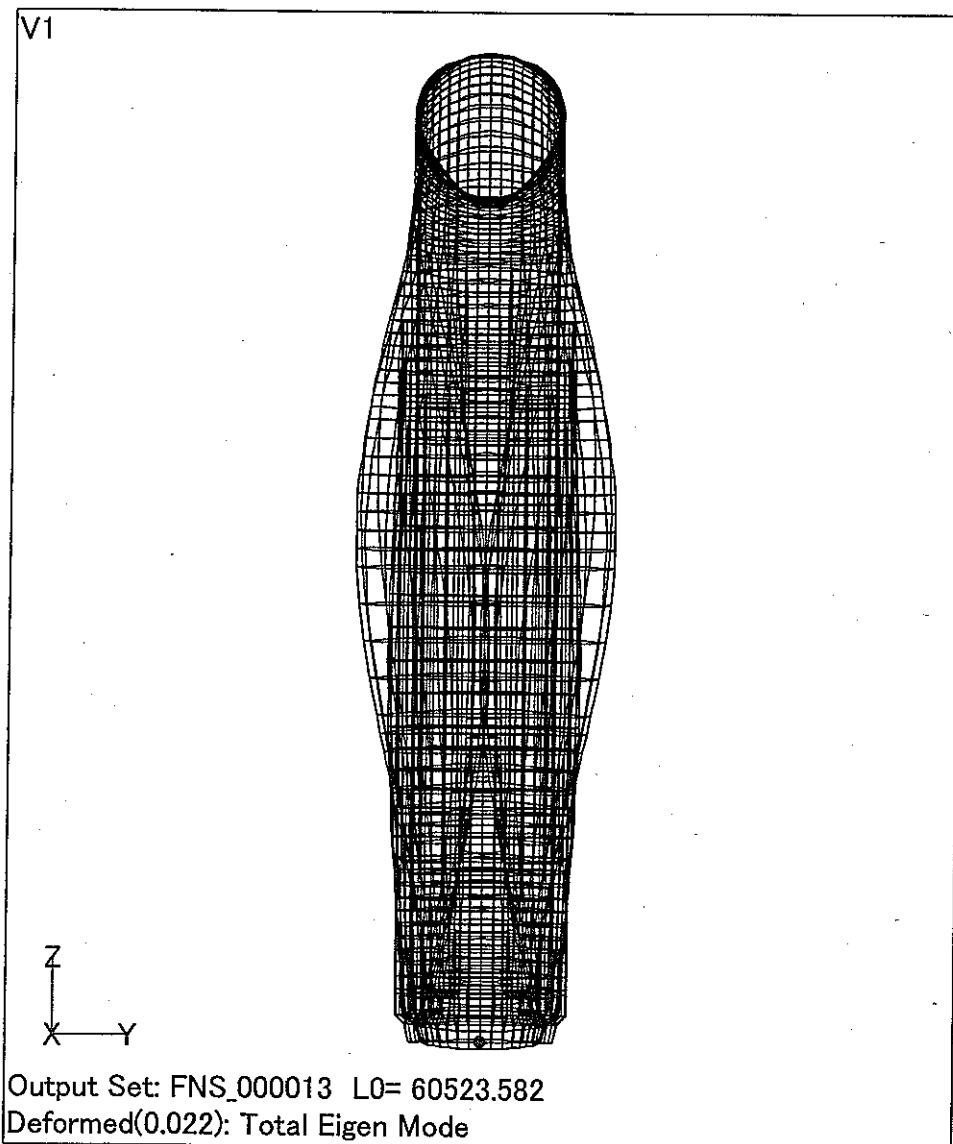


図 2.3-7 シェル特有の振動モード(ケース S2、Mode-13)

表2.4-1 ピーム解析とシェル解析の対応

Case→	ピームB2		ピームB2B			シェルS2	
Mode ↓	f (c/s)	成分	f (Hz)	成分		f (c/s)	成分
1	13.47	X	12.03	X		11.82	Y
2	13.51	Y	12.06	Y		11.84	X
3	20.51	Y	18.92	Y		18.56	Y
4	38.26	X	34.18	X		18.72	X
5	43.77	Y	41.49	Y		19.86	Y
6	46.33	Z	45.33	Z		28.44	X
7	59.48	Y	52.00	Y		28.63	Y
8	79.98	Z	66.75	Z		31.01	X
9	85.28	Y	75.17	Y		31.01	Y
10	101.12	Y	77.97	X		36.11	X
11	114.27	X	78.26	Y		36.16	Y
12	117.49	Y	96.23	Y		39.14	Y
13	119.49	X	100.70	Z		39.15	X
14	144.75	X	121.02	Y		39.31	X
15	156.88	Y	127.51	X		40.34	Y
16	161.80	X	134.40	Z		43.75	Z
17	173.71	Y	141.92	Y		45.62	Z
18	194.31	Y	153.56	X		46.70	Y
19	221.87	X	157.73	Y		48.29	Z
20	227.35	Y	163.86	X		49.55	Y

(せん断無視) (せん断考慮)

表 2.4-2 ビーム解析 B2 による刺激係数および有効質量

Mode	f (Hz)	項目	1(Ux)	2(Uy)	3(Uz)	4(θx)	5(θy)	6(θz)
1	13.47	刺激係数	-1.497E+00	-5.388E-03	-4.478E-03			
		有効質量	1.634E-04	2.115E-01	1.461E-01	2.723E+02	7.065E+05	9.030E+02
		有効質量比	6.165E-01	8.031E-06	5.521E-06	1.959E-07	1.571E-01	9.426E-08
2	13.51	刺激係数	5.308E-03	-1.502E+00	-2.380E-03			
		有効質量	2.058E-01	1.648E+04	4.139E-02	3.542E+05	1.450E+01	2.764E+06
		有効質量比	7.766E-06	6.256E-01	1.564E-06	2.549E-04	3.224E-06	2.885E-04
3	20.51	刺激係数	2.109E-02	1.032E+00	-5.635E-03			
		有効質量	2.628E+00	6.292E+03	1.877E-01	2.875E+06	6.191E+02	3.783E+08
		有効質量比	9.916E-05	2.389E-01	7.093E-06	2.069E-03	1.376E-04	3.949E-02
4	38.26	刺激係数	6.902E-01	-3.417E-02	2.438E-02			
		有効質量	3.633E+03	8.907E+00	4.533E+00	1.091E+05	6.345E+05	3.471E+07
		有効質量比	1.371E-01	3.382E-04	1.713E-04	7.850E-05	1.411E-01	3.623E-03
5	43.77	刺激係数	2.670E-02	2.708E-01	5.893E-03			
		有効質量	1.047E+01	1.077E+03	5.099E-01	4.112E+06	3.704E+03	6.841E+09
		有効質量比	3.951E-04	4.089E-02	1.927E-05	2.959E-03	8.234E-04	7.142E-01
6	46.33	刺激係数	1.431E-02	7.045E-04	-1.340E+00			
		有効質量	2.727E+00	6.607E-03	2.392E+04	1.368E+06	8.977E+05	6.208E+04
		有効質量比	1.029E-04	2.509E-07	9.038E-01	9.846E-04	1.996E-01	6.481E-06
7	59.48	刺激係数	7.355E-03	1.457E-01	1.320E-02			
		有効質量	5.561E-01	2.182E+02	1.791E+00	3.147E+07	2.962E+01	1.331E+09
		有効質量比	2.098E-05	8.285E-03	6.769E-05	2.264E-02	6.584E-06	1.389E-01
8	79.98	刺激係数	4.223E-02	-2.339E-02	1.451E-02			
		有効質量	1.572E+01	4.824E+00	1.856E+00	1.133E+06	4.724E+04	1.442E+07
		有効質量比	5.933E-04	1.832E-04	7.015E-05	8.152E-04	1.050E-02	1.505E-03
9	85.28	刺激係数	3.633E-02	-1.755E-01	1.478E-02			
		有効質量	1.741E+01	4.065E+02	2.881E+00	2.381E+06	2.097E+04	5.573E+08
		有効質量比	6.571E-04	1.544E-02	1.089E-04	1.713E-03	4.663E-03	5.818E-02
10	101.12	刺激係数	-2.338E-02	1.332E-01	-1.231E-02			
		有効質量	9.707E+00	3.151E+02	2.692E+00	3.325E+08	3.737E+04	1.582E+07
		有効質量比	3.663E-04	1.196E-02	1.017E-04	2.392E-01	8.308E-03	1.651E-03

表2.4-2 (続き)

11	114.27	刺激係数	6.922E-02	1.750E-02	1.292E-01			
		有効質量	7.040E+01	4.497E+00	2.453E+02	8.157E+05	1.184E+04	6.157E+03
		有効質量比	2.657E-03	1.708E-04	9.272E-03	5.870E-04	2.632E-03	6.427E-07
12	117.49	刺激係数	-9.877E-02	-3.974E-01	-2.492E-02			
		有効質量	6.198E+01	1.003E+03	3.946E+00	2.188E+07	4.342E+04	2.739E+04
		有効質量比	2.339E-03	3.810E-02	1.491E-04	1.575E-02	9.652E-03	2.860E-06
13	119.49	刺激係数	-5.554E-01	2.193E-02	-1.686E-01			
		有効質量	3.373E+03	5.261E+00	3.109E+02	4.690E+06	1.679E+06	1.363E+04
		有効質量比	1.273E-01	1.998E-04	1.175E-02	3.375E-03	3.732E-01	1.422E-06
14	144.75	刺激係数	-3.667E-01	1.086E-02	3.443E-01			
		有効質量	1.865E+03	1.635E+00	1.644E+03	1.112E+06	1.798E+05	1.385E+03
		有効質量比	7.036E-02	6.207E-05	6.214E-02	8.000E-04	3.998E-02	1.446E-07
15	156.88	刺激係数	-3.499E-03	3.542E-03	-9.554E-03			
		有効質量	2.494E+00	2.556E+00	1.860E+01	5.985E+08	1.166E+03	1.519E+07
		有効質量比	9.413E-05	9.705E-05	7.029E-04	4.306E-01	2.591E-04	1.586E-03
16	161.80	刺激係数	3.864E-01	-4.028E-02	1.598E-01			
		有効質量	9.364E+02	1.018E+01	1.603E+02	3.729E+06	2.314E+04	1.207E+06
		有効質量比	3.534E-02	3.864E-04	6.056E-03	2.683E-03	5.144E-03	1.260E-04
17	173.71	刺激係数	-1.293E-01	-2.989E-01	9.045E-04			
		有効質量	6.184E+01	3.304E+02	3.024E-03	2.685E+05	3.031E+03	1.241E+07
		有効質量比	2.334E-03	1.255E-02	1.143E-07	1.932E-04	6.738E-04	1.296E-03
18	194.31	刺激係数	-1.907E-03	-4.852E-02	6.883E-03			
		有効質量	1.340E-01	8.672E+01	1.745E+00	3.803E+08	4.789E+03	3.495E+08
		有効質量比	5.057E-06	3.293E-03	6.596E-05	2.736E-01	1.065E-03	3.648E-02
19	221.87	刺激係数	9.244E-02	1.602E-02	1.105E-01			
		有効質量	7.523E+01	2.260E+00	1.075E+02	3.508E+05	2.216E+04	3.490E+06
		有効質量比	2.839E-03	8.581E-05	4.064E-03	2.525E-04	4.926E-03	3.643E-04
20	227.35	刺激係数	-4.496E-02	8.804E-02	-5.655E-02			
		有効質量	2.394E+01	9.181E+01	3.788E+01	1.834E+06	1.814E+05	2.214E+07
		有効質量比	9.034E-04	3.486E-03	1.432E-03	1.319E-03	4.032E-02	2.311E-03
		全有効質量	2.650E+04	2.634E+04	2.646E+04	1.390E+09	4.498E+06	9.580E+09
			kg	kg	kg	kg.mm	kg.mm	kg.mm

表 2.4-3 シェル解析 S2 による刺激係数および有効質量

Mode	f (Hz)	項目	1(Ux)	2(Uy)	3(Uz)	4(θx)	5(θy)	6(θz)
1	11.82	刺激係数	-4.473E-09	1.510E+00	-1.966E-12	8.950E-03	2.845E-11	-2.895E-03
		有効質量	1.654E-13	1.883E+04	3.194E-20	6.620E-01	6.688E-18	6.926E-02
		有効質量比	8.646E-18	7.671E-01	1.341E-24	5.719E-01	7.705E-18	2.422E-03
2	11.84	刺激係数	1.479E+00	4.837E-09	1.098E-03	2.850E-11	-9.372E-03	-9.338E-12
		有効質量	1.712E+04	1.832E-13	9.449E-03	6.361E-18	6.878E-01	6.829E-19
		有効質量比	8.953E-01	7.463E-18	3.966E-07	5.495E-18	7.925E-01	2.389E-20
3	18.56	刺激係数	-7.157E-11	-6.742E-01	2.858E-11	3.960E-03	5.851E-13	1.383E-02
		有効質量	2.217E-17	1.968E+03	3.536E-18	6.788E-02	1.482E-21	8.278E-01
		有効質量比	1.159E-21	8.014E-02	1.484E-22	5.864E-02	1.707E-21	2.895E-02
4	18.72	刺激係数	7.034E-02	-1.232E-09	-1.496E-02	8.146E-12	-1.722E-04	3.097E-11
		有効質量	2.007E+01	6.156E-15	9.075E-01	2.692E-19	1.203E-04	3.892E-18
		有効質量比	1.050E-03	2.507E-19	3.809E-05	2.326E-19	1.386E-04	1.361E-19
5	19.86	刺激係数	1.667E-13	-7.372E-01	5.314E-13	6.692E-03	-2.837E-13	1.179E-02
		有効質量	1.571E-22	3.072E+03	1.597E-21	2.531E-01	4.550E-22	7.854E-01
		有効質量比	8.215E-27	1.251E-01	6.701E-26	2.187E-01	5.242E-22	2.747E-02
6	28.44	刺激係数	3.465E-02	-1.062E-09	-2.448E-02	5.693E-11	1.732E-04	1.564E-11
		有効質量	4.750E+00	4.460E-15	2.370E+00	1.282E-17	1.186E-04	9.679E-19
		有効質量比	2.484E-04	1.817E-19	9.949E-05	1.108E-17	1.367E-04	3.385E-20
7	28.63	刺激係数	1.406E-09	4.644E-02	3.273E-10	-1.254E-03	5.692E-11	3.764E-03
		有効質量	7.529E-15	8.217E+00	4.082E-16	5.992E-03	1.235E-17	5.399E-02
		有効質量比	3.937E-19	3.347E-04	1.713E-20	5.176E-03	1.422E-17	1.888E-03
8	31.01	刺激係数	1.656E-04	5.448E-09	-5.531E-05	-4.098E-10	2.603E-06	-4.077E-10
		有効質量	7.138E-05	7.727E-14	7.964E-06	4.372E-16	1.764E-08	4.327E-16
		有効質量比	3.732E-09	3.147E-18	3.343E-10	3.777E-16	2.033E-08	1.513E-17
9	31.01	刺激係数	-3.655E-08	-3.158E-04	-5.284E-09	-2.357E-07	-1.575E-09	-5.923E-05
		有効質量	3.513E-12	2.622E-04	7.343E-14	1.461E-10	6.522E-15	9.227E-06
		有効質量比	1.837E-16	1.068E-08	3.082E-18	1.263E-10	7.514E-15	3.227E-07
10	36.11	刺激係数	3.306E-01	2.495E-07	-1.497E-01	-1.301E-08	3.325E-03	-9.519E-09
		有効質量	2.934E+02	1.671E-10	6.019E+01	4.545E-13	2.967E-02	2.433E-13
		有効質量比	1.534E-02	6.805E-15	2.526E-03	3.926E-13	3.418E-02	8.508E-15

表2.4-3 (続き)

11	36.16	刺激係数	-2.687E-07	3.524E-01	-5.373E-08	2.363E-03	-1.128E-08	8.080E-02
		有効質量	1.491E-10	2.566E+02	5.966E-12	1.153E-02	2.630E-13	1.349E+01
		有効質量比	7.798E-15	1.045E-02	2.504E-16	9.964E-03	3.030E-13	4.718E-01
12	39.14	刺激係数	3.229E-06	2.841E-02	2.055E-07	1.903E-03	1.546E-07	8.093E-03
		有効質量	3.015E-08	2.333E+00	1.220E-10	1.047E-02	6.910E-11	1.893E-01
		有効質量比	1.576E-12	9.502E-05	5.122E-15	9.041E-03	7.961E-11	6.622E-03
13	39.15	刺激係数	3.831E-01	5.432E-07	-5.824E-02	-4.126E-08	3.542E-03	-1.971E-07
		有効質量	3.032E+02	6.096E-10	7.007E+00	3.517E-12	2.591E-02	8.024E-11
		有効質量比	1.585E-02	2.483E-14	2.941E-04	3.038E-12	2.986E-02	2.807E-12
14	39.31	刺激係数	5.729E-01	-4.861E-08	-1.703E-01	-1.737E-09	4.963E-03	8.173E-08
		有効質量	1.220E+03	8.784E-12	1.078E+02	1.122E-14	9.160E-02	2.484E-11
		有効質量比	6.381E-02	3.578E-16	4.525E-03	9.693E-15	1.055E-01	8.687E-13
15	40.34	刺激係数	-1.191E-06	-1.825E-01	-4.387E-07	-5.272E-03	-4.473E-08	-4.728E-02
		有効質量	6.742E-09	1.584E+02	9.155E-10	1.322E-01	9.517E-12	1.063E+01
		有効質量比	3.525E-13	6.453E-03	3.842E-14	1.142E-01	1.096E-11	3.719E-01
16	43.75	刺激係数	5.832E-03	5.554E-06	-1.721E+00	-3.662E-07	-1.798E-03	1.130E-07
		有効質量	2.617E-01	2.373E-07	2.280E+04	1.032E-09	2.486E-02	9.824E-11
		有効質量比	1.368E-05	9.667E-12	9.568E-01	8.912E-10	2.864E-02	3.436E-12
17	45.62	刺激係数	2.059E-01	-4.785E-06	5.569E-01	3.259E-07	1.592E-03	3.944E-06
		有効質量	1.060E+02	5.724E-08	7.754E+02	2.654E-10	6.337E-03	3.889E-08
		有効質量比	5.542E-03	2.331E-12	3.254E-02	2.293E-10	7.301E-03	1.360E-09
18	46.70	刺激係数	6.423E-05	1.169E-01	-2.701E-06	2.169E-03	3.249E-06	2.779E-02
		有効質量	1.246E-05	4.124E+01	2.202E-08	1.420E-02	3.186E-08	2.332E+00
		有効質量比	6.513E-10	1.680E-03	9.243E-13	1.227E-02	3.670E-08	8.158E-02
19	48.29	刺激係数	1.339E-01	6.572E-05	1.590E-01	-3.174E-06	7.139E-04	6.288E-06
		有効質量	5.357E+01	1.290E-05	7.550E+01	3.008E-08	1.522E-03	1.181E-07
		有効質量比	2.801E-03	5.253E-10	3.169E-03	2.599E-08	1.753E-03	4.130E-09
20	49.55	刺激係数	-1.130E-04	3.193E-01	-2.035E-05	2.790E-04	-5.242E-06	1.006E-02
		有効質量	2.661E-05	2.125E+02	8.633E-07	1.623E-04	5.730E-08	2.108E-01
		有効質量比	1.391E-09	8.657E-03	3.624E-11	1.402E-04	6.601E-08	7.374E-03
		全有効質量	1.913E+04	2.455E+04	2.383E+04	1.158E+00	8.680E-01	2.859E+01
			kg	kg	kg	kg.mm	kg.mm	kg.mm

表 2.4-4 静解析による変位と反力の比較

位置 ↓	ケース→ 項目 ↓	B2 Y部PIPE3 Yテ一パ有	B2A 全てPIPE2 Yテ一パ無	B2B 全てPIPE2 せん断考慮	B2C SBEAM2 せん断考慮	S2 QFLA4S Yテ一パ有	S2A QFLA4S Yテ一パ無
外筒上端	Rx(N)	-6.140E+04	-6.142E+04	-5.048E+04	-5.048E+04	-4.899E+04	-4.903E+04
	Rz(N)	6.780E+02	6.727E+02	1.933E+03	1.933E+03	4.497E+03	4.487E+03
	My(Nmm)	3.140E+08	3.141E+08	2.678E+08	2.678E+08	2.639E+08	2.639E+08
外筒 Yノズル	Ux(mm)	9.307E-01	9.307E-01	9.339E-01	9.339E-01	9.297E-01	9.296E-01
	Uz(mm)	-3.161E-04	-3.136E-04	-9.013E-04	-9.013E-04	-2.214E-03	-2.210E-03
	θ y(rad)	-2.215E-04	-2.214E-04	-1.978E-04	-1.978E-04	-1.997E-04	-1.996E-04
強制変位 Yピース 付け根	Ux(mm)	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
	Uz(mm)	-3.265E-04	-3.239E-04	-9.309E-04	-9.309E-04	-2.614E-03	-2.587E-03
	θ y(rad)	-2.185E-04	-2.185E-04	-1.959E-04	-1.959E-04	-1.898E-04	-1.901E-04
内筒 Yノズル	Rx(N)	5.332E+04	5.333E+04	4.537E+04	4.537E+04	4.493E+04	4.494E+04
	Ux(mm)	9.728E-01	9.728E-01	9.758E-01	9.758E-01	9.771E-01	9.771E-01
	Uz(mm)	-3.319E-04	-3.291E-04	-9.457E-04	-9.456E-04	-2.762E-03	-2.732E-03
エルボ 下端	θ y(rad)	-2.160E-04	-2.161E-04	-1.943E-04	-1.943E-04	-1.838E-04	-1.840E-04
	Ux(mm)	3.614E-02	3.608E-02	5.235E-02	5.235E-02	7.689E-02	7.675E-02
	Uz(mm)	-7.525E-04	-7.463E-04	-2.145E-03	-2.145E-03	-8.442E-03	-8.406E-03
エルボ 右端	θ y(rad)	-1.018E-04	-1.018E-04	-1.145E-04	-1.145E-04	-1.141E-04	-1.139E-04
	Ux(mm)	-2.406E-03	-2.410E-03	-1.523E-03	-1.524E-03	3.277E-03	3.262E-03
	Uz(mm)	5.479E-03	5.458E-03	1.268E-02	1.268E-02	3.262E-02	3.259E-02
内筒 IHXノズ ル	θ y(rad)	3.004E-06	2.994E-06	4.722E-06	4.721E-06	1.346E-05	1.345E-05
	Rx(N)	8.072E+03	8.083E+03	5.110E+03	5.110E+03	4.064E+03	4.096E+03
	Rz(N)	-6.780E+02	-6.727E+02	-1.933E+03	-1.933E+03	-4.497E+03	-4.486E+03
	My(Nmm)	-3.032E+06	-3.018E+06	-6.111E+06	-6.111E+06	-1.490E+07	-1.488E+07

エルボPIPE2