

PNC TN 941 85-172

FINAS : RM003

社内一般

本資料は1998年3月26日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

FINAS

汎用非線形構造解析システム解析例題書

FINITE ELEMENT NONLINEAR STRUCTURAL ANALYSIS SYSTEM

EXAMPLE MANUAL

昭和61年3月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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)



社 内 一 般
PNC TN941 85-172
FINAS : RM003
1 9 8 6 年 3 月

FINAS 汎用非線形構造解析システム解析例題書

岩 田 耕 司* 今 津 彰* 小笠原 正 人**
千 葉 隆 久** 上 野 睦 郎*** 久 保 文 男**

要 旨

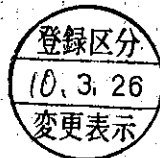
本解析例題書は、汎用非線形構造解析システム (Finite Element Nonlinear Structural Analysis System) による各種解析例を収録したものである。

解析例は基礎編と応用編に分類しており、基礎編は解析タイプごとに理論解等の参照解がある基礎的例題を、応用編はより複雑で実際的な例題を取り上げている。各例題は、初心者でも追計算が可能なように、出来る限り全入力データリストと主要結果を載せるようにした。なお、ここでの解析はすべて FINAS の Version 9.0 により実行したものである。

* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

** センチュリリサーチセンタ株式会社 構造技術部

*** 同 上 ソフトウェア技術部



OFFICIAL USE ONLY
PNC IN941 85-172
FINAS : RM003
Mar., 1986

FINAS Example Manual

K. Iwata*, A. Imazu*, M. Ogasawara**,
T. Chiba**, M. Ueno*** and F. Kubo**

Introduction

FINAS is a general purpose structural analysis computer program developed at Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation for the calculation of static, dynamic and thermal responses of elastic and inelastic structures by the finite element method.

This manual contains typical analysis examples that illustrate applications of FINAS to a number of structural engineering problems.

The first part of this manual presents fundamental examples in which numerical solutions by FINAS are compared with some analytical reference solutions, and the second part of this manual presents more complex examples intended for practical application.

All of the input data image and principal results for each problem are included in this manual for beginners convenience.

All the analyses are performed using the Version 9.0 of FINAS.

-
- * Structural Engineering Section, Systems and Components Development Division, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.
 - ** Structural Technology Division, Century Research Center Corporation.
 - *** Software Technology Division, Century Research Center Corporation.

目 次

I. 基礎編	1
1. 概要	1
2. 静的解析	4
2.1 線形解析	4
2.1.1 トラスの弾性解析	4
2.1.2 内圧を受ける有孔円板の弾性解析	10
2.1.3 肉厚方向に温度分布のある円筒の熱弾性解析	13
2.1.4 外圧を受ける浅い球殻の弾性解析	18
2.2 材料非線形解析	25
2.2.1 並列2本棒の弾塑性解析	25
2.2.2 直列2本棒の弾性クリープ解析	30
2.2.3 肉厚方向に温度分布のある円筒の熱弾塑性クリープ解析	37
2.3 幾何学的非線形解析および座屈荷重解析	44
2.3.1 2本棒トラスの線形および非線形座屈荷重解析	44
3. 動的解析	52
3.1 モーダル法	52
3.1.1 ばね質量系の固有値解析	52
3.1.2 片持ちはりのモーダル応答解析	59
3.1.3 単純支持はりの応答スペクトル解析	67
3.2 直接積分法	73
3.2.1 片持ちはりの時刻歴応答解析	73
3.2.2 初期変位のあるばね質量系の自由振動解析	80
4. 温度解析	86
4.1 定常温度解析	86
4.1.1 円筒の定常温度解析	86
4.1.2 無限板の定常温度解析	94
4.2 非定常温度解析	98
4.2.1 コールド/ホットショックを受ける円筒の非定常温度解析	98
4.2.2 2重管の非定常温度解析	106

5. ユーティリティプログラムの使用例	110
5.1 温度解析と応力解析との連結	110
5.1.1 熱過渡を受ける円筒の弾性熱応力解析	110
5.2 リスタートテープの編集	115
5.2.1 熱弾塑性クリープ解析におけるリスタートテープの編集と リスタートテープからの出力	115
参考文献	119
II. 応用編	121
1. 概要	121
2. 静的解析	123
2.1 線形解析	123
2.1.1 パイプ結合部の弾性解析	123
2.1.2 面内曲げモーメントを受ける直管付きエルボの弾性解析	131
2.1.3 多種の荷重を受ける配管の弾性解析	141
2.2 材料非線形解析	148
2.2.1 円筒の熱ラッチェット解析	148
2.2.2 面内荷重を受ける多孔板の弾塑性解析	156
2.2.3 はりの弾塑性クリープ解析	166
2.3 幾何学的非線形解析および座屈荷重解析	180
2.3.1 球殻の弾性大変形解析	180
2.4 破壊力学解析	184
2.4.1 3点曲げ試験片の弾性破壊力学解析	184
3. 動的解析	192
3.1 モーダル法	192
3.1.1 クーリングタワーの固有値解析	192
3.1.2 3次元骨組構造の応答スペクトル解析	199
参考文献	205

I. 基礎編

1. 概 要

FINASが現在備えている解析機能は主として静的解析，動的解析，熱伝導解析の3つの解析機能であり，基礎編ではこれらの解析タイプごとの基本的データ構成と解析結果を出力するデータを示すことを目的としている。解析する問題は構造も負荷も単純であり，多くのものはFINASの解と理論解との比較が行なわれる。理論解の求解が困難な場合には，他の汎用プログラムによる参照解が併記される。

静的解析の例を第2章，動的解析の例を第3章，そして熱伝導解析の例を第4章でそれぞれ述べ，最後に第5章でユーティリティプログラムの利用例を示す。これらの例題の要約を表1-1～表1-4に示す。

表1-1 静的解析例題の要約

節番号	タイトル	解析の種類							使用要素		主な機能項目
		線形		材料非線形		幾何学的非線形		熱	分類	名称	
		弾性	多荷重処理	弾塑性	クリープ	大変形	線形座屈					非線形座屈
2.1.1	トラスの弾性解析	○							棒	ROD 2	節点集中荷重
2.1.2	内圧を受ける有孔円板の弾性解析	○							平面応力	QMEM 4	分布荷重, 円筒座標系
2.1.3	肉厚方向に温度分布のある円筒の熱弾性解析	○						○	軸対称	QAX 4	熱荷重, ファスニング (フォーマット F1)
2.1.4	外圧を受ける浅い球殻の弾性解析	○							シェル	QFLA4R	球座標系, 4節点要素の三角形化
2.2.1	並列2本棒の弾塑性解析			○					棒	ROD 2	2種類の材料タイプ, 等方硬化則
2.2.2	直列2本棒の弾性クリープ解析	○			○				棒	ROD 2	材料データライブラリ (EPLAST LIB), 組み込みクリープ式 (ノートン型), ひずみ硬化則, 規定変位
2.2.3	肉厚方向に温度分布のある円筒の熱弾塑性クリープ解析			○	○			○	軸対称	QAX4	リスタート, 材料データライブラリ (EPLAST LIB, CREEP LIB), 材料温度依存, ファスニング (フォーマット F2), 自動クリープ時間増分
2.3.1	2本棒トラスの線形および非線形座屈荷重解析	○				○	○	○	棒	ROD	座屈荷重

表1-2 動的解析例題の要約

節番号	タイトル	解析の種類					使用要素		主な機能項目
		モーダル法			直接積分法		分類	名称	
		固有値	モーダル応答	スペクトル応答	線形	非線形			
3.1.1	ばね質量系の固有値解析	○					結合	LCOMB 2	固有値, 付加質量
3.1.2	片持ちはりのモーダル応答解析		○				はり	SBEAM 2	モーダル減衰
3.1.3	単純支持はりの応答スペクトル解析			○			はり	SBEAM 2	変位スペクトル
3.2.1	片持ちはりの時刻歴応答解析				○		はり	SBEAM 2	比例減衰
3.2.2	初期変位のあるばね質量系の自由振動解析				○		結合	LCOMB 2	静的解析からのリスタート, 自由振動, 粘性減衰

表1-3 熱伝導解析例題の要約

節番号	タイトル	解析の種類				使用要素		主な機能項目
		定常		非定常		分類	名称	
		線形	非線形	線形	非線形			
4.1.1	円筒の定常温度解析	○				軸対称	HQAX 4 FLAX 2	熱伝達境界, 熱流束
4.1.2	無限板の定常温度解析		○			平板	HQMEM 8	材料温度依存, 規定温度
4.2.1	コールド/ホットショックを受ける円筒の非定常温度解析		○		○	軸対称	HQAX 4 FLAX 2	定常と非定常の連結, 材料および熱伝達境界の温度依存
4.2.2	2重管の非定常温度解析			○		軸対称	HQAX 4 FLAX 2 CALINK 4	熱伝達リンク要素

表1-4 ユーティリティプログラム使用例題の要約

節番号	タイトル	FNSEDIT		主な機能項目
		インタフェース	リスタートテープの編集	
5.1.1	熱過渡を受ける円筒の弾性熱応力解析	○		熱応力解析するステップの選択
5.2.1	熱弾塑性クリープ解析におけるリスタートテープの編集とリスタートテープからの出力		○	2本のリスタートテープの編集, 編集後のリスタートテープからの出力

2. 静的解析

2.1 線形解析

2.1.1 トラスの弾性解析

(1) 問題

図 2.1.1-1 に示すように長さ 10 m, 断面積 12 cm^2 の部材からなるトラスに集中荷重が作用する場合について弾性解析を行なう。¹⁾ 弾性係数は $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とする。

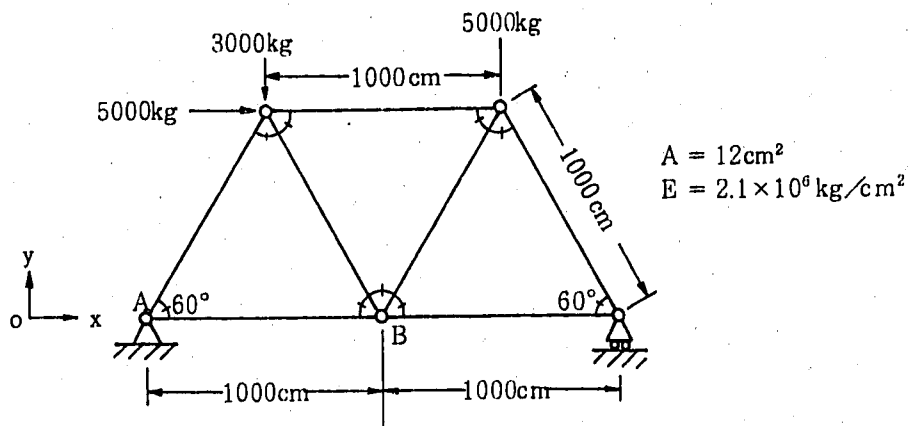


図 2.1.1-1 トラス構造

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元棒要素 ROD2 を用いて図 2.1.1-2 のように有限要素モデルを作成する。境界条件と負荷条件はそれぞれ表 2.1.1-1 と表 2.1.1-2 に示す。

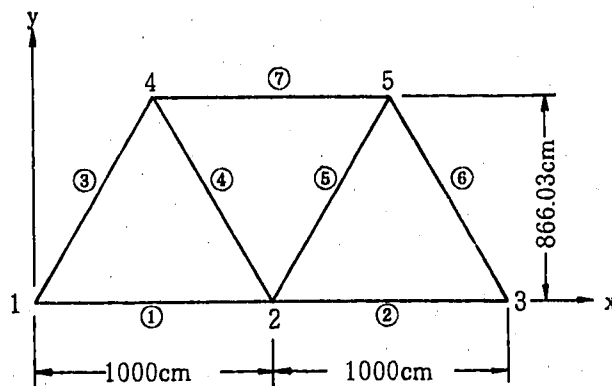


図 2.1.1-2 有限要素モデル

表 2.1.1-1 境界条件

節点番号	拘束自由度
1	u_x, u_y, u_z
3	u_y, u_z
2, 4 ~ 7	u_z

表 2.1.1-2 負荷条件

節点番号	負 荷
2	$P_y = -10000 \text{ kg}$
4	$P_x = 5000 \text{ kg}$ $P_y = -3000 \text{ kg}$
5	$P_y = -5000 \text{ kg}$

(3) 解析結果

反力と各部材における応力を表 2.1.1-3 と表 2.1.1-4 にそれぞれ示す。

表 2.1.1-3 反 力

節点	成分	反 力 [kg]	
		FINAS の解	理 論 解
A	R_x	$-4.99999 \text{ E}+03$	-5000
	R_y	$6.33492 \text{ E}+03$	6.33494×10^3
C	R_y	$1.16651 \text{ E}+04$	11.6651×10^3

表 2.1.1-4 軸方向応力

部材	軸方向応力 [kg/cm ²]	
	FINAS の解	理 論 解
AB	$7.2145 \text{ E}+02$	721.46
BC	$5.6123 \text{ E}+02$	561.24
AD	$-6.0958 \text{ E}+02$	-609.58
DB	$3.2090 \text{ E}+02$	320.90
BE	$6.4135 \text{ E}+02$	641.35
EC	$-1.1225 \text{ E}+03$	-1122.45
DE	$-8.8190 \text{ E}+02$	-881.91

(4) 入力データと解析結果のリスト

表 2.1.1-5 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	ELASTIC ANALYSIS OF A PIN JOINTED TRUSS							
4	STATIC	E							
5	MODEL								
6	NODE								
7	1			0.0		0.0			
8	2			1000.0		0.0			
9	3			2000.0		0.0			
10	4			500.0		866.03			
11	5			1500.0		866.03			
12	ELEMENT TYPE								
13	10	ROD2							
14	CONNECTION								
15	1	10	20	30	1	2			
16	2	10	20	30	2	3			
17	3	10	20	30	1	4			
18	4	10	20	30	4	2			
19	5	10	20	30	2	5			
20	6	10	20	30	5	3			
21	7	10	20	30	4	5			
22	GEOMETRY								
23	20	1	12.0						
24	MATERIAL								
25	30								
26	BOUNDARY	E		2.1E6					
27	1								
28			1			1	2		
29			3			2			
30			1	5		3			
31	FORCE								
32	2								
33			2						
34			4						
35			5						
36	HISTORY								
37	INTERVAL								
38				1					
39				BOUN					
40				FORC					
41	END MODEL			2					
42	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.1.1 - 6 解析結果のリスト

```

ANALYSIS CONTROL DATA IMAGE
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
FINAS.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
TITLE ELASTIC ANALYSIS OF A PIN JOINTED TRUSS
STATIC E
    
```

```

MODEL DATA IMAGE
1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
0- MODEL
1- NODE
2- 1 0.0 0.0
3- 2 1000.0 0.0
4- 3 2000.0 0.0
5- 4 500.0 866.03
6- 5 1500.0 866.03
7- ELEMENT TYPE
8- 10 ROD2
9- CONNECTION
10- 1 10 20 30 1 2
11- 2 10 20 30 2 3
12- 3 10 20 30 1 4
13- 4 10 20 30 4 2
14- 5 10 20 30 2 5
15- 6 10 20 30 5 3
16- 7 10 20 30 4 5
17- GEOMETRY
18- 20 1 12.0
19- MATERIAL 30
20- 30
21- BOUNDARY E 2.1E6
22- 1
23- 1 3 2
24- 3 2
25- 1 5 3
26- FORCE
27- 2
28- 2 -10000.0
29- 4 -3000.0
30- 5 5000.0 -5000.0
31- HISTORY
32- INTERVAL
33- BOUN 1
34- FORC 2
35- END MODEL
36- END FINAS
    
```

*** USER WARNING MESSAGE 4802.
UNDEFINED POISSON RATIO.

MODEL DATA DESCRIPTION

NODAL COORDINATE

NUMBER OF NODAL POINTS 5

NODE	X1	X2	X3
1	0.0	0.0	0.0
2	1000.00	0.0	0.0
3	2000.00	0.0	0.0
4	500.000	866.030	0.0
5	1500.00	866.030	0.0

MAXIMUM VALUE NODE- 3 NODE- 4 NODE- 1 NODE-

 2000.00 866.030 0.0

MINIMUM VALUE NODE- 1 NODE- 1 NODE- 1 NODE-

 0.0 0.0 0.0

ELEMENT TYPE

TYPE	NAME
10	ROD2

ELEMENT CONNECTION

NUMBER OF ELEMENTS ... 7

ELEMENT	TYPE	GEOM	MAT	NODES	
1	10	20	30	1	2
2	10	20	30	2	3
3	10	20	30	1	4
4	10	20	30	1	2
5	10	20	30	2	5
6	10	20	30	5	3
7	10	20	30	4	5

ELEMENT GEOMETRY

GEOMETRY	GEOM-1	GEOM-2
20	12.00	

MODEL DATA DESCRIPTION

MATERIAL PROPERTY

IDENTIFICATION NUMBER *** 30

E	VALUE
	0.210000E+07

BOUNDARY CONDITION

IDENTIFICATION NUMBER *** 1

NODE	DOF	COORD	DISP	NODE	DOF	COORD	DISP	NODE	DOF	COORD	DISP
1	1		0.0	1	2		0.0	3	2		0.0
1	3		0.0	2	3		0.0	3	3		0.0
4	3		0.0	5	3		0.0				

FORCE

IDENTIFICATION NUMBER *** 2

NODE	COORD	F1	F2	F3
2		0.0	-10000.0	0.0
4		5000.00	-3000.00	0.0
5		0.0	-5000.00	0.0

LOAD HISTORY

NUM	BOUNDARY FORCE	IDENT	FACTOR
1		1	1.000
		2	1.000

节点番号 POINT-ID	TOTAL DISPLACEMENT VECTOR			(STEP NUM. 1)		
	D ₁ → U _x	D ₂ → U _y	D ₃ → U _z	D ₄	D ₅	D ₆
1	0.0	0.0	0.0			
2	3.43550E-01	-1.15952E+00	0.0			
3	6.10804E-01	0.0	0.0			
4	7.32868E-01	-7.58301E-01	0.0			
5	3.12913E-01	-7.89187E-01	0.0			

POINT-ID	NODAL POINT REACTION			(STEP NUM. 1)		
	D ₁ → R _x	D ₂ → R _y	D ₃ → R _z	D ₄	D ₅	D ₆
1	-4.99999E+03	6.33492E+03	0.0			
3	0.0	1.16651E+04	0.0			

要素番号 ELM. ID-POINT	積分点番号 POINT	軸方向成分 x	TOTAL STRESS AND STRAIN			(STEP NUM. 1)	
					VON MISES 相当応力	TRESCA 応力強さ	
1 - 1		STRESS	7.2145E+02		7.2145E+02	7.2145E+02	
		STRAIN	3.4355E-04				
2 - 1		STRESS	5.6123E+02		5.6123E+02	5.6123E+02	
		STRAIN	2.6725E-04				
3 - 1		STRESS	-6.0958E+02		6.0958E+02	6.0958E+02	
		STRAIN	-2.9028E-04				
4 - 1		STRESS	3.2090E+02		3.2090E+02	3.2090E+02	
		STRAIN	1.5281E-04				
5 - 1		STRESS	6.4135E+02		6.4135E+02	6.4135E+02	
		STRAIN	3.0540E-04				
6 - 1		STRESS	-1.1225E+03		1.1225E+03	1.1225E+03	
		STRAIN	-5.3451E-04				
7 - 1		STRESS	-8.8190E+02		8.8190E+02	8.8190E+02	
		STRAIN	-4.1995E-04				

2.1.2 内圧を受ける有孔円板の弾性解析

(1) 問題

図 2.1.2-1 に示すような内半径 50mm, 外半径 200mm, 板厚 1mm の有孔円板の内側に圧力 1 kg/mm^2 が作用する場合について弾性解析を行ない, 主応力 σ_r と σ_θ を求める。²⁾ 材料定数は弾性係数 $7.0 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, ポアソン比 0.3 とする。

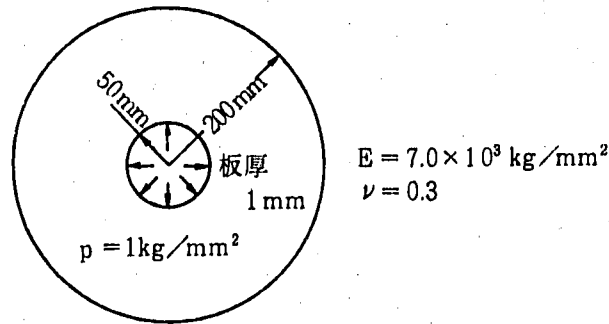


図 2.1.2-1 内圧を受ける有孔円板

(2) 有限要素モデルと解析条件

4 節点四辺形平面応力要素 QMEM 4 を用いて図 2.1.2-2 に示す有限要素モデルを作成する。境界条件は構造と負荷の対称性を考慮して全節点について周方向の自由度を拘束する。

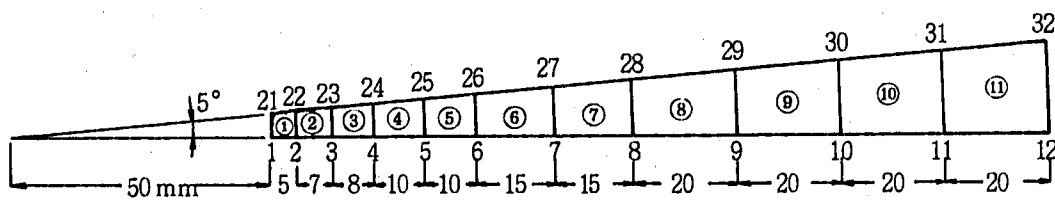


図 2.1.2-2 有限要素モデル

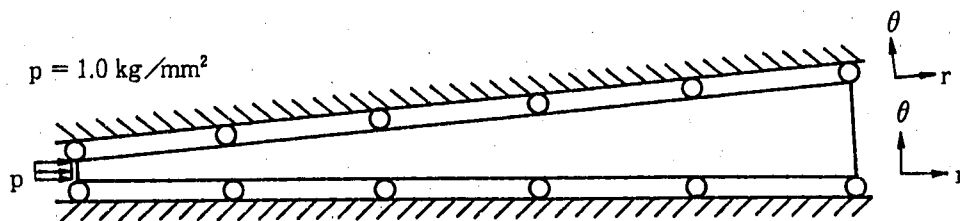


図 2.1.2-3 境界条件

(3) 理論解

内圧を受ける有孔円板の半径方向と周方向の応力は次式で与えられる。³⁾

$$\sigma_r = \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.1.2 - 1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.1.2 - 2)$$

a : 内半径, b : 外半径, r : 評価点位置

p : 内圧

(4) 解析結果

要素中心における主応力の値を表 2.1.2-1 に、ベクトル図を図 2.1.2-4 にそれぞれ示す。

表 2.1.2-1 要素中心における主応力

要素番号	σ_r [kg/mm ²]		σ_θ [kg/mm ²]	
	FINASの解	理論解	FINASの解	理論解
1	-9.0042E-01	-9.0083×10 ⁻¹	1.0317E+00	1.0342
2	-7.1239E-01	-7.1255×10 ⁻¹	8.4509E-01	8.4588×10 ⁻¹
3	-5.4546E-01	-5.4552×10 ⁻¹	6.7824E-01	6.7885×10 ⁻¹
4	-4.0741E-01	-4.0741×10 ⁻¹	5.4071E-01	5.4074×10 ⁻¹
5	-3.0244E-01	-3.0242×10 ⁻¹	4.3523E-01	4.3576×10 ⁻¹
6	-2.1389E-01	-2.1385×10 ⁻¹	3.4768E-01	3.4718×10 ⁻¹
7	-1.4402E-01	-1.4403×10 ⁻¹	2.7737E-01	2.7737×10 ⁻¹
8	-9.1097E-02	-9.1124×10 ⁻²	2.2479E-01	2.2446×10 ⁻¹
9	-5.1794E-02	-5.1852×10 ⁻²	1.8524E-01	1.8519×10 ⁻¹
10	-2.5551E-02	-2.5606×10 ⁻²	1.5887E-01	1.5894×10 ⁻¹
11	-7.1608E-03	-7.2022×10 ⁻³	1.4041E-01	1.4054×10 ⁻¹

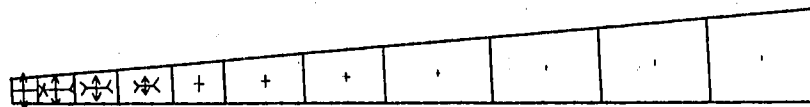


図 2.1.2-4 主応力のベクトル図

(5) 入力データ

表 2.1.2-2 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE ELASTIC ANALYSIS OF A CIRCULAR PLATE SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE								
4	STATIC E								
5	MODEL								
6	COORDINATE SYSTEM								
7	10	2	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
8	NODE PITCH								
9	20	5.0	7.0	8.0	2*10.0	2*15.0	4*20.0		
10	NODE								
11	1	10	50.0	0.0			11	20	12
12	12	10	200.0	0.0					
13	21	10	50.0	5.0			11	20	32
14	32	10	200.0	5.0					
15	ELEMENT TYPE								
16	30	QMEM4							
17	CONNECTION								
18	1	30	40	50	1	2	21	22	11
19	GEOMETRY								
20	40	1.0							
21	MATERIAL								
22	50								
23		E	7000.0						
24		NU	0.3						
25	BOUNDARY								
26	60								
27		1	12	10	2				
28		21	32	10	2				
29	FORCE								
30	70								
31	1	1	2	1.0		1.0			
32	HISTORY								
33	INTERVAL								
34		BOUN	60						
35		FORC	70						
36	END MODEL								
37	OUTPUT								
38	PRINT SELECT								
39	STRSOPT	PRINST							
40	STRUCTURE	PLOT							
41	PTITLE	FINITE ELEMENT MODEL							
42	IPLOT	BOTH							
43	PTITLE	DEFORMATION FIGURE							
44	DPLOT								
45	PTITLE	VECTOR DESCRIPTION OF THE PRINCIPAL STRESS							
46	VPLLOT	PRIN*							
47	END OUTPUT								
48	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.1.3 肉厚方向に温度分布のある円筒の熱弾性解析

(1) 問題

内半径 100mm, 肉厚 10 mm の円筒が式 (2.1.3 - 1) で与えられる肉厚方向の温度分布と, 図 2.1.3 - 1 に示す軸方向等分布荷重を受ける場合について弾性解析を行なう。材料は SUS 304 とし, 表 2.1.3 - 1 に示す物性値を用いる。

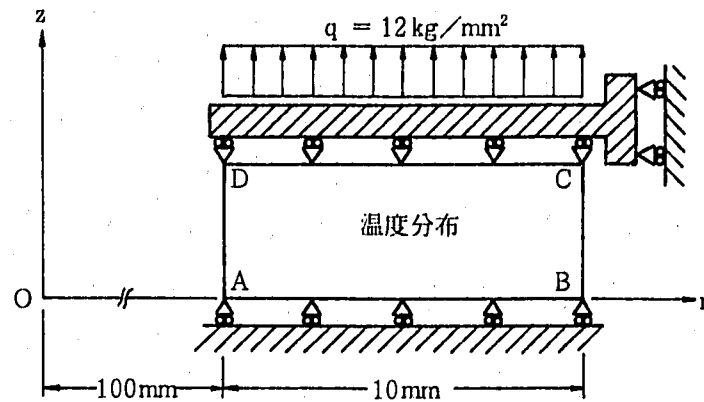


図 2.1.3 - 1 円筒

$$T = T_1 - \frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} (T_1 - T_2) \quad (2.1.3 - 1)$$

a : 内半径

b : 外半径

T₁ : 内表面温度 (500 °C)

T₂ : 外表面温度 (550 °C)

表 2.1.3 - 1 材料定数

弾性係数 E [kg/mm ²]	1.63 × 10 ⁴
ポアソン比 ν	0.3
線膨張係数 α [1/°C]	2.0 × 10 ⁻⁵

(2) 有限要素モデルと解析条件

4 節点四辺形軸対称要素 QAX 4 を用いて図 2.1.3 - 2 に示す有限要素モデルを作成する。

式(2.1.3-1)から求めた各節点温度を表2.1.3-2, 境界条件を表2.1.3-3に示す。
 なお, 参照温度は20°Cとする。

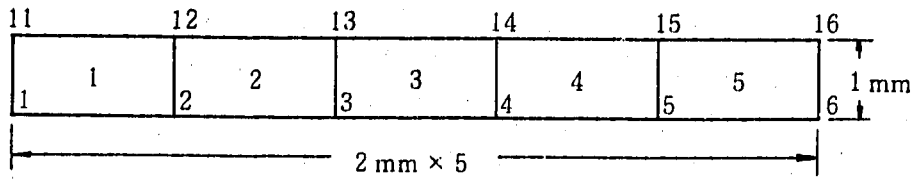


図2.1.3-2 有限要素モデル

表2.1.3-2 各節点における温度

節点番号	T [°C]	節点番号	T [°C]
1, 11	500.00	4, 14	530.57
2, 12	510.39	5, 15	540.37
3, 13	520.58	6, 16	550.00

$T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

表2.1.3-3 境界条件

節点番号	自由度
1 ~ 6	$u_z = 0$
11 ~ 16	$u_{z11} = u_{z12} = \dots = u_{z16}$

(3) 理論解

肉厚方向に式(2.1.3-1)で与えられる温度分布があり, 軸方向に等分布荷重qが負荷された場合の各応力成分の値は評価点の半径rの関数として次式で表わすことができる。³⁾

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \epsilon_z - \frac{\alpha}{r^2} \int_a^r (T - T_{ref}) r dr \right\}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu} \left\{ \epsilon_z - \alpha (T - T_{ref}) \right\} + q$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \epsilon_z + \frac{\alpha}{r^2} \int_a^r (T - T_{ref}) r dr - \alpha (T - T_{ref}) \right\}$$

ここで

$$\varepsilon_z = \alpha \left\{ \frac{T_2 b^2 - T_1 a^2}{b^2 - a^2} + \frac{T_1 - T_2}{2 \ln\left(\frac{b}{a}\right)} - T_{ref} \right\}$$

$$\int_a^r (T - T_{ref}) r dr = \frac{1}{2 \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \left[r^2 \left\{ T_1 \ln\left(\frac{b}{r}\right) + T_2 \ln\left(\frac{r}{a}\right) \right\} - T_1 a^2 \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{2} (T_1 - T_2) (r^2 - a^2) \right] - \frac{T_{ref}}{2} (r^2 - a^2)$$

T_{ref} : 基準温度

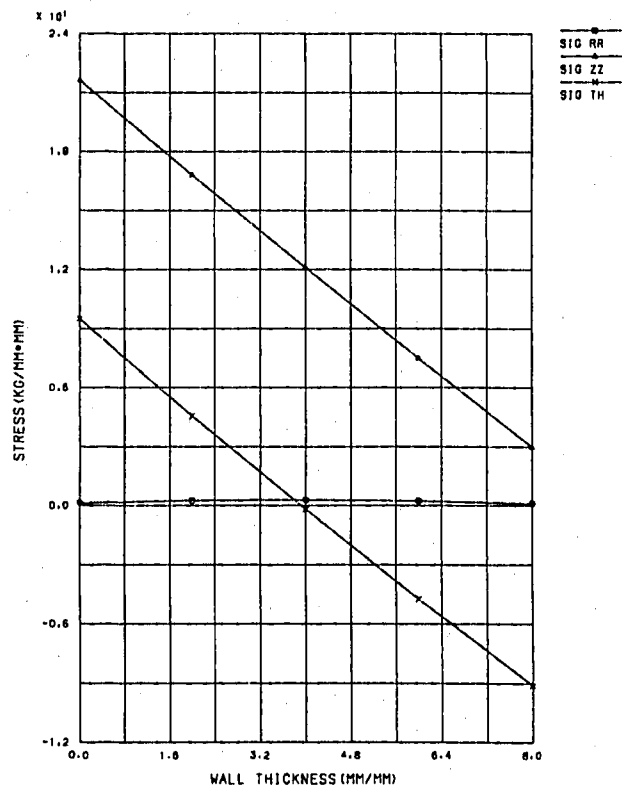
(4) 解析結果

要素 1 と 5 の要素中心における応力を表 2.1.3 - 3 に、応力の肉厚方向分布を図 2.1.3 - 3 に示す。

表 2.1.3 - 3 要素中心における応力

応力成分	要素 1		要素 5	
	FINASの解	理論解	FINASの解	理論解
σ_r [kg/mm ²]	1.2241E-01	0.10633	1.0730E-01	0.093648
σ_z [kg/mm ²]	2.1592E+01	21.582	2.9671E+00	2.9580
σ_θ [kg/mm ²]	9.4845E+00	9.4752	-9.1286E+00	-9.1356

FINAS
STEP NO. 1



STRESS DISTRIBUTIONS THROUGH THE WALL THICKNESS

図 2.2.3 - 3 肉厚内の応力分布

(5) 入力データと解析結果のリスト

表 2.1.3-4 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	THERMAL ELASTIC ANALYSIS OF A STRAIGHT PIPE							
4	STATIC	TE							
5	MODEL								
6	NODE								
7	**NLOOP1	2	10	0.0	1.0				
8	1			100.0	0.0		5		6
9	6			110.0	0.0				
10	**END1								
11	ELEMENT TYPE								
12	1	QAX4							
13	CONNECTION								
14	1	1	1	2	11	12		5	
15	MATERIAL								
16	1								
17	E		1.63E4						
18	NU		0.3						
19	ALPHA		2.0E-5						
20	BOUNDARY								
21	1								
22	FASTENING	1	6		2				
23	2								
24	F2								
25	TEMPERATURE	6	2	11	12	13	14	15	16
26	REF		20.0						
27	3								
28		1	11	10		480.00			
29		2	12	10		490.39			
30		3	13	10		500.58			
31		4	14	10		510.57			
32		5	15	10		520.37			
33		6	16	10		530.00			
34	FORCE								
35	4								
36	1	1	5		4		-1.0	-1.0	
37	HISTORY								
38	INTERVAL								
39	BOUN		1						
40	FAS		2						
41	TEMP		3						
42	FORC		4		12.0				
43	END MODEL								
44	OUTPUT								
45	PRINT SELECT								
46	NSET1	100	1	6	11	16			
47	ESET1	200	1	5					
48	ESET2	210	2	4					
49	IPSET1	300	4	5	6				
50	DISP	100							
51	REAC	100							
52	ELM	200	300		210				
53	↓								
54	STRUCTURE PLOT								
55	PTITLE	NODE NUMBER AND ELEMENT NUMBER							
56	IPLOT	BOTH							
57	↓								
58	XYPLOT								
59	PTITLE	STRESS DISTRIBUTIONS THROUGH THE WALL THICKNESS							
60	XTITLE	WALL THICKNESS(MM/MM)							
61	YTITLE	STRESS(KG/MM*MM)							
62	ELIST2	10	1	5					
63	CURVE	1				SIG RR			
64	CURVE	2				SIG ZZ			
65	CURVE	3				SIG TH			
66	PLOT2	STRS1ELIST	10				STRS2ELIST	10	
67		STRS3ELIST	10						
68	END OUTPUT								
69	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

表 2.1.3-5 解析結果のリスト (抜粋)

THERMAL ELASTIC ANALYSIS OF A STRAIGHT PIPE

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE

8

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR

(STEP NUM. 1)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	9.89357E-01	0.0				
6	1.08831E+00	0.0				
11	9.89357E-01	1.08518E-02				
16	1.08831E+00	1.08518E-02				

NODAL POINT REACTION

(STEP NUM. 1)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	-1.45586E+04				
6	0.0	-1.14873E+03				
11	0.0	6.96858E+03				
16	0.0	-7.09487E+03				

TOTAL STRESS AND STRAIN

(STEP NUM. 1)

ELM.ID-POINT		R	Z	THETA	RZ	VON MISES	TRESCA	TEMP.
1 - 4	STRESS	3.4561E+00	2.4926E+01	1.2891E+01	2.2165E-12	1.8639E+01	2.1470E+01	501.2
	E. STRAIN	-4.8399E-04	1.2283E-03	2.6846E-04	3.5356E-16			
	T. STRAIN	9.6234E-03	9.6234E-03	9.6234E-03	0.0			
	STRAIN	9.1394E-03	1.0852E-02	9.8919E-03	3.5356E-16			
1 - 5	STRESS	1.2241E-01	2.1592E+01	9.4845E+00	2.4813E-12	1.8644E+01	2.1470E+01	505.2
	E. STRAIN	-5.6446E-04	1.1479E-03	1.8221E-04	3.9579E-16			
	T. STRAIN	9.7039E-03	9.7039E-03	9.7039E-03	0.0			
	STRAIN	9.1394E-03	1.0852E-02	9.8061E-03	3.9579E-16			
1 - 6	STRESS	-3.2106E+00	1.8259E+01	6.0802E+00	2.8256E-12	1.8649E+01	2.1470E+01	509.2
	E. STRAIN	-6.4494E-04	1.0674E-03	9.6049E-05	4.5070E-16			
	T. STRAIN	9.7844E-03	9.7844E-03	9.7844E-03	0.0			
	STRAIN	9.1394E-03	1.0852E-02	9.8804E-03	4.5070E-16			
2 - 5	STRESS	2.5532E-01	1.6800E+01	4.5578E+00	2.7936E-12	1.4868E+01	1.6544E+01	515.5
	E. STRAIN	-3.7742E-04	9.4207E-04	-3.4276E-05	4.4561E-16			
	T. STRAIN	9.9097E-03	9.9097E-03	9.9097E-03	0.0			
	STRAIN	9.5323E-03	1.0852E-02	9.8754E-03	4.4561E-16			
3 - 5	STRESS	2.9156E-01	1.2100E+01	-1.7829E-01	2.7936E-12	1.2051E+01	1.2279E+01	525.6
	E. STRAIN	-2.0154E-04	7.4027E-04	-2.3901E-04	4.4561E-16			
	T. STRAIN	1.0111E-02	1.0111E-02	1.0111E-02	0.0			
	STRAIN	9.9100E-03	1.0852E-02	9.8725E-03	4.4561E-16			

弾性ひずみ

全ひずみ

熱ひずみ

THERMAL ELASTIC ANALYSIS OF A STRAIGHT PIPE

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE

9

TOTAL STRESS AND STRAIN

(STEP NUM. 1)

ELM.ID-POINT		R	Z	THETA	RZ	VON MISES	TRESCA	TEMP.
4 - 5	STRESS	2.3961E-01	7.4919E+00	-4.7354E+00	2.0976E-12	1.0650E+01	1.2227E+01	535.5
	E. STRAIN	-3.6035E-05	5.4237E-04	-4.3281E-04	3.3458E-16			
	T. STRAIN	1.0309E-02	1.0309E-02	1.0309E-02	0.0			
	STRAIN	1.0273E-02	1.0852E-02	9.8766E-03	3.3458E-16			
5 - 4	STRESS	3.0975E+00	5.9573E+00	-6.2045E+00	2.7389E-12	1.1014E+01	1.2162E+01	541.5
	E. STRAIN	1.9458E-04	4.2266E-04	-5.4730E-04	4.3688E-16			
	T. STRAIN	1.0429E-02	1.0429E-02	1.0429E-02	0.0			
	STRAIN	1.0624E-02	1.0852E-02	9.8818E-03	4.3688E-16			
5 - 5	STRESS	1.0730E-01	2.9671E+00	-9.1286E+00	4.0450E-12	1.0950E+01	1.2096E+01	545.2
	E. STRAIN	1.1998E-04	3.4807E-04	-6.1662E-04	6.4521E-16			
	T. STRAIN	1.0504E-02	1.0504E-02	1.0504E-02	0.0			
	STRAIN	1.0624E-02	1.0852E-02	9.8871E-03	6.4521E-16			
5 - 6	STRESS	-2.8836E+00	-2.3750E-02	-1.2054E+01	5.6970E-12	1.0886E+01	1.2031E+01	548.9
	E. STRAIN	4.5389E-05	2.7347E-04	-6.8002E-04	9.0872E-16			
	T. STRAIN	1.0578E-02	1.0578E-02	1.0578E-02	0.0			
	STRAIN	1.0624E-02	1.0852E-02	9.8923E-03	9.0872E-16			

2.1.4 外圧を受ける浅い球殻の弾性解析

(1) 問題

半径 90 mm, 厚さ 3 mm, 開き角 35° の浅い球殻に 1.0 kg/mm^2 の外圧が作用する場合の弾性解析を行なう。⁴⁾ 解析する領域は構造と負荷の対称性を考慮して球殻の $1/8$ の部分とし, 材料定数は弾性係数 1.0 kg/mm^2 , ポアソン比 $1/6$ とする。

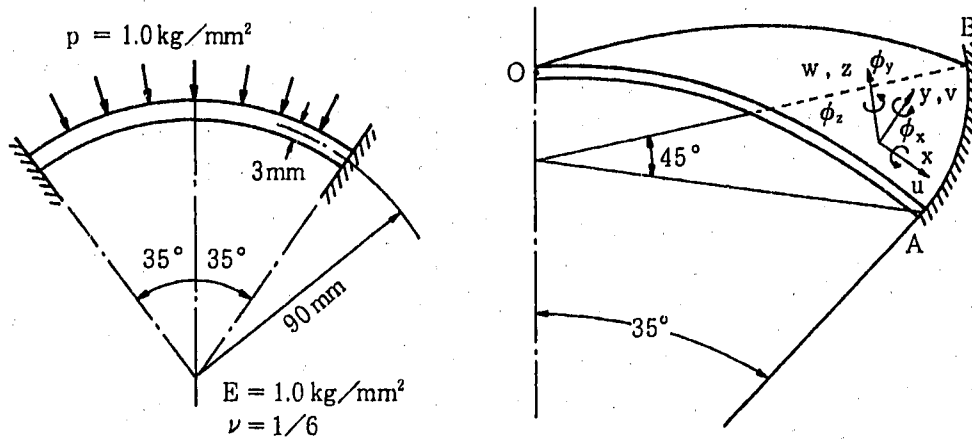
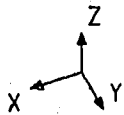
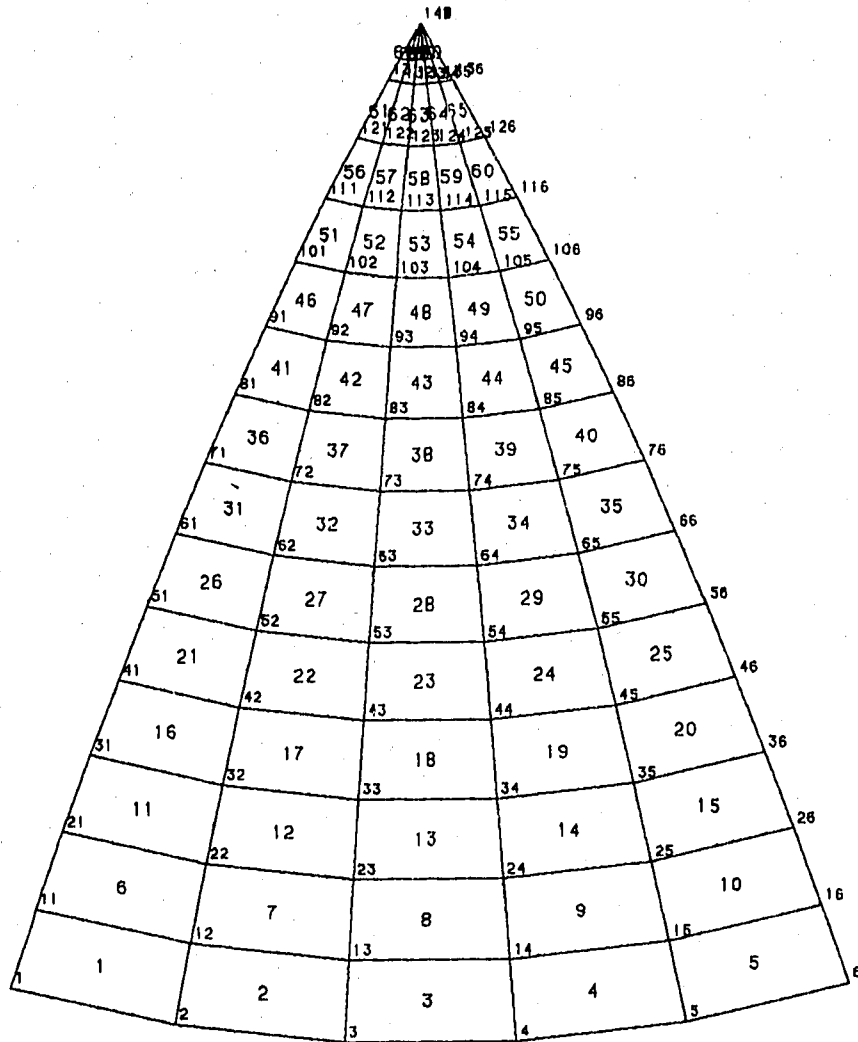


図 2.1.4-1 外圧を受ける浅い球殻

(2) 有限要素モデルと解析条件

4 節点四辺形平板シェル低減積分要素 QFLA 4 R を用いて図 2.1.4-2 に示す有限要素を作成する。要素分割は図 2.1.4-1 の AB に沿い 5 等分, OA (OB) に沿い 14 等分を行なっている。境界条件は AB に沿い固定条件, OA および OB に沿い対称条件, 点 O に極点の条件を与える。境界に沿う節点の拘束自由度を表 2.1.4-1 に示す。また, 図 2.1.4-2 の有限要素モデルでは点 O に対応する節点が複数個あるため, これらの節点が同一の挙動を示すためのファスニング関係も併せて表 2.1.4-1 に示す。

FINAS



GEOM. SCALE [] 8.00000

FINITE ELEMENT MODEL

図 2.1.4-2 有限要素モデル

表 2.1.4 - 1 境界条件

節点番号	境界条件	備考
1 ~ 6	$u = v = w = 0$ $\phi_x = \phi_y = 0$	固定条件
11, 21, 31, ..., 131 16, 26, 36, ..., 136	$v = \phi_x = \phi_y = 0$	対称条件
141 ~ 146	$u = v = 0$ $\phi_x = \phi_y = \phi_z = 0$	極点条件
	$v_{141} = w_{142} = \dots = w_{146}$	ファスニング

(3) 解析結果

子午線方向曲げモーメント分布と周方向面内力分布を FINAS の解と理論解⁵⁾とを比較して図 2.1.4 - 3 と図 2.1.4 - 4 に示す。また、変形図、周方向応力の等高線図、主応力のベクトル図、子午線方向応力の分布図を図 2.1.4 - 5 ~ 図 2.1.4 - 8 にそれぞれ示す。

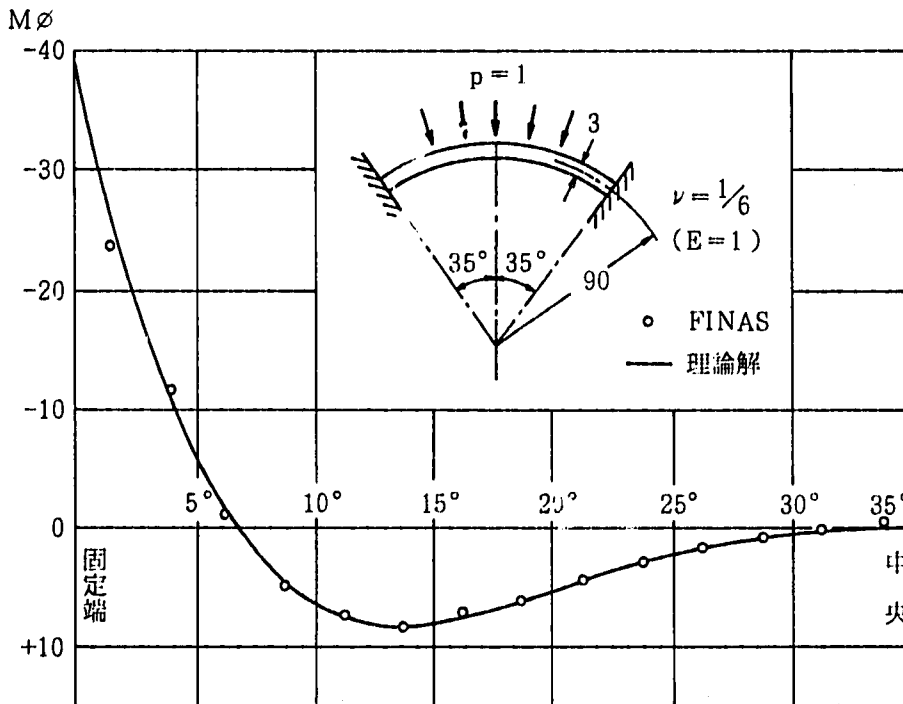


図 2.1.4 - 3 子午線方向曲げモーメント

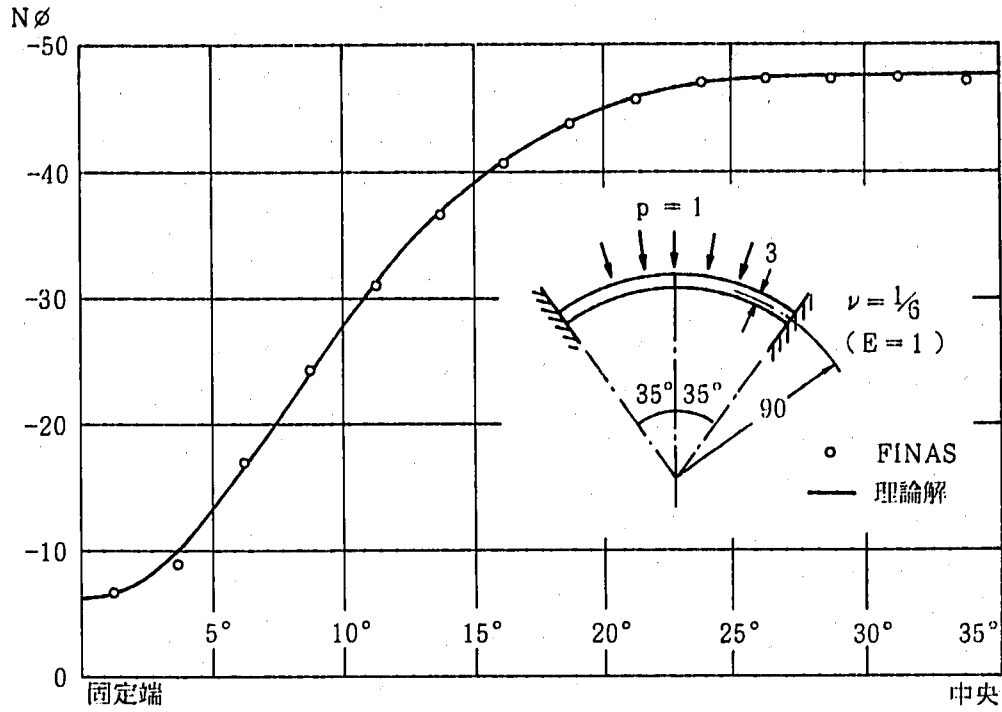


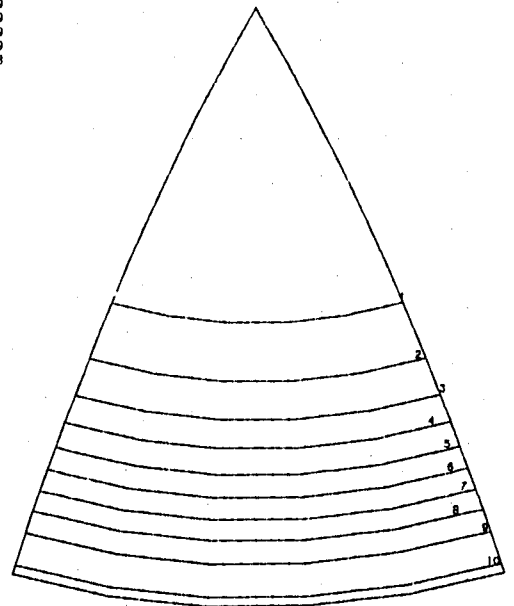
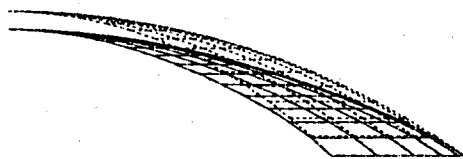
图 2.1.4 - 4 周方向面内力

FINAS
DEFORMED SHAPE

FINAS
STRESS COMPONENT 1

CONTOUR VALUES

1	-15.7000
2	-13.9000
3	-12.1000
4	-10.3000
5	-8.49999
6	-6.69999
7	-4.89999
8	-3.09999
9	-1.29999
10	0.500008



STEP NO. 1

DISP. SCALE 10000.0
GEOM. SCALE 10.0000

DEFORMED SHAPE

图 2.1.4 - 5 变形图



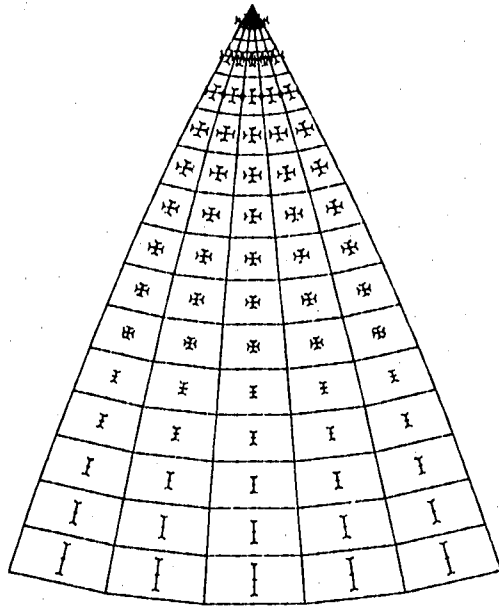
STEP NO. 1

GEOM. SCALE 8.00000

CIRCUMFERENTIAL STRESS CONTOUR LINES ON THE UPPER SURFACE

图 2.1.4 - 6 上面における周方向応力

FINAS
PRINCIPAL STRESSES (BOTTOM)



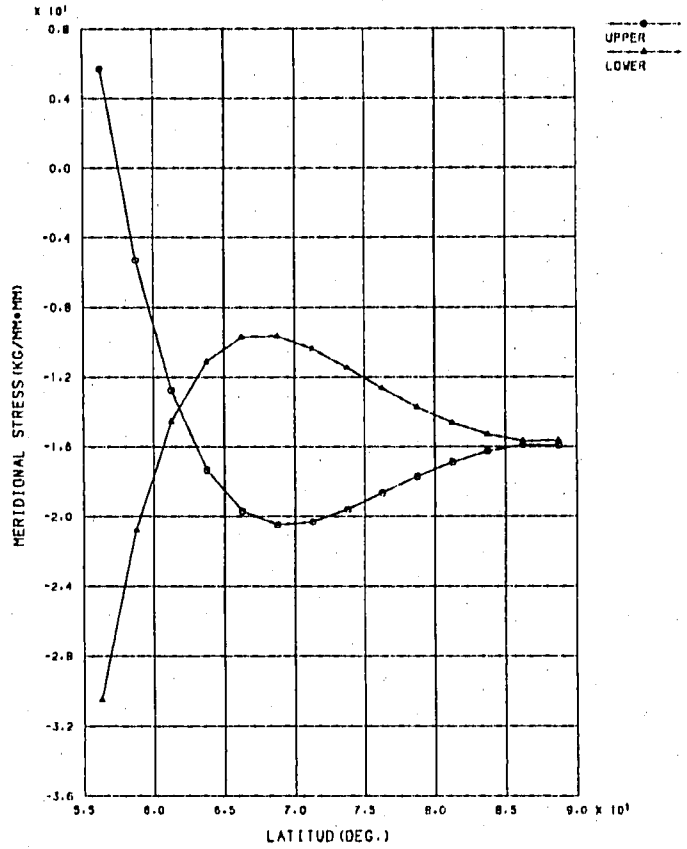
STEP NO. 1

VECT. SCALE 100.000
GEOM. SCALE 8.00000

VECTOR DESCRIPTION OF THE PRINCIPAL STRESS ON THE LOWER SURFACE

図 2.1.4-7 下面における主応力

FINAS
STEP NO. 1



MERIDIONAL STRESS DISTRIBUTION ALONG THE MERIDIONAL LINE

図 2.1.4-8 子午線方向応力の子午線に沿う分布

(4) 入力データ

表 2.1.4-2 入力データイメージ

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	FINAS ELASTIC ANALYSIS OF SPHERICAL SHELL								
3	TITLE E								
4	STATIC								
5	MODEL								
6	COORDINATE SYSTEM								
7	10	3	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	
8	NODE								
9	**NLOOP1	15	10	0.0	0.0	2.5			
10	1	10	90.0	45.0	55.0		5	1	
11	6	10	90.0	90.0	55.0			6	
12	**END1								
13	ELEMENT TYPE								
14	1	QFLA4R							
15	CONNECTION								
16	1	1	1	2	11	12	5	1	
17	GEOMETRY								
18	1	5	3.0						0.83333333
19	MATERIAL								
20	1								
21	E								
22	NU	1.0							
23	BOUNDARY								
24	1	0.16666667							
25	1	6	1	10	1	6			
26	11	131	10	10	2				
27	11	131	10	10	4				
28	11	131	10	10	6				
29	16	136	10	10	2				
30	16	136	10	10	4				
31	16	136	10	10	6				
32	141	146	1	10	2	6			
33	FASTENING								
34	1								
35	F1	5	141	1	0	142	1	1	
36	FORCE								
37	1								
38	3	1	70	1	1	4	1.0	1.0	
39	HISTORY								
40	INTERVAL								
41	1								
42	BOUN	1	1.0						
43	FORC	1	1.0						
44	END MODEL								
45	OUTPUT								
46	NSET2	10	1	141	10	6	146	10	
47	NSET2	20	1	6	141	146			
48	ESET2	10	3	68	5				
49	PRINT SELECT								
50	DISP	10							
51	REAC	20							
52	ELM	10							
53	STRSOPT	PRINST							
54	* STRUCTURE PLOT								
55	VIEW	0.0	0.0	0.0					
56	PTITLE DEFORMED SHAPE								
57	DPLLOT								
58	VIEW	0.0	45.0	-67.5					
59	PTITLE FINITE ELEMENT MODEL								
60	IPLOT BOTH								
61	PTITLE CIRCUMFERENTIAL STRESS CONTOUR LINES ON THE UPPER SURFACE								
62	CPLLOT	STRS1 TOP LCL							
63	PTITLE CIRCUMFERENTIAL STRESS CONTOUR LINES ON THE LOWER FACE								
64	CPLLOT	STRS1 BOT LCL							
65	PTITLE MERIDIONAL STRESS CONTOUR LINES ON THE UPPER SURFACE								
66	CPLLOT	STRS2 TOP LCL							
67	PTITLE MERIDIONAL STRESS CONTOUR LINES ON THE LOWER SURFACE								
68	CPLLOT	STRS2 BOT LCL							
69	PTITLE VECTOR DESCRIPTION OF THE PRINCIPAL STRESS ON THE UPPER SURFACE								
70	VPLLOT	PRIN* TOP							
71	PTITLE VECTOR DESCRIPTION OF THE PRINCIPAL STRESS ON THE LOWER SURFACE								
72	VPLLOT	PRIN* BOT							
73	* XYPLOT								
74	XVALU								
75	10	56.25	58.75	61.25	63.75	66.25	68.75		
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	0	71.25	73.75	76.25	78.75	81.25	83.75	0
77			86.25	88.75					
78	ILIST	10	3	68	5	45			
79	ILIST	20	3	68	5	5			
80	XRANGE		55.0	90.0					
81	XDIVISION	7	0						
82	YDIVISION		0						
83	PTITLE	CIRCUMFERENTIAL STRESS DISTRIBUTION ALONG THE MERIDIONAL LINE							
84	XTITLE	LATITUD(DEG.)							
85	YTITLE	CIRCUMFERENTIAL STRESS(KG/MM*MM)							
86	CURVE	1	UPPER						
87	CURVE	2	LOWER						
88	PLOT2	STRS1ILIST	10	XVALU	10	STRS1ILIST	20	XVALU	10
89	PTITLE	MERIDIONAL STRESS DISTRIBUTION ALONG THE MERIDIONAL LINE							
90	YTITLE	MERIDIONAL STRESS(KG/MM*MM)							
91	PLOT2	STRS2ILIST	10	XVALU	10	STRS2ILIST	20	XVALU	10
92	END OUTPUT								
93	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2 材料非線形解析

2.2.1 並列2本棒の弾塑性解析

(1) 問題

断面積 150 mm^2 の SUS 304 製の棒と断面積 100 mm^2 の SUS 316 製の棒を図 2.2.1-1 に示すように並列に結合し、 4000 kg の引張荷重を負荷する場合について弾塑性解析を行なう。棒の長さは2本とも 100 mm であり、2本の棒の中心間隔は 20 mm とする。構造の温度は 550°C とし、その温度における材料定数を表 2.2.1-1 に示す。

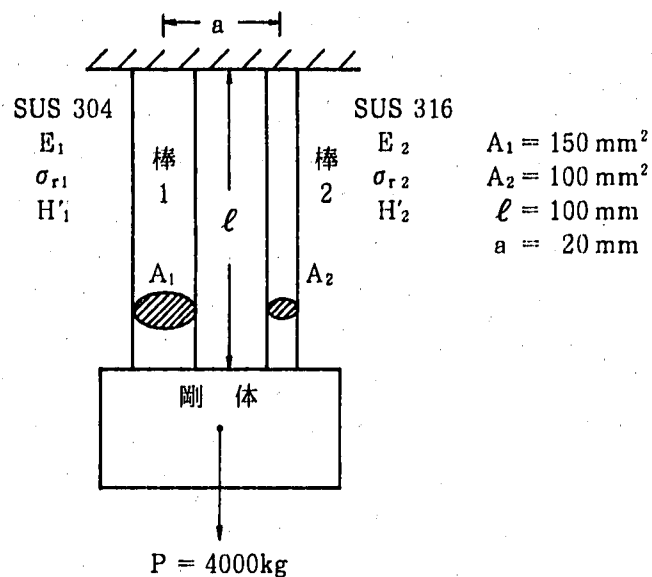


図 2.2.1-1 並列に結合した2本棒

表 2.2.1-1 材料定数

	棒 1 (SUS 304)	棒 2 (SUS 316)
弾性係数 E [kg/mm ²]	1.57×10^4	1.57×10^4
降伏応力 σ_r [kg/mm ²]	13.1	14.0
加工硬化係数 H' [kg/mm ²]	445	407

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元棒要素 ROD 2 を用いて図 2.2.1-2 に示す有限要素モデルを作成する。荷重は最初に 3000 kg を負荷し、次に 100 kg の増分を 10 回行なう。境界条件は表 2.2.1-2 に示すものとし、塑性硬化則は等方硬化則を用いる。

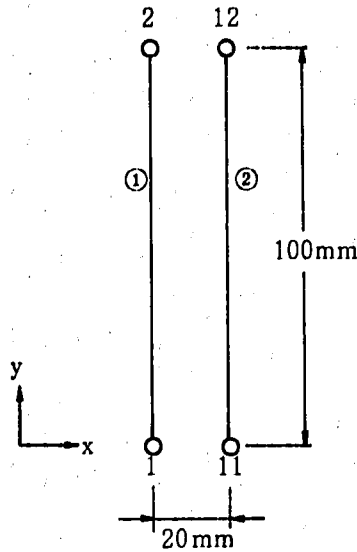


図 2.2.1-2 有限要素モデル

表 2.2.1-2 境界条件

節点番号	境界条件
1, 11	$u_x = u_z = 0$ $u_{y1} = u_{y11}$
2, 12	$u_x = u_y = u_z = 0$

(3) 理論解

2本棒が共に降伏した場合の応力とひずみはそれぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_1 = \frac{\frac{E_1}{E_1 + H'_1}}{\frac{A_1 E_1 H'_1}{E_1 + H'_1} + \frac{A_2 E_2 H'_2}{E_2 + H'_2}} \left\{ PH'_1 + \frac{A_2 E_2}{E_2 + H'_2} (H'_2 \sigma_{y1} - H'_1 \sigma_{y2}) \right\} \quad (2.2.1-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{\frac{E_2}{E_2 + H'_2}}{\frac{A_1 E_1 H'_1}{E_1 + H'_1} + \frac{A_2 E_2 H'_2}{E_2 + H'_2}} \left\{ PH'_2 + \frac{A_1 E_1}{E_1 + H'_1} (H'_1 \sigma_{y2} - H'_2 \sigma_{y1}) \right\} \quad (2.2.1-2)$$

$$\epsilon_1^{eP} = \epsilon_2^{eP} = \frac{1}{\frac{A_1 E_1 H'_1}{E_1 + H'_1} + \frac{A_2 E_2 H'_2}{E_2 + H'_2}} \left\{ P - \left(\frac{A_1 E_1 \sigma_{y1}}{E_1 + H'_1} + \frac{A_2 E_2 \sigma_{y2}}{E_2 + H'_2} \right) \right\} \quad (2.2.1-3)$$

$$\epsilon_1^P = \epsilon_1^{eP} - \frac{\sigma_1}{E_1}, \quad \epsilon_2^P = \epsilon_2^{eP} - \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (2.2.1-4)$$

(4) 解析結果

4000 kg の荷重を负荷した時の応力とひずみの値を表 2.2.1-3 に示し、応力-ひずみ曲線を図 2.2.1-3 に示す。

表 2.2.1-3 棒1と棒2の応力とひずみ

成分	棒 1		棒 2	
	FINAS の解	理論解	FINAS の解	理論解
σ [kg/mm ²]	1.5737E+01	15.737	1.6395E+01	16.395
ϵ^{eP} [mm/mm]	6.9279E-03	6.9279×10^{-3}	6.9279E-03	6.9279×10^{-3}
ϵ^P [mm/mm]	5.9256E-03	5.9256×10^{-3}	5.8837E-03	5.8837×10^{-3}

FINAS

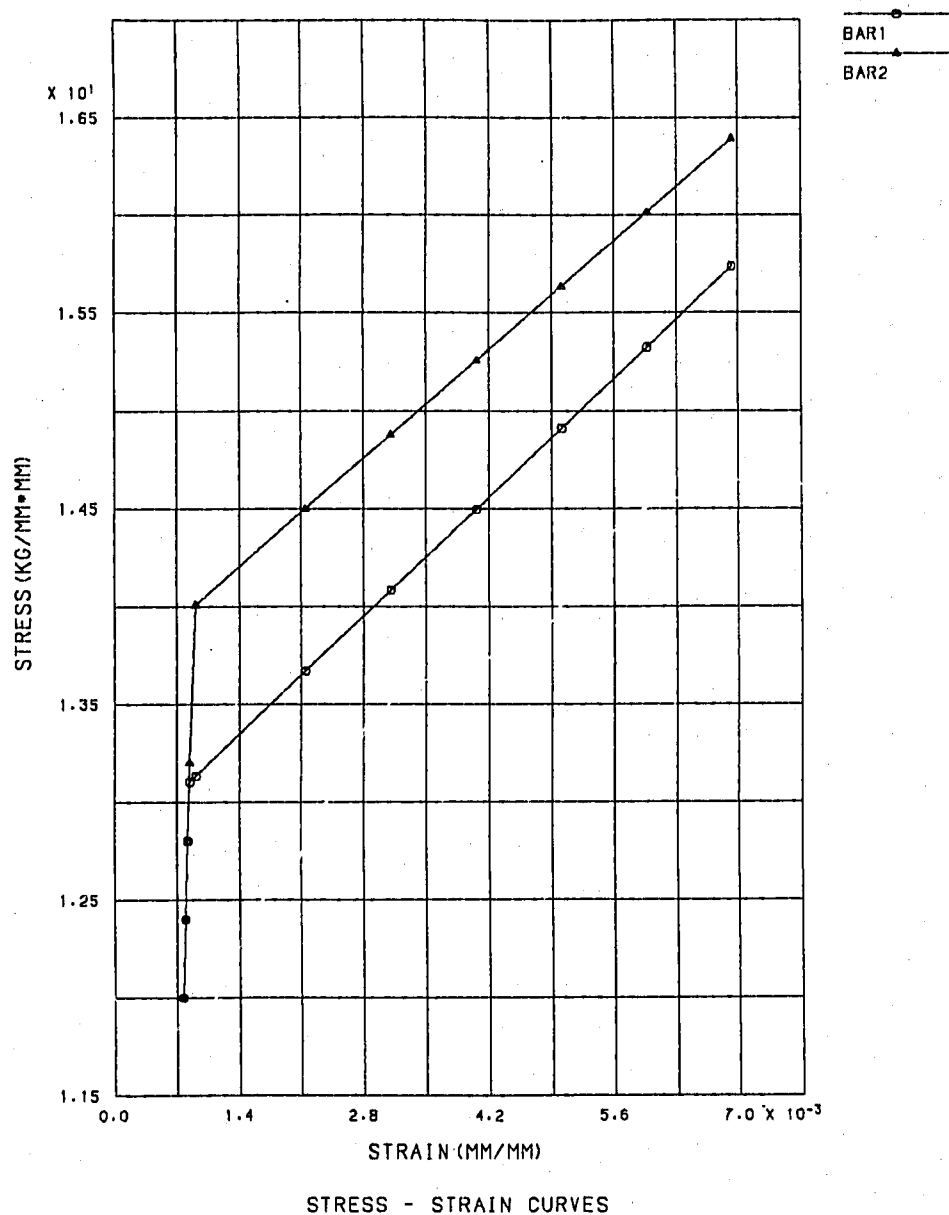


図 2.2.1-3 棒1と棒2の応力-ひずみ曲線

(5) 入力データと解析結果のリスト

表 2.2.1-4 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	ELASTO-PLASTIC ANALYSIS OF TWO BARS IN PARALLEL							
4	STATIC	EP							
5	MODEL								
6	NODE								
7	1			0.0		0.0			
8	2			0.0		100.0			
9	11			20.0		0.0			
10	12			20.0		100.0			
11	ELEMENT TYPE								
12	1	ROD2							
13	CONNECTION								
14	1	1	11	21	1	2			
15	2	1	12	22	11	12			
16	GEOMETRY								
17	11	1	150.0						
18	12	1	100.0						
19	MATERIAL								
20	21			1	1	1			
21	E			1.57E4					
22	SIGY			13.1					
23	HDASH			445.0					
24	22			1	1	1			
25	E			1.57E4					
26	SIGY			14.0					
27	HDASH			407.0					
28	BOUNDARY								
29	1								
30		1	11	10		1			
31		1	11	10		3			
32		2	12	10		1	3		
33	FASTENING								
34	1	F1		1	2	11	2		
35	FORCE								
36	1					2		1.0	
37	HISTORY								
38	INTERVAL								
39									
40	BOUN		1						
41	FAS		1						
42	FORC		1	-3000.0					
43	INTERVAL		10						
44	BOUN		1						
45	FAS		1						
46	FORC		1	-1000.0					
47	END MODEL								
48	OUTPUT								
49	XYPLOT								
50	PTITLE	STRESS - STRAIN CURVES							
51	XTITLE	STRAIN(MM/MM)							
52	YTITLE	STRESS(KG/MM*MM)							
53	CURVE								
54	1				BAR1				
55	2				BAR2				
56	PLOT3	EEP1	1	STRS1	1	EEP1	2	STRS1	2
57	END OUTPUT								
58	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.2.1-5 解析結果のリスト (抜粋)

ELASTO-PLASTIC ANALYSIS OF TWO BARS IN PARALLEL

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE 18

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR

(STEP NUM. 11)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	-6.92795E-01	0.0			
2	0.0	0.0	0.0			
11	0.0	-6.92795E-01	0.0			
12	0.0	0.0	0.0			

NODAL POINT REACTION

(STEP NUM. 11)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	1.63947E+03	0.0			
2	0.0	2.36053E+03	0.0			
11	0.0	-1.63947E+03	0.0			
12	0.0	1.63947E+03	0.0			

TOTAL STRESS AND STRAIN

(STEP NUM. 11)

ELM. ID-POINT	X	STRESS	E. STRAIN	P. STRAIN	STRAIN
1 - 1		1.5737E+01	1.0023E-03	5.9256E-03	6.9279E-03
2 - 1		1.6395E+01	1.0442E-03	5.8837E-03	6.9279E-03

Von Mises の相当応力

VON MISES TRFSCA

1.5737E+01 1.5737E+01

5.9256E-03

相当クリープひずみ

1.6395E+01 1.6395E+01

5.8837E-03

Tresca の応力強さ

全ひずみ
塑性ひずみ
弾性ひずみ

2.2.2 直列2本棒の弾性クリープ解析

(1) 問題

500°Cの高温状態で長さ100 mm, 断面積100 mm²と200 mm²の2本棒を直列に結合し, 端部に0.15 mmの長手方向規定変位を与えて3000時間の保時を行なう。材料はSUS 304であり, 弾性係数は 1.62×10^4 kg/mm², クリープ式は式(2.2.2-1)に示すNorton型を使用する。

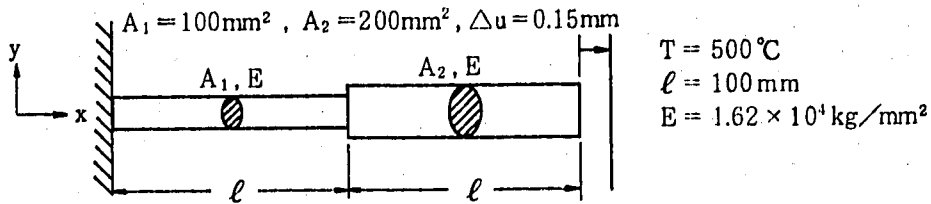


図 2.2.2-1 直列に結合した2本棒

$$\epsilon^c = A \sigma^B t^D \quad (2.2.2-1)$$

$$A = 1.474 \times 10^{-8}$$

$$B = 3.361$$

$$D = 0.4157$$

$$t_{\max} = 3000 \text{ 時間}$$

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元棒要素 ROD 2を用いて図2.2.2-2に示す有限要素モデルを作成する。各節点における境界条件を表2.2.2-1に示す。クリープ硬化則はひずみ硬化則を使用し, 時間増分は次式で決定する。

$$\Delta t_i = \gamma^{i-1} \Delta t_1 \quad (i > 2)$$

$$\Delta t_1 = 0.05 \text{ hr} \quad (2.2.2-2)$$

$$\gamma = 1.3$$

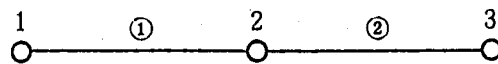


図 2.2.2-2 有限要素モデル

表 2.2.2-1 境界条件

節点番号	境界条件
1	$u_x = u_y = u_z = 0$
2	$u_y = u_z = 0$
3	$u_x = 0.15 \text{ mm}$ $u_y = u_z = 0$

(3) 理論解

時間ステップ i におけるひずみ硬化理論に基づくクリープひずみ $\epsilon_{(i)}^c$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\epsilon_{(i)}^c &= A \sigma_{(i)}^B \Delta t_{(i)}^D \\ \epsilon_{(i)}^c &= A \sigma_{(i-1)}^B (t^* + \Delta t_{(i)})^D \quad (2.2.2-3) \\ t^* &= \left(\frac{\epsilon_{(i-1)}^c}{A \sigma_{(i)}^B} \right)^{\frac{1}{D}}\end{aligned}$$

また、規定変位 Δu を与え、保持を行なった場合の棒 1 と棒 2 の応力 σ_1, σ_2 およびひずみ $\epsilon_1^p, \epsilon_2^p$ はそれぞれ次式で表わすことができる。

棒 1

$$\sigma_1 = \frac{A_2 E}{A_1 + A_2} \left\{ \frac{\Delta u}{\ell} - (\epsilon_1^f + \epsilon_2^f) \right\} \quad (2.2.2-4)$$

$$\epsilon_1^{ec} = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \left\{ \frac{\Delta u}{\ell} - (\epsilon_1^f + \epsilon_2^f) \right\} + \epsilon_1^f \quad (2.2.2-5)$$

棒 2

$$\sigma_2 = \frac{A_1 E}{A_1 + A_2} \left\{ \frac{\Delta u}{\ell} - (\epsilon_1^f + \epsilon_2^f) \right\} \quad (2.2.2-6)$$

$$\epsilon_2^{ec} = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \left\{ \frac{\Delta u}{\ell} - (\epsilon_1^f + \epsilon_2^f) \right\} + \epsilon_2^f \quad (2.2.2-7)$$

(4) 解析結果

棒 1 と棒 2 における応力とひずみを保持時間 0 hr と 3000 hr について表 2.2.2-2 と表 2.2.2-3 に示し、クリープひずみ曲線と応力緩和曲線を図 2.2.2-3 と図 2.2.2-4 にそれぞれ示す。

表 2.2.2 - 2 棒 1 における応力とひずみ

成 分	保持時間 0 hr		保持時間 3,000 hr	
	FINAS の解	理 論 解	FINAS の解	理 論 解 注)
σ [kg/mm ²]	1.6200E+01	16.2	7.6567E+00	7.7542
ϵ^c [mm/mm]	—————	0.0	7.2088E-04	7.1265×10 ⁻⁴
ϵ^{ec} [mm/mm]	1.0000E-03	1.0×10 ⁻³	1.1935E-03	1.1913×10 ⁻³

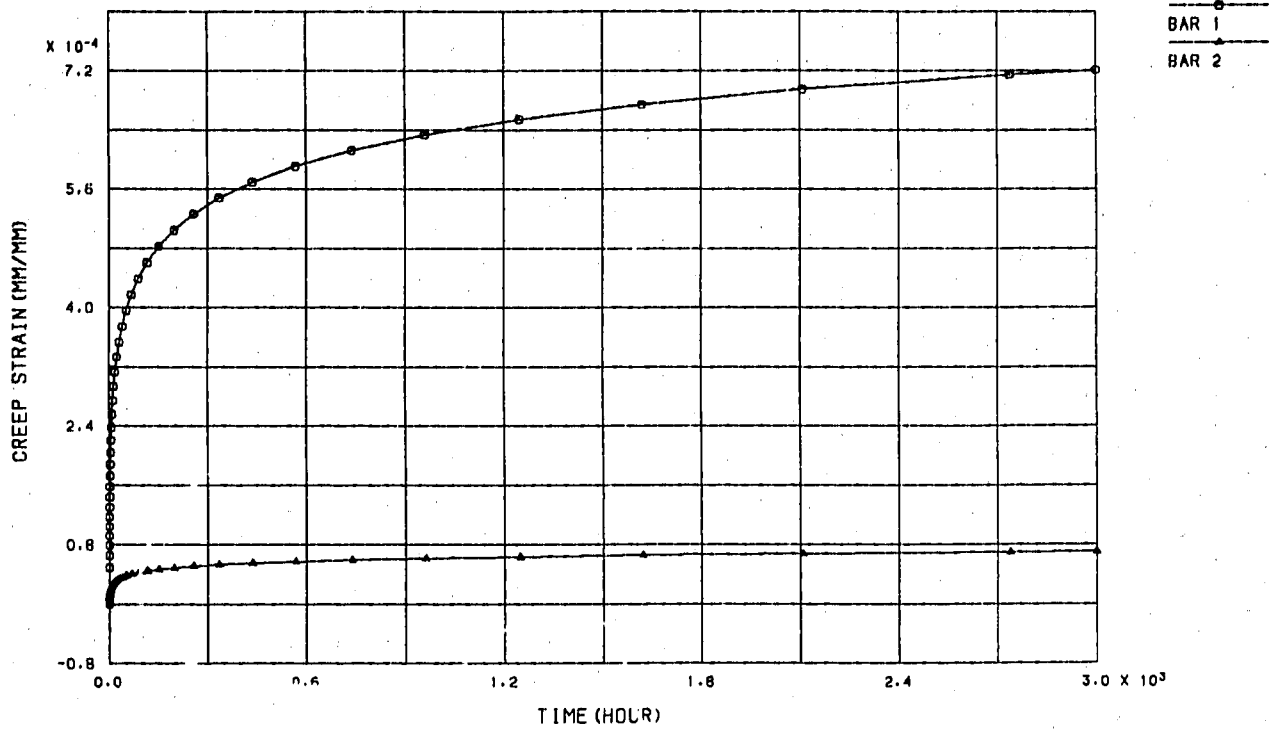
注) 理論解は式(2.2.2-3)において $\Delta t_{(i)} = 0.01$ hr とした値

表 2.2.2 - 3 棒 2 における応力とひずみ

成 分	保持時間 0 hr		保持時間 3,000 hr	
	FINAS の解	理 論 解	FINAS の解	理 論 解 注)
σ [kg/mm ²]	8.1000E+01	8.1	3.8283E+00	3.87712
ϵ^c [mm/mm]	—————	0.	7.0162E-05	6.9361×10 ⁻⁵
ϵ^{ec} [mm/mm]	5.0000E-03	5.0×10 ⁻³	3.0648E-04	3.0869×10 ⁻⁴

注) 理論解は式(2.2.2-3)において $\Delta t_{(i)} = 0.01$ hr とした値

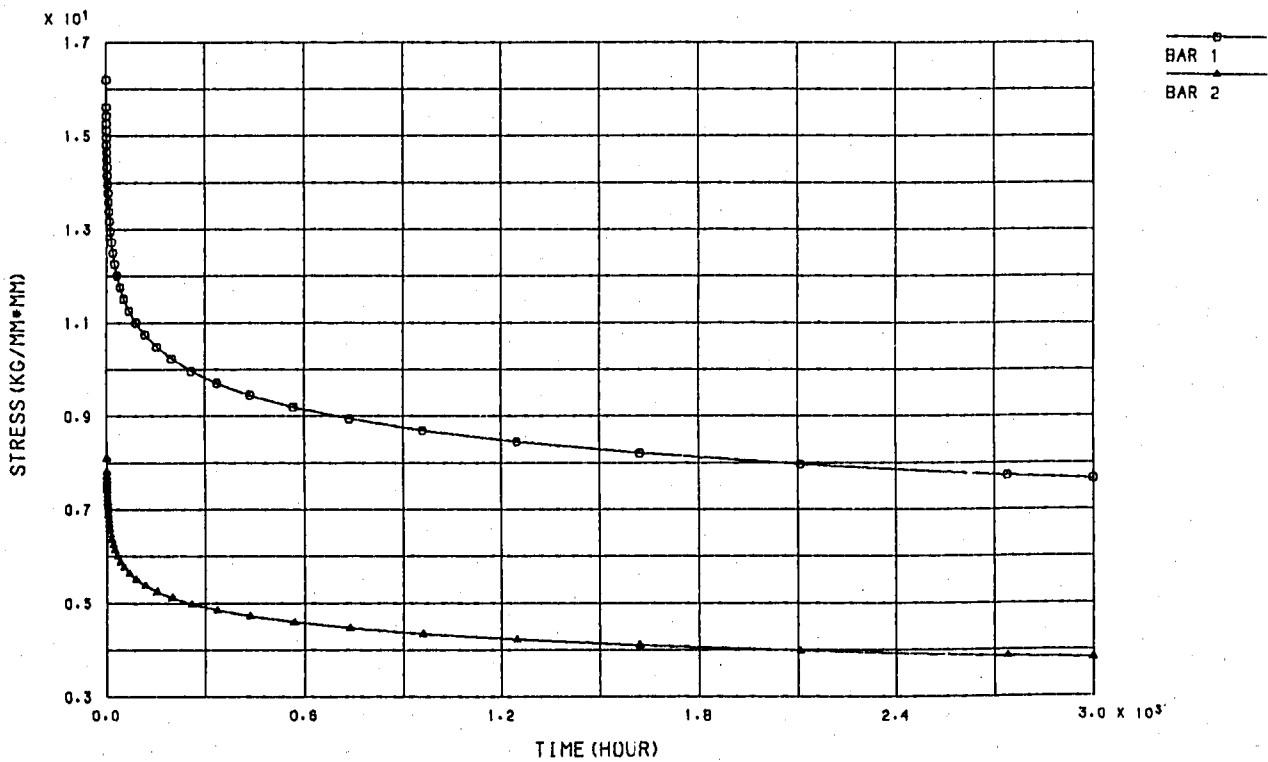
FINAS



CREEP STRAIN CURVE

図 2.2.2-3 棒1と2のクリープひずみ曲線

FINAS



STRESS RELAXATION CURVE

図 2.2.2-4 棒1と2の応力緩和曲線

(5) 入力データと解析結果のリスト

表 2.2.2-4 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	FINAS								
2	TITLE	ELASTIC-CREEP ANALYSIS OF TWO BARS COMBINED IN SERIES							
3	STATIC	EC							
4	MODEL								
5	NODE								
6	1			0.0			2		3
7	3			200.0					
8	ELEMENT TYPE								
9	1	ROD2							
10	CONNECTION								
11	1	1	1	1	2				
12	2	1	2	1	2	3			
13	GEOMETRY								
14	1	1	100.0						
15	2	1	200.0						
16	MATERIAL								
17	1	SUS304							
18		EPLAST LIB							
19		CREEP F8							
20		1.474E-8	3.361		1	0.0	0.4157		
21	BOUNDARY								
22	1								
23		1	3		2	3	0.0		
24		1			1		0.0		
25		3			1		1.0		
26	HISTORY								
27	INTERVAL								
28		BOUN	1	0.15					
29	**ILOOP1	37				1.3			
30	INTERVAL					0.05			
31		BOUN	1	0.0					
32	**END1								
33	INTERVAL					260.153			
34		BOUN	1	0.0					
35	END MODEL								
36	OUTPUT								
37	PRINT SELECT								
38	OTIME1	1	1	2	39				
39	DISP	ALL	1						
40	REAC	ALL	1						
41	ELM	ALL		1					
42	XYPLOT								
43	PTITLE	CREEP STRAIN CURVE							
44	XTITLE	TIME(HOUR)							
45	YTITLE	CREEP STRAIN(MM/MM)							
46	CURVE	1			BAR 1				
47	CURVE	2			BAR 2				
48	FRAME	A4H							
49	PLOT1	EC1	1	EC1	2			CTIME	
50	¥								
51	PTITLE	STRESS RELAXATION CURVE							
52	YTITLE	STRESS(KG/MM*MM)							
53	PLOT1	STRS1	1	STRS1	2			CTIME	
54	END OUTPUT								
55	END FINAS								

表 2.2.2 - 5 解析結果のリスト (抜粋)

ELASTIC-CREEP ANALYSIS OF TWO BARS COMBINED IN SERIES FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 8

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 1) CREEP TIME 0.0

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0			
2	1.00000E-01	0.0	0.0			
3	1.50000E-01	0.0	0.0			

NODAL POINT REACTION (STEP NUM. 1) CREEP TIME 0.0

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	-1.62000E+03	0.0	0.0			
3	1.62000E+03	0.0	0.0			

TOTAL STRESS AND STRAIN (STEP NUM. 1) CREEP TIME 0.0

ELM. ID-POINT	X	VON MISES	TRESCA
1 - 1	STRESS	1.6200E+01	1.6200E+01
	STRAIN	1.0000E-03	
2 - 1	STRESS	8.1000E+00	8.1000E+00
	STRAIN	5.0000E-04	

ELASTIC-CREEP ANALYSIS OF TWO BARS COMBINED IN SERIES FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 9

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 2) CREEP TIME 5.0000E-02

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0			
2	1.01323E-01	0.0	0.0			
3	1.50000E-01	0.0	0.0			

NODAL POINT REACTION (STEP NUM. 2) CREEP TIME 5.0000E-02

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	-1.56157E+03	0.0	0.0			
3	1.56157E+03	0.0	0.0			

TOTAL STRESS AND STRAIN (STEP NUM. 2) CREEP TIME 5.0000E-02

ELM. ID-POINT	X	VON MISES	TRESCA
1 - 1	STRESS	1.5616E+01	1.5616E+01
	E. STRAIN	9.6394E-04	
	C. STRAIN	4.9299E-05	
	STRAIN	1.0132E-03	
2 - 1	STRESS	7.8079E+00	7.8079E+00
	E. STRAIN	4.8197E-04	
	C. STRAIN	4.7982E-06	
	STRAIN	4.8677E-04	

弾性ひずみ
全ひずみ
クリープひずみ

Tresca の応力強さ
Von Mises の相当応力
相当クリープひずみ

ELASTIC-CREEP ANALYSIS OF TWO BARS COMBINED IN SERIES

FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 10

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR

(STEP NUM. 39)
CREEP TIME 2.9999E+03

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0			
2	1.19352E-01	0.0	0.0			
3	1.50000E-01	0.0	0.0			

NODAL POINT REACTION

(STEP NUM. 39)
CREEP TIME 2.9999E+03

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	-7.65670E+02	0.0	0.0			
3	7.65670E+02	0.0	0.0			

TOTAL STRESS AND STRAIN

(STEP NUM. 39)
CREEP TIME 2.9999E+03

ELM. ID-POINT	X		VON MISES	TRESCA
1 - 1	STRESS	7.6567E+00	7.6567E+00	7.6567E+00
	E. STRAIN	4.7263E-04		
	C. STRAIN	7.2088E-04	7.2088E-04	
	STRAIN	1.1935E-03		
2 - 1	STRESS	3.8283E+00	3.8283E+00	3.8283E+00
	E. STRAIN	2.3531E-04		
	C. STRAIN	7.0162E-05	7.0162E-05	
	STRAIN	3.0648E-04		

2.2.3 肉厚方向に温度分布のある円筒の熱弾塑性クリープ解析

(3) 問題

内半径 100 mm, 肉厚 10 mm の円筒に式 (2.2.3-1) で表わされる温度分布を与え, 次に軸方向に 13 kg/mm^2 の等分布荷重を負荷して 1000 hr の保持を行なう。材料は SUS 304 とし, FINAS に組込まれている材料データライブラリ⁶⁾を用いて熱弾塑性クリープ解析を行なう。

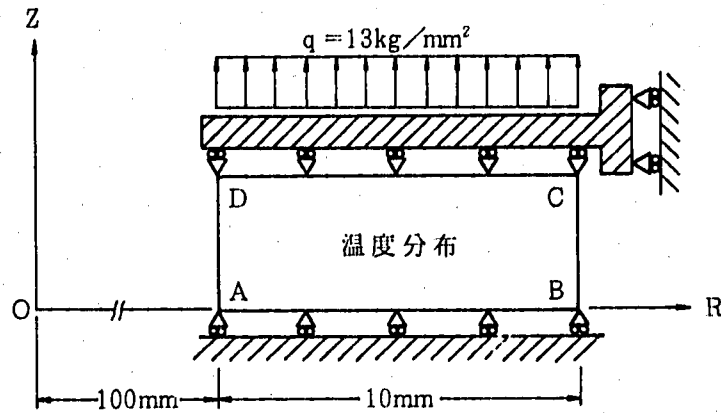


図 2.2.3-1 円筒

$$T = T_1 - \frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} (T_1 - T_2) \quad (2.2.3-1)$$

a : 内半径

b : 外半径

T_1 : 内表面温度 (500°C)

T_2 : 外表面温度 (500°C)

(2) 有限要素モデルと解析条件

4 節点四辺形軸対称要素 QAX 4 を用いて図 2.2.3-2 に示す有限要素モデルを作成する。熱応力計算の基準温度は 550°C とし, 上式から求めた温度を各節点に与える。軸方向分布荷重ははじめに 3 kg/mm^2 負荷し, 次に 1 kg/mm^2 ずつ 10 回に分けて増分を行なう。境界条件は表 2.2.3-1 に示すものを用い, 塑性硬化則は等方硬化則を使用する。また, 解析はリスタート機能を利用して図 2.2.2-3 に示すように 2 回に分けて行なう。

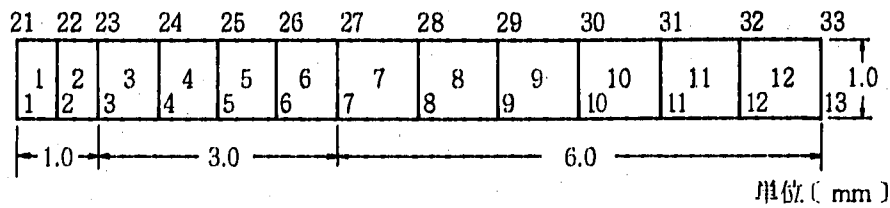


図 2.2.3-2 有限要素モデル

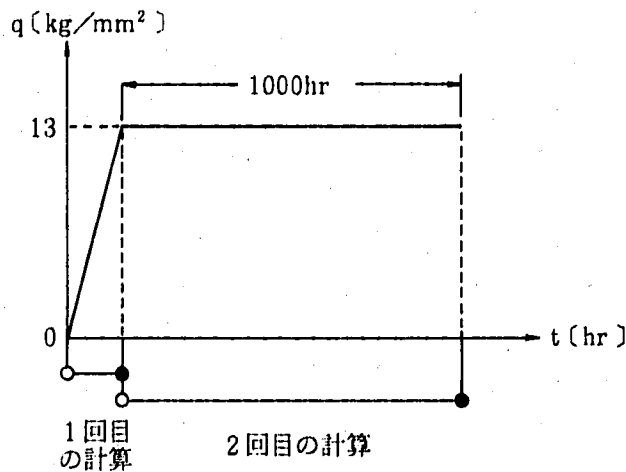


図 2.2.3-3 リスタート条件

表 2.2.3-1 境界条件

節点番号	自 由 度
1 ~ 13	$u_z = 0$
21 ~ 33	$u_{z21} = u_{z22} = \dots = u_{z33}$

(3) 解析結果

図 2.2.3-4 と図 2.2.3-5 に 1 回目の計算による弾塑性解析の結果を、図 2.2.3-6 と図 2.2.3-7 に 2 回目の計算によるクリープ解析の結果を示す。図 2.2.3-4 は熱荷重と熱荷重に機械荷重を加えた場合の軸方向応力の肉厚方向分布であり、図 2.2.3-5 は内外両表面に最も近い積分点における軸方向の応力-ひずみ曲線である。また、図 2.2.3-6 は図 2.2.3-5 と同一点での相当クリープひずみの時刻歴であり、図 2.2.3-7 は相当応力の時刻歴である。

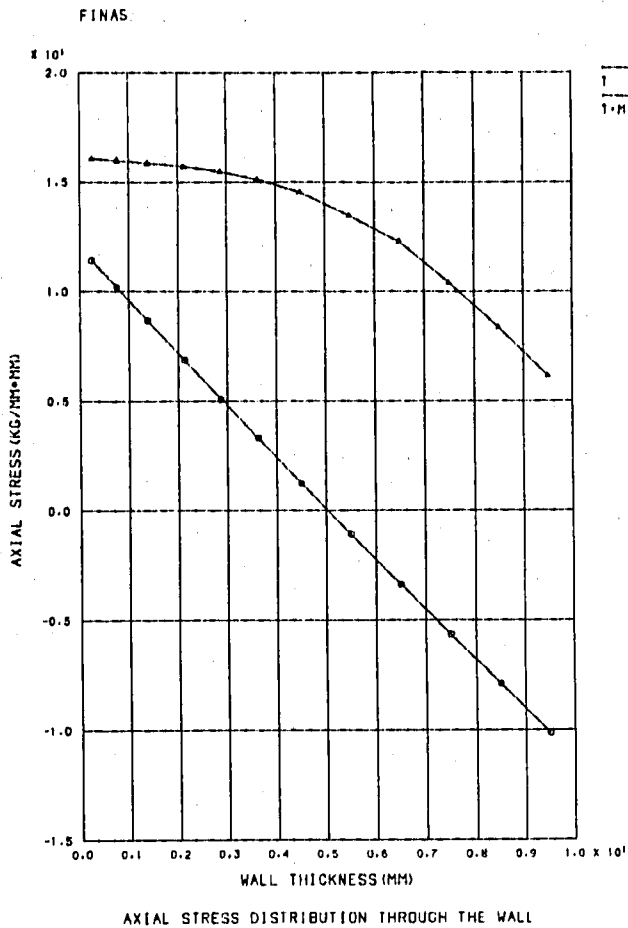


図 2.2.3 - 4 軸方向応力の肉厚方向分布

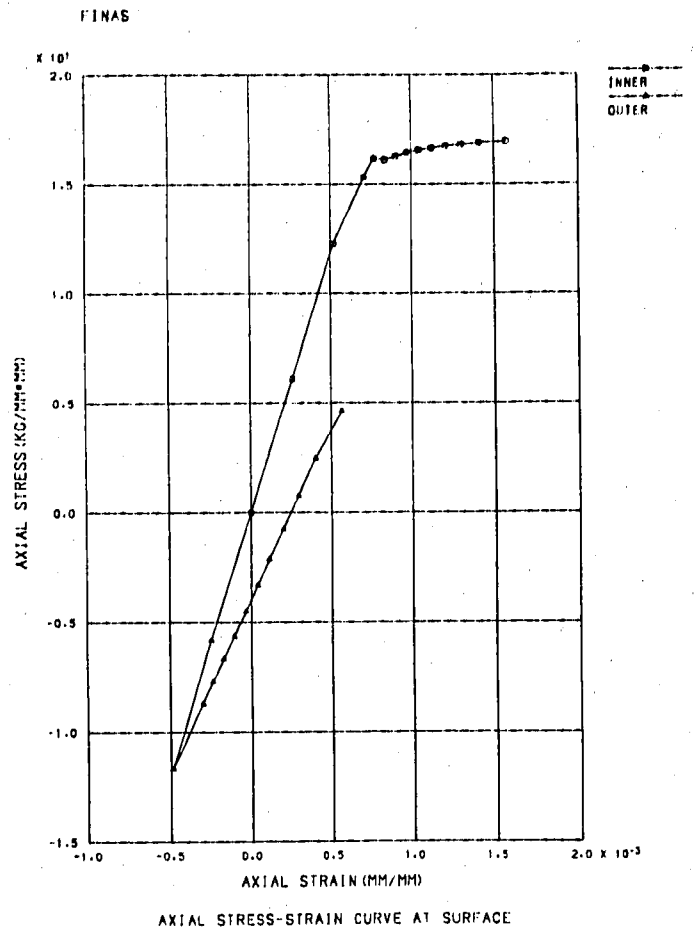


図 2.2.3 - 5 内外表面における応力ひずみ曲線

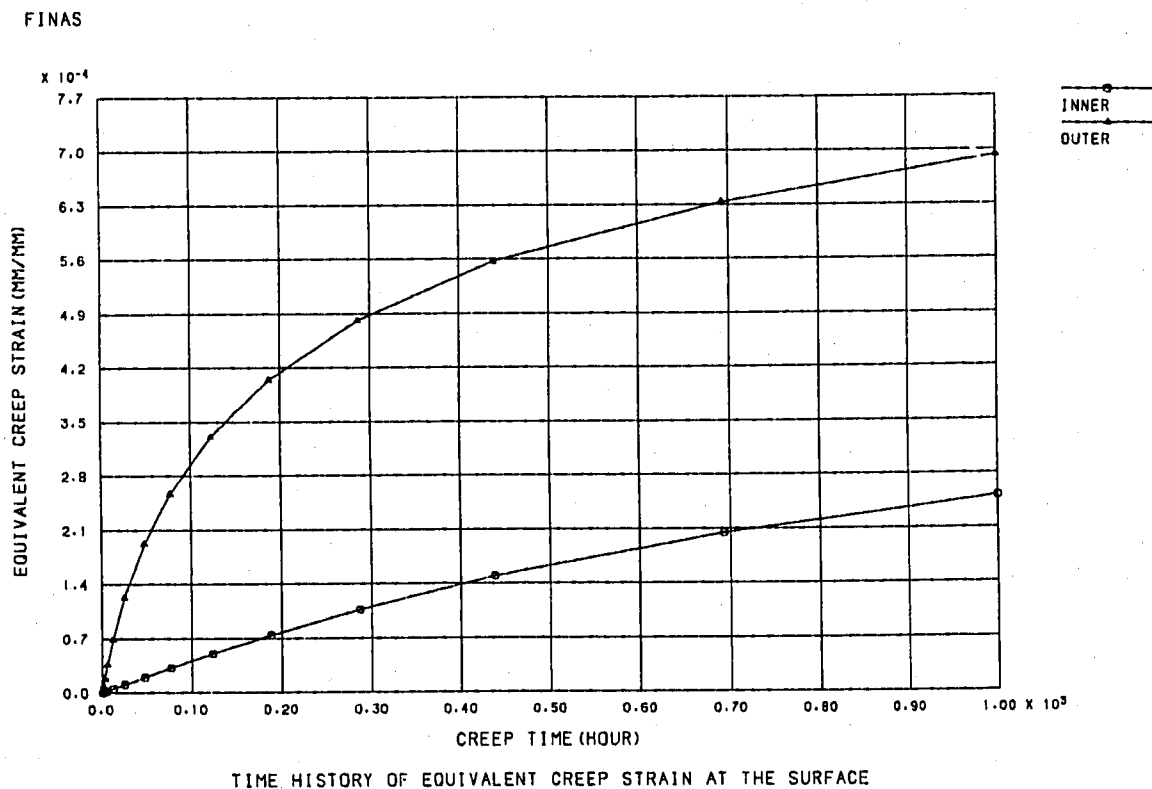


図 2.2.3 - 6 内外表面における相当クリープひずみの時刻歴

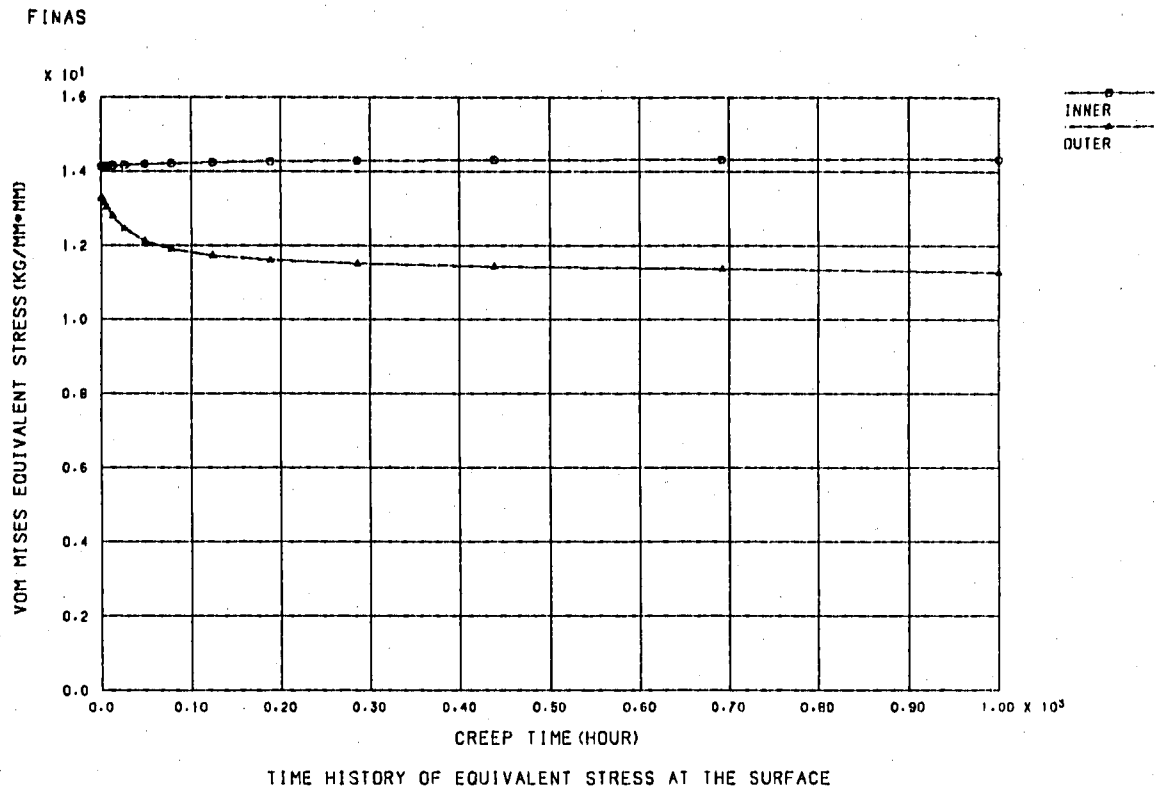


図 2.2.3 - 7 内外表面における相当応力の時刻歴

(5) 入力データ

表 2.2.3-2 1 回目の計算の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE THERMAL ELASTIC-PLASTIC-CREEP ANALYSIS OF A PIPE								
4	SUBTITLE FIRST RUN (THERMAL LOAD AND MECHANICAL LOAD)								
5	STATIC TEPC								
6	SAVE								
7	CONTROL								
8	AUTO CREEP								
9	MODEL								
10	NODE PITCH								
11	1	2*0.5	4*0.75	6*1.0					
12	**NLOOP1								
13	1	2	20	0.0	1.0				
14	13			100.0	0.0		12	1	13
15	**END1								
16	ELEMENT TYPE								
17	1	QAX4							
18	CONNECTION								
19	1	1	1	2	21	22		12	
20	MATERIAL								
21	1	1SUS304							
22		EPLAST LIB							
23		CREEP LIB							
24	BOUNDARY								
25	1								
26		1	13		2	0.0			
27	FASTENING								
28	2								
29	F1	12	21	2	0	22	2	1	
30	TEMPERATURE								
31	REF	550.0							
32	3								
33		1	21	20		-50.00			
34		2	22	20		-47.38			
35		3	23	20		-44.78			
36		4	24	20		-40.90			
37		5	25	20		-37.05			
38		6	26	20		-33.22			
39		7	27	20		-29.42			
40		8	28	20		-24.40			
41		9	29	20		-19.43			
42		10	30	20		-14.51			
43		11	31	20		-9.63			
44		12	32	20		-4.79			
45		13	33	20		0.0			
46	FORCE								
47	4								
48	1	1	12	4		-1.0	-1.0		
49	STEP RATIO								
50	10	3.0	10*1.0						
51	HISTORY								
52	INTERVAL								
53		BOUN	1						
54		FAS	2						
55		INTERVAL	2						
56		BOUN	1						
57		FAS	2						
58		TEMP	3	1.0					
59		INTERVAL	11	10					
60		BOUN	1						
61		FAS	2						
62		FORC	4	13.0					
63		INTERVAL							
64		BOUN	1						
65		FAS	2						
66	END MODEL								
67	OUTPUT								
68		OTIME1	10	3	14	15			
69		NSET1	100	1	13	21	33		
70		ESET1	200	1	12				
71		IPSET1	300	4	5	6			
72	* PRINT SELECT								
73	DISP								
74		100	10						
75	REAC								
		100	10						
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	ELM	200	300	10					
77	Y								
78	POST TAPE								
79	ELM	ALL	300						
80	Y								
81	STRUCTURE PLOT								
82	PTITLE	NODE NUMBER AND ELEMENT NUMBER							
83	IPLOT	BOTH							
84	Y								
85	XYPLOT								
86	PTITLE	AXIAL STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL							
87	XTITLE	WALL THICKNESS(MM)							
88	YTITLE	AXIAL STRESS(KG/MM*MM)							
89	ELIST2	30	1	12					
90	XVALU	40	0.25	0.75	1.375	2.125	2.875	3.625	
91			4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	
92	XRANGE	0.0	10.0						
93	YRANGE	-15.0	20.0						
94	XDIVISION	8	0						
95	YDIVISION	7	0						
96	CURVE	1			T LOAD				
97	CURVE	2			T+M LOAD				
98	PLOT2	STRS2ELIST	30	3XVALU	40	STRS2ELIST	30	15XVALU	40
99	Y								
100	PTITLE	AXIAL STRESS-STRAIN CURVE AT SURFACE							
101	XTITLE	AXIAL STRAIN(MM/MM)							
102	YTITLE	AXIAL STRESS(KG/MM*MM)							
103	XRANGE	-1.0E-3	2.0E-3						
104	YRANGE	-15.0	20.0						
105	XDIVISION	6	0						
106	CURVE	1			INNER				
107	CURVE	2			OUTER				
108	PLOT3	EEP2	1	4STRS2	1	4EEP2	12	6STRS2	12
109	END OUTPUT								
110	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.2.3-3 2回目の計算の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0								
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									
57									
58									
59									
60									
61									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

2.3 幾何学的非線形解析および座屈荷重解析

2.3.1 2本棒トラスの線形および非線形座屈荷重解析

(1) 問題

図 2.3.1-1 に示す 2 本棒トラスの線形および非線形座屈解析を行なう。材料は SUS 304 とし、弾性係数は $1.57 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ を用いる。

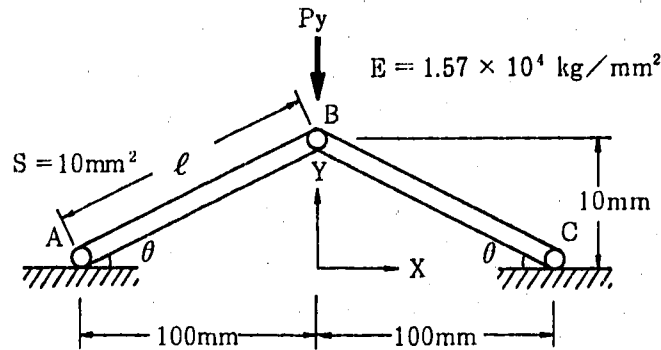


図 2.3.1-1 2本棒トラス

(2) 有限要素モデルと境界条件

3次元棒要素 ROD 2 を用いて図 2.3.1-2 に示す有限要素モデルを作成する。境界条件と負荷条件を表 2.3.1-1 と表 2.3.1-2 にそれぞれ示す。なお、表 2.3.1-2 の () 内は荷重増分の割合とその繰返し数を表わす。

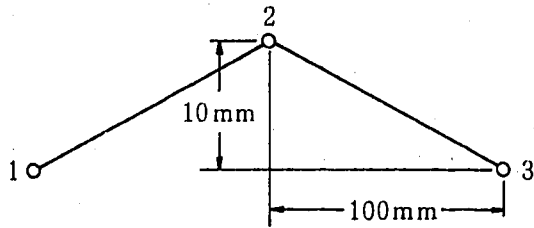


図 2.3.1-2 有限要素モデル

表 2.3.1-1 境界条件

節点番号	拘束自由度
6, 3	u_x, u_y, u_z
2	u_z

表 2.3.1-2 負荷条件

	節点 2
線形座屈	$P_y = -5.9534 \text{ kg}$
非線形座屈	$P_y = -59.534 \text{ kg} \times (0.1 \times 9 + 0.02 \times 5)$

(3) 理論解

線形座屈解析

構造の対称性より解くべき問題はB点のy方向に関する1自由度問題となる。B点におけるYの正の方向変位および荷重を U_y, P_y とすると、B点のY方向に関する微小変位剛性 K^L と初期応力剛性 K^σ 、固有値 λ および変位 u_y はそれぞれ次式で表わすことができる。

$$K^L = 2 E A \sin^2 \theta / \ell \quad (2.3.1-1)$$

$$K^\sigma = P_y / \ell \sin \theta \quad (2.3.1-2)$$

$$\lambda = -K^L / K^\sigma = -2 E A \sin^3 \theta / P_y \quad (2.3.1-3)$$

$$U_y = P_y / K^L = P_y \ell / 2 E A \sin^2 \theta \quad (2.3.1-4)$$

非線形座屈解析

荷重ステップ*i*における荷重増分を ΔP_i 、固有値を λ_i とすると、ステップ*i*における座屈荷重 P_{cr} は次式で推定することができる。

$$P_{cr} = \sum_n^{i-1} \Delta P_n + \lambda_i \Delta P_i \quad (2.3.1-5)$$

(4) 解析結果

線形座屈解析の結果を表2.3.1-3に、非線形座屈解析の結果を表2.3.1-4と図2.3.1-3にMARCの解と併せて示す。

表 2.3.1-3 線形座屈解析の結果

成 分	FINASの解	理 論 解
変位 U_y [mm]	-3.23260 E-02	-3.23260×10^{-2}
ひずみ ϵ [mm/mm]	-3.2006 E-05	-3.2006×10^{-5}
応力 σ [kg/mm ²]	-5.0249 E-01	-5.0249×10^{-1}
固有値 λ	3.09348 D-02	3.09348×10^{-2}

表 2.3.1-4 非線形座屈解析の結果 ($P_y = 58.34332$ kg)

成 分	FINASの解	MARCの解
変位 U_y [mm]	-3.52587 E+00	-3.5666
ひずみ ϵ [mm/mm]	-2.9082 E-03	-2.902 E-03
応力 σ [kg/mm ²]	-4.5146 E+01	-4.555 E+01
固有値 λ	3.70906 D+00	3.316 E+00
座屈荷重 P_{cr}	61.568	62.292

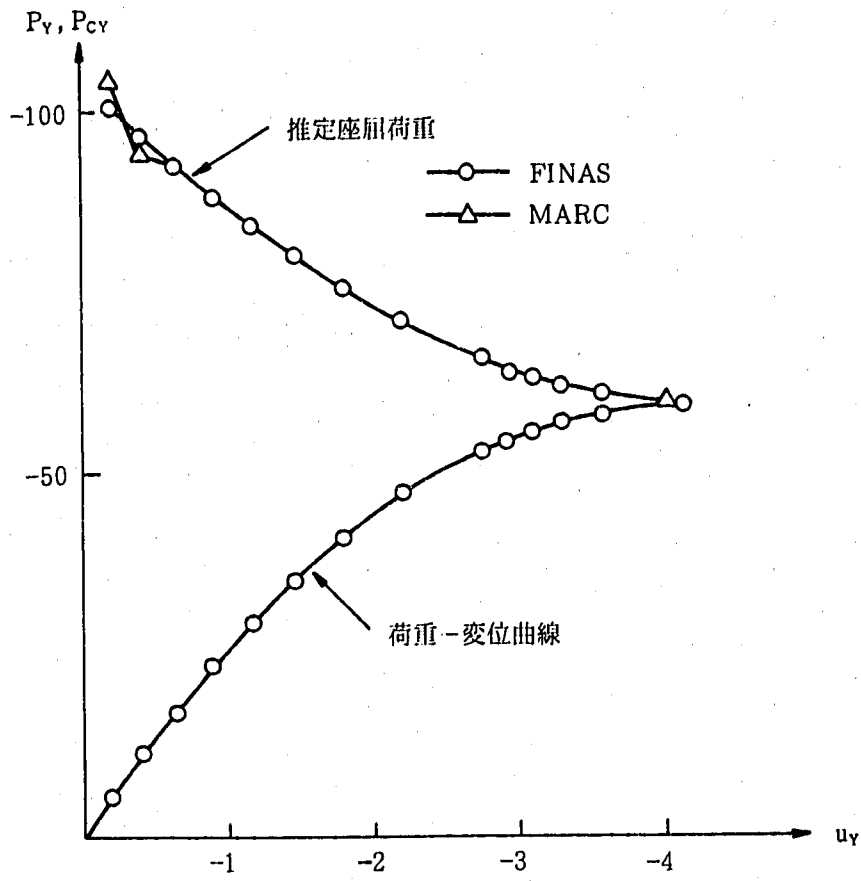


図 2.3.1-3 荷重-変位曲線および推定座屈荷重

(5) 入力データと解析結果のリスト

表 2.3.1-5 線形座屈荷重解析の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0								0
2		FINAS							
3		TITLE	LINEAR BUCKLING ANALYSIS OF A SIMPLE TRUSS MODEL						
4		STATIC	E						
5		CONTROL	BUCKLING						
6		MODEL							
7		NODE							
8		1		-100.0		0.0			
9		2		0.0		10.0			
10		3		100.0		0.0			
11		ELEMENT TYPE							
12		1	ROD2						
13		CONNECTION							
14		1	1	1	1	2			
15		2	1	1	2	3			
16		GEOMETRY							
17		1	10.0						
18		MATERIAL							
19		1							
20		BOUNDARY	E	1.57E4					
21		1							
22									
23			1			1	2		
24			3			1	2		
25			1	3		3			
26		FORCE							
27		1							
28			2				-1.0		
29		HISTORY							
30		INTERVAL							
31			BOUN	1					
32			FORC	1					
33		BUCKLING							
34		END MODEL							
35		END FINAS							
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.3.1 - 6 線形座屈解析結果のリスト (抜粋)

LINEAR BUCKLING ANALYSIS OF A SIMPLE TRUSS MODEL FINAS VERSION 9.0, 11/28/85 PAGE 6

REAL EIGENVALUES (STEP NUM. 1)

MODE-1	MODE-2	MODE-3	MODE-4	MODE-5	MODE-6
3.093483D+02					

REAL EIGENVECTOR (MODE NUM. 1) MAXIMUM NORM = 3.16228E+00

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0			
2	0.0	-1.00000E+00	0.0			
3	0.0	0.0	0.0			

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 1)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0			
2	0.0	-3.23280E-02	0.0			
3	0.0	0.0	0.0			

NODAL POINT REACTION (STEP NUM. 1)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	5.00000E+00	5.00000E-01	0.0			
3	-5.00000E+00	5.00000E-01	0.0			

LINEAR BUCKLING ANALYSIS OF A SIMPLE TRUSS MODEL FINAS VERSION 9.0 11/28/85 PAGE 7

TOTAL STRESS AND STRAIN (STEP NUM. 1)

ELM. ID-POINT	X	STRESS	STRAIN	VON MISES	TRESCA
1 - 1		-5.0249E-01	-3.2006E-05	5.0249E-01	5.0249E-01
2 - 1		-5.0249E-01	-3.2006E-05	5.0249E-01	5.0249E-01

表 2.3.1-7 非線形座屈荷重解析の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE NONLINEAR BUCKLING ANALYSIS OF SIMPLE TRUSS MODEL								
4	STATIC E								
5	CONTROL								
6	BUCKLING								
7	LARGE DISP								
8	MODEL								
9	NODE								
10	1			-100.0		0.0			
11	2			0.0		10.0			
12	3			100.0		0.0			
13	ELEMENT TYPE								
14	1 ROD2								
15	CONNECTION								
16	1	1	1	1	2				
17	2	1	1	1	2	3			
18	GEOMETRY								
19	1		10.0						
20	MATERIAL								
21	1			1.57E4					
22	BOUNDARY								
23	1								
24		1			1	2			
25		3			1	2			
26		1	3		3				
27	FORCE								
28	1								
29		2							
30	HISTORY								
31	INTERVAL								
32			1						
33			1		0.1				
34	BUCKLING								
35	INTERVAL								
36			1						
37			1		0.1				
38	BUCKLING								
39	INTERVAL								
40			1						
41			1		0.1				
42	BUCKLING								
43	INTERVAL								
44			1						
45			1		0.1				
46	BUCKLING								
47	INTERVAL								
48			1						
49			1		0.1				
50	BUCKLING								
51	INTERVAL								
52			1						
53			1		0.1				
54	BUCKLING								
55	INTERVAL								
56			1						
57			1		0.1				
58	BUCKLING								
59	INTERVAL								
60			1						
61			1		0.1				
62	BUCKLING								
63	INTERVAL								
64			1						
65			1		0.1				
66	BUCKLING								
67	INTERVAL								
68			1						
69			1		0.02				
70	BUCKLING								
71	INTERVAL								
72			1						
73			1		0.02				
74	BUCKLING								
75	INTERVAL								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77		BOUN	1						
78		FORC	1	0.02					
79		BUCKLING							
80		INTERVAL							
81		BOUN	1						
82		FORC	1	0.02					
83		BUCKLING							
84		INTERVAL							
85		BOUN	1						
86		FORC	1	0.02					
87		BUCKLING							
88		END MODEL							
88		END FINAS							
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	1	2	3	4	5	6	7	8

表 2.3.1 - 8 非線形座屈解析結果のリスト (抜粋)

NONLINEAR BUCKLING ANALYSIS OF SIMPLE TRUSS MODEL FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 23

REAL EIGENVALUES (STEP NUM. 13)
 MODE-1 MODE-2 MODE-3 MODE-4 MODE-5 MODE-6
 3.709088D+00

REAL EIGENVECTOR (MODE NUM. 1)
 MAXIMUM NORM = 8.24839E-01
 POINT-ID D1 D2 D3 D4 D5 D6
 1 0.0 0.0 0.0
 2 0.0 -1.00000E+00 0.0
 3 0.0 0.0 0.0

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 13)
 POINT-ID D1 D2 D3 D4 D5 D6
 1 0.0 0.0 0.0
 2 0.0 -3.52587E+00 0.0
 3 0.0 0.0 0.0

NODAL POINT REACTION (STEP NUM. 13)
 POINT-ID D1 D2 D3 D4 D5 D6
 1 4.49216E+02 2.90828E+01 0.0
 3 -4.49216E+02 2.90828E+01 0.0

NONLINEAR BUCKLING ANALYSIS OF SIMPLE TRUSS MODEL FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 24

TOTAL STRESS AND STRAIN (STEP NUM. 13)
 ELM. ID-POINT X VON MISES TRESCA
 1 - 1 STRESS -4.5146E+01 4.5146E+01 4.5146E+01
 STRAIN -2.8755E-03
 2 - 1 STRESS -4.5146E+01 4.5146E+01 4.5146E+01
 STRAIN -2.8755E-03

3. 動的解析

3.1 モーダル法

3.1.1 ばね質量系の固有値解析

(1) 問題

図 3.1.1-1 に示す 2 自由度のばね質量系について固有値解析を行ない、1 次と 2 次の固有振動数と振幅比を求める。バネ定数は k_1 と k_3 が 4.0 kg/mm 、 k_2 が 16.0 kg/mm であり、質量は m_1 が $1.0204 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}$ 、 m_2 が $2.0408 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}$ である。

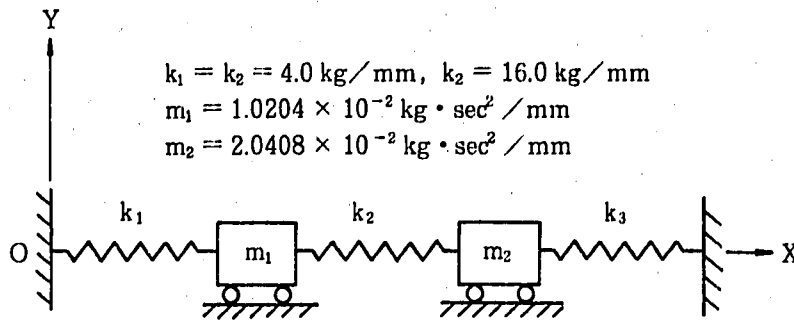


図 3.1.1-1 2 自由度のばね質量系

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元ばね減衰要素 LCOMB2 を用い、減衰定数をゼロとして図 3.1.1-2 の有限要素モデルを作成する。質量は付加質量とし、その値を表 3.1.1-1 に、また境界条件を表 3.1.1-2 に示す。なお、有限要素モデルの作成にあたり、便宜上ばね 1 本の長さを 500 mm と仮定している。

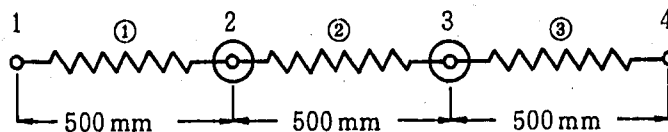


図 3.1.1-2 有限要素モデル

表 3.1.1-1 付加質量 m

節点番号	自由度	m (kg · sec ² /mm)
2	x 方向	1.0204 × 10 ⁻²
3	x 方向	2.0408 × 10 ⁻²

表 3.1.1-2 境界条件

節点番号	拘束自由度
1, 4	u _x , u _y , u _z , θ _x , θ _y , θ _z
2, 3	u _y , u _z , θ _x , θ _y , θ _z

(3) 理論解

図 3.1.1-1 に示したばね質量系の固有円振動数は次の特性方程式の根として与えられる。⁷⁾

$$\omega^4 - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2 + k_3}{m_2} \right) \omega^2 + \frac{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_3 k_1}{m_1 m_3} = 0 \quad (3.1.1-1)$$

式 (3.1.1-1) の根を ω₁, ω₂ とすると固有振動数 f は次式で求めることができる。

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}, \quad f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} \quad (3.1.1-2)$$

また、図 3.1.1-2 の節点 2 と 3 の振幅比 A₂/A₃ は次式で与えられる。

$$\frac{A_2}{A_3} = \frac{k_2}{k_1 + k_2 - m_1 \omega^2} = \frac{k_2 + k_3 - m_2 \omega^2}{k_2} \quad (3.1.1-3)$$

(4) 解析結果

固有振動数と節点 2 と 3 の固有ベクトルを表 3.1.1-3 と表 3.1.1-4 にそれぞれ示す。

表 3.1.1-3 固有振動数 f [Hz]

モード	FINASの解	理論解
1次	2.55546D+00	2.555461
2次	8.24265D+00	8.242651

表3.1.1-4 固有ベクトル

モード	節点番号	FINASの解	理論解
1次	2	9.21164E-01	0.9211646
	3	1.00000E+00	1.0000000
2次	2	1.00000E+00	1.0000000
	3	-4.60582E-01	-0.4605820

(5) 入力データと解析結果のリスト

表3.1.1-5 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	O	.....	O	.....	O	.....	O	.....	O
2	FINAS								
3	TITLE	NATURAL FREQUENCIES OF A TWO-MASS SPRING SYSTEM							
4	DYNAMIC CONTROL	M							
5	EIGENVALUE		2						
6	MODEL								
7	NODE								
8	1			0.0					
9	4		1500.0				3		4
10	ELEMENT TYPE								
11	10	L	COMB2						
12	CONNECTION								
13	1	10	20	1	2				
14	2	10	30	2	3				
15	3	10	20	3	4				
16	GEOMETRY								
17	20	7	4.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
18	30	7	16.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
19	ADD MASS								
20	2								
21	3			1	1.0204E-2				
22	D BOUNDARY			1	2.0408E-2				
23	1	4	3	1					
24	1	4		2	6				
25	END MODEL								
26	OUTPUT								
27	PRINT SELECT								
28	MODE	ALL							
29	END OUTPUT								
30	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	O	.....	O	.....	O	.....	O	.....	O

表 3.1.1 - 6 解析結果のリスト

FINAS VERSION 9.0 11/27/85 PAGE 1

ANALYSIS CONTROL DATA IMAGE

1.....	2.....	3.....	4.....	5.....	6.....	7.....	8.....
0.....	0.....	0.....	0.....	0.....	0.....	0.....	0.....

FINAS
 TITLE NATURAL FREQUENCIES OF A TWO-MASS SPRING SYSTEM
 DYNAMIC M
 CONTROL
 EIGENVALUE 2

FINAS VERSION 9.0 11/27/85 PAGE 2

MODEL DATA IMAGE

1.....	2.....	3.....	4.....	5.....	6.....	7.....	8.....
0.....	0.....	0.....	0.....	0.....	0.....	0.....	0.....

0- MODEL
 1- NODE
 2- 1 0.0 3 4
 3- 4 1500.0
 4- ELEMENT TYPE
 5- 10 LCOMB2
 6- CONNECTION
 7- 1 10 20 1 2
 8- 2 10 30 2 3
 9- 3 10 20 3 4
 10- GEOMETRY
 11- 20 7 4.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
 12- 30 7 16.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
 13- ADD MASS
 14- 2 1 1.0204E-2
 15- 3 1 2.0408E-2
 16- D BOUNDARY
 17- 1 4 3 1
 18- 1 4 2 6
 19- END MODEL

OUTPUT CONTROL DATA IMAGE

1.....1	2.....2	3.....3	4.....4	5.....5	6.....6	7.....7	8.....8
0.....0	0.....0	0.....0	0.....0	0.....0	0.....0	0.....0	0.....0

OUTPUT
PRINT SELECT
MODE ALL
END OUTPUT
END FINAS

- *** USER WARNING MESSAGE INPUT CARD SEQ. = 2129, 7, MATERIAL ID. (0) IS NOT SPECIFIED OR NOT A POSITIVE INTEGER
- *** USER WARNING MESSAGE INPUT CARD SEQ. = 2129, 8, MATERIAL ID. (0) IS NOT SPECIFIED OR NOT A POSITIVE INTEGER
- *** USER WARNING MESSAGE INPUT CARD SEQ. = 2129, 9, MATERIAL ID. (0) IS NOT SPECIFIED OR NOT A POSITIVE INTEGER

CONTROL DATA DESCRIPTION

CONTROL DATA

EIGEN VALUE	
NUMBER OF EIGENVALUES AND EIGENVECTORS	2
MAXIMUM NUMBER OF EIGENVALUE PROBLEM ITERATION	15
TOLERANCE FOR JUDGEMENT OF ITERATION	0.100E-05

MODEL DATA DESCRIPTION

NODAL COORDINATE

NUMBER OF NODAL POINTS						4
NODE	X1	X2	X3			
1	0.0	0.0	0.0			
2	500.000	0.0	0.0			
3	1000.00	0.0	0.0			
4	1500.00	0.0	0.0			
MAXIMUM VALUE	NODE- 4	NODE- 1	NODE- 1	NODE-		
VALUE	1500.00	0.0	0.0	0.0		
MINIMUM VALUE	NODE- 1	NODE- 1	NODE- 1	NODE-		
VALUE	0.0	0.0	0.0	0.0		

ELEMENT TYPE

TYPE	NAME
10	LCOB2

ELEMENT CONNECTION

NUMBER OF ELEMENTS ...						3
ELEMENT	TYPE	GEOM	MAT	NODES		
1	10	20	0	1	2	
2	10	30	0	2	3	
3	10	20	0	3	4	

ELEMENT GEOMETRY

GEOMETRY	GEOM-1	GEOM-2	GEOM-3	GEOM-4	GEOM-5	GEOM-6	GEOM-7
20	4.000	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0
30	16.00	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0

MODEL DATA DESCRIPTION

D BOUNDARY CONDITION

IDENTIFICATION NUMBER *** 0

NODE	DOF	COORD	DISP	NODE	DOF	COORD	DISP	NODE	DOF	COORD	DISP
1	1		0.0	4	1		0.0	1	2		0.0
1	3		0.0	1	4		0.0	1	5		0.0
1	6		0.0	2	2		0.0	2	3		0.0
2	4		0.0	2	5		0.0	2	6		0.0
3	2		0.0	3	3		0.0	3	4		0.0
3	5		0.0	3	6		0.0	4	2		0.0
4	3		0.0	4	4		0.0	4	5		0.0
4	6		0.0								

ADD MASS

NODE	DOFS	DOFE	COORD	VALUE	VALUE	VALUE
2	1	3	0	0.1020E-01	0.0	0.0
3	1	3	0	0.2041E-01	0.0	0.0

REAL EIGENVALUES

MODE	EIGENVALUE	FREQUENCY	PERIOD
1	2.57809D+02	2.55546D+00	3.91319D-01
2	2.68221D+03	8.24265D+00	1.21320D-01

PARTICIPATION FACTOR AND EFFECTIVE MASS

MODE NUM.		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	PARTICIPATION FACTOR	1.74836E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	EFFECTIVE MASS	3.05675E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	RATIO	9.98545E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PARTICIPATION FACTOR	6.67283E-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	EFFECTIVE MASS	4.45266E-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	RATIO	1.45455E-03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL EFFECTIVE MASS		3.06120E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

REAL EIGENVECTOR

(MODE NUM. 1)
MAXIMUM NORM = 5.86548E+00

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	9.21164E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1.00000E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

REAL EIGENVECTOR

(MODE NUM. 2)
MAXIMUM NORM = 8.29504E+00

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.00000E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-4.60582E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3.1.2 片持ちはりのモーダル応答解析

(1) 問題

長さ 200 cm, 断面積 25 cm^2 , 断面 2 次モーメント 52.083 cm^4 の片持ちはりの自由端に衝撃荷重を加える場合について減衰を考慮したモーダル応答解析を行なう。材料定数は弾性係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 質量密度 $8.1939 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^4$ であり, 荷重は図 3.1.2-2 に示す。減衰特性はモーダル減衰とし, 1 次のモードに対する減衰定数は 0.02 とする。

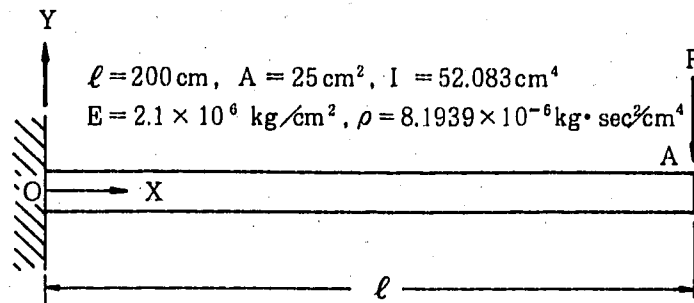


図 3.1.2-1 片持ちはり

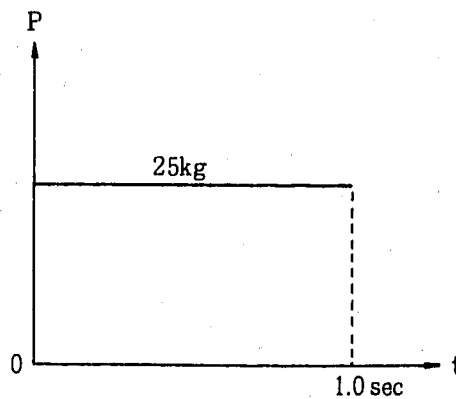


図 3.1.2-2 負荷条件

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元弾性はり要素 SBEAM2 を用いて図 3.1.2-3 に示す有限要素モデルを作成する。応答解析に用いるモードは 1~3 次とし, 式 (3.1.2-1) と式 (3.1.2-2) を用いて求めた各モードに対する減衰定数を表 3.1.2-2 に示す。

$$h_i = h_1 \frac{f_i}{f_1} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.1.2-1)$$

$$f_i = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \frac{(k_i l)^2}{2\pi l^2} \quad (3.1.2-2)$$

ここで、 h_i は i 次の減衰定数であり、 $h_1 = 0.02$ である。また、 f_1 は片持ちはりの固有振動数であり、 $k_i \ell^8$ は表 3.1.2-1 に示す値を持つ。荷重は節点 9 の $-y$ 方向に負荷し、時間増分は 2.5×10^{-4} 秒/ステップとする。境界条件を表 3.1.2-3 に示す。質量マトリックスは整合質量マトリックスを用いる。

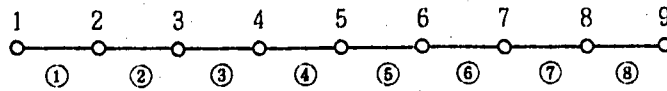


図 3.1.2-3 有限要素モデル

表 3.1.2-1 $k_i \ell$ の値

i	1	2	3
$k_i \ell$	1.875	4.694	7.855

表 3.1.2-2 減衰定数

次数	1	2	3
減衰定数 h	0.02	0.12535	0.35101

表 3.1.2-3 境界条件

節点番号	拘束自由度
1	$u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$
2~9	u_z, θ_x, θ_y

(3) 解析結果

固有振動数とはりの自由端における y 方向変位の代表時間での値を NASTRAN の解と比較し表 3.1.2 - 4 と表 3.1.2 - 5 に示し、1～3 次のモード図および自由端と中間点における y 方向変位の時間履歴を図 3.1.2 - 4 と図 3.1.2 - 5 にそれぞれ示す。

表 3.1.2 - 4 固有振動数 [Hz]

モード	FINAS の解	NASTRAN の解
1 次	1.02212D+01	1.022236E+01
2 次	6.40138D+01	6.406747E+01
3 次	1.79126D+02	1.794855E+02

表 3.1.2 - 5 自由端の y 方向変位

時刻 t [sec]	U _y [mm]	
	FINAS の解	NASTRAN の解
0.05	-1.16230E+00	-1.162284E+00
0.15	-1.08829E+00	-1.088154E+00
0.25	-1.01555E+00	-1.015256E+00
0.35	-9.46610E-01	-9.461315E-01
0.45	-8.82751E-01	-8.820864E-01
0.55	-8.24814E-01	-8.239784E-01
0.65	-7.73264E-01	-7.722845E-01
0.75	-7.28260E-01	-7.271726E-01
0.85	-6.89722E-01	-6.885657E-01
0.95	-6.57387E-01	-6.562008E-01

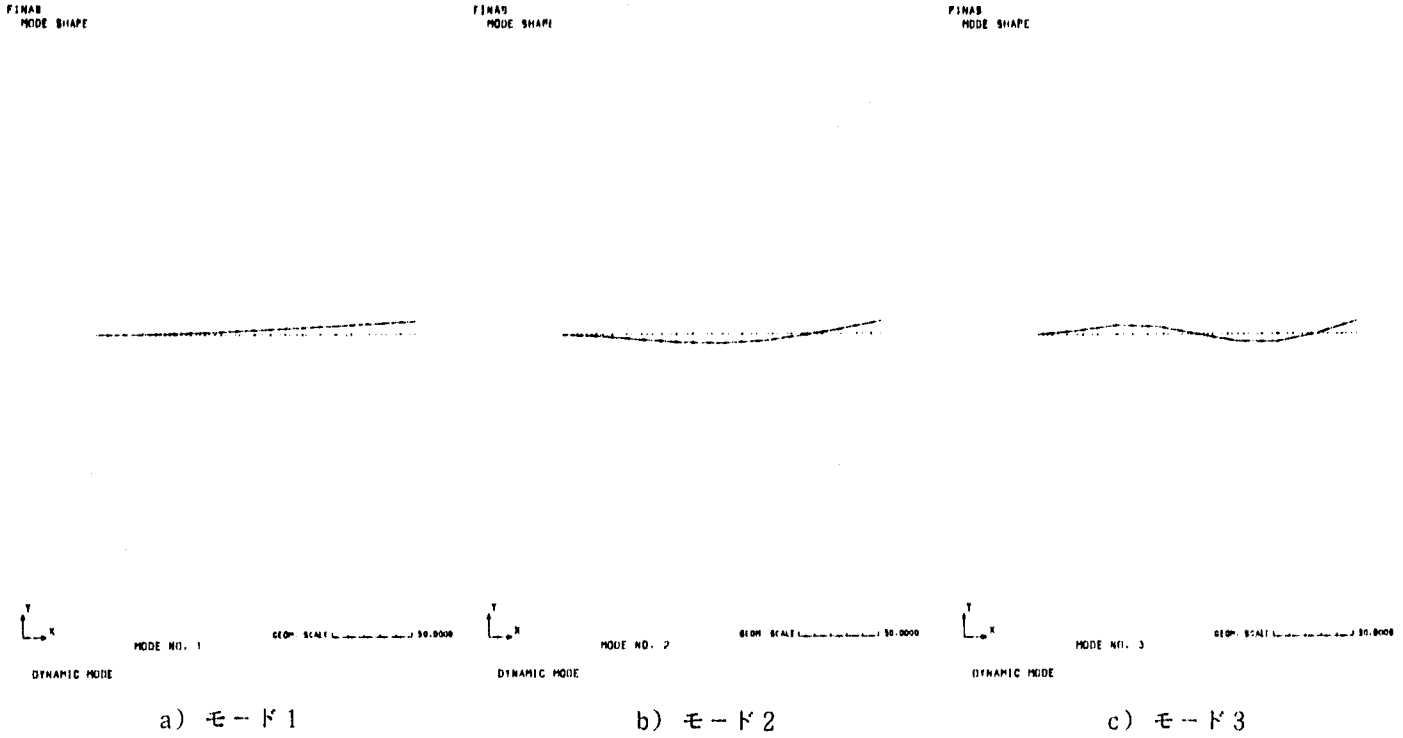


図 3.1.2 - 4 片持ちはりのモード図

FINAS

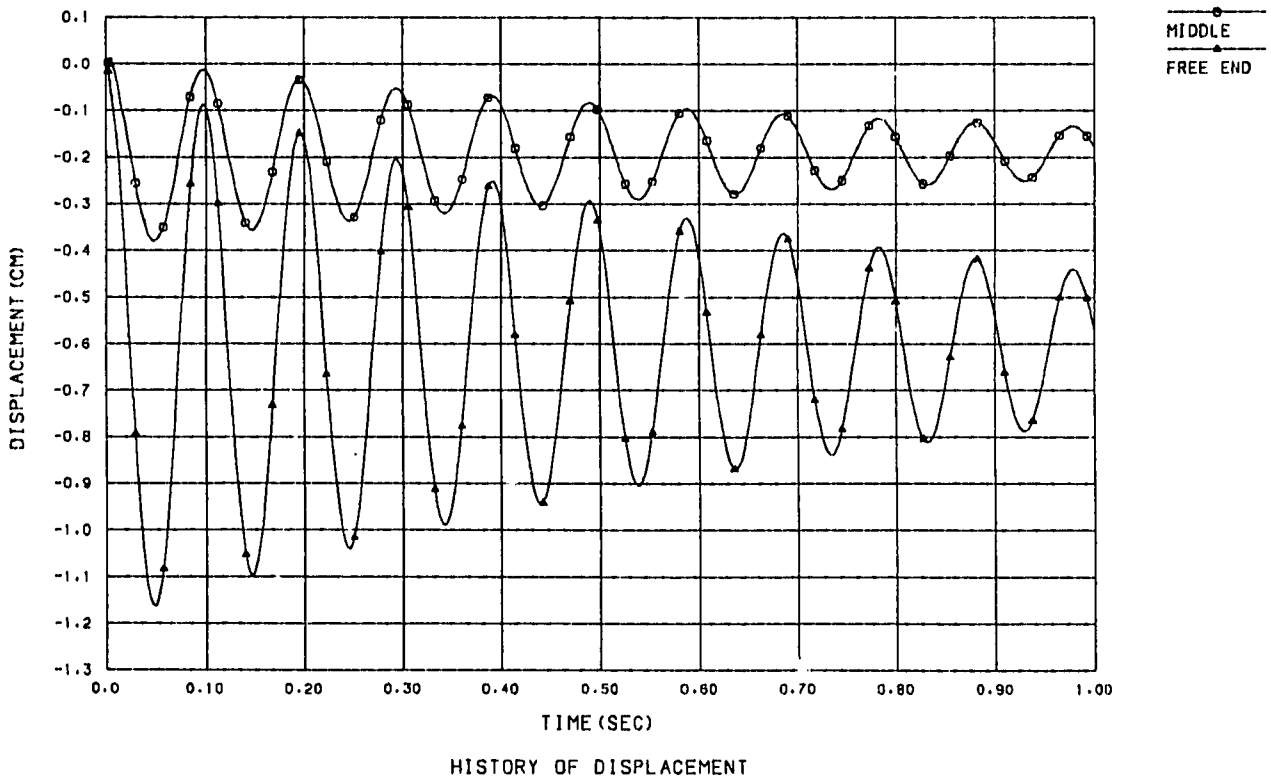


図 3.1.2 - 5 自由端と中間点における y 方向変位の時間履歴

(4) 入力データと解析結果のリスト

表 3.1.2 - 6 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	MODAL RESPONSE ANALYSIS OF BEAM WITH MODAL DAMPING(MODE 1-3)							
4	DYNAMIC CONTROL	M	MR						
5	EIGENVALUE			3					
6	MODEL								
7	NODE								
8	1			0.0			8		9
9	9			200.0					
10	10			0.0	1.0				
11	ELEMENT TYPE								
12	1	SBEAM2							
13	CONNECTION								
14	**ELOOP1	9	1	1	1	0			
15	1	1	1	1	2	10			
16	**END1								
17	GEOMETRY								
18	1	6	25.0			52.083	52.083		
19	MATERIAL								
20	1								
21	E		2.10E6						
22	RHO		8.1939E-6						
23	D BOUNDARY								
24	1				1	6			
25	2	9			3	5			
26	DAMPING								
27	F1	3	0.02		0.12535	0.35101			
28	TIME SERIES								
29	1								
30	F2	2		1.0					
31			1.0	1.0					
32	RESPONSE TIME								
33	1	1.00	400						
34	EXCIT	1	-25.0		9	2			
35	END MODEL								
36	OUTPUT								
37	OTIME2	1	4	40	4	60	340	40	360
38	NSET1	10	5	9					
39	ESET1	20	1	8					
40	*								
41	PRINT SELECT								
42	MODE	ALL							
43	DISP	10	1						
44	VELO	10	1						
45	ACCE	10	1						
46	ELFO	20		1					
47	*								
48	STRUCTUR PLOT								
49	AXES	Z	X	Y					
50	VIEW	0.0	0.0	0.0					
51	PTITLE	DYNAMIC MODE							
52	MPLT								
53	*								
54	XYPLOT								
55	PTITLE	HISTORY OF DISPLACEMENT							
56	XTITLE	TIME(SEC)							
57	YTITLE	DISPLACEMENT(CM)							
58	CURVE	1				10MIDDLE			
59	CURVE	2				10FREE END			
60	FRAME	A4H							
61	XDIVISION	10	0						
62	YDIVISION		0						
63	XRANGE		0.0	1.0					
64	PLOT1	DISP2	5	DISP2	9				RTIME
65	*								
66	PTITLE	HISTORY OF VELOCITY							
67	YTITLE	VELOCITY(CM/SEC)							
68	PLOT1	VELO2	5	VELO2	9				RTIME
69	*								
70	PTITLE	HISTORY OF ACCELERATION							
71	YTITLE	ACCELERATION(CM/SEC**2)							
72	PLOT1	ACCE2	5	ACCE2	9				RTIME
73	END OUTPUT								
74	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

表 3.1.2-7 解析結果のリスト (抜粋)

MODAL RESPONSE ANALYSIS OF BEAM WITH MODAL DAMPING(MODE 1-3)

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE 8

REAL EIGENVALUES

MODE	EIGENVALUE	FREQUENCY	PERIOD
1	4.12442D+03	1.02212D+01	9.78360D-02
2	1.61773D+05	6.40138D+01	1.56216D-02
3	1.26671D+06	1.79126D+02	5.58266D-03

PARTICIPATION FACTOR AND EFFECTIVE MASS

MODE NUM.		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	PARTICIPATION FACTOR	1.28333E-17	1.58379E-01	0.0	0.0	0.0	-2.16556E-02
	EFFECTIVE MASS	1.64692E-34	2.50840E-02	0.0	0.0	0.0	4.68967E-04
	RATIO	3.14781E-20	7.12087E-01	0.0	0.0	0.0	2.82031E-01
2	PARTICIPATION FACTOR	-2.36160E-11	8.73182E-02	0.0	0.0	0.0	1.77502E-02
	EFFECTIVE MASS	5.57715E-22	7.62447E-03	0.0	0.0	0.0	3.15069E-04
	RATIO	1.06598E-07	2.16444E-01	0.0	0.0	0.0	1.89479E-01
3	PARTICIPATION FACTOR	-7.23323E-08	-5.01750E-02	0.0	0.0	0.0	2.96442E-02
	EFFECTIVE MASS	5.23196E-15	2.51753E-03	0.0	0.0	0.0	8.78781E-04
	RATIO	9.99999E-01	7.14679E-02	0.0	0.0	0.0	5.28489E-01
TOTAL EFFECTIVE MASS		5.23196E-15	3.52260E-02	0.0	0.0	0.0	1.66282E-03

REAL EIGENVECTOR

(MODE NUM. 1)
MAXIMUM NORM = 9.87993E+00

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	2.58920E-02	0.0	0.0	0.0	2.00840E-03
3	1.94238E-17	9.72808E-02	0.0	0.0	0.0	3.64032E-03
4	2.81150E-17	2.04829E-01	0.0	0.0	0.0	4.90318E-03
5	3.56605E-17	3.39512E-01	0.0	0.0	0.0	7.81521E-03
6	4.17916E-17	4.92935E-01	0.0	0.0	0.0	6.40925E-03
7	4.63073E-17	6.57738E-01	0.0	0.0	0.0	6.73551E-03
8	4.90700E-17	8.28053E-01	0.0	0.0	0.0	6.86346E-03
9	4.99997E-17	1.00000E+00	0.0	0.0	0.0	6.88274E-03
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

MODAL RESPONSE ANALYSIS OF BEAM WITH MODAL DAMPING(MODE 1-3)

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE 9

REAL EIGENVECTOR

(MODE NUM. 2)
MAXIMUM NORM = 9.87249E+00

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	1.37888E-01	0.0	0.0	0.0	9.66836E-03
3	-3.49137E-11	4.17260E-01	0.0	0.0	0.0	1.14345E-02
4	-5.09151E-11	6.54341E-01	0.0	0.0	0.0	6.61204E-03
5	-6.51514E-11	7.13907E-01	0.0	0.0	0.0	-2.25963E-03
6	-7.70280E-11	5.34718E-01	0.0	0.0	0.0	-1.19373E-02
7	-8.59901E-11	1.35382E-01	0.0	0.0	0.0	-1.94607E-02
8	-9.15753E-11	-4.06483E-01	0.0	0.0	0.0	-2.32401E-02
9	-9.34736E-11	-1.00000E+00	0.0	0.0	0.0	-2.39159E-02
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

REAL EIGENVECTOR

(MODE NUM. 3)
MAXIMUM NORM = 9.86680E+00

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	-3.25513E-01	0.0	0.0	0.0	-1.99060E-02
3	-1.09341E-07	-7.25103E-01	0.0	0.0	0.0	-7.95696E-03
4	-1.58364E-07	-6.19000E-01	0.0	0.0	0.0	1.62877E-02
5	-2.01041E-07	-2.10354E-02	0.0	0.0	0.0	2.77774E-02
6	-2.35847E-07	5.57326E-01	0.0	0.0	0.0	1.45821E-02
7	-2.61591E-07	5.82180E-01	0.0	0.0	0.0	-1.32915E-02
8	-2.77400E-07	-4.90196E-02	0.0	0.0	0.0	-3.45776E-02
9	-2.82732E-07	-9.99999E-01	0.0	0.0	0.0	-3.93002E-02
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

MODAL RESPONSE ANALYSIS OF BEAM WITH MODAL DAMPING(MODE 1-3)

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE

32

DISPLACEMENT VECTOR							(STEP NUM. 400) TIME 1.0000E+00
POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6	
5	-3.87259E-10	-1.78366E-01	0.0	0.0	0.0	-3.21922E-03	
9	-5.44647E-10	-5.73894E-01	0.0	0.0	0.0	-4.26881E-03	

VELOCITY VECTOR							(STEP NUM. 400) TIME 1.0000E+00
POINT-ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	
5	-3.68135E-16	-3.50489E+00	0.0	0.0	0.0	-6.00323E-02	
9	-5.16162E-16	-1.03233E+01	0.0	0.0	0.0	-7.10527E-02	

ACCELERATION VECTOR							(STEP NUM. 400) TIME 1.0000E+00
POINT-ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	
5	-4.16767E-15	-3.96790E+01	0.0	0.0	0.0	-6.79628E-01	
9	-5.84350E-15	-1.16871E+02	0.0	0.0	0.0	-8.04392E-01	

MAXIMUM DISPLACEMENT VECTOR						
POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	-2.83852E-02	0.0	0.0	0.0	-2.20557E-03
3	-2.64480E-10	-1.07070E-01	0.0	0.0	0.0	-4.02696E-03
4	-3.83061E-10	-2.26764E-01	0.0	0.0	0.0	-5.49267E-03
5	-4.86293E-10	-3.79009E-01	0.0	0.0	0.0	-6.64334E-03
6	-5.70450E-10	-5.56144E-01	0.0	0.0	0.0	-7.48862E-03
7	-6.32765E-10	-7.50702E-01	0.0	0.0	0.0	-8.02425E-03
8	-6.71009E-10	-9.54887E-01	0.0	0.0	0.0	-8.26812E-03
9	-6.83907E-10	-1.16230E+00	0.0	0.0	0.0	-8.30701E-03
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

MODAL RESPONSE ANALYSIS OF BEAM WITH MODAL DAMPING(MODE 1-3)

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE

33

MAXIMUM VELOCITY VECTOR						
POINT-ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	-1.14231E+00	0.0	0.0	0.0	-8.70391E-02
3	-4.58183E-08	-4.13804E+00	0.0	0.0	0.0	-1.48471E-01
4	-6.63624E-08	-8.37071E+00	0.0	0.0	0.0	-1.86566E-01
5	-8.42485E-08	-1.33091E+01	0.0	0.0	0.0	-2.14937E-01
6	-9.88372E-08	-1.86165E+01	0.0	0.0	0.0	-2.54097E-01
7	-1.09628E-07	-2.43164E+01	0.0	0.0	0.0	-2.82334E-01
8	-1.16255E-07	-3.06764E+01	0.0	0.0	0.0	-2.95246E-01
9	-1.18491E-07	-3.77415E+01	0.0	0.0	0.0	-2.97428E-01
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

MAXIMUM ACCELERATION VECTOR						
POINT-ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	3.78892E+02	0.0	0.0	0.0	2.33112E+01
3	1.04659E-04	-8.69449E+02	0.0	0.0	0.0	-2.55275E+01
4	1.51582E-04	-1.50191E+03	0.0	0.0	0.0	-2.23856E+01
5	1.92430E-04	-1.91952E+03	0.0	0.0	0.0	-4.26318E+01
6	2.25745E-04	-1.97414E+03	0.0	0.0	0.0	-4.04867E+01
7	2.50386E-04	-2.00484E+03	0.0	0.0	0.0	-3.09637E+01
8	2.65518E-04	-2.31582E+03	0.0	0.0	0.0	-3.52941E+01
9	2.70621E-04	-2.45710E+03	0.0	0.0	0.0	-3.60580E+01
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

MODAL RESPONSE ANALYSIS OF BEAM WITH MODAL DAMPING(MODE 1-3)

FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 43

ELEMENT FORCE

(STEP NUM. 396)
TIME 9.9000E-01

ELM.ID		F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	BEGIN	0.0	-2.16603E+01	0.0	0.0	0.0	-3.89879E+03
	END	0.0	-2.16603E+01	0.0	0.0	0.0	-3.35721E+03
8	BEGIN	-2.15730E-05	-1.42616E+01	0.0	0.0	0.0	-3.01852E+02
	END	-2.15730E-05	-1.42616E+01	0.0	0.0	0.0	5.46880E+01

ELEMENT FORCE

(STEP NUM. 400)
TIME 1.0000E+00

ELM.ID		F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	BEGIN	0.0	-2.76467E+01	0.0	0.0	0.0	-4.76919E+03
	END	0.0	-2.76467E+01	0.0	0.0	0.0	-4.07803E+03
8	BEGIN	-2.15730E-05	-1.51696E+01	0.0	0.0	0.0	-3.20841E+02
	END	-2.15730E-05	-1.51696E+01	0.0	0.0	0.0	5.83980E+01

MAXIMUM ELEMENT FORCE

ELM.ID		F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	BEGIN	0.0	-6.85079E+01	0.0	0.0	0.0	-1.05056E+04
	END	0.0	-6.85079E+01	0.0	0.0	0.0	-8.79295E+03
2	BEGIN	-5.55407E-04	-6.53779E+01	0.0	0.0	0.0	-8.78579E+03
	END	-5.55407E-04	-6.53779E+01	0.0	0.0	0.0	-7.16385E+03
3	BEGIN	-2.49020E-04	-5.90673E+01	0.0	0.0	0.0	-7.16190E+03
	END	-2.49020E-04	-5.90673E+01	0.0	0.0	0.0	-5.70052E+03
4	BEGIN	-2.16789E-04	-5.40631E+01	0.0	0.0	0.0	-5.70691E+03
	END	-2.16789E-04	-5.40631E+01	0.0	0.0	0.0	-4.36740E+03
5	BEGIN	-1.76812E-04	-5.36150E+01	0.0	0.0	0.0	-4.37418E+03
	END	-1.76812E-04	-5.36150E+01	0.0	0.0	0.0	-3.04691E+03
6	BEGIN	-1.30778E-04	-5.44359E+01	0.0	0.0	0.0	-3.04141E+03
	END	-1.30778E-04	-5.44359E+01	0.0	0.0	0.0	-1.68051E+03

MODAL RESPONSE ANALYSIS OF BEAM WITH MODAL DAMPING(MODE 1-3)

FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 44

MAXIMUM ELEMENT FORCE

ELM.ID		F1	F2	F3	F4	F5	F6
7	BEGIN	-8.03116E-05	-4.70172E+01	0.0	0.0	0.0	-1.65677E+03
	END	-8.03116E-05	-4.70172E+01	0.0	0.0	0.0	-4.81343E+02
8	BEGIN	-2.70855E-05	-2.10888E+01	0.0	0.0	0.0	-4.44671E+02
	END	-2.70855E-05	-2.10888E+01	0.0	0.0	0.0	8.25502E+01

3.1.3 単純支持はりの応答スペクトル解析

(1) 問題

長さ 200 cm, 断面積 25 cm^2 , 断面 2 次モーメント 52.083 cm^4 の単純支持はりに応答変位スペクトルを与えた応答スペクトル解析を行なう。材料定数は弾性係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 質量密度 $8.1939 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^4$ であり, 応答変位スペクトルは表 3.1.3-1 に示す。

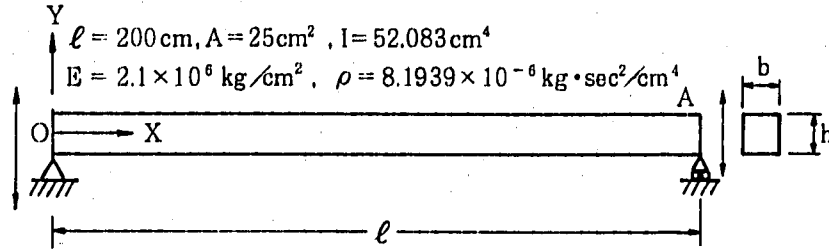


図 3.1.3-1 単純支持はり

表 3.1.3-1 応答変位スペクトル

周期 T(sec)	0.1	1.0
変位 u_y (cm)	1.12	1.12

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元弾性はり要素 SBEAM 2 を用いて図 3.1.3-2 に示す有限要素モデルを作成する。応答解析に使用するモードは 3 次までとし, 質量マトリックスは整合質量マトリックスを用いる。応答変位スペクトルは, 節点 1 と 9 の y 方向自由度を基盤自由度とし, この自由度に与える。拘束する自由度は表 3.1.3-2 に示す。

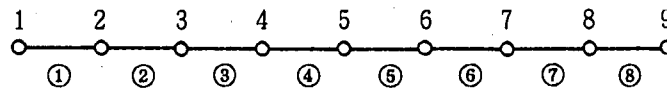


図 3.1.3-2 有限要素モデル

表 3.1.3 - 2 境界条件

節点番号	拘束自由度
1	$u_x, u_z, \theta_x, \theta_y$
2 ~ 9	u_z, θ_x, θ_y

(3) 解析結果

固有振動数とはり中央部の y 方向最大変位, 最大速度, 最大加速度を NASTRAN の解と比較して表 3.1.3 - 3 と表 3.1.3 - 4 に示す。各最大値は 1 次 ~ 3 次の値の 2 乗平均であり, 変位は基盤に対する相対量, 速度と加速度は絶対量である。また, 1 ~ 3 次のモード図を図 3.1.3 - 3 に示す。

表 3.1.3 - 3 固有振動数 [Hz]

モード	FINAS の解	NASTRAN の解
1 次	2.86878D+01	2.869503E+01
2 次	1.14691D+02	1.148080E+02
3 次	2.57988D+02	2.585833E+02

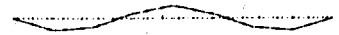
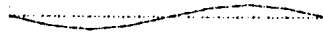
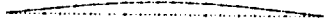
表 3.1.3 - 4 はり中央部の y 方向最大変位, 最大速度
および最大加速度

	FINAS の解	NASTRAN の解
最大変位 [cm]	1.50218E+00	1.503568E+00
最大速度 [cm/sec]	8.10592E+02	8.157213E+02
最大加速度 [cm/sec ²]	1.24707E+06	1.258620E+06

FINAG
MODE SHAPE

FINAG
MODE SHAPE

FINAG
MODE SHAPE



MODE NO. 1

GEOM. SCALE 1:50,000

DYNAMIC MODE



MODE NO. 2

GEOM. SCALE 1:50,000

DYNAMIC MODE



MODE NO. 3

GEOM. SCALE 1:50,000

DYNAMIC MODE

a) モード1

b) モード2

c) モード3

図 3.1.3-3 単純支持はりのモード図

(4) 入力データと解析結果のリスト

表 3.1.3-5 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	SPECTRUM RESPONSE OF A SIMPLE SUPPORTED BEAM							
4	DYNAMIC CONTROL	M	SR						
5	EIGENVALUE			3					
6	MODEL								
7	NODE								
8	1			0.0			8		9
9	9			200.0					
10	10			0.0	1.0				
11	ELEMENT TYPE								
12	1	SBEAM2							
13	CONNECTION								
14	**ELOOP1	8	1	1	1	0			
15	1	1	1	1	2	10			
16	**END1								
17	GEOMETRY								
18	1	6	25.0			52.083	52.083		
19	MATERIAL								
20	1								
21	E		2.10E6						
22	RHO		8.19394E-6						
23	D BOUNDARY								
24	1				1				
25	1				3	5			
26	2	9			3	5			
27	SPECTRUM								
28	1								
29	1	2							
30			0.0	0.1	1.12	1.0	1.12		
31	BASE NODE								
32	1	2							
33	1	9	8						
34	END MODEL								
35	OUTPUT								
36	STRUCTURE PLOT								
37	AXES	Z	X	Y					
38	VIEW		0.0	0.0	0.0				
39	PTITLE	DYNAMIC MODE							
40	MPLOT								
41	END OUTPUT								
42	END FINAS								
CARD NO.	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.1.3 - 6 解析結果のリスト (抜粋)

SPECTRUM RESPONSE OF A SIMPLE SUPPORTED BEAM

FINAS VERSION 9.0

11/26/85

PAGE 8

REAL EIGENVALUES

MODE	EIGENVALUE	FREQUENCY	PERIOD
1	3.24902D+04	2.86878D+01	3.48581D-02
2	5.19296D+05	1.14691D+02	8.71911D-03
3	2.62760D+06	2.57988D+02	3.87615D-03

PARTICIPATION FACTOR AND EFFECTIVE MASS

MODE NUM.		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	PARTICIPATION FACTOR	1.26470E-14	1.82186E-01	0.0	0.0	0.0	4.17418E-18
	EFFECTIVE MASS	1.59947E-28	3.31917E-02	0.0	0.0	0.0	1.74238E-35
	RATIO	1.08070E-12	9.00404E-01	0.0	0.0	0.0	0.0
2	PARTICIPATION FACTOR	-6.13603E-11	-9.68841E-08	0.0	0.0	0.0	1.54011E-16
	EFFECTIVE MASS	3.76509E-21	9.38652E-15	0.0	0.0	0.0	2.37194E-32
	RATIO	4.42710E-05	2.54632E-13	0.0	0.0	0.0	0.0
3	PARTICIPATION FACTOR	9.22185E-09	6.05922E-02	0.0	0.0	0.0	-6.64071E-14
	EFFECTIVE MASS	8.50426E-17	3.67141E-03	0.0	0.0	0.0	4.40990E-27
	RATIO	9.99955E-01	9.95958E-02	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL EFFECTIVE MASS		8.50464E-17	3.68631E-02	0.0	0.0	0.0	4.40993E-27

SPECTRUM RESPONSE OF A SIMPLE SUPPORTED BEAM

FINAS VERSION 9.0

11/26/85

PAGE 9

PLOTTER INFORMATION

PLOTTER = CALCOMP 1036

PLOT	MODE	SHAPE	AXES	SCALE FACTOR	VIEW ANGLE	FRAME SIZE
1.	MODE	SHAPE	+Z, +X, +Y	5.789E-01	0.0	210.2
		SCALE FACTOR		5.789E-01	0.0	297.2
2.	MODE	SHAPE	+Z, +X, +Y	5.789E-01	0.0	210.2
		SCALE FACTOR		5.789E-01	0.0	297.2
3.	MODE	SHAPE	+Z, +X, +Y	5.789E-01	0.0	210.2
		SCALE FACTOR		5.789E-01	0.0	297.2

MAXIMUM NODAL POINT DISPLACEMENTS

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.16350E-02
2	1.91602E-09	6.99657E-01	0.0	0.0	0.0	2.23834E-02
3	4.66580E-09	1.06220E+00	0.0	0.0	0.0	2.23693E-02
4	8.78591E-09	1.32929E+00	0.0	0.0	0.0	2.23552E-02
5	1.42663E-08	1.50218E+00	0.0	0.0	0.0	5.20075E-08
6	2.04568E-08	1.32929E+00	0.0	0.0	0.0	2.23552E-02
7	2.62218E-08	1.06220E+00	0.0	0.0	0.0	2.23693E-02
8	3.03132E-08	6.99656E-01	0.0	0.0	0.0	2.23834E-02
9	3.17917E-08	0.0	0.0	0.0	0.0	3.16349E-02
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

SPECTRUM RESPONSE OF A SIMPLE SUPPORTED BEAM

FINAS VERSION 9.0 11/26/85 PAGE 10

POINT-ID	MAXIMUM NODAL POINT VELOCITIES					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.64522E+01
2	3.10585E-06	7.17051E+02	0.0	0.0	0.0	1.43566E+01
3	7.56321E-06	5.73175E+02	0.0	0.0	0.0	2.57756E+01
4	1.42418E-05	3.78019E+02	0.0	0.0	0.0	3.35059E+01
5	2.31255E-05	8.10592E+02	0.0	0.0	0.0	7.68815E-05
6	3.31602E-05	3.78020E+02	0.0	0.0	0.0	3.35060E+01
7	4.25052E-05	5.73177E+02	0.0	0.0	0.0	2.57756E+01
8	4.91373E-05	7.17050E+02	0.0	0.0	0.0	1.43566E+01
9	5.15339E-05	0.0	0.0	0.0	0.0	3.64520E+01
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

POINT-ID	MAXIMUM NODAL POINT ACCELERATIONS					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.87298E+04
2	5.03454E-03	1.15149E+06	0.0	0.0	0.0	2.24832E+04
3	1.22599E-02	8.81814E+05	0.0	0.0	0.0	4.15282E+04
4	2.30858E-02	4.78821E+05	0.0	0.0	0.0	5.42556E+04
5	3.74862E-02	1.24707E+06	0.0	0.0	0.0	1.22106E-01
6	5.37523E-02	4.78823E+05	0.0	0.0	0.0	5.42558E+04
7	6.89003E-02	8.81817E+05	0.0	0.0	0.0	4.15283E+04
8	7.96510E-02	1.15149E+06	0.0	0.0	0.0	2.24834E+04
9	8.35357E-02	0.0	0.0	0.0	0.0	5.87295E+04
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ELM.ID		MAXIMUM ELEMENT FORCE					
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	BEGIN	4.02365E-03	4.39936E+03	0.0	0.0	0.0	5.86586E+03
	END	4.02365E-03	4.39936E+03	0.0	0.0	0.0	1.15809E+05
2	BEGIN	5.77455E-03	1.13877E+03	0.0	0.0	0.0	1.20280E+05
	END	5.77455E-03	1.13877E+03	0.0	0.0	0.0	9.77173E+04
3	BEGIN	8.65221E-03	5.15331E+03	0.0	0.0	0.0	8.98209E+04
	END	8.65221E-03	5.15331E+03	0.0	0.0	0.0	5.61188E+04
4	BEGIN	1.15089E-02	2.91531E+03	0.0	0.0	0.0	6.48452E+04
	END	1.15089E-02	2.91531E+03	0.0	0.0	0.0	1.32597E+05
5	BEGIN	1.30000E-02	2.91527E+03	0.0	0.0	0.0	1.32597E+05
	END	1.30000E-02	2.91527E+03	0.0	0.0	0.0	6.48461E+04
6	BEGIN	1.21064E-02	5.15339E+03	0.0	0.0	0.0	5.61194E+04
	END	1.21064E-02	5.15339E+03	0.0	0.0	0.0	8.98221E+04

SPECTRUM RESPONSE OF A SIMPLE SUPPORTED BEAM

FINAS VERSION 9.0 11/26/85 PAGE 11

ELM.ID		MAXIMUM ELEMENT FORCE					
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
7	BEGIN	8.59202E-03	1.13870E+03	0.0	0.0	0.0	9.77186E+04
	END	8.59202E-03	1.13870E+03	0.0	0.0	0.0	1.20280E+05
8	BEGIN	3.10472E-03	4.39932E+03	0.0	0.0	0.0	1.15807E+05
	END	3.10472E-03	4.39932E+03	0.0	0.0	0.0	5.86545E+03

3.2 直接積分法

3.2.1 片持ちはりの時刻歴応答解析

(1) 問題

長さ 200 cm, 断面積 25 cm^2 , 断面 2 次モーメント 52.083 cm^4 の片持ちはりの自由端に衝撃荷重を加える場合につき, 直接積分法により減衰を考慮した時刻歴応答解析を行なう。材料定数は弾性係数 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 質量密度 $8.1939 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}^4$ である。減衰特性は比例減衰とし, 定数は式 (3.2.1-1) において $\alpha_m = 0.0$, $\alpha_k = 6.0 \times 10^{-4}$ とする。

$$[C] = \sum \alpha_m [m] + \sum \alpha_k [k] \quad (3.2.1-1)$$

[C]: 減衰マトリックス

[m]: 要素の質量マトリックス

[k]: 要素の剛性マトリックス

また, 負荷条件は図 3.2.1-2 に示すものとする。

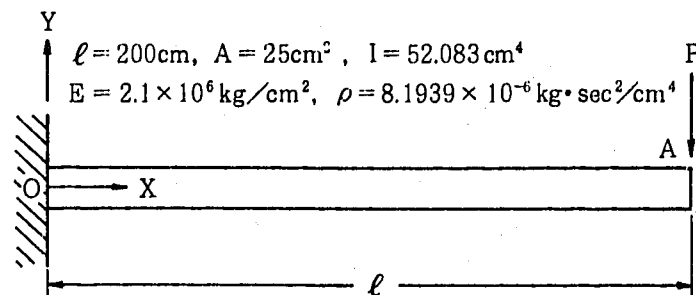


図 3.2.1-1 片持ちはり

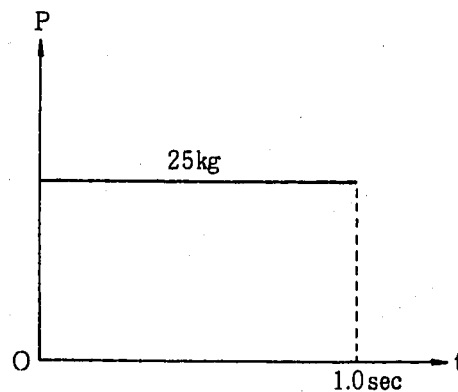


図 3.2.1-2 負荷条件

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元弾性はり要素SBEAM 2を用いて図3.2.1-3に示す有限要素モデルを作成する。荷重は節点9の-y方向に負荷し、時間増分は 2.5×10^{-3} 秒/ステップとする。質量マトリックスは整合質量マトリックスを用い、境界条件は表3.2.1-1に示すものを適用する。

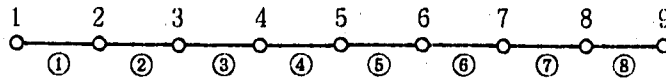


図3.2.1-3 有限要素モデル

表3.2.1-1 境界条件

節点番号	拘束自由度
1	$u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$
2~9	u_z, θ_x, θ_y

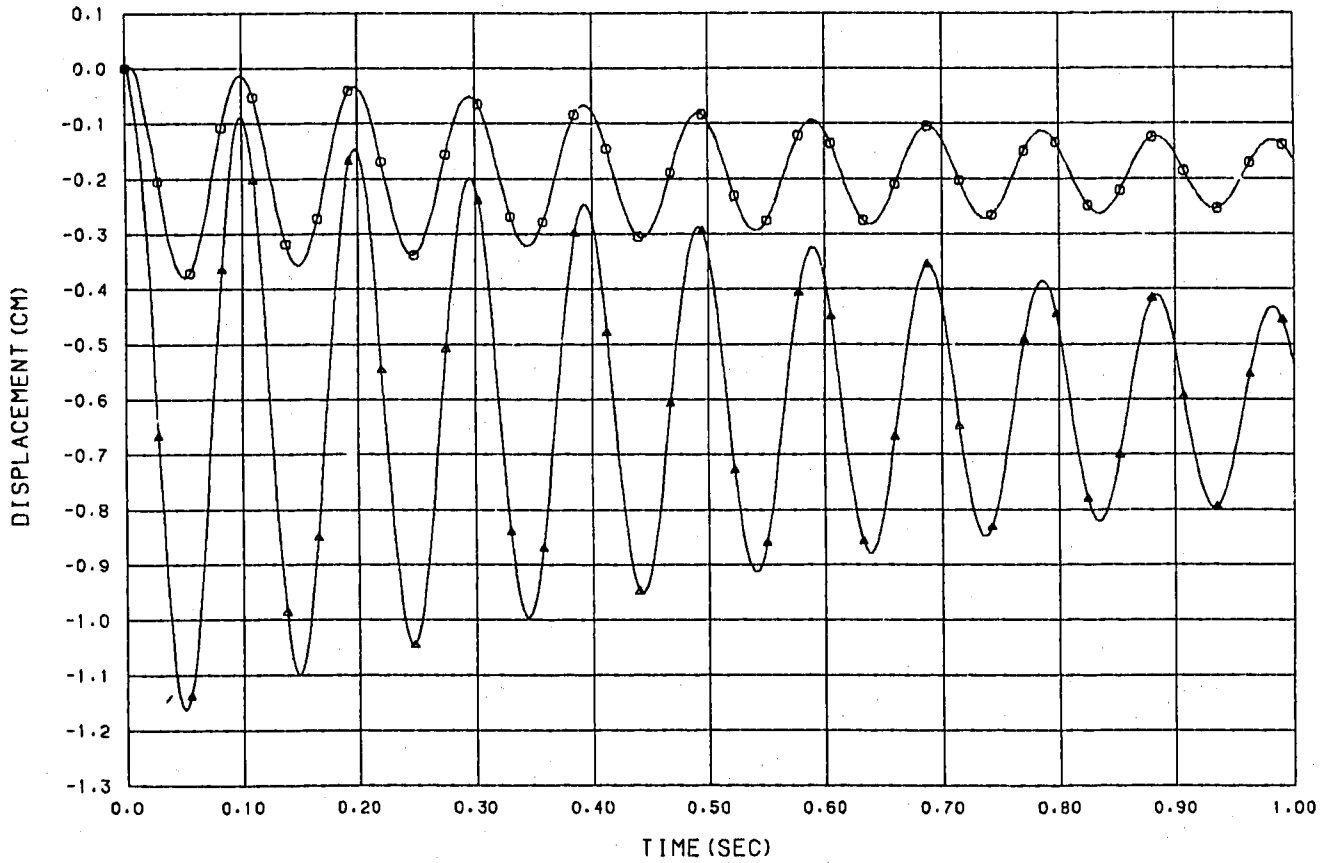
(3) 解析結果

はりの自由端におけるy方向変位の代表時刻での値をNASTRANの解と比較して表3.2.1-2に示す。時間積分のスキームはいずれのプログラムもNewmarkの β 法を使用している。また、自由端と中間点におけるy方向変位の時刻歴を図3.2.1-4に、固定端におけるz軸回りの反力つまり固定端モーメントの時刻歴を図3.2.1-5にそれぞれ示す。

表 3.2.1-2 自由端の y 方向変位

時刻 t(sec)	u _y (mm)	
	FINAS の解	NASTRAN の解
0.05	-1.16343 E+00	-1.163386 E+00
0.15	-1.09898 E+00	-1.098520 E+00
0.25	-1.03439 E+00	-1.035046 E+00
0.35	-9.72408 E-01	-9.745234 E-01
0.45	-9.14149 E-01	-9.178171 E-01
0.55	-8.60372 E-01	-8.655497 E-01
0.65	-8.11550 E-01	-8.180951 E-01
0.75	-7.67921 E-01	-7.756224 E-01
0.85	-7.29529 E-01	-7.381368 E-01
0.95	-6.96268 E-01	-7.055122 E-01

FINAS



HISTORY OF DISPLACEMENT

○ MIDDLE
△ FREE END

図 3.2.1-4 自由端と中間点における y 方向変位の時刻歴

FINAS

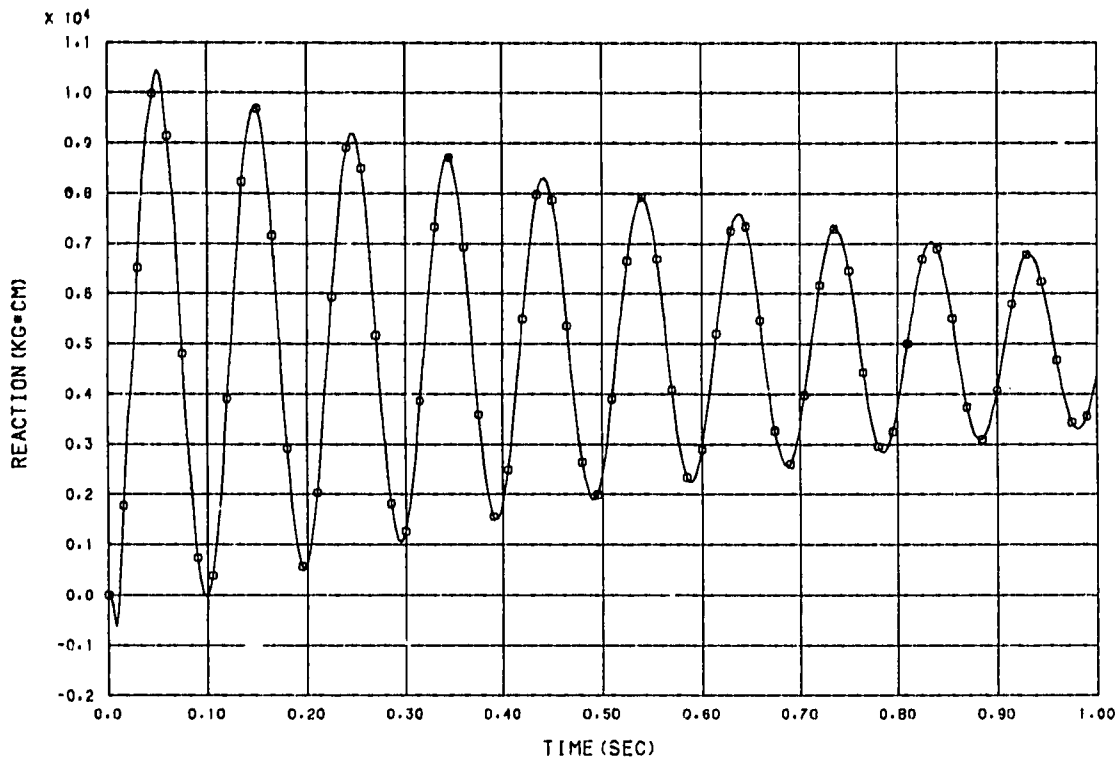


図 3.2.1-5 固定端における Z 軸回りのモーメントの時刻歴

(4) 入力データと解析結果のリスト

表 3.2.1-3 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	FINAS									
2	TITLE DIRECT INTEGRATION ANALYSIS OF A BEAM WITH DAMPING									
3	DYNAMIC LD									
4	MODEL									
5	NODE									
6	1									
7	9			0.0			8		9	
8	10			200.0						
9				0.0	1.0					
10	ELEMENT TYPE SBEAM2									
11	CONNECTION									
12	**ELOOP1	8	1	1	1	0				
13	1	1	1	1	2	10				
14	**END1									
15	GEOMETRY									
16	1	6	25.0				52.083	52.083		
17	MATERIAL									
18	1									
19		E		2.10E6						
20		RHO		8.1939E-6						
21	D BOUNDARY									
22		1			1	6				
23		2	9		3	5				
24	DAMPING									
25	F2			1	0.0	6.0E-4				
26	TIME SERIES									
27	1									
28	F2	2		1.0						
29			-1.0	-1.0						
30	RESPONSE									
31	TIME	1.0	400							
32	EXCIT	1	25.0	9	2					
33	END MODEL									
34	OUTPUT									
35	OTIME2	1	4	40	4	60	400	20		
36	NSET1	1	5	9						
37	NSET1	2	1							
38	ESET1	1	1	8						
39	#									
40	PRINT SELECT									
41	DISP	1	1							
42	VELO	1	1							
43	ACCE	1	1							
44	REAC	2	1							
45	ELFO	1		1						
46	#									
47	XYPLOT									
48	PTITLE	HISTORY OF DISPLACEMENT								
49	XTITLE	TIME(SEC)								
50	YTITLE	DISPLACEMENT(CM)								
51	CURVE	1			10MIDDLE					
52	CURVE	2			10FREE END					
53	FRAME	A4H								
54	XDIVISION	10	0							
55	YDIVISION		0							
56	XRANGE		0.0	1.0						
57	PLOT1	DISP2	5	DISP2	9				RTIME	
58	#									
59	PTITLE	HISTORY OF VELOCITY								
60	YTITLE	VELOCITY(CM/SEC)								
61	PLOT1	VELO2	5	VELO2	9				RTIME	
62	#									
63	PTITLE	HISTORY OF ACCELERATION								
64	YTITLE	ACCELERATION(CM/SEC**2)								
65	PLOT1	ACCE2	5	ACCE2	9				RTIME	
66	#									
67	PTITLE	HISTORY OF REACTION AT THE FIXED END								
68	CURVE	1			5REACTION					
69	YTITLE	REACTION(KG*CM)								
70	PLOT1	REAC6	1						RTIME	
71	END OUTPUT									
72	END FINAS									

表 3.2.1 - 4 解析結果のリスト (抜粋)

DIRECT INTEGRATION ANALYSIS OF A BEAM WITH DAMPING FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 26

(STEP NUM. 360)
TIME 9.0000E-01

DISPLACEMENT VECTOR

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
5	0.0	-1.55596E-01	0.0	0.0	0.0	-2.83113E-03
9	0.0	-5.06787E-01	0.0	0.0	0.0	-3.86432E-03

VELOCITY VECTOR (STEP NUM. 360)
TIME 9.0000E-01

POINT-ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6
5	0.0	-3.86632E+00	0.0	0.0	0.0	-6.27971E-02
9	0.0	-1.07988E+01	0.0	0.0	0.0	-7.43294E-02

ACCELERATION VECTOR (STEP NUM. 360)
TIME 9.0000E-01

POINT-ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6
5	0.0	-1.34712E+02	0.0	0.0	0.0	-2.31869E+00
9	0.0	-3.85706E+02	0.0	0.0	0.0	1.07434E+00

DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 380)
TIME 9.5000E-01

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
5	0.0	-2.19927E-01	0.0	0.0	0.0	-3.93301E-03
9	0.0	-6.96268E-01	0.0	0.0	0.0	-5.16847E-03

DIRECT INTEGRATION ANALYSIS OF A BEAM WITH DAMPING FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 27

(STEP NUM. 380)
TIME 9.5000E-01

VELOCITY VECTOR

POINT-ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6
5	0.0	3.56761E+00	0.0	0.0	0.0	6.11066E-02
9	0.0	1.05080E+01	0.0	0.0	0.0	7.23203E-02

ACCELERATION VECTOR (STEP NUM. 380)
TIME 9.5000E-01

POINT-ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6
5	0.0	1.12725E+02	0.0	0.0	0.0	1.92358E+00
9	0.0	3.42579E+02	0.0	0.0	0.0	5.96388E+00

DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 400)
TIME 1.0000E+00

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
5	0.0	-1.66043E-01	0.0	0.0	0.0	-3.01008E-03
9	0.0	-5.37558E-01	0.0	0.0	0.0	-4.07611E-03

VELOCITY VECTOR (STEP NUM. 400)
TIME 1.0000E+00

POINT-ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6
5	0.0	-3.45473E+00	0.0	0.0	0.0	-5.91728E-02
9	0.0	-1.01756E+01	0.0	0.0	0.0	-7.00393E-02

DIRECT INTEGRATION ANALYSIS OF A BEAM WITH DAMPING

FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 34

NODAL POINT REACTION							(STEP NUM. 320)
POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6	TIME 8.0000E-01
1	0.0	1.62804E+01	0.0	0.0	0.0	3.73285E+03	
NODAL POINT REACTION							(STEP NUM. 340)
POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6	TIME 8.5000E-01
1	0.0	3.25001E+01	0.0	0.0	0.0	6.08993E+03	
NODAL POINT REACTION							(STEP NUM. 360)
POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6	TIME 9.0000E-01
1	0.0	1.86321E+01	0.0	0.0	0.0	4.07460E+03	
NODAL POINT REACTION							(STEP NUM. 380)
POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6	TIME 9.5000E-01
1	0.0	3.03210E+01	0.0	0.0	0.0	5.77326E+03	

DIRECT INTEGRATION ANALYSIS OF A BEAM WITH DAMPING

FINAS VERSION 9.0 11/25/85 PAGE 44

ELEMENT FORCE							(STEP NUM. 380)
ELM. ID		F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	BEGIN	0.0	-3.07349E+01	0.0	0.0	0.0	-5.83384E+03
	END	0.0	-3.07349E+01	0.0	0.0	0.0	-5.06546E+03
8	BEGIN	0.0	-2.58789E+01	0.0	0.0	0.0	-6.43238E+02
	END	0.0	-2.58789E+01	0.0	0.0	0.0	3.62500E+00
ELEMENT FORCE							(STEP NUM. 400)
ELM. ID		F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	BEGIN	0.0	-2.02417E+01	0.0	0.0	0.0	-4.30815E+03
	END	0.0	-2.02417E+01	0.0	0.0	0.0	-3.80210E+03
8	BEGIN	0.0	-2.42891E+01	0.0	0.0	0.0	-6.10039E+02
	END	0.0	-2.42891E+01	0.0	0.0	0.0	-2.68750E+00

3.2.2 初期変位のあるばね質量系の自由振動解析

(1) 問題

図 3.2.2-1 に示す減衰のある 1 自由度のばね質量系の一端に荷重を静かに負荷し、次に瞬時に荷重を解放した時の自由振動について解析を行なう。構造の特性はばね定数 0.5 kg/mm 、減衰定数 $2.14 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{sec/mm}$ 、集中質量 $5.1020 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}$ とし、最初に負荷する荷重はばねを引張る方向に 5 kg とする。

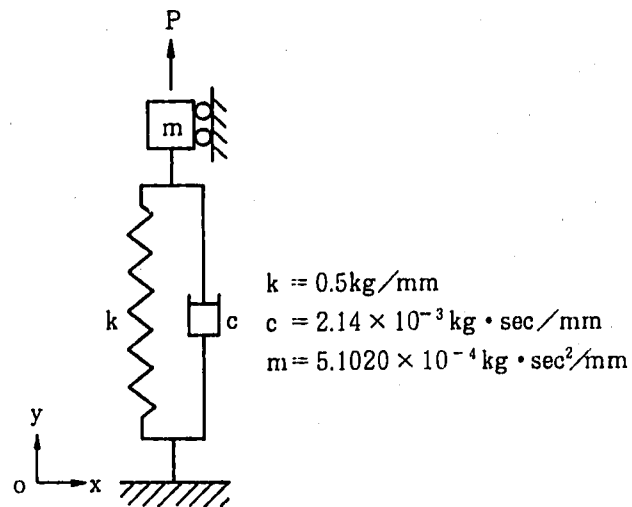


図 3.2.2-1 減衰のある 1 自由度ばね質量系モデル

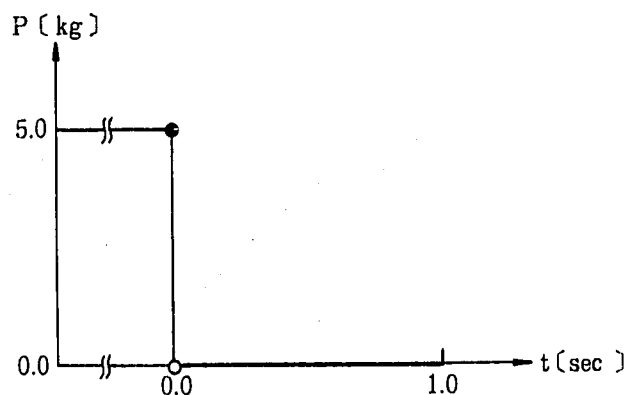


図 3.2.2-2 負荷条件

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元ばね減衰要素 LCOMB 2を使用した有限要素モデルを図 3.2.2-3 に示す。図では便宜上、要素は長さを持つように書かれているが、実際の有限要素モデルでは節点 1 と 2 の座標を同一にし、長さを持たない要素を作成する。

解析は初期条件を求める静的解析と、その結果を使用する直接積分法による動的解析の 2 回に分けて行なうが、動的解析は静的解析のリスタートテープを使用したリスタート計算として実施する。負荷は静的解析で節点 1 の y 方向に与え、動的解析では無負荷とする。境界条件は 2 つの解析で同一であり、表 3.2.2-1 に示すものを使用する。動的解析における集中質量は節点 1 の y 方向に付加し、初期条件は変位については静的解析の結果をリスタートテープから読み込み、初期速度はすべて零とする。また、時間増分は 4.0×10^{-3} 秒/ステップを用いる。

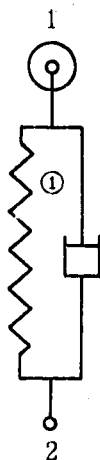


図 3.2.2-3 有限要素モデル

表 3.2.2-1 境界条件

節点番号	拘束自由度
1	$u_x, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$
2	$u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$

(3) 理論解

減衰のある1自由度ばね質量系の自由振動の運動方程式は次式で与えられる。⁸⁾

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3.2.2-1)$$

ここで

$$\alpha = \frac{c}{2m}, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

とおくと、式(3.2.2-1)は次のようになる。

$$\ddot{u} + 2\alpha\dot{u} + \omega^2 u = 0 \quad (3.2.2-2)$$

式(3.2.2-2)の一般解は次式で与えられる。

$$u(t) = e^{-\alpha t} (c_1 \cos \omega_d t + c_2 \sin \omega_d t) \quad (3.2.2-3)$$

ここで、 ω_d は減衰固有円振動数であり、次式で表わされる。

$$\omega_d = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2} \quad (3.2.2-4)$$

初期条件は解析条件より次のように与えられる。

$$u(0) = u_0, \quad \dot{u}(0) = 0 \quad (3.2.2-5)$$

式(3.2.2-5)より式(3.2.2-3)の係数 C_1 と C_2 は次のようになる。

$$C_1 = u_0, \quad C_2 = \frac{\alpha u_0}{\omega_d} \quad (3.2.2-6)$$

したがって、式(3.2.2-3)は次式に書き換えることができる。

$$u(t) = e^{-\alpha t} \left(u_0 \cos \omega_d t + \frac{\alpha u_0}{\omega_d} \sin \omega_d t \right) \quad (3.2.2-7)$$

また、減衰振動の周期 τ_d および対数減衰率 δ は次式で与えられる。

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - \alpha^2}} \quad (3.2.2-8)$$

$$\delta = \ell_n \frac{u_{\max(i)}}{u_{\max(i+1)}} = \alpha \tau_d$$

ここで、 $u_{\max(i)}$ は*i*番目の周期の最大振幅である。

(4) 解析結果

FINASの解を理論解と比較して表3.2.2-2~3.2.2-4に示す。表3.2.2-2は各周期における最大振幅とその時刻である。表3.2.2-3と表3.2.2-4はそれぞれ表3.2.2-2から求めた減衰振動の周期と対数減衰率である。また、節点1における*y*方向変位の時刻歴を図3.2.2-4に示す。

表 3.2.2 - 2 各周期の最大振幅と時刻

周期番号	FINAS の解		理 論 解	
	最大振幅 (mm)	時 刻 (sec)	最大振幅 (mm)	時 刻 (sec)
1	1.00000E+01	0.0	10.0	0.0
2	6.55150E+00	2.0400E-01	6.55815	0.201160
3	4.30045E+00	4.0400E-01	4.30093	0.402320
4	2.82027E+00	6.0800E-01	2.82062	0.603480
5	1.85423E+00	8.0800E-01	1.84980	0.804640

表 3.2.2 - 3 減衰振動の周期

	FINAS の解	理 論 解
$(\tau_d)_{1-2}$	2.0400E-01	0.201160
$(\tau_d)_{2-3}$	2.0000E-01	0.201160
$(\tau_d)_{3-4}$	2.0400E-01	0.201160
$(\tau_d)_{4-5}$	2.0000E-02	0.201160

表 3.2.2 - 4 対数減衰率

	FINAS の解	理 論 解
δ_{1-2}	0.42289	0.42188
δ_{2-3}	0.42097	0.42188
δ_{3-4}	0.42189	0.42188
δ_{4-5}	0.41936	0.42188

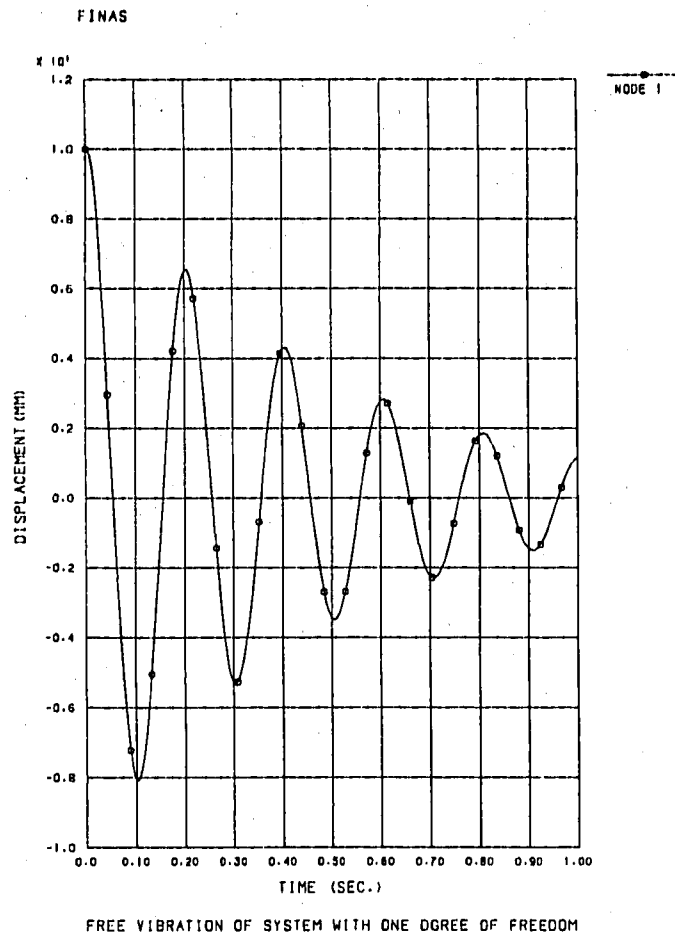


図 3.2.2 - 4 節点1のy方向変位の時刻歴

(5) 入力データ

表 3.2.2 - 5 初期条件を求める静的解析の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		FINAS							
3		STATIC	E						
4		SAVE							
5		TITLE	FREE VIBRATION OF SYSTEM WITH ONE DEGREE OF FREEDOM						
6		SUBTITLE	STATIC ANALYSIS						
7		MODEL							
8		NODE	1						
9			2						
10		ELEMENT TYPE							
11			1	L	COMB2				
12		CONNECTION							
13			1	1	1	2			
14		GEOMETRY							
15			7	0.5	2.14E-3	0.0	0.0	0.0	1.0
16		BOUNDARY							0.0
17			1						
18			1		1				
19			1		3	6			
20			2		1	6			
21		FORCE							
22			1						
23			1		2	5.0			
24		HISTORY							
25		INTERVAL	1						
26				BOUN	1	1.0			
27				FORC	1	1.0			
28		END MODEL							
29		END FINAS							
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.2.2-8 初期条件を静的解析のリスタートテープから読み込む動的解析の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	DYNAMIC	LD							
4	RESTART								
5	TITLE	FREE VIBRATION OF SYSTEM WITH ONE DEGREE OF FREEDOM							
6	SUBTITLE	LINEAR TRANSIENT ANALYSIS (RESTART FROM STATIC ANALYSIS)							
7	MODEL								
8	ADD MASS								
9	D BOUNDARY	1		2		5.102E-4			
10		1		1					
11		1		3	6				
12		2		1	6				
13	TIME SERIES								
14	1								
15	F2	2	1.0						
16	RESPONSE	0.0	0.0						
17	TIME	1.0	250						
18	EXCIT	1	1.0	1	2				
19	END MODEL								
20	OUTPUT								
21	PRINT SELECT								
22	NSET1	1	1						
23	DISP	1							
24	XYPLOT								
25	PTITLE	FREE VIBRATION OF SYSTEM WITH ONE DGREE OF FREEDOM							
26	XTITLE	TIME (SEC.)							
27	YTITLE	DISPLACEMENT(MM)							
28	XRANGE	0.0	1.0						
29	YRANGE	-10.0	12.0						
30	XDIVISION	10	0						
31	YDIVISION	11	0						
32	CURVE	1		1	10	NODE 1			
33	PLOT1	DISP2	1						
34	END OUTPUT								RTIME
35	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4. 温度解析

4.1 定常温度解析

4.1.1 円筒の定常温度解析

(1) 問題

内半径 100 mm, 肉厚 10 mm の円筒の内部をナトリウムが流れ, ヒーターによる熱流束が外壁に与えられる場合についての定常温度解析を行なう。ナトリウムの温度は 450℃であり, 熱流束は $1.0 \times 10^{-7} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{sec}$ である。また, 円筒の熱伝導係数は $4.7 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm} \cdot \text{sec} \cdot \text{℃}$, ナトリウムと円筒内壁との境界における熱伝達係数は $4.3 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{℃}$ とする。

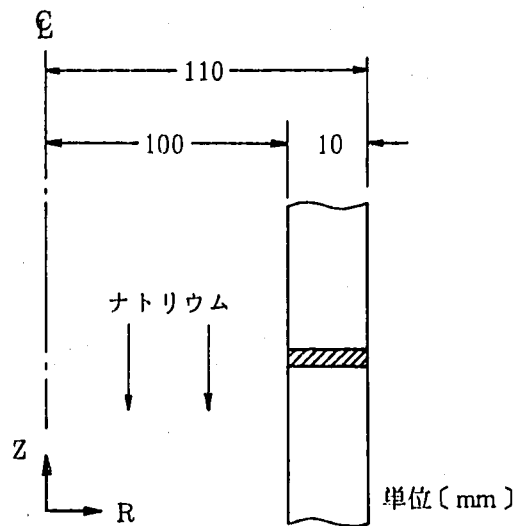


図 4.1.1-1 円筒

(2) 有限要素モデルと解析条件

熱伝導 4 節点四辺形軸対称要素 HQAX 4 と熱伝達 2 節点軸対称要素 FLAX 2 を用いて図 4.1.1-2 に示す有限要素モデルを作成する。境界条件は図 4.1.1-3 に従い, 熱伝達条件を要素 11 に, 熱流束を要素 5 の節点 6 と 16 から成る辺にそれぞれ与える。

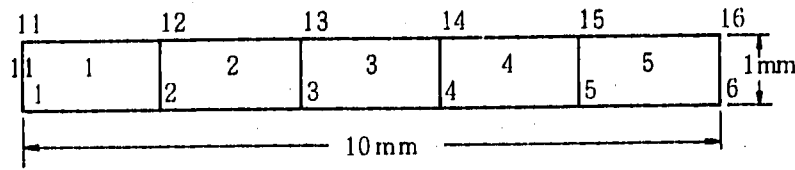


図 4.1.1-2 有限要素モデル

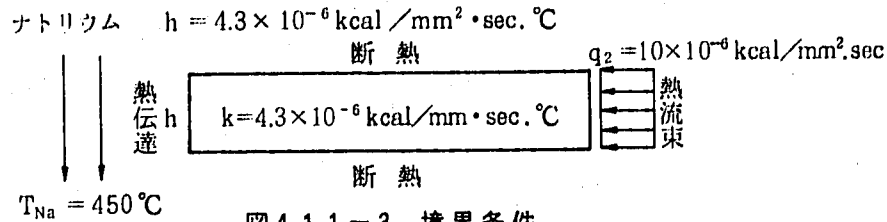


図 4.1.1-3 境界条件

(3) 理論解

内半径を a , 外半径を b とすると, 断面内の温度分布と熱流束はそれぞれ次式で表わすことができる。⁹⁾

$$T = bq_2 \left\{ \frac{1}{ha} + \frac{1}{k} \ln \left(\frac{r}{a} \right) \right\} + T_{Na} \quad (4.1.1-1)$$

$$q_r = -q_2 \frac{b}{r} \quad (4.1.1-2)$$

(4) 解析結果

節点温度と要素中心における熱流束を表 4.1.1-1 と表 4.1.1-2 にそれぞれ示し, 肉厚方向の温度分布を図 4.1.1-4 に示す。

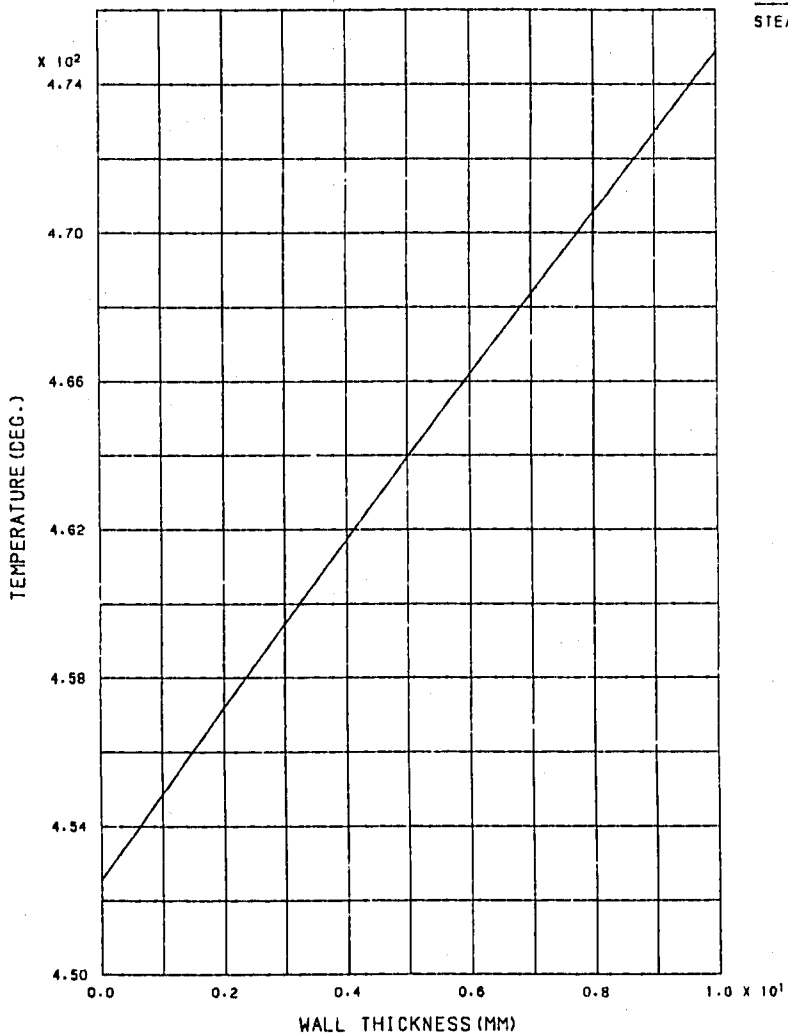
表 4.1.1-1 節点温度

節点番号	温 度 T (°C)	
	FINAS の解	理 論 解
1, 11	4.52558 E+02	452.558
2, 12	4.57192 E+02	457.193
3, 13	4.61737 E+02	461.737
4, 14	4.66195 E+02	466.196
5, 15	4.70570 E+02	470.570
6, 16	4.74864 E+02	474.865

表 4.1.1 - 2 要素中心における熱流束

要素番号	熱流束 q_r (kcal/mm ² ·sec)	
	FINAS の解	理論解
1	-1.08911E-05	-1.08911 × 10 ⁻⁵
2	-1.06796E-05	-1.06796 × 10 ⁻⁵
3	-1.04762E-05	-1.04762 × 10 ⁻⁵
4	-1.02804E-05	-1.02804 × 10 ⁻⁵
5	-1.00917E-05	-1.00917 × 10 ⁻⁵

FINAS



TEMPERATURE DISTRIBUTION THROUGH THE WALL

図 4.1.1 - 4 肉厚方向温度分布

(5) 入力データと解析結果のリスト

表 4.1.1-3 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	STEADY STATE HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A PIPE							
4	HEAT								
5	MODEL								
6	NODE								
7	1			100.0	0.0			5	6
8	6			110.0	0.0				
9	11			100.0	1.0			5	16
10	16			110.0	1.0				
11	ELEMENT TYPE								
12	1 HQAX4								
13	2 FLAX2								
14	CONNECTION								
15	1 1 1 1 2 11 12							5	
16	11 2 1 1 11								
17	MATERIAL								
18	1								
19	FILM COEFFICIENT			4.70E-6					
20	1			4.3E-6					
21	CONVECTION								
22	1								
23	11				1.0	1.0			
24	HEAT INPUT								
25	1								
26	1 5						10.0E-6	10.0E-6	
27	HISTORY								
28	INTERVAL								
29	CONV		1	450.0					
30	HEAT		1	1.0					
31	END MODEL								
32	OUTPUT								
33	STRUCTURE PLOT								
34	PTITLE								
35	IPLOT								
36	¥								
37	XYPLOY								
38	PTITLE								
39	XTITLE								
40	YTITLE								
41	NLIST2		1 1 6						
42	CURVE		1 0	STEADY					
43	PLOT2		TEMP NLIST	1 1					
44	END OUTPUT								
45	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.1.1-4 解析結果のリスト

ANALYSIS CONTROL DATA IMAGE
 1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
 FINAS 0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
 TITLE STEADY STATE HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A PIPE
 HEAT

MODEL DATA IMAGE
 1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
 0- MODEL
 1- NODE
 2- 1 100.0 0.0 5 6
 3- 6 110.0 0.0
 4- 11 100.0 1.0 5 16
 5- 16 110.0 1.0
 6- ELEMENT TYPE
 7- 1 HQAX4
 8- 2 FLAX2
 9- CONNECTION
 10- 1 1 1 2 11 12 5
 11- 11 2 1 1 11
 12- MATERIAL
 13- 1
 14- K 4.70E-6
 15- FILM COEFFICIENT
 16- 1 4.3E-6
 17- CONVECTION
 18- 1
 19- HEAT INPUT 11 1.0 1.0
 20- 1
 21- 1 5 3 10.0E-6 10.0E-6
 22- HISTORY
 23- INTERVAL
 24- CONV 1 450.0
 25- HEAT 1 1.0
 26- END MODEL
 27-

OUTPUT CONTROL DATA IMAGE

```

1.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
OUTPUT
STRUCTURE PLOT
PTITLE FEM MODEL
IPLOT BOTH
v
XYPLOY
PTITLE TEMPERATURE DISTRIBUTION THROUGH THE WALL
XTITLE WALL THICKNESS(MM)
YTITLE TEMPERATURE(DEG.)
NLIST2 1 1 6
CURVE 1 0 STEADY
PLOT2 TEMP NLIST 1 1
END OUTPUT
END FINAS

```

- *** USER WARNING MESSAGE 4901.
UNDEFINED SPECIFIC HEAT DATA.
- *** USER WARNING MESSAGE 4902.
UNDEFINED DENSITY.

CONTROL DATA DESCRIPTION

CONTROL DATA

TEMPERATURE UNIT IS CENTIGRADE

OFFSET TEMPERATURE = 2.7315E+02

MODEL DATA DESCRIPTION

NODAL COORDINATE

NUMBER OF NODAL POINTS				12
NODE	X1	X2		
1	100.000	0.0		
2	102.000	0.0		
3	104.000	0.0		
4	106.000	0.0		
5	108.000	0.0		
6	110.000	0.0		
11	100.000	1.00000		
12	102.000	1.00000		
13	104.000	1.00000		
14	106.000	1.00000		
15	108.000	1.00000		
16	110.000	1.00000		
MAXIMUM VALUE	NODE- 6 110.000	NODE- 11 1.00000	NODE-	
MINIMUM VALUE	NODE- 1 100.000	NODE- 0.0	NODE- 1	NODE-

ELEMENT TYPE

TYPE	NAME
1	HQAX4
2	FLAX2

ELEMENT CONNECTION

NUMBER OF ELEMENTS				6
ELEMENT	TYPE	GEOM	MAT	NODES
1	1		1	1 2 11 12
2	1		1	2 3 12 13
3	1		1	3 4 13 14
4	1		1	4 5 14 15
5	1		1	5 6 15 16
11	2		1	1 11

MODEL DATA DESCRIPTION

MATERIAL PROPERTY

IDENTIFICATION NUMBER *** 1
 ANISOTROPY OF CONDUCTIVITY ISOTROPIC
 K VALUE
 0.470000E-05

FILM COEFFICIENT

IDENTIFICATION NUMBER *** 1
 H VALUE
 0.430000E-05

HEAT INPUT

IDENTIFICATION NUMBER *** 1
 ELEMENT TYPE PARAM P1 P2 P3 P4
 5 1 3 0.100000E-04 0.100000E-04 0.0 0.0

CONVECTION

IDENTIFICATION NUMBER *** 1
 ELEMENT TYPE PARAM P1 P2 P3 P4
 11 1.00000 1.00000 0.0 0.0

LOAD HISTORY

NUM	IDENT	FACTOR	INCREMENT	TOTAL
1	HEAT INPUT	1.0000	REAL TIME	0.0
	CONVECTION	450.00		0.0

STEADY STATE HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A PIPE

FINAS VERSION 9.0 01/31/86 PAGE 7

PLOTTER INFORMATION

PLOTTER = CALCOMP , 1036
 PLOT 1. UNDEFORMED SHAPE
 AXES+Z, +X, +Y VIEW ANGLE 0.0 : 0.0 : 0.0
 SCALE FACTOR 1.250E+01 FRAME SIZE 210.2 : 297.2

STEADY STATE HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A PIPE

FINAS VERSION 9.0 01/31/86 PAGE 8

NODE POINT TEMPERATURE		(STEP NUM. 1)	
POINT-ID	D1	POINT-ID	D1
1	4.52558E+02		
2	4.57192E+02		
3	4.61737E+02		
4	4.66195E+02		
5	4.70570E+02		
6	4.74864E+02		
11	4.52558E+02		
12	4.57192E+02		
13	4.61737E+02		
14	4.66195E+02		
15	4.70570E+02		
16	4.74864E+02		

HEAT FLUX				(STEP NUM. 1)
ELM. ID-POINT	F1	F2	F3	
1 - 5	HT. FLUX	-1.08911E-05	0.0	
2 - 5	HT. FLUX	-1.06796E-05	-6.67910E-19	
3 - 5	HT. FLUX	-1.04762E-05	-6.67910E-19	
4 - 5	HT. FLUX	-1.02804E-05	-4.00746E-19	
5 - 5	HT. FLUX	-1.00917E-05	-4.00746E-19	

HEAT FLOW		(STEP NUM. 1)
ELM. ID	F1	
11	HT. FLOW	-6.91150E-03

STEADY STATE HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A PIPE

FINAS VERSION 9.0 01/31/86 PAGE 9

XY - PLOTTER INFORMATION

PLOTTER = CALCOMP , 1036
 PLOT 2. TYPE 2 COMMAND NUMBER 1. TEMPERATURE DISTRIBUTION THROUGH THE WALL
 CURVE 1, TEMP ALONG NLIST 1
 YMIN(ALL DATA)= 4.52558E+02 AT X= 0.0 YMAX(ALL DATA)= 4.74864E+02 AT X= 1.00000E+01

4.1.2 無限板の定常温度解析

(1) 問題

板厚 100 mm の無限板の両面にそれぞれ 300℃ と 30℃ の規定温度を与える場合について定常温度解析を行なう。ここで熱伝導係数は温度依存とし、式 (4.1.2 - 1) で与えられるものとする。

$$k = k_0 (1 + aT)$$

$$k_0 = 4.0 \times 10^{-5} \text{ kcal/mm} \cdot \text{hr} \cdot \text{°C} \quad (4.1.2 - 1)$$

$$a = 0.0022 \text{ °C}^{-1}$$

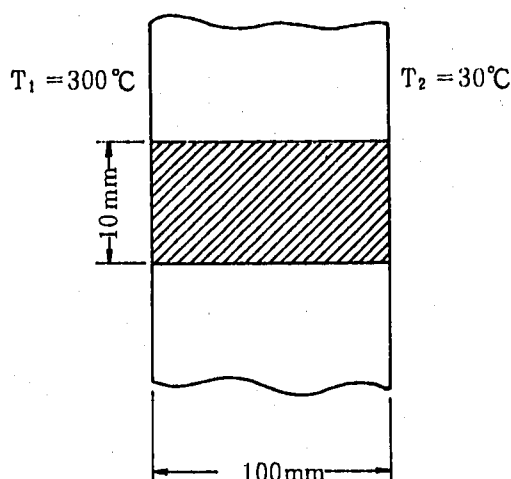


図 4.1.2 - 1 無限板の断面

(2) 有限要素モデルと解析条件

熱伝導 8 節点四辺形平面要素 HQMEM 8 を用いて図 4.1.2 - 2 に示す有限要素モデルを作成する。境界条件は図 4.1.2 - 3 に従い、節点 1, 11, 21 に 300℃, 節点 5, 15, 25 に 30℃ の規定温度を与える。また、材料の温度依存性を考慮して予測子 - 修正子法による繰返しを 2 回行なう。

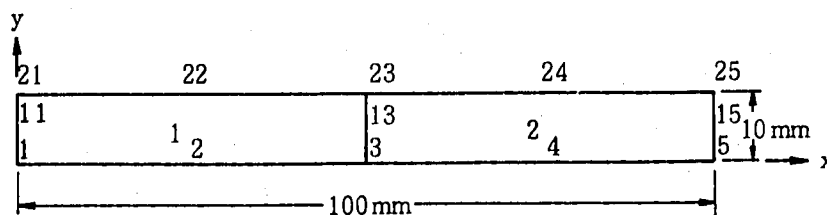


図 4.1.2 - 2 有限要素モデル

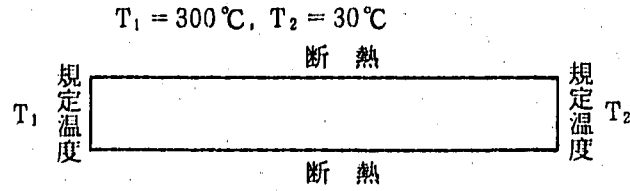


図 4.1.2 - 3 境界条件

(3) 理論解

無限板の両表面の位置をそれぞれ $x = 0$, $x = \ell$ とし, その規定温度を T_1 , T_2 とすると, 断面内の温度は式 (4.1.2 - 1) の a を用いて次式で表わすことができる。⁹⁾

$$\frac{x}{\ell} = \frac{2(T_1 - T) + a(T_1^2 - T^2)}{2(T_1 - T_2) + a(T_1^2 - T_2^2)} \quad (4.1.2 - 2)$$

(4) 解析結果

各節点の温度を表 4.1.2 - 1 に, 断面内温度分布を図 4.1.2 に示す。

表 4.1.2 - 1 節点温度

節点番号	FINAS の解	理論解
1, 11, 21	3.00000E+02	300.0
2, 22,	2.42395E+02	242.376
3, 13, 23	1.79591E+02	179.538
4, 24,	1.09787E+02	109.744
5, 15, 25	3.00000E+01	30.0

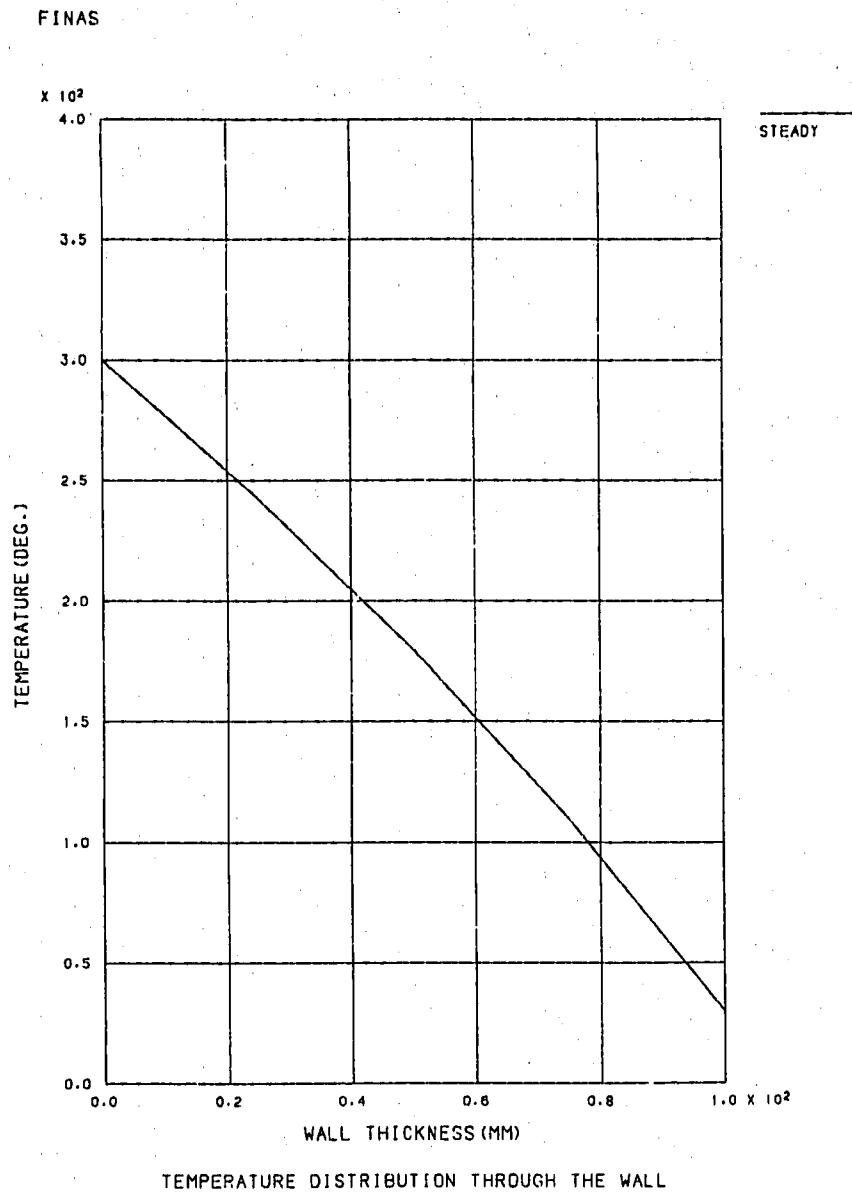


图 4.1.2 - 4 断面内温度分布

(5) 入力データと解析結果のリスト

表 4.1.2-2 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	STEADY STATE HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A WALL(TEMP. DEPEND. MATERIAL)							
4	HEAT								
5	CONTROL								
6	HEAT SOLVE			2					
7	MODEL								
8	NODE								
9	**NLOOP1	2	20	0.0	10.0			4	5
10	1			0.0	0.0				
11	5			100.0	0.0				
12	**END1								
13	11			0.0	5.0			2	2 15
14	15			100.0	5.0				
15	ELEMENT TYPE								
16	10 HQMEMB								
17	CONNECTION								
18	1 10 20 30	1	2	3	11	13	21	22	23 2 2
19	GEOMETRY								
20	20 1		1.0						
21	MATERIAL								
22	30								
23	K		F2		1				
24	SPECIFIED TEMPERATURE		4.0E-5	8.8E-8					
25	40								
26		1	21	10	300.0				
27		5	25	10	30.0				
28	HISTORY								
29	INTERVAL								
30	SPEC		40						
31	END MODEL								
32	OUTPUT								
33	STRUCTURE PLOT								
34	PTITLE	FINITE ELEMENT MODEL							
35	IPLOT	BOTH							
36	Y								
37	XPLOY								
38	PTITLE	TEMPERATURE DISTRIBUTION THROUGH THE WALL							
39	XTITLE	WALL THICKNESS(MM)							
40	YTITLE	TEMPERATURE(DEG.)							
41	NLIST2	1	1	5					
42	XDIVISION	5	0						
43	YDIVISION	8	0						
44	YRANGE		0.0	400.0					
45	CURVE	1	0	STEADY					
46	PLOT2	TEMP	NLIST	1	1				
47	END OUTPUT								
48	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2 非定常温度解析

4.2.1 コールド/ホットショックを受ける円筒の非定常温度解析

(1) 問題

外壁をヒーターで被われた内半径 100 mm、肉厚 10 mm の円筒が内部を流れるナトリウムの急激な温度変化を受ける場合について非定常温度解析を行なう。ヒーターから与えられる熱流束は $10 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{sec}$ であり、ナトリウム温度の時間履歴は図 4.2.1-2 に示すものとする。材料は SUS 304 であり、その材料定数を表 4.2.1-1 に、またナトリウムと内壁との境界の熱伝達係数を表 4.2.1-2 に示す。

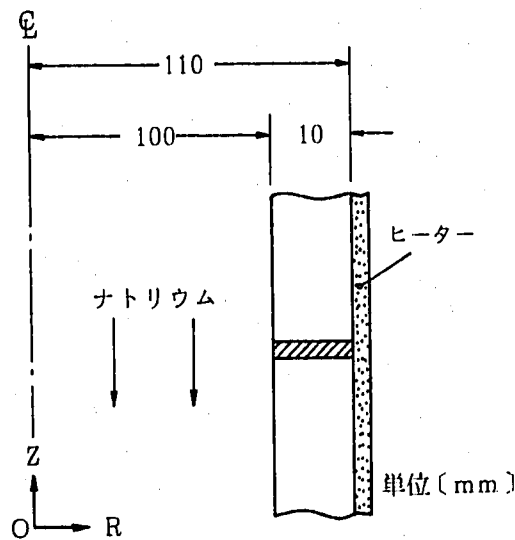


図 4.2.1-1 ヒーターで被われた円筒

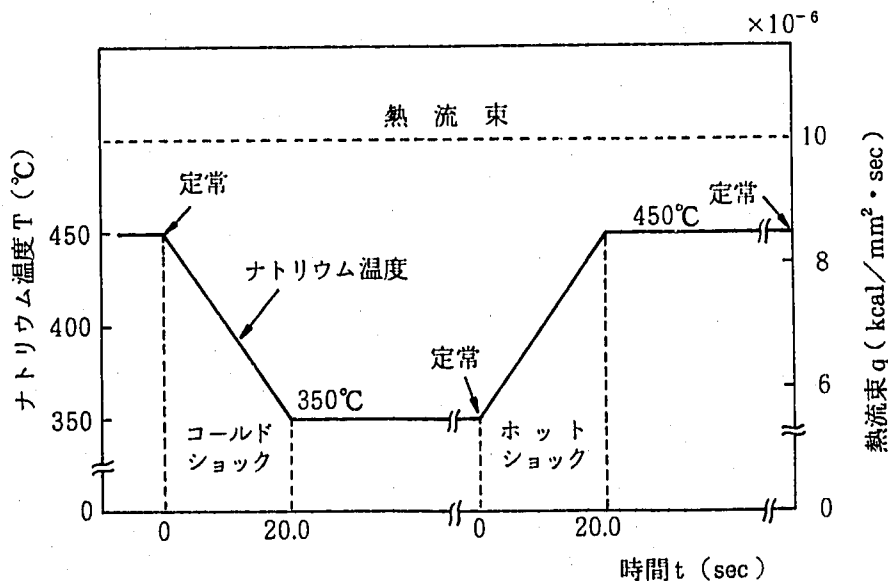


図 4.2.1-2 ナトリウム温度と熱流束の時間履歴

表 4.2.1-1 材料定数

温度 T (°C)	熱伝導係数 k(kcal/mm·sec·°C)	比熱 C(kcal/kg·°C)	密度 ρ(kg/mm³)
300.0	4.37×10^{-6}	0.129	7.90×10^{-6}
350.0	4.53×10^{-6}	0.131	7.88×10^{-6}
400.0	4.70×10^{-6}	0.132	7.86×10^{-6}
450.0	4.86×10^{-6}	0.133	7.83×10^{-6}
500.0	5.02×10^{-6}	0.134	7.81×10^{-6}
550.0	5.18×10^{-6}	0.136	7.79×10^{-6}
600.0	5.34×10^{-6}	0.138	7.76×10^{-6}

表 4.2.1-2 熱伝達係数

温度 T (°C)	300.0	400.0	500.0	500.0
熱伝達係数 h(kcal/mm²·sec·°C)	4.5×10^{-6}	4.3×10^{-6}	4.1×10^{-6}	3.9×10^{-6}

(2) 有限要素モデルと解析条件

熱伝導 4 節点四辺形軸対称要素 HQAX 4 と熱伝達 2 節点軸対称要素 FLAX 2 を用いて 図 4.2.1-3 に示す有限要素モデルを作成する。境界条件は図 4.2.1-4 に従い、熱伝達条件を要素 11 に、熱流束を要素 6 の節点 7 と 17 からなる辺にそれぞれ与える。

非定常温度解析はコールドショックとホットショック開始後それぞれ 40 秒まで行ない、その後で各ショック後の定常温度解析を行なう。また、コールドショック開始前にも定常温度解析を行なうが、ここでは材料の温度依存性を考慮して計算を 3 回行なう。なお、非定常温度解析における時間増分は 2.0 秒/ステップとする。

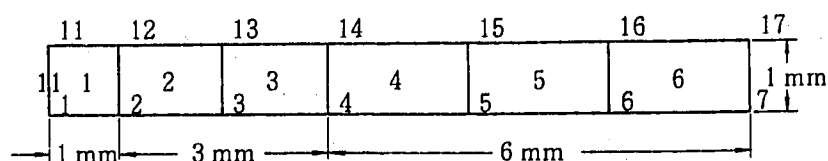


図 4.2.1-3 有限要素モデル

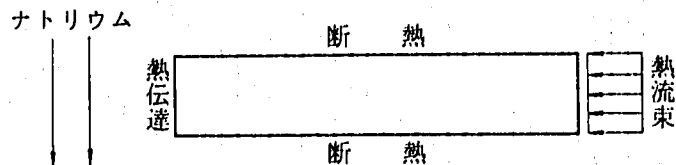


図4.2.1-4 境界条件

(3) 解析結果

表 4.2.1-3 に内外表面における節点温度を示し、代表節点における温度の時間履歴を図 4.2.1-5 に、代表時間での断面内温度分布を図 4.2.1-6 にそれぞれ示す。

表 4.2.1-3 内外表面における温度

	時刻	位置	温度 T [℃]	
			FINAS の解	ANSYS の解
コールド ショック	20秒後	内表面	3.62958E+02	362.95
		外表面	4.31331E+02	431.34
	40秒後	内表面	3.54053E+02	354.03
		外表面	3.85409E+02	385.54
	定常	内表面	3.52500E+02	352.50
		外表面	3.75287E+02	375.29
ホット ショック	20秒後	内表面	4.41667E+02	441.64
		外表面	4.17638E+02	417.96
	40秒後	内表面	4.50999E+02	451.02
		外表面	4.64392E+02	464.36
	定常	内表面	4.52611E+02	452.62
		外表面	4.74091E+02	474.10

FINAS

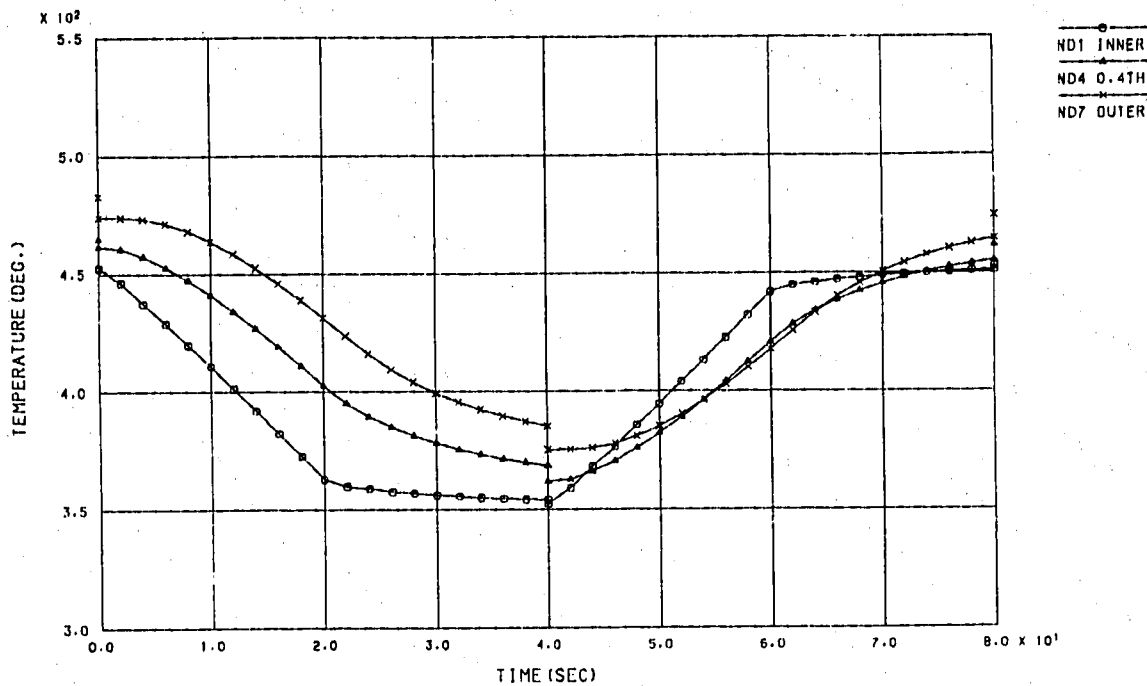


図 4.2.1 - 5 節点温度の時間履歴

FINAS

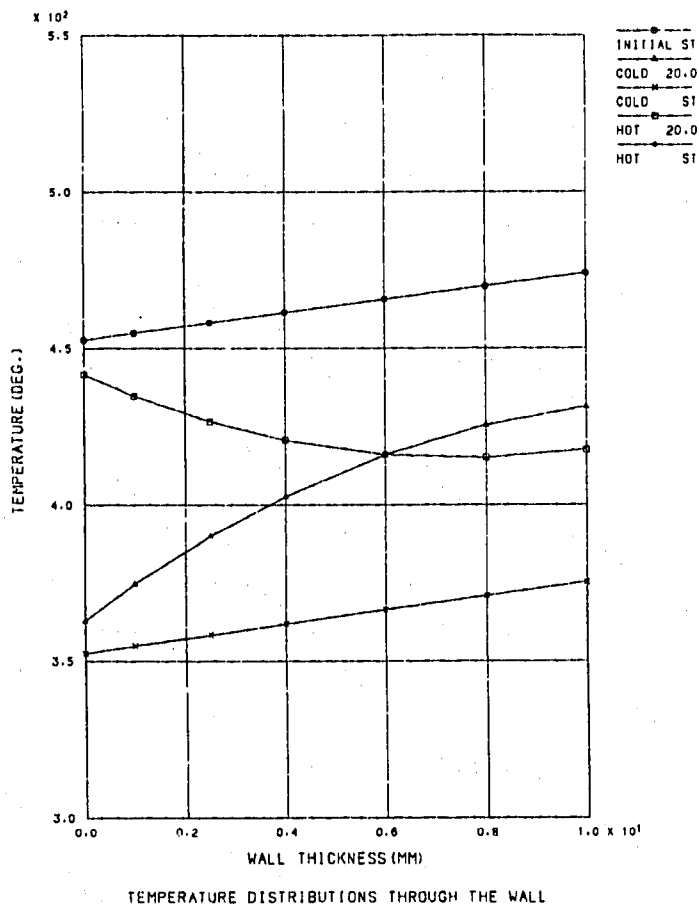


図 4.2.1 - 6 断面内温度分布

(4) 入力データと解析結果のリスト

表 4.2.1-4 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	O	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	HEAT	TRASIENT	ANALYSIS	OF	A	PIPE		
4	HEAT								
5	SAVE								
6	MODEL								
7	NODE PITCH								
8	1	1.0	2*1.5	3*2.0					
9	NODE								
10	1			100.0	0.0		6	1	7
11	7			110.0	0.0				
12	11			100.0	1.0		6	1	17
13	17			110.0	1.0				
14	ELEMENT TYPE								
15	1	HQAX4							
16	2	FLAX2							
17	CONNECTION								
18	1	1	10	1	2	11	12	6	
19	11	2	20	1	11				
20	MATERIAL								
21	10								
22	K	F3	7						
23		300.0	4.37E-6	350.0	4.53E-6	400.0	4.70E-6		
24		450.0	4.86E-6	500.0	5.02E-6	550.0	5.18E-6		
25		600.0	5.34E-6						
26	C	F3	7						
27		300.0	0.129	350.0	0.131	400.0	0.132		
28		450.0	0.133	500.0	0.134	550.0	0.136		
29		600.0	0.138						
30	DENS	F3	7						
31		300.0	7.90E-6	350.0	7.88E-6	400.0	7.86E-6		
32		450.0	7.83E-6	500.0	7.81E-6	550.0	7.79E-6		
33		600.0	7.76E-6						
34	FILM COEFFICIENT								
35	20	F3	4						
36		300.0	4.5E-6	400.0	4.3E-6	500.0	4.1E-6		
37		600.0	3.9E-6						
38	CONVECTION								
39	1								
40	HEAT INPUT	11		1.0	1.0				
41	1								
42	1	6		3	10.0E-6	10.0E-6			
43	HISTORY								
44	INTERVAL								
45	CONV	1	450.0						
46	HEAT	1	1.0						
47	INTERVAL								
48	INTERVAL								
49	INTERVAL	10	20.0						
50	CONV	1	-100.0						
51	INTERVAL	10	20.0						
52	INTERVAL								
53	INTERVAL	10	20.0						
54	CONV	1	100.0						
55	INTERVAL	10	20.0						
56	INTERVAL								
57	END MODEL								
58	OUTPUT								
59	STRUCTURE PLOT								
60	PTITLE	FINITE	ELEMENT	MODEL					
61	IPLOT	BOTH							
62	Y								
63	XYPLOT								
64	PTITLE	TEMPERATURE	DISTRIBUTIONS	THROUGH	THE	WALL			
65	XTITLE	WALL	THICKNESS(MM)						
66	YTITLE	TEMPERATURE(DEG.)							
67	NLIST2	1	1	7					
68	XDIVISION	5	0						
69	YDIVISION	5	0						
70	YRANGE	300.0	550.0						
71	CURVE	1		INITIAL	ST				
72	CURVE	2		COLD	20.0				
73	CURVE	3		COLD	ST				
74	CURVE	4		HOT	20.0				
75	CURVE	5		HOT	ST				
CARD NO.	O	0	0	0	0	0	0	0	0

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	PLOT2	TEMP NLIST	1	3	TEMP NLIST	1	13		
77		TEMP NLIST	1	24	TEMP NLIST	1	34		
78		TEMP NLIST	1	45					
79	Y								
80	PTITLE	TIME HISTORY OF NODAL TEMPERATURE							
81	XTITLE	TIME(SEC)							
82	XRANGE	0.0		80.0					
83	XDIVISION	8	0						
84	CURVE	1			ND1	INNER			
85	CURVE	2			ND4	0.4TH			
86	CURVE	3			ND7	OUTER			
87	FRAME	A4H							
88	PLOT1	TEMP	1	TEMP	4	TEMP	7		RTIME
89	Y								
90	POST TAPE								
91	TEMP	ALL							
92	Y								
93	PRINT SELECT								
94	NSET2	10	1	7					
95	ESET2	20	1	6	11				
96	OTIME1	30	2	3	13	23	24	34	44
97	TEMP	10	30						45
98	ELM	20		30					
99	END OUTPUT								
100	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.2.1-5 解析結果のリスト (抜粋)

HEAT TRANSIENT ANALYSIS OF A PIPE

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE 14

N O D E P O I N T T E M P E R A T U R E

(STEP NUM. 23)
REAL TIME 4.0000E+01

POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1
1	3.54053E+02						
2	3.57882E+02						
3	3.63442E+02						
4	3.68704E+02						
5	3.75091E+02						
6	3.80677E+02						
7	3.85409E+02						

H E A T F L U X

(STEP NUM. 23)
REAL TIME 4.0000E+01

ELM. ID-POINT	F1	F2	F3
1 - 5 HT. FLUX	-1.74255E-05	-4.52645E-19	
2 - 5 HT. FLUX	-1.69258E-05	-3.24452E-19	
3 - 5 HT. FLUX	-1.60801E-05	-3.25759E-19	
4 - 5 HT. FLUX	-1.47045E-05	-3.92600E-19	
5 - 5 HT. FLUX	-1.29174E-05	1.31445E-19	
6 - 5 HT. FLUX	-1.09823E-05	-4.94788E-20	

H E A T F L O W

(STEP NUM. 23)
REAL TIME 4.0000E+01

ELM. ID	F1
11	HT. FLOW -1.12019E-02

HEAT TRANSIENT ANALYSIS OF A PIPE

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE 15

N O D E P O I N T T E M P E R A T U R E

(STEP NUM. 24)
REAL TIME 4.0000E+01

POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1
1	3.52500E+02						
2	3.54905E+02						
3	3.58456E+02						
4	3.61942E+02						
5	3.66495E+02						
6	3.70938E+02						
7	3.75287E+02						

H E A T F L U X

(STEP NUM. 24)
REAL TIME 4.0000E+01

ELM. ID-POINT	F1	F2	F3
1 - 5 HT. FLUX	-1.09267E-05	-3.22771E-19	
2 - 5 HT. FLUX	-1.07787E-05	-3.23490E-19	
3 - 5 HT. FLUX	-1.06073E-05	-3.24340E-19	
4 - 5 HT. FLUX	-1.04167E-05	-1.30124E-19	
5 - 5 HT. FLUX	-1.02110E-05	0.0	
6 - 5 HT. FLUX	-1.00183E-05	1.96476E-19	

H E A T F L O W

(STEP NUM. 24)
REAL TIME 4.0000E+01

ELM. ID	F1
11	HT. FLOW -6.91395E-03

HEAT TRANSIENT ANALYSIS OF A PIPE

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE 17

POINT-TEMPERATURE		POINT-TEMPERATURE		POINT-TEMPERATURE		POINT-TEMPERATURE	
POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1
1	4.50999E+02						
2	4.51891E+02						
3	4.53342E+02						
4	4.54949E+02						
5	4.57509E+02						
6	4.60637E+02						
7	4.64392E+02						

(STEP NUM. 44)
REAL TIME 8.0000E+01

HEAT FLUX

(STEP NUM. 44)
REAL TIME 8.0000E+01

ELM. ID-POINT		F1	F2	F3
1 - 5	HT. FLUX	-4.33942E-06	-4.14784E-19	
2 - 5	HT. FLUX	-4.71089E-06	-1.38368E-19	
3 - 5	HT. FLUX	-5.22250E-06	1.38507E-19	
4 - 5	HT. FLUX	-6.24269E-06	-2.77393E-19	
5 - 5	HT. FLUX	-7.64475E-06	0.0	
6 - 5	HT. FLUX	-9.19989E-06	-5.57072E-19	

HEAT FLOW

(STEP NUM. 44)
REAL TIME 8.0000E+01

ELM. ID		F1
11	HT. FLOW	-2.65601E-03

HEAT TRANSIENT ANALYSIS OF A PIPE

FINAS VERSION 9.0

11/25/85

PAGE 18

POINT-TEMPERATURE		POINT-TEMPERATURE		POINT-TEMPERATURE		POINT-TEMPERATURE	
POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1	POINT-ID	D1
1	4.52611E+02						
2	4.54862E+02						
3	4.58192E+02						
4	4.61471E+02						
5	4.65766E+02						
6	4.69972E+02						
7	4.74091E+02						

(STEP NUM. 45)
REAL TIME 8.0000E+01

HEAT FLUX

(STEP NUM. 45)
REAL TIME 8.0000E+01

ELM. ID-POINT		F1	F2	F3
1 - 5	HT. FLUX	-1.09618E-05	0.0	
2 - 5	HT. FLUX	-1.08386E-05	0.0	
3 - 5	HT. FLUX	-1.06935E-05	0.0	
4 - 5	HT. FLUX	-1.05269E-05	2.78737E-19	
5 - 5	HT. FLUX	-1.03395E-05	1.39755E-19	
6 - 5	HT. FLUX	-1.01544E-05	1.40134E-19	

HEAT FLOW

(STEP NUM. 45)
REAL TIME 8.0000E+01

ELM. ID		F1
11	HT. FLOW	-6.90885E-03

4.2.2 2重管の非定常温度解析

(1) 問題

肉厚 10 mm, 内半径 250 mm と 260 mm の円管からなる 2 重管の内部を流れるナトリウムの温度が急激に低下する場合について非定常温度解析を行なう。2 つの円管の接触面における熱の移動を熱伝達で表わし, ここではその熱伝達係数をナトリウムと管面との境界における値の 100 分の 1 と仮定する。ナトリウムと管面との間の熱伝達係数は 2.78×10^{-6} kcal / $\text{mm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ である。また, ナトリウム温度の変化を図 4.2.2-2 に, 円管の材料定数を表 4.2.2-1 に示す。

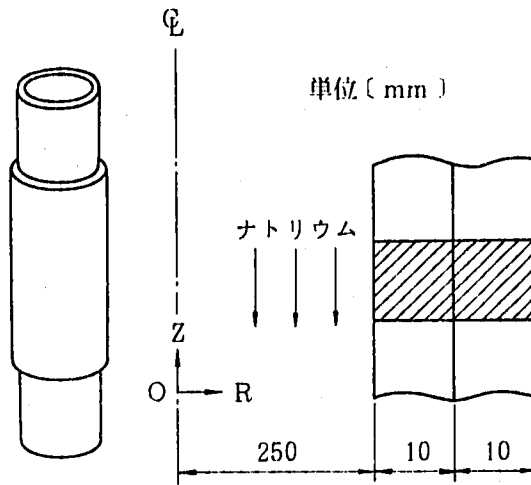


図 4.2.2-1 2 重 管

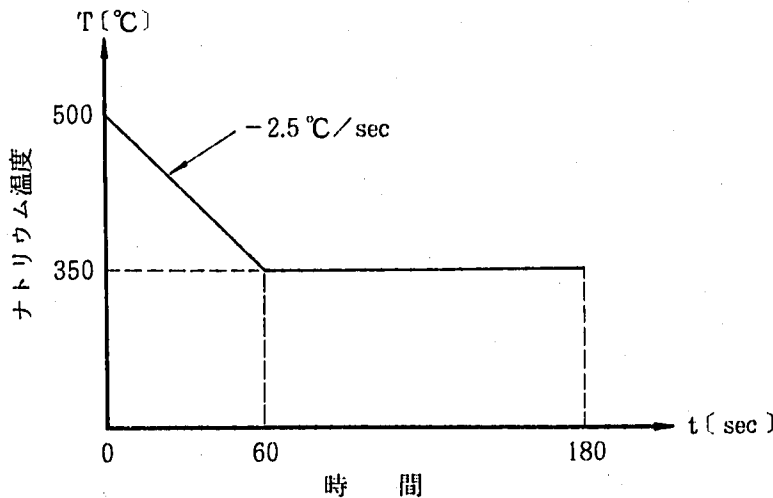


図 4.2.2-2 ナトリウム温度の変化

表 4.2.2-1 材料定数

熱伝導係数	$k = 4.86 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm} \cdot \text{sec} \cdot \text{°C}$
比熱	$c = 0.133 \text{ kcal/kg} \cdot \text{°C}$
密度	$\rho = 7.83 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$

(2) 有限要素モデルと解析条件

熱伝導 4 節点四辺形軸対称要素 HQAX 4, 熱伝達 2 節点軸対称要素 FLAX 2, 熱伝達リンク 4 節点四辺形軸対称要素 CALINK 4 を用いて図 4.2.2-3 に示す有限要素モデルを作成する。FLAX 2 はナトリウムと円管との境界に使用し, CALINK 4 は 2 つの円管の接触面に使用する。境界条件は図 4.2.2-4 に従い, 要素 11 に熱伝達条件を与える。時間増分はコールドショック開始後 120 秒までは 4 秒/ステップであり, それ以後は 6 秒/ステップとする。なお解析は 180 秒で打ち切るものとする。

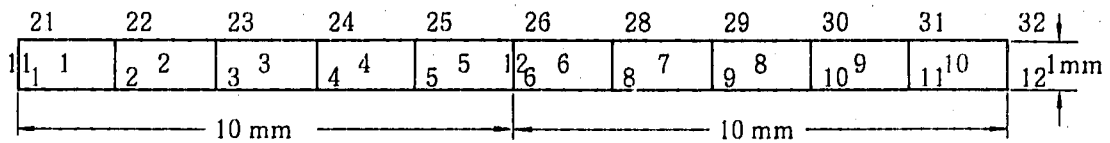


図 4.2.2-3 有限要素モデル

$$h_1 = 2.78 \times 10^{-6} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{°C}$$

$$h_2 = 2.78 \times 10^{-8} \text{ kcal/mm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{°C}$$

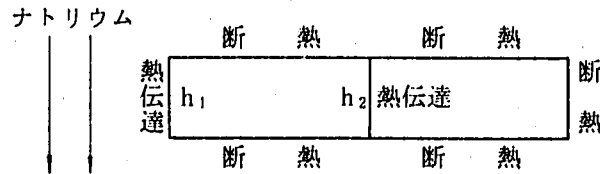


図 4.2.2-4 境界条件

(3) 解析結果

コールドショック開始後 60 秒と 180 秒における 2 重管の内外表面と 2 つの管の接触面での温度を ANSYS の解と併せて表 4.2.2-2 に示す。また代表節点温度の時間履歴と代表時間における断面内温度分布を図 4.2.2-5 と図 4.2.2-6 にそれぞれ示す。

表 4.2.2 - 2 内外表面と接触面における温度

時刻 t(sec)	位置		温度 T (°C)	
			FINAS の解	ANSYS の解
60	内管	内表面	3.60242E+02	360.23
		接触面	3.91901E+02	391.94
	外管	接触面	4.91684E+02	491.67
		外表面	4.94415E+02	494.40
180	内管	内表面	3.51053E+02	351.07
		接触面	3.56999E+02	357.00
	外管	接触面	4.56414E+02	456.42
		外表面	4.59250E+02	459.26

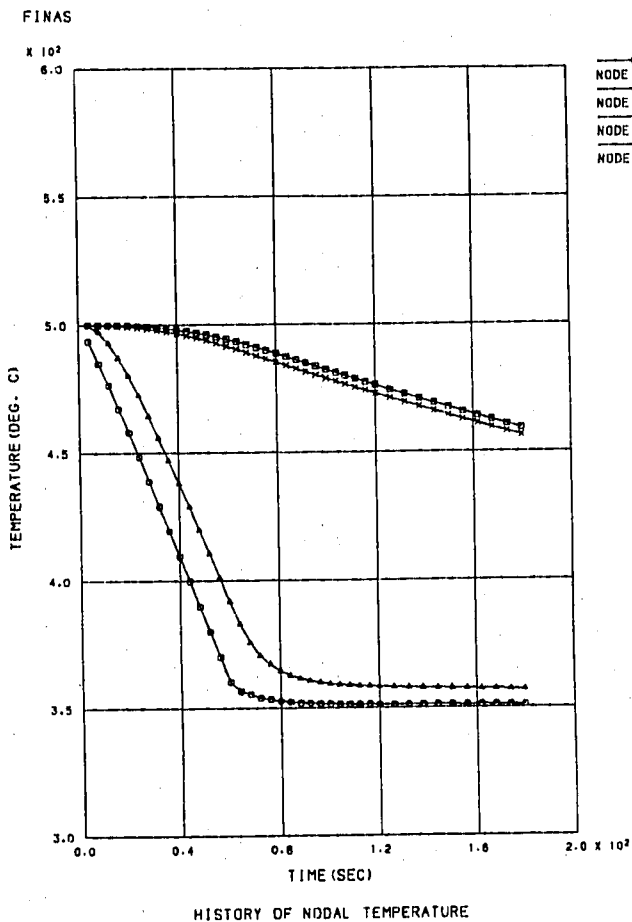


図 4.2.2 - 5 節点温度の時間履歴

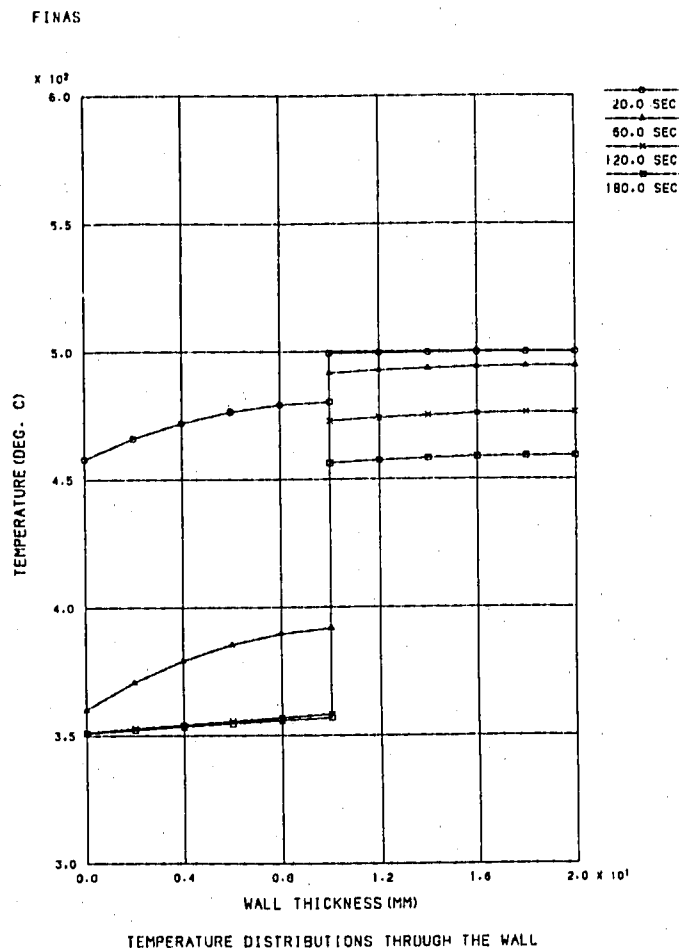


図 4.2.2 - 6 断面内温度分布

(4) 入力データ

表 4.2.2 - 3 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	HEAT TRANSIENT ANALYSIS OF A JACKET PIPE							
4	HEAT								
5	MODEL								
6	NODE								
7	**NLOOP1	2	20	0.0	1.0				
8	1			250.0	0.0		5		6
9	6			260.0	0.0				
10	7			260.0	0.0		5		12
11	12			270.0	0.0				
12	**END1								
13	ELEMENT TYPE								
14	1	HQAX4							
15	2	FLAX2							
16	3	CALINK4							
17	CONNECTION								
18	1	1	1	2	21	22		5	
19	6	1	1	7	8	27	28	5	
20	11	2	1	1	21				
21	12	3	2	26	6	27	7		
22	MATERIAL								
23	1								
24	K		4.86E-6						
25	C		0.133						
26	DENS		7.83E-6						
27	FILM COEFFICIENT								
28	1	2.78E-6							
29	2	2.78E-8							
30	INITIAL TEMPERATURE								
31	1	12			500.0				
32	21	32			500.0				
33	CONVECTION								
34	1				1.0	1.0			
35	HISTORY								
36	INTERVAL	15		60.0					
37	CONV	1		-150.0					
38	INTERVAL	15		60.0					
39	INTERVAL	10		60.0					
40	END MODEL								
41	OUTPUT								
42	PRINT SELECT								
43	OTIME1	10	5	15	30	40			
44	NSET2	20	1	6		7	12		
45	ESET1	30	1	5	6	10	11	12	
46	TEMP	20	10						
47	ELM	30		10					
48	¥								
49	STRUCTURE PLOT								
50	PTITLE	FINITE ELEMENT MODEL							
51	IPLOT	BOTH							
52	¥								
53	XYPLOT								
54	OTIME1	1	5	15	30	40			
55	NLIST2	10	1	6		7	12		
56	CURVE	1				20.0	SEC		
57	CURVE	2				60.0	SEC		
58	CURVE	3				120.0	SEC		
59	CURVE	4				180.0	SEC		
60	YRANGE	300.0		600.0					
61	XDIVISION	5	0						
62	YDIVISION	6	0						
63	PTITLE	TEMPERATURE DISTRIBUTIONS THROUGH THE WALL							
64	XTITLE	WALL THICKNESS(MM)							
65	YTITLE	TEMPERATURE(DEG. C)							
66	PLOT2	TEMP NLIST	10	5		TEMP NLIST	10	15	
67		TEMP NLIST	10	30		TEMP NLIST	10	40	
68	CURVE	1				NODE	1		
69	CURVE	2				NODE	6		
70	CURVE	3				NODE	7		
71	CURVE	4				NODE	12		
72	XRANGE	0.0		200.0					
73	PTITLE	HISTORY OF NODAL TEMPERATURE							
74	XTITLE	TIME(SEC)							
75	PLOT1	TEMP	1	TEMP	6	TEMP	7	TEMP	12
76	END OUTPUT								
77	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5. ユーティリティプログラムの使用例

5.1 温度解析と応力解析との連結

5.1.1 熱過渡を受ける円筒の弾性熱応力解析

(1) 問題

内半径 100 mm，肉厚 10 mm の円筒が 1 次応力として 10 kg/mm^2 の軸方向分布荷重を受け，2 次応力として 4.2.1 項に示した熱過渡を受ける場合について弾性解析を行なう。円筒の材料は SUS 304 とし，その材料定数は FINAS に組み込まれている材料データライブラリ⁶⁾を使用する。また解析に用いる温度分布は初期定常，コールドショック後 20 秒，コールドショック後の定常およびホットショック後 20 秒におけるものとする。

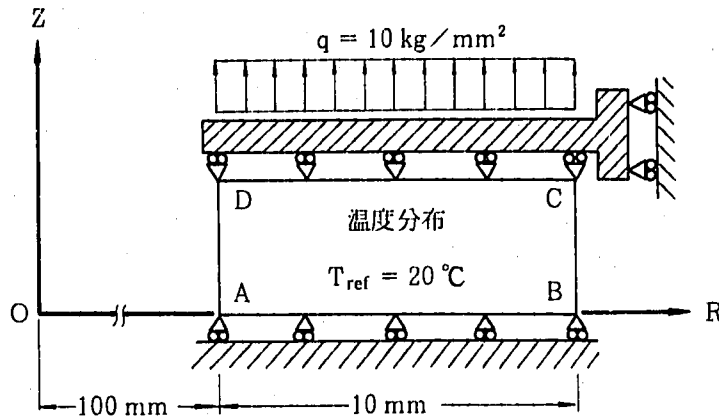


図 5.1.1-1 円筒

(2) 有限要素モデルと解析条件

4 節点四辺形軸対称要素 QAX 4 を用いて図 5.1.1-2 に示す有限要素モデルを作成する。熱応力計算の基準温度は 20 °C とし，温度解析の結果が納められているリスタートテープとユーティリティプログラム FNSEDIT のインターフェイス機能を利用して応力解析するステップの選択を行なう。応力解析と温度解析とのステップ番号の対応と負荷条件を表 5.1.1-1 に，境界条件を表 5.1.1-2 にそれぞれ示す。

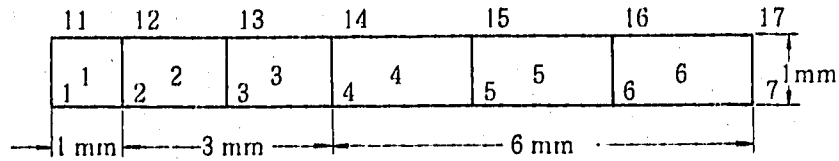


図 5.1.1 - 2 有限要素モデル

表 5.1.1 - 1 応力解析と温度解析のステップ番号の対応

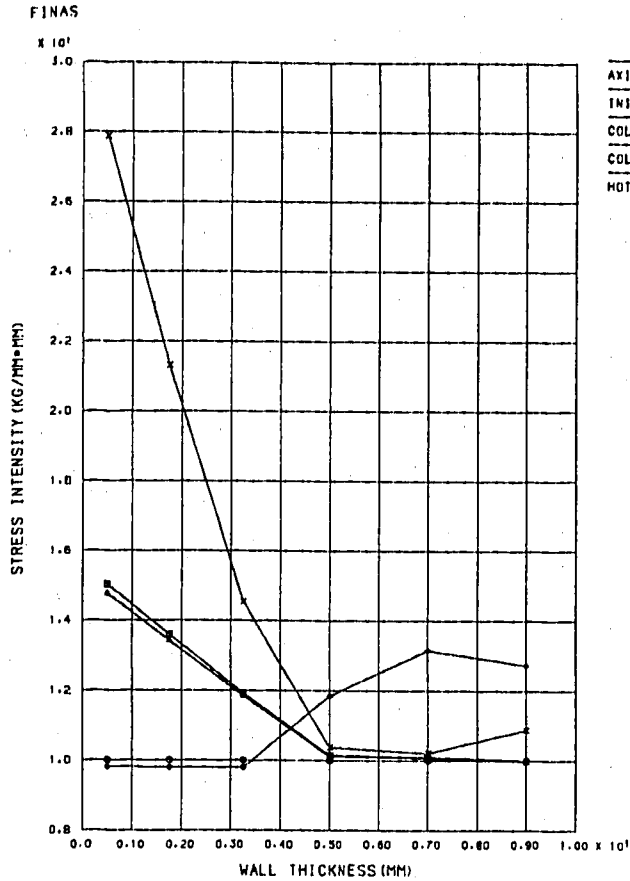
ステップ 番 号	応力解析	1	2	3	4	5
	温度解析	-	3	13	24	34
負荷条件	機械荷重	軸 力 $q = 10 \text{ kg/mm}^2$				
	温度荷重	20℃ 一定	初期定常状態	コールドショ ック後 20 秒	ホットショッ ク後定常状態	ホットショッ ク後 20 秒

表 5.1.1 - 2 境界条件

節点番号	自 由 度
1 ~ 7	$u_z = 0$
11 ~ 17	$u_{z11} = u_{z12} = \dots = u_{z17}$

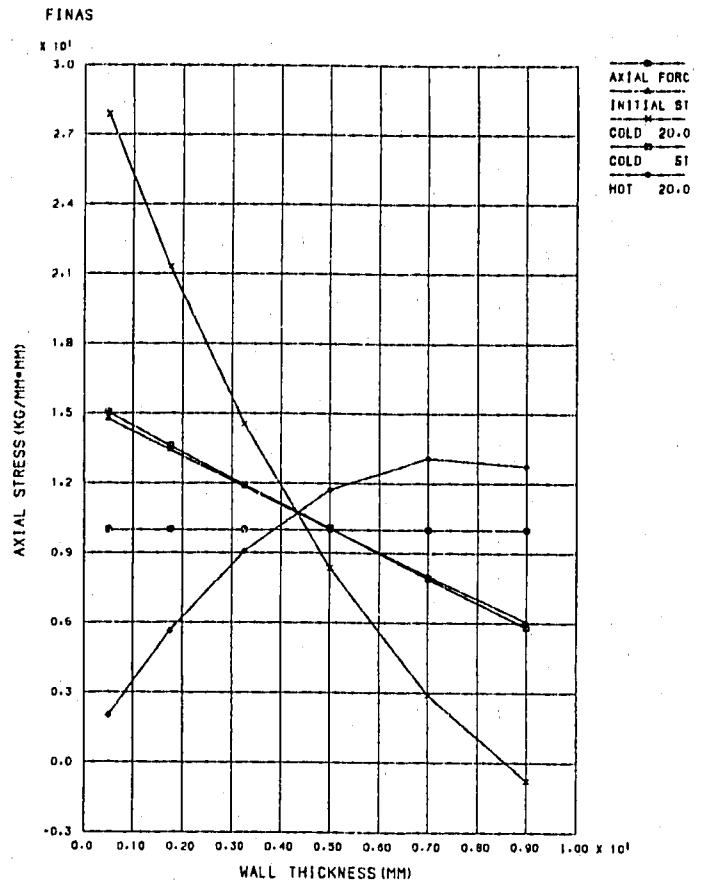
(3) 解析結果

各負荷条件における応力強さと軸方向応力の肉厚方向分布を図 5.1.1 - 3 と図 5.1.1 - 4 にそれぞれ示す。



STRESS INTENSITY DISTRIBUTION THROUGH THE WALL

図 5.1.1-3 応力強さの肉厚方向分布



AXIAL STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL

図 5.1.1-4 軸方向応力の肉厚方向分布

(4) 入力データ

表 5.1.1-3 熱応力解析を行なうステップを選択する FNSEDIT の
入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0							
3		0							
4		0							
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注) 選択したステップの温度データは増分形でファイル FT 21 に出力される。

表 5.1.1-4 ファイル TP 21 から温度データを読み込む熱応力解析の入力データイメージ

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	FINAS								
2	TITLE THERMAL ELASTIC ANALYSIS OF A PIPE SUBJECTED TO THERMAL SHOCK								
3	STATIC TE								
4	MODEL								
5	NODE PITCH								
6	1	1.0	2*1.5	3*2.0					
7	NODE								
8	1			100.0	0.0		6	1	
9	7			110.0	0.0				
10	11			100.0	1.0		6	1	
11	17			110.0	1.0			17	
12	ELEMENT TYPE								
13	1	QAX4							
14	CONNECTION								
15	1	1	1	2	11	12		6	
16	MATERIAL								
17	1	1 SUS304					3		
18	EPLAST LIB								
19	TEMPERATURE								
20	REF	20.0							
21	=READ	21							
22	FORCE								
23	1								
24	1	1	6	4		-1.0	-1.0		
25	BOUNDARY								
26	1								
27		1	7		2				
28	FASTENING								
29	1								
30	F1	6	11	2	0	12	2	1	
31	HISTORY								
32	INTERVAL								
33		BOUN	1						
34		FAS	1						
35		FORC	1	10.0					
36	INTERVAL								
37		BOUN	1						
38		FAS	1						
39		TEMP	1						
40	INTERVAL								
41		BOUN	1						
42		FAS	1						
43		TEMP	2						
44	INTERVAL								
45		BOUN	1						
46		FAS	1						
47		TEMP	3						
48	INTERVAL								
49		BOUN	1						
50		FAS	1						
51		TEMP	4						
52	END MODEL								
53	OUTPUT								
54	STRUCTURE	PLOT							
55	PTITLE	FINITE ELEMENT MODEL							
56	IPLOT	BOTH							
57	*								
58	XYPLO								
59	ELIST2	10	1	6					
60	XVALU	20	0.5	1.75	3.25	5.0	7.0	9.0	
61	XRANGE	0.0	10.0						
62	XDIVISION	10	0						
63	YDIVISION		0						
64	CURVE	1						AXIAL FORC	
65	CURVE	2						INITIAL ST	
66	CURVE	3						COLD 20.0	
67	CURVE	4						COLD ST	
68	CURVE	5						HOT 20.0	
69	PTITLE	STRESS INTENSITY DISTRIBUTION THROUGH THE WALL							
70	XTITLE	WALL THICKNESS(MM)							
71	YTITLE	STRESS INTENSITY(KG/MM*MM)							
72	PLOT2	TRES ELIST	10	1XVALU	2OTRES ELIST	10	2XVAL	20	
73		TRES ELIST	10	3XVALU	2OTRES ELIST	10	4XVAL	20	
74		TRES ELIST	10	5XVALU	20				
75	*								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	PTITLE	AXIAL STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL							
77	XTITLE	WALL THICKNESS(MM)							
78	YTITLE	AXIAL STRESS(KG/MM*MM)							
79	PLOT2	STRS2ELIST	10	1XVALU	20STRS2ELIST	10	2XVAL	20	
80		STRS2ELIST	10	3XVALU	20STRS2ELIST	10	4XVAL	20	
81		STRS2ELIST	10	5XVALU	20				
82	¥								
83	PTITLE	HOOP STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL							
84	XTITLE	WALL THICKNESS(MM)							
85	YTITLE	HOOP STRESS(KG/MM*MM)							
86	PLOT2	STRS3ELIST	10	1XVALU	20STRS3ELIST	10	2XVAL	20	
87		STRS3ELIST	10	3XVALU	20STRS3ELIST	10	4XVAL	20	
88		STRS3ELIST	10	5XVALU	20				
89	¥								
90	POST TAPE								
91	IPSET2	10	4	6					
92	ELM	ALL	10						
93	¥								
94	PRINT SELECT								
95	NSET2	10	1	7					
96	IPSET2	10	4	6					
97	DISP	10							
98	ELM	ALL	10						
99	END OUTPUT								
100	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

5.2 リスタートテープの編集

5.2.1 熱弾塑性クリープ解析におけるリスタートテープの編集とリスタートテープからの出力

(1) 問題

2.2.3 項の肉厚方向に温度分布のある円筒の熱弾塑性クリープ解析で作成した2本のリスタートテープを1本に編集し、プリント出力、ポストテープ出力およびプロット出力を行なう。

(2) 出力結果

編集後のリスタートテープを利用して作成したXYプロット図を図5.2.1-1~5.2.1-4に示す。図5.2.1-1は相当応力の肉厚方向分布、図5.2.1-2は1000時間保持後の相当クリープひずみの分布を表わす。図5.2.1-3と図5.2.1-4は内外表面にそれぞれ一番近い積分点における軸方向応力-ひずみ曲線と相当クリープひずみの時刻歴である。

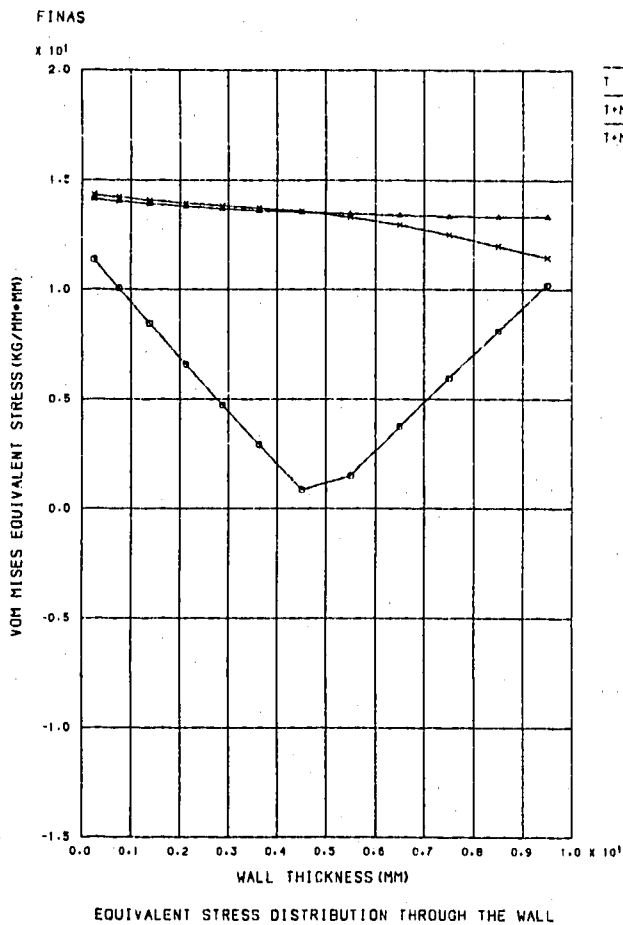


図 5.2.1-1 相当応力の肉厚方向分布

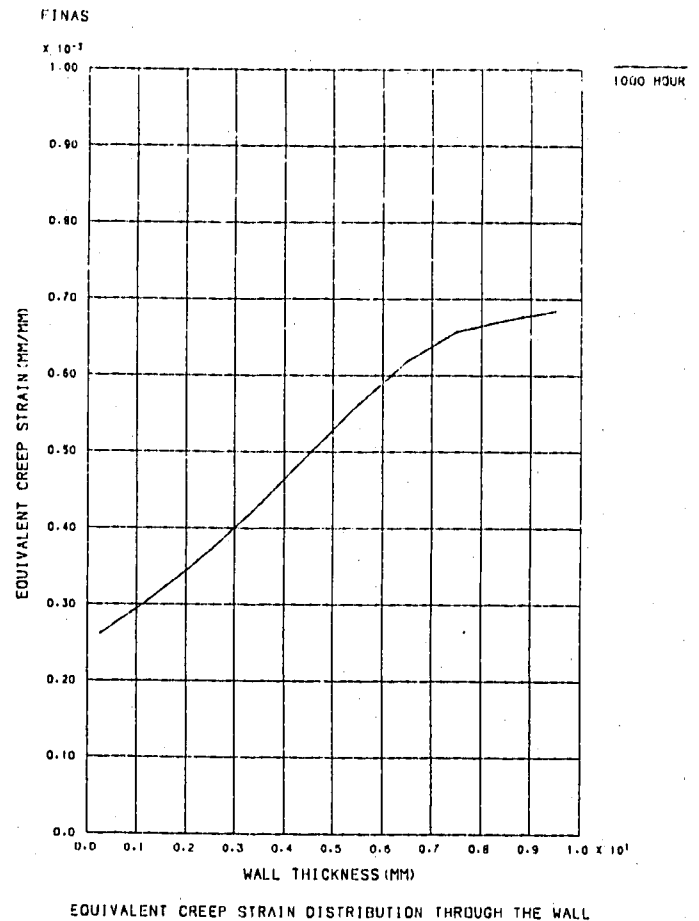


図 5.2.1-2 クリープひずみの肉厚方向分布

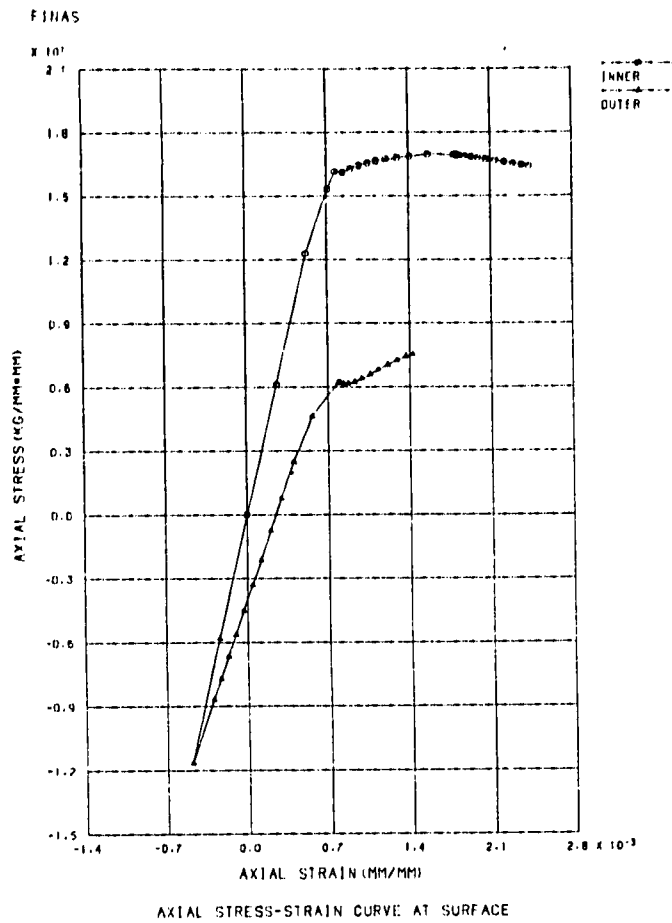


図 5.2.1-3 内外表面における軸方向応力-ひずみ曲線

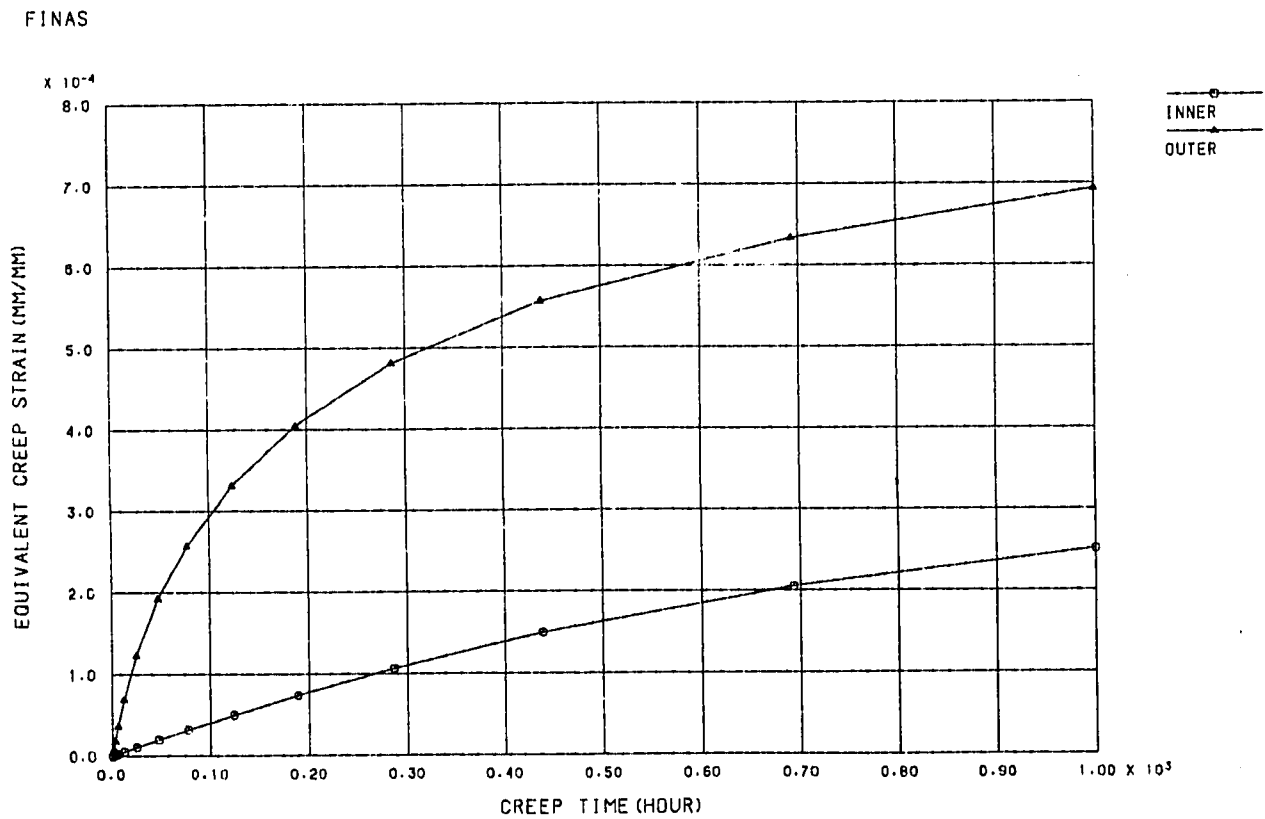


図 5.2.1-4 内外表面における相当クリープひずみの時刻歴

(3) 入力データ

表 5.2.1-1 リスタートテープの編集を行なう FNSEDIT の入力データイメージ

	1	2	3	4	5	6	7	8
CARD NO.	0	0	0	0	0	0	0	0
1	MERGE RESTART							
CARD NO.	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5.2.1-2 リスタートテープから出力を行なう入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2									
3									
4									
5									
6									
7		10	3	15	30				
8		100	1	13	21	33			
9		200	4	5	6				
10									
11									
12		100	10						
13		100	10						
14		ALL	200	10					
15									
16									
17		ALL	200						
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29		30	1	12					
30		40	0.25	0.75	1.375	2.125	2.875	3.625	
31			4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	
32		0.0	10.0						
33		-15.0	20.0						
34		8	0						
35		7	0						
36		1							
37		2							
38		3							
39		VMS	ELIST	30	3XVALU	40	VMS	ELIST	30
40		VMS	ELIST	30	30XVALU	40			
41									
42									
43									
44		0.0	1.0E-3						
45		10	0						
46		1	0						
47		ECEQ	ELIST	30	30XVALU	40			
48									
49									
50									
51									
52		-1.0E-3	2.5E-3						
53		-15.0	20.0						
54		5	0						
55		1							
56		2							
57		EEPC2	1	4STRS2	1	4EEPC2	12	6STRS2	12
58									
59									
60									
61									
62		A4H							
63		1							
64		2							
65		0.0	1000.0						
66		0.0	8.0E-4						
67		10	0						
68		8	0						
69		ECEQ	1	4ECEQ	12	6			
70									
71									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

参 考 文 献

- 1) 最上武雄, 応用力学上巻, 金原出版株式会社
- 2) 鷺津久一郎 他4名, 有限要素法ハンドブック, II 応用編, 培風館, 1983。
- 3) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., Theory of Elasticity, third Edition, McGraw-Hill.
- 4) 非弾性解析プログラムの調査と試用 (II), 非弾性解析プログラム調査研究分科会, 日本機械学会, 1975。
- 5) Timoshenko, S. P. and Woinowsky - Krieger, S., Theory of Plates and Shells, second Edition, McGraw - Hill.
- 6) 小西一郎, 高岡宣善, 構造動力学, 丸善, 1973。
- 7) Timoshenko, S. P., et al. Vibration Problems in Engineering, 4th Edition, John Wiley & Sons, 1974. (谷口, 田村共訳, 新版工業振動学, コロナ社, 1977.)
- 8) 樋田昭 他3名, 伝熱工学演習, 学献社, 1980。

II. 応用編

1. 概 要

応用編はより実際的な問題について FINAS をどのように適用していくかを習得することを意図している。本編の例題は中規模なモデルのものであるが、各々代表的な問題であり、複雑な問題を解く場合の参考にすることができる。第2章で静的解析の例を、第3章で動的解析の例をそれぞれ説明する。これらの例題の要約を表1-1と表1-2に示す。

表 1-1 静的解析例題の要約

節番号	タイトル	解析の種類						使用要素		主な機能項目	
		線形		材料非線形		幾何学的非線形・座屈荷重		熱応力	分類		名称
		弾性	多荷重処理	弾塑性	クリープ	大変形	線形座屈				
2.1.1	パイプ結合部の弾性解析	○							立体	HEX 20	→ READ 21 を用いた座標値の入力
2.1.2	面内曲げモーメントを受ける直管付きエルボの弾性解析	○							配管	ELBOW 6 R	ファスニング, モーメント
2.1.3	多種の荷重を受ける配管の弾性解析		○						配管	PIPE 2	荷重ケースの線形重ね合せ
2.2.1	円筒の熱ラッチェッティング解析			○				○	軸対称	QAX 4	移動硬化則, 材料温度依存, 繰り返し負荷
2.2.2	面内荷重を受ける多孔板の弾塑性解析			○					平面応力	QMEM 4	等方硬化則, ファスニング
2.2.3	はりの弾塑性クリープ解析			○	○				平面応力	QMEM 8	組合せ硬化則, 応力反転を考慮したクリープ硬化則, XCREEP, リスタートテープの編集, リスタートテープからの出力
2.3.1	球殻の弾性大変形解析	○				○			シェル	CONIC 2	大変形
2.4.1	3点曲げ試験片の弾性破壊力学解析	○							平面ひずみ	QPLAN 8	J積分, 中間節点の1/4シフト

表 1-2 動的解析例題の要約

節番号	タイトル	解析の種類					使用要素		主な機能項目	
		モーダル法			直接積分法		分類	名称		
		固有値	モーダル応答	スペクトル応答	線形	非線形				
3.1.1	クーリングタワーの固有値解析	○						シェル	QFLA 4 R	固有値, 整合質量, 集中質量
3.1.2	3次元骨組構造の応答スペクトル解析			○				はり	SBEAM 2	速度スペクトル, 付加質量

2. 静的解析

2.1 線形解析

2.1.1 パイプ結合部の弾性解析

(1) 問題

互いに直交する径の異なる2本のパイプからなる分岐管（ティー管）が内圧を受ける場合の弾性解析を行う。¹⁾ 材料定数は弾性係数 30.0×10^6 psi, ポアソン比 0.3 である。構造に作用する負荷は内圧とパイプ端閉じの条件から生じる両端面における軸方向引張荷重であり, その大きさを図 2.1.1 - 2 に示す。

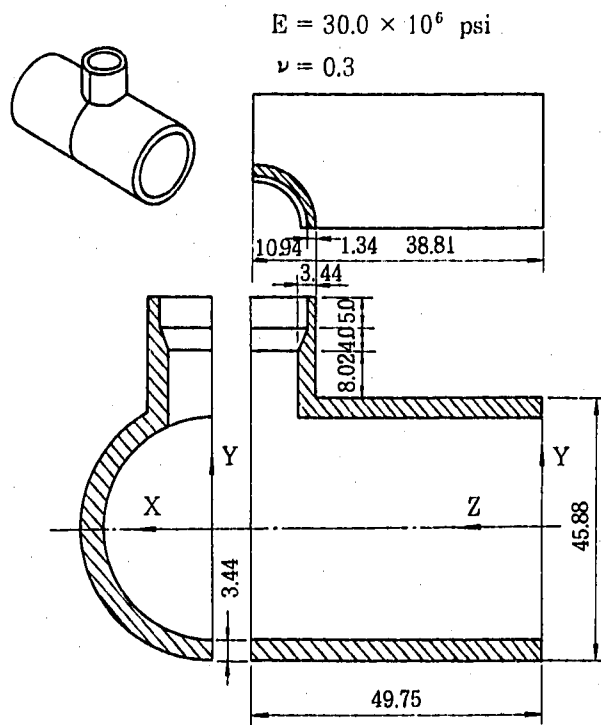


図 2.1.1 - 1 パイプ結合部

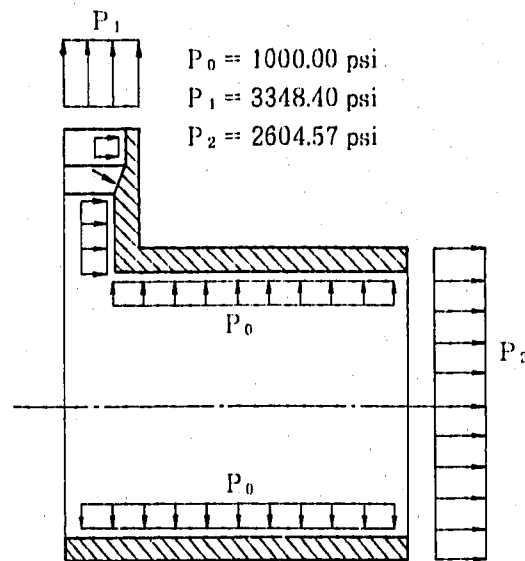


図 2.1.1-2 負荷条件

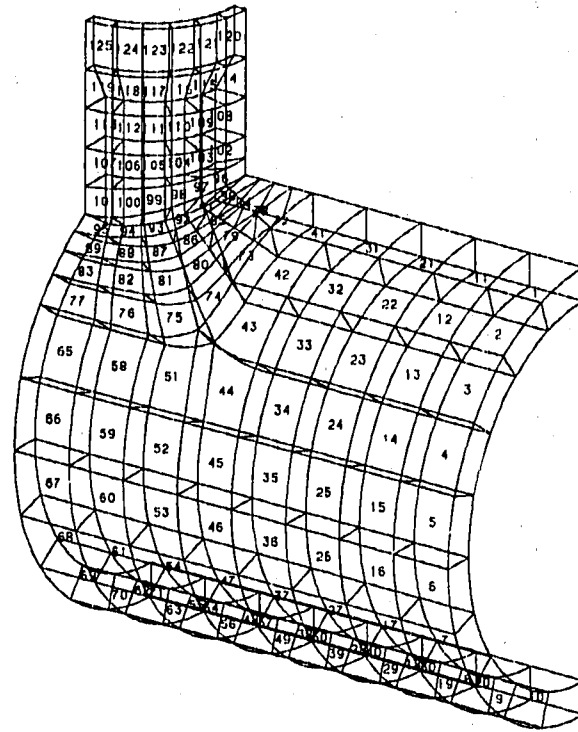
(2) 有限要素モデルと解析条件

構造と負荷の対称性を考慮して4分の1モデルで解析を行なう。20節点六面体要素HEX 20を用いて作成した有限要素モデルを図 2.1.1-3 に示し、4分の1モデルにおける対称条件を考慮した境界条件を図 2.1.1-4 に示す。

(3) 解析結果

パイプ結合部の内外表面における相当応力と応力強さの等高線分布を図 2.1.1-5~2.1.1-8 に示す。なお、参考までに図 2.1.1-9 に内表面の相当応力の分布に関し ASKA の解¹⁾を示す。

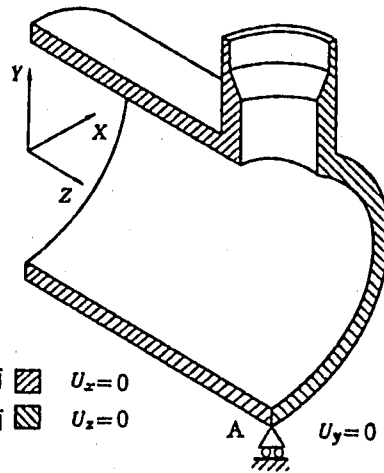
FINAS



GEOM. SCALE 10.0000

ELEMENT NUMBER

図 2.1.1-3 有限要素モデル



$y-z$ 断面 $U_x=0$
 $x-y$ 断面 $U_x=0$

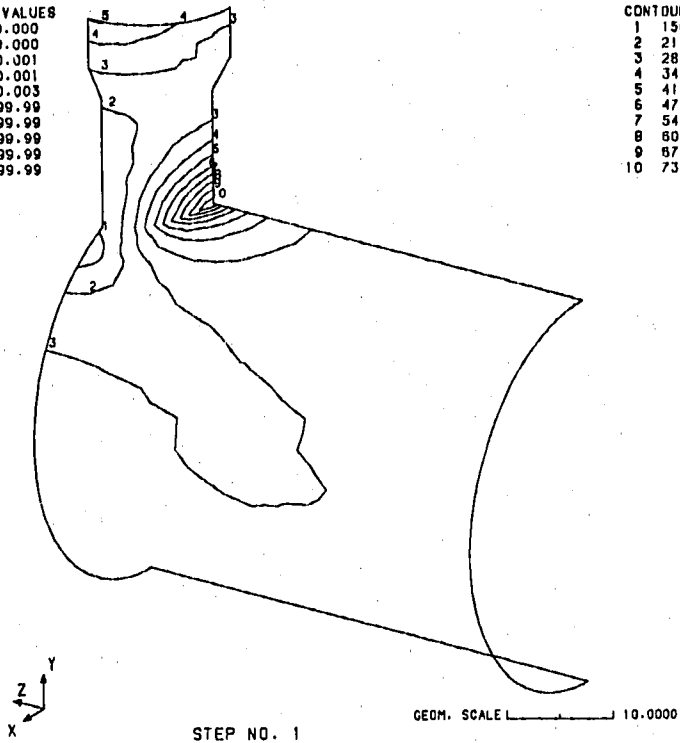
A $U_y=0$

図 2.1.1-4 境界条件

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	2000.000
2	3900.000
3	5800.001
4	7700.001
5	9600.003
6	11499.99
7	13399.99
8	15299.99
9	17199.99
10	19099.99



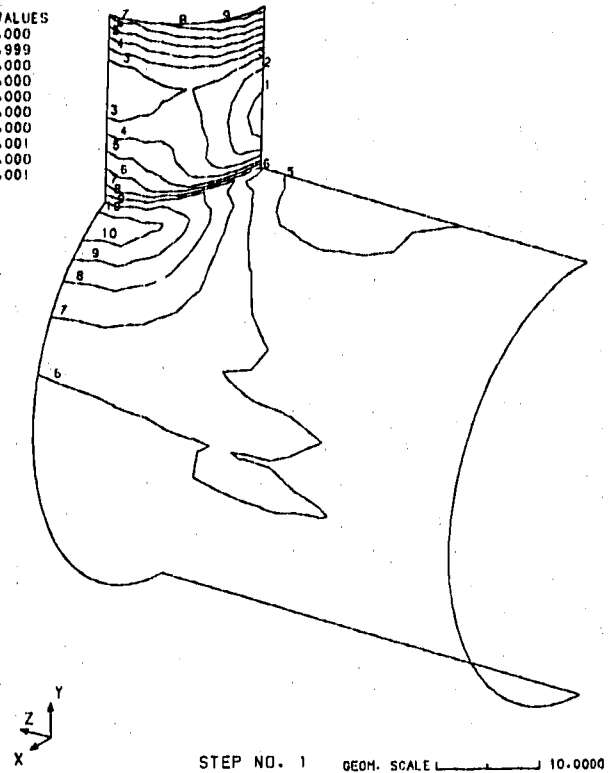
STRESS INTENSITY ON THE INNER SURFACE

図 2.1.1 - 5 内表面における相当応力の分布

FINAS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	1500.000
2	2149.999
3	2800.000
4	3450.000
5	4100.000
6	4750.000
7	5400.000
8	6050.001
9	6700.000
10	7350.001



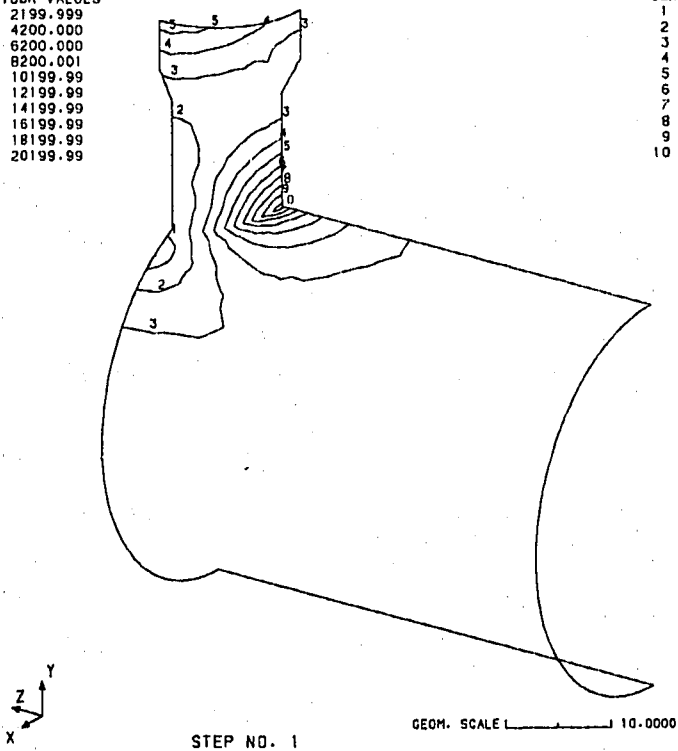
STRESS INTENSITY ON THE OUTER SURFACE

図 2.1.1 - 6 外表面における相当応力の分布

FINAS
TRESCA STRESS

CONTOUR VALUES

1	2199.999
2	4200.000
3	6200.000
4	8200.001
5	10199.99
6	12199.99
7	14199.99
8	16199.99
9	18199.99
10	20199.99



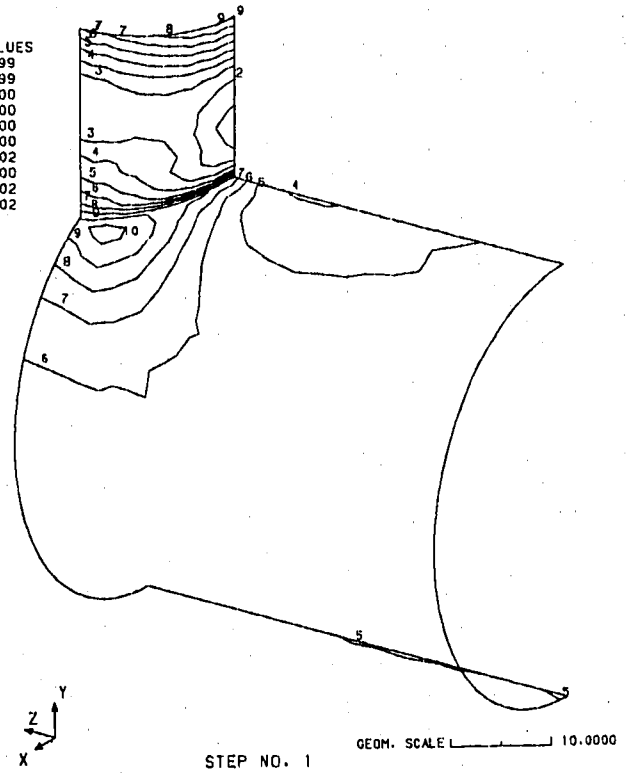
STRESS INTENSITY ON THE INNER SURFACE

図 2.1.1 - 7 内表面における応力強さの分布

FINAS
TRESCA STRESS

CONTOUR VALUES

1	1649.999
2	2459.999
3	3270.000
4	4080.000
5	4890.000
6	5700.000
7	6510.002
8	7320.000
9	8130.002
10	8940.002



STRESS INTENSITY ON THE OUTER SURFACE

図 2.1.1 - 8 外表面における応力強さの分布

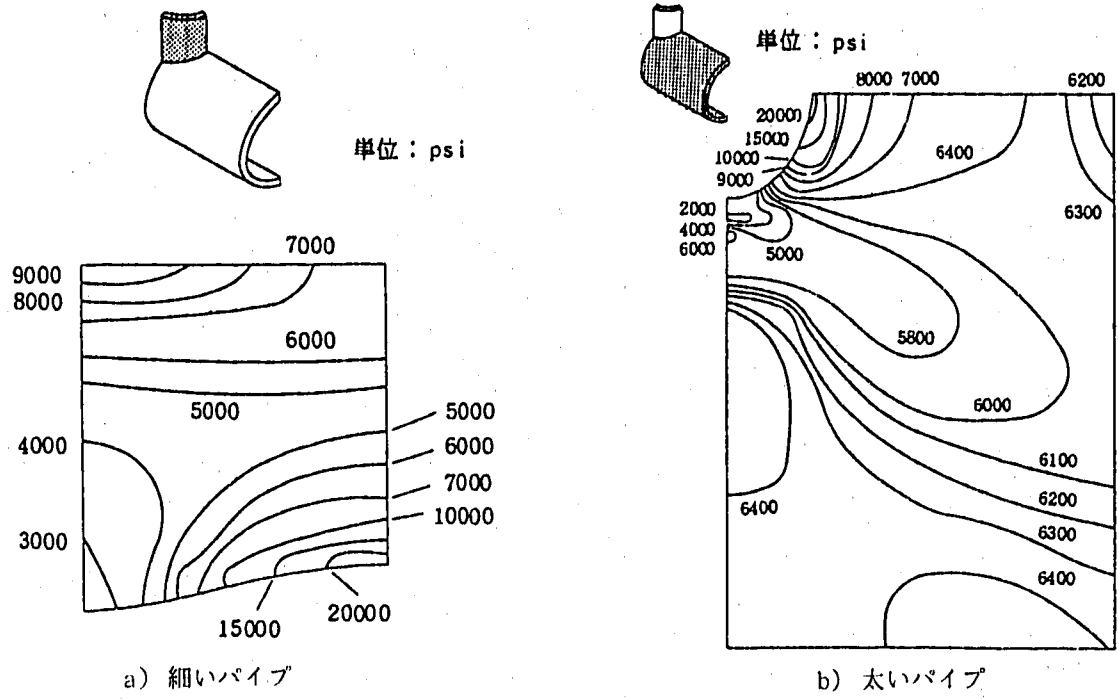


図 2.1.1-9 ASKA における内表面での相当応力の分布

(4) 入力データ

表 2.1.1-1 節点座標をファイル FT21 から読み込む入力データイメージ

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8						
1	FINAS													
2	TITLE ELASTIC ANALYSIS OF A PIPE JUNCTION													
3	STATIC E													
4	MODEL													
5	ELEMENT TYPE													
6	1	HEX20												
7	CONNECTION													
8	**ELOOP1	5	10	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126	20
9				126	126	126	126	126	126	126	126	126		
10				126	126	126	126							
11	1	1	1	7	8	9	4	6	1	2	3	10	6	
12				70	72	64	66	133	134	135	130			
13				132	127	128	129							
14	**END1													
15	**ELOOP1	3	7	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	20
16				90	90	90	90	90	90	90	90			
17				90	90	90	90							
18	51	1	1	655	656	657	652	654	649	650	651	7	6	
19				700	702	694	696	745	746	747	742			
20				744	739	740	741							
21	**END1													
22	72	1	1	637	638	639	634	636	631	632	633	3	6	
23				970	972	964	966	1009	1010	1011	1006			
24				1008	1003	1004	1005							
25	**ELOOP1	3	1	90	90	90	90	90	90	90	90			20
26				6	6	6	6	6	6	6	6			
27				6	6	6	6							
28	75	1	1	739	740	741	694	696	649	650	651			
29				988	990	982	984	1027	1028	1029	1024			
30				1026	1021	1022	1023							
31	**END1													
32	**ELOOP1	8	6	78	78	78	78	78	78	78	78			20
33				78	78	78	78	78	78	78	78			
34				78	78	78	78							
35	78	1	1	1009	1010	1011	1006	1008	1003	1004	1005	6	6	
36				1048	1050	1042	1044	1087	1088	1089	1084			
37				1086	1081	1082	1083							
38	**END1													
39	* NODE DATA READ FROM FILE FT21													
40	=READ 21													
41	* MATERIAL													
42	1													
43	E													
44	30.0E+06													
45	NU													
46	0.3													
47	BOUNDARY													
48	1													
49		1	631	63	1	1								
50		2	632	63	1	1								
51		3	633	63	1	1								
52		964	1627	39	1	1								
53		965	1628	39	1	1								
54		966	1629	39	1	1								
55		61	691	63	1	1								
56		62	692	63	1	1								
57		63	693	63	1	1								
58		736	961	45	1	1								
59		737	962	45	1	1								
60		738	963	45	1	1								
61		919	963	1	3	3								
62		1000	1663	39	3	3								
63		1001	1664	39	3	3								
64		1002	1665	39	3	3								
65		963			2	2								
66	FORCE													
67	1													
68	1	1	125	1	3	1	8	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0			
69								1000.0	1000.0	1000.0	1000.0			
70	1	1	10	1	1	1	8	-2604.57	-2604.57	-2604.57	-2604.57			
71								-2604.57	-2604.57	-2604.57	-2604.57			
72	1	120	125	1	6	1	8	-3348.40	-3348.40	-3348.40	-3348.40			
73								-3348.40	-3348.40	-3348.40	-3348.40			
74	HISTORY													
75	INTERVAL													
		1												
	BOUN	1												

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77		FORC	1						
78		END MODEL							
79		OUTPUT							
80		PRINT SELECT							
81		ESET2	10	90	101				
82		NSET2	10	1	61	3	64	631	63
83				736	961	45	919	958	3
84				1240	1270	3			
85		NSET2	20	3	63	3	66	633	63
86				738	963	45	921	960	3
87				1242	1272	3			
88		DISP	10			20			
89		ELM	10	ALL					
90		POST TAPE							
91		DISP	ALL						
92		REAC	ALL						
93		ELM	ALL	ALL					
94		STRUCTURE PLOT							
95		ESET2	10	1	71				
96		ESET2	20	72	95				
97		ESET2	30	96	125				
98		PESET2	10	1	61	3	64	124	6
99		PESET2	20	253	313	3	316	376	6
100		PESET2	30	505	565	3	568	628	6
101		PESET2	10	739	781	3	784	826	6
102		PESET2	20	919	961	3	964	1000	6
103		PESET2	30	1081	1117	3	1120	1156	6
104		PESET2	10	1237	1273	3	1275	1312	6
105		PESET2	20	1393	1429	3	1432	1468	6
106		PESET2	30	1549	1585	3	1588	1624	6
107		PESET2	10	3	63	3	66	126	6
108		PESET2	20	255	315	3	318	378	6
109		PESET2	30	507	567	3	570	630	6
110		PESET2	10	741	783	3	786	828	6
111		PESET2	20	921	963	3	966	1002	6
112		PESET2	30	1083	1119	3	1122	1158	6
113		PESET2	10	1239	1275	3	1278	1314	6
114		PESET2	20	1395	1431	3	1434	1470	6
115		PESET2	30	1551	1587	3	1590	1626	6
116		PESET2	10			3	66	126	6
117		PESET2	20			3	129	189	3
118		PESET2	30			3	381	441	3
119		PESET2	10			3	633	693	3
120		PESET2	20			3	831	873	3
121		PESET2	30			3	1005	1041	3
122		PESET2	10			3	1161	1197	3
123		PESET2	20			3	1317	1353	3
124		PESET2	30			3	1473	1509	3
125		PESET2	10			3	1629	1665	3
126		PESET2	20			3			3
127		PESET2	30			3			3
128		PESET2	10			3			3
129		PESET2	20			3			3
130		PESET2	30			3			3
131		PESET2	10			3			3
132		PESET2	20			3			3
133		PESET2	30			3			3
134		PESET2	10			3			3
135		PESET2	20			3			3
136		PESET2	30			3			3
137		PESET2	10			3			3
138		PESET2	20			3			3
139		PESET2	30			3			3
140		PESET2	10			3			3
141		PESET2	20			3			3
142		PESET2	30			3			3

表 2.1.1-2 ファイル FT 21 上の節点座標

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NODE								
2	1		0.0	0.1950E+020.0					
3	2		0.0	0.2122E+020.0					
4	3		0.0	0.2294E+020.0					
5	4		0.3050E+010.1926E+020.0						
6	5		0.3320E+010.2096E+020.0						
7	6		0.3589E+010.2266E+020.0						
8	7		0.6026E+010.1855E+020.0						
9	8		0.6557E+010.2018E+020.0						
10	9		0.7089E+010.2182E+020.0						
11	10		0.8853E+010.1737E+020.0						
12	11		0.9634E+010.1891E+020.0						
13	12		0.1041E+020.2044E+020.0						
14	13		0.1146E+020.1578E+020.0						
15	14		0.1247E+020.1717E+020.0						
16	15		0.1348E+020.1856E+020.0						
17	16		0.1379E+020.1379E+020.0						
18	17		0.1500E+020.1500E+020.0						
19	18		0.1622E+020.1622E+020.0						
20	19		0.1578E+020.1146E+020.0						
21	20		0.1717E+020.1247E+020.0						
22	21		0.1856E+020.1348E+020.0						
23	22		0.1737E+020.8853E+010.0						
24	23		0.1891E+020.9634E+010.0						
25	24		0.2044E+020.1041E+020.0						
26	25		0.1855E+020.6026E+010.0						
27	26		0.2018E+020.6557E+010.0						
28	27		0.2182E+020.7089E+010.0						
29	28		0.1926E+020.3050E+010.0						
30	29		0.2096E+020.3320E+010.0						
31	30		0.2266E+020.3589E+010.0						
32	31		0.1950E+020.8756E-090.0						
33	32		0.2122E+020.9529E-090.0						
34	33		0.2294E+020.1030E-080.0						
35	34		0.1926E+02-.3050E+010.0						
36	35		0.2096E+02-.3320E+010.0						
37	36		0.2266E+02-.3589E+010.0						
38	37		0.1855E+02-.6026E+010.0						
39	38		0.2018E+02-.6557E+010.0						
40	39		0.2182E+02-.7089E+010.0						
41	40		0.1737E+02-.8853E+010.0						

(途中省略)

1651	1650	0.8679E+010.4006E+020.4309E+02							
1652	1651	0.8314E+010.4006E+020.4495E+02							
1653	1652	0.8894E+010.4006E+020.4462E+02							
1654	1653	0.9474E+010.4006E+020.4428E+02							
1655	1654	0.8869E+010.4006E+020.4608E+02							
1656	1655	0.9488E+010.4006E+020.4582E+02							
1657	1656	0.1011E+020.4006E+020.4556E+02							
1658	1657	0.9273E+010.4006E+020.4727E+02							
1659	1658	0.9920E+010.4006E+020.4709E+02							
1660	1659	0.1057E+020.4006E+020.4692E+02							
1661	1660	0.9518E+010.4006E+020.4850E+02							
1662	1661	0.1018E+020.4006E+020.4841E+02							
1663	1662	0.1085E+020.4006E+020.4832E+02							
1664	1663	0.9600E+010.4006E+020.4975E+02							
1665	1664	0.1027E+020.4006E+020.4975E+02							
1666	1665	0.1094E+020.4006E+020.4975E+02							
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

2.1.2 面内曲げモーメントを受ける直管付きエルボの弾性解析

(1) 問題

図 2.1.2-1 に示す直管付きエルボの一端を固定し、剛体を取り付けた他端に面内曲げモーメントを負荷する場合の弾性解析を行なう。材料は SUS 304 であり、弾性係数は 21.7×10^3 ksi, ポアソン比 0.309 を用いる。また、負荷するモーメントは $7458 \text{ lb} \cdot \text{in}$ である。

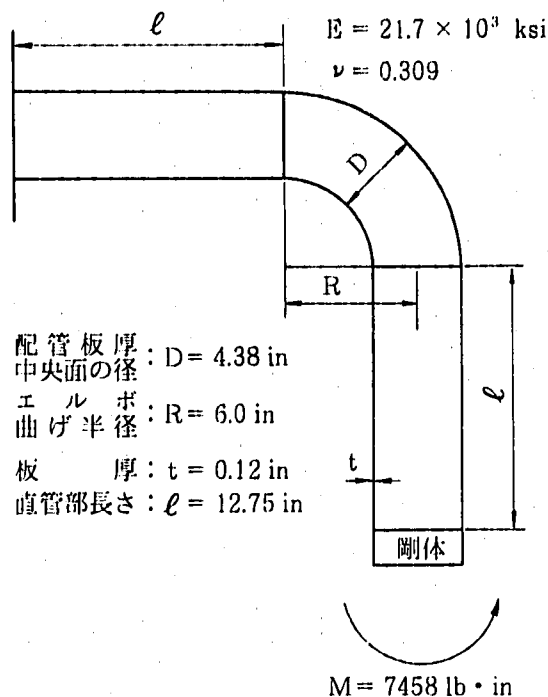


図 2.1.2-1 直管付きエルボ

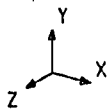
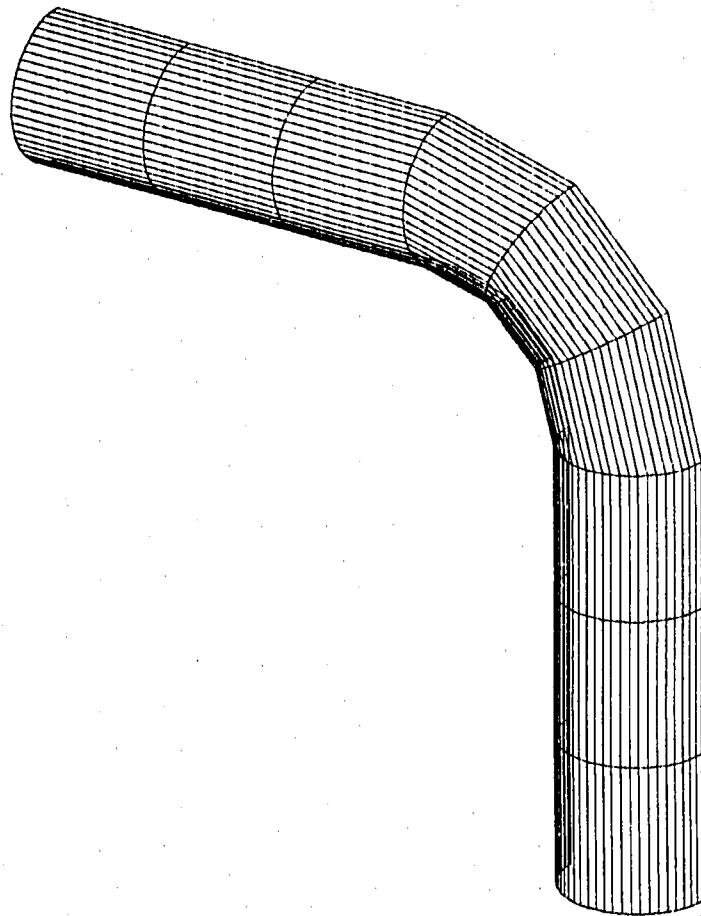
(2) 有限要素モデルと解析条件

構造と負荷の対称性を考慮して、半断面についてモデル化を行なう。6 節点配管要素 ELBOW 6 R による、円周方向 27 分割、管長手方向 9 分割の有限要素モデルを図 2.1.2-2 に示す。表 2.1.2-1 は ELBOW 6 R の節点自由度について示したものであるが、半断面で解析する場合の対称条件は、エルボ節点では対称面で波形が逆対称となる $\cos \phi$, $\sin 2\phi$, $\cos 3\phi$, $\sin 4\phi$, $\cos 5\phi$, $\sin 6\phi$ に対応する自由度 u_3 , u_4 , u_7 , u_8 , u_{11} , u_{12} を拘束し、シェル節点では対称面内の節点において、円周方向変位 v , 管長手方向軸回り回転 θ_i を拘束する。また、荷重端に剛体に取り付けられている条件は、変形後も円形断面を保持するものとして、エルボ節点の自由度のうち管長手方向の並進量 u_1 , 面内回転に対応する u_2 以外の自由度 u_3 , u_4 , \dots , u_{12} を拘束する。シェル節点については、変形が微小であるとして、断面が変形前の円形を保持するために、次の条件を荷重端に与える。

$$\begin{aligned}
 v_i &= -w_{1001} \cos \phi_i \\
 w_i &= -w_{1001} \sin \phi_i \\
 \theta_i &= 0 \\
 \theta_s^i &= \frac{u_2}{r} \sin \phi_i
 \end{aligned}
 \tag{2.1.2-1}$$

ここで、 w_{1001} 、 r はそれぞれ節点 1001 の半径方向変位、板厚中央面の半径を表わし、添字 i は節点 i における値であることを表わす。

FINAS



GEOM. SCALE 4.00000

FINITE ELEMENT MODEL

図 2.1.2-2 有限要素モデル

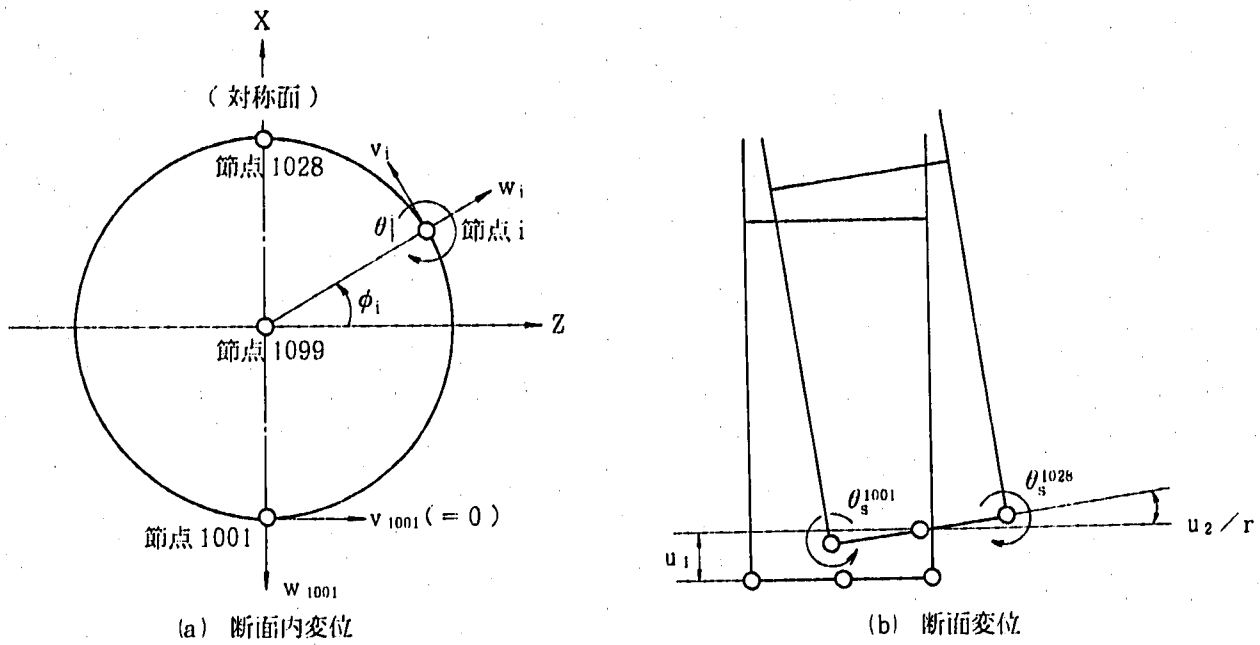


図 2.1.2 - 3 荷重端の変位

表 2.1.2 - 1 ELBOW 6 R 要素の節点自由度

節 点	自 由 度	説 明
エルボ節点	u_1	管長手方向並進量
	u_2	面内回転に対応
	u_3	面外回転に対応
	u_4	$u = u_1 + \sum_k^6 \{ u_{2k} \sin(k\phi) + u_{2k+1} \cos(k\phi) \}$
	u_5	
	\vdots	
	u_{13}	u : 管長手方向変位 ϕ : 円周方向の位置を表わす角度
シェル節点	u	円周方向変位
	w	半径方向変位
	θ_1	管長手方向軸回り回転
	θ_s	断面の円周方向接線回りの回転

(円周方向断面)

表 2.1.2 - 2 はり要素と ELBOW 6 R の荷重入力の対比

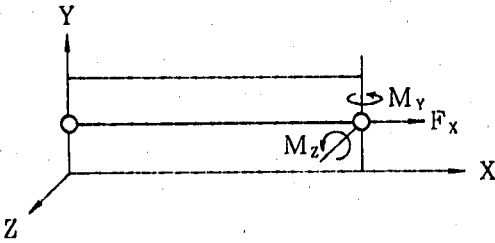
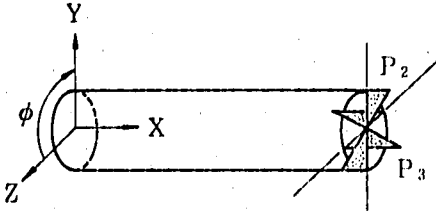
はり要素	ELBOW 6 R (エルボ節点)
F_x : 軸力 M_y : Y 軸回り (面外) モーメント M_z : Z 軸回り (面内) モーメント	$P_1 = F_x$ $P_2 = -M_z / r$ ただし, r は断面平均半径 $P_3 = M_y / r$
	

表 2.1.2 - 2 ははり要素と ELBOW 6 R 要素における荷重入力を対比したものである。はり要素が XY 面内にあり, ELBOW 6 R の円周方向の位置を表わす角度 ϕ を表中に示すように定めるとすると, 面内曲げモーメント M_z , 面外曲げモーメント M_y を与える場合には, エルボ節点の 2, 3 番目の自由度にそれぞれ $-M_z/r$, M_y/r を入力し, その他の剪断力 F_y , F_z , ねじりモーメント M_x を与える場合には, 断面内のシェル節点の 1, 2 番目の自由度に力を割り振って入力する。したがって図 2.1.2 - 1 に示す面内曲げモーメント $7458 \text{ lb} \cdot \text{in}$ を与えるには, 節点 1099 の 2 番目の自由度に次の値を入力すればよい。

$$P = -7458 / 2.19 / 2 = -1702.7397 \text{ lb} \quad (2.1.2 - 2)$$

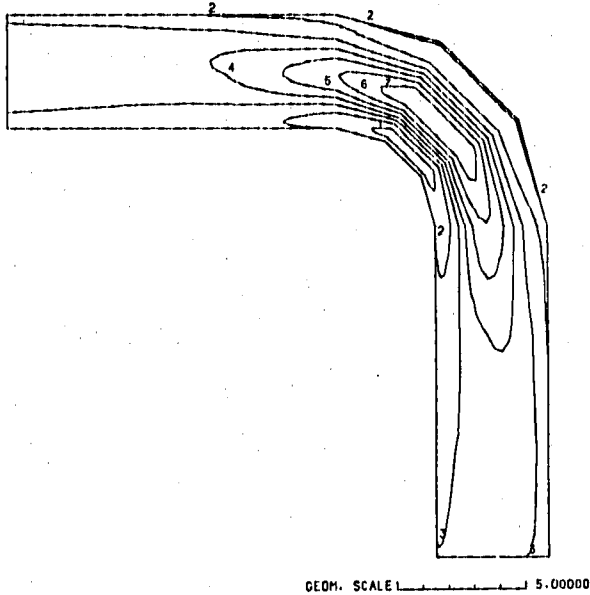
(3) 解析結果

周方向応力の内外表面における等高線分布を図 2.1.2 - 4 と図 2.1.2 - 5 に, 長手方向応力の等高線分布を図 2.1.2 - 6 と図 2.1.2 - 7 にそれぞれ示し, 周方向応力と長手方向応力のエルボ中央部における周方向分布を図 2.1.2 - 8 と図 2.1.2 - 9 に示す。

FINAS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-10.0000
2	-5.00000
3	0.0
4	4.999999
5	9.999999
6	15.00000
7	19.99998
8	24.99999



STEP NO. 1

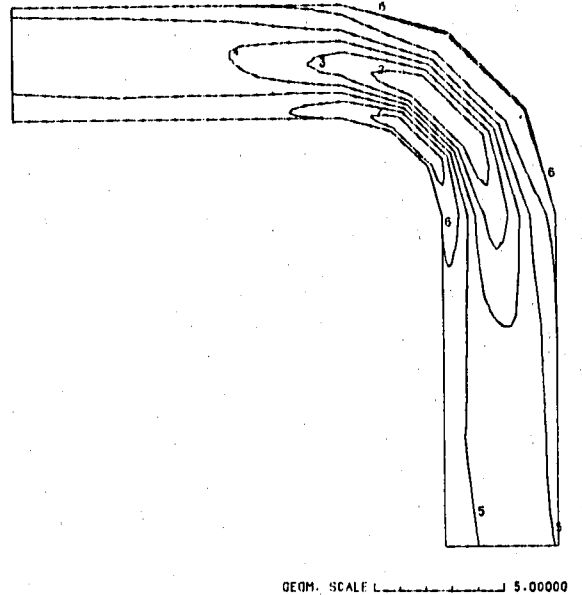
CIRCUMFERENTIAL STRESS CONTOUR ON THE INNER SURFACE

図 2.1.2-4 内表面における周方向応力

FINAS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-20.0000
2	-15.0000
3	-10.0000
4	-5.00000
5	0.0
6	4.999999
7	9.999999



STEP NO. 1

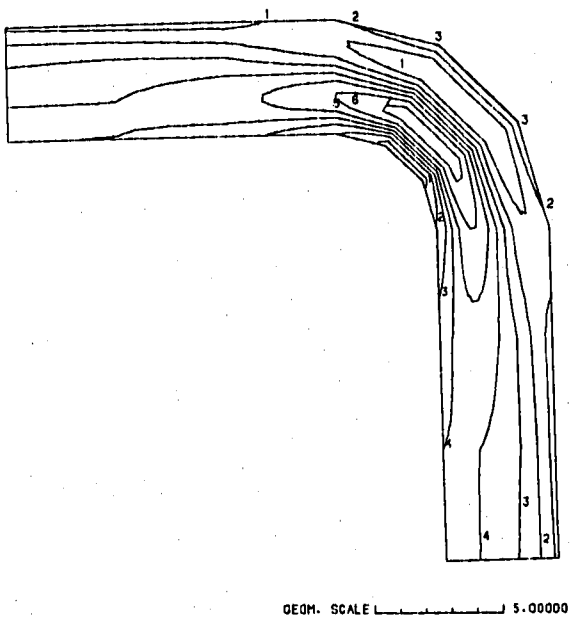
CIRCUMFERENTIAL STRESS CONTOUR ON THE OUTER SURFACE

図 2.1.2-5 外表面における周方向応力

FINAS
STRESS COMPONENT 1

CONTOUR VALUES

1	-5.00000
2	-2.50000
3	0.0
4	2.499999
5	4.999999
6	7.499999
7	9.999999



STEP NO. 1

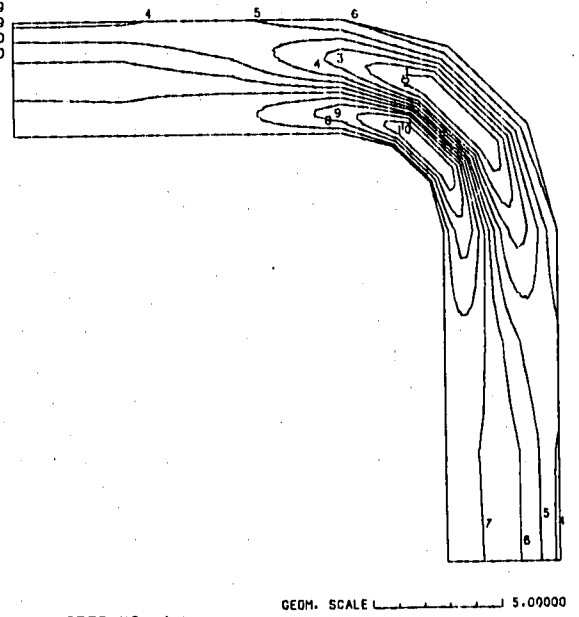
LONGITUDINAL STRESS CONTOUR ON THE INNER SURFACE

図 2.1.2-6 内表面における長手方向応力

FINAS
STRESS COMPONENT 1

CONTOUR VALUES

1	-12.5000
2	-10.0000
3	-7.50000
4	-5.00000
5	-2.50000
6	0.0
7	2.499999
8	4.999999
9	7.499999
10	9.999999
11	12.50000
12	15.00000

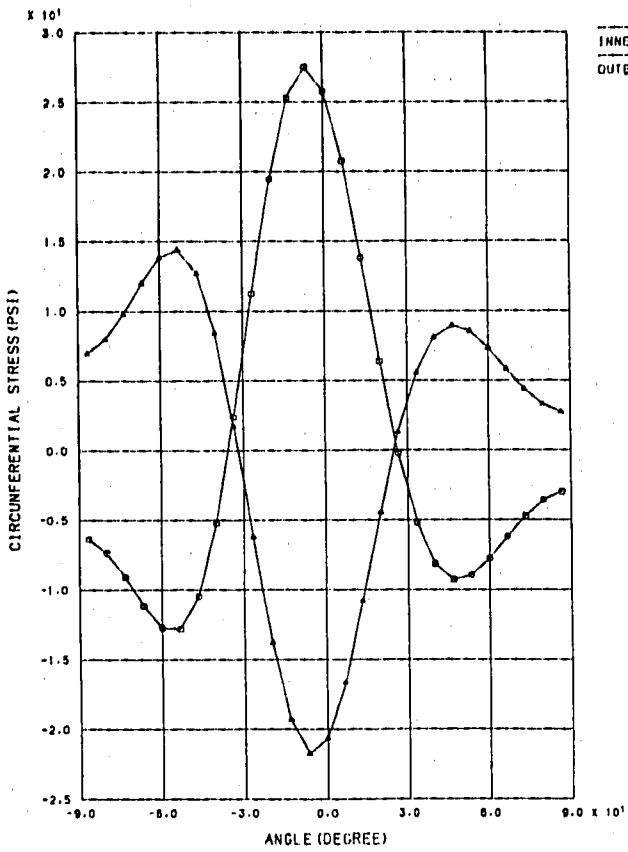


STEP NO. 1

LONGITUDINAL STRESS CONTOUR ON THE OUTER SURFACE

図 2.1.2-7 外表面における長手方向応力

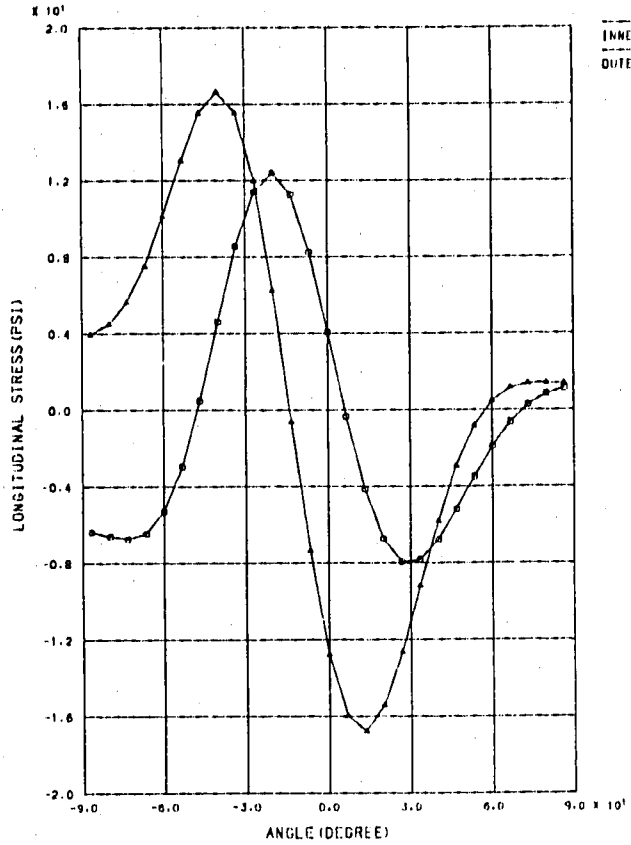
FINAS
STEP NO. 1



CIRCUMFERENTIAL STRESS DISTRIBUTION AT THE MIDDLE OF ELBOW

図 2.1.2 - 8 エルボ中央部における周方向応力の分布

FINAS
STEP NO. 1



LONGITUDINAL STRESS DISTRIBUTION AT THE MIDDLE OF ELBOW

図 2.1.2 - 9 エルボ中央部における長手方向応力の分布

(4) 入力データ

表 2.1.2-3 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE ELBOW-PIPE ASSEMBLY SUBJECTED TO IN-PLANE BENDING MOMENT								
4	NOPRINT DESCR								
5	STATIC E								
6	MODEL								
7	COORDINATE SYSTEM								
8	1	2		0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
9	2	2	1	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10				6.0	90.0	0.0	6.0	90.0	100.0
11	3	2	1	100.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12				6.0	60.0	0.0	6.0	60.0	100.0
13	4	2	1	100.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14				6.0	30.0	0.0	6.0	30.0	100.0
15	5	2	1	100.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16				6.0	0.0	0.0	6.0	0.0	100.0
17				100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	NODE								
19	**NLOOP1		4	100			-4.25		
20	101	2			2.19	-90.0	12.75	27	1 128
21	128	2			2.19	90.0	12.75		
22	199	2			0.00	0.0	12.75		
23	**END1								
24	501	3			2.19	-90.0		27	1 528
25	528	3			2.19	90.0			
26	599	3			0.00	0.0			
27	601	4			2.19	-90.0		27	1 628
28	628	4			2.19	90.0			
29	699	4			0.00	0.0			
30	**NLOOP1								
31	701	5	4	100			-4.25		
32	728	5			2.19	-90.0	0.00	27	1 728
33	799	5			2.19	90.0	0.00		
34	9999	5			0.00	0.0	0.00		
35	ELEMENT TYPE								
36	1	ELBOW6R							
37	CONNECTION								
38	**ELOOP2	9	100	100	100	100	100	100	100
39	**ELOOP1	27	1	1	1	1	1	1	1
40	101	1	1	1	101	102	199	201	202 299 9999
41	**END1								
42	**END2								
43	GEOMETRY								
44	1	0.12							
45	MATERIAL								
46	1								
47		E	21.7E3						
48		NU	0.309						
49	BOUNDARY								
50	1								
51		101	128		1	4			
52		199			1	13			
53		201	1001	100	1				
54		201	1001	100	3				
55		228	1028	100	1				
56		228	1028	100	3				
57		299	999	100	3	4			
58		299	999	100	7	8			
59		299	999	100	11	12			
60		1002	1027		3				
61		1099			3	13			
62	FASTENING								
63	1								
64	F3	1002	1		1				
65		1001	2-0.1160938						
66	F3	1002	2		1				
67		1001	2 0.9932382						
68	F3	1002	4		1				
69		1099	2-0.4535335						
70	F3	1003	1		1				
71		1001	2-0.2306165						
72	F3	1003	2		1				
73		1001	2 0.9730447						
74	F3	1003	4		1				
75		1099	2-0.4443127						
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76		F3	1004	1					
77			1001	2-0.3420204					
78		F3	1004	2					
79			1001	2 0.9396925					
80		F3	1004	4					
81			1099	2-0.4290834					
82		F3	1005	1					
83			1001	2-0.4488000					
84		F3	1005	2					
85			1001	2 0.8936322					
86		F3	1005	4					
87			1099	2-0.4080513					
88		F3	1006	1					
89			1001	2-0.5495091					
90		F3	1006	2					
91			1001	2 0.8354877					
92		F3	1006	4					
93			1099	2-0.3815013					
94		F3	1007	1					
95			1001	2-0.6427877					
96		F3	1007	2					
97			1001	2 0.7660444					
98		F3	1007	4					
99			1099	2-0.3497920					
100		F3	1008	1					
101			1001	2-0.7273736					
102		F3	1008	2					
103			1001	2 0.6862417					
104		F3	1008	4					
105			1099	2-0.3133524					
106		F3	1009	1					
107			1001	2-0.8021231					
108		F3	1009	2					
109			1001	2 0.5971586					
110		F3	1009	4					
111			1099	2-0.2726752					
112		F3	1010	1					
113			1001	2-0.8660249					
114		F3	1010	2					
115			1001	2 0.5000007					
116		F3	1010	4					
117			1099	2-0.2283108					
118		F3	1011	1					
119			1001	2-0.9182160					
120		F3	1011	2					
121			1001	2 0.3960800					
122		F3	1011	4					
123			1099	2-0.1808584					
124		F3	1012	1					
125			1001	2-0.9579893					
126		F3	1012	2					
127			1001	2 0.2868038					
128		F3	1012	4					
129			1099	2-0.1309606					
130		F3	1013	1					
131			1001	2-0.9848076					
132		F3	1013	2					
133			1001	2 0.1736491					
134		F3	1013	4					
135			1099	2-0.0792918					
136		F3	1014	1					
137			1001	2-0.9983081					
138		F3	1014	2					
139			1001	2 0.0581451					
140		F3	1014	4					
141			1099	2-0.0265503					
142		F3	1015	1					
143			1001	2-0.9983082					
144		F3	1015	2					
145			1001	2-0.0581442					
146		F3	1015	4					
147			1099	2 0.0265499					
148		F3	1016	1					
149			1001	2-0.9848079					
150		F3	1016	2					

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
151		0	1001	2-0.1736472					0
152	F3		1016	4					1
153			1099	2 0.0792909					
154	F3		1017	1					1
155			1001	2-0.9579896					
156	F3		1017	2					1
157			1001	2-0.2868029					
158	F3		1017	4					1
159			1099	2 0.1309602					
160	F3		1018	1					1
161			1001	2-0.9182163					
162	F3		1018	2					1
163			1001	2-0.3960791					
164	F3		1018	4					1
165			1099	2 0.1808581					
166	F3		1019	1					1
167			1001	2-0.8660259					
168	F3		1019	2					1
169			1001	2-0.4999991					
170	F3		1019	4					1
171			1099	2 0.2283101					
172	F3		1020	1					1
173			1001	2-0.8021240					
174	F3		1020	2					1
175			1001	2-0.5971575					
176	F3		1020	4					1
177			1099	2 0.2726747					
178	F3		1021	1					1
179			1001	2-0.7273742					
180	F3		1021	2					1
181			1001	2-0.6862411					
182	F3		1021	4					1
183			1099	2 0.3133521					
184	F3		1022	1					1
185			1001	2-0.6427885					
186	F3		1022	2					1
187			1001	2-0.7660437					
188	F3		1022	4					1
189			1099	2 0.3497917					
190	F3		1023	1					1
191			1001	2-0.5495102					
192	F3		1023	2					1
193			1001	2-0.8354869					
194	F3		1023	4					1
195			1099	2 0.3815010					
196	F3		1024	1					1
197			1001	2-0.4488000					
198	F3		1024	2					1
199			1001	2-0.8936322					
200	F3		1024	4					1
201			1099	2 0.4080513					
202	F3		1025	1					1
203			1001	2-0.3420213					
204	F3		1025	2					1
205			1001	2-0.9396922					
206	F3		1025	4					1
207			1099	2 0.4290832					
208	F3		1026	1					1
209			1001	2-0.2306173					
210	F3		1026	2					1
211			1001	2-0.9730445					
212	F3		1026	4					1
213			1099	2 0.4443126					
214	F3		1027	1					1
215			1001	2-0.1160938					
216	F3		1027	2					1
217			1001	2-0.9932382					
218	F3		1027	4					1
219			1099	2 0.4535335					
220	F3		1028	2					1
221			1001	2-1.0000000					
222	F3		1028	4					1
223			1099	2 0.4566211					
224	FORCE								
225	1								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
226	0	1099				-1.7027397			0
227		HISTORY							
228		INTERVAL	1						
229		BOUN	1						
230		FAS	1						
231		FORC	1						
232		END MODEL							
233		OUTPUT							
234		STRUCTURE PLOT							
235		PTITLE	FINITE	ELEMENT	MODEL				
236		AXES	Z	X	Y				
237		IPLT							
238		PTITLE	CIRCUMFERENTIAL STRESS CONTOUR ON THE INNER SURFACE						
239		VIEW	0.0	0.0	0.0				
240		CLEVEL	-10.0	-5.0	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0
241			25.0						
242		CPLT	STRS2	BOT	LCL				
243		PTITLE	CIRCUMFERENTIAL STRESS CONTOUR ON THE OUTER SURFACE						
244		CLEVEL	-20.0	-15.0	-10.0	-5.0	0.0	5.0	10.0
245		CPLT	STRS2	TOP	LCL				
246		PTITLE	LONGITUDINAL STRESS CONTOUR ON THE INNER SURFACE						
247		CLEVEL	-5.0	-2.5	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0
248		CPLT	STRS1	BOT	LCL				
249		PTITLE	LONGITUDINAL STRESS CONTOUR ON THE OUTER SURFACE						
250		CLEVEL	-12.5	-10.0	-7.5	-5.0	-2.5	0.0	2.5
251			5.0	7.5	10.0	12.5	15.0		
252		CPLT	STRS1	TOP	LCL				
253		*XYPLT							
254		ILIST	1	501	527	1			
255		ILIST	2	501	527	9			
256		XVALU	1						
257					-86.67	-80.0	-73.33	-66.67	-60.0
258					-46.67	-40.0	-33.33	-26.67	-20.0
259					-6.67	0.0	6.67	13.33	20.0
260					33.33	40.0	46.67	53.33	60.0
261					73.33	80.0	86.67		66.67
262		PTITLE	CIRCUMFERENTIAL STRESS DISTRIBUTION AT THE MIDDLE OF ELBOW						
263		XTITLE	ANGLE(DEGREE)						
264		YTITLE	CIRCUMFERENTIAL STRESS(PSI)						
265		XRANGE	-90.0	90.0					
266		*YRANGE							
267		XDIVISION	6	0					
268		YDIVISION	10	0					
269		CURVE	1		INNER				
270		CURVE	2		OUTER				
271		PLOT2	STRS2ILIST	1	XVALU	1STRS2ILIST	2	XVALU	1
272		*PTITLE	LONGITUDINAL STRESS DISTRIBUTION AT THE MIDDLE OF ELBOW						
273		YTITLE	LONGITUDINAL STRESS(PSI)						
274		*YRANGE							
275		YDIVISION	10	0					
276		PLOT2	STRS1ILIST	1	XVALU	1STRS1ILIST	2	XVALU	1
277		END OUTPUT							
278		END FINAS							
279									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

2.1.3 多種の荷重を受ける配管の弾性解析

(1) 問題

直管、曲管およびバルブで構成される図 2.1.3 - 1 に示す配管系が複数の荷重を受ける場合について弾性解析を行なう。²⁾ 直管および曲管は同一の外径と板厚を持ち、外径は 10.74 in、板厚は 0.5 in であり、曲管の曲げ半径は 15 in である。バルブは直管と同様に扱うものとし、剛性が等価になる外径を 10.74 in、板厚を 2.0 in とする。この配管系はバネ、ハンガーおよびコンスタントフォースハンガーにより支持されており、バネ定数は 10^4 lb/in、ハンガーの等価バネ定数は 10^5 lb/in である。また、直管、曲管およびバルブの材料定数は弾性係数が 27.9×10^6 lb/in²、ポアソン比が 0.333 である。配管系は図 2.1.3 - 1 の C 端で固定され、フォースハンガーの反力を含めて表 2.1.3 - 1 に示す荷重が与えられる。

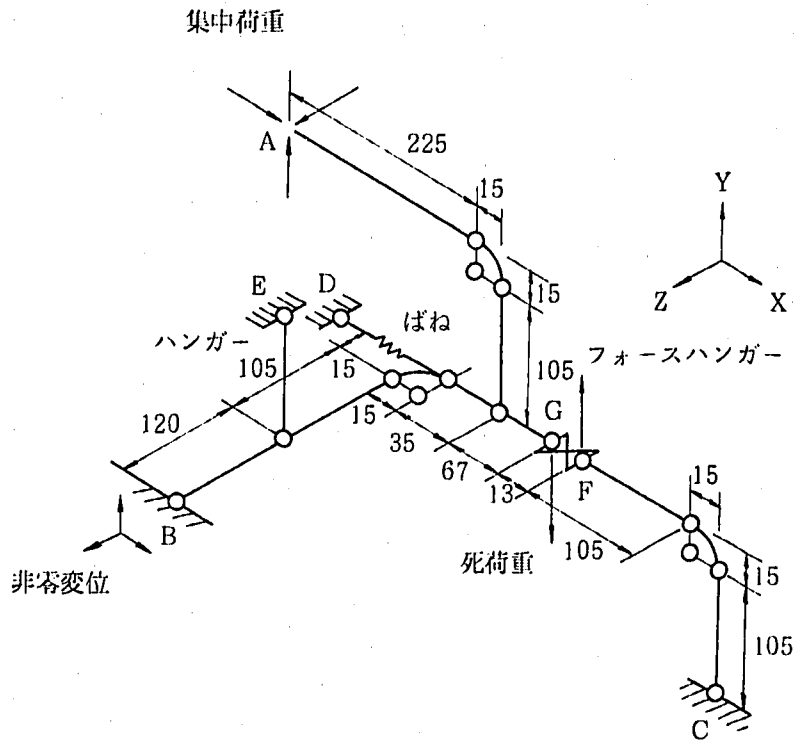


図 2.1.3 - 1 配管系

表 2.1.3-1 負荷条件

強制変位	B点において $u_x = 0.2 \text{ in}$, $u_y = 0.1 \text{ in}$ $u_z = 0.3 \text{ in}$
集中荷重	F点において $P_y = 1000 \text{ lb}$ G点において $P_y = -200 \text{ lb}$ A点において $P_x = 3000 \text{ lb}$, $P_y = 1000 \text{ lb}$ $P_z = 2000 \text{ lb}$
自重	直管, 曲管, バルブ において(-Y方向) $W = 6.61 \text{ lb/in}$

(2) 有限要素モデルと解析条件

直管, 曲管およびバルブについては2節点配管要素 PIPE 2, バネおよびハンガーについては3次元バネ減衰要素 LCOMB 2を用いて図 2.1.3-2 に示す有限要素モデルを作成する。境界条件は表 2.1.3-2 のものを使用し, 負荷は表 2.1.3-1 に基づき表 2.1.3-2 のように分類して表 2.1.3-3 の荷重ケースを作成する。

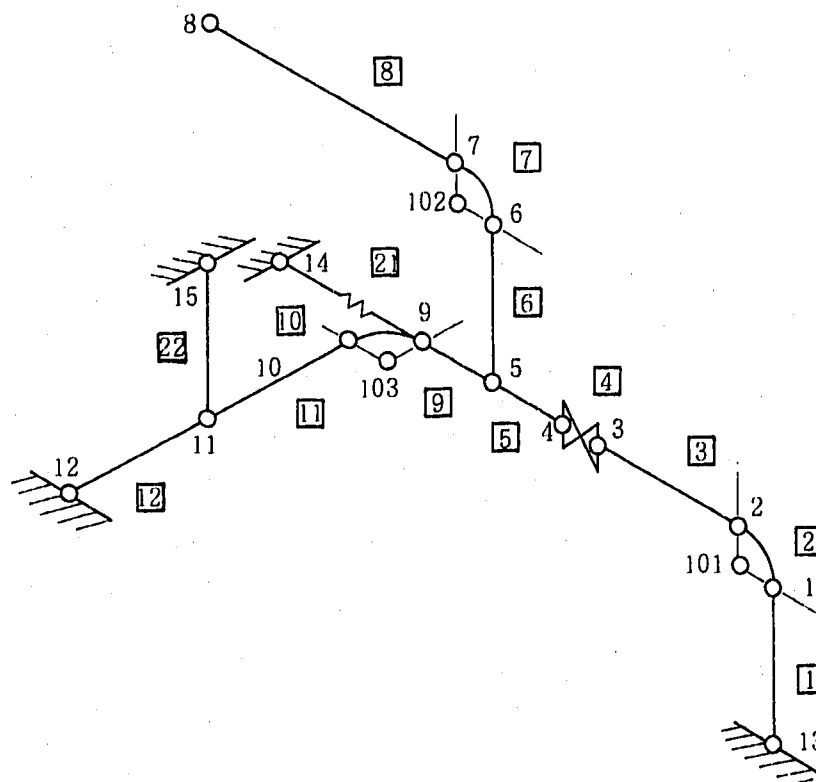


図 2.1.3-2 有限要素モデル

表 2.1.3 - 2 境界条件

節点 13, 14, 15	$u_x = u_y = u_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$
節点 12	$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ u_x, u_y, u_z は表 2.1.3 - 3 参照

表 2.1.3 - 3 負荷の分類

強制変位	節点 12 において $u_x = 0.2 \text{ in}, u_y = 0.1 \text{ in},$ $u_z = 0.3 \text{ in}$
荷重 1	節点 3 において $P_y = 1000 \text{ lb}$ 節点 4 において $P_y = -200 \text{ lb}$
荷重 2	節点 8 において $P_x = 3000 \text{ lb}, P_y = 1000 \text{ lb},$ $P_z = 2000 \text{ lb}$
荷重 3	要素 1~12 において自重 (-Y 方向) 6.61 lb/in

注) 荷重 1~3 では節点 12 において $u_x = u_y = u_z = 0$

表 2.1.3 - 4 荷重ケース

荷重ケース	強制変位	荷重 1	荷重 2	荷重 3
1	○			
2		○		
3			○	
4				○
5	○	○	○	○

(3) 解析結果

荷重ケース 5 について代表点での変位, 支点反力および部材力を SAP IV の解と比較して表 2.1.3 - 5 ~ 表 2.1.3 - 7 にそれぞれ示す。

表 2.1.3 - 5 荷重ケース 5 における配管分岐点および荷重端の変位 (in)

成分	配管分岐点 (節点 5)		荷重端 (節点 8)	
	FINAS	SAP IV	FINAS	SAP IV
u_x	7.95473×10^{-2}	7.95474×10^{-2}	8.32475×10^{-1}	8.32476×10^{-1}
u_y	2.44465×10^{-2}	2.44464×10^{-2}	2.13155	2.53155
u_z	1.67004×10^{-1}	1.67005×10^{-1}	7.43779	7.43779
θ_x	5.14004×10^{-1}	5.14404×10^{-3}	1.04102×10^{-2}	1.04102×10^{-2}
θ_y	3.59782×10^{-3}	3.59782×10^{-3}	3.02333×10^{-2}	3.02333×10^{-2}
θ_z	-3.21090×10^{-3}	-3.21091×10^{-3}	-1.14535×10^{-2}	-1.14535×10^{-2}

表 2.1.3 - 6 荷重ケース 5 における強制変位端および固定端の支点反力 (lb)

成分	強制変位端 (節点 12)		固定端 (節点 13)	
	FINAS	SAP IV	FINAS	SAP IV
F_x	-- 160.631	-- 160.631	-- 2044.64	-- 2044.640
F_y	2961.94	2961.946	3216.14	3216.143
F_z	-- 3417.14	-- 3417.135	1417.14	1417.135
M_x	175573.0	175573.52	71589.9	71589.92
M_y	-- 10761.8	-- 10761.78	23597.1	23597.09
M_z	55093.6	55093.66	150230.0	150230.06

表 2.1.3-7 荷重ケース 5 における曲管および直管の部材力 (lb)

位置	成分	曲管部 (要素 2)		直管部 (要素 12)	
		FINAS	SAPIV	FINAS	SAPIV
始 点	F_x	- 2522.09	- 2522.093	- 3417.14	- 3417.135
	F_y	2044.64	2044.640	21687.4	2168.746
	F_z	1417.14	1417.135	160.631	160.631
	M_x	- 23597.1	- 23597.09	55093.6	55093.66
	M_y	77209.2	77209.30	- 30037.5	- 30037.51
	M_z	- 64457.2	- 64457.16	132268.0	132268.06
中 点	F_x	- 3174.10	- 3174.104		
	F_y	- 282.546	- 282.546		
	F_z	1417.14	1417.135		
	M_x	- 77506.9	- 77506.93		
	M_y	52940.5	52940.55		
	M_z	- 725288.9	- 75288.97		
終 点	F_x	- 2044.64	- 2044.640	- 3417.14	- 3417.135
	F_y	- 2366.35	- 2366.348	2961.94	2961.946
	F_z	1417.14	1417.135	160.631	160.631
	M_x	- 98466.2	- 98466.34	55093.6	55093.66
	M_y	- 2340.07	- 2340.06	- 10761.8	- 10761.78
	M_z	- 58782.6	- 58782.62	- 175573.0	- 175573.52

(4) 入力データ

表 2.1.3-8 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	FINAS								
2	STATIC								
3	E MLT								
4	TITLE MULTI-LOADING FOR PIPE NETWORK								
5	MODEL								
6	NODE								
7	1			0.0	105.0	0.0			
8	2			-15.0	120.0	0.0			
9	3			-120.0	120.0	0.0			
10	4			-133.0	120.0	0.0			
11	5			-200.0	120.0	0.0			
12	6			-200.0	225.0	0.0			
13	7			-215.0	240.0	0.0			
14	8			-440.0	240.0	0.0			
15	9			-235.0	120.0	0.0			
16	10			-250.0	120.0	15.0			
17	11			-250.0	120.0	120.0			
18	12			-250.0	120.0	240.0			
19	13			0.0	0.0	0.0			
20	14			-236.0	120.0	0.0			
21	15			-250.0	121.0	120.0			
22	101			-15.0	105.0	0.0			
23	102			-215.0	225.0	0.0			
24	103			-235.0	120.0	15.0			
25	ELEMENT TYPE								
26	1	PIPE2							
27	2	LCOMB2							
28	CONNECTION								
29	1	1	2	1	13	1			
30	2	1	1	1	1	2	101		
31	3	1	2	1	2	3			
32	4	1	3	1	3	4			
33	5	1	2	1	4	5			
34	6	1	2	1	5	6			
35	7	1	1	1	6	7	102		
36	8	1	2	1	7	8			
37	9	1	2	1	5	9			
38	10	1	1	1	9	10	103		
39	11	1	2	1	10	11			
40	12	1	2	1	11	12			
41	21	2	4		9	14			
42	22	2	5		11	15			
43	GEOMETRY								
44	1	5	15.0		10.74	0.5			
45	2	5			10.74	0.5			
46	3	5			10.74	2.0			
47	4	7	1.0E4		0.0	0.0	0.0		
48	5	7	1.0E5		0.0	0.0	0.0		
49	MATERIAL								
50	1				27.9E6				
51					0.333				
52	BOUNDARY								
53	1								
54		12				1		0.2	
55		12				2		0.1	
56		12				3		0.3	
57		12				4	6		
58		13	15			1	6		
59	FORCE								
60	1								
61		3				1	3		1000.0
62		4				1	3		-200.0
63	2								
64		8				1	3	3000.0	1000.0 2000.0
65	3								
66		6	1	12				-6.61	
67	MULTICASE								
68	LOADING								
69		BOUN	1						
70	LOADING	BOUN	2						
71		BOUN	1	0.0					
72		FORC	1						
73	LOADING	BOUN	3						
74		BOUN	1	0.0					
75		FORC	2						

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	LOADING	0	0	0	0	0	0	0	0
77			4						
78			1	0.0					
79	COMBINATION		3						
80	LOAD		5		2		3		
81			1						
82	END MODEL		4						
83	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2 材料非線形解析

2.2.1 円筒の熱ラッチェティング解析

(1) 問題

内径 185 mm, 肉厚 15 mm の 304 ステンレス鋼製無限円筒に一定内圧下で肉厚方向に直線分布の温度変化が繰り返し加えられる場合について弾塑性熱ラッチェティング解析を行なう。³⁾ 内圧は 1.1352 kg/mm^2 であり, 熱負荷は図 2.2.1-2 に示す温度変化が 5 回繰り返されるものとする。材料定数は温度依存であり表 2.2.1-1 のものを用いる。

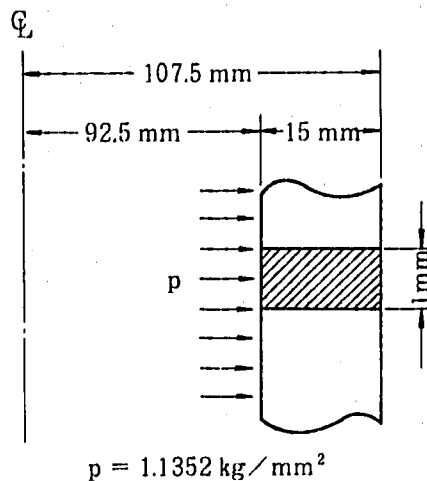


図 2.2.1-1 無限円筒

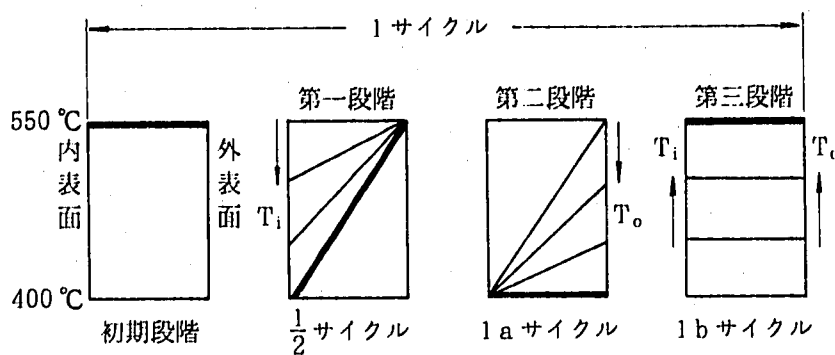


図 2.2.1-2 温度変化

表 2.2.1-1 材料定数

温度 (°C)	350	400	450	500	550	600
E (kg/mm ²)	1.762 × 10 ⁴	1.714 × 10 ⁴	1.665 × 10 ⁴	1.616 × 10 ⁴	1.568 × 10 ⁴	1.519 × 10 ⁴
ν	0.292	0.295	0.299	0.302	0.306	0.309
α (1/°C)	1.90 × 10 ⁻⁵	1.94 × 10 ⁻⁵	1.98 × 10 ⁻⁵	2.02 × 10 ⁻⁵	2.06 × 10 ⁻⁵	2.09 × 10 ⁻⁵
σ _v (kg/mm ²)	15.49	14.90	14.33	13.76	13.20	12.65
H' (kg/mm ²)	395.85	383.25	370.95	358.65	346.50	334.65

(2) 有限要素モデルと解析条件

図 2.2.1-1 の斜線部について図 2.2.1-3 に示す有限要素モデルを作成する。使用する要素は 4 節点四辺形軸対称要素 QAX 4 である。負荷は内圧と熱負荷の他に内圧に対応する軸力 30514.46 kg を図 2.2.1-4 の DC 面に与える。塑性硬化則は移動硬化則を用いる。

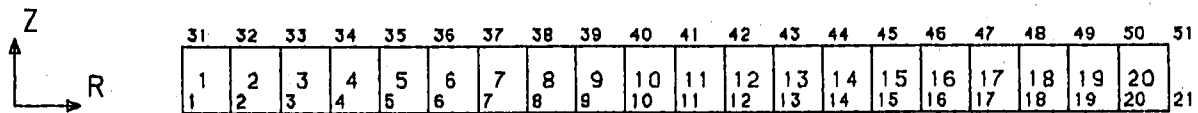


図 2.2.1-3 有限要素モデル

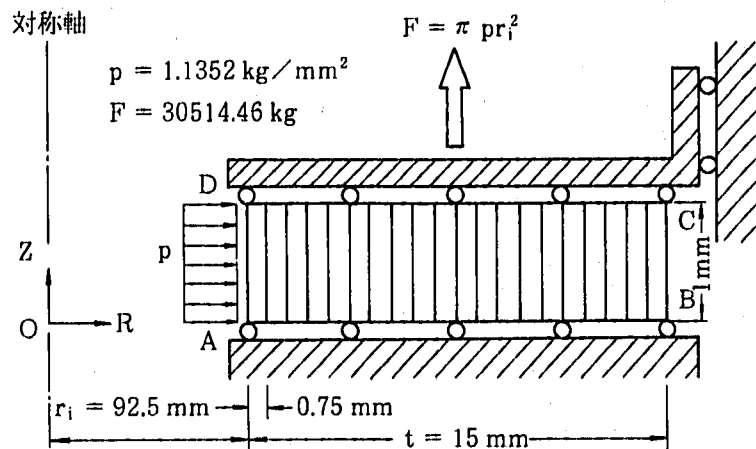


図 2.2.1-4 境界条件

(3) 解析結果

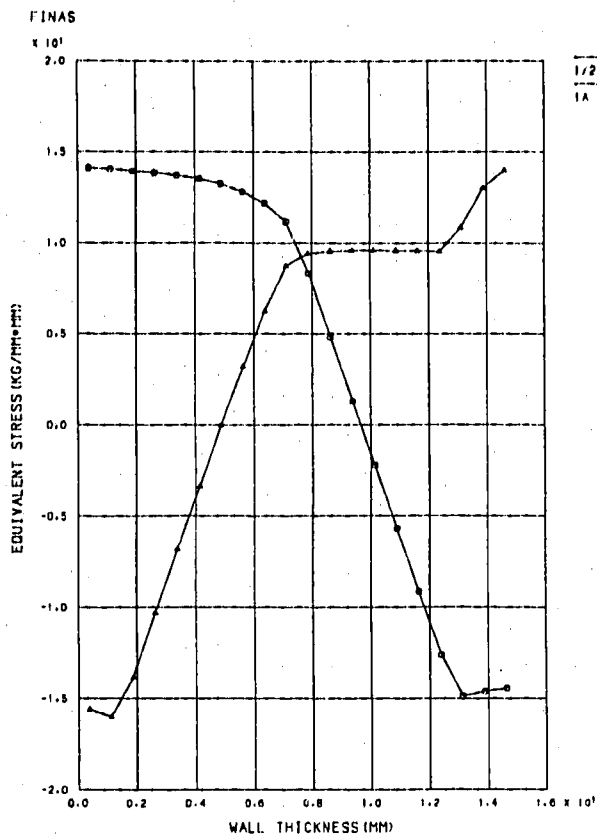
5 サイクル終了時における累積ひずみを EPICC 報告書³⁾の解と比較して表 2.2.1-2 に示し、各サイクル終了時における相当塑性ひずみを表 2.2.1-3 に示す。また、肉厚方向の軸方向応力の分布を図 2.2.1-5 と図 2.2.1-6 に、周方向応力の分布を図 2.2.1-7 と図 2.2.1-8 にそれぞれ示し、内側要素中心における軸方向と周方向の応力・ひずみ曲線を図 2.2.1-9 と図 2.2.1-10 に示す。

表 2.2.1-2 5 サイクル終了時における累積ひずみ

プログラム	周方向ひずみ ϵ_{θ}^p [%]		軸方向ひずみ ϵ_z^p [%]
	内側要素	外側要素	
FINAS	0.134	0.0987	0.0387
TEPICC-4	0.141	0.105	0.040

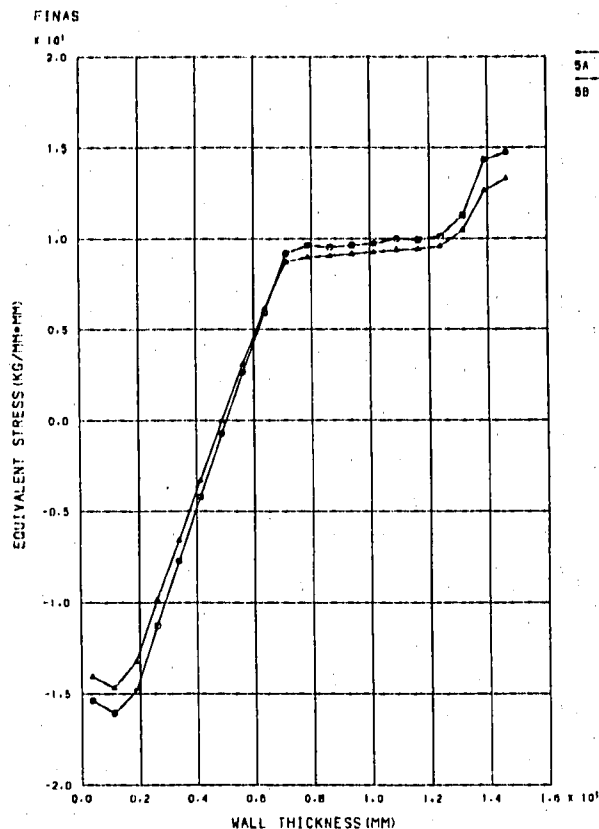
表 2.2.1-3 各サイクル終了時における相当塑性ひずみ

サイクル	$\bar{\epsilon}^p$ [%]		$\Delta \bar{\epsilon}^p = \bar{\epsilon}^p - \bar{\epsilon}^p_{-1}$ [%]	
	内側要素	外側要素	内側要素	外側要素
1 b	0.2498	0.02047	—	—
2 b	0.2543	0.02551	0.0045	0.00504
3 b	0.2583	0.02863	0.0040	0.00312
4 b	0.2617	0.03184	0.0034	0.00321
5 b	0.2650	0.03563	0.0033	0.00379



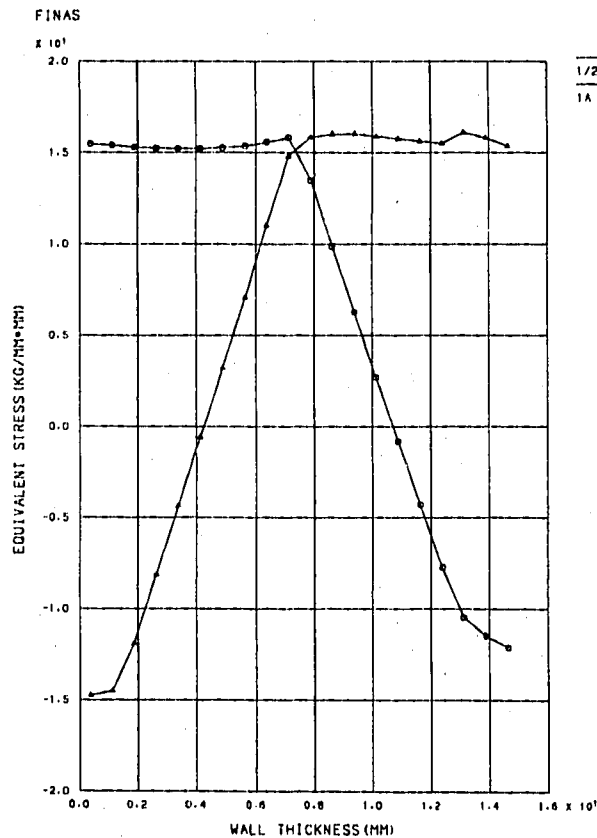
AXIAL STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL AT 1/2 AND 1A CYCLE

図 2.2.1-5 1/2サイクルおよび1aサイクルにおける軸方向応力の分布



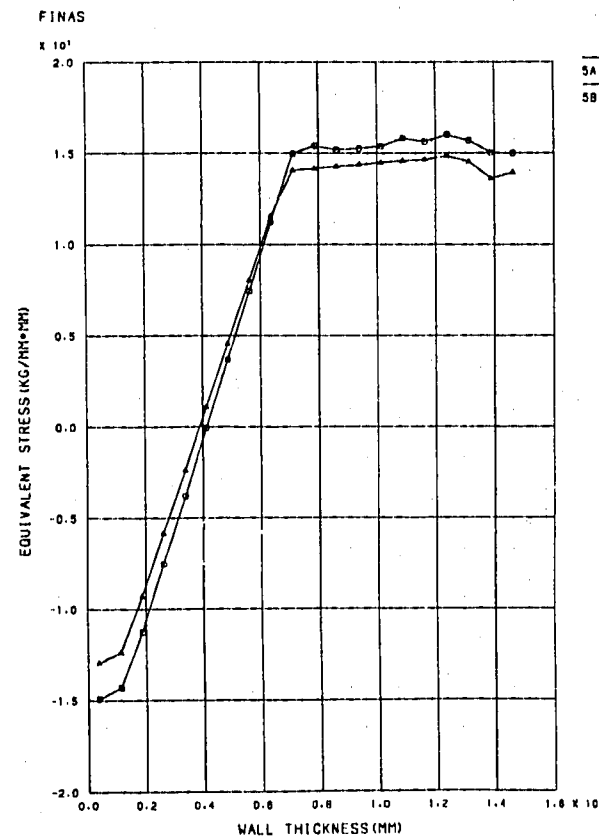
AXIAL STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL AT 5A AND 5B CYCLE

図 2.2.1-6 5aサイクルおよび5bサイクルにおける軸方向応力の分布



HOOP STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL AT 1/2 AND 1A CYCLE

図 2.2.1-7 1/2サイクルおよび1aサイクルにおける周方向応力の分布



HOOP STRESS DISTRIBUTION THROUGH THE WALL AT 5A AND 5B CYCLE

図 2.2.1-8 5aサイクルおよび5bサイクルにおける周方向応力の分布

FINAS

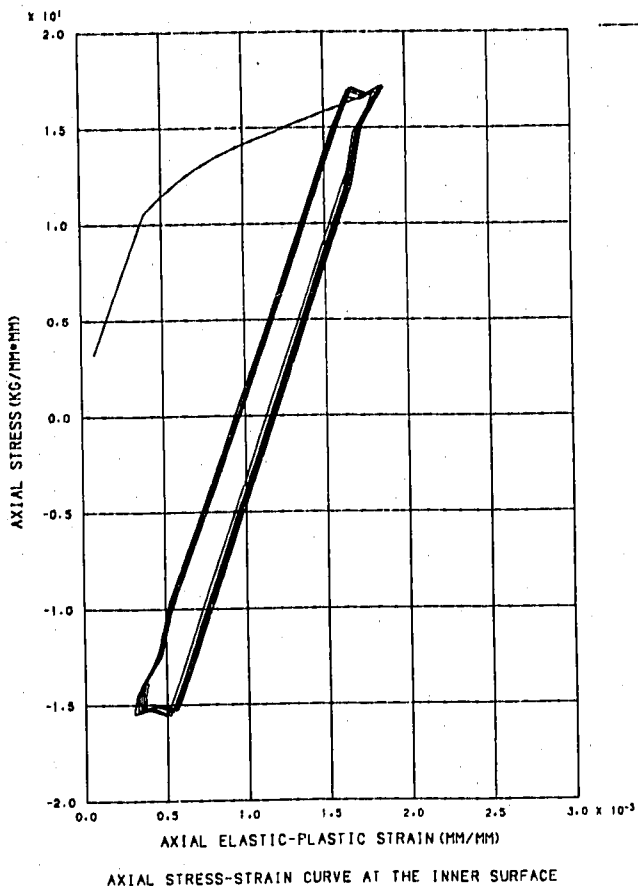


図 2.2.1 - 9 内側要素中心における軸方向応力
・ひずみ曲線

FINAS

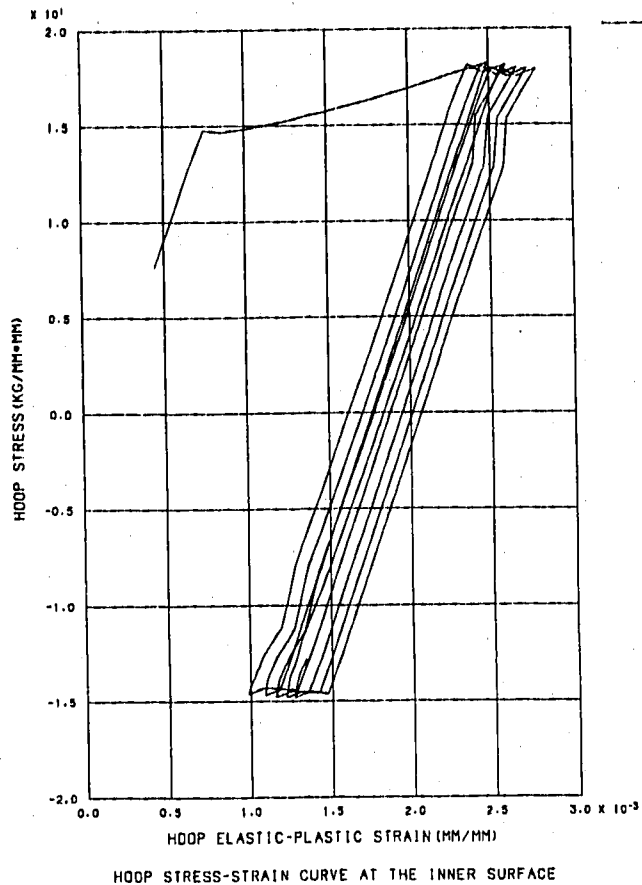


図 2.2.1 - 10 内側要素中心における周方向応力
・ひずみ曲線

(4) 入力データ

表 2.2.1-4 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8						
1	FINAS														
2	TITLE THERMAL RATCHETTING ANALYSIS OF A THICK CYLINDRICAL MODEL														
3	STATIC TEP														
4	SAVE														
5	MODEL														
6	NODE														
7	**NLOOP1	2	30	0.0	1.0										
8	1			92.5	0.0		20		21						
9	21			107.5	0.0										
10	**END1														
11	ELEMENT TYPE														
12	1	QAX4													
13	CONNECTION														
14	1	1	1	2	31	32		20							
15	MATERIAL														
16	1			1	1	2									
17	E	F5		6											
18		350.0	1.762E4	400.0	1.714E4	450.0	1.665E4								
19		500.0	1.616E4	550.0	1.568E4	600.0	1.519E4								
20	NU	F5		6											
21		350.0	0.292	400.0	0.295	450.0	0.299								
22		500.0	0.302	550.0	0.306	600.0	0.309								
23	SIGY	F5		6											
24		350.0	15.49	400.0	14.90	450.0	14.33								
25		500.0	13.76	550.0	13.20	600.0	12.65								
26	ALPHA	F5		6											
27		350.0	1.90E-5	400.0	1.94E-5	450.0	1.98E-5								
28		500.0	2.02E-5	550.0	2.06E-5	600.0	2.09E-5								
29	HDASH	F5		6											
30		350.0	395.85	400.0	383.25	450.0	370.95								
31		500.0	358.65	550.0	346.5	600.0	334.65								
32	BOUNDARY														
33	1														
34		1	21		2										
35	FASTENING														
36	1														
37	F2	21	2	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
38				43	44	45	46	47	48	49	50	51			
39	TEMPERATURE														
40	REF	550.0													
41	1														
42		1	31	30											
43		2	32	30											
44		3	33	30											
45		4	34	30											
46		5	35	30											
47		6	36	30											
48		7	37	30											
49		8	38	30											
50		9	39	30											
51		10	40	30											
52		11	41	30											
53		12	42	30											
54		13	43	30											
55		14	44	30											
56		15	45	30											
57		16	46	30											
58		17	47	30											
59		18	48	30											
60		19	49	30											
61		20	50	30											
62		21	51	30											
63	2														
64		1	31	30											
65		2	32	30											
66		3	33	30											
67		4	34	30											
68		5	35	30											
69		6	36	30											
70		7	37	30											
71		8	38	30											
72		9	39	30											
73		10	40	30											
74		11	41	30											
75		12	42	30											

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	0	13	43	30				
77			14	44	30				
78			15	45	30				
79			16	46	30				
80			17	47	30				
81			18	48	30				
82			19	49	30				
83			20	50	30				
84			21	51	30				
85	3								
86			1	21					150.0
87			31	51					150.0
88	FORCE								
89	1								
90		1	1		2	1	2	1.0	1.0
91	2								
92			41			1	2	0.0	1.0
93	HISTORY								
94	INTERVAL		1						
95		BOUN		1					
96		FAS		1					
97		FORC		1	1.1352		2	30514.46	
98	**ILOOP1	5							
99	INTERVAL	15							
100		BOUN		1					
101		FAS		1					
102		TEMP		1					
103	INTERVAL	1							
104		BOUN		1					
105		FAS		1					
106	INTERVAL	15							
107		BOUN		1					
108		FAS		1					
109		TEMP		2					
110	INTERVAL	1							
111		BOUN		1					
112		FAS		1					
113	INTERVAL	10							
114		BOUN		1					
115		FAS		1					
116		TEMP		3					
117	INTERVAL	1							
118		BOUN		1					
119		FAS		1					
120	**END1								
121	END MODEL								
122	OUTPUT								
123	PRINT SELECT								
124	OTIME2	1	1			17	189	43	33
125	NSET1	1	31	51					
126	ESET1	1	1	20					
127	ESET2	2	2	19					
128	IPSET2	1	4	6					
129	DISP	1	1						
130	REAC	NONE							
131	ELM	1	1	1	2				1
132	¥								
133	STRUCTURE PLOT								
134	PTITLE	FINITE	ELEMENT	MODEL					
135	IPLOT		BOTH						
136	¥								
137	XYPLOT								
138	ELIST2	1	1	20					
139	XVALU	1	0.375	1.125	1.875	2.625	3.375	4.125	
140			4.875	5.625	6.375	7.125	7.875	8.625	
141			9.375	10.125	10.875	11.625	12.375	13.125	
142			13.875	14.625					
143	PTITLE	EQUIVALENT	STRESS	DISTRIBUTION	THROUGH	THE	WALL	AT	1/2
144	XTITLE	WALL	THICKNESS(MM)						
145	YTITLE	EQUIVALENT	STRESS(KG/MM*MM)						
146	XRANGE		0.0	15.0					
147	YRANGE		0.0	20.0					
148	XDIVISION	6	0						
149	YDIVISION	8	0						
150	CURVE	1			1/2	CYCLE			

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
151	0	2	0	0	0	0	0	0	0
152									
153									
154									
155									
156									
157									
158									
159									
160									
161									
162									
163									
164									
165									
166									
167									
168									
169									
170									
171									
172									
173									
174									
175									
176									
177									
178									
179									
180									
181									
182									
183									
184									
185									
186									
187									
188									
189									
190									
191									
192									
193									
194									
195									
196									
197									
198									
199									
200									
201									
202									
203									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2.2 面内荷重を受ける多孔板の弾塑性解析

(1) 問題

円孔半径 9 mm, ピッチ 20 mm の多孔板 (リガメント) に面内荷重が作用する平面問題について弾塑性解析を行なう。³⁾ 荷重は図 2.2.2-2 の U_1 に規定変位を与え, P_1 と U_2 を未知量, P_2 を零とする。荷重する規定変位の量は, 応力最大の点が降伏応力に達する時の規定変位 U_y の 10 倍までとし, 材料定数は表 2.2.2-1 に示す値を用いる。

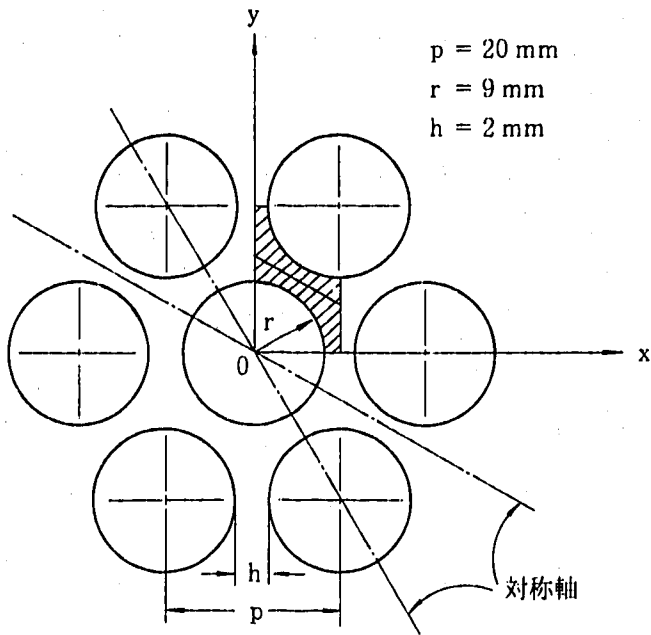


図 2.2.2-1 多孔板

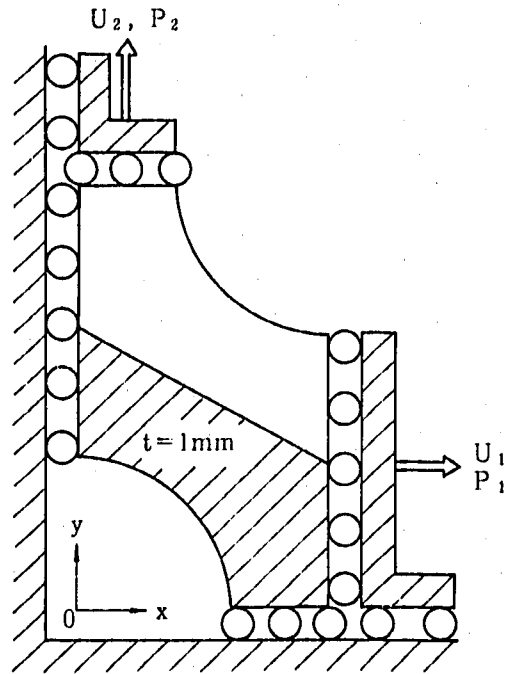


図 2.2.2-2 平面部分モデル

表 2.2.2-1 材料定数

弾性係数 E [kg/mm^2]	2.11×10^3
ポアソン比 ν	0.3
降伏応力 σ_y [kg/mm^2]	42.2
降伏ひずみ ϵ_y [mm/mm]	2.0×10^{-3}
加工硬化係数 H' [kg/mm^2]	2.34×10^3

(2) 有限要素モデルと解析条件

平面問題モデルの対称性を考慮して図 2.2.2 - 2 の斜線部について図 2.2.2 - 3 に示す有限要素モデルを作成する。図 2.2.2 - 3 において EH は P_1 の値を知るために取り付けられた剛な棒であり、弾性係数を $10 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 、降伏応力を $1.0 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ と仮定する。使用する有限要素はリガメントに対しては 4 節点四辺形平面応力要素 QMEM 4、棒に対しては 3 次元棒要素 ROD 2 である。

図 2.2.2 - 3 において、モデルの対称性より DF に沿う X 方向変位は同一であり、O' 点の X 方向変位は DF に沿う X 方向変位の 2 分の 1 である。また、AF に沿う節点の変位が O' に関し点对称となる挙動を示すための条件を与える。棒 EH は上記のとおり剛性が非常に高いので、FD に沿い U_1 の変位を与えるためには H 点に規定変位 U_1 を負荷すればよい。なお、塑性硬化則は等方硬化則を使用する。

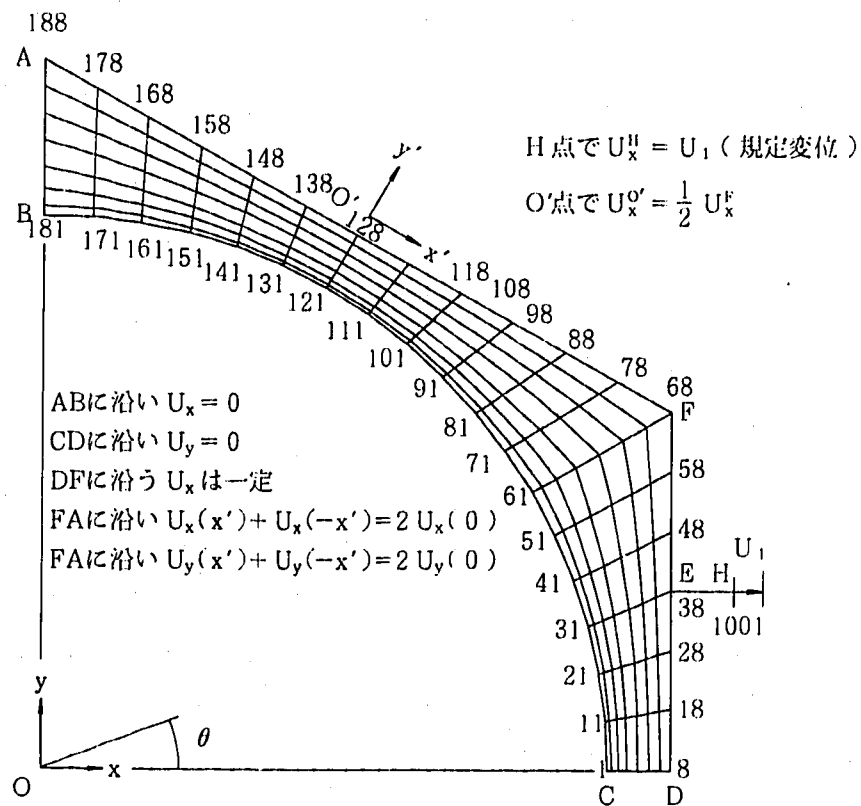


図 2.2.2 - 3 有限要素モデルと境界条件

(3) 解析結果

変位 U_1 とそれに等価な荷重 P_1 の関係を表 2.2.2 - 2 に、無次元化した平均応力と平均ひずみを表 2.2.2 - 3 に EPICC 報告書³⁾ の解と比較してそれぞれ示す。また、塑性ひずみの進展の様子を図 2.2.2 - 4 に、最終状態における主応力のベクトル表示を図 2.2.2 - 5 に、孔に沿う相当応力の分布を図 2.2.2 - 6 に示す。ここで各図表における λ_r は最大応力が降伏応力に達する時の規定変位 U_Y に対する U_1 の比を表わしている。

表 2.2.2 - 2 変位と荷重

λ_r^*	FINAS の 解			EPIC の解 (EPICC 報告書)		
	U_1 (mm)	U_2 (mm)	P_1 (kg)	U_1 (mm)	U_2 (mm)	P_1 (kg)
1	1.651×10^{-2}	-1.921×10^{-2}	30.13	1.63×10^{-2}	-1.90×10^{-2}	30.26
2	3.302	- 3.791	49.05	3.26	- 3.77	48.78
3	4.953	- 5.576	57.18	4.89	- 5.58	57.17
4	6.604	- 7.327	62.15	6.52	- 7.38	62.47
5	8.255	- 9.092	66.30	8.15	- 9.16	67.02
6	9.906	-10.863	70.10	9.79	-11.00	71.07
7	11.557	-12.655	73.74	11.42	-12.85	74.94
8	13.208	-14.456	77.21	13.05	-14.73	78.64
9	14.859	-16.262	80.62	14.68	-16.63	82.30
10	16.510	-18.079	83.98	16.31	-18.53	85.91

*) $\lambda_r = U_1 / U_Y$

表 2.2.2-3 無次元化した平均応力と平均ひずみ

λ_r	FINAS の 解						EPIC の 解 (EPICC 報告書)					
	応 力 ρ_{xx}^*	全ひずみ		塑性ひずみ		F_{yy}^p	応 力 ρ_{xx}^*	全ひずみ		塑性ひずみ		F_{yy}^p
		F_{xx}^*	F_{yy}^*	F_{xx}^p	F_{yy}^p	F_{xx}^p		F_{xx}^*	F_{yy}^*	F_{xx}^p	F_{yy}^p	F_{xx}^p
1	4.12×10^{-2}	0.83	-0.55	0	0	---	4.14×10^{-2}	0.82	-0.55	0	0	---
2	6.71	1.65	-1.09	0.31	-0.19	0.62	6.67	1.63	-1.09	0.32	-0.20	0.65
3	7.82	2.48	-1.61	0.91	-0.56	0.61	7.82	2.45	-1.61	0.91	-0.57	0.63
4	8.50	3.30	-2.12	1.60	-0.97	0.61	8.55	3.26	-2.13	1.58	-1.00	0.63
5	9.07	4.13	-2.62	2.31	-1.40	0.61	9.17	4.08	-2.64	2.27	-1.43	0.63
6	9.59	4.95	-3.14	3.03	-1.85	0.61	9.72	4.89	-3.18	2.98	-1.89	0.63
7	10.09	5.78	-3.65	3.76	-2.30	0.61	10.25	5.71	-3.71	3.69	-2.35	0.64
8	10.56	6.60	-4.17	4.49	-2.75	0.61	10.76	6.53	-4.25	4.41	-2.83	0.64
9	11.03	7.43	-4.69	5.22	-3.21	0.61	11.26	7.34	-4.80	5.12	-3.31	0.65
10	11.49	8.26	-5.22	5.95	-3.67	0.62	11.75	8.16	-5.35	5.84	-3.79	0.65

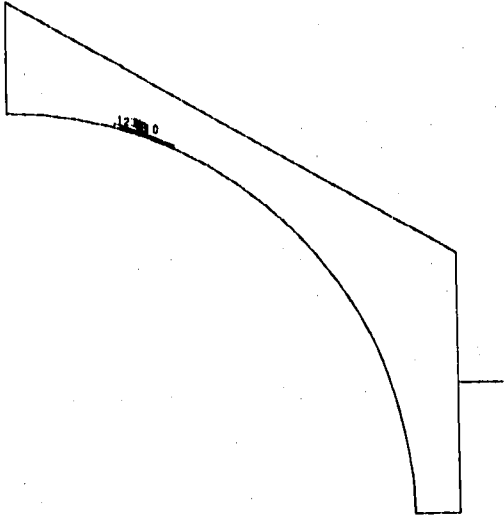
$$\lambda_r = \frac{U_1}{U_y}, \quad \rho_{xx}^* = \frac{P_1}{\sigma_y} \cdot \frac{2}{t_p \sqrt{3}}, \quad F_{xx}^* = \frac{U_1}{\epsilon_y} \cdot \frac{2}{p}, \quad F_{yy}^* = \frac{U_2}{\epsilon_y} \cdot \frac{2}{p \sqrt{3}}$$

$$F_{xx}^e = P_1 \times \left(\frac{F_{xx}^*}{P_1} \right)_{\lambda_r=1}, \quad F_{yy}^e = P_1 \times \left(\frac{F_{yy}^*}{P_1} \right)_{\lambda_r=1}$$

$$F_{xx}^p = F_{xx}^* - F_{xx}^e, \quad F_{yy}^p = F_{yy}^* - F_{yy}^e$$

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 2.200-08
2 6.700-08
3 1.120-07
4 1.570-07
5 2.020-07
6 2.470-07
7 2.920-07
8 3.370-07
9 3.820-07
10 4.270-07



STEP NO. 1

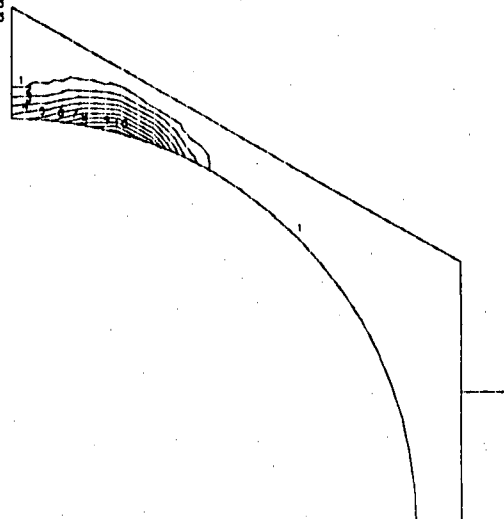
G.EOM. SCALE 2.00000

EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

a) $\lambda_r = 1$

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 1.000-04
2 3.300-04
3 6.000-04
4 8.500-04
5 1.100-03
6 1.350-03
7 1.600-03
8 1.850-03
9 2.100-03
10 2.350-03



STEP NO. 6

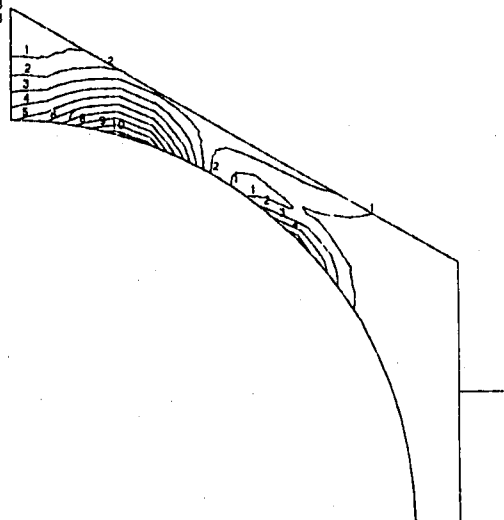
G.EOM. SCALE 2.00000

EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

b) $\lambda_r = 2$

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 4.400-04
2 1.370-03
3 2.300-03
4 3.230-03
5 4.160-03
6 5.090-03
7 6.020-03
8 6.950-03
9 7.880-03
10 8.810-03



STEP NO. 21

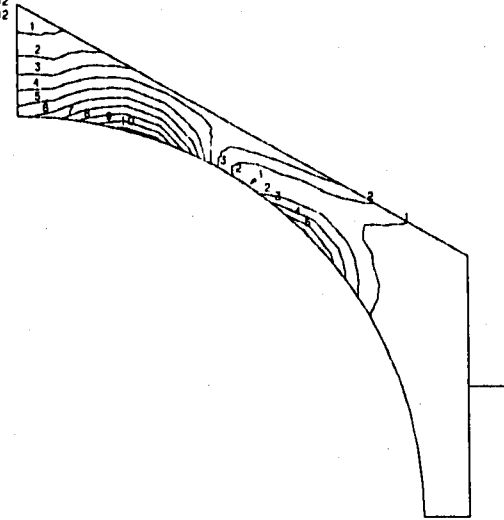
G.EOM. SCALE 2.00000

EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

c) $\lambda_r = 5$

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES
1 9.000-04
2 2.900-03
3 4.900-03
4 6.900-03
5 8.900-03
6 1.090-02
7 1.290-02
8 1.490-02
9 1.690-02
10 1.890-02



STEP NO. 46

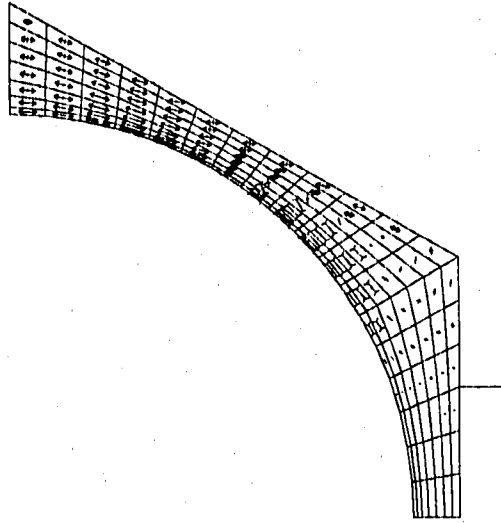
G.EOM. SCALE 2.00000

EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

d) $\lambda_r = 10$

図 2.2.2-4 塑性域の進展

FINAS
PRINCIPAL STRESSES



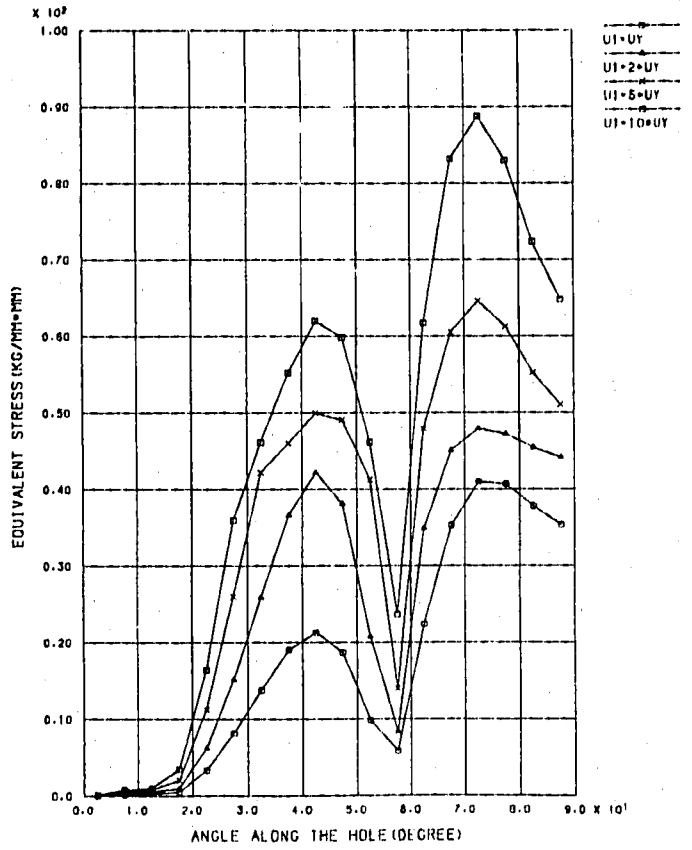
STEP NO. 46

VECT. SCALE 400,000
GEOM. SCALE 2,00000

MAX. AND MIN. PRINCIPAL STRESS

図 2.2.2 - 5 最終状態における主応力

FINAS



VON MISES EQUIVALENT STRESS DISTRIBUTIONS ALONG THE HOLE EDGE

図 2.2.2 - 6 孔に沿う相当応力分布

(4) 入力データ

表 2.2.2-4 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	FINAS								
2	TITLE ELASTO-PLASTIC ANALYSIS OF LIGAMENT SUBJECTED TO IN-PLANE LOAD								
3	STATIC EP								
4	SAVE								
5	MODEL								
6	NODE PITCH								
7	1	1*0.4	1*0.6	1*0.8	4*1.0				
8	NODE								
9	1		9.00000	0.00000			7	1	1 8
10	8		10.00000	0.00000			7	1	1 18
11	11		8.96575	.78440			7	1	1 28
12	18		10.00000	.96667			7	1	1 38
13	21		8.86327	1.56283			7	1	1 48
14	28		10.00000	1.93333			7	1	1 58
15	31		8.69333	2.32937			7	1	1 68
16	38		10.00000	2.90000			7	1	1 78
17	41		8.45723	3.07818			7	1	1 88
18	48		10.00000	3.86667			7	1	1 98
19	51		8.15677	3.80356			7	1	1 108
20	58		10.00000	4.83333			7	1	1 118
21	61		7.79423	4.50000			7	1	1 128
22	68		10.00000	5.80000			7	1	1 138
23	71		7.37237	5.16219			7	1	1 148
24	78		9.16667	6.27500			7	1	1 158
25	81		6.89440	5.78509			7	1	1 168
26	88		8.33333	6.75000			7	1	1 178
27	91		6.36396	6.36396			7	1	1 188
28	98		7.50000	7.22500					
29	101		5.78509	6.89440					
30	108		6.66667	7.70000					
31	111		5.16219	7.37237					
32	118		5.83333	8.17500					
33	121		4.50000	7.79423					
34	128		5.00000	8.65000					
35	131		3.80356	8.15677					
36	138		4.16667	9.12500					
37	141		3.07818	8.45723					
38	148		3.33333	9.60000					
39	151		2.32937	8.69333					
40	158		2.50000	10.07500					
41	161		1.56283	8.86327					
42	168		1.66667	10.55000					
43	171		.78440	8.96575					
44	178		.83333	11.02500					
45	181		0.00000	9.00000					
46	188		0.00000	11.50000					
47	1001		11.0	2.9	0.0				
48	ELEMENT TYPE								
49	1	QMEM4							
50	2	ROD2							
51	CONNECTION								
52	**ELOOP1	18	10	10	10	10	10		
53	1	1	1	1	2	11	12	7	1
54	**END1								
55	1001	2	2	2	38	1001			
56	GEOMETRY								
57	1	1	1.0						
58	2	1	1.0						
59	MATERIAL								
60	1		1	1	1				
61		E	2.11E4						
62		NU	0.3						
63		SIGY	42.2						
64		HDASH	2.34E3						
65	2		1	1	1				
66		E	1.0E10						
67		SIGY	1000.0						
68		HDASH	1.0						
69	BOUNDARY								
70	1								
71		1	8	1	2	0.0			
72		181	188	1	1	0.0			
73		38			3	0.0			
74		1001			1	1.0			
75		1001			2	0.0			

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	FASTENING								
77	1								
78	F3	8	1	0.0	1				
79		68	1	1.0					
80	F3	18	1	0.0	1				
81		68	1	1.0					
82	F3	28	1	0.0	1				
83		68	1	1.0					
84	F3	38	1	0.0	1				
85		68	1	1.0					
86	F3	48	1	0.0	1				
87		68	1	1.0					
88	F3	58	1	0.0	1				
89		68	1	1.0					
90	F3	128	1	0.0	1				
91		68	1	0.5					
92	F3	138	1	0.0	2				
93		68	1	1.0	118	1	-1.0		
94	F3	148	1	0.0	2				
95		68	1	1.0	108	1	-1.0		
96	F3	158	1	0.0	2				
97		68	1	1.0	98	1	-1.0		
98	F3	168	1	0.0	2				
99		68	1	1.0	88	1	-1.0		
100	F3	178	1	0.0	2				
101		68	1	1.0	78	1	-1.0		
102	F3	138	2	0.0	2				
103		128	2	2.0	118	2	-1.0		
104	F3	148	2	0.0	2				
105		128	2	2.0	108	2	-1.0		
106	F3	158	2	0.0	2				
107		128	2	2.0	98	2	-1.0		
108	F3	168	2	0.0	2				
109		128	2	2.0	88	2	-1.0		
110	F3	178	2	0.0	2				
111		128	2	2.0	78	2	-1.0		
112	F3	188	2	0.0	2				
113		128	2	2.0	68	2	-1.0		
114	HISTORY								
115	INTERVAL	1							
116	BOUN		1	0.01651					
117	FAS		1						
118	**ILOOP1	9							
119	INTERVAL	5							
120	BOUN		1	0.01651					
121	FAS		1						
122	**END1								
123	END MODEL								
124	OUTPUT								
125	OTIME2	1	1	46	5				
126	OTIME1	2	1	46					
127	NSET2	1	1	8		11	171	10	18
128			1001						178
129	NSET2	2	1	8		181	188		10
130	ESET2	1	1	171	10				181
131	ESET1	2	1001						188
132	IPSET1	1	1	3	5				
133	#								
134	PRINT SELECT								
135	DISP	1	1						
136	REAC	2	1						
137	ELM	1	1	1	2	1			
138	#								
139	XYPLOT								
140	XVALU	1	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	
141			32.5	37.5	42.5	47.5	52.5	57.5	
142			62.5	67.5	72.5	77.5	82.5	87.5	
143	ELIST2	1	1	171	10				
144	CURVE	1							
145	CURVE	2							
146	CURVE	3							
147	CURVE	4							
148	PTITLE	VOM MISES EQUIVALENT STRESS DISTRIBUTIONS ALONG THE HOLE EDGE							
149	XTITLE	ANGLE ALONG THE HOLE(DEGREE)							
150	YTITLE	EQUIVALENT STRESS(KG/MM*MM)							

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
151	XRANGE	0.0	0.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
152	YRANGE		0.0	100.0					
153	XDIVISION	9	0						
154	YDIVISION	10	0						
155	PLOT2	VMS	ELIST	1	1XVALU	1VMS	ELIST	1	6XVALU
156		VMS	ELIST	1	21XVALU	1VMS	ELIST	1	46XVALU
157	PTITLE	EQUIVALENT	PLASTIC STRAIN DISTRIBUTIONS	ALONG THE HOLE EDGE					
158	YTITLE	EQUIVALENT	PLASTIC STRAIN(MM/MM)						
159	YRANGE	0.0	2.5E-2						
160	PLOT2	EPEQ	ELIST	1	1XVALU	1EPEQ	ELIST	1	6XVALU
161		EPEQ	ELIST	1	21XVALU	1EPEQ	ELIST	1	46XVALU
162	✽								
163	STRUCTURE PLOT								
164	AXES	Z	X	Y					
165	VIEW	0.0	0.0	0.0					
166	✽								
167	PTITLE	NODE NUMBER							
168	IPLOT	NODES							
169	✽								
170	PTITLE	ELEMENT NUMBER							
171	IPLOT	ELEMENTS							
172	✽								
173	PTITLE	DEFORMATION FIG.							
174	DPLOT	2							
175	✽								
176	PTITLE	VON MISES EQUIVALENT STRESS							
177	CPLLOT	2VMS							
178	✽								
179	PTITLE	EQUIVALENT PLASTIC STRAIN							
180	CPLLOT	1EPEQ							
181	✽								
182	PTITLE	MAX. AND MIN. PRINCIPAL STRESS							
183	VPLOT	2PRIN*							
184	END OUTPUT								
185	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2.3 はりの弾塑性クリープ解析

(1) 問題

1100°F の高温状態において図 2.2.3-1 に示す幅 1 in, 高さ 2 in, 長さ 26 in, 有効長 24 in の単純支持はりの中央に上下両方向から交互に荷重を与え, それぞれの荷重状態で長時間の保持を行なう。⁴⁾ 荷重の符号は上面に負荷する下向きが正であり, 下面に負荷する上向きが負である。荷重履歴は図 2.2.3-2 に示すとおりである。材料は SUS 304 であり, 1100°F における材料データは表 2.2.3-1, 表 2.2.3-2, 図 2.3.2-3 に示すもの⁵⁾ を使用する。

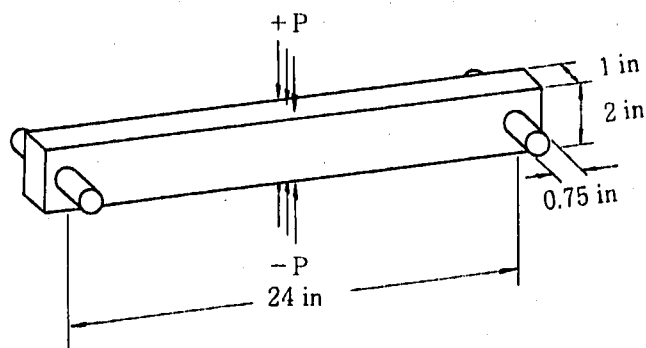


図 2.2.3-1 単純支持はり

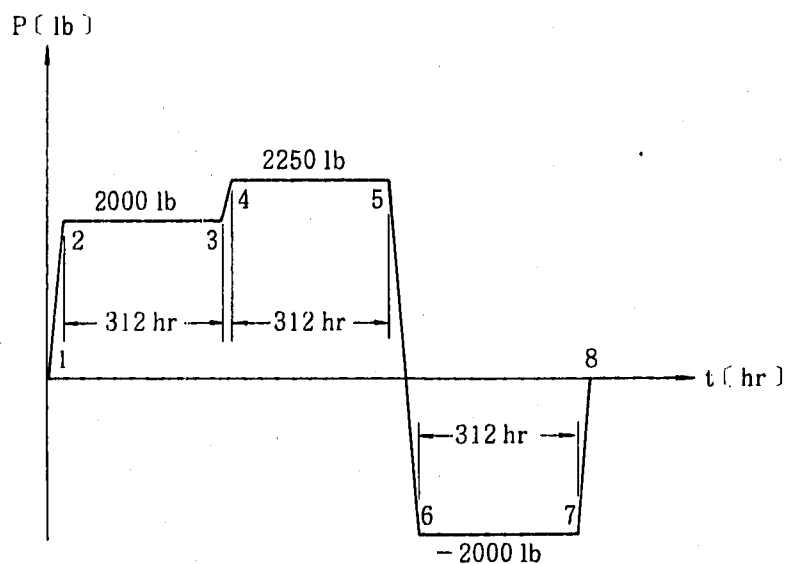


図 2.2.3-2 荷重履歴

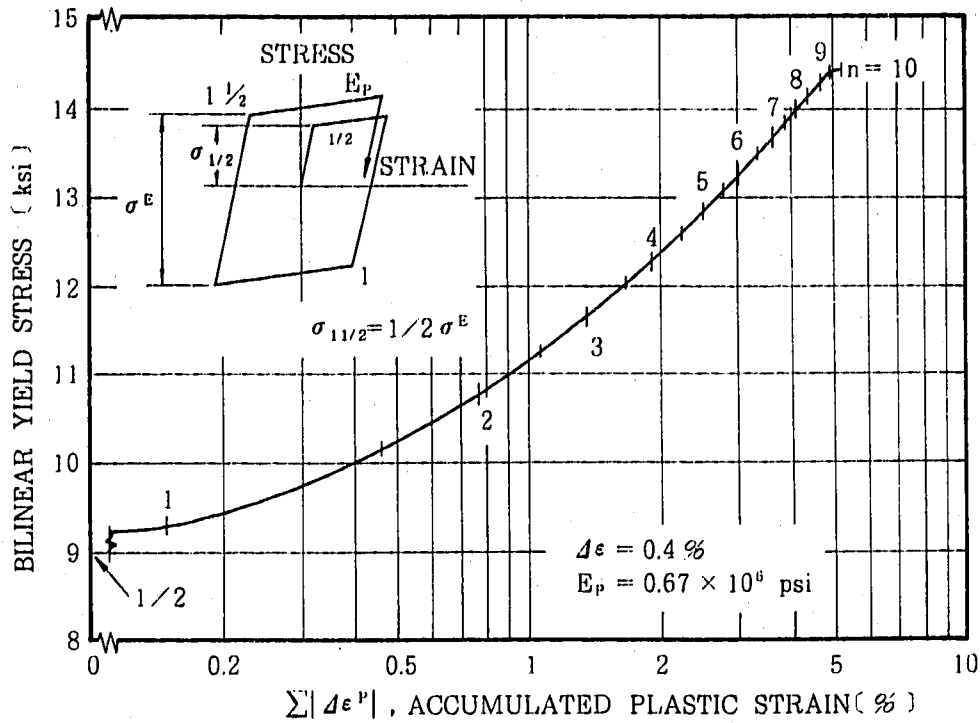


図 2.2.3 - 3 累積塑性ひずみと降伏応力 (1100°F)

表 2.2.3 - 1 材料定数 (1100°F)

弾性係数	$E = 21.7 \times 10^6 \text{ psi}$
ポアソン比	$\nu = 0.0$
初期降伏応力	$\sigma_y = 9.0 \times 10^3 \text{ psi}$
降伏後の応力・ひずみ関係の勾配	$E_p = 0.67 \times 10^6 \text{ psi}$
累積塑性ひずみと降伏応力の関係	図 2.2.3 - 3 参照
クリープデータ	表 2.2.3 - 2 参照

表 2.2.3-2 1100°F におけるクリープデータ

応力 (ksi)	時 間 (hr)												
	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10,000
1	0.00006	0.00010	0.00022	0.00040	0.00060	0.00067	0.00078	0.00098	0.00150	0.00200	0.00250	0.00320	0.00370
2	0.00018	0.00032	0.00065	0.00100	0.00140	0.00170	0.00210	0.00270	0.00400	0.00470	0.00650	0.00700	0.00800
3	0.00036	0.00070	0.00120	0.00182	0.00250	0.00300	0.00355	0.00450	0.00700	0.00830	0.01000	0.01200	0.01400
4	0.00060	0.00115	0.00187	0.00280	0.00400	0.00475	0.00575	0.00750	0.01000	0.01250	0.01500	0.01900	0.02150
5	0.00095	0.00173	0.00275	0.00410	0.00570	0.00700	0.00830	0.01010	0.01500	0.01870	0.02250	0.02750	0.03150
6	0.00140	0.00250	0.00400	0.00575	0.00775	0.00980	0.01200	0.01600	0.02220	0.02750	0.03200	0.03950	0.04500
7	0.00210	0.00355	0.00550	0.00800	0.01070	0.01375	0.01700	0.02250	0.03100	0.03800	0.04700	0.05800	0.06700
8	0.00290	0.00485	0.00765	0.01070	0.01450	0.01950	0.02400	0.03100	0.04300	0.05300	0.06800	0.08900	0.10500
9	0.00400	0.00650	0.01000	0.01400	0.01900	0.02650	0.03300	0.04350	0.06000	0.07500	0.10100	0.14000	0.16500
10	0.00515	0.00830	0.01300	0.01815	0.02400	0.03600	0.04700	0.06000	0.08300	0.10700	0.14000	0.21500	0.29000
11	0.00650	0.01035	0.01650	0.02300	0.03150	0.04900	0.06500	0.08500	0.12000	0.15300	0.19500	0.31250	0.50000
12	0.00750	0.01240	0.02000	0.02900	0.04200	0.06500	0.08900	0.11500	0.16500	0.21000	0.27000	0.43750	0.68000
13	0.00910	0.01475	0.02450	0.03600	0.05400	0.08500	0.11700	0.15500	0.22000	0.28500	0.37200	0.57500	0.90000
14	0.01150	0.01720	0.02800	0.04200	0.06750	0.10750	0.15200	0.20250	0.29500	0.38000	0.49400	0.75500	1.16500
15	0.01355	0.01965	0.03350	0.05300	0.08500	0.13350	0.19100	0.25950	0.38000	0.49300	0.62500	0.98500	1.48000
16	0.01515	0.02220	0.03800	0.06100	0.10300	0.16500	0.24200	0.32250	0.48000	0.62500	0.80000	1.25000	1.90000
17	0.01700	0.02450	0.04500	0.07200	0.11600	0.20250	0.29800	0.39400	0.60000	0.80000	1.04500	1.60000	2.50000
18	0.02500	0.03500	0.05600	0.08600	0.14000	0.24000	0.35500	0.51000	0.77500	1.05000	1.40000	2.20000	3.50000
19	0.02800	0.04200	0.08000	0.12500	0.19000	0.30000	0.45000	0.65000	0.99000	1.40000	2.00000	2.97500	
20	0.03200	0.05000	0.09500	0.16000	0.24000	0.38500	0.57500	0.82000	1.27500	1.95000	3.00000		
21	0.03600	0.06000	0.12200	0.20000	0.31000	0.49000	0.71000	1.02500	1.67500	2.70000			
22	0.04000	0.07700	0.15500	0.25000	0.39000	0.62000	0.88500	1.31000	2.25000				
23	0.05000	0.09500	0.19500	0.31000	0.48000	0.77500	1.11100	1.68500	3.00000				
24	0.06500	0.12000	0.23500	0.38000	0.60000	0.95500	1.40000	2.17500					
25	0.08000	0.15000	0.29000	0.47000	0.72500	1.20000	1.77500	2.80000					
26	0.09000	0.17700	0.35000	0.57500	0.90000	1.51000	2.25000	3.50000					
27	0.11500	0.22000	0.42300	0.70000	1.10000	1.90000	2.80000						
28	0.14500	0.26000	0.50000	0.85000	1.35500	2.34000	3.42000						
29	0.18000	0.32500	0.61500	1.03500	1.68000	2.87500							
30	0.22500	0.40000	0.77000	1.25500	2.07500	3.42500							
31	0.28000	0.50500	0.98000	1.54500	2.55000								
32	0.35000	0.63200	1.25000	1.90000	3.06500								
33	0.43500	0.80000	1.57500	2.31000									
34	0.53500	0.98000	1.92500	2.80000									
35	0.65500	1.21500	2.31000	3.32500									

(2) 有限要素モデルと解析条件

構造と負荷と対称性を考慮して、8節点四辺形平面応力要素 QMEM 8 を用いて図 2.2.3-4 に示す 2 分の 1 有限要素モデルを作成する。要素分割ははり中央部を細かくし、細かい部分と粗い部分の境界に断面保持の条件を FASTENING データにより与える。荷重は節点 1 と 9 に図 2.2.3-2 に示した値の 2 分の 1 を負荷し、境界条件は節点 1~9 に対称条件を、節点 145 に単純支持条件を与える。塑性硬化則は組み合わせ硬化則と移動硬化則を使用し、塑性に関するデータは図 2.2.3-3 と表 2.2.3-1 を基に作成した表 2.2.3-3 と表 2.2.3-4 に示すものを用いる。また、クリープについては応力反転を考慮したひずみ硬化則を採用し、クリープデータはサブプログラム XCREEP により与える。

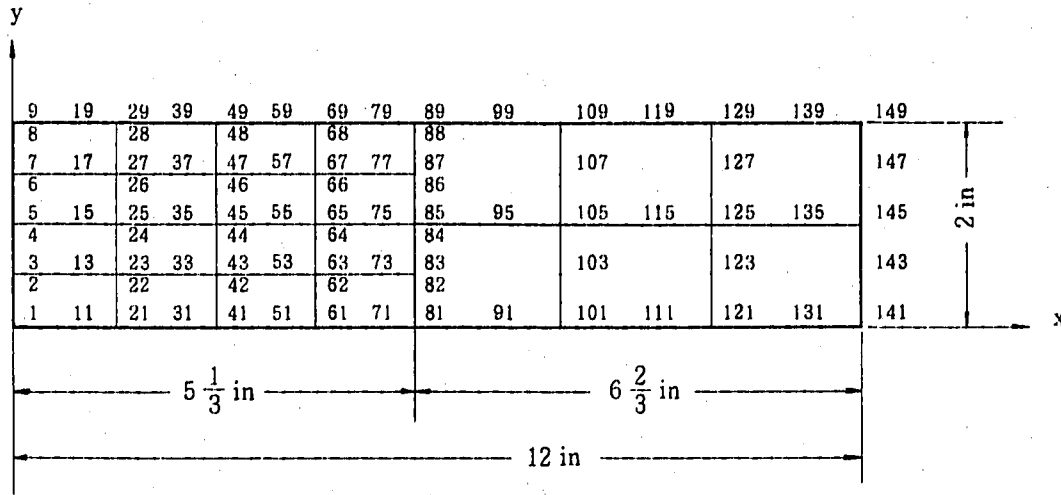


図 2.2.3-4 有限要素モデル

表 2.2.3-3 塑性に関する材料データ

	組合せ硬化則	移動硬化則
初期降伏応力 σ_y [psi]	9.0×10^3	9.0×10^3
加工硬化係数 (移動硬化分) H'_k (psi)	471×10^3	691.5×10^3
降伏面の拡大率 H_i [psi]	表 2.2.3-4 参照	———
備考		
$H' = \frac{EE_p}{E - E_p} = 691 \times 10^3 \text{ psi}$		
$H'_k = H' - H_1 = 314 \times 10^3 \text{ psi (組合せ硬化側)}$		
$H' = 691.5 \times 10^3 \text{ psi (移動硬化側)}$		

表 2.2.3-4 降伏面の拡大率

累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$	H_i [psi]
$0.0 \leq \bar{\epsilon}^p < 0.002$	220×10^3
$0.002 \leq \bar{\epsilon}^p < 0.004$	280×10^3
$0.004 \leq \bar{\epsilon}^p < 0.007$	213×10^3
$0.007 \leq \bar{\epsilon}^p < 0.01$	163×10^3
$0.01 \leq \bar{\epsilon}^p < 0.02$	122×10^3
$0.02 \leq \bar{\epsilon}^p$	68×10^3

$$\bar{\epsilon}^p = \sum \sqrt{\frac{2}{3}} \Delta \epsilon_{ij}^p \Delta \epsilon_{ij}^p$$

(3) 解析結果

はり中央の中央面における時間に依存しない変位と荷重の関係を図 2.2.3-5 に示し、時間に依存する変位の時間履歴を図 2.2.3-6 に示す。両図には ORNL の実験結果⁴⁾と Corum ほかの解析結果⁶⁾を併せて示すが、Corum ほかによる解析は 3 節点三角形要素を使用して行なわれたものである。図 2.2.3-7 に組み合わせ硬化則と移動硬化則における残留変形の比較を示す。

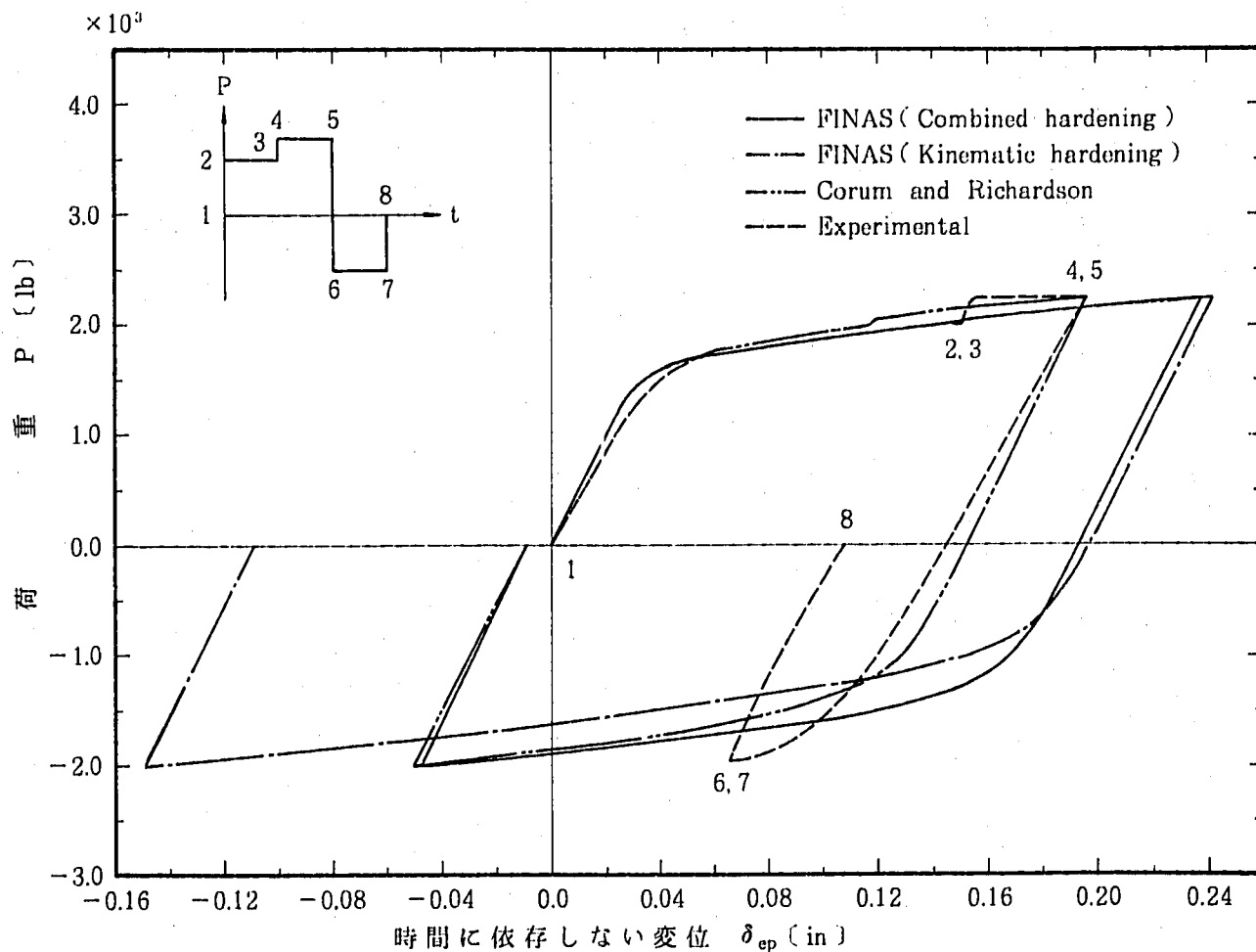


図 2.2.3-5 時間に依存しない変位と荷重の関係

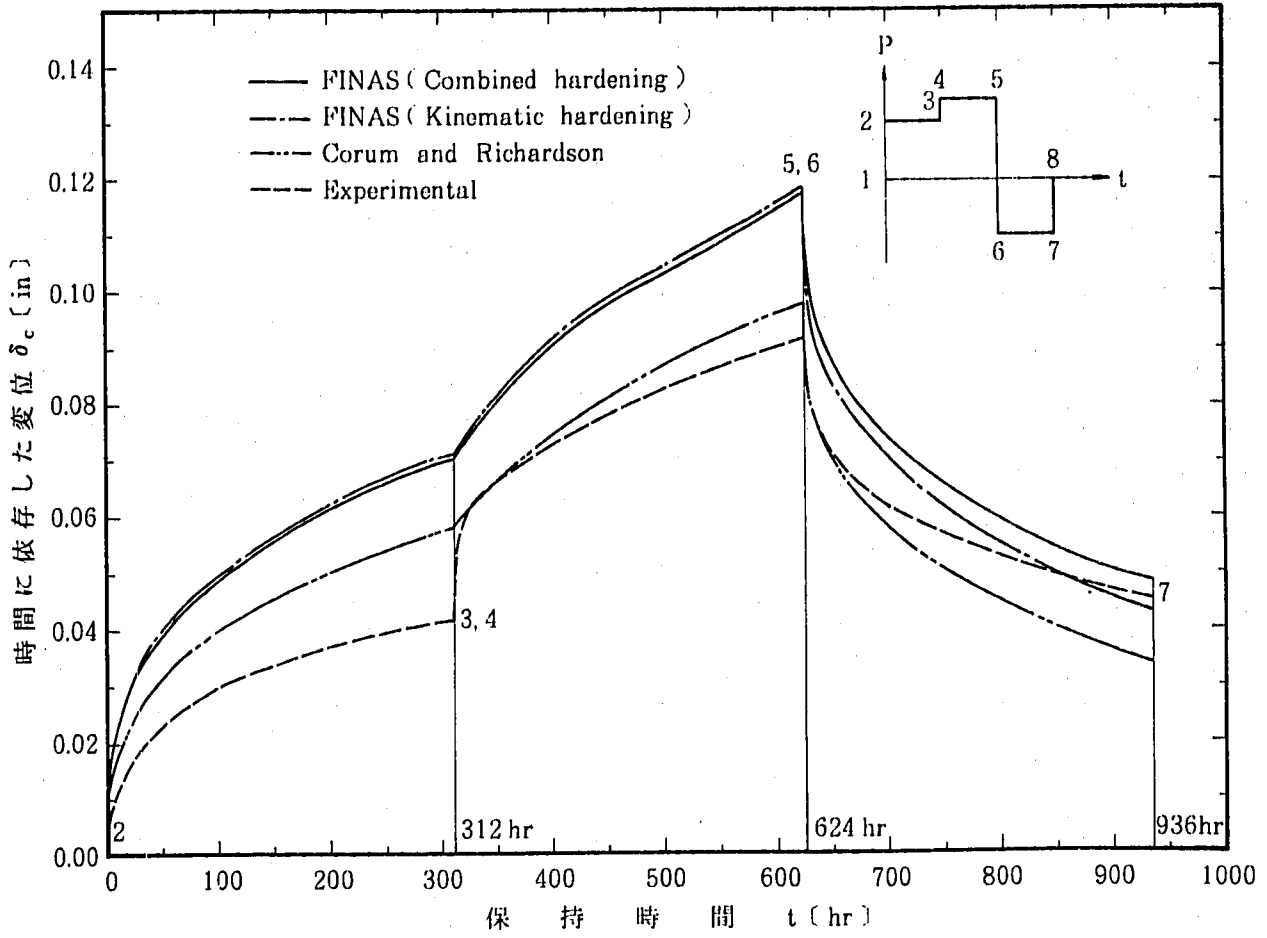
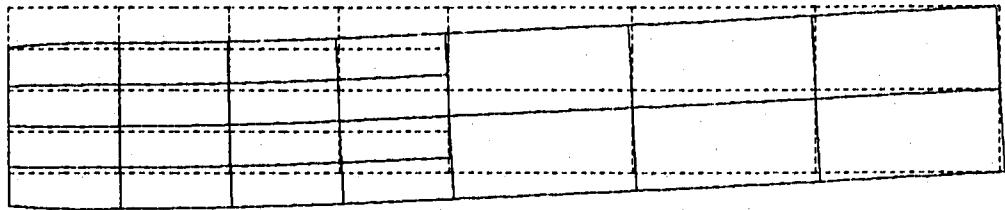


図 2.2.3-6 時間に依存した変位の時間履歴

FINAS
DEFORMED SHAPE



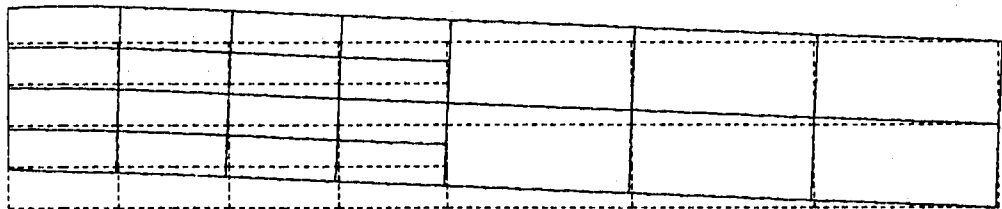
STEP NO. 78

DISP. SCALE 0.15000
GEOM. SCALE 2.00000

RESIDUAL DEFORMED SHAPE (P=0, T=936HR)

a) 組み合せ硬化則

FINAS
DEFORMED SHAPE



STEP NO. 79

DISP. SCALE 0.20000
GEOM. SCALE 2.00000

RESIDUAL DEFORMED SHAPE (P=0, T=936HR)

b) 移動硬化則

図 2.2.3-7 残留変形

(4) 入力データ

表 2.2.3 - 5 サブプログラム XCREEP

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....
2		SUBROUTINE XCREEP(IELM, IGP, TIME, T, FLX, SIGB, EPSCB, DTIME,						
3		DT, DFLX, DEPCB)						
4	C	***** DIMENSION OF STRESS MUST BE P S I						
5	C	IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)						
6								
7	C	DIMENSION TAB1(35,3), TAB2(35,3), TAB3(35,3), TAB4(35,3), TAB5(35)						
8		, ETAB(35,13), TTAB(13), TABL(13), NDATA(36)						
9	C	EQUIVALENCE (ETAB(1,1), TAB1(1,1))						
10		EQUIVALENCE (ETAB(1,4), TAB2(1,1))						
11		EQUIVALENCE (ETAB(1,7), TAB3(1,1))						
12		EQUIVALENCE (ETAB(1,10), TAB4(1,1))						
13		EQUIVALENCE (ETAB(1,13), TAB5(1,1))						
14	C							
15		DATA TAB1/0.00006,0.00018,0.00036,0.00060,0.00095,0.00140,0.00210,						
16		0.00290,0.00400,0.00515,0.00650,0.00750,0.00910,0.01150,						
17		0.01355,0.01515,0.01700,0.02500,0.02800,0.03200,0.03600,						
18		0.04000,0.05000,0.06500,0.08000,0.09000,0.11500,0.14500,						
19		0.18000,0.22500,0.28000,0.35000,0.43500,0.53500,0.65500,						
20		0.00010,0.00032,0.00070,0.00115,0.00173,0.00250,0.00355,						
21		0.00485,0.00650,0.00830,0.01035,0.01240,0.01475,0.01720,						
22		0.01965,0.02220,0.02450,0.03500,0.04200,0.05000,0.06000,						
23		0.07700,0.09500,0.12000,0.15000,0.17700,0.22000,0.26000,						
24		0.32500,0.40000,0.50500,0.63200,0.80000,0.98000,1.21500,						
25		0.00022,0.00065,0.00120,0.00187,0.00275,0.00400,0.00550,						
26		0.00765,0.01000,0.01300,0.01650,0.02000,0.02450,0.02800,						
27		0.03350,0.03800,0.04500,0.05600,0.08000,0.09500,0.12200,						
28		0.15500,0.19500,0.23500,0.29000,0.35000,0.42300,0.50000,						
29		0.61500,0.77000,0.98000,1.25000,1.57500,1.92500,2.31000/						
30		DATA TAB2/0.00040,0.00100,0.00182,0.00280,0.00410,0.00575,0.00800,						
31		0.01070,0.01400,0.01815,0.02300,0.02900,0.03600,0.04200,						
32		0.05300,0.06100,0.07200,0.08600,0.12500,0.16000,0.20000,						
33		0.25000,0.31000,0.38000,0.47000,0.57500,0.70000,0.85000,						
34		1.03500,1.25500,1.54500,1.90000,2.31000,2.80000,3.32500,						
35		0.00060,0.00140,0.00250,0.00400,0.00570,0.00775,0.01070,						
36		0.01450,0.01900,0.02400,0.03150,0.04200,0.05400,0.06750,						
37		0.08500,0.10300,0.11600,0.14000,0.19000,0.24000,0.31000,						
38		0.39000,0.48000,0.60000,0.72500,0.90000,1.10000,1.35500,						
39		1.68000,2.07500,2.55000,3.06500,0.0,0.0,						
40		0.00067,0.00170,0.00300,0.00475,0.00700,0.00980,0.01375,						
41		0.01950,0.02650,0.03600,0.04900,0.06500,0.08500,0.10750,						
42		0.13350,0.16500,0.20250,0.24000,0.30000,0.38500,0.49000,						
43		0.62000,0.77500,0.95500,1.20000,1.51000,1.90000,2.34000,						
44		2.87500,3.42500,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
45		DATA TAB3/0.00078,0.00210,0.00355,0.00575,0.00830,0.01200,0.01700,						
46		0.02400,0.03300,0.04700,0.06500,0.08900,0.11700,0.15200,						
47		0.19100,0.24200,0.29800,0.35500,0.45000,0.57500,0.71000,						
48		0.88500,1.11100,1.40000,1.77500,2.25000,2.80000,3.42000,						
49		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
50		0.00098,0.00270,0.00450,0.00750,0.01010,0.01600,0.02250,						
51		0.03100,0.04350,0.06000,0.08500,0.11500,0.15500,0.20250,						
52		0.25950,0.32250,0.39400,0.51000,0.65000,0.82000,1.02500,						
53		1.31000,1.68500,2.17500,2.80000,3.50000,0.0,0.0,						
54		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
55		0.00150,0.00400,0.00700,0.01000,0.01500,0.02220,0.03100,						
56		0.04300,0.06000,0.08300,0.12000,0.16500,0.22000,0.29500,						
57		0.38000,0.48000,0.60000,0.77500,0.99000,1.27500,1.67500,						
58		2.25000,3.00000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
59		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
60		DATA TAB4/0.00200,0.00470,0.00830,0.01250,0.01870,0.02750,0.03800,						
61		0.05300,0.07500,0.10700,0.15300,0.21000,0.28500,0.38000,						
62		0.49300,0.62500,0.80000,1.05000,1.40000,1.95000,2.70000,						
63		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
64		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
65		0.00250,0.00550,0.01100,0.01500,0.02250,0.03200,0.04700,						
66		0.06800,0.10100,0.14000,0.19500,0.27000,0.37200,0.49400,						
67		0.62500,0.80000,1.04500,1.40000,2.00000,3.00000,0.0,						
68		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
69		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
70		0.00320,0.00700,0.01200,0.01900,0.02750,0.03950,0.05800,						
71		0.08900,0.14000,0.21500,0.31250,0.43750,0.57500,0.75500,						
72		0.98500,1.25000,1.60000,2.20000,2.97500,0.0,0.0,						
73		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
74		0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,						
75								
CARD NO.	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....	O.....

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77	*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	/
78	*	DATA TAB5/0.	00370	0.00800	0.01400	0.02150	0.03150	0.04500	0.06700
79	*		0.10500	0.16500	0.29000	0.50000	0.68000	0.90000	1.16500
80	*		1.48000	1.90000	2.50000	3.50000	0.0	0.0	;
81	*		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	;
82	*		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	/
83	C	DATA NDATA/18*13,12,11,10,2*9,3*8,2*7,2*6,2*5,4*4/							
84	C	DATA TTAB/1.0,2.0,5.0,10.0,20.0,50.0,100.0,200.0,							
85	*	500.0,1000.0,2000.0,5000.0,10000.0							/
86	C	DATA NSD/35/							
87	C	DEPSCB = 0.0							
88	C	IF(DTIME.EQ.0.0) RETURN							
89	C	SIGB=SIGB/1000.							
90	C	ISIG = SIGB							
91	C	IF(ISIG.GT.NSD) ISIG=NSD							
92	C	NUMD = NDATA(ISIG+1)							
93	C	IF(ISIG.GE.0) GO TO 10							
94	C	DEPSCB = 0.0							
95	C	GO TO 999							
96	C	10 IF(ISIG.GT.1) GO TO 20							
97	C	DO 15 I=1,NUMD							
98	C	TABL(I) = ETAB(1,I)*SIGB							
99	C	15 CONTINUE							
100	C	GO TO 100							
101	C	20 IF(ISIG.LT.NSD) GO TO 30							
102	C	DO 25 I=1,NUMD							
103	C	TABL(I) = ETAB(NSD,I)+(ETAB(NSD,I)-ETAB(NSD-1,I))*(SIGB-35.0)							
104	C	25 CONTINUE							
105	C	GO TO 100							
106	C	30 DO 35 I=1,NUMD							
107	C	TABL(I) = ETAB(ISIG,I)+(ETAB(ISIG+1,I)-ETAB(ISIG,I))*(SIGB-ISIG)							
108	C	35 CONTINUE							
109	C	100 EPSC = EPSCB*100.0							
110	C	DO 105 I=1,NUMD							
111	C	IS = I							
112	C	IF(EPSC.LT.TABL(I)) GO TO 110							
113	C	105 CONTINUE							
114	C	DEPSCB = (TABL(NUMD)-TABL(NUMD-1))/(TTAB(NUMD)-TTAB(NUMD-1))*DTIME							
115	C	*0.01							
116	C	GO TO 999							
117	C	110 IF(IS.NE.1) GO TO 120							
118	C	CTIME = EPSC*TTAB(1)/TABL(1)							
119	C	GO TO 130							
120	C	120 CTIME = TTAB(IS-1)+(TTAB(IS)-TTAB(IS-1))/(TABL(IS)-TABL(IS-1))							
121	C	* (EPSC-TABL(IS-1))							
122	C	130 CTIM1 = CTIME+DTIME							
123	C	DO 135 I=1,NUMD							
124	C	IS = I							
125	C	IF(CTIM1.LT.TTAB(I)) GO TO 140							
126	C	135 CONTINUE							
127	C	EPSC1 = TABL(NUMD)+(TABL(NUMD)-TABL(NUMD-1))/(TTAB(NUMD)-TTAB(NUMD-1))*(CTIM1-TTAB(NUMD))							
128	C	GO TO 160							
129	C	140 IF(IS.NE.1) GO TO 150							
130	C	EPSC1 = TABL(1)*CTIM1/TTAB(1)							
131	C	GO TO 160							
132	C	150 EPSC1 = TABL(IS-1)+(TABL(IS)-TABL(IS-1))/(TTAB(IS)-TTAB(IS-1))							
133	C	* (CTIM1-TTAB(IS-1))							
134	C								
135	C								
136	C								
137	C								
138	C								
139	C								
140	C								
141	C								
142	C								
143	C								
144	C								
145	C								
146	C								
147	C								
148	C								
149	C								
150	C								

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
151	0	0	0	0	0	0	0	0	0
152	C	160 DEPSCB = (EPSC1-EPSC)*0.01							
153		IF(DABS(DEPSCB).LE.1.0D-8) DEPSCB=0.0							
154		IF(DEPSCB.GE.0.0) GO TO 999							
155	C								
156		WRITE(6,1000) EPSCB,SIGB,DTIME,DEPSCB							
157		1000 FORMAT(10X,3E20.5,10X,20.5)							
158	C								
159		STOP							
160		999 SIGB=SIGB*1000.0							
161		RETURN							
162		END							
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.2.3-6 組み合わせ硬化則の場合の入力データイメージ (1回目の計算)

CARD NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	O.....O.....O.....O.....O.....O.....O.....O.....O							
2	FINAS							
3	TITLE SIMPLY-SUPPORTED BEAM SUBJECTED TO TIME-VARYING LOADS(FIRST RUN)							
4	SUBTITLE COMBINED HARDENING							
5	STATIC EPC							
6	CONTROL							
7	AUTO CREEP 2 1 4							
8	SAVE							
9	MODEL							
10	MODE							
11	**NLOOP1	9	1	0.0	0.25			
12	1			0.0	0.0	8	10	81
13	81		5.33333333		0.0			
14	**END1							
15	**NLOOP1	5	2	0.0	0.5			
16	141			12	0.0	6	-10	81
17	**END1							
18	ELEMENT TYPE							
19	1	QMEM8						
20	CONNECTION							
21	**ELOOP1	4	10	20	20	20	20	20
22	1	1	1	1	11	21	2	22
23	**END1							
24	**ELOOP1	3	10	20	20	20	20	20
25	41	1	1	81	91	101	83	103
26	**END1							
27	FASTENING							
28	1							
29	F3	82	1	0.0	2			
30		81	1	0.875	89	1	0.125	
31	F3	83	1	0.0	2			
32		81	1	0.750	89	1	0.250	
33	F3	84	1	0.0	2			
34		81	1	0.625	89	1	0.375	
35	F3	85	1	0.0	2			
36		81	1	0.500	89	1	0.500	
37	F3	86	1	0.0	2			
38		81	1	0.375	89	1	0.625	
39	F3	87	1	0.0	2			
40		81	1	0.250	89	1	0.750	
41	F3	88	1	0.0	2			
42		81	1	0.125	89	1	0.875	
43	F3	82	2	0.0	2			
44		81	2	0.875	89	2	0.125	
45	F3	83	2	0.0	2			
46		81	2	0.750	89	2	0.250	
47	F3	84	2	0.0	2			
48		81	2	0.625	89	2	0.375	
49	F3	85	2	0.0	2			
50		81	2	0.500	89	2	0.500	
51	F3	86	2	0.0	2			
52		81	2	0.375	89	2	0.625	
53	F3	87	2	0.0	2			
54		81	2	0.250	89	2	0.750	
55	F3	88	2	0.0	2			
56		81	2	0.125	89	2	0.875	
57	GEOMETRY							
58	1	1 1.0						
59	MATERIAL							
60	1		1	1	3	1	3	
61	E		21.7E6					
62	NU		0.3					
63	SIGY		9.0E3					
64	HDASHC		0.471E6					
65	HDASH	F6	6					
66		0.0	0.220E6	0.002	0.280E6	0.004	0.213E6	
67	0.007	0.163E6	0.01	0.122E6	0.02	0.068E6		
68	BOUNDARY	1	F8	1				
69	1							
70								
71		1	9	1	0.			
72		145		2	0.			
73		1	149	3	0.			
74	FORCE							
75	1							
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	0	0	0

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77		9		2	1.0				
78		STEP RATIO							
79		1	1.0	10+0.1					
80		HISTORY							
81		INTERVAL	11	1					
82		FORC	1	-1000.0					
83		BOUN	1						
84		FAS	1						
85		INTERVAL	AUTO CREEP		312.0	0.2			
86		BOUN	1						
87		FAS	1						
88		INTERVAL	5						
89		FORC	1	-125.0					
90		BOUN	1						
91		FAS	1						
92		INTERVAL	AUTO CREEP		312.0	1.0			
93		BOUN	1						
94		FAS	1						
95		END MODEL							
96		OUTPUT							
97		NSET1	1	1	5	9			
98		NSET1	2	1	5	9	145		
99		ESET2	1	1	4	3			
100		IPSET1	1	1	4	7			
101		PRINT SELECT							
102		DISP	1						
103		REAC	2						
104		ELM	1	1					
105		XYPLOT							
106		PTITLE	BENDING STRESS-STRAIN CURVE AT IPNT 1 IN ELM 1						
107		XTITLE	STRAIN(IN/IN)						
108		YTITLE	BENDING STRESS(PSI)						
109		CURVE	1		E+P+C	STRN			
110		PLOT3	EEPC1	1	1STRS1	1	1		
111		PTITLE	BENDING STRESS-STRAIN CURVE AT IPNT 7 IN ELM 4						
112		PLOT3	EEPC1	4	7STRS1	4	7		
113		TIME HISTORY OF EQUIVALENT CREEP STRAIN							
114		PTITLE	CREEP TIME(HOUR)						
115		XTITLE	EQUIVALENT CREEP STRAIN(IN/IN)						
116		YTITLE							
117		CURVE	1		ELM1,IP1				
118		CURVE	2		ELM4,IP7				
119		PLOT1	ECEQ	1	1ECEQ	4	7		CTIME
120		END OUTPUT							
121		END FINAS							
122									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.2.3-7 組み合わせ硬化則の場合の入力データイメージ (2回目の計算)

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	SIMPLY-SUPPORTED BEAM SUBJECTED TO TIME-VARYING LOADS(SECOND RUN)							
4	SUBTITLE	COMBINED HARDENING							
5	STATIC	EPC							
6	NOPRINT	DESCR							
7	RESTART								
8	SAVE								
9	MODEL								
10	FORCE	1							
11			9		2	1.0			
12		2							
13			1		2	1.0			
14	STEP RATIO								
15	1	1.0	10*0.1						
16	2	10.0	1115.0	200.0	4*100.0	4*50.0	8*25.0		
17	3	1.0	99.0						
18	HISTORY								
19	INTERVAL	11	1						
20	FORC		1	-1000.0					
21	BOUN		1						
22	FAS		1						
23	INTERVAL		AUTO CREEP		312.0	0.2			
24	BOUN		1						
25	FAS		1						
26	INTERVAL	5							
27	FORC		1	-125.0					
28	BOUN		1						
29	FAS		1						
30	INTERVAL		AUTO CREEP		312.0	1.0			
31	BOUN		1						
32	FAS		1						
33	INTERVAL	19	2						
34	FORC		2	2125.0					
35	BOUN		1						
36	FAS		1						
37	INTERVAL		AUTO CREEP		312.0	0.2			
38	BOUN		1						
39	FAS		1						
40	INTERVAL	2	3						
41	BOUN		1						
42	FORC		1	-1000.0					
43	FAS		1						
44	END MODEL								
45	OUTPUT								
46	NSET1	1	1	5	9				
47	NSET1	2	1	5	9	145			
48	ESET2	1	1	4	3				
49	IPSET1	1	1	4	7				
50	PRINT SELECT								
51	DISP	1							
52	REAC	2							
53	ELM	1	1						
54	XYPLOT								
55	PTITLE	BENDING STRESS-STRAIN CURVE AT IPNT 1 IN ELM 1							
56	XTITLE	STRAIN(IN/IN)							
57	YTITLE	BENDING STRESS(PSI)							
58	CURVE	1			E+P+C	STRN			
59	PLOT3	EEPC1	1	1STRS1	1	1			
60	PTITLE	BENDING STRESS-STRAIN CURVE AT IPNT 7 IN ELM 4							
61	XTITLE	STRAIN(IN/IN)							
62	YTITLE	BENDING STRESS(PSI)							
63	CURVE	1			E+P+C	STRN			
64	PLOT3	EEPC1	4	7STRS1	4	7			
65	PTITLE	TIME HISTORY OF EQUIVALENT CREEP STRAIN							
66	XTITLE	CREEP TIME(HOUR)							
67	YTITLE	EQUIVALENT CREEP STRAIN(IN/IN)							
68	CURVE	1			ELM1, IP1				
69	CURVE	2			ELM4, IP7				
70	PLOT1	ECEQ	1	1ECEQ	4	7			CTIME
71	END OUTPUT								
72	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.2.3-8 リスタートテープの編集を行なう FNSEDIT の入力データイメージ

	1	2	3	4	5	6	7	8
CARD NO.	0	0	0	0	0	0	0	0
1	MERGE	RESTART	TAPES=2					
CARD NO.	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.2.3 - 9 リスタートテープから出力を行なう入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									
57									
58									
59									
60									
61									
62									
63									
64									
65									
66									
67									
68									
69									
70									
71									
72									
73									
74									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

2.3 幾何学的非線形解析および座屈荷重解析

2.3.1 球殻の弾性大変形解析

(1) 問題

図2.3.1-1に示す半径4.758 in, 板厚0.01576 inの部分球殻の頂部に集中荷荷を作用させる場合について弾性大変形解析を行なう。⁷⁾ 構造の周縁は完全固定とし, 荷荷は荷重制御と変位制御の2ケースを考える。荷重制御における最大荷荷は60 lbとし, 変位制御における最大荷荷は0.16 inとする。材料定数は弾性係数 10×10^6 lb/in², ポアソン比0.3とする。

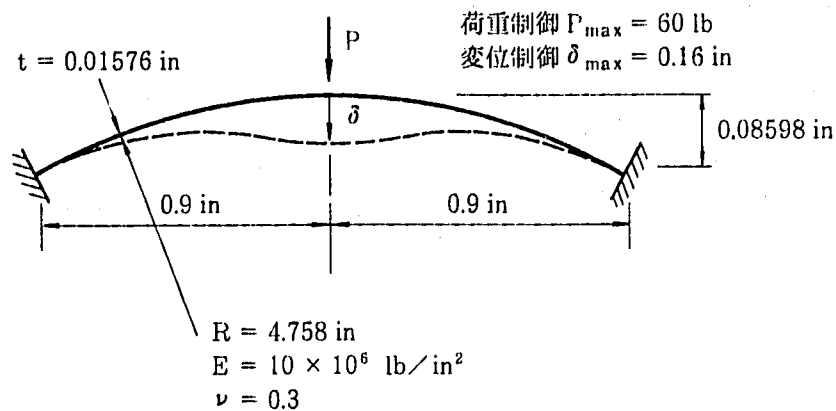


図2.3.1 部分球殻

(2) 有限要素モデルと解析条件

解析対象が薄肉シェル構造であることと荷荷の対称性を考慮して, 2節点円錐台シェル要素 CONIC 2 を使用して図2.3.1-2に示す有限要素モデルを作成する。境界条件は図2.3.1-2のA点に対称条件を与え, B点で完全拘束を行なう。1ステップ当りの荷荷の増分は荷重制御では2 lb以下とし, 変位制御では0.005 in一定とする。

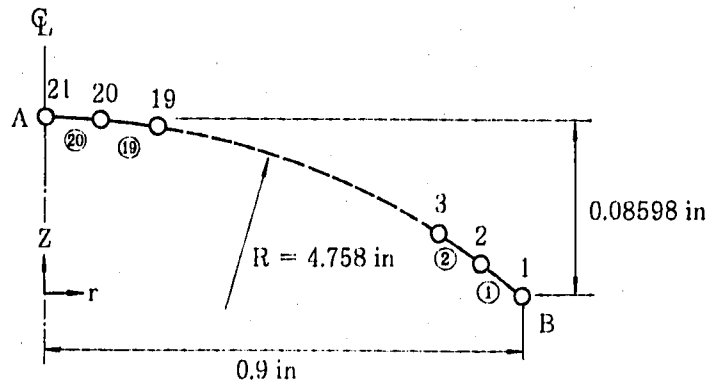


図 2.3.1-2 有限要素モデル

(3) 解析結果

荷重あるいは反力と変位との関係を図 2.3.1-3 に示す。

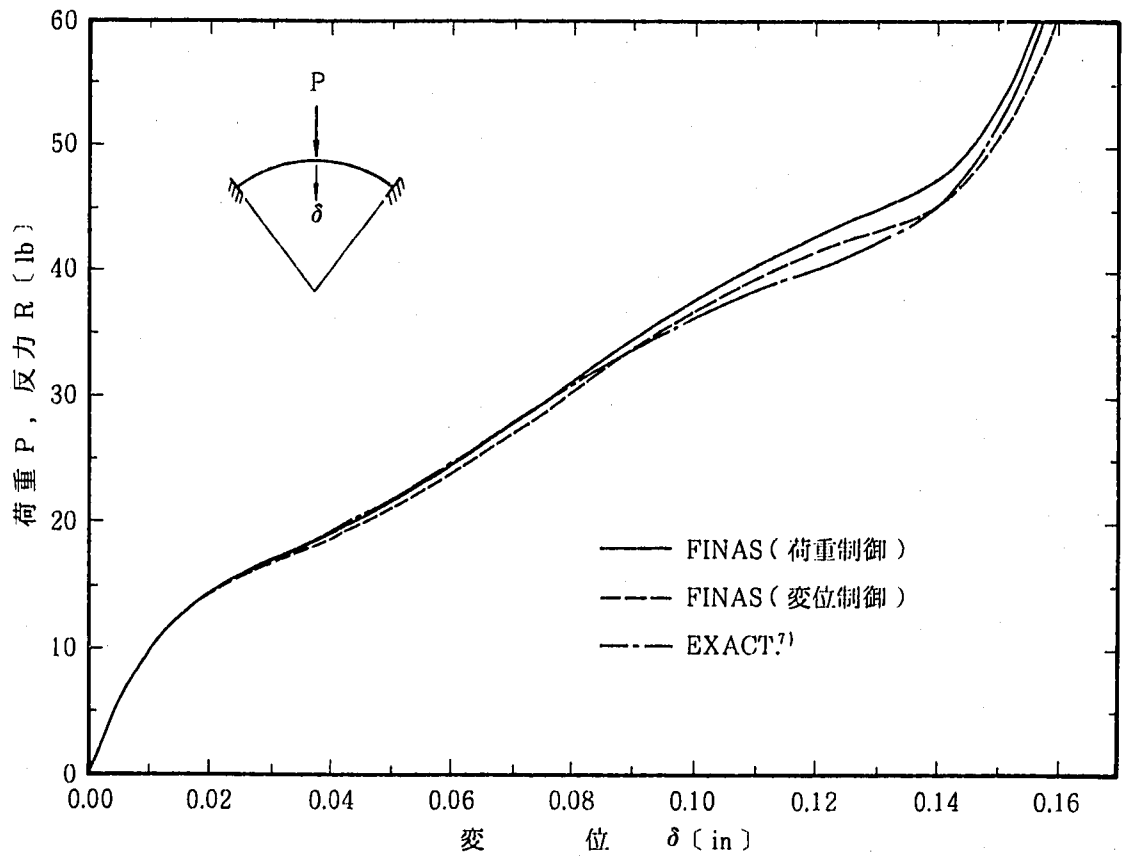


図 2.3.1-3 荷重と変位の関係

(4) 入力データ

表 2.3.1-1 荷重制御の場合の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2.3.1-2 変位制御の場合の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8

2.4 破壊力学解析

2.4.1 3点曲げ試験片の弾性破壊力学解析

(1) 問題

図 2.4.1-1 に示す試験片に 3 点曲げ荷重を負荷して弾性解析を行ない、経路積分法と変位外挿法で求めた応力拡大係数について比較を行なう。⁸⁾ 試験片の材料は溶接材と母材が同一の場合と、異なる場合の 2 ケースを考え、それぞれに対する弾性係数とポアソン比を表 2.4.1-1 と表 2.4.1-2 に示す。負荷は図 2.4.1-2 に示すものとする。

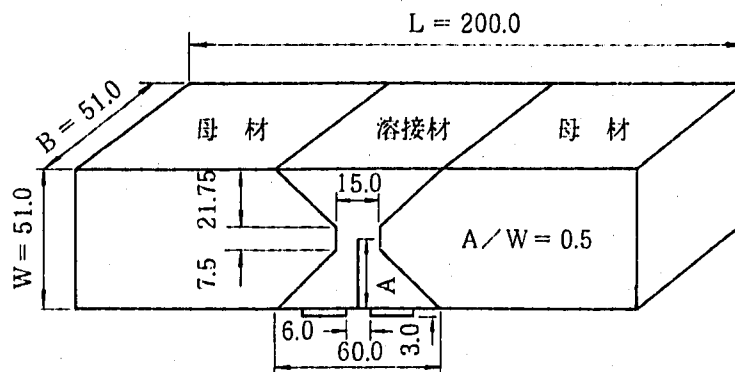


図 2.4.1-1 試験片

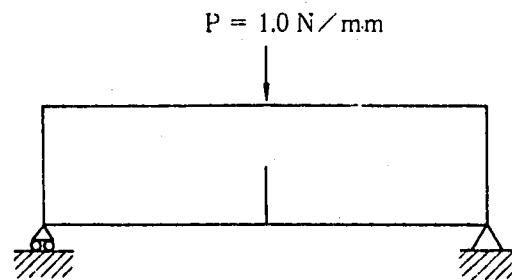


図 2.4.1-2 負荷条件

表 2.4.1-1 溶接材と母材が同一材質の場合の材料定数

	溶 接 材	母 材
弾 性 係 数	$210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$	$210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.3	0.3

表 2.4.1-2 溶接材と母材が異なる材質の場合の材料定数

	溶 接 材	母 材
弾 性 係 数	$170 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$	$210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.3	0.3

(2) 有限要素モデルと解析条件

試験片と負荷の対称条件を考慮して2分の1の有限要素モデルを作成する。8節点四辺形平面ひずみ要素QPLAN 8を使用した有限要素モデルを図2.4.1-3に示す。き裂先端を節点に含む要素は図2.4.1-4のように、き裂先端につながる辺上の中間節点をき裂寄り4分の1の位置に移動させてき裂先端の特異性を表現する。積分経路は図2.4.1-3の9つの経路を考え、境界条件は対称条件を考慮して図2.4.1-5に示すものを用いる。

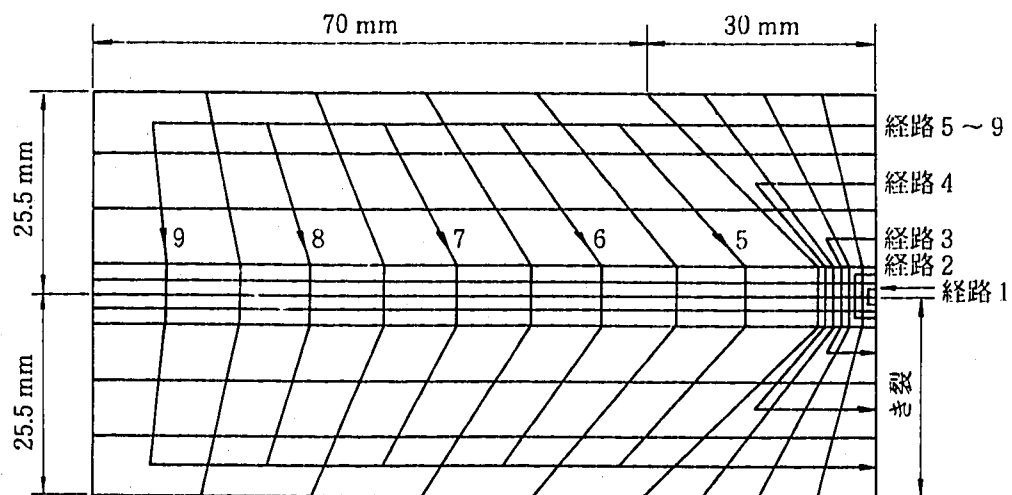


図 2.4.1-3 有限要素モデルと積分経路

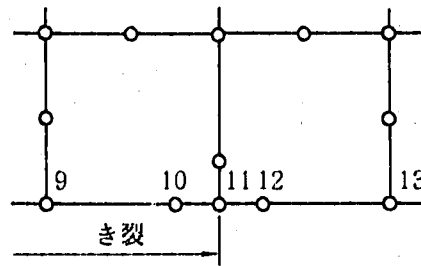


図 2.4.1-4 き裂先端の節点配置

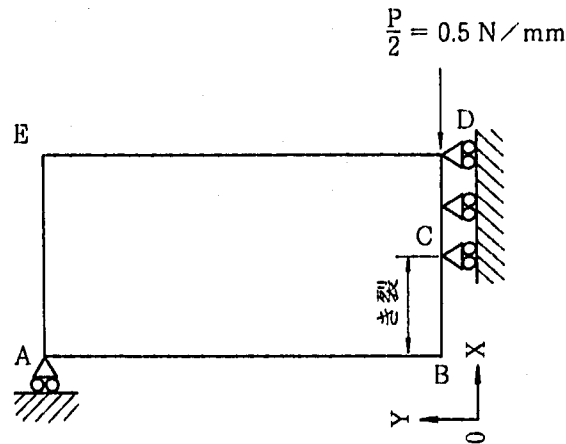


図 2.4.1-5 境界条件

(3) 解析結果

表 2.4.1-3 と図 2.4.1-6 に経路積分の結果を、表 2.4.1-4 に式 (2.4.1-1) により無次元化した応力拡大係数 F_I をそれぞれ示す。

$$F_I = \frac{K_I B \sqrt{W}}{P} \quad (2.4.1-1)$$

ここで、 K_I は応力拡大係数、 $B = 1.0 \text{ mm}$ 、 $W = 51 \text{ mm}$ 、 $P = 1 \text{ N}$ である。 K_I の値は解法ごとにそれぞれ次式で求めている。

経路積分法

$$K_I = \sqrt{\frac{JE}{1-\nu^2}} \quad (2.4.1-2)$$

変位外挿法

$$K_I = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} U_y \quad (2.4.1-3)$$

U_y : 節点のy方向変位

r : き裂先端から節点までの距離

変位外挿法では図 2.4.1-4 の節点 9 と 11 でそれぞれ K_I を求め、線形外挿によりき裂先端での値を計算している。なお参考のため EPICC 報告書⁹⁾に掲載されている無次元応力拡大係数を表 2.4.1-5 に示す。

表 2.4.1-3 $\frac{1}{2}J$ 値

経路番号		溶接材と母材が同一材質	溶接材と母材が異なる材質
溶接材内	1	4.36018×10^{-6}	5.24404×10^{-6}
	2	4.34082×10^{-6}	5.23822×10^{-6}
	3	4.41178×10^{-6}	5.29196×10^{-6}
	4	4.38192×10^{-6}	5.28550×10^{-6}
溶接材内+母材	5	4.64720×10^{-6}	5.53206×10^{-6}
	6	4.68393×10^{-6}	5.55463×10^{-6}
	7	4.67597×10^{-6}	5.54344×10^{-6}
	8	4.71372×10^{-6}	5.58594×10^{-6}
	9	5.06837×10^{-6}	5.97306×10^{-6}
溶接材内の平均		4.37368×10^{-6}	5.26493×10^{-6}
全体の平均		4.58710×10^{-6}	5.47209×10^{-6}

表 2.4.1-4 無次元化応力拡大係数 F_1

解 法		溶接材と母材 が同一材質	溶接材と母材 が異なる材質
経路 積分法	溶接材内平均	10.15	10.02
	全体平均	10.39	—
変位外挿法		9.866	9.752

表 2.4.1-5 EPICC 報告書⁸⁾ による無次元化応力拡大係数 F_1

プログラム	溶接材と母材が同一材質		溶接材と母材が異なる材質	
	JPLAS	ELCOM	JPLAS	ELCOM
解 法	経路積分法*	変位外挿法	経路積分法**	変位外挿法
3 点 曲 げ	10.31	10.15	10.15	10.02

* 全経路の平均

** 溶接材内経路の平均

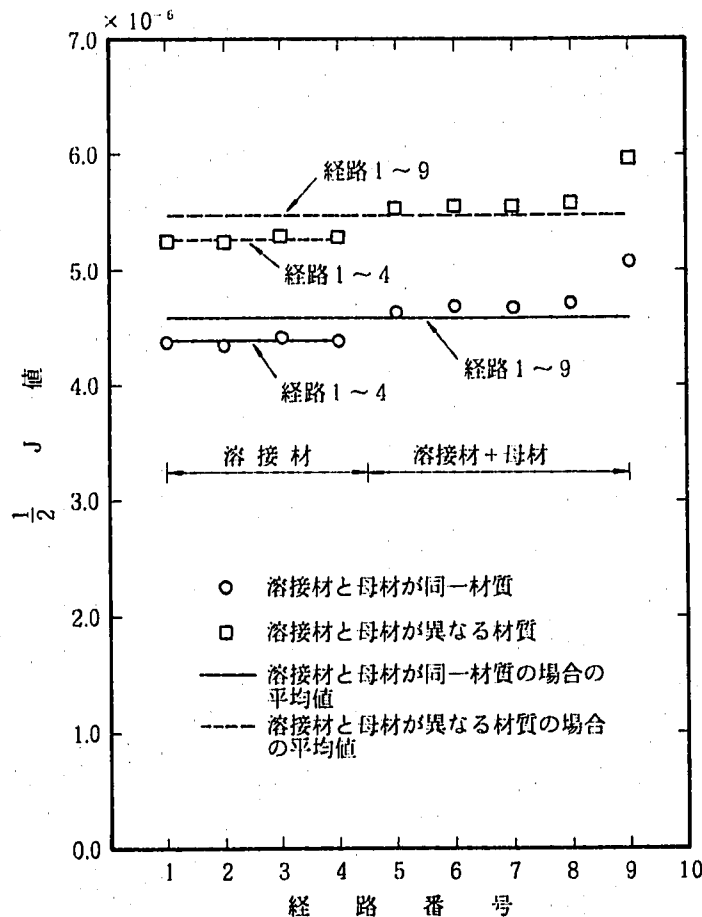


図 2.4.1-6 1/2 J 値

(4) 入力データと解析結果のリスト

表 2.4.1-6 溶接材と母材の材質が異なる場合の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8				
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
2	FINAS	THREE POINT BENDING(ONE MATERIAL) - J-INTEGRAL PROBLEM											
3	TITLE	E											
4	STATIC	J-INTEGRAL											
5	CONTROL	9	2	6	10	14	18	20	22	24	26		
6		6	5										
7		7	17	16	15	14	4						
8		8	18	28	27	26	25	24	23	13	3		
9		9	19	29	39	38	37	36	35	34	33	32	22
10		12	2										
11		10	20	30	40	50	49	48	47	46	45	44	43
12		42	41	31	21	11	1						
13		10	20	30	40	50	60	59	58	57	56	55	54
14		53	52	51	41	31	21	11	1				
15		10	20	30	40	50	60	70	69	68	67	66	65
16		64	63	62	61	51	41	31	21	11	1		
17		10	20	30	40	50	60	70	80	79	78	77	76
18		75	74	73	72	71	61	51	41	31	21	11	1
19		10	20	30	40	50	60	70	80	90	89	88	87
20		86	85	84	83	82	81	71	61	51	41	31	21
21		11	1										
22	MODEL												
23	NODE PITCH												
24	1	8*3.75	10*7.0										
25	2	2*1.75	2*2.0	5*18.5									
26	3	4*0.875	4*1.0	10*9.25									
27	4	1.75	2*2.0	5*18.5									
28	5	0.4375	1.3125	2*0.875	4*1.0	10*9.25							
29	11	4*3.5	2*3.875										
30	12	2*7.0	7.75										
31	NODE												
32	1		0.0	0.0						18	1	30	541
33	541		0.0	100.0									
34	7		21.75	0.0						6	11	-1	1
35	37		21.75	0.875						3	12	-2	31
36	67		21.75	1.75						6	11	-1	61
37	97		21.75	2.625						3	12	-2	91
38	127		21.75	3.50						6	11	-1	121
39	157		21.75	4.50						3	12	-2	151
40	187		21.75	5.50						6	11	-1	181
41	217		21.75	6.50						3	12	-2	211
42	247		21.75	7.50						6	11	-1	241
43	277		21.75	16.75						3	12	-2	271
44	307		21.75	26.00						6	11	-1	301
45	337		21.75	35.25						3	12	-2	331
46	367		21.75	44.50						6	11	-1	361
47	397		21.75	53.75						3	12	-2	391
48	427		21.75	63.00						6	11	-1	421
49	457		21.75	72.25						3	12	-2	451
50	487		21.75	81.50						6	11	-1	481
51	517		21.75	90.75						3	12	-2	511
52	547		21.75	100.00						6	11	-1	541
53	8		22.75	0.0						9	2	60	548
54	548		22.75	100.0									
55	9		23.75	0.0						18	3	30	549
56	549		23.75	100.0									
57	70		24.625	1.75						8	4	60	550
58	550		24.625	100.0									
59	11		25.50	0.0						18	5	30	551
60	551		25.50	100.0									
61	72		26.375	1.75						8	4	60	552
62	552		26.375	100.0									
63	13		27.25	0.0						18	3	30	553
64	553		27.25	100.0									
65	14		28.25	0.0						9	2	60	554
66	554		28.25	100.0									
67	21		51.0	0.0						18	1	30	561
68	561		51.0	100.0									
69	15		29.25	0.0						6	11	1	21
70	561		29.25	0.875						3	12	2	51
71	45		29.25	1.75						6	11	1	81
72	75		29.25	2.625						3	12	2	111
73	105		29.25	3.50						6	11	1	141
74	135		29.25										
75													

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	165		29.25	4.50			3	12
77		195		29.25	5.50			6	11
78		225		29.25	6.50			3	11
79		255		29.25	7.50			6	11
80		285		29.25	16.75			3	12
81		315		29.25	26.00			3	11
82		345		29.25	35.25			3	12
83		375		29.25	44.50			6	11
84		405		29.25	53.75			3	12
85		435		29.25	63.00			6	11
86		465		29.25	72.25			3	12
87		495		29.25	81.50			6	11
88		525		29.25	90.75			3	12
89		555		29.25	100.00			6	11
90									
91		10		25.0625	0.0				
92		12		25.9375	0.0				
93		ELEMENT TYPE							
94		1 QPLAN8							
95		CONNECTION							
96		1 1	1	1	2	3	31	33	61
97		MATERIAL							
98		1							
99									
100		E NU		210.0E3					
101		BOUNDARY		0.3					
102		1							
103			11	21	1	2			
104			541			1			
105		FORCE							
106		1							
107			21			1		-1.0	
108		HISTORY							
109		INTERVAL							
110									
111		BOUN FORC		1					
112					0.5				
113		END MODEL							
114		OUTPUT							
115		STRUCTURE PLOT							
116		ESET2	1	4	7	1	14	17	1
117		PTITLE							
118		VIEW		90.0					
119		IPLOT							
120		IPLOT	1						
121		END OUTPUT							
122		END FINAS							

表 2.4.1-7 溶接材と母材の材質が異なる場合の解析結果のリスト (抜粋)

THREE POINT BENDING(TWO MATERIAL) - J-INTEGRAL PROBLEM

FINAS VERSION 9.0

11/26/85

PAGE 19

PATH INDEPENDENT INTEGRAL ESTIMATION (STEP NUMBER 1)

PATH NUMBER	J-VALUE
1	5.24405E-06
2	5.23822E-06
3	5.29196E-06
4	5.28550E-06
5	5.53205E-06
6	5.55463E-06
7	5.54344E-06
8	5.58593E-06
9	5.97305E-06

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 1)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	-2.91101E-04	8.81690E-05				
2	-2.91135E-04	7.78419E-05				
3	-2.91213E-04	6.74302E-05				
4	-2.91305E-04	5.77903E-05				
5	-2.91367E-04	4.77935E-05				
6	-2.91397E-04	3.71783E-05				
7	-2.91303E-04	2.52580E-05				
8	-2.91450E-04	2.12647E-05				
9	-2.91481E-04	1.64988E-05				
10	-2.91150E-04	7.84903E-06				
11	-2.91046E-04	0.0				
12	-2.89229E-04	0.0				
13	-2.86812E-04	0.0				
14	-2.85765E-04	0.0				
15	-2.85001E-04	0.0				
16	-2.83047E-04	0.0				
17	-2.81664E-04	0.0				
18	-2.80549E-04	0.0				
19	-2.79998E-04	0.0				
20	-2.81140E-04	0.0				
21	-2.82355E-04	0.0				
31	-2.81123E-04	8.81265E-05				
33	-2.83825E-04	6.74387E-05				
35	-2.86137E-04	4.77709E-05				
37	-2.88073E-04	2.52059E-05				
39	-2.87137E-04	1.64484E-05				
41	-2.87641E-04	3.35062E-06				
43	-2.86065E-04	1.04545E-06				
45	-2.84686E-04	6.04269E-07				
47	-2.81093E-04	-3.50237E-07				
49	-2.79167E-04	-1.80036E-06				
51	-2.74980E-04	-7.33216E-06				
61	-2.71229E-04	8.80707E-05				
62	-2.73891E-04	7.78680E-05				

THREE POINT BENDING(TWO MATERIAL) - J-INTEGRAL PROBLEM

FINAS VERSION 9.0

11/26/85

PAGE 20

TOTAL DISPLACEMENT VECTOR (STEP NUM. 1)

POINT-ID	D1	D2	D3	D4	D5	D6
63	-2.76526E-04	6.74380E-05				
64	-2.78838E-04	5.77523E-05				
65	-2.81057E-04	4.77090E-05				
66	-2.83127E-04	3.70534E-05				
67	-2.84977E-04	2.50830E-05				
68	-2.84503E-04	2.10136E-05				
69	-2.83881E-04	1.64116E-05				
70	-2.83388E-04	1.17656E-05				
71	-2.83569E-04	7.36346E-06				
72	-2.83997E-04	4.07719E-06				
73	-2.84208E-04	2.59581E-06				
74	-2.84140E-04	1.70169E-06				
75	-2.83808E-04	1.22593E-06				
76	-2.81536E-04	4.91577E-07				
77	-2.79713E-04	-5.20166E-07				
78	-2.77892E-04	-1.88279E-06				
79	-2.75724E-04	-4.06415E-06				
80	-2.73051E-04	-7.67418E-06				
81	-2.68879E-04	-1.45112E-05				
91	-2.61544E-04	8.30483E-05				
93	-2.69407E-04	6.74703E-05				
95	-2.76174E-04	4.76554E-05				
97	-2.82198E-04	2.50171E-05				
99	-2.81339E-04	1.66172E-05				
101	-2.81379E-04	9.01935E-06				
103	-2.82294E-04	4.14746E-06				
105	-2.82473E-04	2.00850E-06				
107	-2.77366E-04	-6.51234E-07				
109	-2.71469E-04	-6.07936E-06				
111	-2.61893E-04	-2.00509E-05				
121	-2.52089E-04	8.81508E-05				
122	-2.57298E-04	7.80784E-05				
123	-2.62468E-04	6.75707E-05				
124	-2.67050E-04	5.77956E-05				
125	-2.71498E-04	4.76585E-05				
126	-2.75739E-04	3.69457E-05				
127	-2.79697E-04	2.50198E-05				
128	-2.79352E-04	2.11579E-05				
129	-2.79162E-04	1.71185E-05				
130	-2.79212E-04	1.36122E-05				
131	-2.79427E-04	1.03698E-05				
132	-2.79866E-04	7.67755E-06				
133	-2.80366E-04	5.61093E-06				
134	-2.80733E-04	4.01729E-06				
135	-2.80902E-04	2.91049E-06				
136	-2.77756E-04	1.38268E-06				
137	-2.74401E-04	-7.03140E-07				
138	-2.70620E-04	-3.73233E-06				
139	-2.66207E-04	-8.05318E-06				

3. 動的解析

3.1 モーダル法

3.1.1 クーリングタワーの固有値解析

(1) 問題

基底部が大地に固定されたコンクリート製のクーリングタワーについて固有値解析を行ない、固有振動数と対応する変形モードを求める。構造の形状を図 3.1.1-1 に、材料定数を表 3.1.1-1 にそれぞれ示す。

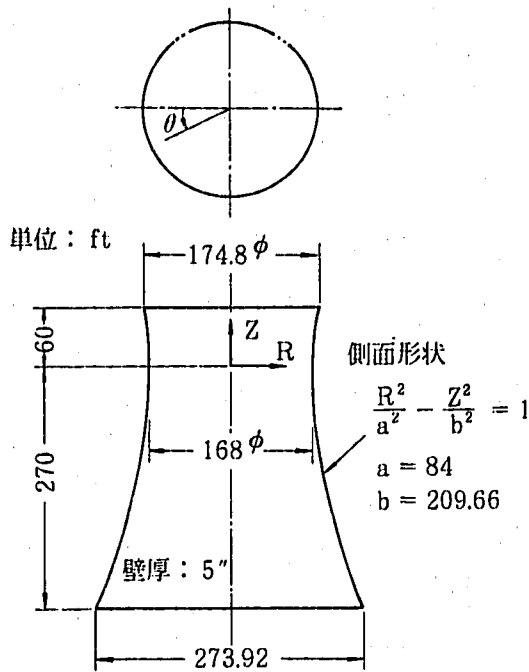


表 3.1.1-1 材料定数

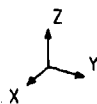
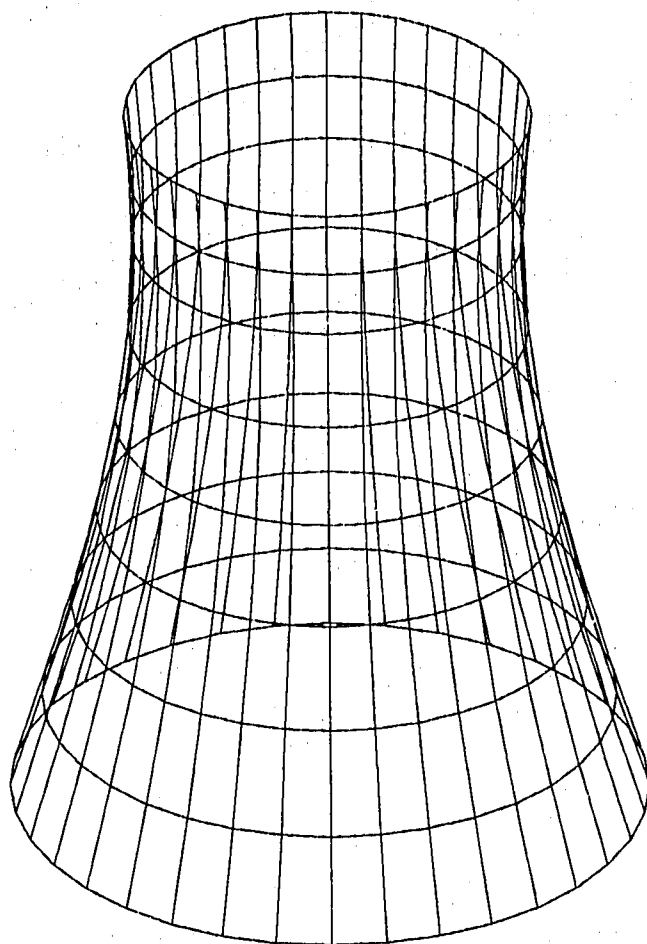
弾性係数 E (lb/ft ²)	4.32 × 10 ⁸
ポアソン比 ν	0.15
質量密度 ρ (lb · sec ² /ft ⁴)	4.6656

図 3.1.1-1 クーリングタワー

(2) 有限要素モデルと解析条件

4 節点四辺形平板シェル要素 QFLA 4 R を用い、クーリングタワーを有限要素モデル化したものを図 3.1.1-2 に示す。質量マトリックスの取扱いは集中質量 (lumped mass) と整合質量 (consistent mass) の両方とし、それぞれの場合について重根を含めて低い方から 20 個の固有振動数と対応する変形モードを求める。

FINAS



GEOM. SCALE 50.0000

FINITE ELEMENT MODEL OF THE COOLING TOWER

図 3.1.1 - 2 有限要素モデル

(3) 解析結果

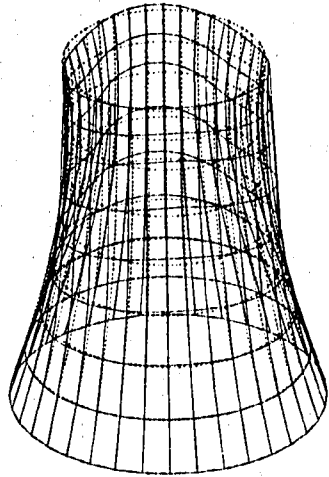
表 3.1.1 - 2 に固有振動数と変形モードを NASTRAN の解と比較して示し、図 3.1.1 - 3 と図 3.1.1 - 4 に整合質量の取扱いをした場合について代表的な変形モードを示す。

表3.1.1 - 2 固有振動数と変形モード

モード 番号	集 中 質 量				整 合 質 量			
	FINAS		NASTRAN		FINAS		NASTRAN	
	f [Hz]	モード (C, L)*	f [Hz]	モード (C, L)*	f [Hz]	モード (C, L)*	f [Hz]	モード (C, L)*
1	1.00976	(5, 1)	0.9841943	(5, 1)	1.11967	(5, 1)	1.091044	(5, 1)
2	1.00976	(5, 1)	0.9841943	(5, 1)	1.11967	(5, 1)	1.091044	(5, 1)
3	1.07235	(6, 1)	1.067201	(6, 1)	1.25026	(6, 1)	1.232130	(4, 1)
4	1.07318	(6, 1)	1.067248	(6, 1)	1.25091	(6, 1)	1.232264	(4, 1)
5	1.17729	(4, 1)	1.147625	(4, 1)	1.26386	(4, 1)	1.237331	(6, 1)
6	1.17737	(4, 1)	1.147772	(4, 1)	1.26396	(4, 1)	1.237561	(6, 1)
7	1.20029	(7, 1)	1.203538	(7, 1)	1.41877	(3, 1)	1.383634	(3, 1)
8	1.20029	(7, 1)	1.203538	(7, 1)	1.41877	(3, 1)	1.383634	(3, 1)
9	1.27161	(6, 2)	1.266095	(6, 2)	1.47069	(7, 1)	1.459634	(7, 1)
10	1.27413	(6, 2)	1.266638	(6, 2)	1.47069	(7, 1)	1.459634	(7, 1)
11	1.35326	(7, 2)	1.347002	(3, 1)	1.51449	(6, 2)	1.482838	(4, 2)
12	1.35326	(7, 2)	1.347002	(3, 1)	1.51744	(6, 2)	1.482954	(4, 2)
13	1.37519	(8, 1)	1.364908	(5, 2)	1.54863	(4, 2)	1.508137	(6, 2)
14	1.37585	(8, 1)	1.364908	(5, 2)	1.54880	(4, 2)	1.508819	(6, 2)
15	1.38182	(3, 1)	1.366822	(8, 1)	1.59124	(5, 2)	1.536016	(5, 2)
16	1.38182	(3, 1)	1.367072	(8, 1)	1.59124	(5, 2)	1.536016	(5, 2)
17	1.40739	(5, 2)	1.387331	(7, 2)	1.72799	(7, 2)	1.717367	(8, 1)
18	1.40739	(5, 2)	1.387331	(7, 2)	1.72799	(7, 2)	1.717637	(8, 1)
19	1.45996	(4, 2)	1.398458	(4, 2)	1.79060	(8, 1)	1.739480	(7, 2)
20	1.46013	(4, 2)	1.398587	(4, 2)	1.79084	(8, 1)	1.739480	(7, 2)

(C, L)* = (周方向モード, 長手方向モード)

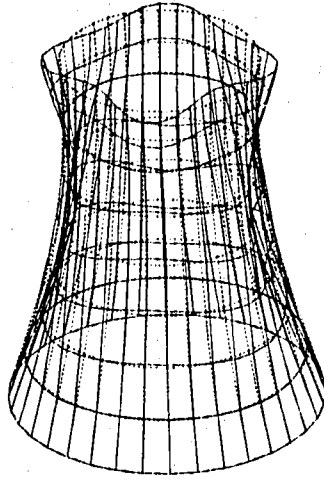
FINAS
MODE SHAPE



MODE NO. 8 GEOM. SCALE 1/80,000
DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER

a) 周方向モード3

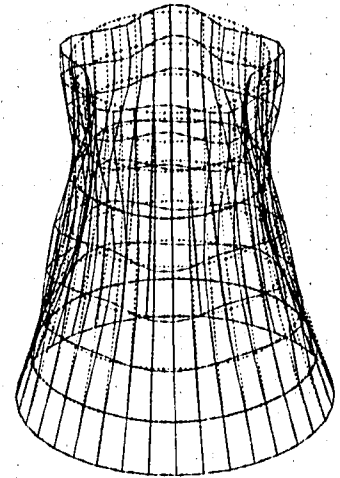
FINAS
MODE SHAPE



MODE NO. 5 GEOM. SCALE 1/80,000
DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER

b) 周方向モード4

FINAS
MODE SHAPE

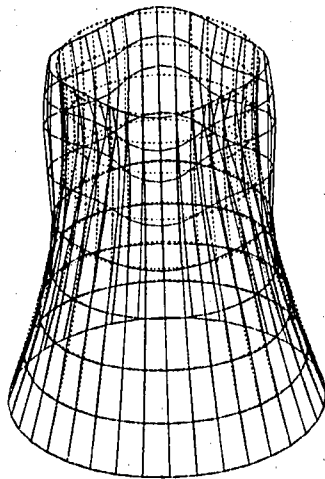


MODE NO. 2 GEOM. SCALE 1/80,000
DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER

c) 周方向モード5

図 3.1.1-3 長手方向モード1の変形モード

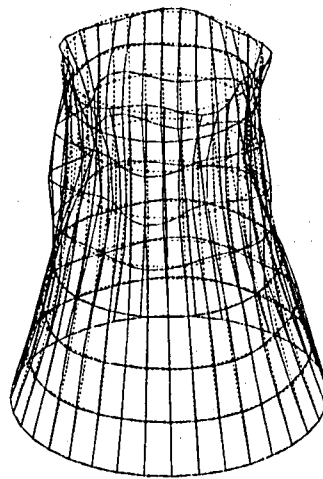
FINAS
MODE SHAPE



MODE NO. 13 GEOM. SCALE 1/80,000
DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER

a) 周方向モード4

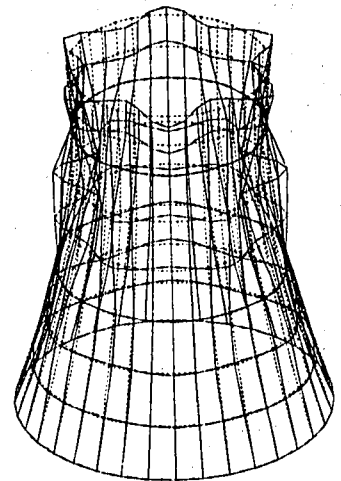
FINAS
MODE SHAPE



MODE NO. 16 GEOM. SCALE 1/80,000
DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER

b) 周方向モード5

FINAS
MODE SHAPE



MODE NO. 12 GEOM. SCALE 1/80,000
DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER

c) 周方向モード6

図 3.1.1-4 長手方向モード2の変形モード

(4) 入力データ

表 3.1.1-3 節点座標をジェネレートするプログラム

```

CARD NO. 0.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
1          0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0
2          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
3          DIMENSION TH2(9)
4          DATA A,B/84.0,209.66/
5          DATA TH2/0.0,2*30.0,6*45.0/
6          DATA H,N1,N2,H270 /330.0,36.8,270.0/
7          DATA PAI /3.141592654D+0/
8          C
9          NT1=N1+1
10         NT2=N2+1
11         HU=H-H270
12         C
13         DO 10 I1=1,NT1
14         SH=0
15         TH1=2.0*PAI*(I1-1)/N1
16         NP=100*(I1-1)
17         DO 20 I2=1,NT2
18         SH=SH+TH2(I2)
19         Z=HU-SH
20         R=A*DSQRT(1.0+Z**2/B**2)
21         X=R*DCOS(TH1)
22         Y=R*DSIN(TH1)
23         Z=Z+H270
24         NP=NP+1
25         WRITE(21,100) NP,X,Y,Z
26         WRITE( 6,200) NP,X,Y,Z
27         20 CONTINUE
28         10 CONTINUE
29         C
30         100 FORMAT(I5,15X, 3E10.4)
31         200 FORMAT(1H ,8HNODE      ,18,8X,3F8.2)
32         C
33         STOP
34         END
CARD NO. 0.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
          0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0.....0

```

注1) 節点座標をファイルFT21 へ出力

注2) 節点座標のジェネレーションは FINAS の機能を使って容易に作成することもできる。

表 3.1.1-4 集中質量として取扱う場合の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE	EIGENVALUE PROBLEM OF A COOLING TOWER(LUMPED MASS)							
4	DYNAMIC	M							
5	CONTROL	LUMP MASS							
6		EIGENVALUE	20	50					
7	MODEL								
8	ELEMENT TYPE								
9	1	QFLA4R							
10	CONNECTION								
11	**ELOOP1	36	100	100	100	100	100		
12	1	1	1	1	2	101	102	8	1
13	**END1								
14	NODE								
15	=READ	21							
16	MATERIAL								
17	1								
18		E				4.32E+08			
19		NU				0.15			
20		RHO				4.6656			
21	GEOMETRY								
22	1	5	0.4167				1000.		
23	D BOUNDARY								
24		9	3609	100		1	6		
25	D FASTENING								
26	F1	8	1	1	1	3601	1	1	
27	F1	8	1	2	1	3601	2	1	
28	F1	8	1	3	1	3601	3	1	
29	F1	8	1	4	1	3601	4	1	
30	F1	8	1	5	1	3601	5	1	
31	F1	8	1	6	1	3601	6	1	
32	END MODEL								
33	OUTPUT								
34	POST TAPE								
35	MODE	ALL							
36	STRUCTURE	PLOT							
37	AXES	X	Y	Z					
38	VIEW		0.0	30.0		-30.0			
39	PTITLE	FINITE ELEMENT MODEL OF THE COOLING TOWER							
40	IPLOT								
41	PTITLE	DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER							
42	MPLOT								
43	END OUTPUT								
44	END FINAS								
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.1.1 - 5 整合質量として取扱う場合の入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	FINAS									
3	TITLE EIGENVALUE PROBLEM OF A COOLING TOWER(CONSISTENT MASS)									
4	DYNAMIC M									
5	CONTROL									
6	EIGENVALUE 20 50									
7	MODEL									
8	ELEMENT TYPE									
9	1 QFLA4R									
10	CONNECTION									
11	**ELOOP1	36	100	100	100	100	100			
12	1	1	1	1	2	101	102	B	1	
13	**END1									
14	NODE									
15	=READ 21									
16	MATERIAL									
17	1									
18	E								4.32E+08	
19	NU								0.15	
20	RHO								4.6656	
21	GEOMETRY									
22	1	5	0.4167						1000.	
23	D BOUNDARY									
24	9	3609	100	1		6				
25	D FASTENING									
26	F1	8	1	1	1	3601	1	1		
27	F1	8	1	2	1	3601	2	1		
28	F1	8	1	3	1	3601	3	1		
29	F1	8	1	4	1	3601	4	1		
30	F1	8	1	5	1	3601	5	1		
31	F1	8	1	6	1	3601	6	1		
32	END MODEL									
33	OUTPUT									
34	POST TAPE									
35	MODE ALL									
36	STRUCTURE PLOT									
37	AXES	X	Y	Z						
38	VIEW	0.0		30.0	-30.0					
39	PTITLE FINITE ELEMENT MODEL OF THE COOLING TOWER									
40	IPLOT									
41	PTITLE DYNAMIC MODE OF THE COOLING TOWER									
42	MPLLOT									
43	END OUTPUT									
44	END FINAS									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

3.1.2 3次元骨組構造の応答スペクトル解析

(1) 問題

図 3.1.2 - 1 に示す外径 2.375 in, 肉厚 0.154 in の鋼鉄製パイプと辺長 2.75 in の鋼鉄製立方体からなる骨組構造に X 方向応答スペクトルを与えた場合について応答スペクトル解析を行なう。^{10), 11)} 材料定数は弾性係数が 27.9×10^6 psi, ポアソン比が 0.3 である。質量は集中質量とし, 集中質量の大きさとその位置を図 3.1.2 - 2 に示す。ここで斜線部は表 3.1.2 - 1 の応答スペクトルを入力する基盤を表わしている。

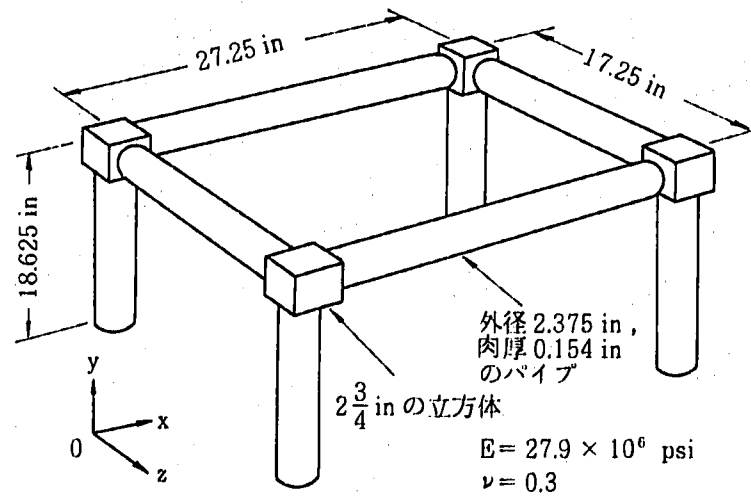


図 3.1.2 - 1 3次元骨組構造

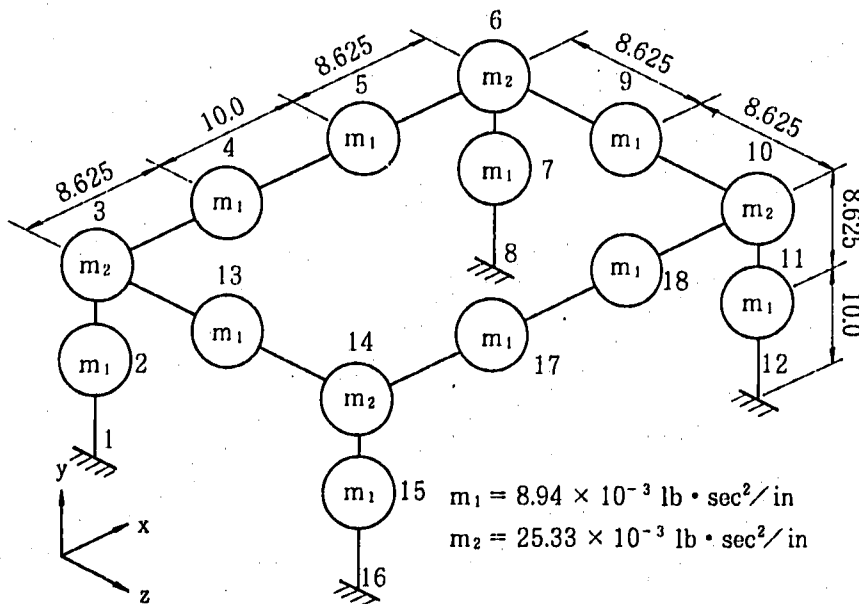


図 3.1.2 - 2 有限要素モデルと集中質量

表 3.1.2-1 X 方向の応力速度スペクトル

振動数 f [Hz]	周期 T [sec]	速度スペクトル Vs [in/sec]
0.0	40.0	17.0
0.2	5.0	17.0
0.9	1.110	30.0
2.0	0.500	160.0
8.0	0.125	130.0
30.0	0.033	30.0
40.0	0.025	1.3
200.0	0.005	1.0
1000.0	0.001	0.0

(2) 有限要素モデルと解析条件

3次元弾性はり要素SBEAM 2を用いて図 3.1.2-2 の有限要素モデルを作成する。

SBEAM2の断面定数はパイプの断面定数と等価なものを使用する。また、応答スペクトル解析に用いるモードは振動数が低い方から10個とする。

$$\begin{aligned} \text{断面積} \quad A &= \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (2.375^2 - 2.067^2) \\ &= 1.0745315 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{有効せん断} \\ \text{断面積} \quad A_y = A_z &= \frac{1}{2} A = 0.5372657 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{断面2次} \\ \text{モーメント} \quad I_y = I_z &= \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) = 0.6657471 \text{ in}^4 \end{aligned}$$

$$\text{ねじり定数} \quad J = I_y + I_z = 1.3314942 \text{ in}^4$$

(3) 解析結果

FINASの解をNASTRANとASKAの解と比較したものを表 3.1.2-2 と表 3.1.2-3 に示す。表 3.1.2-2 は固有振動数であり、表 3.1.2-3 は各モードの値を2乗平均した変位、速度、加速度を表わす。また図 3.1.2-3 はモード1~4の変形モード図である。

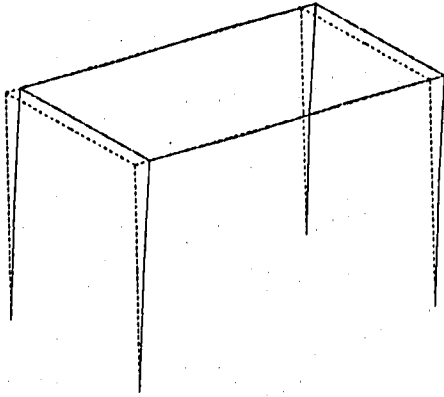
表 3.1.2 - 2 固有振動数 f (Hz)

モード	FINAS	NASTRAN	ASKA
1	111.216	111.2162	111.22
2	115.777	115.7774	115.78
3	137.143	137.1430	137.14
4	215.761	215.7606	215.76
5	404.222	404.2216	404.22
6	422.567	422.5670	422.57
7	451.516	451.5165	451.52
8	548.874	548.8740	548.87
9	733.405	733.4045	733.40
10	758.370	758.3703	758.37

表 3.1.2 - 3 2乗平均した変位, 速度, 加速度

成分	節点番号	FIANS	NASTRAN	ASKA
変位 U_x (in)	2, 7, 11, 15	7.41714×10^{-4}	8.163120×10^{-4}	7.4172×10^{-4}
	3, 6, 10, 14	1.59412×10^{-3}	1.754456×10^{-3}	1.5941×10^{-3}
	4, 5, 17, 18	1.59613×10^{-3}	1.756662×10^{-3}	1.5961×10^{-3}
	9, 13	1.61930×10^{-3}	1.782164×10^{-3}	1.6193×10^{-3}
速度 U_x (in/sec)	2, 7, 11, 15	5.18304×10^{-1}	5.704326×10^{-1}	/
	3, 6, 10, 14	1.11396	1.226001	
	4, 5, 17, 18	1.11536	1.227542	
	9, 13	1.13155	1.245363	
加速度 U_x (in/sec ²)	2, 7, 11, 15	3.62187×10^2	3.986140×10^2	3.6607×10^2
	3, 6, 10, 14	7.78428×10^2	8.567200×10^2	7.7848×10^2
	4, 5, 17, 18	7.79407×10^2	8.577974×10^2	7.7947×10^2
	9, 13	7.90722×10^2	8.702502×10^2	7.9418×10^2

FINAS
MODE SHAPE



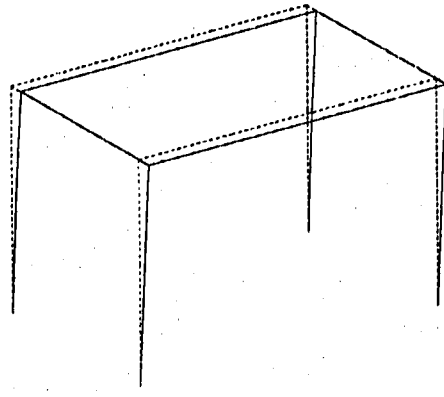
MODE NO. 1

GEOM. SCALE 8.00000

MODE 1

a) モード1

FINAS
MODE SHAPE



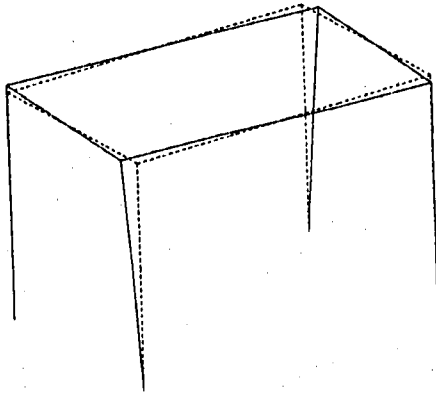
MODE NO. 2

GEOM. SCALE 8.00000

MODE 2

b) モード2

FINAS
MODE SHAPE



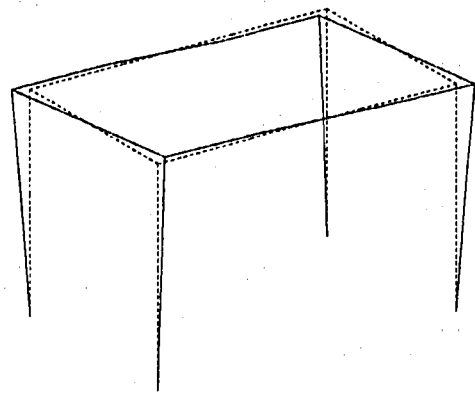
MODE NO. 3

GEOM. SCALE 8.00000

MODE 3

c) モード3

FINAS
MODE SHAPE



MODE NO. 4

GEOM. SCALE 8.00000

MODE 4

d) モード4

図 3.1.2 - 3 振動モード

(4) 入力データ

表 3.1.2 - 4 入力データイメージ

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	FINAS								
3	TITLE MODAL SPECTRUM RESPONSE ANALYSIS(VELOCITY IS GIVEN.)								
4	DYNAMIC M SR								
5	CONTROL								
6	EIGENVALUE 10								
7	MODEL								
8	NODE PITCH								
9	1	10.0	8.625	8.625					
10	2	8.625	10.0						
11	1			0.0	0.0	0.0		2	1
12	3			0.0	18.625	0.0			3
13	4			8.625	18.625	0.0			
14	5			18.625	18.625	0.0			
15	6			27.25	18.625	0.0		2	2
16	8			27.25	0.0	0.0			8
17	9			27.25	18.625	8.625			
18	10			27.25	18.625	17.25		2	2
19	12			27.25	0.0	17.25			12
20	13			0.0	18.625	8.625			
21	14			0.0	18.625	17.25		2	2
22	16			0.0	0.0	17.25			16
23	17			8.625	18.625	17.25			
24	18			18.625	18.625	17.25			
25	110			0.0	18.625	20.0			
26	120			27.25	18.625	20.0			
27	210			30.0	18.625	17.25			
28	310			27.25	20.0	0.0			
29	320			27.25	20.0	17.25			
30	ELEMENT TYPE								
31	1 SBEBAM2								
32	CONNECTION								
33	1	1	1	1	2	110			
34	2	1	1	1	3	110			
35	3	1	1	1	4	310			
36	4	1	1	1	5	310			
37	5	1	1	1	6	310			
38	6	1	1	1	7	120			
39	7	1	1	1	8	120			
40	8	1	1	1	9	210			
41	9	1	1	1	10	210			
42	10	1	1	1	11	120			
43	11	1	1	1	12	120			
44	12	1	1	1	3	210			
45	13	1	1	1	13	210			
46	14	1	1	1	15	110			
47	15	1	1	1	16	110			
48	16	1	1	1	14	320			
49	17	1	1	1	17	320			
50	18	1	1	1	18	320			
51	GEOMETRY								
52	6	1.0745315	0.5372657	0.5372657	0.6657471	0.6657471	1.3314942		
53	BASE NODE								
54	1	1							
55		1	8	7					
56		12	16	4					
57	D BOUNDARY								
58		1	8	7	2	6			
59		12	16	7	2	6			
60	MATERIAL								
61	1								
62									
63		E	27.9E6						
64		NU	0.3						
65	ADD MASS								
66		2	4	2	1	3	0.00894	0.00894	0.00894
67		5	17	2	1	3	0.00894	0.00894	0.00894
68		18			1	3	0.00894	0.00894	0.00894
69		3	6	3	1	3	0.02538	0.02538	0.02538
70		10	14	4	1	3	0.02538	0.02538	0.02538
71	SPECTRUM								
72	2	1.0	1.0	0.0	0.0				
73	1	9							
74		0.0	0.001	0.0	0.005	1.0	0.025	1.3	
75		0.0333	30.0	0.125	130.0	0.5	160.0	17.0	
76		1.11	30.0	5.0	17.0	40.0	17.0		
77	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
77									
78									
79		1	1						
80		2	2						
81		3	3						
82		4	4						
83		5	5						
84									
85									
86									
87									
88									
89									
90									
91									
92									
93									
94									
95									
96									
97									
98									
99									
100									
CARD NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

END MODEL
 OUTPUT
 MSET1 1 1
 MSET1 2 2
 MSET1 3 3
 MSET1 4 4
 MSET1 5 5
 PRINT SELECT
 MODE ALL
 STRUCTURE PLOT
 AXES Z X Y
 VIEW 0.0 23.17 34.27
 IPLOT NODES
 PTITLE MODE 1
 MPLOT 1
 PTITLE MODE 2
 MPLOT 2
 PTITLE MODE 3
 MPLOT 3
 PTITLE MODE 4
 MPLOT 4
 PTITLE MODE 5
 MPLOT 5
 END OUTPUT
 END FINAS

参 考 文 献

- 1) Munch, K.V., Report Nr 91 "A Collection of Problems Solved with ASKA", ISD Universität Stuttgart, August, 1970.
- 2) Bathe, K.J., Wilson, E.L. and Peterson, F.E., SAP IV EERC 73-11, College of Engineering University of California, 1974.
- 3) 非弾性構造解析法の実用化に関する研究(Ⅰ), 非弾性構造解析法実用化研究分科会, 機械学会, 1977.
- 4) Corum, J.M. and Richardson, M. "Elevated-Temperature Test of Simply-Supported Beams and Circular Plates Subjected to Time-Varying Loadings", Pressure Vessels and Piping: Verification and Qualification of Inelastic Analysis Computer Programs, ASME, 1975, pp. 13-25.
- 5) Corum, J.M. "Appendix. Material Property Data for Elastic-Plastic-Creep Analysis of Benchmark Problems", Pressure Vessels and Piping: Verification and Qualification of Inelastic Analysis Computer Programs, ASME, 1975, pp. 99-109.
- 6) Clinard, J.A., Corum, J.M. and Satory, W.K. "Comparison of Typical Inelastic Analysis Predictions with Benchmark Problem Experimental Results", Pressure Vessels and Piping: Verification and Qualification of Inelastic Analysis Computer Programs, ASME, 1975, pp. 79-98.
- 7) Messcal, J.F., Journal of Applied Mechanics, vol. 32, pp. 936~938, 1965.
- 8) 非弾性解析の設計への適用方法に関する研究(Ⅰ), 非弾性解析の設計適用方法研究分科会, 機械学会, 1980.
- 9) Gran, C.S. and Yang, T.Y., "NASTRAN and SAP IV Applications on the Seismic Response of Column-Supported Cooling Towers", Computers & Structures, Vol8, No.6, 1978.
- 10) Crede, C.E., Shock and Vibration Concepts in Engineering Design, Prentice Hall Inc.
- 11) Desalvo, G.J. and Swanson J.A., ANSYS Engineer Analysis System Example Manual, Swanson Analysis Systems Inc.