

# FBR大型炉の設計主要目に関する研究

湾曲拘束に起因する被覆管応力の解析評価手法の検討

1989 年 5 月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## FBR大型炉の設計主要目に関する研究

## 湾曲拘束に起因する被覆管応力の解析評価手法の検討

菰田成一\* 渡辺力\*\*

## 要 旨

FBRの燃料被覆管の温度は周方向に関して有意に変化する。このため照射初期には周方向の熱膨張歪差が、また照射末期には周方向のスエリング歪差が現れる。これらの歪差に起因し、被覆管に曲げ応力が働く。また、燃料要素束とラッパ管の径方向膨張率の違いのため、燃料要素束とラッパ管の寸法干渉が生じることもある。この寸法干渉に起因しても、被覆管に曲げ応力が生じる。これらの曲げ応力をまとめて、湾曲拘束に起因する応力と呼ぶ。

本研究は、FINAS (Finite Element Nonlinear Structural Analysis System)を用いた、上記湾曲拘束に起因する応力の評価手法を検討したものである。周方向温度差に起因する応力と、寸法干渉に起因する応力を別個に評価するための手法と、湾曲拘束による応力としてまとめて評価する手法を示した。要素としては、PIPE3またはELBOW6Rを使用するのが適切であることを確認した。また、拘束条件や温度分布の経日変化を考慮した評価が可能であることを確認した。

61年度レファレンス炉心における湾曲拘束に起因する応力は、照射初期で $10\text{kgf/mm}^2$ 程度であるが、照射中期ではクリープのため半減すること、また照射末期ではスエリングのため増大するが、初期での応力を大きく上回ることはないとの結果を得た。

---

\* 大洗工学センター、技術開発部、プラント工学室

\*\* 株式会社 CSK

Study on the Main Design Parameters  
of Large Scale FBR Core Characteristics  
Methods of Analysis and Evaluation of Fuel Cladding Stress due to Restriction of Bending

Seiichi Komoda\* and Chikara Watanabe\*

Abstract

The circumferential temperature distribution of the FBR fuel cladding displays a considerable variation. This temperature distribution gives rise to the circumferential variations of thermal strain at the beginning of life (BOL) and swelling strain at the end of life (EOL). These circumferential variations of the strains give rise to the bending stress of the cladding. The dimensional interference between the fuel pin bundle and the wrapper tube often occurs owing to the discrepancy of the radial expansion rates between the bundle and the tube. This interference gives rise to the additional bending stress of the cladding. These bending stresses are called the stress due to the restriction of bending in the lump.

In this work, the methods of analysis and evaluation of the above-mentioned cladding stress are studied using Finite Element Nonlinear Structural Analysis System(FINAS). The methods are discussed in this report not only to evaluate the stress due to the circumferential temperature variation and the stress due to the dimensional interference respectively but also to evaluate these stresses together as the stress due to the restriction of bending in the lump. It is found that the element "PIPE3" or "ELBOW6R" is applicable and that the time history of restriction condition and temperature distribution can be taken into account.

In this work, the cladding stress due to the restriction of bending is roughly evaluated for the reference core designed in the year 1986. It is found that the magnitude of stress is about 10 kgf/mm<sup>2</sup> at BOL, decreases to the half at the middle of life owing to the irradiation creep and increases to an certain value less than about 10 kgf/mm<sup>2</sup> at EOL owing to the swelling.

---

\*Plant Engineering Office, Technology Development Division, O-arai Engineering Center  
\*\*CSK CO., LTD.

## 目 次

1. はじめに	1
2. 予備検討	7
2.1 解析条件	7
2.2 解析結果	12
2.3 結論	12
3. 照射初期における周方向温度差に起因する被覆管応力の評価	13
3.1 解析条件	13
3.2. 解析結果	20
3.3 結論	26
4. 照射末期における周方向温度差に起因する被覆管応力の評価	27
4.1 解析条件	27
4.2. 解析結果	30
4.3 結論	32
5. BDI発生に起因する被覆管応力の評価手法の検討	33
5.1 解析条件	34
5.2. 解析結果	39
5.3 結論	43
6. 周方向温度差とBDIに起因する被覆管応力の一括評価	44
6.1 解析条件	44
6.2. 解析結果および結論	46
7. 『常陽』特燃の湾曲拘束に起因する被覆管応力の評価	47
7.1 解析条件	47
7.2. 解析結果および結論	53
8. まとめと今後の課題	59
謝辞	61
付録	61

## 表 リ ス ト

第1.1表	被覆管周方向各部における肉厚中心温度の軸方向分布-----	4
第2.1.1表	解析ケース-----	9
第2.1.2表	同一軸方向高さにおいて、同一温度データを持つ積分点の対応表-----	9
第3.1.1表	要素PIPE3使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位:無)-----	16
第3.1.2表	要素ELBOW6R使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位:無)-----	16
第3.1.3表	要素PIPE3使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位:Y軸方向)-----	16
第3.1.4表	要素PIPE3使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位:X軸方向)-----	16
第3.2.1表	PIPE3使用ケース(拘束点での変位:無)での、 最大湾曲変位量、軸方向応力(肉厚中心)最大値、平均拘束荷重の評価結果-----	24
第3.2.2表	ELBOW6R使用ケース(拘束点での変位:無)での、 最大湾曲変位量、軸方向応力(肉厚中心)最大値、平均拘束荷重の評価結果-----	24
第3.2.3表	PIPE3使用ケース(拘束点での変位:無)での、 最大湾曲変位量、軸方向応力(肉厚中心)最大値、平均拘束荷重の評価結果-----	24
第4.2.1表	最大湾曲変位量、軸方向応力最大値、平均拘束荷重の評価結果-----	31
第5.1.1表	ワイヤ巻付けピッチ等の影響検討ケースにおける拘束条件-----	36
第5.1.2表	曲がり速度の影響検討ケースにおける拘束条件-----	36
第5.2.1表	炉中心高さでの軸方向応力最大値等の評価結果 (ワイヤ巻付けピッチ等の影響を検討したケースの照射末期)-----	40
第5.2.2表	炉中心高さでの軸方向応力最大値等の評価結果 (曲がり速度の影響を検討したケースの照射末期)-----	40
第6.1.1表	解析ケース毎温度条件-----	45
第6.1.2表	解析ケース毎拘束条件-----	45
第6.2.1表	応力重ね合わせ成立性-----	46
第6.2.2表	荷重重ね合わせ成立性-----	46
第7.1.1表	『常陽』特燃解析ケース毎拘束条件-----	49
第7.2.1表	最大発熱部、最高温度部の肉厚中心での被覆管軸方向応力解析結果-----	55
第7.2.2表	肉厚中心での被覆管軸方向応力最大値解析結果-----	55

## 目 次

第1.1図	被覆管周方向各部における肉厚中心温度の軸方向分布-----	5
第1.2図	最外層燃料要素#232の被覆管が面するサブチャンネル および集合体内温度分布解析条件-----	6
第2.1.1図	3節点中空円形断面配管要素PIPE3の特徴-----	10
第2.1.2図	6節点配管要素ELBOW6Rの特徴-----	10
第2.1.3図	PIPE3およびELBOW6R使用ケースにおける積分点温度の比較-----	11
第3.1.1図	PIPE3使用ケースにおける要素番号、節点番号、 および積分点の周方向位置-----	17
第3.1.2図	ELBOW6R使用ケースにおける要素番号、節点番号、 および節点、積分点の周方向位置-----	17
第3.1.3図	PIPE3とELBOW6R使用ケースにおける周方向温度分布-----	18
第3.1.4図	ELBOW6Rにおける積分点と節点の周方向温度分布の比較-----	19
第3.2.1図	拘束荷重解析結果 (PIPE3使用のケース)-----	25
第3.2.2図	拘束荷重解析結果 (ELBOW6R使用のケース)-----	25
第4.1.1図	要素番号、節点番号、および積分点の周方向位置-----	29
第4.1.2図	高速中性子束軸方向分布-----	29
第4.2.1図	拘束荷重解析結果-----	31
第5.1.1図	ワイヤ巻付けピッチの影響等を検討するケースにおける 強制曲がり量履歴条件-----	37
第5.1.2図	曲がり速度の影響を検討するケースにおける 強制曲がり量履歴条件-----	38
第5.2.1図	照射末期における応力と荷重に対するピッチの影響-----	41
第5.2.2図	照射末期における拘束荷重に対する曲がり量分布の影響-----	41
第5.2.3図	曲がり量を軸方向一様条件とした時と、分布を考慮した時の 応力経日変化の比較-----	42
第7.1.1図	『常陽』特燃被覆管周方向温度差の経日変化-----	50

第7.1.2図	コーナピン#20を囲むサブチャンネルの番号、周方向位置一貫番号、 温度対称軸、および強制曲がり方向-----	50
第7.1.3図	1050日における被覆管肉厚中心温度の軸方向分布-----	51
第7.1.4図	照射末期(1260日)におけるBDI量の軸方向分布-----	51
第7.1.5図	BDI量最大値(軸方向ピーク値)の経日変化-----	52
第7.1.6図	高速中性子束軸方向分布-----	52
第7.2.1図	スエリング差とBDIに起因する応力の重畳挙動を 考察するためのイラスト-----	56
第7.2.2図	照射末期における拘束荷重解析結果-----	57
第7.2.3図	拘束荷重経日変化解析結果-----	58
***『第3章 照射初期における周方向温度差に起因する被覆管応力の評価』関連プロット図***		
付図3-P0-1	湾曲形状解析結果(ケース:P0)-----	62
付図3-P0-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P0)-----	63
付図3-P0-3	軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:P0、軸方向位置:1162.5 mm)---	64
付図3-P4-1	湾曲形状解析結果(ケース:P4)-----	65
付図3-P4-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4)-----	66
付図3-P4-3	軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:P4、軸方向位置:1162.5 mm)---	67
付図3-P7-1	湾曲形状解析結果(ケース:P7)-----	68
付図3-P7-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P7)-----	69
付図3-P13-1	湾曲形状解析結果(ケース:P13)-----	70
付図3-P13-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P13)-----	71
付図3-P3A-1	湾曲形状解析結果(ケース:P3A)-----	72
付図3-P3A-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P3A)-----	73
付図3-P4A-1	湾曲形状解析結果(解析ケース:P4A)-----	74
付図3-P4A-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A)-----	75
付図3-P5A-1	湾曲形状解析結果(ケース:P5A)-----	76
付図3-P5A-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P5A)-----	77
付図3-P6A-1	湾曲形状解析結果(ケース:P6A)-----	78



付図3-P6A-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P6A)-----	79
付図3-E0-1 湾曲形状解析結果(ケース:E0)-----	80
付図3-E0-2a 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E0)-----	81
付図3-E0-2b 周方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E0)-----	82
付図3-E0-3a 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E0、軸方向位置:1162.5 mm)--	83
付図3-E0-3b 周方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E0、軸方向位置:1162.5 mm)--	84
付図3-E4-1 湾曲形状解析結果(ケース:E4)-----	85
付図3-E4-2a 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E4)-----	86
付図3-E4-2b 周方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E4)-----	87
付図3-E4-3a 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E4、軸方向位置:1162.5 mm)--	88
付図3-E4-3b 周方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E4、軸方向位置:1162.5 mm)--	89
付図3-E13-1 湾曲形状解析結果(ケース:E13)-----	90
付図3-E13-2a 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E13)-----	91
付図3-E13-2b 周方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E13)-----	92
付図3-P4A1-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A1)-----	93
付図3-P4A1-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A1)-----	94
付図3-P4A2-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A2)-----	95
付図3-P4A2-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A2)-----	96
付図3-P4A3-1 湾曲形状解析結果(解析ケース:P4A3)-----	97
付図3-P4A3-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A3)-----	98
付図3-P4A4-1 湾曲形状解析結果(解析ケース:P4A4)-----	99
付図3-P4A4-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A4)-----	100
付図3-P4A5-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A5)-----	101
付図3-P4A5-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A5)-----	102
付図3-P4A6-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A6)-----	103
付図3-P4A6-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A6)-----	104
付図3-P4A7-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A7)-----	105
付図3-P4A7-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A7)-----	106
付図3-P4A7-3 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:P4A7、軸方向位置:1162.5 mm)--	107

付図3-P4A8-1	湾曲形状解析結果(ケース:P4A8)-----	108
付図3-P4A8-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A8)-----	109
付図3-P4A9-1	湾曲形状解析結果(ケース:P4A9)-----	110
付図3-P4A9-2	軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A9)-----	111
付図3-E0T-1	湾曲形状解析結果(ケース:E0T)-----	112
付図3-E0T-2	軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E0T)-----	113
付図3-E4T-1	湾曲形状解析結果(ケース:E4T)-----	114
付図3-E4T-2	軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E4T)-----	115
***『第4章 照射末期における周方向温度差に起因する被覆管応力の評価』関連プロット図***		
付図4-1.1	照射初期における湾曲形状解析結果(標準ケース)-----	116
付図4-1.2	照射初期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(標準ケース)-----	117
付図4-1.3	照射初期における軸方向応力の周方向分布解析結果(標準ケース)-----	118
付図4-2.1	照射中期における湾曲形状解析結果(標準ケース)-----	119
付図4-2.2	照射中期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(標準ケース)-----	120
付図4-3.1	照射末期における湾曲形状解析結果(標準ケース)-----	121
付図4-3.2	照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(標準ケース)-----	122
付図4-3.3	照射末期における軸方向応力の周方向分布解析結果(標準ケース)-----	123
付図4-4.1	軸方向応力の経時変化解析結果(標準ケース)-----	124
付図4-4.2	スエリング歪の経時変化解析結果(標準ケース)-----	125
付図4-4.3	軸方向クリープ歪の経時変化解析結果(標準ケース)-----	126
付図4-5.1	照射末期における湾曲形状解析結果(比較ケース)-----	127
付図4-5.2	照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(比較ケース)-----	128
付図4-5.3	照射末期における軸方向応力の周方向分布解析結果(比較ケース)-----	129
付図4-6.1	軸方向応力の経時変化解析結果(比較ケース)-----	130
付図4-6.2	スエリング歪の経時変化解析結果(比較ケース)-----	131
付図4-6.3	軸方向クリープ歪の経時変化解析結果(比較ケース)-----	132

\*\*\*『第5章 BDIに起因する被覆管応力評価手法の検討』関連プロット図\*\*\*

付図5-1.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:150mm,曲がり量:一様)--- 133

付図5-1.2a 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果  
(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様) (要素内中央高さ層の積分点における応力)---- 134

付図5-1.2b 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果  
(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様) (要素内最上段層の積分点における応力)---- 135

付図5-1.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布解析結果  
(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様)----- 136

付図5-1.4 軸方向応力の経時変化解析結果(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様)---- 137

付図5-1.5 軸方向クリープ歪の経時変化解析結果(巻付けピッチ:150mm,曲がり量:一様)--- 138

付図5-2.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:250mm,曲がり量:一様)--- 139

付図5-2.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果  
(巻付けピッチ:250mm、曲がり量:一様) (要素内中央高さ層の積分点における応力)-- 140

付図5-3.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:350mm,曲がり量:一様)-- 141

付図5-3.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果  
(巻付けピッチ:350mm、曲がり量:一様) (要素内中央高さ層の積分点における応力)--- 142

付図5-4.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:150mm,曲がり量:分布有)-- 143

付図5-4.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果  
(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:分布有) (要素内中央高さ層の積分点における応力)-- 144

付図5-5.1 照射末期における湾曲形状解析結果(曲がり速度:0.00353mm/日)----- 145

付図5-5.2 照射末期軸方向応力の軸方向分布解析結果(曲がり速度:0.00353mm/日)----- 146

付図5-6.1 照射末期軸方向応力の軸方向分布解析結果(曲がり速度:0.00462mm/日)----- 147

付図5-7.1 照射末期軸方向応力の軸方向分布解析結果(曲がり速度:0.00667mm/日)----- 148

\*\*\*『第6章 周方向温度差とBDIに起因する被覆管応力の一括評価』関連プロット図\*\*\*

付図6-1.1 照射末期における湾曲形状 (応力原因:周方向温度差)----- 149

付図6-1.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布 (応力原因:周方向温度差)----- 150

付図6-1.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布  
(軸方向位置:747.5mm) (応力原因:周方向温度差)-----151

付図6-1.4	照射末期における軸方向応力の周方向分布 (軸方向位置:822.5mm) (応力原因:周方向温度差)-----	152
付図6-2.1	照射末期における湾曲形状 (応力原因:BDI)-----	153
付図6-2.2	照射末期における軸方向応力の軸方向分布 (応力原因:BDI)-----	154
付図6-2.3	照射末期における軸方向応力の周方向分布 (軸方向位置:747.5mm) (応力原因:BDI)-----	155
付図6-2.4	照射末期における軸方向応力の周方向分布 (軸方向位置:822.5mm) (応力原因:BDI)-----	156
付図6-3.1	照射末期における湾曲形状 (応力原因:周方向温度差とBDI)-----	157
付図6-3.2	照射末期軸方向応力の軸方向分布 (応力原因:周方向温度差とBDI)-----	158
付図6-3.3	照射末期における軸方向応力の周方向分布 (軸方向位置:747.5mm) (応力原因:周方向温度差とBDI)-----	159
付図6-3.4	照射末期における軸方向応力の周方向分布 (軸方向位置:822.5mm) (応力原因:周方向温度差とBDI)-----	160
***『第7章 「常陽」特燃の湾曲拘束に起因する被覆管応力の評価』関連プロット図***		
付図7-1.1	照射初期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布-----	161
付図7-1.2	照射初期における軸方向応力(最大発熱部)の周方向分布-----	162
付図7-1.3	照射初期における軸方向応力(最高温度部)の周方向分布-----	163
付図7-2.1	照射中期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布-----	164
付図7-3.1	照射末期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布 (ケース1)-----	165
付図7-3.2	照射末期における軸方向応力(最大発熱部)の周方向分布 (ケース1)-----	166
付図7-3.3	照射末期における軸方向応力(最高温度部)の周方向分布 (ケース1)-----	167
付図7-4.1	照射末期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布 (ケース2)-----	168
付図7-4.2	照射末期における軸方向応力(最大発熱部)の周方向分布 (ケース2)-----	169
付図7-4.3	照射末期における軸方向応力(最高温度部)の周方向分布 (ケース2)-----	170
付図7-5.1	照射末期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布 (ケース3)-----	171
付図7-6.1	熱膨張ひずみの軸方向分布-----	172
付図7-6.2	スエリングひずみ(最大発熱部)の経時変化-----	173
付図7-6.3	スエリングひずみ(最高温度部)の経時変化-----	174

## 1. はじめに

軽水炉では、冷却材として局所沸騰状態の軽水が用いられ、燃料要素は水の気化熱によって除熱される。したがって、冷却材温度は集合体入口から出口まで一定であり、燃料被覆管に面する冷却材自体には、周方向温度差は生じない。しかし、熱中性子炉であるため、燃料ペレット内で有意な周方向出力変化があることで、被覆管には周方向温度差が発生する。周方向温度差が生じると、熱膨張ひずみの周方向に関する不均一性により、一般に熱湾曲モーメントが働き、燃料要素は熱湾曲しようとする。第3章に示すように、一般に熱湾曲が許容されるならば、許容されない場合と比べて発生応力は若干緩和される。ところが、軸方向数ヵ所の所定の高さにグリッドスペーサが配置され、スペーサスプリングのばね力にて、燃料要素はグリッドスペーサのセル中心に保持されるという燃料集合体構造なので、実際にはほとんど熱湾曲しない。このような訳で、軽水炉では、燃料要素の熱湾曲が全く許容されないと見なし、被覆管の周方向温度差に起因する軸方向応力を評価している。尚、温度差が高々20°C程度であること、および被覆管材であるジルコニウム合金の熱膨張率と縦弾性係数が比較的小さいことで、この軸方向応力は1 kgf/mm<sup>2</sup>未満と小さい。

一方、FBRの場合には、燃料ペレット内での周方向出力変化は無視できるが、冷却材ナトリウムが沸点以下で使用されること、ラッパ管内壁に沿って冷却材流量が過剰になる傾向(周辺流れ効果)のあること、集合体内での径方向出力分布が存在すること等により、冷却材自体および被覆管に周方向温度差が生じる。その結果、軽水炉におけると同様、燃料要素には熱湾曲モーメントが生じる。FBRの場合、高速中性子束が高いので、照射クリープと呼ばれる現象により、この熱湾曲モーメントは時間の経過とともに小さくなる。しかし、燃焼が十分進んだ時点ではスエリングが発生し、このスエリング量が温度依存性を示すため、スエリング湾曲モーメントも生じる可能性がある。このような訳で、被覆管の周方向温度差に起因する応力を求めるためには、軽水炉におけるよりも高度な評価技術が必要となる。尚、FBRではワイヤスペーサによって燃料要素間の間隙が確保されることや、燃料要素下端は固定でも上端はフリーであることから、軽水炉と異なり、燃料要素の拘束状態は初めから明らかなわけではない。

「もんじゅ」設計では、燃料要素間の力学的バランスを厳密に解くことにより、燃料要素同志のワイヤスペーサを介しての接触挙動を解析評価し、この接触挙動解析結果に基づき、周方向温度差の大きい最外層燃料要素の拘束条件を設定し、有限要素法に基づく比較的簡易な応

力評価コードを用いて、湾曲拘束に起因する応力を評価している。ここで、湾曲拘束に起因する応力とは、周方向温度差に起因する応力(すなわち、上記の熱湾曲およびスエリング湾曲が拘束されることで発生する応力)に、燃料要素束とラッパ管の機械的相互作用(BDI)に起因する応力も含めた応力である。また、BDIに起因する応力とは、第5章で述べるように、BDI発生に伴って被覆管が強制的に曲げられることによって生じる応力である。尚、簡易応力評価コードは、拘束状態および温度分布の経時変化を追うことができず、また燃料要素の3次元的な湾曲も取り扱えないコードなので、周方向温度差を過度に保守的な条件とすることで、応力評価の保守性を確保するということが行われている。

さて、動力炉・核燃料開発事業団はセンチュリ・リサーチ・センター(株)の協力を得て、幅広い解析機能を備えた高速炉非弾性構造解析システムFINAS (FBR Inelastic Structural Analysis System)を開発している。FINASは、上記簡易コードでは考慮できない拘束状態および温度分布の経時変化、および3次元的な湾曲を取り扱うことができるので、FINASを用いた方がより正確な評価を行うことができる。

本研究の主目的は、湾曲拘束に起因する応力を評価するための、FINASを用いた手法を開発することである。第2章での予備検討に引続き、第3章にて、3次元的な湾曲を模擬する拘束条件を含めた種々の拘束条件を仮定して、照射初期の周方向温度差に起因する応力評価を実施することにより、拘束条件の影響が小さいことを示した。第4章では、周方向温度差に起因する応力の経日変化挙動を明らかにした。第5章では、BDIに起因する応力の評価手法を示した。第6章では、周方向温度差に起因する応力と、BDIに起因する応力を一括して評価することが可能であることを示した。第7章では、本評価手法の、『常陽』特燃37本バンドルの湾曲拘束に起因する被覆管応力の評価への適用例を示した。

一般に、被覆管の周方向温度差は、内層燃料要素においては小さく、最外層の燃料要素において大きい。それ故、周方向温度差に起因する被覆管応力は最外層燃料要素において最大となる。また、燃料要素間においては、1/2ワイヤピッチ毎にワイヤが来るのに対し、ピンとラッパ管間においては、ワイヤピッチ毎でしかワイヤが来ない。それ故、BDIが発生したとき、最外層燃料要素の強制曲がり最大となり、BDIに起因する被覆管応力も最外層燃料要素において最大となる。したがって、湾曲拘束に起因する応力の評価対象燃料要素は最外層燃料要素としておけば良い。

61年度レファレンス炉心の271本ピンバンドル燃料集合体について、熱流動解析コード

PYTHONを用い、流路変形を考えない条件で求めた最外層燃料要素(#232)の被覆管各部(サブチャンネル#410、#411、#412、#500、#501に面する各セクタ)の肉厚中心温度を第1.1表および第1.1図に示した。第1.2図に、ピン(#232)、およびそのピンを取り囲むサブチャンネル(#410、#411、#412、#500、#501)の位置を示した。これらの番号は、PYTHONで使用されている番号である。温度解析条件としての寸法仕様、発熱・除熱条件も、第1.2図に示した。バンドル長さが180cmと短いのは、発熱の無視できる下部ガスプレナム部から下の部分を解析対象範囲外とし、バンドル長さに含めていないためである。

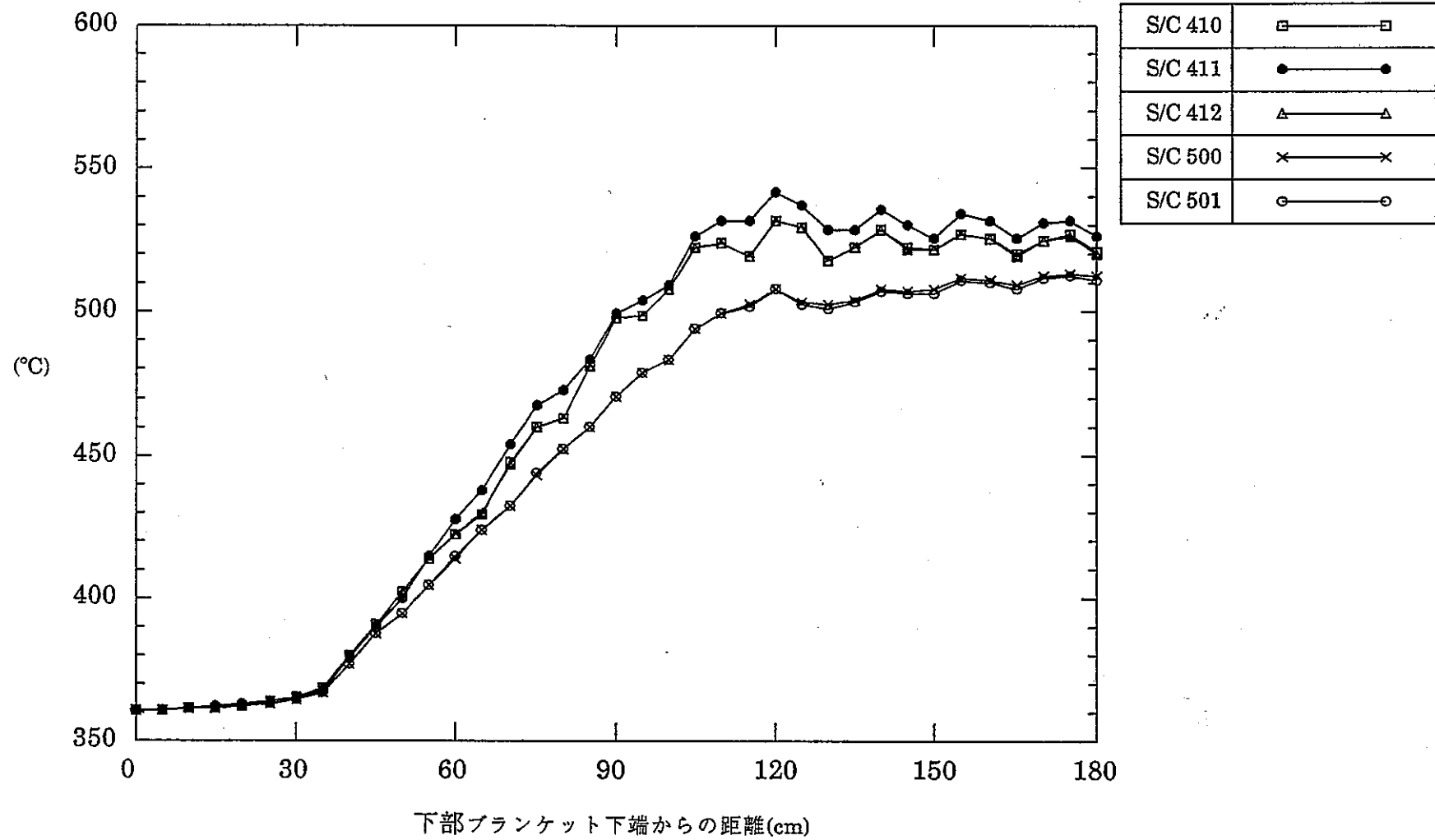
一般に、燃料集合体内の温度分布は、ピンバンドルの熱およびスエリング湾曲に伴う流路変形に起因し変化する。さらにまた、ワイヤコンタクト効果によって、被覆管の周方向温度分布は変化する。しかし、次章以降第6章までに述べる応力解析における被覆管の温度分布条件は、これらの変化を考慮しないで、第1.1表および第1.1図に示した肉厚中心温度データを基に設定している。

第1.1表 被覆管周方向各部における肉厚中心温度の軸方向分布 (単位: °C)

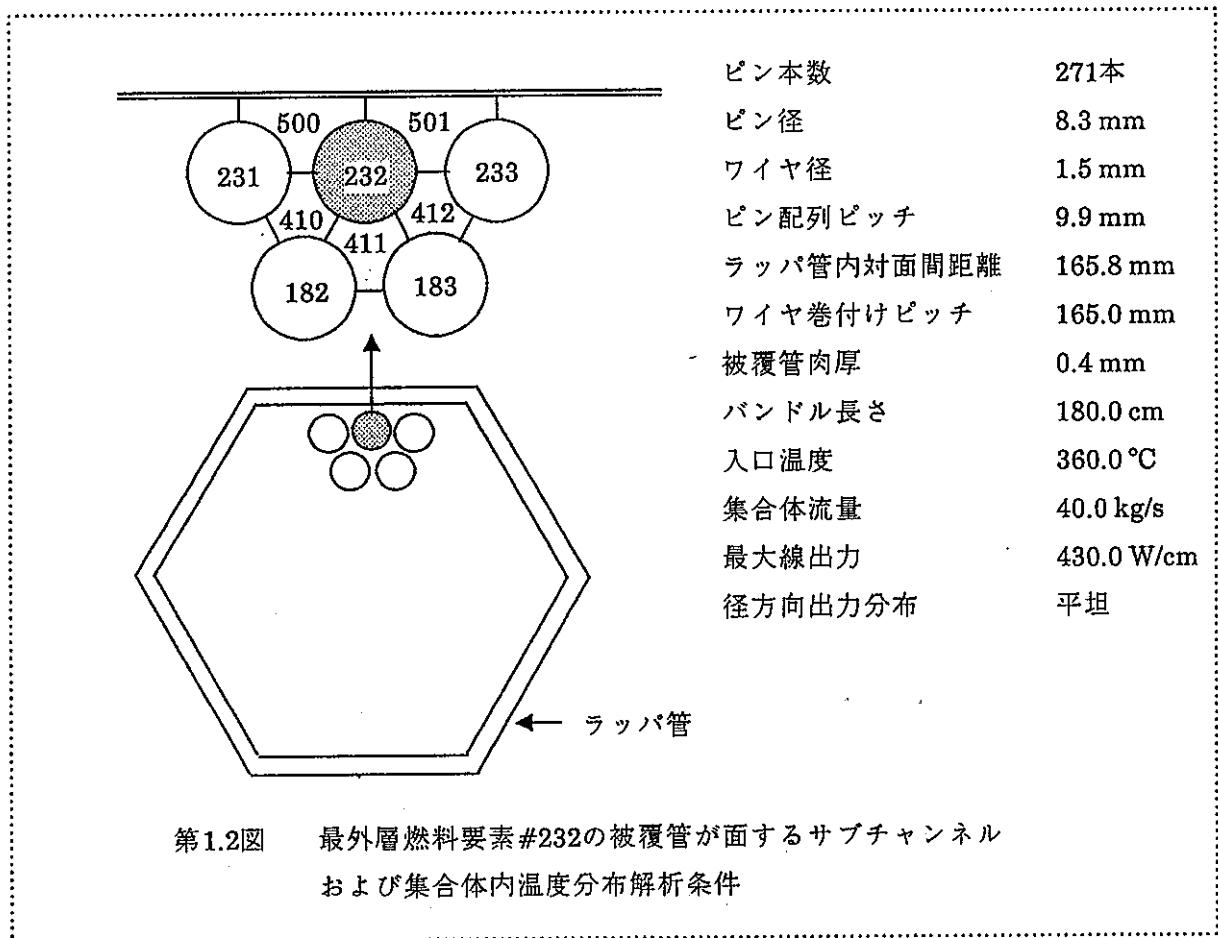
軸方向 位置(cm)	S/C 410	S/C 411	S/C 412	S/C 500	S/C 501
0.0	360.62	360.62	360.62	360.63	360.63
5.0	360.95	361.02	360.95	360.88	360.88
10.0	361.31	361.44	361.31	361.22	361.22
15.0	361.77	361.98	361.77	361.72	361.72
20.0	362.62	362.82	362.62	362.26	362.26
25.0	363.45	363.59	363.47	362.94	362.99
30.0	364.98	365.12	365.02	364.61	364.64
35.0	368.20	367.78	368.21	366.77	366.77
40.0	380.16	378.97	380.13	376.91	376.93
45.0	390.73	389.69	390.76	387.52	387.62
50.0	402.22	400.08	402.19	394.71	394.78
55.0	413.76	414.30	413.60	404.13	404.26
60.0	422.01	427.27	422.01	413.71	414.22
65.0	429.37	437.19	429.40	423.39	423.53
70.0	447.06	453.15	446.83	432.18	432.19
75.0	460.00	466.95	459.86	443.17	443.85
80.0	462.75	472.34	462.83	452.02	452.31
85.0	481.20	483.07	481.10	459.78	459.82
90.0	498.10	499.45	498.01	470.31	470.77
95.0	498.90	504.39	498.99	478.55	478.90
100.0	507.99	509.30	508.06	483.62	483.49
105.0	522.69	526.08	522.70	494.23	494.28
110.0	524.03	531.54	524.01	499.59	499.78
115.0	519.78	531.37	519.73	502.63	501.97
120.0	531.92	541.57	532.00	508.23	507.75
125.0	529.72	536.84	529.69	503.02	502.83
130.0	518.18	528.89	517.87	502.23	501.21
135.0	522.23	528.54	522.29	504.15	503.17
140.0	528.75	535.79	528.83	508.03	507.32
145.0	522.19	530.02	521.75	507.46	506.12
150.0	521.93	525.98	521.64	507.93	506.47
155.0	527.41	534.28	527.43	511.90	510.91
160.0	525.97	531.61	525.57	511.36	510.16
165.0	520.41	525.32	519.83	509.71	508.28
170.0	524.68	530.68	524.65	512.89	511.85
175.0	526.93	531.47	526.66	513.21	512.21
180.0	520.87	526.32	520.18	512.36	511.08

注記) PYTHONによる解析結果である。





第1.1図 被覆管周方向各部における肉厚中心温度の軸方向分布(PYTHONによる解析結果)



## 2. 予備検討

FINASを用いて湾曲拘束に起因する被覆管応力評価を実施するに先立ち、使用要素、境界条件、メッシュ分割等の適正化に関する検討を行うため、照射初期における周方向温度差に起因する応力を予備的に評価した。

### 2.1 解析条件

#### (1) 使用要素

3節点中空円形断面配管要素PIPE3、または6節点配管要素ELBOW6Rを使用すれば、周方向温度差やBDIに起因する応力を評価できそうと判断されたので、これらの要素をそれぞれ用いた解析を実施し、解析結果を比較検討するものとした。これらの要素の特徴を以下に示す。

##### a) 3節点中空円形断面配管要素PIPE3

PIPE3の特徴を第2.1.1図に示した。本要素1個だけによって円筒が形作られるという点で都合であるが、軸方向応力膜成分(肉厚方向平均値)は評価できるものの、軸方向応力曲げ成分や周方向応力を評価できない点で不都合となる可能性がある。1要素当たり、軸方向5点、周方向24点、肉厚方向1点の計120点の積分点を有しており、これらの積分点に温度データを与えることによって、円筒の周方向温度分布を考慮することができる。

##### b) 6節点配管要素ELBOW6R

ELBOW6Rの特徴を第2.1.2図に示した。本要素を使用する場合には、複数個(任意の個数)の要素を周方向に繋ぎ合わせることで、円筒を形作ることになる。第2.1.2図では、周方向48分割としたケースを例として示した。1要素当たり、面内1点、肉厚方向9点の計9点の積分点を有しているので、応力の肉厚方向分布を知ることができる。また、軸方向応力だけではなく、周方向応力も評価できるという特徴がある。

#### (2) 境界条件

いずれの要素を使用のケースでも、下端部の軸方向変位のみ固定し、その他の自由度を許容するものとした。すなわち、被覆管の熱膨張や熱湾曲を拘束しないような境界条件とした。

#### (3) メッシュ分割条件

PIPE3を使用する場合は、周方向分割は不要なので、軸方向分割数が36分割と72分割(軸方向メッシュ幅が50mmと25mm)の2ケースについて比較解析するものとした。

一方、ELBOW6Rを使用する場合は、周方向分割数を決める必要があるので、軸方向分割

数を72分割(メッシュ幅を25mm)に固定し、周方向分割数が48分割と72分割の2ケースについて比較解析するものとした。

したがって、全解析ケースは第2.1.1表に示した4ケースである。

#### (4) 温度条件

PIPE3およびELBOW6R使用のいずれのケースにおいても、積分点毎に温度を与えたが、PYTHONによる温度解析結果(第1.1図または第1.1表)を軸方向に内挿して作成した。但し、S/C#500とS/C#501に面する被覆管セクタ温度、またS/C#410とS/C#412に面するセクタ温度は、それぞれほぼ等しいので、S/C#501およびS/C#412に面する被覆管セクタ温度として、それぞれS/C#500、S/C#410に面するセクタ温度を使用するものとした。すなわち、被覆管周方向温度分布を軸対称とした。

PIPE3使用のケース(周方向積分点数:24ケ)において設定した積分点温度周方向分布データを、第2.1.3図に白丸(O)で示した。PYTHONによる温度解析結果は周方向に関してステップ状の分布型であるが、積分点の間隔が15°であるという制限から、同図に示した分布で近似せざるを得ない。ELBOW6R使用のケース(周方向分割数が48、72の2ケース)では、積分点の間隔がより狭いので、よりステップ状に近い分布型とすることも可能であるが、PIPE3使用のケースとの比較を意義あるものとするため、第2.1.3図に示したようにPIPE3使用のケースと同様の温度分布とした。これら3ケースの各積分点のうち、同一温度データを持つ積分点の対応関係を、第2.1.2表にまとめた。

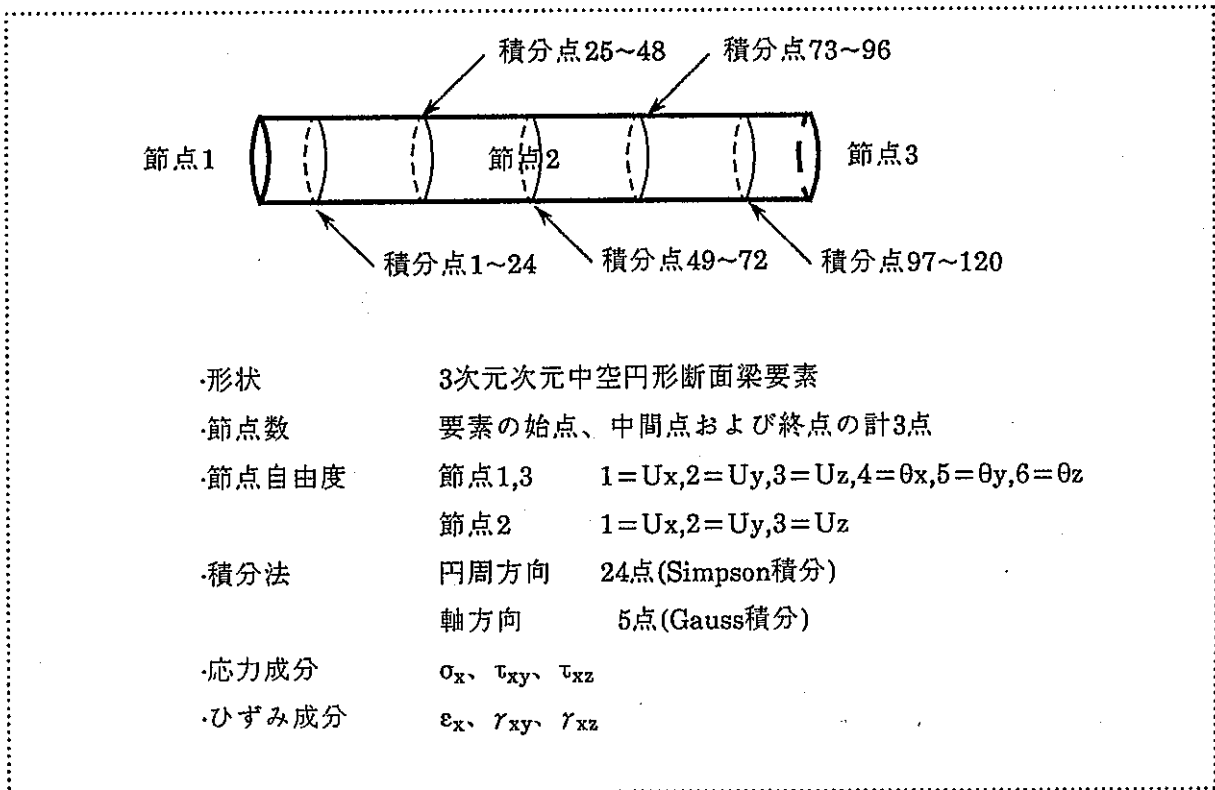
第2.1.1表 解析ケース

解析ケース名	使用要素	分割数		積分点数		
		周方向	軸方向	周方向	軸方向	肉厚
P3#36	PIPE3	—	36	24	180	1
P3#72	PIPE3	—	72	24	360	1
E48#72	ELBOW6R	48	72	48	72	9
E72#72	ELBOW6R	72	72	72	72	9

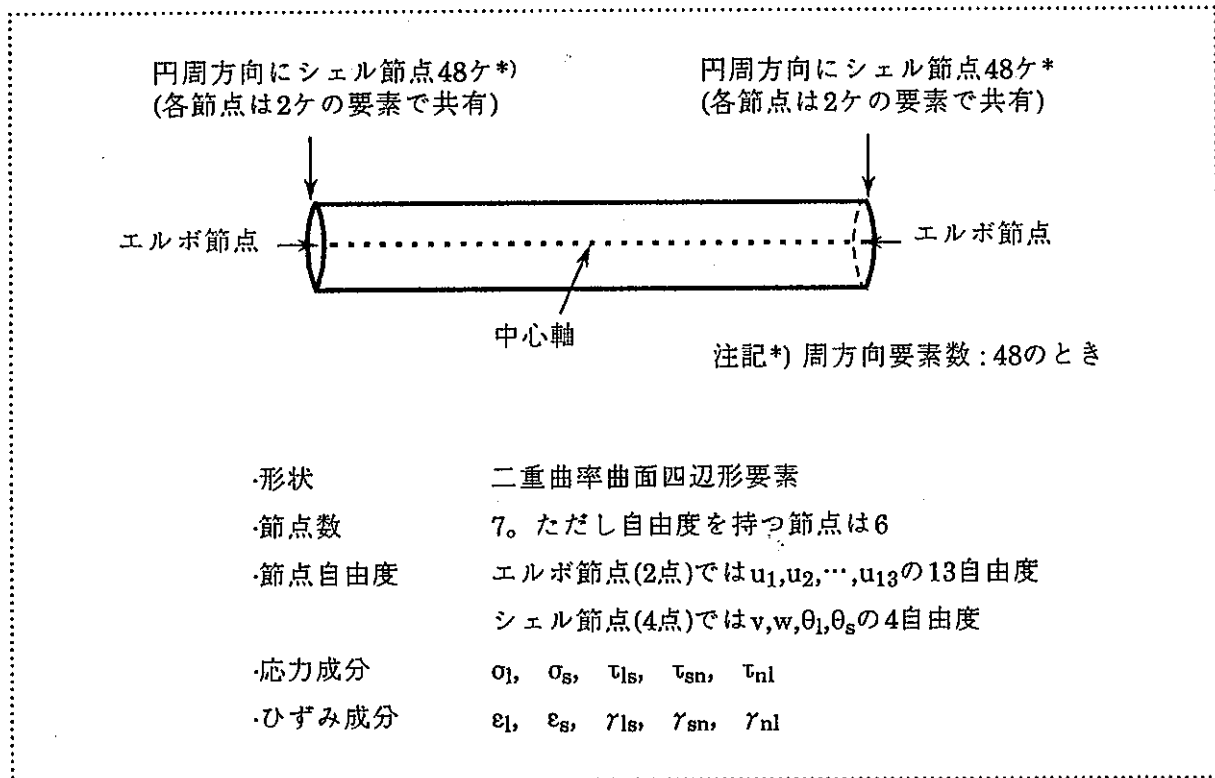
第2.1.2表 同一軸方向高さにおいて、同一温度データを持つ積分点の対応表

被覆管温度	PIPE3	ELBOW6R (48分割)	ELBOW6R (72分割)
T1	#1~#6	#1~#11	#1~#16
(周方向内挿値)	—	#12	#17, #18
T2	#7~#10	#13~#19	#19~#28
(周方向内挿値)	—	#20	#29, #30
T3	#11~#15	#21~#29	#31~#37
(周方向内挿値)	—	#30	#38, #39
T2	#16~#19	#31~#37	#46~#55
周方向(内挿値)	—	#38	#56, #57
T1	#20~#24	#39~#48	#58~#72

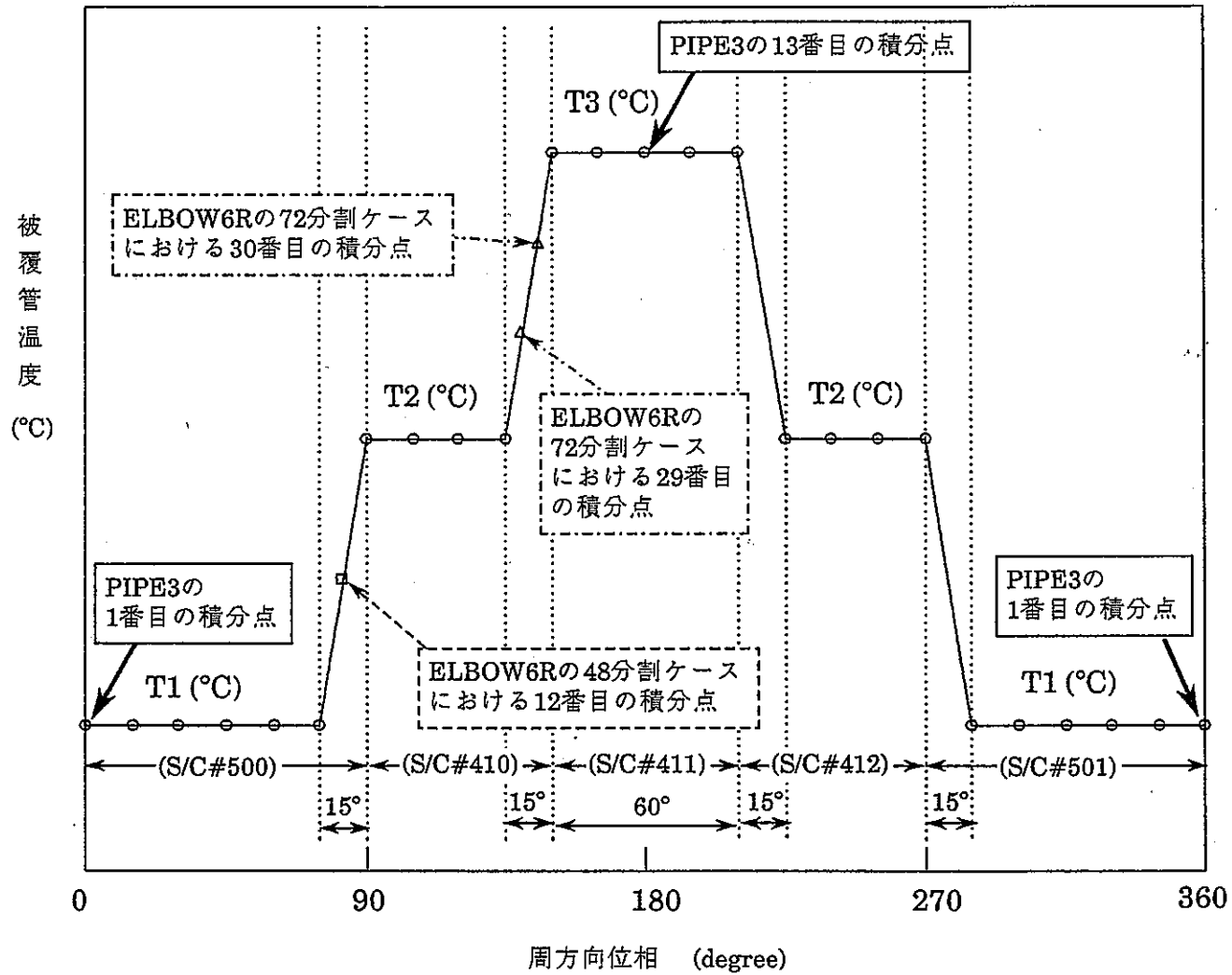
注記) 本表は、周方向内挿値(ELBOW6R使用のケースでは、特定の積分点に対しては、第2.1.3図に示したように直線内挿した値を、積分点温度として与えている。)については、対応表となっていない。また、積分点#は同一軸方向高さの積分点についての、周方向に関する一貫番号で表している。



第2.1.1図 3節点中空円形断面配管要素PIPE3の特徴



第2.1.2図 6節点配管要素ELBOW6Rの特徴



第2.1.3図 PIPE3およびELBOW6R使用ケースにおける積分点温度の比較

## 2.2 解析結果

要素PIPE3を使用した、軸方向分割数が36と72のケースの比較結果では、湾曲形状解析結果は若干変化するものの、応力値はほとんど変化しないことが分かった。一方、要素ELBOW6Rを使用した周方向分割数が48と72のケースの比較結果では、湾曲形状だけでなく、肉厚中心における応力も変化することが分かった。また、周方向分割数が72のケースにおける方が、応力値はPIPE3を使用したケースでの値に近いことが分かった。このように、周方向分割数を増加した方がPIPE3の結果に近づく理由は、次のように考えられる。PIPE3では同一要素内にある複数個(24個)の周方向積分点に温度データを与えるので、積分点間の周方向温度分布は滑らかに変化する。一方、ELBOW6Rでは同一要素内に周方向1点しか積分点がないことから、周方向温度は要素内で一定となり、積分点間の周方向温度分布は要素の変わり目でステップ状に変化する。したがって、周方向分割数を増加した方が変化中は小さくなり、温度分布は滑らかとなる。

ELBOW6Rを使用した解析の結果、軸方向応力は膜成分が主体的で、曲げ成分は小さいこと、また周方向応力の膜成分は無視できるものの、曲げ応力成分は軸方向応力の大きさに比べて無視できない大きさであることが分かった。

補足検討として、PYTHONで得られている軸方向温度分布はガタついているが、このガタつきに起因した応力が現れているかを明らかにするため、周方向温度差を無しとし、S/C#411の軸方向温度データを用いて、PIPE3とELBOW6Rを使用した解析を実施した。その結果、応力は $0.01\text{kg/mm}^2$ 以下と十分小さく、軸方向温度分布のガタつきに起因する応力は実質的に現れないことが分かった。

## 2.3 結論

- (1) 6節点配管要素ELBOW6Rは、周方向温度分布を設定する上で融通性があり、また3節点中空円形断面配管要素PIPE3では考慮できない周方向応力や曲げ成分も評価できる。
- (2) 軸方向応力の膜成分を評価するだけならば、PIPE3を使用することで十分であり、計算時間の観点で、PIPE3の方が圧倒的に有利である。
- (2) 軸方向メッシュ幅の湾曲形状解析結果に及ぼす影響は若干あるが、応力解析結果への影響はほとんど無いので、今後の解析では今回並みのメッシュ幅(25mmまたは50mm)で良い。



### 3. 照射初期における周方向温度差に起因する被覆管応力の評価

一般に、燃料要素間の間隙や燃料要素とラップ管内壁との間隙は高々0.1mm程度と小さいので、ラップ管が直立状態ならば、燃料要素の熱湾曲はほとんど許容されないと見なし得る。すなわち、隣接燃料要素またはラップ管と接触する軸方向高さ(拘束点高さ)において、燃料要素の水平方向変位を零と見なして良い。そこで、周方向温度差に起因する応力を評価するためには、拘束点での変位量を零と仮定し、燃料要素がほとんど湾曲することがないように、拘束点数および拘束点の軸方向位置を適当に設定してやりさえすれば十分であろうと推定される。本章の第一の目的は、この推定の正当性を確認することである。

現実にはラップ管は直立状態でないので、ラップ管の湾曲方向に依存すると考えられるが、燃料要素の熱湾曲がある程度許容されることで周方向温度差に起因する応力が緩和されるか、あるいはラップ管の湾曲に伴う応力が新たに加わるかという事態が予測される。本章第二の目的は、ラップ管の湾曲の影響を評価検討することである。

予備検討においては、サブチャンネル解析で得られたステップ状の急激な周方向温度変化をそのまま模擬しないで、滑らかに変化させた条件で評価した。本章第三の目的は、ステップ状の急激な温度変化と滑らかな温度変化とで、応力評価結果の違いが十分小さいことを確認し、被覆管の周方向熱伝導を考慮した温度詳細評価が不要であることを示すことである。

#### 3.1 解析条件

##### (1) 使用要素

拘束条件を変えた多数のケースについて解析する必要があるので、計算効率上有利なPIPE3を主体的に使用し、PIPE3による解析結果妥当性確認用、およびサブチャンネル境界での温度変化挙動の応力評価結果への影響検討用としてELBOW6Rを用いた解析を実施するものとした。

##### (2) 境界条件(拘束条件)

第3.1.1表および第3.1.2表に示した。解析ケース名の末尾に“T”を付したケースは、後述の比較検討用温度条件に、その他はレファレンス温度条件に対応する。解析ケースP0およびE0、E0Tは自由湾曲状態に対応し、その他の解析ケースは拘束のある状態に対応している。拘束点は上下端を含むように設定しており、拘束点間の間隔は等間隔のケースと不等間隔のケースを設定している。不等間隔のケースでは、先ず上下端を拘束した条件での最大変位点を見つけ、

次にこの最大変位点も拘束した条件での新たな最大変位点を見つけ、……という一連の解析を繰り返すことで拘束点位置を設定したものである。以上のケースはいずれも拘束点での変位量を零としたケースである。

第3.1.3表および第3.1.4表に示したように、解析ケースP4Aと同様の軸方向位置で拘束するが、拘束点での変位量を設定した解析もPIPE3を使用して実施した。第3.1.3表に示したケース(P4A1~P4A6)は拘束点での変位量を熱湾曲方向としたもので、一方、第3.1.4表に示したケース(P4A7~P4A9)は、熱湾曲方向に垂直な方向としたものである。

ケースP4A1、P4A2、およびP4A7はトータルクリアランスの存在に起因する拘束点での変位量不確かさの影響(燃料要素間ギャップ存在に起因する直立状態からのずれの影響)を調べることを意図したものである。ピン間のギャップ巾が0.1mmで、最長対角線上のピン数が19本であるので、対角線上のトータルクリアランスは約2.0mmある。したがって、拘束点での変位量は高々±1.0mmと考えて良いであろう。

ケースP4A3~P4A6、およびP4A8、P4A9は燃料集合体の熱、スエリング湾曲に伴う燃料要素の湾曲の影響を調べることを意図したものである。これらのケースにおける拘束点での変位量は、「もんじゅ」での集合体湾曲挙動評価結果等を参考として、大きめに設定した。

### (3) メッシュ分割条件

PIPE3を使用する場合は、周方向分割は不要である。ELBOW6Rを使用のケースでは、周方向に72分割とした。一方、軸方向に関しては、すべてのケースで72分割(メッシュ幅:25mm)とした。

第3.1.1図および第3.1.2図に、要素番号、節点番号、および節点、積分点の周方向位置を示した。PIPE3使用ケースでは、上から見て時計周り方向に積分点番号を取り、ELBOW6R使用ケースでは、反時計周り方向に節点および積分点番号を取った。また、PIPE3使用ケースの1番目節点とELBOW6R使用ケースの1番目積分点が、ラップ管内壁に面する低温サブチャンネル境界部に位置するようにした。

### (4) 温度条件

PIPE3使用のケースでは予備検討におけると全く同様に、積分点毎に温度データを与えた(周方向温度分布は、第3.1.3図の実線に一致する)。一方、ELBOW6R使用のケースでは、積分点毎ではなく、節点毎に温度データを与えたが、周方向分布に関して2種類(レファレンス温

度、比較検討用温度)の分布を設定した。レファレンス温度分布は、第3.1.3図の実線で示したように、サブチャンネル境界を跨ぐ位相 $30^\circ$ の間で徐々に温度差の付く分布である。一方、比較検討用温度分布は、第3.1.3図の破線で示したように、サブチャンネル境界を跨ぐ位相 $10^\circ$ の間でより急激に温度差の付く分布である。

ELBOW6R使用のケースでは、与えられた節点温度データから積分点温度データがコード内で作成される。第3.1.4図に示したように、PIPE3使用ケースの温度条件(第3.1.4図では、ELBOW6R使用ケースの節点温度分布に対応する。)と、ELBOW6R使用のケースにおけるレファレンス温度条件(積分点温度分布)は大差なく、同一温度条件と見なし得る。

第3.1.1表 要素PIPE3使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位:無)

解析ケース	Z方向 自由度 拘束節点	X,Y方向自由度の拘束点		X,Y方向自由度 拘束点の軸方向間隔 (mm)
		節点#	拘束点総数	
P0	#1	—	0	—
P4	#1	1, 241, 481, 721	4	600
P7	#1	1, 121, 241, ……………, 721	7	300
P13	#1	1, 61, 121, ……………, 721	13	150
P3A	#1	1, 411, 721	3	— (不等間隔)
P4A	#1	1, 191, 411, 721	4	— (不等間隔)
P5A	#1	1, 191, 411, 581, 721	5	— (不等間隔)
P6A	#1	1, 191, 411, 581, 671, 721	6	— (不等間隔)

第3.1.2表 要素ELBOW6R使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位:無)

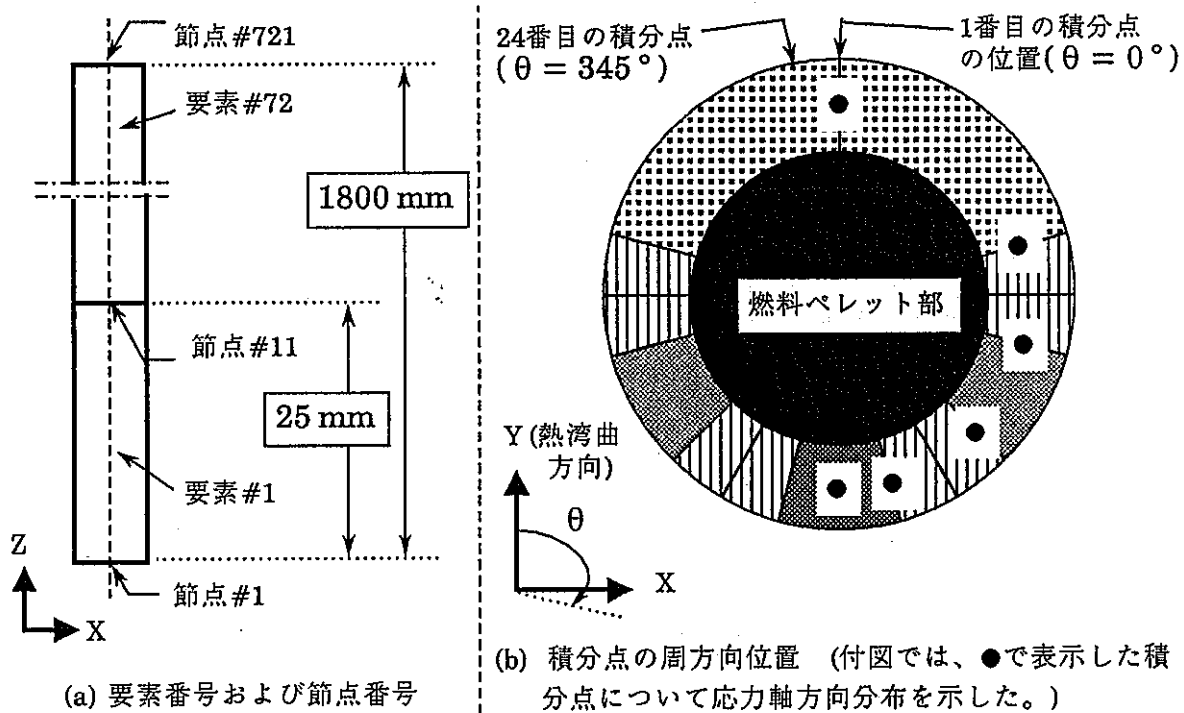
解析 ケース	温度 条件	全(13) 自由度 拘束 節点	Z方向 自由度 拘束 節点	V方向 (周方向) 自由度 だけの 拘束節点	V方向(周方向)、および W方向(径方向)の自由度拘束点		V, W方向 自由度 拘束点の 軸方向間隔 (mm)
					節点#	拘束点 総数	
E0	レファレンス	—	#199	—	—	0	—
E4	↓	—	#199	#102~172	101, 2501, 4901, 7301	4	600
E13	レファレンス	—	#199	#102~172	101, 701, 1301, …, 7301	13	150
E0T	比較検討用	—	#199	—	—	0	—
E4T	比較検討用	—	#199	#102~172	101, 2501, 4901, 7301	4	600

第3.1.3表 要素PIPE3使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位: Y軸方向)

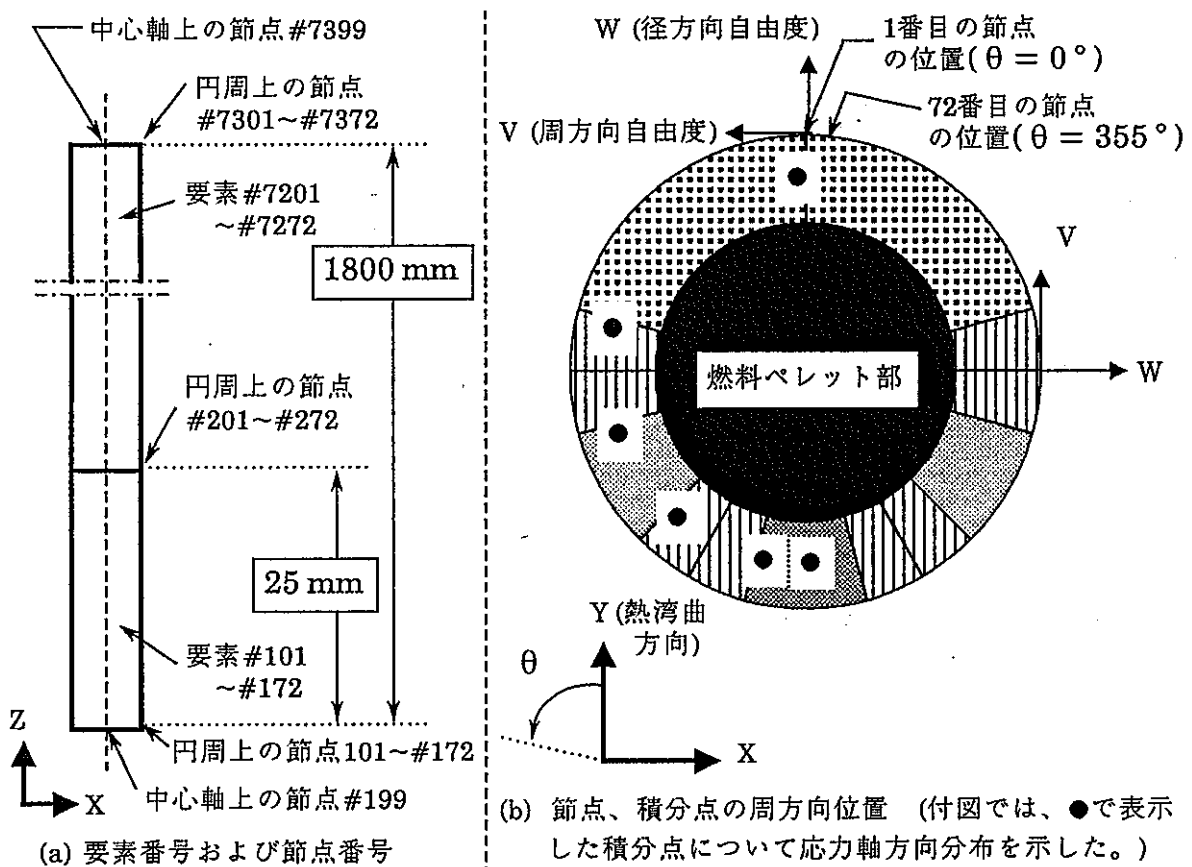
解析ケース	拘束点におけるY軸方向(熱湾曲方向)の変位量 (mm)			
	節点#1	節点#191	節点#411	節点#721
P4A1	0	1.0	-1.0	1.0
P4A2	0	-1.0	1.0	-1.0
P4A3	0	1.0	3.0	10.0
P4A4	0	-1.0	-3.0	-10.0
P4A5	0	2.0	0.0	-4.0
P4A6	0	-2.0	0.0	4.0

第3.1.4表 要素PIPE3使用ケースにおける拘束条件 (拘束点での変位: X軸方向)

解析ケース	拘束点におけるX軸方向(熱湾曲方向に垂直な方向)の変位量 (mm)			
	節点#1	節点#191	節点#411	節点#721
P4A7	0	1.0	-1.0	1.0
P4A8	0	1.0	3.0	10.0
P4A9	0	2.0	0.0	-4.0

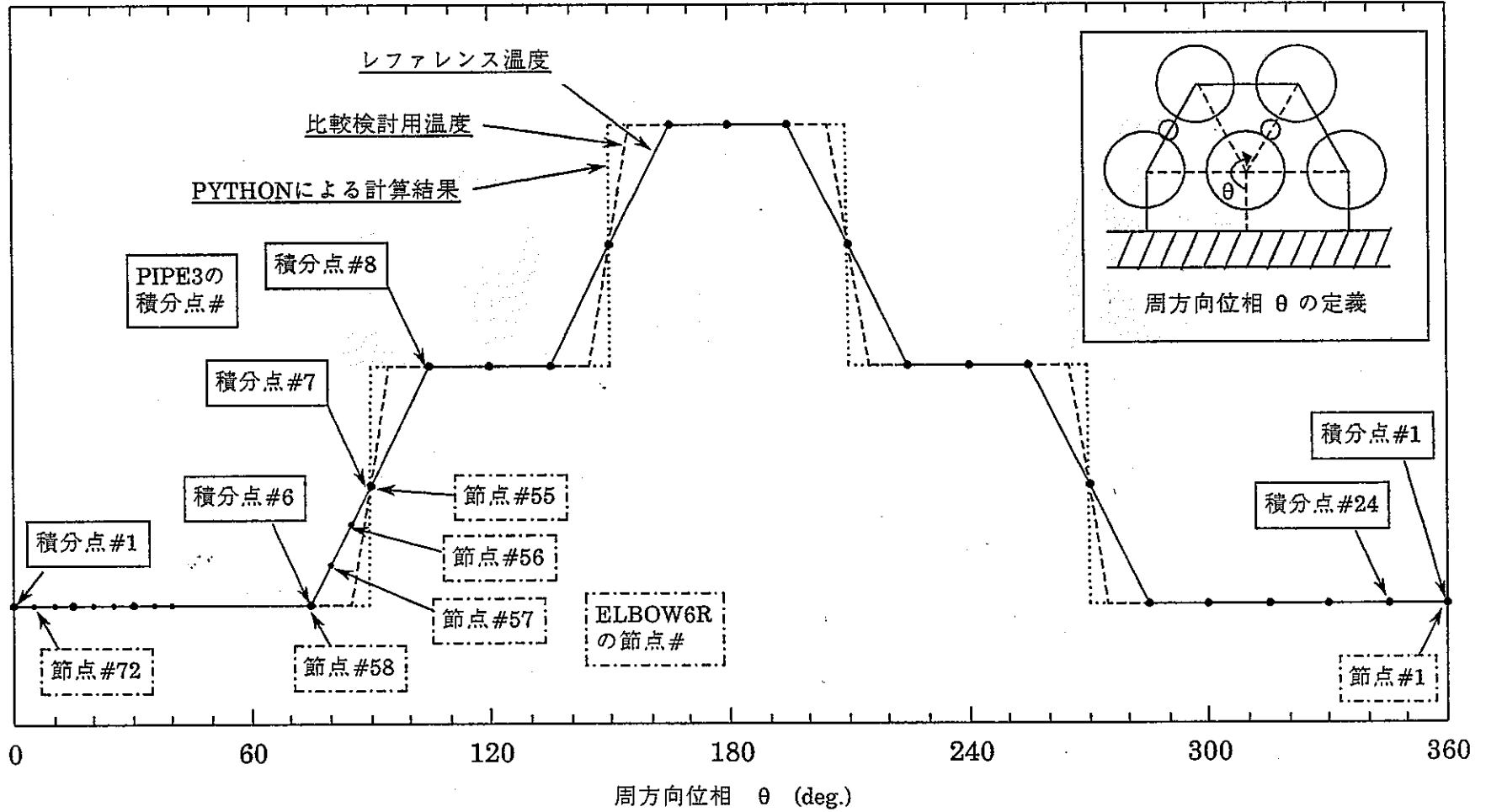


第3.1.1図 PIPE3使用ケースにおける要素番号、節点番号、および積分点の周方向位置

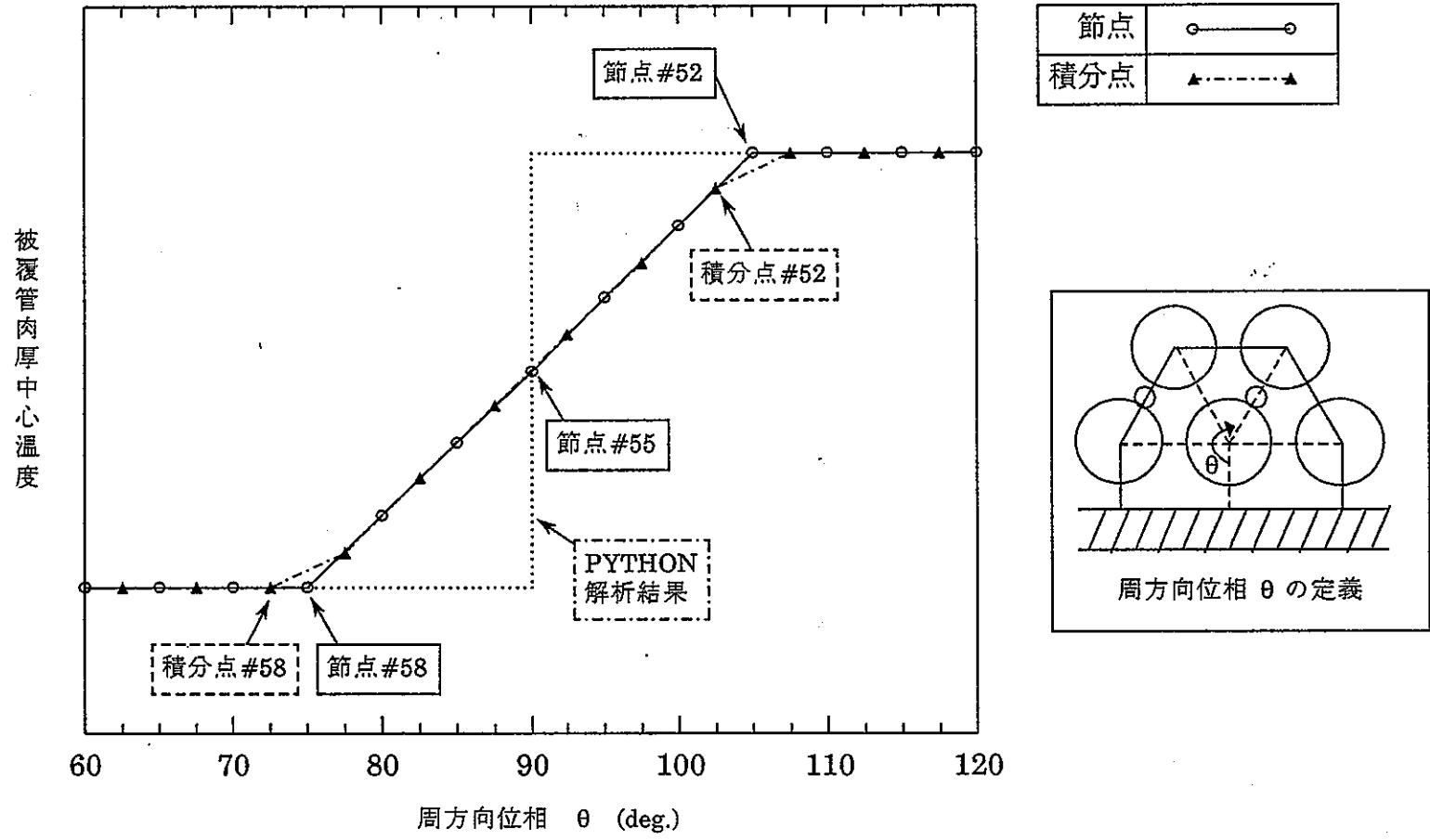


第3.1.2図 ELBOW6R使用ケースにおける要素番号、節点番号、および節点、積分点の周方向位置

被覆管肉厚中心温度



第3.1.3図 PIPE3とELBOW6R使用ケースにおける周方向温度分布 (注:PIPE3に対しては積分点温度分布、ELBOW6Rに対しては節点温度分布。また、積分点#および節点#は、いずれも絶対番号とは異なり、同一軸方向高さの点についての周方向に関する一貫番号。)



第3.1.4図 ELBOW6Rにおける積分点と節点の周方向温度分布の比較  
 (注:積分点#および節点#は、いずれも絶対番号とは異なり、同一軸方向高さの点についての一貫番号である。)

### 3.2 解析結果

以下、付録に収録した解析結果プロット図が参照されることを念頭において、記述している。

#### (1) PIPE3使用ケースでの解析結果(拘束点での変位:無)

##### 1) 湾曲変位置

PIPE3は中心軸上に節点を有しているため、被覆管中心軸の変位置が評価される。最大変位置および最大となる軸方向位置を第3.2.1表に示した。無拘束で18.5mmと大きいですが、拘束点数の増加とともに当然の結果として、最大変位置は低下している。

等間隔拘束としたケースについて湾曲形状を比較すると、4点拘束での下部側ピーク変位置は上部側でのそれに匹敵する大きさであるが、7点拘束または13点拘束では、上部側ピーク変位置と比べてずっと小さいという特徴のあることが分かる。上部側において熱湾曲モーメントが大きいためである。

不等間隔拘束としたケースでは、より拘束点の少ない条件での解析の結果にて最大変位置となる点を拘束点として追加するという手法で拘束条件を設定しているため、拘束点数の多いケースでは、拘束点が若干上部側に偏在しており、下部側でのピーク変位置は上部側でのそれに匹敵する大きさである。

##### 2) 応力軸方向分布

無拘束、等間隔での7点および13点拘束では、下端から300mmの軸方向範囲(下部ブラケット部)において、応力が生じていない。しかし、等間隔での4点拘束、および不等間隔での3~6点拘束では若干現れている。この軸方向範囲では周方向温度差がほとんど無いので、炉心部下端より上方側(300~1800mmの範囲)での温度差による燃料要素の湾曲に起因して二次的に発生した応力と考えられる。尚、7点および13点拘束において、この下端部での応力が現れないという特異性は、下端部での湾曲変位置が小さいことに起因すると考えられる。

炉心部下端より上方側における軸方向応力の軸方向分布は、拘束の有無によって大きく異なっている。拘束があると、熱膨張率の小さい低温側(積分点#49、#54)では引張り応力が、また熱膨張率の大きい高温側(積分点#56、#58、#60、#61)では圧縮応力が生じており、より高温側(積分点#60、#61)での圧縮応力は、それより低温側(積分点#56、#58)での圧縮応力と比



較して大きいという明確な傾向がある。一方、拘束が無いと、被覆管の熱湾曲に起因する二次的応力発生のためと考えられるが、その傾向は無い。

軸方向応力の最大値に着目すると、第3.2.1表に示したように、拘束状態では無拘束状態より大きくなるものの、拘束点数の増加につれて漸増する傾向はなく、等間隔および不等間隔拘束条件のいずれにおいても4点拘束時に最大となっている。最大値(ピーキング)の生じる軸方向位置は、いずれのケースにおいても周方向温度差の最大となる、下端より1200mm上方(炉心上端高さ)付近であるが、軸方向応力最大値の生じる4点拘束時には明瞭なピーキングが現れている。

尚、拘束状態を模擬した7ケースの解析結果を単純平均すると、引張り応力最大値は $6.0\text{kg/mm}^2$ で、圧縮応力最大値は $8.4\text{kg/mm}^2$ となる。この最大値の平均値と解析ケース中の最大値を比較することによって、拘束点の数とその軸方向位置の不確かさによる応力評価誤差を見積もるならば、引張り応力については17%、また圧縮応力については13%となる。

### 3) 応力周方向分布

拘束状態では軸方向熱膨張差による応力が主体的であるため、高温部では圧縮応力、また低温部では引張り応力が現れるという単純な分布である。一方、無拘束状態では燃料要素の湾曲に起因する二次的応力の重畳しているためと考えられるが、複雑な分布となっている。

### 4) 拘束点における荷重

拘束荷重(絶対値)の平均値を第3.2.1表に示した。拘束条件に関する明確な依存性は見られない。また、応力最大値との相関性も見られない。代表的なケースについて、第3.2.1図に各拘束点における荷重を示した(見易くするために、各点間を直線または破線で結んでいる。)

## (2) ELBOW6R使用ケースでの解析結果(拘束点での変位:無)

### 1) 湾曲変位量

ELBOW6Rの節点は中心軸上ではなく円周上にあるので、円周上節点の変位量が評価される。第3.2.2表に示したように、レファレンス温度条件での最大変位量は無拘束状態および4点拘束状態で、17.5mmおよび0.54mmであり、PIPE3による結果よりそれぞれ1mmおよび0.01mm小さいだけであり、良く一致している。しかし、拘束状態を模擬すると、変位量軸方向分布は付図に示したように振動し、拘束点数13点の時の振幅が非常に大きいため、変位量の最大となる位置はPIPE3使用のケースと異なった結果になっている。また、比較検討用温度条

件とレファレンス温度条件での解析結果を比較すると、無拘束条件で最大変位量が0.2mmだけ増加するが、4点拘束条件ではぴったり一致している。

## 2) 応力軸方向分布

第3.2.2表と第3.2.1表を比較して明らかなように、レファレンス温度条件、4点等間隔拘束状態での肉厚中心軸方向応力最大値および最大位置はPIPE3による解析結果とぴったり一致している。13点等間隔拘束状態では若干異なっているが、最大値の誤差は $0.3\text{kg/mm}^2$ 以下と小さい。比較検討用温度条件とレファレンス温度条件での軸方向応力最大値解析結果を比較すると、無拘束条件では増加しているが、4点拘束条件ではぴったり一致している。

肉厚中心周方向応力の軸方向分布は、湾曲変位量と同様に振動しているが、 $0.1\text{kg/mm}^2$ 以下と小さい。

## 3) 応力周方向分布

無拘束状態では、軸方向応力は肉厚方向で変化している(曲げ成分が現れている)が、拘束状態ではほとんど肉厚方向で変化しないこと、およびPIPE3による解析結果と良く一致していることが分かる。一方、周方向応力は拘束の有無に拘わらず、曲げ成分が主体的であるが、拘束点数の増加に伴い小さくなることが分かる。すなわち、無拘束での周方向曲げ応力最大値は $2.5\text{kg/mm}^2$ であるが、4点拘束では $0.7\text{kg/mm}^2$ 、13点拘束では $0.5\text{kg/mm}^2$ となっている。

## 4) 拘束点における荷重

拘束荷重(絶対値)の平均値を第3.2.2表に示した。代表的なケースについて、第3.2.2図に各拘束点における荷重を示した(見易くするために、各点間を直線または破線で結んでいる。)。同一拘束条件に対応するPIPE3使用ケースにて得られた結果と良く一致している。

### (3) PIPE3使用ケースでの解析結果(拘束点での変位:有)

#### 1) 湾曲変位量

拘束点での変位を零とした解析において、応力が最大になるケースP4、P4Aのうち、P4Aと同様に拘束点の軸方向位置を定め、拘束点での変位量をパラメトリックに設定した各ケースにおける湾曲変位量最大値等の解析結果を、P4Aにおける解析結果と比較して、第3.2.3表に示した。同表の脚注に記述したように湾曲変位量としては、熱湾曲方向の変位量だけをを示している。

## 2) 応力軸方向分布

いずれのケースにおいても、拘束点での変位を零とした解析において見られた傾向、すなわち、熱膨張率の小さい低温側(積分点#49、#54)では引張り応力が、また熱膨張率の大きい高温側(積分点#56、#58、#60、#61)では圧縮応力が生じており、より高温側(積分点#60、#61)での圧縮応力は、それより低温側(積分点#56、#58)での圧縮応力と比較して大きいという明確な傾向がある。また、ケースP4Aと同様、明瞭なピーキングが現れている。

第3.2.3表より分かるように、拘束点の変位量を熱湾曲方向に設定したケース(P4A1~P4A6)のうちでは、P4A2およびP4A4において応力が大きくなっている。しかし、P4Aと比較して、圧縮応力で20%以下、引張り応力で14%以下の増分に収まっている。一方、拘束点の変位量を熱湾曲方向と垂直な方向に設定したケース(P4A7~P4A9)での応力は、P4Aでの応力と6%未満の誤差範囲で良く一致している。

## 3) 応力周方向分布

拘束点の変位量を熱湾曲方向に設定したケースでの応力周方向分布は、拘束点での変位を零とした解析におけると同様軸対称であるが、熱湾曲方向と垂直な方向に設定したケースでは付図に示したように非対称性が現れている。

第3.2.1表 PIPE3使用ケース(拘束点での変位:無)での、  
最大湾曲変位量、軸方向応力(肉厚中心)最大値、平均拘束荷重の評価結果

解析 ケース	拘束点 総数	拘束点 間隔 (mm)	湾曲変位量		引張り応力		圧縮応力		平均 拘束 荷重 (g)
			最大値 (mm)	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	
P0	0	—	18.5	1800	3.9	1062.5	-3.4	1037.5	—
P4	4	600	0.55	1600	6.6	1187.5	-9.5	1162.5	247
P7	7	300	0.20	1700	5.6	1062.5	-8.3	1162.5	185
P13	13	150	0.06	1750	5.7	1062.5	-8.5	1162.5	182
P3A	3	不等間隔	2.7	475	5.7	1012.5	-7.4	1137.5	217
P4A	4	不等間隔	1.3	1500	7.0	1012.5	-8.7	1137.5	256
P5A	5	不等間隔	0.26	1675	5.8	1062.5	-8.3	1162.5	234
P6A	6	不等間隔	0.10	250	5.9	1012.5	-8.2	1162.5	340

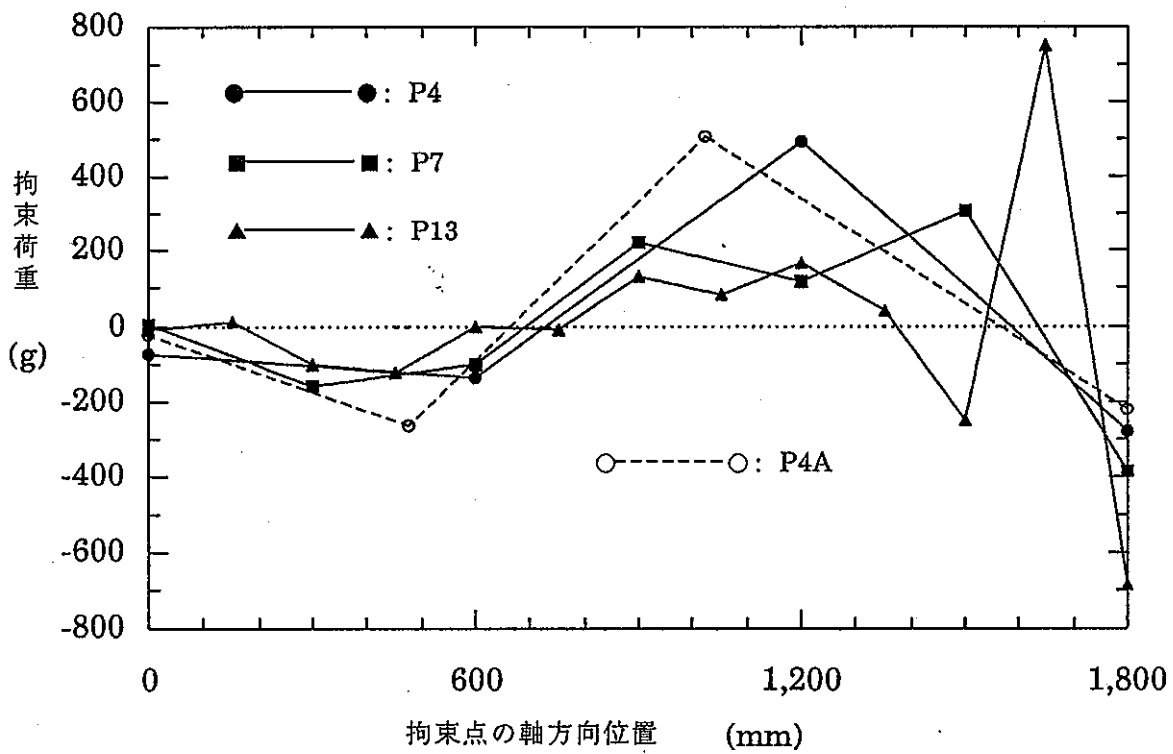
第3.2.2表 ELBOW6R使用ケース(拘束点での変位:無)での、  
最大湾曲変位量、軸方向応力(肉厚中心)最大値、平均拘束荷重の評価結果

解析 ケー ス	温度条件	拘束 点 総数	拘束 点 間隔 (mm)	湾曲変位量		引張り応力		圧縮応力		平均 拘束 荷重 (g)
				最大値 (mm)	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	
E0	レファレンス	0	—	17.5	1800	3.5	1062.5	-2.8	1037.5	—
E4	レファレンス	4	600	0.54	1600	6.6	1187.5	-9.5	1162.5	238
E13	レファレンス	13	150	0.06	825	5.4	1137.5	-8.6	1162.5	176
E4B	レファレンス	4	600	0.55	1600	6.6	1187.5	-9.5	1162.5	212
E0T	比較検討用	0	—	17.7	1800	4.4	1062.5	-2.8	1037.5	—
E4T	比較検討用	4	600	0.54	1600	6.6	1187.5	-9.5	1162.5	241

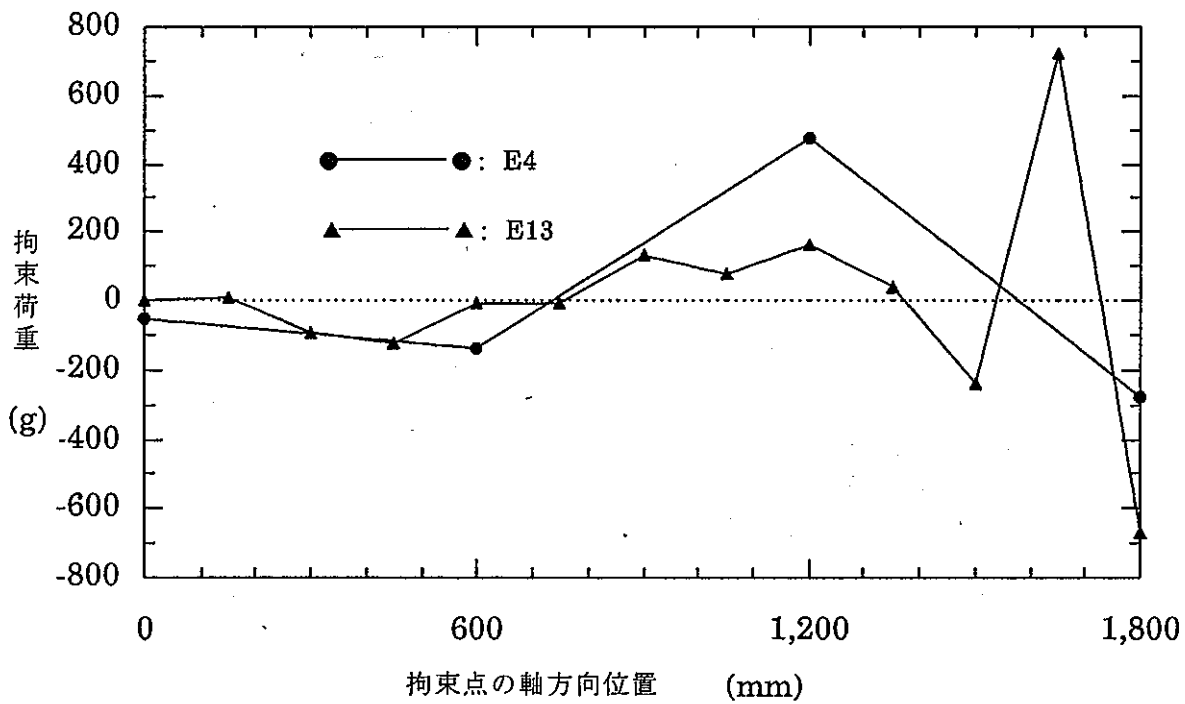
第3.2.3表 PIPE3使用ケース(拘束点での変位:無)での、  
最大湾曲変位量、軸方向応力(肉厚中心)最大値、平均拘束荷重の評価結果

解析 ケース	拘束点 総数	拘束点 間隔 (mm)	湾曲変位量		引張り応力		圧縮応力		平均 拘束 荷重 (g)
			最大値 (mm)	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	
P4A	4	不等間隔	1.3	1500	7.0	1012.5	-8.7	1137.5	256
P4A1	4	不等間隔	2.0	1350	5.7	1037.5	-7.4	1137.5	181
P4A2	4	不等間隔	1.3	1675	8.4	1012.5	-9.9	1137.5	354
P4A3	4	不等間隔	10	1800	6.1	1012.5	-7.8	1137.5	229
P4A4	4	不等間隔	10	1800	8.0	1012.5	-9.5	1137.5	283
P4A5	4	不等間隔	4.3	1675	7.0	1012.5	-8.6	1137.5	220
P4A6	4	不等間隔	4.0	1800	7.1	1012.5	-8.7	1137.5	318
P4A7	4	不等間隔	1.3	1500	7.4	1037.5	-8.6	1137.5	256
P4A8	4	不等間隔	1.3	1500	7.0	1012.5	-8.6	1137.5	256
P4A9	4	不等間隔	1.3	1500	7.0	1012.5	-8.6	1137.5	256

注) ケースP4A7~P4A9までは、熱湾曲方向に垂直な方向(X軸方向)への拘束点の変位を設  
定したので、その方向に関する湾曲変位および拘束荷重も現れるが、本表には熱湾曲方向  
(Y軸方向)に関する湾曲変位量および平均拘束荷重だけを示した。



第3.2.1図 拘束荷重解析結果 (PIPE3使用のケース)



第3.2.2図 拘束荷重解析結果 (ELBOW6R使用のケース)

### 3.3 結論

- (1) 燃料要素が周りの要素やラップ管からの干渉を受けない仮想的な条件(自由湾曲条件)、および湾曲拘束の重畳する条件のいずれの条件においても、周方向温度差に起因して発生する応力は軸方向応力が主体的であり、周方向応力は軸方向応力と比べて小さい。また、燃料要素の湾曲変位量が小さくなる、湾曲拘束の重畳する条件では、周方向応力は減少する。従って、周方向応力は燃料要素の湾曲に起因して二次的に発生すると考えられる。
- (2) 周方向応力は常に曲げ成分が主体的で、膜成分は無視できるほど小さい。一方、軸方向応力は膜成分が主体的で、自由湾曲条件では若干の曲げ成分が生じるものの、湾曲拘束が重畳する条件では膜成分だけと考えてよい。
- (3) 自由湾曲条件では、サブチャンネル境界部での被覆管温度周方向分布が急勾配になると、発生する応力の大きくなる傾向がある。しかし、拘束条件で発生する応力は、境界部での温度周方向分布の勾配に依存しないことが分かった。
- (4) 拘束点での変位量を零と仮定するならば、61年度大型炉レファレンス炉心における周方向温度差および湾曲拘束に起因する軸方向応力最大値は、ラップ管側低温部の引張り応力で $5.6\sim 7.0\text{ kg/mm}^2$ 程度、また反対側高温部の圧縮応力で $7.4\sim 9.5\text{ kg/mm}^2$ 程度である。ここで、不確かさ中は、拘束点個数およびその軸方向位置の不確かさに起因する。
- (5) さらに、拘束点での変位量の不確かさも考慮して、保守側の評価とするならば、軸方向応力最大値は、引張り応力で $7.0\times 1.20=8.4\text{ kg/mm}^2$ 程度、また圧縮応力で $9.5\times 1.14=10.8\text{ kg/mm}^2$ 程度である。

## 4. 照射末期における周方向温度差に起因する被覆管応力の評価

第3章での照射初期における周方向温度差に起因する被覆管応力評価の結果、発生応力の大きさは拘束条件に若干依存するものの、拘束条件の不確かさに起因する発生応力の不確かさは30%程度であることが明らかになった。したがって、拘束条件が寿命中変わらないと仮定し、またその拘束条件をかなり適当に設定してやることで、スエリング/照射クリープを考慮した照射中期および末期における周方向温度差に起因する被覆管応力も概算評価できると考えられる。

### 4.1 解析条件

#### (1) スエリング/照射クリープ式

改良オーステナイト鋼のスエリング/照射クリープ暫定式において、潜伏期間を下限值 $\tau=19$ とし、それ以外の定数をノミナル値とした式を用いた。

#### (2) 使用要素

照射末期に生じるスエリング差による応力は、照射初期の熱膨張差による応力と同様、膨張率の周方向変化に起因するものであり、したがって、照射初期の熱膨張差による応力と同様、軸方向応力は膜成分が主体的で、周方向応力は軸方向応力と比較して小さいと判断できる。そこで、軸方向応力膜成分だけ評価しておけば十分なので、PIPE3を使用した。

#### (3) 境界条件(拘束条件)

上下端を含む軸方向等間隔(150mm)13点で拘束し、拘束点での変位量は零とした。すなわち、前章の解析ケースP13と同じ拘束条件である。

#### (4) メッシュ分割条件

前章におけると同様、軸方向に関して72分割(メッシュ幅:25mm)した。

#### (5) 温度条件

標準ケースとして実施の解析では、前章と同一の照射初期における温度分布を、寿命期間を通して使用した。

「もんじゅ」設計における燃料要素束照射変形解析で、BDIが発生すると周辺流れ効果が

抑制され、最外層燃料要素の被覆管周方向温度差は小さくなるとの結果が得られている。したがって、寿命後期でBDIが生じる場合(61年度レファレンス炉心では、BDIはほとんど生じない。)には、寿命中の被覆管温度変化を考慮した評価を実施すべきである。ここでは、FINASコードにて、寿命中のその温度変化を考慮した評価が可能なことを示しておけば十分と考え、比較ケースとして寿命期間を2ステップに分割し、前半(0~667日)で標準ケースと同一の分布を、後半(667~1125日)については以下に述べる周方向温度差の小さい分布を用いた解析も実施した。

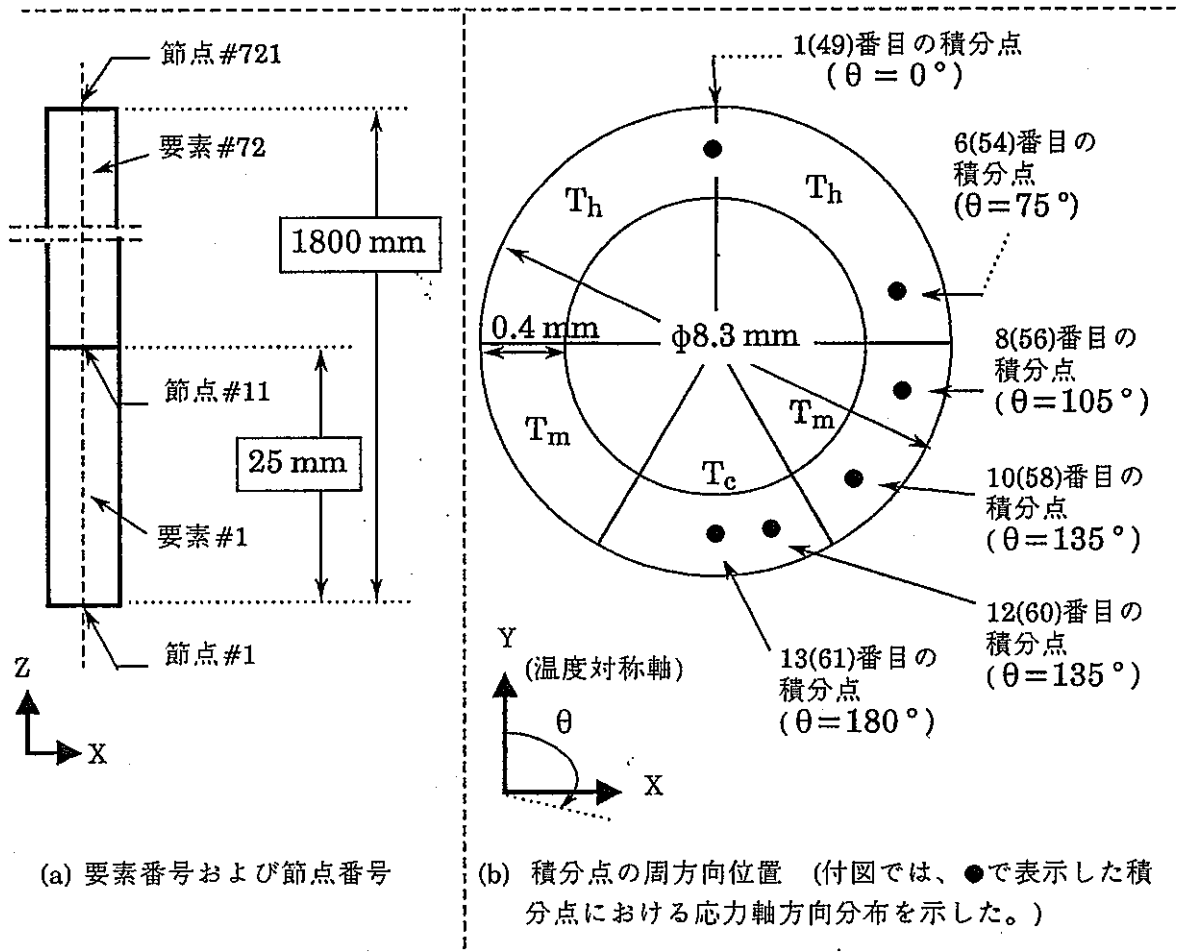
寿命前半における、被覆管の集合体中心側(高温部)の温度を $T_h$ 、ラッパ管側(低温部)の温度を $T_c$ 、また中間温度部の温度を $T_m$ と表した時(第4.1.1図参照)、後半における温度 $T_h'$ 、 $T_m'$ 、 $T_c'$ は次式にて求まる値とした。

$$T_h' = 0.5 \times (T_h - T_c) + T_c, \quad T_m' = 0.5 \times (T_m - T_c) + T_c, \quad T_c' = T_c$$

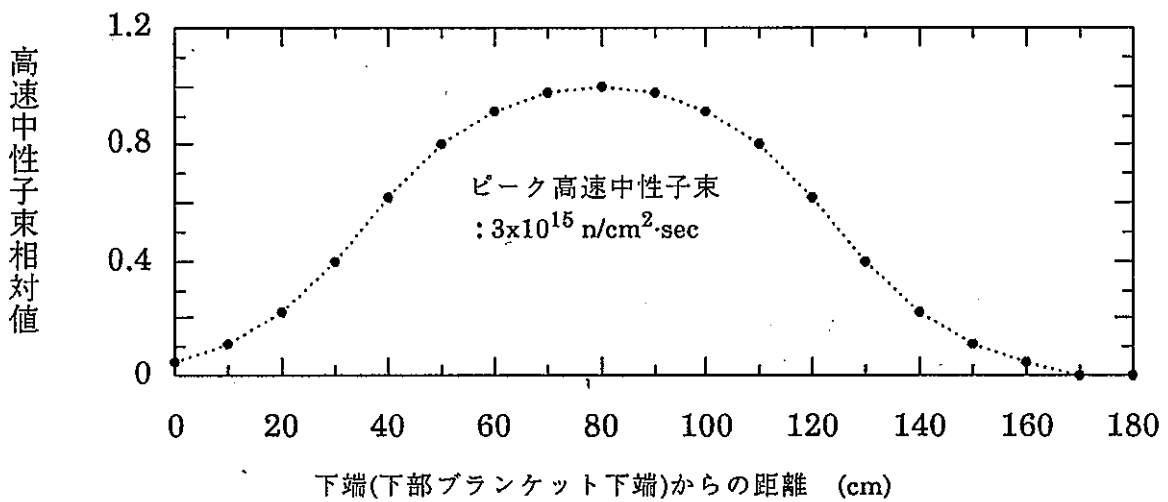
#### (6) 高速中性子束条件

第4.1.2図に、評価条件として設定した高速中性子束軸方向分布を示した。炉中心(軸方向位置:800mm)ピーク位置での高速中性子束は $3 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>·secとした。61年度レファレンス炉心の燃料寿命は1095日であるが、解析上は1125日としている。この1125日における最大高速中性子照射量は $29.2 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup>である。





第4.1.1図 要素番号、節点番号、および積分点の周方向位置



第4.1.2図 高速中性子束軸方向分布

## 4.2 解析結果

以下、付録の解析結果プロット図が参照されることを念頭において、記述している。

### (1) 標準ケース

#### 1) 湾曲形状

照射中期(500日)において、最大高速中性子照射量は $13 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ と潜伏期間内なので、スエリングは未発生である。しかし、照射クリープは照射開始直後から生じているので、照射中期の湾曲形状にはクリープの影響が現れる可能性がある。ところが、照射初期と中期における湾曲形状の差異は小さい。この結果より、クリープが生じても、弾性歪が永久歪に転じるだけであり、湾曲形状への影響は小さいと結論できる。一方、スエリング湾曲の現れる照射末期(1125日)では、湾曲形状は全く異なる。

#### 2) 応力

照射中期では炉心部(軸方向位置:300~1300mm)における初期の応力は緩和され、クリープの生じない上部ブランケット上端(軸方向位置:1600mm)付近で応力が最大となる。しかし、照射末期ではスエリング湾曲のため、再び炉心部で応力が最大となっている。スエリングは直線的に増加するが、クリープの応力依存性のため、応力はより緩やかに増加している。

照射初期と末期では周方向応力分布形状は大きく異なるが、熱またはスエリングによる膨張率の大きい側で圧縮応力、小さい側で引張り応力が生じるという点では同じである。

#### 3) 拘束荷重

第4.2.1図に示したように、応力評価結果におけると同様、炉心部における荷重はクリープのため照射中期でほぼ零になり、照射末期においてはスエリングのため再び大きくなっている。しかし、応力末期ピーク値は照射初期での値と同レベルであるにもかかわらず、荷重末期ピーク値は初期での値よりも大幅に大きい点で異なっている。

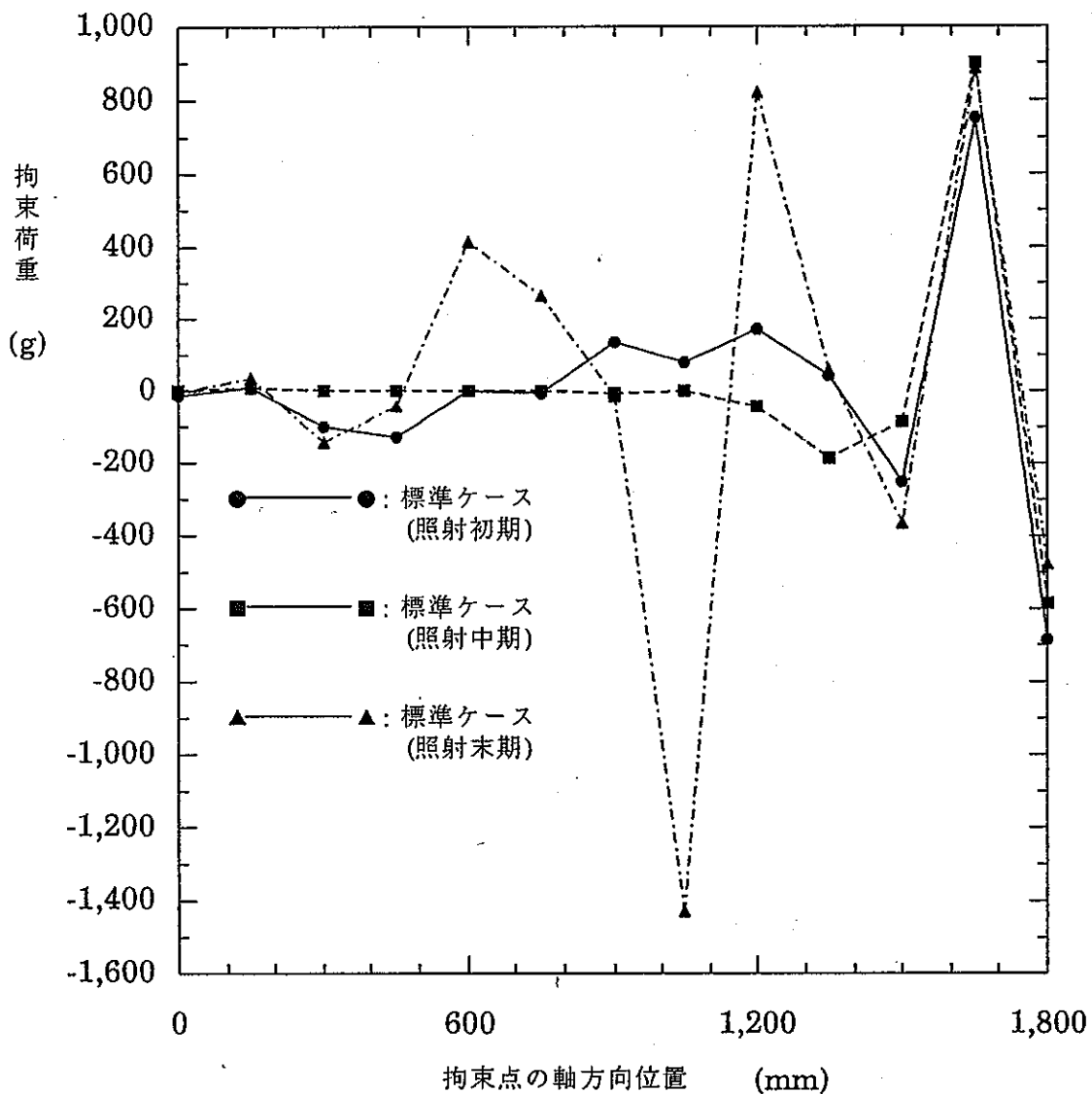
### (2) 比較ケース

照射初期および中期では、標準ケースと同じなので、照射末期での解析結果だけを付図に示している。照射期間後半での周方向温度差低下を考慮すれば、末期応力が小さくなることを確認できた。

第4.2.1表 最大湾曲変位量、軸方向応力最大値、平均拘束荷重の評価結果

解析ケース	評価時期	湾曲変位量		引張り応力		圧縮応力		平均拘束荷重 (g)
		最大値 (mm)	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大位置 (mm)	
標準ケース	初期	0.06	1750	5.7	1062.5	-8.5	1162.5	182
標準ケース	中期	0.06	1750	2.7	1612.5	-4.7	1637.5	141
標準ケース	末期	0.07	1750	7.0	1037.5	-6.0	1062.5	381
比較ケース	末期	0.04	1725	3.9	1037.5	-3.5	1062.5	-

脚注) 照射中期および末期は、それぞれ500日および1125日とした。



第4.2.1図 拘束荷重解析結果

## 4.3 結論

- (1) 61年度レファレンス炉心における周方向温度差に起因する被覆管応力を概算評価し、下記の評価結果を得た。

評価時期	照射初期	照射中期	照射末期
引張り応力	5.7 kg/mm <sup>2</sup>	2.7 kg/mm <sup>2</sup>	7.0 kg/mm <sup>2</sup>
圧縮応力	-8.5 kg/mm <sup>2</sup>	-4.7 kg/mm <sup>2</sup>	-6.0 kg/mm <sup>2</sup>

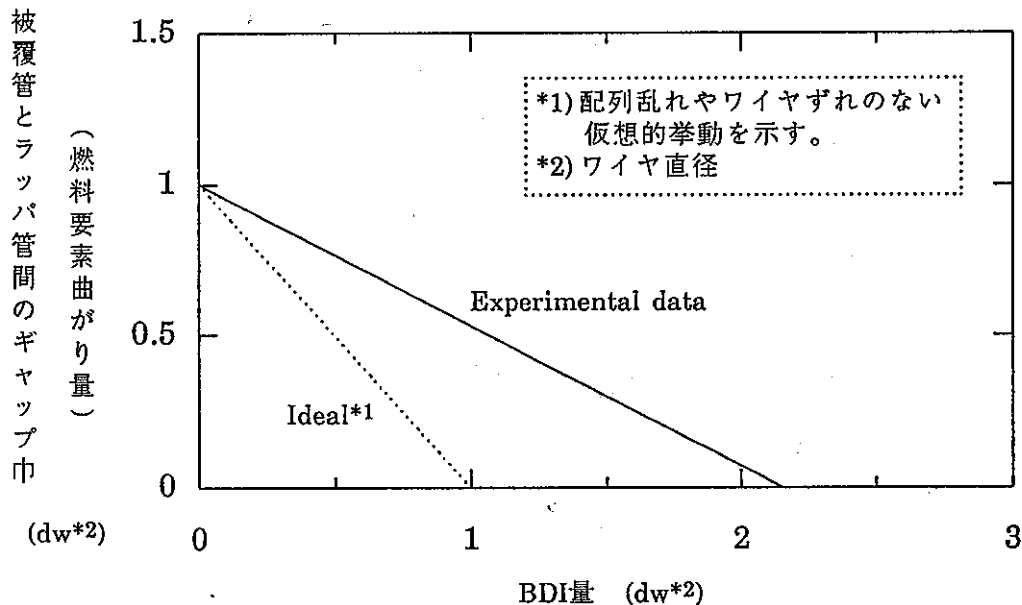
- (2) FINASにて、被覆管温度経日変化を考慮した解析が可能であることを確認した。また、BDIが発生し、照射期間後半で周方向温度差が低下する場合には、照射末期における周方向温度差に起因する被覆管応力が低減されることを確認した。

## 5. BDI発生に起因する被覆管応力の評価手法の検討

61年度大型炉レファレンス炉心では、炉心材料として改良オーステナイト鋼を採用しているが、ラップ管の膨れが寿命制限因子となっており、BDIはほとんど生じない。したがって、湾曲拘束に起因する応力として、周方向温度差に起因する応力だけを考慮しておけば十分である。しかし、燃料寿命のさらなる長期化を狙うため、ラップ管材をフェライト鋼に変更した設計等においては、BDIに起因する応力評価が必要となる。

BDIが発生した場合には、強制的な被覆管曲がりが生じ、最外層燃料要素の曲がりが大きくなると思われる。曲がり量が分かれば、次のようにしてBDIに起因する応力を評価できる。周方向温度差に起因する応力は別途評価すれば良いので、被覆管の周方向温度差が無い条件とし、BDI発生に伴う最外層燃料要素の強制曲がりを模擬した拘束条件(この拘束条件の経時変化挙動を含めて)を仮定し、照射クリープを考慮した解析を行うことで評価できる。

なお、BDIが発生した場合の燃料要素曲がり量は、炉外BDI模擬試験結果(下に例を示す。)、またはその試験データに基づき検証された評価コードを用いて求めれば良いと考えられるが、ここでは評価手法を示すことを目的としたので、かなり適当に設定している。



炉外BDI模擬試験結果の例

## 5.1 解析条件

### (1) 照射クリープ式

前章におけると同様、改良オーステナイト鋼の照射クリープ暫定式において、スエリング潜伏期間を下限值 $\tau=19$ とし、それ以外の定数をノミナル値とした式を用いた。

### (2) 使用要素

PIPE3を使用した。

### (3) 境界条件(拘束条件)

#### i) ワイヤ巻付けピッチ等の影響を検討するケース

BDIに起因する応力は、ワイヤ巻付けピッチが短いほど大きくなる可能性が強い。そこで、ワイヤ巻付けピッチとして3ケース(150mm、250mm、350mm)を選定し、ピッチのBDI応力に及ぼす影響を検討するものとした。それぞれのケースについての拘束条件を第5.1.1表に示した。同表における節点の軸方向位置は、その節点番号と前章の第4.1.1図の説明図から知ることができる。尚、第4.1.1図では、Y方向がラップ管内壁方向であるが、本章ではX方向をラップ管内壁方向と見なしている。

XY方向の自由度を拘束する節点として、過大な湾曲を防止するための節点の他に、BDIに起因する曲がりを模擬するための節点を1/2ワイヤ巻付けピッチ毎に設定した。前者の節点のXY方向変位量は零に固定した。また、後者の節点については、XY方向変位量を零に固定した節点と、Y方向変位量は零に固定し、X方向変位量を照射日数とともに可変とした点の2種類とした。

可変とした変位量の経日変化(すなわち、BDI発生時のピン強制曲がり量の履歴)を第5.1.1図(a)に示す。ピッチが150mm、250mm、および350mmの各ケースについて、この曲がり量が一律の条件で解析した。照射末期での曲がり量はワイヤ直径に相当する1.5mmとしている。すなわち、照射末期で被覆管とラップ管の直接接触が生じるものとした。

実際にはBDI量は軸方向に変化するので、曲がり量も軸方向に分布するものとした条件の方が現実的である。そこで、150mmのケースについては第5.1.1図(b)の軸方向分布を考慮した条件での解析も実施し、軸方向分布の影響を検討するものとした。

ii) 曲がり速度の影響を検討するケース

ワイヤ巻付けピッチが150mmの時に限定して検討した。拘束条件は第5.1.2表のように設定した。すなわち、第5.1.1表に示した条件との比較から明らかなように、燃料要素の上部および下部での湾曲を、ワイヤ巻付けピッチ等の影響を検討するケースのように厳しく制限するのではなく、比較的許す条件とした。この条件の違いにより、BDIによる応力の評価結果に大差の無いことを確認したいとの意図がある。

可変とした変位量の経日変化(すなわち、BDI発生時のピン強制曲がり量の履歴)は、第5.1.2図に示した3通りとした。いずれにおいても、曲がり量は軸方向一様とした。

(4) メッシュ分割条件

前章におけると同様、軸方向に関して72分割(メッシュ幅:25mm)した。

(5) 温度条件

被覆管温度条件は、縦弾性係数および照射クリープ等を通して、応力の大きさに若干の影響を及ぼすと考えられる。しかし、ここでは、周方向温度差に起因する応力が重畳しないようにとの観点で、サブチャンネル#410に面する被覆管温度を周方向一律に用いた。

(6) 高速中性子束条件

前章におけると同一の条件とした。

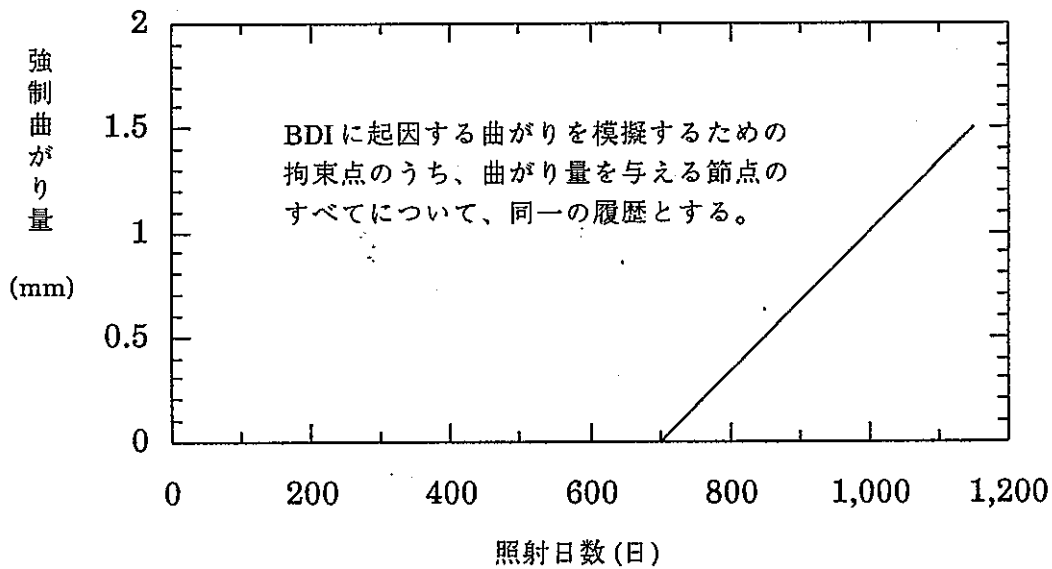
第5.1.1表 ワイヤ巻付けピッチ等の影響検討ケースにおける拘束条件 (使用要素:PIPE3)

ワイヤ 巻付け ピッチ (mm)	Z方向 自由度 拘束 節点	過大な曲がりを 防止するための 拘束節点と、その 軸方向位置 (mm)	BDIに起因する曲がりを模擬するための拘束点	
			節点と、その軸方向位置 (mm)	
			変位量:零	変位量:強制曲がり量
150	#1 (下端)	#1(0), #101(250), #571(1425), #721(1800)	#171(425), #231(575), #291(725), #351(875), #411(1025), #471(1175)	#201(500), #261(650), #321(800), #381(950), #441(1100)
250	#1 (下端)	#1(0), #121(300), #521(1300), #721(1800)	#171(425), #271(675), #371(925), #471(1175)	#221(550), #321(800), #421(1050)
350	#1 (下端)	#1(0), #41(100), #601(1500), #721(1800)	#111(275), #251(625), #391(975), #531(1325)	#181(450), #321(800), #461(1150)

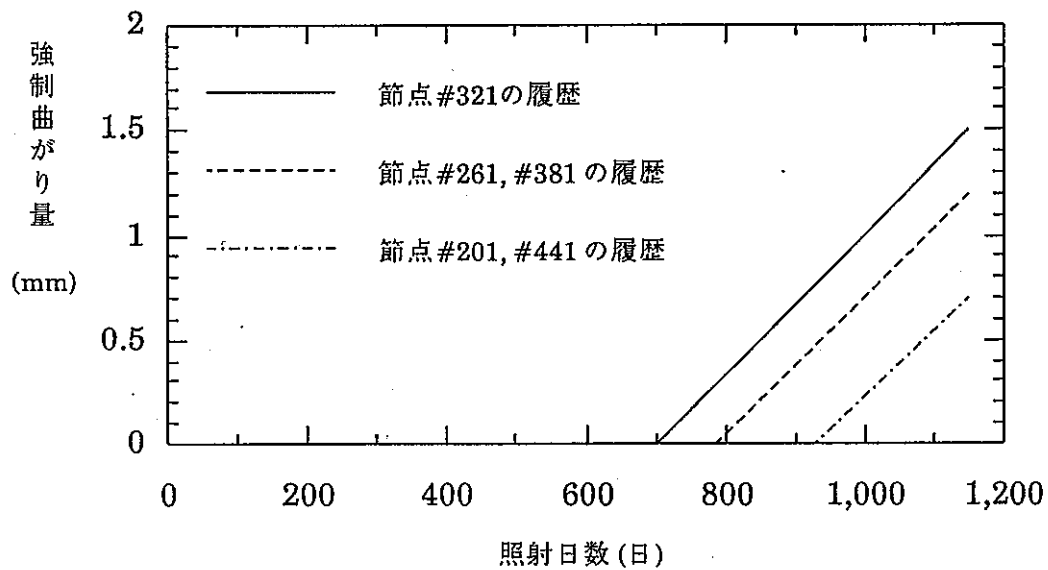
第5.1.2表 曲がり速度の影響検討ケースにおける拘束条件 (使用要素:PIPE3)

ワイヤ 巻付け ピッチ (mm)	Z方向 自由度 拘束 節点	過大な曲がりを 防止するための 拘束節点と、その 軸方向位置 (mm)	BDIに起因する曲がりを模擬するための拘束点	
			節点と、その軸方向位置 (mm)	
			変位量:零	変位量:強制曲がり量
150	#1 (下端)	#1(0), #721(1800)	#231(575), #291(725), #351(875), #411(1025)	#201(500), #261(650), #321(800), #381(950), #441(1100)



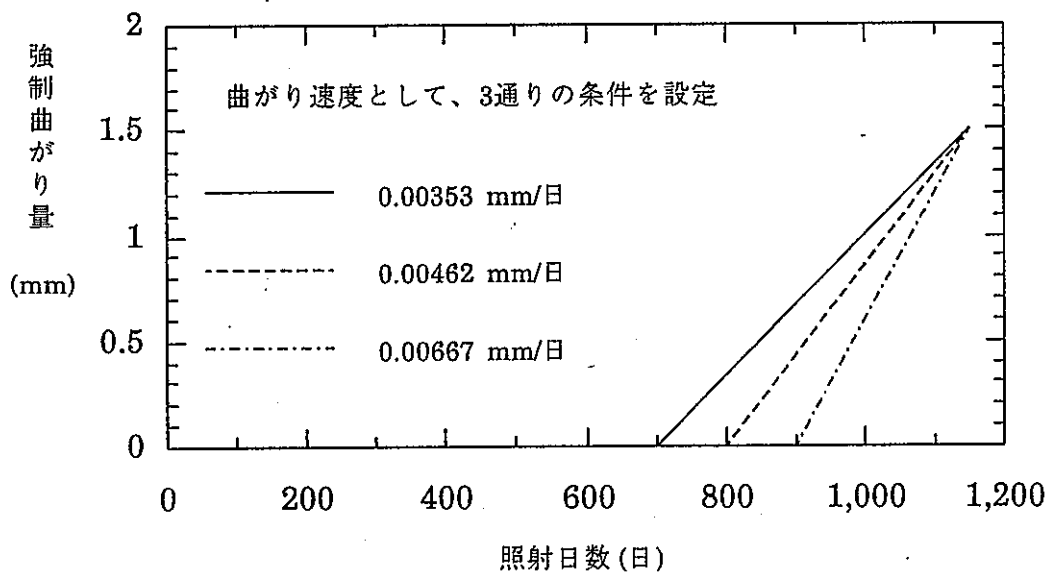


(a) 軸方向一様条件 (ワイヤ巻付けピッチ3通りについて、本条件での解析を実施)



(b) 軸方向分布を考慮した条件 (ワイヤ巻付けピッチが150mmの場合については、本条件での解析も実施)

第5.1.1図 ワイヤ巻付けピッチの影響等を検討するケースにおける強制曲がり量履歴条件



第5.1.2図 曲がり速度の影響を検討するケースにおける強制曲がり量履歴条件

## 5.2 解析結果

以下、付録の解析結果プロッタ図が参照されることを念頭において、記述している。

### (1) ワイヤ巻付けピッチの影響等を検討したケース

軸方向応力の軸方向分布を示した付図から分かるように、BDIを模擬するための拘束点の近傍において、鋭いピークが現れている。炉中心に近いピークは、照射クリープのため、その上下のピークより低い傾向が見られる。また、要素内中央層の積分点応力より、上段層の積分点応力の方が若干大きい。上段層の積分点の方が拘束節点位置に近いことによる。

本来ならば、軸方向に関する最大値について比較するべきであろうが、現象を明らかにする上では、炉中心高さの要素(#321)の中央層の積分点における応力を比較することで十分である。第5.2.1表および第5.2.1図に、下端位置が炉中心高さの要素(#321)の中央層の積分点における軸方向応力の周方向に関する最大値を示した。曲がり量を与えた節点#321の軸方向位置よりも12.5mmだけ上方位置における応力である。巻付けピッチを短くすると、応力が大きくなっている。また、第5.2.1表に示したように、ピッチを短くすると、荷重も大きくなっている。

一方、曲がり量の軸方向分布を考慮しても、応力および荷重はほとんど低下しないとの結果が得られた。第5.2.2図に示したように、軸方向分布を考慮した場合、荷重の低下は僅かであるが見られる。第5.2.3図に示したように、炉中心高さでは800日以前において、また炉中心より1/2ピッチだけ上方では900日において、軸方向分布を考慮した方が応力は明らかに小さい。しかし、寿命末期に近づくとつれ、両者の差異は消失している。

本評価例では、軸方向分布の影響は小さいとの結果が得られたはしたが、不偏的な結果でないことに留意する必要がある。曲がり速度およびクリープ速度が異なれば、また異なる結果が得られるであろう。

### (2) 曲がり速度の影響を検討したケース

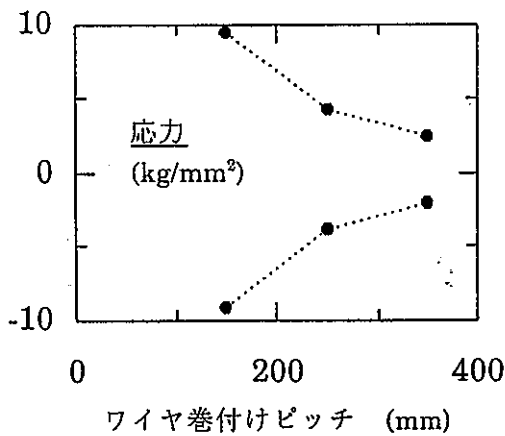
第5.2.2表に示したように、曲がり速度が大きいほど、応力・荷重とも大きくなる。曲がり速度0.00353mm/secは、第5.2.1表に示した評価における曲がり速度に等しい。これらの表における、同一巻付けピッチでの結果を比較して明らかなように、BDI発生部の応力の大きさはほぼ等しい。曲がり速度が同一ならば、BDI発生を想定している炉中心付近から上下に離れた範囲での拘束条件の違いにより、BDI発生部の応力の大きさは変わらないことを確認した。

第5.2.1表 炉中心高さでの軸方向応力最大値等の評価結果  
(ワイヤ巻付けピッチ等の影響を検討したケースの照射末期、使用要素:PIPE3)

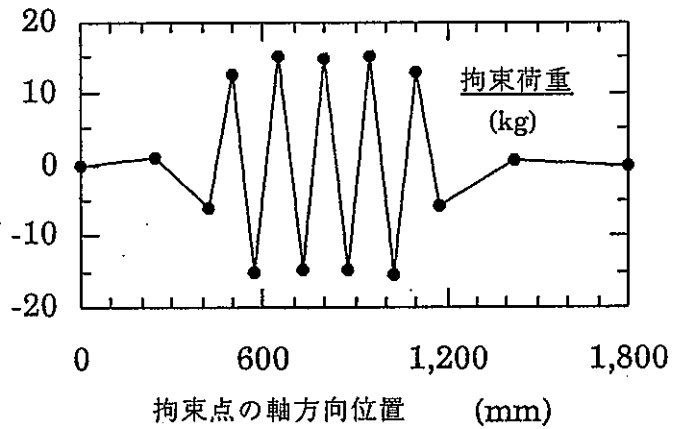
ワイヤ巻付けピッチ (mm)	曲がり量履歴	炉中心高さでの評価結果			平均拘束荷重 (kg)	
		軸方向応力最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )		拘束荷重 (kg)	BDIに起因する曲がり を模擬するための 拘束点についての平均	全拘束点 についての 平均
		引張応力	圧縮応力			
150	軸方向一様	9.4	-9.1	14.6	13.0	9.6
150	軸方向分布有	9.4	-9.1	14.6	12.8	9.5
250	軸方向一様	4.2	-3.9	3.2	2.8	1.9
350	軸方向一様	2.4	-2.1	1.2	1.3	0.9

第5.2.2表 炉中心高さでの軸方向応力最大値等の評価結果  
(曲がり速度の影響を検討したケースの照射末期、使用要素:PIPE3)

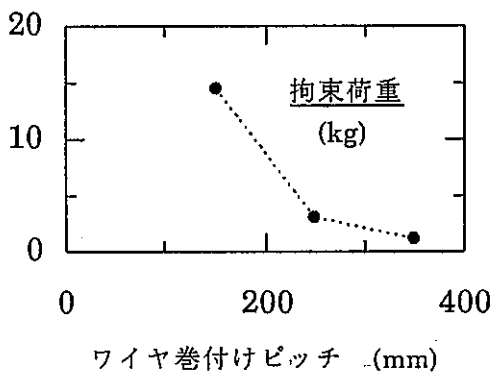
ワイヤ巻付けピッチ (mm)	曲がり速度 (mm/日)	炉中心高さでの評価結果			平均拘束荷重 (kg)	
		軸方向応力最大値 (kg/mm <sup>2</sup> )		拘束荷重 (kg)	BDIに起因する曲がり を模擬するための 拘束点についての平均	全拘束点 についての 平均
		引張応力	圧縮応力			
150	0.00353	9.3	-9.0	14.5	11.1	9.1
150	0.00462	12.2	-11.9	18.9	14.5	11.9
150	0.00667	17.3	-17.0	27.1	20.7	17.0



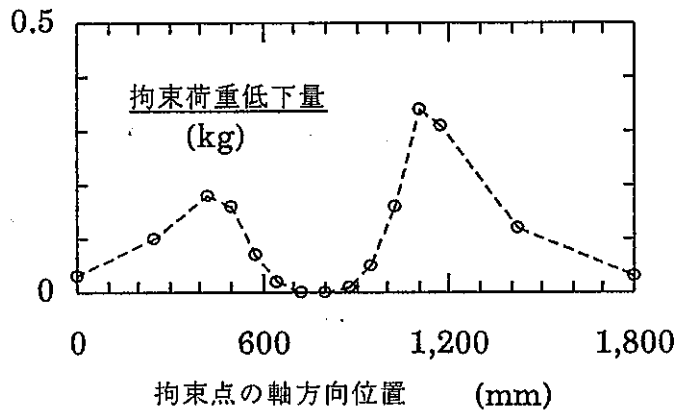
(a) 炉心高さでの被覆管応力のワイヤ巻付けピッチへの依存性



(a) ワイヤ巻付けピッチが150mmで、曲がり量履歴が軸方向一様条件での拘束荷重



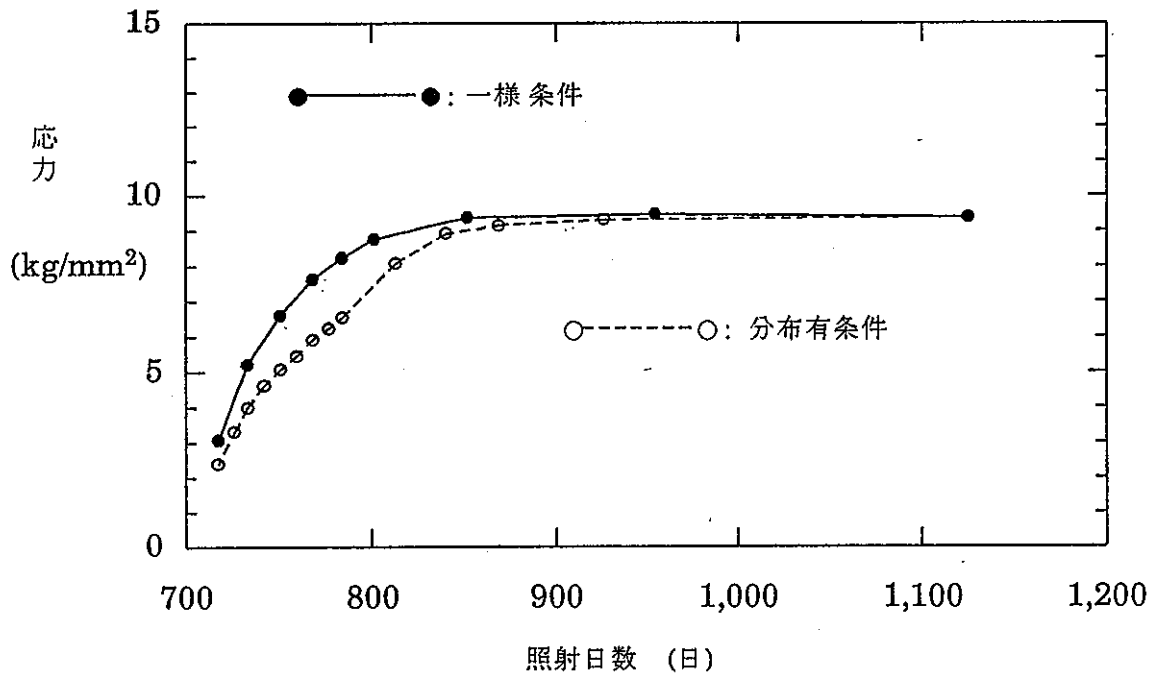
(b) 炉心高さでの拘束荷重のワイヤ巻付けピッチへの依存性



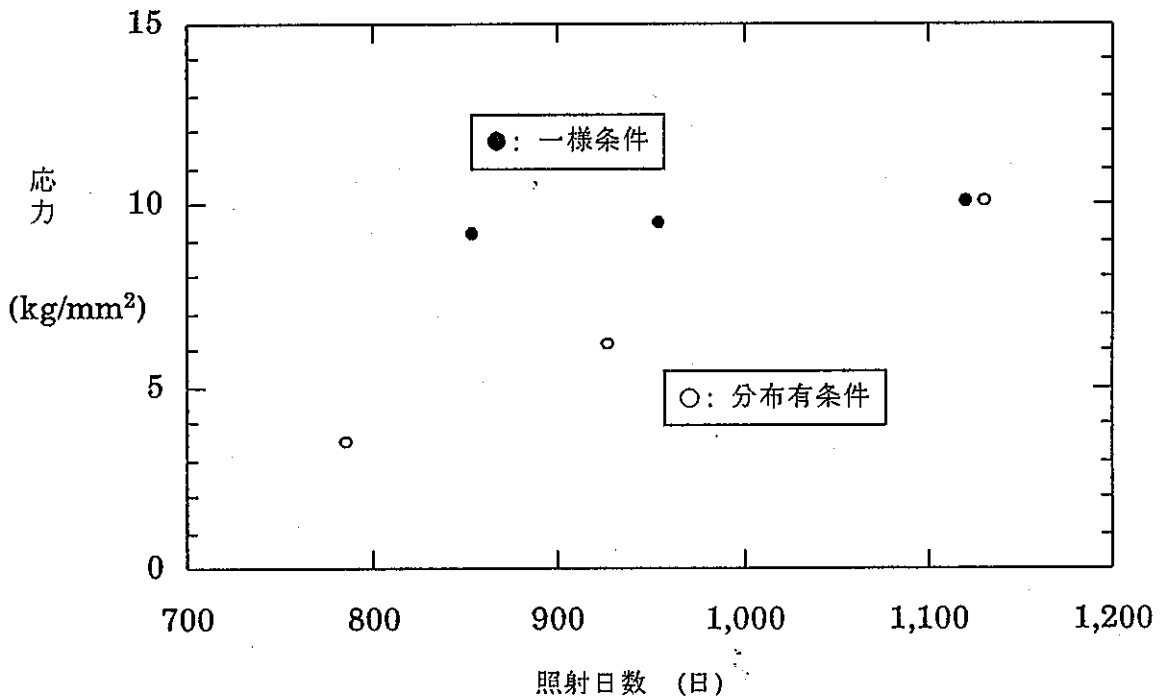
(b) 曲がり量履歴として軸方向分布を考慮することによる拘束荷重(絶対値)の低下量

第5.2.1図 照射末期における応力と荷重に対するピッチの影響  
(使用要素: PIPE3)

第5.2.2図 照射末期における拘束荷重に対する曲がり量分布の影響  
(使用要素: PIPE3)



(a) 炉中心高さでの最大引張り応力の経日変化挙動解析結果の比較



(b) 炉中心高さより1/2ピッチだけ上方での最大引張り応力の経日変化挙動解析結果の比較

第5.2.3図 曲がり量を軸方向一様条件とした時と、分布を考慮した時の応力経日変化の比較  
(使用要素: PIPE3)

### 5.3 結論

- (1) FINASにて、BDI発生に起因する被覆管強制曲がりによる被覆管応力を評価できる見通しが得られた。(但し、BDI発生に起因する被覆管強制曲がり挙動が与えられることを前提とする。)
- (2) BDI量が同じならば、巻付けピッチ長さに関係なく、被覆管強制曲がり量は同じであるという条件では、巻付けピッチを短くすると、BDI発生に起因する被覆管応力が大きくなることを確認した。(実際には、巻付けピッチを短くすると、配列乱れが大きくなり、被覆管強制曲がり量が減少すると考えられるので、本検討で得られた程には、BDI発生に起因する被覆管応力が大きくなることはないであろう。)
- (3) 曲がり速度が速いと、BDI発生に起因する被覆管応力が大きくなることを確認した。(尚、BDIの増加速度が速いと、曲がり速度も速いと予想される。)

## 6. 周方向温度差とBDIに起因する被覆管応力の一括評価

これまで、現象をより良く理解するため、周方向温度差とBDIに起因する応力をそれぞれ別個(応力原因毎)に評価してきたが、一括して評価した方が手間は省ける。このような理由で、一括評価できること、および別個に評価した応力の合計値と一致すること(重ね合わせ成立性)を示した。尚、照射クリープ式として、クリープ歪が応力に比例する式を採用しているので、重ね合わせが成立するであろうと予測される。

### 6.1 解析条件

#### (1) スエリング/照射クリープ式

前章までにおけると同様、改良オーステナイト鋼の照射クリープ暫定式において、スエリング潜伏期間を下限値 $\tau=19$ とし、それ以外の定数をノミナル値とした式を用いた。

#### (2) 使用要素

PIPE3を使用した。

#### (3) メッシュ分割条件

軸方向に関して72分割(メッシュ幅:25mm)した。

#### (4) 温度条件

第6.1.1表に示したように、解析ケース毎に設定した。

#### (5) 境界条件(拘束条件)

第6.1.2表に示したように、ケース1では17点ある拘束点での変位が無い条件とした。一方、ケース2および3では17点の拘束点のうち5点については、ケース1における温度勾配方向の変位を与えた。

#### (6) 高速中性子束条件

前章までにおけると同一の軸方向分布を用いた。



第6.1.1表 解析ケース毎温度条件

ケース	応力原因	被覆管温度条件	備考
1	周方向温度差	<p>対面するサブチャンネル毎に、高温部、低温部、および中温部に被覆管を周方向分割し、周方向24点の積分点の周方向位置に応じて、3通りの軸方向温度分布を与えた。</p> <p>また、寿命後半(667日~1125日)では、高温部および中温部の温度を前半での温度より低くした。</p>	<p>第4章において、比較ケースとして実施の解析と同一の温度条件である。</p>
2	BDI	<p>周方向温度差なし(周方向24点の積分点すべてに対し、ケース1で言及の中温部の軸方向温度分布を与えた。)とし、温度経日変化も考慮しなかった。</p>	<p>第5章の解析と同一の温度条件である。</p>
3	温度差とBDI	<p>ケース1と同一の温度条件とした。</p>	<p>—</p>

第6.1.2表 解析ケース毎拘束条件 (ケース1/ケース2およびケース3)

拘束点の 軸方向 位置 (mm)	拘束点における変位量			拘束点の 軸方向 位置 (mm)	拘束点における変位量		
	変位の 有無	変位開始 時期(日)	末期におけ る変位量 (mm)		変位の 有無	変位開始 時期(日)	末期におけ る変位量 (mm)
0	無	—	—	900	無/有	-/785	-/1.2
150	無	—	—	975	無	—	—
300	無	—	—	1050	無/有	-/927	-/0.7
450	無/有	-/927	-/0.7	1200	無	—	—
525	無	—	—	1350	無	—	—
600	無/有	-/785	-/1.2	1500	無	—	—
675	無	—	—	1650	無	—	—
750	無/有	-/700	-/1.5	1800	無	—	—
825	無	—	—	—	—	—	—

脚注) 変位速度は、時間に関して一定。

## 6.2 解析結果および結論

寿命末期についてだけであるが、応力および荷重の重ね合わせ成立性を検討した。ケース1とケース3の温度条件は同一であるが、ケース2は異なることから、材料特性を同一とした比較ではない。このため、完全には一致しなかったが、重ね合わせ成立性を確認できた。

## (1) 応力解析結果

第6.2.1表に示したように、応力についての重ね合わせ成立性を確認できた。

## (2) 荷重解析結果

第6.2.2表に示したように、拘束荷重についての重ね合わせ成立性を確認できた。

第6.2.1表 応力重ね合わせ成立性 (単位: kgf/mm<sup>2</sup>)

	集合体中心側 (高温部)		ラッパ管内壁側 (低温部)	
	軸方向位置: 747.5 mm	軸方向位置: 822.5 mm	軸方向位置: 747.5 mm	軸方向位置: 822.5 mm
ケース1 (温度差)	0.6	0.9	-0.3	-0.9
ケース2 (BDI)	-13.5	13.2	13.5	-13.6
ケース3 (温度差とBDI)	-12.9	14.3	13.2	-14.3
ケース1 + ケース2	-12.9	14.1	13.2	-14.5

注) 任意に、軸方向2点×周方向2点=4点を選び、これらの点での応力重ね合わせ成立性を確認した。

第6.2.2表 荷重重ね合わせ成立性 (単位: kgf)

軸方向位置 (mm)	0	300	675	750	825	1500	1800
ケース1 (温度差)	-0.00	-0.04	0.13	-0.10	0.39	-0.32	-0.23
ケース2 (BDI)	-0.19	-2.61	-14.84	14.61	-14.49	-0.29	-0.01
ケース3 (温度差とBDI)	-0.19	-2.65	-14.70	14.51	-14.10	-0.60	-0.25
ケース1 + ケース2	-0.19	-2.65	-14.71	14.51	-14.10	-0.61	-0.24

注) 拘束点17点のうち、任意に7点を選び、これらの点での荷重の重ね合わせ成立性を確認した。

## 7. 『常陽』特燃の湾曲拘束に起因する被覆管応力の評価

『常陽』B7特燃(LDP)のPYTHON-SHADOW解析結果データに基づき実施した、湾曲拘束(周方向温度差とBDI)に起因する被覆管応力評価の結果をまとめた。

### 7.1 解析条件

#### (1) 解析対象ピン

最外層ピン#20(PYTHON-SHADOW解析でのナンバーリングに従う)を選定した。

#### (2) スエリング/照射クリープ式

前章までにおけると同様、改良オーステナイト鋼の照射クリープ暫定式において、スエリング潜伏期間を下限值 $\tau=19$ とし、それ以外の定数をノミナル値とした式を用いた。

#### (3) 使用要素

本章の評価では、ELBOW6Rを使用した。

#### (4) メッシュ分割条件

周方向に関しては24分割、軸方向に関して87分割とした。ピン全長(ピン下端固定位置より上方)が1679.1mmなので、軸方向メッシュ幅は19.3mmである。

#### (5) 温度条件

コーナピン#20の被覆管肉厚中心温度の周方向温度差解析結果(経日変化)を、第7.1.1図に示した。周方向温度差は1050日において極大になり、末期(1260日)では若干小さくなる傾向にある。そこで、保守側に1050日における温度条件を、照射期間中を通して一貫して用いるものとした。また、第7.1.2図に示したような温度対称性がほぼ成立しているので、サブチャンネル#54および#72に面する被覆管肉厚中心温度は、それぞれ#25および#55に面する温度に等しいとすることで簡略化した。1050日におけるサブチャンネル#25、#55、および#73に面する被覆管肉厚中心温度を第7.1.3図に示した。

第7.1.3図には、最大発熱部と最高温度部を示したが、それぞれピン下端固定位置から704mmおよび878mmの位置に相当するものとした。

## (6) 拘束条件

第5章で示したように、BDIに起因する応力はワイヤ巻付けピッチが短いほど大きくなるので、ワイヤ巻付けピッチは公称値203mmではなく、製作誤差を考慮した下限値193mmとした。縦方向拘束点はピン下端固定位置とした。周方向温度差に起因する応力を評価する上では横方向拘束点の総数と間隔は適当で良い(cf. 第3章)こと、およびBDIに起因する曲がりを模擬する上で、横方向拘束点の間隔を1/2ワイヤピッチ長さとする必要がある(cf. 第5章)ことで、横方向拘束点はピン下端固定位置を含め、その位置から1/2ワイヤピッチ毎の18点と上端の計19点とした。

PYTHON-SHADOW解析で得られている1260日でのBDI量軸方向分布を第7.1.4図に示した。BDI量が正となっている軸方向範囲はおおよそ400mm~800mmの範囲であり、最大発熱部はこの範囲内に含まれるが、最高温度部は範囲外である。また、この範囲内に含まれる横方向拘束点は4点である。この4点のうち、ワイヤピッチ長さだけ離れた2点を選定し、選定した2点にBDIに起因する曲がりを模擬するための変位を与えるものとした。このようにして、第7.1.1表に示したケース1およびケース2の2通りを選定した。また、ケース1にて得られた解析結果の妥当性を考察するため、ケース1で選定したBDIに起因する曲がりを模擬するための変位を与える2点のうち上方の1点を通常の拘束点に変更したケース(ケース3)も追加解析した。

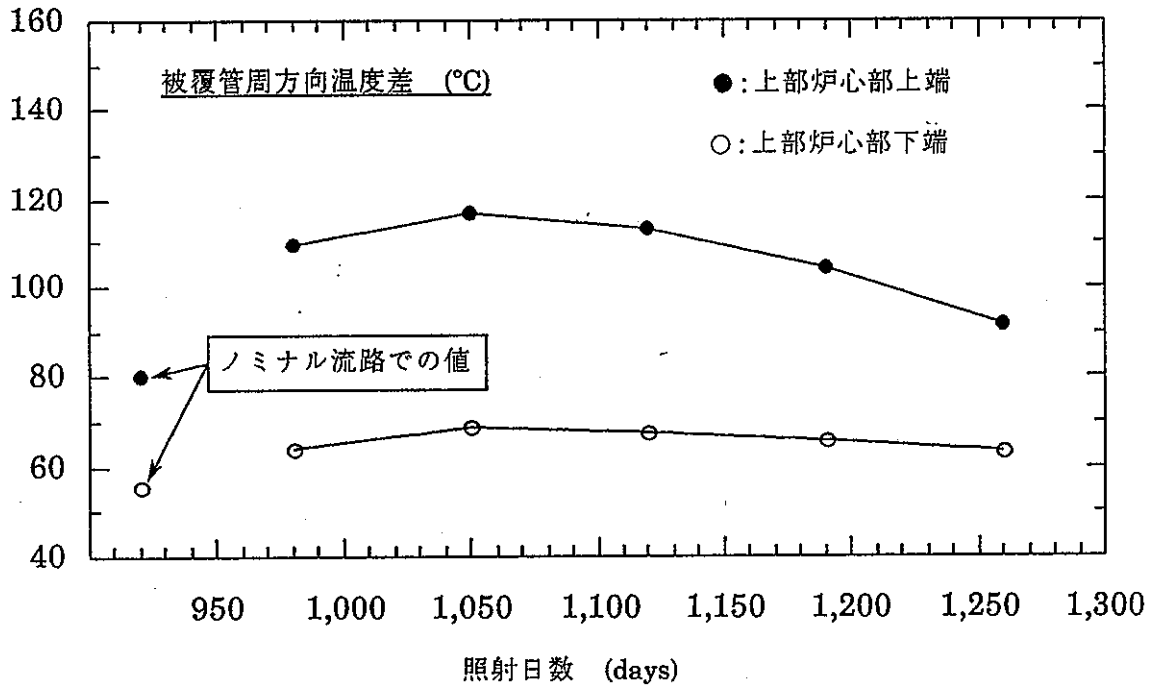
第7.1.5図に、PYTHON-SHADOW解析で得られているBDI量最大値(軸方向ピーク値)の経日変化を示した。950日頃に正となり、直線的に増加し、末期には1.43dwとなっている。GE社実施の、FFTF仕様の燃料ピンを用いた炉外BDI試験結果では、ピンとラップ管間のギャップ巾はBDI量の増加とともに直線的に減少し、BDI量が2.15dwに達した時点でギャップ巾は零になっている。すなわち、BDI量が2.15dwに達したときに、ピンはワイヤ径1本分曲がるとのデータがある。『常陽』特燃も同様の挙動を示すと仮定すると、BDI量が1.43dwとなる1260日でのピン曲がり量は、 $1.3 \times 1.43 / 2.15 = 0.865 \text{mm}$ となる。そこで、950日までは変位量を零とし、950日から1260日まで一定速度で増加し、1260日での変位量が0.865mmになるものとした。尚、変位方向(強制曲がり方向)は、第7.1.2図に示したように、サブチャンネル#73へ向かう方向(ラップ管コーナ方向に相当する方向)である。

## (5) 高速中性子束条件

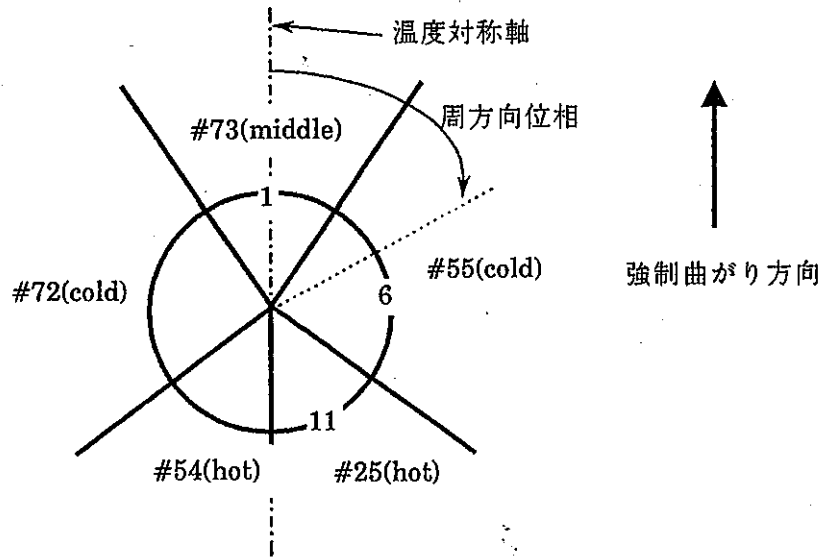
第7.1.6図に示した軸方向分布を用いた。

第7.1.1表 『常陽』特燃解析ケース毎拘束条件 (ケース1/ケース2/ケース3)

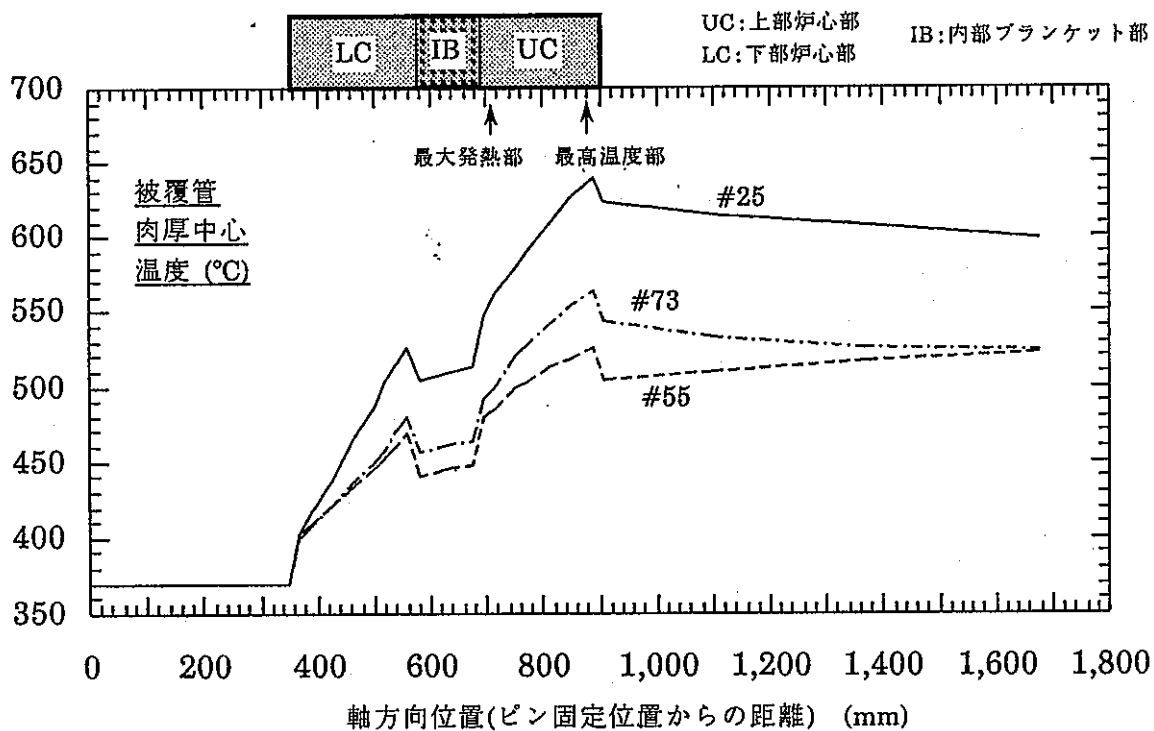
拘束点の 軸方向 位置 (mm)	拘束点における変位量(ケース1 / ケース2 / ケース3)			拘束点の 軸方向 位置 (mm)	拘束点にお ける変位の 有無
	変位の 有無	変位開始時期 (日)	末期における変位量 (mm)		
0	無	—	—	868.5	無
96.5	無	—	—	965.0	無
193	無	—	—	1061.5	無
289.5	無	—	—	1158.0	無
386	無	—	—	1254.5	無
482.5	無 / 有 / 無	— / 950 / —	— / 0.865 / —	1351.0	無
579.0	有 / 無 / 有	950 / — / 950	0.865 / — / 0.865	1447.5	無
675.5	無 / 有 / 無	— / 950 / —	— / 0.865 / —	1544.0	無
772.0	有 / 無 / 無	950 / — / —	0.865 / — / —	1640.5	無
—	—	—	—	1679.1	無



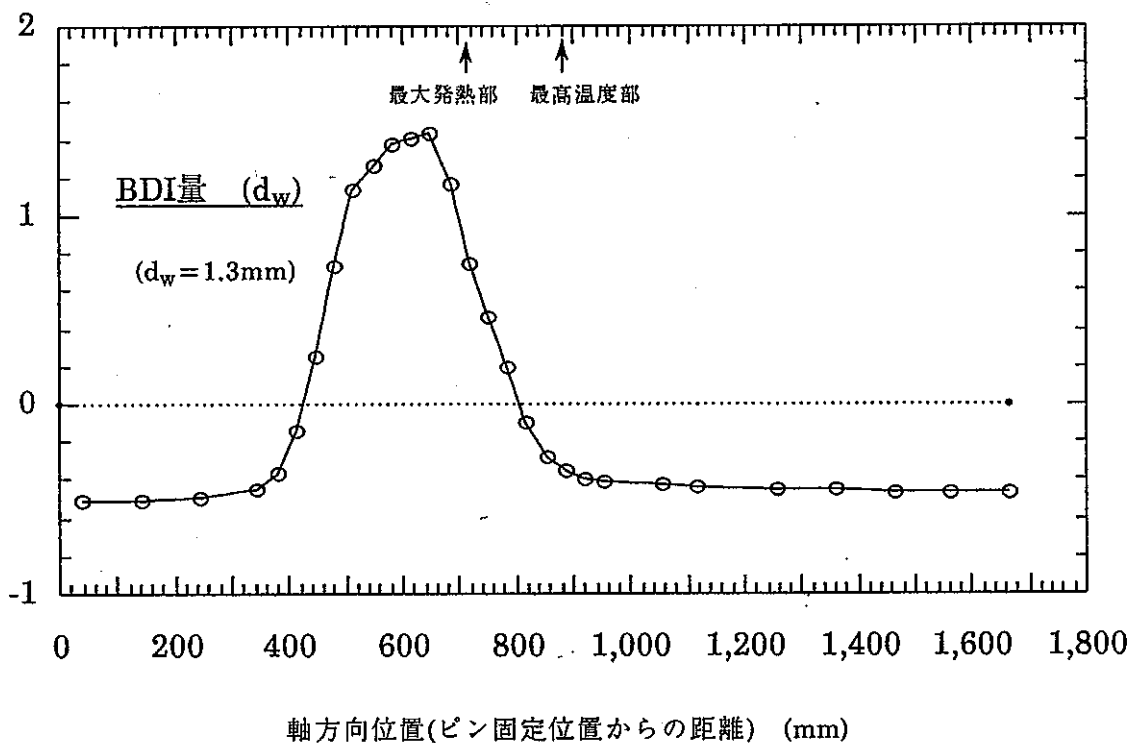
第7.1.1図 『常陽』特燃被覆管周方向温度差の経日変化



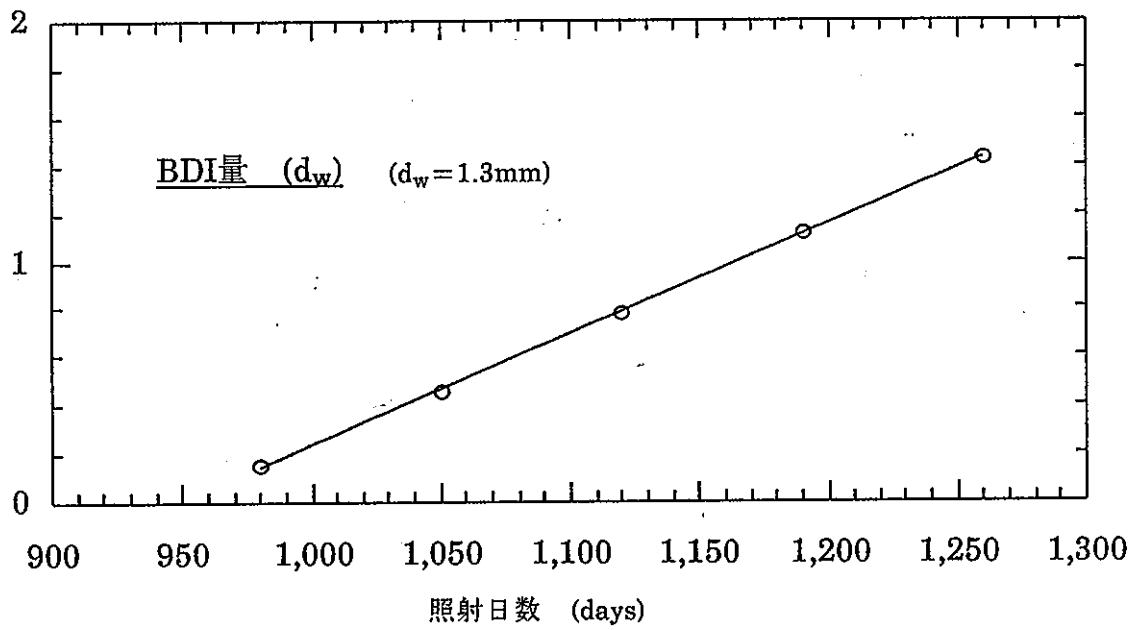
第7.1.2図 コーナピン#20を囲むサブチャンネルの番号、周方向位置一貫番号、温度対称軸、および強制曲がり方向



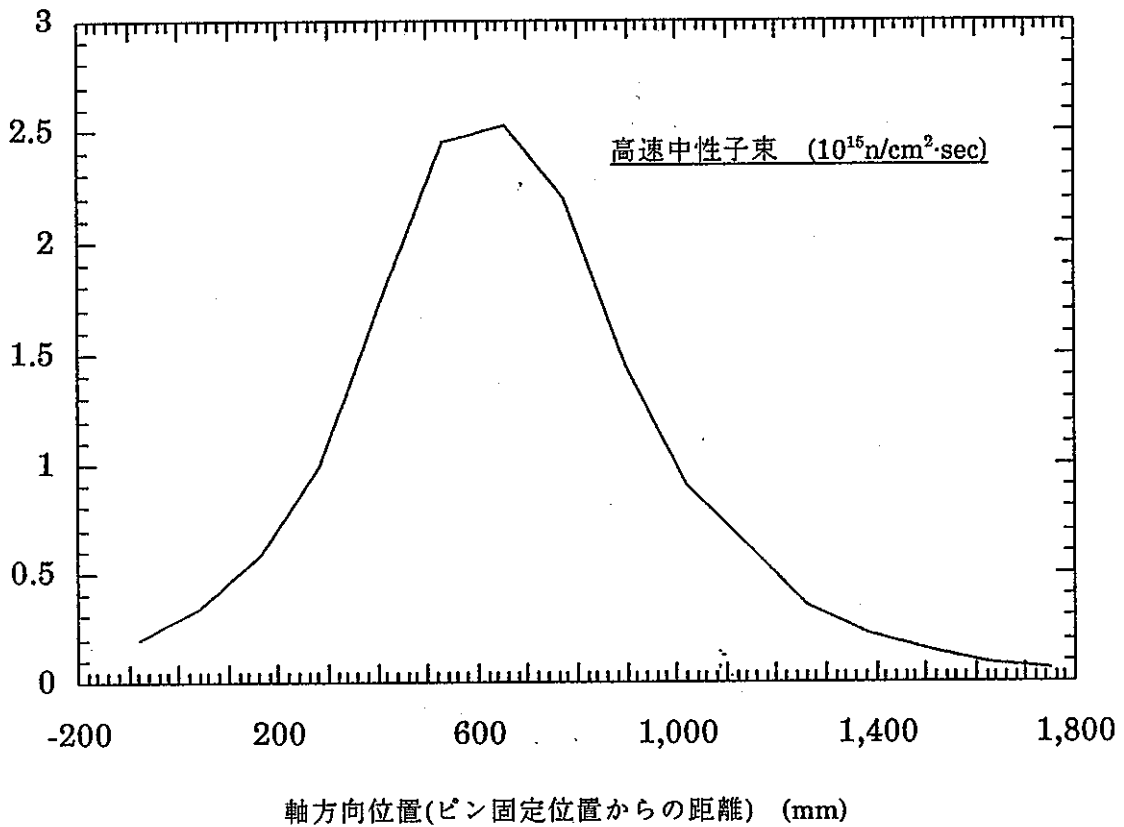
第7.1.3図 1050日における被覆管肉厚中心温度の軸方向分布



第7.1.4図 照射末期(1260日)におけるBDI量の軸方向分布



第7.1.5図 BDI量最大値(軸方向ピーク値)の経日変化



軸方向位置(ピン固定位置からの距離) (mm)

第7.1.6図 高速中性子束軸方向分布



## 7.2 解析結果および結論

ELBOW6Rを使用したので、軸方向応力だけではなく周方向応力も求まっているが、周方向応力は軸方向応力より小さいこと、および従来設計では湾曲拘束による周方向応力を計上していないことから、周方向応力解析結果は割愛した。950日まではBDIに起因する強制曲がりが発生しない条件としているので、ケース1~3の950日までの解析結果は完全に一致している。また、熱膨張ひずみおよびスエリングひずみも完全に一致している。尚、付録に収録した付図(プロッタ出力結果)において使用の番号(1、6、および11)は、周方向位置を示すための一貫番号であり、第7.1.2図にて説明している。

第7.2.1表に、最大発熱部および最高温度部における被覆管肉厚中心での被覆管軸方向応力解析結果をまとめた。また第7.2.2表に、被覆管肉厚中心での被覆管軸方向応力最大値解析結果をまとめた。

第7.1.3図に示したように、サブチャンネル#73の温度(middle)は#55(cold)の温度に近いので、被覆管は周方向に関して高温部が狭く、低温部が広いと考えて良い(cf. 第1.2図)。このため、照射初期の応力は、高温部(圧縮側)における方が低温部(引張側)におけるよりも絶対値として大きい傾向が得られている。照射末期の応力についても同様の理由で、スエリングひずみの小さい高温部(引張側)における方が低温部(圧縮側)におけるよりも絶対値として大きい傾向になっている。(尚、照射末期ではBDIの影響があるものの、BDIに起因する応力は圧縮側と引張側で絶対値が等しいので、上記傾向が保存される。)

湾曲拘束(スエリング差とBDI)に起因する応力は、最大発熱部から最高温度部までの軸方向範囲内で最大となっている。高速中性子束は最大発熱部付近で最大である(cf. 第7.1.6図)こと、周方向温度差は最高温度部で最大である(cf. 第7.1.3図)ことから、スエリング差に起因する応力がその範囲内で最大になることに起因していると推定できる。

スエリングピーク温度が450°Cなので、最大発熱部から上の軸方向範囲では一様に低温部に圧縮応力、高温部に引張応力が生じることに對し、BDIに起因する応力は、第7.2.1図に+および-で示したように、軸方向位置によって引張/圧縮側が変化する。最大発熱部におけるスエリング差とBDIに起因する応力は、ケース1とケース3では大きくなるように、またケース2では打ち消し合うように重畳していると推定できる。いずれのケースにおいても圧縮側の応力の大きさがほとんど変わらないのは、BDIによる応力がスエリング差による応力と比較して小さいた

めと推定できる。最高温度部におけるスエリング差とBDIに起因する応力は、ケース1では大きくなるように、ケース2では打ち消し合うように重畳していると推定できる(ケース3ではBDIによる応力は無視できる。)。最高温度部での圧縮側の応力はケースにより異なっており、スエリング差による応力がBDIによる応力並みに小さいためと推定できる。

第7.2.2図に、照射末期における拘束荷重軸方向分布解析結果を、また第7.2.3図に、拘束荷重経日変化解析結果を示した。スエリングのない仮想的条件では、強制変位点(強制曲がりを与えた拘束点)での荷重は正になるべきであるが、ケース1における上方の強制変位点では負になるとの結果が得られた。そこで、この点を通常の拘束点としたケース3を追加解析し、この点を低温側に変位させようとする湾曲モーメントがスエリングのため生じていることを確認した。

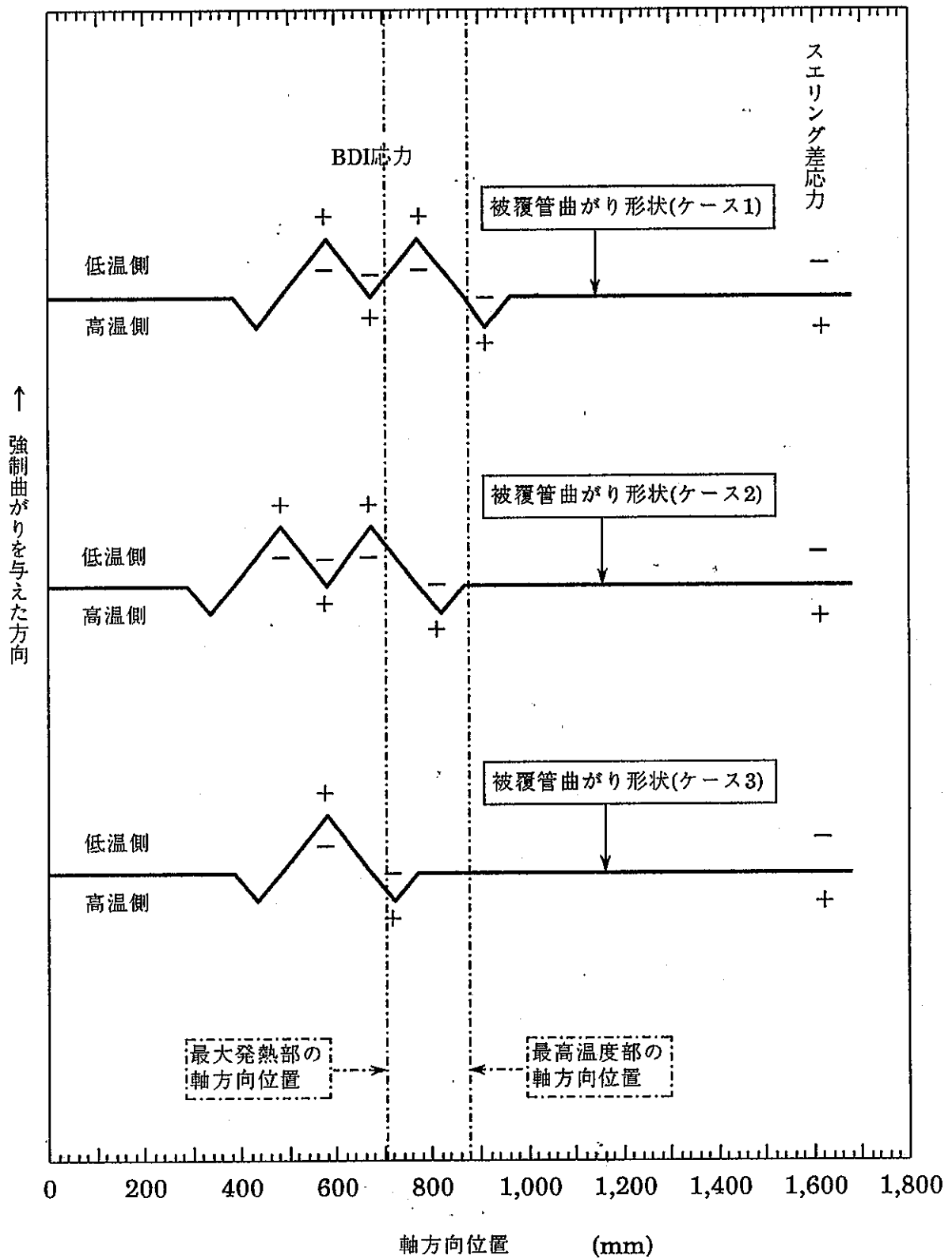
結論として、湾曲拘束に起因する応力は従来の設計例と比較して大きく、また、周方向温度差に起因する応力はBDIに起因する応力よりも大きい(すなわち、周方向温度差に起因する応力が支配的である)ことが分かったと云える。271本ピンバンドルではなく、37本少数ピンバンドルであるため、被覆管の周方向温度差は最大約120°Cと大きいためである。

第7.2.1表 最大発熱部、最高温度部の肉厚中心での被覆管軸方向応力解析結果

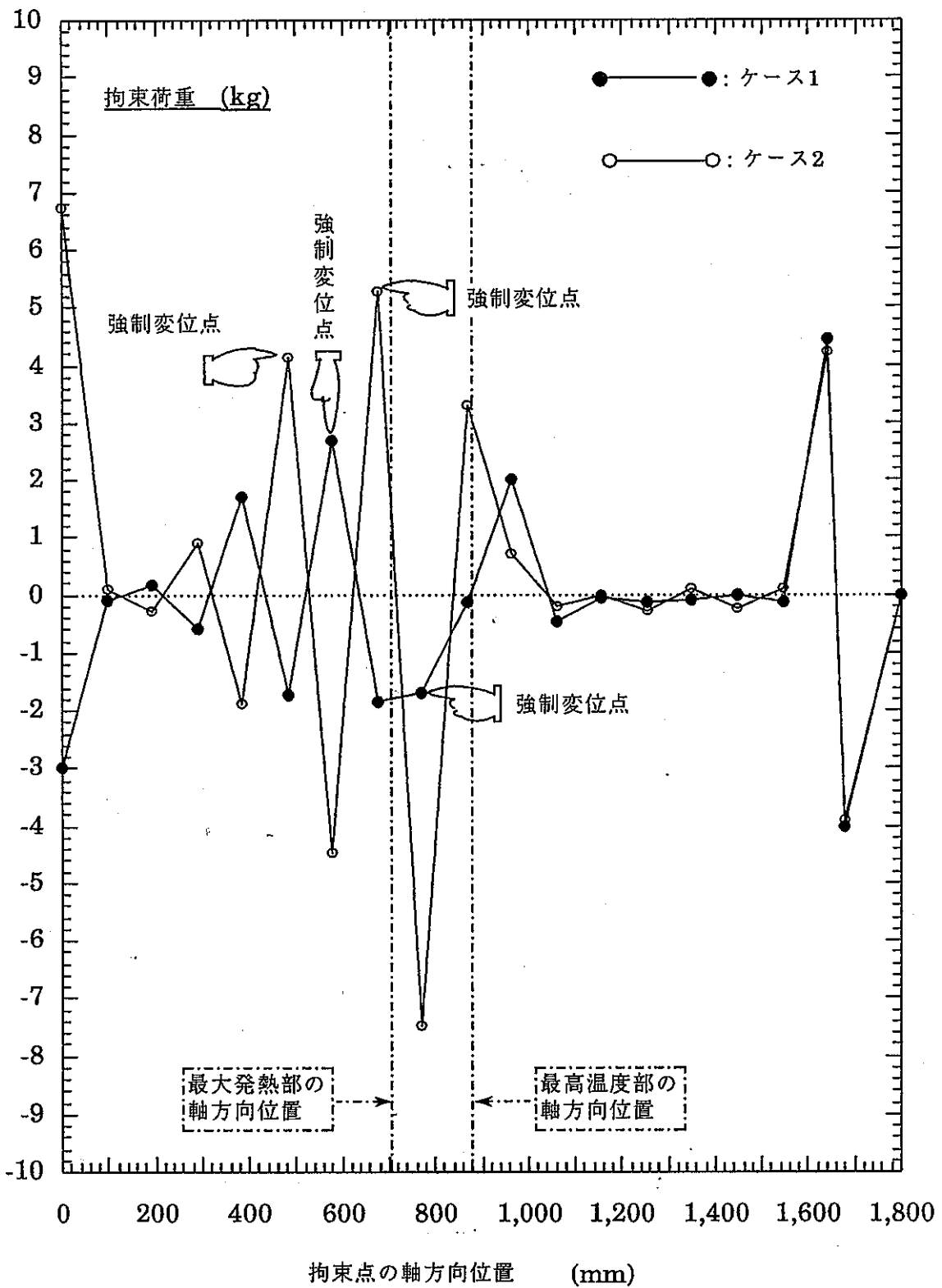
評価時期	最大発熱部 (軸方向位置 : 704 mm)				最高温度部 (軸方向位置 : 878 mm)			
	引張側		圧縮側		引張側		圧縮側	
	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	位相 (°)	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	位相 (°)	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	位相 (°)	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	位相 (°)
照射初期	10.9	97.5 &262.5	-18.4	142.5 &217.5	18.1	97.5 &262.5	-28.5	172.5 &187.5
照射中期	0.13	142.5 &217.5	-0.08	97.5 &262.5	0.01	7.5 &352.5	-0.01	172.5 &187.5
照射末期 (ケース1)	21.0	142.5 &217.5	-11.5	97.5 &262.5	8.0	172.5 &187.5	-5.9	37.5 &322.5
照射末期 (ケース2)	16.8	142.5 &217.5	-11.5	97.5 &262.5	3.6	142.5 &217.5	-2.6	52.5 &307.5
照射末期 (ケース3)	20.5	142.5 &217.5	-11.4	97.5 &262.5	4.6	172.5 &187.5	-3.2	52.5 &307.5

第7.2.2表 肉厚中心での被覆管軸方向応力最大値解析結果

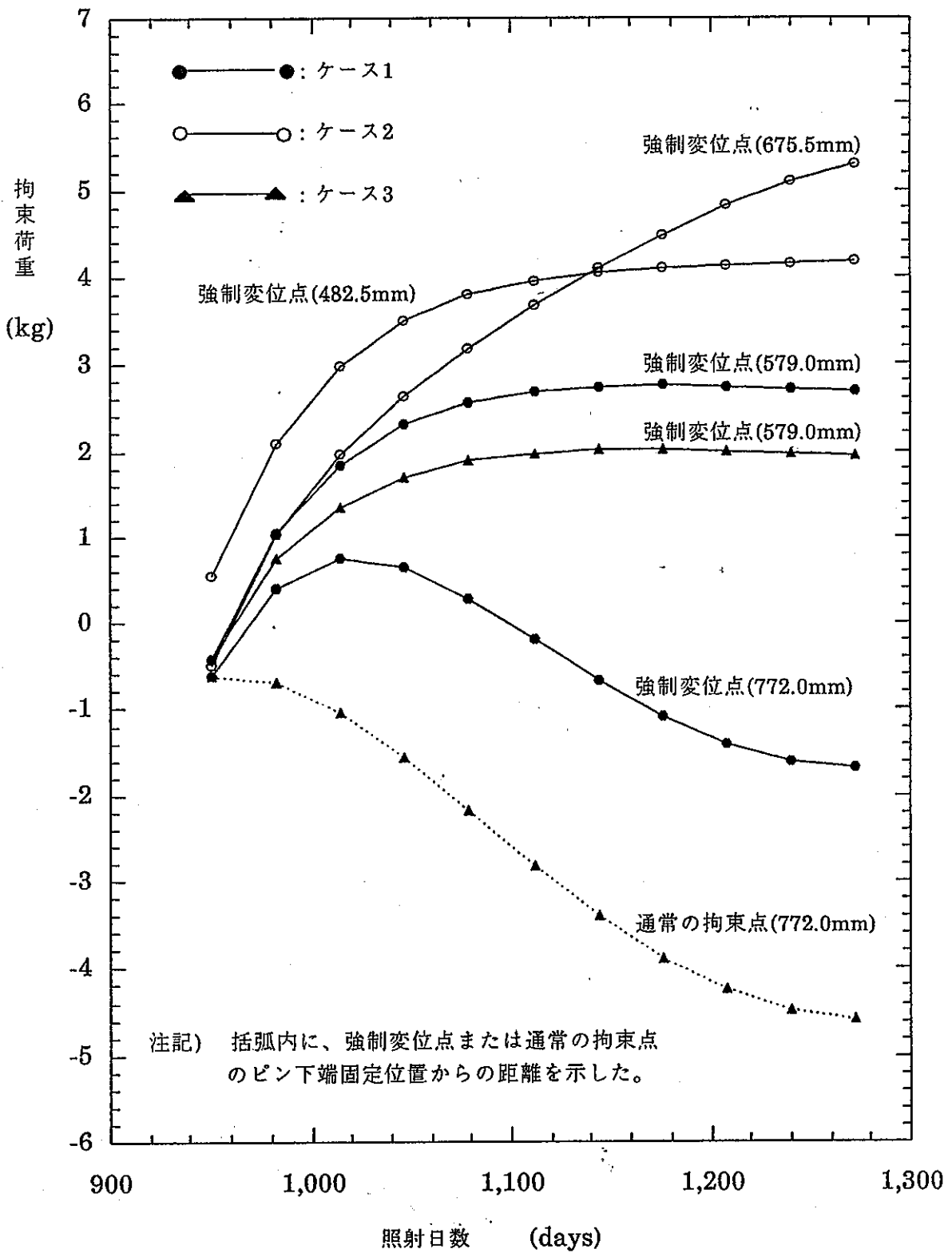
評価時期	最大応力と、その軸方向位置および周方向位置					
	引張側			圧縮側		
	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	軸方向位置 (mm)	周方向位置 (サブチャンネル)	応力 (kg/mm <sup>2</sup> )	軸方向位置 (mm)	周方向位置 (サブチャンネル)
照射初期	18.7	917	#6 (cold)	-29.1	936	#25 (hot)
照射中期	8.7	1631	#6 (cold)	-16.0	1631	#25 (hot)
照射末期 (ケース1)	23.2	762	#25 (hot)	-15.4	782	#6 (cold)
照射末期 (ケース2)	30.0	782	#25 (hot)	-16.2	782	#6 (cold)
照射末期 (ケース3)	27.3	762	#25 (hot)	-15.8	782	#6 (cold)



第7.2.1図 スエリング差とBDIに起因する応力の重畳挙動を考察するためのイラスト



第7.2.2図 照射末期における拘束荷重解析結果



第7.2.3図 拘束荷重経日変化解析結果

## 8. まとめと今後の課題

本検討にて得られた主要な結論を、以下にまとめた。

- (1) 湾曲拘束に起因する応力として、軸方向応力の膜成分を評価するだけならば、3節点中空円形断面配管要素PIPE3を使用することで十分であり、計算時間の観点で、PIPE3の方が6節点配管要素ELBOW6Rと比較して圧倒的に有利である。
- (2) 周方向温度差やBDIに起因して発生する応力は軸方向応力が主体的であり、周方向応力は軸方向応力と比べて小さい。尚、軸方向応力は膜成分が、また周方向応力は曲げ成分がそれぞれ主体的である。また、周方向温度差に起因して発生する応力は、被覆管を囲むサブチャンネル間の温度差に依存するが、サブチャンネル境界での温度勾配にはほとんど依存しない。
- (3) 大型炉61年度レファレンス炉心における周方向温度差に起因する被覆管軸方向応力の大きさは、次のような値となるが、湾曲拘束条件の不確かさのため高々50%程度の不確かさがある。尚、BDIは十分小さいので、BDIに起因する応力は無視できる。

評価時期	照射初期	照射中期	照射末期
引張り応力	5.7 kg/mm <sup>2</sup>	2.7 kg/mm <sup>2</sup>	7.0 kg/mm <sup>2</sup>
圧縮応力	-8.5 kg/mm <sup>2</sup>	-4.7 kg/mm <sup>2</sup>	-6.0 kg/mm <sup>2</sup>

- (4) BDI発生に起因する被覆管強制曲がり挙動が与えられることを前提とするが、BDIに起因する被覆管応力を評価できる見通しが得られた。尚、BDI量が同じならば、被覆管強制曲がり量は巻付けピッチ長さに関係なく同じになるという条件では、巻付けピッチを短くすると、BDIに起因する被覆管応力が大きくなる。また、曲がり速度が速いほど、BDI発生に起因する被覆管応力が大きくなる。
- (5) 周方向温度差とBDIに起因する応力をそれぞれ別個に評価しなくとも、一括して一度に評価できることや、被覆管温度分布の経日変化を考慮して評価できる。

以下、今後の課題を列挙する。

- (1) 燃料要素束炉内変形挙動評価、および変形流路場での燃料集合体内温度分布評価に適用できる、271本大型ピンバンドル用解析コードの開発・検証が必要である。

(2) 同解析コードにて求まる温度条件および湾曲拘束条件の下で、湾曲拘束に起因する応力を再度評価することにより、湾曲拘束条件の不確かさに伴う発生応力の不確かさを、燃料強度評価上どのように取扱うべきかを明らかにする必要がある。

(3) 271本大型ピンバンドルでは、ワイヤコンタクトに起因する被覆管温度の局所の上昇巾がサブチャンネル解析にて得られるサブチャンネル間温度差と比べて無視できない。したがって、周方向温度差に起因する応力評価の際の、ワイヤコンタクトに起因する周方向温度変化の取り扱い方を検討する必要がある。

(4) BDI発生に起因する最外層燃料要素強制曲がり量のワイヤ巻付けピッチ依存性を炉外BDI模擬試験等にて明らかにし、得られた知見に基づき強制曲がり量条件を設定し、BDIに起因する被覆管応力のワイヤ巻付けピッチ依存性を再度評価することが望ましい。



## 謝 辞

第1章で引用の61年度レファレンス炉心燃料集合体内温度分布データ(PYTHONによる解析結果)は、プラント工学室大久保良幸副主研より提供頂いた。また、第7章『「常陽」特燃の湾曲拘束に起因する被覆管応力の評価』を実施するに当たり、PYTHON-SHADOW解析結果を東海設計開発課伊藤研究員等より提供頂いた。

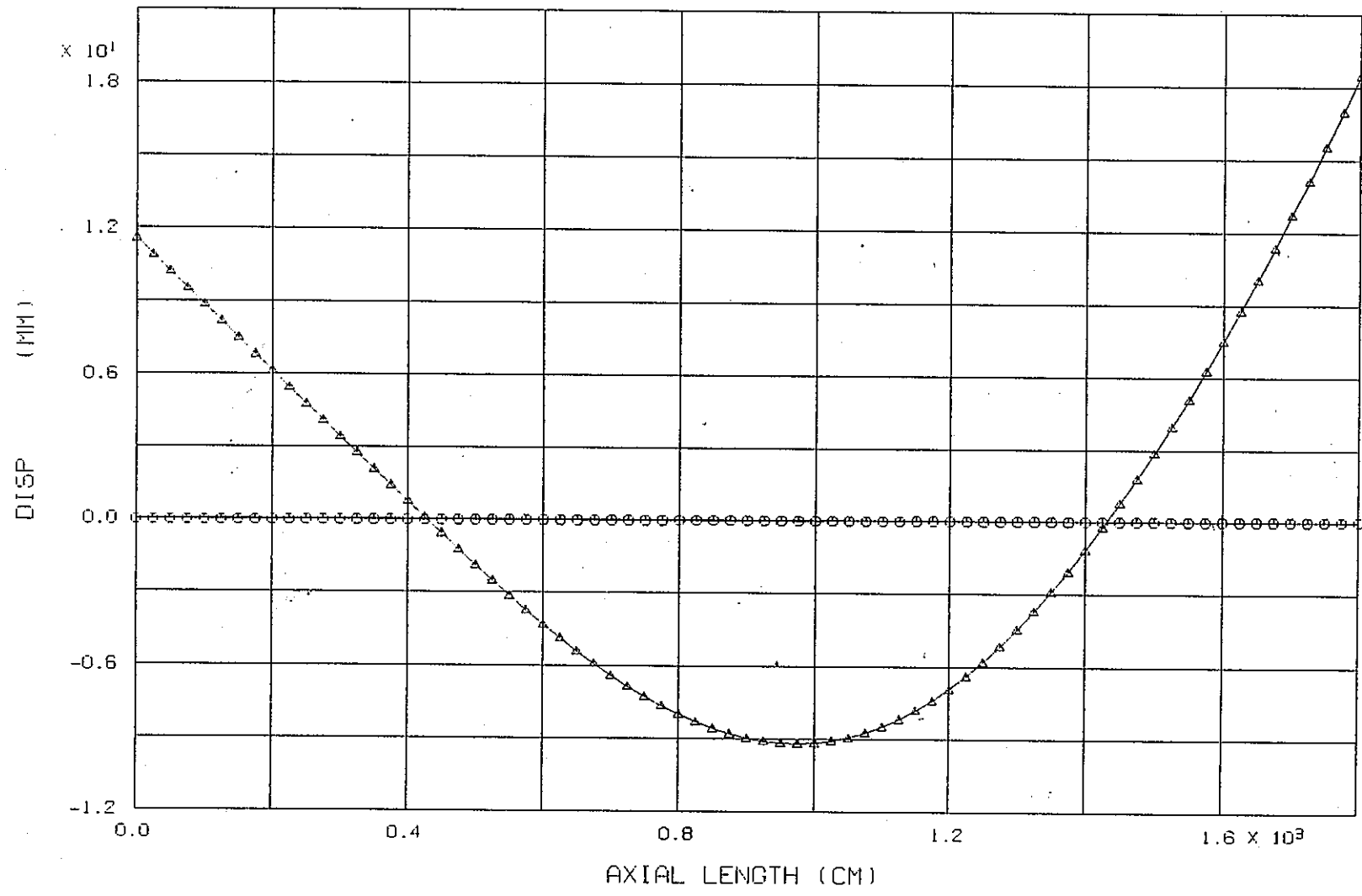
## 付 録

第3章～第7章の解析結果プロッタ図を次頁以降に収録した。

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077

○  
DISP1  
△  
DISP2



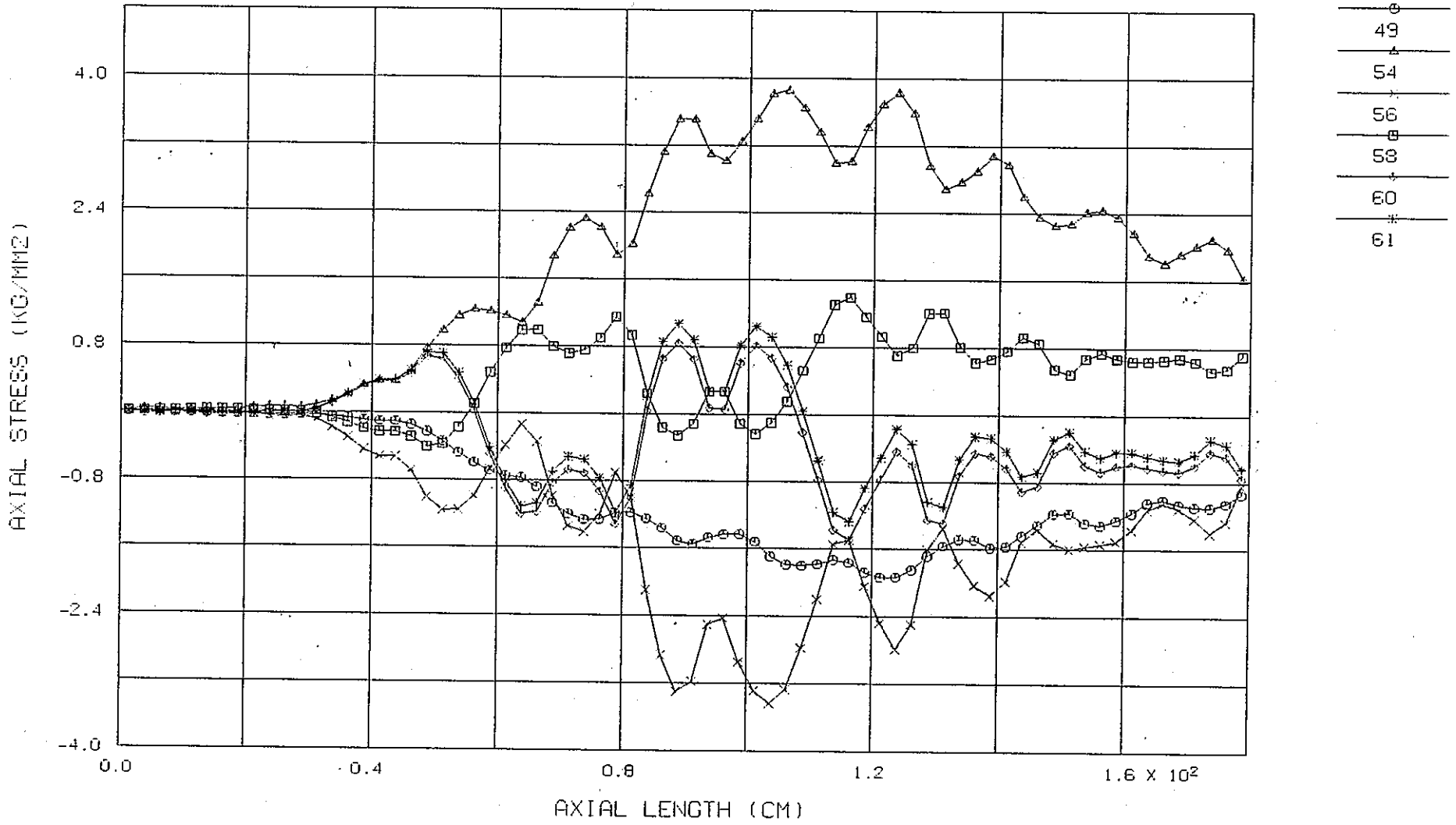
- 62 -

NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( REF )

付図3-P0-1 湾曲形状解析結果(ケース:P0)

FINAS  
STEP NO. 1



— 63 —

ELM NO. 1-711 ( PIPE3 \* 72 ) ( REF )

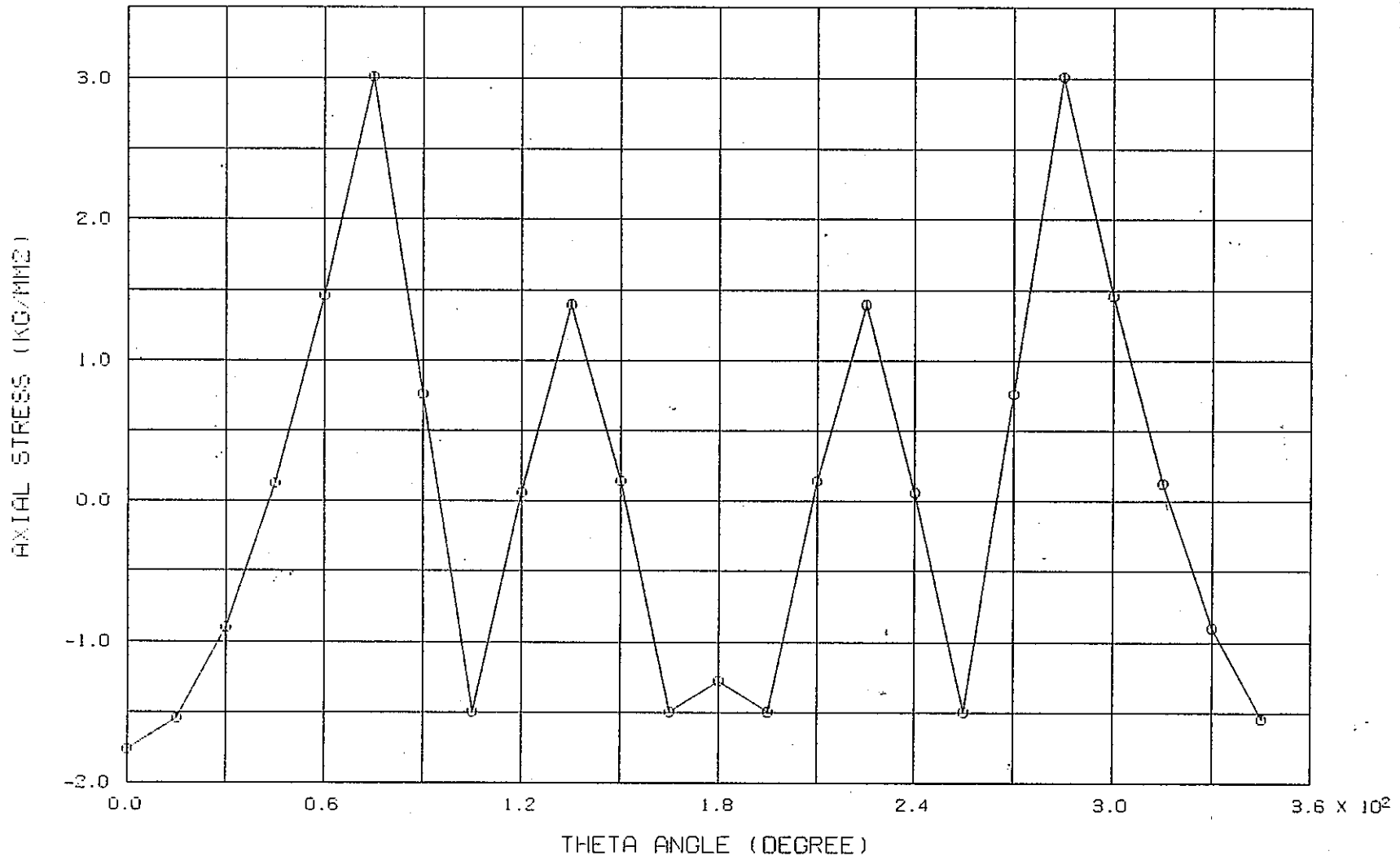
付図3-P0-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P0)

FINAS  
STEP NO. 1

43 - 72

PNC TN9410 89-077

— 64 —



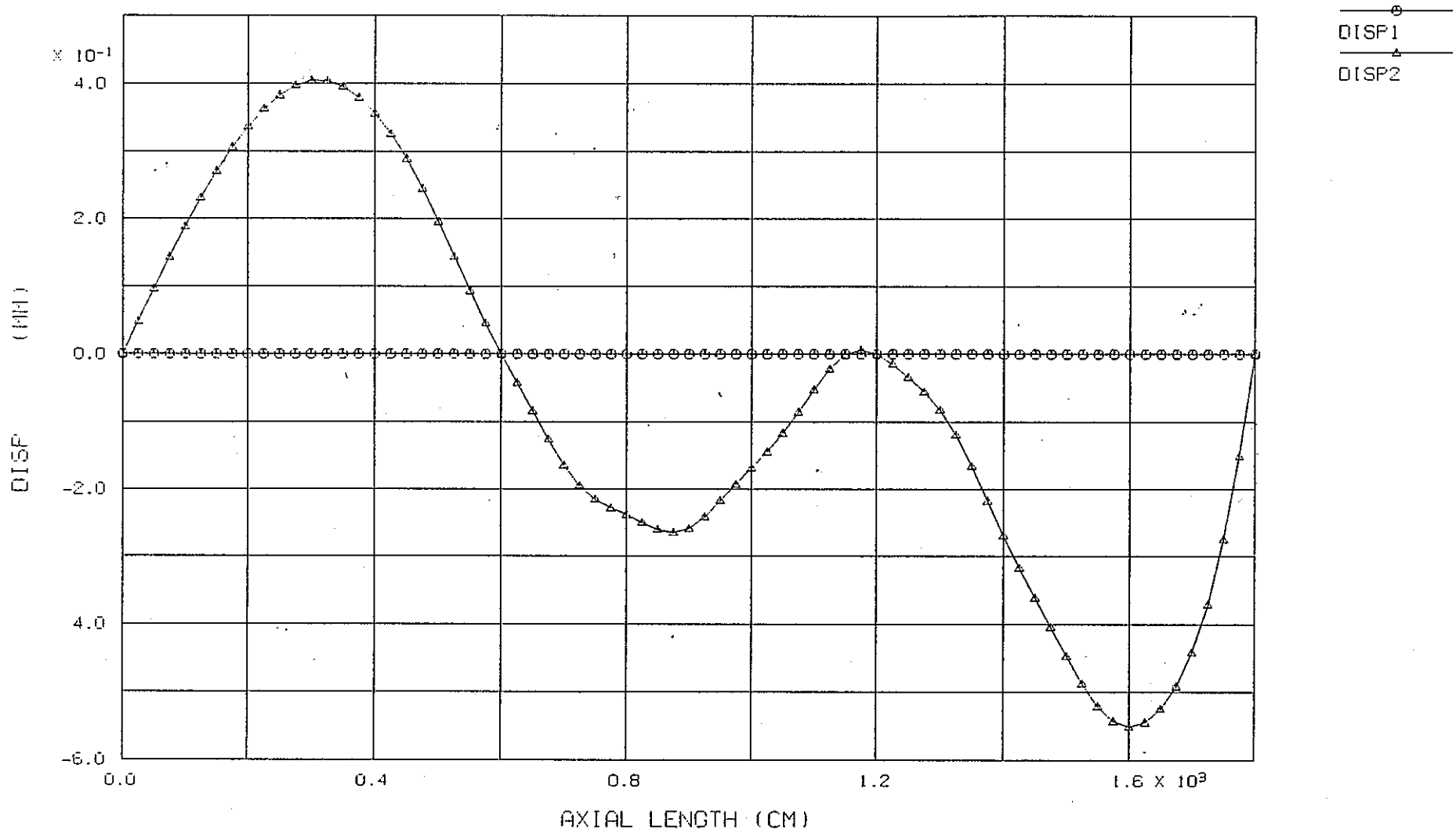
ELEMENT NO. 461

( PIPE3 \* 72 ) ( REF )

付図3-P0-3 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:P0、軸方向位置:1162.5 mm)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077

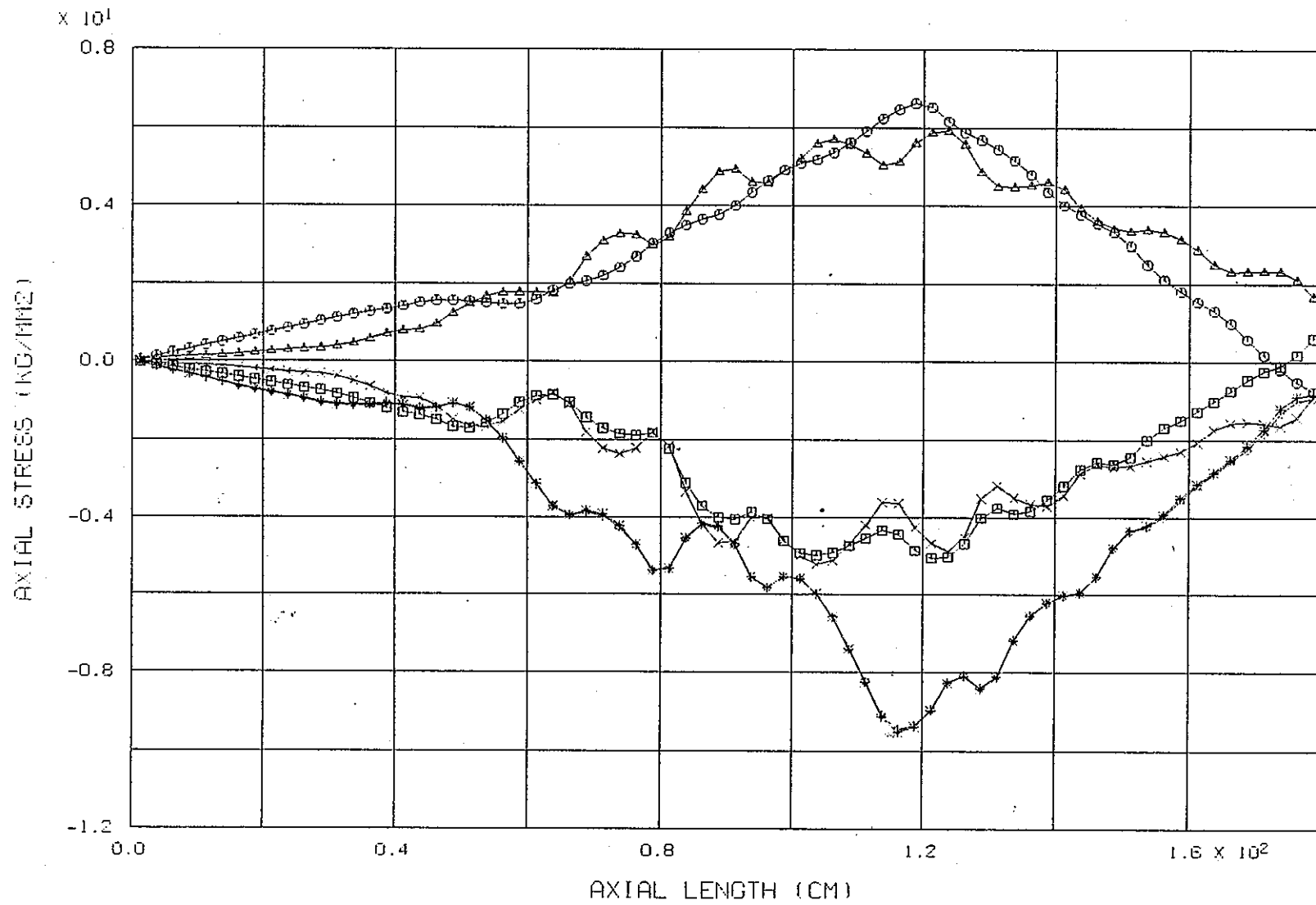


NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( 600MM )

付図3-P4-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4)

FINAS  
STEP NO. 1



- 49
- △ 54
- × 56
- 58
- ◇ 60
- ⊕ 61

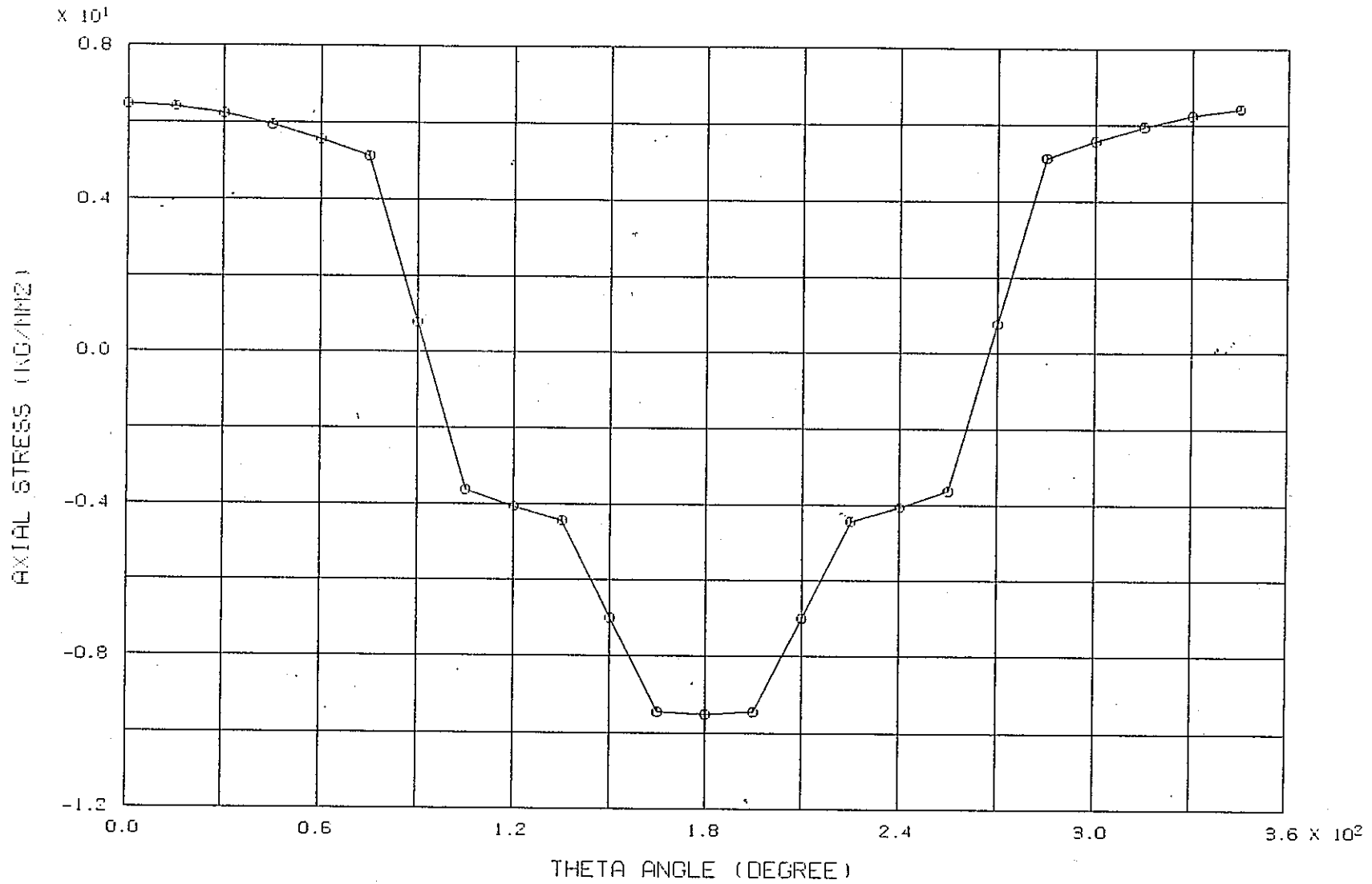
PNC TN9410 89-077

ELM NO. 1-711

( PIPES # 72 ) ( 600MM )

付図3-P4-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4)

FINAS  
STEP NO. 1

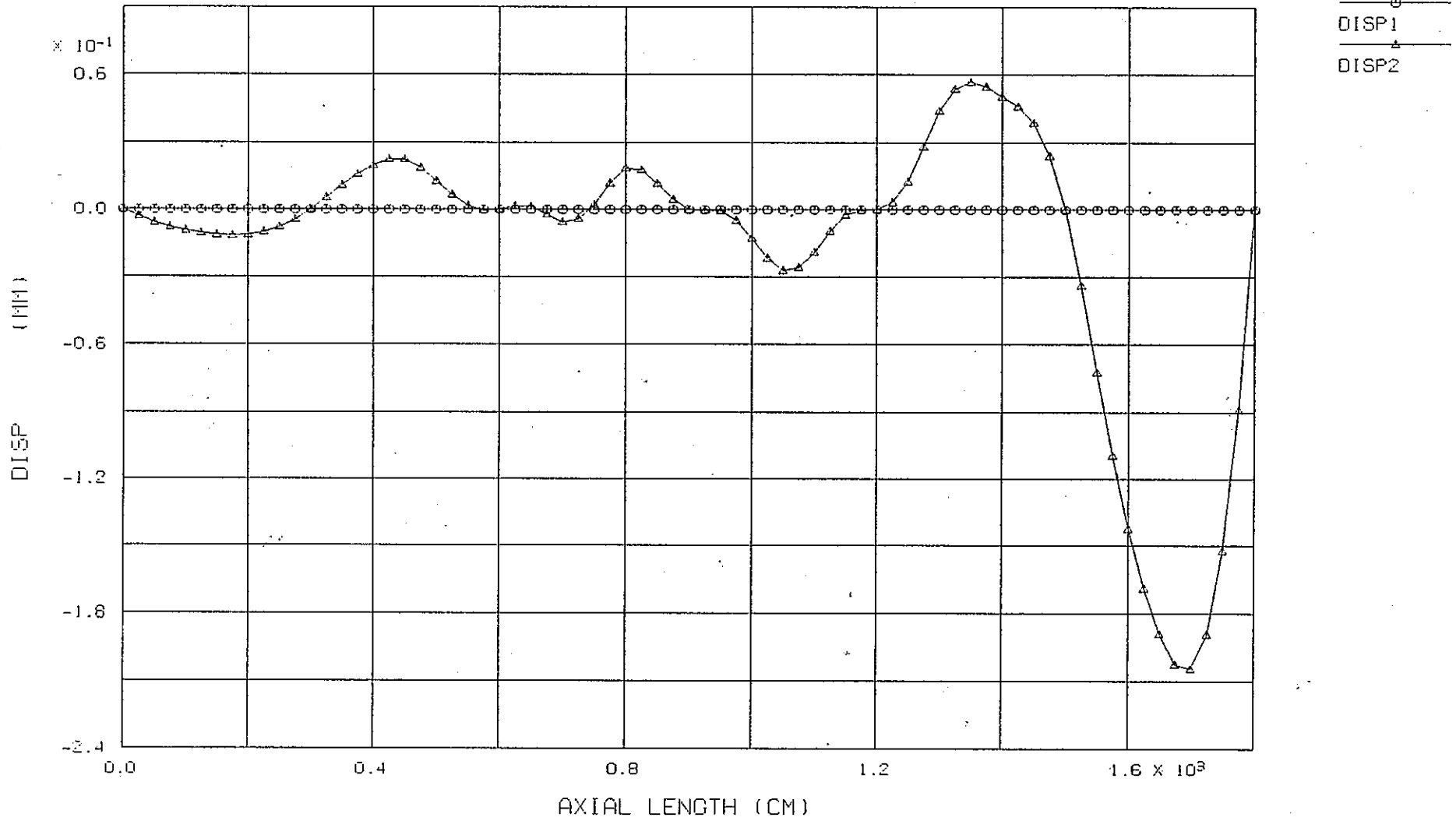


49 - 72

ELEMENT NO. 461 ( PIPE3 \* 72 ) ( 600MM )

付図3-P4-3 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:P4、軸方向位置:1162.5 mm)

FINAS  
STEP NO. 1

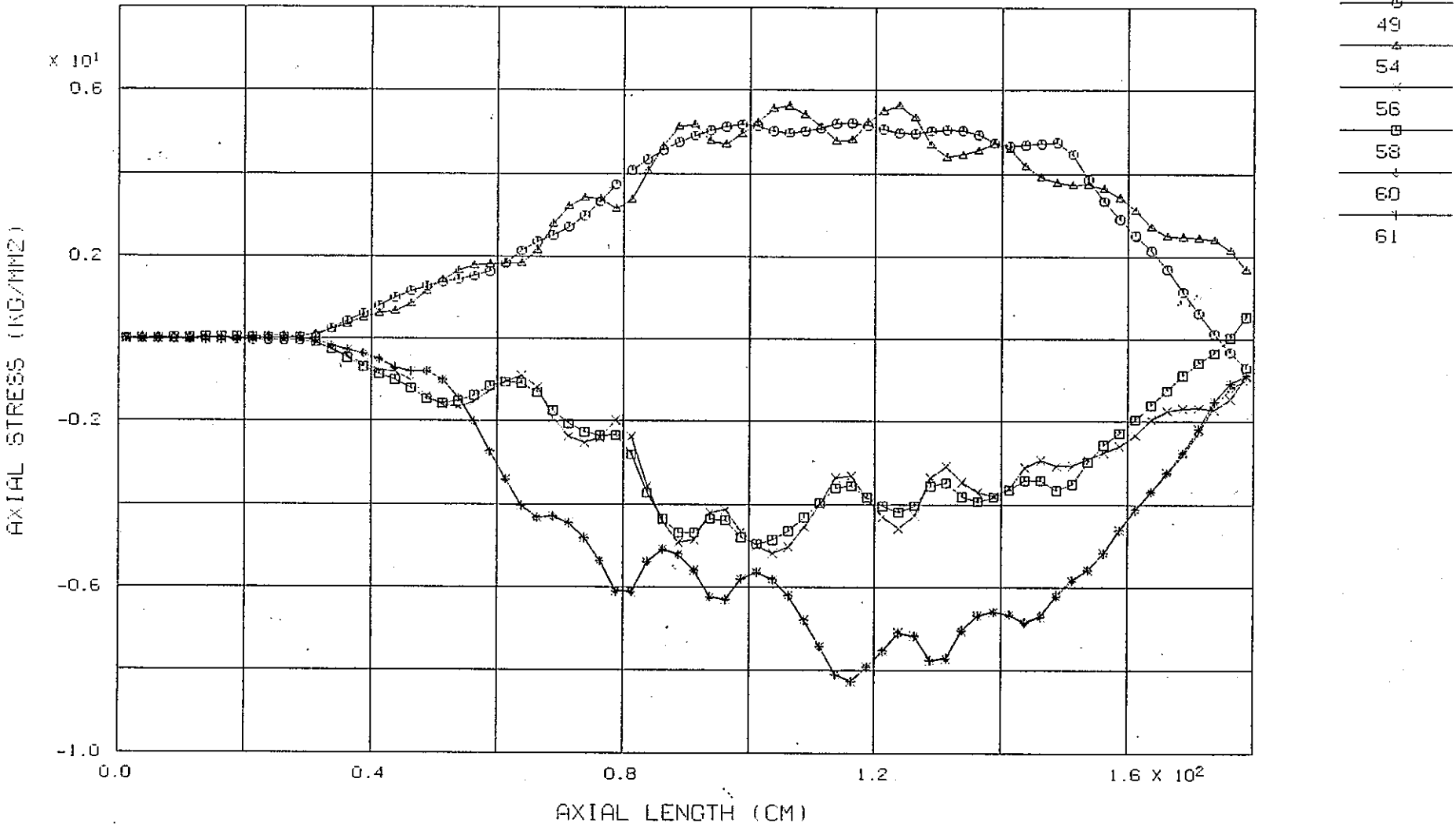


NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( 300MM )

付図3-P7-1 湾曲形状解析結果(ケース:P7)





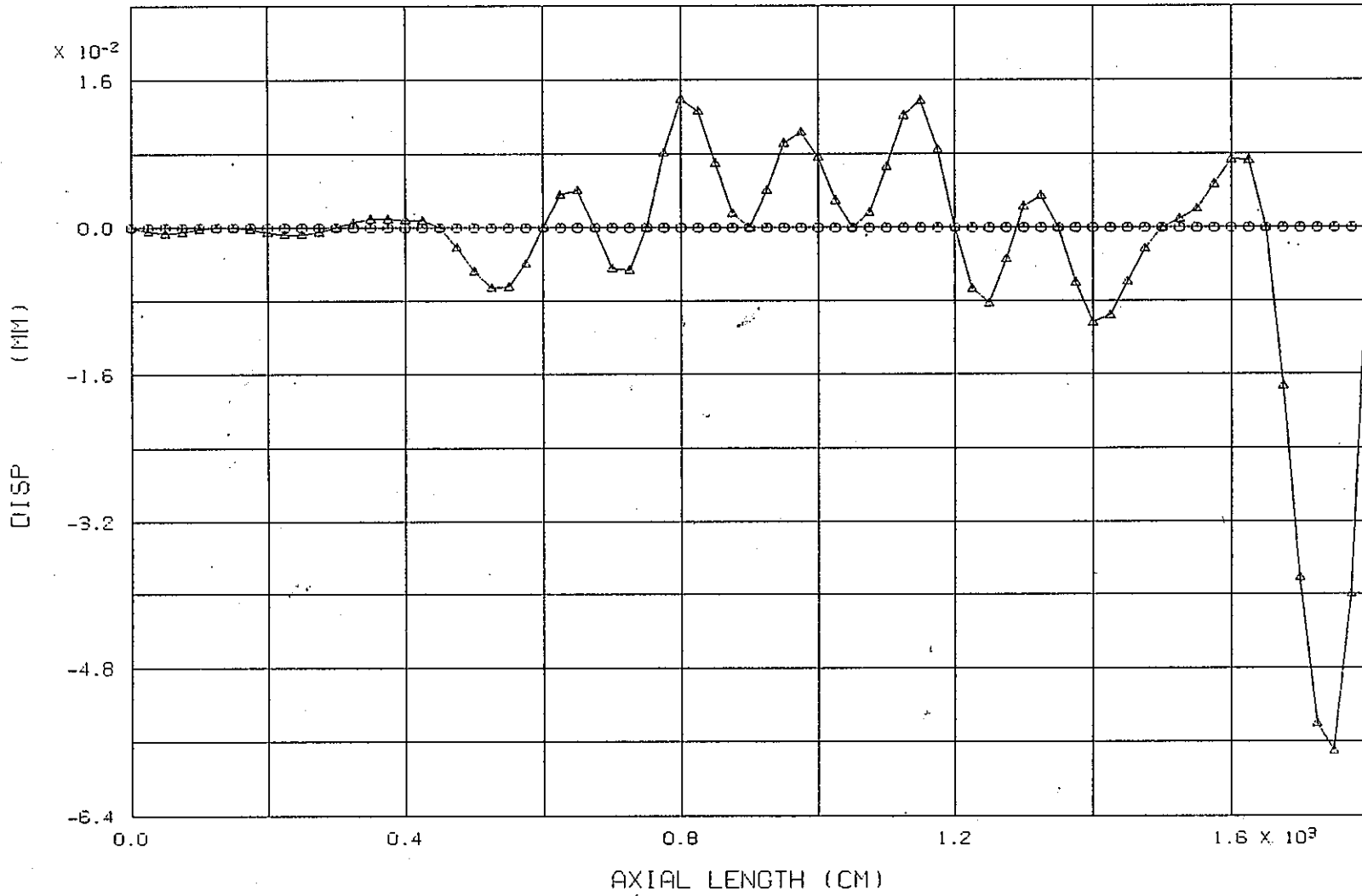
ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( 300MM )

付図3-P7-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P7)

FINAS  
STEP NO. 1

DISP1  
DISP2

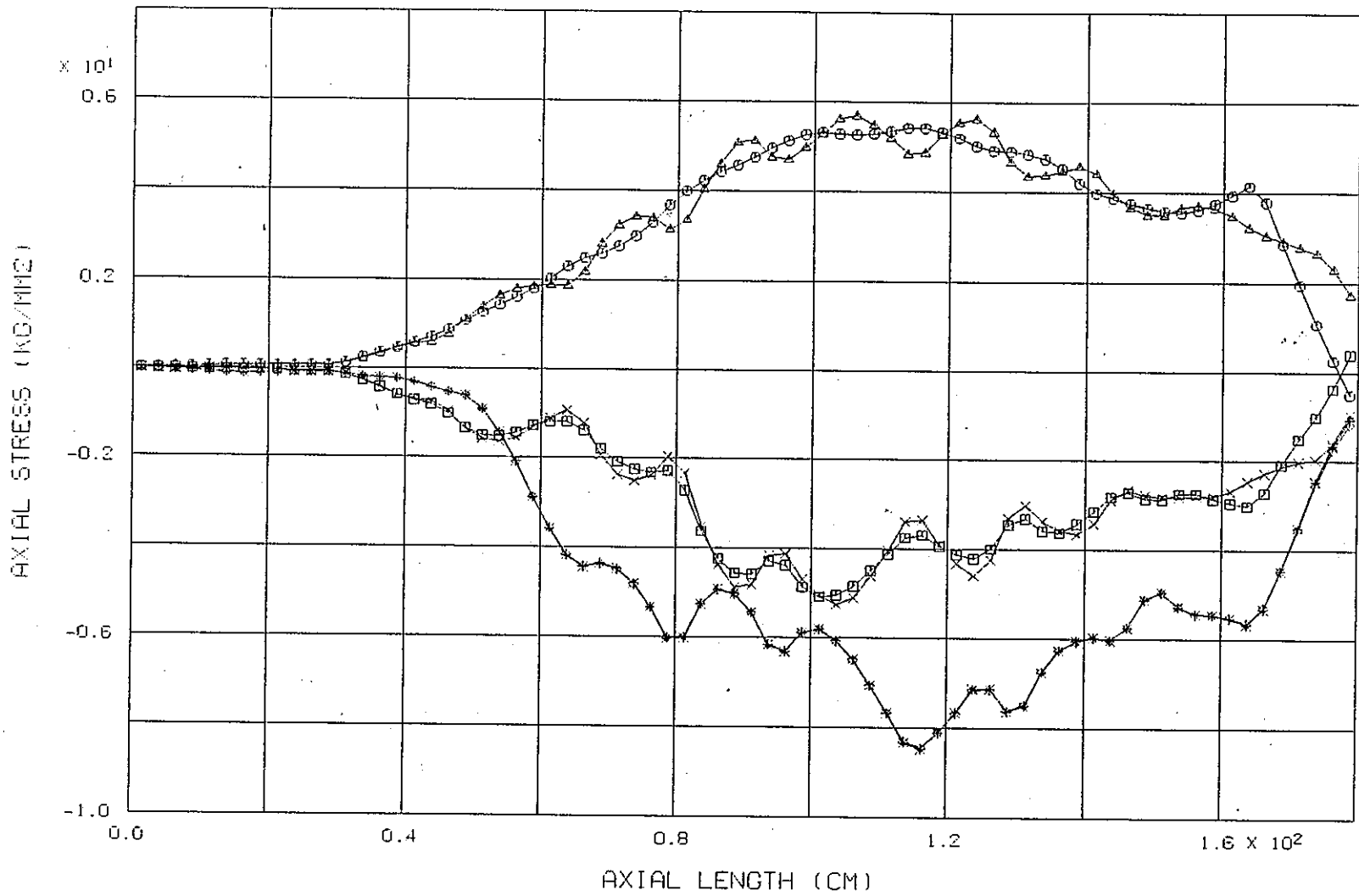


NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( 150MM )

付図3-P13-1 湾曲形状解析結果(ケース:P13)

○
△
×
□
+
*
●



— 71 —

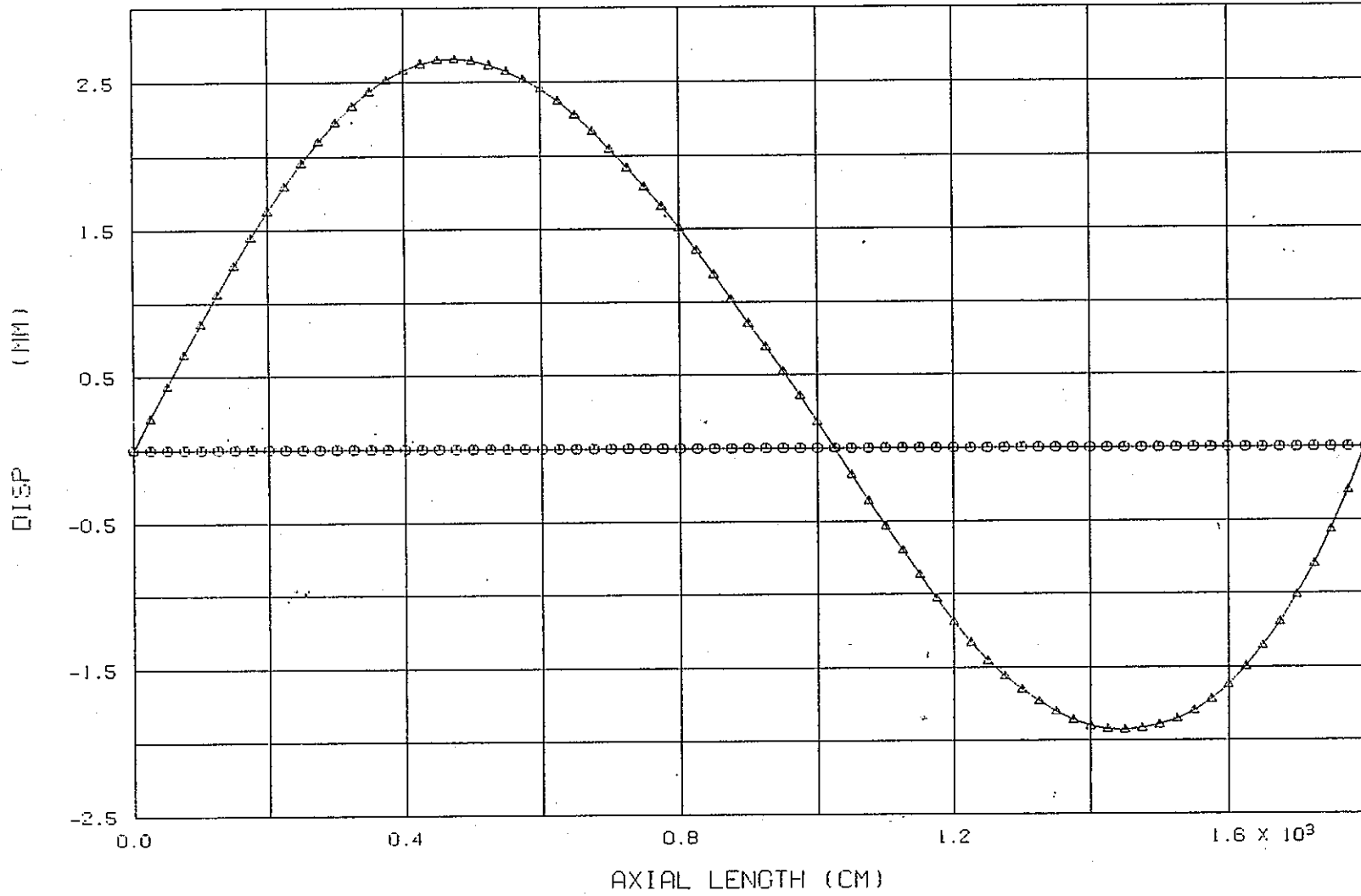
ELM NO. 1-711

( PIPE 3 \* 72 ) ( 150MM )

付図3-P13-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P13)

FINAS  
STEP NO. 1

DISP1  
DISP2



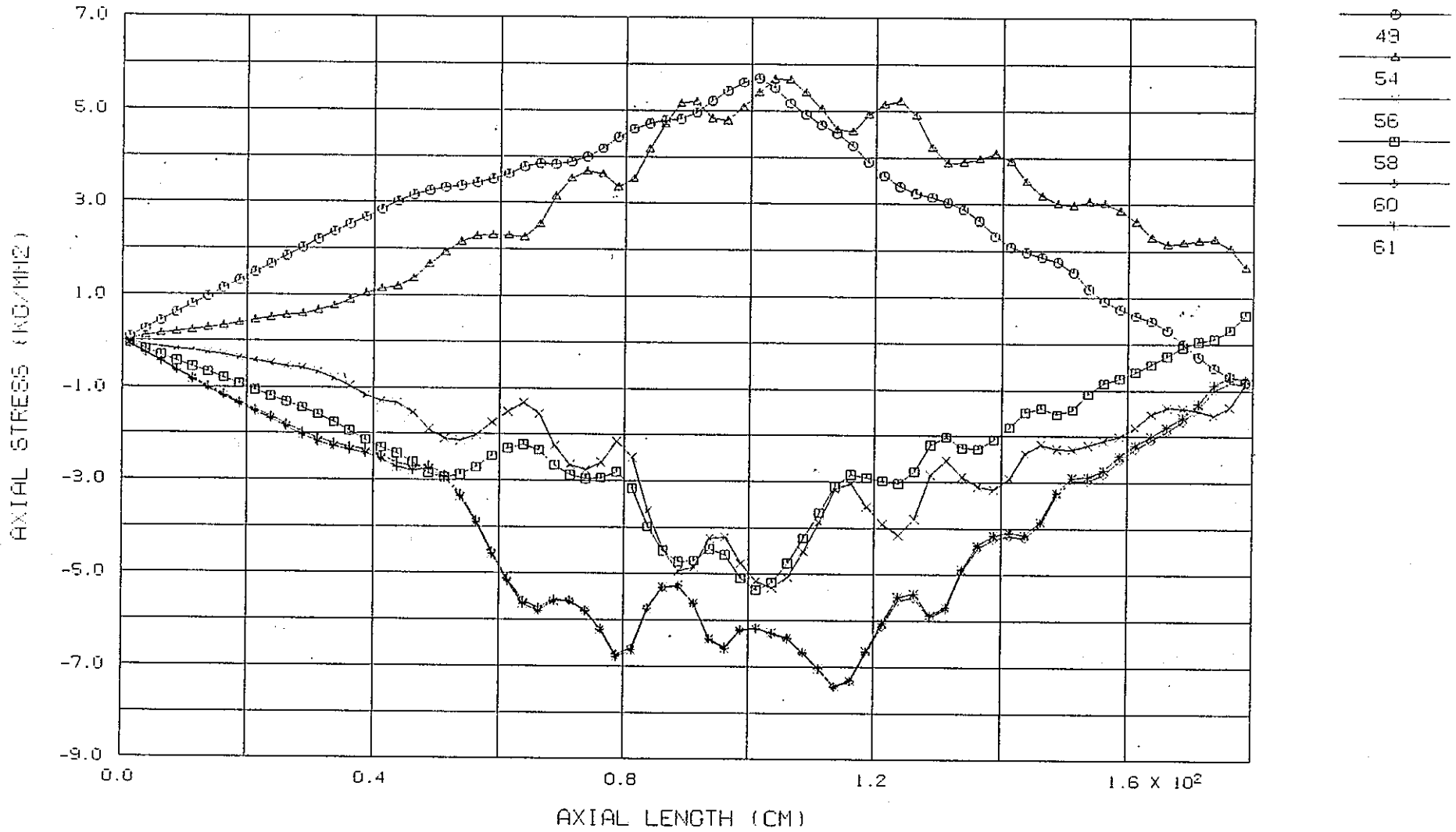
— 72 —

NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( P72\$C2 )

付図3-P3A-1 湾曲形状解析結果(ケース:P3A)

FINAS  
STEP NO. 1

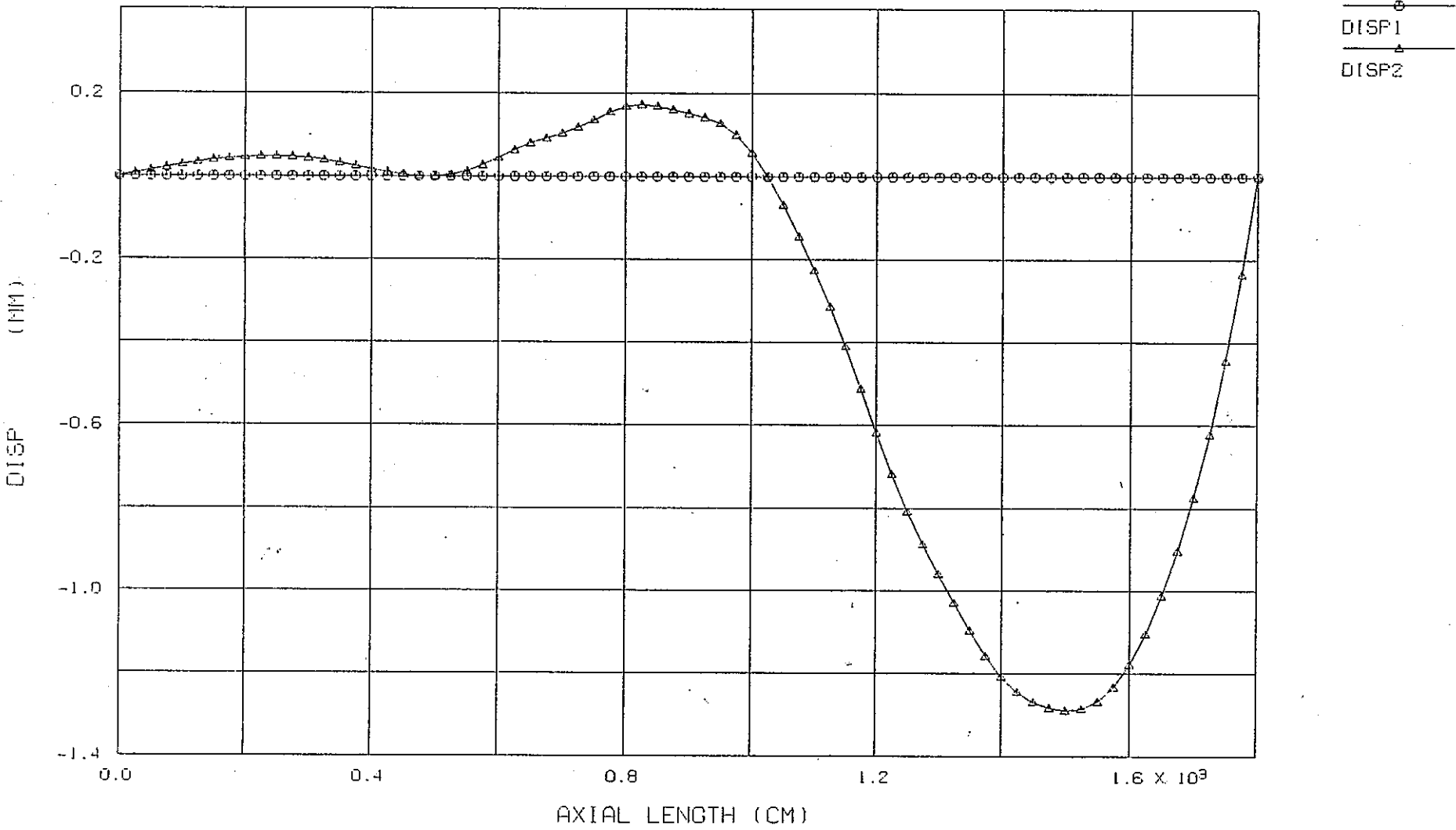


ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( P72ΦC2 )

付図3-P3A-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P3A)

FINAS  
STEP NO. 1

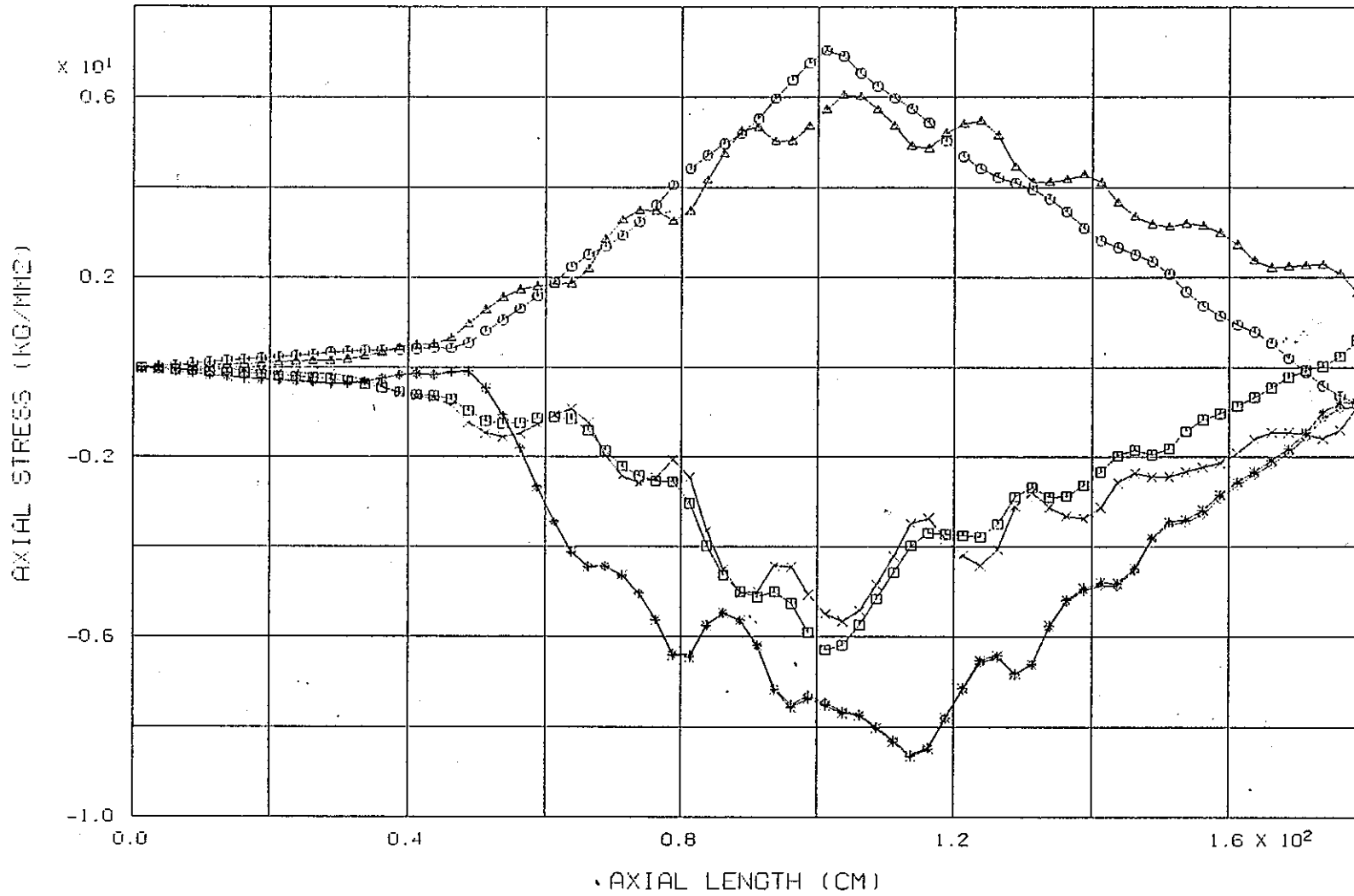


NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( P72ΦC2B )

付図3-P4A-1 湾曲形状解析結果(解析ケース:P4A)

○
△
×
□
+
61



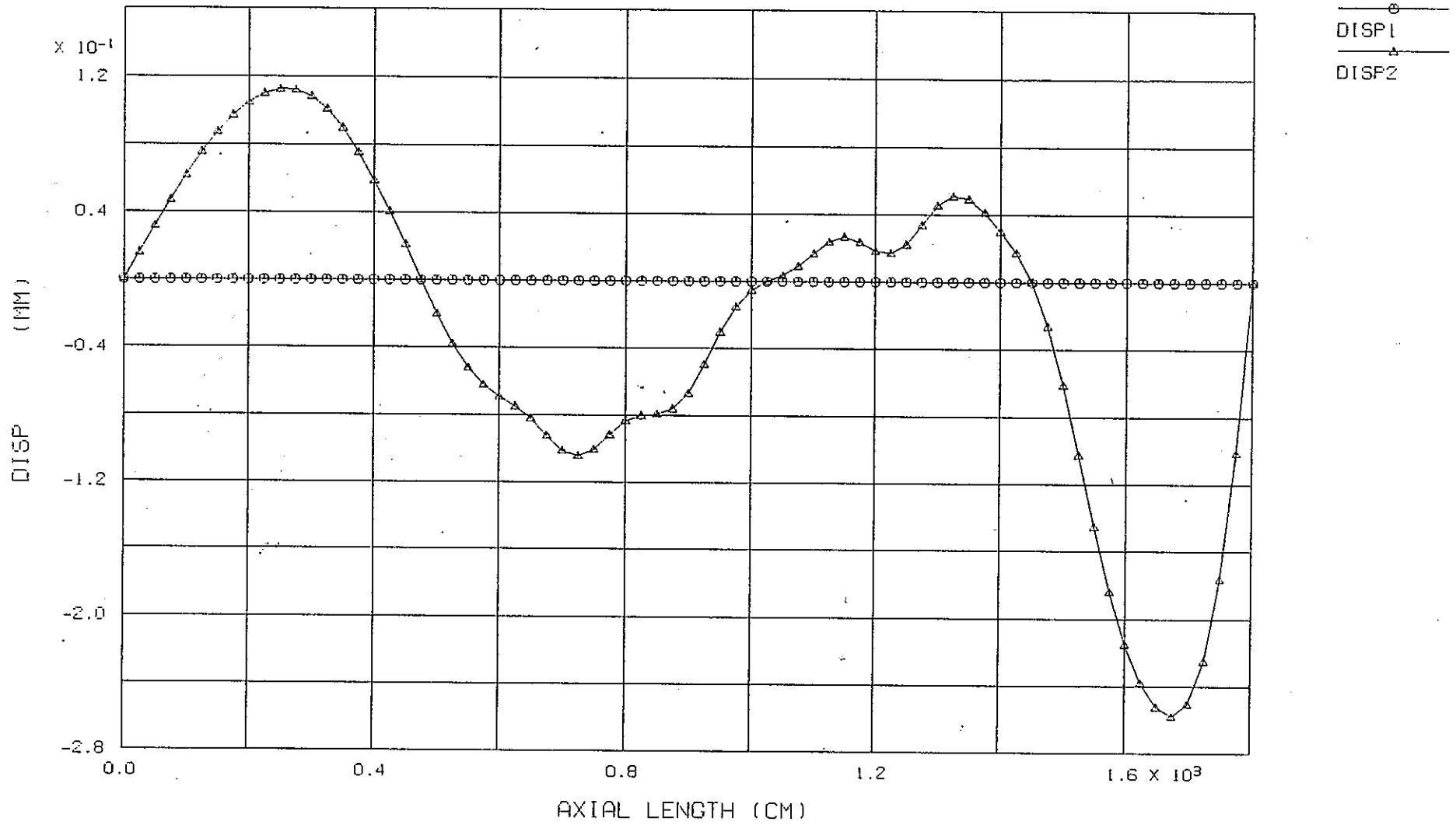
ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( P72#C2B )

付図3-P4A-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



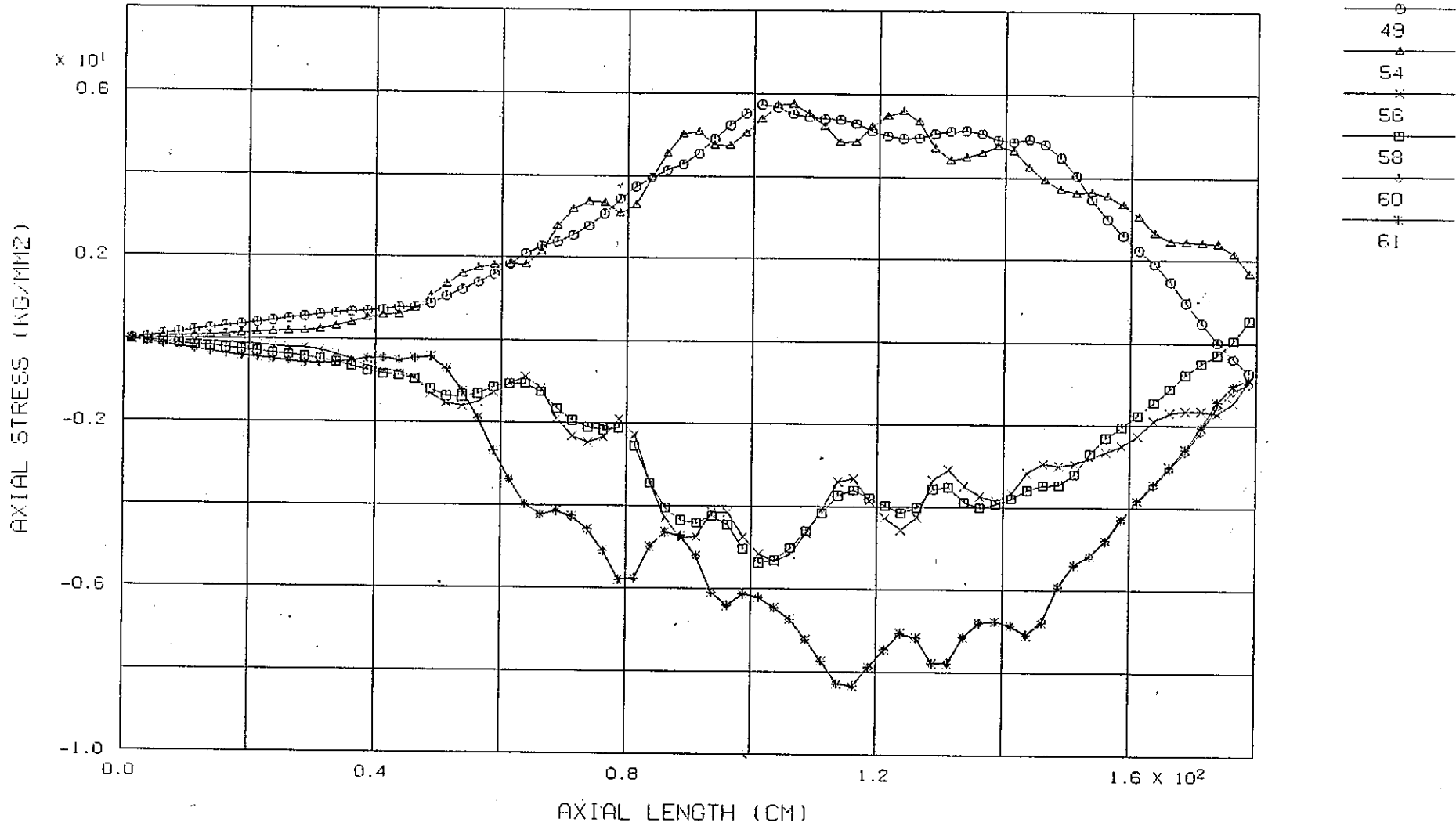
NODE NO. 1-721

( PIPE3 # 72 ) ( P72#C3 )

付図3-P5A-1 湾曲形状解析結果(ケース:P5A)



FINAS  
STEP NO. 1



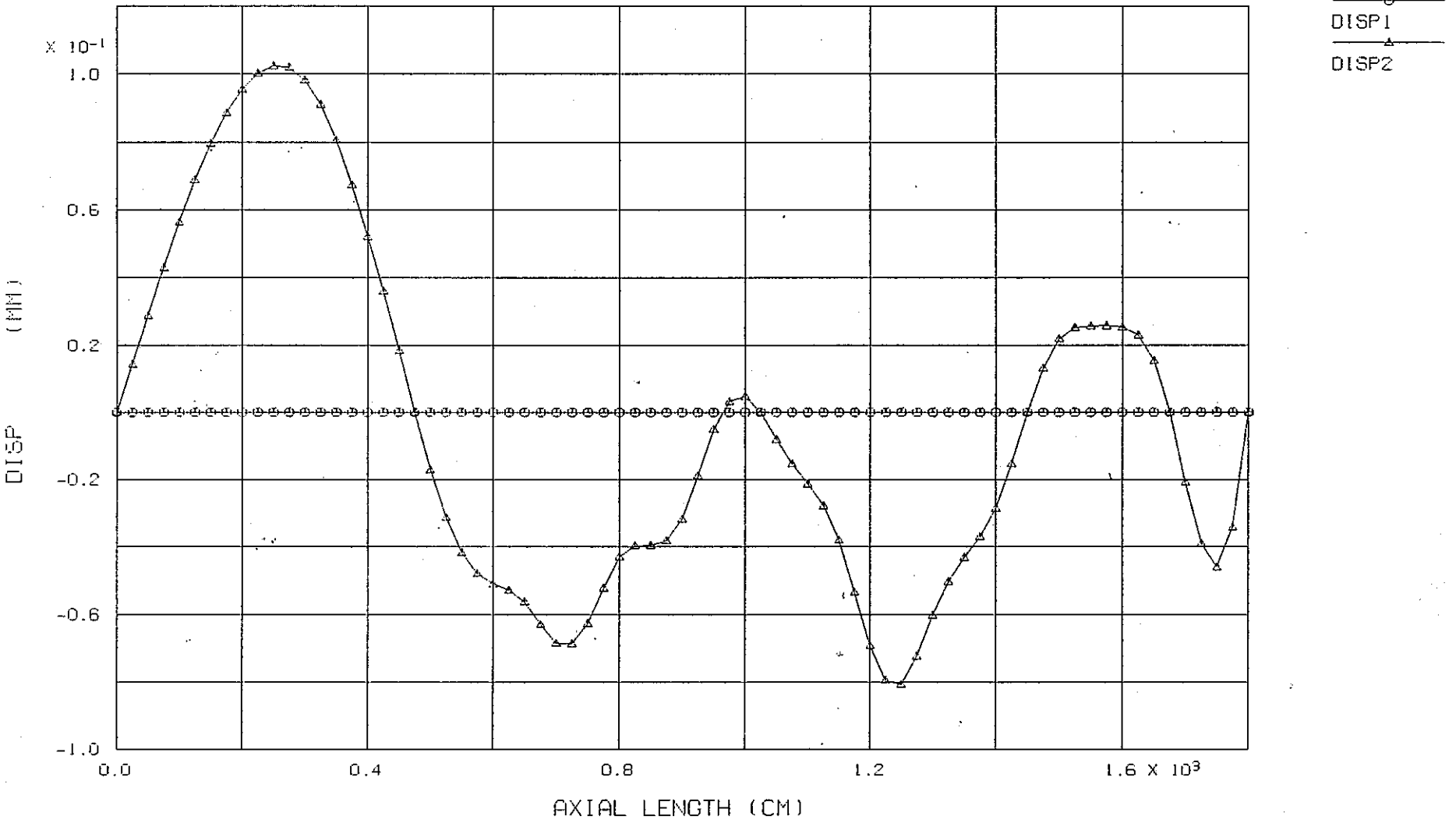
- 77 -

ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( P72\$C3 )

付図3-P5A-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P5A)

FINAS  
STEP NO. 1

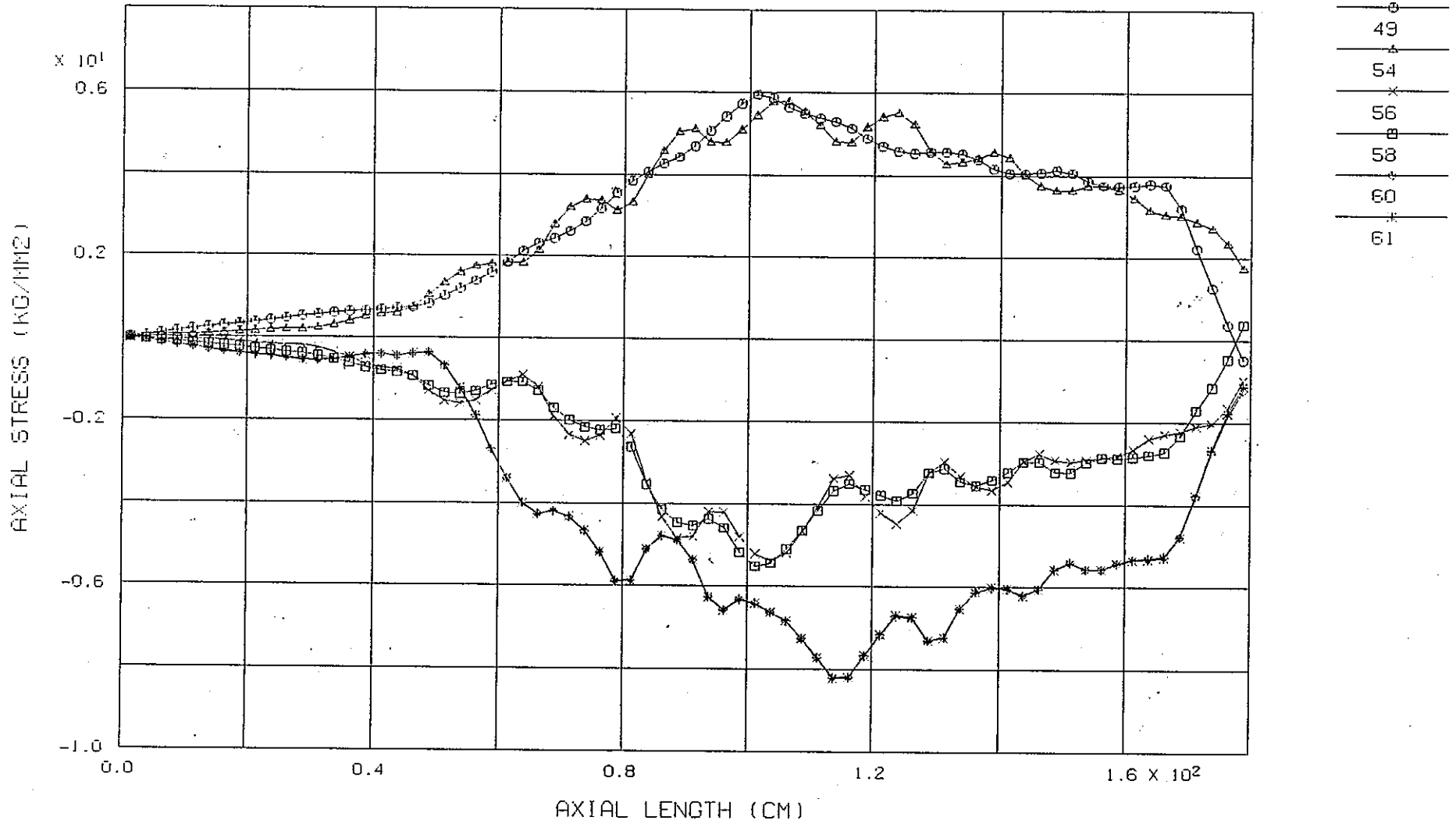


NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( P72ΦC4 )

付図3-P6A-1 湾曲形状解析結果(ケース:P6A)

FINAS  
STEP NO. 1



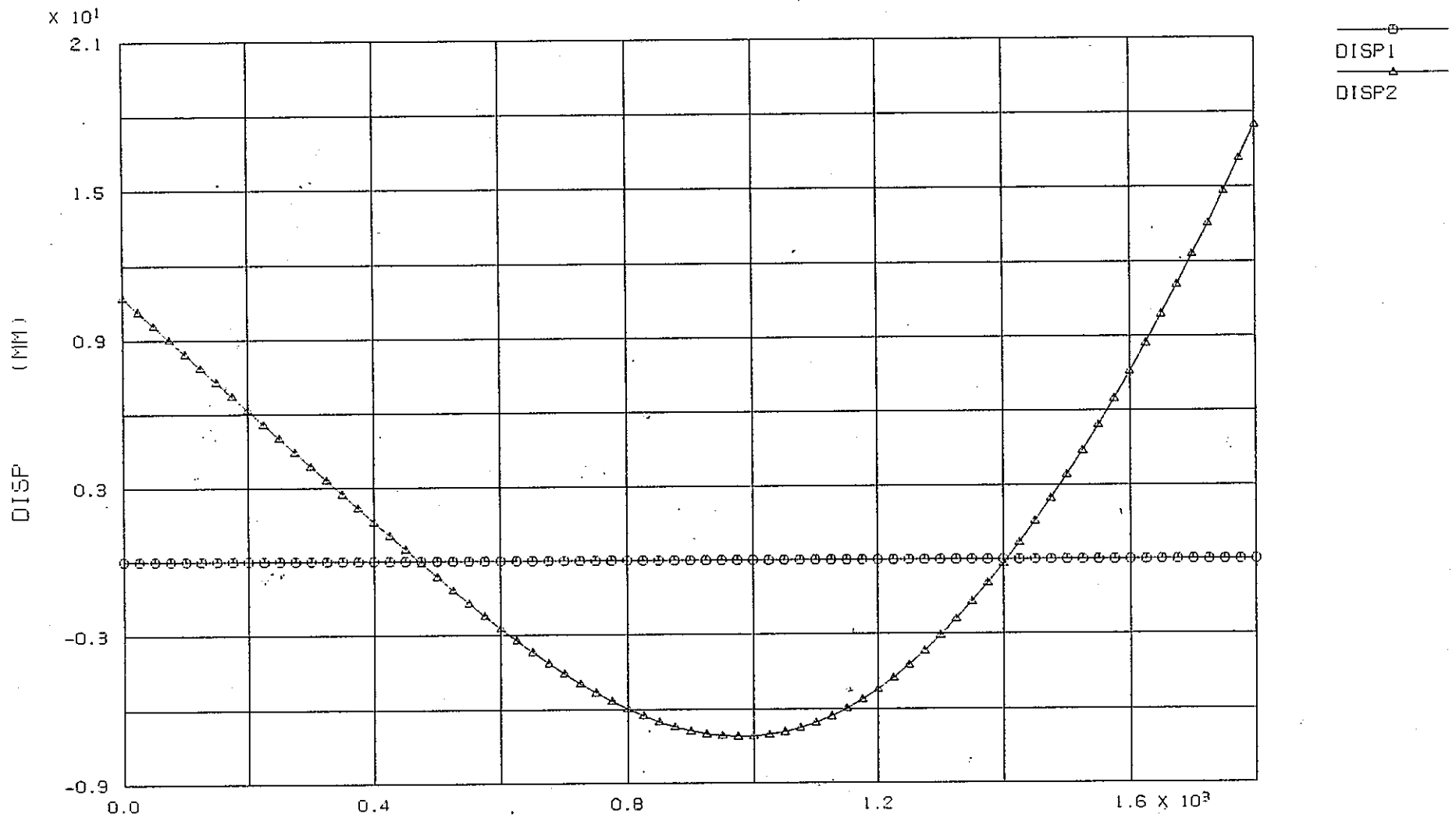
PNC TN9410 89-077

ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( P72\$C4 )

付図3-P6A-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P6A)

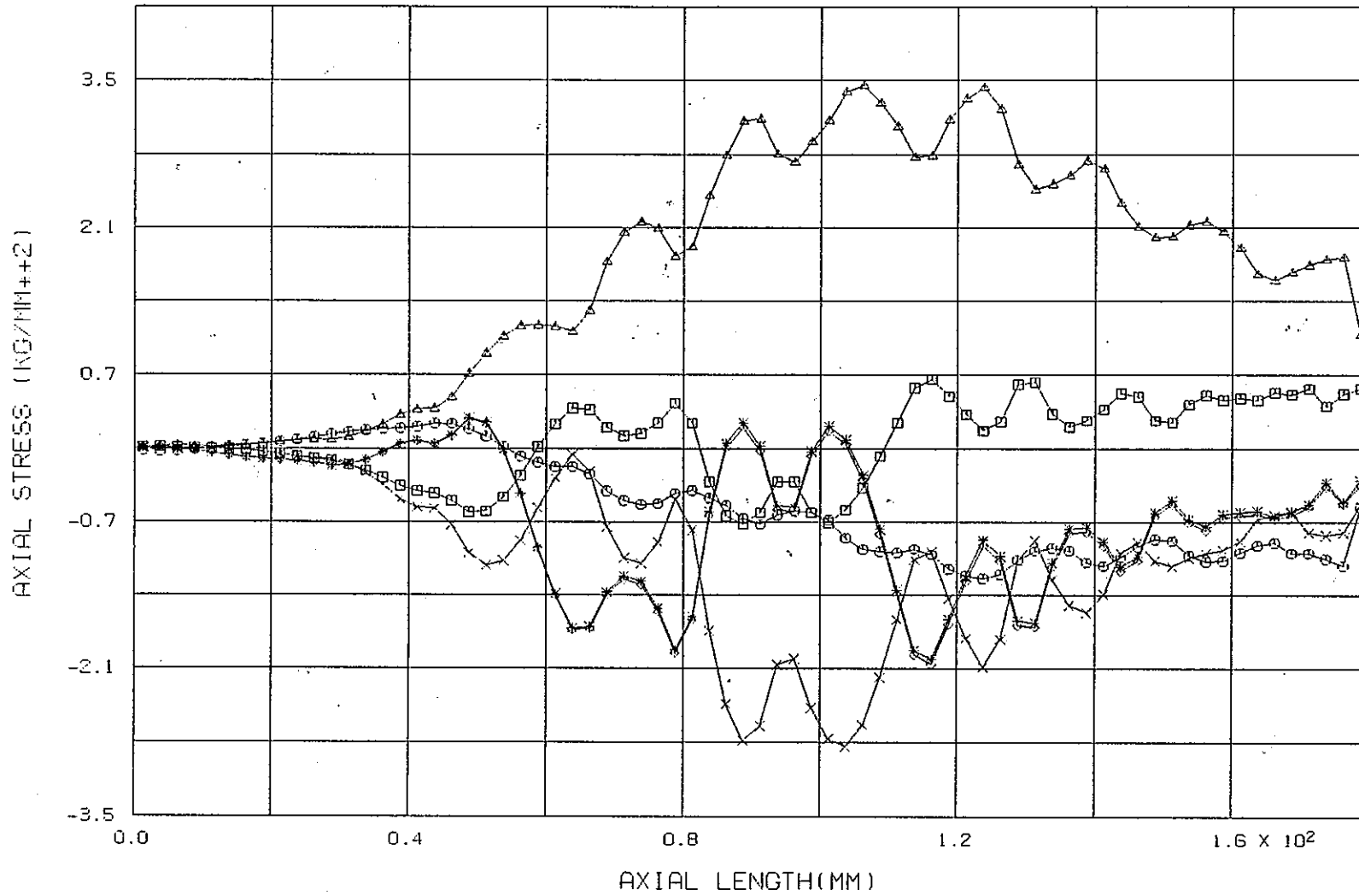
FINAS  
STEP NO. 1



NODE NO. 101-7301 ( ELBOW \* 72 ) ( REF )

付図3-E0-1 湾曲形状解析結果(ケース:E0)

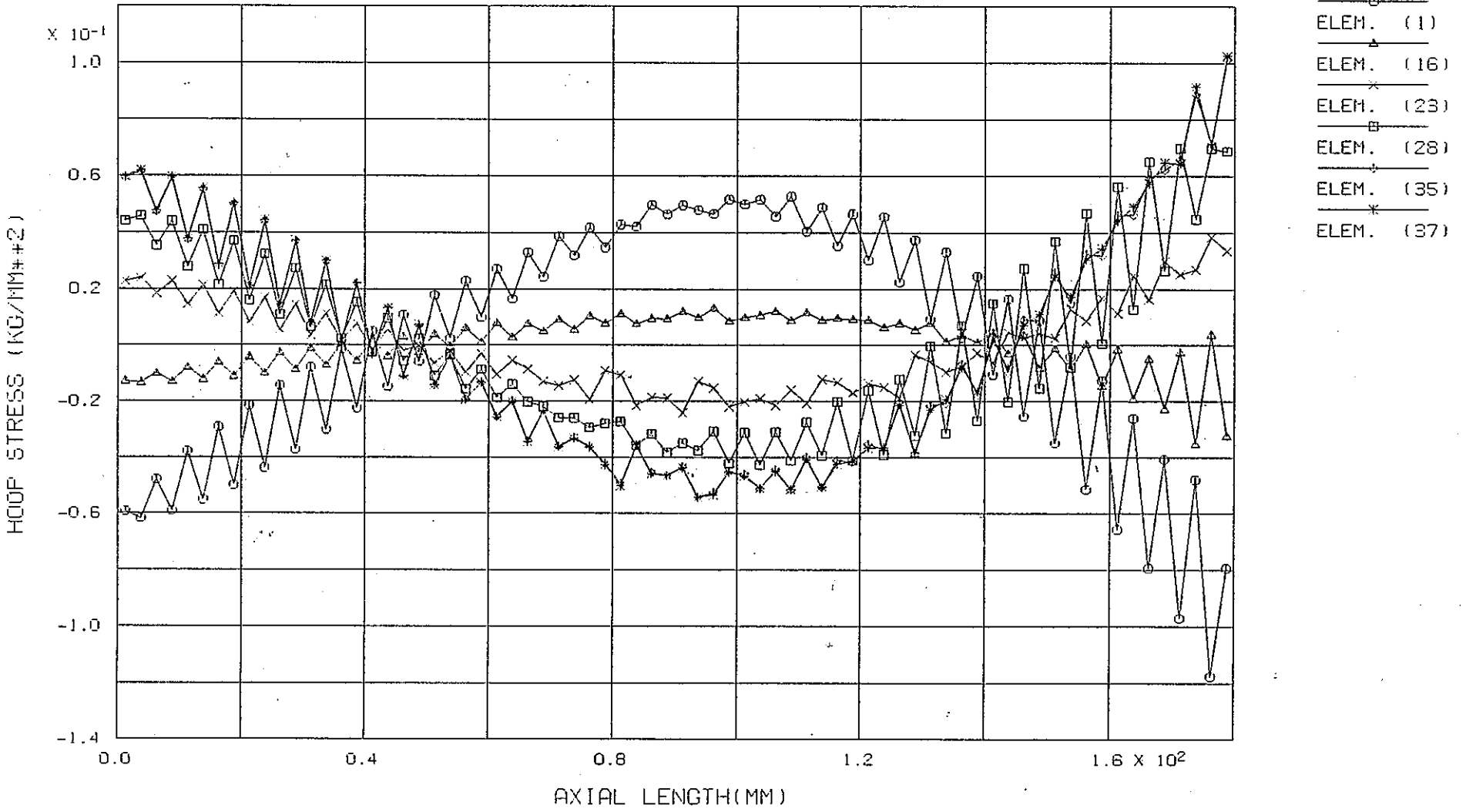
- ELEM. (1)
- △ ELEM. (16)
- \* ELEM. (23)
- ELEM. (28)
- ◇ ELEM. (35)
- × ELEM. (37)



MID VALU ( ELBOW \* 72 ) ( REF )

付図3-E0-2a 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E0)

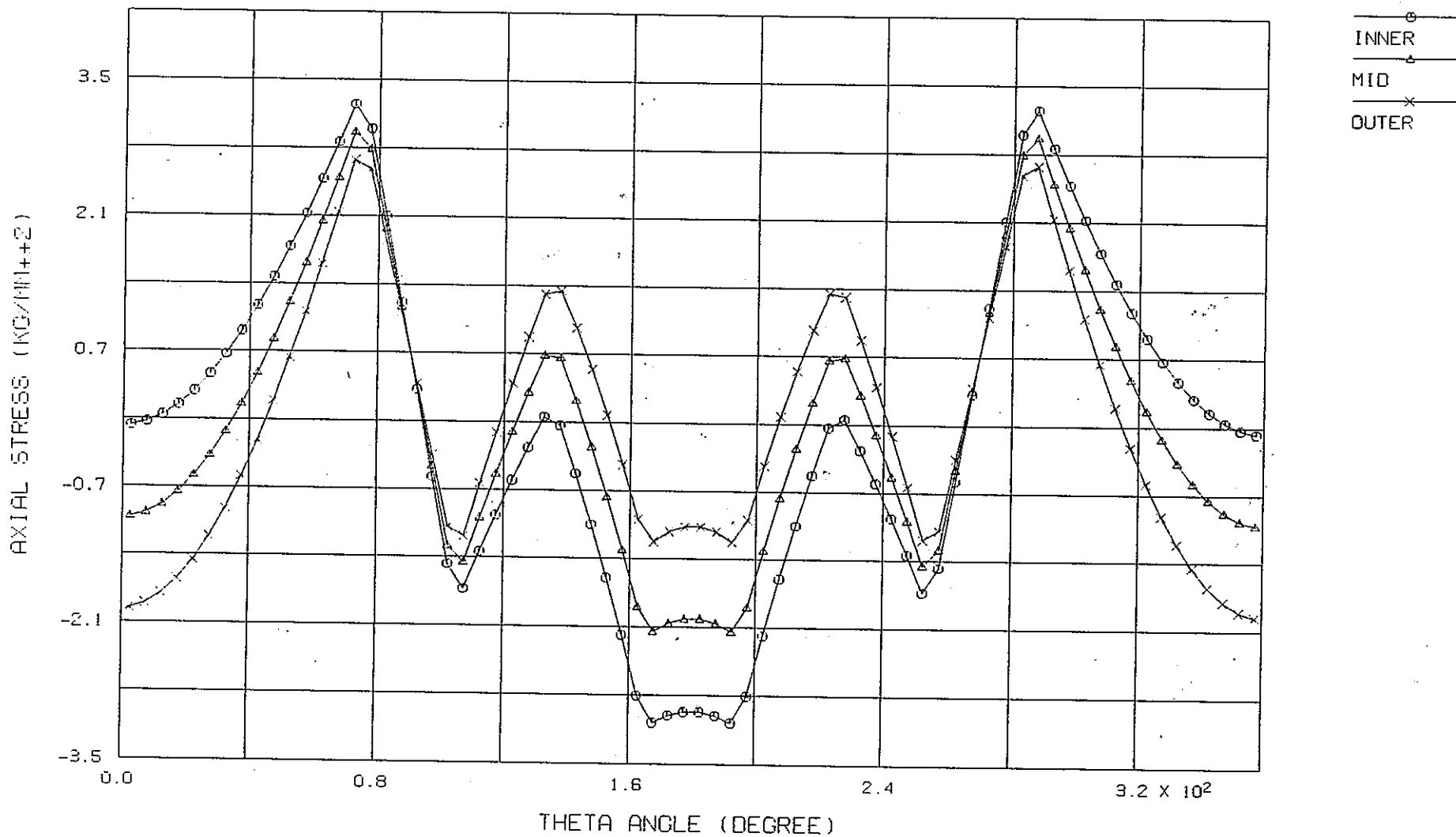
FINAS  
STEP NO. 1



MID VALU

( ELBOW \* 72 ) ( REF )

付図3-E0-2b 周方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E0)

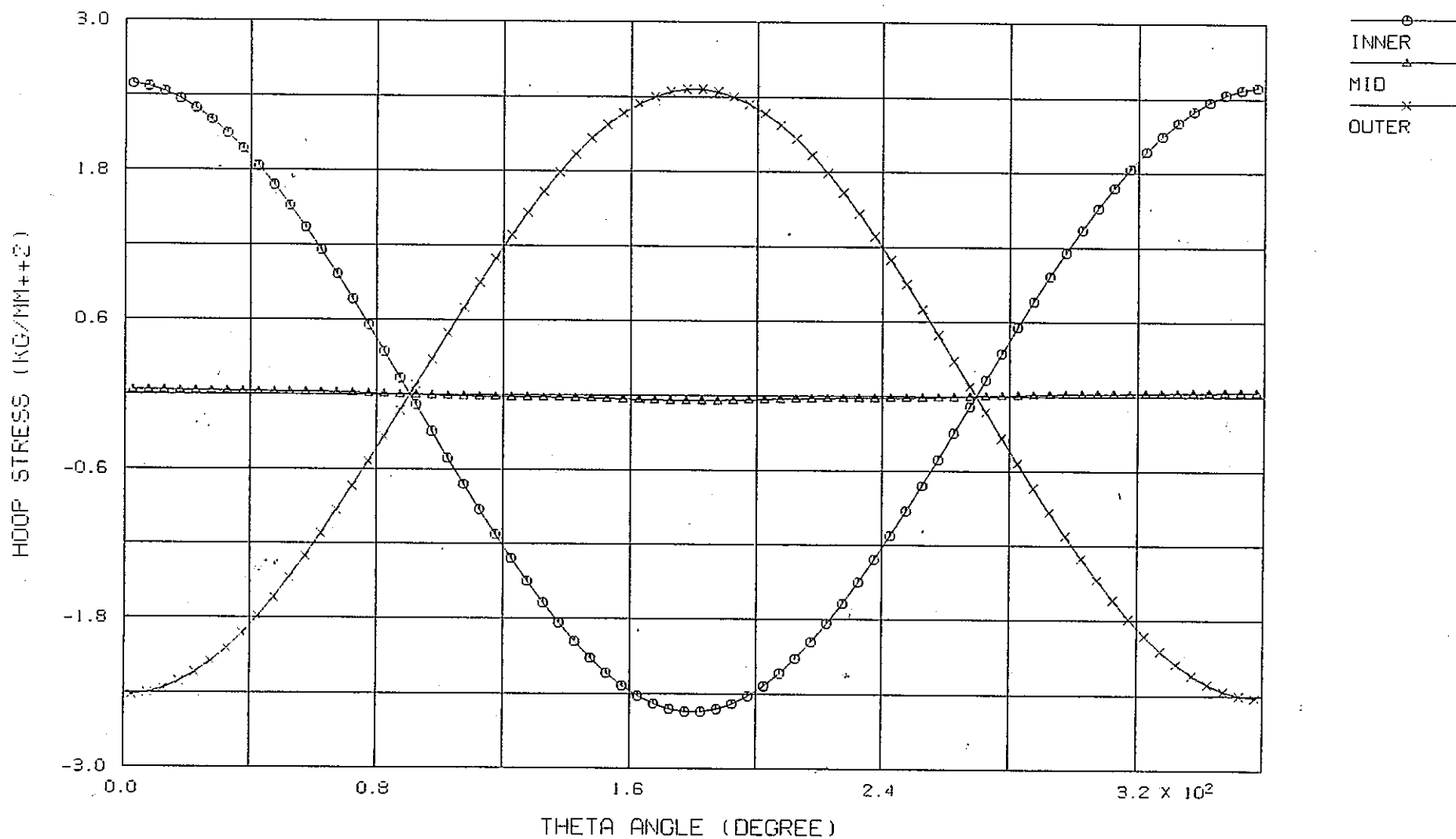


ELEMENT NO. 4701-4772

( ELBOW \* 72 ) ( REF )

付図3-E0-3a 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E0、軸方向位置:1162.5 mm)

FINAS  
STEP NO. 1



ELEMENT NO. 4701-4772

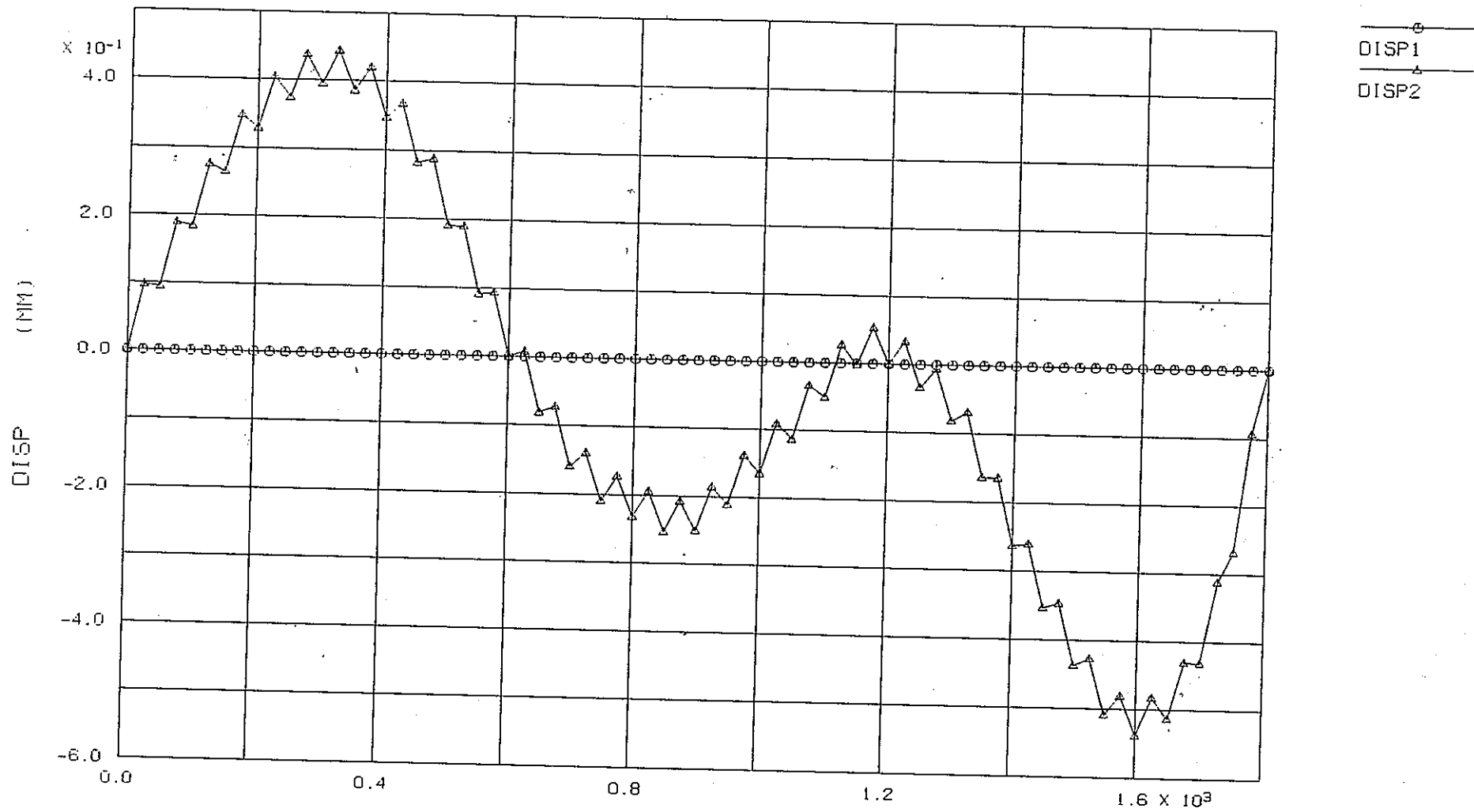
( ELBOW \* 72 ) ( REF )

付図3-E0-3b 周方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E0、軸方向位置:1162.5 mm)



FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



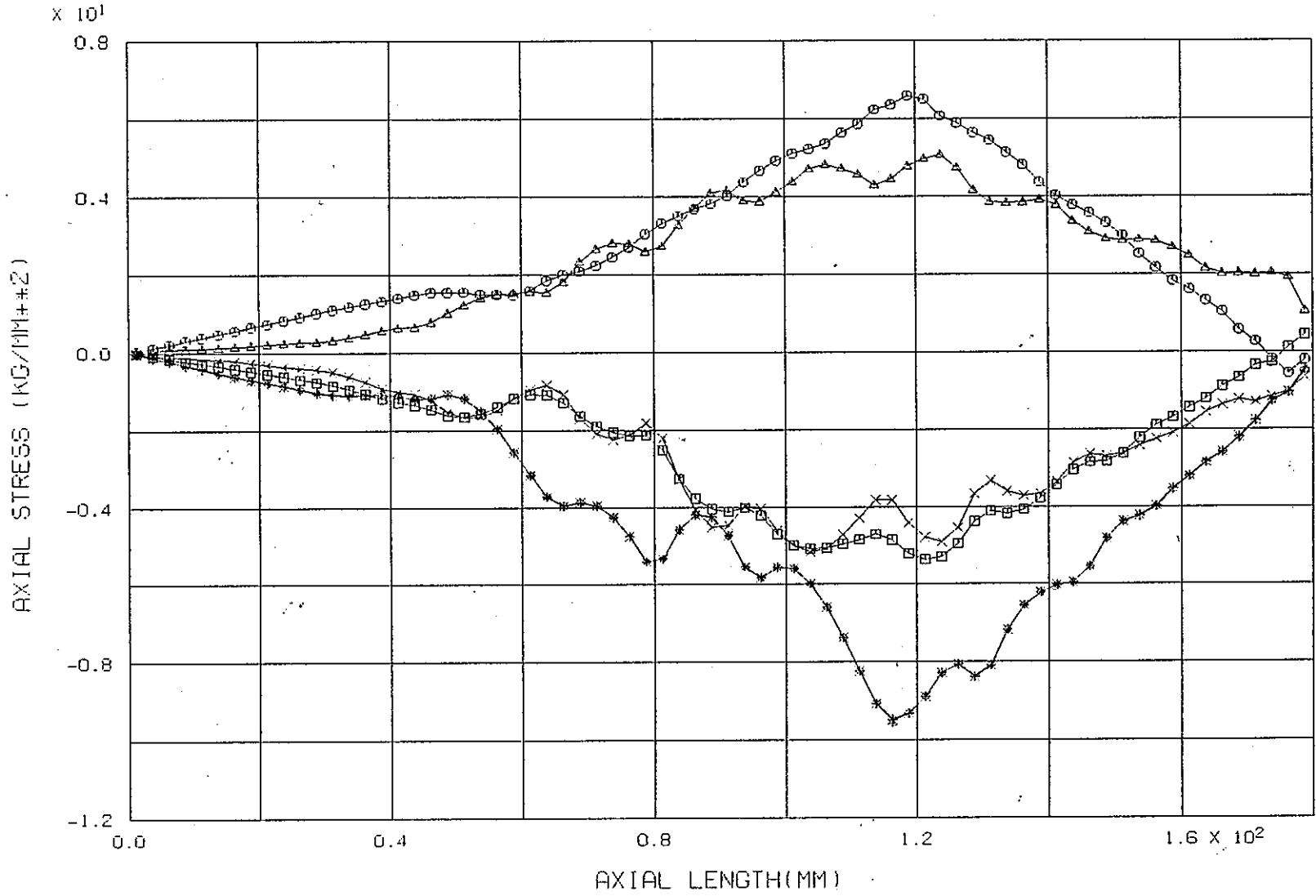
NODE NO. 101-7301

( ELBOW \* 72 ) ( 600MM )

付図3-E4-1 湾曲形状解析結果(ケース:E4)

FINAS  
STEP NO. 1

- ELEM. (1)
- △ ELEM. (16)
- × ELEM. (23)
- ELEM. (28)
- ▽ ELEM. (35)
- \* ELEM. (37)

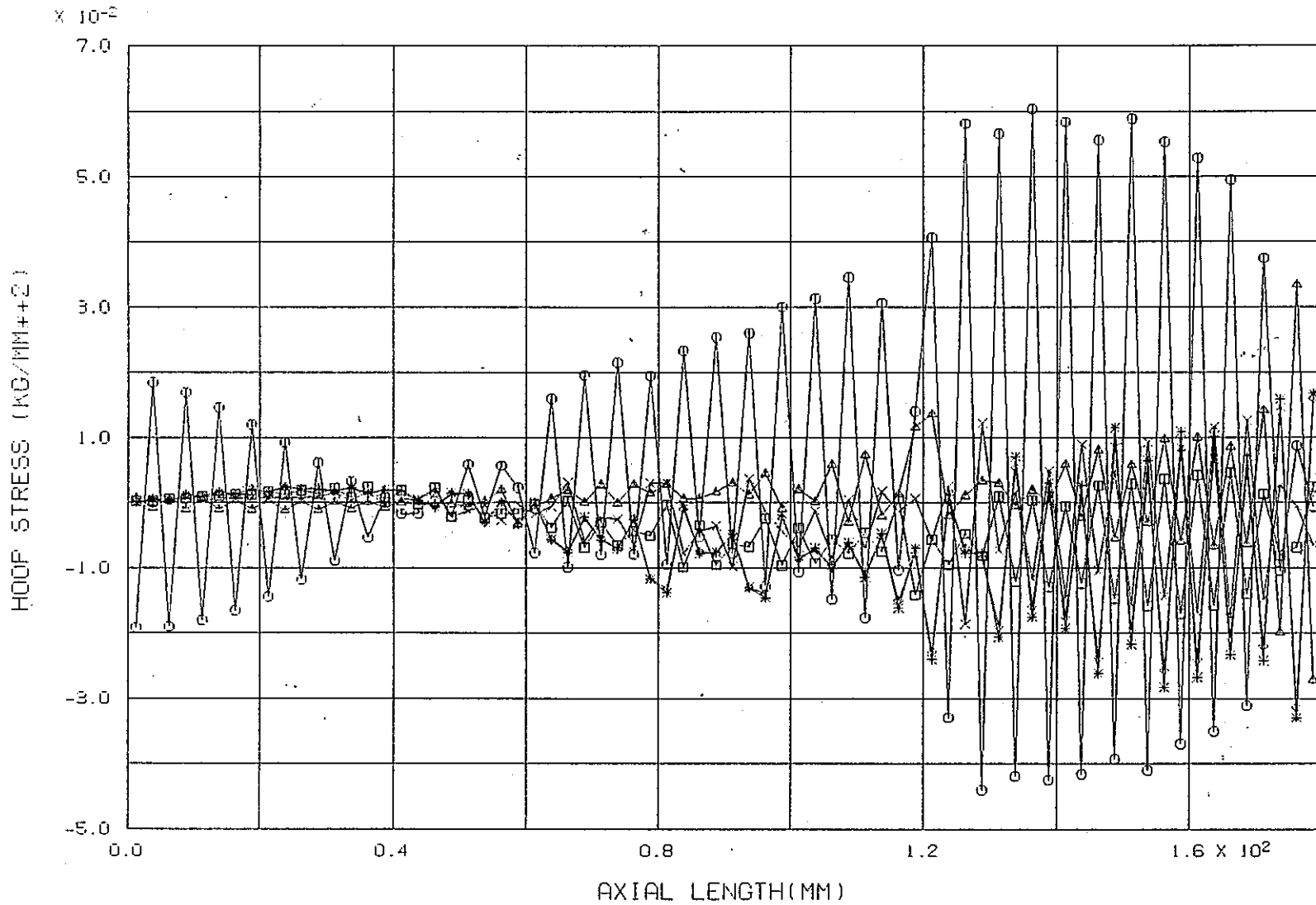


MID VALU ( ELBOW \* 72 ) ( 600MM )

付図3-E4-2a 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E4)

FINAS  
STEP NO. 1

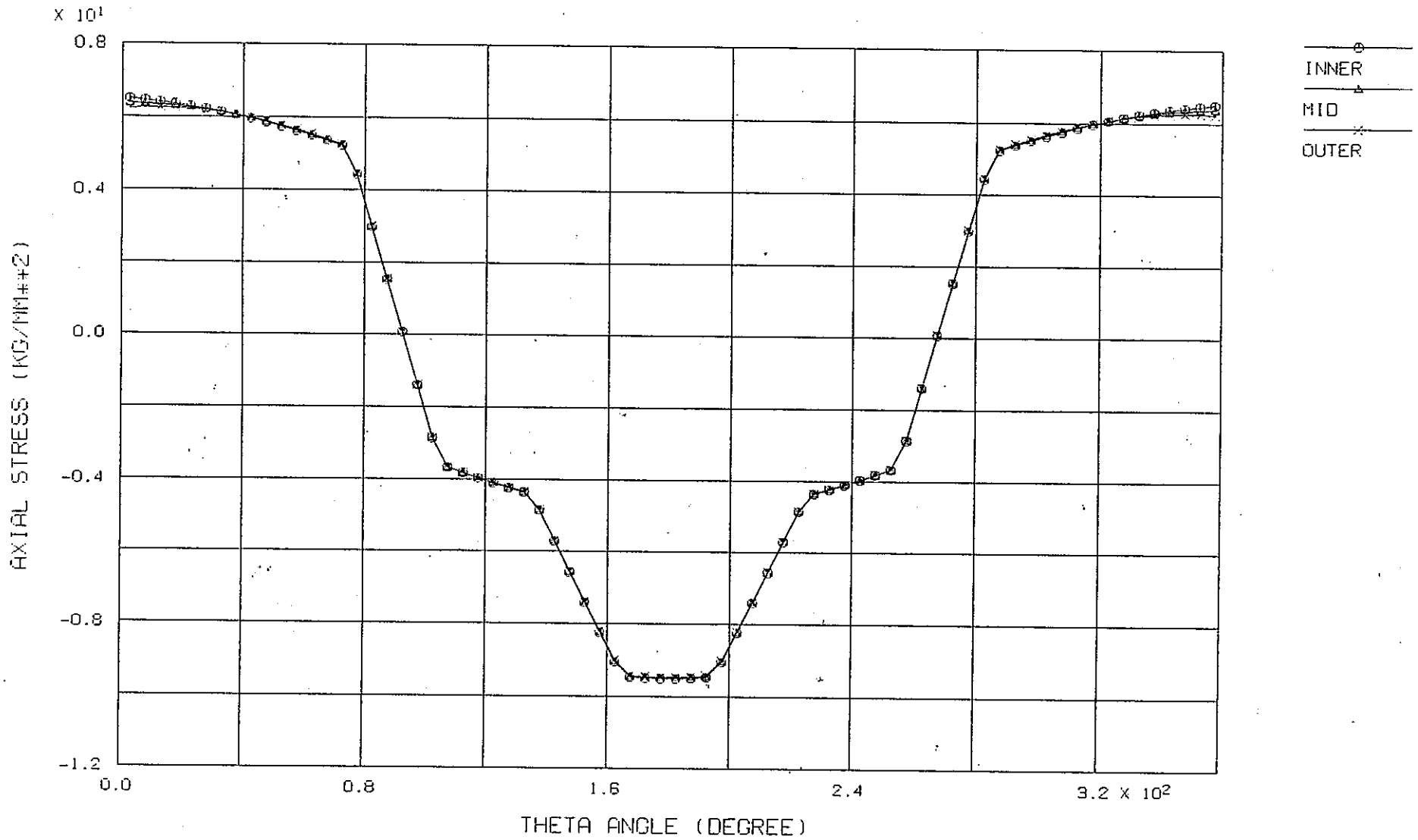
- ELEM. (1)
- △ ELEM. (16)
- × ELEM. (23)
- ELEM. (28)
- ◇ ELEM. (35)
- \* ELEM. (37)



MID VALU ( ELBOW \* 72 ) ( 600MM )

付図3-E4-2b 周方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E4)

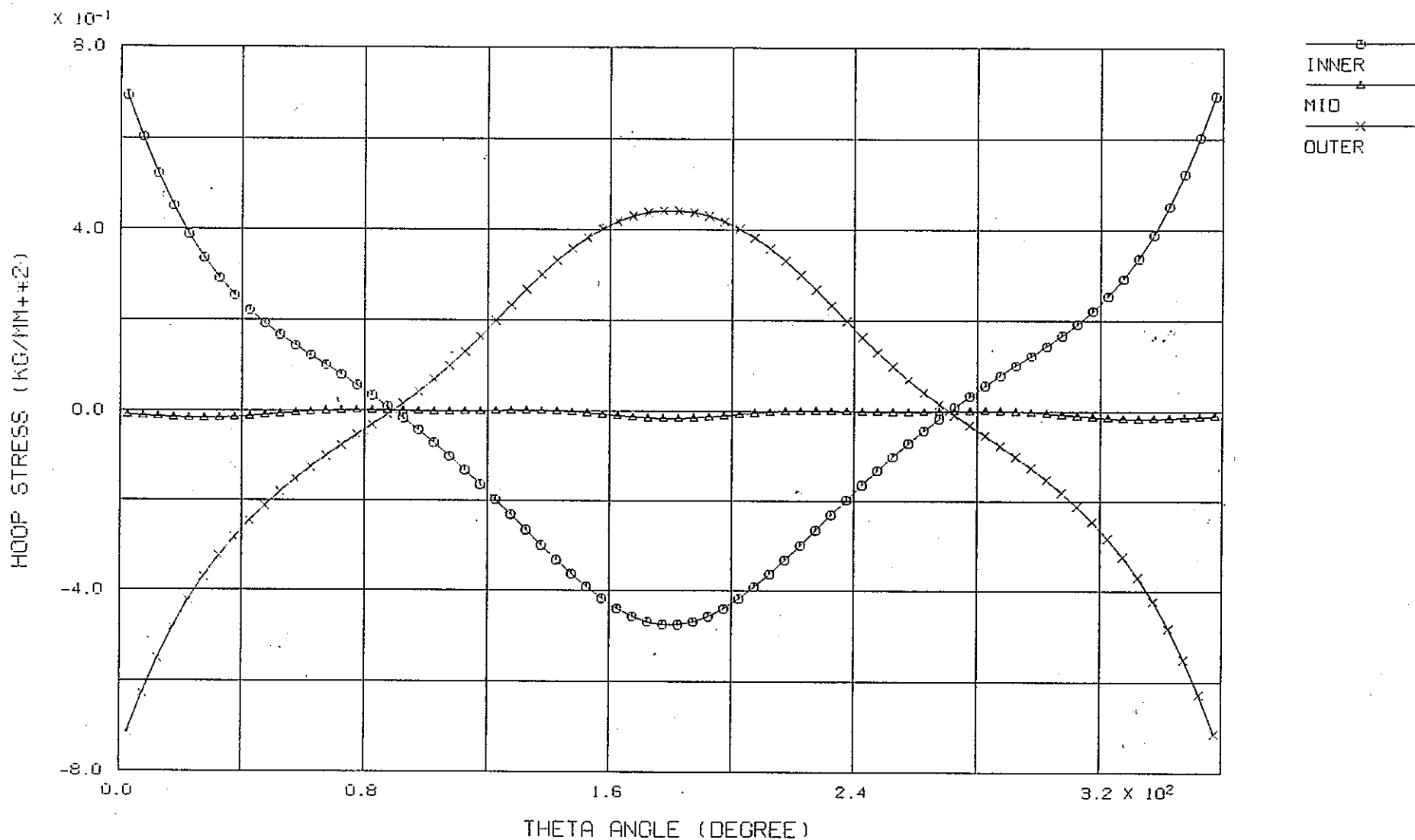
FINAS  
STEP NO. 1



ELEMENT NO. 4701-4772 ( ELBOW \* 72 ) ( 600MM )

付図3-E4-3a 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E4、軸方向位置:1162.5 mm)

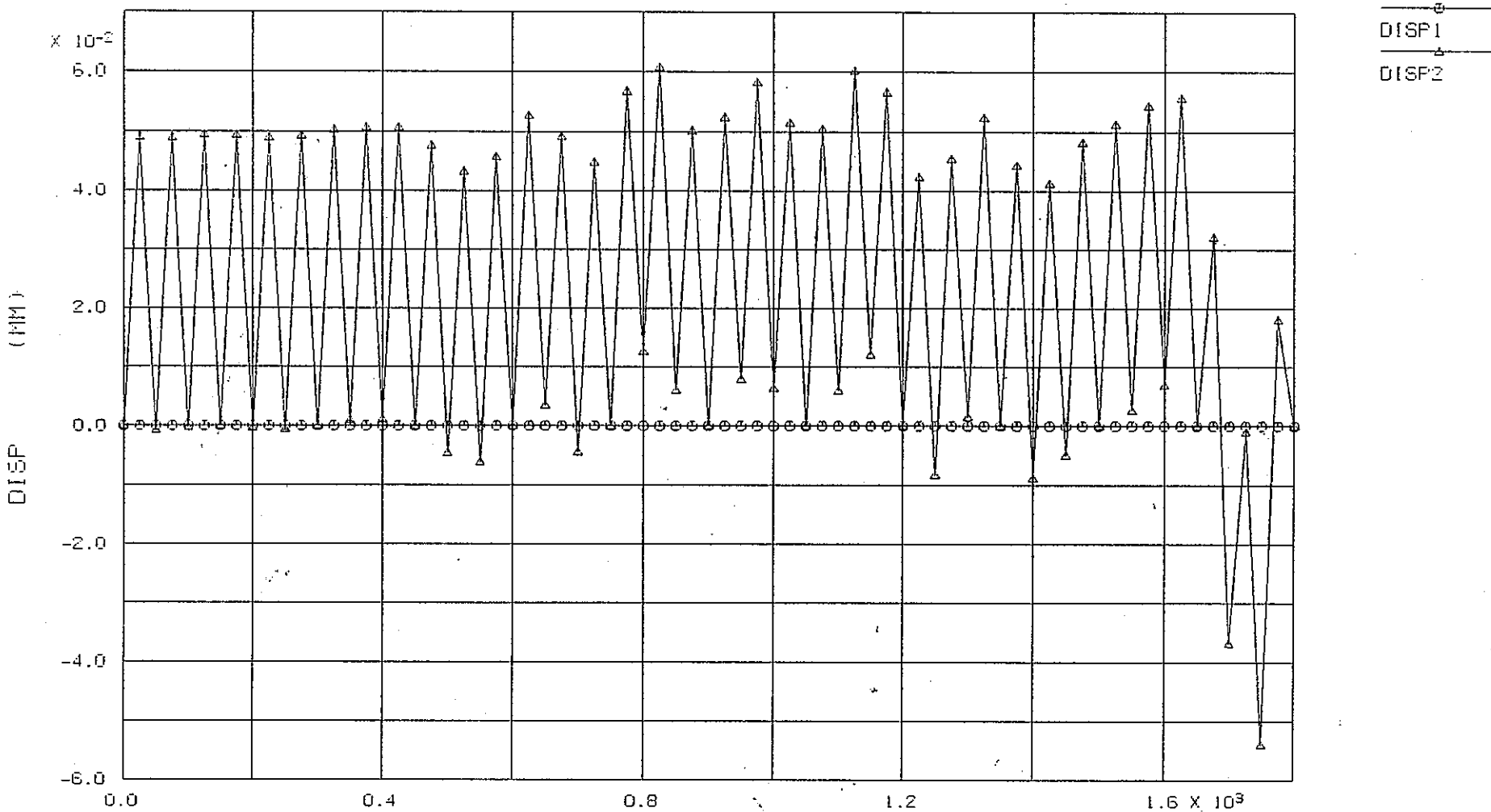
FINAS  
STEP NO. 1



ELEMENT NO. 4701-4772 ( ELBOW \* 72 ) ( 600MM )

付図3-E4-3b 周方向応力の周方向分布解析結果(ケース:E4、軸方向位置:1162.5 mm)

FINAS  
STEP NO. 1

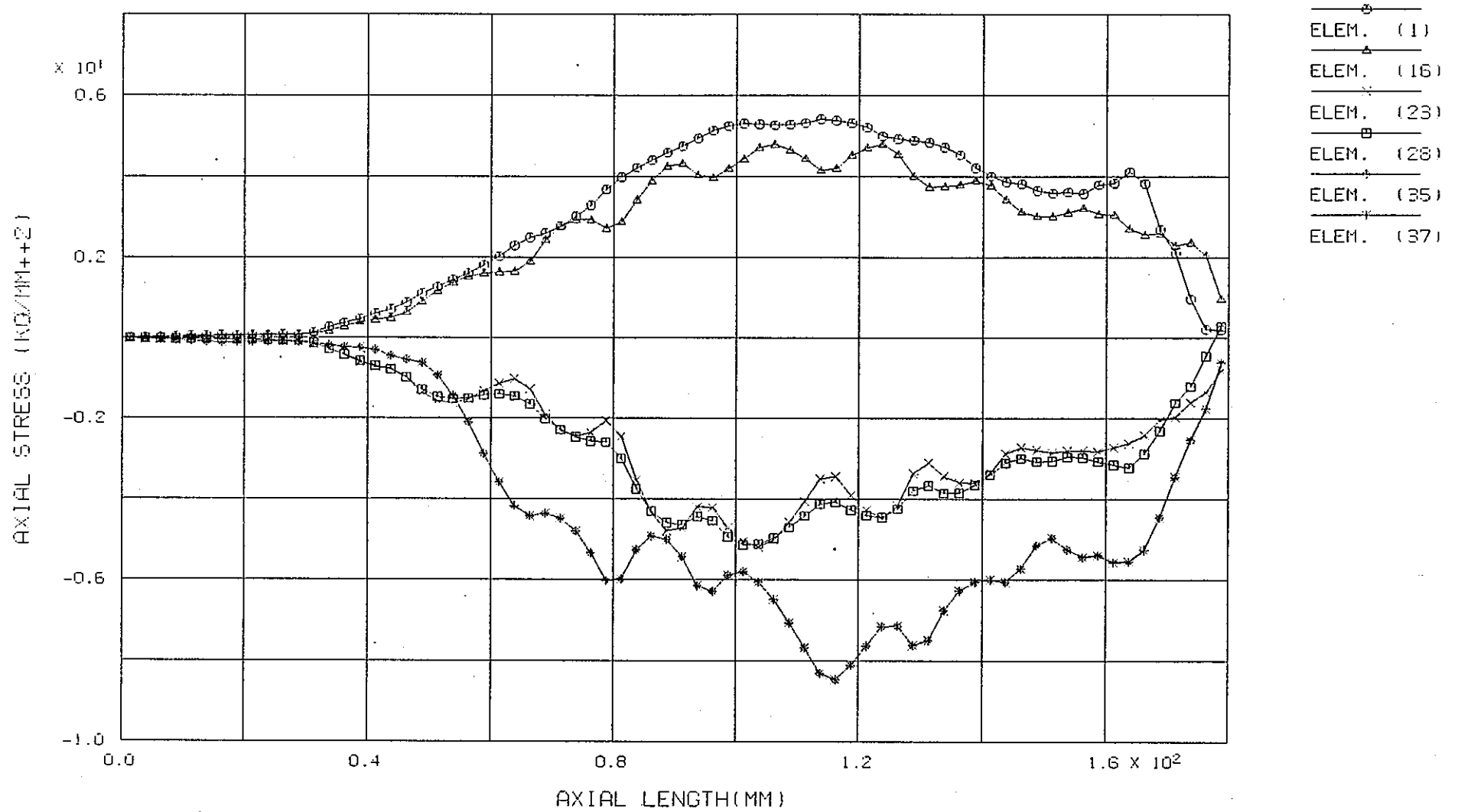


NODE NO. 101-7301

( ELBOW \* 72 ) ( 150MM )

付図3-E13-1 湾曲形状解析結果(ケース:E13)

FINAS  
STEP NO. 1



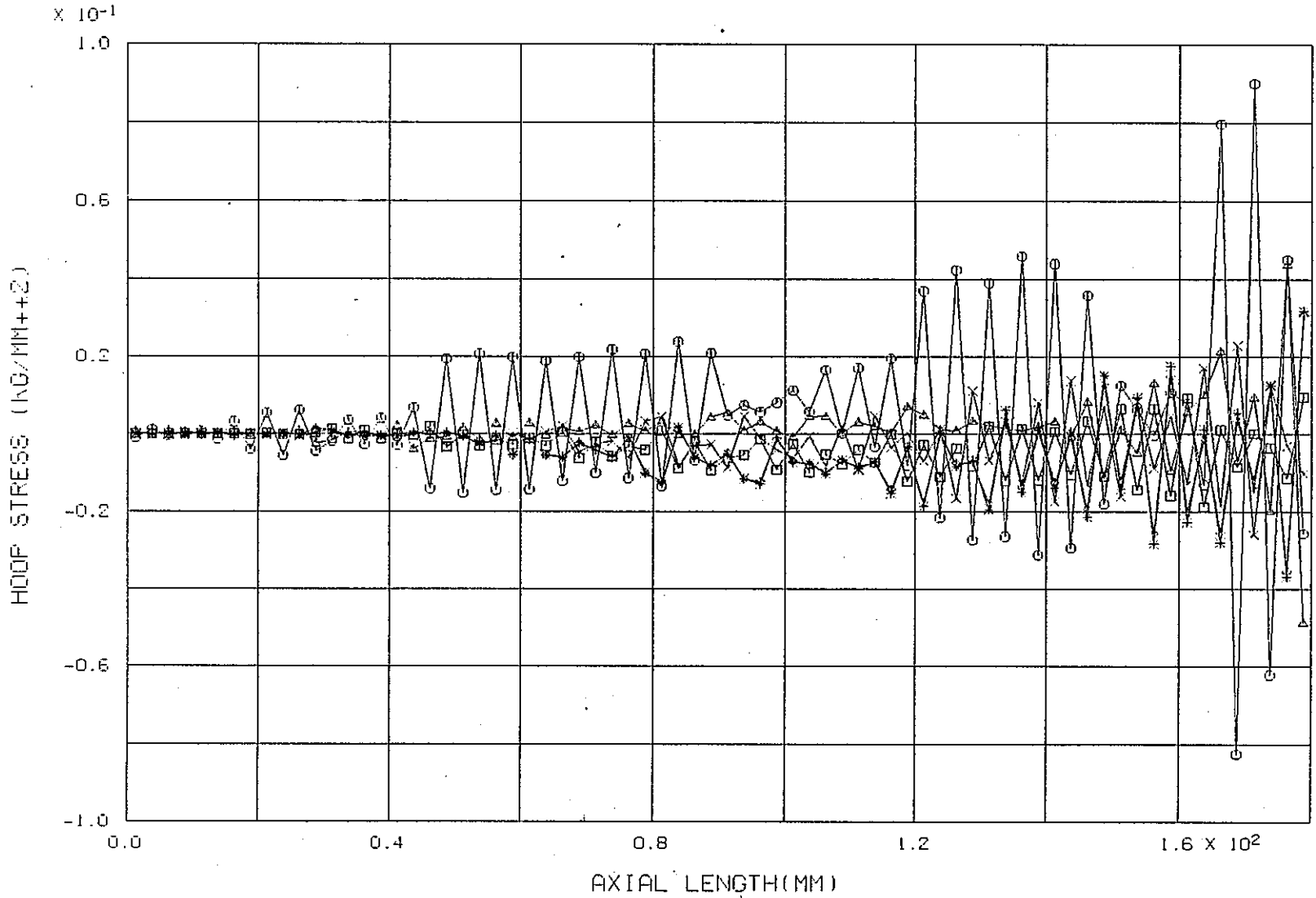
MID VALU

( ELBOW # 72 ) ( 150MM )

付図3-E13-2a 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E13)

FINAS  
STEP NO. 1

- ELEM. (1)
- △ ELEM. (16)
- × ELEM. (23)
- ELEM. (28)
- ▽ ELEM. (35)
- \* ELEM. (37)



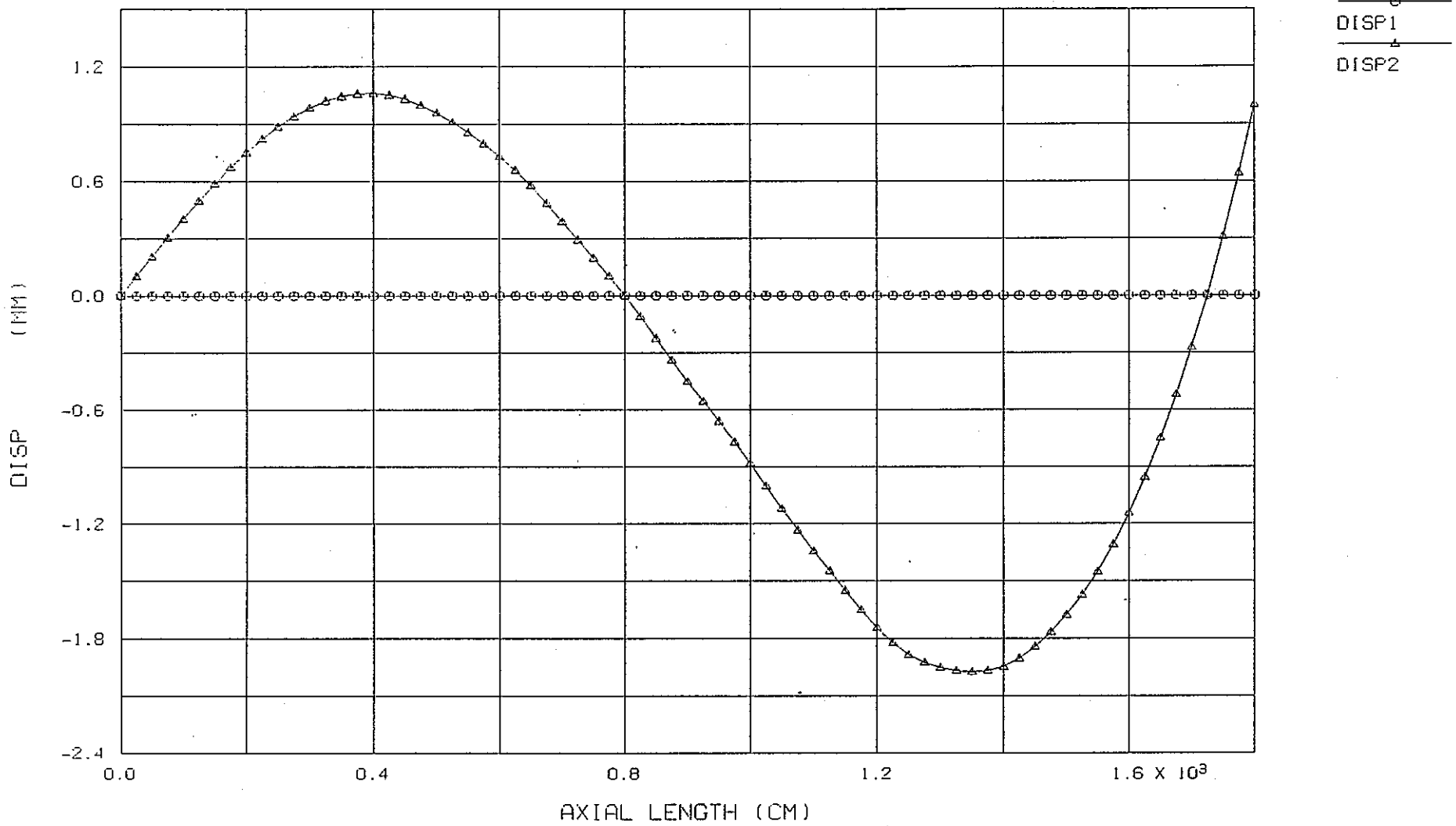
MID VALU ( ELBOW \* 72 ) ( 150MM )

付図3-E13-2b 周方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E13)



FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



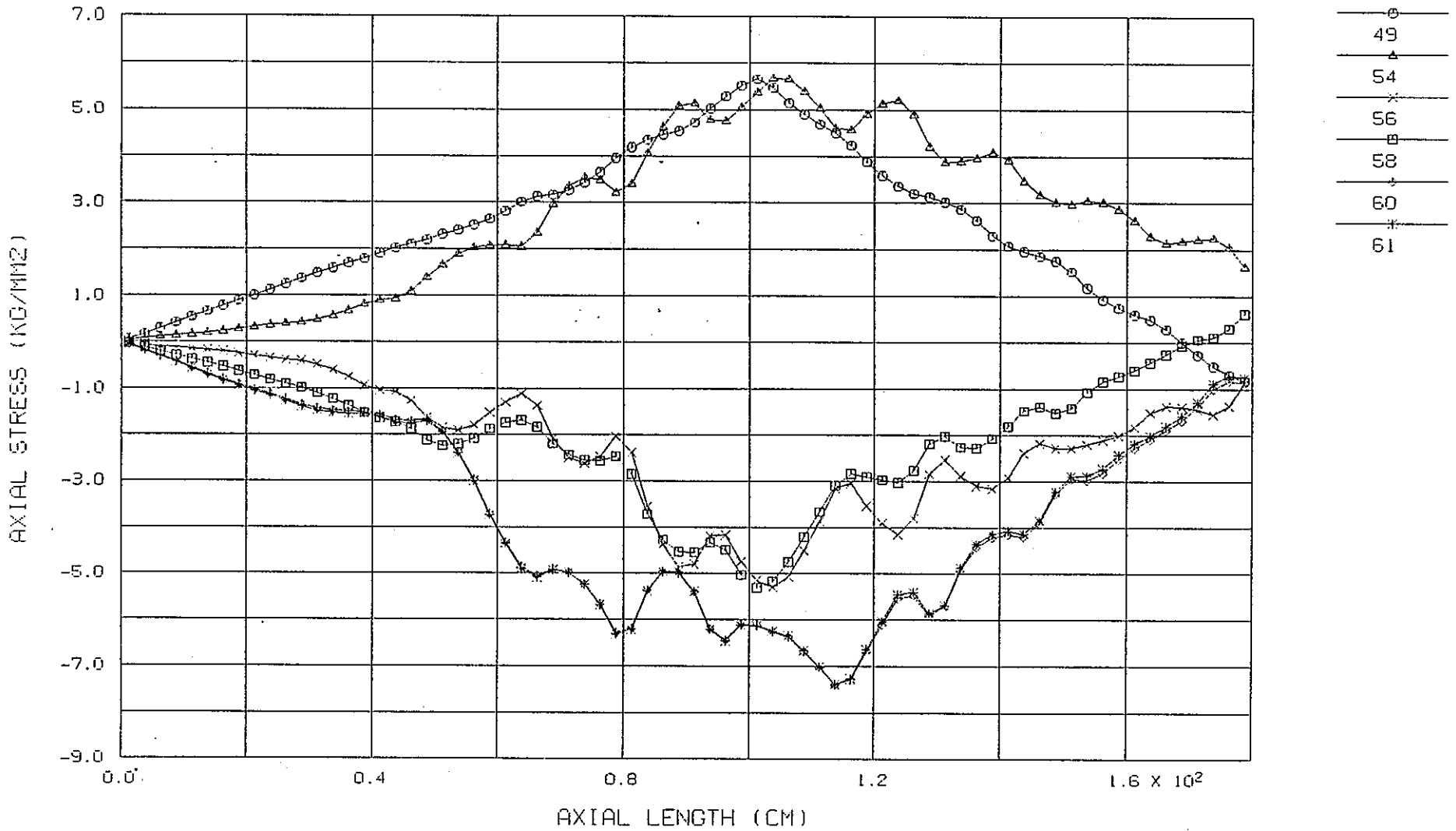
NODE NO. 1-721

( CASE : P4A1 )

付図3-P4A1-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A1)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



ELM NO. 1-711

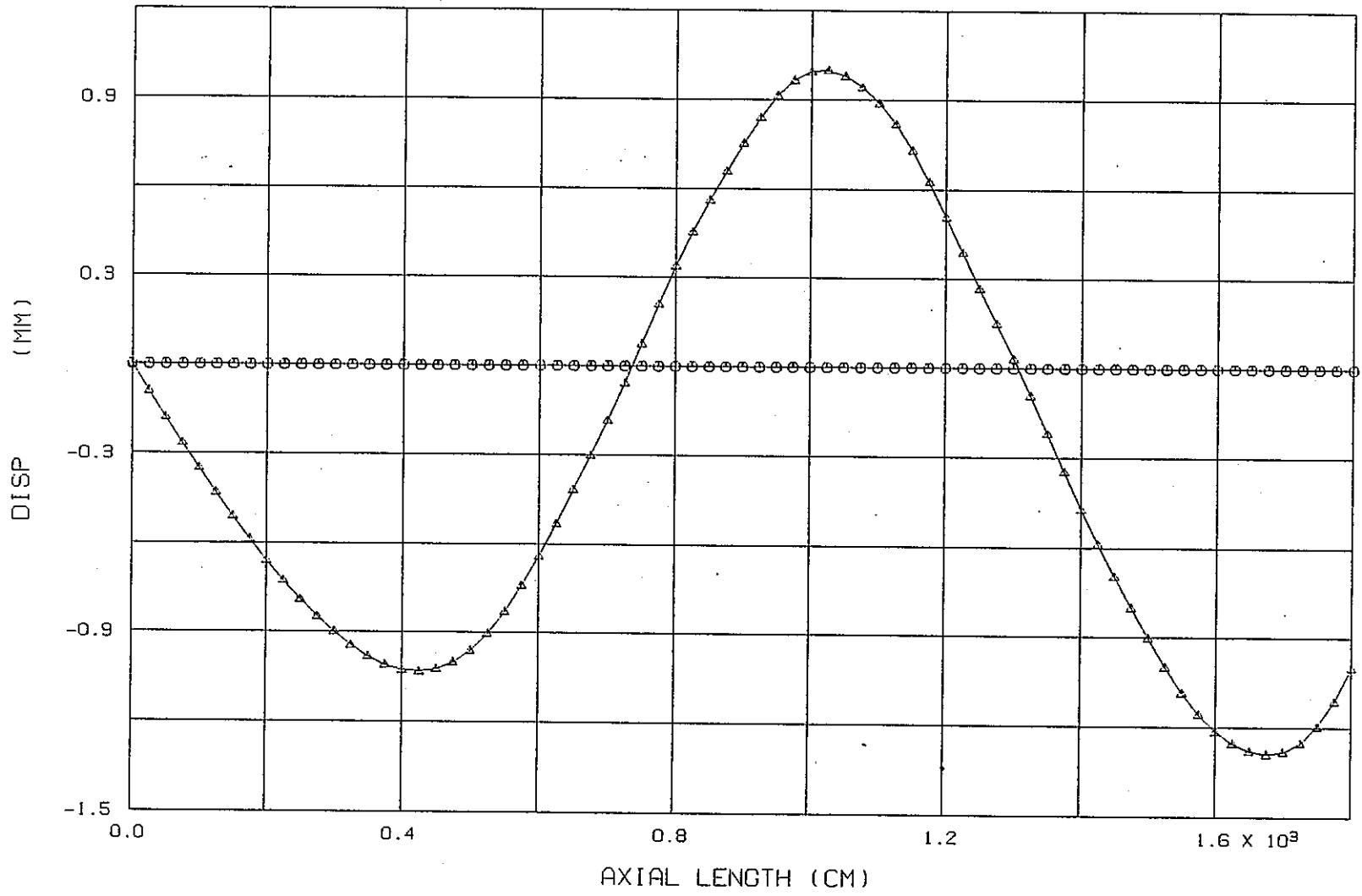
( CASE : P4A1 )

付図3-P4A1-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A1)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077

○  
DISP1  
△  
DISP2



— 95 —

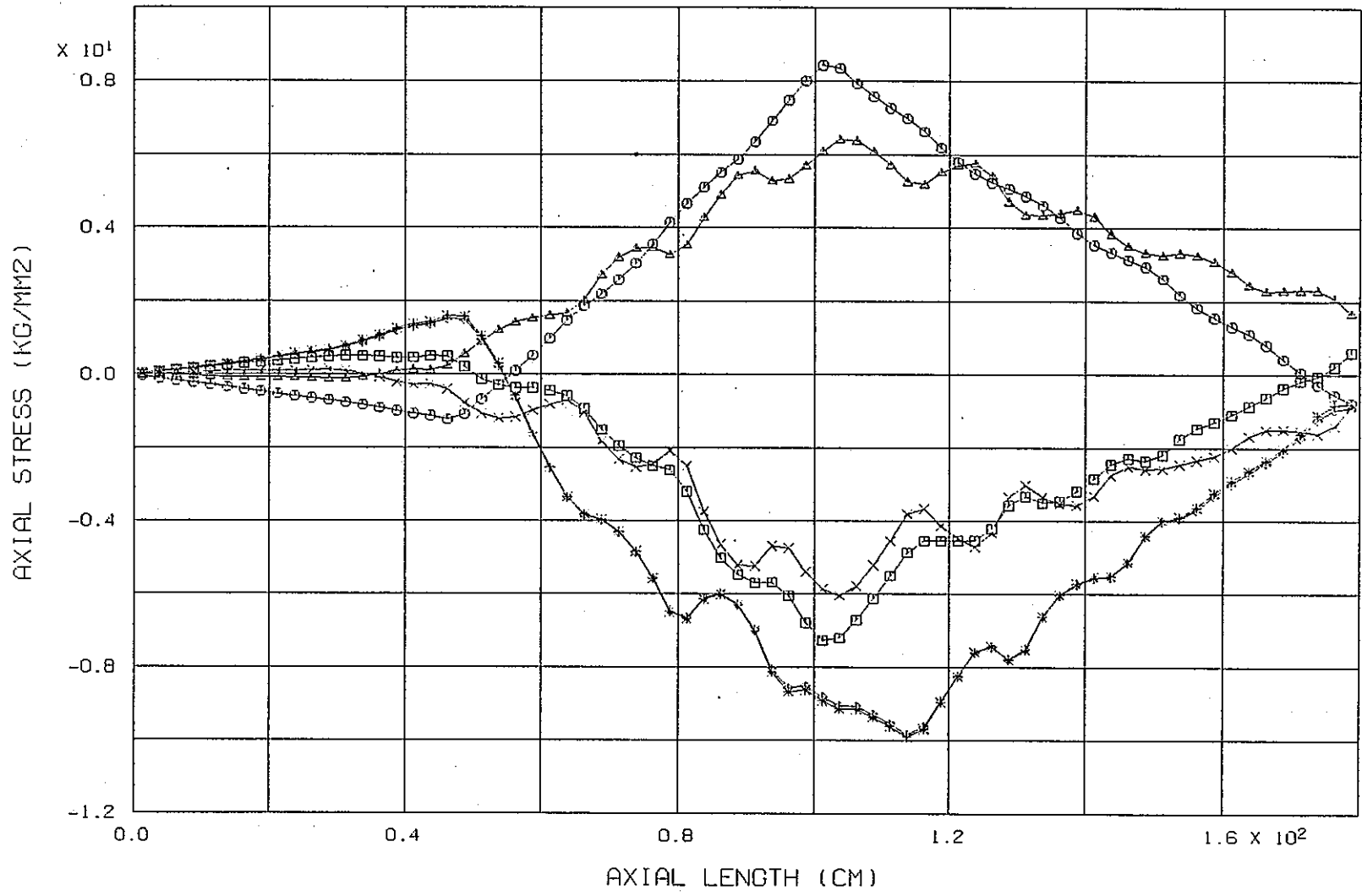
NODE NO. 1-721

( CASE : P4A2 )

付図3-P4A2-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A2)

FINAS  
STEP NO. 1

- 
- 49
- △
- 54
- ×
- 56
- 
- 58
- ▽
- 60
- +
- 61

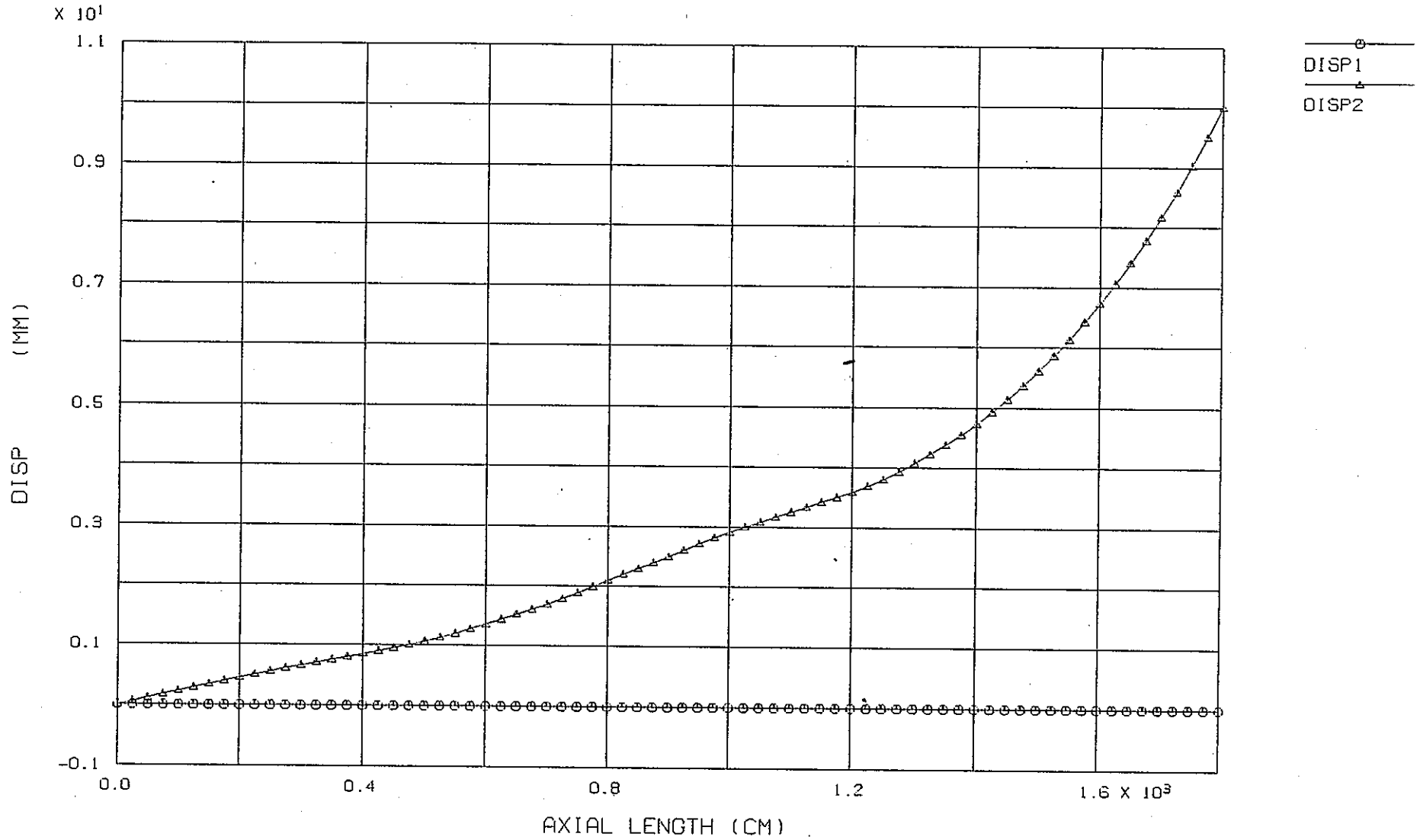


ELM NO. 1-711

( CASE : P4A2 )

付図3-P4A2-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A2)

FINAS  
STEP NO. 1

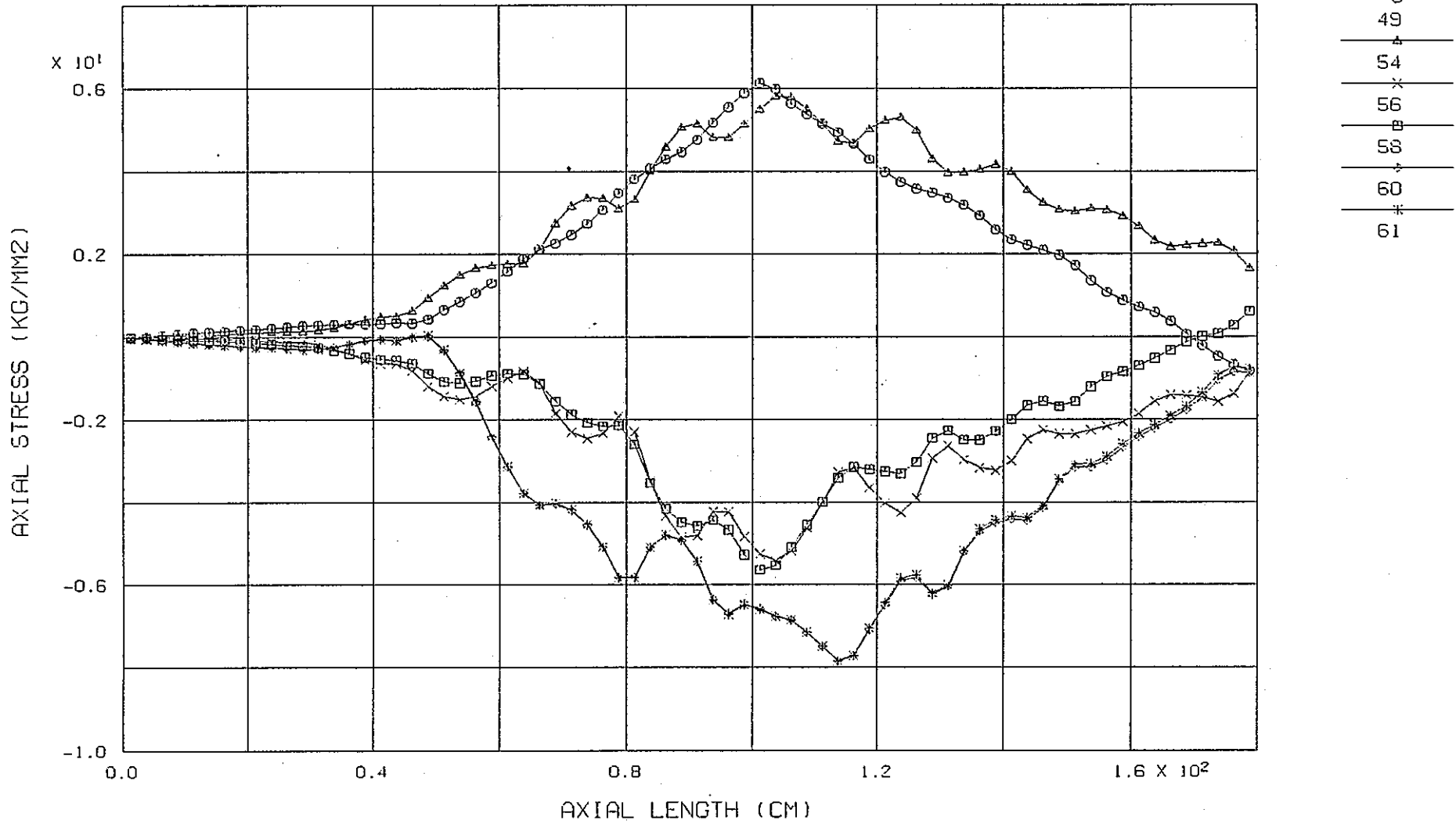


NODE NO. 1-721

( CASE : P4A3 )

付図3-P4A3-1 湾曲形状解析結果(解析ケース:P4A3)

FINAS  
STEP NO. 1

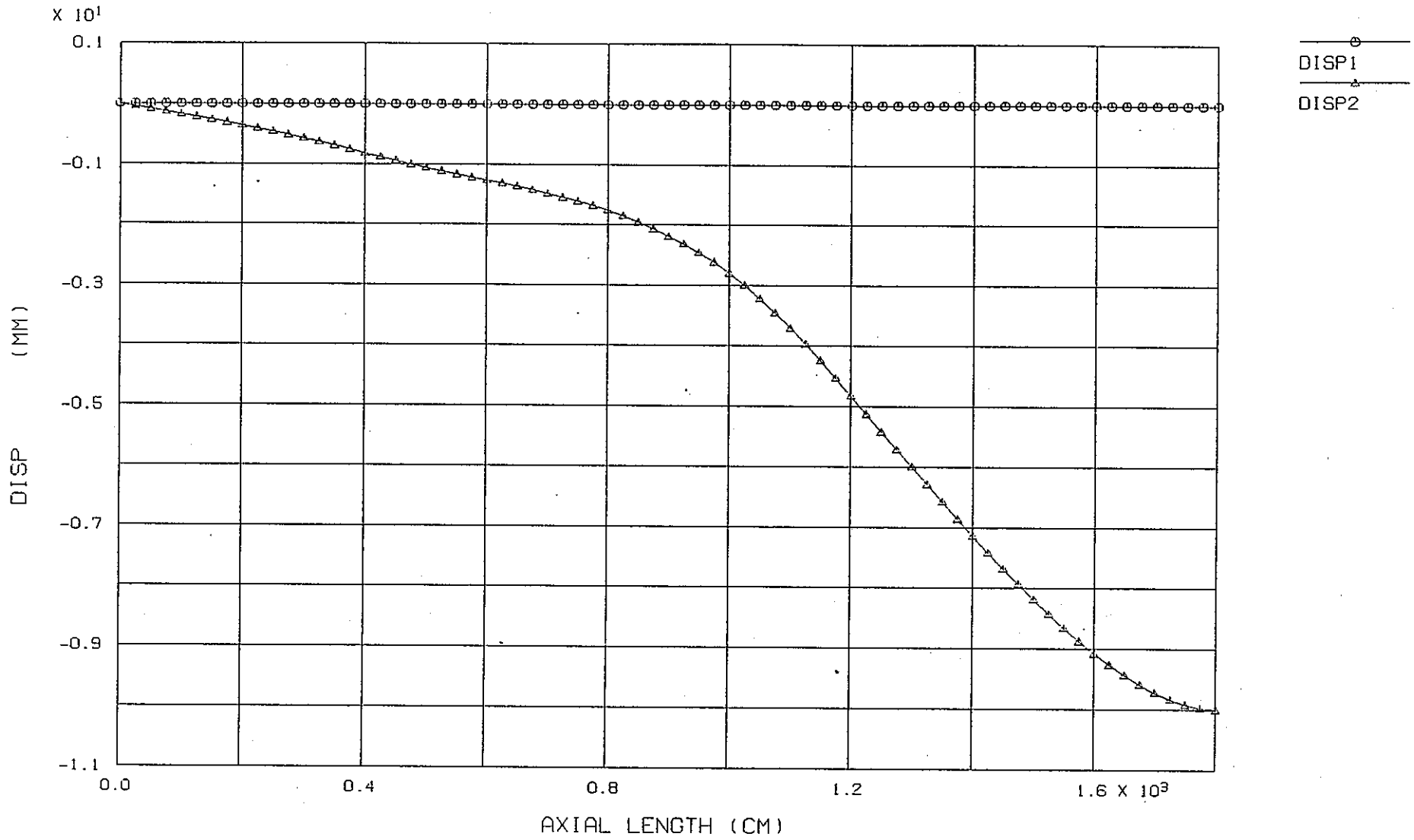


ELM NO. 1-711

( CASE : P4A3 )

付図3-P4A3-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A3)

FINAS  
STEP NO. 1



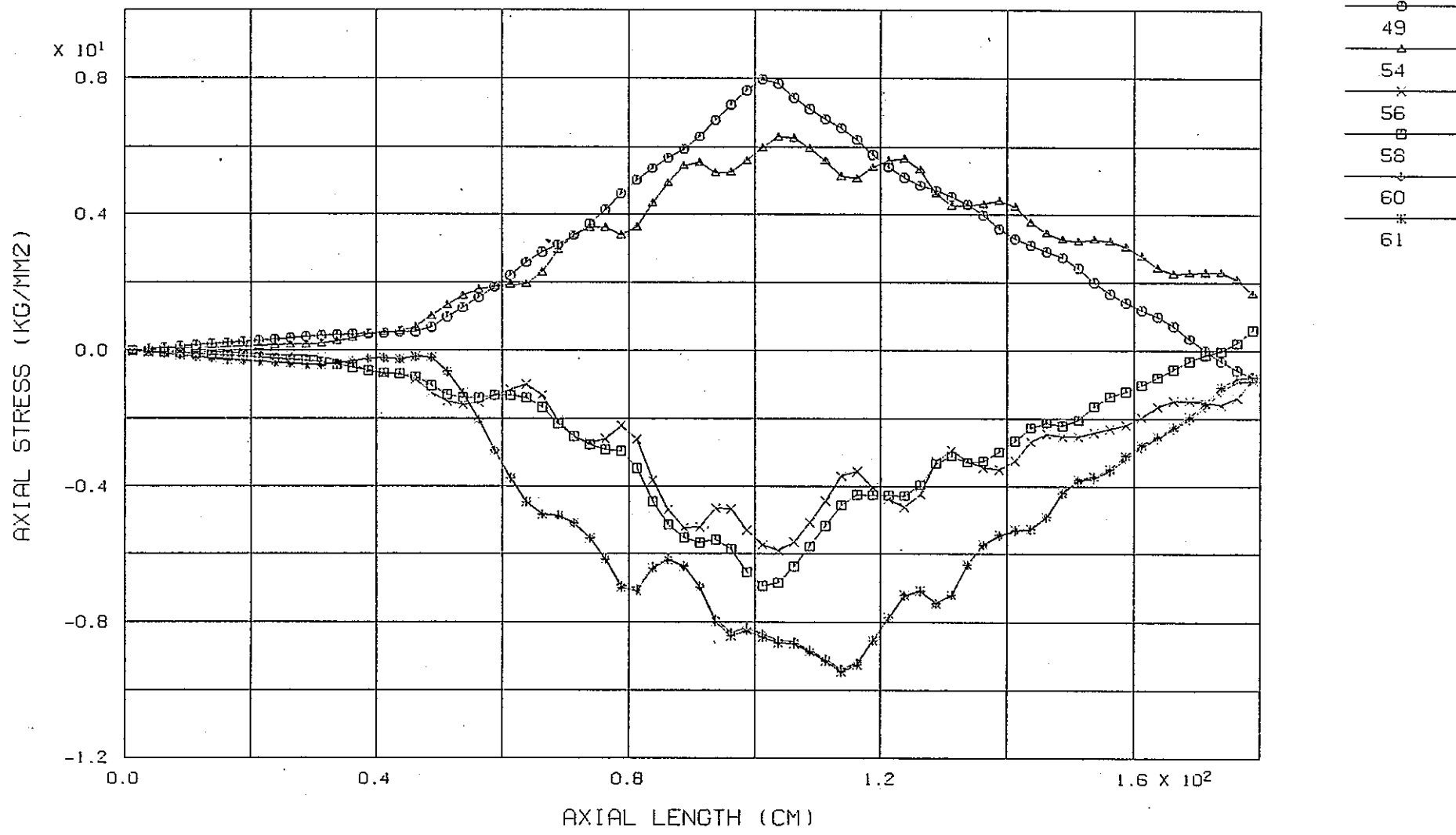
NODE NO. 1-721

( CASE : P4A4 )

付図3-P4A4-1 湾曲形状解析結果(解析ケース:P4A4)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



—100—

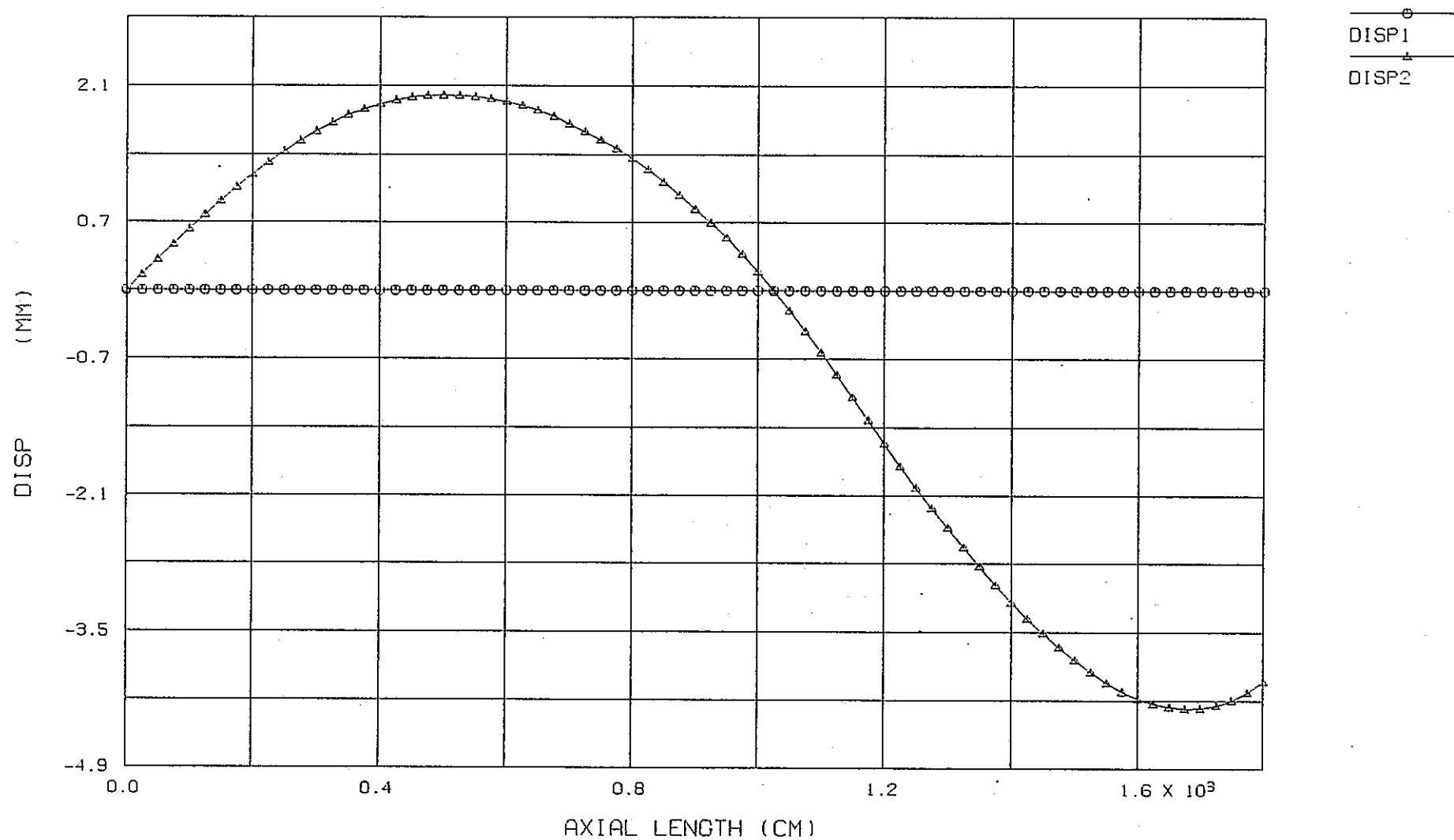
ELM NO. 1-711 ( CASE : P4A4 )

付図3-P4A4-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A4)



FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



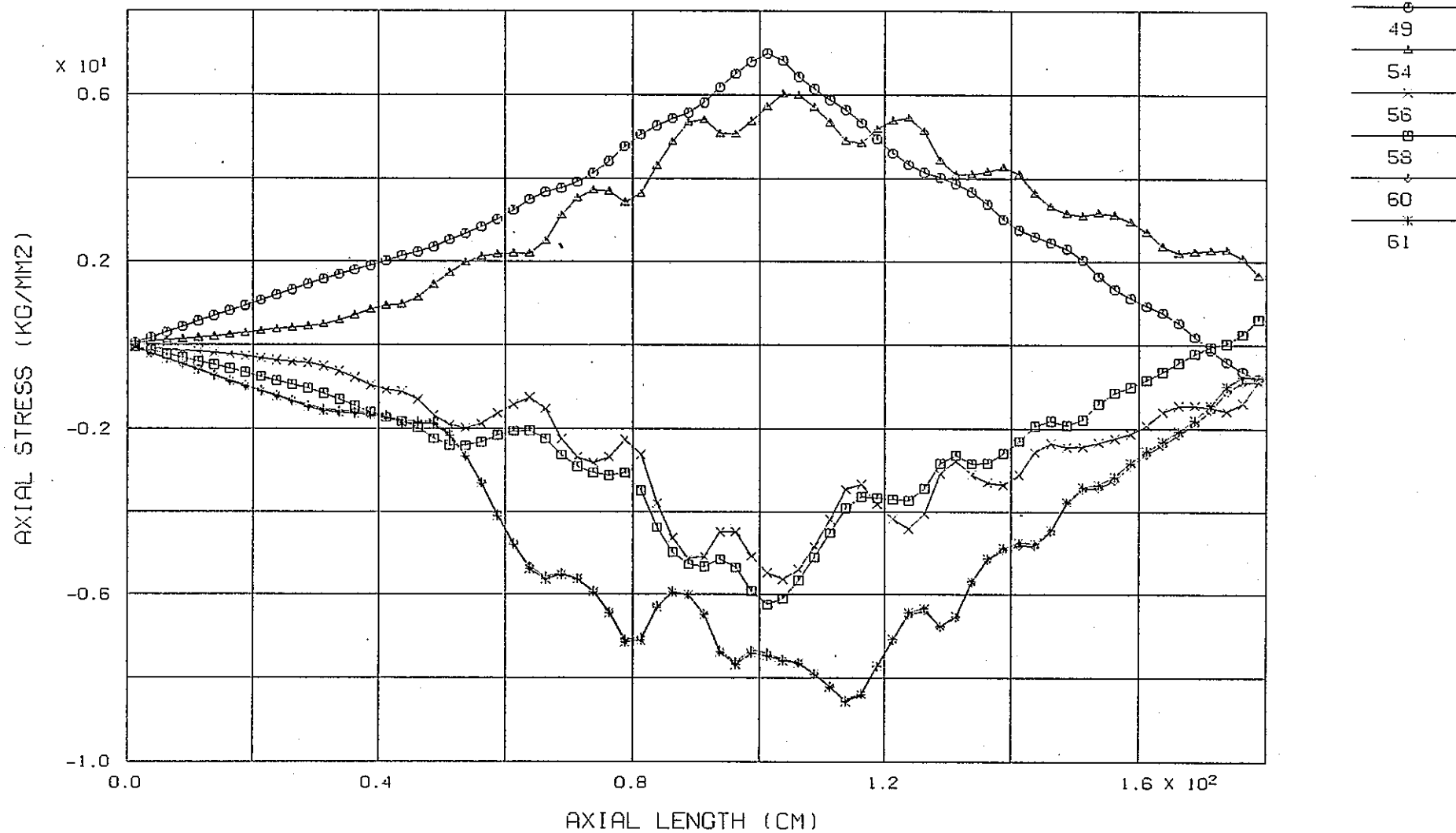
—101—

NODE NO. 1-721

( CASE : P4A5 )

付図3-P4A5-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A5)

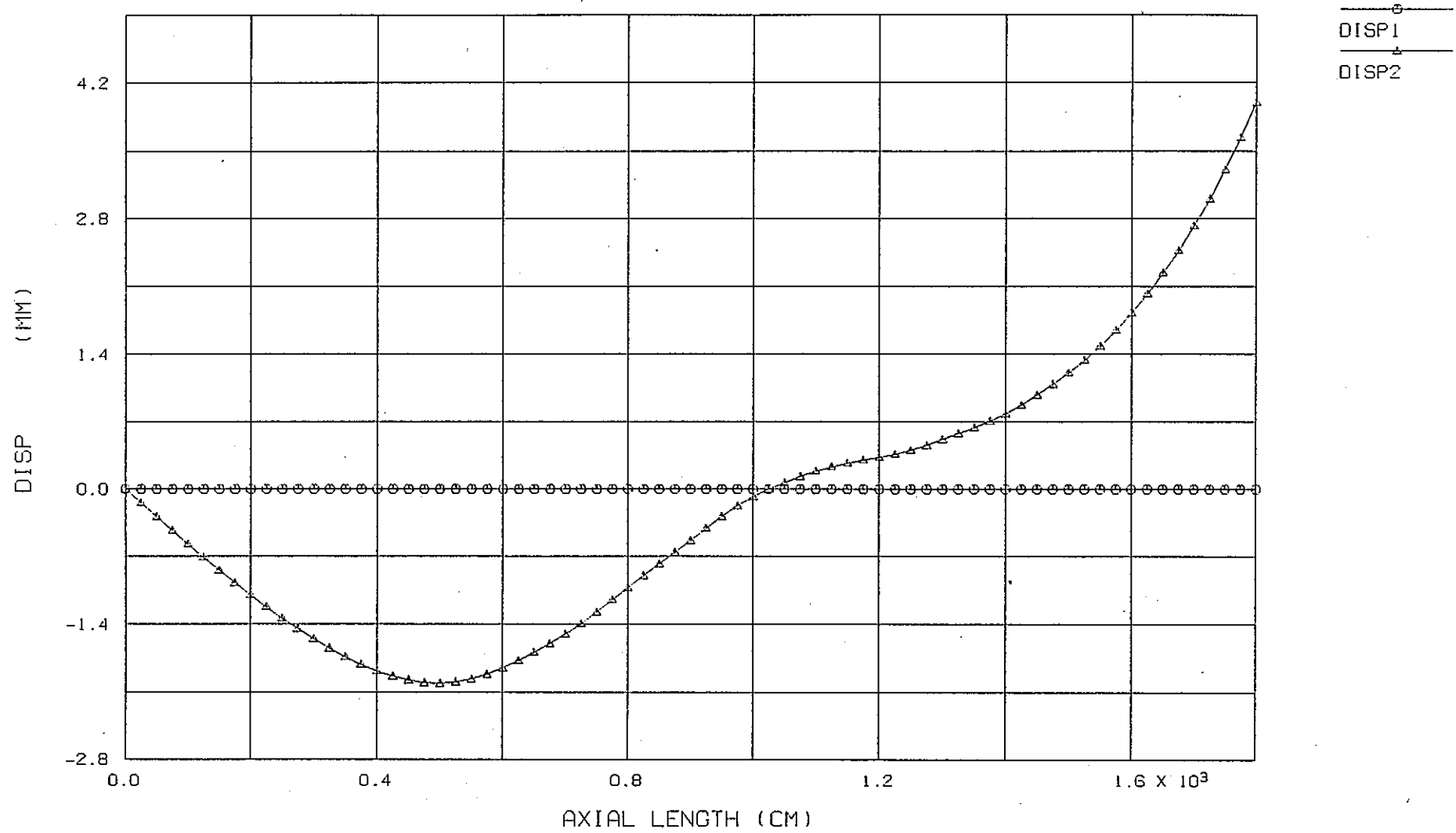
FINAS  
STEP NO. 1



ELM NO. 1-711

( CASE : P4A5 )

付図3-P4A5-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A5)

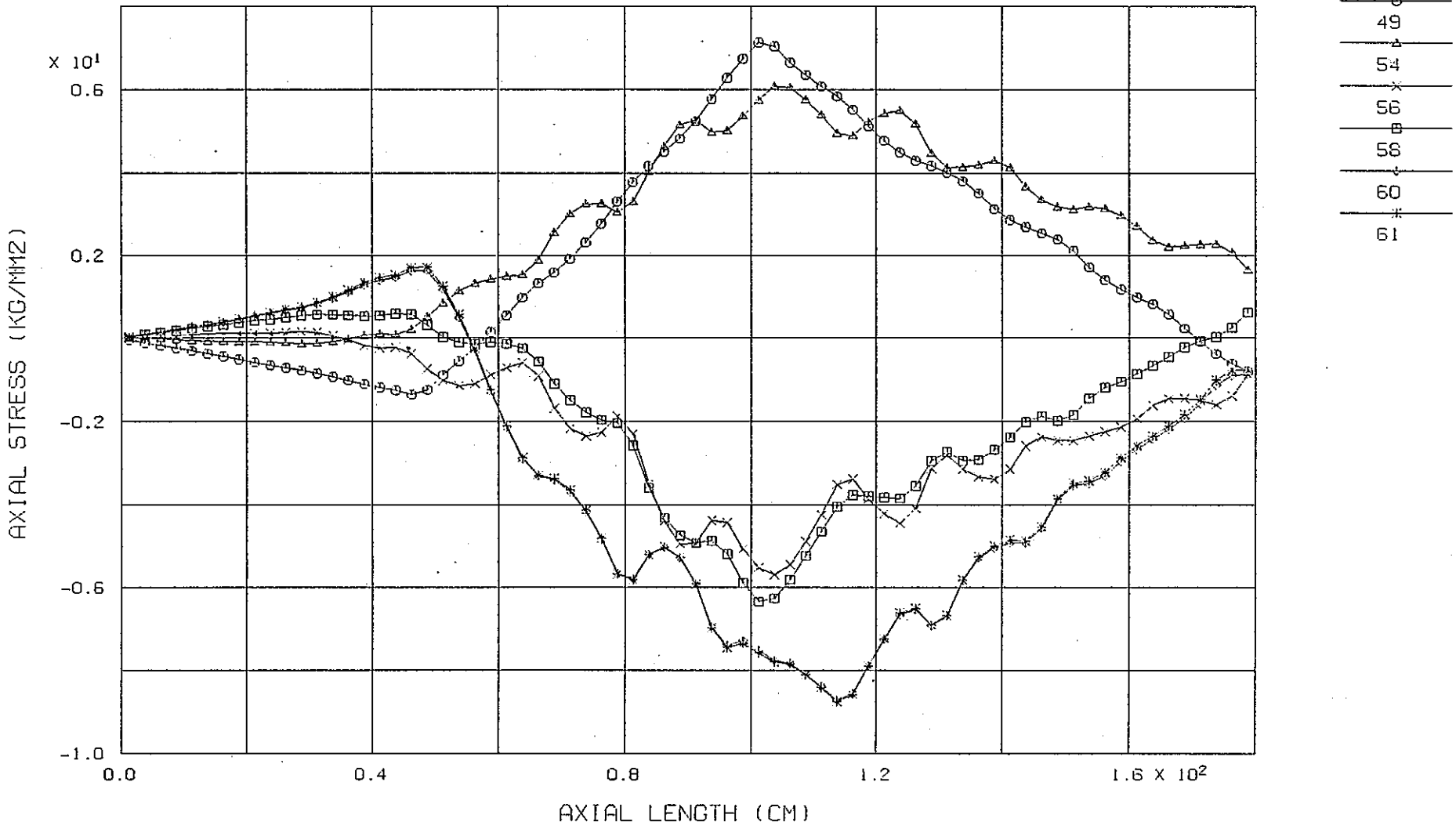


NODE NO. 1-721

( CASE : P4A6 )

付図3-P4A6-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A6)

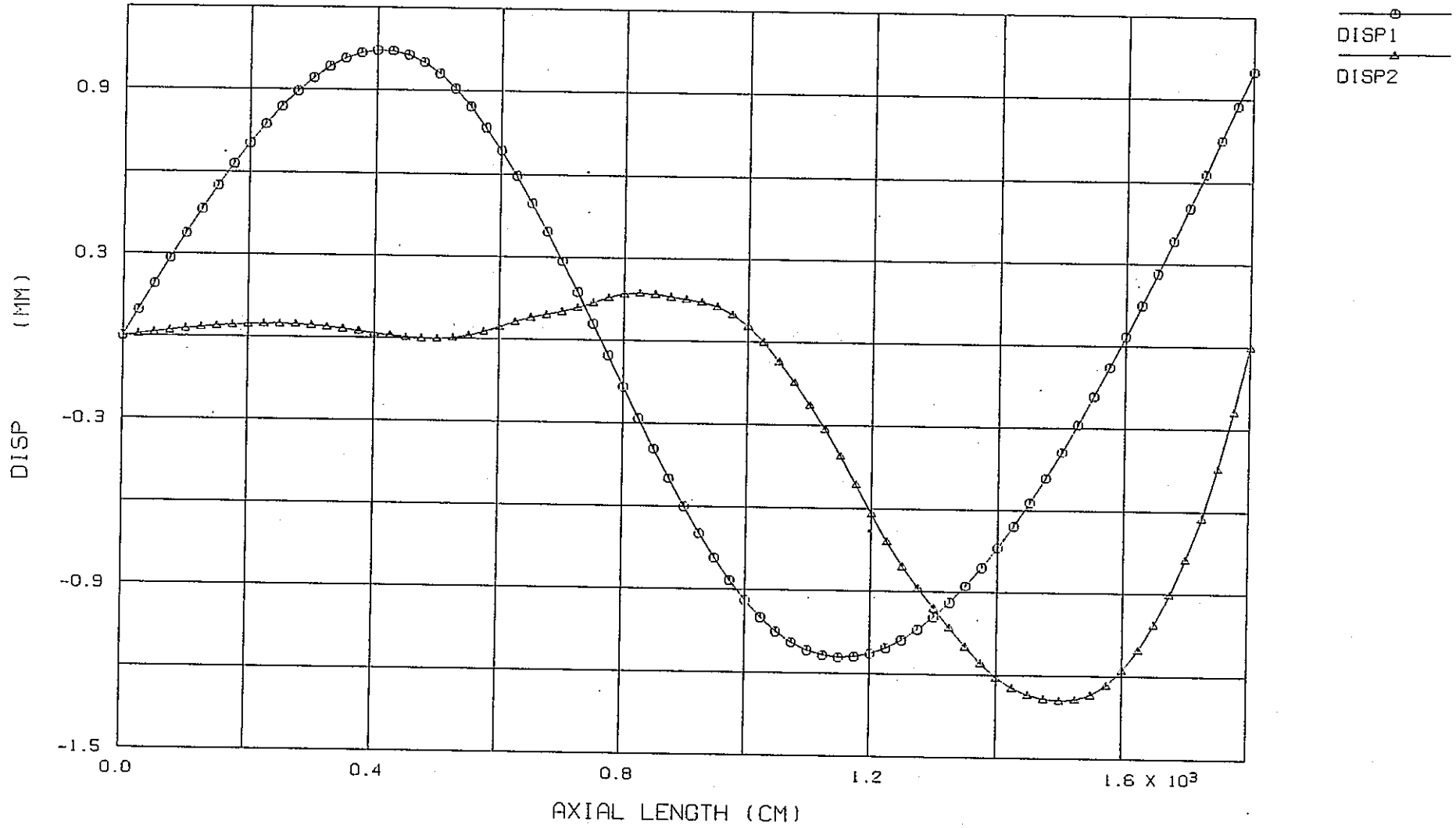
FINAS  
STEP NO. 1



ELM NO. 1-711

( CASE : P4A6 )

付図3-P4A6-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A6)

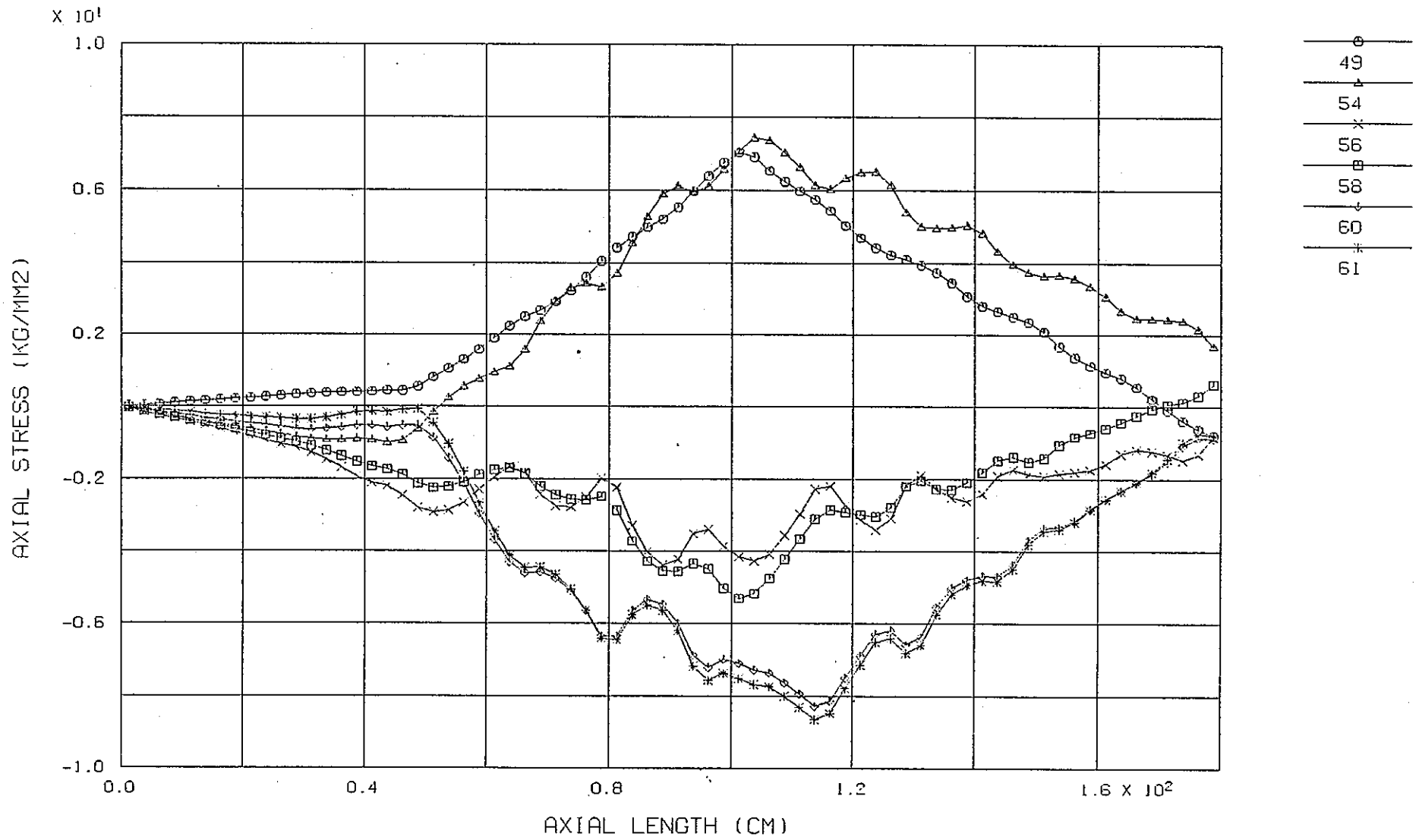


NODE NO. 1-721

( CASE : P4A7 )

付図3-P4A7-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A7)

FINAS  
STEP NO. 1



PNC TN9410 89-077

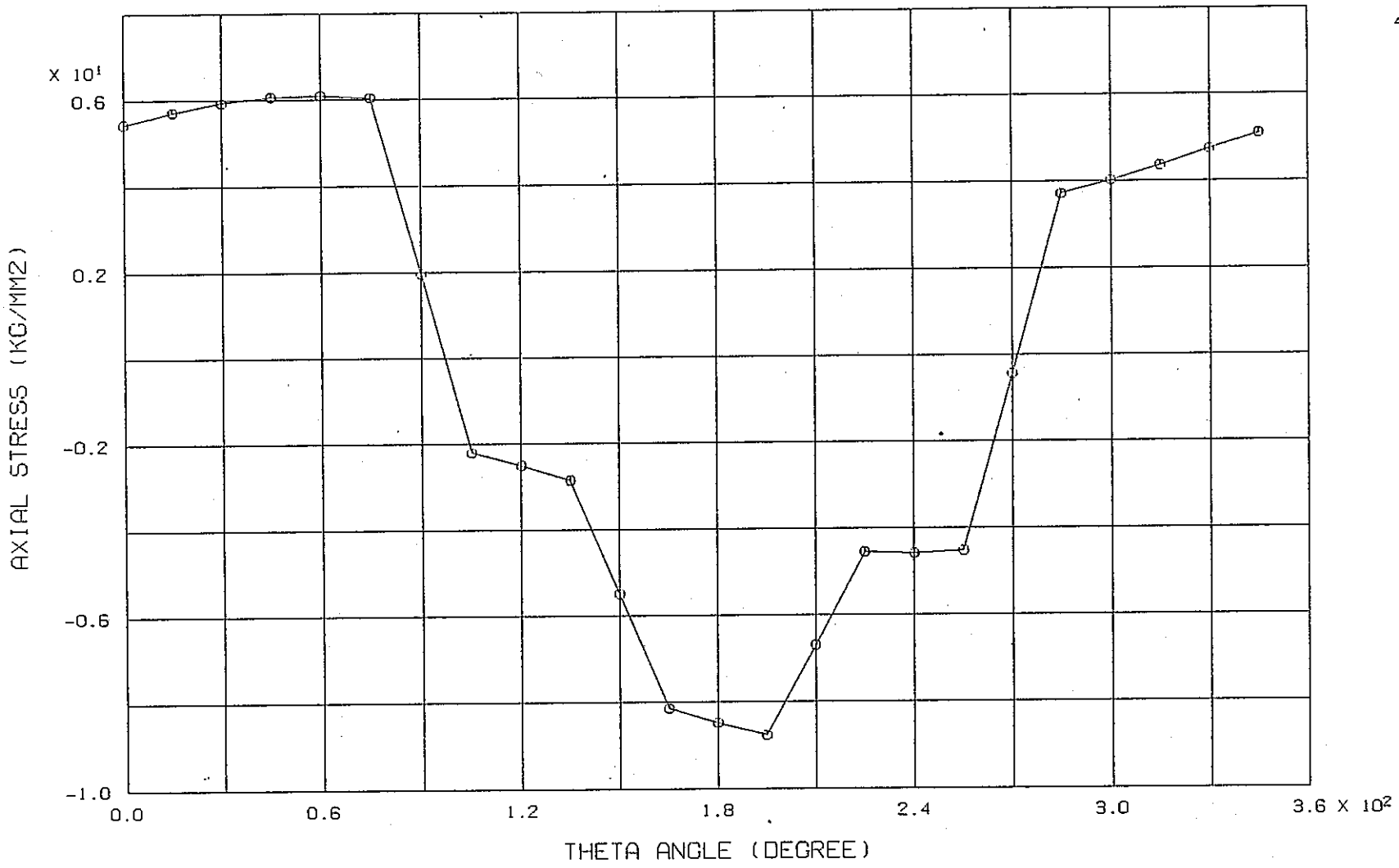
ELM NO. 1-711

( CASE : P4A7 )

付図3-P4A7-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A7)

FINAS  
STEP NO. 1

49 - 72

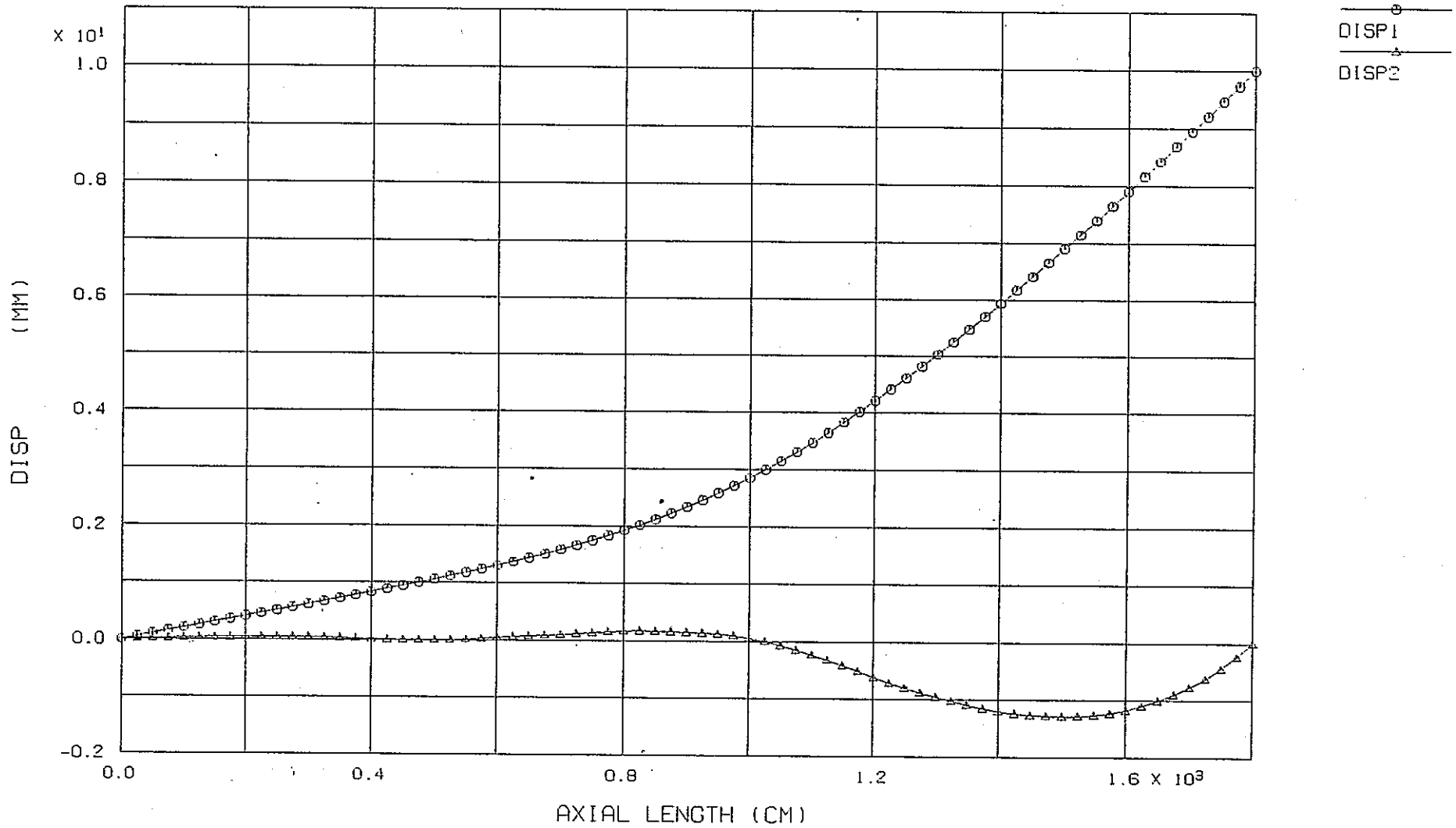


ELEMENT NO. 461

( CASE : P4A7 )

付図3-P4A7-3 軸方向応力の周方向分布解析結果(ケース:P4A7、軸方向位置:1162.5 mm)

FINAS  
STEP NO. 1



NODE NO. 1-721

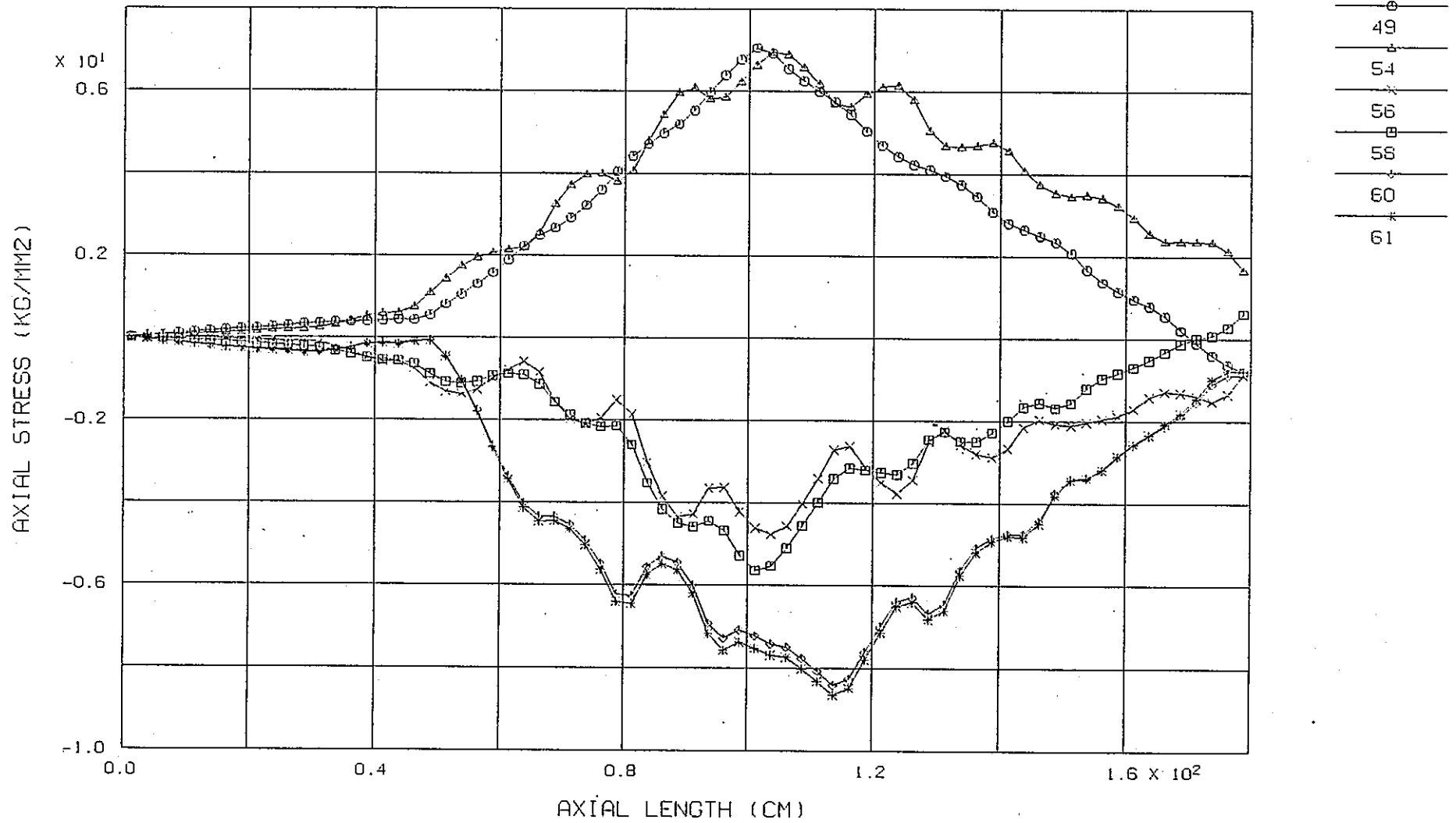
( CASE : P4A8 )

付図3-P4A8-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A8)



FINAS  
STEP NO. 1

109



ELM NO. 1-711

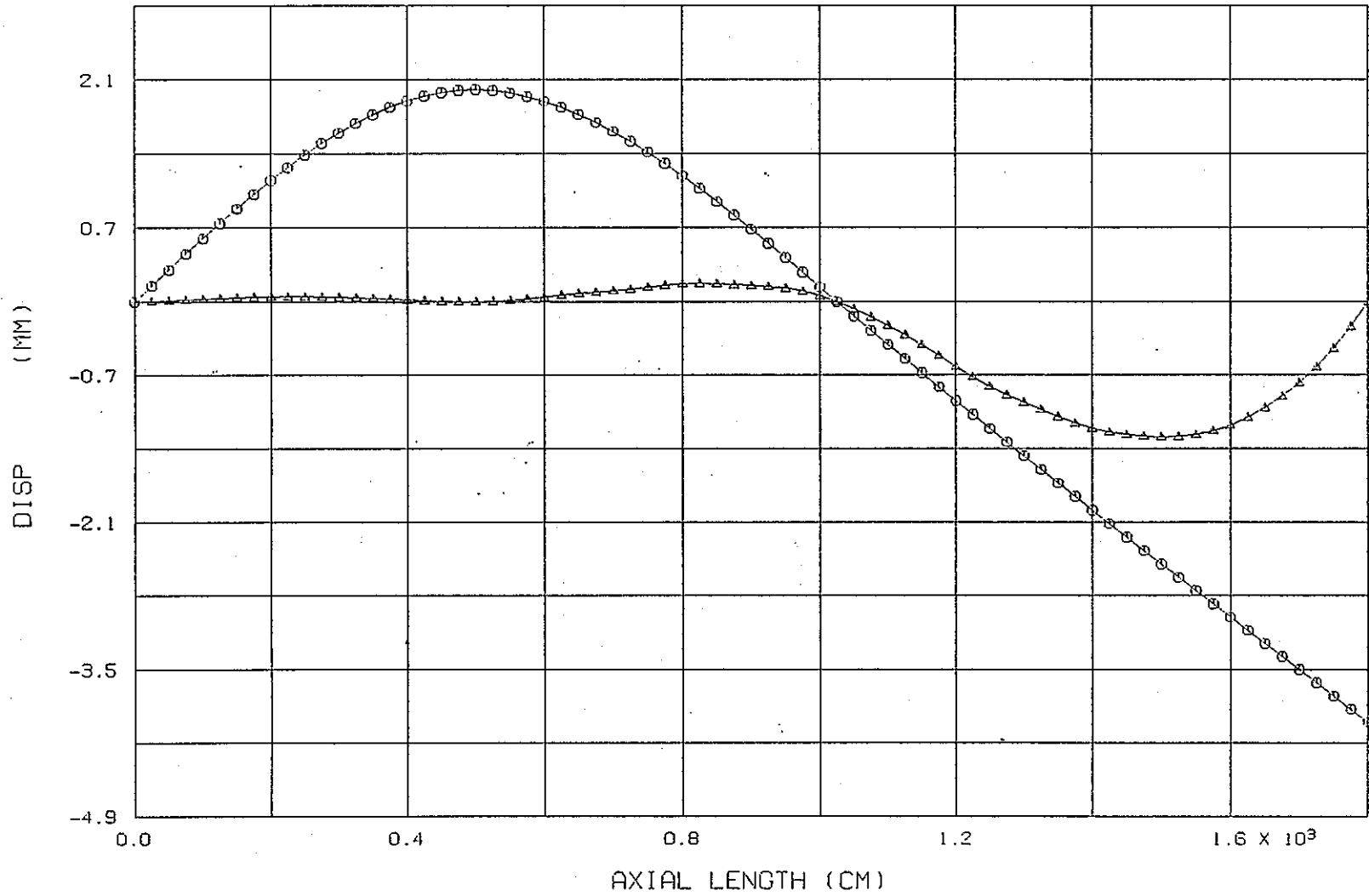
( CASE : P4A8 )

付図3-P4A8-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A8)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077

○  
DISP1  
△  
DISP2



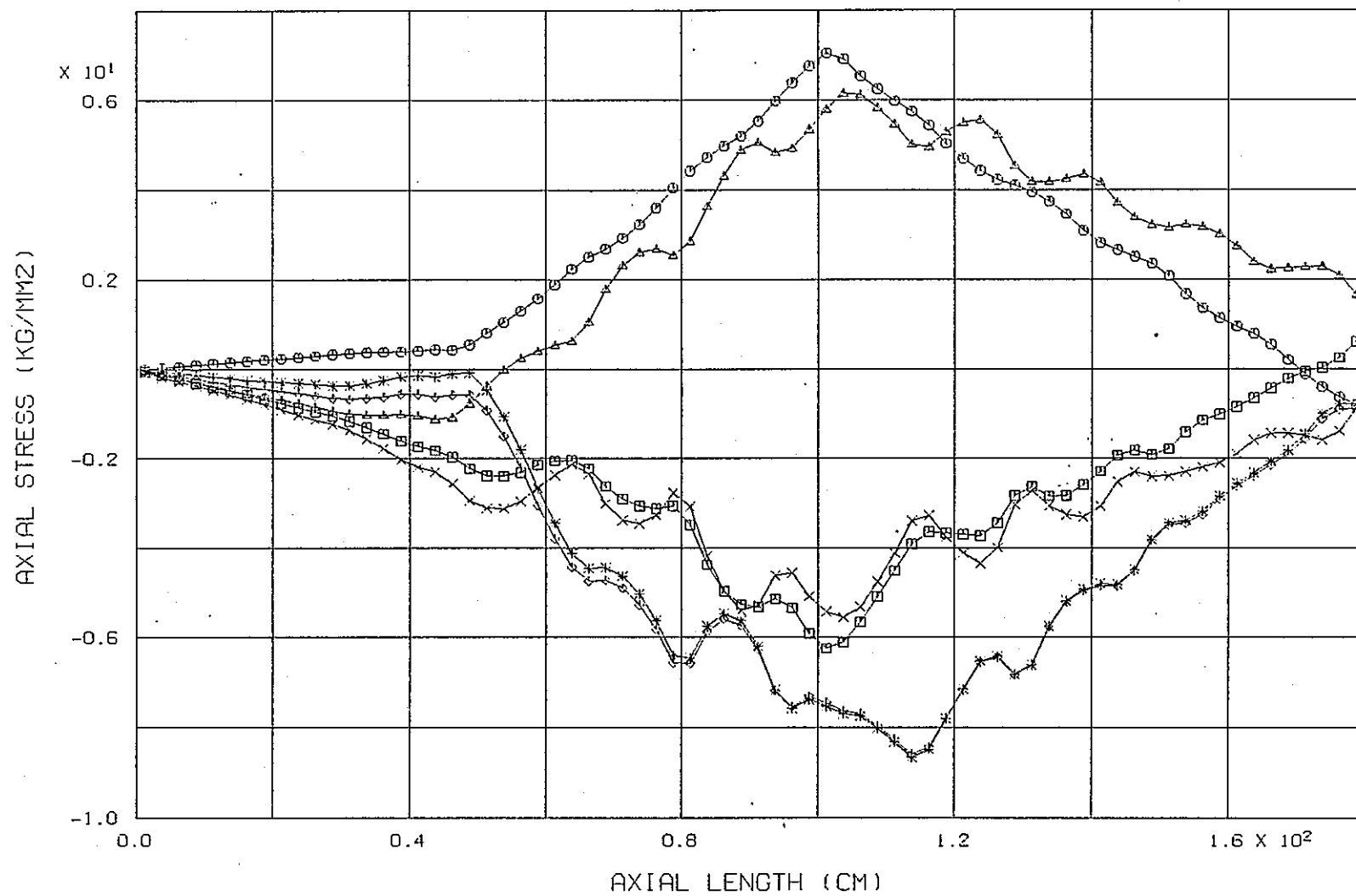
NODE NO. 1-721

( CASE : P4A9 )

付図3-P4A9-1 湾曲形状解析結果(ケース:P4A9)

FINAS  
STEP NO. 1

○
△
◇
×
□
+
*



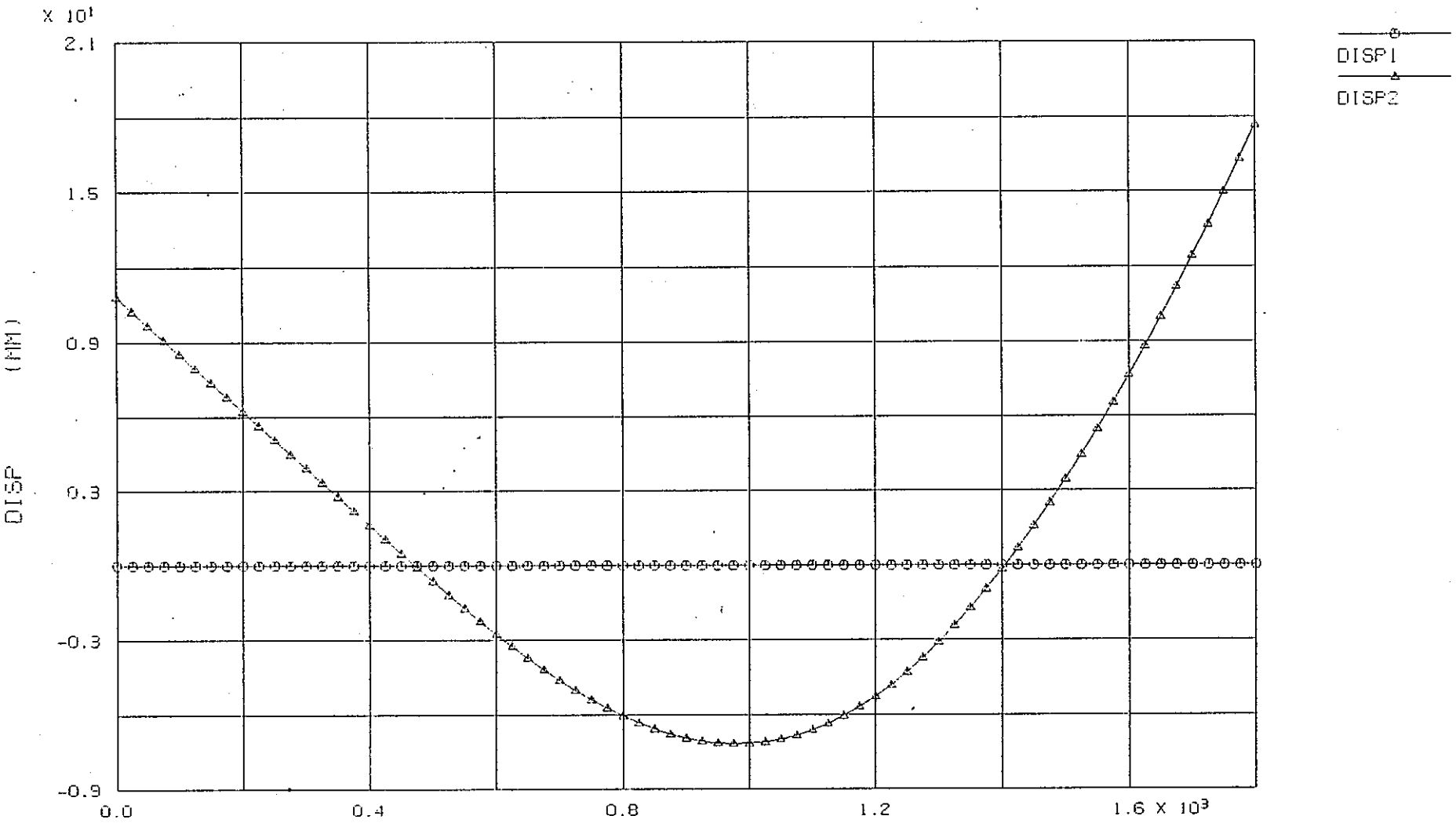
- 111 -

ELM NO. 1-711

( CASE : P4A9 )

付図3-P4A9-2 軸方向応力の軸方向分布解析結果(ケース:P4A9)

FINAS  
STEP NO. 1

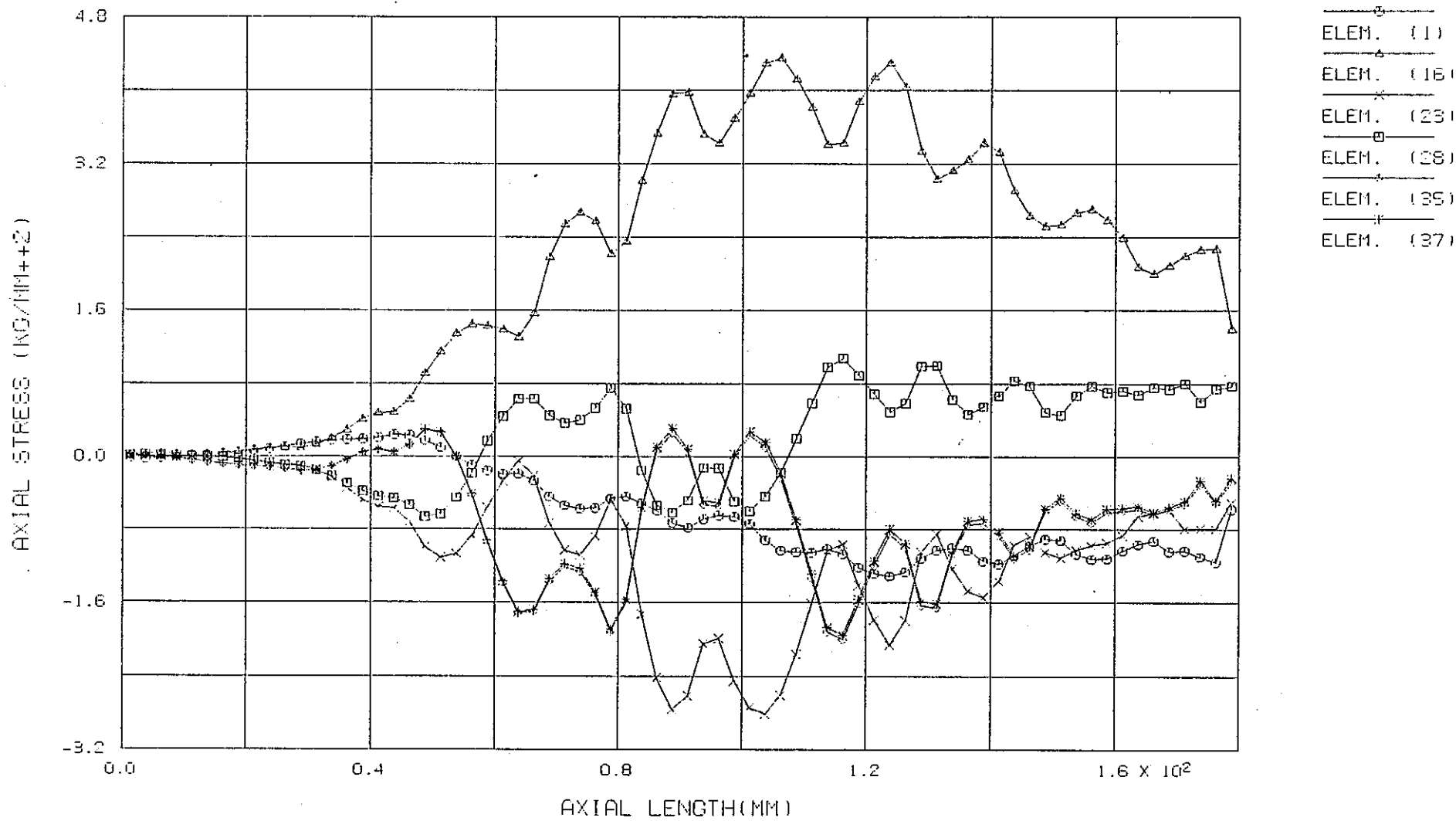


NODE NO. 101-7301

( E72#10 TEMP ) ( REF )

付図3-E0T-1 湾曲形状解析結果(ケース:E0T)

FINAS  
STEP NO. 1



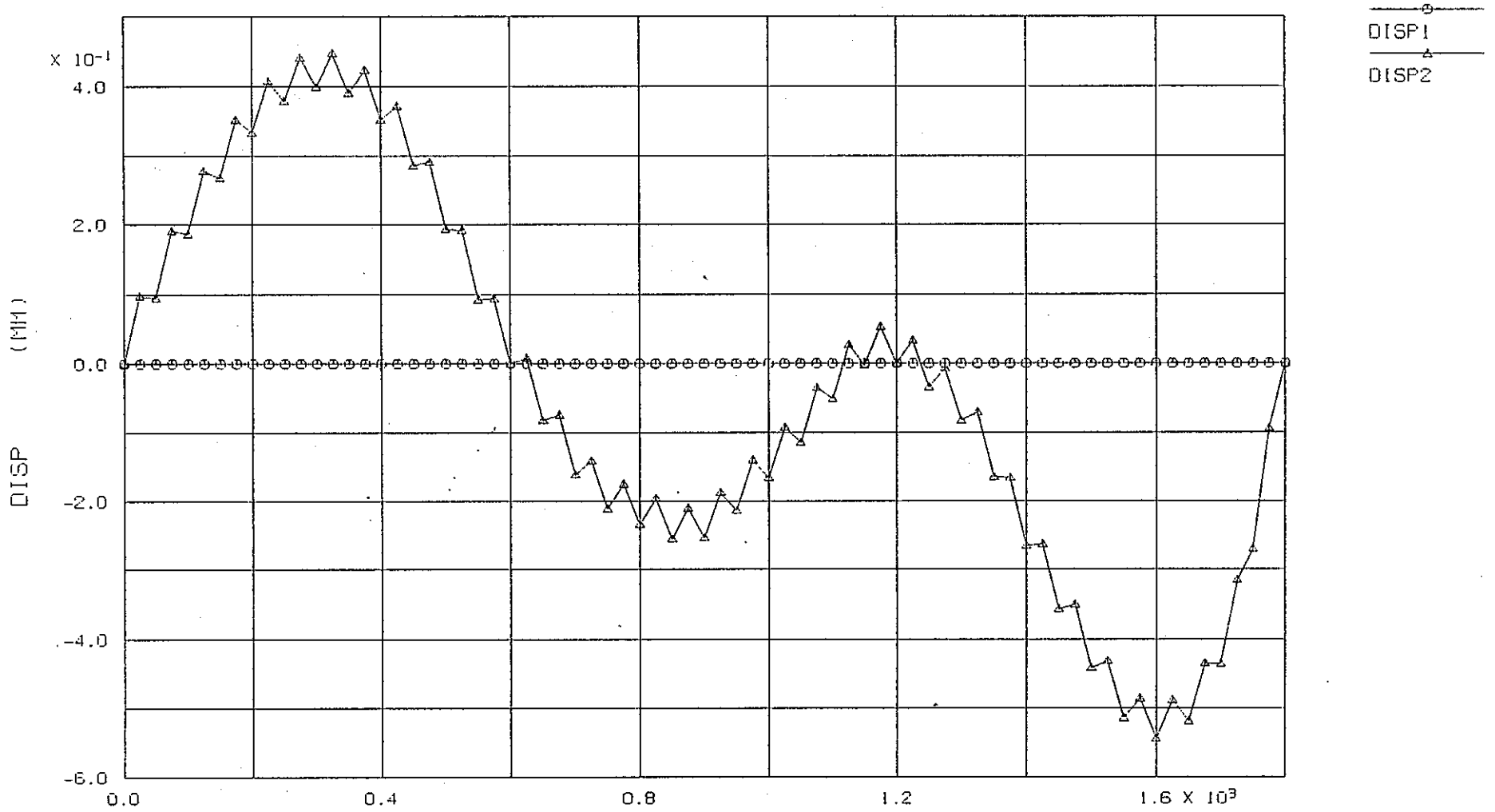
MID VALU

( E72#10 TEMP ) ( REF )

付図3-E0T-2 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E0T)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



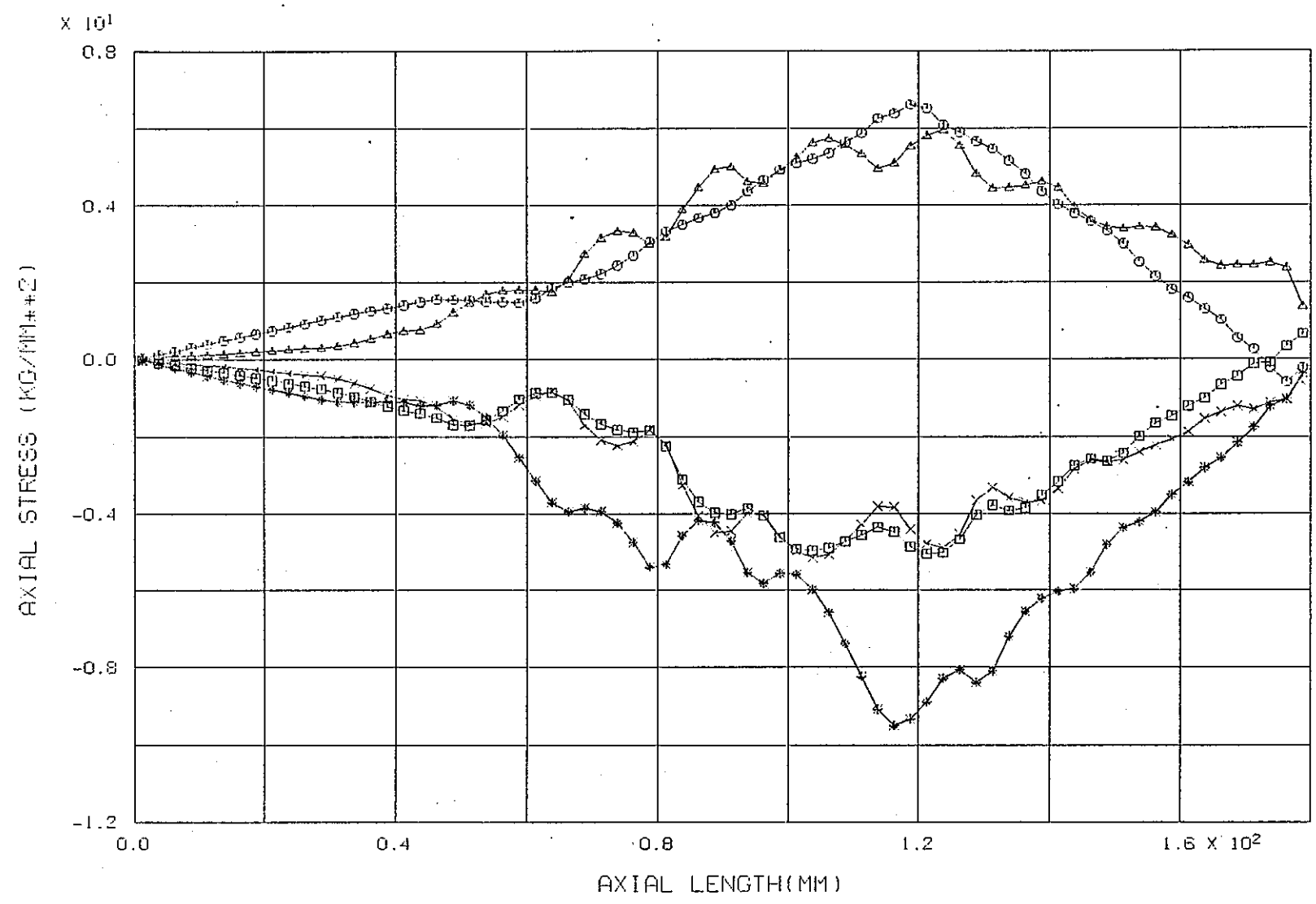
NODE NO. 101-7301

( ELBOW \* 72 ) ( 600MM )

付図3-E4T-1 湾曲形状解析結果(ケース:E4T)

FINAS  
STEP NO. 1

- ELEM. (1)
- △— ELEM. (16)
- ×— ELEM. (23)
- ELEM. (28)
- ◇— ELEM. (35)
- +— ELEM. (37)

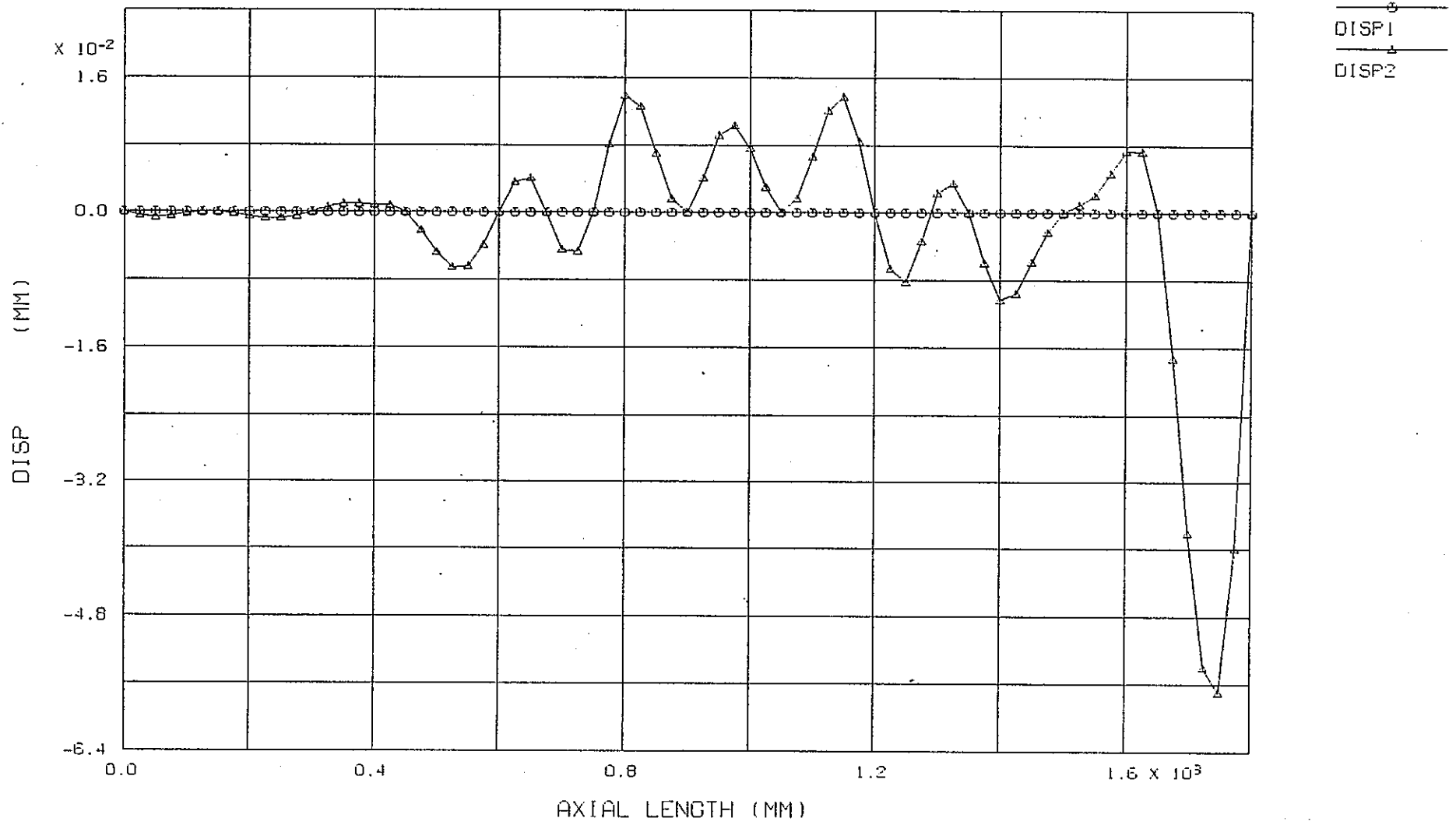


MID VALU ( ELBOW \* 72 ) ( 600MM )

付図3-E4T-2 軸方向応力(肉厚中心)の軸方向分布解析結果(ケース:E4T)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077



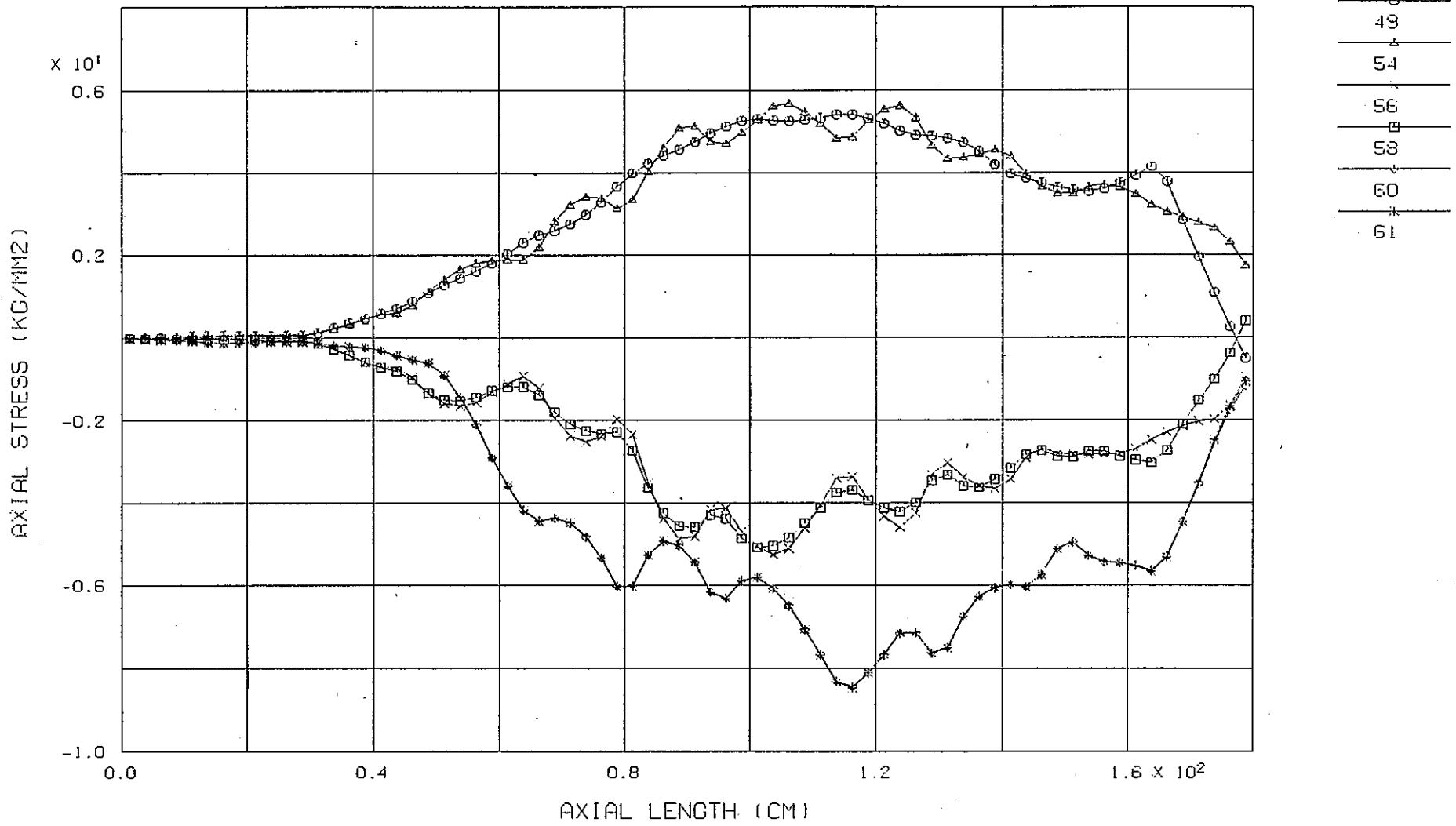
NODE NO. 1-721

( PIPE3 # 72 ) ( P13L )

付図4-1.1 照射初期における湾曲形状解析結果(標準ケース)



FINAS  
STEP NO. 1



ELM NO. 1-711

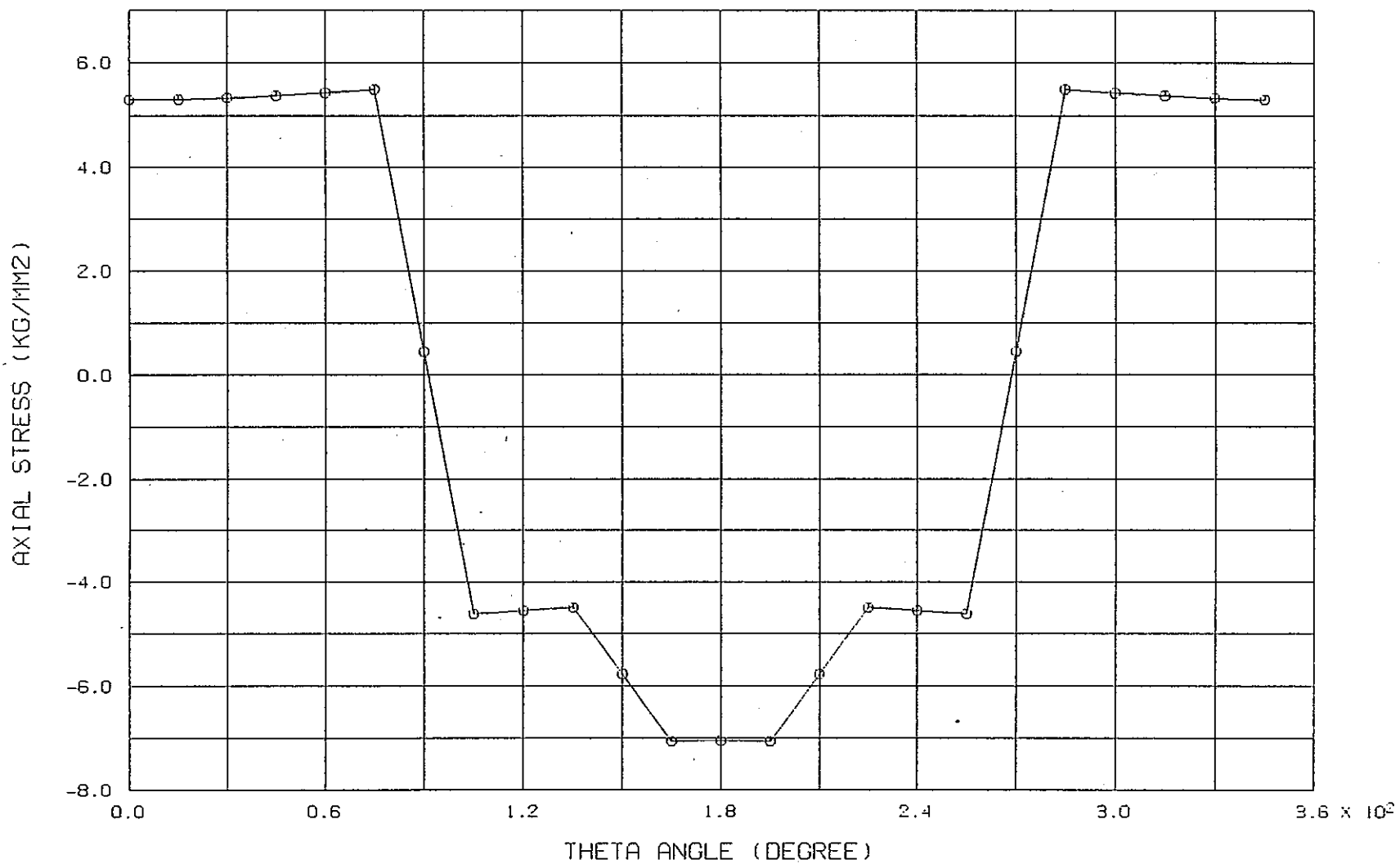
( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-1.2 照射初期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(標準ケース)

FINAS  
STEP NO. 1

PNC TN9410 89-077

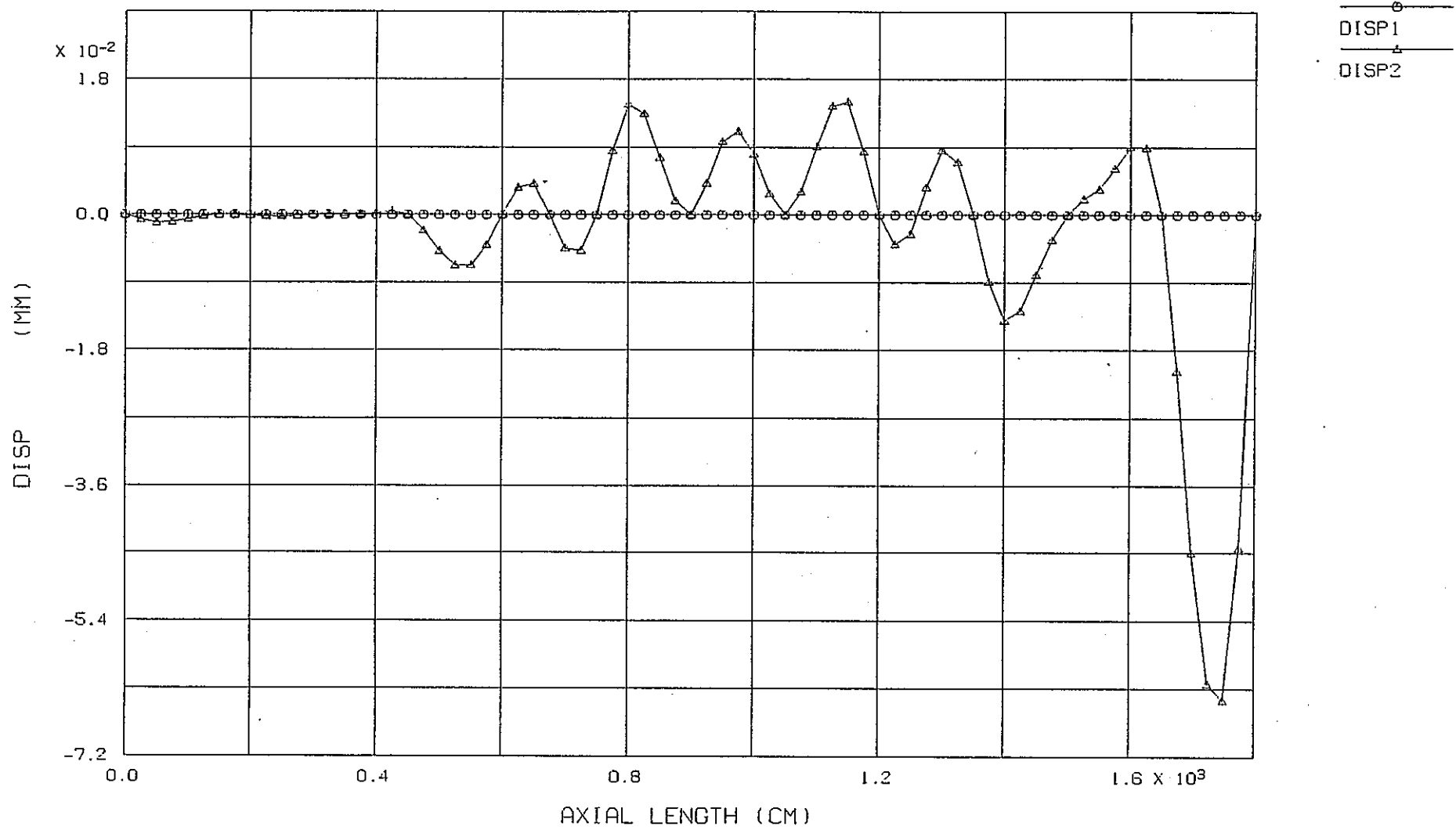
49 - 72



ELEMENT NO. 431

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

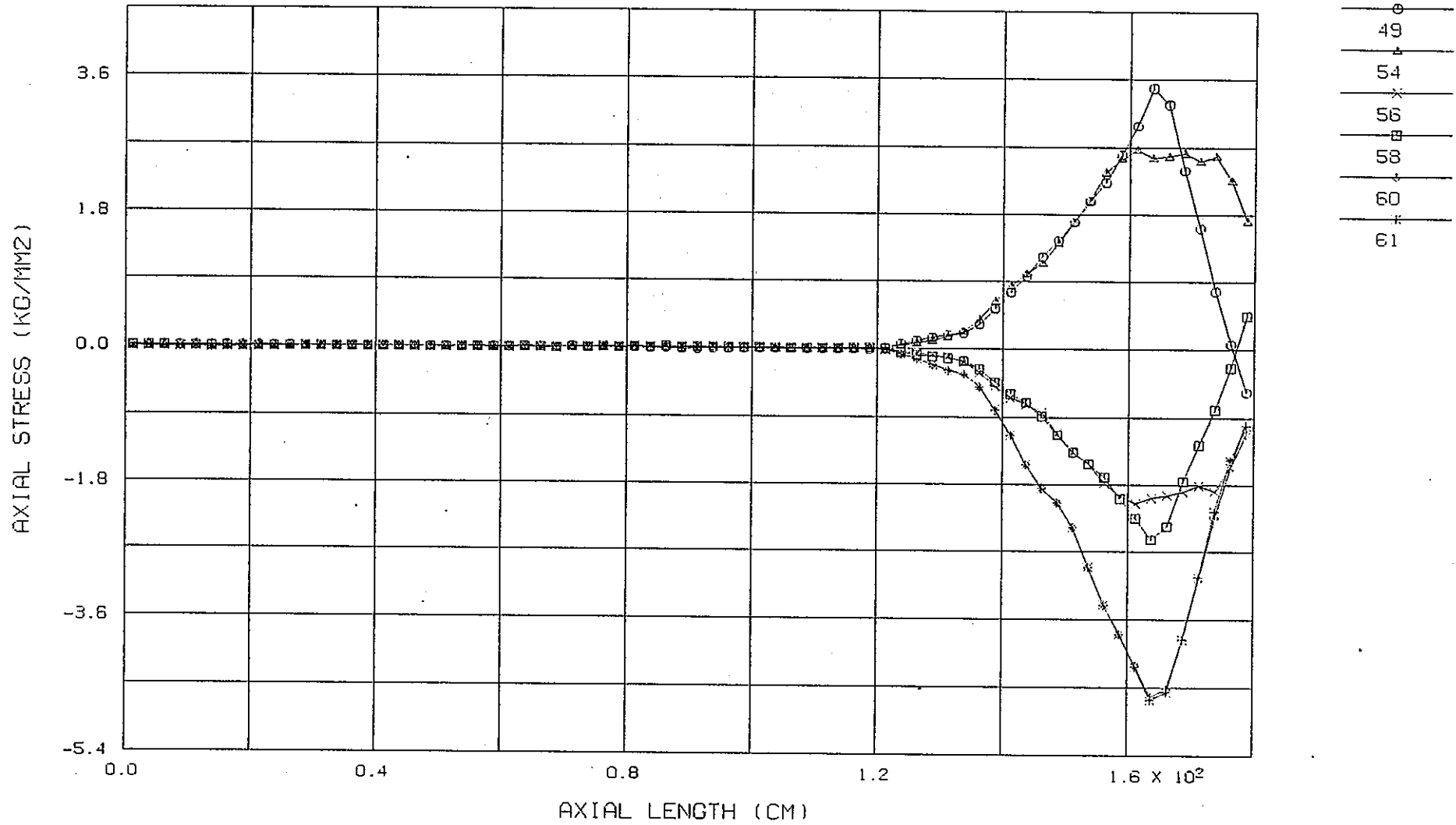
付図4-1.3 照射初期における軸方向応力の周方向分布解析結果(標準ケース)



NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-2.1 照射中期における湾曲形状解析結果(標準ケース)

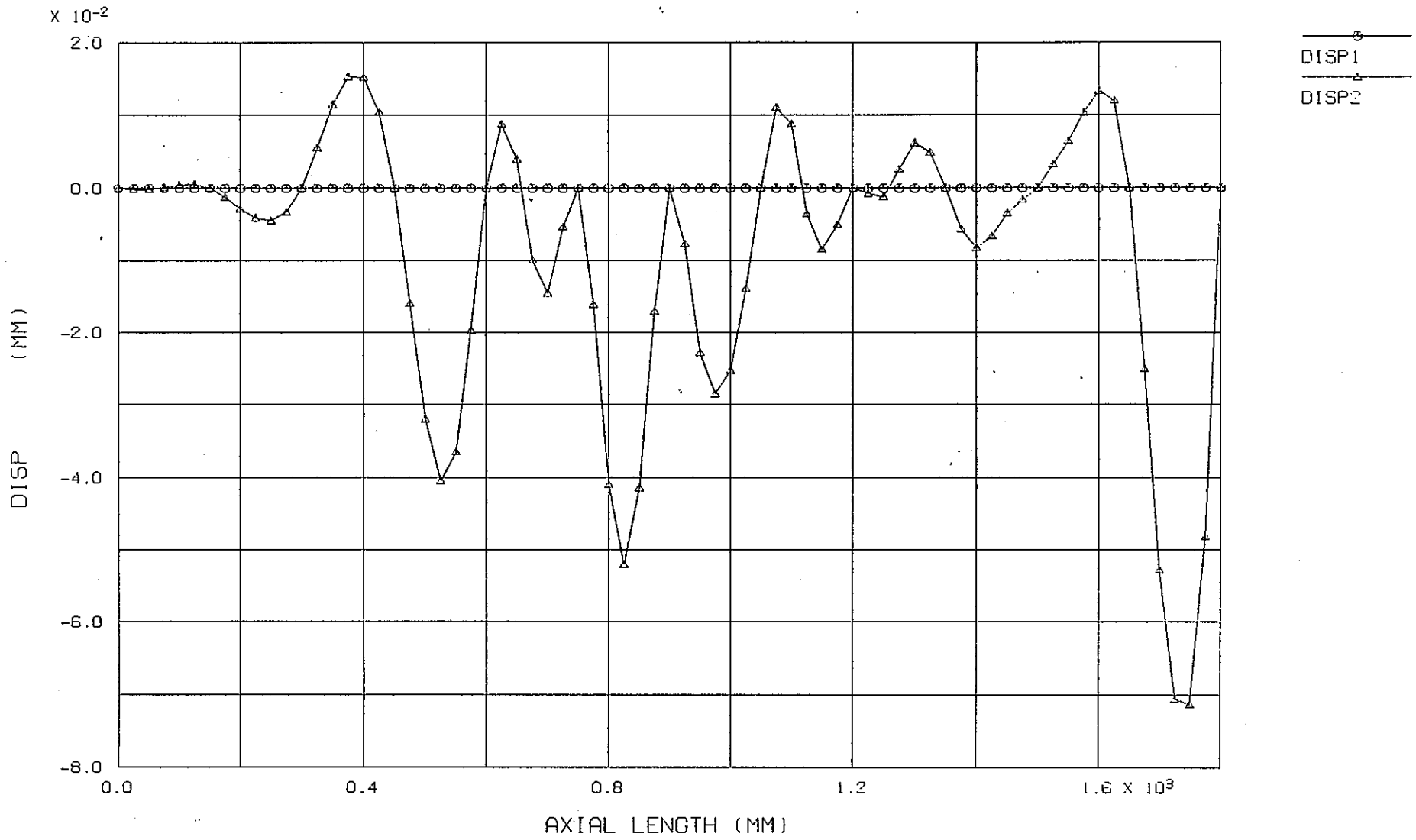


ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-2.2 照射中期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(標準ケース)

FINAS  
STEP NO. 40

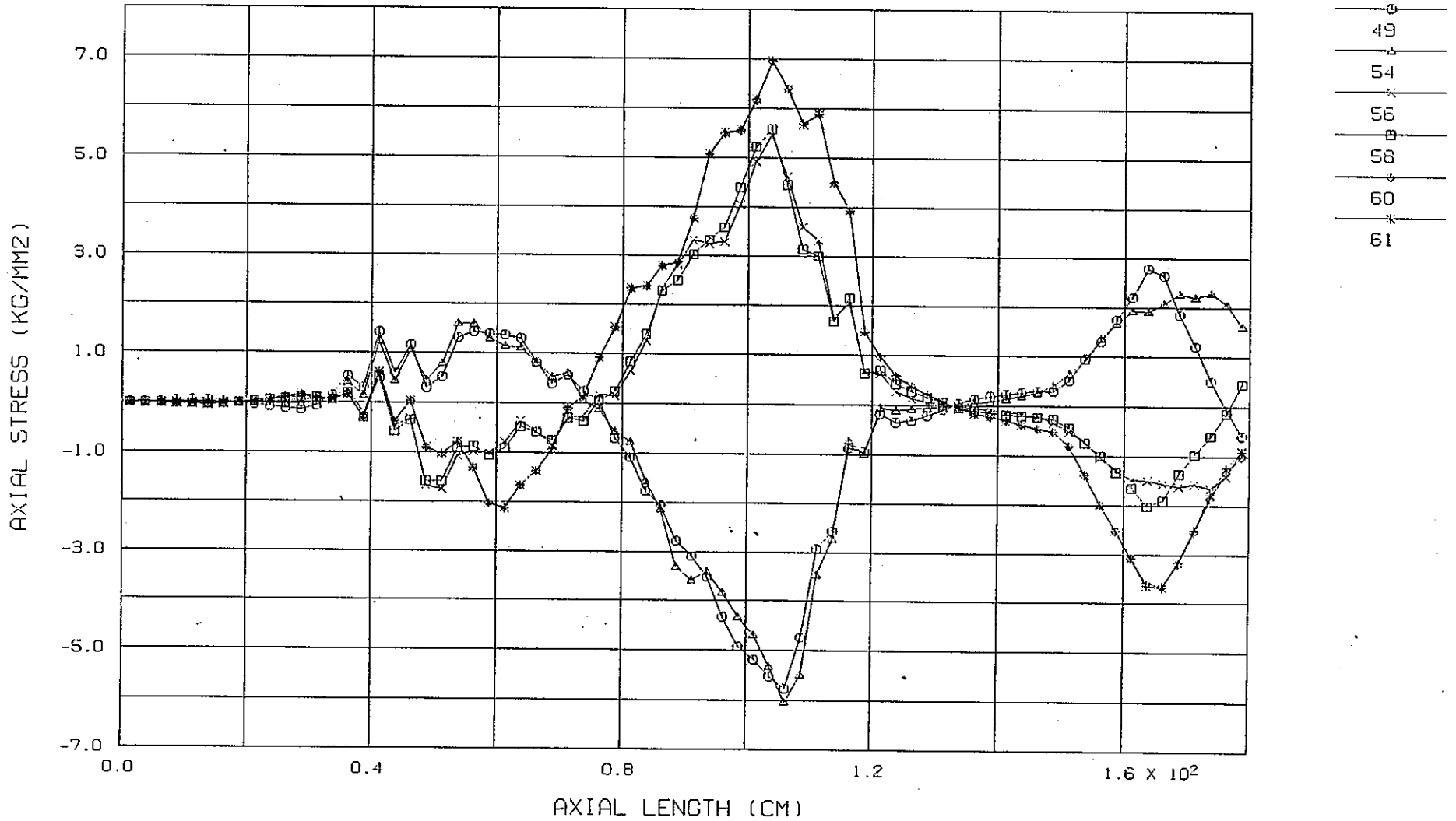


NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-3.1 照射末期における湾曲形状解析結果(標準ケース)

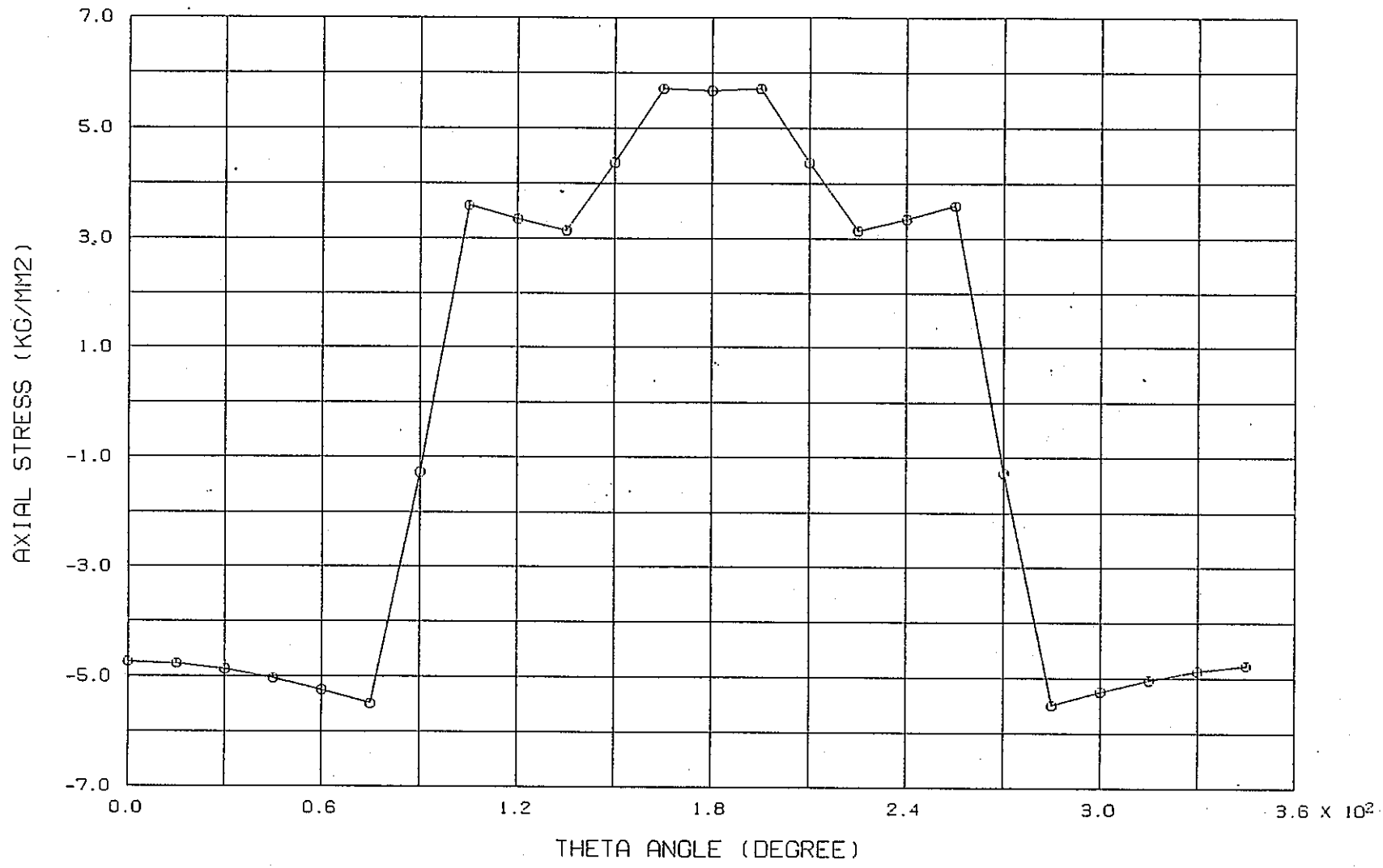
FINAS  
STEP NO. 40



ELM NO. 1-711

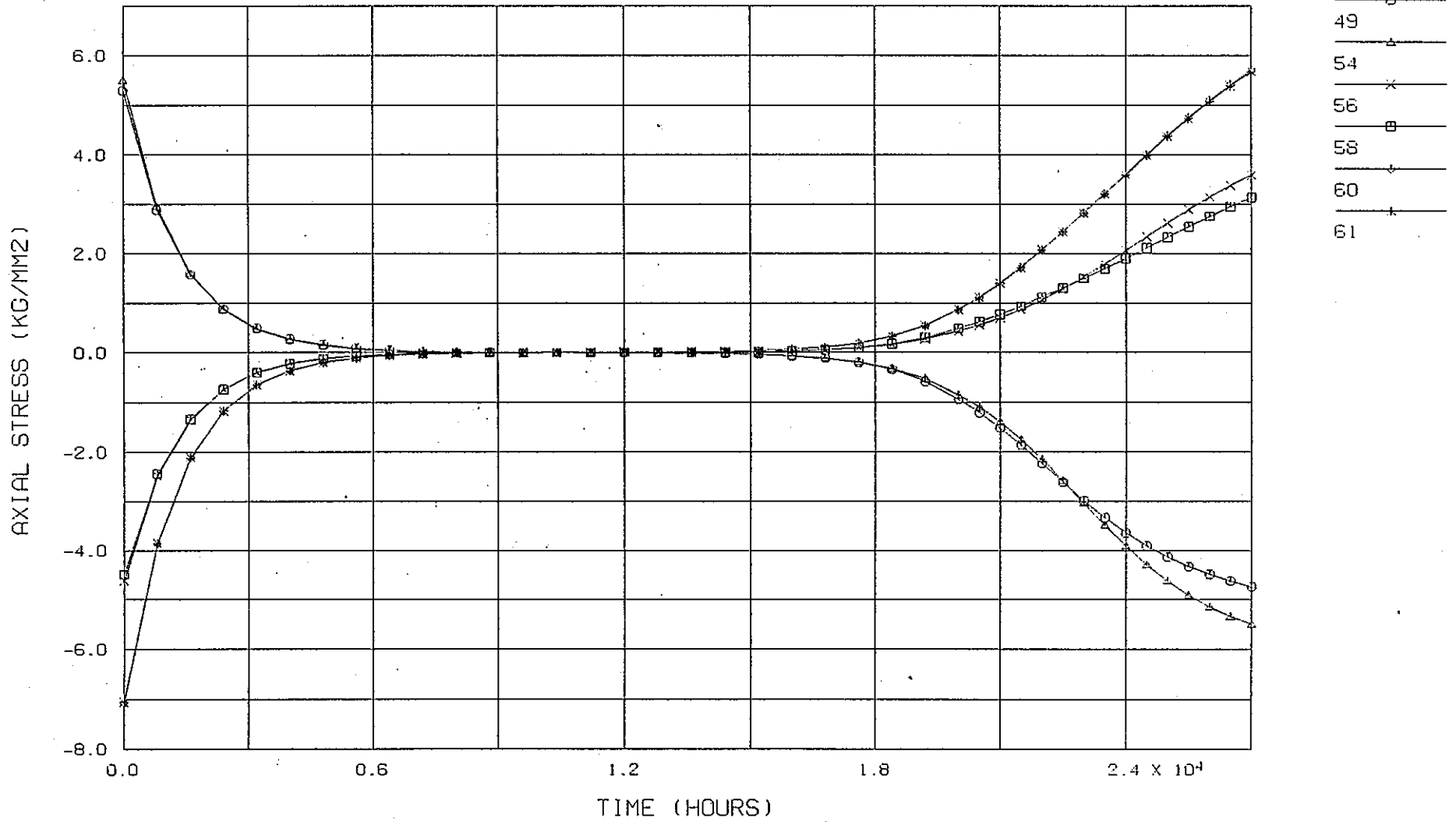
( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-3.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(標準ケース)



ELEMENT NO. 431 ( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-3.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布解析結果(標準ケース)

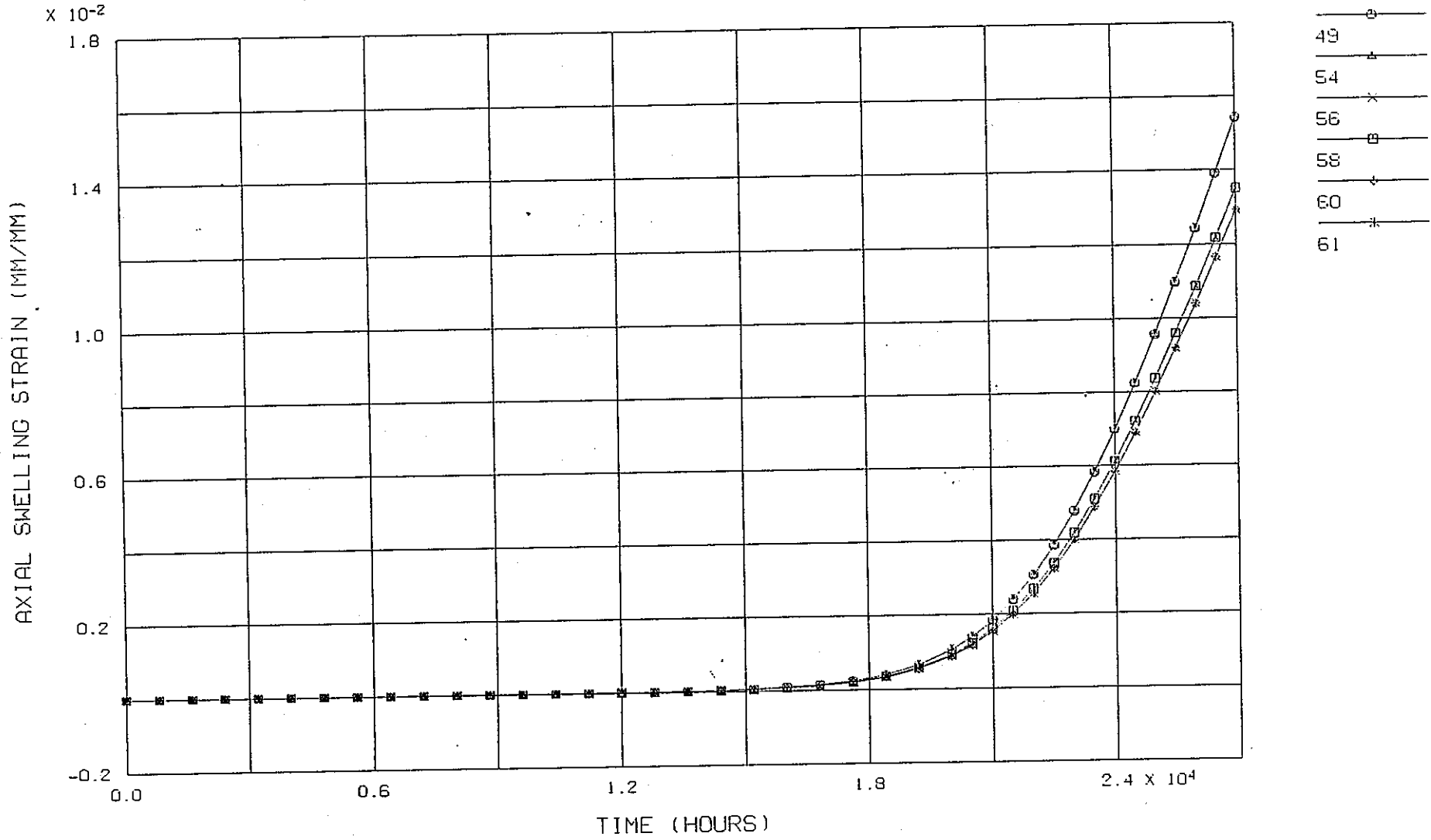


ELEMENT NO. 431

( PIPE3 # 72 ) ( P13L )

付図4-4.1 軸方向応力の経時変化解析結果(標準ケース)

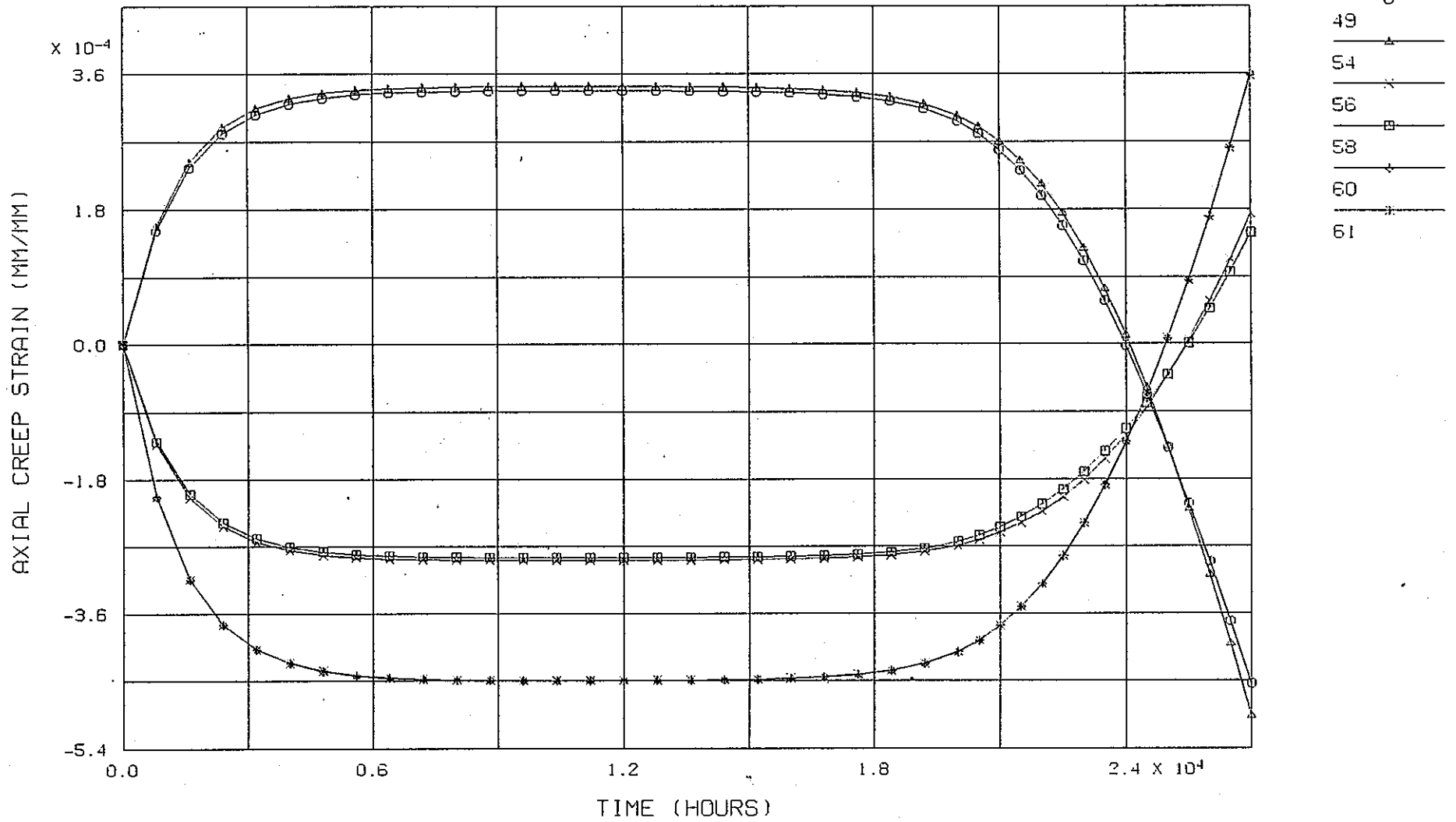




ELEMENT NO. 431

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-4.2 スエリング歪の経時変化解析結果(標準ケース)

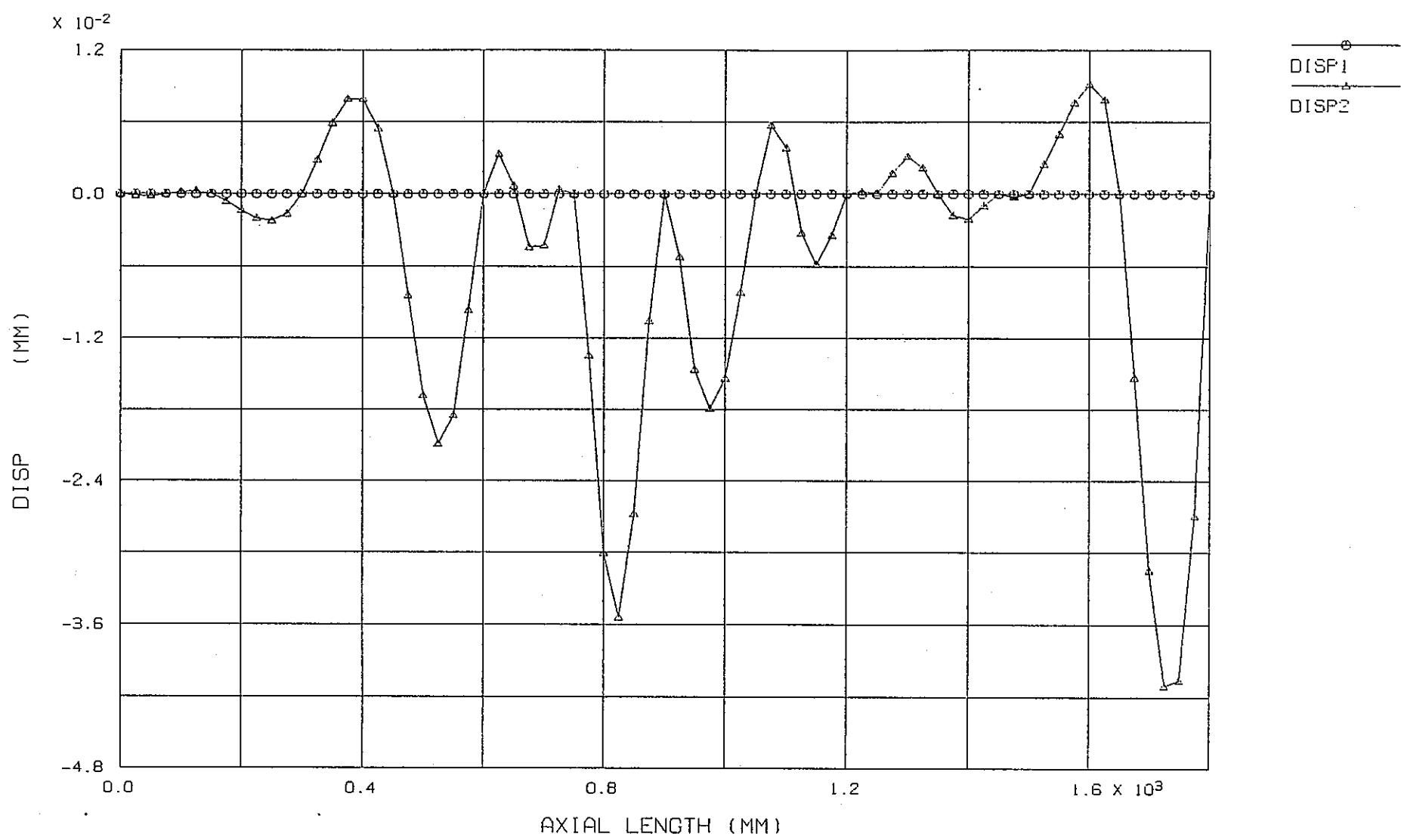


ELEMENT NO. 431

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L )

付図4-4.3 軸方向クリープ歪の経時変化解析結果(標準ケース)

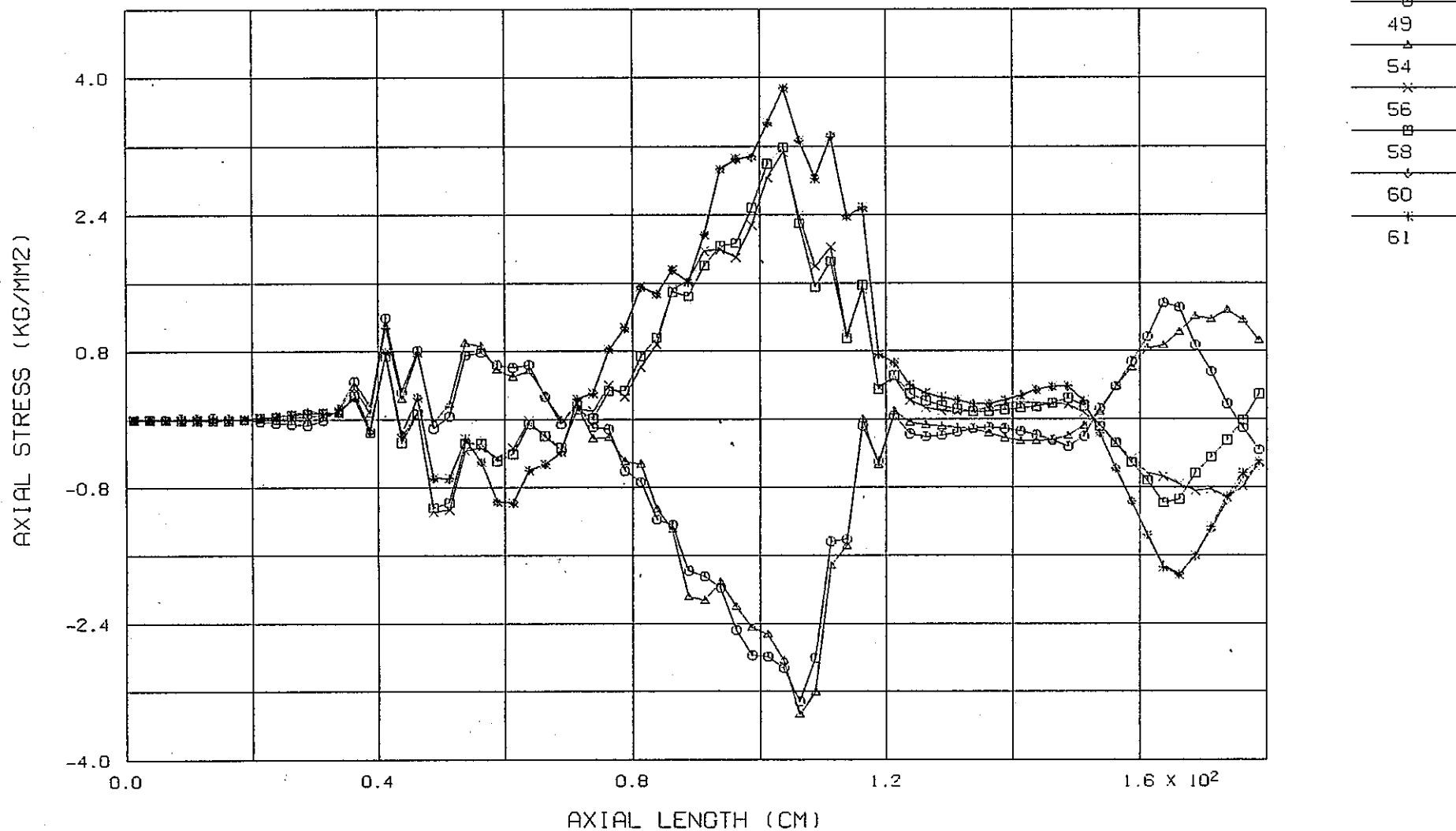
FINAS  
STEP NO. 41



NODE NO. 1-721

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L2 )

付図4-5.1 照射末期における湾曲形状解析結果(比較ケース)

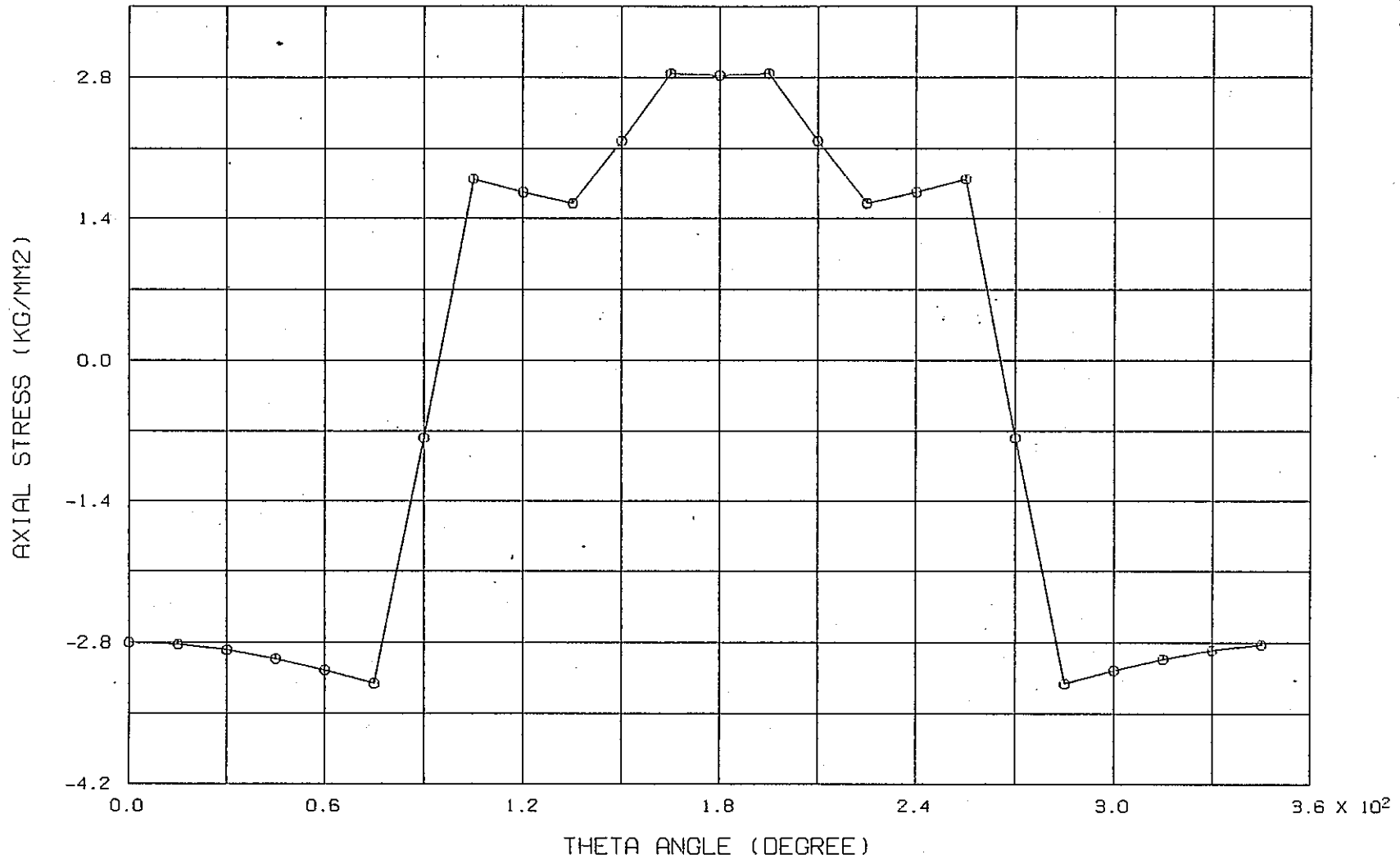


ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L2 )

付図4-5.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(比較ケース)

49 - 72

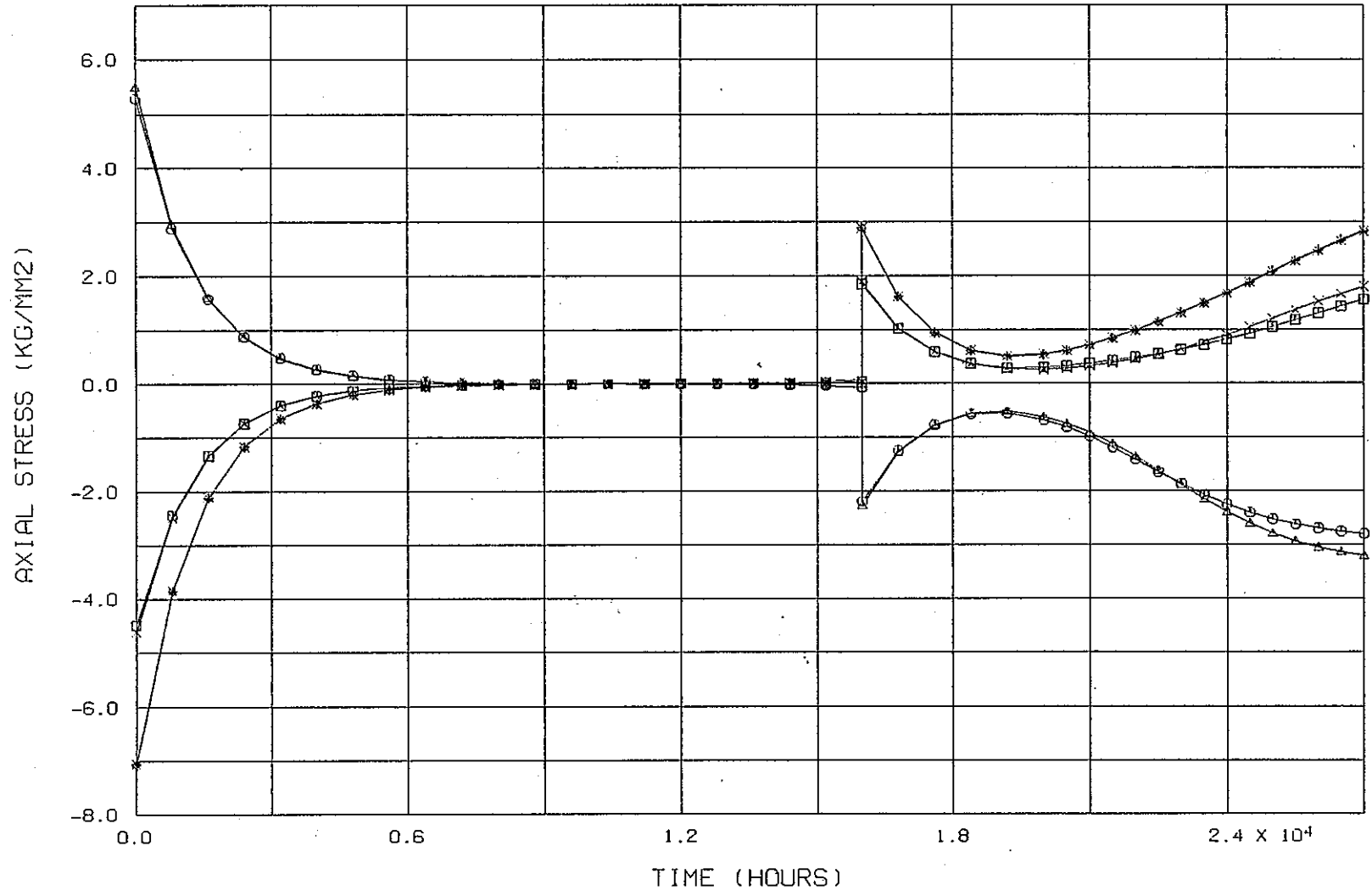


ELEMENT NO. 431

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L2 )

付図4-5.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布解析結果(比較ケース)

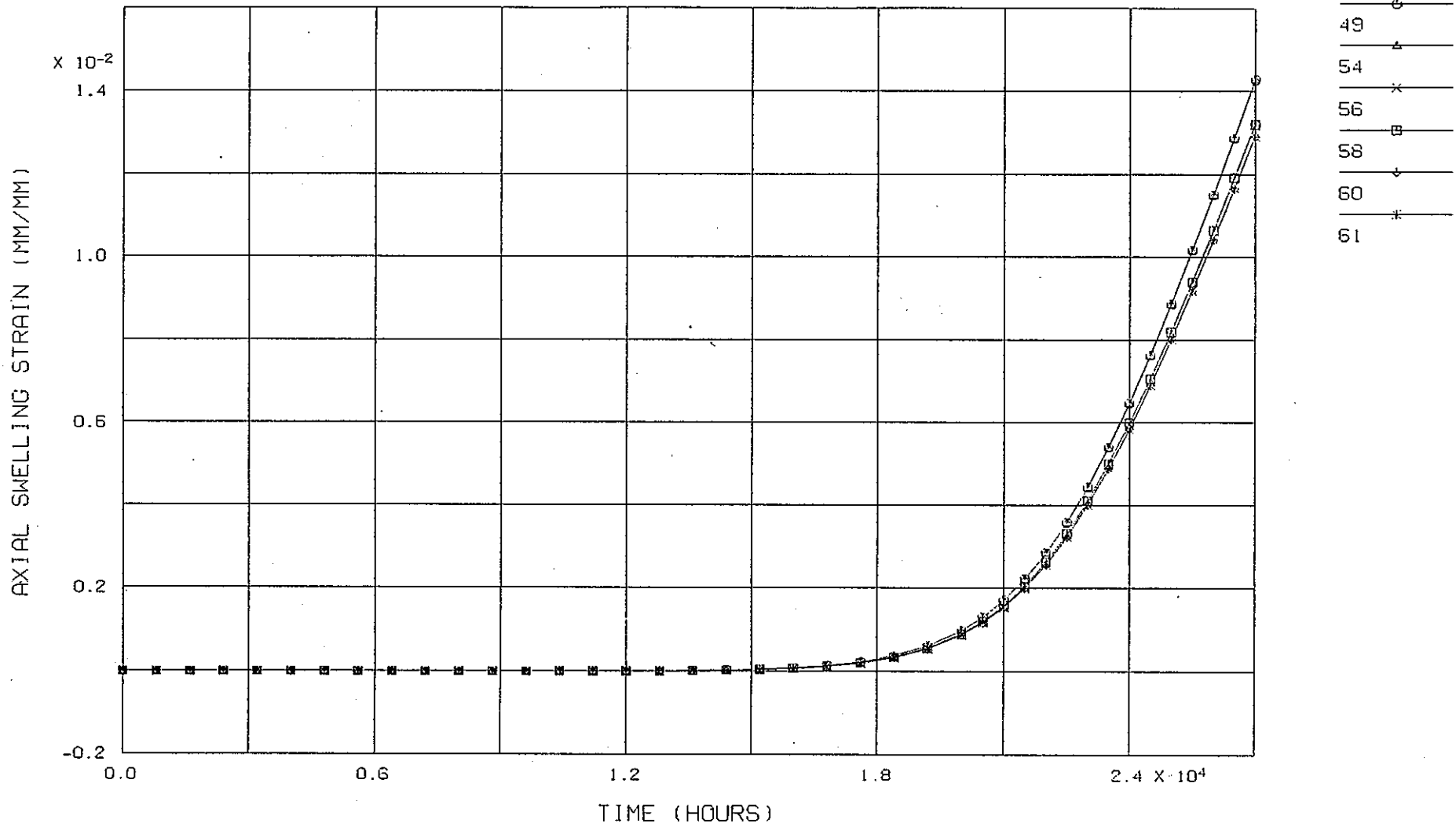
- 
- △
- ×
- 
- ◇
- \*
- 61



ELEMENT NO. 431 ( PIPE3 \* 72 ) ( P13L2 )

付図4-6.1 軸方向応力の経時変化解析結果(比較ケース)

FINAS

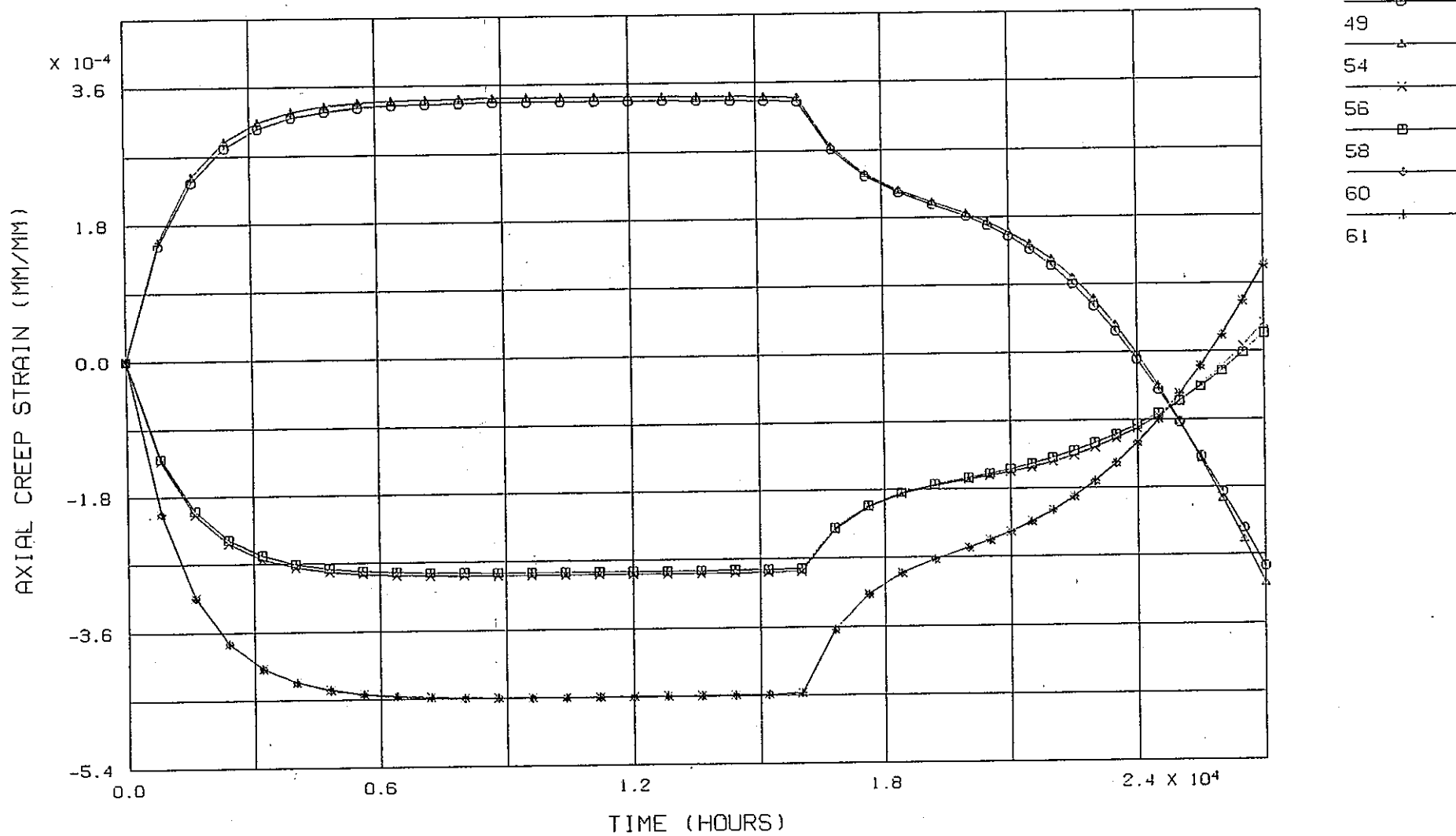


ELEMENT NO. 431

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L2 )

付図4-6.2 スエリング歪の経時変化解析結果(比較ケース)

FINAS

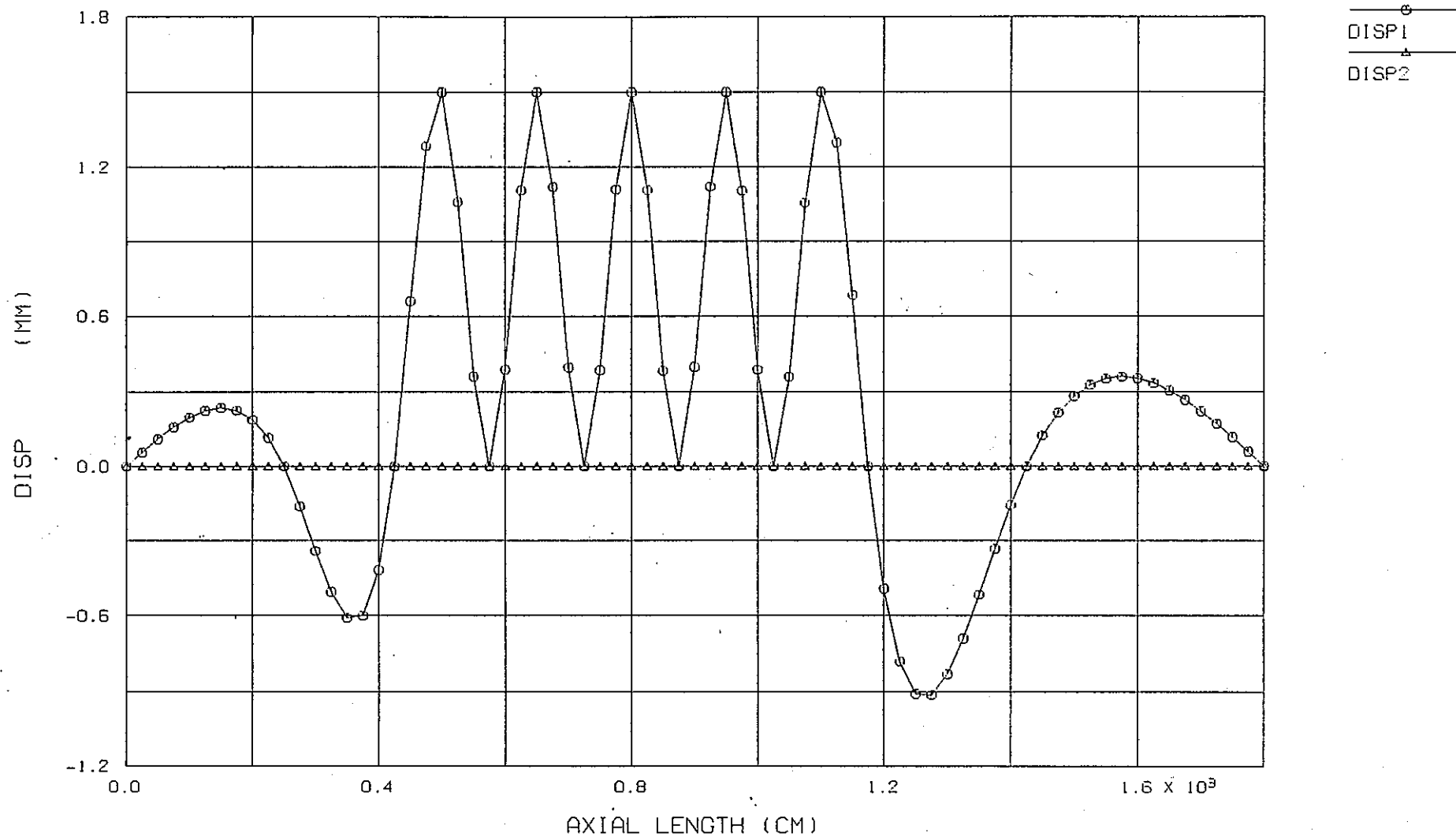


ELEMENT NO. 431

( PIPE3 \* 72 ) ( P13L2 )

付図4-6.3 軸方向クリープ歪の経時変化解析結果(比較ケース)

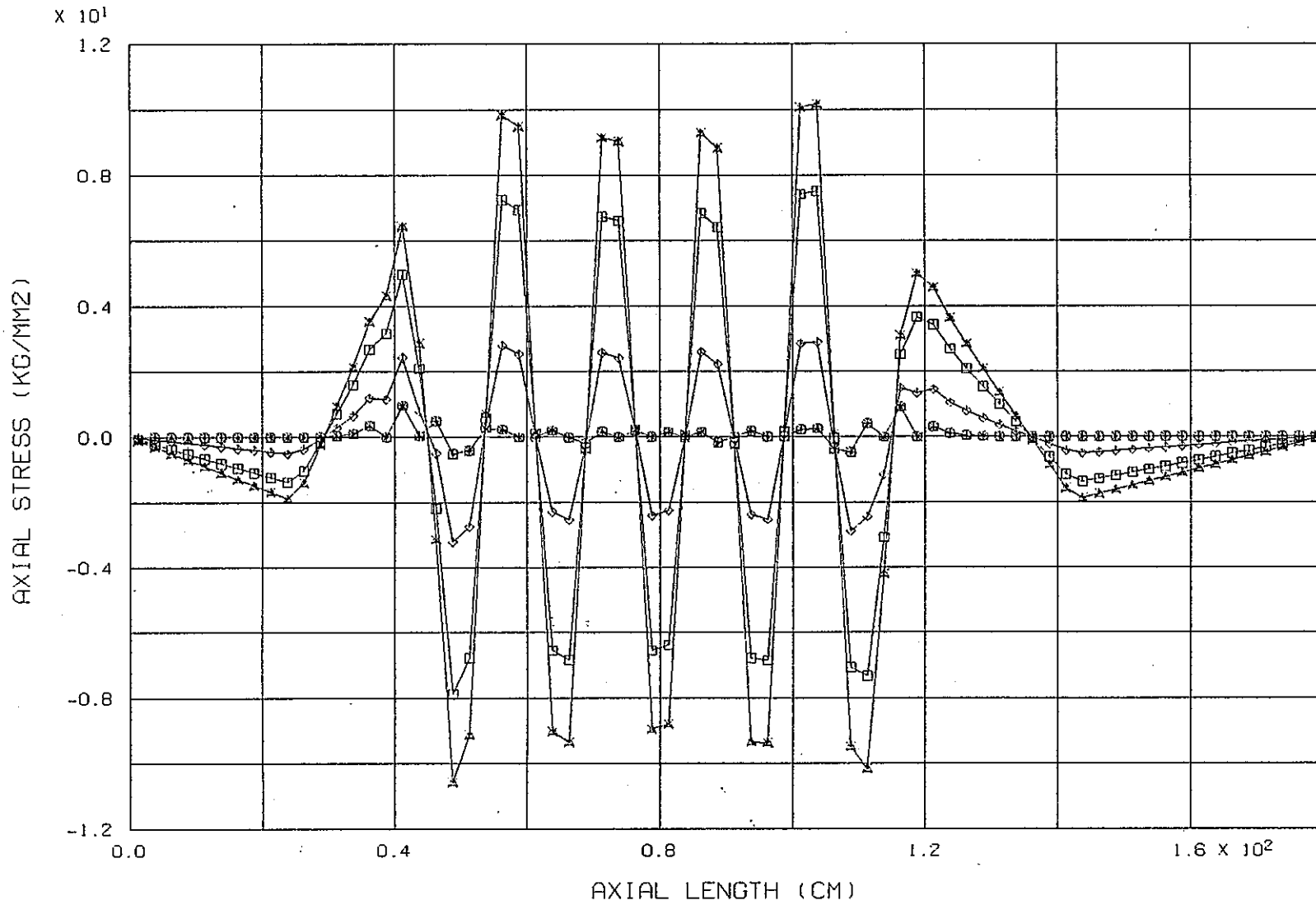




NODE NO. 1-721      <<WP=150MM>>      ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-1.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様)

FINAS  
STEP NO. 33

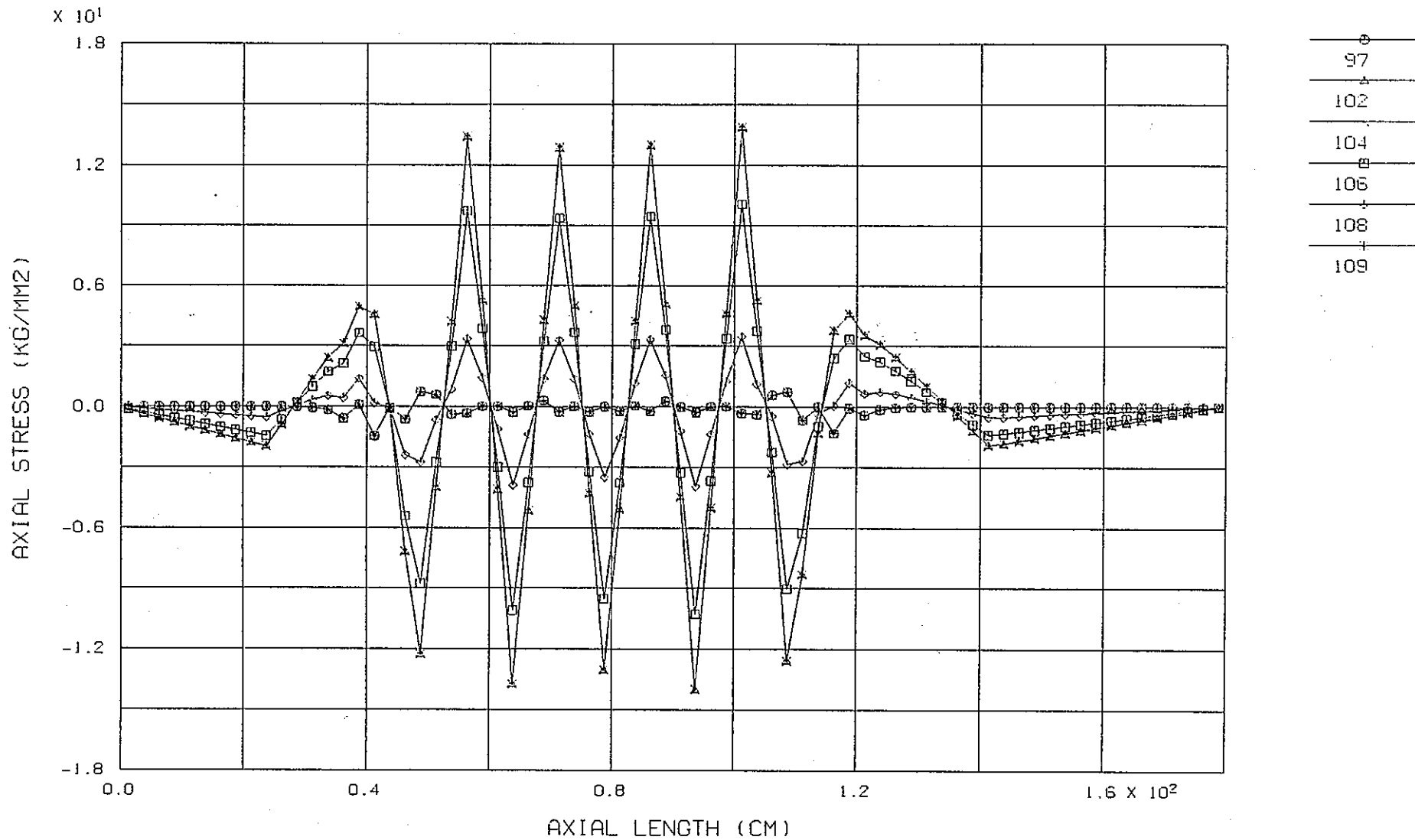


ELM NO. 1-711 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-1.2a 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果

(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様) (要素内中央高さ層の積分点における応力)

FINAS  
STEP NO. 33

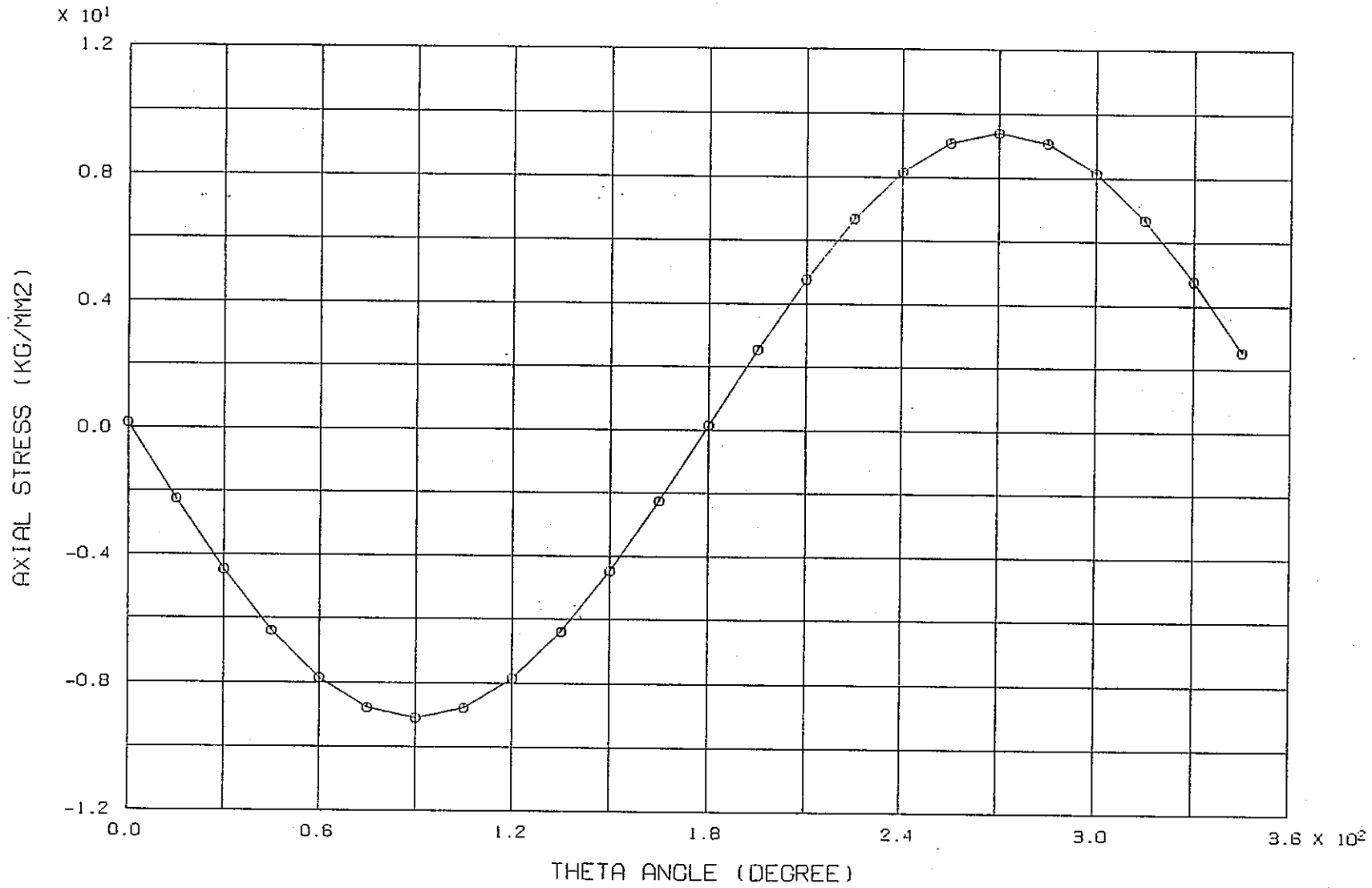


ELM NO. 1-711 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-1.2b 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果

(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様) (要素内最上段層の積分点における応力)

FINAS  
STEP NO. 33

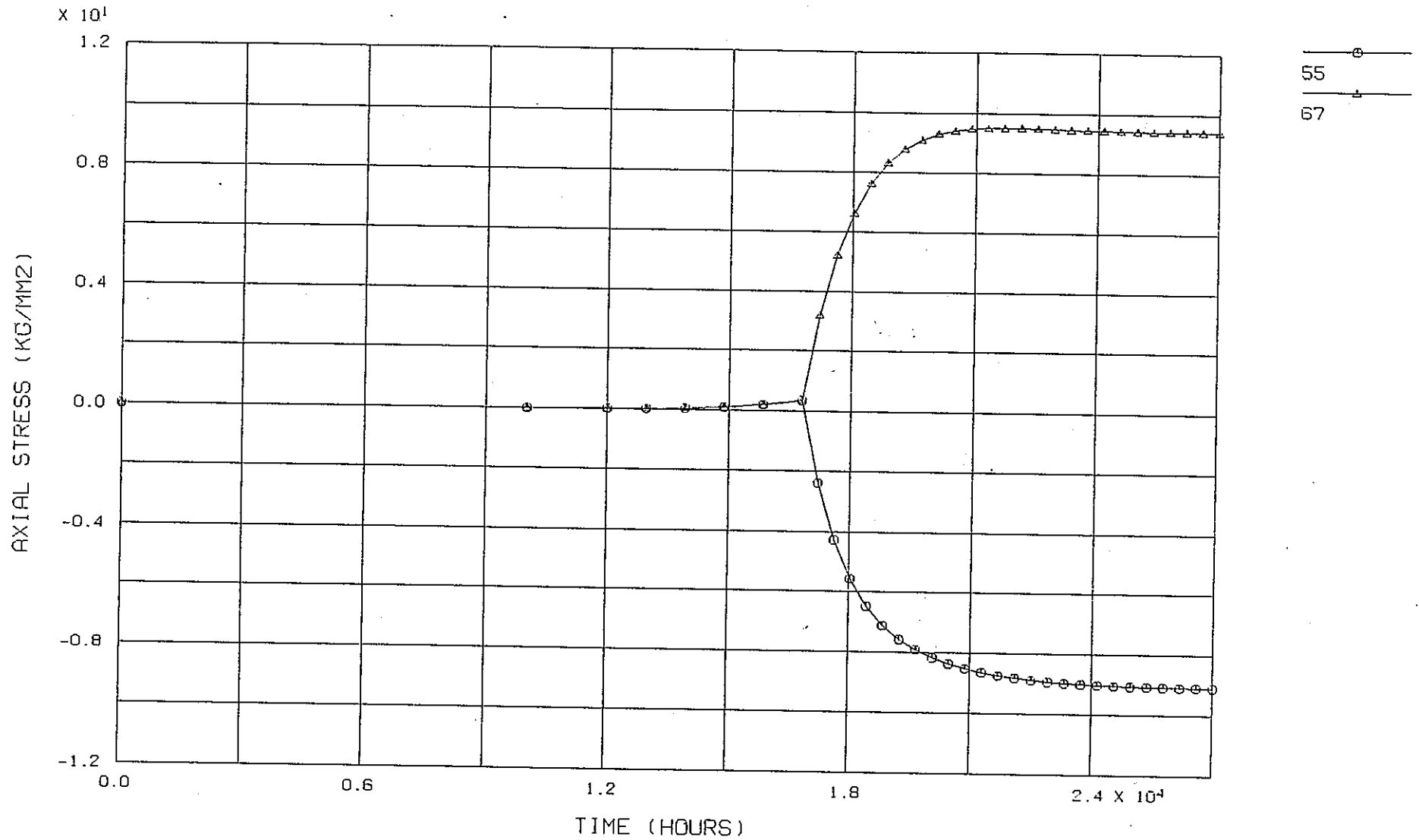


49 - 72

ELEMENT NO. 321 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-1.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布解析結果  
(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様)

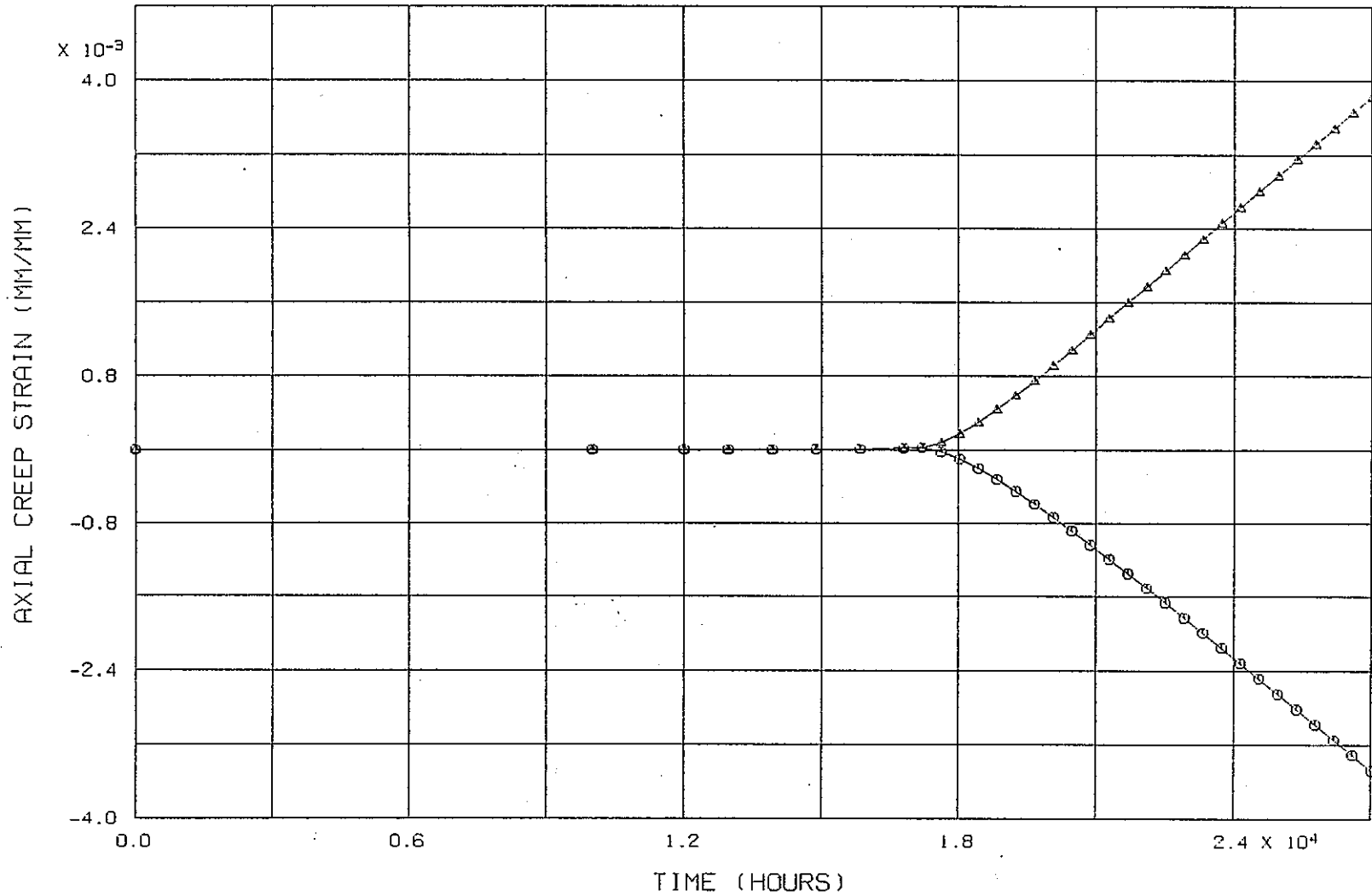
FINAS



ELEMENT NO. 321 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-1.4 軸方向応力の経時変化解析結果(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様)

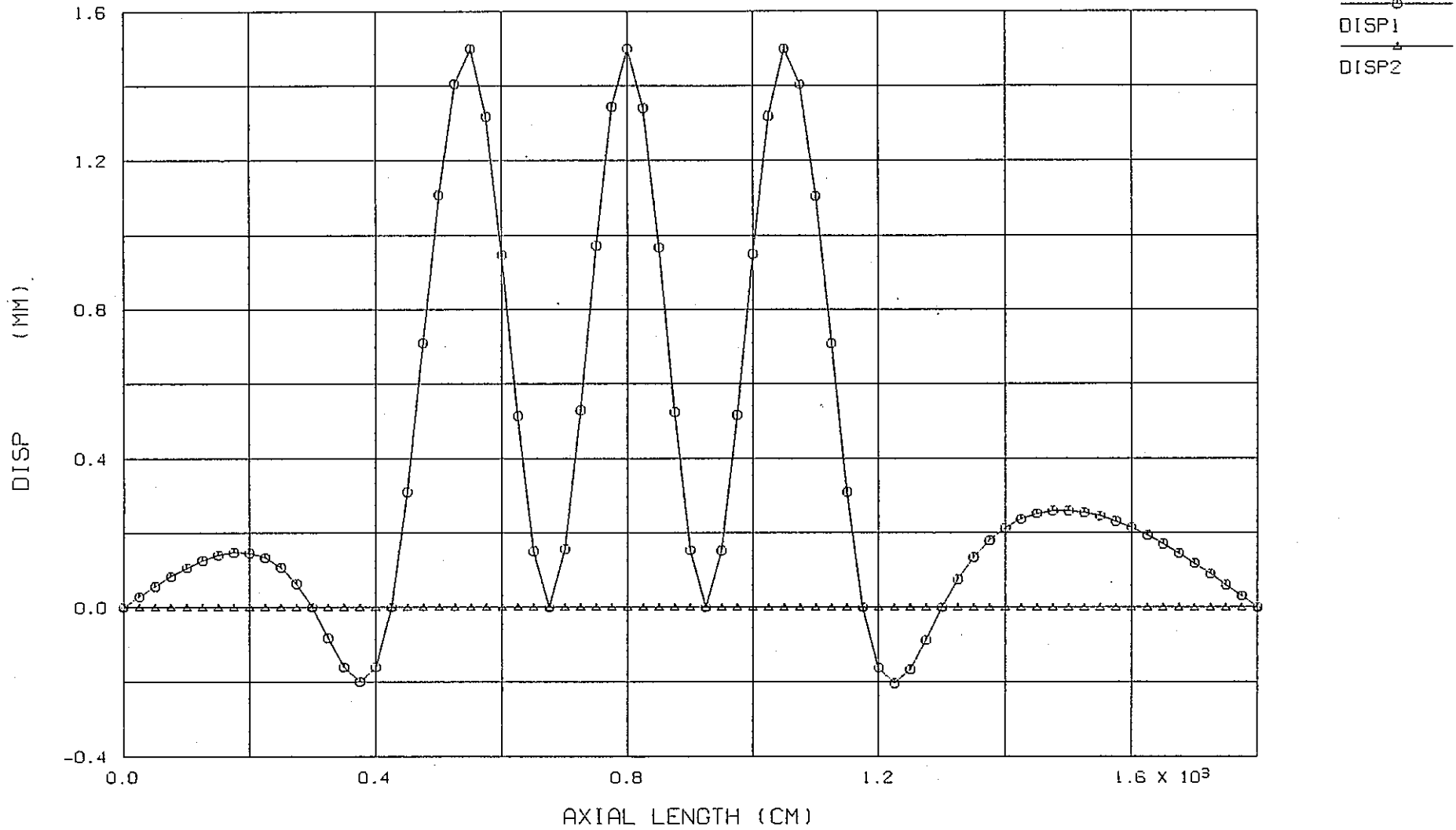
55  
67



ELEMENT NO. 321 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

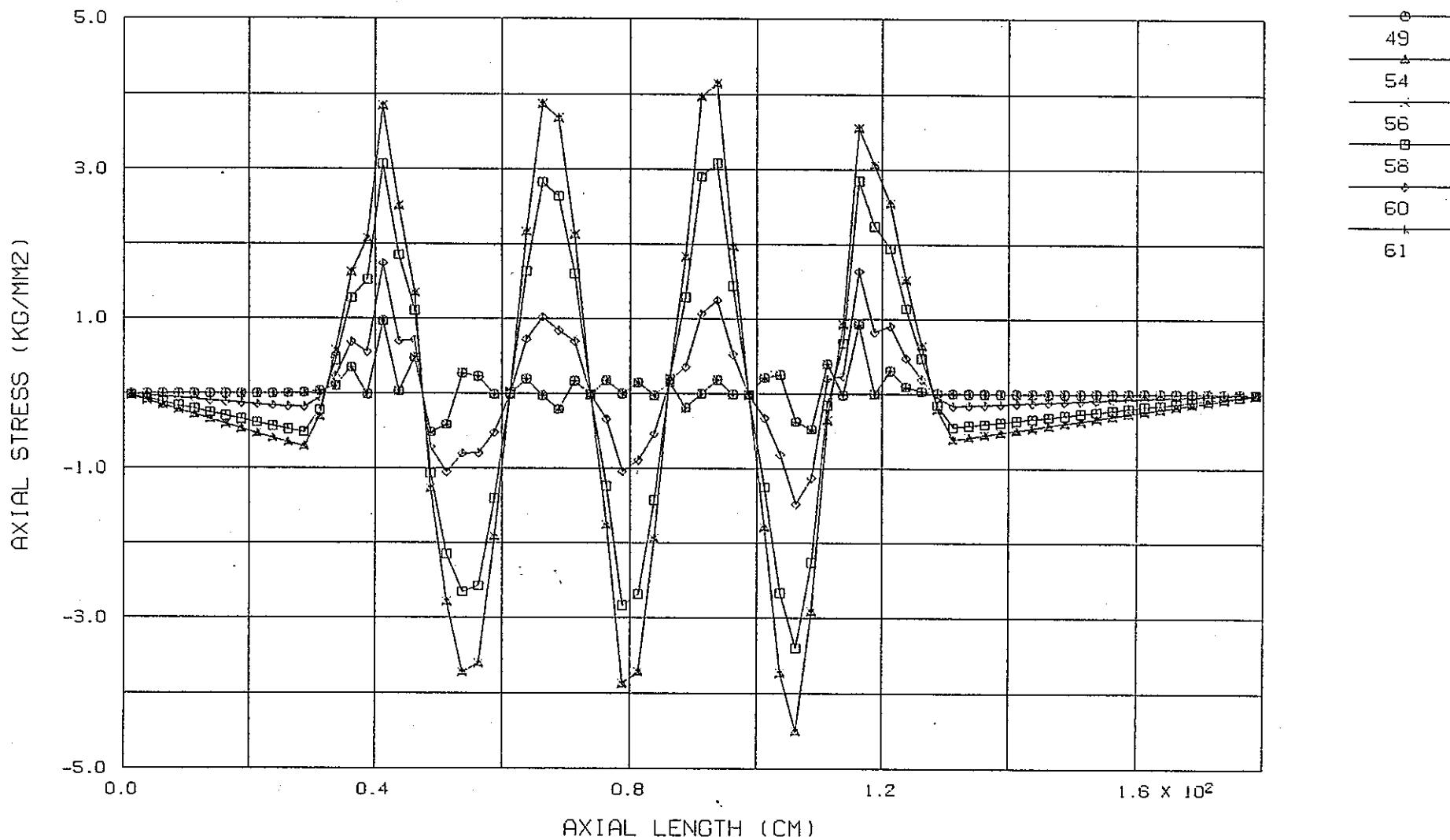
付図5-1.5 軸方向クリープ歪の経時変化解析結果(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:一様)

FINAS  
STEP NO. 33



NODE NO. 1-721 <<WP=250MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-2.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:250mm、曲がり量:一様)

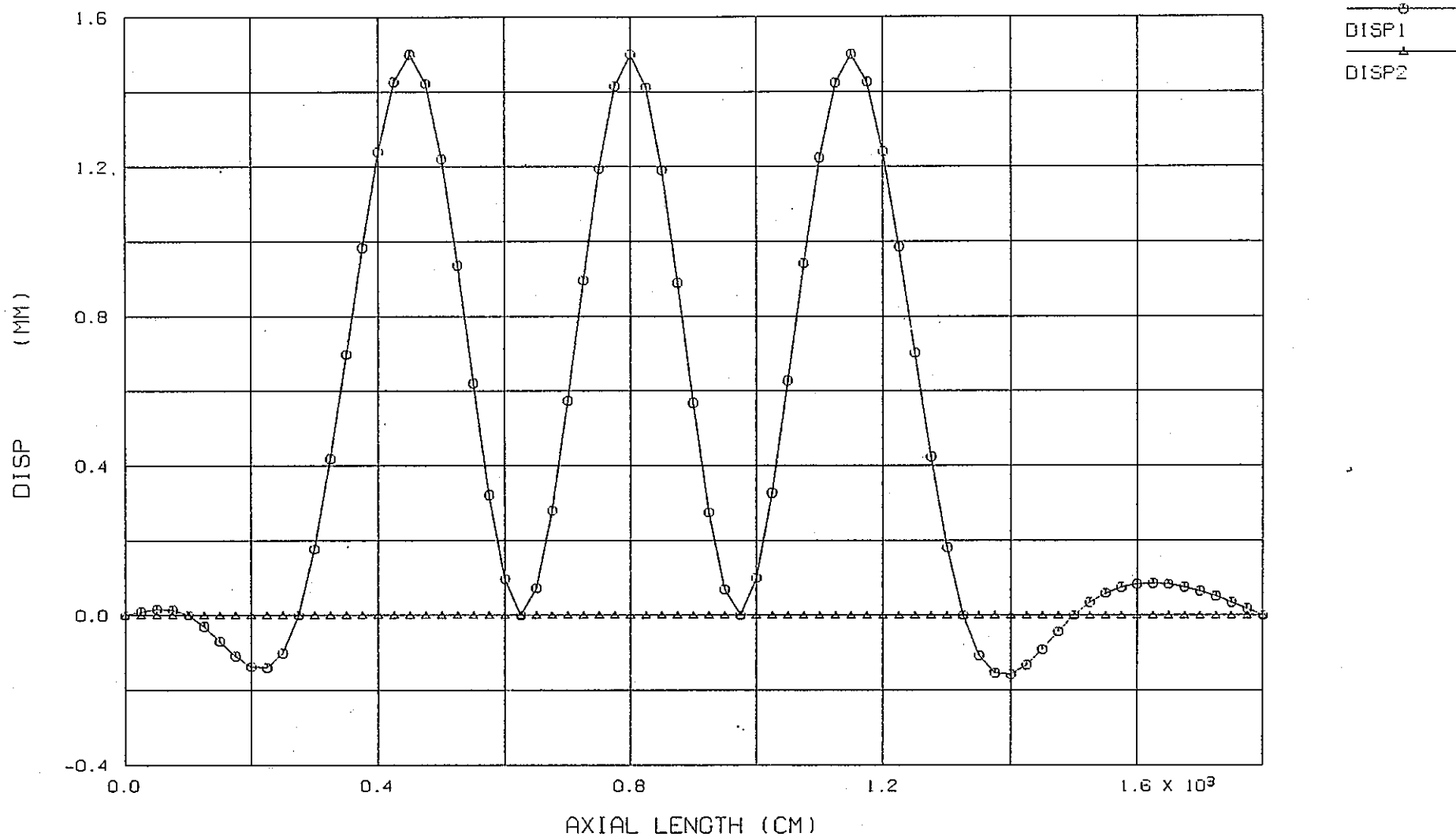


ELM NO. 1-711 <<WP=250MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-2.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果

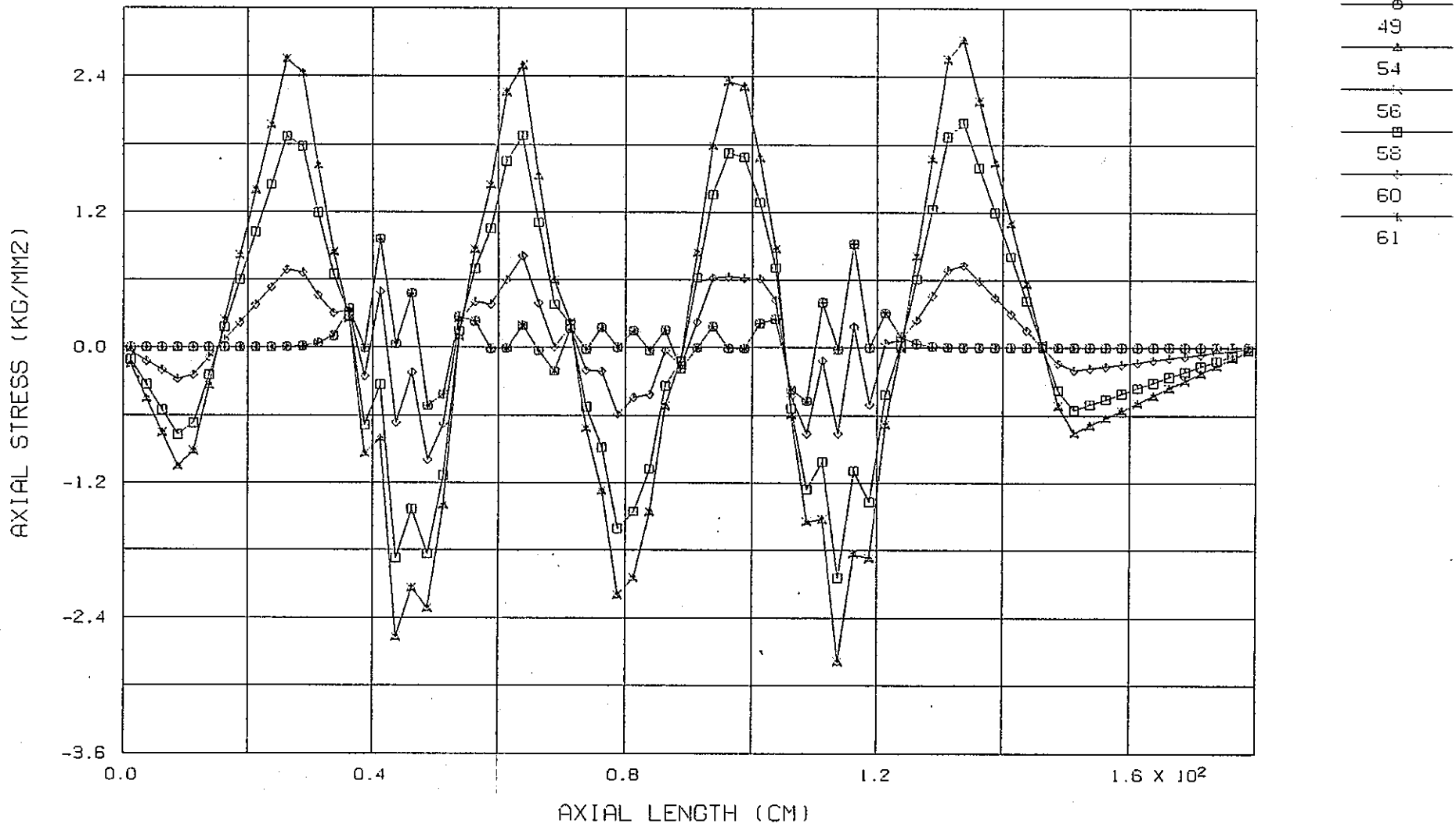
(巻付けピッチ:250mm、曲がり量:一様) (要素内中央高さ層の積分点における応力)





NODE NO. 1-721 <<WP=350MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

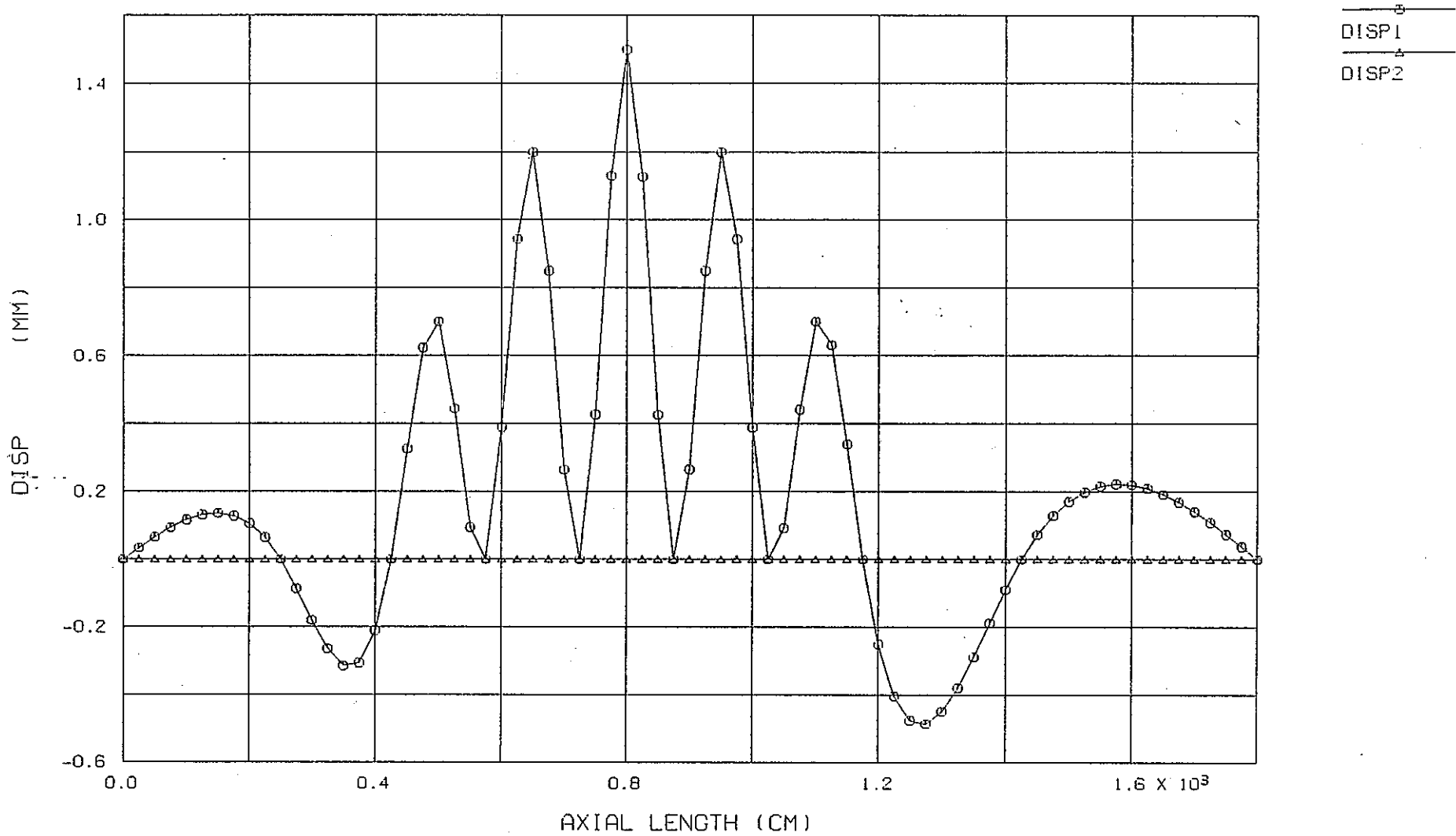
付図5-3.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:350mm、曲がり量:一様)



ELM NO. 1-711 <<WP=350MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-3.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果

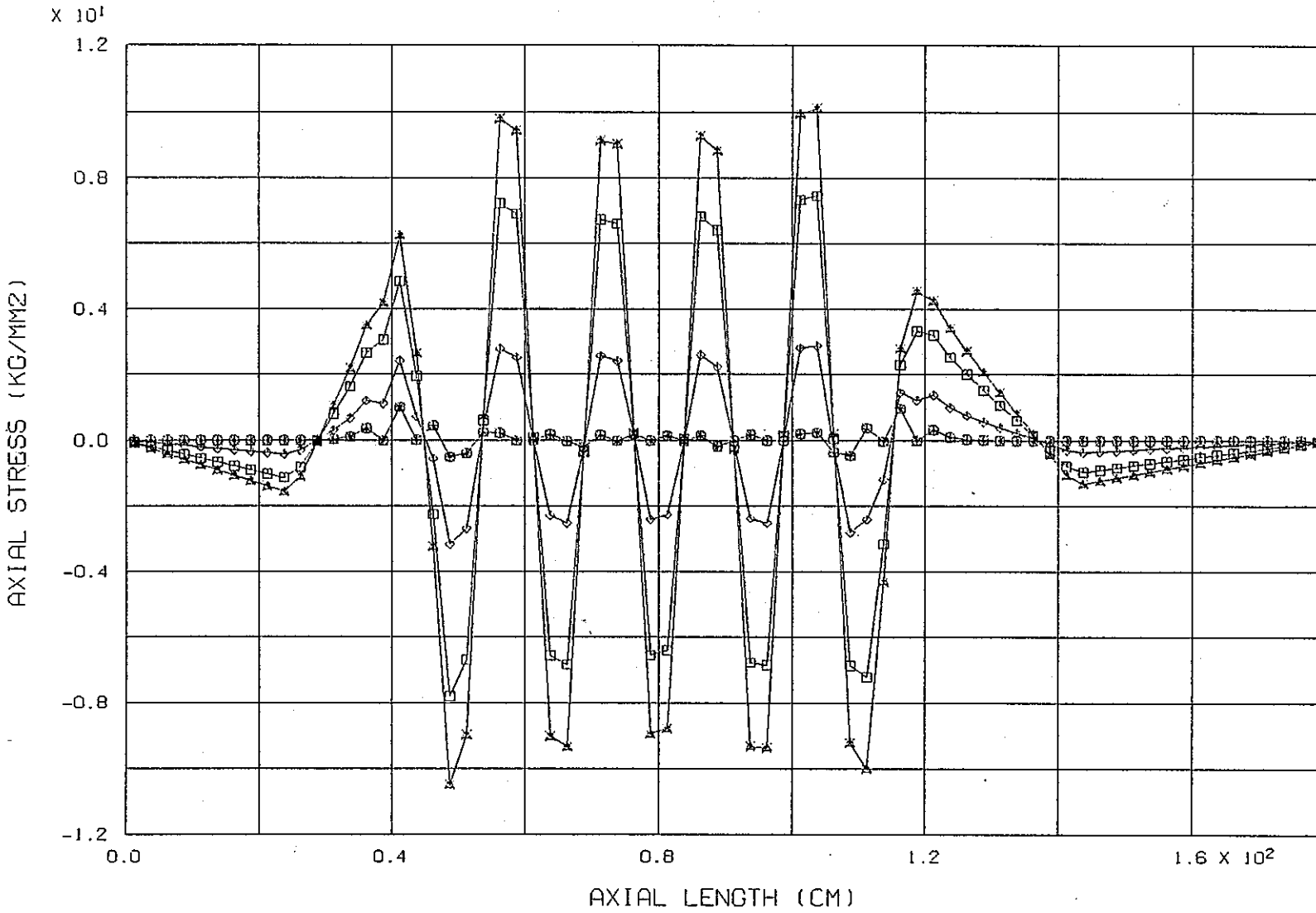
(巻付けピッチ:350mm、曲がり量:一様) (要素内中央高さ層の積分点における応力)



NODE NO. 1-721      <<WP=150MM>>      ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-4.1 照射末期における湾曲形状解析結果(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:分布有)

FINAS  
STEP NO. 28

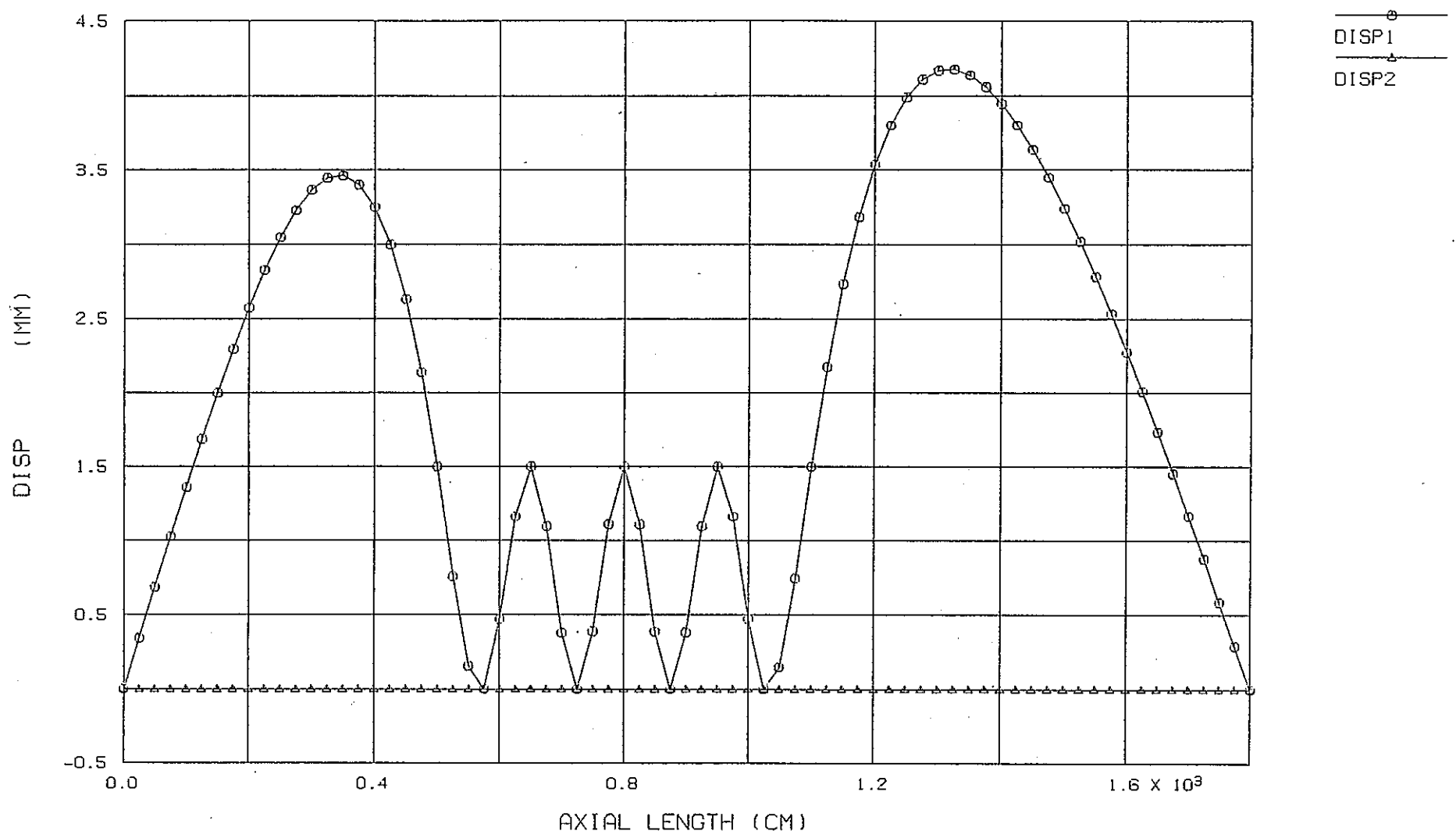


ELM NO. 1-711 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-4.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果

(巻付けピッチ:150mm、曲がり量:分布有) (要素内中央高さ層の積分点における応力)

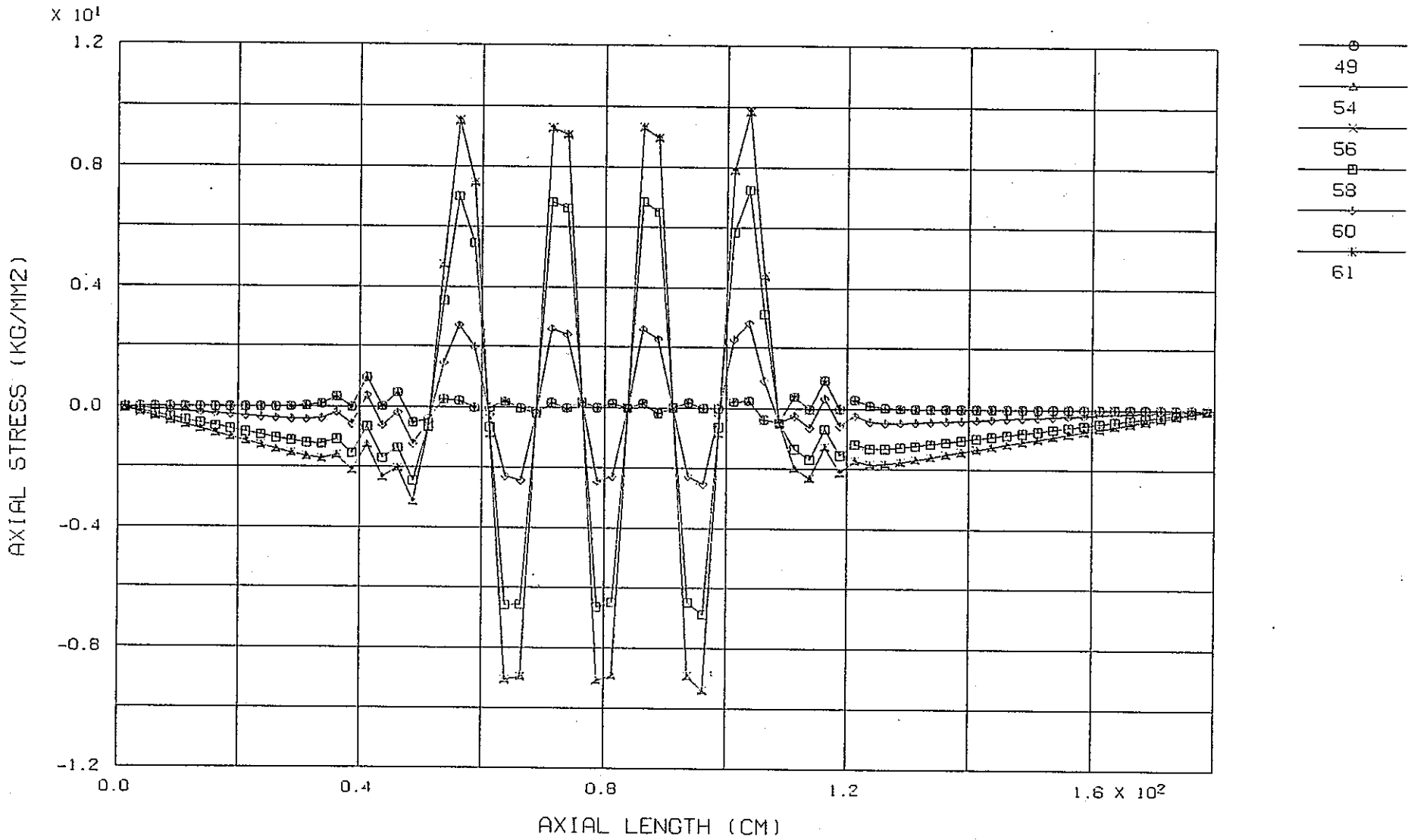
FINAS  
STEP NO. 33



NODE NO. 1-721 ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-5.1 照射末期における湾曲形状解析結果(曲がり速度:0.00353mm/日)

FINAS  
STEP NO. 33

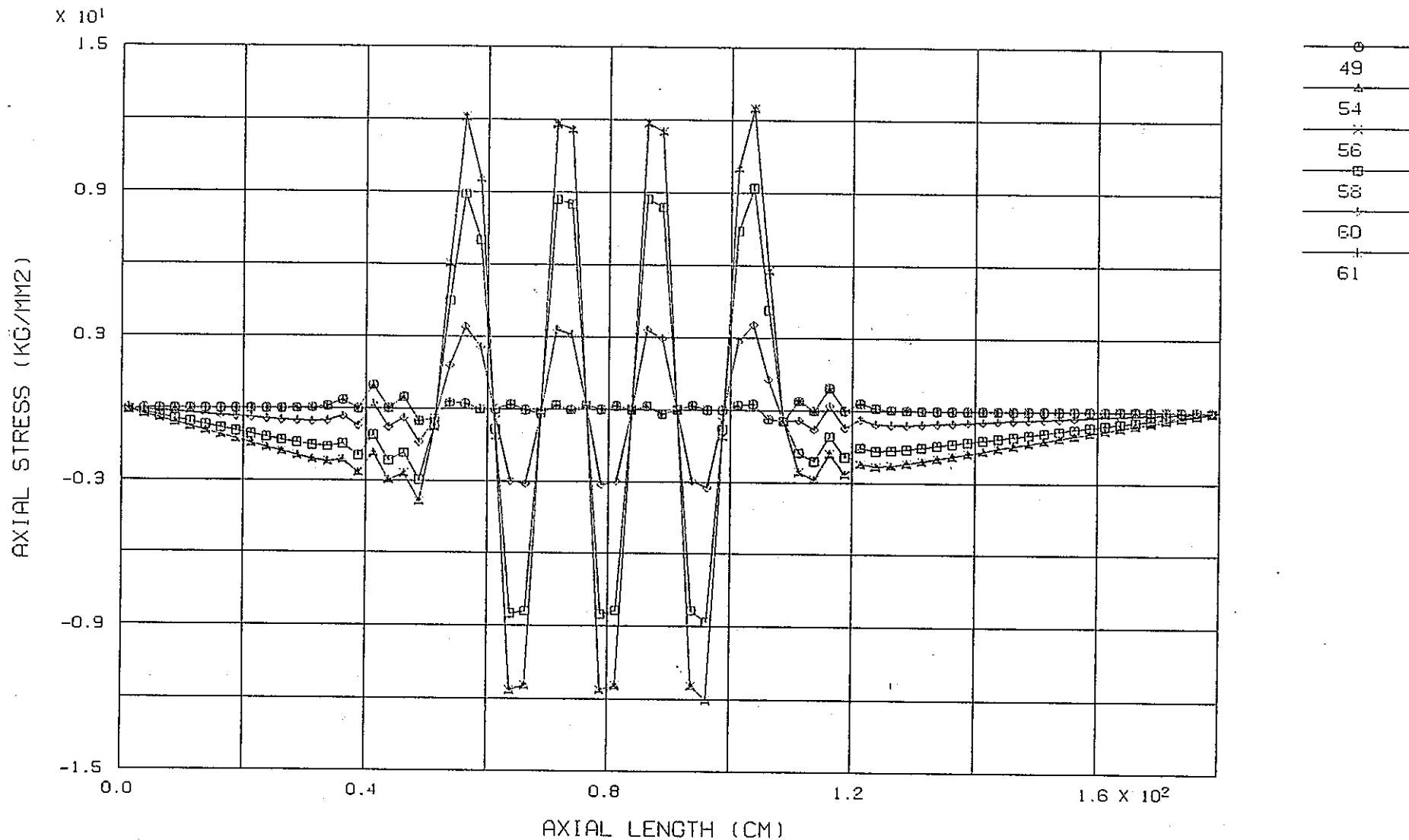


ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図5-5.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(曲がり速度:0.00353mm/日)

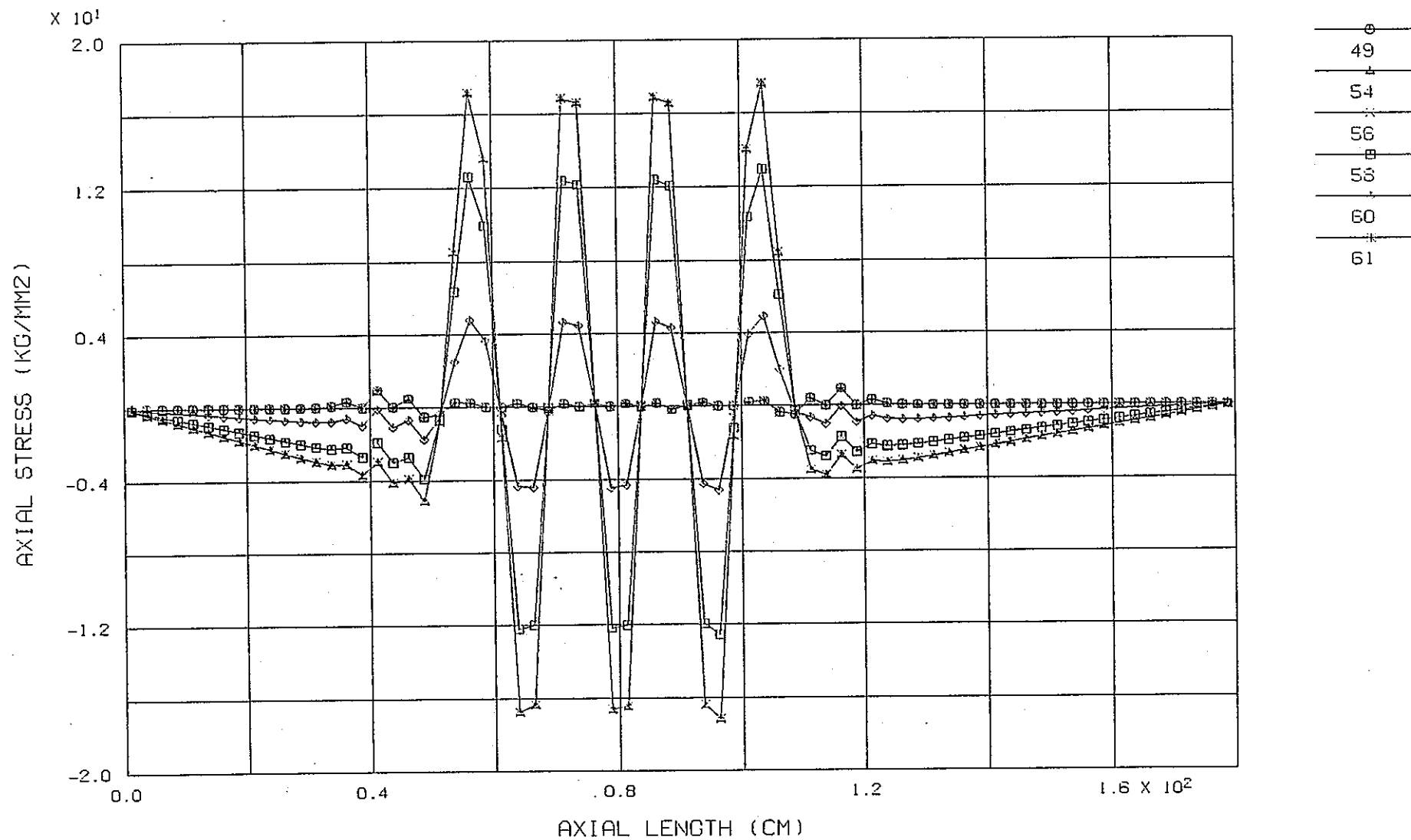
FINAS  
STEP NO. 33



ELM NO. 1-711 ( PIPE3 \* 72 ) ( B800 )

付図5-6.1 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(曲がり速度:0.00462mm/日)

FINAS  
STEP NO. 33



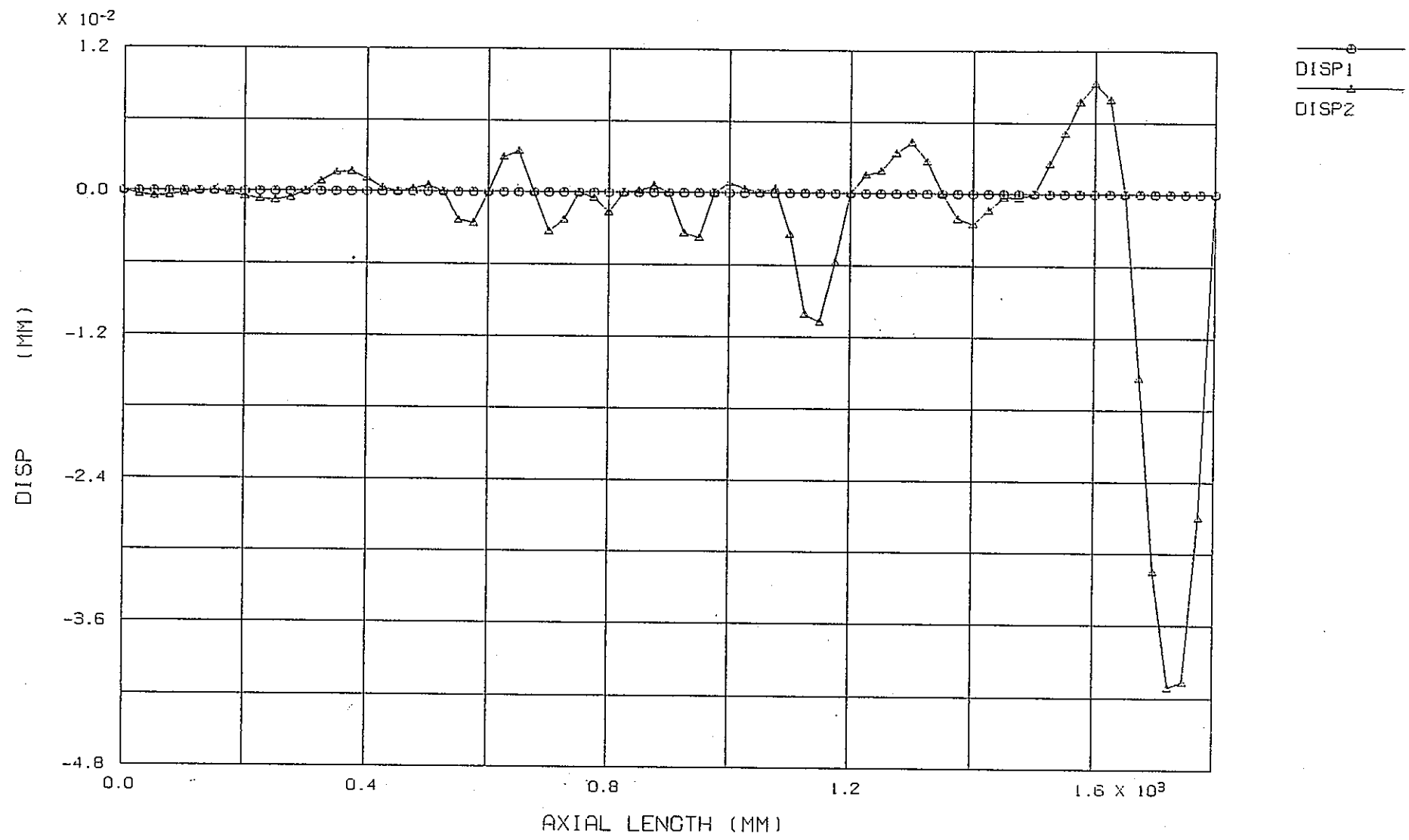
ELM NO. 1-711

( PIPE3 \* 72 ) ( B900 )

付図5-7.1 照射末期における軸方向応力の軸方向分布解析結果(曲がり速度: 0.00667mm/日)



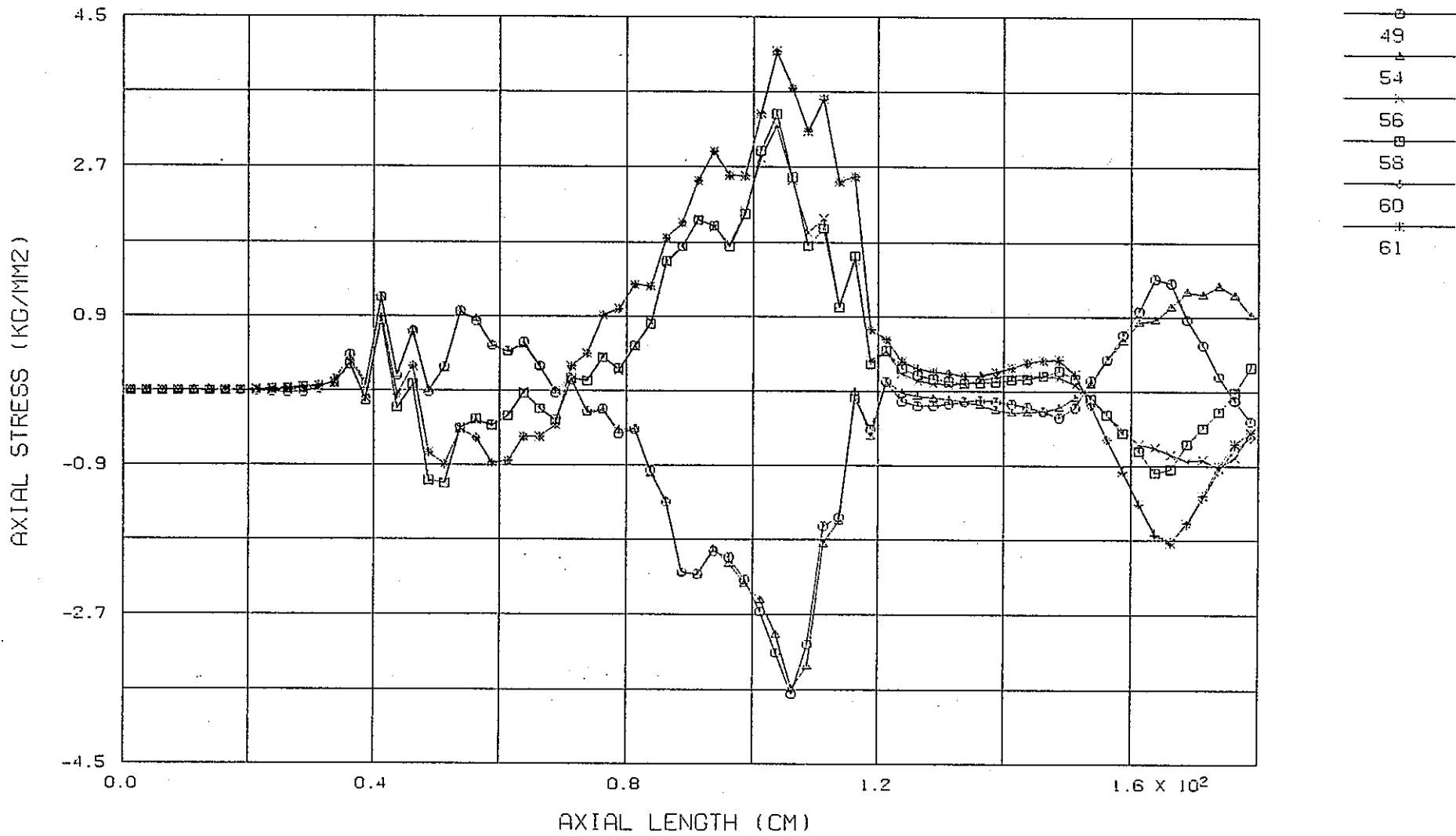
FINAS  
STEP NO. 43



NODE NO. 1-721 <<WP=150MM>> ( PIPE3 #72 ) ( B700 )

付図6-1.1 照射末期における湾曲形状 (応力原因:周方向温度差)

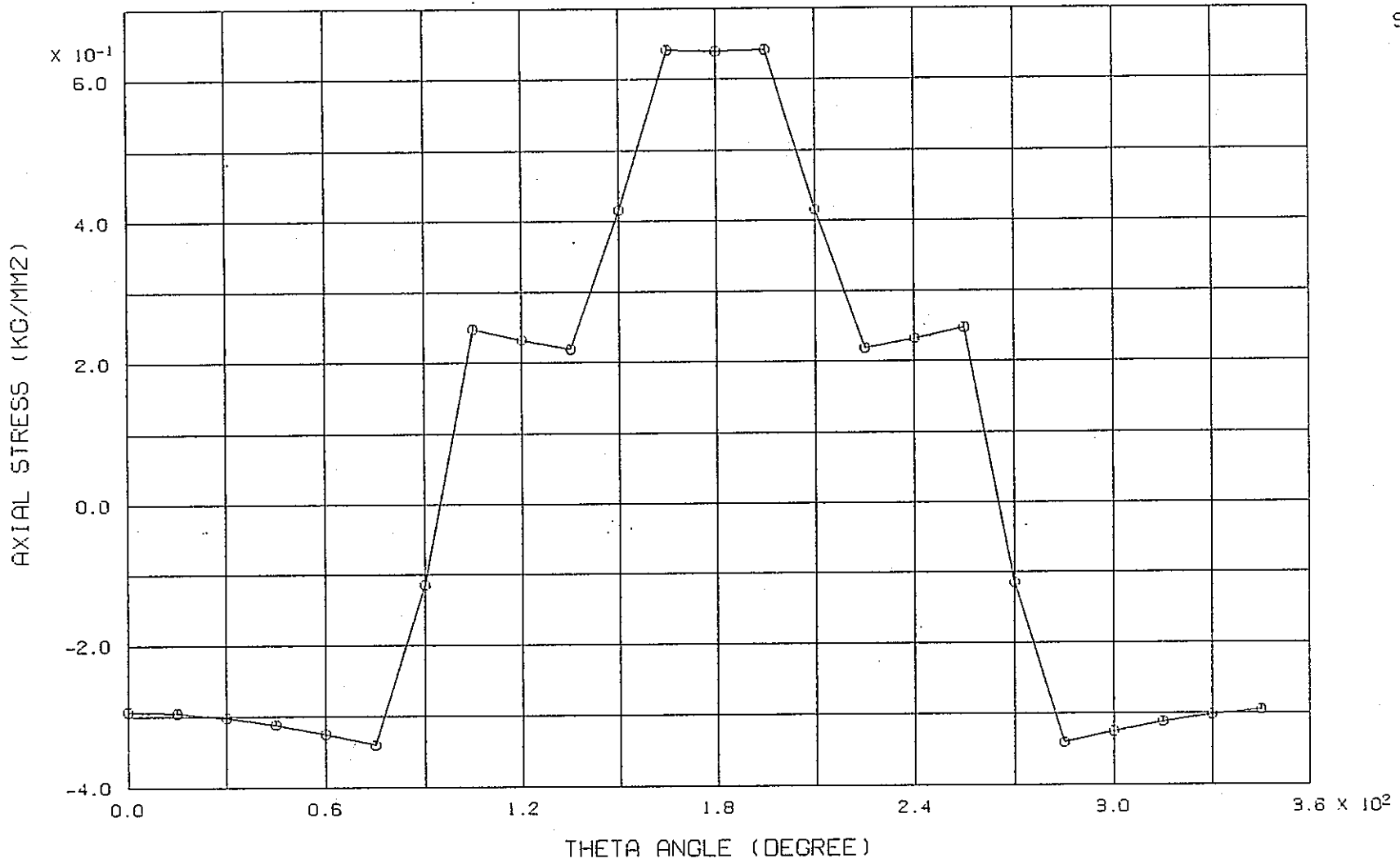
FINAS  
STEP NO. 43



PNC TN9410 89-077

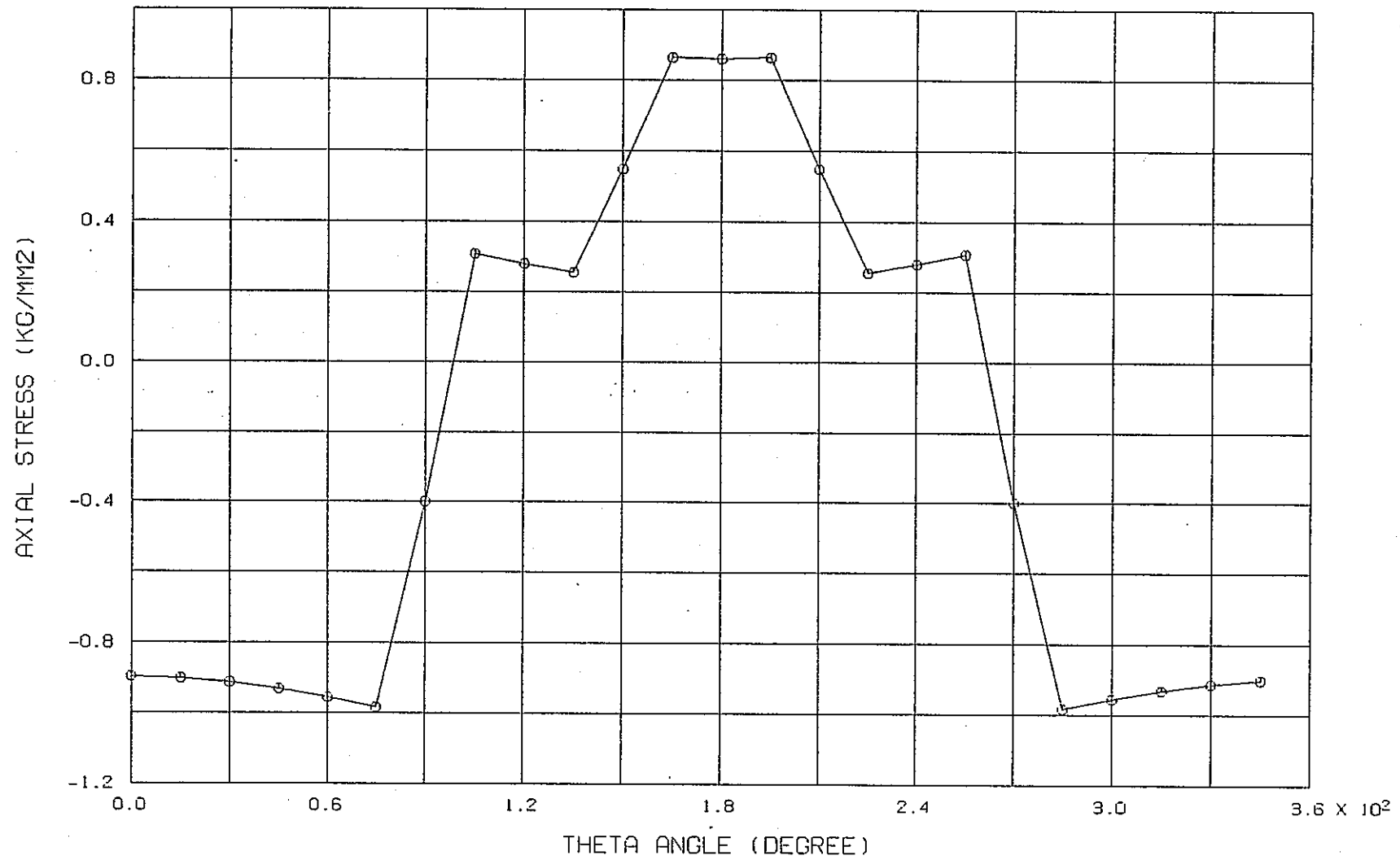
ELM NO. 1-711 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-1.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布 (応力原因:周方向温度差)



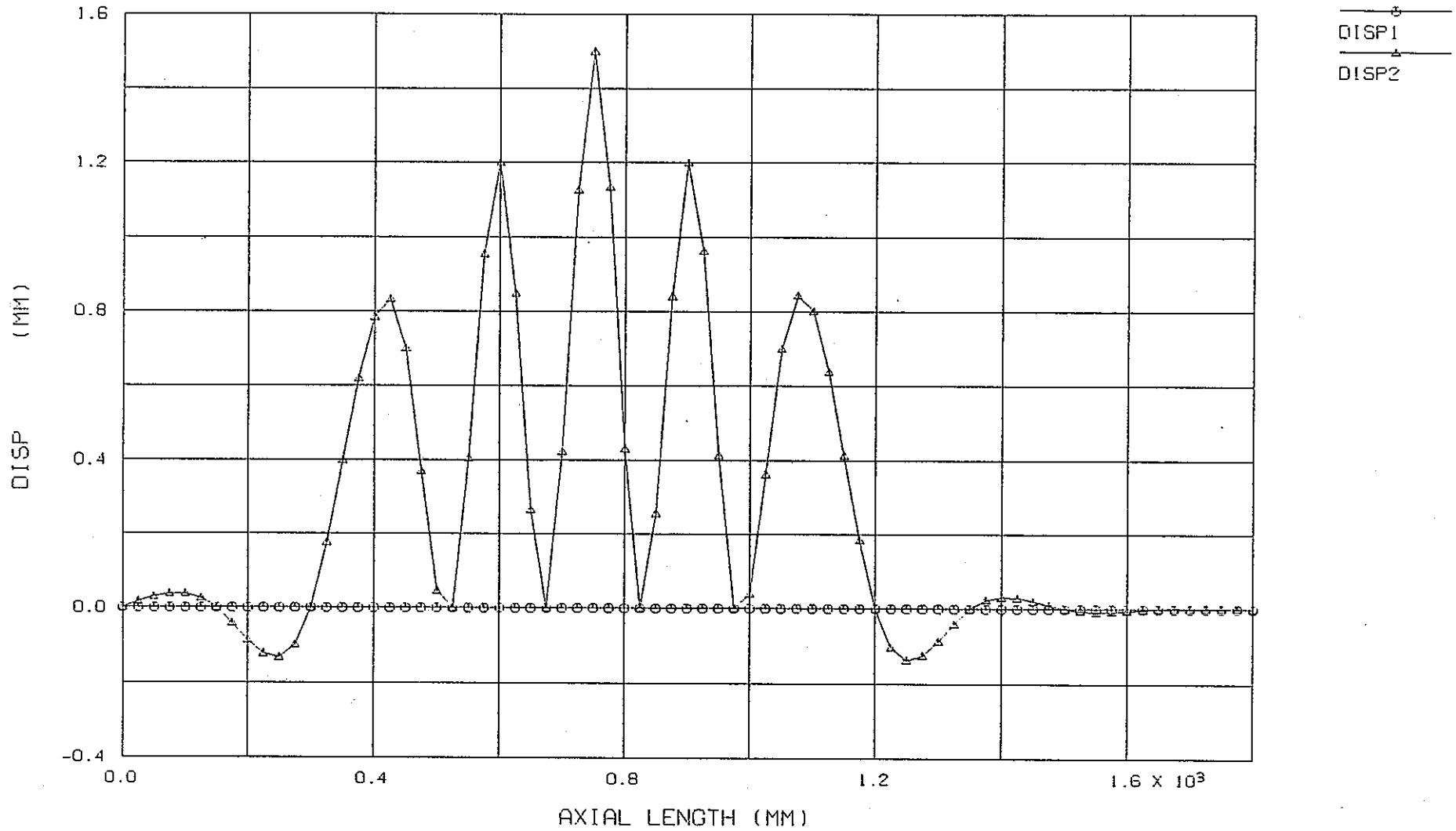
ELEMENT NO. 291 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-1.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布  
(軸方向位置: 747.5mm) (応力原因: 周方向温度差)



ELEMENT NO. 321 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-1.4 照射末期における軸方向応力の周方向分布  
(軸方向位置: 822.5mm) (応力原因: 周方向温度差)

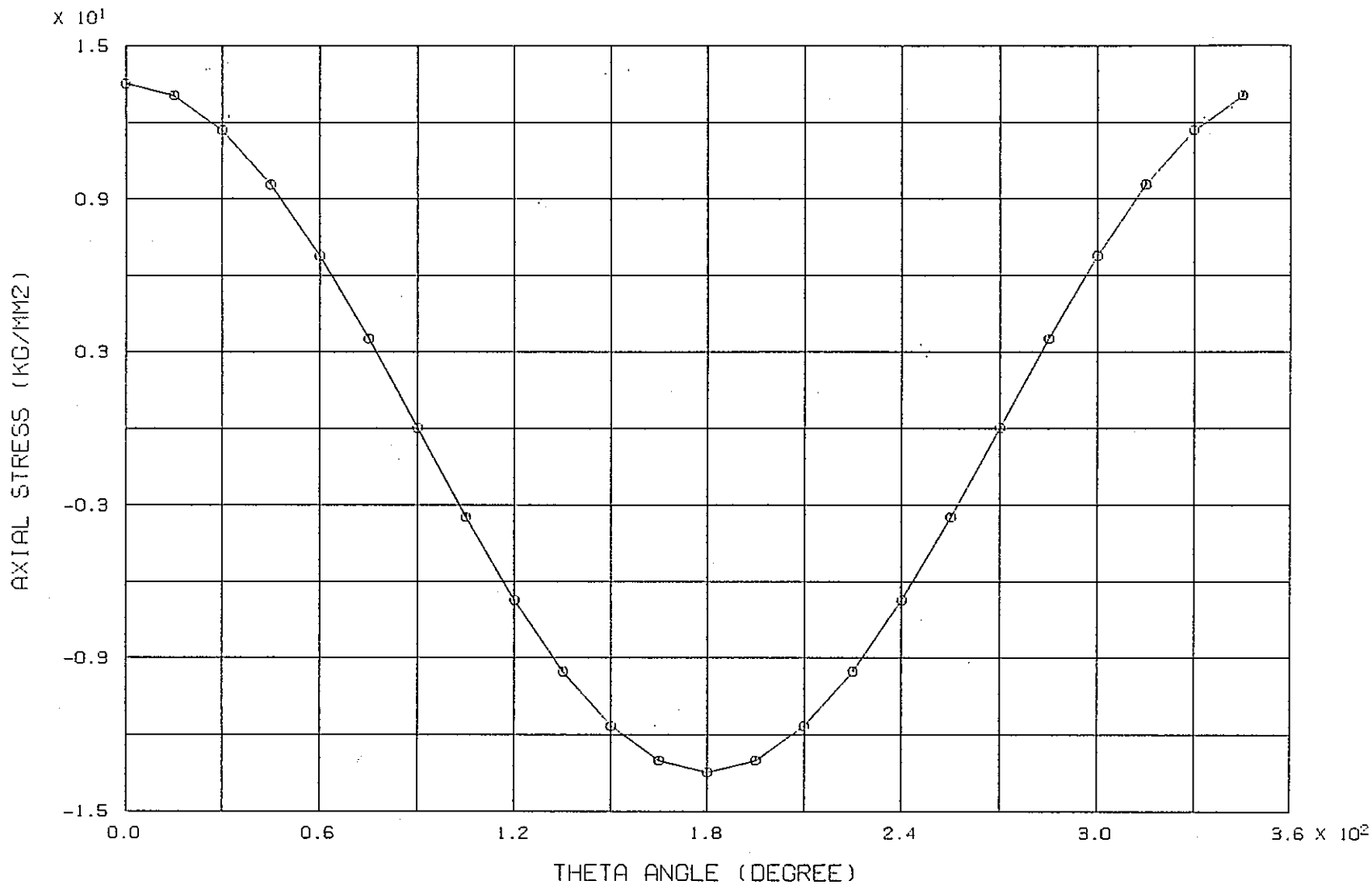


NODE NO. 1-721 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \*72 ) ( B700 )

付図6-2.1 照射末期における湾曲形状 (応力原因:BDI)



FINAS  
STEP NO. 43



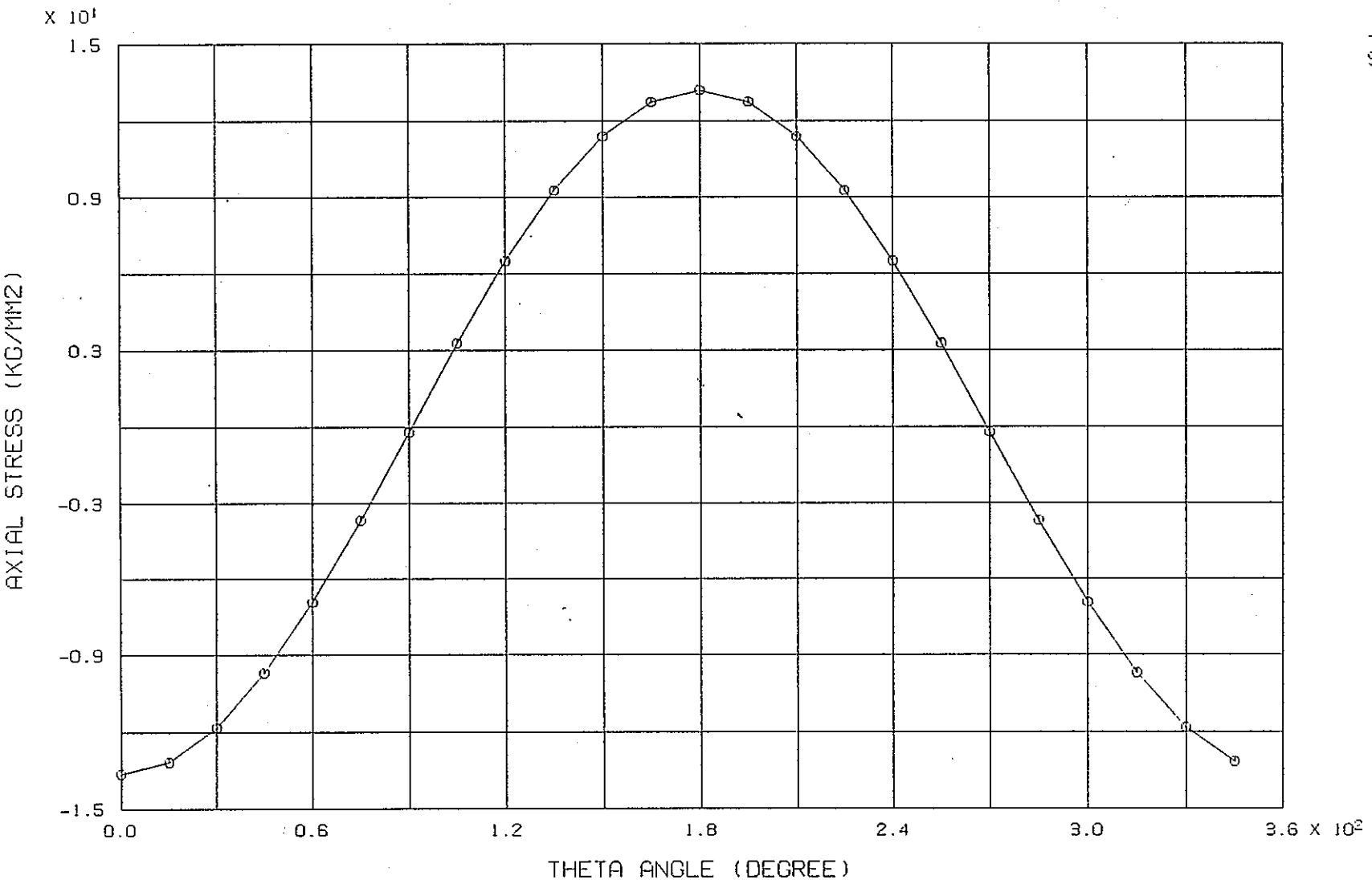
97 - 120

PNC TN9410 89-077

ELEMENT NO. 291 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-2.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布  
(軸方向位置: 747.5mm) (応力原因: BDI)

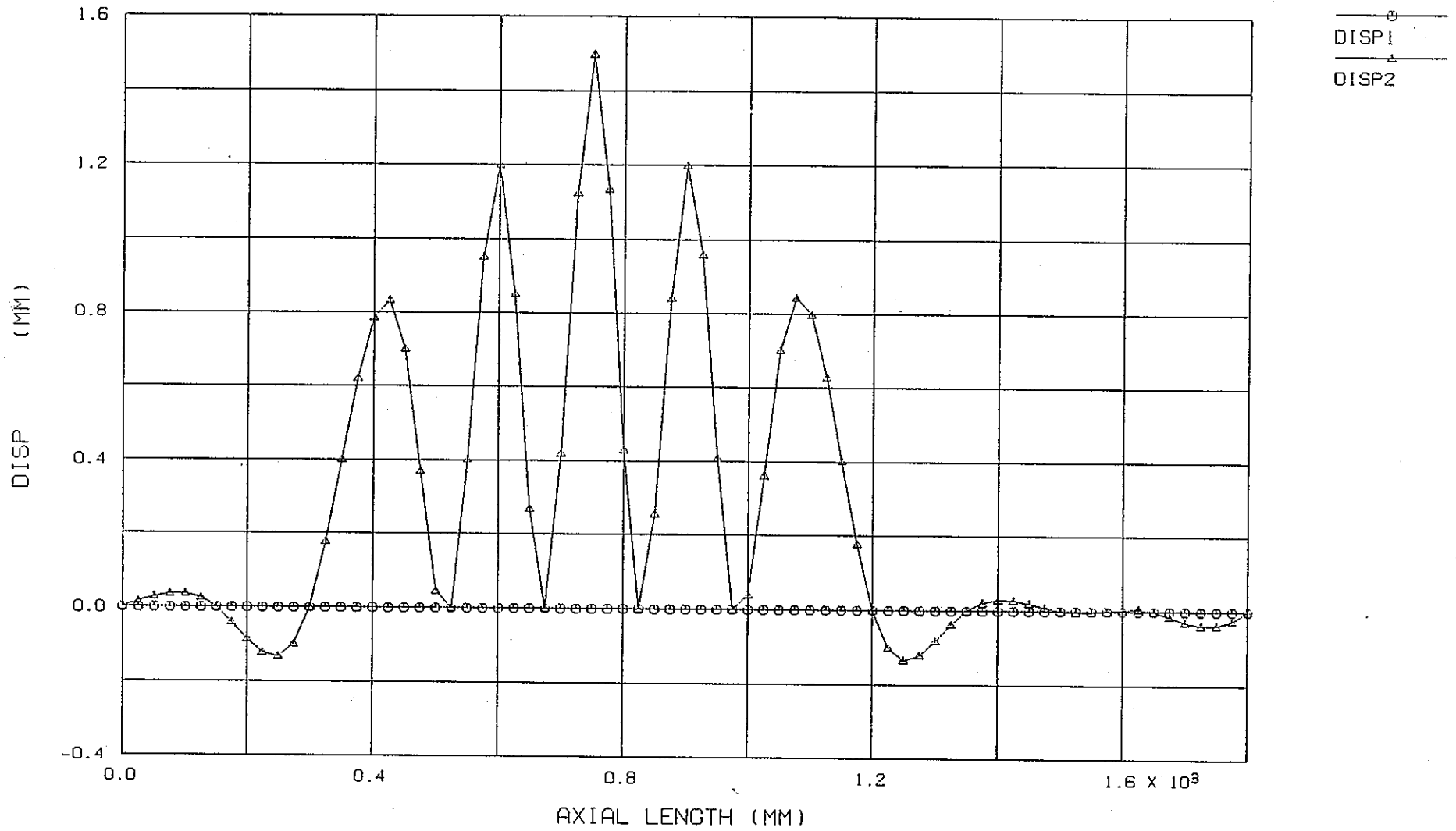
FINAS  
STEP NO. 43



ELEMENT NO. 321 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-2.4 照射末期における軸方向応力の周方向分布  
(軸方向位置:822.5mm) (応力原因:BDI)

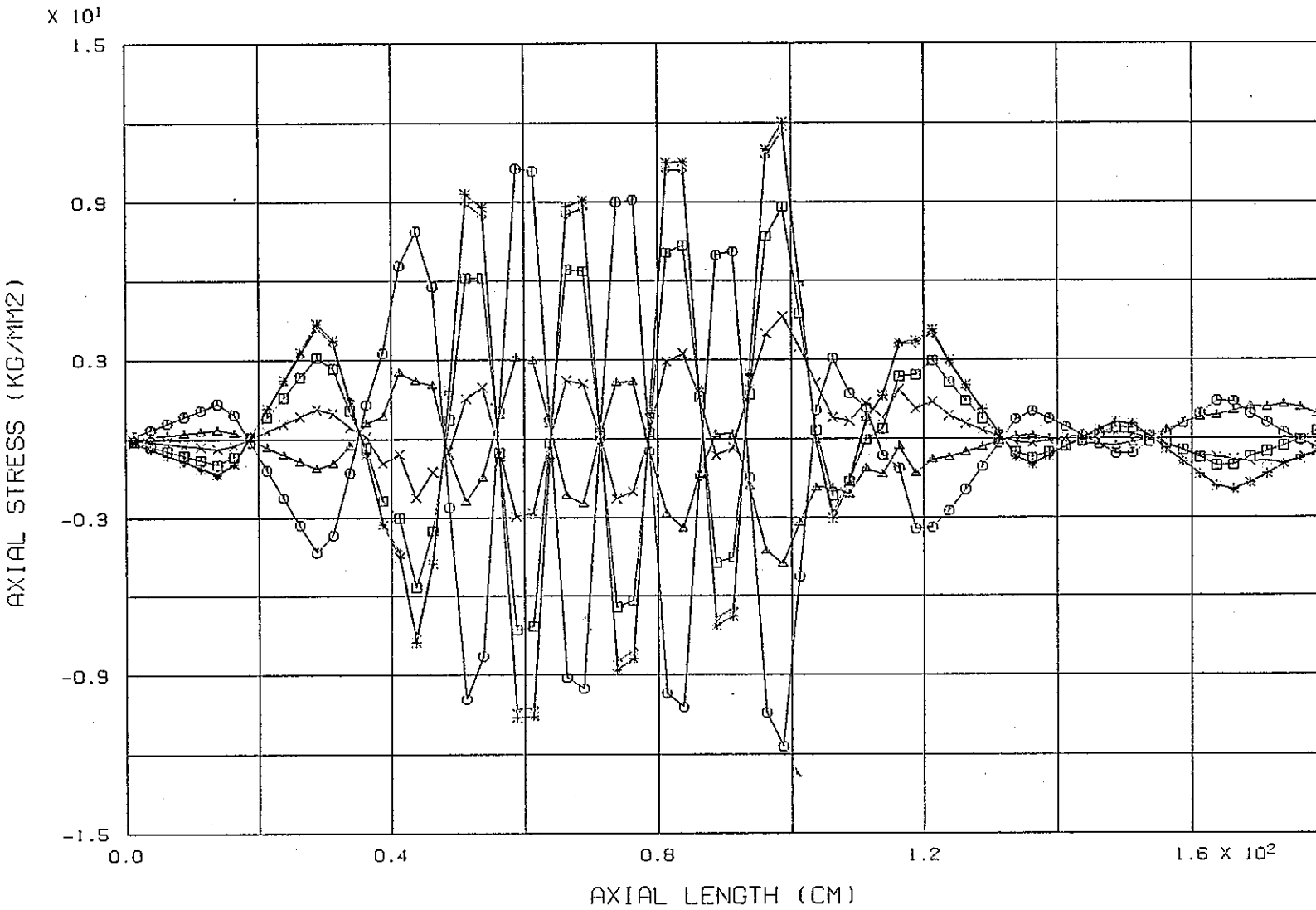




NODE NO. 1-721 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \*72 ) ( B700 )

付図6-3.1 照射末期における湾曲形状 (応力原因:周方向温度差とBDI)

FINAS  
STEP NO. 43

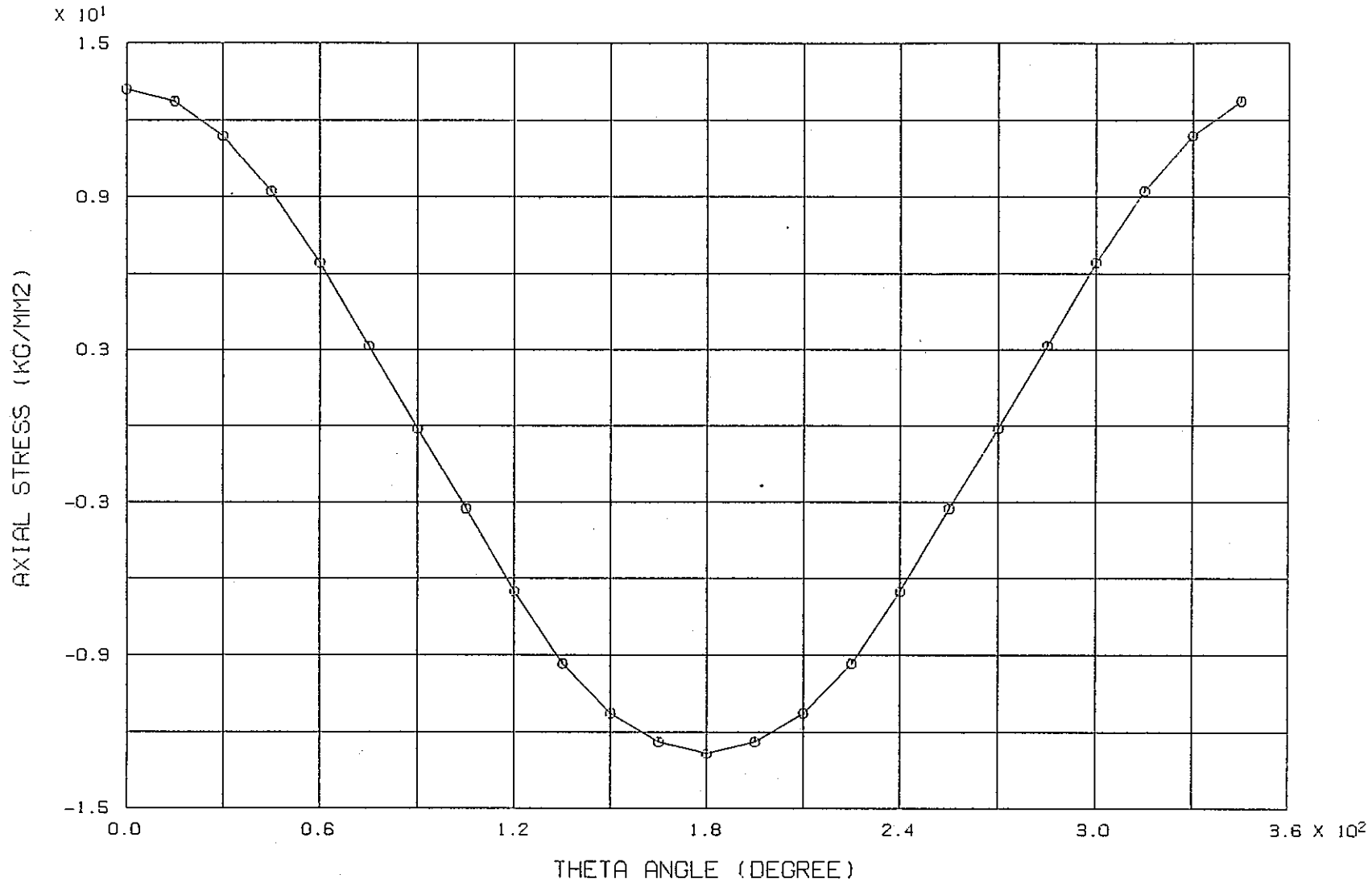


- 49
- △ 54
- \* 56
- 58
- + 60
- \* 61

ELM NO. 1-711 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-3.2 照射末期における軸方向応力の軸方向分布 (応力原因:周方向温度差とBDI)

FINAS  
STEP NO. 43



97 - 120

PNC TN9410 89-077

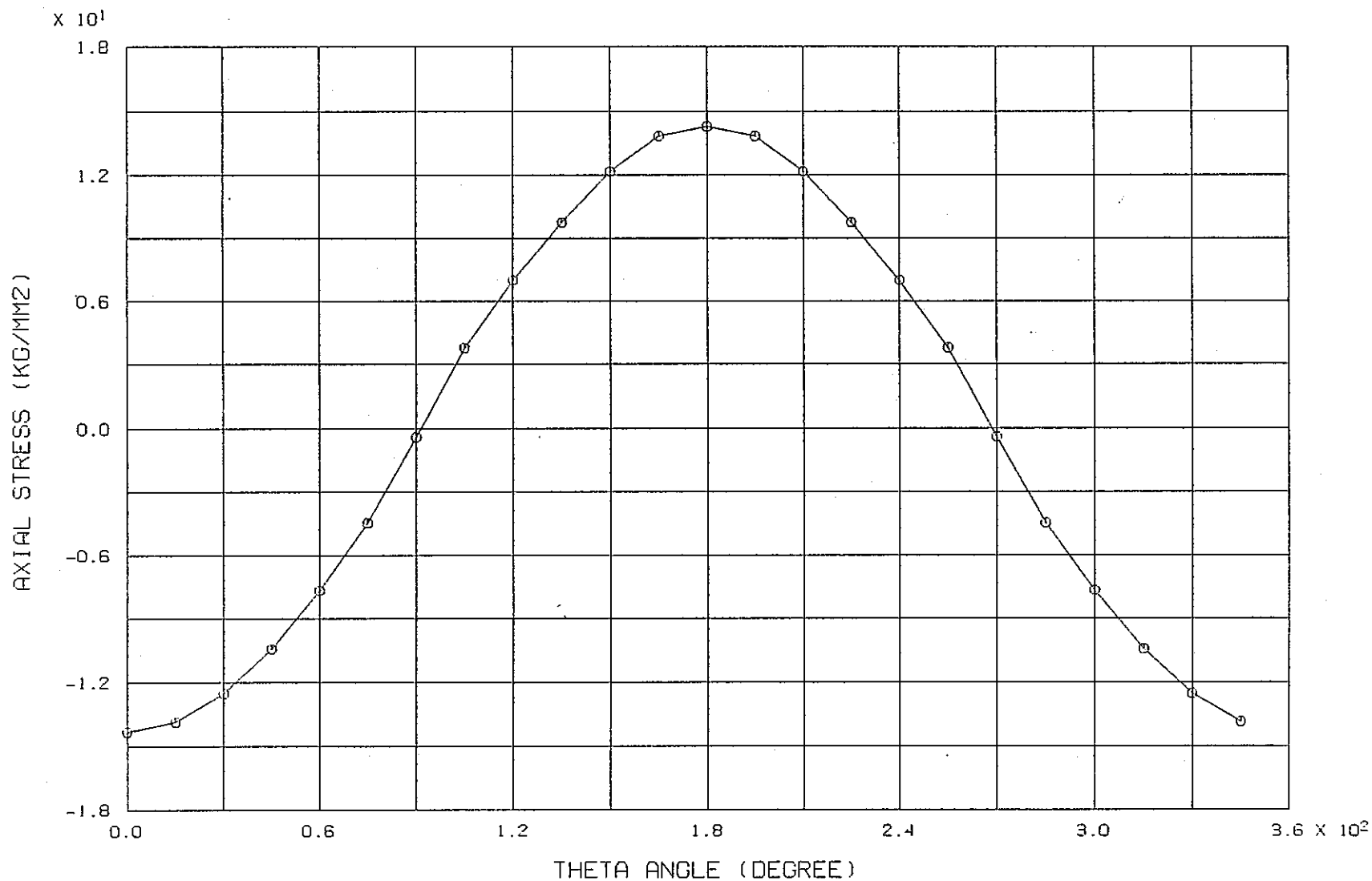
—159—

ELEMENT NO. 291 <<WP=150MM>> ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-3.3 照射末期における軸方向応力の周方向分布  
(軸方向位置:747.5mm) (応力原因:周方向温度差とBDI)

FINAS  
STEP NO. 43

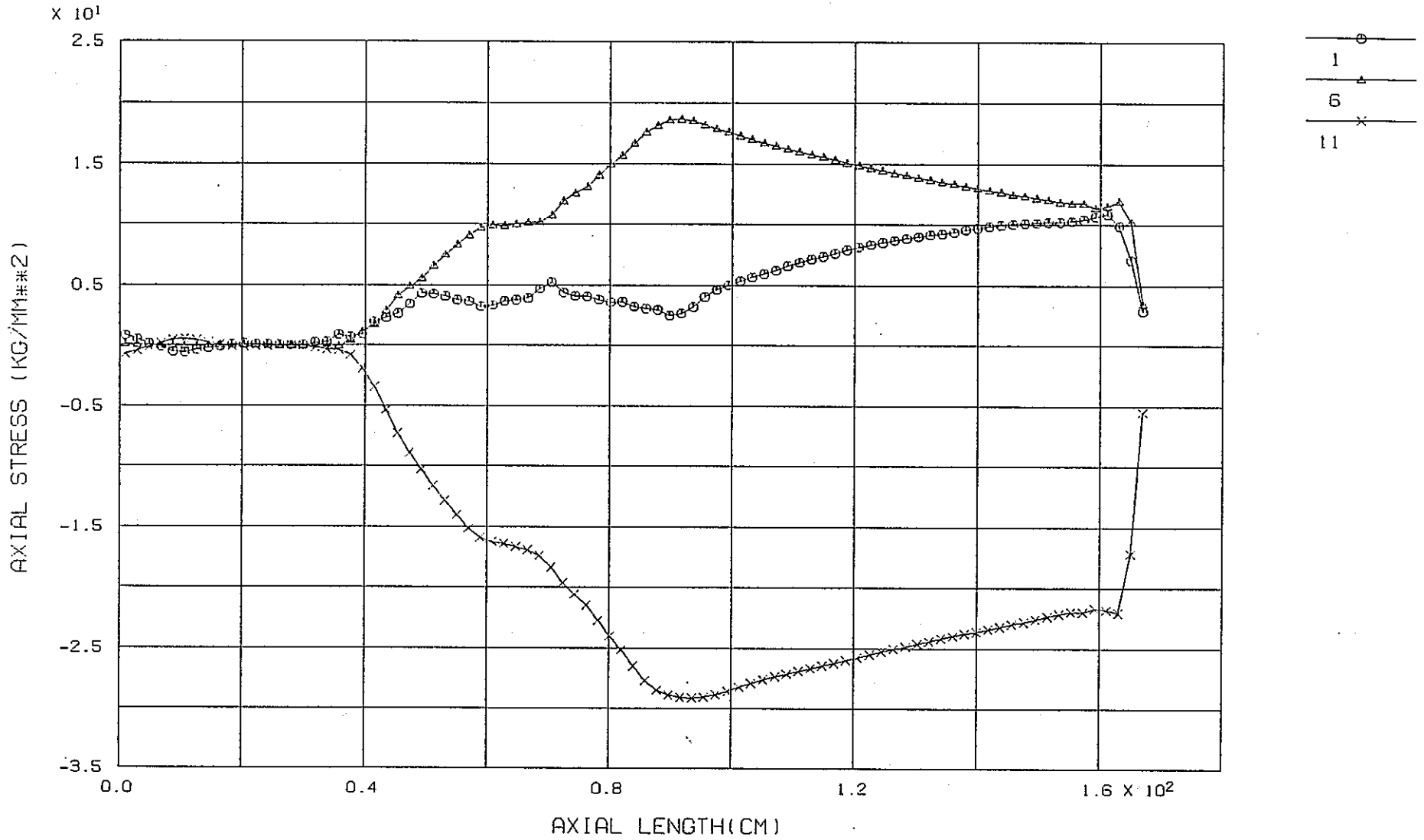
97 - 120



ELEMENT NO. 321      <<WP=150MM>>      ( PIPE3 \* 72 ) ( B700 )

付図6-3.4 照射末期における軸方向応力の周方向分布  
(軸方向位置:822.5mm) (応力原因:周方向温度差とBDI)

FINAS  
STEP NO. 1

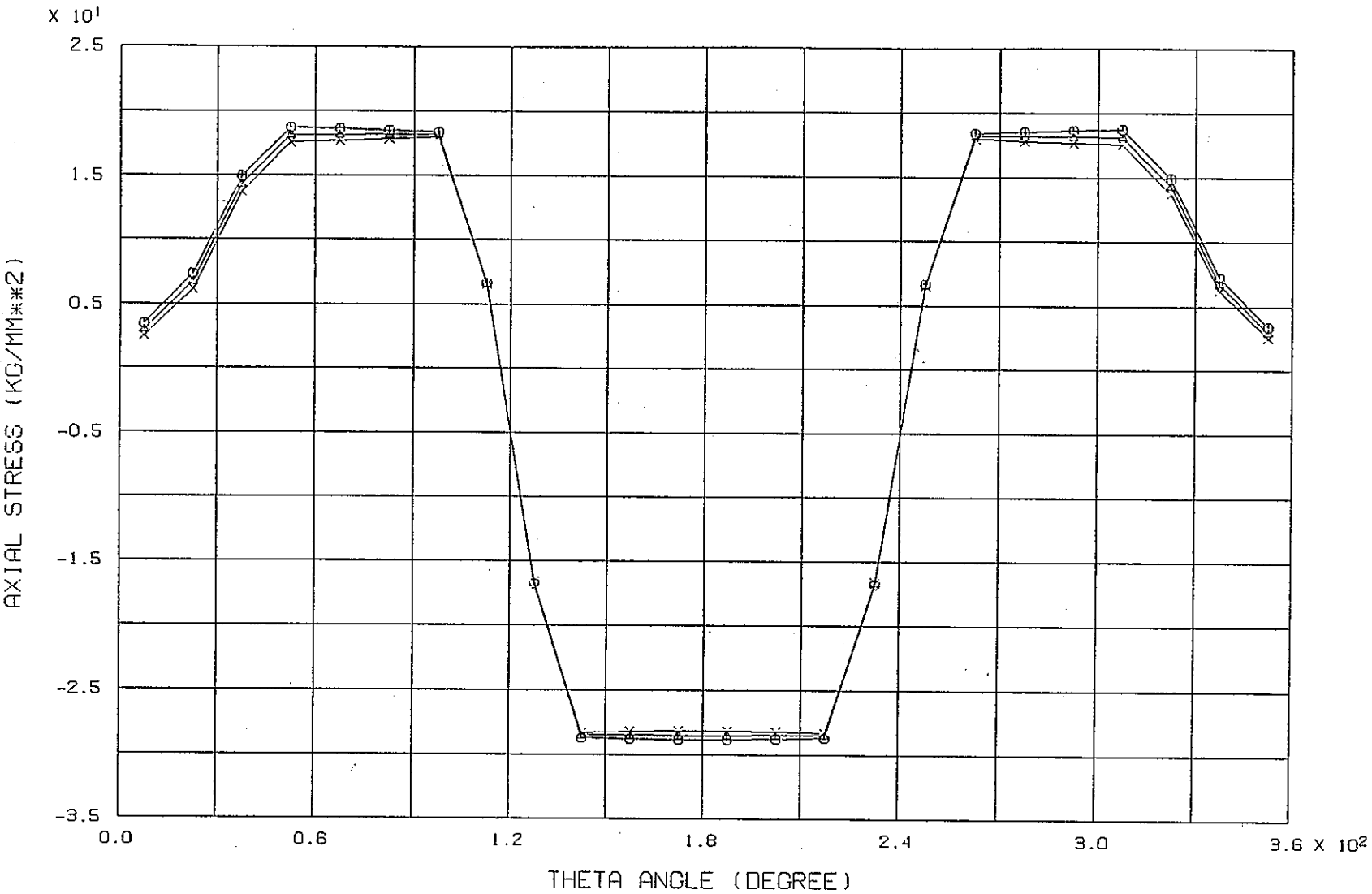


MID VALU <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-1.1 照射初期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布



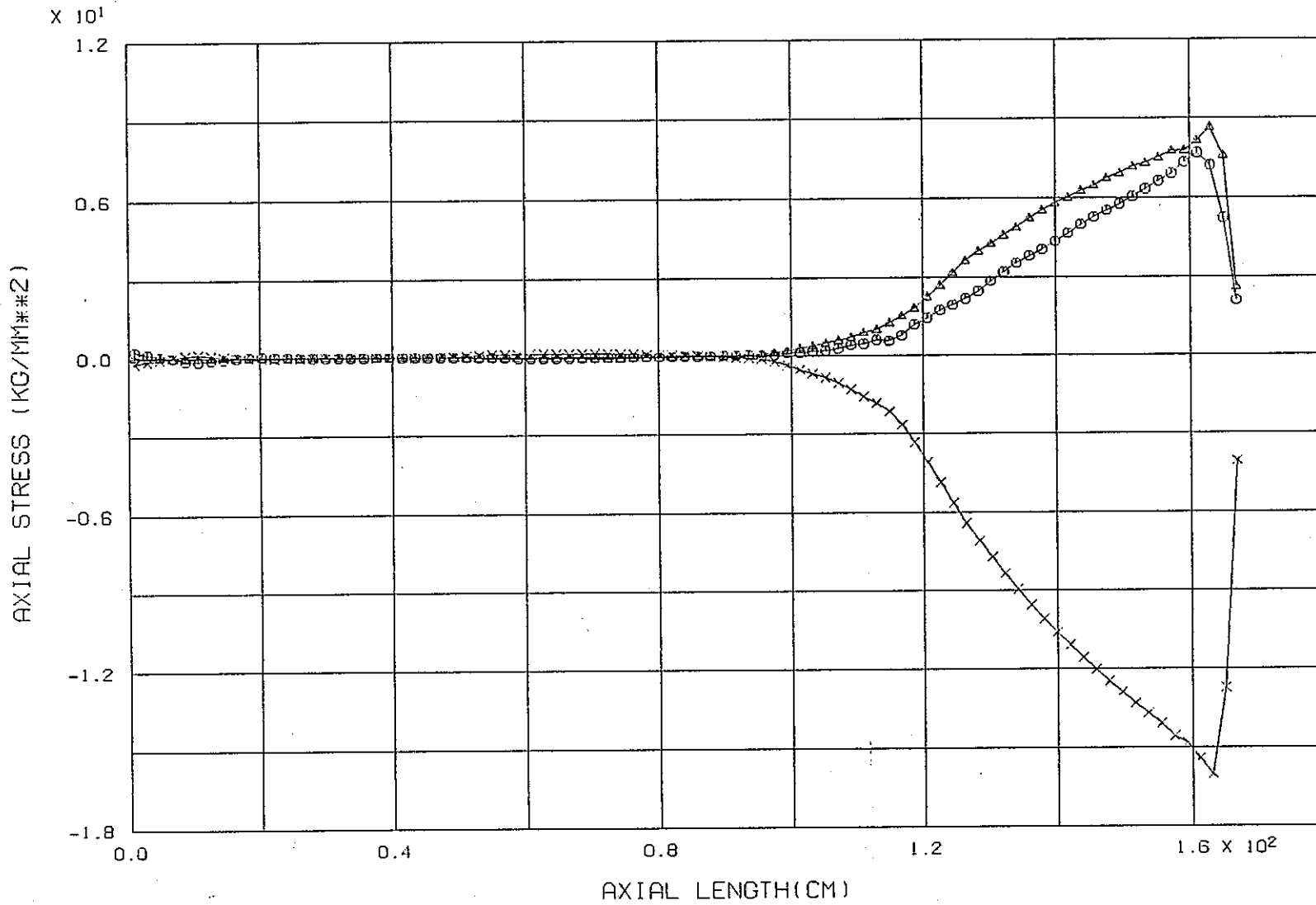
FINAS  
STEP NO. 1



ELEMENT NO. 4601-4624 <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-1.3 照射初期における軸方向応力(最高温度部)の周方向分布

FINAS  
STEP NO. 11



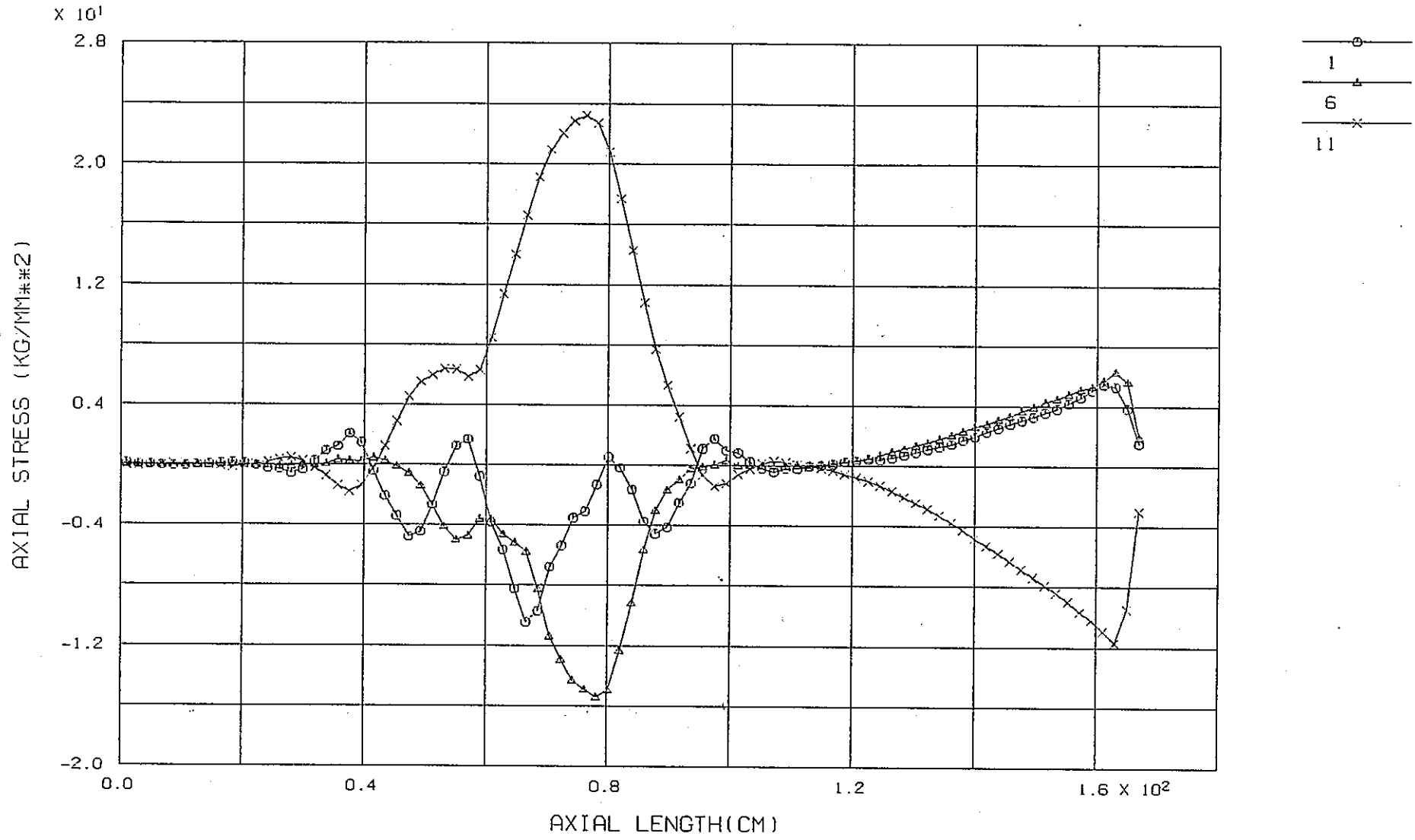
○  
1  
△  
6  
×  
11

MID VALU <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BD1 )

付図7-2.1 照射中期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布



FINAS  
STEP NO. 26

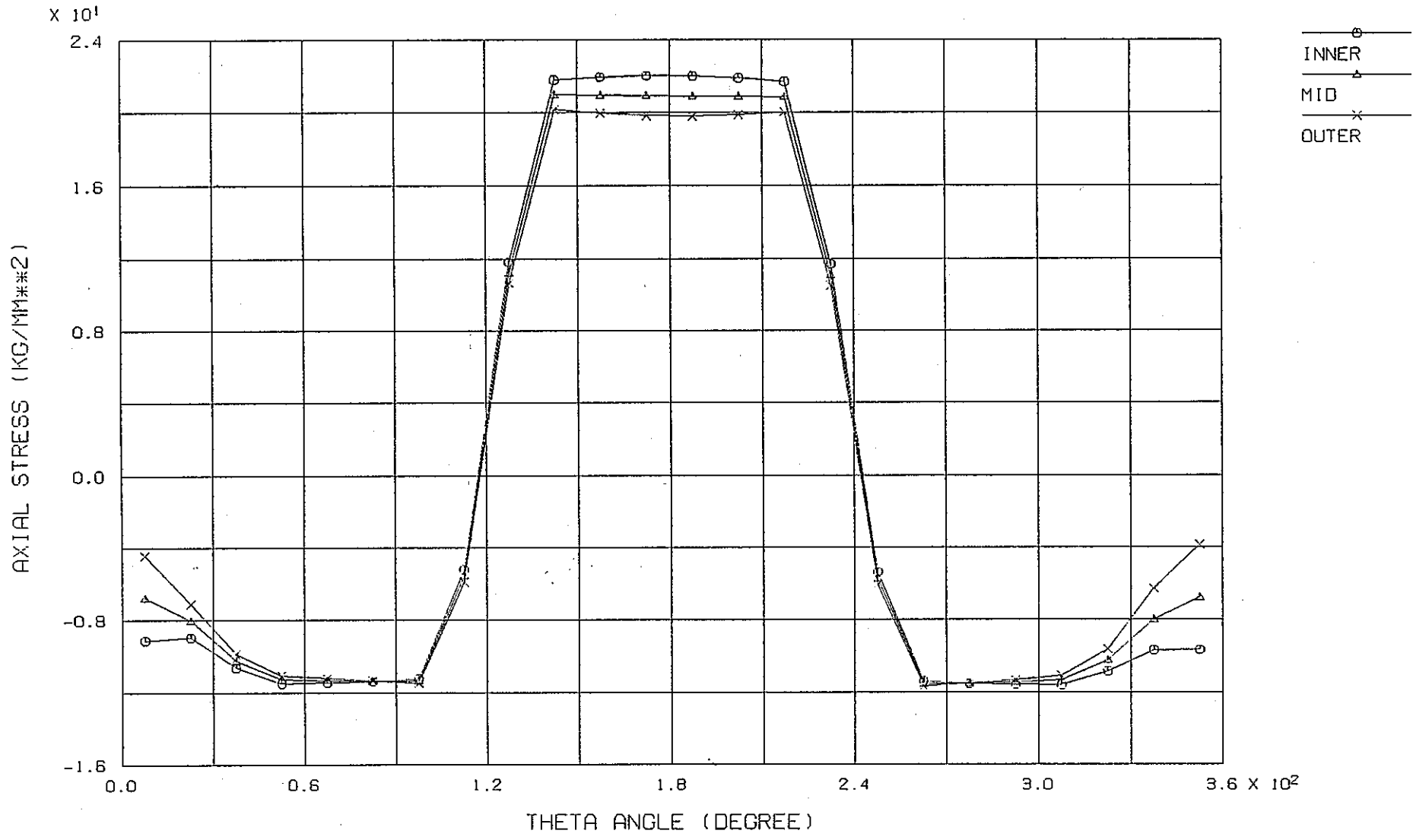


MID VALU <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-3.1 照射末期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布 (ケース1)

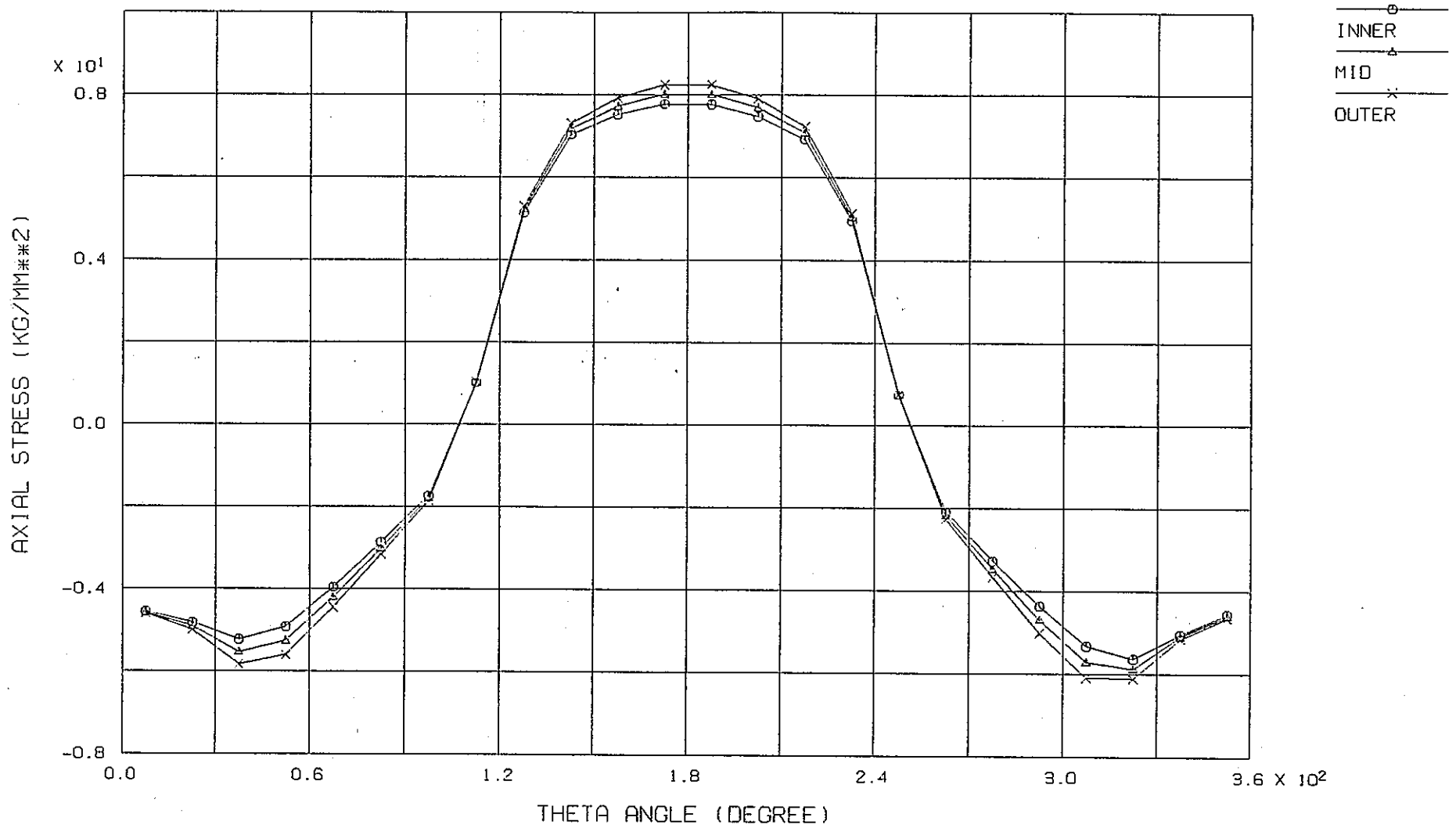
FINAS  
STEP NO. 26

PNC TN9410 89-077



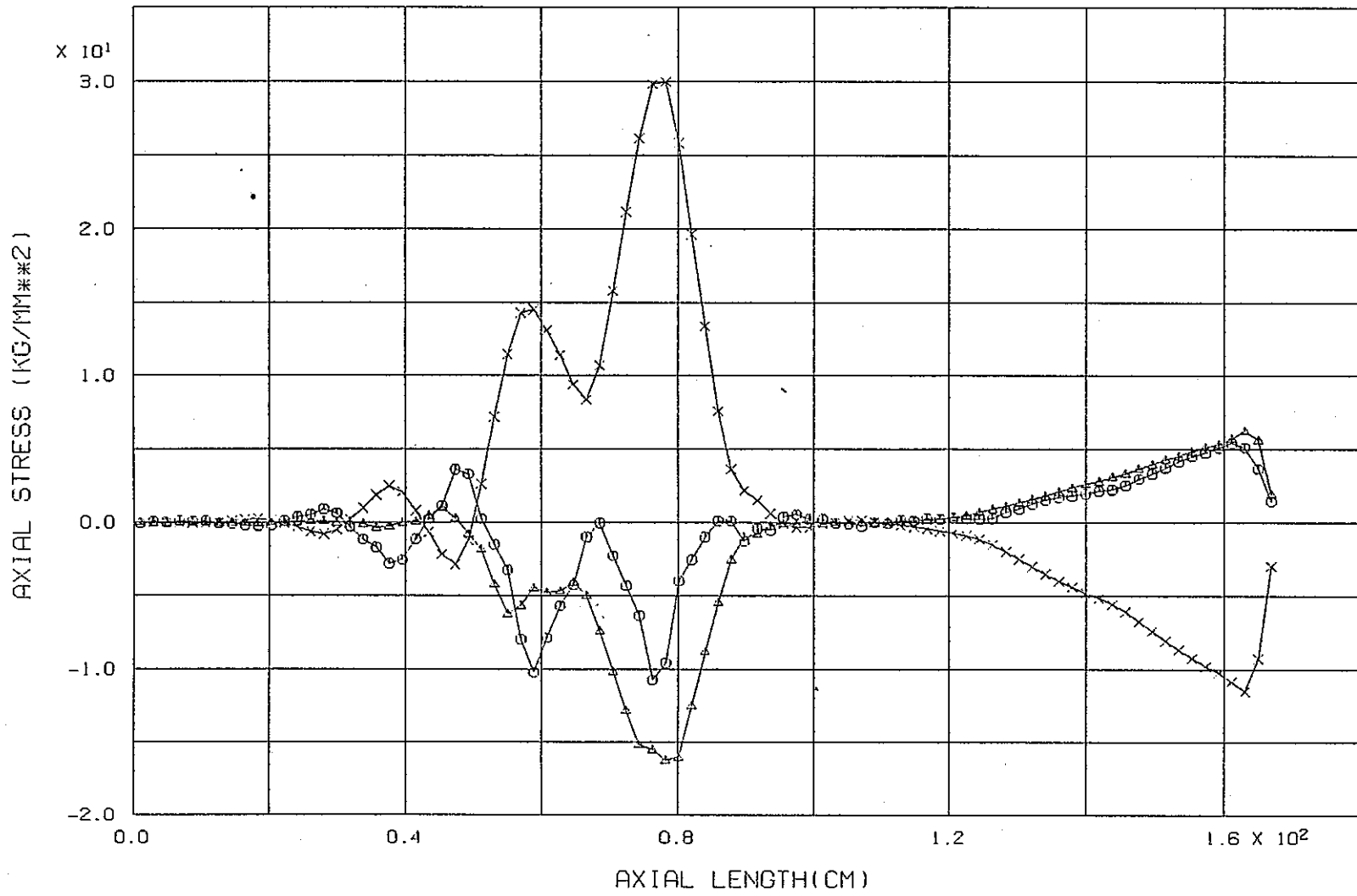
ELEMENT NO. 3701-3724 <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-3.2 照射末期における軸方向応力(最大発熱部)の周方向分布 (ケース1)



ELEMENT NO. 4601-4624 <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-3.3 照射末期における軸方向応力(最高温度部)の周方向分布 (ケース1)

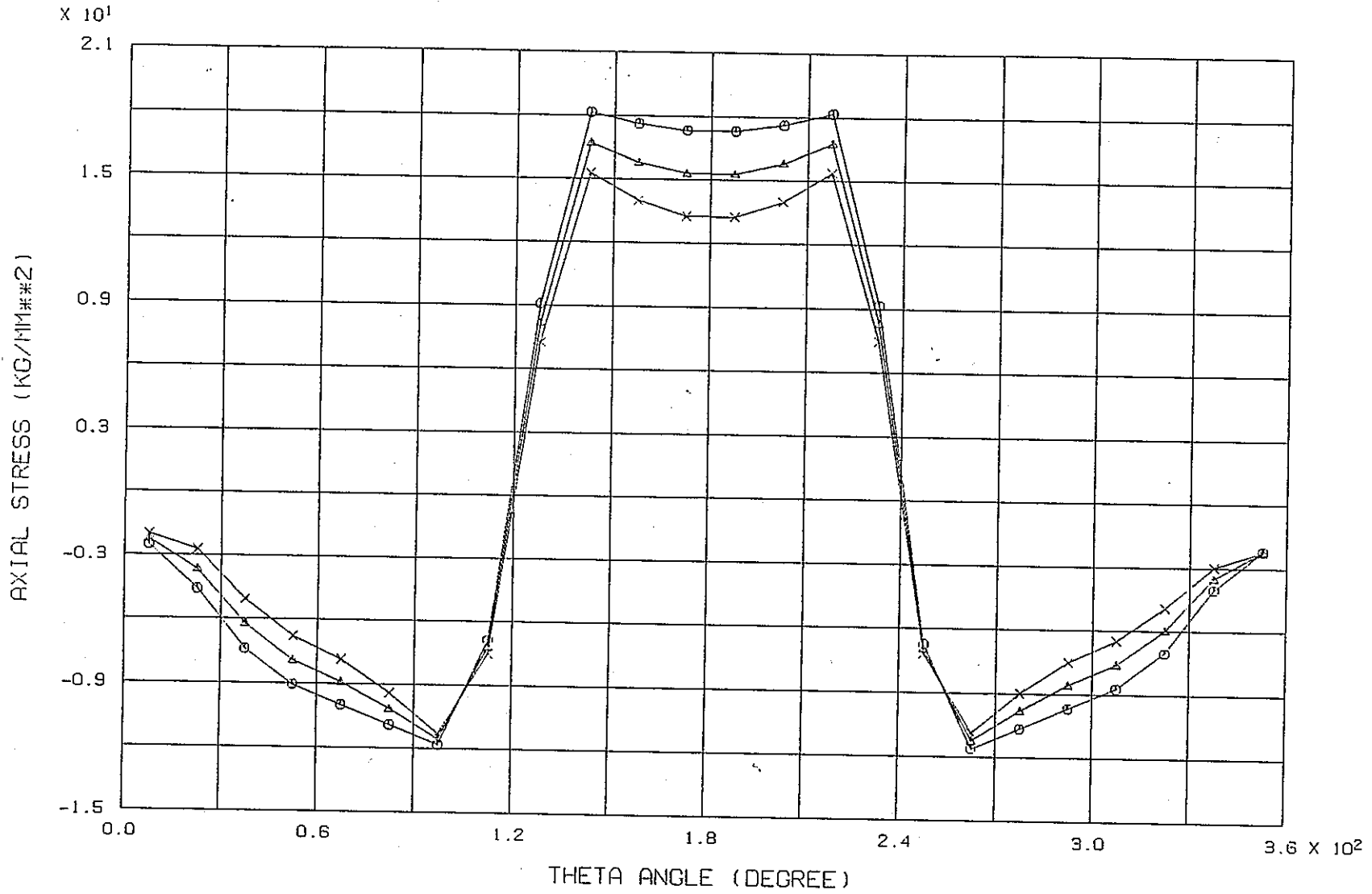


○  
1  
△  
9  
×  
11

MID VALU <<WP=19.3MM>> CASE2 ( E24BDI )

付図7-4.1 照射末期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布 (ケース2)

FINAS  
STEP NO. 26

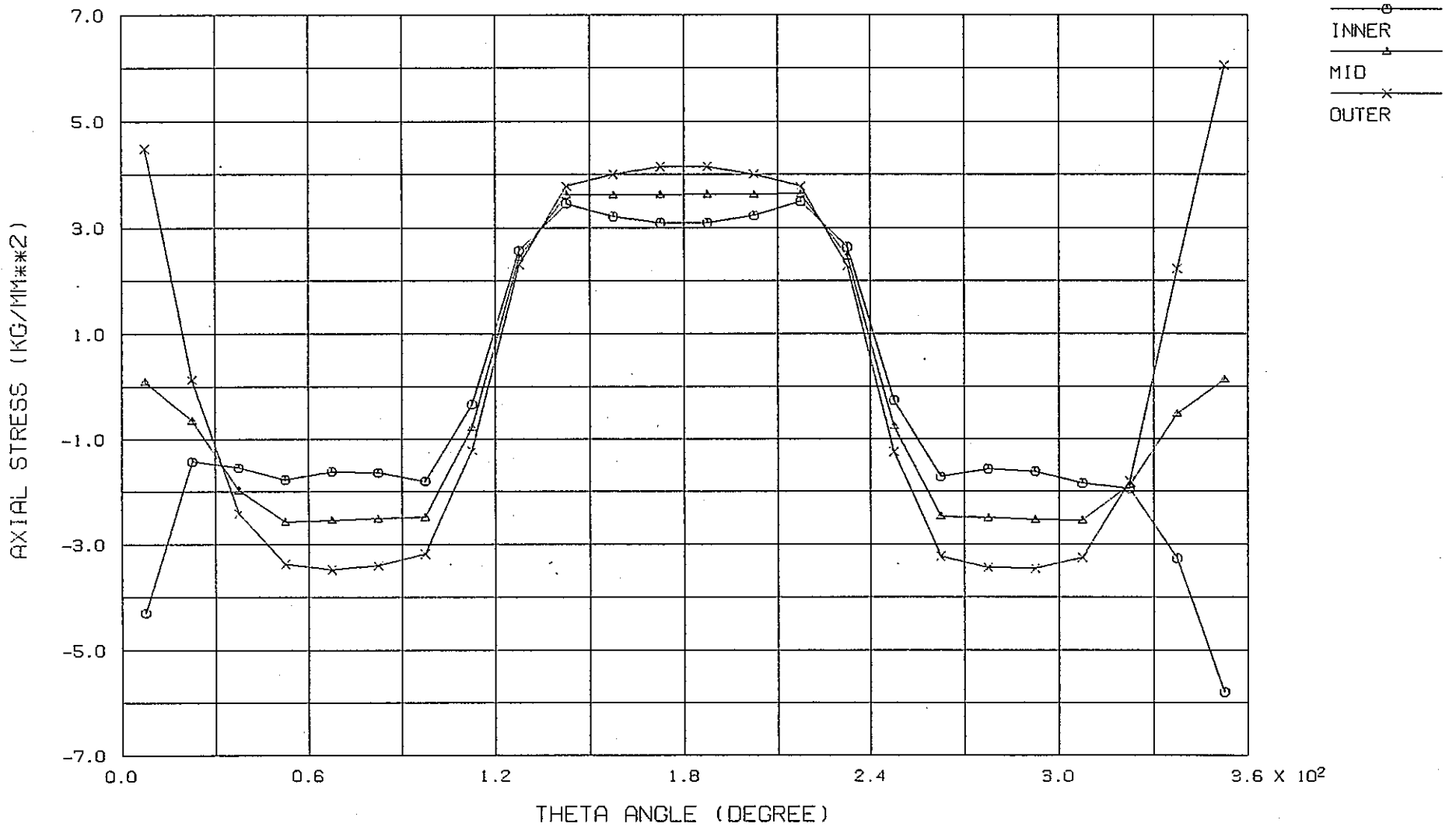


ELEMENT NO. 3701-3724 <<WP=19.3MM>> CASE2 ( E24BD1 )

付図7-4.2 照射末期における軸方向応力(最大発熱部)の周方向分布 (ケース2)

FINAS  
STEP NO. 26

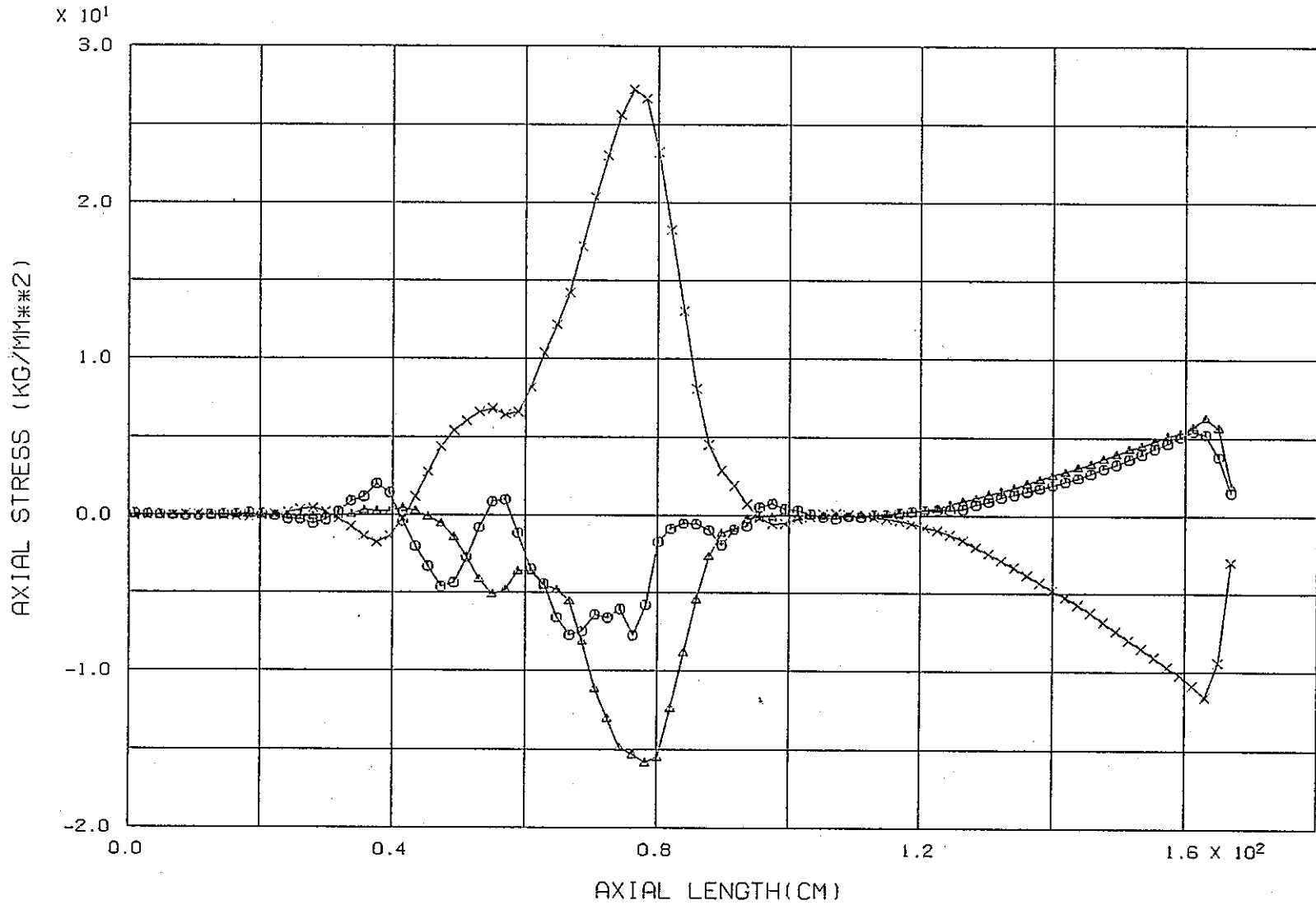
PNC TN9410 89-077



ELEMENT NO. 4601-4624 <<WP=19.3MM>> CASE2 ( E24BDI )

付図7-4.3 照射末期における軸方向応力(最高温度部)の周方向分布 (ケース2)

FINAS  
STEP NO. 26

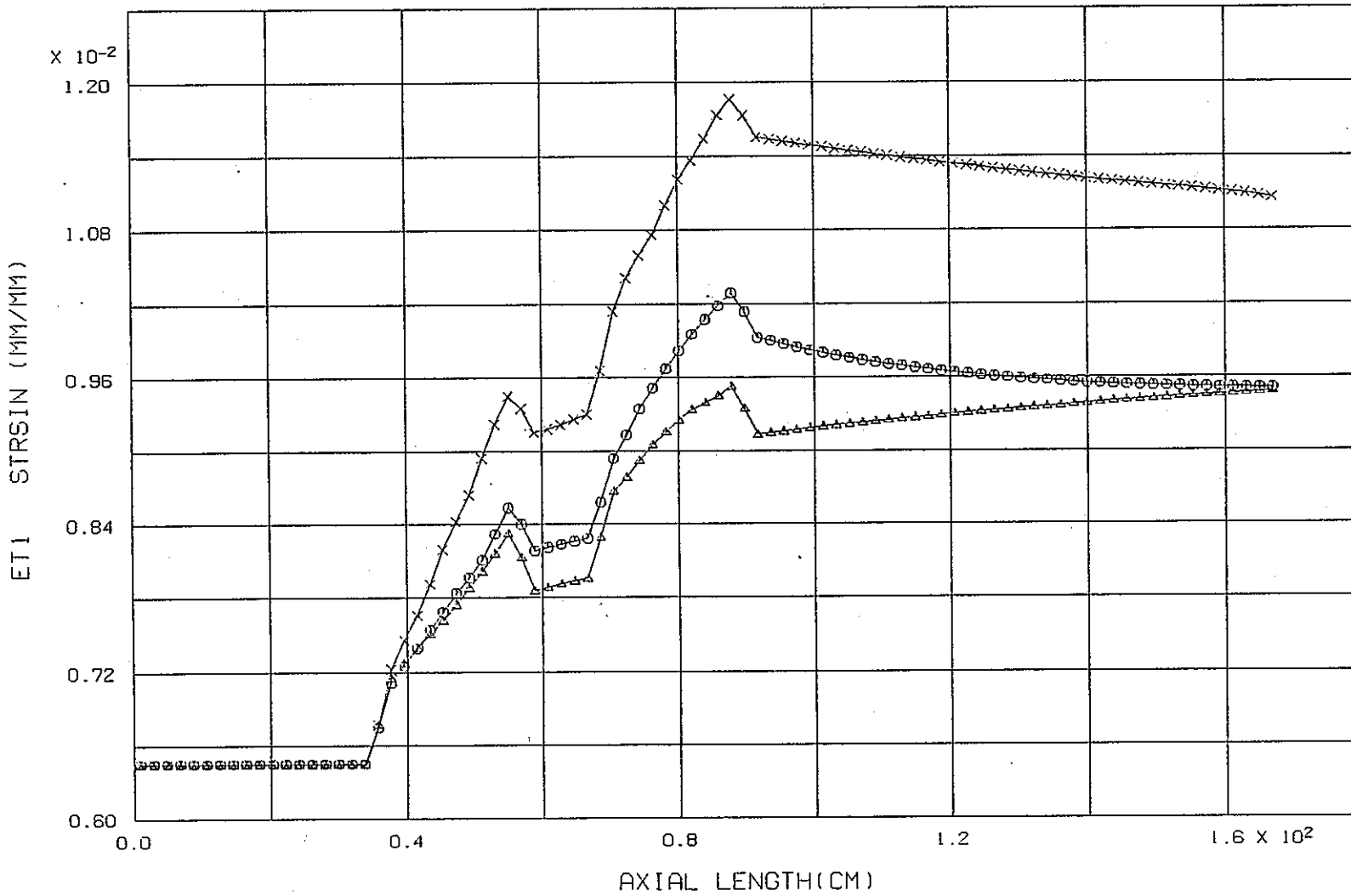


○  
1  
△  
6  
×  
11

MID VALU <<WP=19.3MM>> CASE3 ( E24BDI )

付図7-5.1 照射末期における肉厚中心軸方向応力の軸方向分布 (ケース3)

FINAS  
STEP NO. 1



○  
1  
Δ  
6  
x  
11

PNC TN9410 89-077

172

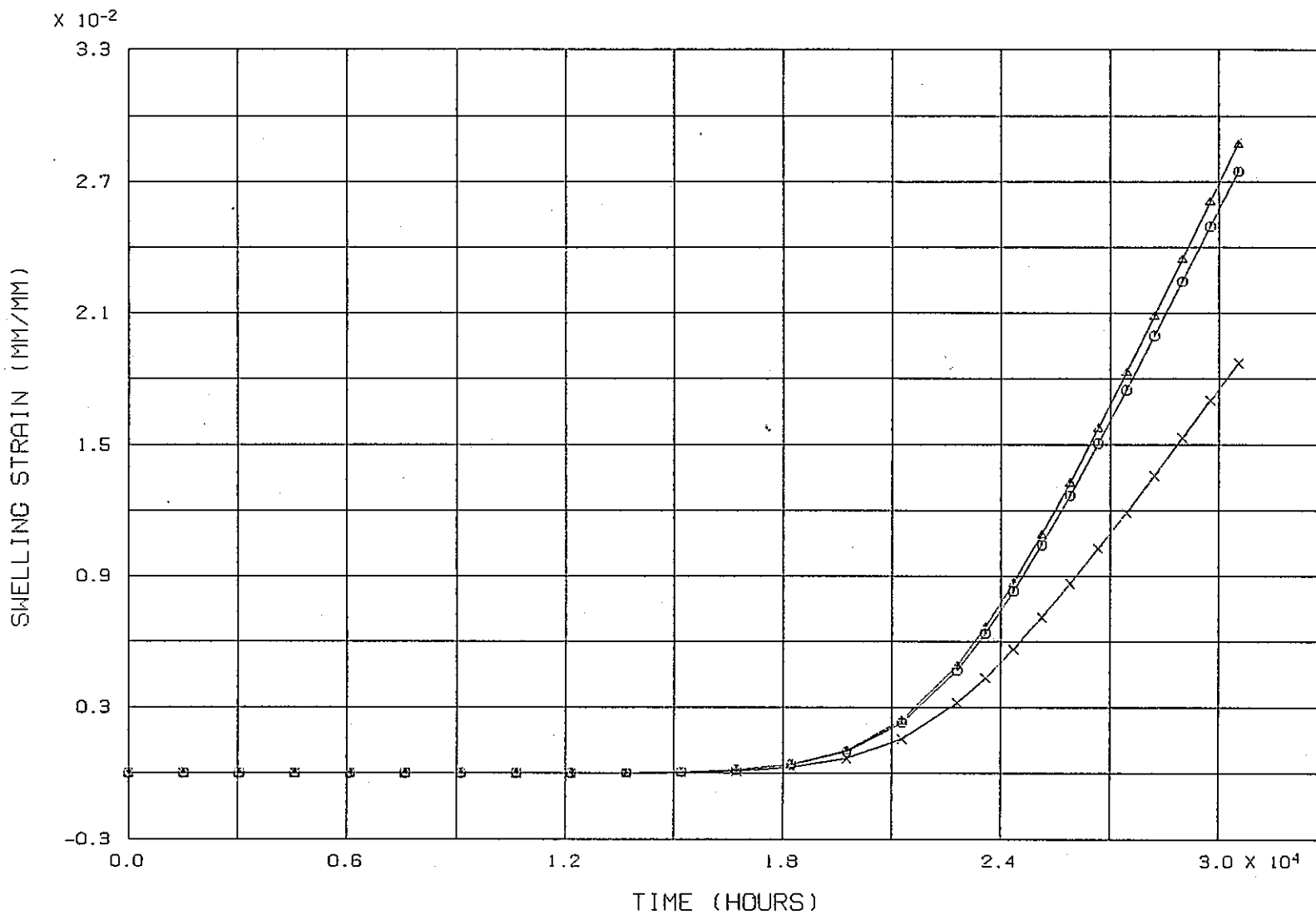
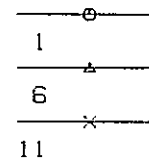
MID VALU

<<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-6.1 熱膨張ひずみの軸方向分布

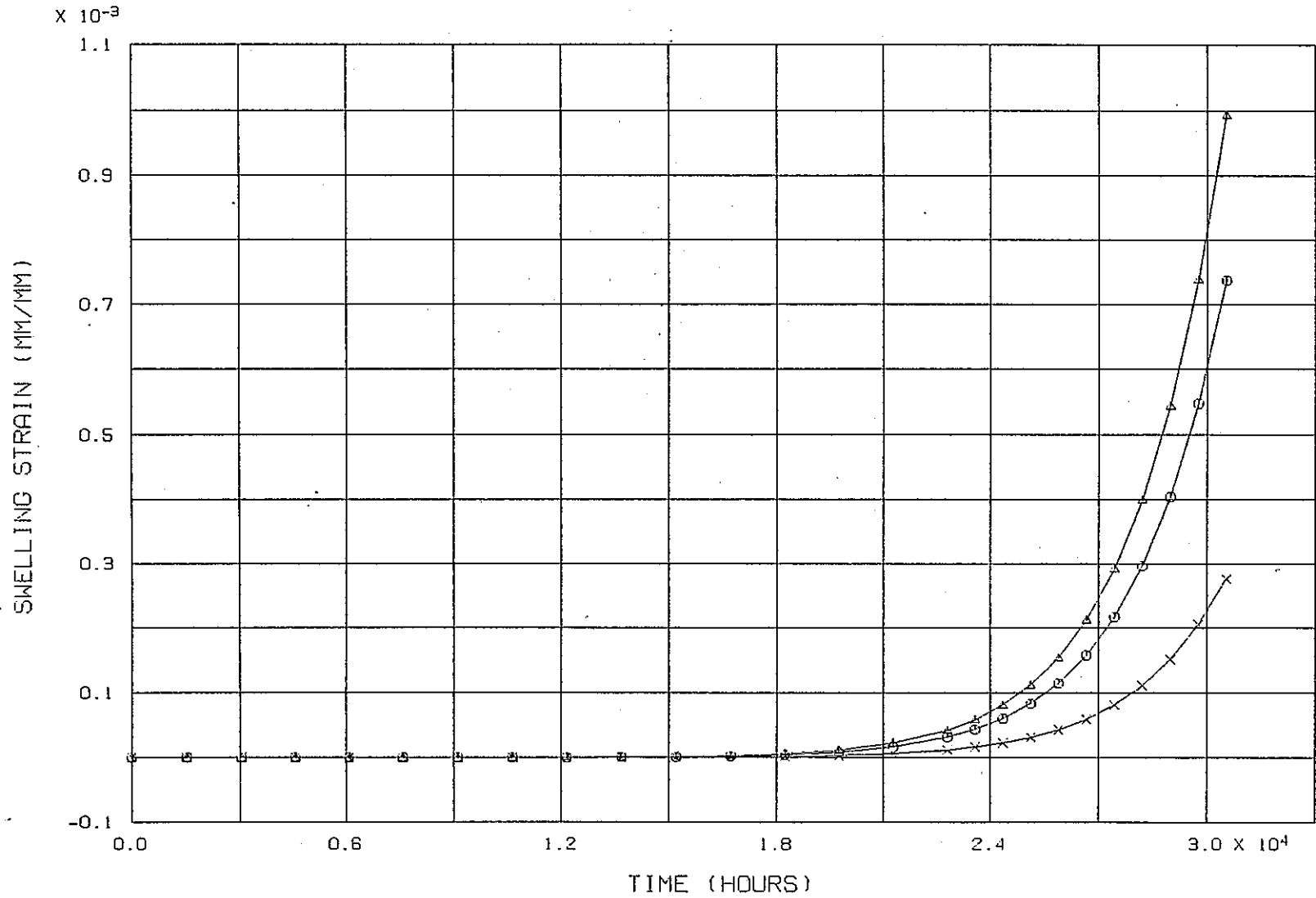
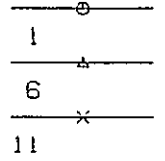


FINAS



ELEMENT NO.3701-3724 MID <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-6.2 スエリングひずみ(最大発熱部)の経時変化



ELEMENT NO.4601-4624 MID <<WP=19.3MM>> CASE1 ( E24BDI )

付図7-6.3 スエリングひずみ(最高温度部)の経時変化