

FBR大型炉の設計主要目に関する研究

軸非均質燃料被覆管の軸方向温度差に
起因する応力の解析評価

1988年12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

軸非均質燃料被覆管の軸方向温度差に起因する応力の解析評価

菰田成一* 金城勝哉* 中西征二* 谷山洋*

要 旨

軸非均質炉心(AHC)成立性に関する燃料設計側からの検討課題の一つである、炉心部と内部ブランケット(IB)部の境界部における軸方向温度差に起因する被覆管応力について検討した。

FINAS(Finite Element Nonlinear Structural Analysis System)を用いた、管壁方向と軸方向に関する二次元(軸対称)熱伝導解析により、軸非均質燃料IB境界部の被覆管二次元温度分布を求めた。この温度条件のもとで、再びFINASを用い、最大発熱部被覆管応力を解析評価した。その結果、照射初期に生じる熱膨張差に伴う応力は、クリープにより照射とともに漸減するが、スエリングが現れる照射中期以降では漸増することが分かった。3年寿命末期応力は、照射初期の応力と比較して、その符号が逆であるものの、大きさは同程度となった。

また、管壁温度差に起因する均質燃料最大発熱部応力も解析評価し、軸非均質燃料最大発熱部応力評価結果と比較した。その結果、極端な差違はなく、したがって、軸方向温度差に起因する被覆管応力はAHC成立性上の障害にならないとの見通しが得られた。

尚、被覆管材としては改良オーステナイト鋼(PNC1520、15Cr-20Ni-2.5Mo-0.25Ti/0.1Nb)を採用することを前提とした。

* 大洗工学センター、技術開発部、プラント工学室

Study on the Main Design Parameters
of Large Scale FBR Core Characteristics
Analysis of AHC Fuel Cladding Stress due to Axial Temperature Difference

Seiichi Komoda*, Katsuya Kinjo*, Seiji Nakanishi* and Hiroshi Taniyama*

Abstract

This work is on the study of fuel cladding stress due to axial temperature difference at the boundaries of internal blanket (IB) sections, which is one of issues in fuel design field connected with the realization of axial heterogeneous core (AHC).

Two-dimensional cladding temperature distribution near the boundaries of IB sections of AHC fuel pins is obtained by two-dimensional (axial and radial) thermal conduction analysis using Finite Element Nonlinear Structural Analysis System (FINAS). On the basis of this temperature distribution, cladding stress at the maximum linear heat rate level is evaluated by FINAS. As a result, it is found that cladding stress induced by thermal expansion rate difference at the beginning of irradiation gradually decreases with irradiation time owing to irradiation creep, but gradually increases inversely in and after the middle of irradiation when a swelling appears. The sign of cladding stress at the end of fuel life after 3 years irradiation duration is contrary to the one at the beginning, but the magnitudes of cladding stress are comparable to each other.

Is also evaluated cladding stress due to radial temperature difference at the maximum linear heat rate level of homogeneous core (HOC), and the result is compared with the corresponding cladding stress in AHC. It is turned out that the difference of cladding stress between AHC and HOC is not so great. Consequently, it may be expected that fuel cladding stress due to axial temperature difference is not an obstacle to the realization of AHC.

It should be mentioned that a cladding material is supposed to be an advanced austenitic steel (PNC1520, 15Cr - 20Ni - 2.5Mo - 0.25Ti / 0.1 Nb).

*Plant Engineering Office, Technology Development Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. 概要	1
2. 予備検討	5
2.1 解析対象軸方向範囲の検討	5
2.2 解析解、簡易応力評価式による評価結果とFINAS解析結果の比較	7
2.3 メッシュ巾の検討	10
3. ノミナル相当条件での検討	13
3.1 解析条件	13
3.2 解析結果	15
4. 不確かさの検討	19
4.1 解析条件	19
4.2 解析結果	19
5. 二次元熱伝導解析	22
5.1 解析条件	22
5.2 解析結果	22
6. 応力解析評価	25
6.1 軸方向温度勾配を考慮した軸方向温度差に起因する応力の評価	25
6.2 二次元温度分布条件での応力の評価	25
6.3 管壁温度差(肉厚方向温度差)に起因する応力の評価	26
6.4 被覆管強度成立性の見通し	27
7. まとめと今後の課題	33
謝辞	34
参考文献	35
付録	36

表 リ ス ト

第2.1.1表	節点温度入力データ-----	6
第2.2.1表	不連続部高温側での応力の比較-----	9
第2.3.1表	解析解プロッター図一覧表-----	12
第2.3.2表	FINASコードによる応力解析結果プロッター図一覧表-----	12
第3.2.1表	周方向膜応力のピーク値、およびピークとなる軸方向位置-----	17
第3.2.2表	軸方向曲げ応力の最大値および最大となる軸方向位置-----	17
第3.2.3表	QAX8を用いた1125日照射後の応力解析結果-----	17
第3.2.4表	FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表-----	18
第4.2.1表	周方向膜応力および軸方向曲げ応力の最大値評価結果-----	21
第4.2.2表	FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表-----	21
第5.2.1表	FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表-----	24
第6.1.1表	温度勾配を考慮した軸方向温度差に起因する応力の評価結果-----	25
第6.2.1表	二次元温度分布条件での応力の評価結果-----	26
第6.3.1表	管壁温度差(肉厚方向温度差)に起因する応力の評価結果-----	26
第6.4.1表	照射初期における応力評価結果の比較-----	30
第6.4.2表	照射中期における応力評価結果の比較-----	30
第6.4.3表	照射末期における応力評価結果の比較-----	30
第6.4.4表	AHCの一次応力参考評価結果(通常時、最大発熱部、EOL)-----	31
第6.4.5表	HOCの一次応力参考評価結果(通常時、最大発熱部、EOL)-----	31
第6.4.6表	FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表-----	32

図 リ ス ト

第1.1図	軸非均質炉心(AHC)の概念図	3
第1.2図	炉心燃料要素の概念比較図	3
第1.3図	軸非均質燃料最大発熱部被覆管応力解析評価の概要	4
第2.1.1図	要素内における積分点と節点の位置	6
第2.1.2図	メッシュ分割と境界条件	6
第2.1.3図	節点温度入力データにより、コード内で設定される積分点温度	6
第2.2.1図	薄肉円筒管の軸方向温度分布条件と、 θ_i の定義	9
第2.3.1図	CONIC2要素の積分点の位置	10
第4.2.1図	応力、スエリング差、および等価クリープ歪評価結果と、 スエリングピーク温度条件の関係	21
第5.1.1図	温度不連続部二次元温度分布解析条件	23
第5.1.2図	軸方向および肉厚方向メッシュ分割	24
付図2.1	ピーク応力解析解の軸方向温度勾配への依存性	39
付図2.2.1	軸方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚:0.4mm)	40
付図2.2.2	周方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚:0.4mm)	41
付図2.3.1	軸方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚:0.1mm)	42
付図2.3.2	周方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚:0.1mm)	43
付図2.4.1	QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:1.0mm)	44
付図2.4.2	QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:1.0mm)	45
付図2.4.3	QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:1.0mm)	46
付図2.5.1	QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)	47
付図2.5.2	QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)	48
付図2.5.3	QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)	49
付図2.6.1	QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)	50
付図2.6.2	QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)	51
付図2.6.3	QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)	52

付図2.7.1	QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)-----	53
付図2.7.2	QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)-----	54
付図2.7.3	QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)-----	55
付図2.8.1	CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)-----	56
付図2.8.2	CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)-----	57
付図2.9.1	CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)-----	58
付図2.9.2	CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)-----	59
付図2.10.1	CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)-----	60
付図2.10.2	CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)-----	61
付図2.11.1	QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(被覆管肉厚:0.1mm)-----	62
付図2.11.2	QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(被覆管肉厚:0.1mm)-----	63
付図2.11.3	QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(被覆管肉厚:0.1mm)-----	64
付図3.1.1	CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射初期)-----	65
付図3.1.2	CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射初期)-----	66
付図3.2.1	CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)-----	67
付図3.2.2	CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)-----	68
付図3.3.1	CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)-----	69
付図3.3.2	CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)-----	70
付図3.4.1	CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	71
付図3.4.2	CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	72
付図3.5.1	QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	73
付図3.5.2	QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	74
付図3.5.3	QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	75
付図3.6.1	CONIC2を用いた周方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	76
付図3.6.2	CONIC2を用いた軸方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	77
付図3.7.1	QAX8を用いた軸方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	78
付図3.7.2	QAX8を用いた周方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	79
付図3.7.3	QAX8を用いた肉厚方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)-----	80

付図3.8.1 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の経時変化-----	81
付図3.8.2 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の経時変化-----	82
付図4.1 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(保守側条件)-----	83
付図4.2 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(保守側条件)-----	84
付図5.1 二次元熱伝導解析による軸方向温度分布解析結果-----	85
付図5.2 二次元温度分布解析結果(コンター図)-----	86
付図6.1.1 温度勾配を考慮した軸方向温度差による軸方向応力解析結果(照射初期)-----	87
付図6.1.2 温度勾配を考慮した軸方向温度差による周方向応力解析結果(照射初期)-----	88
付図6.1.3 温度勾配を考慮した軸方向温度差による軸方向応力解析結果(照射中期)-----	89
付図6.1.4 温度勾配を考慮した軸方向温度差による周方向応力解析結果(照射中期)-----	90
付図6.1.5 温度勾配を考慮した軸方向温度差による軸方向応力解析結果(照射末期)-----	91
付図6.1.6 温度勾配を考慮した軸方向温度差による周方向応力解析結果(照射末期)-----	92
付図6.2.1 二次元温度分布条件での肉厚方向応力解析結果(照射初期)-----	93
付図6.2.2 二次元温度分布条件での軸方向応力解析結果(照射初期)-----	94
付図6.2.3 二次元温度分布条件での周方向応力解析結果(照射初期)-----	95
付図6.2.4 二次元温度分布条件での肉厚方向応力解析結果(照射中期)-----	96
付図6.2.5 二次元温度分布条件での軸方向応力解析結果(照射中期)-----	97
付図6.2.6 二次元温度分布条件での周方向応力解析結果(照射中期)-----	98
付図6.2.7 二次元温度分布条件での肉厚方向応力解析結果(照射末期)-----	99
付図6.2.8 二次元温度分布条件での軸方向応力解析結果(照射末期)-----	100
付図6.2.9 二次元温度分布条件での周方向応力解析結果(照射末期)-----	101
付図6.3.1 管壁温度差による応力解析結果肉厚方向分布(照射初期)-----	102
付図6.3.2 管壁温度差による応力解析結果肉厚方向分布(照射中期)-----	103
付図6.3.3 管壁温度差による応力解析結果肉厚方向分布(照射末期)-----	104

1. 概 要

軸非均質炉心(Axial Heterogeneous Core)は、第1.1図に示したように、炉心部のほぼ中央高さ付近に内部ブランケット(Internal Blanket)層を設けた炉心であるが、従来の均質炉心(Homogeneous Core)よりも出力分布平坦化、炉心コンパクト化上有利であり、実証炉以降のFBRにおいてこのAHCを採用することが検討されている。昭和62年度、『高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(II)』⁽¹⁾における炉心設計の一項目として、『軸非均質炉心の検討』が実施されており、以下に述べるような核特性が明らかになっている。炉心サイズ、炉出力、運転サイクル期間、および交換バッチ数の等しい均質炉心と比べて、燃焼反応度劣化が小さく、また最大高速中性子照射量も低いので、長期サイクル化および長寿命化のポテンシャルが高い。しかし、制御棒価値の低いこと、および制御棒配置によっては最大線出力が制御棒の動きに敏感に反応する可能性のあることで、制御棒の運用等に配慮が必要である。

本報告書は、軸非均質炉心(AHC)成立性についての燃料設計側からの検討結果をまとめたものである。燃料設計側から検討すべき課題として、次の3項目を挙げることができる。

- ①炉心燃料要素の製造・検査工数の増加
- ②IB境界部へのCs蓄積に起因する局所的PCMIの発生
- ③IB境界部における被覆管軸方向温度差に起因する応力の発生

第1.2図に示したように、従来のHOC炉心燃料要素は炉心部(MOXペレットスタック部)の上下両側にブランケット部(劣化ウランペレットスタック部)を設けた構造であるのに対し、AHC炉心燃料要素では炉心部内にもブランケット部を設けた、より複雑な構造とする必要がある。このため、AHC炉心燃料要素の製造・検査工数はHOC炉心燃料要素のそれより大きくなるが、AHC採用の妨げとなるほどの工数増加ではないと推定される。但し、MOXペレットの軸方向長さ製造誤差が大きいので、炉心部を2分割としたAHC炉心燃料要素の炉心部長さ合計値の誤差は、HOC炉心燃料要素の炉心部全長誤差より大きくなる可能性があり、炉心熱設計上の検討を今後行う必要がある。

AHC炉心燃料要素では、炉心部とIB部との境界部にCsが蓄積し、低密度のセシウムウラネイト(Cs_2UO_4 、 Cs_3UO_4 、および $\text{Cs}_2\text{U}_2\text{O}_7$)が形成されることで、IB境界部においてPCMIの局所的に大きくなることが従来より懸念されていた。しかし、86年米国のTucsonで開催された燃料

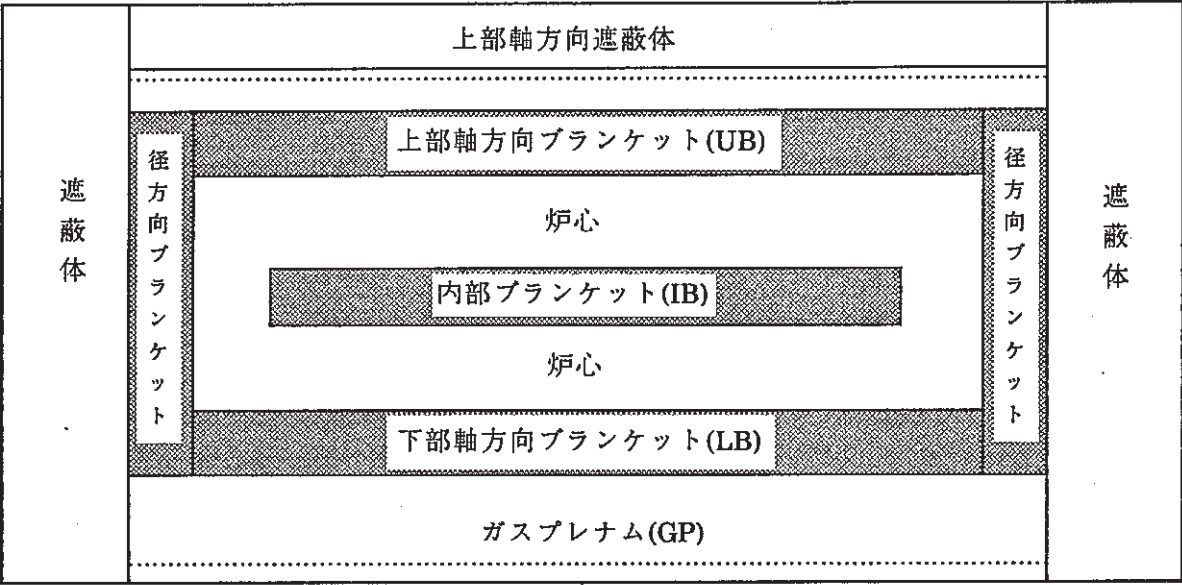
要素の信頼性に関する国際会議で報告された、ピーク燃焼度12 at %まで照射されたAHC燃料要素の照射試験結果では、IB境界部にCsピークが生じているものの、炉心部平均値の2倍程度であり⁽²⁾、IB境界部のペレットスエリング量は最大発熱部のそれよりもむしろ小さいと推定される⁽³⁾。すなわち、Cs蓄積はAHC採用の妨げにならないという見通しが得られている。但し、セシウムウラネイト生成に伴う酸素消費のため、最大発熱部ペレットO/M比の低下する恐れがあり、燃焼が進んだ時期における融点の低下および燃料温度の検討を今後行う必要がある。

このように、項目①と②に関しても今後検討すべき課題は残されているが、本研究は項目③の『IB境界部における被覆管軸方向温度差に起因する応力』だけに絞り、被覆管内での軸方向熱伝導を考慮した現実的温度分布条件にて検討したものである。尚、被覆管材としては改良オーステナイト鋼(15Cr-20Ni-2.5Mo-0.25Ti/0.1Nb)を採用することを前提としている。

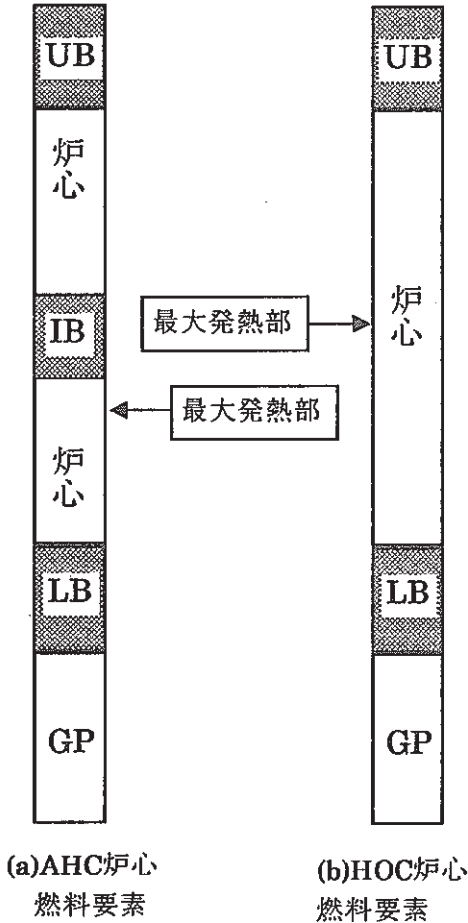
第1.3図に示したように、HOCでは最大発熱部付近の被覆管肉厚中心温度軸方向分布は滑らかに変化するが、AHCにおいては上記軸方向熱伝導を考慮しないならば、最大発熱部のすぐ近く(IB境界部)でステップ状に急変する。現実にはこれ程極端でないであろうが、AHC燃料要素の被覆管最大発熱部には、軸方向温度不連続性に起因した応力が生じると考えられる。

応力解析と温度解析には、有限要素法による汎用非線形構造解析システムFINAS(Finite Element Nonlinear Structural Analysis System)⁽⁴⁾を用いた。応力解析における使用要素は、軸方向温度分布だけを考慮できるCONIC2と、肉厚方向温度分布もを考慮できるQAX8の2種類とした。尚、CONIC2では薄肉近似となるので、肉厚方向応力を評価できないが、QAX8では評価できる。したがって、より汎用性のあるQAX8を一貫して使用しても良かったが、CONIC2を使用した方が若干計算時間の点で有利であることや、2種の要素を使った解析結果がほぼ一致することを確認したいという意図から、CONIC2使用の解析も実施している。

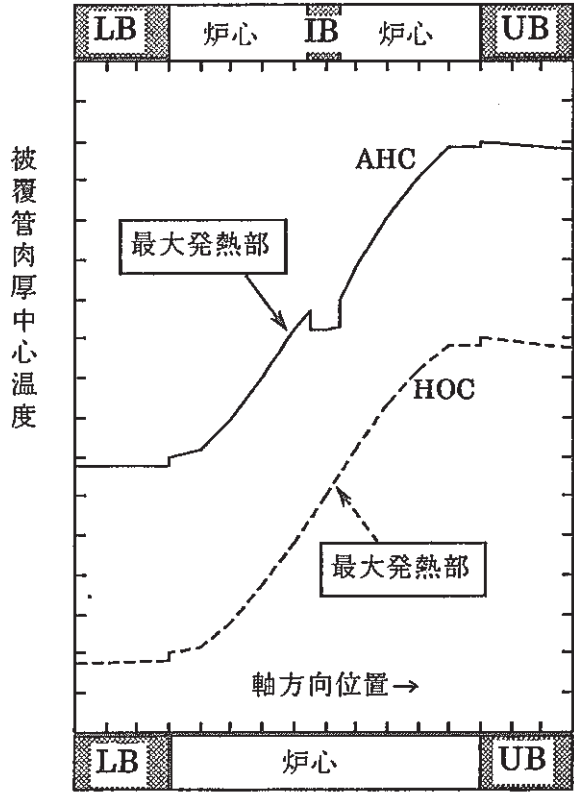
第1.4図に、本解析評価の全体スコープを示した。ステップ0からステップ2までは、主にステップ3以降の本解析の条件を設定するための作業である。従来、燃料設計では軸方向熱伝導を考慮していないが、ステップ3では管壁方向および軸方向の熱伝導解析を行い、現実的な(合理的な)二次元温度分布を求めた。ステップ4では、AHC燃料要素の被覆管最大発熱部に生じる管壁方向および軸方向温度分布に起因する応力、およびHOC燃料要素の被覆管最大発熱部に生じる管壁温度差に起因する応力をそれぞれ評価し、①それらの応力の大きさを単純に比較すること、および②その他の一次応力も考慮した一次応力合計値として比較することで、AHC燃料最大発熱部被覆管強度成立性見通しについて述べた。



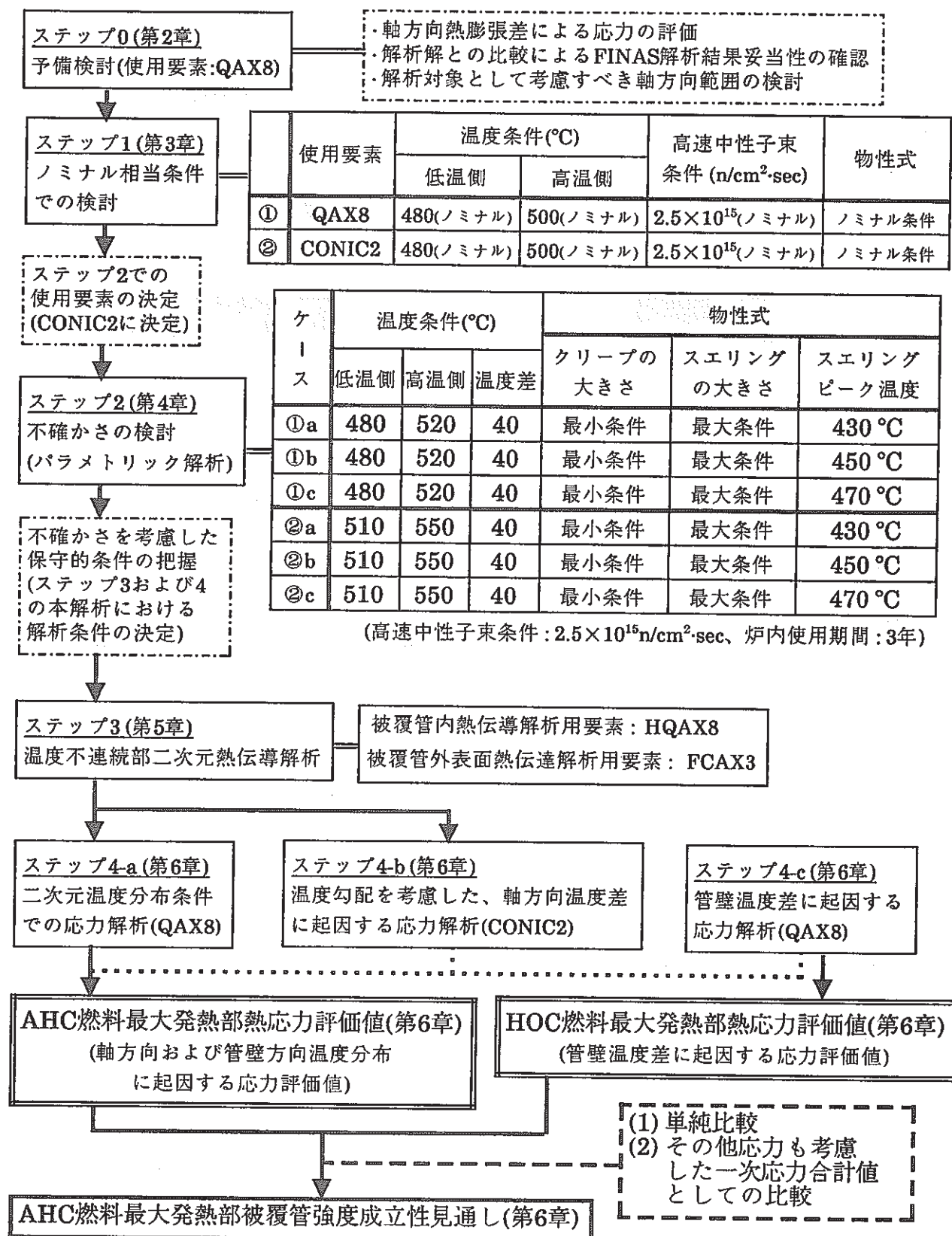
第1.1図 軸非均質炉心(AHC)の概念図



第1.2図 炉心燃料要素の概念比較図



第1.3図 被覆管肉厚中心温度
軸方向分布の比較図



第1.4図 軸非均質燃料最大発熱部被覆管応力解析評価の概要

2. 予備検討

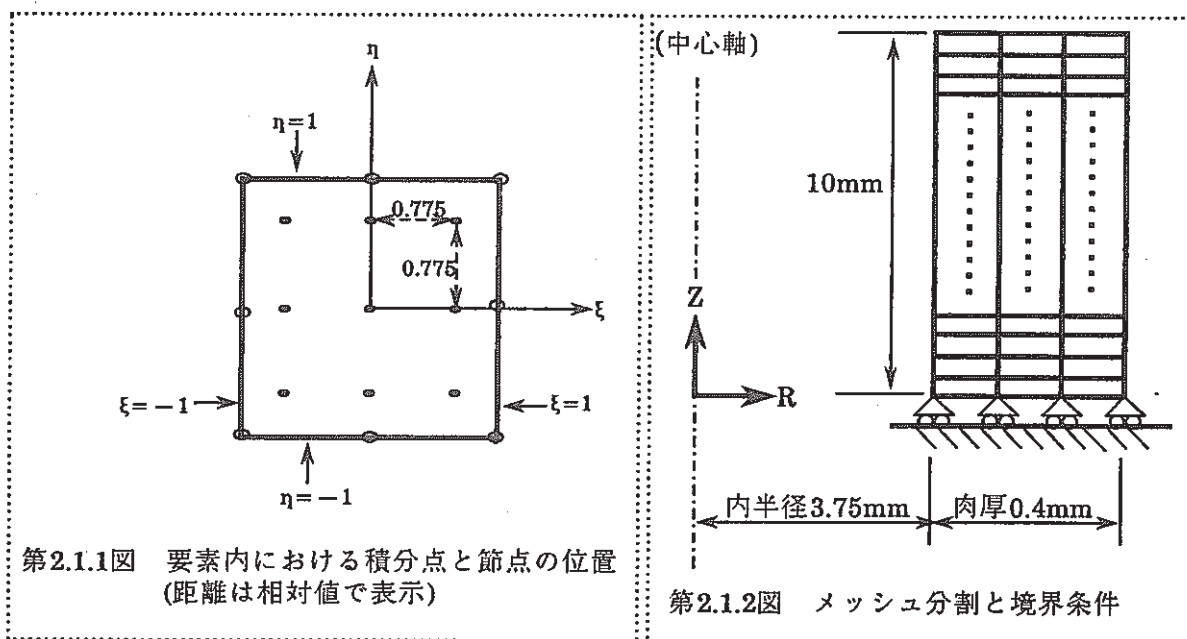
2.1 解析対象軸方向範囲の検討

良く知られているように、軸方向温度差に起因する応力の発生する範囲は、概略 $2.5 \times (\text{平均半径} \times \text{肉厚})^{1/2}$ で評価することができる(たとえば、『解説 原子力設備の技術基準』第2章)。被覆管外径 $\phi 8.3\text{mm}$ 、肉厚 0.4mm の場合には、温度不連続位置から約 $2.5 \times (3.95 \times 0.4)^{1/2} = 3.1\text{mm}$ 以内の範囲で、有意な応力が生じると考えられる。以下に述べるように、FINASによる予備解析を実施したところ、上記知見と矛盾の無い結果の得られることを確認することができた。

外径 $\phi 8.3\text{mm}$ 、肉厚 0.4mm 、全長 10mm の円筒を、8節点四辺形軸対象要素QAX8(第2.1.1図に要素内の積分点および節点の位置を示す。)によって、第2.1.2図に示したように肉厚方向には3等分割とし、軸方向には一様間隔で細かく分割し、下端側で軸方向を固定する境界条件とした。下端側 5mm では温度一定(360°C)、上端側 5mm では一定の温度勾配(約 $0.3^\circ\text{C}/\text{mm}$)とし、また中央高さ位置(温度不連続部)で 10°C の温度差条件を想定した。

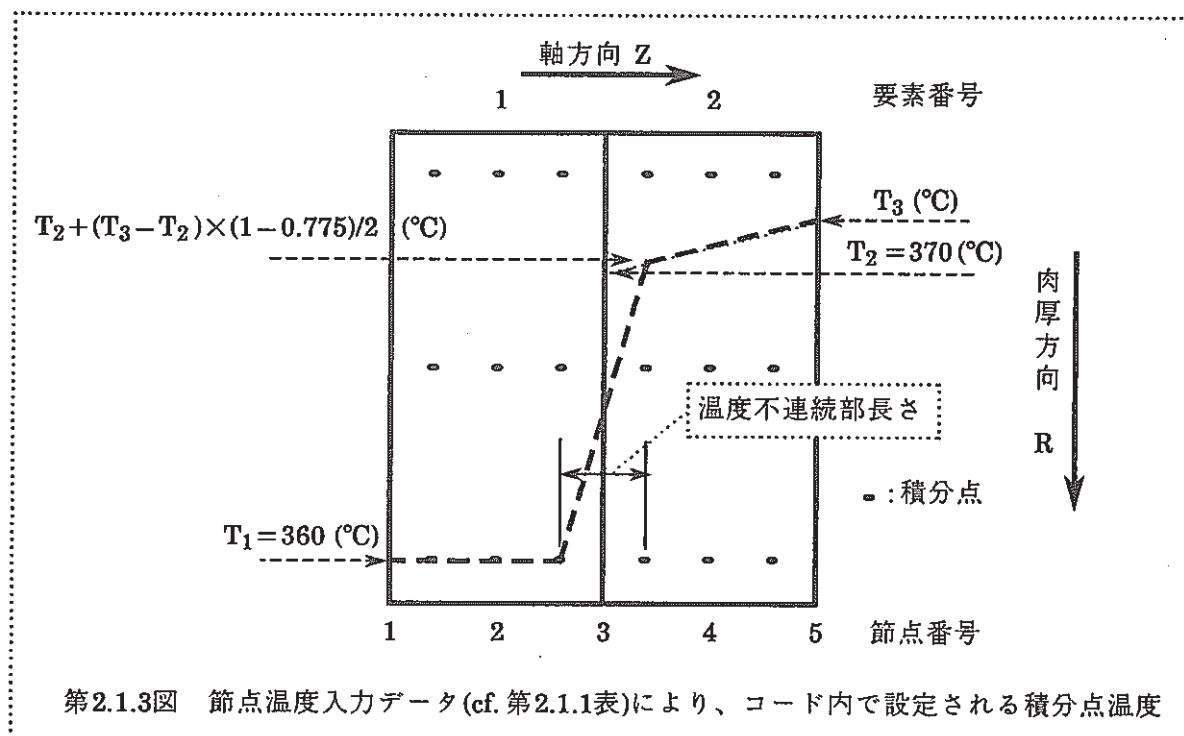
実際に、FINASコードの入力データ作成に当たっては、第2.1.1表のように(T_3 の値は、軸方向メッシュ巾に依存)、節点に温度データを与える方法を採用した。この時、FINASコード内では内挿されて、第2.1.3図のように積分点温度分布が設定される。詳細は第2.3節で述べるが、メッシュを細かくするほど、不連続部近傍での鋭い(巾の非常に狭い)ピークの値は大きくなるが、このピークの外側に現れる、巾の広いピーク応力はある程度メッシュを細かくすれば、一定値に収束することが分かった。

さて、FINAS解析結果(たとえば、付図2.6.1~2.6.3を参照)では、温度不連続部から約 0.8mm 離れた点で軸方向応力のピーク(上記の巾の広いピーク)が現れるが、約 3mm 以上離れたとほぼ零になっている。周方向応力は温度不連続部に近いほど大きいですが、軸方向応力と同様、約 3mm 以上離れたとほぼ零になっている。肉厚方向応力は、温度不連続部のすぐ近くでだけ現れており、約 0.5mm 以上離れた所で零になっている。尚、得られた応力分布は、温度不連続部に対して上下ほぼ対称となっていることから、温度変化があっても、温度勾配が一定ならば、それに起因して発生する応力は十分小さいことが分かった。



第2.1.1表 節点温度入力データ

要素番号	要素を構成する 1番目の節点		要素を構成する 2番目の節点		要素を構成する 3番目の節点	
	節点番号	節点温度(°C)	節点番号	節点温度(°C)	節点番号	節点温度(°C)
1	1	$T_1=360$	2	$T_1=360$	3	$T_1=360$
2	3	$T_2=370$	4	$(T_2+T_3)/2$	5	T_3



2.2 解析解、簡易応力評価式による評価結果とFINAS解析結果の比較検討

2.2.1 解析解および簡易応力評価式

(1) Timoshenkoの式(解析解)^{(5),(6)}

薄肉円筒管において、温度勾配の不連続に起因する応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_z(Z) = \mp 1/4 \cdot \{3/(1-\nu^2)\}^{1/4} \cdot E \cdot \alpha \cdot (R \cdot h)^{1/2} \cdot \{\Sigma \theta_i \phi(\beta|Z-l_i|)\}$$

$$\sigma_\theta(Z) = 1/4 \cdot \{3/(1-\nu^2)\}^{1/4} \cdot E \cdot \alpha \cdot (R \cdot h)^{1/2} \cdot \{\Sigma \theta_i \psi(\beta|Z-l_i|)\} \pm \nu \cdot |\sigma_z|$$

ここで、 $\sigma_z(Z)$: 軸方向応力(kg/mm²)

$\sigma_\theta(Z)$: 周方向応力(kg/mm²)

$$\phi(\beta x) = e^{-\beta x}(\cos \beta x + \sin \beta x)$$

$$\psi(\beta x) = e^{-\beta x}(\cos \beta x - \sin \beta x)$$

$$\beta = \{3/(1-\nu^2)\}^{1/4} / (R \cdot h)^{1/2}$$

θ_i : 点 $Z=l_i$ での温度勾配の変化量(°C/mm)、(cf.第2.2.1図)

R : 被覆管平均半径(mm)

h : 被覆管肉厚(mm)

α : 熱膨張係数(1/°C)

E : ヤング率 (kg/mm²)

ν : ポアソン比(-)

l_i : 温度勾配不連続点位置(mm)、[$l_1=0$ 、 l_2 =温度不連続部長さ]

Z : 軸方向位置(mm)

であり、符号 $\mp$ および $\pm$ は、温度勾配不連続部の高温側では上側が外面、下側が内面に対応しており、低温側では符号が逆になる。

(2) 簡易応力評価式

従来のHOC燃料においても、評価部位は最高温度部であるという違いはあるが、軸方向温度差に起因する応力は存在し、たとえば、次の簡易応力評価式⁽⁷⁾が使用されている。

$$\sigma_z = \pm 0.1612 \cdot \{3/(1-\nu^2)\}^{1/2} \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma_{\theta} = -0.1612 \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T \pm \nu \cdot |\sigma_z|$$

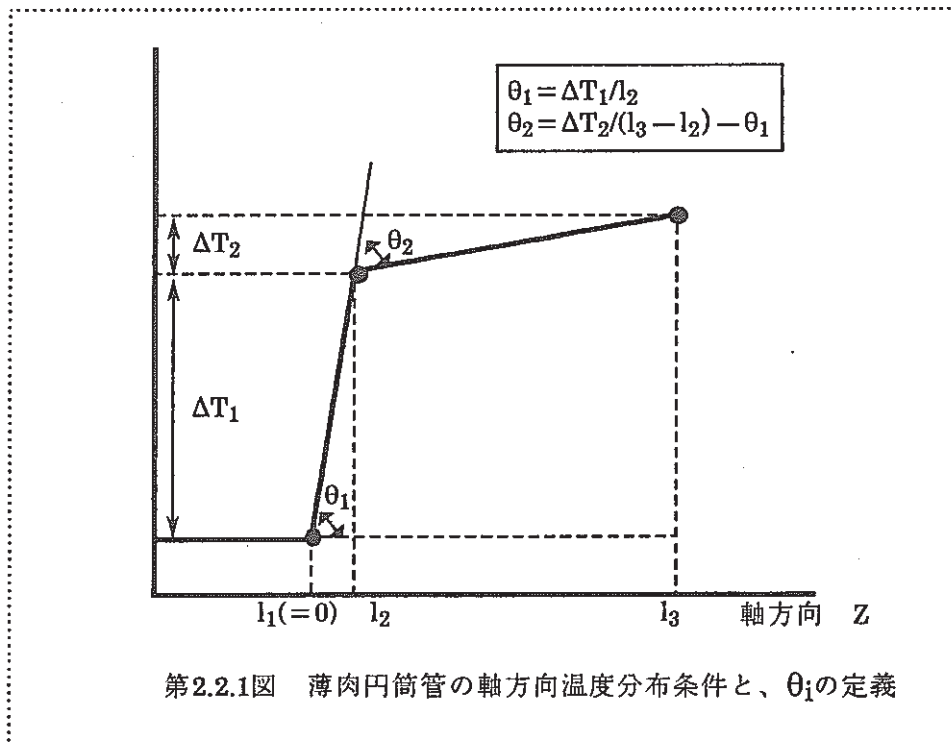
ここで、
 α : 熱膨張係数($1/^{\circ}\text{C}$)
 E : ヤング率 (kg/mm^2)
 ν : ポアソン比(-)
 ΔT : 軸方向温度差($^{\circ}\text{C}$) [高温-低温]

であり、符号±は、上側が外面、下側が内面を表す。

2.2.2 FINAS解析結果との比較

温度不連続部高温側での解析解および簡易応力評価式による応力計算結果と、FINAS解析結果との比較を第2.2.1表に示す。簡易応力評価式では、軸方向の応力分布は得られないが、解析解およびFINAS解析では軸方向分布として解が得られる。軸方向応力のFINAS解析結果(たとえば、付図2.7.1を参照)、および解析解(付図2.2.1参照)を比較すると、いずれも不連続部から0.8mmだけ高温側に離れた位置において、ピークが現れており、ピークの高さもほぼ一致することが分かった。そこで、第2.2.1表における解析解とFINAS解析結果として、その軸方向位置での応力を示した。

FINAS解析結果は、厳密には内外面での応力値ではなく、若干肉厚中心方向にずれた位置(応力を評価する積分点が表面より若干内側にあるため)での応力値であるという点に留意する必要があるが、軸方向応力については、解析解および簡易応力評価式による応力計算結果はFINAS解析結果と良く一致することが分かった。一方、周方向応力については、簡易応力評価式による応力計算結果はFINAS解析結果と良く一致するが、解析解による応力はFINAS解析結果と比較して若干小さいことが分かった。この食い違いは、解析解では薄肉近似であるのに対し、FINAS解析では肉厚方向応力も考慮できるQAX8を使用していることに起因すると考えられる。

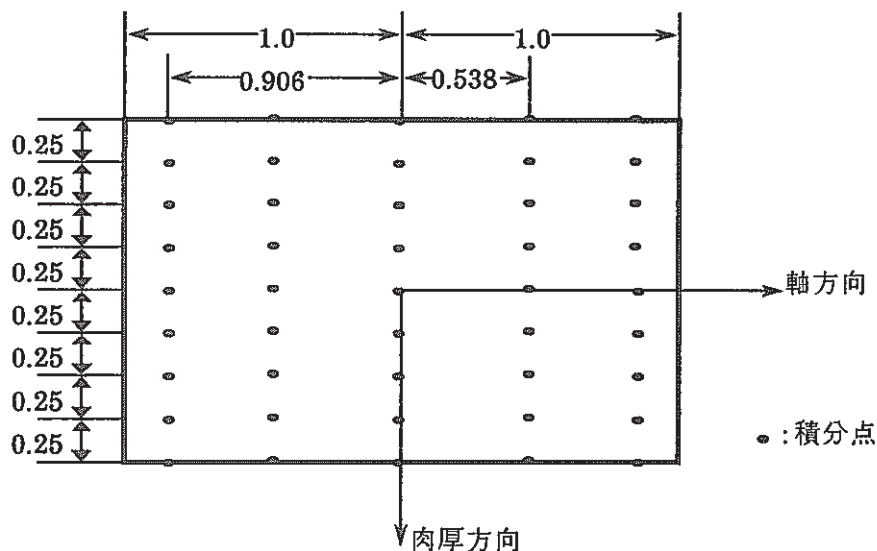


第2.2.1表 不連続部高温側での応力の比較(上/下はそれぞれ内面、外面を示す。)

	解析解 (Timoshenkoの式)	簡易応力評価式	FINAS解析結果
軸方向応力 (kg/mm ²)	-0.96 0.96	-0.95 0.95	-1.00 0.95
周方向応力 (kg/mm ²)	-0.76 -0.20	-0.81 -0.24	-0.85 -0.25

2.3 メッシュ巾の検討

FINAS解析において、どの程度細かくメッシュ分割すれば良いかを検討するため、メッシュ巾をパラメータとして解析を行った。不連続部から離れるほどメッシュを粗くするといった分割を採用すると、メッシュ巾の不連続性に起因すると考えられる、異常なピークが現れてしまったので、解析対象軸方向全範囲について等分割とした。使用した要素は、肉厚方向応力も評価できるQAX8(解析結果を付図2.4.1~2.7.3に示す。)、および薄肉近似となる2節点円錐台シェル要素CONIC2(積分点位置を第2.3.1図に、また解析結果を付図2.8.1~2.10.2に示す。)の2種類である。



第2.3.1図 CONIC2要素の積分点の位置(距離は相対値で表示)

QAX8を使用してメッシュ巾を1mmとしたケース(付図2.4.1~2.4.3)では、応力分布曲線は滑らかにならず、メッシュ巾の粗すぎる事が分かる。メッシュ巾を0.1mm(付図2.5.1~2.5.3)、0.05mm(付図2.6.1~2.6.3)、0.01mm(付図2.7.1~2.7.3)とした各ケースでは、温度不連続部のごく近傍で鋭いピークが現れていることを除けば、ほぼ滑らかな曲線になっている。不連続部のごく近傍では、肉厚方向応力が鋭いピークとなって発生し、これに起因して軸方向および周方向の応力についても鋭いピークが現れていると推察される。この推察の妥当性は、CONIC2を用いた解析結果から明らかである。

以上の解析の結果、温度不連続部近傍の応力分布は、メッシュ巾を0.1mm以下の範囲に限

定しても、メッシュ巾に対する依存性のあることが分かる。メッシュ巾を細かくするほど、不連続部温度勾配が急となる(第2.3.1表参照)ことで、ピークは大きくなる傾向にある。しかし、温度不連続部近傍を除いた応力分布に着目するならば、メッシュ巾を0.1mm(この時、不連続部温度勾配は444°C/mm)^{*)}以下としておけば、メッシュ巾に対する依存性はほぼ無視できることが分かる。

メッシュ巾に関してより深く考察するため、温度不連続部高温側下端における応力の解析解(但し、薄肉近似)の、不連続部長さへの依存性(不連続部温度勾配への依存性)を調べた。付図2.1に示した解析解の不連続部温度勾配への依存性評価結果より、温度勾配を上記444°C/mm以上とすれば、応力値は温度勾配にほとんど依存せず、ほぼ一定になることが明らかである。CONIC2を用いた解析結果においても、温度不連続部高温側下端での応力値は、メッシュ巾0.1mm以下(この時、不連続部温度勾配1087°C/mm以上)^{**)}で、ほぼ一定になっている。

付録として添付した解析解およびFINAS解析結果のプロッター図について、一覧表としてそれぞれ第2.3.1表および第2.3.2表にその内容を示した。尚、ここでの検討では参照としなかった肉厚0.1mmのケースについての解析解およびFINAS解析結果プロッター図も参考として添付した。

注記*) 不連続部温度勾配の計算方法

メッシュ巾が0.1mmの時の温度不連続部長さは、第2.1.1図および第2.1.3図を参考にすると明らかなように、 $(0.1 \div 2) \times (1 - 0.775) \times 2 = 0.0225\text{mm}$ である。また、高温側最下端積分点の温度は、厳密には第2.1.3図に示した式より求める必要があるが、温度勾配が小さいので、ほぼ $T_2 = 370^\circ\text{C}$ である。したがって、不連続部温度勾配は、 $(370 - 360) \div 0.0225 = \sim 444^\circ\text{C/mm}$ となる。

^{**) CONIC2とQAX8での積分点位置の相違により、同じメッシュ巾でも温度勾配は同じにならない。}

第2.3.1表 解析解プロッター図一覧表

付図No.	評価応力	不連続部 長さ(mm)	不連続部温度 勾配(°C/mm)	被覆管肉厚 (mm)	被覆管外径 (mm)
2.1	ピーク応力	0.005 ~ 100	2000~0.1	0.4	φ8.3
2.2.1	軸方向	0.01	1000	0.4	同上
2.2.2	周方向	0.01	1000	0.4	同上
2.3.1	軸方向	0.01	1000	0.1	同上
2.3.2	周方向	0.01	1000	0.1	同上

第2.3.2表 FINASコードによる応力解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	肉厚 方向 分割数	評価応力	メッシュ巾 (mm)	不連続部 温度勾配 (°C/mm)	被覆管 肉厚(mm)	被覆管 外径(mm)
2.4.1	QAX8	3	軸方向	1.0	44	0.4	φ8.3
2.4.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.4.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.5.1	↓	↓	軸方向	0.1	444	↓	↓
2.5.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.5.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.6.1	↓	↓	軸方向	0.05	889	↓	↓
2.6.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.6.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.7.1	↓	↓	軸方向	0.01	4444	↓	↓
2.7.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.7.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.8.1	CONIC2	—	軸方向	0.1	1087	↓	↓
2.8.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.9.1	↓	↓	軸方向	0.05	2174	↓	↓
2.9.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.10.1	↓	↓	軸方向	0.01	10870	↓	↓
2.10.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.11.1	QAX8	3	軸方向	0.1	444	0.1	↓
2.11.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.11.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓

3. ノミナル相当条件での検討

3.1 解析条件

第2章における予備的検討結果に基づき、温度不連続部の上下5mm長さ(計10mm長さ)だけを解析対象軸方向範囲とし、また軸方向メッシュ巾を0.1mmとした。クリープ式およびスエリング式としては、次頁に示した改良オーステナイト鋼(PNC1520)の62年度設計用暫定式を採用したが、式に含まれる潜伏期間等の定数は、ノミナル値を使用した。尚、燃料寿命1095日を越える1125日までの応力分布挙動を解析した。

低温側温度はノミナル値相当温度480°Cとした。従来の設計例では、炉心上端部におけるサブチャンネル冷却材最高温度ノミナル値は600°C程度である。これを参考とし、内部ブランケット部における線出力が低いことを考え合わせると、炉心入口温度360°Cの条件における内部ブランケット部被覆管温度ノミナル値は内外面とも $(360+600)/2=480^\circ\text{C}$ 程度である。

高温側温度はノミナル値相当温度500°Cとした。内部ブランケット部に隣接する炉心部では、線出力が高いため、被覆管肉厚方向に温度差が生じる。最大線出力公称値を430W/cmとし、熱出力誤差2%、出力分布誤差5%、ペレット密度誤差補正2.17%、等価fissile富化度誤差補正4%を考慮した定格時最大線出力(489W/cm)を用いて、内外面温度差を求めると、

$$489 \times \ln(4.15/3.75) / (2\pi \times 0.197) = 40.0^\circ\text{C}$$

となる。ここで、4.15(mm)および3.75(mm)はそれぞれ被覆管の外半径および内半径であり、0.197(W/cm °C)は500°Cにおける被覆管の熱伝導度である。この温度差が40.0°Cという計算結果に基づき、内部ブランケット部に隣接する炉心部被覆管肉厚方向平均温度は、内部ブランケット部被覆管温度より $40.0/2=20^\circ\text{C}$ 程度だけ高い温度500°Cとした。炉心部線出力として、不確かさを考慮した最大値を用いており、また内部ブランケット部の線出力が十分小さいとしている点では、この温度差20°Cは保守側(大きめ)の設定であるが、冷却材と被覆管外面間のフィルムドロップ分を無視しているので、ノミナル値相当温度と呼んでいる。

高速中性子束は、解析対象軸方向範囲10mm以内ではほぼ一定なので、低温側および高温側とも同一の値(ノミナル値相当) $2.5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ としたが、この値は従来の設計例を参考に設定したものである。

次に、タイムステップの切り方について述べる。FINASコード内で、応力および歪の変動

巾が許容範囲以内となるように、自動的に時間増分を決定する機能がある。この機能を利用(許容変動巾はコード内標準値を使用)して、必要時間増分を求めた結果(20,000 hr以上ではスエリングが生じるので、時間増分をより小さくする必要のあることが分かった。)に基づき、0 hrから20,000 hrまでは800 hr間隔、また20,000 hrから27,000 hr(1125days)までは500 hr間隔のタイムステップとした。

クリープ式

$$\bar{\varepsilon} = 100(B_0 \Phi t + DS) \bar{\sigma}$$

$$B_0 = 4.3 \pm 3 \times 10^{-28} \text{MPa}^{-1} (\text{n/cm}^2)^{-1}$$

$$D = 3.2 \pm 2 \times 10^{-3} \text{MPa}^{-1}$$

(適用範囲) 温度 : 400~600°C

ここで ε : 照射クリープ歪 (%) σ : 応力 (MPa)
 Φt : 中性子照射量 (n/cm^2 , $E > 0.1 \text{MeV}$)
 S : スエリング (Vol%)
 B_0, D : 材料に依存する係数 (相互作用係数)

スエリング式

$$\Delta V/V = R \left[\Phi t + \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{1 + \exp(\alpha(\tau - \Phi t))}{1 + \exp(\alpha\tau)} \right\} \right]$$

$$R = R_0 \exp[A(T - T_P)^2]$$

$$\begin{array}{lll} \alpha = 0.75 & A = -4.34 \times 10^{-5} & T_P = 450 \pm 20 \\ R_0 = 1.25 \pm 0.25 & \tau = 22 \pm 0/-3 & \end{array}$$

(適用範囲) 温度 : 400~800°C

照射量 : $\Delta V/V \leq 15\%$ となる照射量

ここで $\Delta V/V$: スエリング量 (Vol%) R : スエリング率 ($\%/(10^{22} \text{n/cm}^2)$)
 α : 曲率パラメータ ($(10^{22} \text{n/cm}^2)^{-1}$) A : 材料定数
 τ : 潜伏期間 (10^{22}n/cm^2) T_P : ピークスエリング温度 (°C)
 R_0 : ピークスエリング温度でのスエリング速度 ($\%/(10^{22} \text{n/cm}^2)$)
 Φt : 中性子照射量 (10^{22}n/cm^2 , $E > 0.1 \text{MeV}$)

3.2 解析結果

3.2.1 CONIC2を用いた解析の結果

周方向応力は、若干の曲げ応力成分を含むが、膜応力成分が主体的であり、そこで、CONIC2を用いた周方向応力の解析結果として、この局部膜応力に着目するものとした。

第3.2.1表に、1125日間の照射を追った解析結果のうち、4時点における周方向膜応力のピーク値およびピークとなる軸方向位置を示した。照射初期においては、温度不連続部のすぐ近く(0.05mmだけ離れた位置)で、 3.7kg/mm^2 の圧縮応力が生じているが、照射が進行するとクリープのため一旦は 0.01kg/mm^2 以下となる。さらに照射が進み、スエリングが開始すると引張り応力に転じるが、クリープも大きくなるため引張り応力の照射進行に伴う上昇速度は非常に緩やかであり、1125日照射後でも 0.31 kg/mm^2 と小さい。スエリングのピーク温度が 450°C であるため、低温部(480°C)の方が高温部(500°C)より膨張率の大きいことで、高温部側で引張り応力が生じている。また、照射初期において、温度不連続部から2mmだけ離れた位置で、 0.3kg/mm^2 の引張り応力が生じているが、照射が進行すると一旦 0.01kg/mm^2 以下となり、さらに照射が進み、スエリングが開始すると圧縮応力に転ずるが、 0.1kg/mm^2 以下と小さい。

軸方向応力は、膜応力成分が無く、純粋な曲げ応力である。第3.2.2表に、軸方向曲げ応力の最大値および最大となる軸方向位置を示した。照射初期においては、温度不連続部から0.8mmだけ離れた位置で 2.3kg/mm^2 の外面で引張り、内面で圧縮の曲げ応力が生じている。照射が進行すると一旦 0.01kg/mm^2 以下となり、さらに照射が進み、スエリングが開始すると、逆方向の曲げ応力が生じるが、周方向膜応力におけると同様に、照射進行に伴う応力の上昇速度は非常に緩やかであり、1125日照射後でも -0.22 kg/mm^2 と小さい。

3.2.2 QAX8を用いた解析結果との比較

照射初期における比較結果(第2章)により、温度不連続部から0.5mm以内の範囲では一致しないとの結論を得ているが、照射が進んだ時点においても同じ結論が得られた。しかし、周方向膜応力だけに着目するならば、約0.2mm以内の範囲を除けば、ほぼ一致することも重要な事実であることが分かった。

第3.2.3表に、1125日照射時点での、温度不連続部から0.2mm以上離れた範囲における周方向膜応力、および0.5mm以上離れた範囲における軸方向曲げ応力の最大値を示した。第3.2.1表と第3.2.2表のCONIC2を用いた解析の結果とほぼ一致している。したがって、保守側の条件を

検討するためのパラメトリック解析(ステップ2)において、CONIC2を用いることで十分である。ちなみに、CONIC2でのCPU時間は5分弱で、QAX8でのCPU時間はそれより約40秒だけ長い。

付録として添付したFINASコードによる解析結果プロッター図の内容を第3.2.4表に示した。

第3.2.1表 周方向膜応力のピーク値、およびピークとなる軸方向位置(温度不連続部高温側)

time step No.	照射時間 (hours) / (days)	高速中性子照射量 (10^{22}n/cm^2 , $>0.1\text{MeV}$)	引張り応力		圧縮応力	
			ピーク値 (kgf/mm^2)	ピーク位置 (mm)	ピーク値 (kgf/mm^2)	ピーク位置 (mm)
1	0	0.000	0.3	~2	-3.7	0.05
16	12,000/500	10.80	—*)	—*)	—*)	—*)
34	16,500/687.5	14.85	0.28	0.05	-0.02	~2
40	27,000/1125	24.30	0.31	0.05	-0.02	~2

注記*) ピーク値(絶対値)が 0.01kg/mm^2 以下と非常に小さいため、blankとした。

第3.2.2表 軸方向曲げ応力の最大値および最大となる軸方向位置(温度不連続部高温側)

time step No.	照射時間 (hours) / (days)	高速中性子照射量 (10^{22}n/cm^2 , $>0.1\text{MeV}$)	最大値*) (kgf/mm^2)	最大となる位置 (mm)
1	0	0.000	+2.3	0.8
16	12,000/500	10.80	—**)	—**)
34	16,500/687.5	14.85	-0.19	0.8
40	27,000/1125	24.30	-0.22	0.8

注記 *) 外面が正負となる方向の曲げ応力を、それぞれ正負で示した。

***) ピーク値(絶対値)が 0.01kg/mm^2 以下と非常に小さいため、blankとした。

第3.2.3表 QAX8を用いた1125日照射後の応力解析結果(温度不連続部高温側)

time step No.	照射時間 (hours) / (days)	高速中性子照射量 (10^{22}n/cm^2 , $>0.1\text{MeV}$)	周方向膜応力最大値		軸方向曲げ応力最大値	
			最大値*) (kgf/mm^2)	最大位置 (mm)	最大値***) (kgf/mm^2)	最大位置 (mm)
40	27,000/1125	24.30	約0.3	約0.2	約-0.2	約0.8

注記 *) 温度不連続部から0.2mm以内の範囲での最大値を示した。

***) 外面が正負となる方向の曲げ応力を、それぞれ正負で示した。

第3.2.4表 FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	横軸の変数	縦軸の変数	評価時期(days) /STEP NO	評価位置(mm) [不連続部基準]
3.1.1	CONIC2	軸方向位置	周方向応力	0 / 1	—
3.1.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	0 / 1	—
3.2.1	↓	軸方向位置	周方向応力	500 / 16	—
3.2.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	500 / 16	—
3.3.1	↓	軸方向位置	周方向応力	687.5 / 34	—
3.3.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	687.5 / 34	—
3.4.1	↓	軸方向位置	周方向応力	1125 / 40	—
3.4.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	1125 / 40	—
3.5.1	QAX8	軸方向位置	周方向応力	1125 / 40	—
3.5.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	1125 / 40	—
3.5.3	↓	軸方向位置	肉厚方向応力	1125 / 40	—
3.6.1	CONIC2	軸方向位置	周方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.6.2	↓	軸方向位置	軸方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.7.1	QAX8	軸方向位置	軸方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.7.2	↓	軸方向位置	周方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.7.3	↓	軸方向位置	肉厚方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.8.1	CONIC2	照射期間	周方向応力	—	0.8
3.8.2	↓	照射期間	軸方向応力	—	0.8

4. 不確かさの検討

4.1 解析条件

第3章では温度不連続部低温側(IB側)の被覆管温度としてノミナル相当温度480°Cを用いた。今、「もんじゅ」設計におけると同様に、この温度の不確かさとして25%の誤差を考慮すると、ホットスポット温度は、 $(480-360) \times 1.25 + 360 = 510^\circ\text{C}$ となる。そこで、低温側温度として、480°Cおよび510°Cの2ケースを考えるものとした。尚、‘コールドスポット温度’とした方が保守側ではないかとも考えられるが、第4.2節に示した解析結果より明らかなように、その可能性は無い。

また、第3章では、軸方向温度差としてノミナル相当温度20°Cを用いた。しかし、温度差の大きい方が、保守側であることは明らかであり、ここでは不確かさを考慮した上限値を採用するものとした。ところで、PYTHONコードによる62年度レファレンス仕様燃料集合体の熱流動解析結果を調査したところ、炉心上端部の線出力が152.5W/cmの条件で、冷却材温度が540.37°C、被覆管外面温度が545.50°Cという計算例があった。この結果より、489W/cm(高温側における不確かさを考慮した線出力上限値)におけるフィルムドロップ分を概算すると、

$$(545.50-540.37) \times 489/152.5 = 16^\circ\text{C}$$

となるが、フィルムドロップ評価不確かさとして、「もんじゅ」設計におけると同様30%を考慮すると、約20°Cとなる。このフィルムドロップ分20°Cを、軸方向温度差ノミナル相当値20°Cに加えることで、厳しい側の軸方向温度差条件40°Cを設定した。

クリープが最小で、かつスエリングが最大の条件にて応力が厳しくなることは明らかなので、クリープ式における相互作用係数 B_0 , D として最小値を、またスエリング式における潜伏期間 τ として最小値、スエリング速度 R_0 として最大値をそれぞれ採用した。しかし、スエリングピーク温度の影響は自明でないので、スエリングピーク温度として下限値430°C、ノミナル値450°C、上限値470°Cの3ケースを考えるものとした。

高速中性子束、したがって、高速中性子照射量が高いと、スエリング量は大きくなるが、照射直後から生じるクリープも大きくなるので、末期での応力への高速中性子束の不確かさの影響は小さい。それ故、高速中性子束の不確かさは無視するものとした。

4.2 解析結果

評価結果を第4.2.1表に示した。温度不連続部低温側温度をホットスポット温度510°Cとし、

スエリングピーク温度を下限値430°Cとした時に、低温側と高温側被覆管のスエリング差が最大となり、照射末期被覆管周方向膜応力、軸方向曲げ応力も最大となった。すなわち、温度不連続部低温側温度を510°Cとし、スエリングピーク温度を430°Cにすれば、保守側の評価となることが分かった。

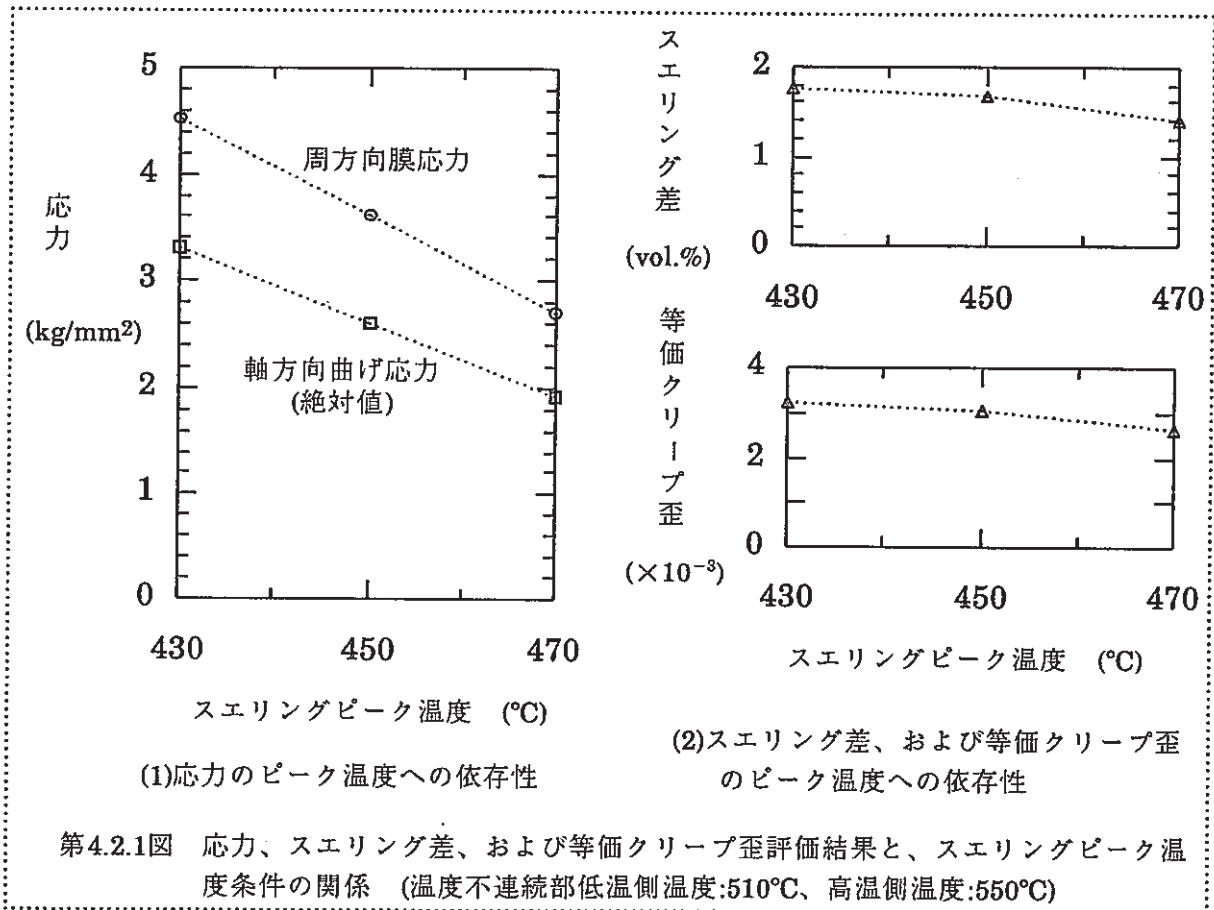
参考として、第4.2.1図に、ケース②a~cの解析結果(応力、スエリング差、および等価クリープ歪)のスエリングピーク温度に対する依存性を示した。高温側と低温側とのスエリング差は、スエリングピーク温度の低下とともに大きくなるが、450°Cから430°Cまでの低下に対する上昇率は、470°Cから450°Cまでの低下に対するそれより小さい。ところが、被覆管応力は470°Cから430°Cまでの温度範囲で、ほぼ直線的に変化している。この挙動の違いは、被覆管応力がスエリング差だけではなく、照射クリープ速度にも依存することに起因していると考えられる。すなわち、スエリングピーク温度が小さくなると、スエリング差による弾性歪が大きくなり、かつ、照射クリープによる弾性歪のクリープ歪への変化速度の小さくなることが原因と考えられる。ところで、第4.2.1図に示したように、スエリングピーク温度が小さいほど、不連続部での等価クリープ歪は大きい結果となっているが、照射クリープは応力の大きさにも依存するので、クリープ歪への変化速度の低下による応力増加のフィードバック効果のためと考えられる。

尚、付図4.1~付図4.2までに、保守側の条件(ケース②a)での照射末期解析結果(プロッター図)を示した。温度不連続部高温側のピークが低温側のピークより高くなっているのは、高温側における照射クリープがより小さく、したがって応力緩和がより小さいためである。

第4.2.1表 周方向膜応力および軸方向曲げ応力の最大値評価結果(温度不連続部高温側)

ケース	温度条件(°C)			物性式			照射末期 スエリング(vol.%)			照射末期 応力(kg/mm ²)	
	低温側	高温側	温度差	クリープの 大きさ	スエリングの 大きさ	スエリング ピーク温度	低温側	高温側	スエリ ング差	周方向 膜応力	軸方向 曲げ応力 ^{*)}
①a	480	520	40	最小条件	最大条件	430 °C	7.17	5.62	1.55	3.16	2.26
①b	480	520	40	最小条件	最大条件	450 °C	7.68	6.45	1.23	2.24	1.58
①c	480	520	40	最小条件	最大条件	470 °C	7.95	7.17	0.78	1.33	0.92
②a	510	550	40	最小条件	最大条件	430 °C	6.05	4.28	1.77	4.51	3.30
②b	510	550	40	最小条件	最大条件	450 °C	6.83	5.17	1.66	3.61	2.61
②c	510	550	40	最小条件	最大条件	470 °C	7.45	6.05	1.40	2.70	1.92

注記 ^{*)} 内面が正負となる方向の曲げ応力を、それぞれ正負で示した。



第4.2.2表 FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	図の種類	PLOT成分	評価時期(days)/STEP NO
4.1	CONIC2	軸方向分布	軸方向応力	1125 / 40
4.2	↓	↓	周方向応力	1125 / 40

5. 二次元熱伝導解析

5.1 解析条件

熱伝導解析用要素としてHQAX8(熱伝導8節点四辺形軸対称要素)を、また熱伝達解析用要素としてFCAX3(熱伝達3節点軸対称要素)をそれぞれ使用し、FINASコードを用いて、肉厚方向と軸方向の熱移動を考慮した二次元熱伝導(温度分布)解析を実施した。尚、要素HQAX8は各辺の両端と中間点に節点を持つ要素であり、要素当たり節点数は8点である。また、辺要素FCAX3は両端と中間点に計3点の節点を持つ要素である。

解析条件を第5.1.1図に示した。軸方向の熱移動を考慮しない場合には、第4章で明らかにした保守側の温度条件が得られるように、境界条件(ナトリウム温度、熱流束、および熱伝達率の各条件)を設定している。尚、燃料ペレット内でも軸方向熱移動が生じるので、これを無視した本解析条件は保守的なものである。

第5.1.2図に示したように、解析対象軸方向範囲は温度不連続部の上下5mm長さ(計10mm)とした。軸方向メッシュ分割は、100等分割のケースと、第3.2図に示したように、不連続部近傍でより細かな分割とした計176分割のケースの2通りとした。肉厚方向メッシュ分割は、いずれのケースにおいても、3等分割とした。

軸方向100等分割、肉厚方向3等分割としておけば、温度評価上十分であったが、第4章で述べる二次元温度分布条件での応力解析において、不連続部近傍でより細かく軸方向分割した方が良いと判断されたので、軸方向176分割のケースも実施した。すなわち、応力解析の温度条件データとして、温度解析結果をそのまま使用したい(内外挿するという手間を省きたい)という理由で、軸方向176分割のケースも実施した。尚、肉厚方向3分割とした時、肉厚方向節点数は7点となり、したがって、肉厚方向温度計算点も7点となるが、より細かく分割(5等分割、10等分割)した解析も実施し、3等分割で十分であることを確認している。

5.2 解析結果

内外面および肉厚中心における軸方向温度分布解析結果を付図5.1に、またコンター図(等温度線図)を付図5.2に示した。温度不連続部から十分離れた低温側における温度は510°C、また高温側肉厚中心における温度は550°Cとなっており、それぞれ第4章で明らかにした保守側の温度条件に一致している。付図の内容一覧を第5.2.1表に示した。

被覆管内熱伝導解析用要素：HQAX8
被覆管外表面熱伝達解析用要素：FCAX3

炉心部単位面積当たり入熱量：

$$q = 4.96 \times 10^{-4} \text{ kcal/mm}^2 \text{ sec}$$

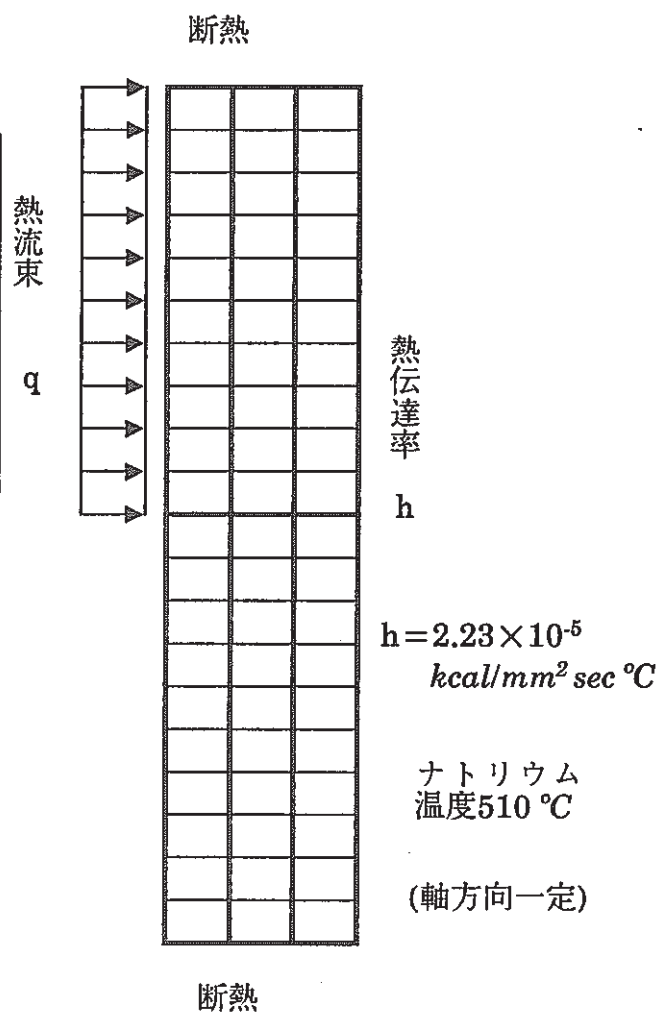
注記) 線出力489W/cm、および
被覆管内径 $\phi 7.5 \text{ mm}$ より、

$$489 / (\pi \times 0.75) = 208 \text{ W/cm}^2$$

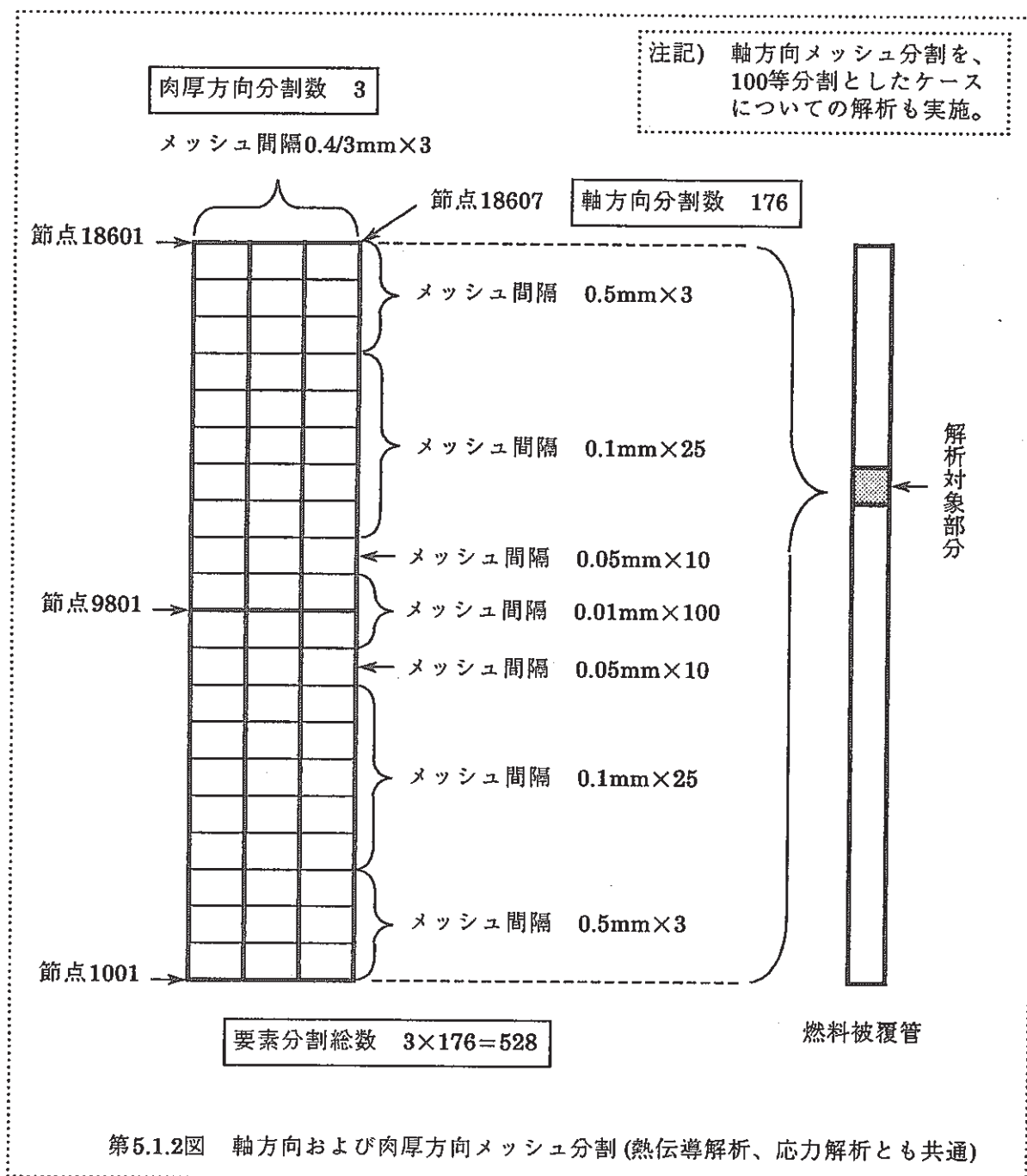
となり、これを単位換算した。

IB部単位面積当たり入熱量：

無視する(零とする)。



第5.1.1図 温度不連続部二次元温度分布解析条件



第5.2.1表 FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	図の種類	PLOT成分
5.1	HQAX8、FCAX3	軸方向分布	温度
5.2	↓	コンター図	温度

6. 応力解析評価

6.1 軸方向温度勾配を考慮した軸方向温度差に起因する応力の評価

第5章において求めた(軸方向100等分割のケースでの)被覆管肉厚中心温度軸方向分布データを用い、また肉厚方向の温度勾配がないという条件の下で、CONIC2を用いた応力評価を実施した。評価結果を第6.1.1表に示す。また、付図6.1.1～付図6.1.6に、応力軸方向分布を示す。

第4.2.1表②aと第6.1.1表を比較することにより、現実的な温度勾配を用いるならば、応力が大幅に低減されること、たとえば照射末期における周方向膜応力は 4.51kg/mm^2 から 1.41kg/mm^2 に、また軸方向曲げ応力は 3.30kg/mm^2 から 2.50kg/mm^2 に、それぞれ低下することが分かる。

第6.1.1表 温度勾配を考慮した軸方向温度差に起因する応力の評価結果

評価時期/ 評価位置 (mm)	照射初期(0日)		照射中期(500日)		照射末期(1125日)	
	0.5	1.0	0.6	1.0	0.6	1.0
軸方向応力 (kg/mm^2) (内面、中心、外面)	-2.85 0.00 2.85	-3.56 0.00 3.56	-0.35 0.00 0.35	-0.44 0.00 0.44	2.10 0.00 -2.10	2.50 0.00 -2.50
周方向応力 (kg/mm^2) (内面、中心、外面)	-3.18 -2.40 -1.70	-2.38 -1.46 -0.53	-0.50 -0.25 0.05	-0.49 -0.18 0.14	2.48 1.41 0.39	2.20 0.93 -0.24

注記) 評価位置は、軸方向曲げ応力または周方向肉厚中心応力の最大となる軸方向位置とし、IB上端からの高さで示した。

6.2 二次元温度分布条件での応力の評価

第5章において求めた(軸方向176分割のケースでの)被覆管二次元温度分布データを用い、QAX8を使用した応力評価を実施した。評価結果を第6.2.1表に示す。また、付図6.2.1～付図6.2.9に、コンター図(応力等高線図)を示す。

尚、解析対象部分の下端部は、第6.1節におけると同様、BOUNDARY DATA(境界条件)によって軸方向変位を固定した。一方、上端部については、第6.1節におけると異なり、フリーとはしないで、FASTENING DATA(節点変位間の線形な従属関係を規定)によって、軸方向変位量をすべて等しくするという工夫をしている。

予備解析において、上端部をフリーとしたところ、上端部近傍で異常な応力変化が現れた。この原因を検討した結果、解析対象部分として、被覆管の一部を取り出したことによる異

常との結論を得た。そこで、解析対象軸方向範囲を長くしないで、すなわち、計算時間の増加を招かないで、上端部での異常を解消するために、FASTENING DATAを使用した。

第6.2.1表 二次元温度分布条件での応力の評価結果

評価時期/ 評価位置 (mm)	照射初期(0日)		照射中期(500日)		照射末期(1125日)	
	0.5	1.4	0.6	1.7	0.6	1.6
軸方向応力 (kg/mm ²) (内面、中心、外面)	-	-13.64 -0.11 12.36	-	-2.38 0.03 2.13	-	12.54 -0.59 -9.72
周方向応力 (kg/mm ²) (内面、中心、外面)	-13.64 -2.94 6.22	-	-2.41 -0.29 1.42	-	12.80 1.27 -6.08	-

注記) 評価位置は、軸方向曲げ応力または周方向肉厚中心応力の最大となる軸方向位置とし、IB上端からの高さで示した。

6.3 管壁温度差(肉厚方向温度差)に起因する応力の評価

軸方向温度分布を平坦とし、肉厚方向に一定勾配で、40°Cの管壁温度差を考えた温度条件で、QAX8を用いた応力評価を実施した。均質炉心では高速中性子束が約10%高い¹⁾ので、中性子束を10%だけ高くした時の評価も実施した。第6.2節におけると同様、FASTENING DATAを使用している。評価結果を第6.3.1表に示す。中性子束を高くすると、照射クリープが大きくなるので、中期での応力は小さいが、スエリングの大きくなることで、末期応力はあまり変わらない結果となっている。また、付図6.3.1~付図6.3.3に、高速中性子束が元の条件の時の応力肉厚方向分布を示す。軸方向応力および周方向応力とも、軸方向位置の如何に係わらず一定なので、第6.3.1表には軸方向位置を示していない。

第6.3.1表 管壁温度差(肉厚方向温度差)に起因する応力の評価結果

評価時期	照射初期(0日)	照射中期(500日)	照射末期(1125日)
軸方向応力 (kg/mm ²) (内面、中心、外面)	-10.48 -0.17 10.10	-2.03 (-1.66) 0.00 (0.00) 1.88 (1.53)	10.54 (10.59) -0.33 (-0.34) -8.54 (-8.53)
周方向応力 (kg/mm ²) (内面、中心、外面)	-10.44 0.11 10.10	-2.02 (-1.65) 0.05 (0.05) 1.89 (1.53)	10.46 (10.50) -0.58 (-0.60) -8.54 (-8.54)

注記) 括弧内は、高速中性子束を10%だけ高くした時の応力である。

6.4 被覆管強度成立性の見通し

管壁温度差による応力の軸方向位置依存性がないので、軸方向温度差による応力がピーク値となる軸方向位置において、軸方向温度差による応力と管壁温度差による応力の合計値と、二次元温度分布条件での応力評価結果とを、第6.4.1表～第6.4.3表に比較対比した。また、二次元温度分布条件での応力がピーク値となる軸方向位置において、二次元温度分布条件での応力(AHC)評価結果と、高速中性子束を10%だけ増加させた条件での管壁温度差による応力(HOC)評価結果とを、同じく第6.4.1表～第6.4.3表に比較対比した。

二次元温度分布条件での周方向応力評価値のピークとなる軸方向位置は、合計値のピークになる位置と一致するが、軸方向応力のピークとなる軸方向位置は若干上方側にずれている。この軸方向位置ずれの原因は、『二次元温度分布条件では、肉厚方向温度差の軸方向依存性および肉厚方向温度勾配の肉厚方向依存性が考慮されることに對し、軸方向温度差による応力や肉厚方向温度差による応力の評価用温度分布条件のいずれにおいても、それらが考慮されない』ことにある。また、応力合計値(AHC)が二次元温度分布条件での応力(AHC)評価結果と一致しない原因も同様であるが、それほど大きな違いのないことから、二次元温度分布条件での応力評価結果の妥当性を伺い知ることができる。

以下、二次元温度分布条件での応力(AHC)と、管壁温度差による応力(HOC)の評価結果を比較する。すなわち、AHCとHOCにおける被覆管最大発熱部応力を比較する。

(1)照射初期

①軸方向応力

いずれの炉心においても、曲げ応力成分が主体的であり、AHCでの曲げ応力の方が、HOCにおける曲げ応力と比べ、10～20%程度だけ大きい。

②周方向応力

AHCでの膜応力成分は -3 kg/mm^2 程度であるのに対し、HOCではほぼ零である。曲げ応力成分は、ほぼ等しい。

(2)照射中期

①軸方向応力

曲げ応力成分が主体的であり、AHCでの曲げ応力の方が、HOCにおける曲げ応力と比べ、40%程度だけ大きいものの、照射初期と比べれば、ずっと小さくなっている。

②周方向応力

膜応力、曲げ応力ともAHCにおける方が大きいものの、軸方向応力と同様に、照射初期と比べれば、ずっと小さくなっている。

(3)照射末期

①軸方向応力

曲げ方向が照射初期と比べ逆方向であるという違いはあるが、曲げ応力の大きさは照射初期と同様、AHCの方がHOCより10~20%程度だけ大きい。

②周方向応力

肉厚中心においては、AHCで 1.3kg/mm^2 の引っ張り応力、HOCでは 0.6kg/mm^2 の圧縮応力が生じている。内面ではAHCの方が、また外面ではHOCの方が、それぞれ絶対値として応力大となっている。

以上の比較検討の結果をまとめる。『AHC燃料被覆管最大発熱部における管壁方向および軸方向温度分布に起因する応力は、HOC燃料被覆管最大発熱部における管壁温度差に起因する応力と比較して、照射初期および末期においては、①軸方向曲げ応力成分が高々20%だけより大きい。②周方向膜応力成分が高々 3kg/mm^2 だけより引っ張り側となる。また中期においては、軸方向および周方向応力はいずれもより大きい、初期および末期に比べればずっと小さい。』。したがって、この程度の差異ならば、AHC成立性上の障害にはならないと予想できる。

AHCにおける被覆管の強度成立性見通しをさらに検討するため、照射末期通常運転時における応力評価を、また比較のためHOCについての応力評価も、それぞれ、非常に保守的な方法で実施するものとした。第6.4.3表に示したように、AHCにおいて、周方向応力と軸方向応力のピークとなる軸方向位置は、互いに約1mmだけ離れているが、いずれも同一の位置(最大発熱部)に発生する局部+曲げ応力とした。また、スエリングおよび照射クリープを考慮した疑似非弾性解析により求めた応力なので一次応力と見なし^⑥、膜応力成分を一次局部応力、曲げ応力成分を一次曲げ応力とした。従来設計手法^⑥においては、流力振動による応力のように被覆管全体の曲がりモードに対応する応力を曲げ応力としているが、ここでは肉厚方向の曲がりモードに対応する応力を曲げ応力とした。すなわち、従来設計手法では管全体としての強度に着目しているのに対し、管を周方向に分割した各セクターの強度に着目した保守側の評価とした。

HOCにおける管壁温度差による応力も、同様の取扱いとした。

第6.4.4表および第6.4.5表に、AHCおよびHOCにおける被覆管の最大発熱部一次応力評価結果を示した。一次応力だけの評価に着目すると、その他応力として、内外圧差による一般膜応力、流力振動に起因する局部応力(従来設計では、曲げ応力)、湾曲拘束による局部応力、ワイヤとの相互作用による局部+曲げ応力を考慮しておけば十分である。「もんじゅ」高燃炉心における内外圧差による周方向応力は 6.57kg/mm^2 であるが⁽⁷⁾、ここでは保守側に 10kg/mm^2 とした。流力振動、湾曲拘束、およびワイヤとの相互作用による応力は「もんじゅ」高燃炉心での値⁽⁸⁾を暫定的に使用した。局部応力 P_L として、周方向依存性のあるものについては、最大値と最小値を示した。曲げ応力 P_b は、内面側で引っ張りとなる応力を土で、また内面側で圧縮となる応力を干で示した。AHCおよびHOCにおける一次応力評価結果($\langle P_L(P_m)+P_b \rangle$)の設計比は、それぞれ0.83および0.80であり、ほとんど変わらないとの結果が得られている。

本章で引用した付図の内容一覧を第6.4.6表に示した。

第6.4.1表 照射初期における応力評価結果の比較

	軸方向 位置 (mm)	軸方向温度差 による応力 (AHC)	管壁温度差 による応力 (AHC)	応力 合計値 (AHC)	二次元温度 分布条件での 応力(AHC)	管壁温度差 による応力 (HOC)
軸方向応力 (Kg/mm ²) (内面, 中心, 外面)	1.0	-3.56 0.00 3.56	-10.48 -0.17 10.10	-14.04 -0.17 13.66	-12.94 -0.11 12.12	—
同上	1.4	—	—	—	-13.64 -0.11 12.36	-10.48 -0.17 10.10
周方向応力 (Kg/mm ²) (内面, 中心, 外面)	0.5	-3.18 -2.40 -1.70	-10.44 0.11 10.10	-13.62 -2.29 8.40	-13.64 -2.94 6.22	-10.44 0.11 10.10

第6.4.2表 照射中期における応力評価結果の比較

	軸方向 位置 (mm)	軸方向温度差 による応力 (AHC)	管壁温度差 による応力 (AHC)	応力 合計値 (AHC)	二次元温度 分布条件での 応力(AHC)	管壁温度差 による応力 (HOC)
軸方向応力 (Kg/mm ²) (内面, 中心, 外面)	1.0	-0.44 0.00 0.44	-2.03 0.00 1.88	-2.47 0.00 2.32	-2.26 0.03 2.01	—
同上	1.7	—	—	—	-2.38 0.03 2.13	-1.66 0.00 1.53
周方向応力 (Kg/mm ²) (内面, 中心, 外面)	0.6	-0.50 -0.25 0.05	-2.02 0.05 1.89	-2.52 -0.20 1.94	-2.41 -0.29 1.42	-1.65 0.05 1.53

第6.4.3表 照射末期における応力評価結果の比較

	軸方向 位置 (mm)	軸方向温度差 による応力 (AHC)	管壁温度差 による応力 (AHC)	応力 合計値 (AHC)	二次元温度 分布条件での 応力(AHC)	管壁温度差 による応力 (HOC)
軸方向応力 (Kg/mm ²) (内面, 中心, 外面)	1.0	2.50 0.00 -2.50	10.54 -0.33 -8.54	13.04 -0.33 -11.04	11.98 -0.57 -9.26	—
同上	1.6	—	—	—	12.54 -0.59 -9.72	10.59 -0.34 -8.53
周方向応力 (Kg/mm ²) (内面, 中心, 外面)	0.6	2.48 1.41 0.39	10.46 -0.58 -8.54	12.94 0.83 -8.15	12.80 1.27 -6.08	10.50 -0.60 -8.54

第6.4.4表 AHCの一次応力参考評価結果(通常時、最大発熱部、EOL)

応力の原因	円周方向				軸方向			
	P _m (kg/mm ²)	P _L (kg/mm ²)	P _b (kg/mm ²)	合計 (kg/mm ²)	P _m (kg/mm ²)	P _L (kg/mm ²)	P _b (kg/mm ²)	合計 (kg/mm ²)
内外圧力差	10.				5.			
流力振動						±0.01*)		
温度分布		1.27	±9.44			-0.59	±11.13	
湾曲拘束						±10.90*)		
ワイヤとの相互作用						+0.83*) -1.87*)	±0.07*)	
[全て考慮]	10.	1.27	±9.44	20.71 1.83	5.	11.15 -13.37	11.06 -11.06	27.21 -19.43
応力分類	応力強さ (kg/mm ²)		評価温度 (°C)		許容応力 (kg/mm ²)		設計比	
⟨P _m ⟩	10.		556*)		21.9*)(S _m)		0.46	
⟨P _L (P _m)+P _b ⟩	27.21		556*)		32.8*)(1.5S _m)		0.83	

注記 *)「もんじゅ」高燃焼度炉心EOLでの条件⁽⁷⁾を暫定的に用いた。

第6.4.5表 HOCの一次応力参考評価結果(通常時、最大発熱部、EOL)

応力の原因	円周方向				軸方向			
	P _m (kg/mm ²)	P _L (kg/mm ²)	P _b (kg/mm ²)	合計 (kg/mm ²)	P _m (kg/mm ²)	P _L (kg/mm ²)	P _b (kg/mm ²)	合計 (kg/mm ²)
内外圧力差	10.				5.			
流力振動						±0.01*)		
管壁温度差		-0.60	±9.52			-0.34	±9.56	
湾曲拘束						±10.90*)		
ワイヤとの相互作用						+0.83*) -1.87*)	±0.07*)	
[全て考慮]	10.	-0.60	±9.52	18.92 -0.12	5.	11.40 -13.12	9.49 -9.49	25.89 -17.61
応力分類	応力強さ (kg/mm ²)		評価温度 (°C)		許容応力 (kg/mm ²)		設計比	
⟨P _m ⟩	10.		556*)		21.9*)(S _m)		0.46	
⟨P _L (P _m)+P _b ⟩	25.89		556*)		32.8*)(1.5S _m)		0.80	

注記 *)「もんじゅ」高燃焼度炉心EOLでの条件⁽⁷⁾を暫定的に用いた。

第6.4.6表 FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	図の種類	PLOT成分	評価時期(days)/STEP NO
6.1.1	CONIC2	軸方向分布	軸方向応力	0 / 1
6.1.2	↓	↓	周方向応力	0 / 1
6.1.3	↓	↓	軸方向応力	500 / 16
6.1.4	↓	↓	周方向応力	500 / 16
6.1.5	↓	↓	軸方向応力	1125 / 40
6.1.6	↓	↓	周方向応力	1125 / 40
6.2.1	QAX8	コンター図	肉厚方向応力	0 / 1
6.2.2	↓	↓	軸方向応力	0 / 1
6.2.3	↓	↓	周方向応力	0 / 1
6.2.4	QAX8	コンター図	肉厚方向応力	500 / 16
6.2.5	↓	↓	軸方向応力	500 / 16
6.2.6	↓	↓	周方向応力	500 / 16
6.2.7	QAX8	コンター図	肉厚方向応力	1125 / 40
6.2.8	↓	↓	軸方向応力	1125 / 40
6.2.9	↓	↓	周方向応力	1125 / 40
6.3.1	QAX8	肉厚方向分布	肉厚方向応力 軸方向応力 周方向応力	0 / 1
6.3.2	↓	↓	肉厚方向応力 軸方向応力 周方向応力	500 / 16
6.3.3	↓	↓	肉厚方向応力 軸方向応力 周方向応力	1125 / 40

7. まとめと今後の課題

本研究の結果、明らかになった事実を以下に列挙する。

- (1) 軸方向温度不連続に起因する熱膨張差だけによって被覆管に生じる熱応力を評価するための簡易応力評価式の適用性が、有限要素法による解析結果との比較により、確認できた。
- (2) 上記熱膨張差によって生じる熱応力は、照射の進行とともに照射クリープにより緩和され小さくなるが、スエリングの開始とともにスエリング差の増加に起因して再び大きくなる。また、改良オーステナイト鋼のスエリングピーク温度が450℃程度であるので、熱膨張差による応力とスエリング差による応力は互いに方向が逆となる。
- (3) 軸方向温度差に起因するAHC燃料被覆管最大発熱部応力を保守側に評価するためには、被覆管温度をホットスポット値とし、スエリング速度を上限値とし、また、スエリング潜伏期間、クリープ相互作用係数、およびスエリングピーク温度を下限値とすれば良い。
- (4) 軸方向温度差に起因するAHC燃料被覆管最大発熱部応力を、軸方向熱伝導を考慮した合理的な手法で評価したところ、管壁温度差に起因する最大発熱部応力の約20~30%の大きさであることが分かった。
- (5) 軸方向温度差および管壁温度差に起因するAHC燃料最大発熱部応力は、管壁温度差に起因するHOC燃料最大発熱部応力よりも、約20~30%だけ大きいことが分かった。
- (6) AHC燃料とHOC燃料において、その他の応力原因による応力の大きさは同等と考えられるので、同一の値(主に、「もんじゅ」設計での評価値)を用いて、その他の応力を含めた一次応力評価を行い、AHC燃料とHOC燃料における設計比はそれぞれ0.83および0.80と大差が無いとの結果を得た。すなわち、軸方向温度差に起因するAHC燃料被覆管最大発熱部応力は、AHC成立性上の障害にはならないとの見通しを得た。

AHCに限らず、燃料設計における今後の課題として、以下の2点が明らかになった。

- (1) 改良オーステナイト鋼の照射クリープが小さいため、燃料寿命末期において生じるスエリング差による応力が有意な値となる可能性があるため、今後、周方向温度差に起因する応力(湾曲拘束力に起因する応力)、被覆管とスペーサワイヤとの相互作用による応力等も評価しておく必要がある。
- (2) スエリング差に起因する応力を含めた燃料設計基準を策定する必要がある。

謝 辞

解析用入力データの作成、解析の実行、解析結果の検討および整理にあたっては、(株)CSK 渡辺力氏に協力頂きました。FINAS使用に関して、構造室 岩田耕司室長代理より、種々の有益なコメントを頂きました。また、軸非均質燃料の炉内条件設定においては、プラント工学室 大久保良幸副主任研究員および原昭浩研究員に協力頂きました。

以上の方々に、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 谷山 & 中西, PNC N 9410 88-035 “高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(II) 昭和62年度成果概要”
- (2) M. Boidron and C. Berlanga, “In pile behaviour of axially heterogeneous fuel elements”, Proc. Int. Conf. on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Tucson, Arizona, 3-17(1986).
- (3) 斎藤 他, PNC SN9410 88-051 “高速炉燃料ピン内セシウム軸方向移動解析コード(MINERVA)の開発”.
- (4) PNC N9520 87-004(FINAS:RM002), “汎用非線形構造解析システムFINAS使用説明書”.
- (5) 岩田 他, PNC SN 9410 86-031, “大型高速増殖炉 要素技術設計研究 原子炉容器構造成立性パラメトリック解析”, pp.59-62.
- (6) S. Timoshenko, “Theory of Plates and Shells”, (1940), pp.498-501.
- (7) PNC SJ 5449 86-001, “もんじゅ炉心燃料体強度評価・解析”, pp.127-128.
- (8) PNC SN241 85-21(2), “高速原型炉燃料集合体の構造設計方針(案) 解説書”, p.58.

付録

付録として、以下にプロッター図を収録した。本文中においても、プロッター図の内容を各表に示したが、便宜を図るため付表1～付表6までに再度示した。

付表1 第2章にて引用の、解析解プロッター図一覧表

付図No.	評価応力	不連続部 長さ(mm)	不連続部温度 勾配(°C/mm)	被覆管肉厚 (mm)	被覆管外径 (mm)
2.1	ピーク応力	0.005～100	2000～0.1	0.4	φ8.3
2.2.1	軸方向	0.01	1000	0.4	同上
2.2.2	周方向	0.01	1000	0.4	同上
2.3.1	軸方向	0.01	1000	0.1	同上
2.3.2	周方向	0.01	1000	0.1	同上

付表2 第2章にて引用の、FINASコードによる応力解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	肉厚 方向 分割数	評価応力	メッシュ巾 (mm)	不連続部 温度勾配 (°C/mm)	被覆管 肉厚(mm)	被覆管 外径(mm)
2.4.1	QAX8	3	軸方向	1.0	44	0.4	φ8.3
2.4.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.4.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.5.1	↓	↓	軸方向	0.1	444	↓	↓
2.5.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.5.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.6.1	↓	↓	軸方向	0.05	889	↓	↓
2.6.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.6.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.7.1	↓	↓	軸方向	0.01	4444	↓	↓
2.7.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.7.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓
2.8.1	CONIC2	—	軸方向	0.1	1087	↓	↓
2.8.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.9.1	↓	↓	軸方向	0.05	2174	↓	↓
2.9.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.10.1	↓	↓	軸方向	0.01	10870	↓	↓
2.10.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.11.1	QAX8	3	軸方向	0.1	444	0.1	↓
2.11.2	↓	↓	周方向	↓	↓	↓	↓
2.11.3	↓	↓	肉厚方向	↓	↓	↓	↓

付表3 第3章にて引用の、FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	横軸の変数	縦軸の変数	評価時期(days) /STEP NO	評価位置(mm) [不連続部基準]
3.1.1	CONIC2	軸方向位置	周方向応力	0 / 1	—
3.1.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	0 / 1	—
3.2.1	↓	軸方向位置	周方向応力	500 / 16	—
3.2.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	500 / 16	—
3.3.1	↓	軸方向位置	周方向応力	687.5 / 34	—
3.3.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	687.5 / 34	—
3.4.1	↓	軸方向位置	周方向応力	1125 / 40	—
3.4.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	1125 / 40	—
3.5.1	QAX8	軸方向位置	周方向応力	1125 / 40	—
3.5.2	↓	軸方向位置	軸方向応力	1125 / 40	—
3.5.3	↓	軸方向位置	肉厚方向応力	1125 / 40	—
3.6.1	CONIC2	軸方向位置	周方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.6.2	↓	軸方向位置	軸方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.7.1	QAX8	軸方向位置	軸方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.7.2	↓	軸方向位置	周方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.7.3	↓	軸方向位置	肉厚方向クリープ歪	1125 / 40	—
3.8.1	CONIC2	照射期間	周方向応力	—	0.8
3.8.2	↓	照射期間	軸方向応力	—	0.8

付表4 第4章にて引用の、FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	図の種類	PLOT成分	評価時期(days) / STEP NO
4.1	CONIC2	軸方向分布	軸方向応力	1125 / 40
4.2	↓	↓	周方向応力	1125 / 40

注記) 保守側の条件での解析結果。

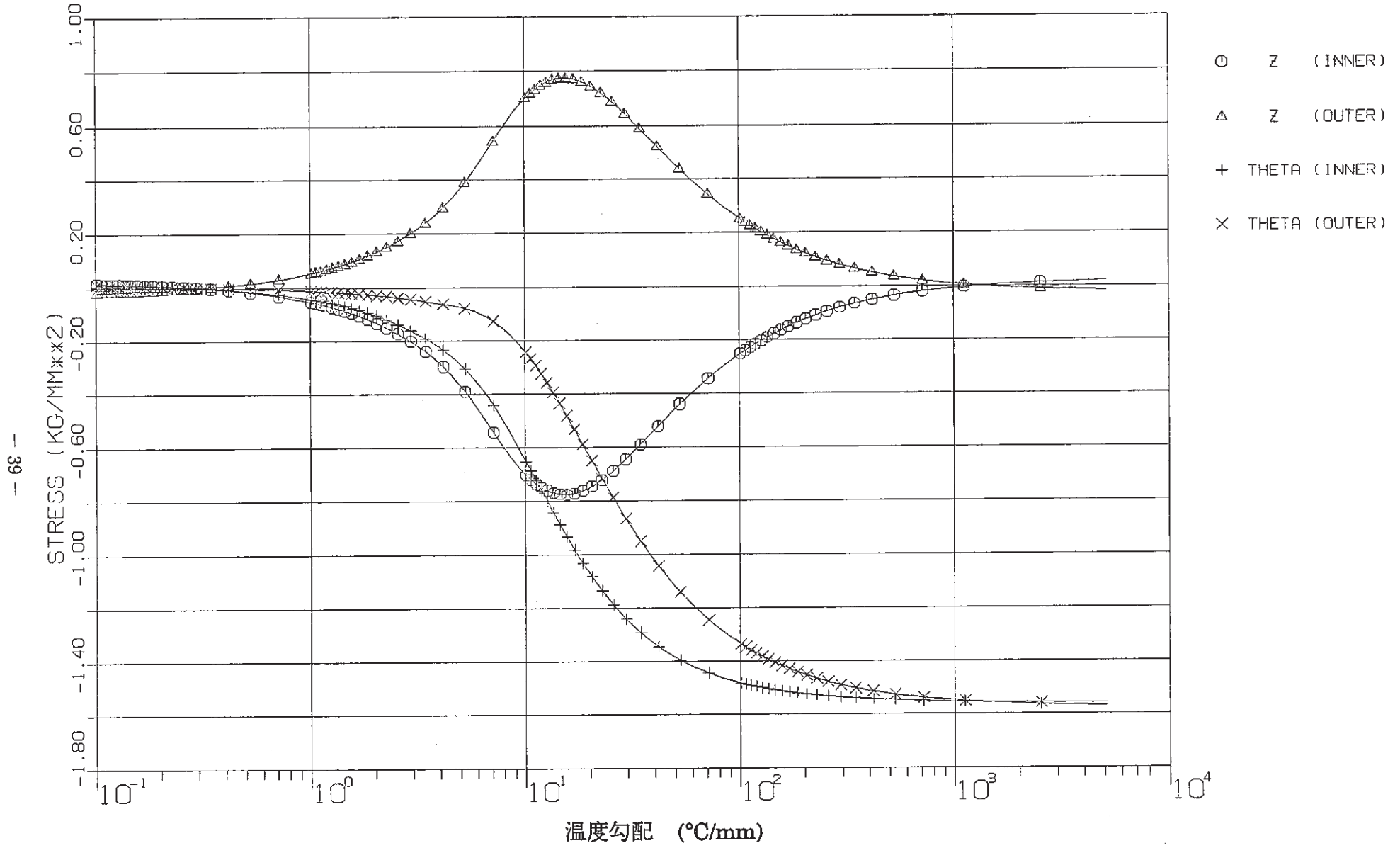
付表5 第5章にて引用の、FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	図の種類	PLOT成分
5.1	HQAX8、FCAX3	軸方向分布	温度
5.2	↓	コンター図*)	温度

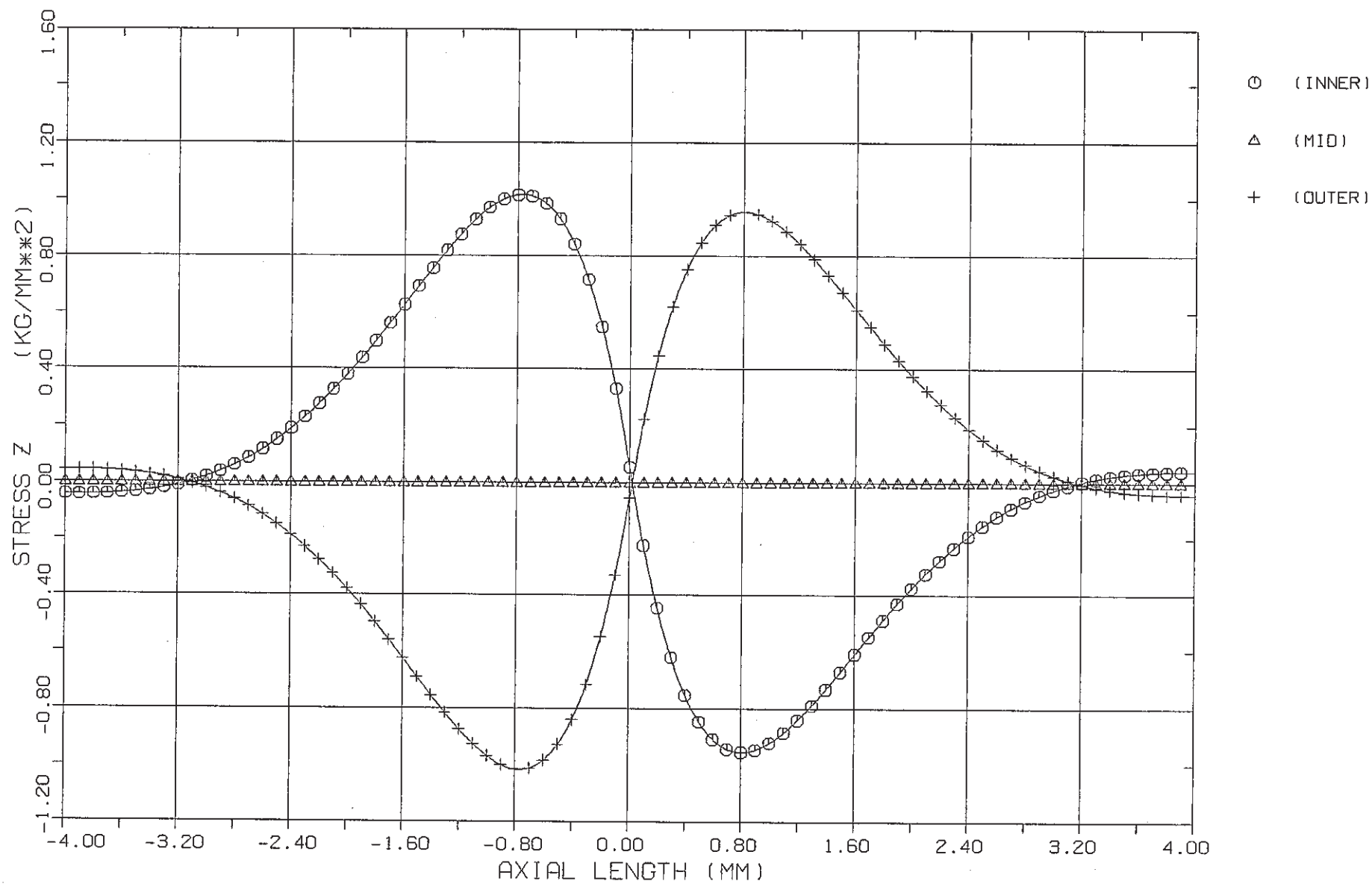
付表6 第6章にて引用の、FINASコードによる解析結果プロッター図一覧表

付図No.	使用要素	図の種類	PLOT成分	評価時期(days)/STEP NO
6.1.1	CONIC2	軸方向分布	軸方向応力	0 / 1
6.1.2	↓	↓	周方向応力	0 / 1
6.1.3	↓	↓	軸方向応力	500 / 16
6.1.4	↓	↓	周方向応力	500 / 16
6.1.5	↓	↓	軸方向応力	1125 / 40
6.1.6	↓	↓	周方向応力	1125 / 40
6.2.1	QAX8	コンター図*)	肉厚方向応力	0 / 1
6.2.2	↓	↓	軸方向応力	0 / 1
6.2.3	↓	↓	周方向応力	0 / 1
6.2.4	QAX8	コンター図*)	肉厚方向応力	500 / 16
6.2.5	↓	↓	軸方向応力	500 / 16
6.2.6	↓	↓	周方向応力	500 / 16
6.2.7	QAX8	コンター図*)	肉厚方向応力	1125 / 40
6.2.8	↓	↓	軸方向応力	1125 / 40
6.2.9	↓	↓	周方向応力	1125 / 40
6.3.1	QAX8	肉厚方向分布	肉厚方向応力 軸方向応力 周方向応力	0 / 1
6.3.2	↓	↓	肉厚方向応力 軸方向応力 周方向応力	500 / 16
6.3.3	↓	↓	肉厚方向応力 軸方向応力 周方向応力	1125 / 40

注記*) コンター図に示したスケールは、軸方向に対してであり、肉厚方向には10倍拡大してプロットしている。

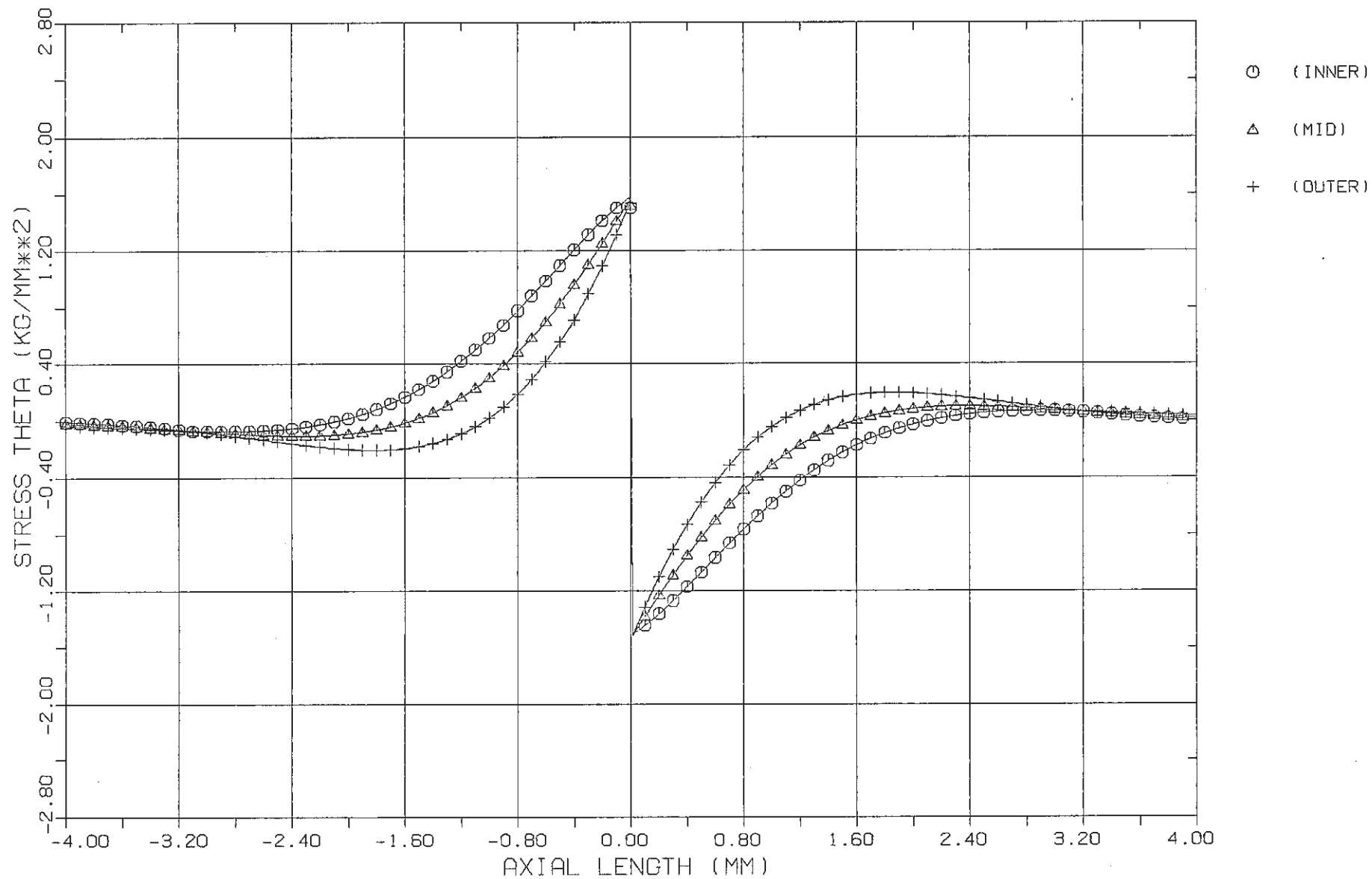


付図2.1 ピーク応力解析解の軸方向温度勾配への依存性



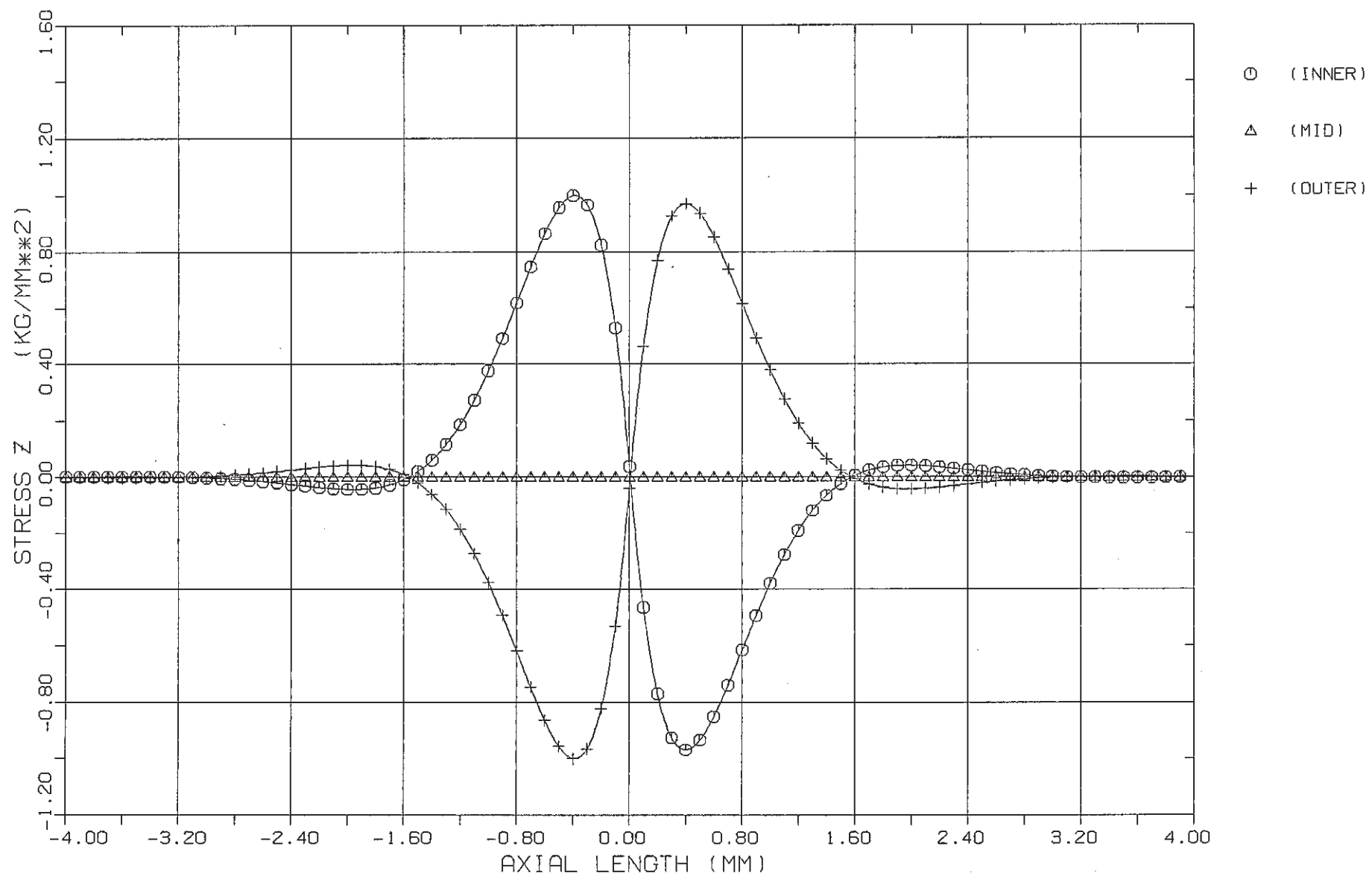
(TIMOSHENKO MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM, DLT TEMP: 10.0)

付図2.2.1 軸方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚: 0.4mm)



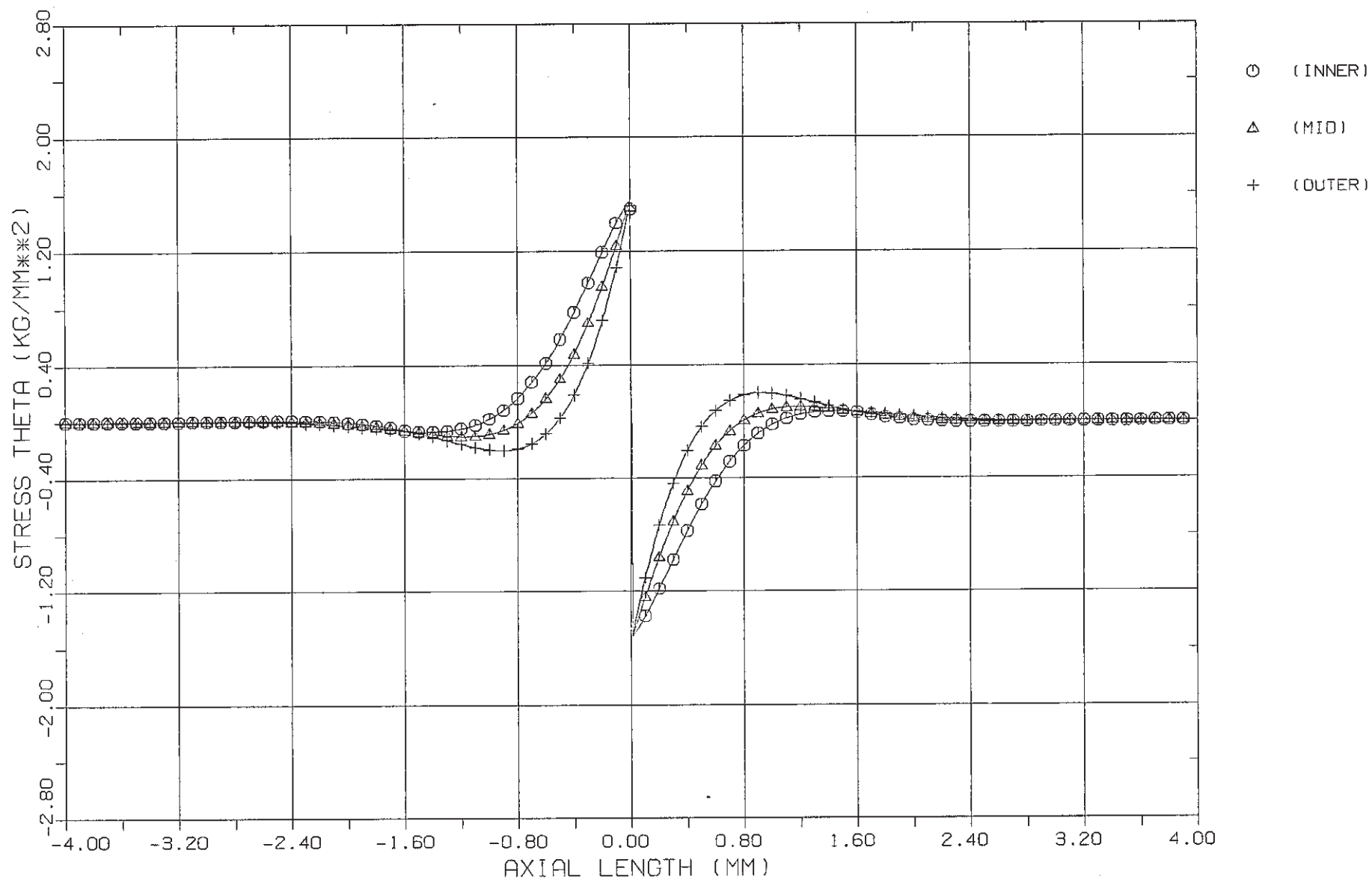
(TIMOSHENKO MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM, DLT TEMP: 10.0)

付図2.2.2 周方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚: 0.4mm)



(TIMOSHENKO MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 4.05 MM, DLT TEMP: 10.0)

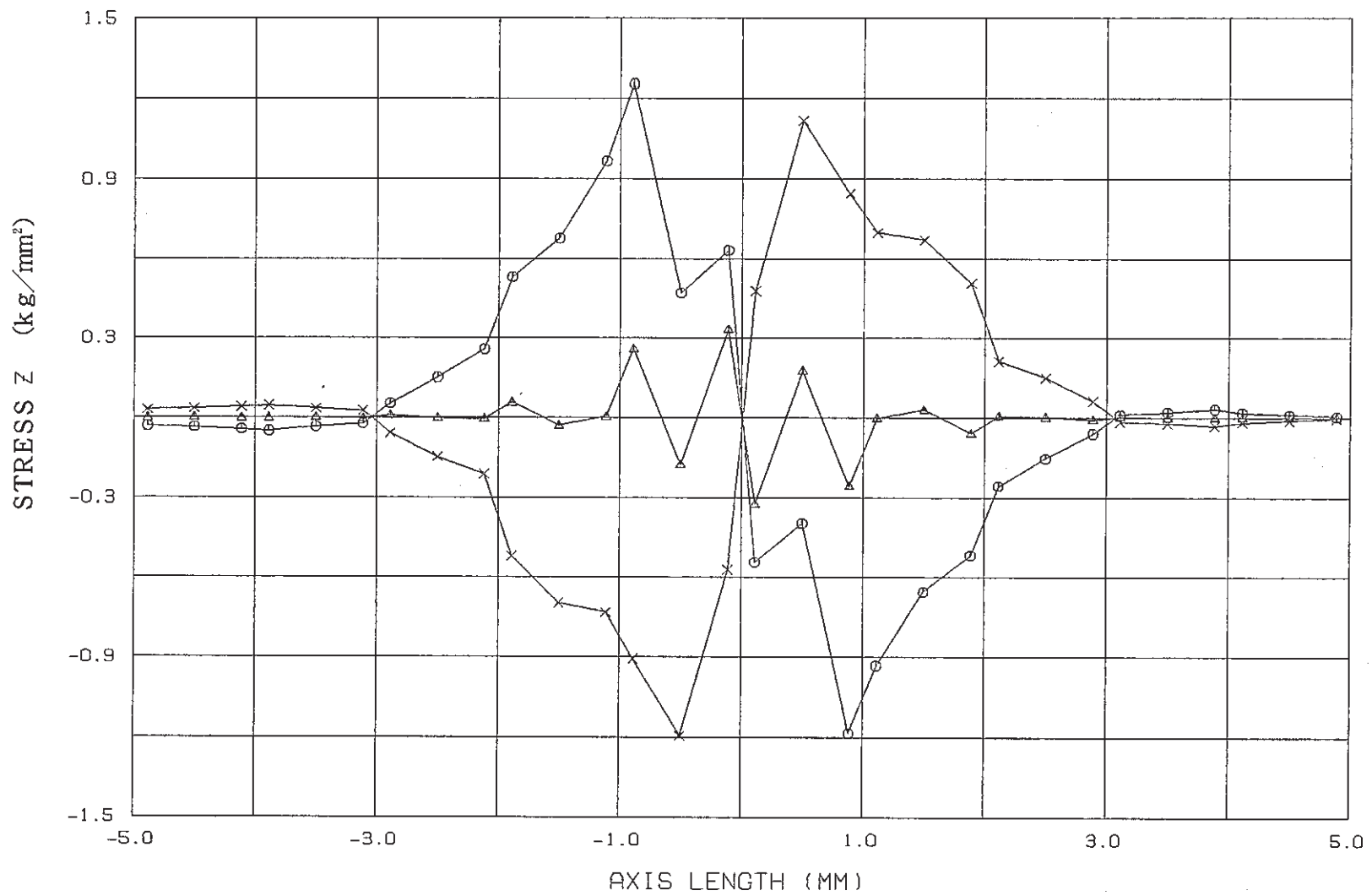
付図2.3.1 軸方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚: 0.1mm)



(TIMOSHENKO MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 4.05 MM, DLT TEMP: 10.0)

付図2.3.2 周方向応力解析解の軸方向分布(被覆管肉厚: 0.1mm)

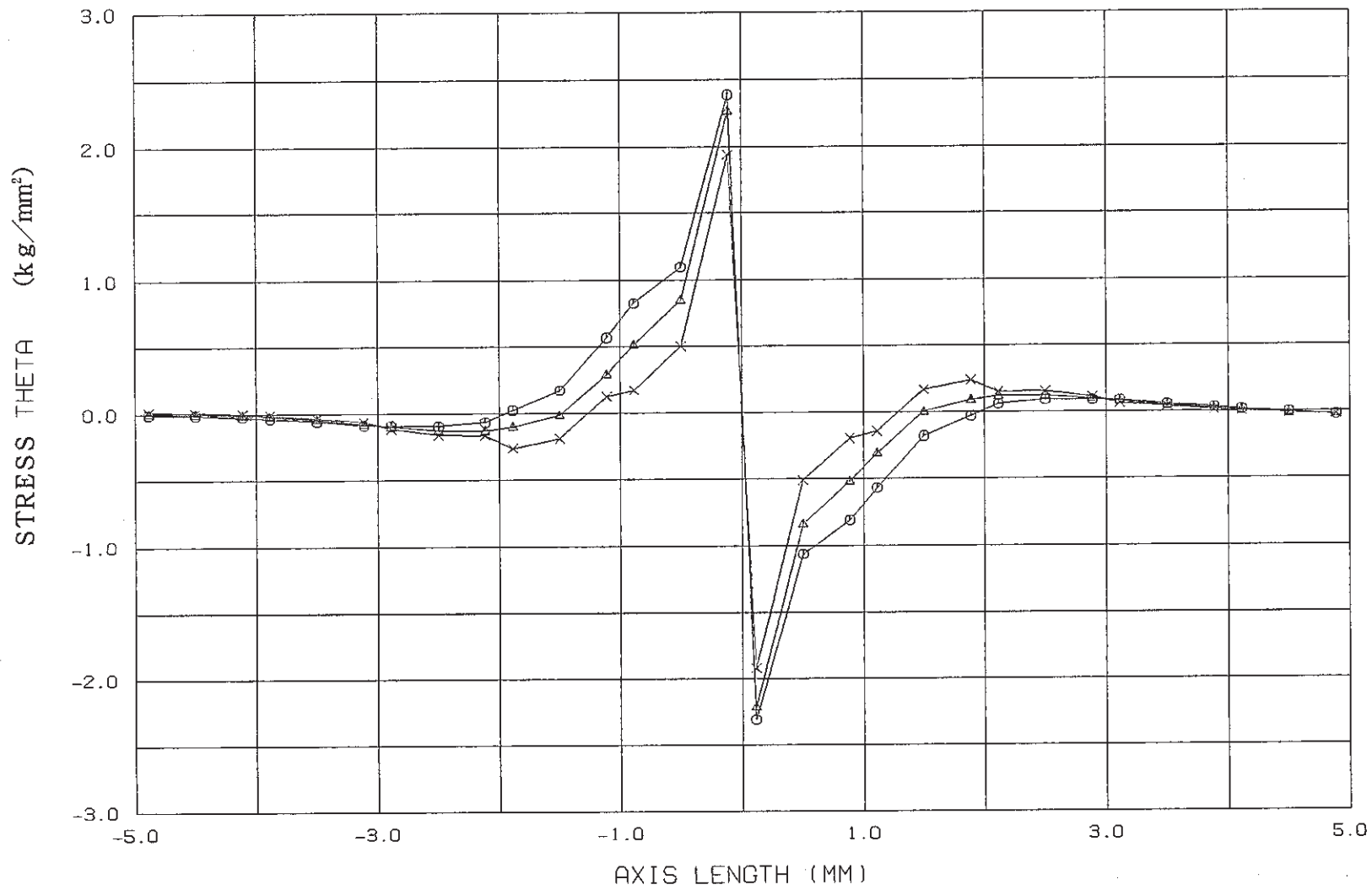
FINAS
STEP NO. 1



(QAX8 MESH: 1.00 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.4.1 QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:1.0mm)

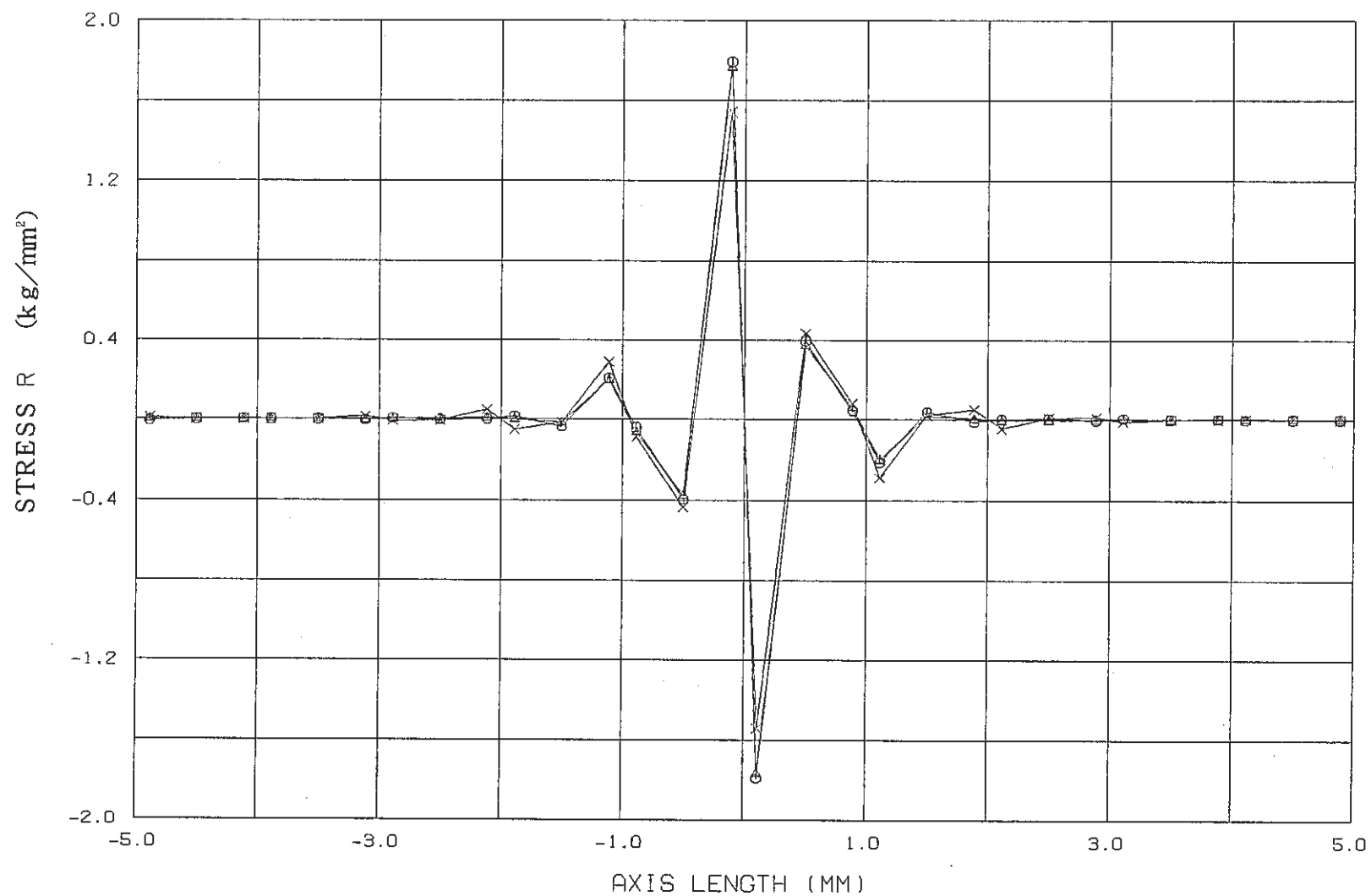
○
INNER
△
MID
×
OUTER



(QAX8 MESH: 1.00 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.4.2 QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾: 1.0mm)

FINAS
STEP NO. 1

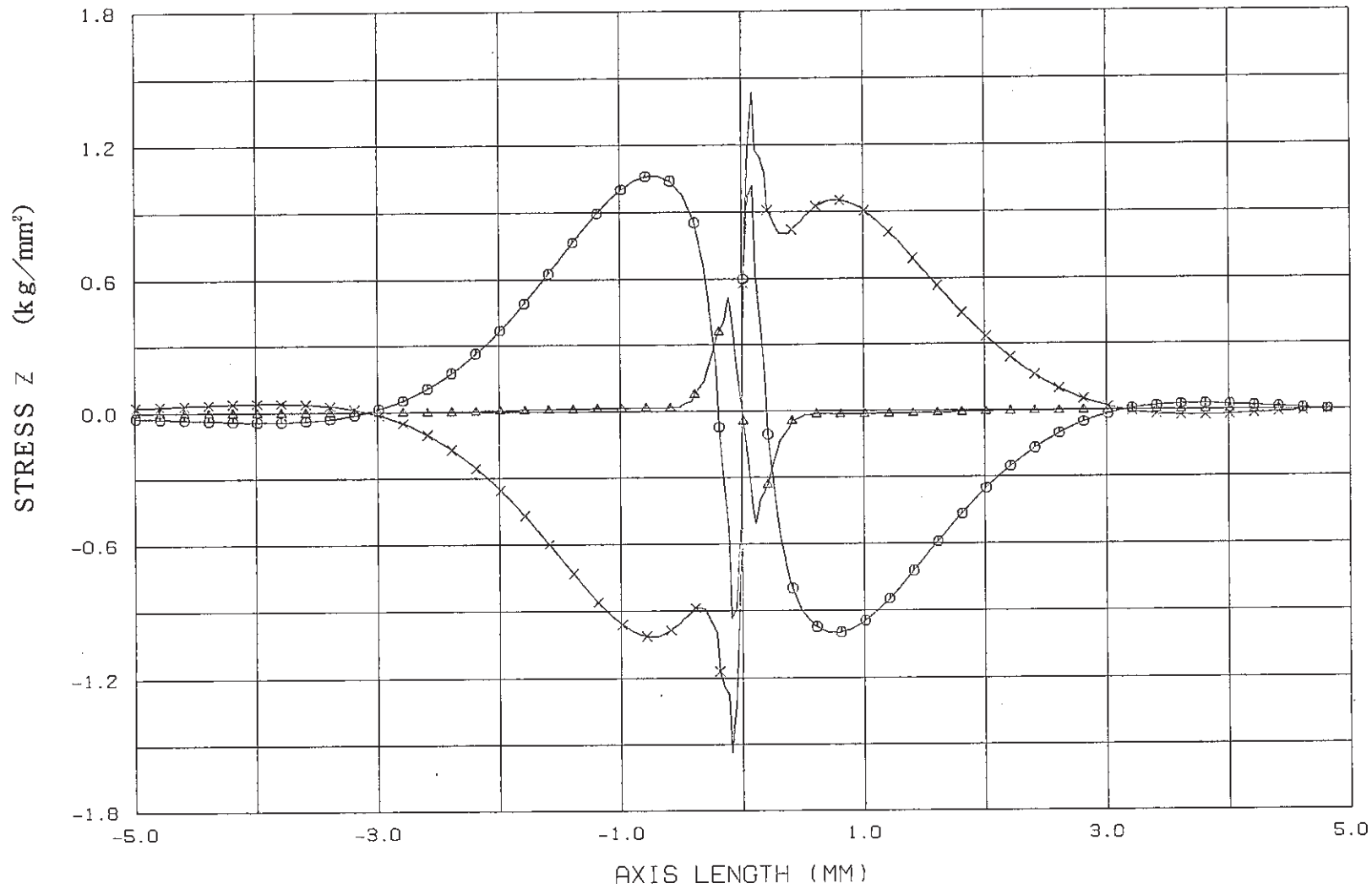


(QAX8 MESH: 1.00 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.4.3 QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾: 1.0mm)

 INNER
 MID
 OUTER

FINAS
STEP NO. 1

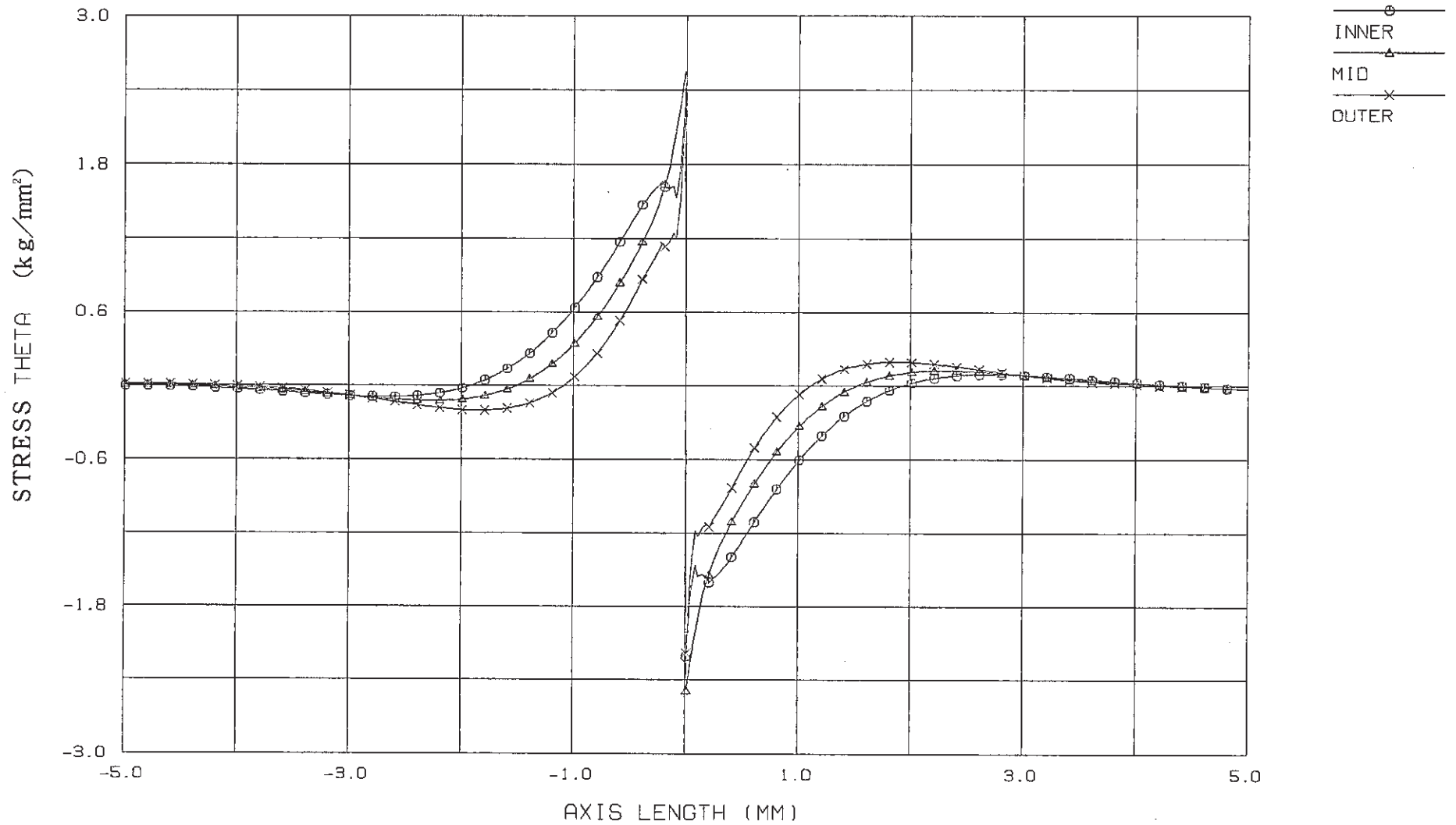


(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.5.1 QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)

FINAS

STEP NO. 1

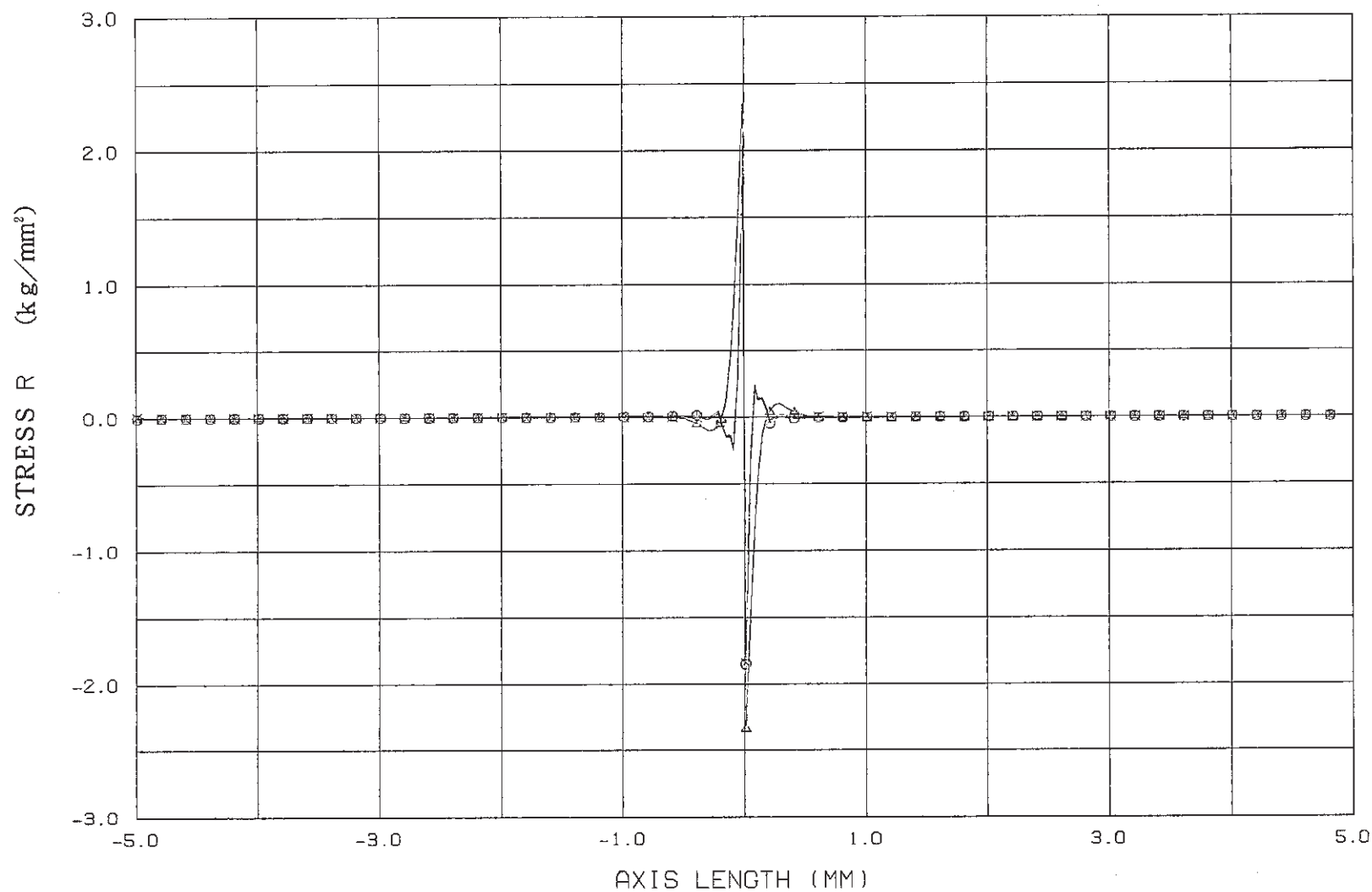


(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.5.2 QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)

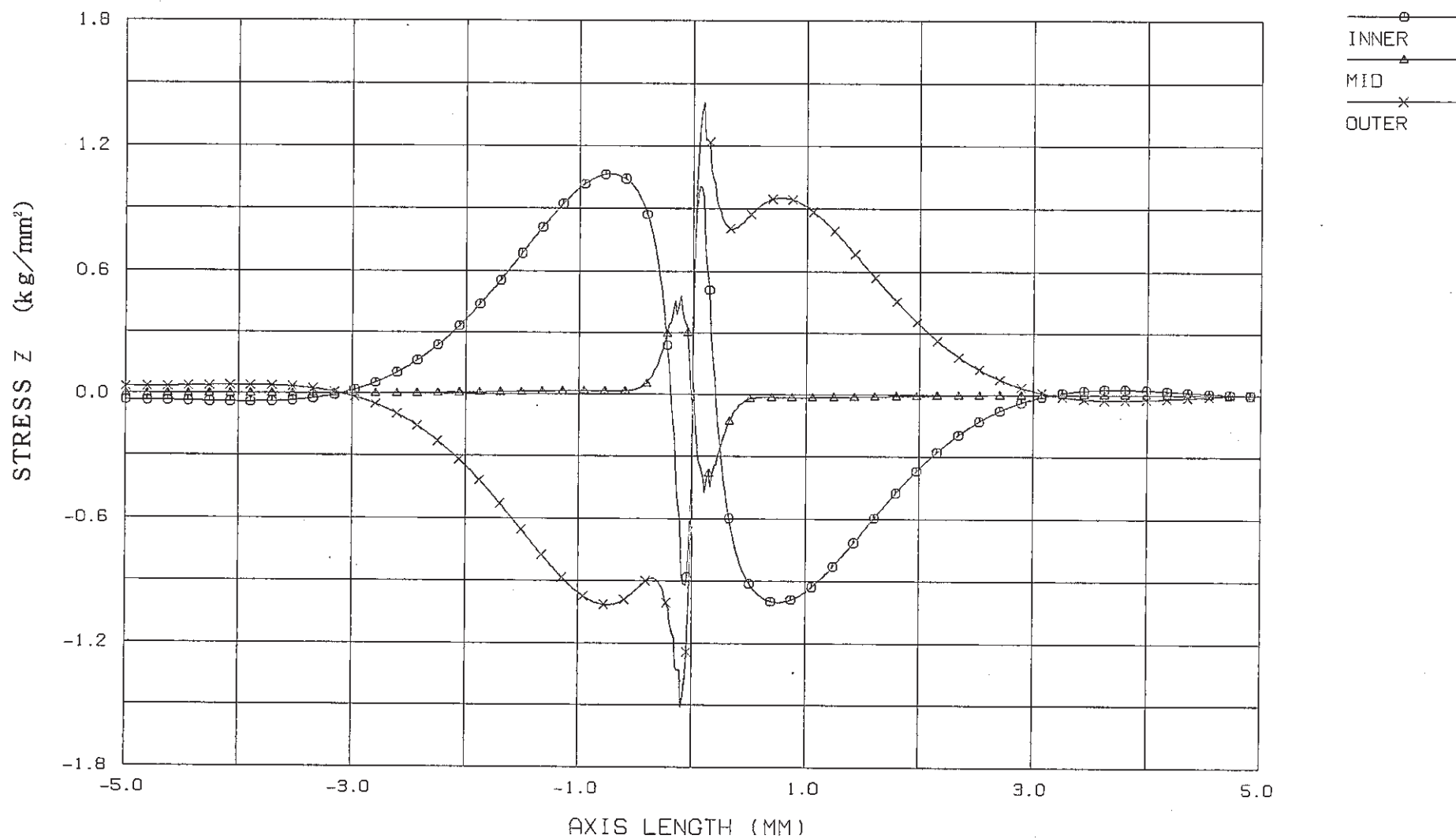
○
INNER
△
MID
×
OUTER

FINAS
STEP NO. 1



(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

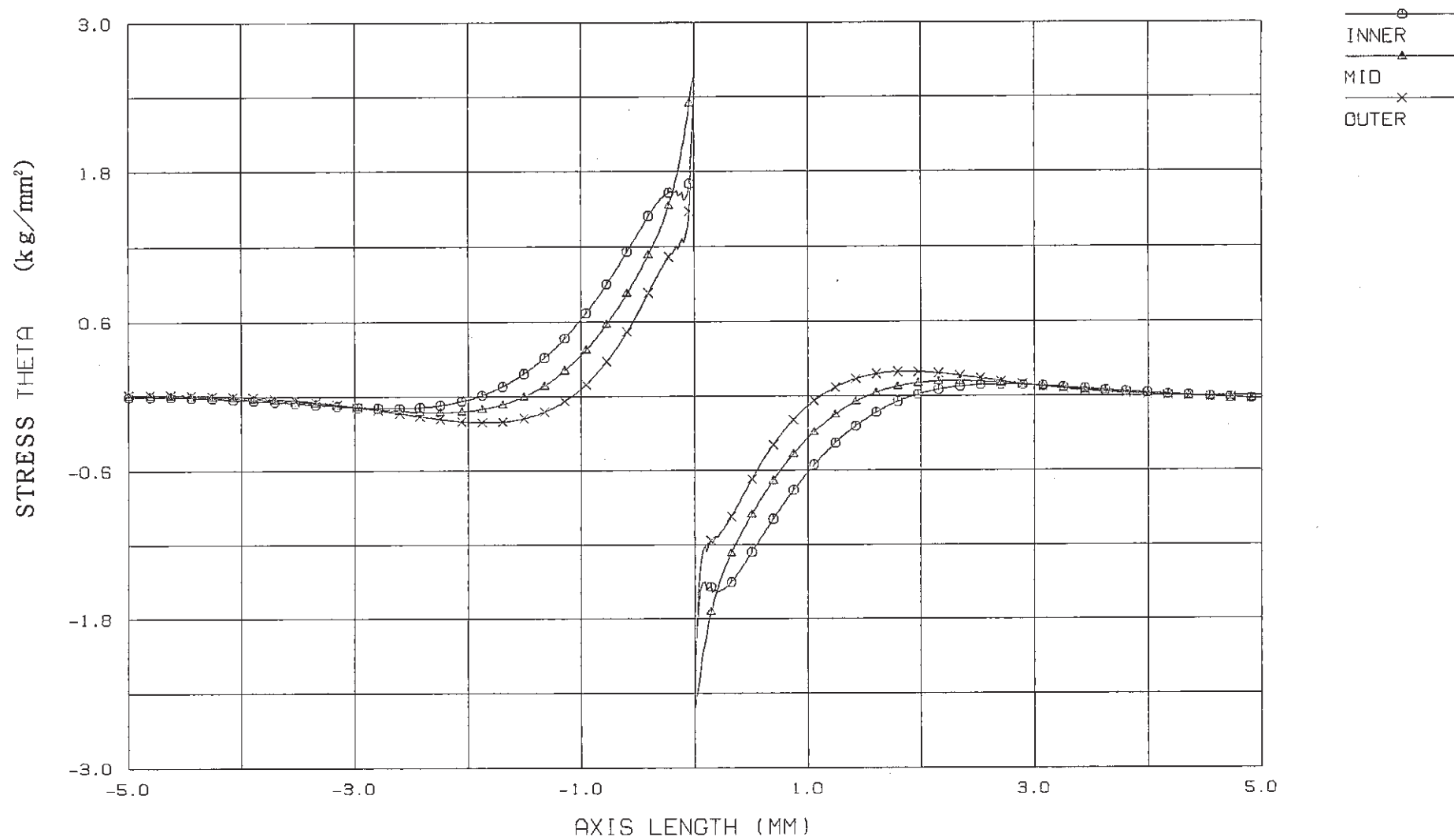
付図2.5.3 QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)



(QAX8 MESH: 0.05 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.6.1 QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)

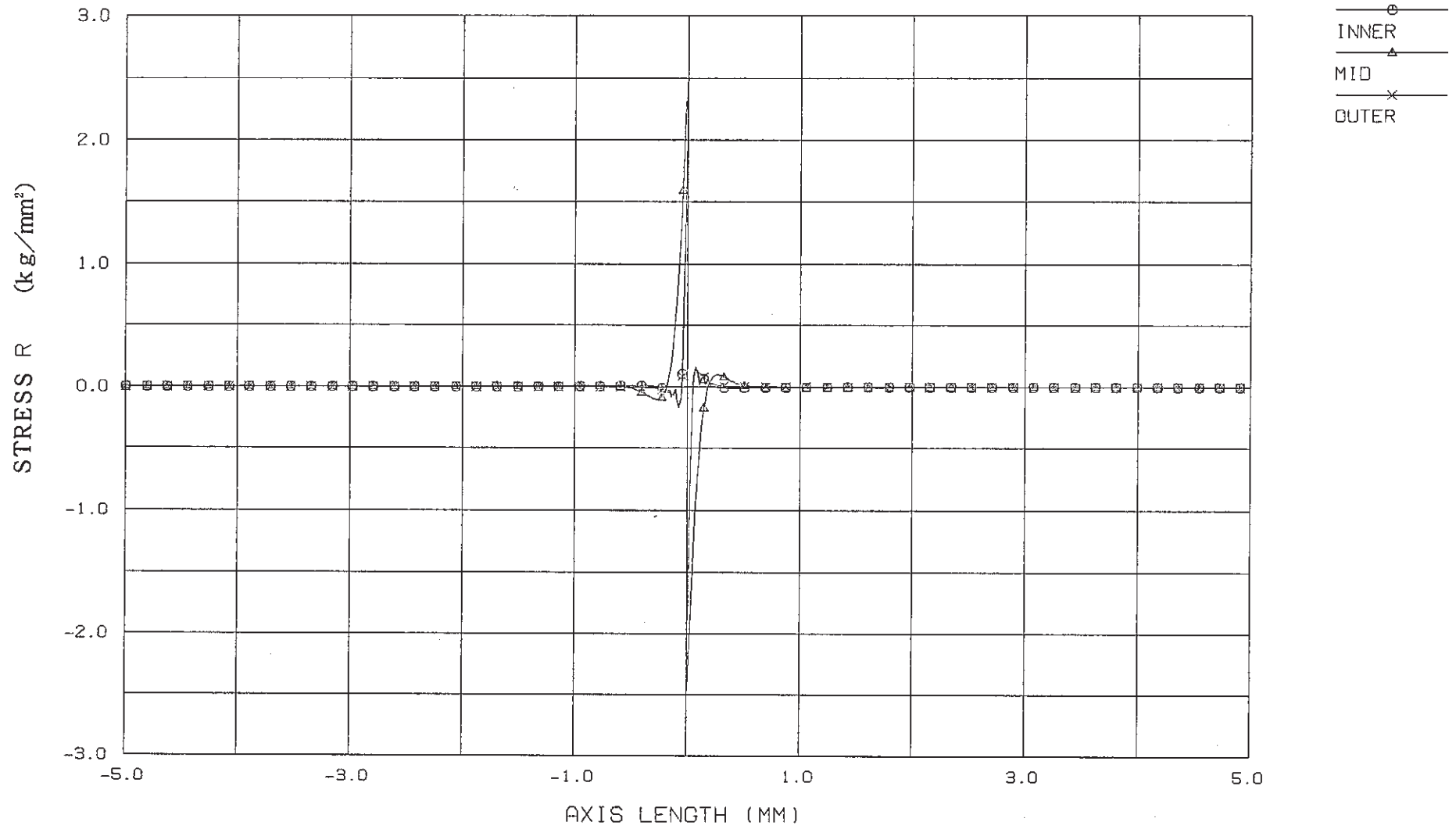
FINAS
STEP NO. 1



(QAX8 MESH: 0.05 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.6.2 QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾: 0.05mm)

FINAS
STEP NO. 1



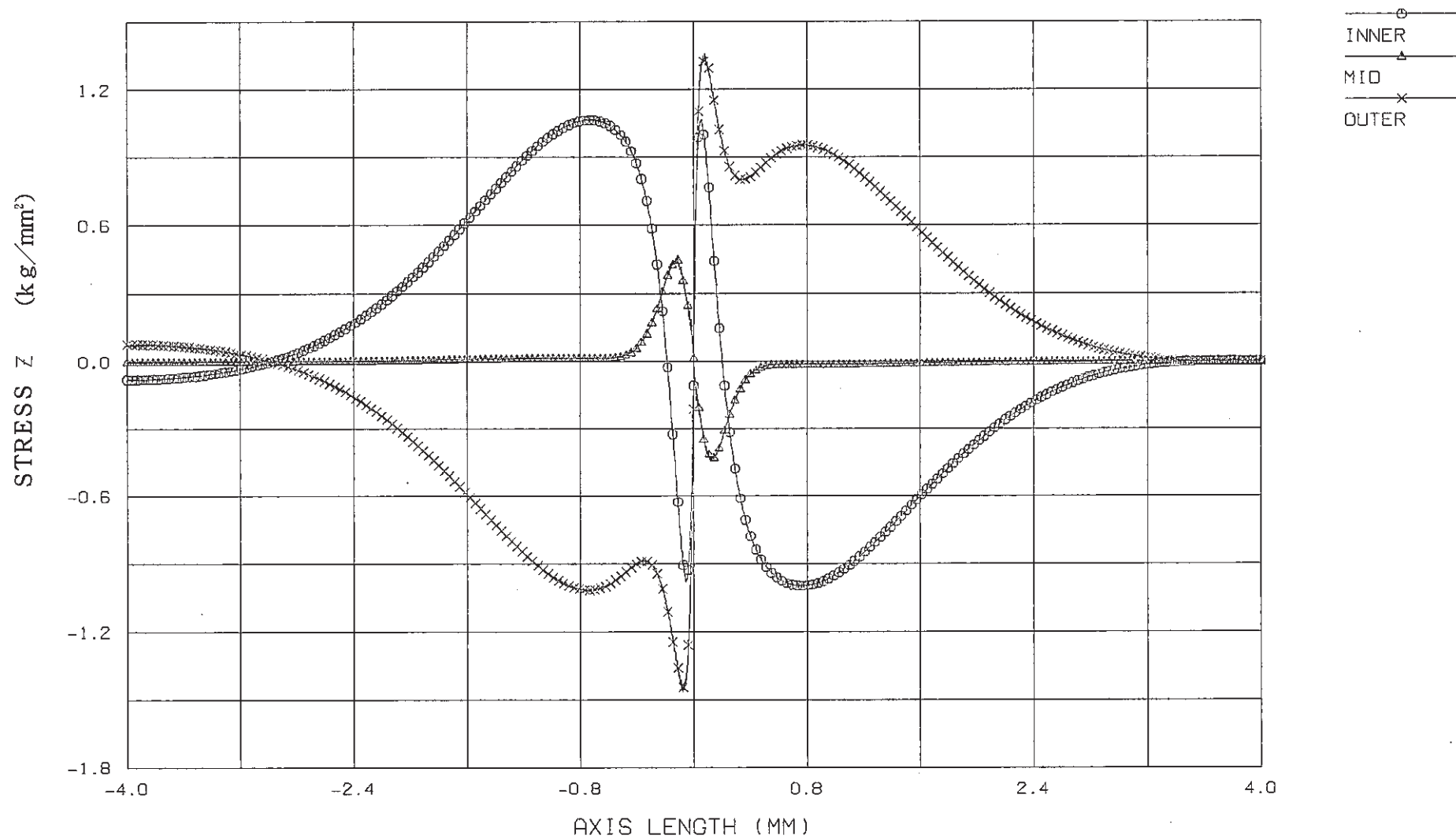
(QAX8 MESH: 0.05 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.6.3 QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)

FINAS
STEP NO. 1

PNC-TN9410 88-153

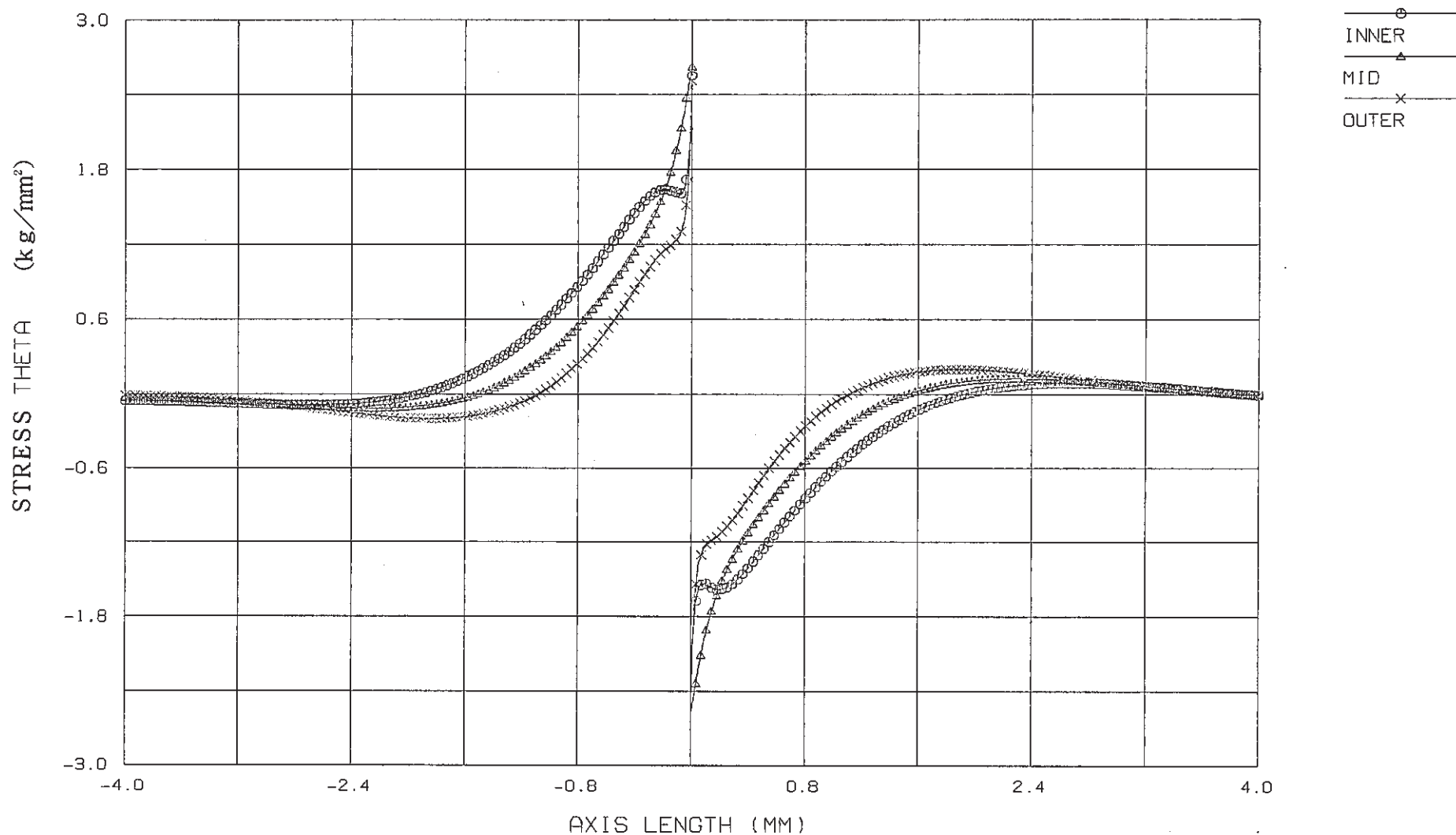
- 53 -



(QAX8 MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.7.1 QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾: 0.01mm)

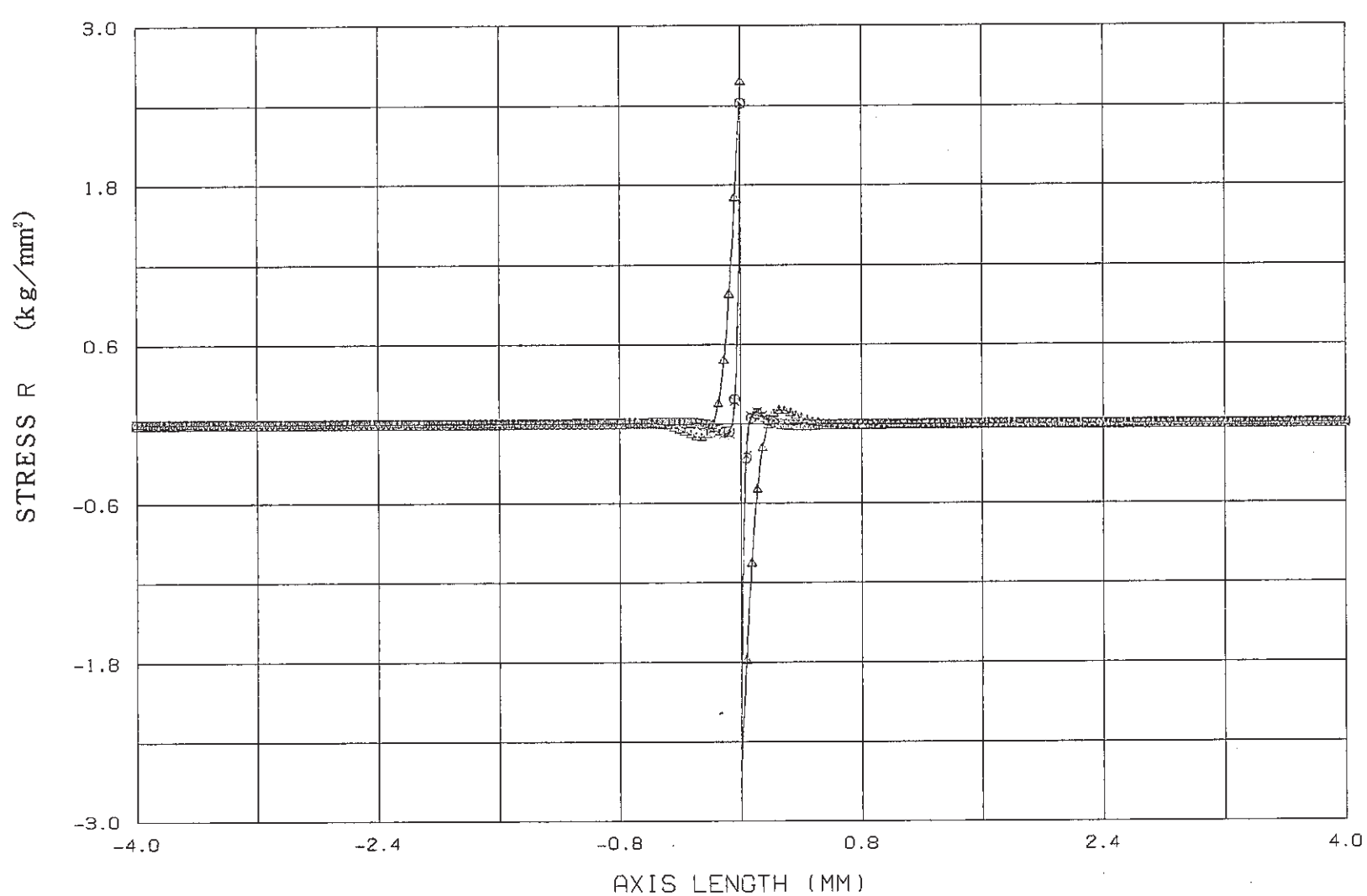
FINAS
STEP NO. 1



(QAX8 MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.7.2 QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)

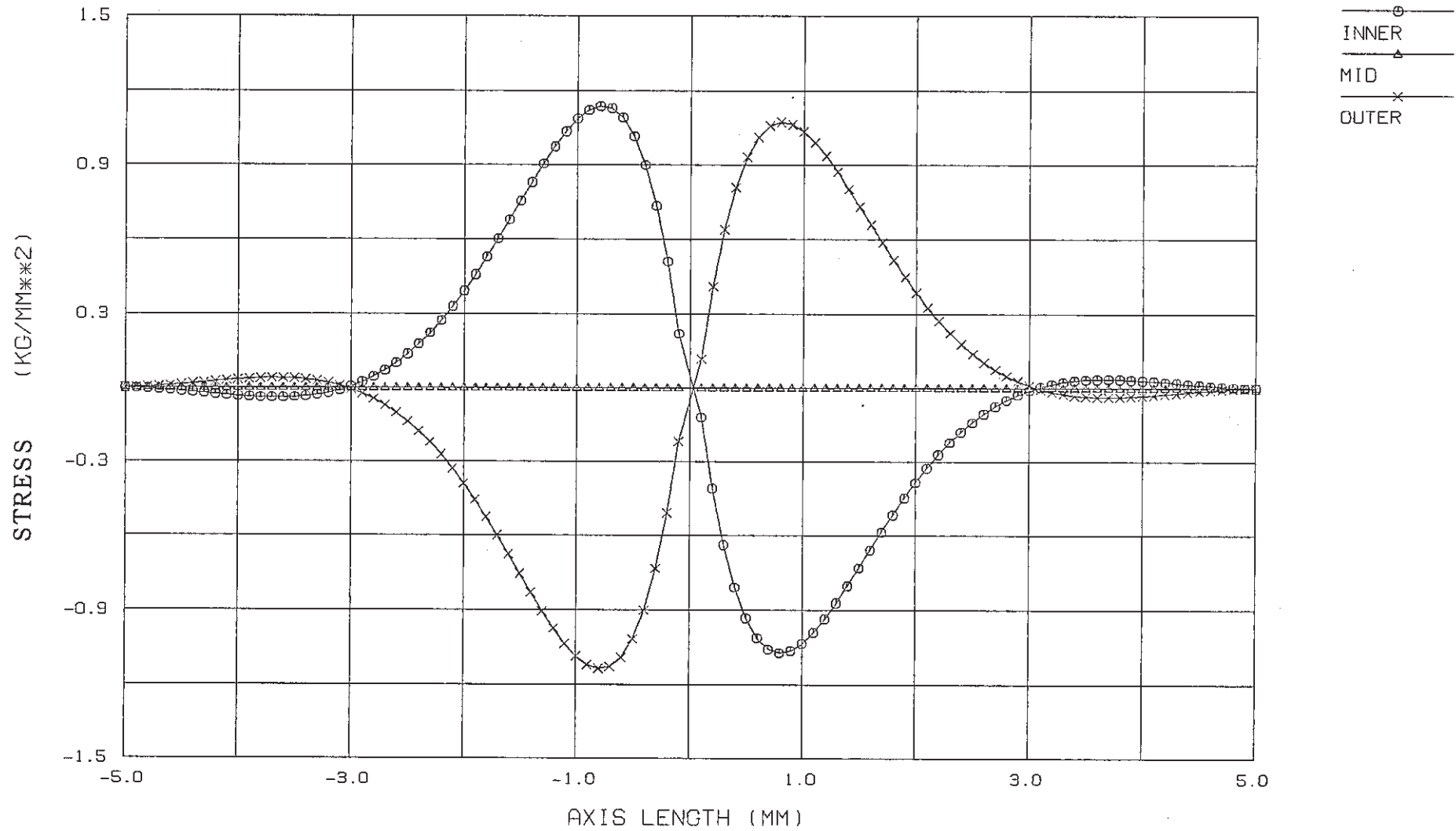
FINAS
STEP NO. 1



(QAX8 MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.7.3 QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)

FINAS
STEP NO. 1

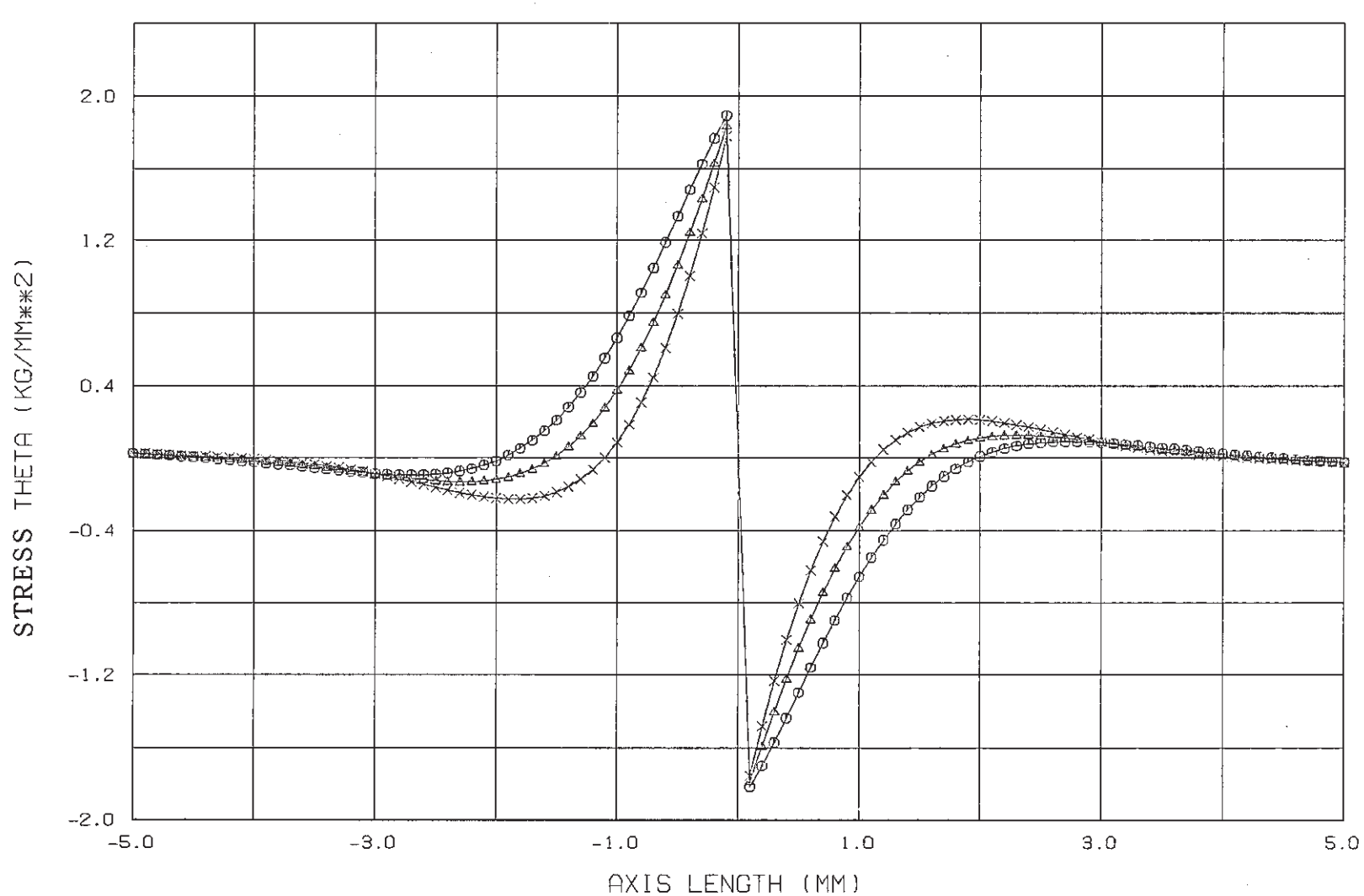


(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.8.1 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)

FINAS
STEP NO. 1

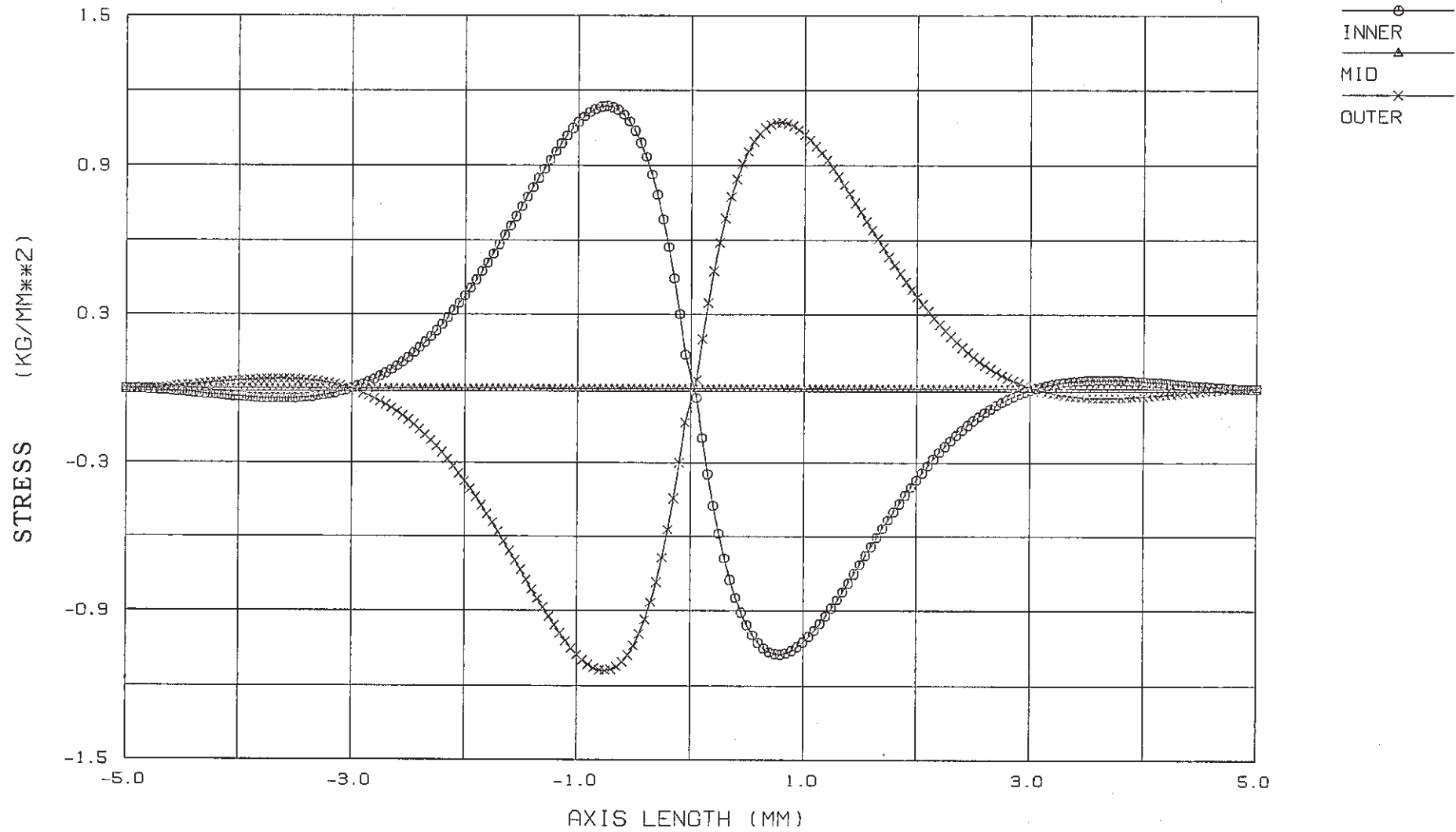
PNC-TN9410 88-153



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.8.2 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.1mm)

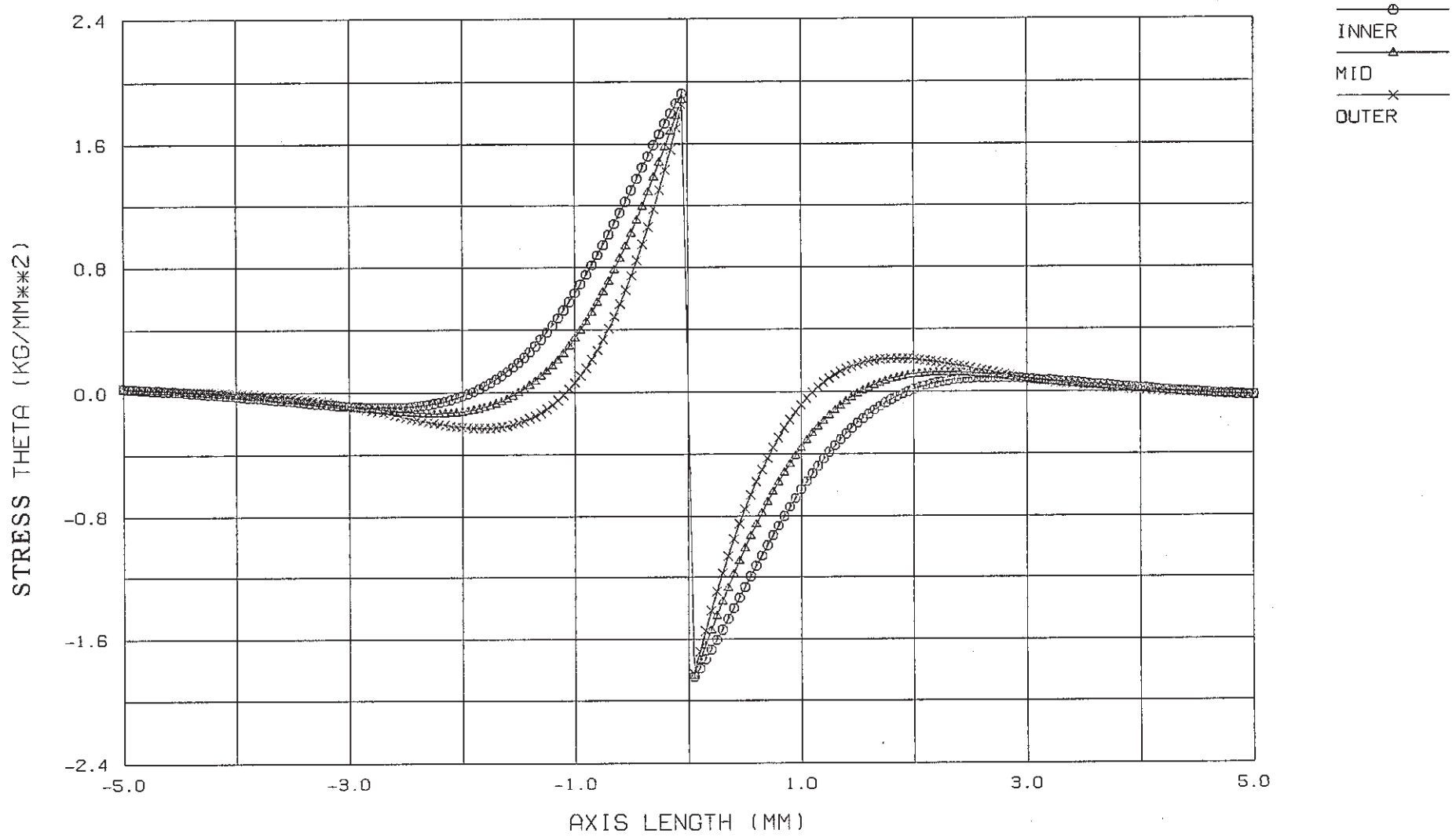
FINAS
STEP NO. 1



(CONIC2 MESH: 0.05 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.9.1 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾: 0.05mm)

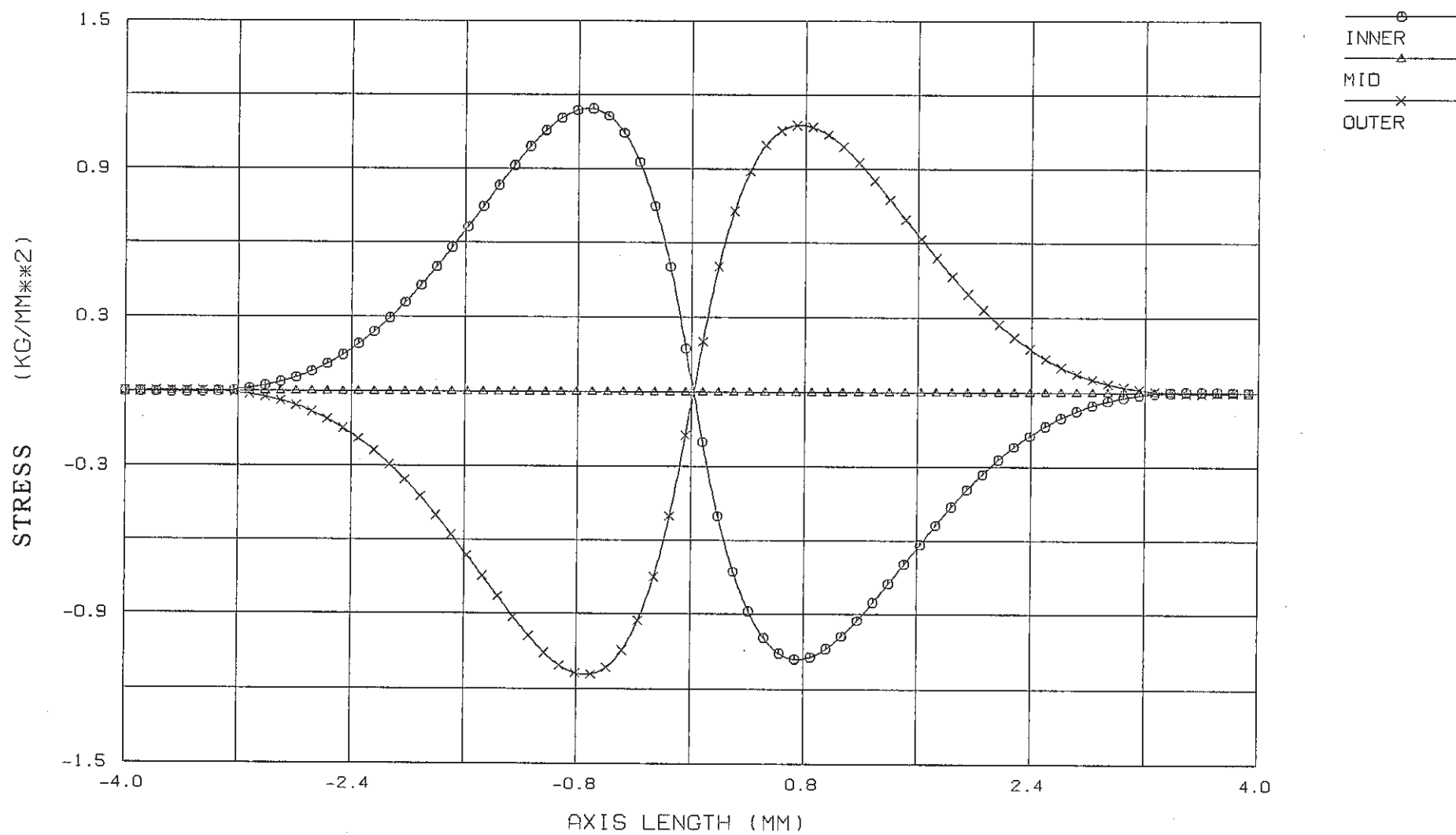
FINAS
STEP NO. 1



(CONIC2 MESH: 0.05 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.9.2 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.05mm)

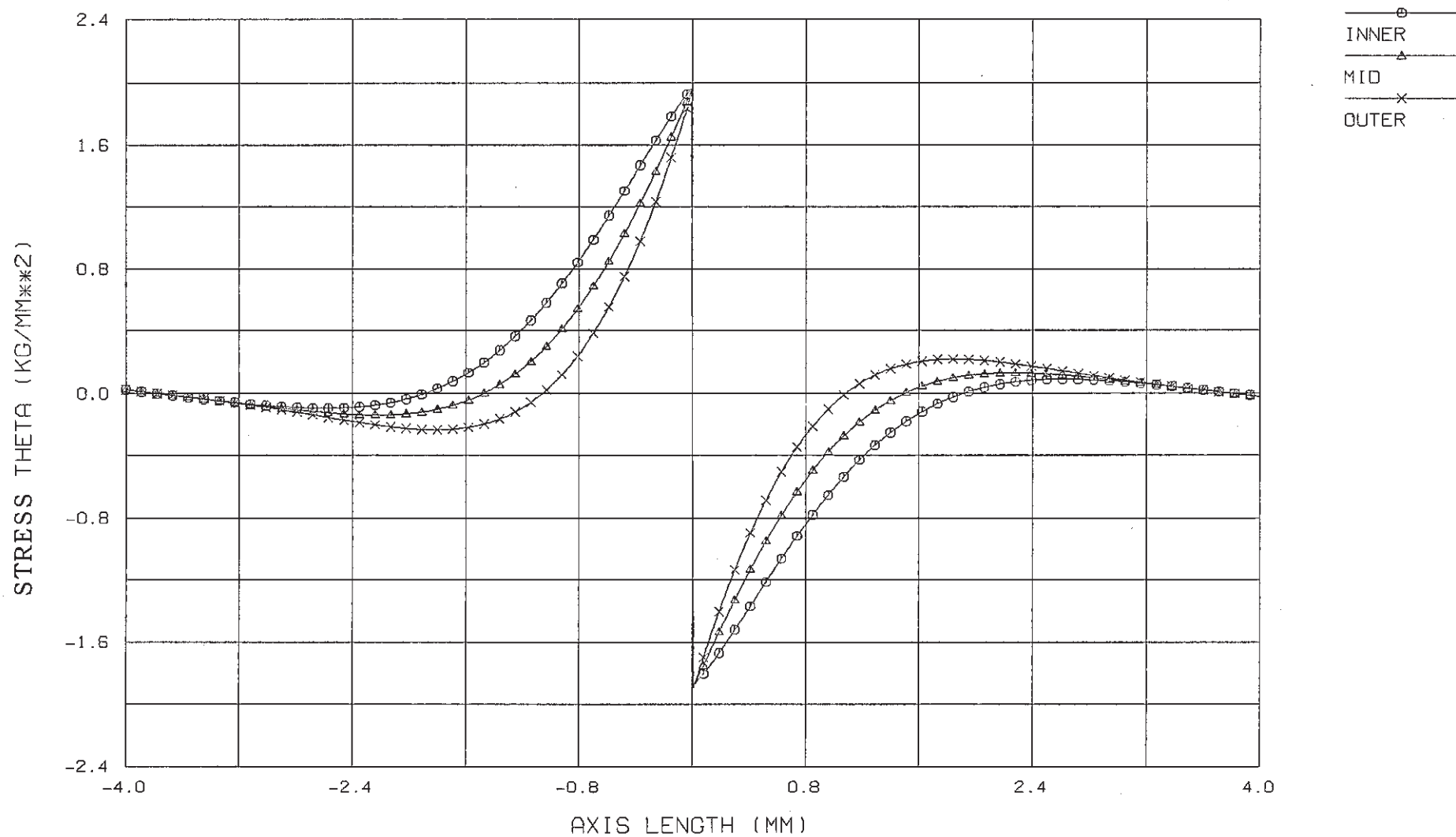
FINAS
STEP NO. 1



(CONIC2 MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.10.1 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)

FINAS
STEP NO. 1

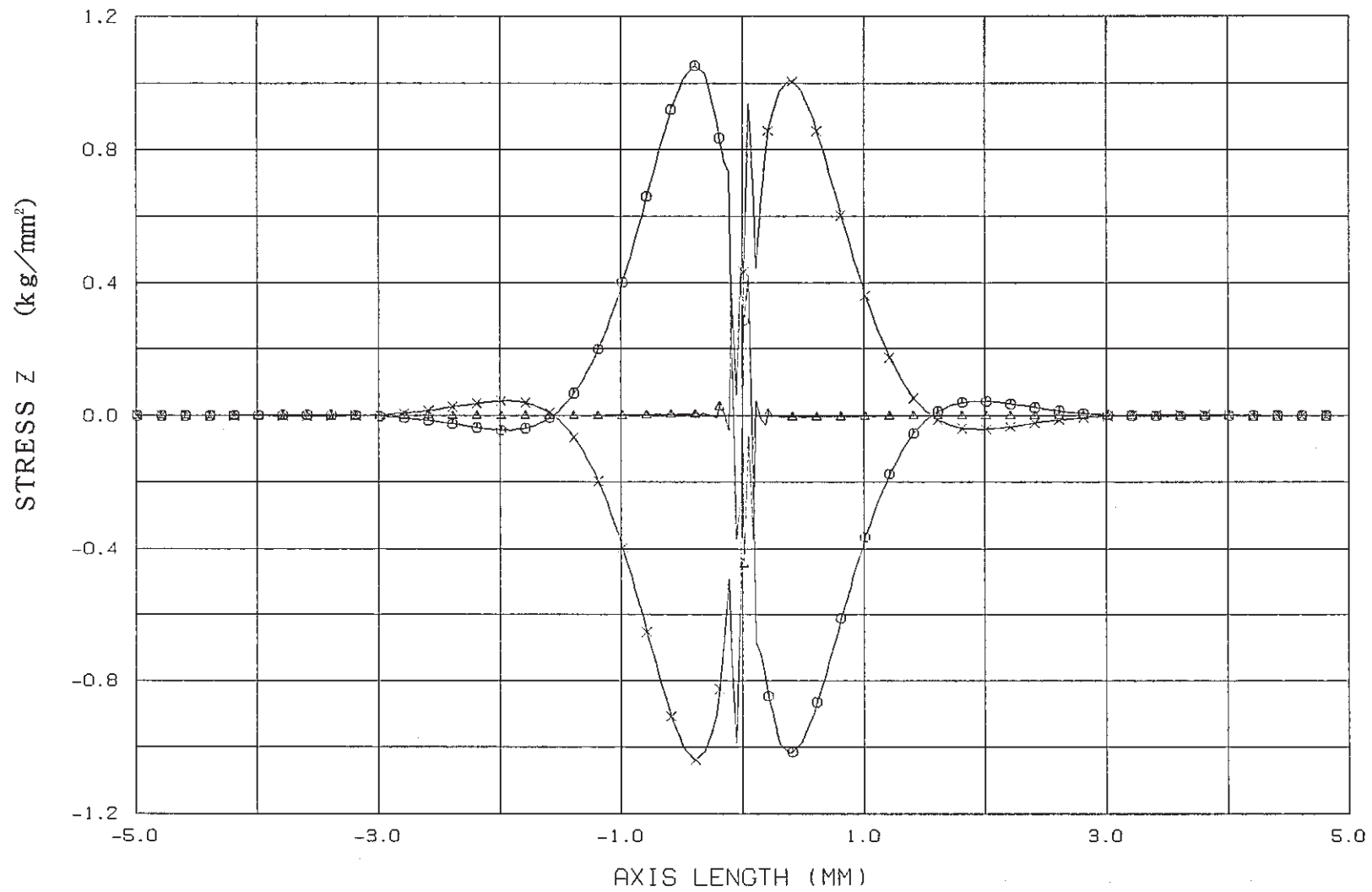


(CONIC2 MESH: 0.01 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図2.10.2 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(メッシュ巾:0.01mm)

FINAS

STEP NO. 1

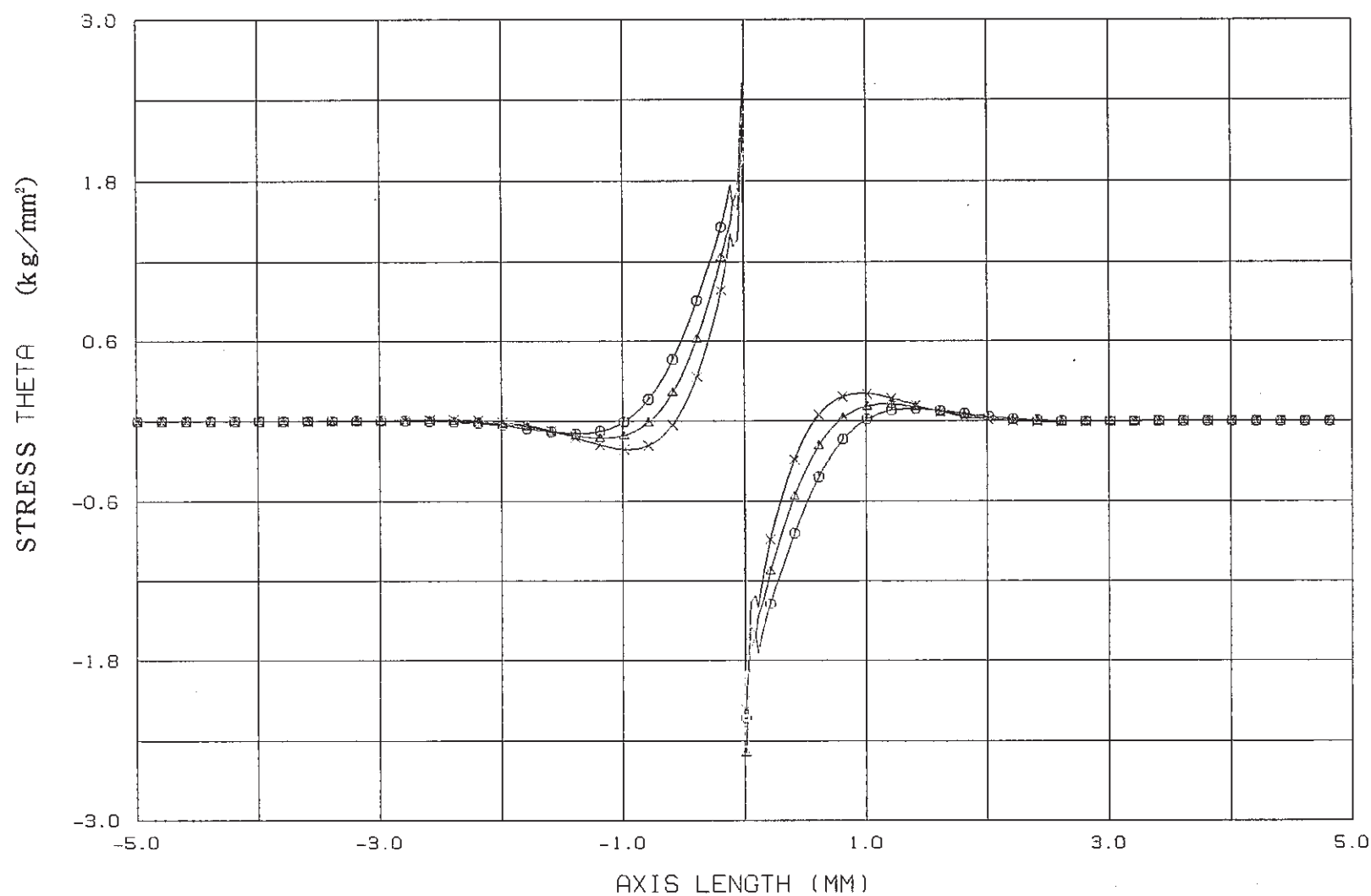


FINAS XYLOT (QAX8-MESH010)

付図2.11.1 QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(被覆管肉厚:0.1mm)

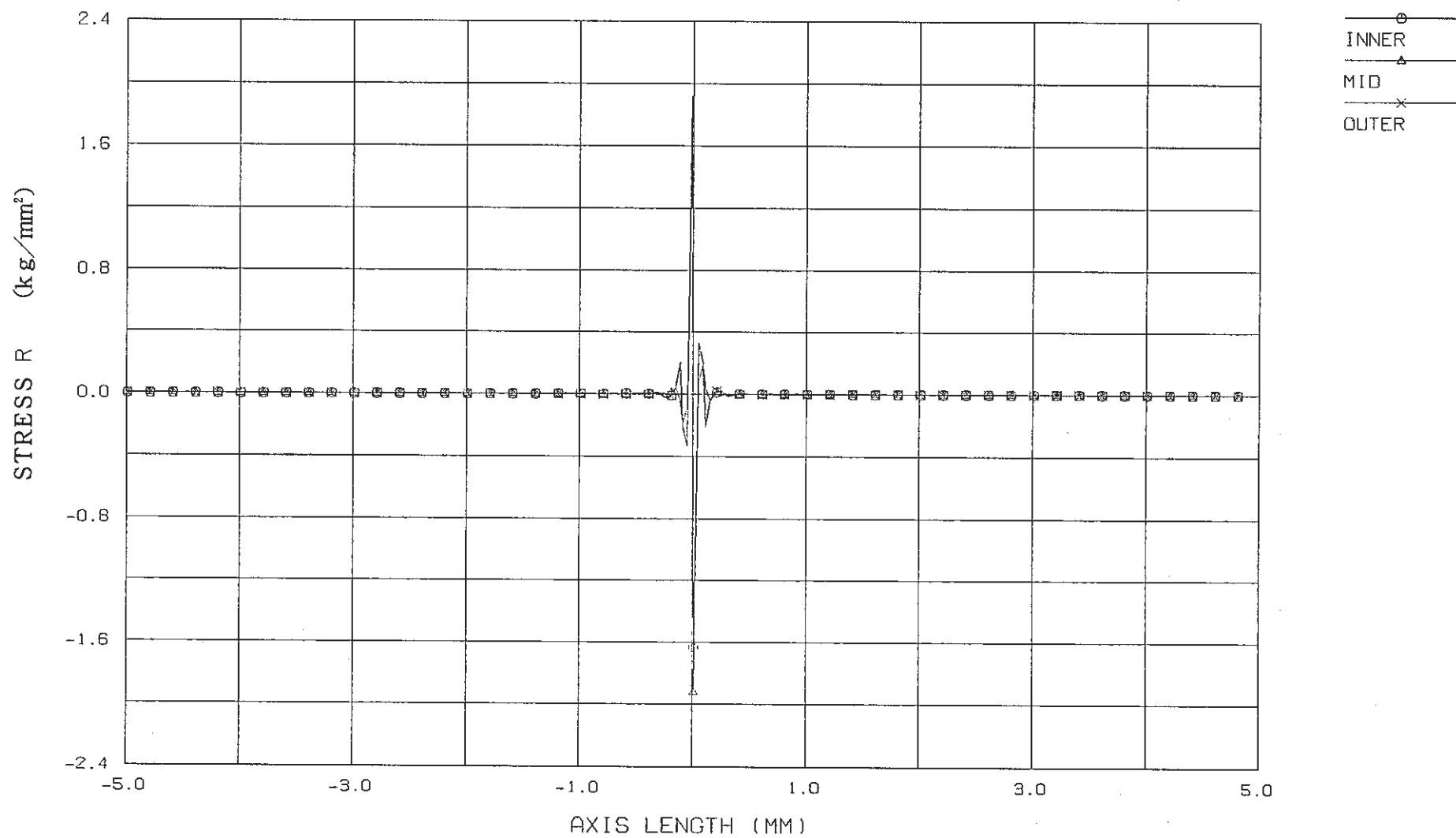
○ INNER
 ▲ MID
 × OUTER

FINAS
STEP NO. 1



FINAS XYPLOT (QAX8-MESH010)

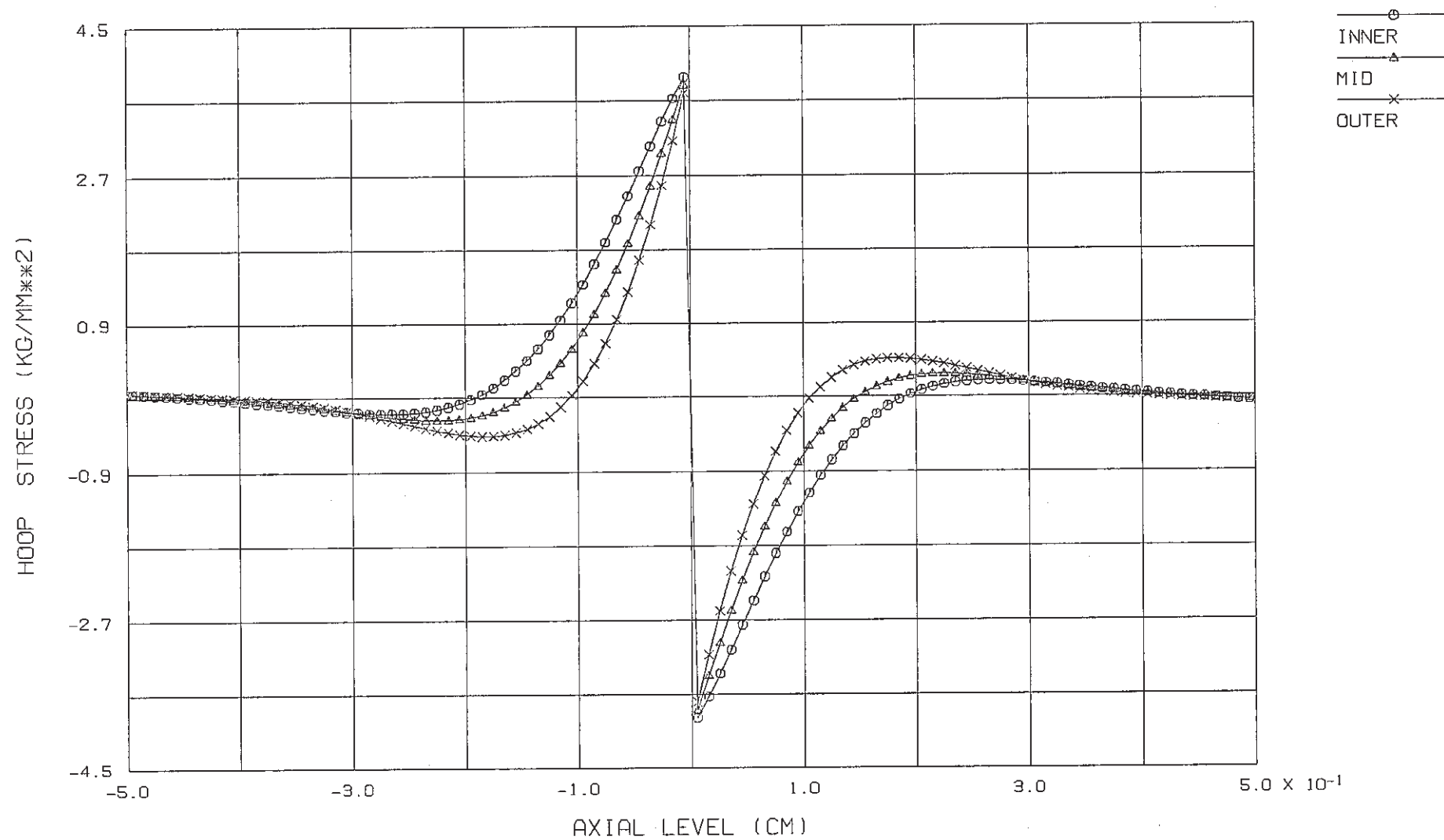
付図2.11.2 QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(被覆管肉厚:0.1mm)

FINAS
STEP NO. 1

FINAS XYPLOT (QAX8-MESH010)

付図2.11.3 QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(被覆管肉厚: 0.1mm)

FINAS
STEP NO. 1

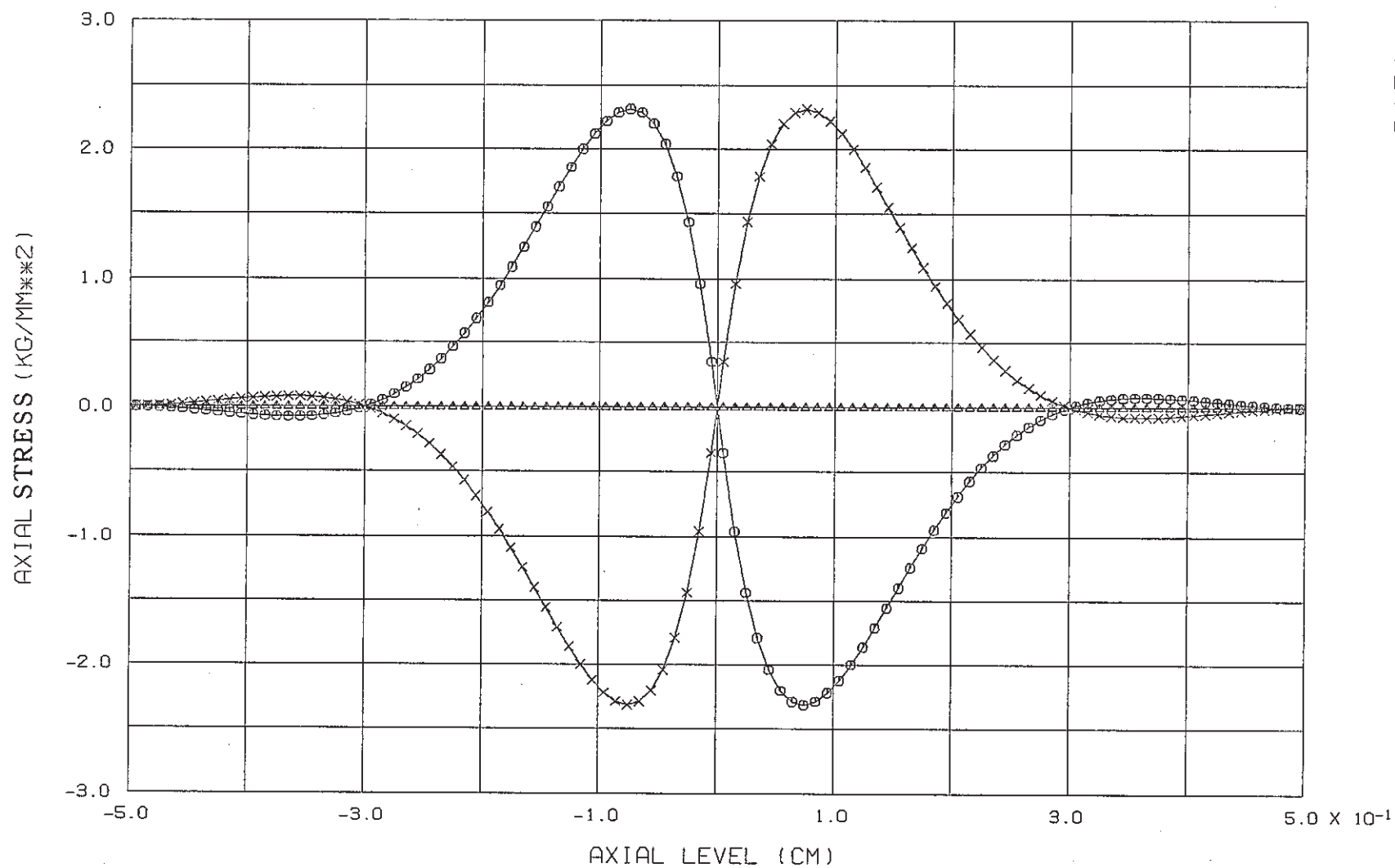


(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.1.1 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射初期)

FINAS

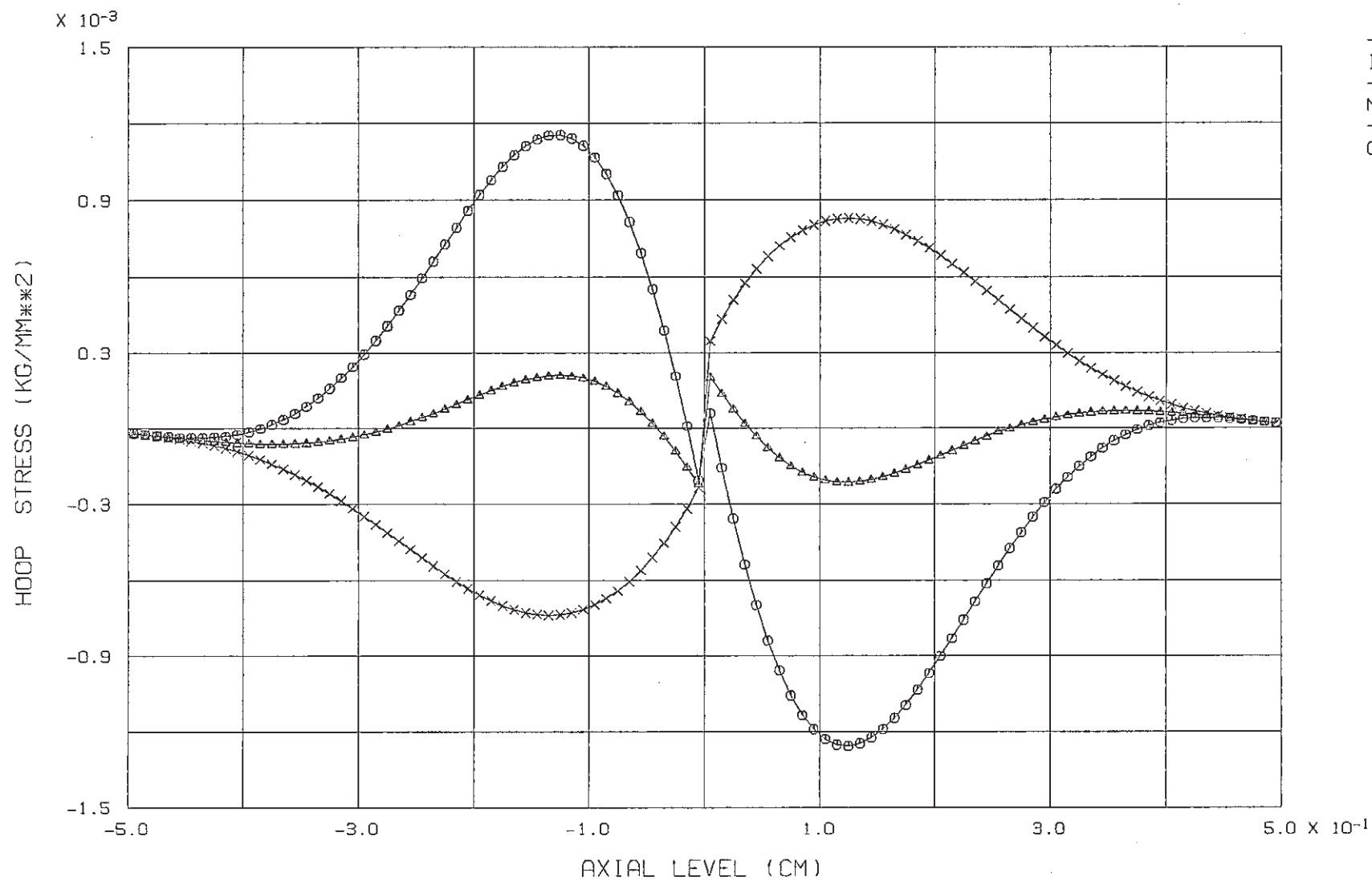
STEP NO. 1



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.1.2 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射初期)

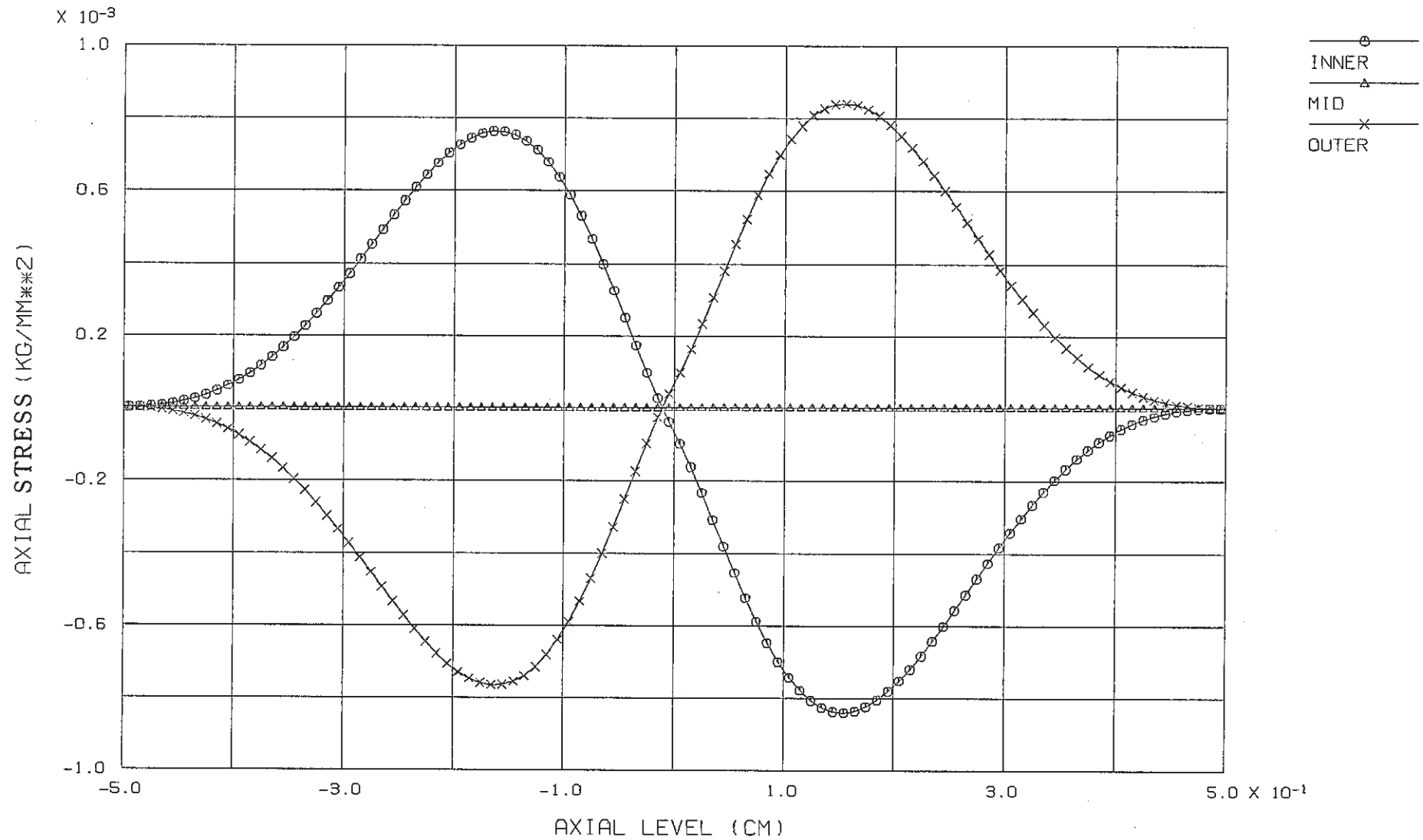
FINAS
STEP NO. 16



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.2.1 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)

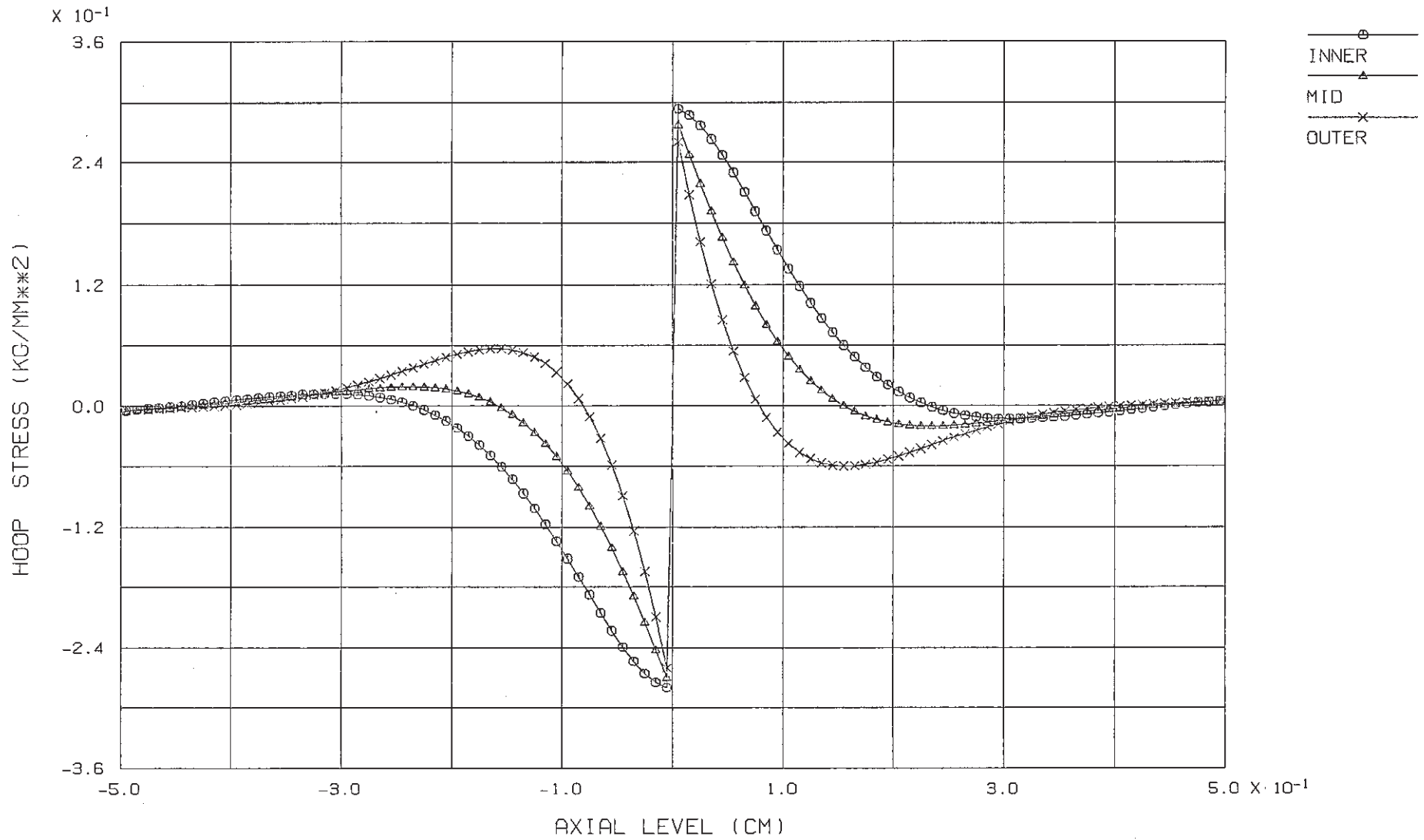
FINAS
STEP NO. 16



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.2.2 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)

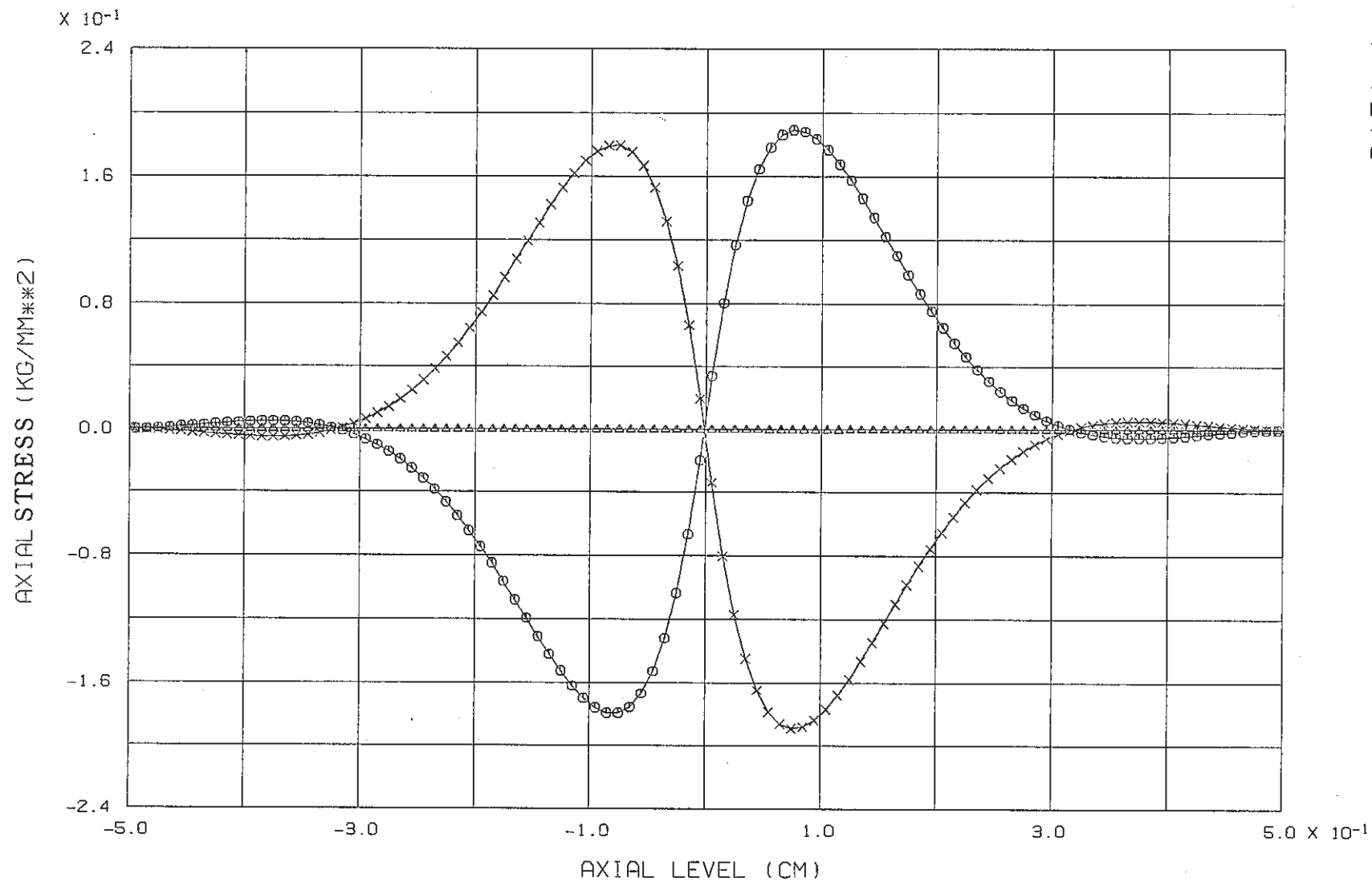
FINAS
STEP NO. 34



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.3.1 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)

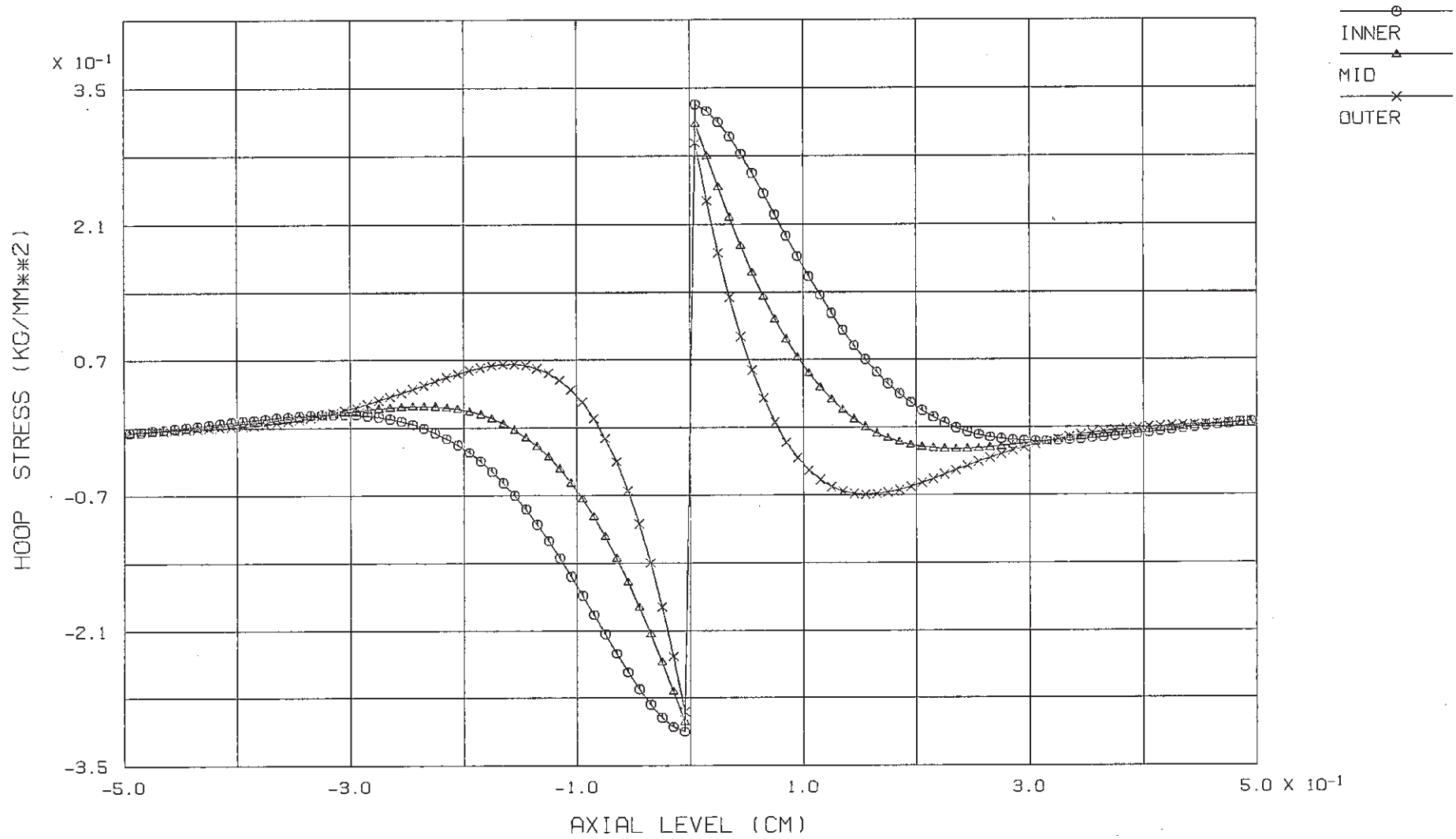
FINAS
STEP NO. 34



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.3.2 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射中期)

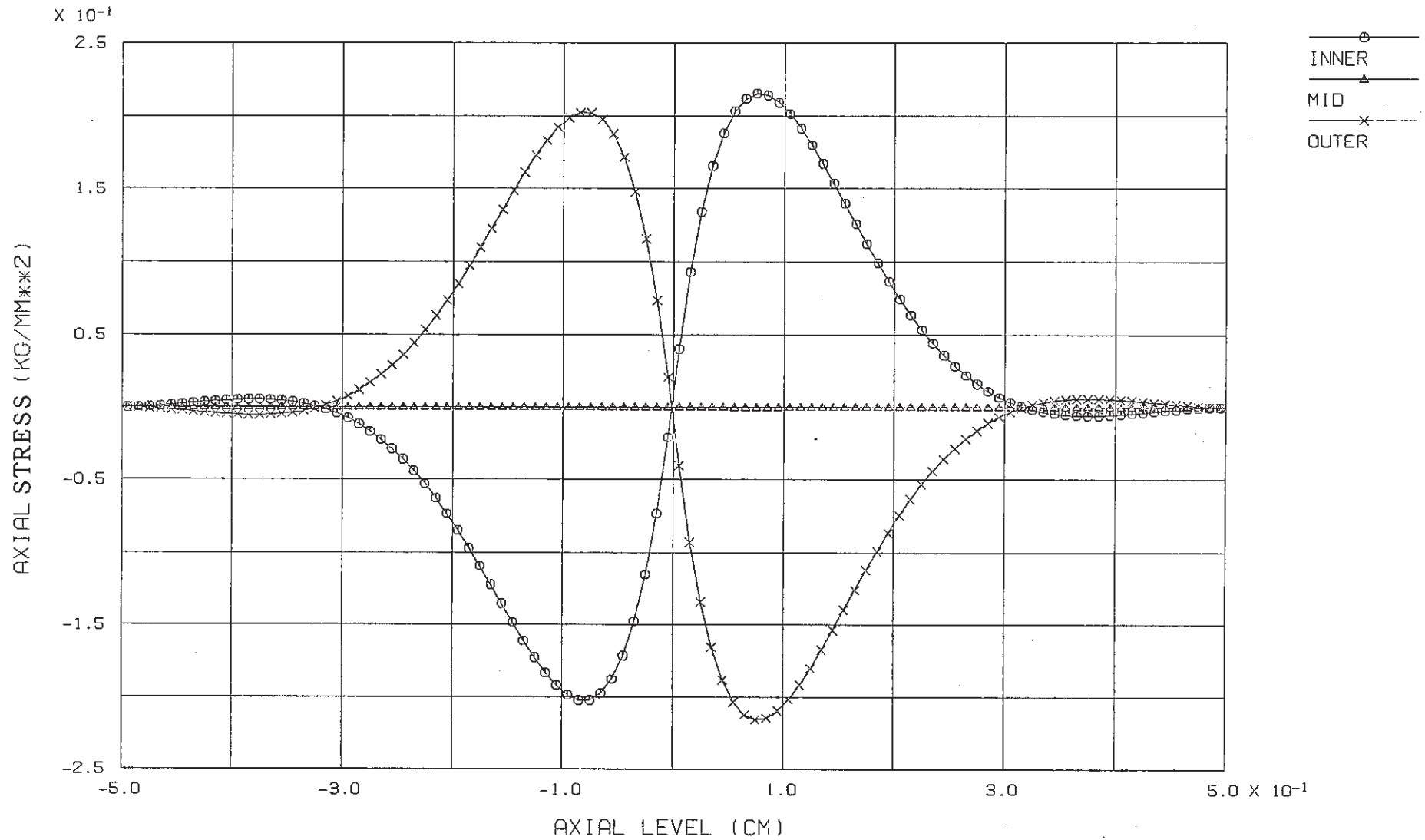
FINAS
STEP NO. 40



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.4.1 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)

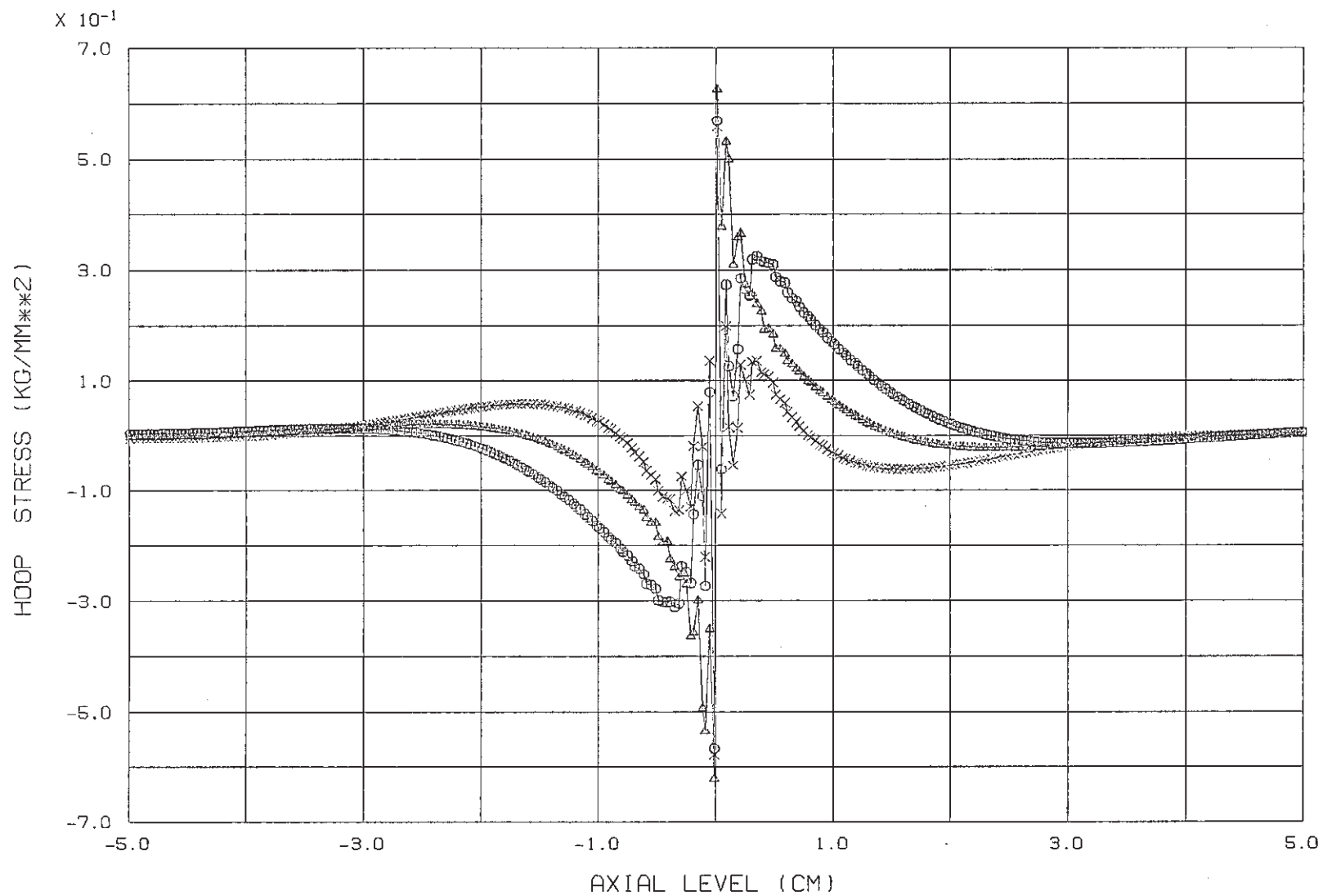
FINAS
STEP NO. 40



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.4.2 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)

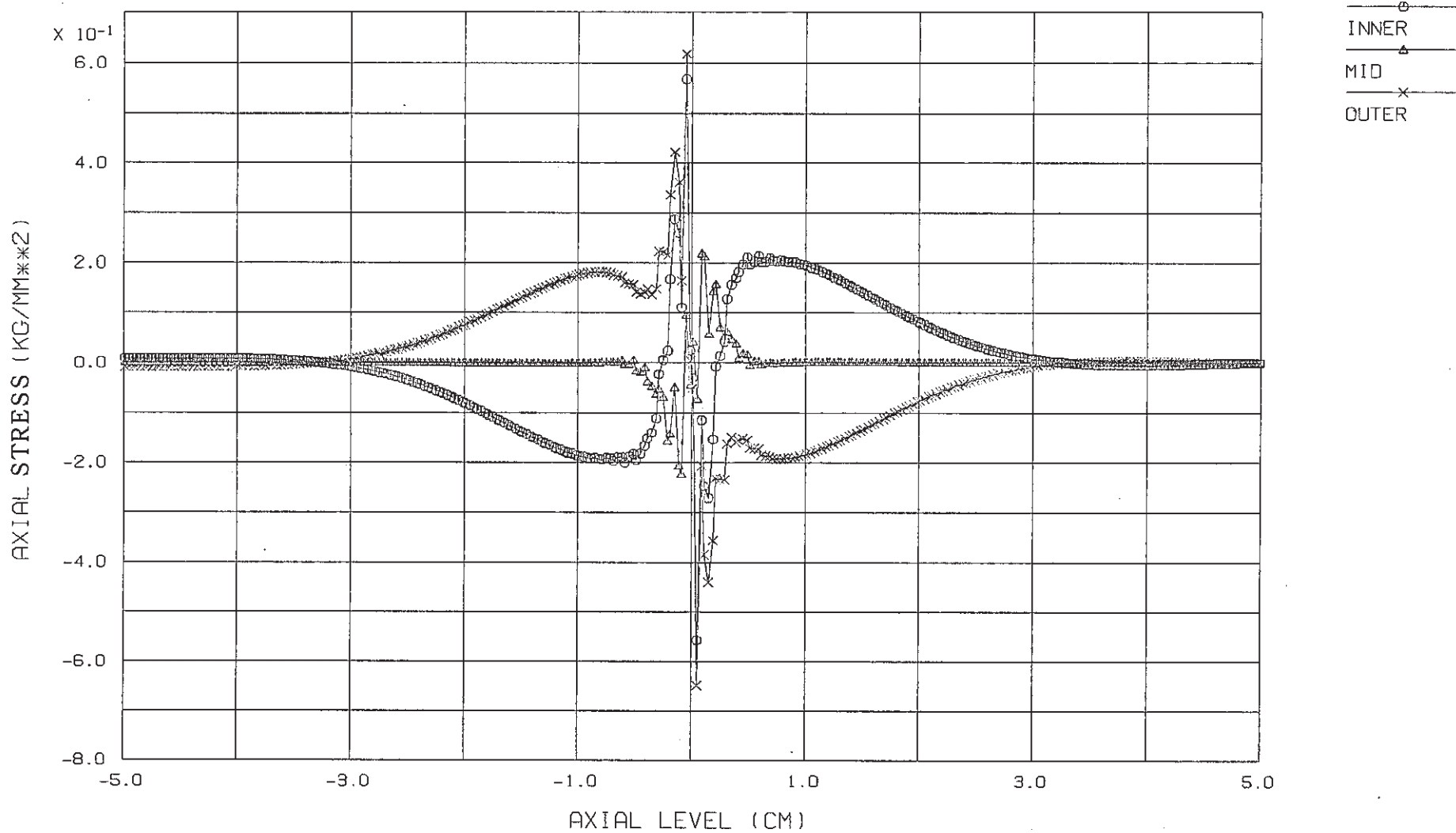
FINAS
STEP NO. 40



(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.5.1 QAX8を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)

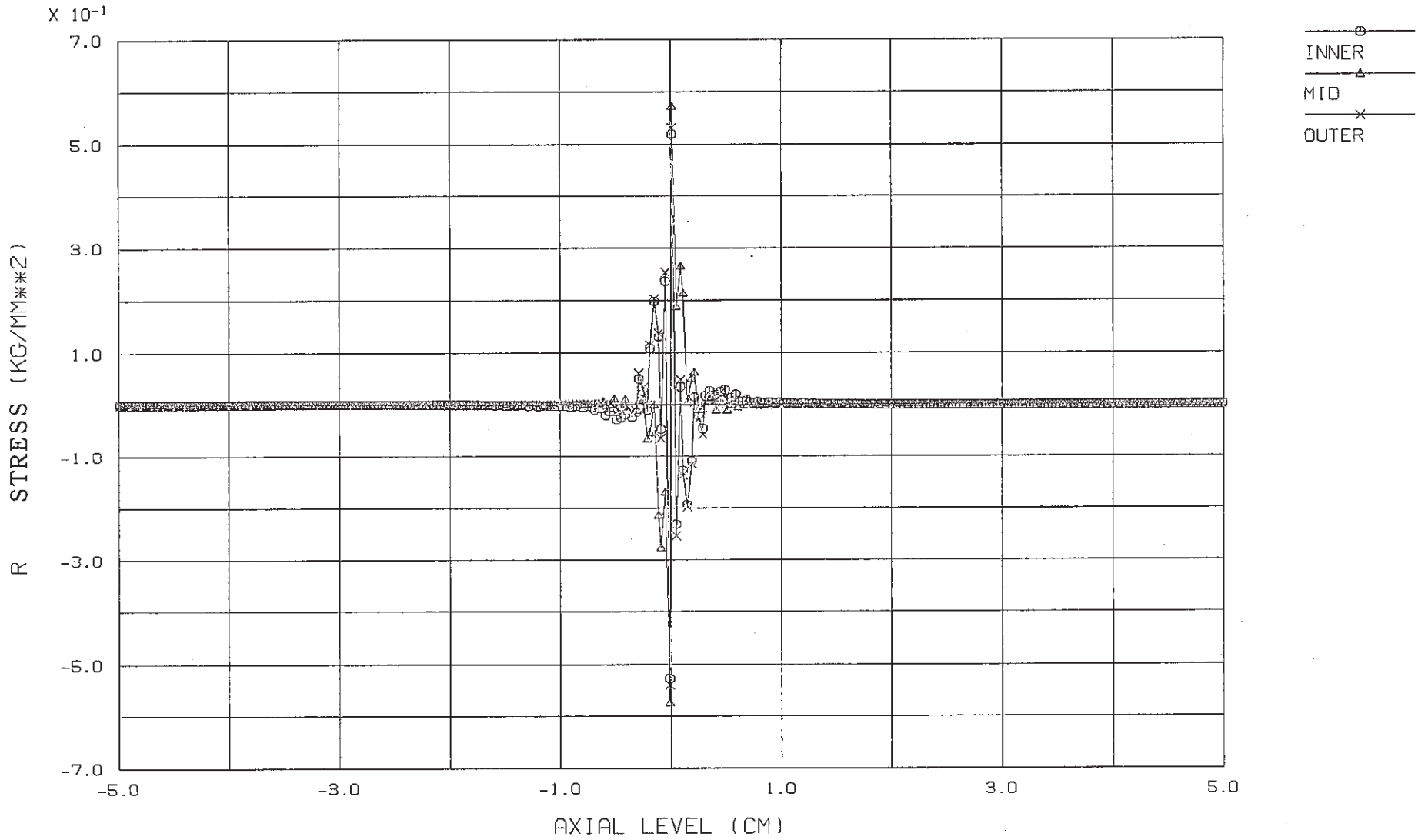
FINAS
STEP NO. 40



(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.5.2 QAX8を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)

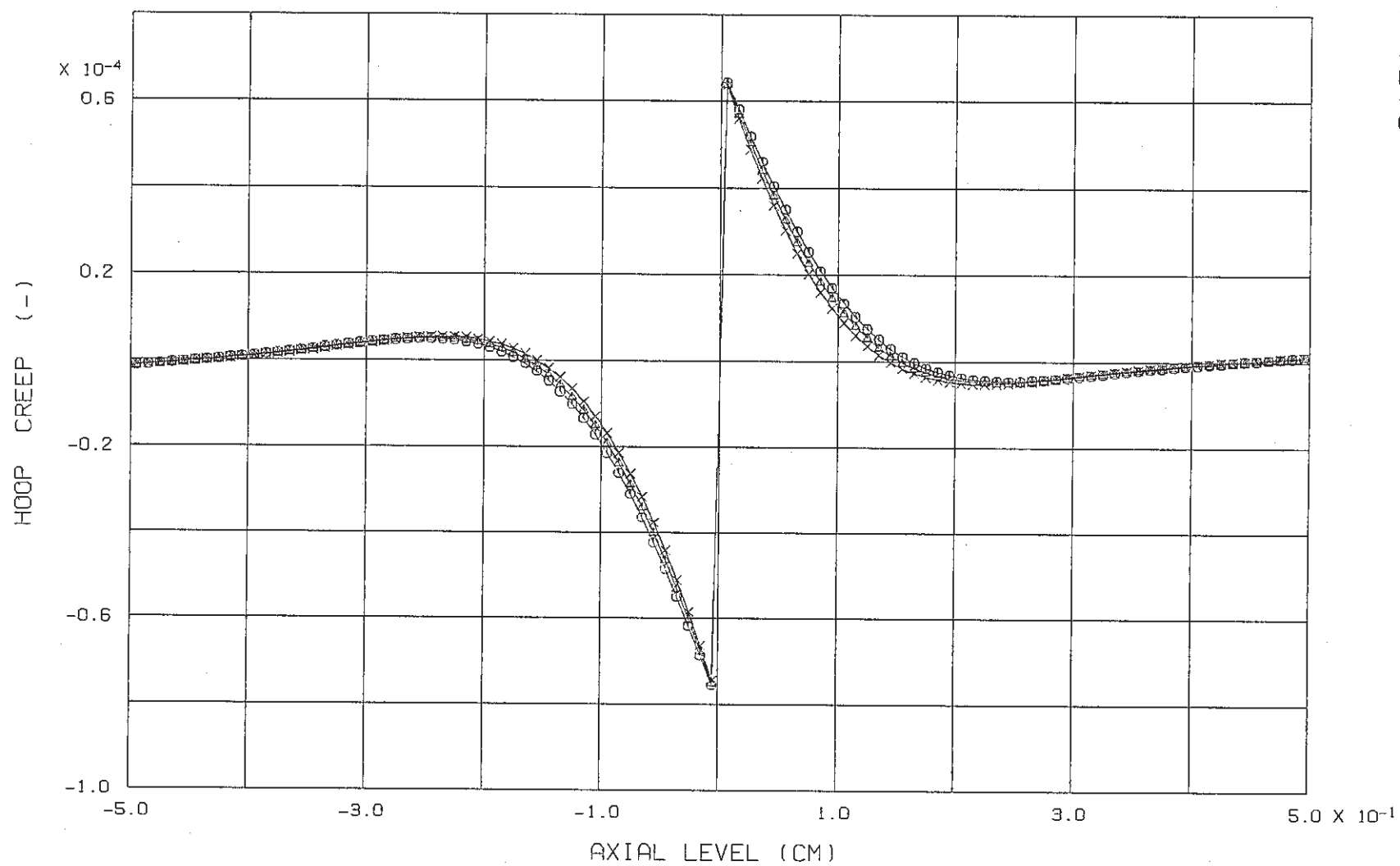
FINAS
STEP NO. 40



(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.5.3 QAX8を用いた肉厚方向応力解析結果の軸方向分布(照射末期)

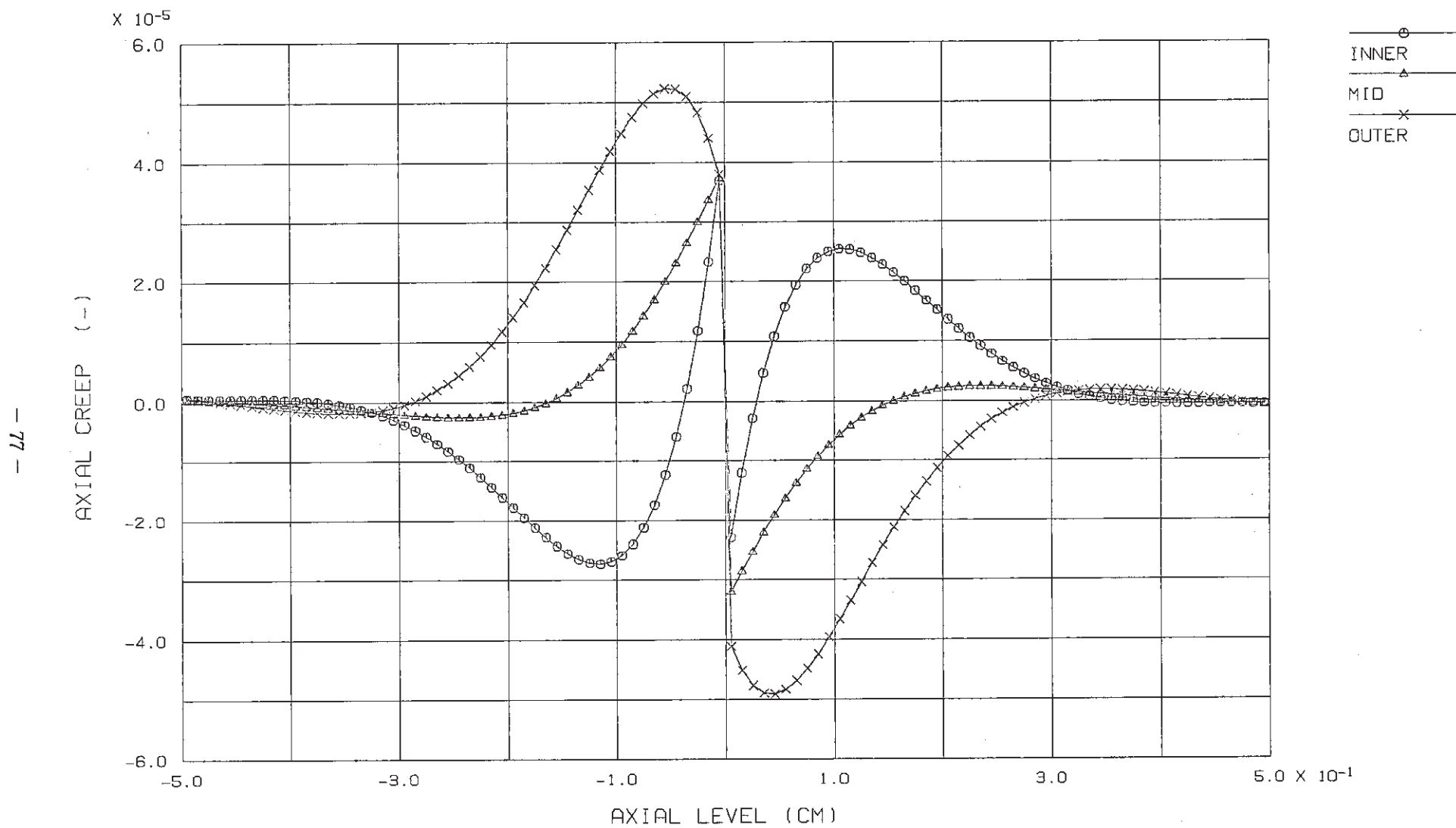
FINAS
STEP NO. 40



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

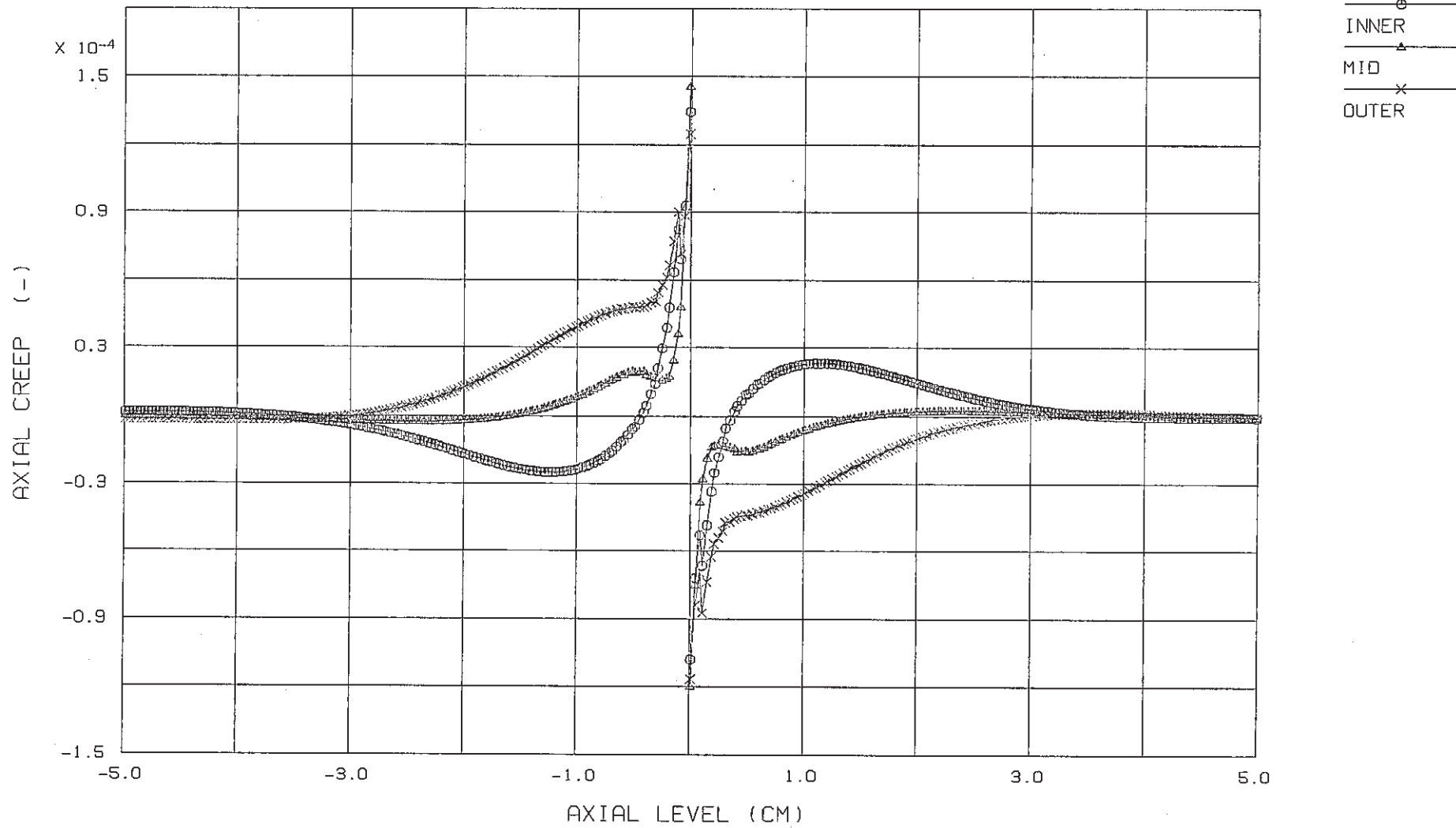
付図3.6.1 CONIC2を用いた周方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)

FINAS
STEP NO. 40



(CONIC2 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

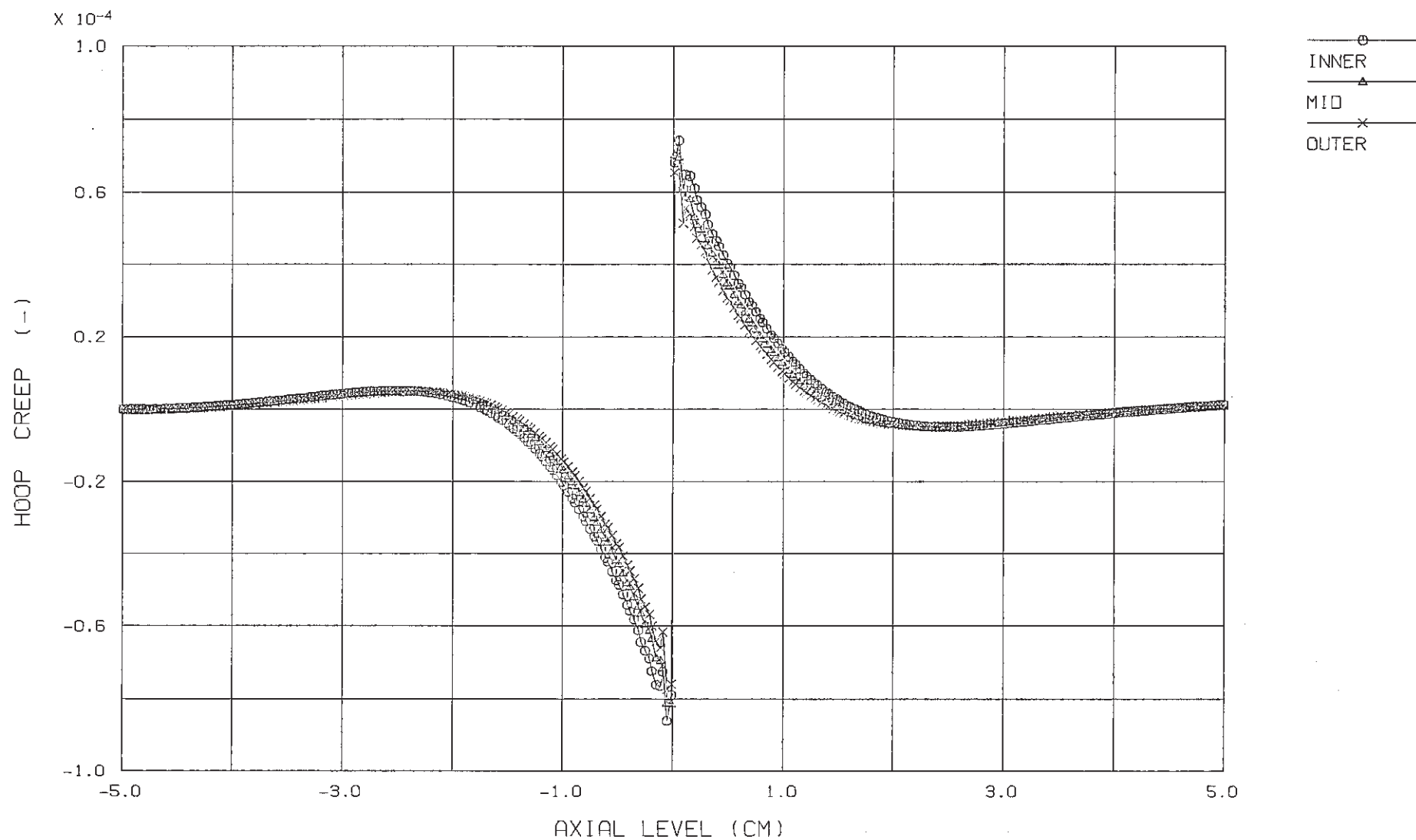
付図3.6.2 CONIC2を用いた軸方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)



(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.7.1 QAX8を用いた軸方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)

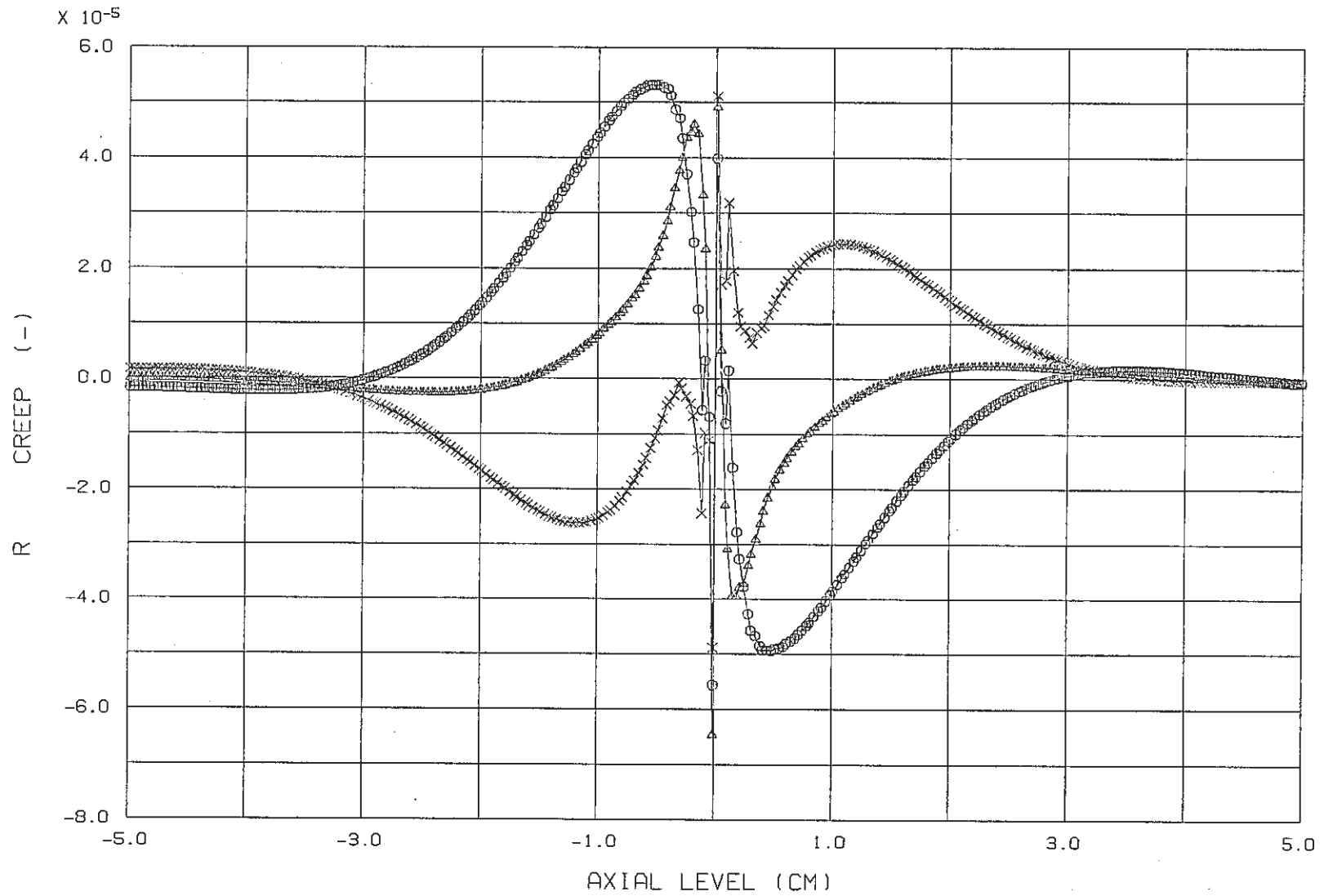
FINAS
STEP NO. 40



(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

付図3.7.2 QAX8を用いた周方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)

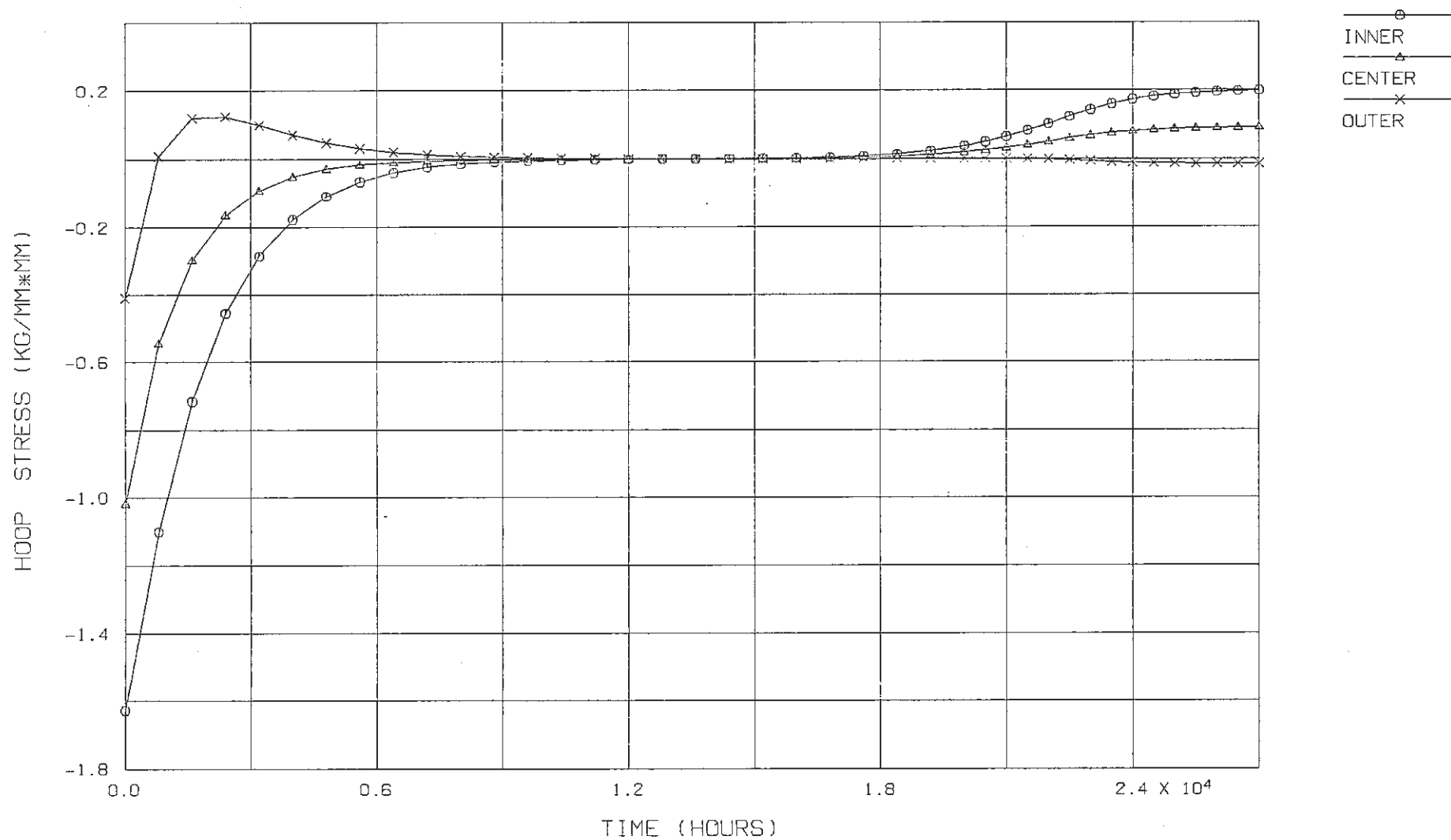
FINAS
STEP NO. 40



(QAX8 MESH: 0.10 MM, ROUT: 4.15 MM, RIN: 3.75 MM)

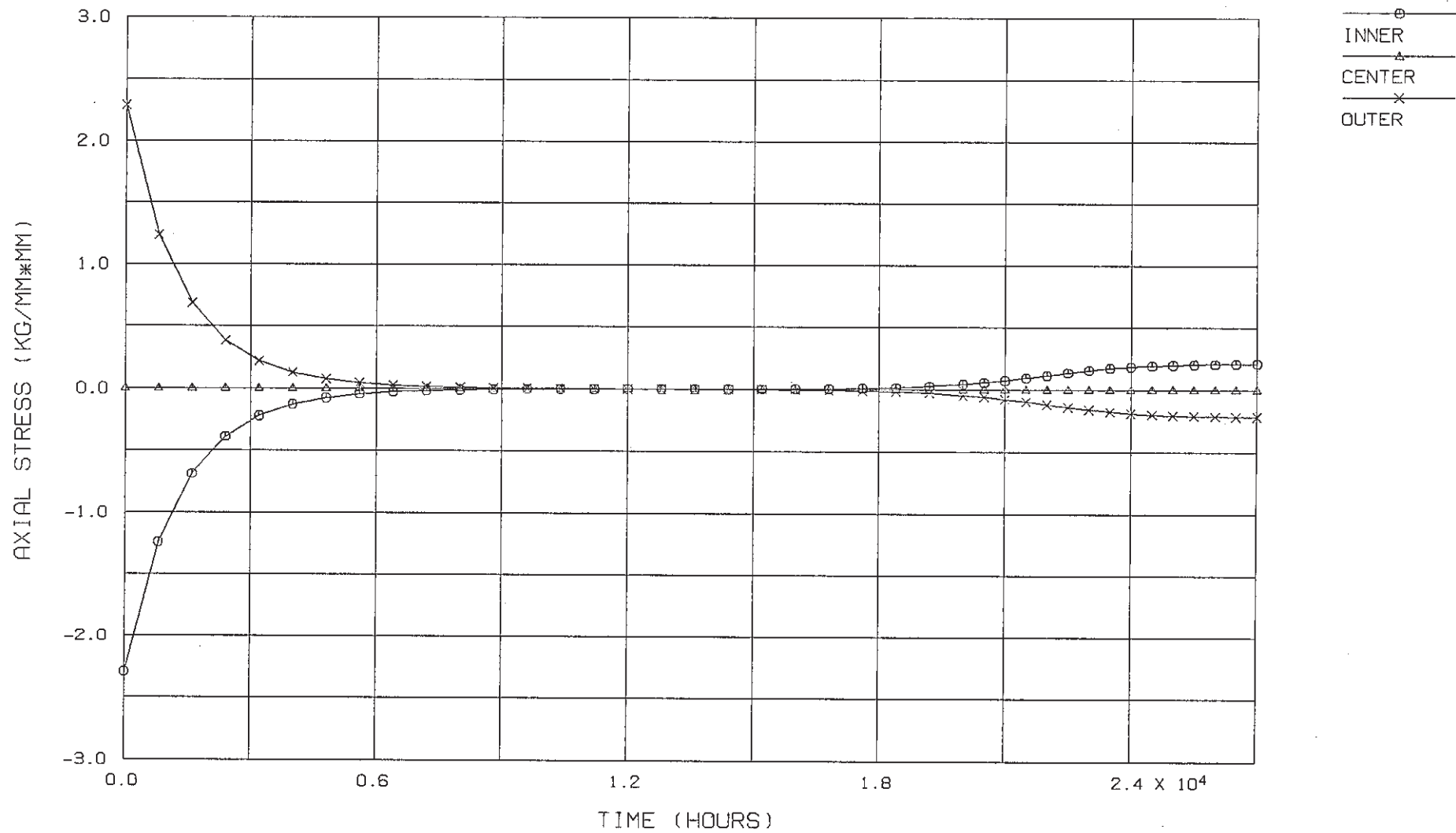
付図3.7.3 QAX8を用いた肉厚方向クリープ歪解析結果の軸方向分布(照射末期)

FINAS



TIME HISTORY (CONE 6801) CONIC2

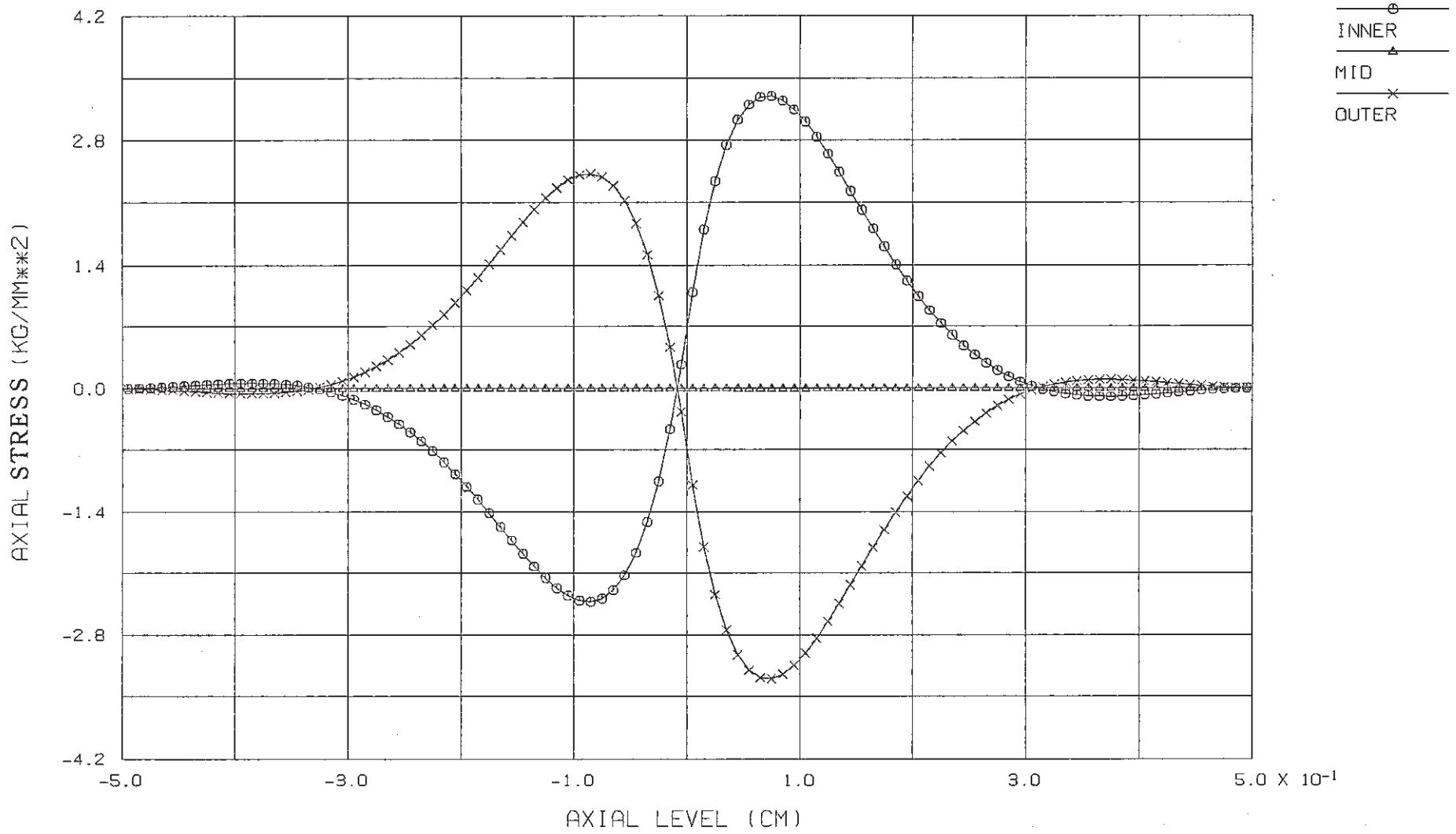
付図3.8.1 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の経時変化



TIME HISTORY (CONE 6801) CONIC2

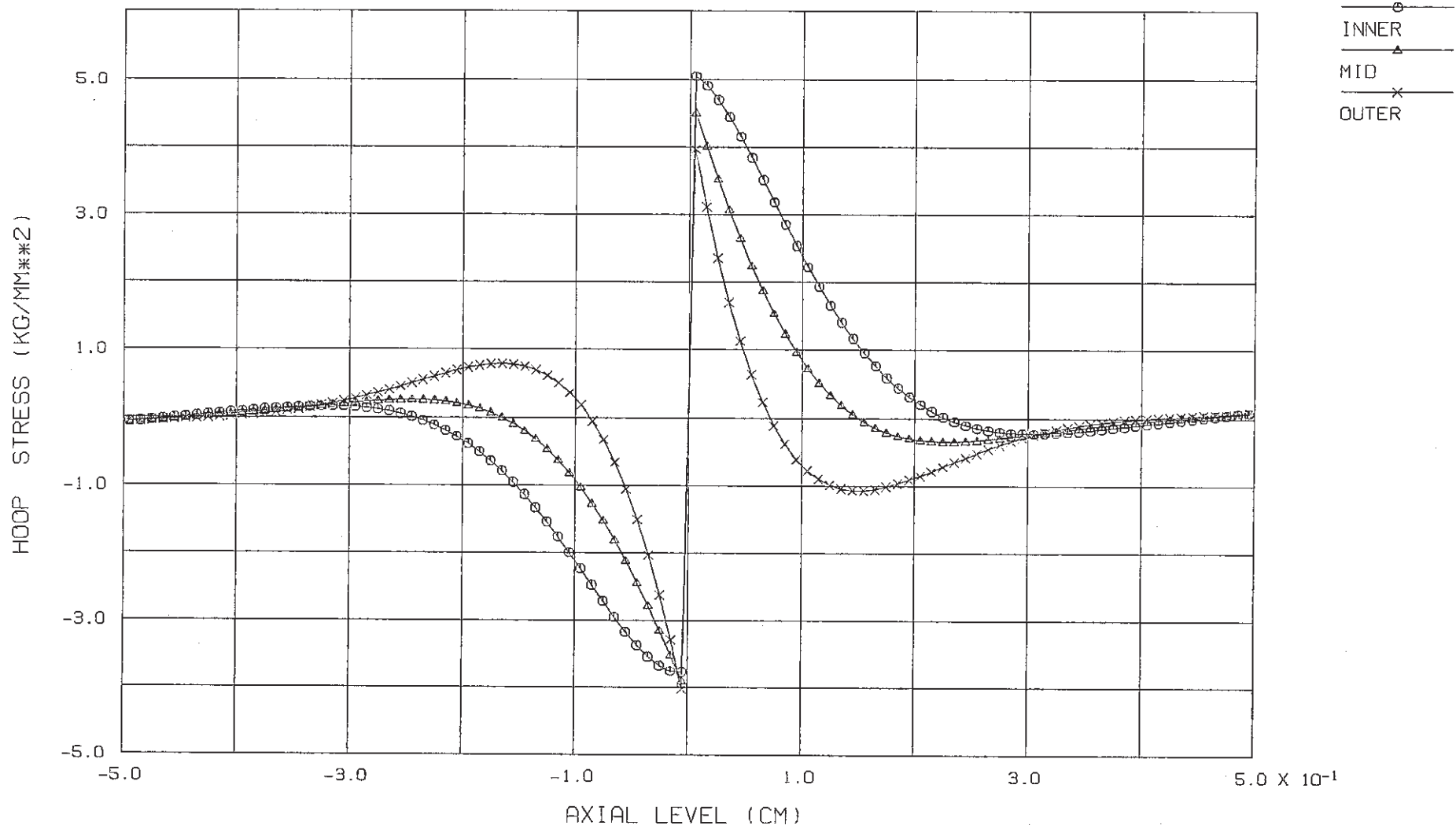
付図3.8.2 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の経時変化

FINAS
STEP NO. 40



L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C), CONIC2

付図4.1 CONIC2を用いた軸方向応力解析結果の軸方向分布(保守側条件)

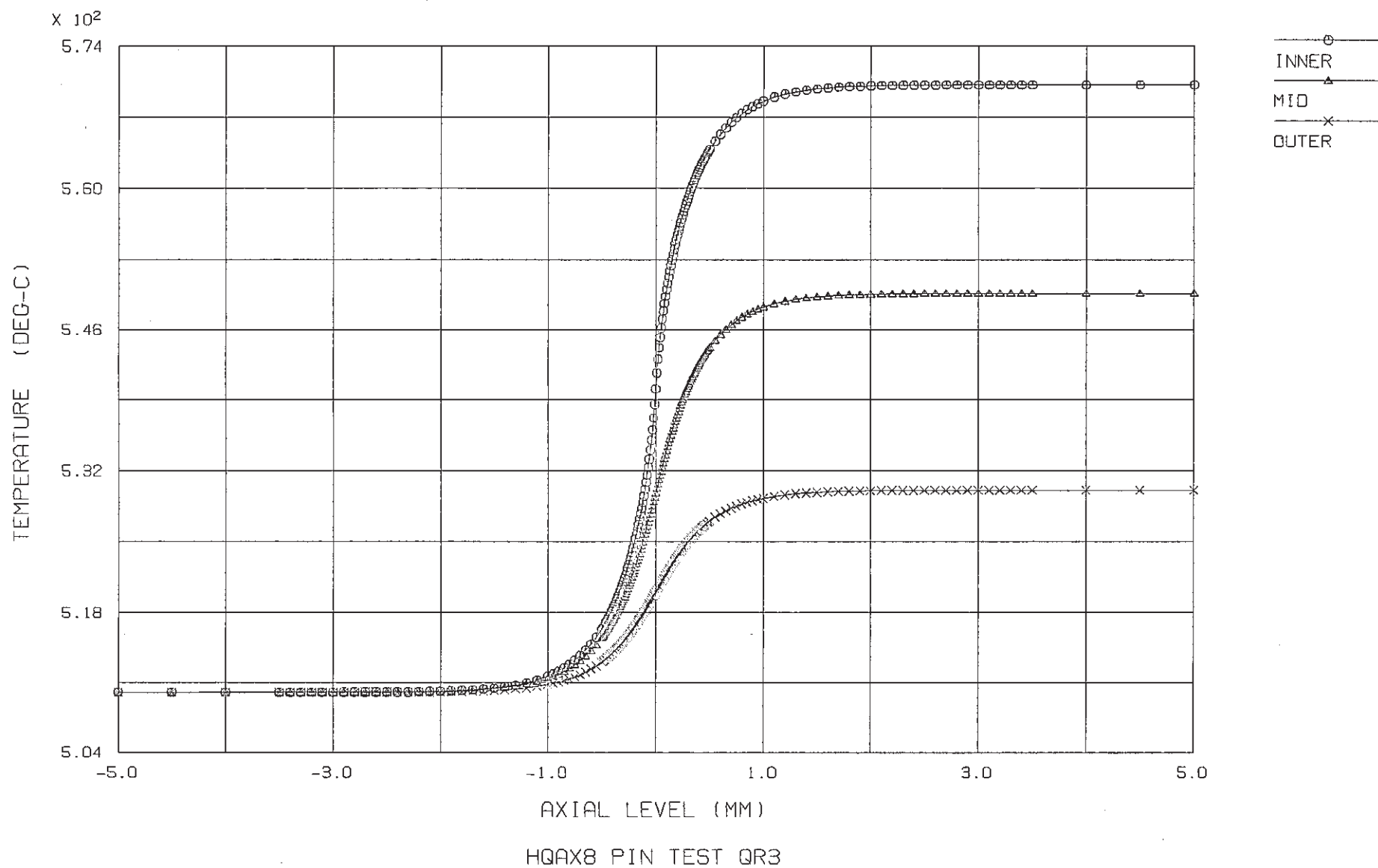


L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C),

CONIC2

付図4.2 CONIC2を用いた周方向応力解析結果の軸方向分布(保守側条件)

FINAS
STEP NO. 1



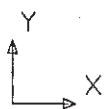
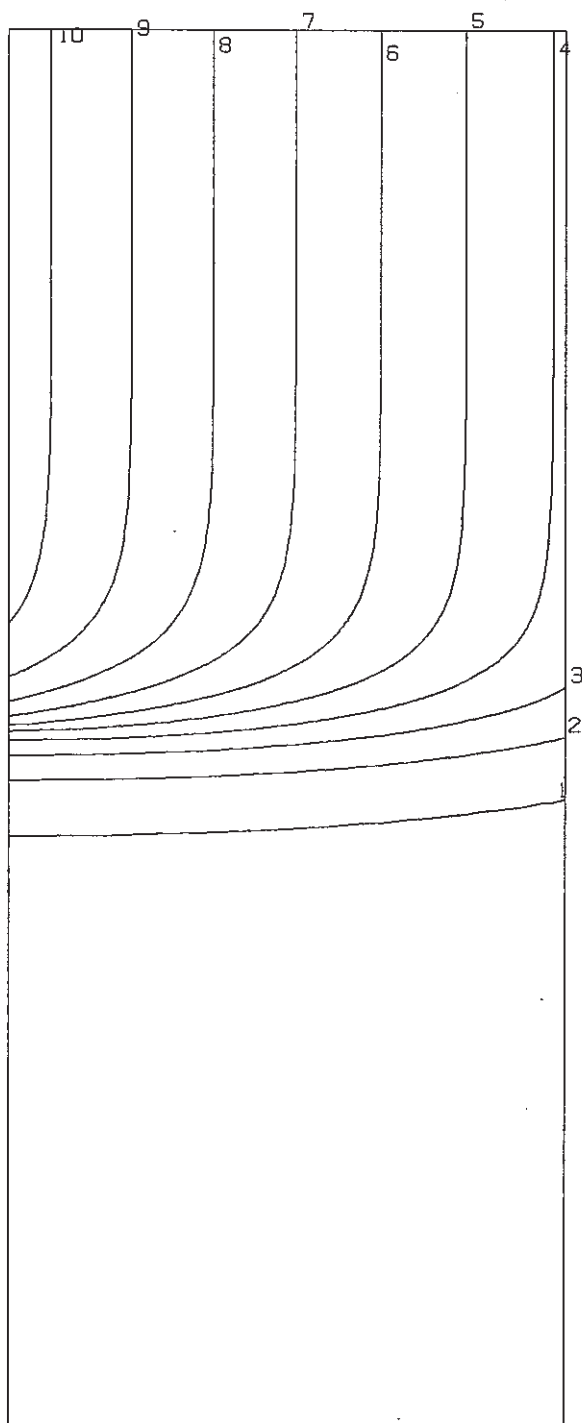
付図5.1 二次元熱伝導解析による軸方向温度分布解析結果

FINAS

TEMPERATURE

CONTOUR VALUES

1	512.9995
2	518.9992
3	524.9990
4	530.9988
5	536.9985
6	542.9983
7	548.9980
8	554.9978
9	560.9975
10	566.9973



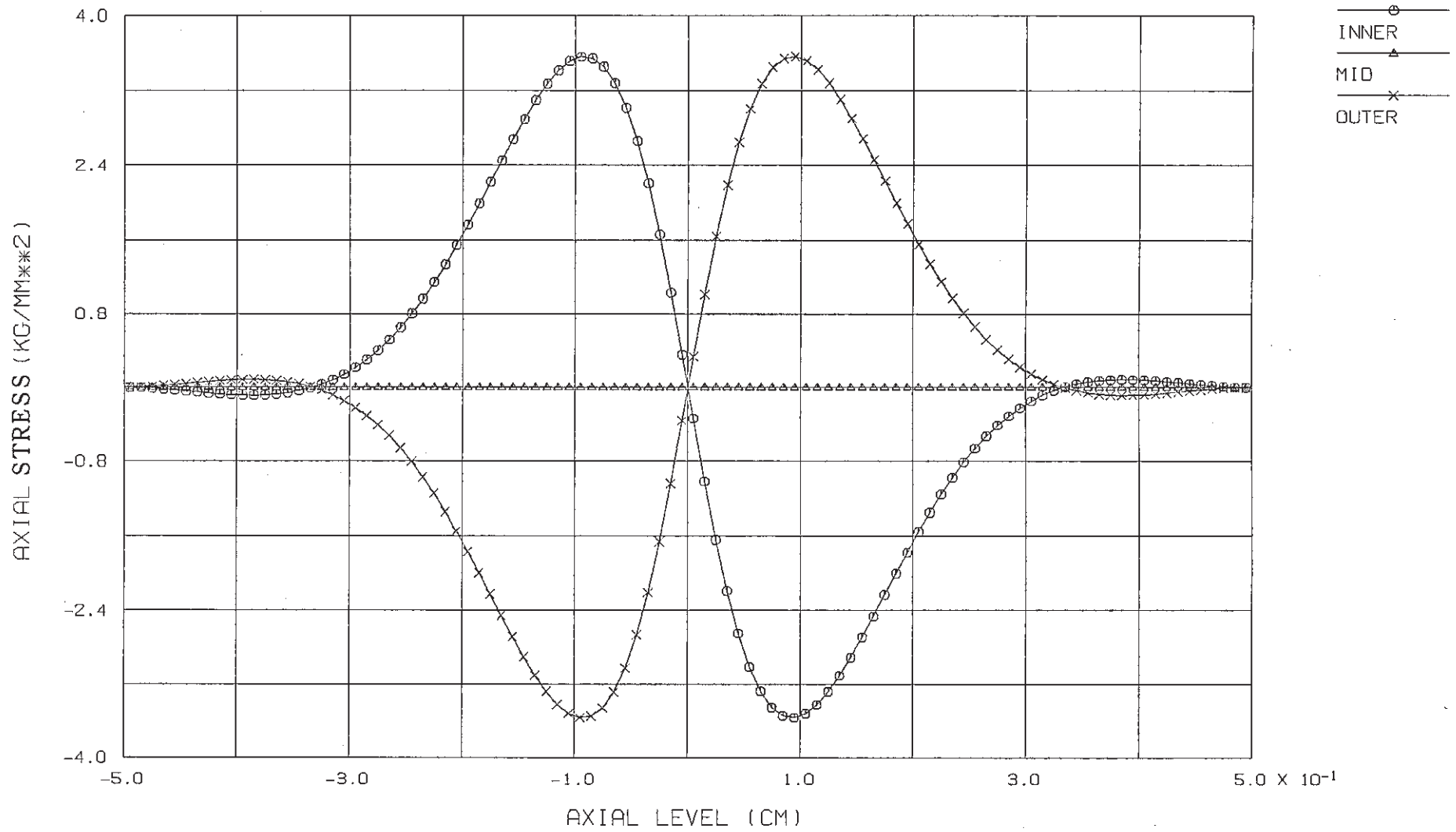
STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1.50000

HQAX8 PIN TEST QR3

付図5.2 二次元温度分布解析結果(コンター図)

FINAS
STEP NO. 1

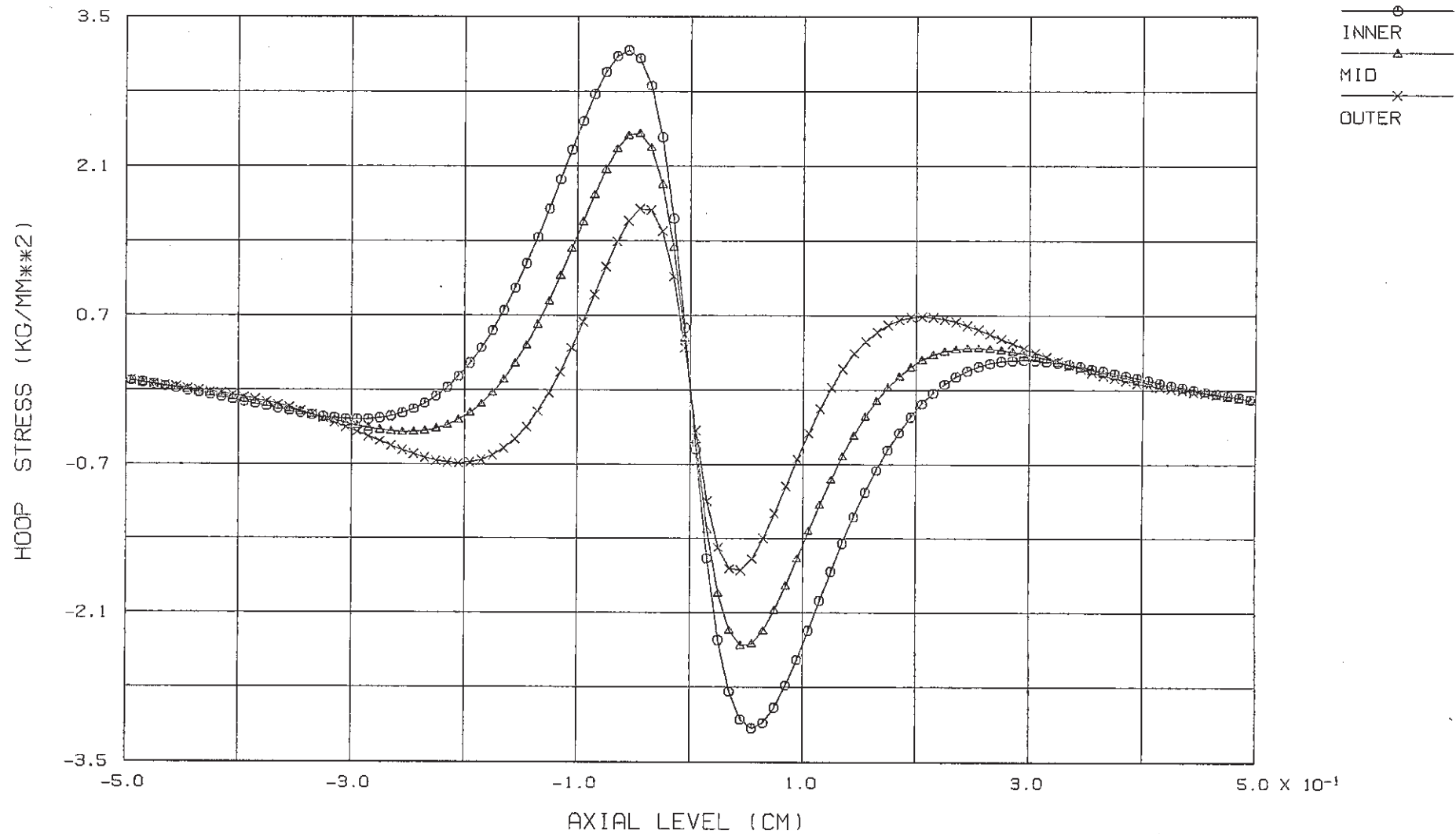


L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C),

CONIC2

付図6.1.1 温度勾配を考慮した軸方向温度差による軸方向応力解析結果(照射初期)

FINAS
STEP NO. 1

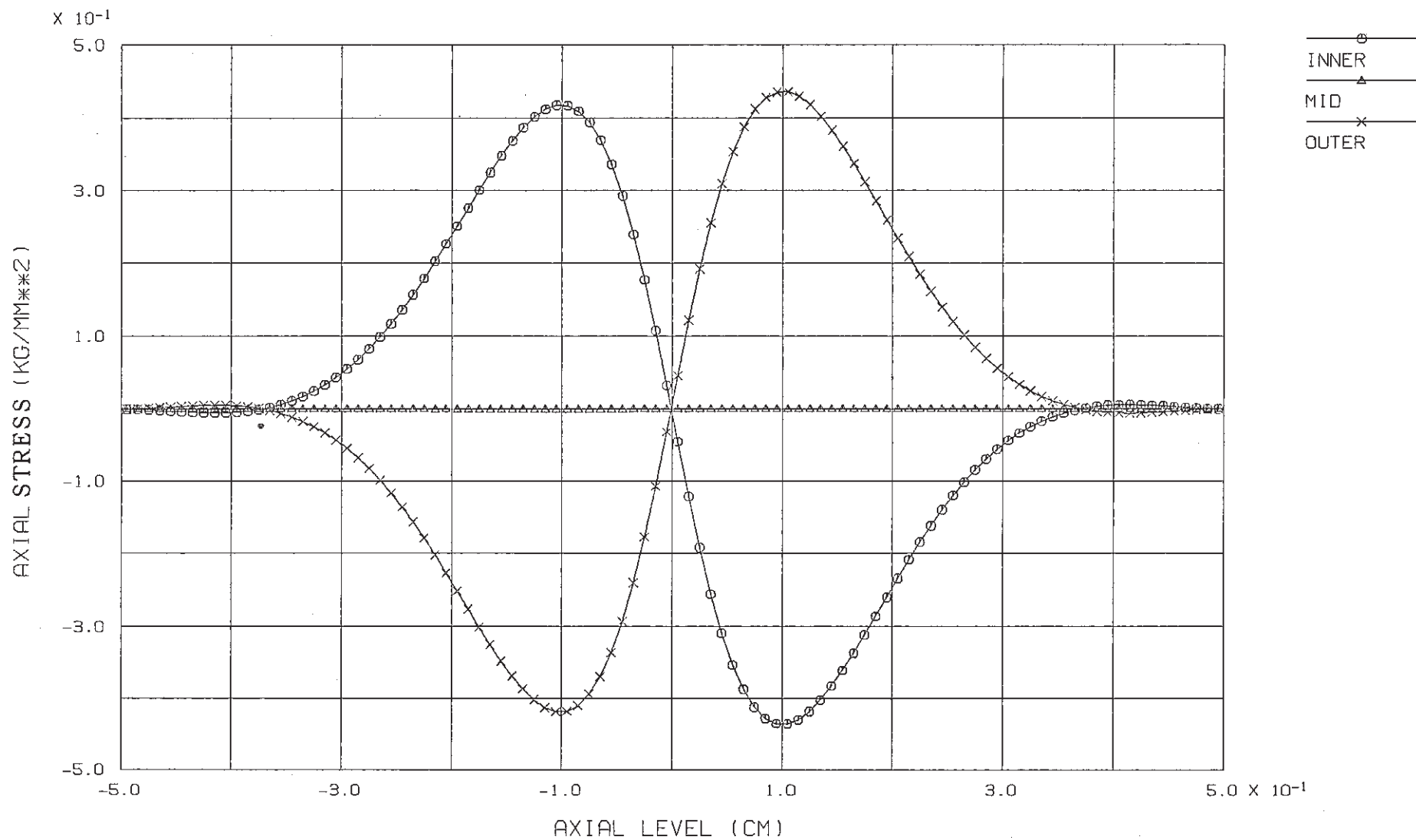


L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C),

CONIC2

付図6.1.2 温度勾配を考慮した軸方向温度差による周方向応力解析結果(照射初期)

FINAS
STEP NO. 16

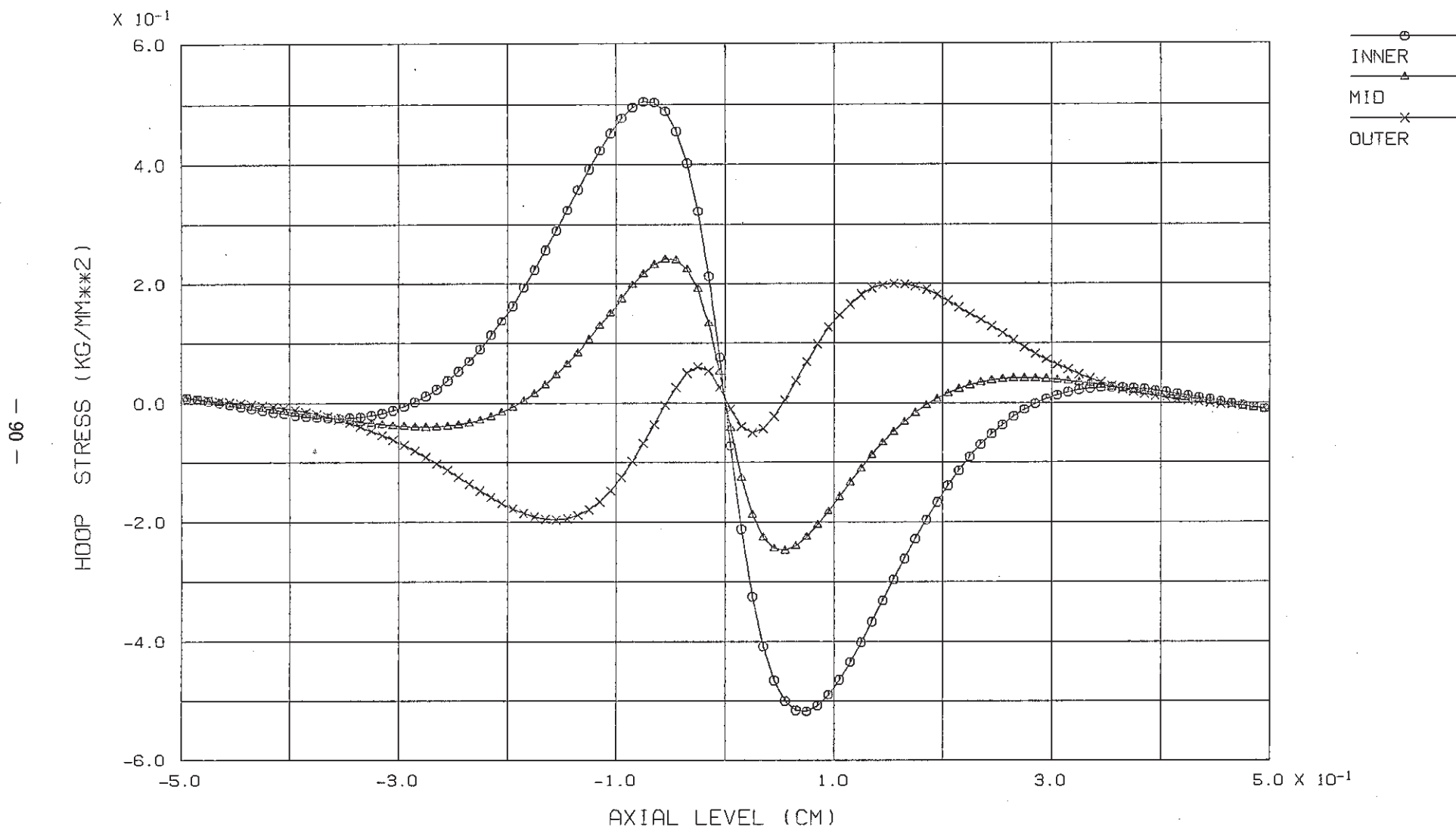


L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C),

CONIC2

付図6.1.3 温度勾配を考慮した軸方向温度差による軸方向応力解析結果(照射中期)

FINAS
STEP NO. 16

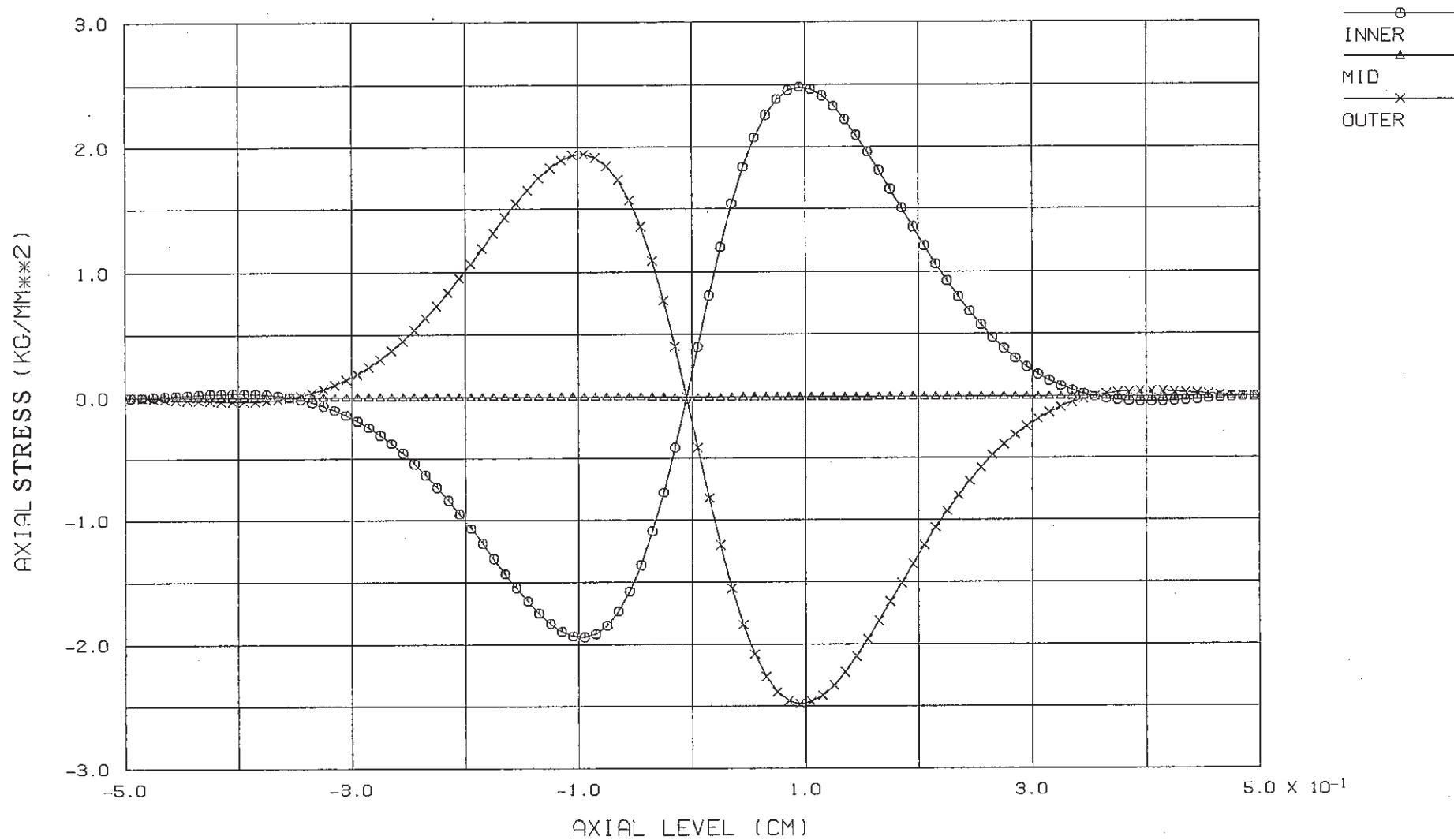


L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C),

CONIC2

付図6.1.4 温度勾配を考慮した軸方向温度差による周方向応力解析結果(照射中期)

FINAS
STEP NO. 40

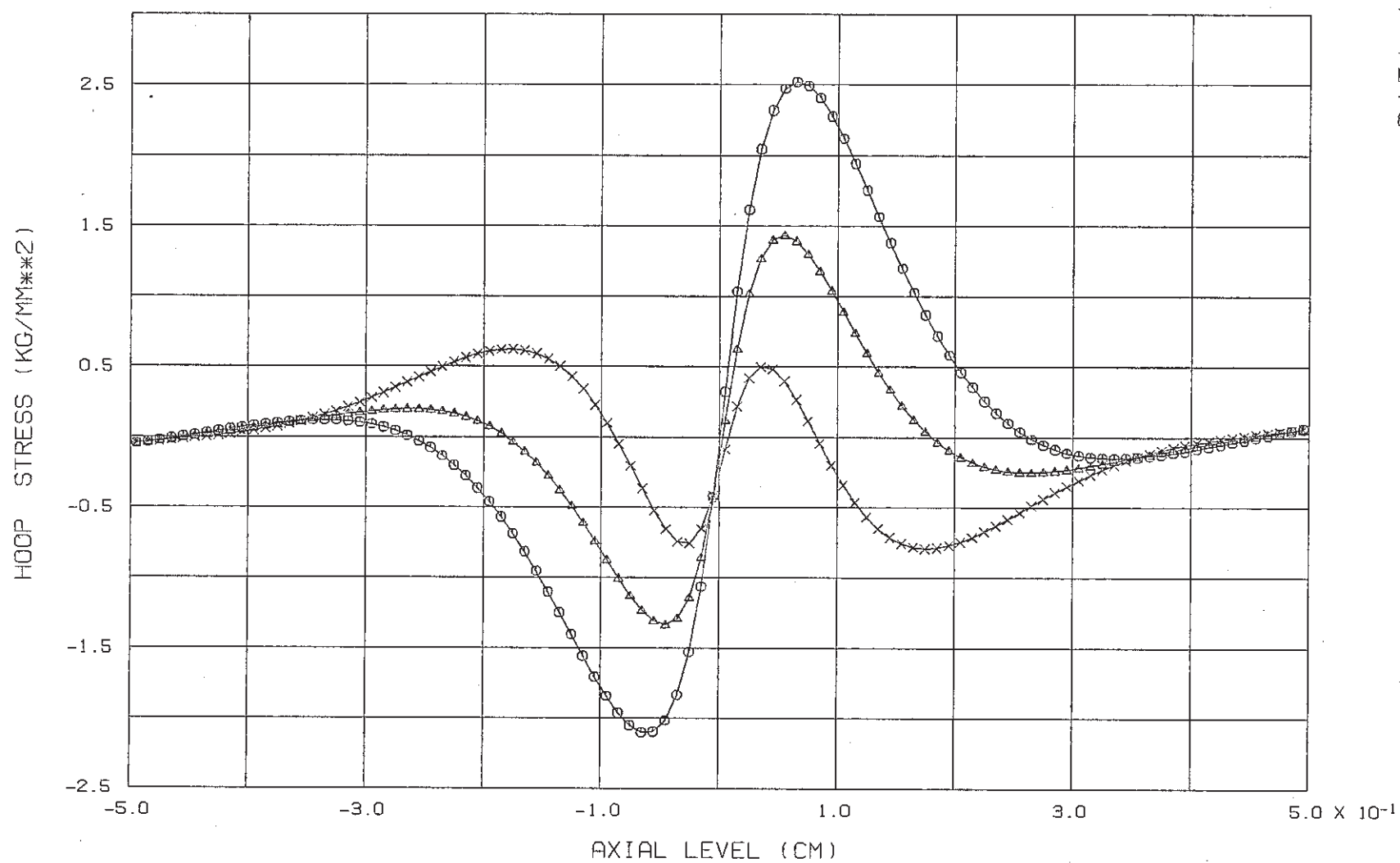


L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C),

CONIC2

付図6.1.5 温度勾配を考慮した軸方向温度差による軸方向応力解析結果(照射末期)

FINAS
STEP NO. 40



L.T=510,H.T=550,S.P=430.0(DEG.C),

CONIC2

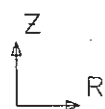
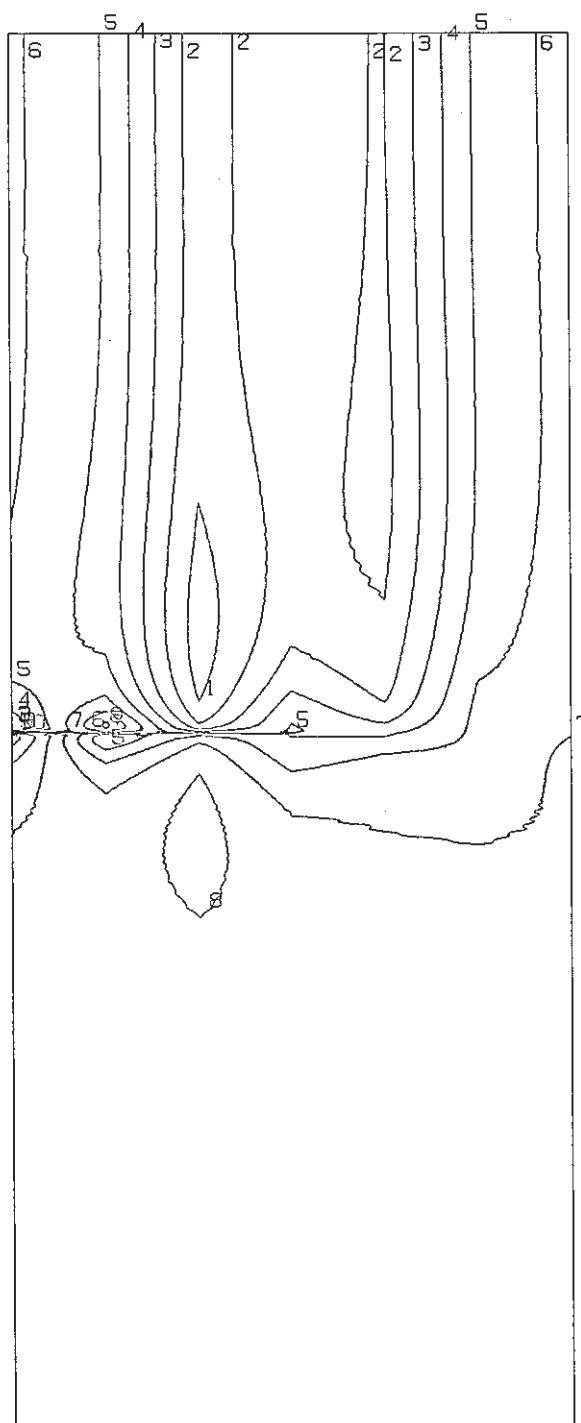
付図6.1.6 温度勾配を考慮した軸方向温度差による周方向応力解析結果(照射末期)

FINAS

STRESS COMPONENT 1

CONTOUR VALUES

1	-0.34100
2	-0.28700
3	-0.23300
4	-0.17900
5	-0.12500
6	-7.10-02
7	-1.70-02
8	3.700-02
9	9.100-02
10	0.145000



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1.50000

R STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

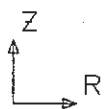
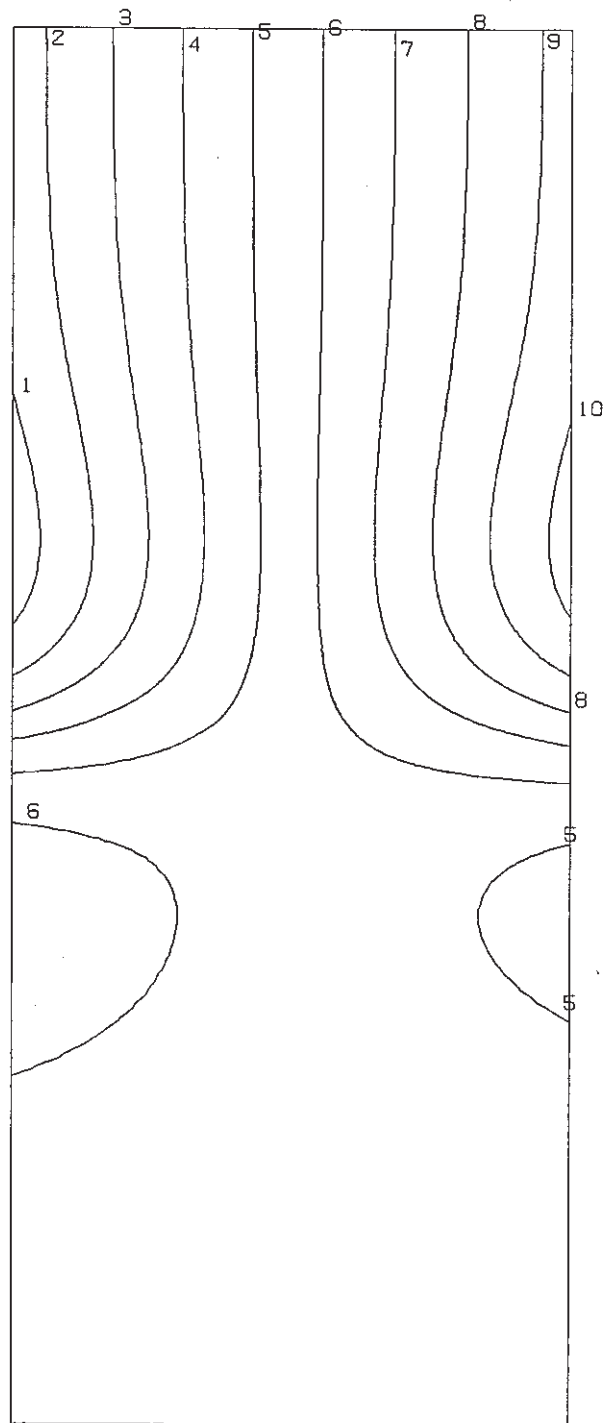
付図6.2.1 二次元温度分布条件での肉厚方向応力解析結果(照射初期)

FINAS

STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-12.9000
2	-10.1000
3	-7.30000
4	-4.50000
5	-1.70000
6	1.099996
7	3.899994
8	6.699993
9	9.499991
10	12.29998



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1.50000

AXIAL STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

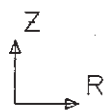
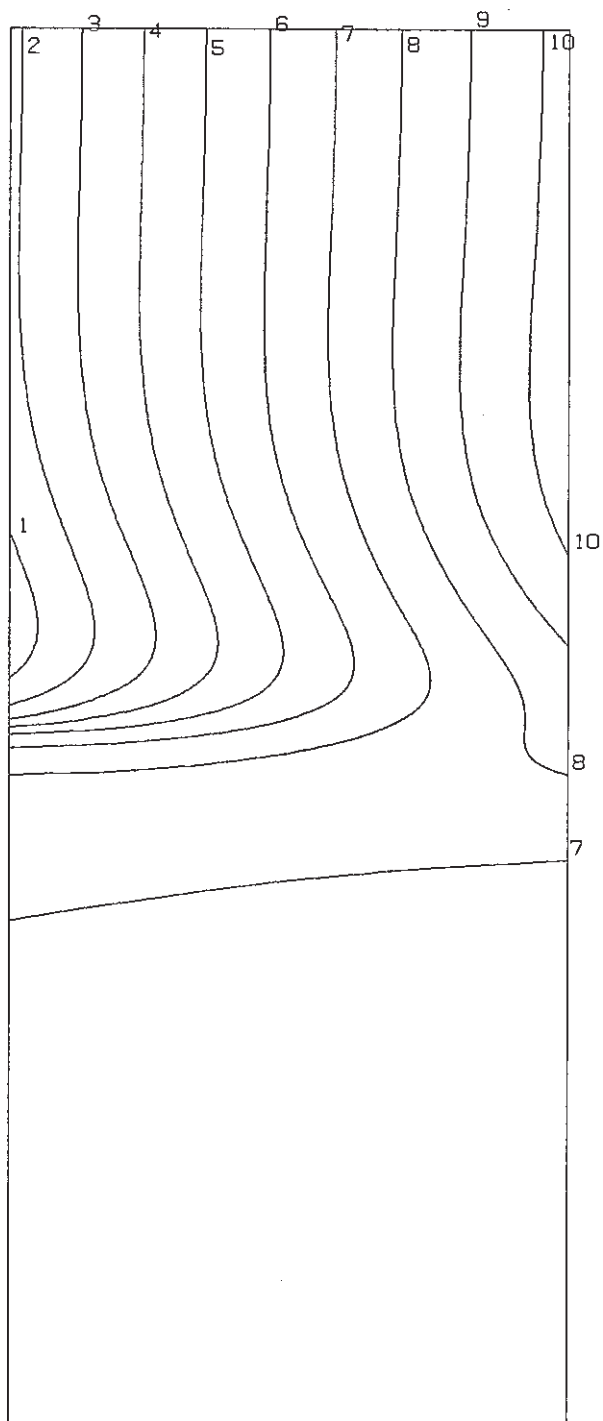
付図6.2.2 二次元温度分布条件での軸方向応力解析結果(照射初期)

FINAS

STRESS COMPONENT 3

CONTOUR VALUES

1	-13.6000
2	-11.0000
3	-8.39999
4	-5.79999
5	-3.19999
6	-0.59999
7	2.000007
8	4.600006
9	7.200004
10	9.800003



STEP NO. 1

GEOM. SCALE 1.50000

HOOP STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

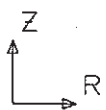
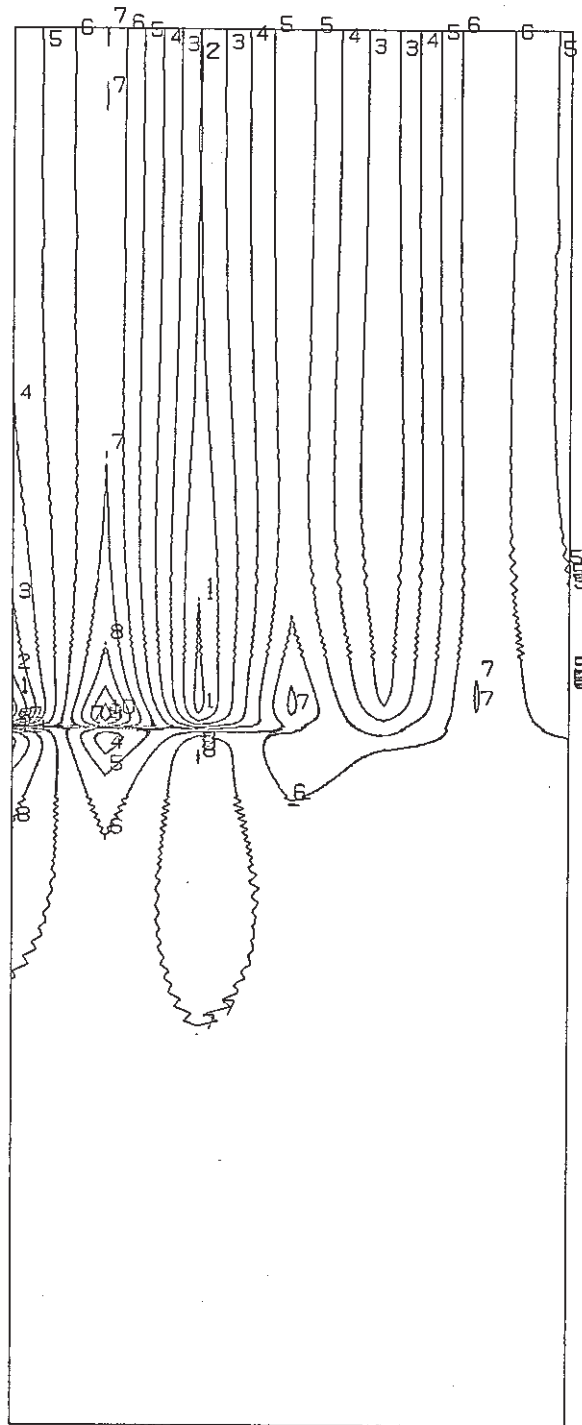
付図6.2.3 二次元温度分布条件での周方向応力解析結果(照射初期)

FINAS

STRESS COMPONENT 1

CONTOUR VALUES

1	-0.11900
2	-9.80-02
3	-7.70-02
4	-5.60-02
5	-3.50-02
6	-1.40-02
7	7.000-03
8	2.800-02
9	4.900-02
10	7.000-02



STEP NO. 16

GEOM. SCALE L 1.50000

R STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

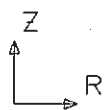
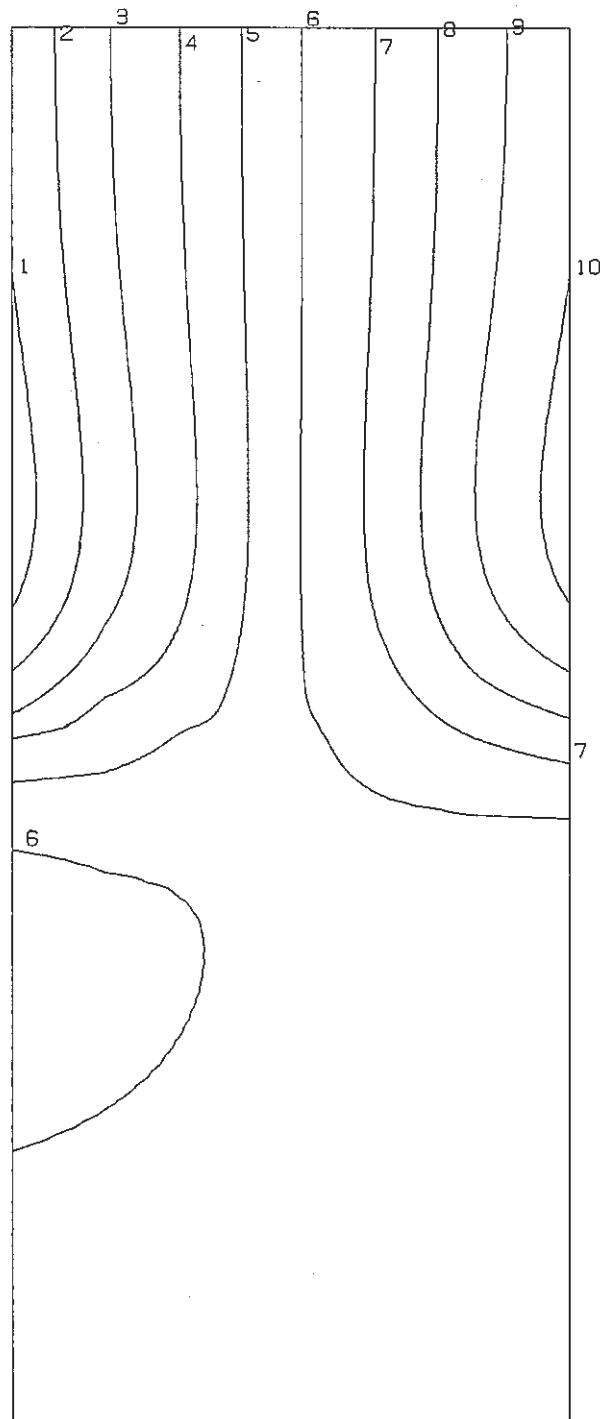
付図6.2.4 二次元温度分布条件での肉厚方向応力解析結果(照射中期)

FINAS

STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-2.35000
2	-1.86000
3	-1.37000
4	-0.88000
5	-0.39000
6	0.100001
7	0.590001
8	1.079999
9	1.569998
10	2.059997



STEP NO. 16

GEOM. SCALE  1.50000

AXIAL STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

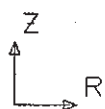
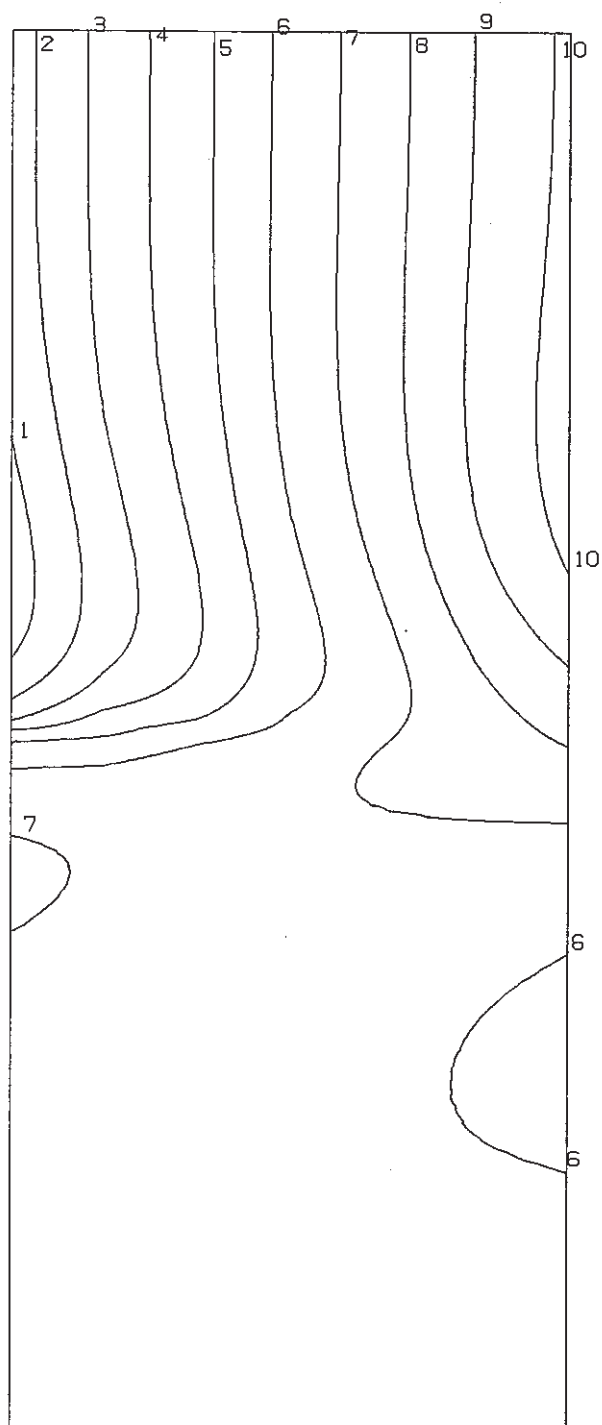
付図6.2.5 二次元温度分布条件での軸方向応力解析結果(照射中期)

FINAS

STRESS COMPONENT 3

CONTOUR VALUES

1	-2.52000
2	-2.03000
3	-1.54000
4	-1.05000
5	-0.56000
6	-7.00-02
7	0.420002
8	0.910001
9	1.400000
10	1.889999



STEP NO. 16

GEOM. SCALE 1 1.50000

HOOP STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

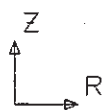
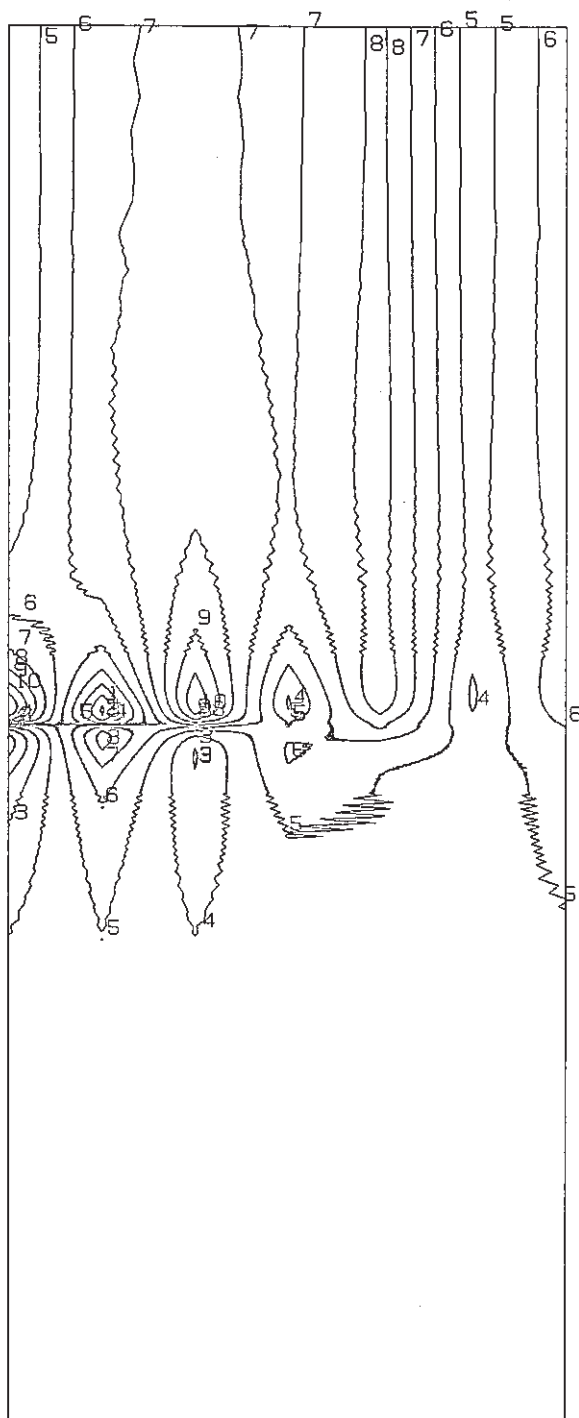
付図6.2.6 二次元温度分布条件での周方向応力解析結果(照射中期)

FINAS

STRESS COMPONENT 1

CONTOUR VALUES

1	-0.37000
2	-0.27000
3	-0.17000
4	-7.00-02
5	3.000-02
6	0.130000
7	0.230000
8	0.330000
9	0.429999
10	0.529999



STEP NO. 40

GEOM. SCALE 1.50000

R STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

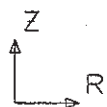
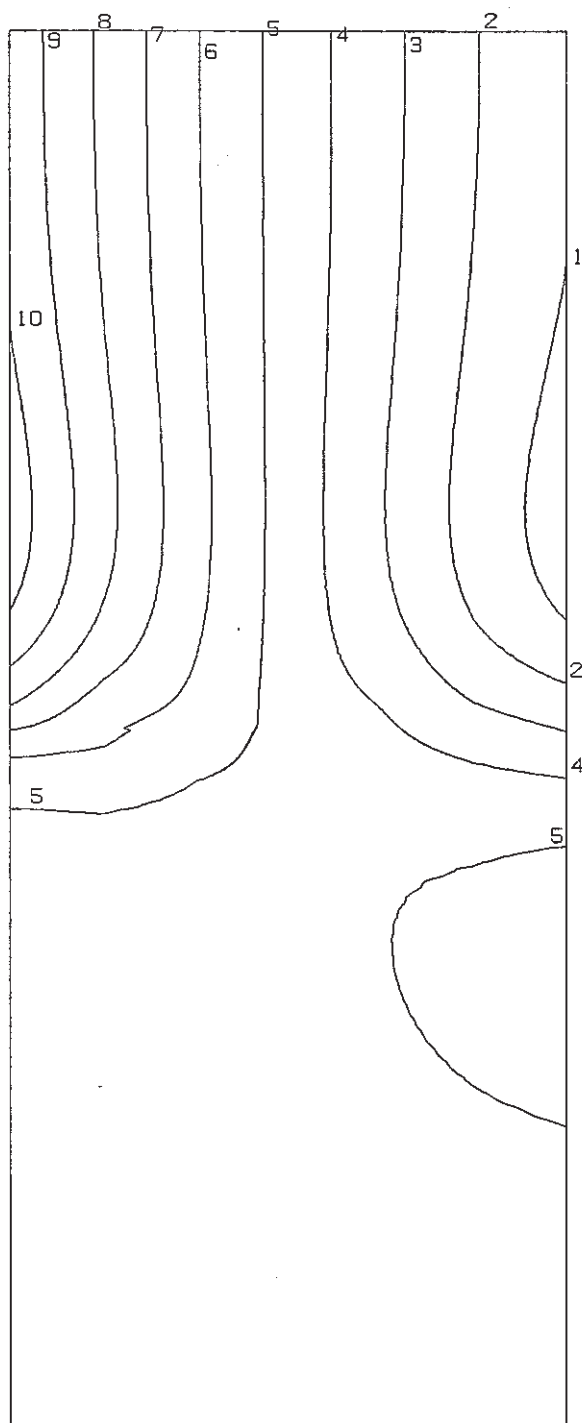
付図6.2.7 二次元温度分布条件での肉厚方向応力解析結果(照射末期)

FINAS

STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES

1	-9.10000
2	-6.70000
3	-4.30000
4	-1.90000
5	0.499998
6	2.899996
7	5.299995
8	7.699994
9	10.09999
10	12.49999



STEP NO. 40

GEOM. SCALE  1.50000

AXIAL STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

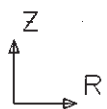
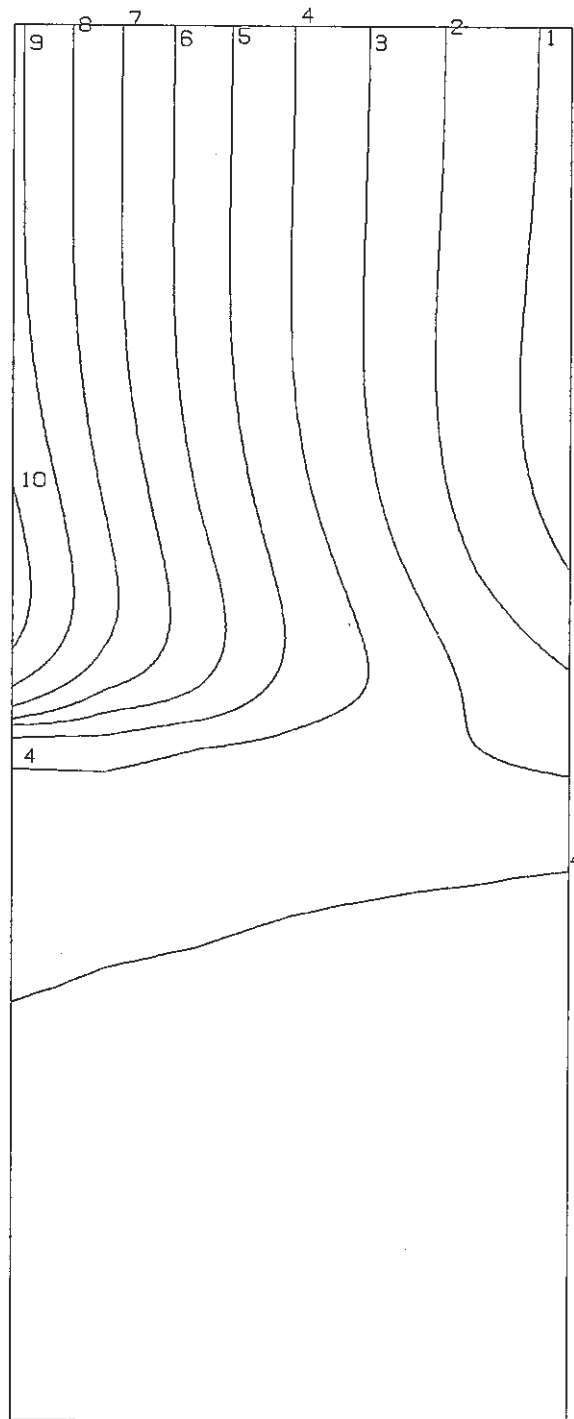
付図6.2.8 二次元温度分布条件での軸方向応力解析結果(照射末期)

FINAS

STRESS COMPONENT 3

CONTOUR VALUES

1	-8.10000
2	-5.70000
3	-3.30000
4	-0.90000
5	1.499998
6	3.899996
7	6.299995
8	8.699994
9	11.09998
10	13.49999



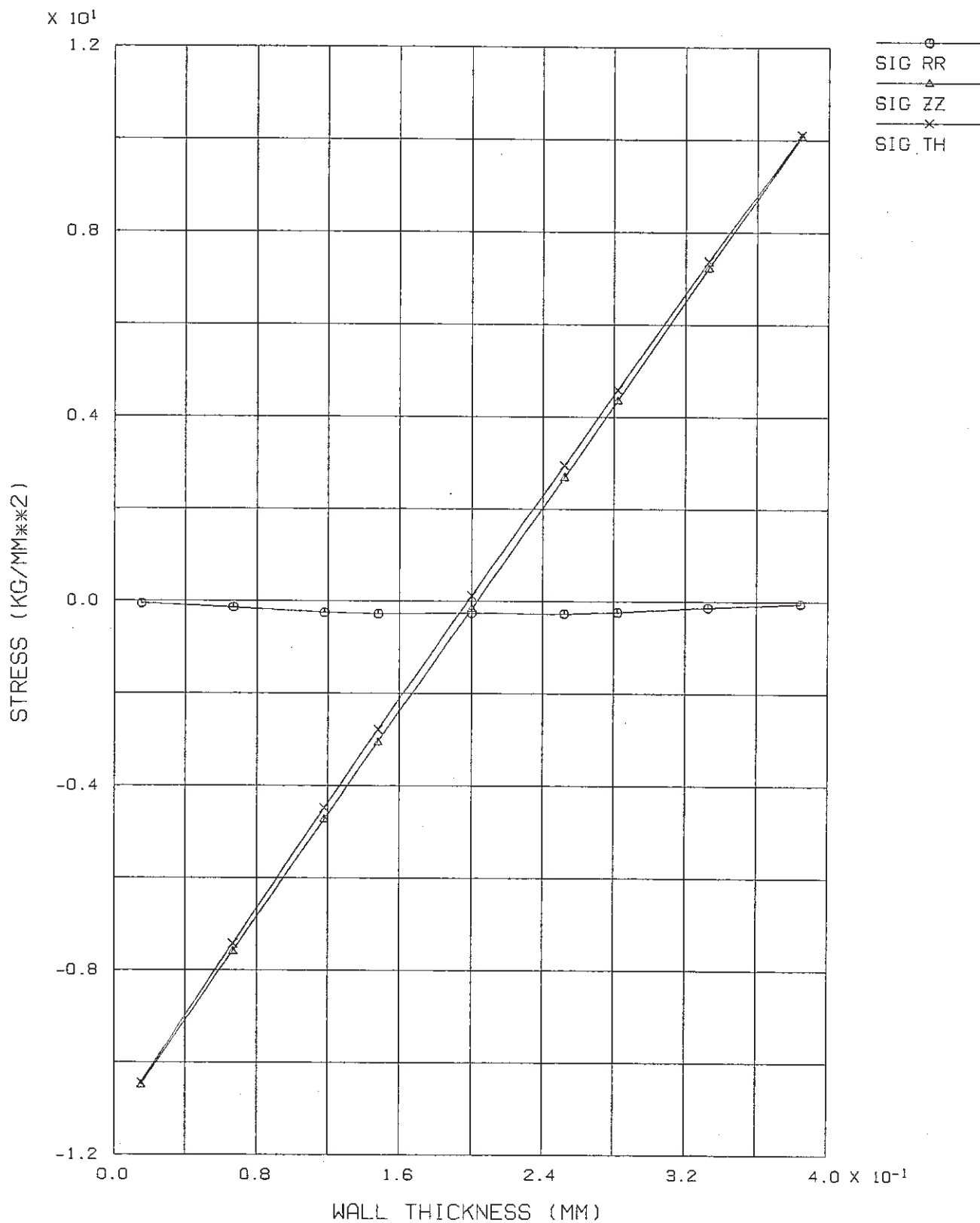
STEP NO. 40

GEOM. SCALE 1.50000

HOOP STRESS (KG/MM**2) QAX8*3

付図6.2.9 二次元温度分布条件での周方向応力解析結果(照射末期)

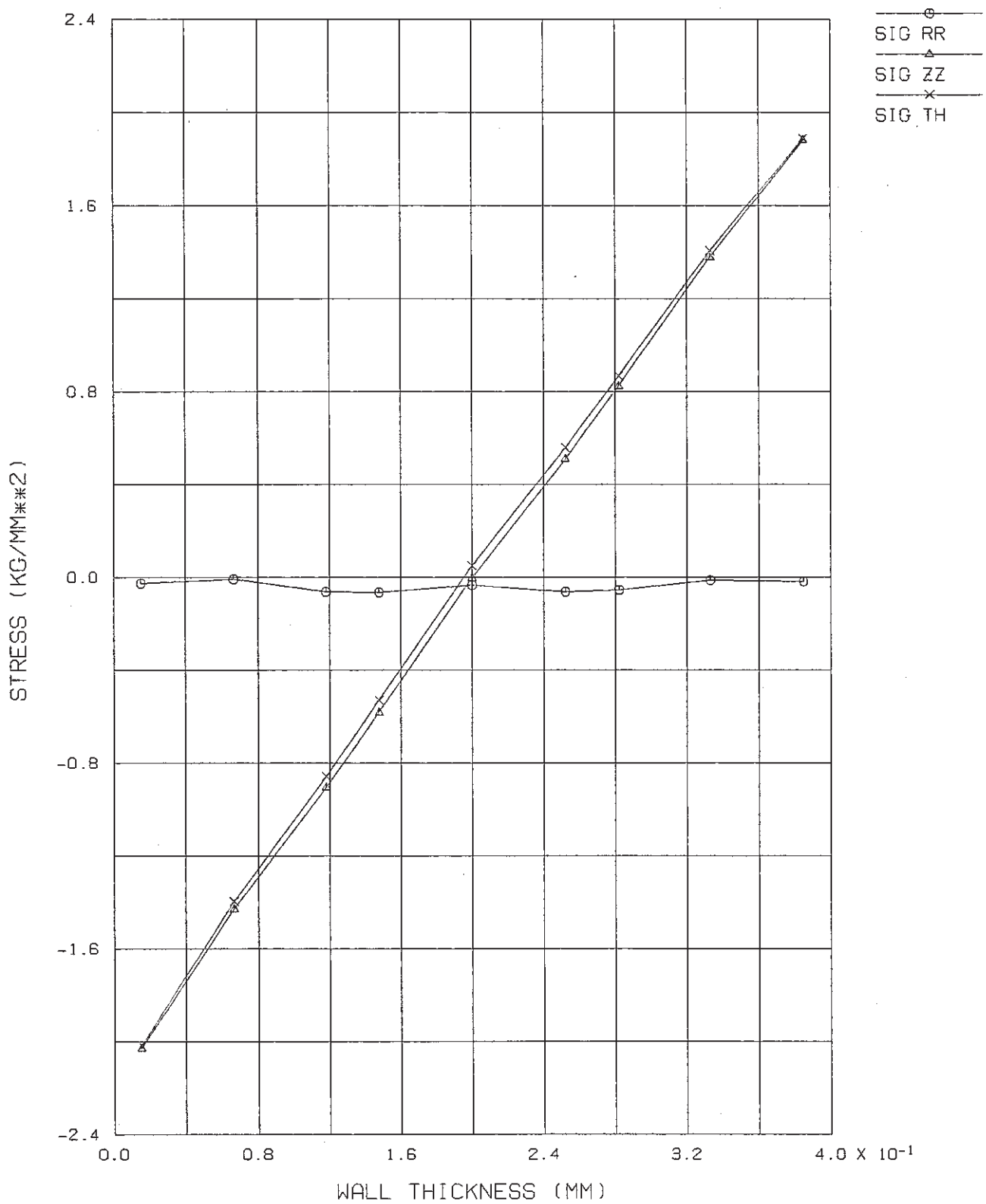
FINAS
STEP NO. 1



付図6.3.1 管壁温度差による応力解析結果肉厚方向分布(照射初期)

FINAS

STEP NO. 16

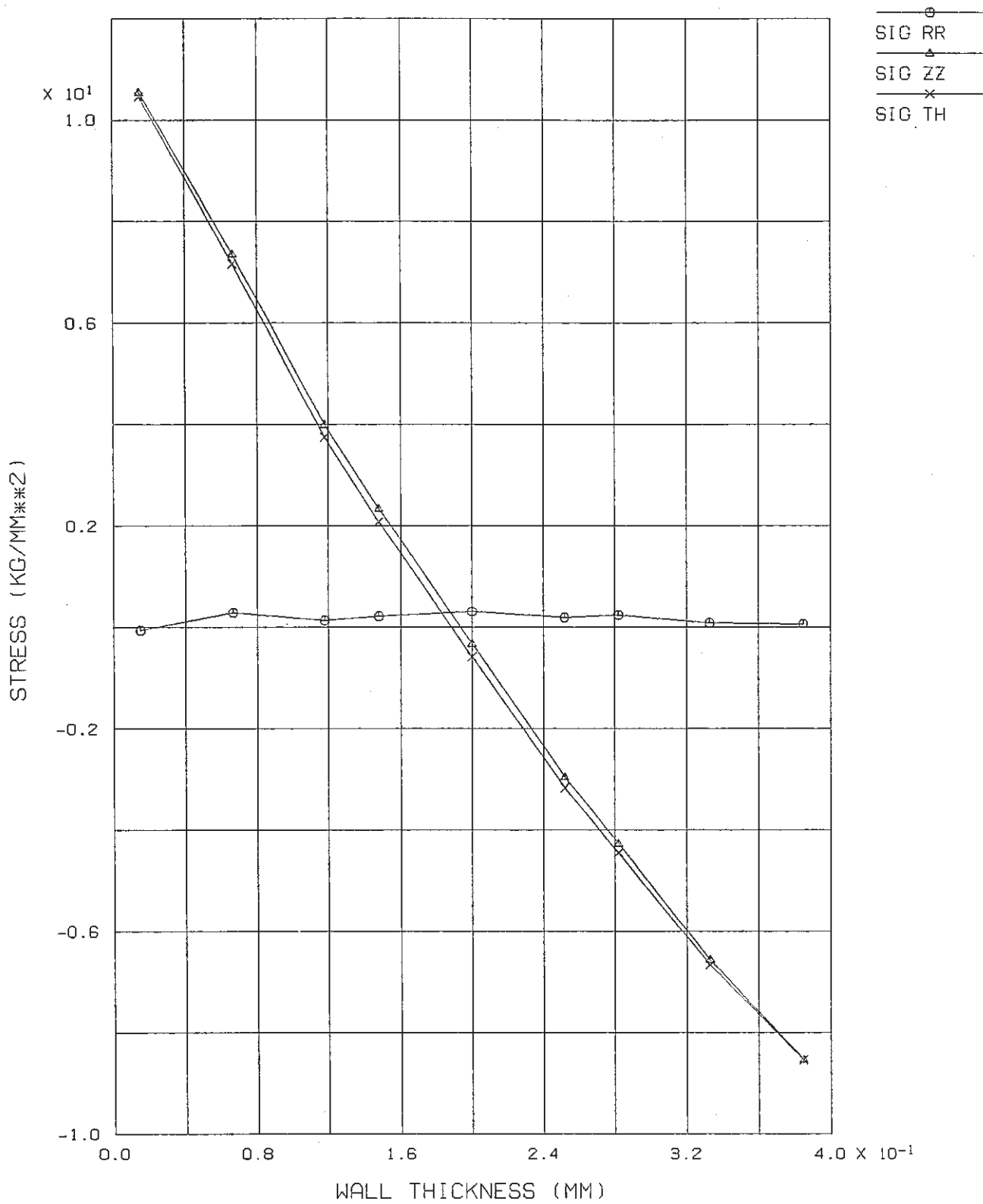


STRESS DUSTRIBUTIONS THROUGH THE WALL THICKNESS

付図6.3.2 管壁温度差による応力解析結果肉厚方向分布(照射中期)

FINAS

STEP NO. 40



STRESS DUSTRIBUTIONS THROUGH THE WALL THICKNESS

付図6.3.3 管壁温度差による応力解析結果肉厚方向分布(照射末期)