

高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究 (Ⅱ)

周溶接継手の解析 (2)

— 冶金的構造不連続効果におけるひずみ範囲算出式の検討 —

1991年1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)

高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究 (Ⅱ)

周溶接継手の解析 (2)

— 冶金的構造不連続効果におけるひずみ範囲算出式の検討 —

霜越 稔*¹ 根岸 仁*¹ 谷川 雅之*²

永田 敬*¹ 岩田 耕司*¹

要 旨

溶接継手のクリープ疲労損傷評価法の開発では、冶金的不連続と形状不連続とによる効果を適切に評価する必要がある。

ここでは、冶金的不連続効果を統一的に把握することを目的として、厚さ方向温度分布による熱応力を受ける平滑周溶接継手について形状・負荷・材料特性因子に関する非弾性パラメータ解析を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・ 冶金的不連続効果を弾性追従パラメータで表したひずみ範囲算出式を提示した。
- ・ 影響因子の効果を継手幅無限大・線形温度分布条件に対する弾性追従パラメータの増倍係数として定量化した。
- ・ 検討した範囲では継手幅の影響が最も大きく増倍係数の最大値は1.8程度となった。

今後、形状不連続の重畳効果の検討を行い、周溶接継手の評価法として一般化する予定である。

* 1 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

* 2 現在 日立造船㈱

Key Design Parameter Study (II) for Large Scale-up Fast Breeder Reactor

Stress Analysis of the Circumferential Welded Joint (2)

- Study on the evaluation method of strain ranges at
the metallurgical discontinuity -

M. Shimokoshi *¹, H. Negishi *¹, M. Tanigawa*²,
T. Nagata *¹ and K. Iwata*¹

Abstract

In the development of the evaluation method of creep-fatigue damage at the welded joint, it is necessary to properly verify effects of the geometrical discontinuity and metallurgical discontinuity

For the purpose of understanding metallurgical discontinuity effects, inelastic parametric analyses with shapes, loads and material properties were performed using the circumferential welded joint model with the temperature distribution through the wall thickness.

The results are as follows

- The equations for the strain range evaluation using the elastic follow-up parameter were proposed.
- The effects of parameters were quantified the multiplication coefficient to the elastic follow-up parameter of the reference model (joint width: infinity, temperature distribution through the wall thickness: linear)
- The effect of joint width was found to be the largest and the value of the coefficient was about 1.8

In the next step, the overlap effect of geometrical discontinuity will be studied and the generalized evaluation method for circumferential welded joint will be proposed.

*1 Structural Engineering Section, Systems and Components Development Division
Darai Engineering Center

*2 Currently at Hitachi Zosen Corporation

目 次

1. 緒 言	1
2. 検討の考え方	2
2.1 ひずみ集中係数	2
2.2 パラメータ解析のフロー	7
3. 解析の方法	9
3.1 解析モデル	9
3.2 解析結果のアウトプット	15
4. パラメータ解析結果	33
4.1 基本挙動	33
4.2 厚さ方向温度分布の影響	43
4.3 シェルパラメータの影響	53
4.4 継手幅の影響	62
4.5 降伏応力比の影響	77
4.6 加工硬化係数の影響	86
4.7 ま と め	95
5. 冶金的構造不連続効果に対するひずみ範囲算出式の検討	103
5.1 目 的	103
5.2 方 法	103
5.3 結 果	107
5.4 ま と め	118
6. 結 言	119
謝 辞	120
参考文献	121
付録A 各影響因子における弾性追従パラメータ q_F の挙動	122

表 リ ス ト

表 3.1.1	厚さ方向温度分布の影響 解析ケース一覧表	17
Table 3.1.1	Analysis cases (parameter:temperature distribution of through the wall thickness (n))	
表 3.1.2	シェルパラメータの影響 解析ケース一覧表	18
Table 3.1.2	Analysis cases (parameter:shell parameter (\sqrt{Dt}))	
表 3.1.3	継手幅の影響 解析ケース一覧表	19
Table 3.1.3	Analysis cases (parameter:joint width)	
表 3.1.4	降伏応力比の影響 解析ケース一覧	20
Table 3.1.4	Analysis cases (parameter:yield stress ratio (γ_y) of weld metal to base metal)	
表 3.1.5	加工硬化係数の影響 解析ケース一覧	21
Table 3.1.5	Analysis cases (parameter:work hardening coefficient (H'))	
表 4.1.1	軸方向、周方向ひずみ範囲の各成分の内外表面の値	37
Table 4.1.1	Each component value of axial and hoop strain range at inner surface and outer surface	
表 4.2.1	相当ひずみ範囲最大部と溶金中央部、母材端部の相当ひずみ範囲の比率	46
Table 4.2.1	Ratio of equivalent strain range at the portion of maximum equivalent strain range to the center of weld metal and the end of base metal	
表 4.7 (a)	各影響因子に対するひずみ集中係数 K_F の挙動(1) (相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ 時点)	98
Table 4.7 (a)	Strain concentration factor K_F on parameters(1) (at the portion of maximum equivalent strain range, at $S_p/2\sigma_y=5$)	

表 4. 7 (b)	各影響因子に対するひずみ集中係数 K_F の挙動(2) (相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2 \sigma_y = 5$ 時点) ……………	99
Table. 4. 7 (b)	Strain concentration factor K_F on parameters(2) (at the portion of maximum equivalent strain range, at $S_p / 2 \sigma_y = 5$)	
表 5. 3. 2. 1 (a)	各影響因子のリファレンスケースに対する効果係数(1) ……………	110
Table 5. 3. 2. 1 (a)	Multiplication coefficient of influence factors to reference model(1)	
表 5. 3. 2. 1 (b)	各影響因子のリファレンスケースに対する効果係数(2) ……………	111
Table 5. 3. 2. 1 (b)	Multiplication coefficient of influence factors to reference model(2)	

図 リ ス ト

図 1. 1	平滑円筒の検討フロー	5
Fig. 1. 1	Flow diagram of study on the cylinder	
図 1. 2	周継手解析の検討フロー	6
Fig. 1. 2	Flow diagram of study on stress analysis of the circumferential welded joint	
図 2. 1	解析のフロー	8
Fig. 2. 1	Flow diagram of stress analysis of the circumferential welded joint	
図 3. 1. 1. 1	モデル寸法及び要素分割 (リファレンスケース、CASE-1-1、CASE-1-1 A)	22
Fig. 3. 1. 1. 1	Configuration of analysis model and mesh (Reference case, CASE-1-1, CASE-1-1A)	
図 3. 1. 1. 2	境界条件	23
Fig. 3. 1. 1. 2	Boundary condition	
図 3. 1. 1. 3	負荷条件	23
Fig. 3. 1. 1. 3	Condition of loading	
図 3. 1. 3. 1. (a)	モデル寸法及び要素分割 (CASE-2-1、 $\sqrt{Dt}=10.0$)	24
Fig. 3. 1. 3. 1 (a)	Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-1, $\sqrt{Dt}=10.0$)	
図 3. 1. 3. 1 (b)	モデル寸法及び要素分割 (CASE-2-2 A、 $\sqrt{Dt}=50.0$)	25
Fig. 3. 1. 3. 1 (b)	Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-2A, $\sqrt{Dt}=50.0$)	
図 3. 1. 3. 1 (c)	モデル寸法及び要素分割 (CASE-2-4、 $\sqrt{Dt}=100.0$)	26
Fig. 3. 1. 3. 1 (c)	Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-4, $\sqrt{Dt}=100.0$)	

図 3. 1. 3. 1 (d)	モデル寸法及び要素分割 (CASE- 2 - 5、 $\sqrt{Dt}=500.0$)	27
Fig. 3. 1. 3. 1 (d)	Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-5, $\sqrt{Dt}=500.0$)	
図 3. 1. 4. 1 (a)	モデル寸法及び要素分割 (CASE- 3 - 1、 $H=3.0\text{mm}$)	28
Fig. 3. 1. 4. 1 (a)	Confituration of analysis model and mesh (CASE-3-1, $H=3.0\text{mm}$)	
図 3. 1. 4. 1 (b)	モデル寸法及び要素分割 (CASE- 3 - 2、 $H=6.0\text{mm}$)	29
Fig. 3. 1. 4. 1 (b)	Confituration of analysis model and mesh (CASE-3-2, $H=6.0\text{mm}$)	
図 3. 1. 4. 1 (c)	モデル寸法及び要素分割 (CASE- 3 - 3、 $H=20.0\text{mm}$)	30
Fig. 3. 1. 4. 1 (c)	Confituration of analysis model and mesh (CASE-3-3, $H=20.0\text{mm}$)	
図 3. 1. 4. 1 (d)	モデル寸法及び要素分割 (CASE- 3 - 4、 $H=15.0\text{mm}$)	31
Fig. 3. 1. 4. 1 (d)	Confituration of analysis model and mesh (CASE-3-4, $H=15.0\text{mm}$)	
図 3. 1. 4. 1 (e)	モデル寸法及び要素分割 (CASE- 3 - 5、 $H=10.5\text{mm}$)	32
Fig. 3. 1. 4. 1 (e)	Confituration of analysis model and mesh (CASE-3-5, $H=10.5\text{mm}$)	
図 4. 1. 1 (a)	相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布	38
Fig. 4. 1. 1 (a)	Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the inner surface)	
図 4. 1. 1 (b)	相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (境界部拡大)	38
Fig. 4. 1. 1 (b)	Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the inner surface, enlargement for the portion of boundary)	

図 4. 1. 1 (c)	相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布	39
Fig. 4. 1. 1 (c)	Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the outer surface)	
図 4. 1. 1 (d)	相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (境界部拡大)	39
Fig. 4. 1. 1 (d)	Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the outer surface, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 1. 2	相当塑性ひずみコンター図 (リファレンスケース、 極値時点 B)	40
Fig. 4. 1. 2	Equivalent plastic strain contour (reference case, at the stress extreme; B)	
図 4. 1. 3	ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点 B、相当ひずみ 範囲最大部)	41
Fig. 4. 1. 3	Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme; B, at the portion of maximum equivalent strain range)	
図 4. 1. 4	ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (溶金中央部、相当ひずみ 範囲最大部、母材端部、内面、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)	42
Fig. 4. 1. 4	History of strain concentration factor K_F (at the center of weld metal, the portion of maximum equivalent strain range and the end of base metal, inner surface, until $S_p/2\sigma_y=5$)	

図 4. 1. 5	ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (溶金中央部、相当ひずみ 範囲最大部、母材端部、外面、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで) ……	42
Fig. 4. 1. 5	History of strain concentration factor K_F (at the center of weld metal, the portion of maximum equivalent strain range and the end of base metal, outer surface, until $S_p/2\sigma_y=5$)	
図 4. 2. 1 (a)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース) ……	47
Fig. 4. 2. 1 (a)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases)	
図 4. 2. 1 (b)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、 境界部拡大) ……	47
Fig. 4. 2. 1 (b)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 2. 2 (a)	相当塑性ひずみコンター図 ($n=1$ 、 $n=2$ 、 極値時 B) ……	48
Fig. 4. 2. 2 (a)	Equivalent plastic strain contour ($n=1$, $n=2$, at the stress extreme; B)	
図 4. 2. 2 (b)	相当塑性ひずみコンター図 ($n=3$ 、 $n=4$ 、 極値時 B) ……	49
Fig. 4. 2. 2 (b)	Equivalent plastic strain contour ($n=3$, $n=4$, at the stress extreme; B)	
図 4. 2. 2 (c)	相当塑性ひずみコンター図 ($n=1$ 、 $n=2$ 、 極値時 B、境界部拡大) ……	50
Fig. 4. 2. 2 (c)	Equivalent plastic strain contour ($n=1$, $n=2$, at the stress extreme; B, enlargement for the portion of boundary)	

図 4. 2. 2 (d)	相当塑性ひずみコンター図 ($n = 3$ 、 $n = 4$ 、 極値時 B、境界部拡大)	51
Fig. 4. 2. 2 (d)	Equivalent plastic strain contour ($n=3$, $n=4$, at the stress extreme;B, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 2. 3	ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (各ケース、内面、 相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2 \sigma_y = 5$ まで)	52
Fig. 4. 2. 3	History of strain concentration factor K_F (each case, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p / 2 \sigma_y = 5$)	
図 4. 3. 1 (a)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース)	56
Fig. 4. 3. 1 (a)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases)	
図 4. 3. 1 (b)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、 境界部拡大)	56
Fig. 4. 3. 1 (b)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 3. 2 (a)	相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt} = 10.0$ 、 $\sqrt{Dt} = 50.0$ 、 極値時点 B)	57
Fig. 4. 3. 2 (a)	Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=10.0$, $\sqrt{Dt}=50.0$, at the stress extreme;B)	
図 4. 3. 2 (b)	相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt} = 100.0$ 、 $\sqrt{Dt} = 500.0$ 、極値時点 B)	58
Fig. 4. 3. 2 (b)	Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=100.0$, $\sqrt{Dt}=500.0$, at the stress extreme;B)	

図 4. 3. 2 (c)	相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=10.0$ 、 $\sqrt{Dt}=50.0$ 、 極値時点 B、境界部拡大)	59
Fig. 4. 3. 2 (c)	Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=10.0$, $\sqrt{Dt}=50.0$, at the stress extreme; B, enlargement for the portion of boundary).	
図 4. 3. 2 (d)	相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=100.0$ 、 $\sqrt{Dt}=500.0$ 、 極値時点 B、境界部拡大)	60
Fig. 4. 3. 2 (d)	Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=100.0$, $\sqrt{Dt}=500.0$, at the stress extreme; B, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 3. 3	ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (全ケース、内面、 相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)	61
Fig. 4. 3. 3	History of strain concentration factor K_F (All cases, σ inner surface, at the Portion of maximum equivalent strain range, until $S_p/2\sigma_y=5$)	
図 4. 4. 1	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、 境界部拡大)	66
Fig. 4. 4. 1	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 4. 2 (a)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $H=3.0\text{mm}$ 、 6.0mm)	67
Fig. 4. 4. 2 (a)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H=3.0\text{mm}$, 6.0mm)	
図 4. 4. 2 (b)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $H=10.5\text{mm}$ 、 15.0mm)	68
Fig. 4. 4. 2 (b)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H=10.5\text{mm}$, 15.0mm)	

図 4. 4. 2 (c)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、H=20.0mm)	69
Fig. 4. 4. 2 (c)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme;B, H=20.0mm)	
図 4. 4. 2 (d)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、境界部拡大、 H=3.0mm、6.0mm)	70
Fig. 4. 4. 2 (d)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme;B, enlargement for the portion of boundary, H=3.0mm, 6.0mm)	
図 4. 4. 2 (e)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、境界部拡大、 H=10.5mm、15.0mm)	71
Fig. 4. 4. 2 (e)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme;B, enlargement for the portion of boundary, H=10.5mm, 15.0mm)	
図 4. 4. 2 (f)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、境界部拡大、 H=20.0mm)	72
Fig. 4. 4. 2 (f)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme;B, enlargement for the portion of boundary, H=20.0mm)	
図 4. 4. 3 (a)	ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点 B、相当ひずみ 範囲最大部、H=3.0mm)	73
Fig. 4. 4. 3 (a)	Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=3.0mm)	
図 4. 4. 3 (b)	ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点 B、相当ひずみ 範囲最大部、H=6.0mm)	73
Fig. 4. 4. 3 (b)	Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=6.0mm)	

図 4. 4. 3 (c)	ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点 B、相当ひずみ 範囲最大部、H = 10.5mm)	74
Fig. 4. 4. 3 (c)	Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme; B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=10.5mm)	
図 4. 4. 3 (d)	ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点 B、相当ひずみ 範囲最大部、H = 15.0mm)	74
Fig. 4. 4. 3 (d)	Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme; B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=15.0mm)	
図 4. 4. 3 (e)	ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点 B、相当ひずみ 範囲最大部、H = 20.0mm)	75
Fig. 4. 4. 3 (e)	Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme; B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=20.0mm)	
図 4. 4. 4	ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (全ケース、内面、 相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2 \sigma_y = 5$ まで)	76
Fig. 4. 4. 4	History of strain concentration factor K_F (All cases, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p / 2 \sigma_y = 5$)	
図 4. 5. 1 (a)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース)	80
Fig. 4. 5. 1 (a)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases)	
図 4. 5. 1 (b)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、 境界部拡大)	80
Fig. 4. 5. 1 (b)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)	

図 4. 5. 2 (a)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $\tau_y=0.75$ 、 $\tau_y=0.85$)	81
Fig. 4. 5. 2 (a)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $\tau_y=0.75$, $\tau_y=0.85$)	
図 4. 5. 2 (b)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $\tau_y=0.9$ 、 $\tau_y=0.95$)	82
Fig. 4. 5. 2 (b)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $\tau_y=0.9$, $\tau_y=0.95$)	
図 4. 5. 2 (c)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $\tau_y=0.75$ 、 $\tau_y=0.85$ 、境界部拡大)	83
Fig. 4. 5. 2 (c)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $\tau_y=0.75$, $\tau_y=0.85$, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 5. 2 (d)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $\tau_y=0.9$ 、 $\tau_y=0.85$ 、境界部拡大)	84
Fig. 4. 5. 2 (d)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $\tau_y=0.9$, $\tau_y=0.95$, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 5. 3	ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (全ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)	85
Fig. 4. 5. 3	History of strain concentration factor K_F (All cases, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p/2\sigma_y=5$)	
図 4. 6. 1 (a)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース)	89
Fig. 4. 6. 1 (a)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases)	

図 4. 6. 1 (b)	相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大)	89
Fig. 4. 6. 1 (b)	Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 6. 2 (a)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $H' = 1620.0$ 、 $H' = 2430.0$)	90
Fig. 4. 6. 2 (a)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H' = 1620.0$, $H' = 2430.0$)	
図 4. 6. 2 (b)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $H' = 3240.0$)	91
Fig. 4. 6. 2 (b)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H' = 3240.0$)	
図 4. 6. 2 (c)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $H' = 1620.0$ 、 $H' = 2430.0$ 、境界部拡大)	92
Fig. 4. 6. 2 (c)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H' = 1620.0$, $H' = 2430.0$, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 6. 2 (d)	相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $H' = 3240.0$ 、境界部拡大)	93
Fig. 4. 6. 2 (d)	Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H' = 3240.0$, enlargement for the portion of boundary)	
図 4. 6. 3	ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (各ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2 \sigma_y = 5$ まで)	94
Fig. 4. 6. 3	History of strain concentration factor K_F (each case, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p / 2 \sigma_y = 5$)	

図 4. 7. 1	厚さ方向温度分布 (n) - ひずみ集中係数 K_F プロット図	100
Fig. 4. 7. 1	Temperature distribution of through the wall thickness (n) - strain concentration Factor K_F	
図 4. 7. 2	シェルパラメータ (\sqrt{Dt}) - ひずみ集中係数 K_F プロット図	100
Fig. 4. 7. 2	Shell parameter (\sqrt{Dt}) - strain concentration factor K_F	
図 4. 7. 3	継手幅 / 板厚比 (H/t) - ひずみ集中係数 K_F プロット図	101
Fig. 4. 7. 3	Ratio of the joint width to the wall thickness (H/t) - strain concentration factor K_F	
図 4. 7. 4	降伏応力比 (γ_y) - ひずみ集中係数 K_F プロット図	101
Fig. 4. 7. 4	Yield stress ratio (γ_y) of weld metal to base metal - strain concentration factor K_F	
図 4. 7. 5	加工硬化係数 (H') - ひずみ集中係数 K_F プロット図	102
Fig. 4. 7. 5	work hardening coefficient (H') - strain concentration factor K_F	
図 5. 3. 1. 1	厚さ方向温度分布パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y$ - K_w プロット図	112
Fig. 5. 3. 1. 1	$S_n/2\sigma_y$ - Strain concentration factor K_w in paratertic analysis of temperature distribution of through the wall thickness	
図 5. 3. 1. 2	シェルパラメータパラメータ解析における $S_n/2\sigma_y$ - K_w プロット図	112
Fig. 5. 3. 1. 2	$S_n/2\sigma_y$ - Strain concentration factor K_w in paratertic analysis of shell parameter	

図 5.3.1.3	継手幅パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y - K_w$ プロット図	113
Fig. 5.3.1.3	$S_n/2\sigma_y$ - Strain concentration factor K_w in parametric analysis of joint width	
図 5.3.1.4	降伏応力比パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y - K_w$ プロット図	113
Fig. 5.3.1.4	$S_n/2\sigma_y$ - Strain concentration factor K_w in parametric analysis of yield stress ratio of weld metal to base metal	
図 5.3.1.5	加工効果係数パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y - K_w$ プロット図	114
Fig. 5.3.1.5	$S_n/2\sigma_y$ - Strain concentration factor K_w in parametric analysis of work hardening coefficient	
図 5.3.2.1	厚さ方向温度分布パラメータ解析における n - 効果係数 プロット図	115
Fig. 5.3.2.1	n - multiplication coefficient in parametric analysis of temperature distribution of through the wall thickness	
図 5.3.2.2	シェルパラメータパラメータ解析における \sqrt{Dt} - 効果係数 プロット図	115
Fig. 5.3.2.2	\sqrt{Dt} - multiplication coefficient in parametric analysis of shell parameter	
図 5.3.2.3	継手幅パラメータ解析における 継手幅 / 板厚比 - 効果係数 プロット図	116
Fig. 5.3.2.3	Ratio of the joint width to the wall thickness - multiplication coefficient in parametric analysis of joint width	

図 5. 3. 2. 4	降伏応力比パラメータ解析における γ_y -効果係数 プロット図	116
Fig. 5. 3. 2. 4	γ_y - multiplication coefficient in parametric analysis of yield stress ratio of weld metal to base metal	
図 5. 3. 2. 5	加工効果係数パラメータ解析における H' -効果係数 プロット図	117
Fig. 5. 3. 2. 5	H' - multiplication coefficient in parametric analysis of work hardening coefficient	
図 A. 2. 1	厚さ方向温度分布における弾性追従パラメータ q_F の履歴 (全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)	126
Fig. A. 2. 1	History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of temperature distribution through the the wall thickness (all cases, at the potion of maximum equivalent strain range, inner surface)	
図 A. 2. 2	シェルパラメータにおける弾性追従パラメータ q_F の履歴 (全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)	126
Fig. A. 2. 2	History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of shell parameter	
図 A. 2. 3	継手幅における弾性追従パラメータ q_F の履歴 (全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)	127
Fig. A. 2. 3	History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of joint width (all cases, at the potion of maximum equivalent strain range, inner surface)	

図A. 2. 4	降伏応力比における弾性追従パラメータ q_F の履歴 (全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)	127
Fig. A. 2. 4	History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of yield stress ratio	
図A. 2. 5	加工効果係数における弾性追従パラメータ q_F の履歴 (全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)	128
Fig. A. 2. 5	History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of work hardening coefficient (all cases, at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface)	
図A. 3. 1	厚さ方向温度分布 (n) パラメータ値 - 弾性追従 パラメータ q_F プロット図 (相当ひずみ範囲最大部、 $S_n / 2 \sigma_y = 5$ 時点)	129
Fig. A. 3. 1	Temperature distribution through the the wall thickness(n) - elastic-follow-up parameter q_F (at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n / 2 \sigma_y = 5$)	
図A. 3. 2	シェルパラメータ (\sqrt{Dt}) パラメータ値 - 弾性追従 パラメータ q_F プロット図 (相当ひずみ範囲最大部、 $S_n / 2 \sigma_y = 5$ 時点)	129
Fig. A. 3. 2	Shell parameter (\sqrt{Dt}) - elastic-follow-up parameter q_F (at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n / 2 \sigma_y = 5$)	

図A. 3. 3	継手幅（継手幅／板厚比、 H/t ）パラメータ値 —弾性追従パラメータ q_F プロット図（相当ひずみ範囲 最大部、 $S_n/2\sigma_y=5$ 時点）	130
Fig. A. 3. 3	Joint width (ratio of joint width to wall thickness: H/t) - elastic-follow-up parameter q_F (at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)	
図A. 3. 4	降伏応力比（ γ_y ）パラメータ値—弾性追従パラメータ q_F プロット図（相当ひずみ範囲最大部、 $S_n/2\sigma_y$ = 5 時点）	130
Fig. A. 3. 4	Yield stress ratio (γ_y) - elastic-follow-up parameter q_F (at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)	
図A. 3. 5	加工効果係数（ H' ）パラメータ値—弾性追従パラメータ q_F プロット図（相当ひずみ範囲最大部、 $S_n/2\sigma_y$ = 5 時点）	131
Fig. A. 3. 5	Work hardening coefficient(H') - elastic-follow -up parameter q_F (at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)	

1. 緒 言

溶接継手のクリープ疲労損傷評価法の開発では、材料特性モデルとして母材・溶接金属をそれぞれ弾完全塑性体と仮定した2種材料結合モデルが用いられる。モデルの特性は母材の降伏応力と溶金の母材に対する降伏応力比で表される。高速炉で用いられるSUS304の溶接継手では、高温の繰返し荷重下で溶金が母材に対し相対的に軟化することによるひずみ集中が、強度低下の主要な原因となっていることからモデル化では、降伏応力比の値の設定が問題となる。

主要パラメータである降伏応力比の値は、溶接継手のクリープ疲労強度試験データを参考として定める必要がある。継手材料試験では、強度データが比較的多く得られているが、構造物の継手と異なり2種材料が直列に結合される形となっているため、降伏応力比として過小な値が算出される傾向にある。従って、実機条件に適用すべきパラメータ値を定めるためには、荷重が変位制御型となり継手部が多軸的に拘束される形となる熱応力を受ける継手構造物強度試験データを十分考慮する必要がある。

構造物溶接継手部の強度データはTTS・SPTT・STST等である程度得られているが、データの多くは溶接施工に伴う余盛り・裏波・シュリンケージ等の形状不連続を含んでおり、強度の低下は、冶金的な不連続と形状不連続の効果が重畳する形で生じている。第1報⁽¹⁾ではSPTTで得られた周継手の強度データを中心にした検討を行い、形状不連続による強度低下分も含めて降伏応力比として0.8程度の値が設定できるとの見通しを得ている。

但し、降伏応力比は、冶金的な不連続による強度低下に基づき定めるべきものであり、形状不連続による効果は分離して考える必要がある。更に、溶接部評価法として一般化を図る上でも両者の効果を分けて検討する必要がある。

本報告書では、形状不連続の重畳効果を検討する上での前提として、冶金的な不連続効果の統一的な把握を目的として行った形状・負荷・材料因子に関する非弾性パラメータ解析結果について述べる。

2. 検討の考え方

2.1 ひずみ集中係数

現在、構造工学室では、高速増殖炉の各種機器に使用される溶接部のクリープ疲労損傷設計係数の策定に関するR&Dが行われている。

溶接継手部では、母材との材料特性の差異、形状不連続、溶接金属自体のクリープ疲労強度等が原因し、母材部に対するクリープ疲労強度が低下することが考えられるため、溶接継手部クリープ疲労損傷設計係数を適切に策定する必要がある。

本検討では、溶接継手部のクリープ疲労強度に影響を与える各種要因の内、母材との材料特性の差異による冶金的構造不連続効果に着目し、平滑周溶接継手をモデルとして、ひずみ集中挙動に及ぼす各種因子の影響を検討する。また、この検討結果を基に、冶金的構造不連続効果によるひずみ集中挙動を表わす基本的なひずみ範囲算出式を示し、式で用いられるひずみ集中係数の定量化を試みる。

尚、本検討では、クリープ疲労損傷の内、疲労損傷評価に着目している。また、ここでの周溶接継手とは、2本の直管を突き合わせ溶接した継手を指す。

先ず、平滑周溶接継手のひずみ集中挙動を説明する前に、均一材料を想定し、基本的な形状である平滑無限円筒モデルでのひずみ範囲算出について説明する。

「過渡熱応力に対する設計係数の策定に係わる解析 第1報」⁽⁷⁾では、弾完全塑性体を想定した無限長平滑円筒モデルに対し、厚さ方向温度分布による熱応力に与え、そのひずみ集中挙動について理論解とFEM解析から以下の知見を得ている。

図1.1にその検討フローを示す。

○ 平滑円筒形状において設計に関するひずみ集中係数としては、ポアソン比効果（表面での厚さ方向ひずみの増大）を表わす弾性追従パラメータ q_{ν} と板厚内応力再配分効果（膜ひずみの増大）を表わす弾性追従パラメータ $q_{\sigma T}$ の組合せが適切と考えられる。

上記弾性追従パラメータによるひずみ集中係数の組合せとして両者の積を考えるならば、評価式は以下の形態となると考えられる。

$$K_T = (\epsilon_t / \epsilon_F) = K_\nu \times K_{DT} \dots\dots\dots (1.1)$$

K_T : 平滑円筒におけるひずみ集中係数

ϵ_t : 弾塑性解析における相当ひずみ範囲

ϵ_F : 弾性解析における相当ひずみ範囲

K_ν : ポアソン比効果によるひずみ集中係数

$$K_\nu = 1 + (q_\nu - 1) \times (1 - 2\sigma_y / S_p) \dots\dots\dots (1.2)$$

q_ν : ポアソン比効果による弾性追従パラメータ

等2軸状態においては、 $q_\nu = 2 \times (1 - \nu)$

$$\dots\dots\dots (1.3)$$

ν : ポアソン比

σ_y : 降伏応力

S_p : 弾性解析によるピーク応力強さ

K_{DT} : 応力再配分効果によるひずみ集中係数

$$K_{DT} = 1 + (q_{DT} - 1) \times (1 - 2\sigma_y / S_p) \dots\dots\dots (1.4)$$

q_{DT} : 応力再配分効果による弾性追従パラメータ

σ_y 、 S_p : (1.2) 式と同様

以上の考え方を基に平滑周溶接継手におけるひずみ範囲算出式を考察する。平滑周溶接継手を2種材料弾完全塑性体モデルとして考えた場合、均一材料を想定した平滑円筒に対し溶接金属、母材と言う2種材料の材料特性の差異から生ずるひずみ集中が重畳すると考えられる。以下にそのひずみ範囲算出式を示す。

$$K_{TW} = (\epsilon_t / \epsilon_F) = K_\nu \times K_{DT} \times K_w \dots\dots\dots (1.5)$$

K_{TW} : 平滑周溶接継手におけるひずみ集中係数

ϵ_t : 弾塑性解析における溶接継手部相当ひずみ範囲

ϵ_F : 弾性解析における相当ひずみ範囲

K_w : 冶金的構造不連続効果によるひずみ集中係数

K_ν : 溶接継手部のポアソン比効果によるひずみ集中係数

$$K_\nu = 1 + (q_\nu - 1) \times (1 - r_y \times 2\sigma_y / S_p) \dots\dots\dots (1.6)$$

q_ν : (1.3) 式と同様

σ_y 、 S_p : (1.2) 式と同様

r_y : 母材と溶接金属の降伏応力比

K_{DT} : 溶接継手部の応力再配分効果によるひずみ集中係数

$$K_{DT} = 1 + (q_{DT} - 1) \times (1 - r_y \times 2 \sigma_y / S_p) \dots\dots (1.7)$$

q_{DT} : (1.4) 式と同様

σ_y 、 S_p 、 r_y : (1.6) 式と同様

本検討では、冶金的構造不連続効果によるひずみ集中係数 K_w を策定するに際し、均一材料におけるひずみ増大分はFEM解析結果を用いるものとして以下の式を想定した。

$$K_w = (\varepsilon_{tw} / \varepsilon_{tw0}) = 1 + \{ (f_w \times q_w) - 1 \} \times (1 - r_y \times 2 \sigma_y / S_n) \dots\dots (1.8)$$

ε_{tw} : 弾塑性解析での溶接継手部の相当ひずみ範囲

ε_{tw0} : 弾塑性解析での溶金一様を想定した場合の相当ひずみ範囲

q_w : リファレンスとなる負荷条件、形状、材料特性より得られた溶接継手部の弾性追従パラメータ

f_w : 冶金的構造不連続効果に影響を及ぼすと考えられる各種因子（負荷、形状、材料特性等）のリファレンスに対する効果係数

S_n : 弾性解析での（膜+曲げ）応力強さ範囲

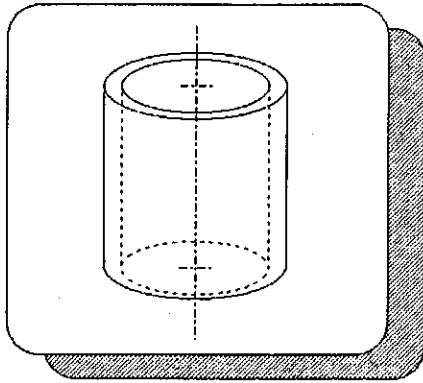
σ_y 、 r_y : (1.6) 式と同様

ここで、リファレンスとして継手幅無限大、厚さ方向温度分布を線形分布としたモデルを考える。

以上の考え方を基に本報では、以下の手順により検討を進める。図1.2に検討フローを示す。

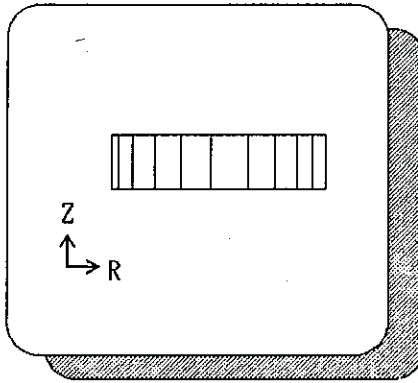
- ① リファレンスモデルにおける平滑周溶接継手の解析を行い、その基本挙動について把握する。
- ② 平滑周溶接継手に影響を及ぼす因子について、パラメータ解析を行いその影響度を把握する。
- ③ ②の解析結果から想定した冶金的構造不連続効果によるひずみ範囲算出式におけるリファレンスに対する効果係数を算出し、その挙動の傾向を検討する。

平滑無限円筒モデル

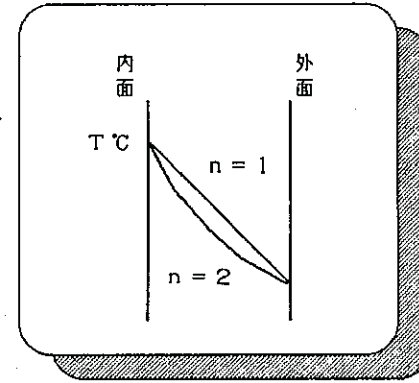


モデル化

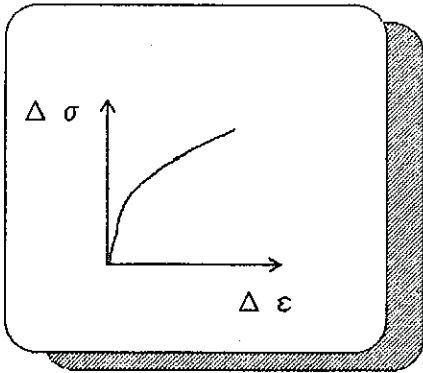
軸対称モデル



厚さ方向指数型温度分布

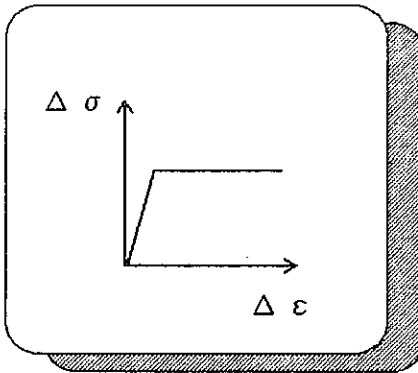


母材の応力-ひずみ関係



モデル化

弾完全塑性体モデル



FEMによるパラメータ解析

検討結果

- 平滑円筒のひずみ集中係数
- ボアソン比効果を表わす弾性追従パラメータ (q_v)
- 応力再配分効果を表わす弾性追従パラメータ (q_{DT})
- 上記2種の組合せ

周継手解析における検討

図1.1 平滑円筒の検討フロー
 Fig. 1.1 Flow diagram of study on the cylinder

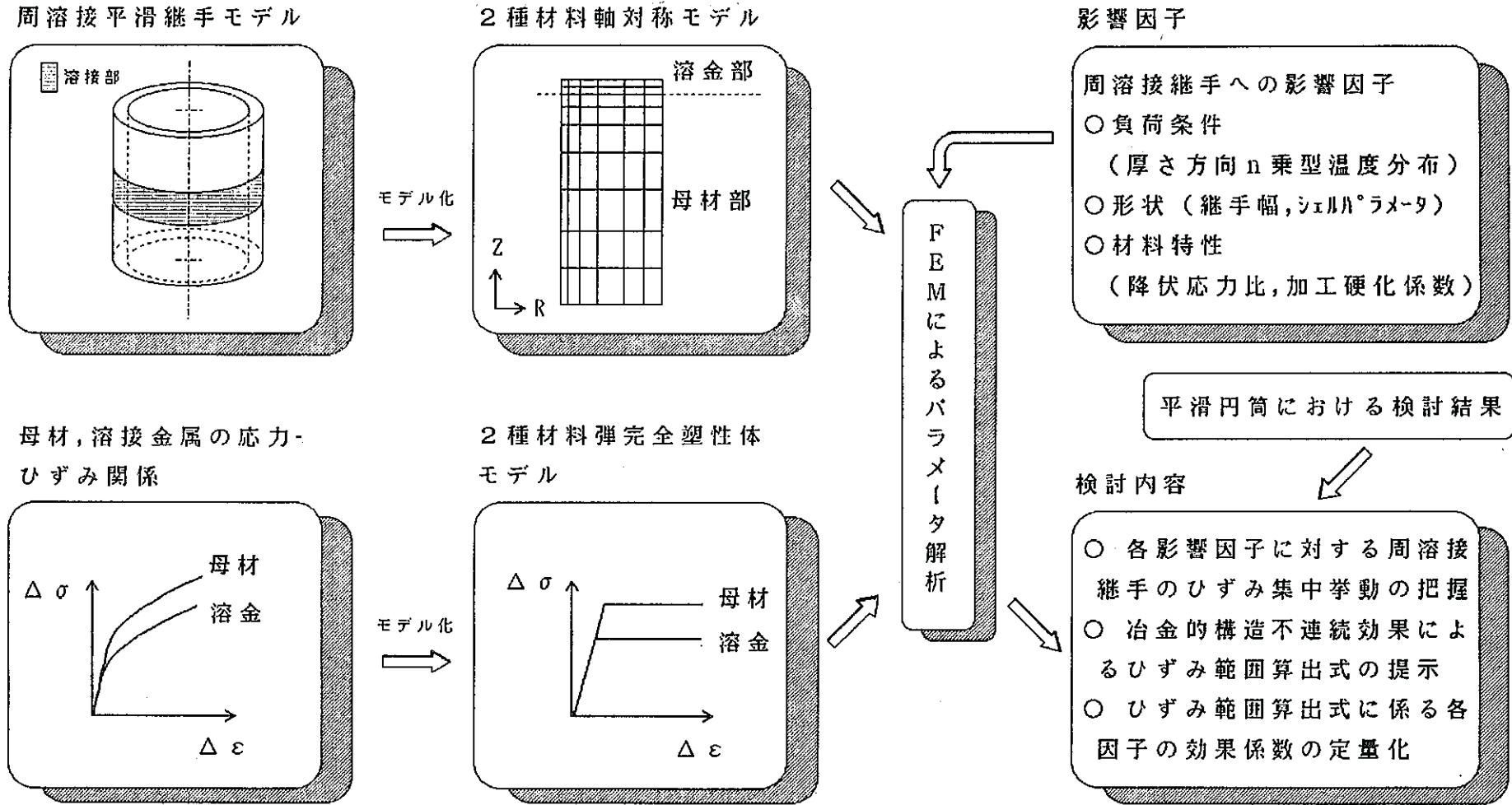


図1.2 周継手解析の検討フロー

Fig. 1.2 Flow diagram of study on stress analysis of the circumferential welded joint

2.2 パラメータ解析のフロー

溶接金属、母材の2種材料弾完全塑性体モデルを想定した周溶接継手に対し、負荷因子、形状因子、材料因子の各種パラメータにおける弾塑性解析を行い、周溶接継手に生ずる冶金的構造不連続効果によるひずみ集中係数の検討を行う。

FEM解析における各種パラメータを以下に示す。

① 負荷因子

- 厚さ方向 n 乗型温度分布 (n)

② 形状因子

- シェルパラメータ (\sqrt{Dt})

D : 直径、t : 板厚

- 継手幅 (H)

③ 材料因子

- 溶金と母材の降伏応力比 (r_y)

- 加工硬化係数 (H')

図2.1に解析のフローを示す。

先ず、周溶接継手の基本挙動を把握するために継手幅 ∞ 、厚さ方向 n 乗型温度分布を線形分布 ($n = 1$) としたリファレンスモデルに対する解析を行う。

以下、各種パラメータ解析を行い、冶金的構造不連続効果におけるひずみ範囲算出式を考案し、パラメータ解析結果を基にその策定を行う。

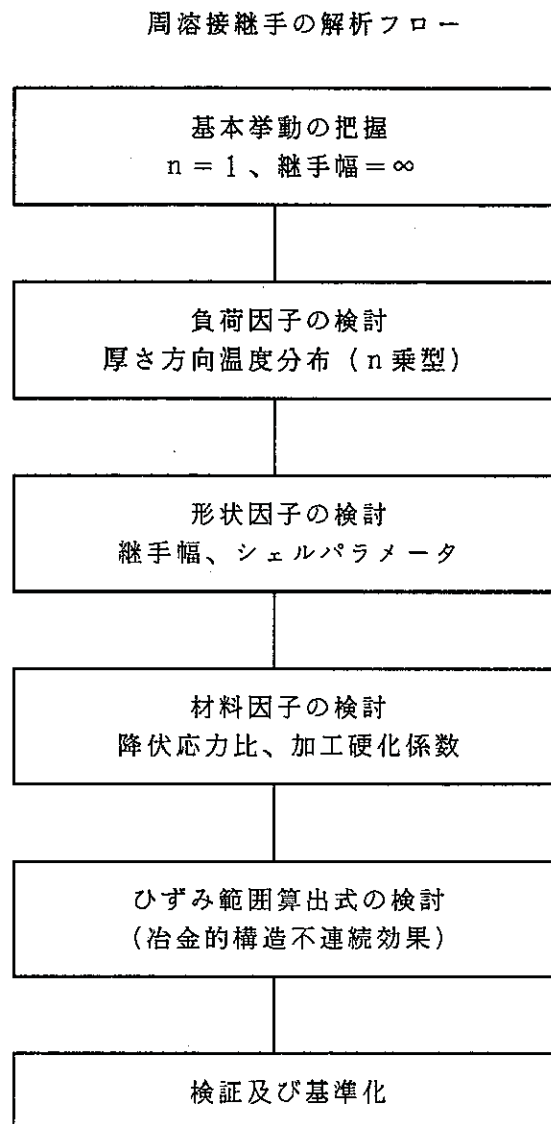


図 2.1 解析のフロー

Fig. 2.1 Flow diagram of stress analysis of the circumferential welded joint

3. 解析の方法

3.1 解析モデル

本解析で使用した解析モデルについて述べる。

3.1.1 リファレンスモデル

リファレンスとして以下のモデルを考える。

○ 形状

形状としては、継手幅を無限大としてモデルを考える。

○ 負荷条件

厚さ方向について線形温度分布を与える。

負荷の大きさは、4.2節 厚さ方向温度分布の検討の場合のみ $S_p / 2\sigma_y \approx 10$ 、その他の場合は、解析時間等を節約するために $S_p / 2\sigma_y \approx 5$ としている。

尚、文中に記されているリファレンスケースのケース名は、以下の様に区別される。

文中のリファレンスケース名 CASE-1-1 … $S_p / 2\sigma_y \approx 10$

CASE-1-1A … $S_p / 2\sigma_y \approx 5$

ここで、

S_p : 弾性解析による内表面でのピーク応力強さ範囲

σ_y : 母材の降伏応力

(1) モデル寸法及び要素分割 (図3.1.1.1)

① ケース名 CASE-1-1 及び CASE-1-1A

② 寸法

半径 R …… 1000mm (直径 D = 2000mm)

板厚 t …… 15mm (シェルパラメータ $\sqrt{Dt} \approx 173.2$)

継手部幅 … 800mm

母材部幅 … 400mm

ここで、溶接金属部幅及び母材部幅は端部境界条件の継手部に対する影響が充分小さくなる長さとして、 $2.5\sqrt{Rt}$ 以上の長さを設定した。

③ 要素分割

板厚方向8層、軸方向30層

(2) 要素の種類

QAX8 (8節点四辺形軸対称要素)

詳細は、FINAS使用説明書⁽⁹⁾を参照。

(3) 境界条件 (図3.1.1.2)

θ 軸まわりに回転拘束

(4) 負荷条件 (図3.1.1.3)

外面温度を一定 (0℃) とし、厚さ方向の温度分布が所定の分布になる様に節点温度をファスニングした上で内面温度履歴を与える。図3.1.1.3に内面の温度履歴を示す。

リファレンス条件では、線形の温度分布を考える。

負荷の大きさを、以下に示す。

CASE-1-1 の場合 … $S_p / 2 \sigma_y \approx 10$

CASE-1-1A の場合 … $S_p / 2 \sigma_y \approx 5$

弾塑性解析は1サイクル行う。

(5) 材料特性

温度依存性を考慮せず、弾完全塑性体を想定する。

○ 縦弾性係数 $E = 16200.0 \text{ kg/mm}^2$

○ ポアソン比 $\nu = 0.3$

○ 線膨張係数 $\alpha = 18.12 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$

○ 加工硬化係数 $H' = 16.2 \text{ kg/mm}^2$ (弾完全塑性体を近似するためEの

1/1000の値を設定)

○ 母材部降伏応力 $\sigma_y = 15.0 \text{ kg/mm}^2$

SUS304 500℃における1.5 S_m に相当する。

○ 降伏応力比 (溶金部降伏応力/母材部降伏応力) $r_y = 0.8$

高温構造設計方針、
材料強度基準SUS304
500℃のデータに相当

○ 移動硬化則

3.1.2 厚さ方向温度分布の影響

厚さ方向に n 乗型温度分布を想定した場合について、弾塑性挙動に対する n の影響を把握するため、以下に示す 3 ケースの解析を行った。温度分布 T の定義は、外表面の温度を 0、内表面の温度を a 、板厚を t 、外面からの距離を x とした場合に、

$$T = a \left(x / t \right)^n$$

で表わされる。

① ケース名

CASE-1-2 … $n = 2$

CASE-1-3 … $n = 3$

CASE-1-4 … $n = 4$

解析パラメータ一覧を表 3.1.1 に示す。

(1) モデル寸法及び要素分割

リファレンスと同一をモデル使用 (3.1.1 節参照)

(2) 要素の種類

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

(3) 境界条件

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

(4) 負荷条件

n 乗型温度分布: $n = 2, 3, 4$

但し、リファレンスモデルと同様に負荷の大きさは、最大で $S_p / 2 \sigma_y = 10$ とする。

(5) 材料特性

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

3.1.3 シェルパラメータの影響

シェルパラメータの影響を把握するため、以下に示す 4 ケースの解析を行った。

CASE-2-1 … シェルパラメータ $\sqrt{Dt} = 10.0$

CASE-2-2 A … シェルパラメータ $\sqrt{Dt} = 50.0$

CASE-2-4 … シェルパラメータ $\sqrt{Dt}=100.0$

CASE-2-5 … シェルパラメータ $\sqrt{Dt}=500.0$

ここで、Dは直径、tは板厚である。

尚、直径・板厚比 (D/t) については、 $n=3$ の場合であるが $D/t > 20$ であれば円周方向の曲率の影響は小さくなるという知見が得られている⁽⁷⁾。上記4ケースの内、CASE-2-4は、 $D/t=11.1$ であるので多少曲率の影響をうける可能性がある。

解析パラメータ一覧を表3.1.2に示す。

(1) モデル寸法及び要素分割

板厚方向8層、軸方向30層

CASE-2-1 ($\sqrt{Dt}=10.0$) … 図3.1.3.1(a)

半径 $R=1000\text{mm}$ (直径 $D=2000\text{mm}$)

板厚 $t=0.05\text{mm}$

溶金部幅 = 800mm 母材部 = 400mm

CASE-2-2 A ($\sqrt{Dt}=50.0$) … 図3.1.3.1(b)

半径 $R=333.33\text{mm}$ (直径 $D=666.66\text{mm}$)

板厚 $t=15.0\text{mm}$

溶金部幅 = 800mm 母材部 = 400mm

CASE-2-4 ($\sqrt{Dt}=100.0$) … 図3.1.3.1(c)

半径 $R=83.33\text{mm}$ (直径 $D=166.66\text{mm}$)

板厚 $t=15.0\text{mm}$

溶金部幅 = 800mm 母材部 = 400mm

板厚方向8層、軸方向46層

CASE-2-5 ($\sqrt{Dt}=500.0$) … 図3.1.3.1(d)

半径 $R=8333.33\text{mm}$ (直径 $D=16666.66\text{mm}$)

板厚 $t=15.0\text{mm}$

溶金部幅 = 2500mm 母材部 = 1250mm

(2) 要素の種類

リファレンスモデルと同一（3.1.1節参照）

(3) 境界条件

リファレンスモデルと同一（3.1.1節参照）

(4) 負荷条件

リファレンスモデルと同一（3.1.1節参照）

但し、負荷の大きさは、 $S_p / 2 \sigma_y = 5$ とする。

(5) 材料特性

リファレンスモデルと同一（3.1.1節参照）

3.1.4 継手幅の影響

継手幅の影響を把握するため、以下に示す5ケースの解析を行った。

CASE-3-1 … 継手幅 $H = 3.0\text{mm}$ ($H/t = 0.2$)

CASE-3-2 … 継手幅 $H = 6.0\text{mm}$ ($H/t = 0.4$)

CASE-3-3 … 継手幅 $H = 20.0\text{mm}$ ($H/t = 1.33$)

CASE-3-4 … 継手幅 $H = 15.0\text{mm}$ ($H/t = 1.0$)

CASE-3-5 … 継手幅 $H = 10.5\text{mm}$ ($H/t = 0.7$)

ここで、 t は板厚で15.0mmである。

解析パラメーター一覧を表3.1.3に示す。

(1) モデル寸法及び要素分割

板厚方向8層、軸方向20層

CASE-3-1（継手幅 $H = 3.0$ ） … 図3.1.4(a)

板厚方向8層、軸方向18層

CASE-3-2（継手幅 $H = 6.0$ ） … 図3.1.4(b)

板厚方向8層、軸方向19層

CASE-3-3（継手幅 $H = 20.0$ ） … 図3.1.4(c)

板厚方向8層、軸方向22層

CASE-3-4（継手幅 $H = 15.0$ ） … 図3.1.4(d)

CASE-3-5（継手幅 $H = 10.5$ ） … 図3.1.4(e)

(2) 要素の種類

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

(3) 境界条件

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

(4) 負荷条件

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

但し、負荷の大きさは、 $S_p / 2 \sigma_y \approx 5$ とする。

(5) 材料特性

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

3.1.5 降伏応力比の影響

降伏応力比の影響を把握するため、以下に示す4ケースの解析を行った。

CASE-4-1 ... 降伏応力比 $r_y = 0.75$

CASE-4-2 ... 降伏応力比 $r_y = 0.9$

CASE-4-3 ... 降伏応力比 $r_y = 0.85$

CASE-4-4 ... 降伏応力比 $r_y = 0.95$

解析ケース一覧を表3.1.4に示す。

(1) モデル寸法及び要素分割

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

(2) 要素の種類

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

(3) 境界条件

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

(4) 負荷条件

リファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

但し、負荷の大きさは、 $S_p / 2 \sigma_y \approx 5$ とする。

(5) 材料特性

降伏応力比を除いてリファレンスモデルと同一 (3.1.1 節参照)

3.1.6 加工硬化係数の影響

加工硬化係数の影響を把握するため、以下に示す3ケースの解析を行った。

CASE-5-1 … 加工硬化係数 $H' = 1620.0 \text{ kg/mm}^2$ (E/10)

CASE-5-2 … 加工硬化係数 $H' = 2430.0 \text{ kg/mm}^2$ (E/6.6…)

CASE-5-3 … 加工硬化係数 $H' = 3240.0 \text{ kg/mm}^2$ (E/5)

解析ケース一覧を表3.1.5に示す。

(1) モデル寸法及び要素分割

リファレンスモデルと同一 (3.1.1節参照)

(2) 要素の種類

リファレンスモデルと同一 (3.1.1節参照)

(3) 境界条件

リファレンスモデルと同一 (3.1.1節参照)

(4) 負荷条件

リファレンスモデルと同一 (3.1.1節参照)

但し、負荷の大きさは、 $S_p / 2 \sigma_y = 5$ とする。

(5) 材料特性

加工硬化係数を除いてリファレンスモデルと同一 (3.1.1節参照)

3.2 解析結果のアウトプット

以下に本解析で出力した結果の概要を示す。

(1) ひずみ範囲軸方向分布

内表面での相当ひずみ範囲が、最大になるような極値2時点間で算出した相当ひずみ範囲及び成分毎のひずみ範囲の内表面での外挿値を軸方向の分布としてプロットする。

尚、極値2時点について文中では、最初の極値時点を極値時点A、後の極値時点を極値時点Bと表記する。

(2) 相当塑性ひずみコンター図

極値時点Bにおける相当塑性ひずみを示す。

(3) ひずみ集中係数 K_F の履歴

ひずみ集中係数 K_F は、内表面の相当ひずみについて極値時点 A を基準にした非弾性解析による相当ひずみ増分をその時点に対応した弾性解析による相当ひずみ増分で除した値である。

図の横軸は、弾性解析による内表面での相当応力増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で無次元化したものである。

ひずみ集中係数 K_F の算出法

$$K_F = \varepsilon_t / \varepsilon_F \dots\dots\dots (1.9)$$

K_F : ひずみ集中係数

ε_F : 弾性解析における表面での相当ひずみ範囲

ε_t : 非弾性解析における表面での相当ひずみ範囲

表 3.1.1 厚さ方向温度分布の影響 解析ケース一覧表

Table 3.1.1 Analysis cases (parameter:temperature distribution of through the wall thickness (n))

解析ケース	直径 D (mm)	板厚 t (mm)	継手幅 H (mm)	母材幅 (mm)	n 乗型温度分布
CASE-1-1	2000.0	15.0	800.0	400.0	1
CASE-1-2					2
CASE-1-3					3
CASE-1-4					4

○ 母材降伏応力 15.0 Kg/mm² 溶金降伏応力 12.0 Kg/mm²

○ 降伏応力比 溶金/母材 = 0.8

○ 加工硬化係数 16.2 Kg/mm²

表 3.1.2 シェルパラメータの影響 解析ケース一覧表
 Table 3.1.2 Analysis cases (Parameter:shell parameter (\sqrt{Dt}))

解析ケース	直径 D (mm)	板厚 t (mm)	シェルパラメータ \sqrt{Dt}	影響域 2.5 Dt	板厚・直径比 t/D	継手幅 (mm)	母材幅 (mm)
CASE-2-1	2000.0	0.05	10.0	17.7	4.0×10^4	800.0	400.0
CASE-2-2A	666.666	15.0	100.0	176.8	44.44	800.0	400.0
CASE-2-4	166.666		50.0	88.4	11.11		
CASE-2-5	16666.666		500.0	883.9	1.11×10^3		
CASE-1-1*)	2000.0		173.205	306.2	133.33	800.0	400.0

*) リファレンスケース

- 負荷条件 n乗型温度分布 n = 1
- 母材降伏応力 15.0 Kg/mm² 溶金降伏応力 12.0 Kg/mm²
- 降伏応力比 溶金/母材 = 0.8
- 加工硬化係数 16.2 Kg/mm²

表 3.1.3 継手幅の影響 解析ケース一覧表
 Table 3.1.3 Analysis cases (parameter: joint width)

解析ケース	直径 D (mm)	板厚 t (mm)	継手幅 H (mm)	継手部・板厚比 H/t	母材幅 (mm)
CASB-3-1	2000.0	15.0	3.0	0.2	400.0
CASE-3-2			6.0	0.4	
CASE-3-3			20.0	0.75	
CASE-3-4			15.0	1.0	
CASE-3-5			10.5	0.7	
CASE-1-1 ^{*)}			800.0	53.33	

^{*)} リファレンスケース

- 負荷条件 n 乗型温度分布 $n = 1$
- 母材降伏応力 15.0 Kg/mm² 溶金降伏応力 12.0 Kg/mm²
- 降伏応力比 溶金/母材 = 0.8
- 加工硬化係数 16.2 Kg/mm²

表 3.1.4 降伏応力比の影響 解析ケース一覧

Table 3.1.4 Analysis cases (parameter: yield stress ratio (γ_y) of weld metal to base metal)

解析ケース	直径 D (mm)	板厚 t (mm)	継手幅 H (mm)	母材幅 (mm)	降伏応力比 γ_y
CASE-4-1	2000.0	15.0	800.0	400.0	0.75
CASE-4-2					0.9
CASE-4-3					0.85
CASE-4-4					0.95
CASE-1-1 ^{*)}					0.8

*) リファレンスケース

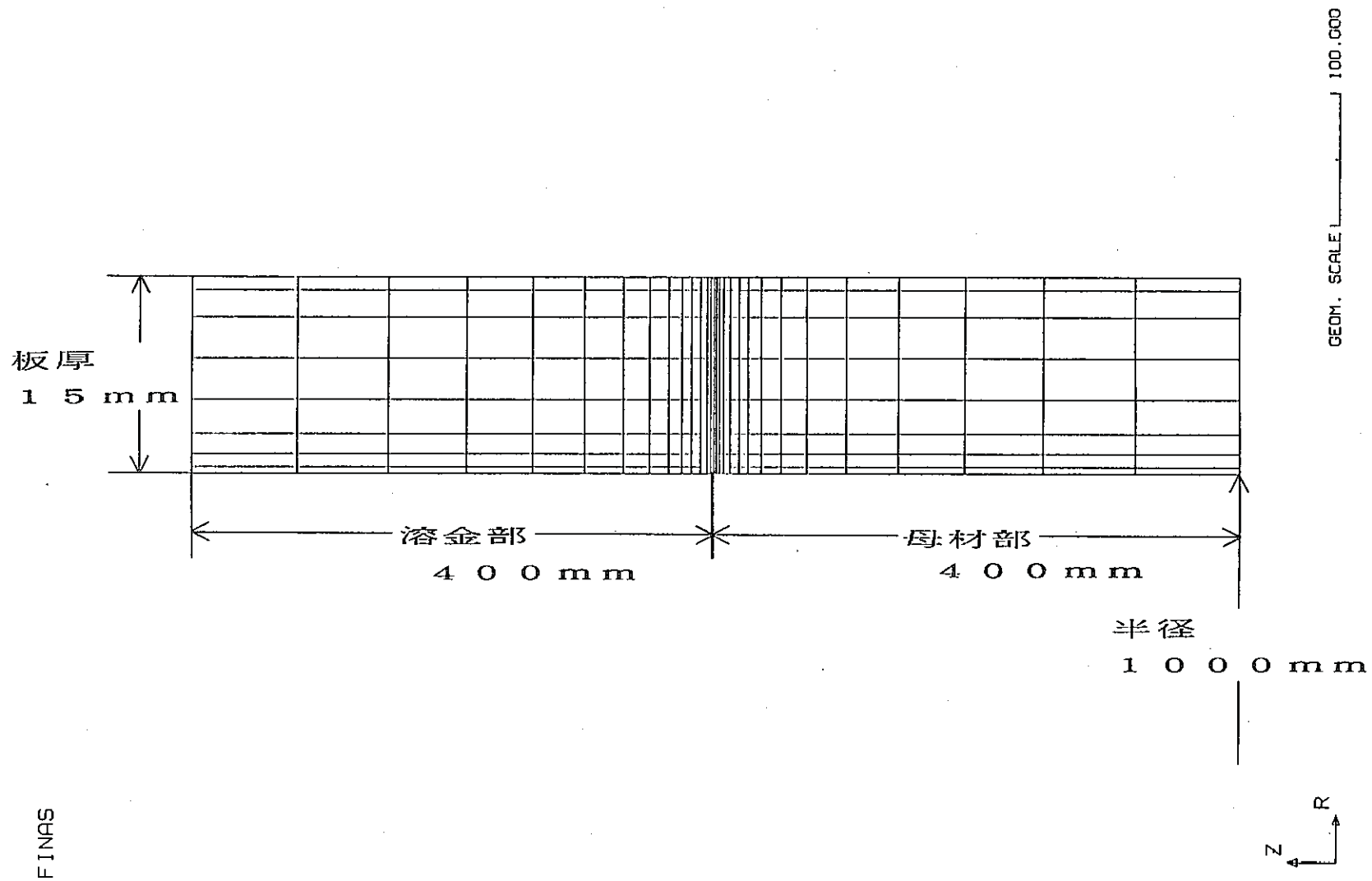
- 負荷条件 n乗型温度分布 n = 1
- 母材降伏応力 15.0 Kg/mm² 溶金降伏応力 12.0 Kg/mm²
- 加工硬化係数 16.2 Kg/mm²

表 3.1.5 加工硬化係数の影響 解析ケース一覧
 Table 3.1.5 Analysis cases (parameter:Work hardening coefficient (H'))

解析ケース	直径 D (mm)	板厚 t (mm)	継手幅 H (mm)	母材幅 (mm)	加工硬化係数 H' (Kg/mm ²)
CASE-5-1	2000.0	15.0	800.0	400.0	1620.0 (E/10)
CASE-5-2					2430.0 (E/6.67)
CASE-5-3					3240.0 (E/5)
CASE-1-1*)					16.2 (E/1000)

*) リファレンスケース

- 負荷条件 n乗型温度分布 n = 1
- 母材降伏応力 15.0 Kg/mm² 溶金降伏応力 12.0 Kg/mm²
- 降伏応力比 溶金/母材 = 0.8
- 縦弾性係数 E = 16200.0 Kg/mm²



FINAS

図3.1.1.1 モデル寸法及び要素分割 (リファレンスケース、CASE-1-1、CASE-1-1A)
 Fig. 3.1.1.1 Configuration of analysis model and mesh (Reference case, CASE-1-1, CASE-1-1a)

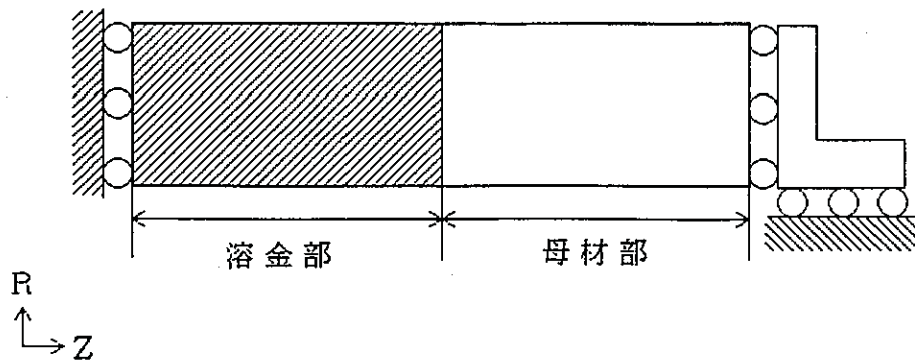


図 3.1.1.2 境界条件
Fig. 3.1.1.2 Boundary condition

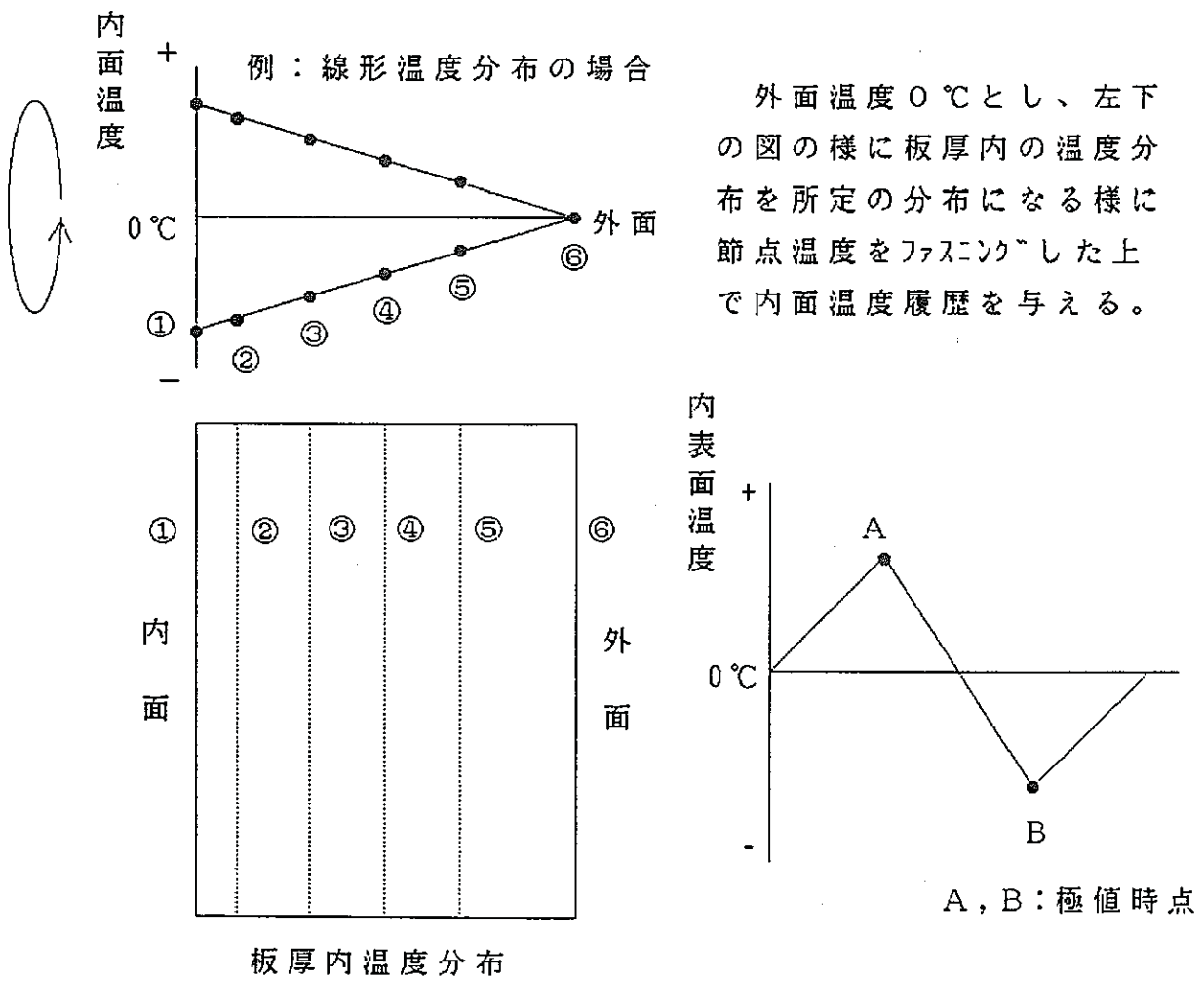


図 3.1.1.3 負荷条件
Fig. 3.1.1.3 Condition of loading

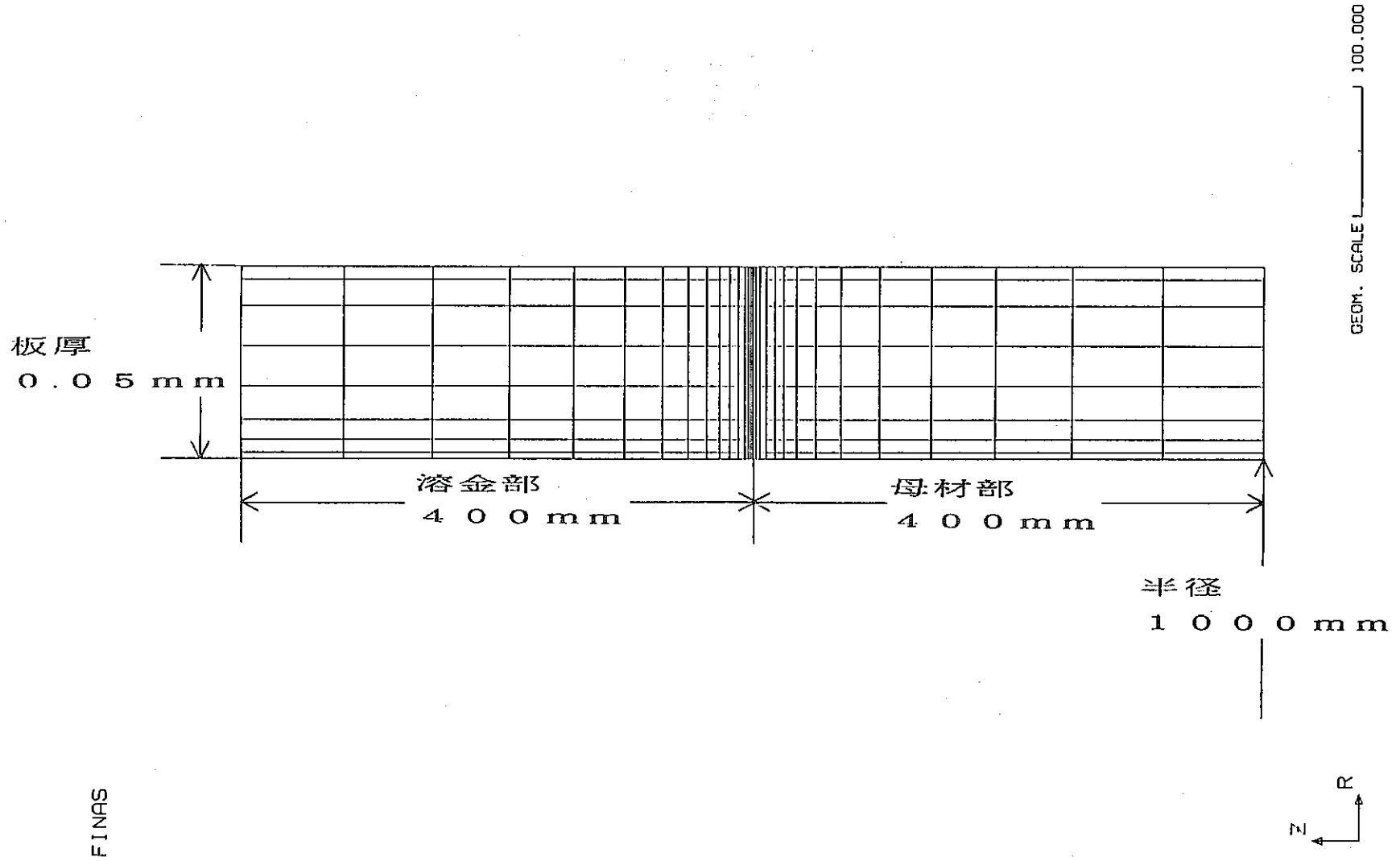
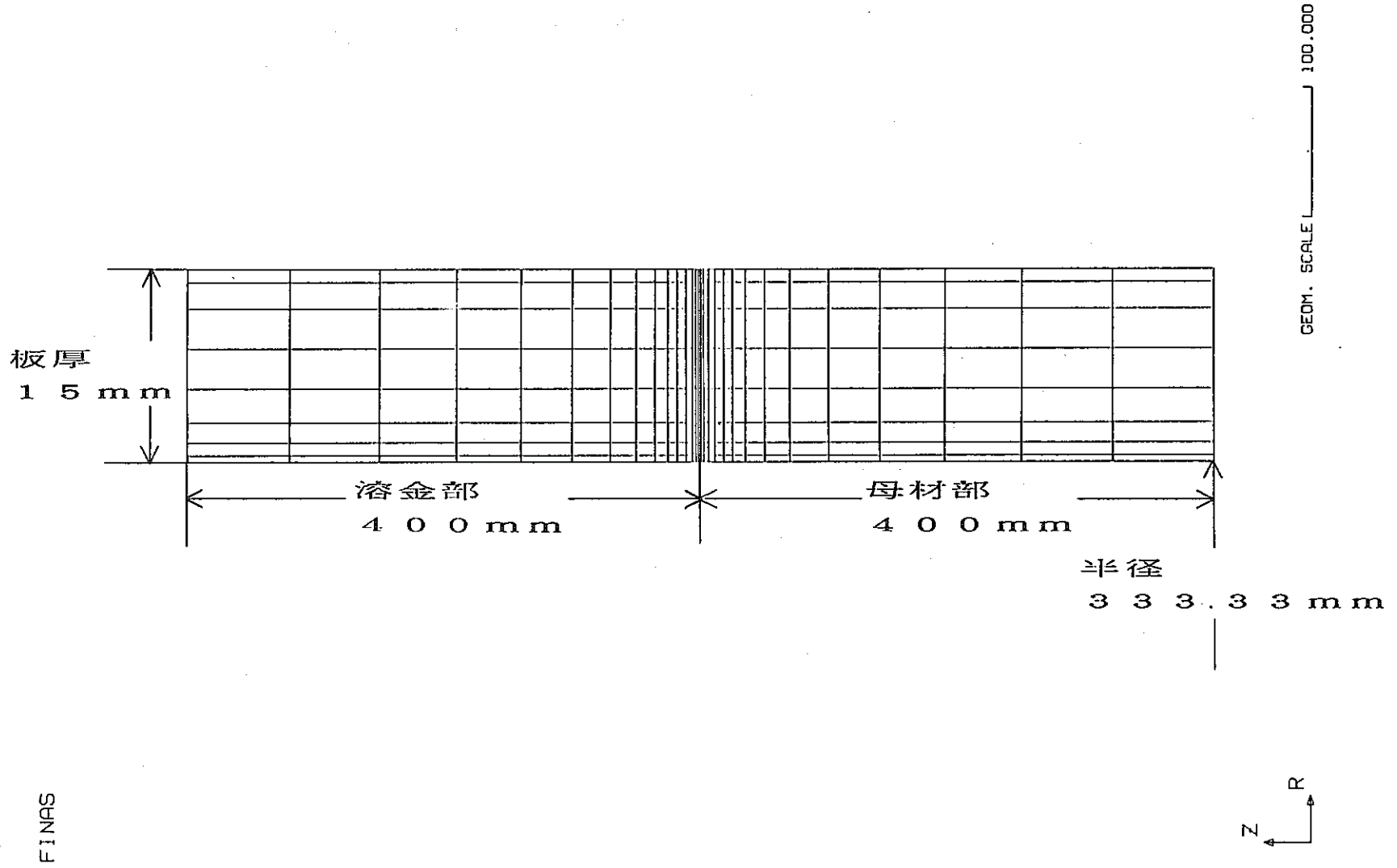


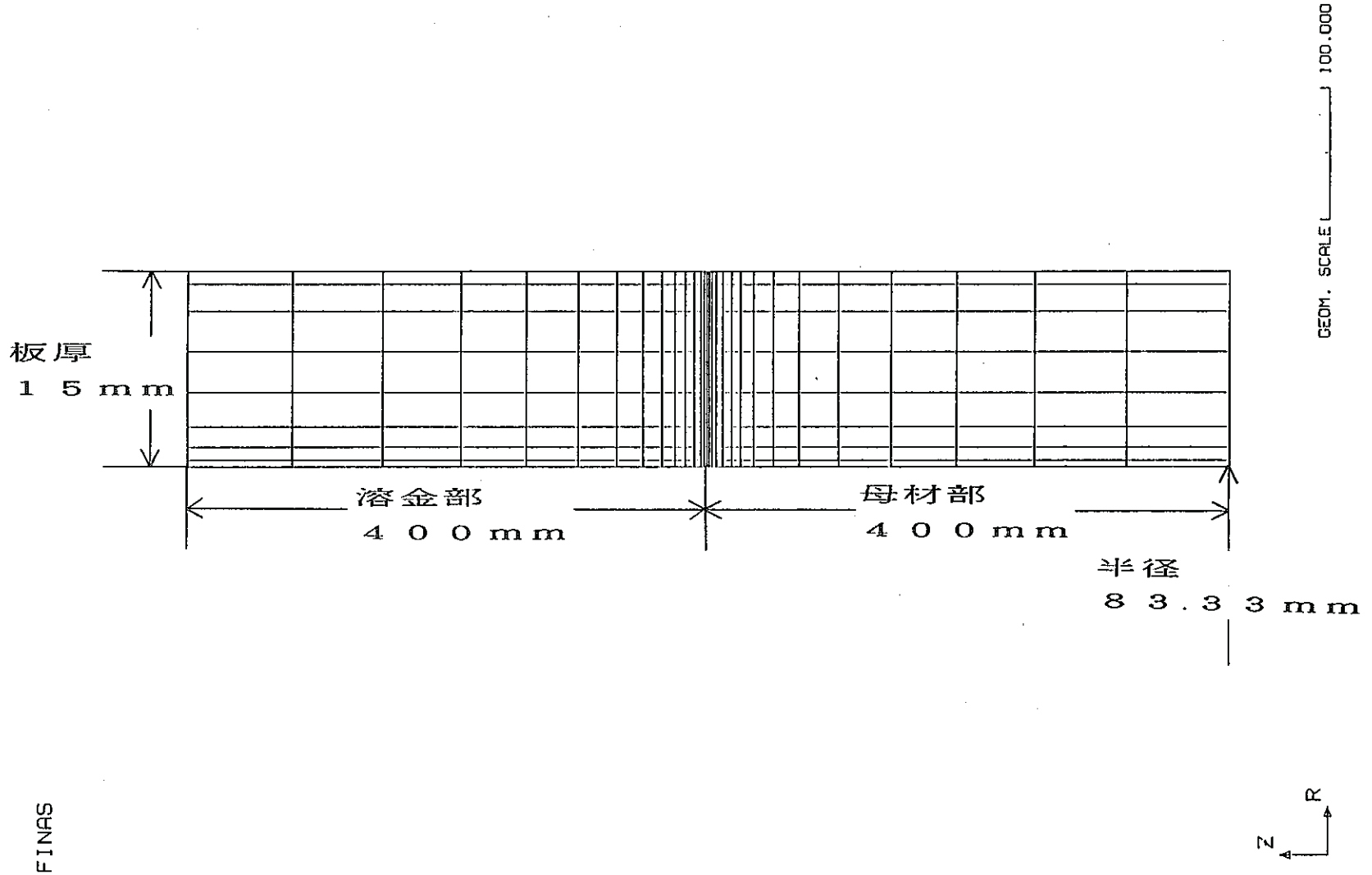
図3.1.3.1(a) モデル寸法及び要素分割 (CASE-2-1、 $\sqrt{Dt}=10.0$)

Fig. 3.1.3.1(a) Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-1, $\sqrt{Dt}=10.0$)



FINAS

図 3.1.3.1 (b) モデル寸法及び要素分割 (CASE-2-2A、 $\sqrt{Dt}=50.0$)
 Fig. 3.1.3.1 (b) Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-2A, $\sqrt{Dt}=50.0$)



FINAS

図 3.1.3.1(c) モデル寸法及び要素分割 (CASE-2-4、 $\sqrt{Dt}=100.0$)
 Fig. 3.1.3.1(c) Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-4, $\sqrt{Dt}=100.0$)

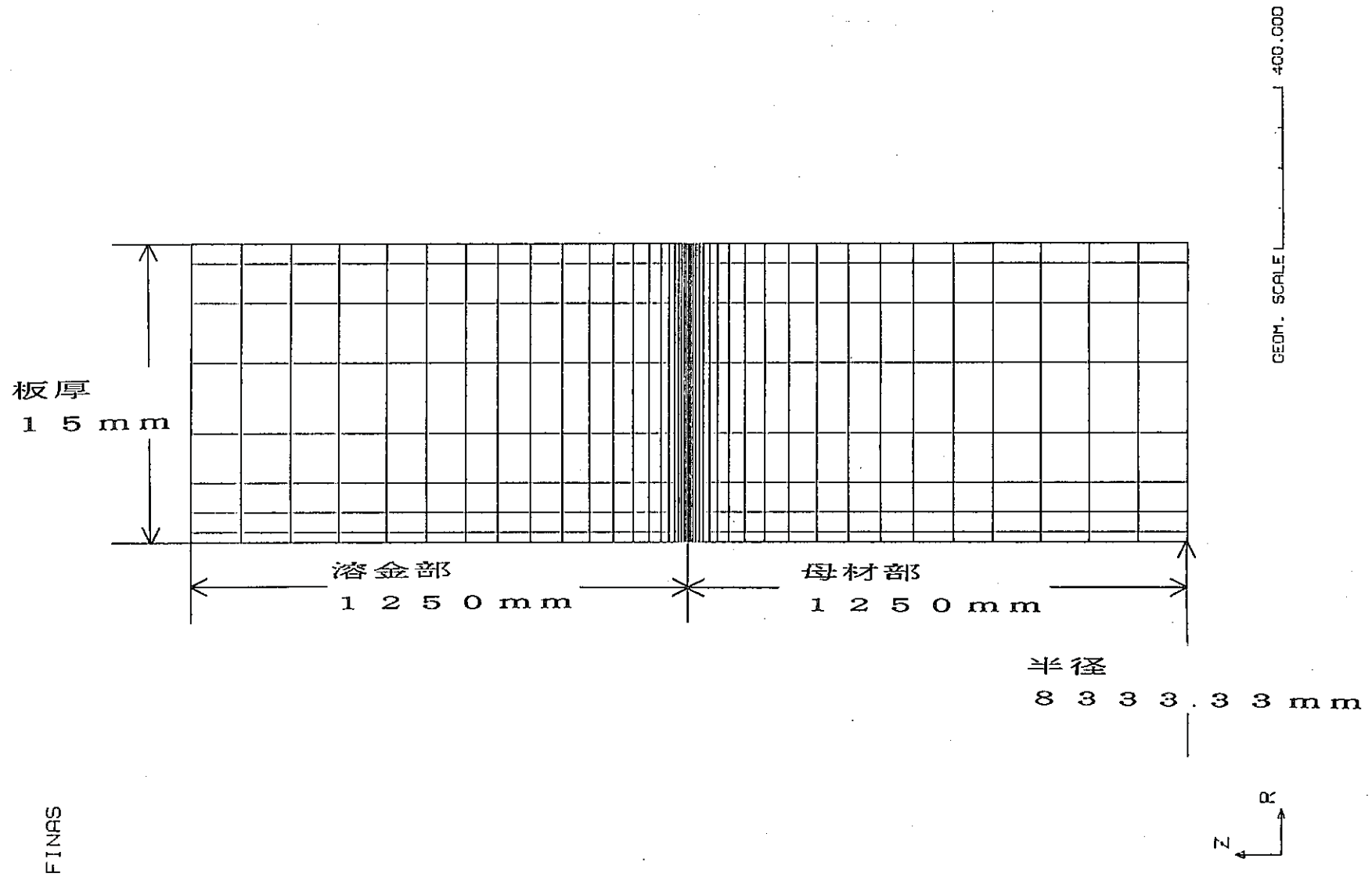


図 3.1.3.1 (d) モデル寸法及び要素分割 (CASE-2-5、 $\sqrt{Dt}=500.0$)
 Fig. 3.1.3.1 (d) Configuration of analysis model and mesh (CASE-2-5, $\sqrt{Dt}=500.0$)

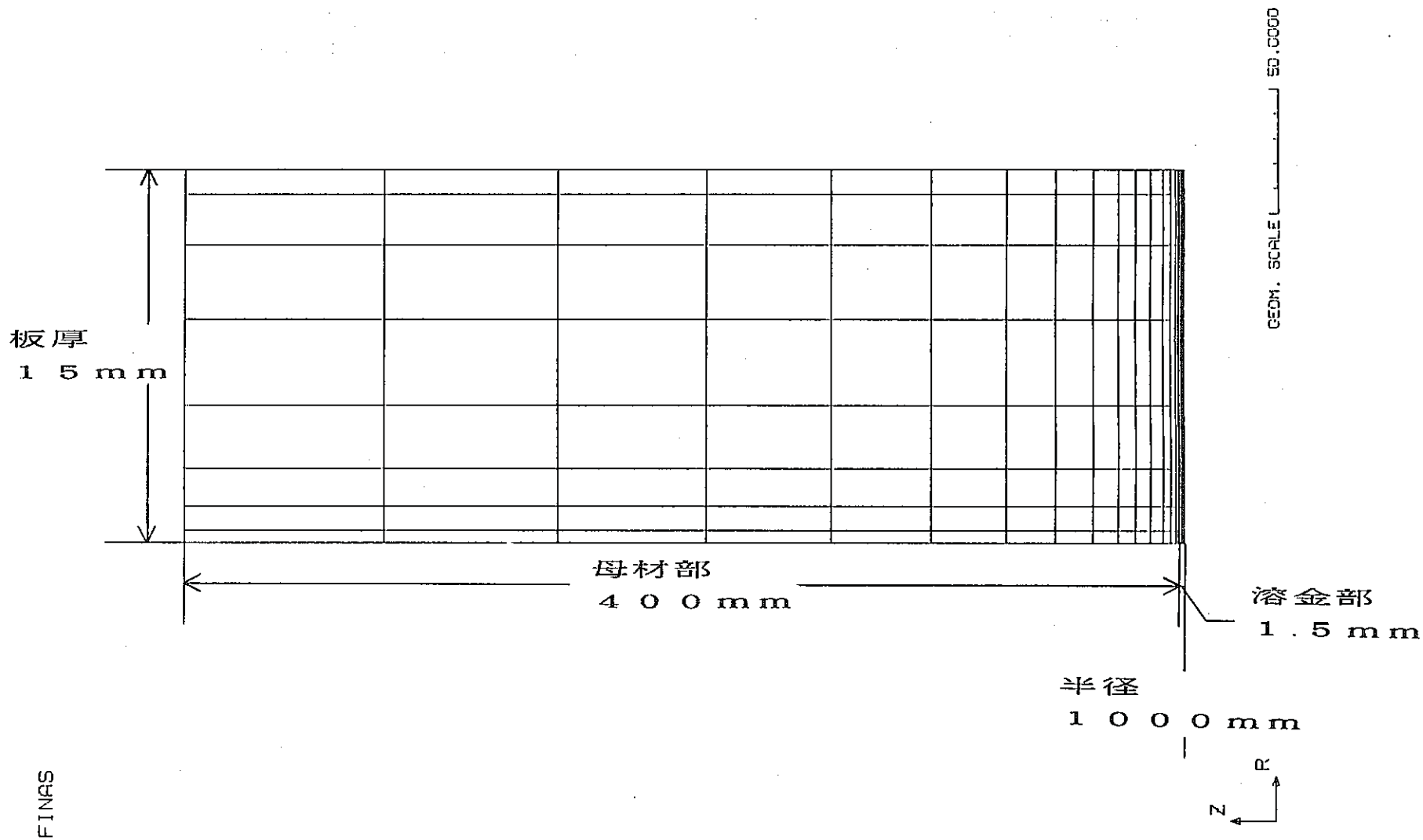


図3.1.4.1(a) モデル寸法及び要素分割 (CASE-3-1、H=3.0mm)

Fig. 3.1.4.1(a) Configuration of analysis model and mesh (CASE-3-1, H=3.0mm)

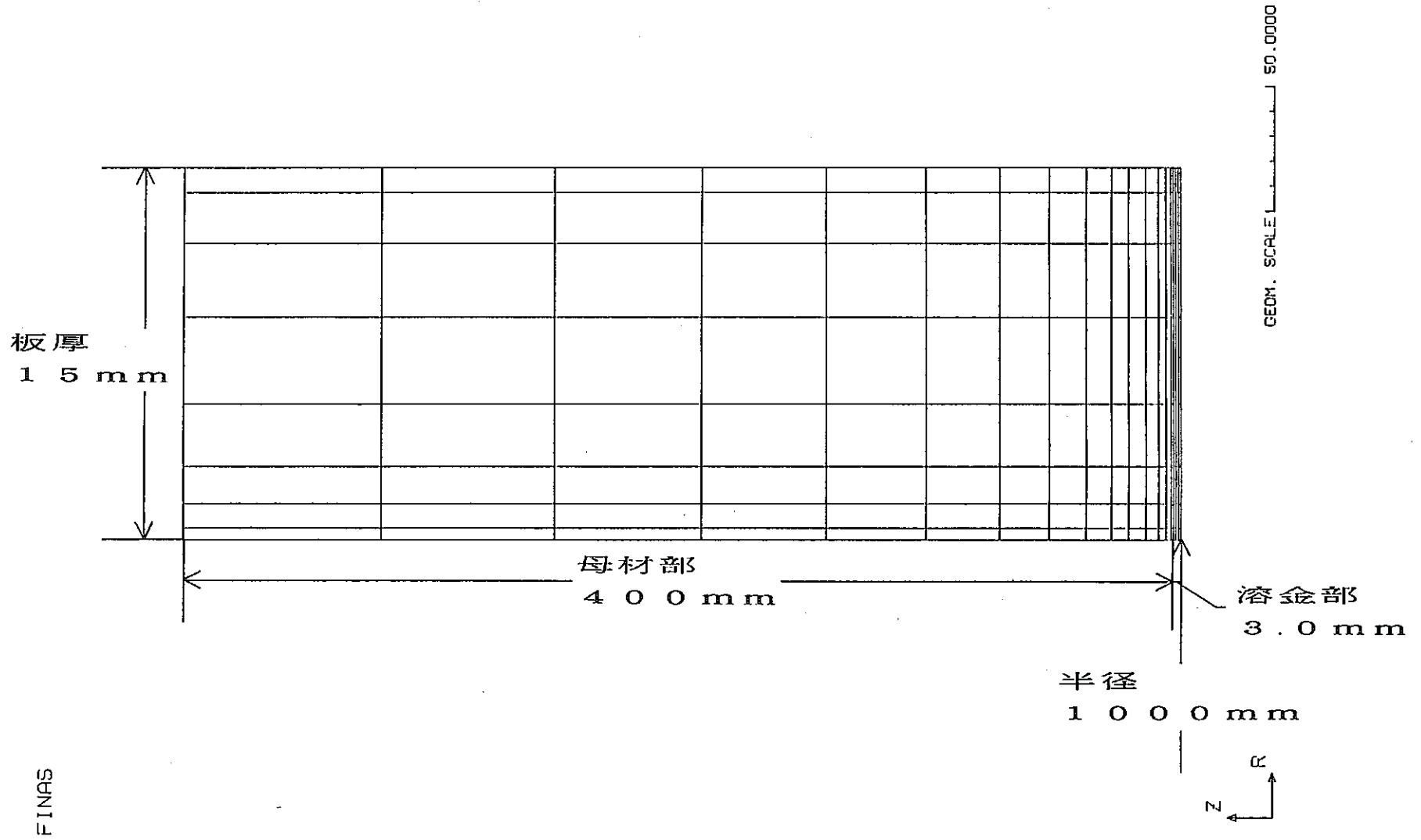
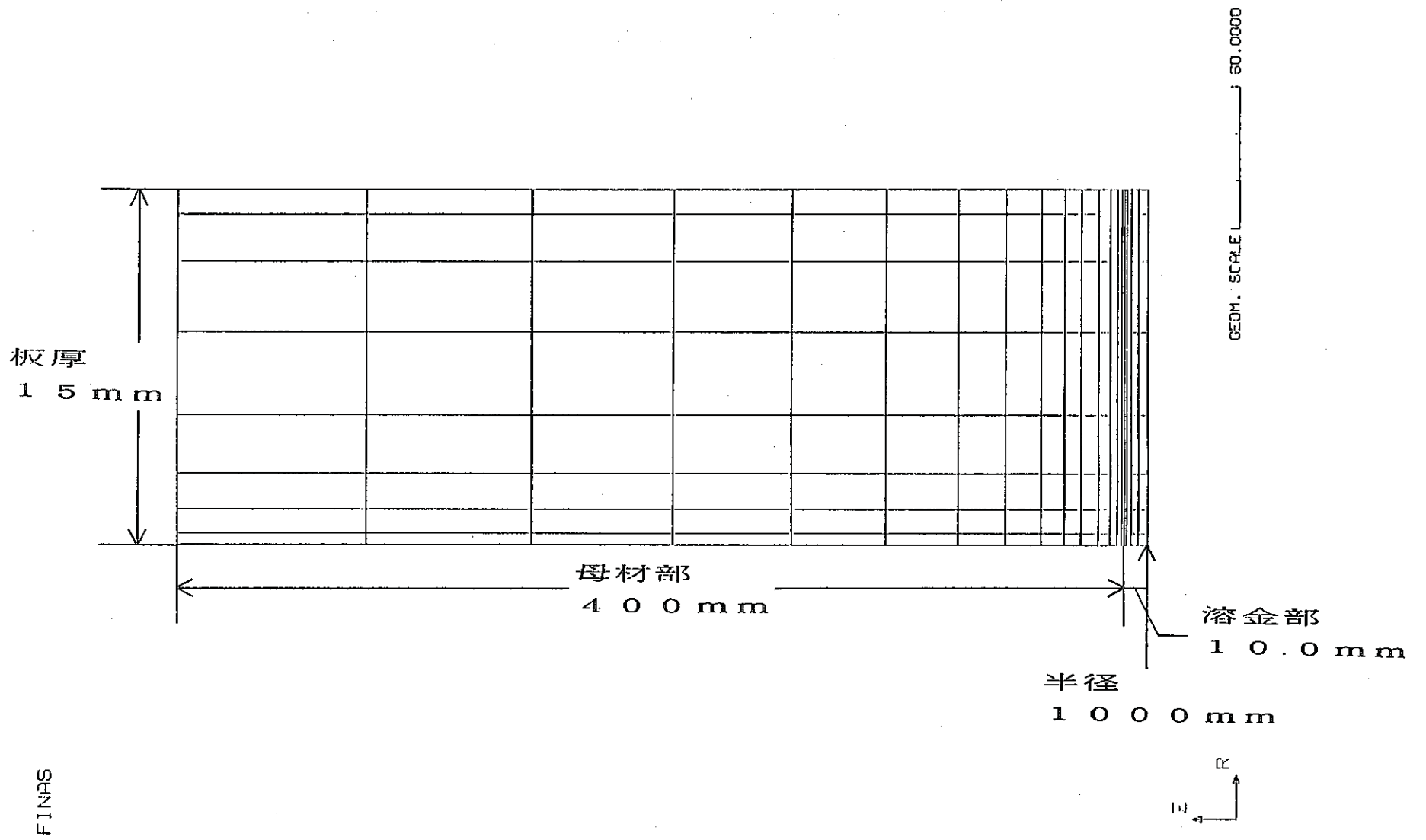


図3.1.4.1(b) モデル寸法及び要素分割 (CASE-3-2、H=6.0mm)

Fig. 3.1.4.1(b) Configuration of analysis model and mesh (CASE-3-2, H=6.0mm)



FINRS

図 3.1.4.1 (c) モデル寸法及び要素分割 (CASE-3-3、H=20.0mm)
Fig. 3.1.4.1 (c) Configuration of analysis model and mesh (CASE-3-3, H=20.0mm)

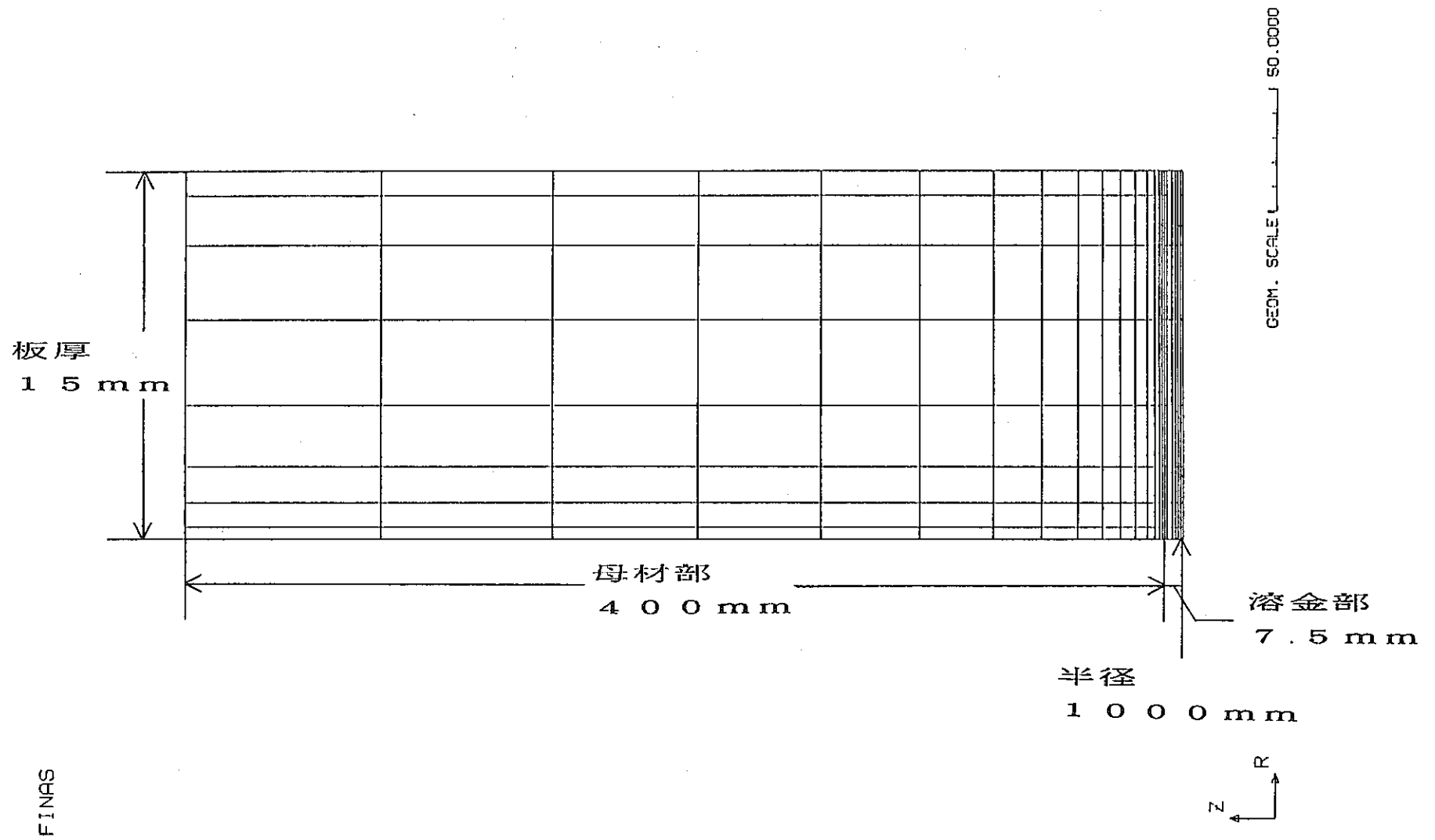


図3.1.4.1(d) モデル寸法及び要素分割 (CASE-3-4、H=15.0mm)
Fig. 3.1.4.1(d) Configuration of analysis model and mesh (CASE-3-4, H=15.0mm)

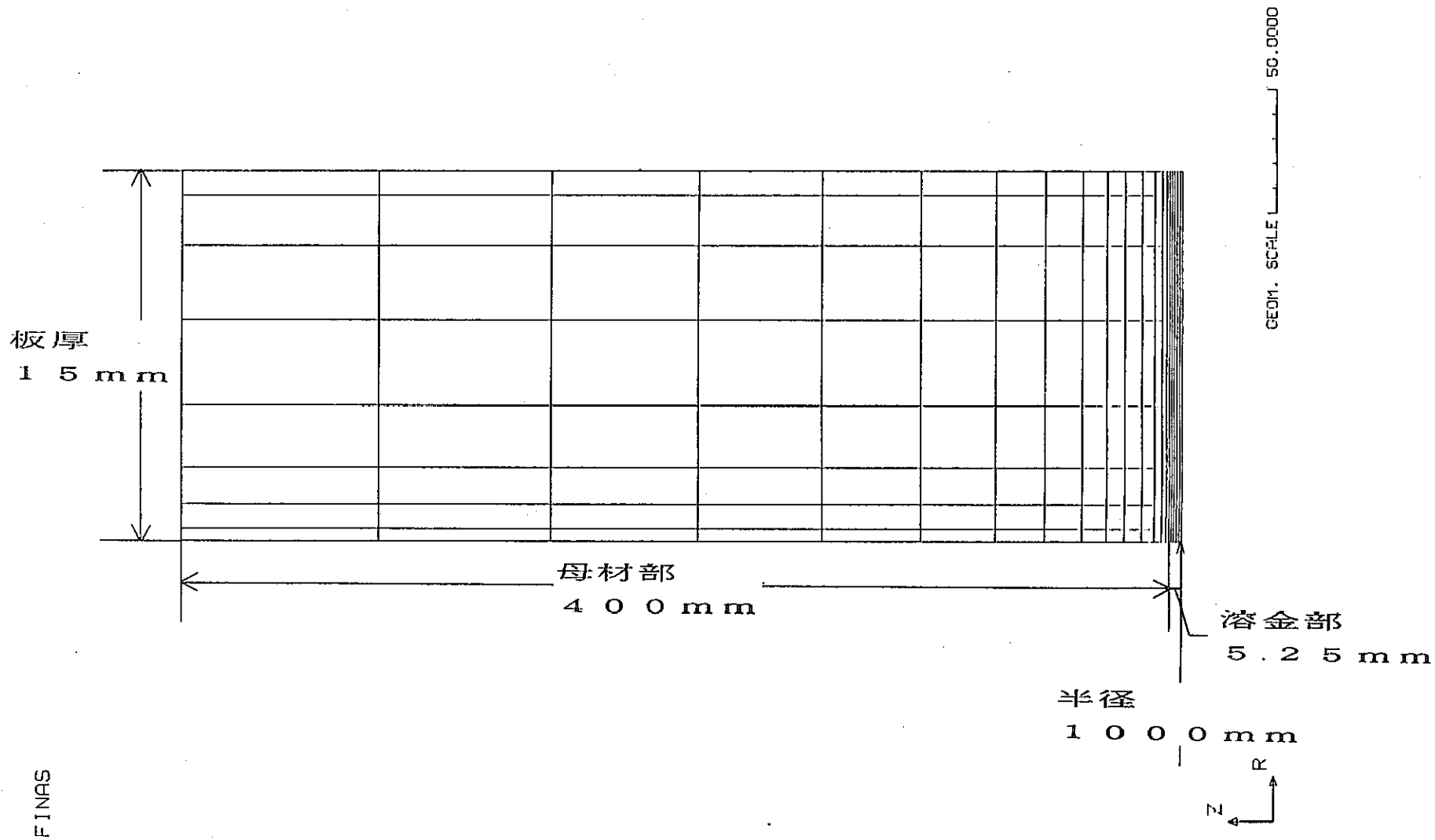


図 3.1.4.1 (e) モデル寸法及び要素分割 (CASE-3-5、H=10.5mm)

Fig. 3.1.4.1 (e) Configuration of analysis model and mesh (CASE-3-5, H=10.5mm)

4. パラメータ解析結果

ここでは、冶金的不連続を2種材料弾完全塑性体でモデル化した周溶接継手についてリファレンス条件に対する解析を行い、基本となる弾塑性挙動を把握する。更に、形状、負荷、材料特性因子に対するパラメータ解析を行い、各因子のひずみ集中挙動に対する影響の傾向及び程度を把握する。

4.1 基本挙動

平滑周溶接継手モデルの基本挙動を把握するためにリファレンスモデル (CASE-1-1) の解析を行った。以下に結果を示す。尚、以下の説明では、溶金中央部、母材端部とあるのは、それぞれFEMモデルの溶金側、母材側の端部を指す。また、溶金中央部と呼ぶ理由は、継手幅を小さくした場合の周継手において実際の中央部に相当するためである。

(1) ひずみ範囲の軸方向分布

$S_p / 2 \sigma_y = 10.0$ におけるひずみ範囲の軸方向分布を以下に示す。

○相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (内面) … 図4.1.1 (a)

○相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (内面、継手部拡大)
… 図4.1.1 (b)

○相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (外面) … 図4.1.1 (c)

○相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (外面、継手部拡大)
… 図4.1.1 (d)

尚、横軸において、負方向が溶金側、正方向が母材側を示す。

これらの図より以下のことがわかる。

○ 相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{\theta}$ は溶金部の継手境界 (境界より9 mm程度の位置) で最大となり、境界より十分離れた溶金中央部、母材端部においては、若干溶金中央部が大きくなるもののほとんど同じ値となる。

○ 軸方向ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_z$ は、溶金部の継手境界 (境界より9 mm程度の位置) で最大となり、 $\Delta \epsilon_{\theta}$ と同様の分布形態を示す。

- 周方向ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{\theta}$ は、境界より60mm程度の母材部で最大となり、境界より40mm程度の溶金部で最小となる傾向が見られるが、いずれも平均値との差は小さくほぼ一様の分布と見なすことが出来る。

尚、継手境界近傍で平均値からはずれるのは軸方向曲げにより半径方向変位が影響を受けているためと考えられる。

- せん断ひずみ範囲 $\Delta \gamma_{RZ}$ は、殆ど生じていない。
- 径方向ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_R$ は、 $\Delta \epsilon_{\theta}$ の符号を反転した分布に近いが、主として軸方向及び周方向の塑性ひずみの和が0になるポアソン比の効果により生じていると考えられる。

(2) 相当塑性ひずみコンター図

リファレンスケースの相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。プロットした時点は相当ひずみ範囲が最大となる極値2時点の1つであるB時点である。負荷は、 $S_p / 2 \sigma_y = 10.0$ のものである。

尚、本コンター図では、断面内をわかりやすくするために板厚方向に拡大している。また、図中のスケールは、軸方向（Z方向）の距離を表わしている。

○相当塑性ひずみコンター図（リファレンスケース、極値時点B）

… 図 4.1.2

これらの図から以下のことがわかる。

- 全断面降伏となっており、継手部近傍で塑性域が集中している。

(3) ひずみ成分の板厚方向分布

$S_p / 2 \sigma_y = 10.0$ の極値時点Bにおけるひずみ成分の板厚方向分布を以下の図に示す。

○ひずみ成分の板厚方向分布（極値時点B、相当ひずみ範囲最大部）

… 図 4.1.3

○軸方向、周方向ひずみ範囲の各成分の内外表面の値（相当ひずみ範囲最大部）

… 表 4.1.1

尚、図中横軸の板厚方向距離は、内面からの距離を示す。

この図より以下のことがわかる。

- 厚さ方向温度分布を $n = 1$ で与えているため、各ひずみ成分はほぼ板厚方向に線形に分布している。また、ピーク成分が殆ど見られないことから接続部の局部変形の影響は小さいと考えられる。
- 弾性状態では、 $\Delta \epsilon_z$ 、 $\Delta \epsilon_\theta$ 共曲げ成分が主体で、同程度の値となる。
- 弾塑性状態では、 $\Delta \epsilon_z$ が、 $\Delta \epsilon_\theta$ より大きくなっており、軸方向曲げひずみが増大していることがわかる。
- 弾塑性状態では、 $\Delta \epsilon_\theta$ に比較的大きな膜成分の増大が見られる。
- 相当ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{eq}$ は、弾性状態では内面でやや大きくなるが、弾塑性状態では外面側で大きくなる。これは、 $\Delta \epsilon_z$ 、 $\Delta \epsilon_\theta$ の膜成分が生じ、外面の曲げ成分に重畳するためである。
- $\Delta \epsilon_z$ 、 $\Delta \epsilon_\theta$ と $\Delta \epsilon_R$ は逆符号となるが、主としてポアソン比の影響と考えられる。
- $\Delta \gamma_{Rz}$ は、板厚内部においても殆ど生じていない。

(4) ひずみ集中係数 K_F の履歴

以下に溶金中央部、ひずみ範囲最大部、母材端部のひずみ集中係数 K_F の履歴を示す。

縦軸はひずみ集中係数 K_F あり、横軸は対応する時点での弾性解析による内表面での相当応力（膜+曲げ+ピーク成分： S_p ）の極値時点 A を基準にした増分を母材の降伏応力の 2 倍（ $2\sigma_y$ ）で除した値を示している。尚、線形温度分布を仮定しており弾性解析では相当応力のピーク成分は 0 となることから、横軸は相当応力の膜+曲げ成分 S_n を $2\sigma_y$ で除したものと考えることも出来る。

○ ひずみ集中係数 K_F の履歴

（溶金中央部、溶金ひずみ範囲最大部、母材端部、内面、 $S_p / 2\sigma_y = 5$ まで）

… 図 4.1.4

○ ひずみ集中係数 K_F の履歴

（溶金中央部、溶金ひずみ範囲最大部、母材端部、外面、 $S_p / 2\sigma_y = 5$ まで）

… 図 4.1.5

これらの図より以下のことがわかる。

- 図にプロットした3者の内、溶金ひずみ範囲最大部の増大傾向が最も大きい。
溶金ひずみ範囲最大部は、溶金側継手部近傍であり、母材との冶金的構造不連続によるものであると考えられる。
- 溶金中央部と母材端部を比較すると、溶金中央部の方がやや大きくなる。
溶金中央部は継手部より十分離れているため、ここで現われている母材端部との差は、主として同一の負荷に対し、降伏応力が異なることが原因と考えられる。

(5) まとめ

- 相当ひずみ範囲は溶金部の継手境界近傍で最大となる。これは、冶金的構造不連続に基づく再配分効果によりひずみが集中したためと考えられる。また、内外表面で比較すると外面側が大きくなる。これは、 $\Delta \varepsilon_z$ 、 $\Delta \varepsilon_\theta$ の膜成分が外面側で曲げ成分と同符号となるためである。
- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置の内表面では、ピーク成分が殆ど見られず境界接合部における局所変形の影響は充分小さいことがわかる。
- 継手部より十分離れた溶金中央部、母材端部を比較すると、溶金中央部の方が相当ひずみ範囲が大きくなる。
これは、同一の負荷に対する両者の降伏応力の差によるものと考えられる。
- 内外面で各値を比較すると若干外面側の値が大きくなるが、その挙動は殆ど同様である。

表 4.1.1 軸方向、周方向ひずみ範囲の各成分の内外表面での値
(相当ひずみ範囲最大部)

Table 4.1.1 Each component value of axial and hoop strain range at inner surface and outer surface
(at the portion of maximum equivalent strain range)

ひずみ	成分	弾性解析		弾塑性解析	
		内面 (%)	外面 (%)	内面 (%)	外面 (%)
$\Delta \varepsilon_z$	膜成分	-0.0003	-0.0003	-0.0340	-0.0340
	曲げ成分	1.3158	-1.3093	2.1940	-2.1833
	膜+曲げ成分	1.3155	-1.3096	2.1601	-2.2173
	膜+曲げ+ピーク成分	1.3079	-1.3014	2.1107	-2.1409
$\Delta \varepsilon_\theta$	膜成分	-0.0062	-0.0062	-0.0624	-0.0624
	曲げ成分	1.3157	-1.3093	1.3147	-1.3082
	膜+曲げ成分	1.3095	-1.3154	1.2523	-1.3706
	膜+曲げ+ピーク成分	1.3079	-1.3014	1.2561	-1.3513
$\Delta \varepsilon_{eq}$	表面値	1.8684	1.8591	3.3434	3.4628

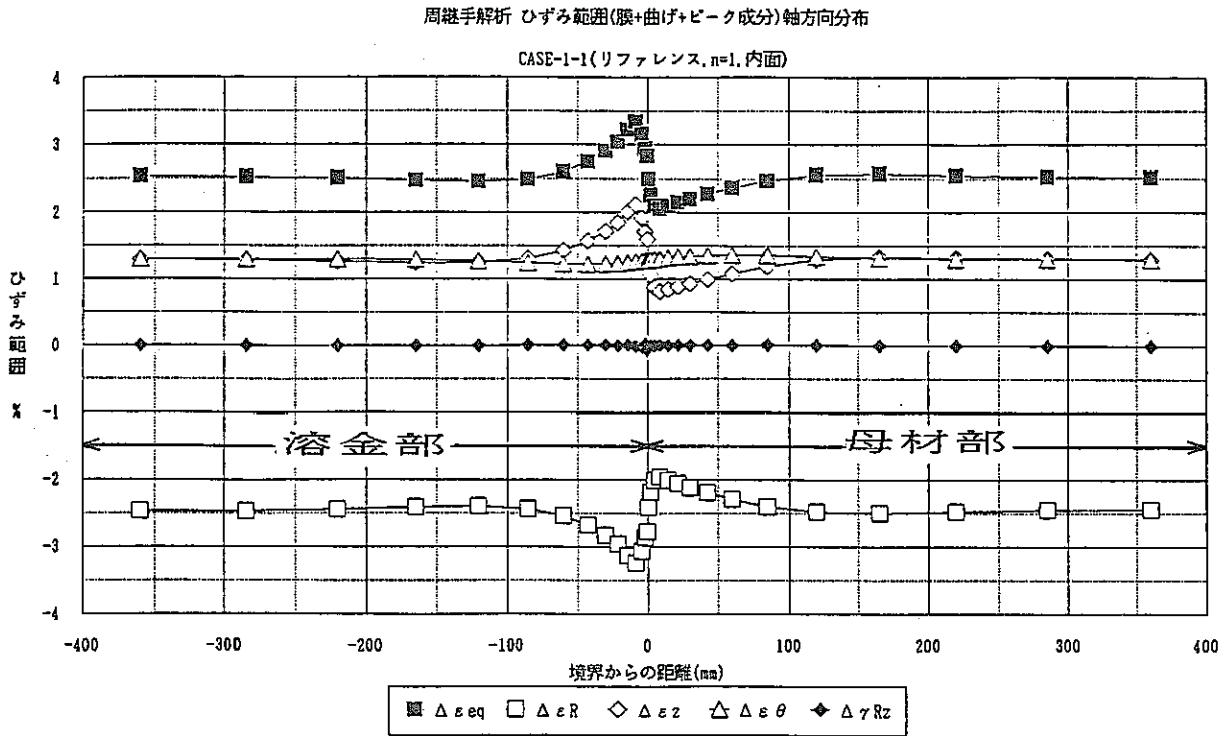


図 4.1.1 (a) 相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布
Fig. 4.1.1 (a) Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the inner surface)

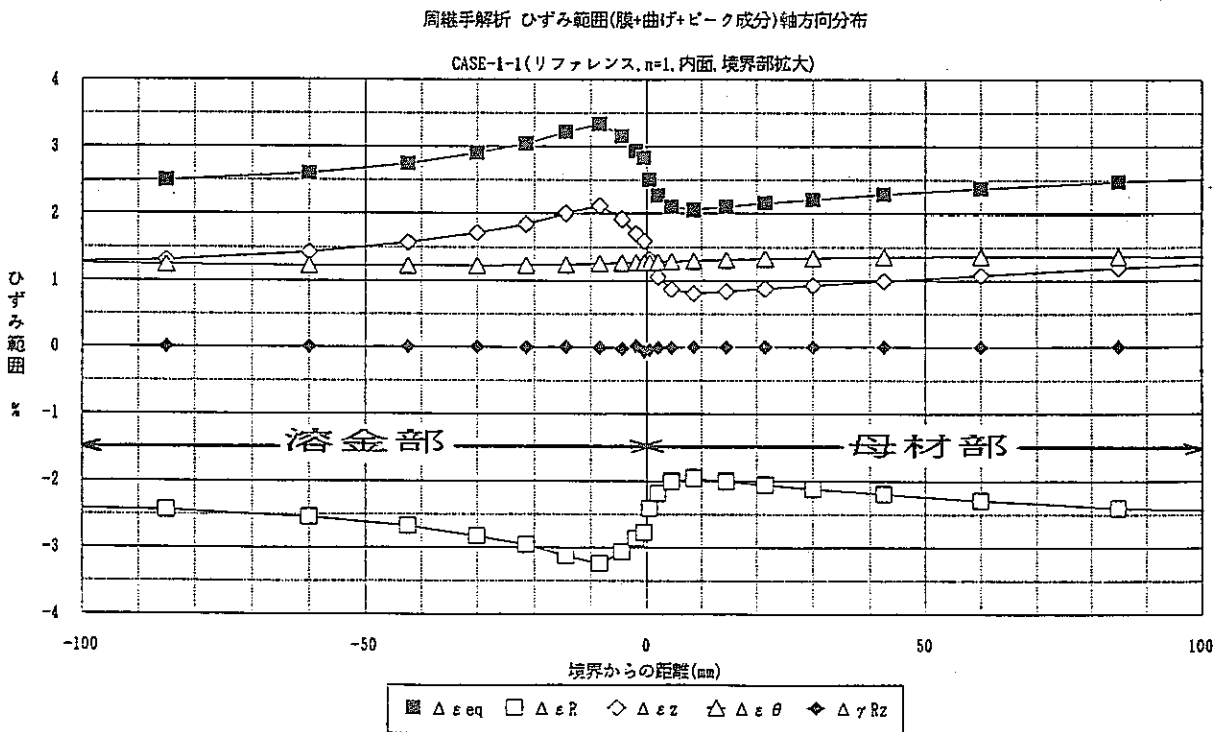


図 4.1.1 (b) 相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (境界部拡大)
Fig. 4.1.1 (b) Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the inner surface, enlargement for the portion of boundary)

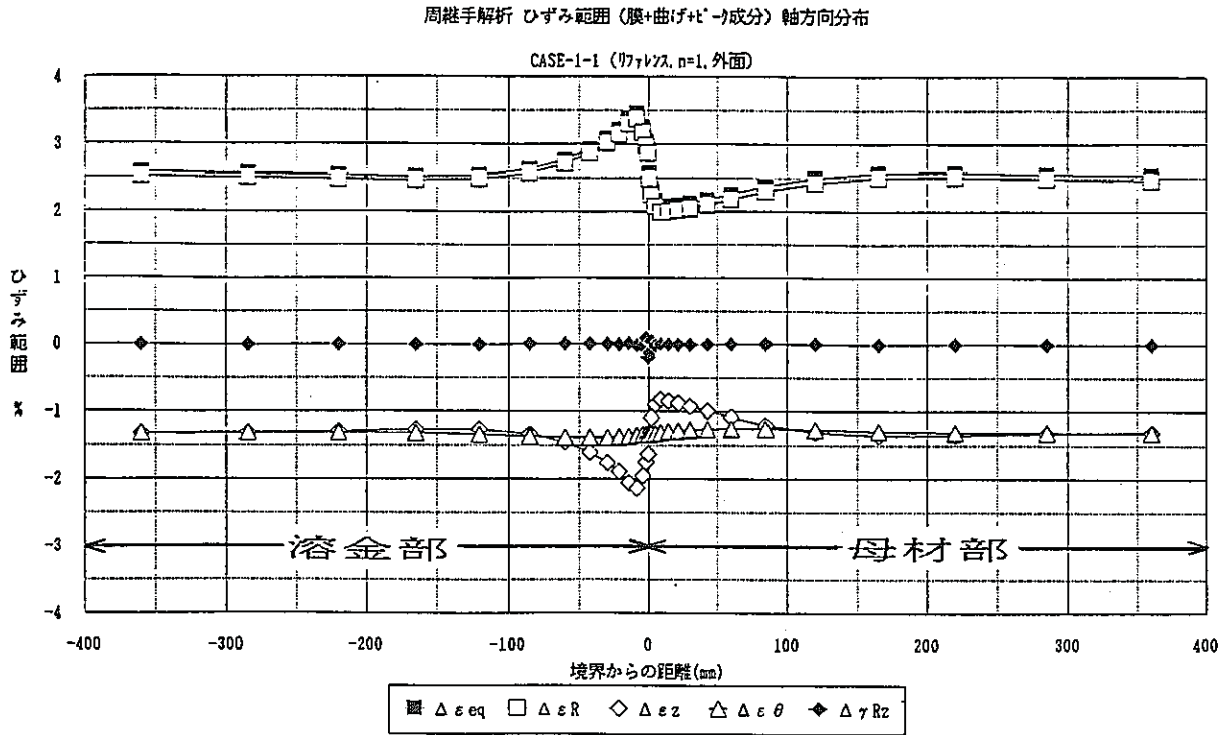


図 4.1.1 (c) 相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布
Fig. 4.1.1 (c) Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the outer surface)

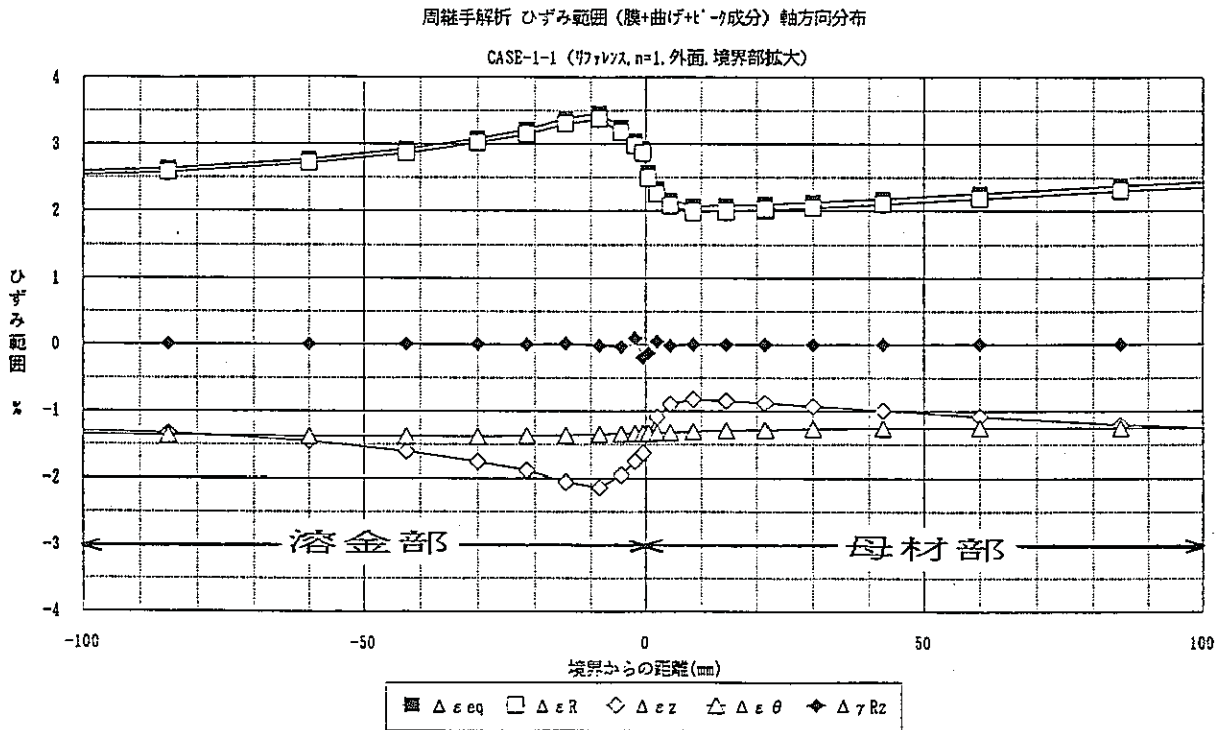
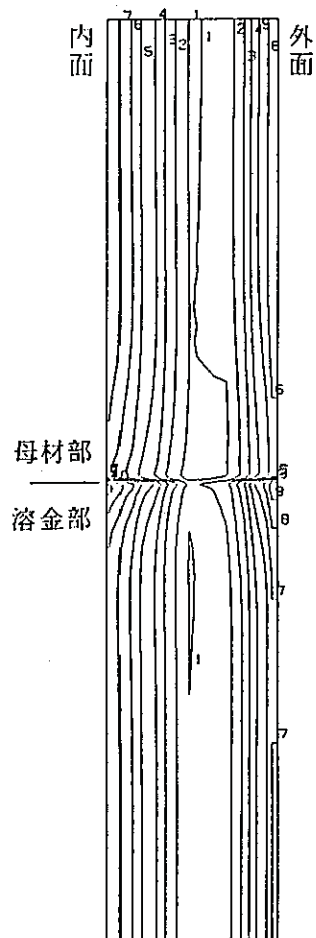


図 4.1.1 (d) 相当ひずみ範囲及び各成分毎のひずみ範囲軸方向分布 (境界部拡大)
Fig. 4.1.1 (d) Axial distribution of equivalent strain range and strain range for each component (at the outer surface, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	1.500-03
2	3.000-03
3	4.500-03
4	6.000-03
5	7.500-03
6	9.000-03
7	1.050-02
8	1.200-02
9	1.350-02
10	1.500-02



STEP NO. 146

GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-1(REFERENCE MODEL)

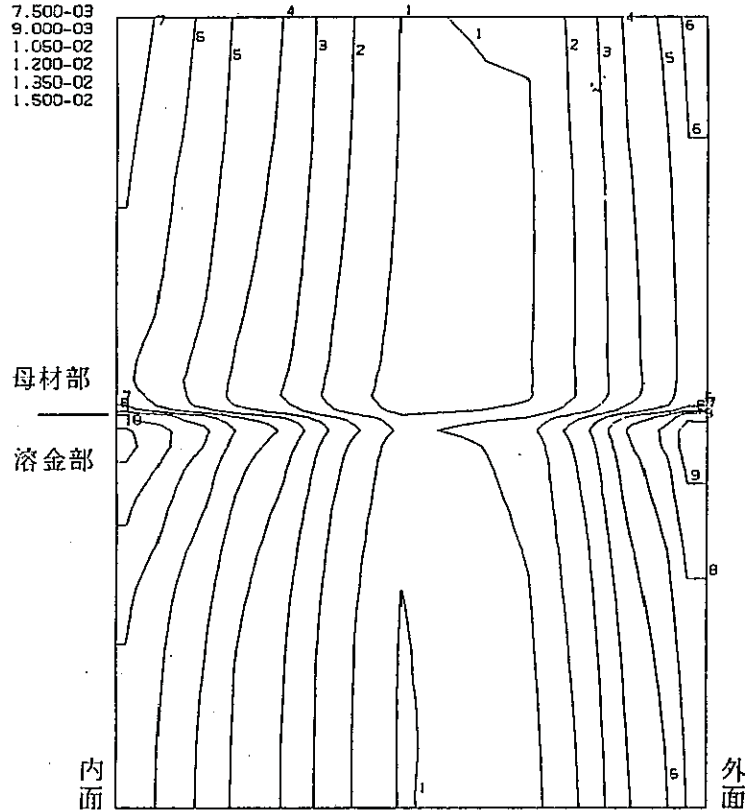
図 4.1.2 相当塑性ひずみコンター図 (リファレンスケース、極値時点B)

Fig. 4.1.2 Equivalent plastic strain contour (reference case, at the stress extreme;B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	1.500-03
2	3.000-03
3	4.500-03
4	6.000-03
5	7.500-03
6	9.000-03
7	1.050-02
8	1.200-02
9	1.350-02
10	1.500-02



境界部拡大

STEP NO. 146

GEOM. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-1(REFERENCE MODEL)

周継手解析 ひずみ範囲板厚方向分布

CASE-1-1 (ワッルス, 極値時点B, 相当ひずみ範囲最大部)

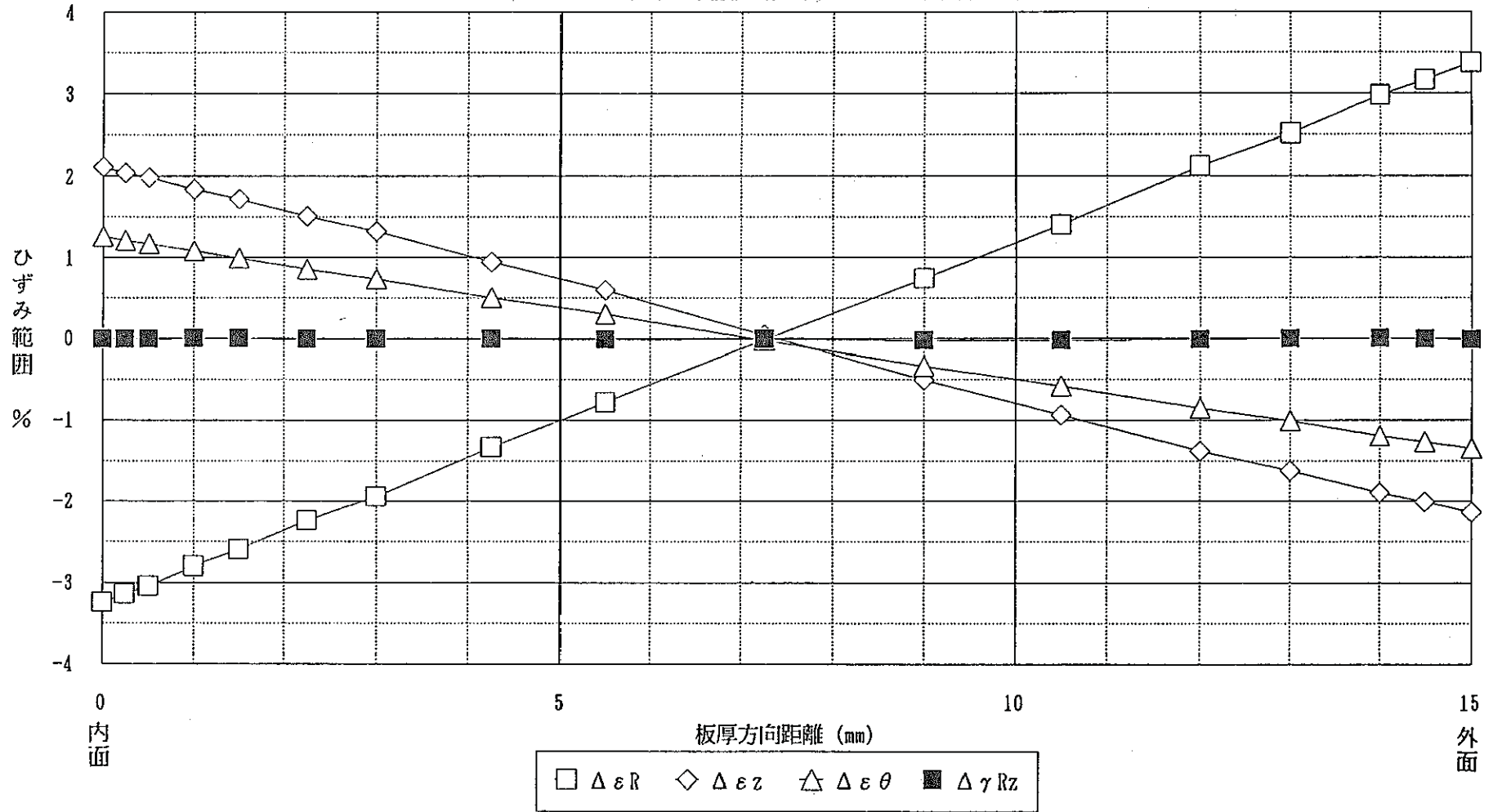


図 4.1.3 ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点B、相当ひずみ範囲最大部)

Fig. 4.1.3 Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range)

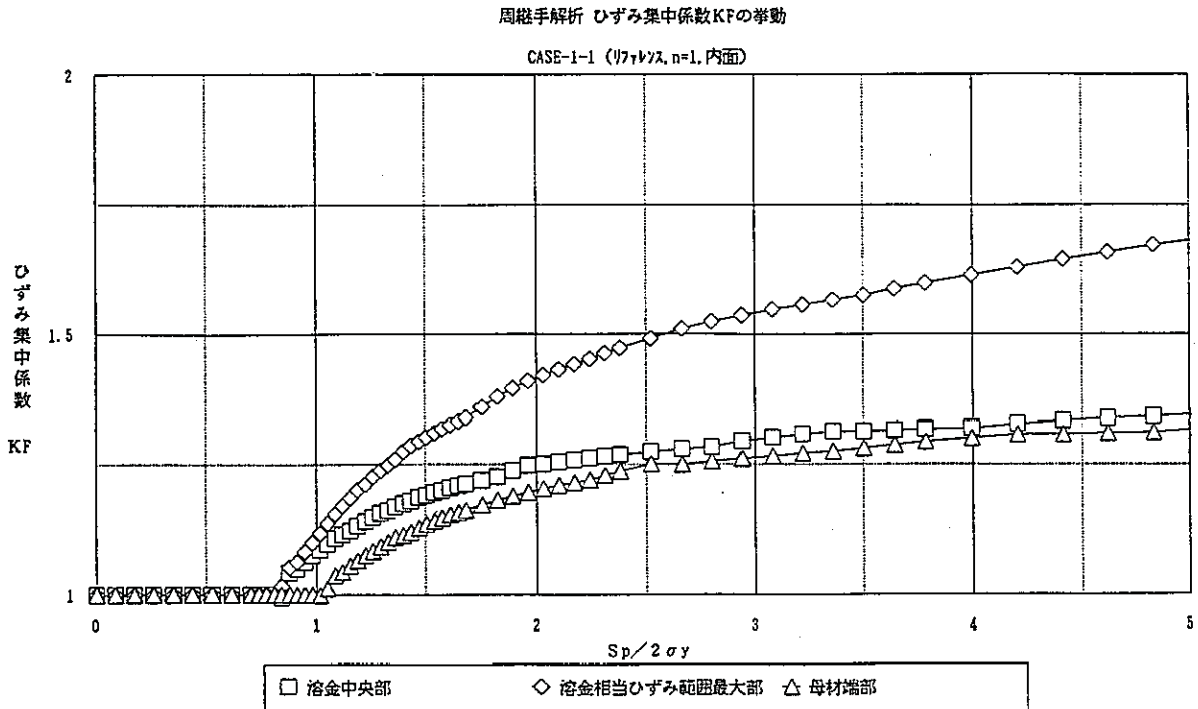


図 4. 1. 4 ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (溶金中央部、相当ひずみ範囲最大部、母材端部、内面、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)

Fig. 4. 1. 4 History of strain concentration factor K_F (at the center of weld metal, the portion of maximum equivalent strain range and the end of base metal, inner surface, until $S_p/2\sigma_y=5$)

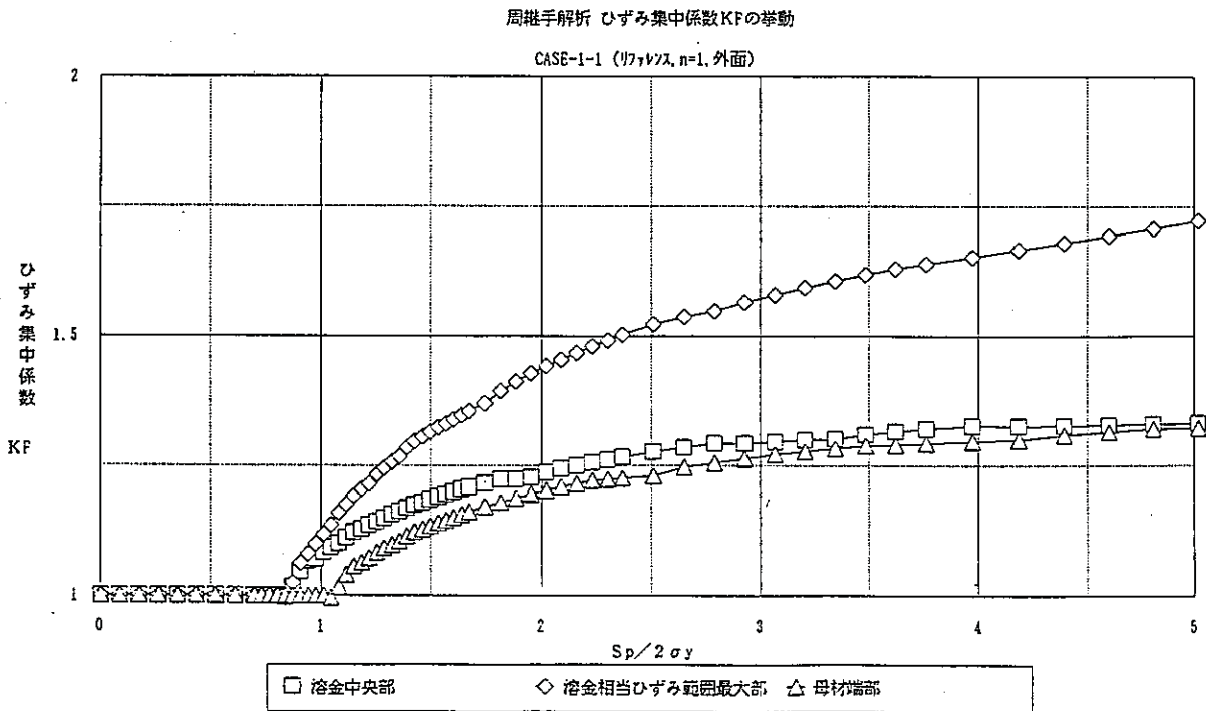


図 4. 1. 5 ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (溶金中央部、相当ひずみ範囲最大部、母材端部、外面、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)

Fig. 4. 1. 5 History of strain concentration factor K_F (at the center of weld metal, the portion of maximum equivalent strain range and the end of base metal, outer surface, until $S_p/2\sigma_y=5$)

4.2 厚さ方向温度分布の影響

4.2.1 目的

板厚方向温度分布を n 乗型で表わした場合の冶金的構造不連続によるひずみ増大挙動に及ぼす影響を把握する。

4.2.2 方法

3.2 節で示した方法により、 n をそれぞれ 2、3、4 とした 3 ケースの弾塑性解析を行う。

また、リファレンスモデル (CASE-1-1, $n=1$) との比較を行う。

負荷の大きさは、弾性解析による内表面での相当応力範囲と母材の降伏応力の比 $S_p / 2 \sigma_y$ が 10.0 となるようにしている。

- $n = 2$ … CASE-1-2
- $n = 3$ … CASE-1-3
- $n = 4$ … CASE-1-4

4.2.3 結果

(1) 相当ひずみ範囲の軸方向分布

図には、上記 3 ケースの他にリファレンスケースも同時にプロットしている。

- 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース) … 図 4.2.1 (a)
- 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大) … 図 4.2.1 (b)

尚、横軸において、負方向が溶金側、正方向が母材側を示す。

これらの図より以下のことがわかる。

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、 $n=1 \sim 3$ の場合境界より 9 mm 程度の位置、 $n=4$ の場合境界より 5 mm 程度の位置となる。
- 各ケース共、リファレンスと同様に溶金中央部及び母材端部はほぼ同じ値となり溶金中央部の方がやや大きくなる傾向が見られる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大値を比較すると、 $n=2$ の場合で最大となるが、母材端部または溶金中央部における相当ひずみ範囲との比率で比較すると $n=1$ で最大となり、 n が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示す。

(2) 相当塑性ひずみコンター図

各ケースの相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。プロットした時点は相当ひずみ範囲が最大となる極値 2 時点の 1 つである B 時点である。

尚、本コンター図では、断面内をわかりやすくするために、板厚方向に拡大している。

○相当塑性ひずみコンター図 (n = 1、2、極値時点 B) … 図 4.2.2 (a)

○相当塑性ひずみコンター図 (n = 3、4、極値時点 B) … 図 4.2.2 (b)

○相当塑性ひずみコンター図 (n = 1、2、極値時点 B、境界部拡大)
… 図 4.2.2 (c)

○相当塑性ひずみコンター図 (n = 3、4、極値時点 B、境界部拡大)
… 図 4.2.2 (d)

これらの図から以下のことがわかる。

- n = 1 では全断面降伏となっており、n が大きくなるにつれてピーク成分の増大により降伏部分は徐々に内面側に移動する。
- 相当塑性ひずみのレベルは、n が大きくなるにつれて徐々に小さくなる傾向を示す。

(3) ひずみ集中係数 K_F の履歴

以下に各ケースにおける相当ひずみ範囲最大部のひずみ集中係数 K_F の履歴を示す。

縦軸はひずみ集中係数 K_F 、横軸は対応する時点での弾性解析による内表面での相当応力 (膜 + 曲げ + ピーク成分: S_p) の極値時点 A を基準にした増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で除した値を示している。

○ひずみ集中係数 K_F の履歴図 … 図 4.2.3

(各ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2\sigma_y = 5$ まで)

この図より以下のことがわかる。

- 各ケース共、弾性追従型のひずみ増大傾向を示す。
- ひずみ増大傾向は、n = 2 の場合で最大となり、以下 n = 1、3、4 の順となる。

4.2.4 まとめ

- 相当ひずみ範囲の最大値は、 $n = 1 \sim 3$ で溶金部で境界より9 mm程度の位置に生じるが、 $n = 4$ では溶金部で境界より5 mm程度の位置に移行する。また、全ケースを通じて $n = 2$ で最大となる。
- 弾性解析による表面での相当応力範囲を同一とした場合、 $n = 2$ で最大のひずみ増加傾向を示す。
- 最大値発生位置における相当ひずみ範囲と溶金中央部または母材端部における相当ひずみ範囲の比に着目すると、 $n = 1$ の場合が最大となる。

表 4.2.1 相当ひずみ範囲最大部と溶金中央部、母材端部の相当ひずみ範囲の比率
 Table 4.2.1 Ratio of equivalent strain range at the portion of maximum equivalent strain range to the center of weld metal and the end of base metal

ケース名	n 乗型 温度分布	相当ひずみ範囲 (%)				相当ひずみ範囲最大部と溶金中央部、 母材端部との比率	
		弾性解析	溶金中央部 (A)	相当ひずみ範囲 最大部 (B)	母材端部 (C)	(B)/(A)	(B)/(C)
CASE-1-1	1	1.868	2.5302	3.3434	2.5183	1.3214	1.3276
CASE-1-2	2	1.867	2.8557	3.3909	2.8432	1.1874	1.1926
CASE-1-3	3	1.865	2.9772	3.2895	2.9498	1.1049	1.1151
CASE-1-4	4	1.863	2.9703	3.1217	2.9366	1.0510	1.0630

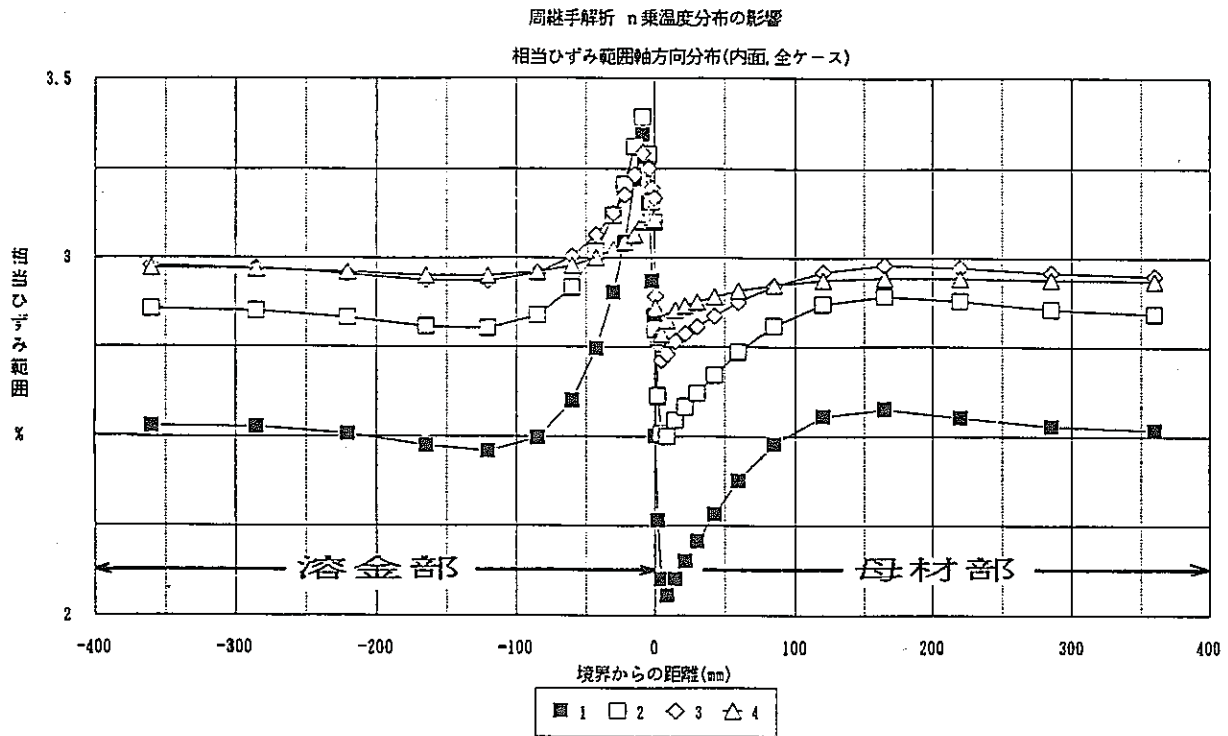


図 4. 2. 1 (a) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース)
Fig. 4. 2. 1 (a) Axial distribution of equivalent strain range
(inner surface, all cases)

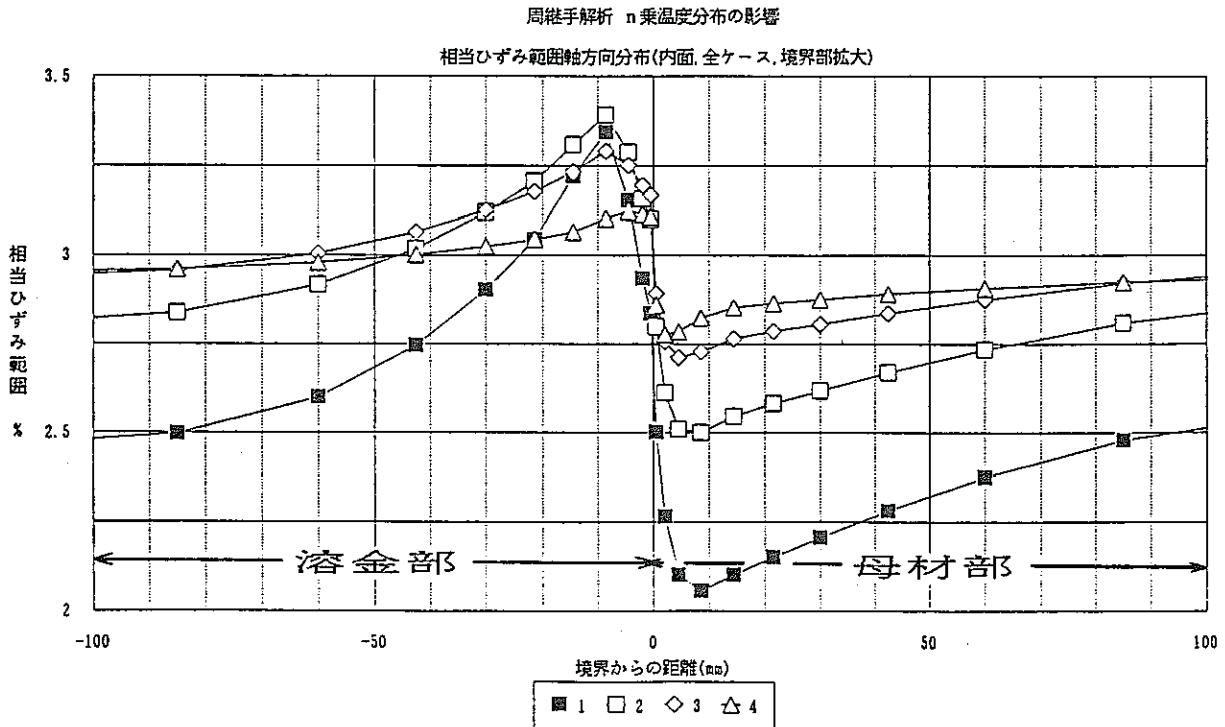
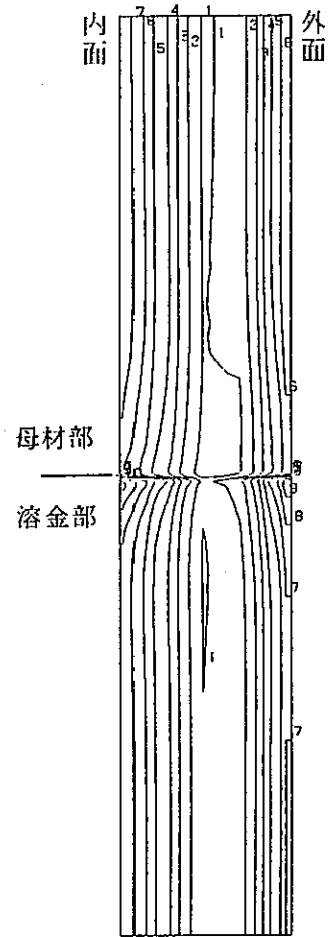


図 4. 2. 1 (b) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大)
Fig. 4. 2. 1 (b) Axial distribution of equivalent strain range (inner surface,
all cases, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	1.500-03
2	3.000-03
3	4.500-03
4	6.000-03
5	7.500-03
6	9.000-03
7	1.050-02
8	1.200-02
9	1.350-02
10	1.500-02



STEP NO. 146

GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-1(REFERENCE MODEL)

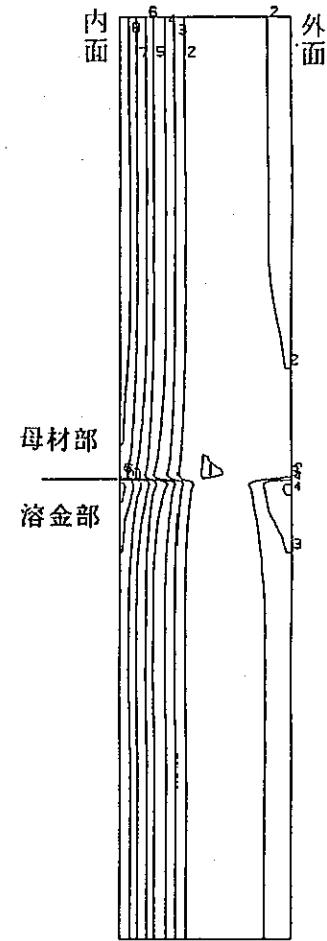
図 4.2.2 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (n = 1、n = 2、極値時B)

Fig. 4.2.2 (a) Equivalent plastic strain contour (n=1, n=2, at the stress extreme;B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	3.000-03
3	4.500-03
4	6.000-03
5	7.500-03
6	9.000-03
7	1.050-02
8	1.200-02
9	1.350-02
10	1.500-02



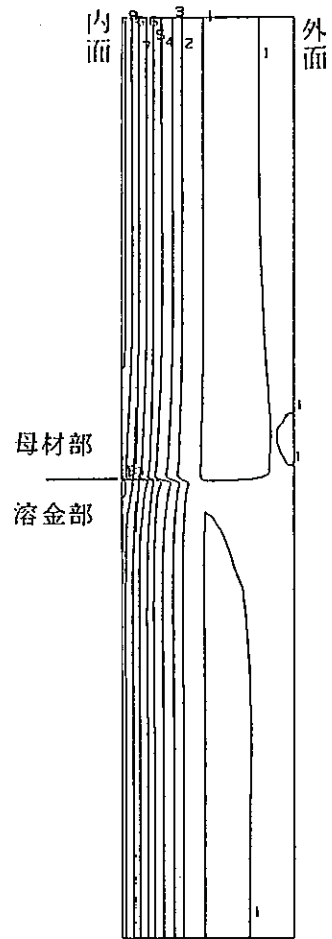
STEP NO. 140

GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-2 (N=2)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

- CONTOUR VALUES
- 1 5.000-04
 - 2 3.000-03
 - 3 4.500-03
 - 4 6.000-03
 - 5 7.500-03
 - 6 9.000-03
 - 7 1.050-02
 - 8 1.200-02
 - 9 1.350-02
 - 10 1.500-02



STEP NO. 156

GEOM. SCALE 100,000

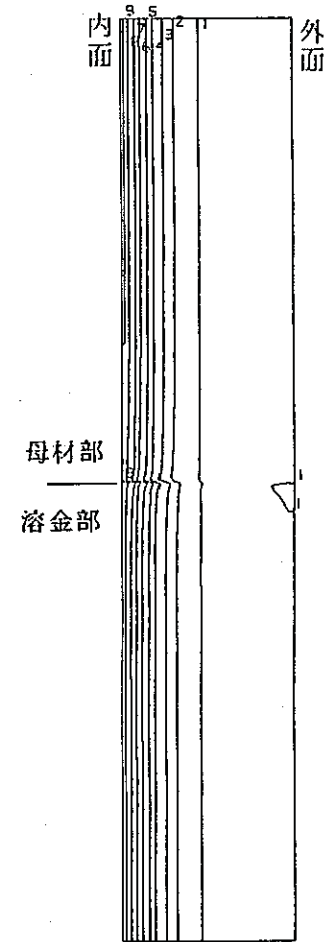
CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-3(N=3)

図 4. 2. 2 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (n = 3、n = 4、極値時 B)

Fig. 4. 2. 2 (b) Equivalent plastic strain contour (n=3, n=4, at the stress extreme; B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

- CONTOUR VALUES
- 1 5.000-04
 - 2 3.000-03
 - 3 4.500-03
 - 4 6.000-03
 - 5 7.500-03
 - 6 9.000-03
 - 7 1.050-02
 - 8 1.200-02
 - 9 1.350-02
 - 10 1.500-02



STEP NO. 155

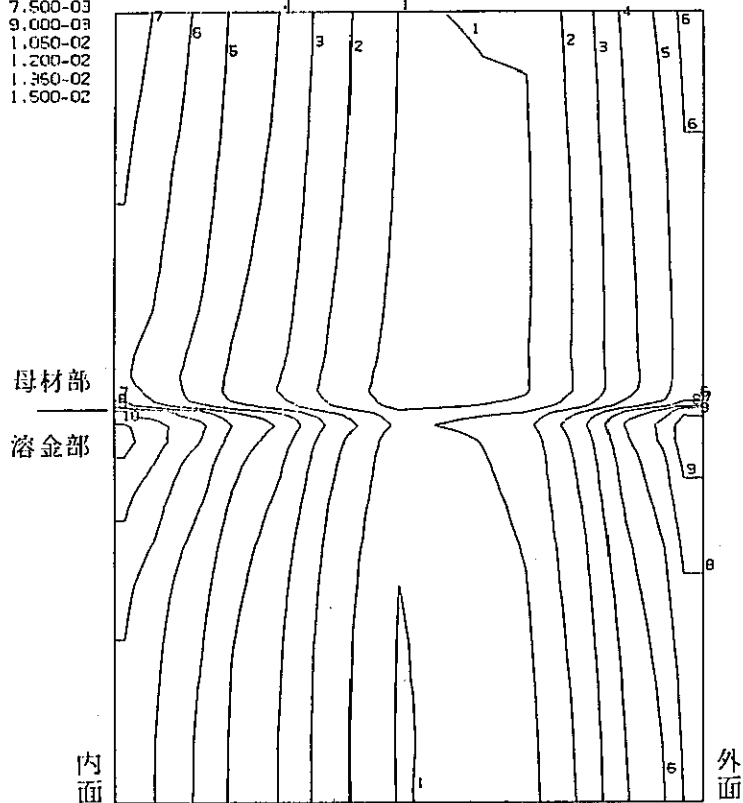
GEOM. SCALE 100,000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-4(N=4)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 1.500-03
- 2 3.000-03
- 3 4.500-03
- 4 6.000-03
- 5 7.500-03
- 6 9.000-03
- 7 1.050-02
- 8 1.200-02
- 9 1.350-02
- 10 1.500-02



STEP NO. 146

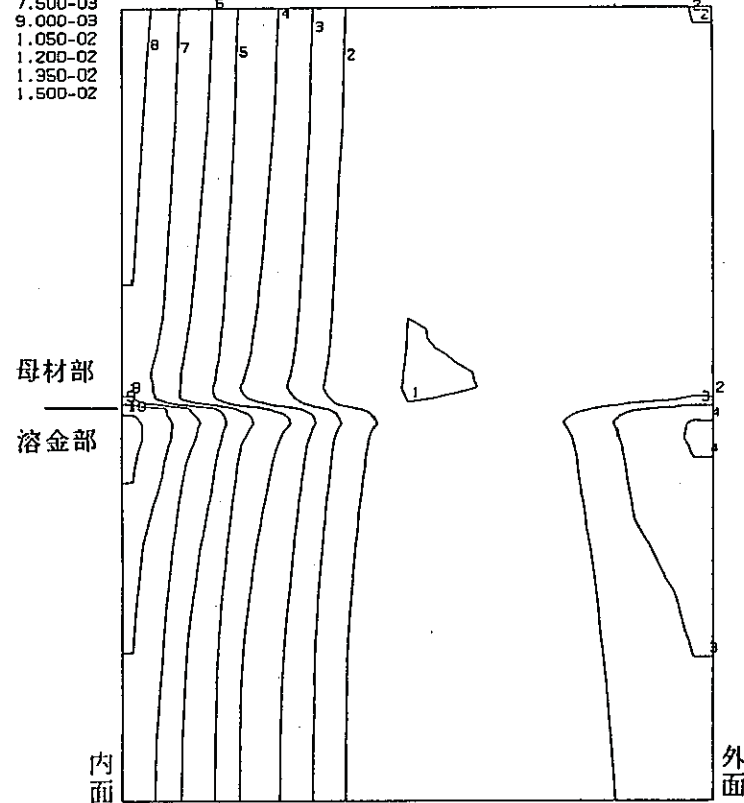
GEOM. SCALE 30,0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-1(REFERENCE MODEL)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 5.000-04
- 2 3.000-03
- 3 4.500-03
- 4 6.000-03
- 5 7.500-03
- 6 9.000-03
- 7 1.050-02
- 8 1.200-02
- 9 1.350-02
- 10 1.500-02



STEP NO. 140

GEOM. SCALE 30,0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-2 (N=2)

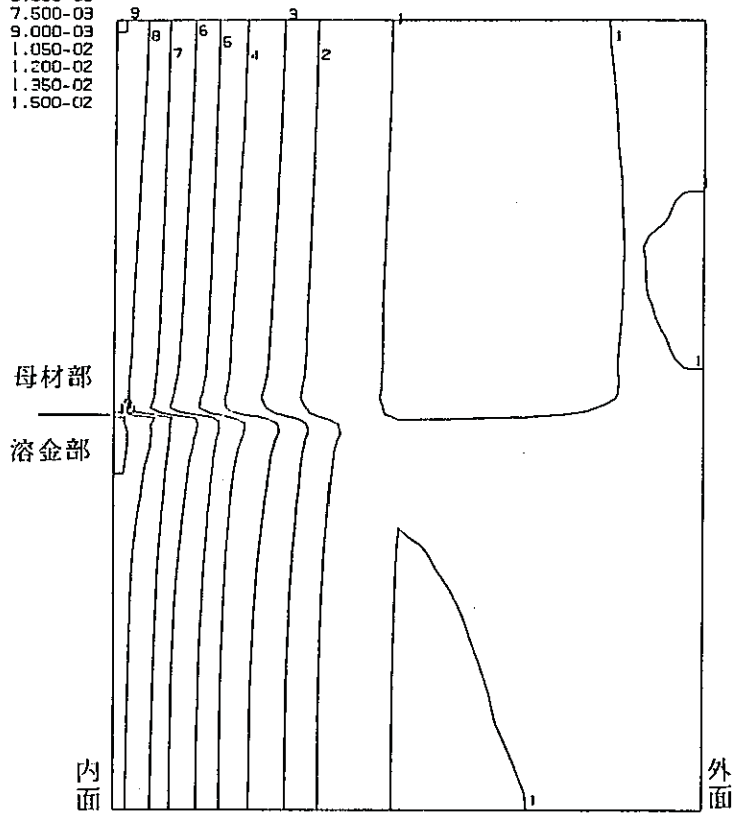
図 4. 2. 2 (c) 相当塑性ひずみコンター図 (n=1、n=2、極値時B、境界部拡大)

Fig. 4. 2. 2 (c) Equivalent plastic strain contour (n=1, n=2, at the stress extreme; B, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	3.000-03
3	4.500-03
4	6.000-03
5	7.500-03
6	9.000-03
7	1.050-02
8	1.200-02
9	1.350-02
10	1.500-02



STEP NO. 166

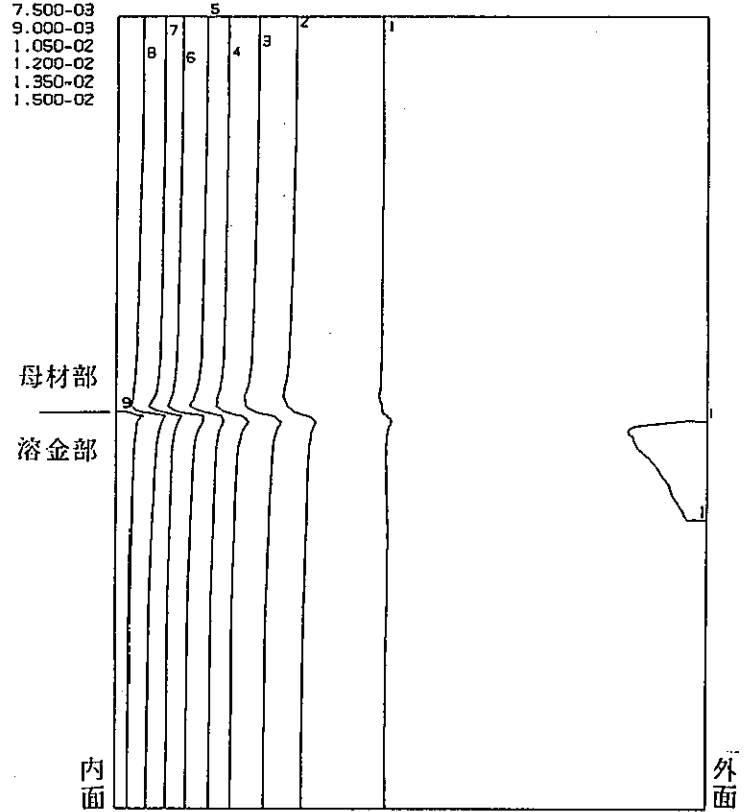
GEOH. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-3(N=3)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	3.000-03
3	4.500-03
4	6.000-03
5	7.500-03
6	9.000-03
7	1.050-02
8	1.200-02
9	1.350-02
10	1.500-02



STEP NO. 155

GEOH. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-1-4(N=4)

図 4. 2. 2 (d) 相当塑性ひずみコンター図 (n = 3、n = 4、極値時B、境界部拡大)

Fig. 4. 2. 2 (d) Equivalent plastic strain contour (n=3, n=4, at the stress extreme; B, enlargement for the portion of boundary)

周継手解析 温度分布による影響

ひずみ集中係数 K_F の挙動(内面, 相当ひずみ範囲最大部)

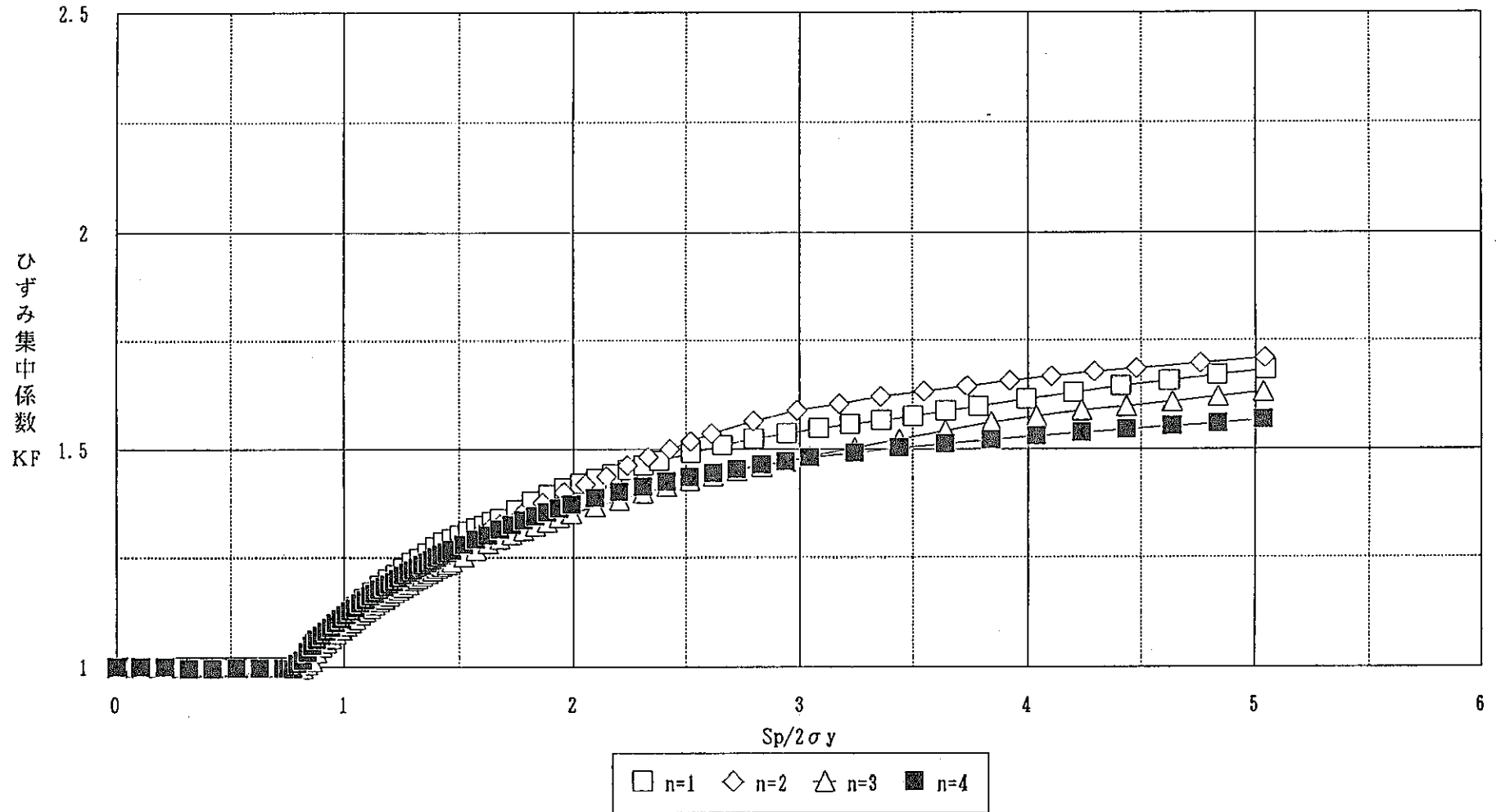


図 4.2.3 ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (各ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)

Fig. 4.2.3 History of strain concentration factor K_F (each case, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p/2\sigma_y=5$)

4.3 シェルパラメータの影響

4.3.1 目的

形状因子の1つである直径と板厚について、シェルパラメータ (\sqrt{Dt}) として表し、シェルパラメータが冶金的構造不連続によるひずみ増大挙動に及ぼす影響を把握する。

4.3.2 方法

3.2節で示した方法により、シェルパラメータをそれぞれ10.0、50.0、100.0、500.0とした4ケースの弾塑性解析を行う。

また、リファレンスケース (CASE-1-1 A、 $\sqrt{Dt} \approx 173.2$) との比較を行う。

負荷の大きさは、弾性解析による内表面での相当応力範囲と母材の降伏応力との比 ($S_p / 2 \sigma_y$) が5.0となるようにしている。

- $\sqrt{Dt} = 10.0$ … CASE-2-1
- $\sqrt{Dt} = 50.0$ … CASE-2-4
- $\sqrt{Dt} = 100.0$ … CASE-2-2 A
- $\sqrt{Dt} = 500.0$ … CASE-2-5
- $\sqrt{Dt} \approx 173.2$ … CASE-1-1 A (リファレンス)

4.3.3 結果

(1) 相当ひずみ範囲軸方向分布

図には、上記4ケースの他にリファレンスケースも同時にプロットしている。

○相当ひずみ範囲軸方向分布 (内面、全ケース) … 図4.3.1 (a)

○相当ひずみ範囲軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大) … 図4.3.1 (b)

尚、横軸において、負方向が溶金側、正方向が母材側を示す。

これらの図より以下のことがわかる。

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で $\sqrt{Dt} = 10.0$ の場合、境界より3 mm程度の位置、 $\sqrt{Dt} = 50.0 \sim 500.0$ の場合、境界より9 mm程度の位置となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、 \sqrt{Dt} が大きくなるにつれて相当ひずみ範囲が増大する傾向を示す。

(2) 相当塑性ひずみコンター図

各ケースの相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。プロットした時点は相当ひずみ範囲が最大となる極値 2 時点の 1 つである B 時点である。

尚、本コンター図では、断面内をわかりやすくするために、板厚方向に拡大している。

また、図中のスケールは、軸方向 (Z 方向) の距離を表わしている。

○相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=10.0$ 、 50.0 、極値時点 B) … 図 4.3.2 (a)

○相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=100.0$ 、 500.0 、極値時点 B) … 図 4.3.2 (b)

○相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=10.0$ 、 50.0 、極値時点 B、境界部拡大) … 図 4.3.2 (c)

○相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=100.0$ 、 500.0 、極値時点 B、境界部拡大) … 図 4.3.2 (d)

これらの図から以下のことがわかる。

- 各ケース共、相当ひずみ範囲最大部の断面で板厚方向の塑性域の進展が最も大きく、ほぼ全断面が降伏している。
- \sqrt{Dt} が大きくなるにつれて、表面近傍における高塑性ひずみ域及び板厚中央部の高塑性ひずみ域は、溶金側軸方向に広がっていく傾向を示す。

(3) ひずみ集中係数 K_F の履歴

以下に各ケースにおける相当ひずみ範囲最大部のひずみ集中係数 K_F の履歴を示す。

縦軸はひずみ集中係数 K_F 、横軸は対応する時点での弾性解析による内表面の相当応力 (膜+曲げ+ピーク成分: S_p) の極値時点 A を基準とした増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で除した値を示している。尚、線形温度分布を仮定しているため、弾性解析では応力のピーク成分は 0 となり、横軸は相当応力の膜+曲げ成分 S_m を $2\sigma_y$ で除したものと考えることも出来る。

○ひずみ集中係数 K_F の履歴

… 図 4.3.3

(全ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2 \sigma_y = 5$ まで)

この図より以下のことがわかる。

- 各ケース共、弾性追従型のひずみ増大傾向を示す。
- ひずみ増大挙動は、 \sqrt{Dt} が大きくなるにつれて増大し、500.0 で最大を示す。

4.3.4 まとめ

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で $\sqrt{Dt} = 10.0$ の場合、境界より 3 mm 程度の位置、 $\sqrt{Dt} = 50.0 \sim 500.0$ の場合、境界より 9 mm 程度の位置となる。
- 弾性解析による表面での相当応力範囲を同一とした場合、 $\sqrt{Dt} = 500.0$ で最大のひずみ増大挙動を示す。また、 \sqrt{Dt} が大きくなるにつれてひずみ増大挙動は増大する傾向を示す。

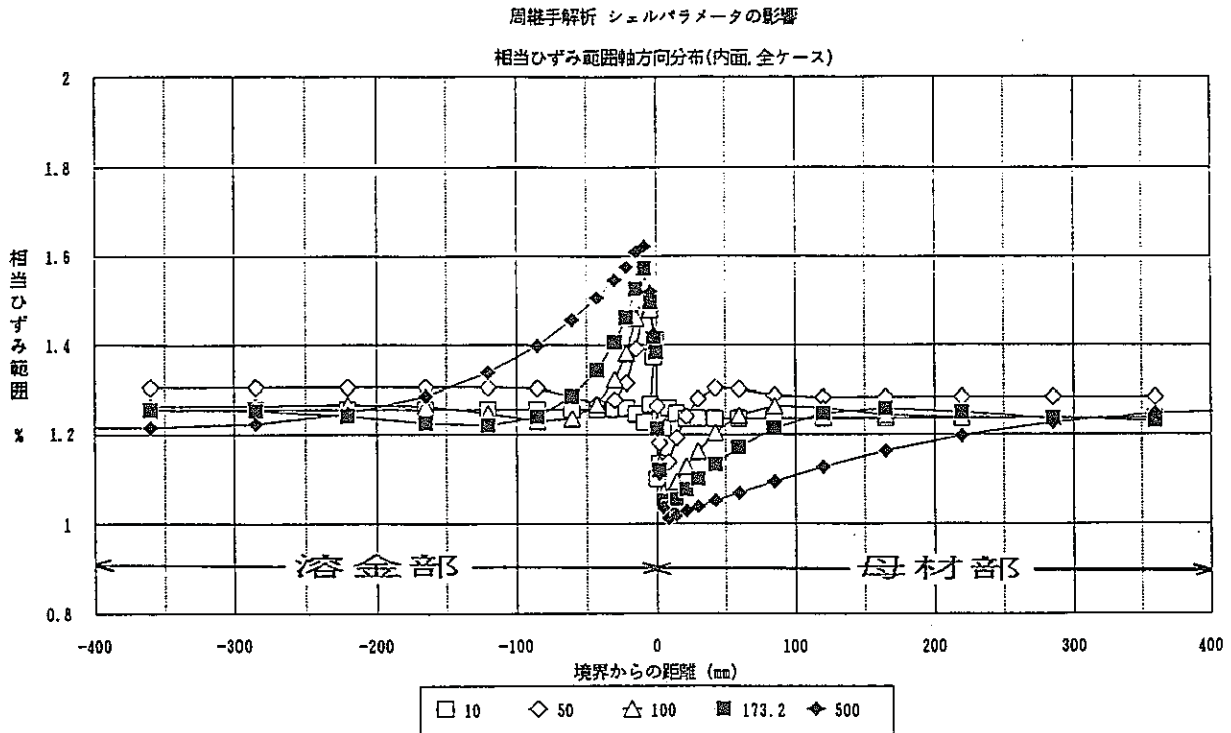


図 4. 3. 1 (a) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース)
Fig. 4. 3. 1 (a) Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases)

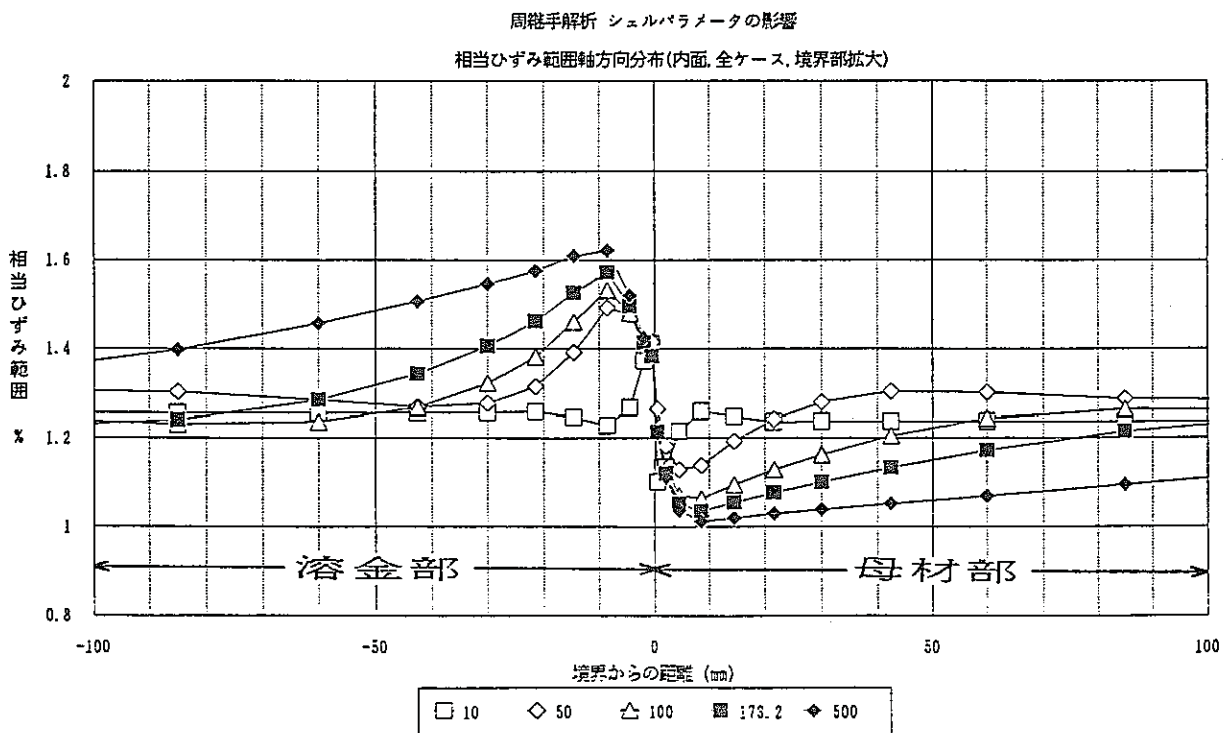
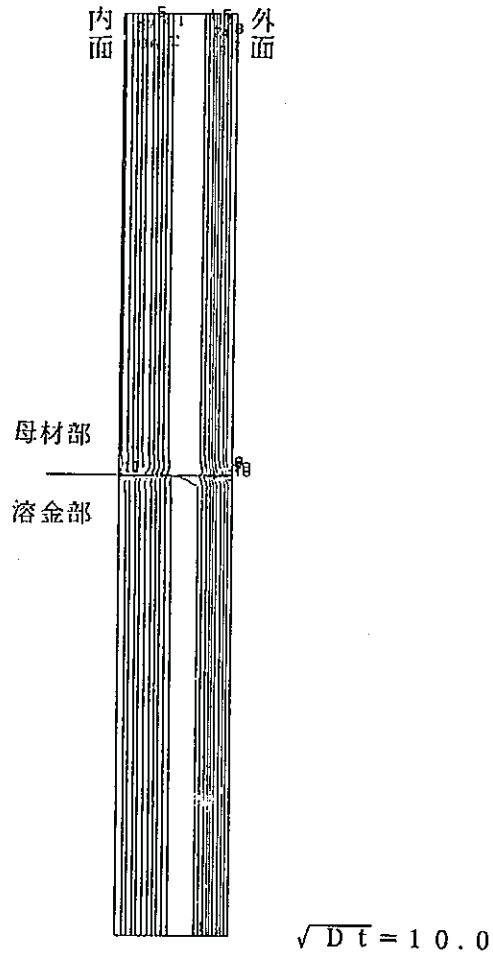


図 4. 3. 1 (b) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大)
Fig. 4. 3. 1 (b) Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03



STEP NO. 107

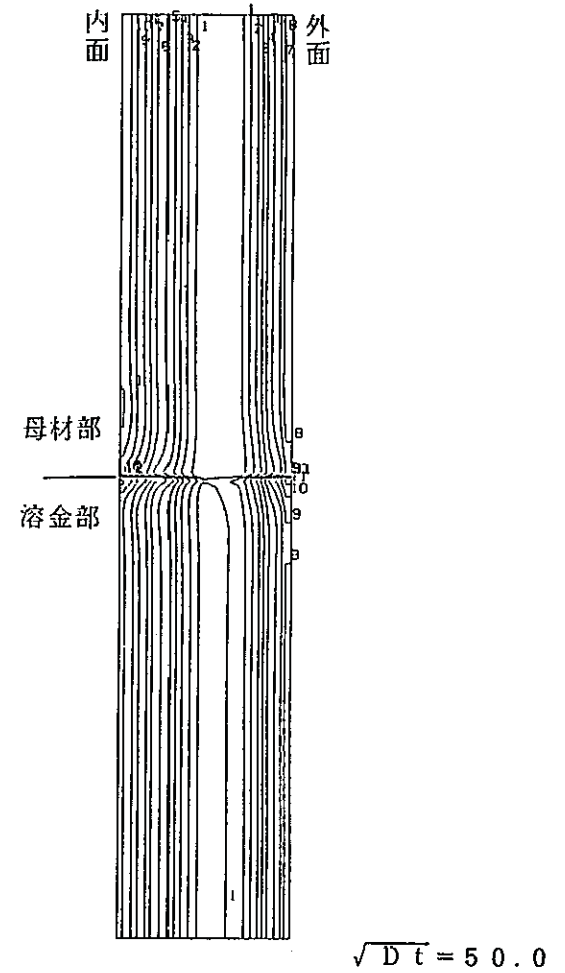
GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-1

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.000-03
3	1.500-03
4	2.000-03
5	2.500-03
6	3.000-03
7	3.500-03
8	4.000-03
9	4.500-03
10	5.000-03
11	5.500-03
12	6.000-03
13	6.500-03



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-4

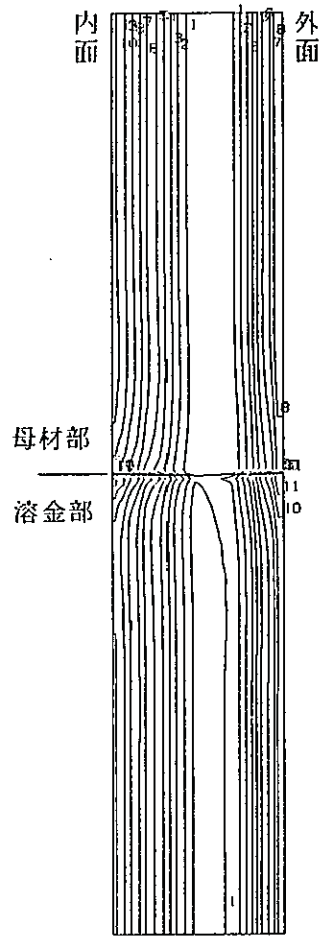
図 4.3.2 (a) 相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=10.0$ 、 $\sqrt{Dt}=50.0$ 、極値時点B)

Fig. 4.3.2 (a) Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=10.0$, $\sqrt{Dt}=50.0$, at the stress extreme;B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 5.000-04
- 2 1.000-03
- 3 1.500-03
- 4 2.000-03
- 5 2.500-03
- 6 3.000-03
- 7 3.500-03
- 8 4.000-03
- 9 4.500-03
- 10 5.000-03
- 11 5.500-03
- 12 6.000-03
- 13 6.500-03



$\sqrt{Dt} = 100.0$



STEP NO. 107

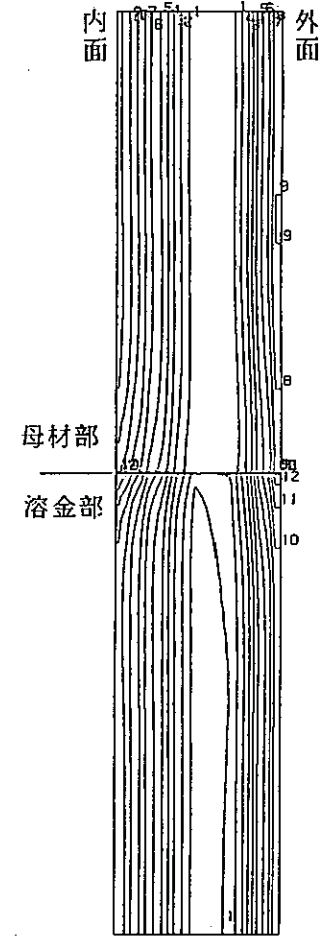
GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-2A

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 5.000-04
- 2 1.000-03
- 3 1.500-03
- 4 2.000-03
- 5 2.500-03
- 6 3.000-03
- 7 3.500-03
- 8 4.000-03
- 9 4.500-03
- 10 5.000-03
- 11 5.500-03
- 12 6.000-03
- 13 6.500-03



$\sqrt{Dt} = 500.0$



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 400.000

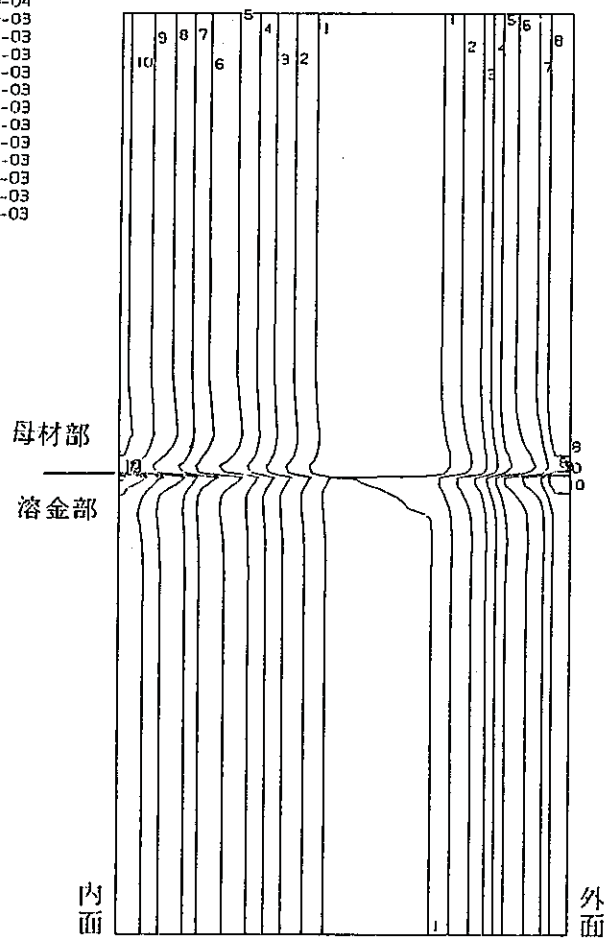
CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-5

图 4.3.2 (b) 相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=100.0$ 、 $\sqrt{Dt}=500.0$ 、極値時点 B)

Fig. 4.3.2 (b) Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=100.0$, $\sqrt{Dt}=500.0$, at the stress extreme; B)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

- CONTOUR VALUES
- 1 5.000-04
 - 2 1.000-03
 - 3 1.500-03
 - 4 2.000-03
 - 5 2.500-03
 - 6 3.000-03
 - 7 3.500-03
 - 8 4.000-03
 - 9 4.500-03
 - 10 5.000-03
 - 11 5.500-03
 - 12 6.000-03
 - 13 6.500-03



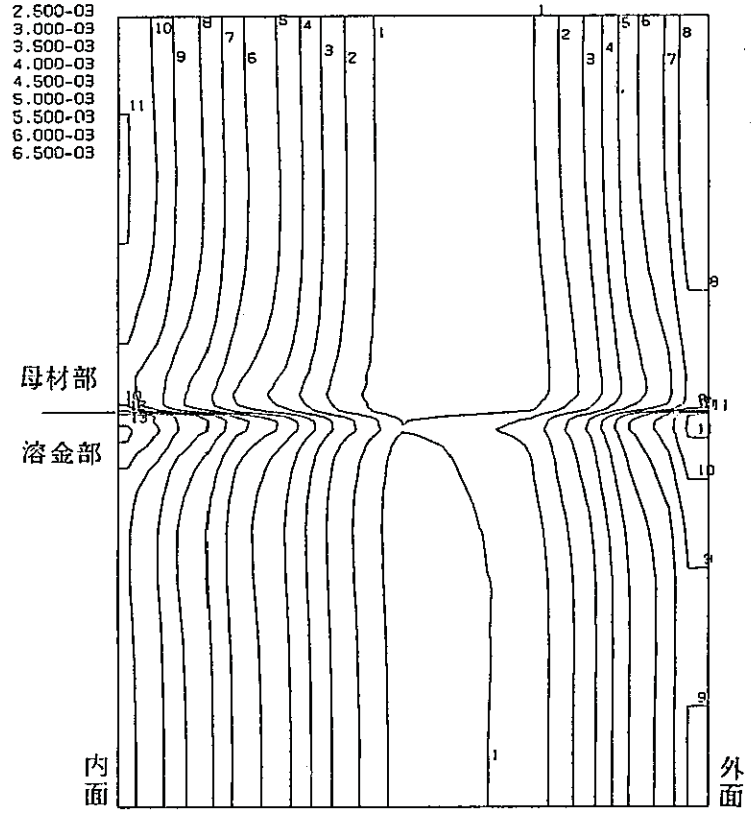
$\sqrt{Dt} = 10.0$

STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

- CONTOUR VALUES
- 1 5.000-04
 - 2 1.000-03
 - 3 1.500-03
 - 4 2.000-03
 - 5 2.500-03
 - 6 3.000-03
 - 7 3.500-03
 - 8 4.000-03
 - 9 4.500-03
 - 10 5.000-03
 - 11 5.500-03
 - 12 6.000-03
 - 13 6.500-03



$\sqrt{Dt} = 50.0$

STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-1

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-4

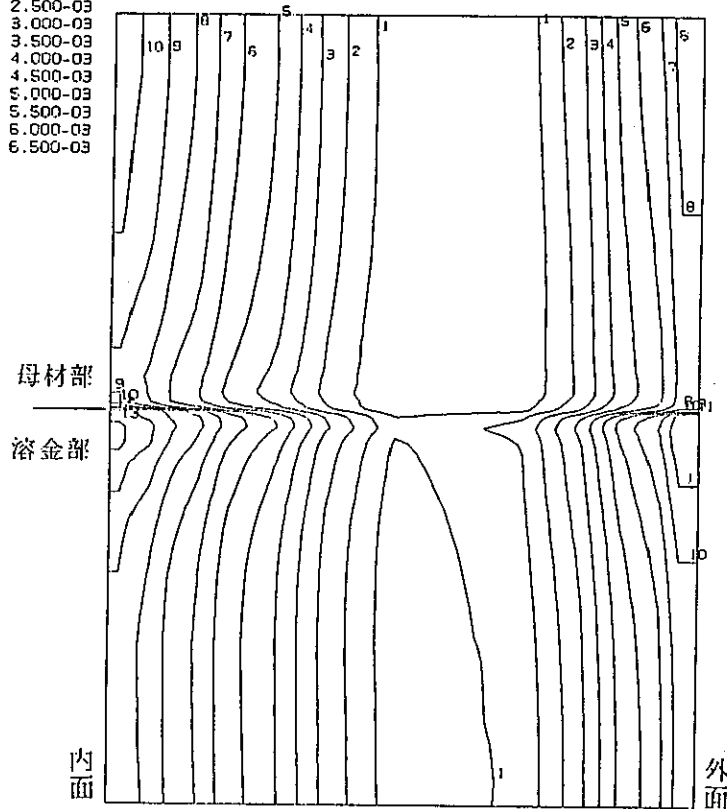
図 4.3.2 (c) 相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=10.0$ 、 $\sqrt{Dt}=50.0$ 、極値時点B、境界部拡大)

Fig. 4.3.2 (c) Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=10.0$, $\sqrt{Dt}=50.0$, at the stress extreme; B, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 5.000-04
- 2 1.000-03
- 3 1.500-03
- 4 2.000-03
- 5 2.500-03
- 6 3.000-03
- 7 3.500-03
- 8 4.000-03
- 9 4.500-03
- 10 5.000-03
- 11 5.500-03
- 12 6.000-03
- 13 6.500-03



$\sqrt{Dt} = 100.0$

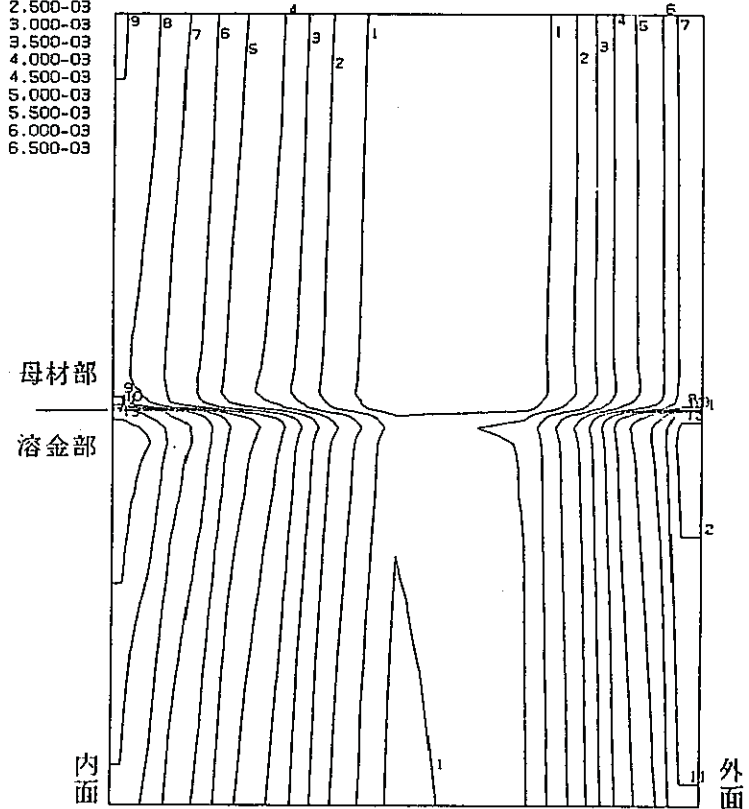
STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 5.000-04
- 2 1.000-03
- 3 1.500-03
- 4 2.000-03
- 5 2.500-03
- 6 3.000-03
- 7 3.500-03
- 8 4.000-03
- 9 4.500-03
- 10 5.000-03
- 11 5.500-03
- 12 6.000-03
- 13 6.500-03



$\sqrt{Dt} = 500.0$

STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-2A

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-2-5

図 4.3.2 (d) 相当塑性ひずみコンター図 ($\sqrt{Dt}=100.0$ 、 $\sqrt{Dt}=500.0$ 、極値時点B、境界部拡大)

Fig. 4.3.2 (d) Equivalent plastic strain contour ($\sqrt{Dt}=100.0$, $\sqrt{Dt}=500.0$, at the stress extreme; B, enlargement for the portion of boundary)

周継手解析 シェルパラメータの検討

ひずみ集中係数 K_F の挙動(内面, 相当ひずみ範囲最大部)

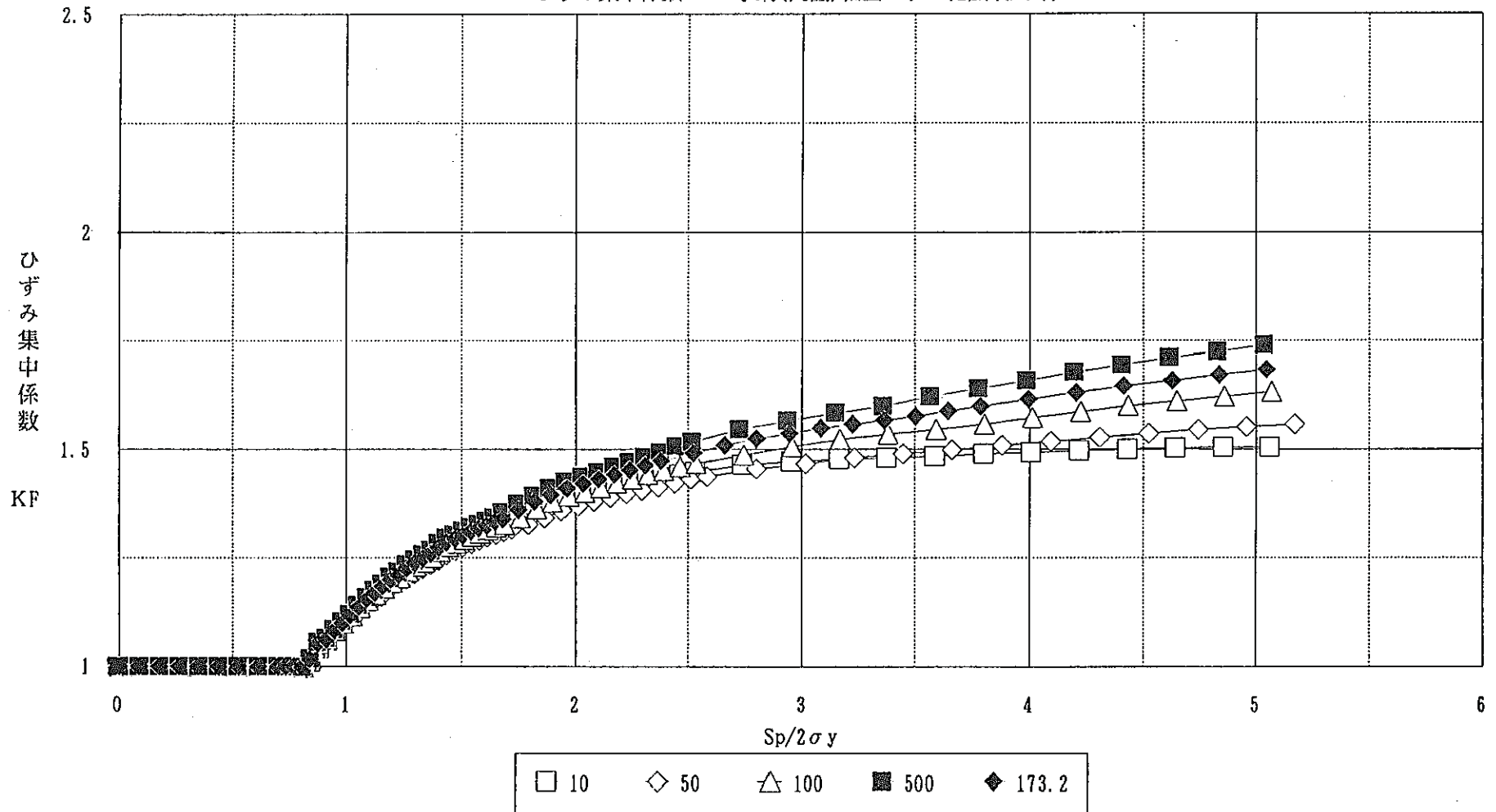


図 4.3.3 ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (全ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)
 Fig. 4.3.3 History of strain concentration factor K_F (All cases, inner surface, at the Portion of maximum equivalent strain range, until $S_p/2\sigma_y=5$)

4.4 継手幅の影響

4.4.1 目的

形状因子の1つである継手幅について、冶金的構造不連続によるひずみ増大挙動に及ぼす影響をを把握する。

4.4.2 方法

3.2節で示した方法により、継手幅をそれぞれ3.0、6.0、10.5、15.0、20.0（継手幅・板厚比でそれぞれ0.2、0.4、0.7、1.0、1.33）とした5ケースの弾塑性解析を行う。

また、リファレンスケース（CASE-1-1A、継手幅=800.0）との比較を行う。

負荷の大きさは、弾性解析による内表面での相当応力範囲と母材の降伏応力との比（ $S_p / 2 \sigma_y$ ）が5.0となるようにしている。

- 継手幅 H = 3.0 … CASE-3-1
- 継手幅 H = 6.0 … CASE-3-2
- 継手幅 H = 10.5 … CASE-3-5
- 継手幅 H = 15.0 … CASE-3-4
- 継手幅 H = 20.0 … CASE-3-3
- 継手幅 H = 800.0 … CASE-1-1A（リファレンス）

4.4.3 結果

(1) 相当ひずみ範囲軸方向分布

継手部の幅がリファレンスケースに対し、非常に小さいため境界部を拡大した図のみを示す。尚、図には上記5ケースの他にリファレンスケースも同時にプロットしている。

○相当ひずみ範囲軸方向分布（内面、全ケース、境界部拡大）… 図4.4.1

尚、横軸において、負方向が溶金側、正方向が母材側を示す。

これらの図より以下のことがわかる。

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、H=3.0~10.5では境界部付近、H=15.0~20.0では溶金中央部となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、その値は継手幅が大きくなる

につれて増大する傾向を示し、 $H = 15.0$ で最大となる。以後、減少する傾向を示す。

(2) 相当塑性ひずみコンター図

各ケースの相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。プロットした時点は相当ひずみ範囲が最大となる極値2時点の1つであるB時点である。

尚、本コンター図では、断面内をわかりやすくするために、板厚方向及び軸方向に拡大している。

○相当塑性ひずみコンター図 ($H = 3.0, 6.0\text{mm}$ 、極値時点B) … 図4.4.2(a)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H = 10.5, 15.0\text{mm}$ 、極値時点B)
… 図4.4.2(b)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H = 20.0\text{mm}$ 、極値時点B) … 図4.4.2(c)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H = 3.0, 6.0\text{mm}$ 、極値時点B、境界部拡大)
… 図4.4.2(d)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H = 10.5, 15.0\text{mm}$ 、極値時点B、境界部拡大)
… 図4.4.2(e)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H = 20.0\text{mm}$ 、極値時点B、境界部拡大)
… 図4.4.2(f)

これらの図から以下のことがわかる。

○ 継手幅が3mmの場合、溶金部継手境界付近で表面よりやや内部に入った位置で、相当塑性ひずみのピークが生じている。

○ 継手幅が大きくなるにつれて、ピーク発生位置が溶金中央部に移動する。

(3) ひずみ成分の板厚方向分布

以下に極値時点Bでの各ひずみ成分の板厚方向分布を示す。プロットした位置は相当ひずみ範囲最大部であり、横軸の板厚方向距離は内面からの距離を表わしている。

○ひずみ成分の板厚方向分布 ($H = 3.0\text{mm}$ 、極値時点B、相当ひずみ範囲最大部) … 図4.4.3(a)

○ひずみ成分の板厚方向分布 ($H = 6.0\text{mm}$ 、極値時点B、相当ひずみ範囲最大

部) … 図 4. 4. 3 (b)

○ひずみ成分の板厚方向分布 (H = 10. 5mm、極値時点 B、相当ひずみ範囲最大部) … 図 4. 4. 3 (c)

○ひずみ成分の板厚方向分布 (H = 15. 0mm、極値時点 B、相当ひずみ範囲最大部) … 図 4. 4. 3 (d)

○ひずみ成分の板厚方向分布 (H = 20. 0mm、極値時点 B、相当ひずみ範囲最大部) … 図 4. 4. 3 (e)

これらの図より以下のことがわかる。

- 継手幅 3、6 mm の場合、 $\Delta \varepsilon_z$ が表面で減少する傾向を示す。また、3、6、10. 5mm の場合、表面よりやや内部でせん断ひずみが生じている。これらは、継手幅がある程度小さい場合、表面近傍に局部変形が生じているためであり、せん断ひずみの発生は主応力の方向にずれが生じたためと考えられる。
- 継手幅が小さくなると $\Delta \varepsilon_z$ の曲げ成分が減少する。これは、板厚方向の変形が母材側に拘束されて 3 軸的な応力状態となる塑性拘束の影響で σ_z が大きくなるためと考えられる。
- 相当ひずみ範囲が最大となる継手幅 15mm のケースでは、断面全体にわたって、 $\Delta \varepsilon_z$ の分布が非線形となっている。

(4) ひずみ集中係数 K_F の履歴

以下に各ケースにおける相当ひずみ範囲最大部のひずみ集中係数 K_F の履歴を示す。

縦軸はひずみ集中係数 K_F 、横軸は対応する時点での弾性解析による内表面の相当応力 (膜+曲げ+ピーク成分: S_p) の極値時点 A を基準とした増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で除した値を示している。

○ひずみ集中係数 K_F の履歴 … 図 4. 4. 4

(全ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2\sigma_y = 5$ まで)

この図より以下のことがわかる。

- リファレンスケースに対し各ケース共、降伏後急激な増大を示すが、継手幅が小さいケースでは、徐々に増加の割合が減少し継手幅が 3 mm のケースでは一定の

値に漸近する傾向を示す。

- 継手幅が大きくなるにつれて増大する傾向が強まり、継手幅 $H = 15.0\text{mm}$ で最大となる。
- 継手幅が 15.0mm より大きくなるとひずみ増大挙動は減少する傾向を示す。

4.3.4 まとめ

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、 $H = 3.0 \sim 10.5$ では境界部、 $H = 15.0 \sim 20.0$ では溶金中央部となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、その値は継手幅が大きくなるにつれて増大する傾向を示し、 $H = 15.0$ で最大となる。以後、減少する傾向を示す。これは、以下のような原因が考えられる。
 - ◎ 継手幅が小さい場合、継手部の板厚方向ひずみの拘束により軸方向応力成分が増大する結果、軸方向曲げひずみの集中が抑えられる。但し、境界近傍で局部変形によるピークが生ずる。
 - ◎ 継手幅が大きくなると板厚方向ひずみの拘束効果の及ばない継手中央部にひずみ集中部が移行する。また、継手両側母材部からのひずみ再配分が重畳し、ひずみ集中傾向が強まる。
 - ◎ 継手幅がある程度大きくなると、継手両側からの重畳効果が減少するため、ひずみ集中が小さくなる。
- ひずみ集中係数は、リファレンスケースに対し各ケース共、降伏後急激な増大を示し、継手幅が大きくなるにつれて、徐々に増加の割合が増大する傾向を示し、その最大値は継手幅 $H = 15.0\text{mm}$ で最大となる。

周継手解析 継手幅の影響

相当ひずみ範囲軸方向分布(内面, 全ケース)

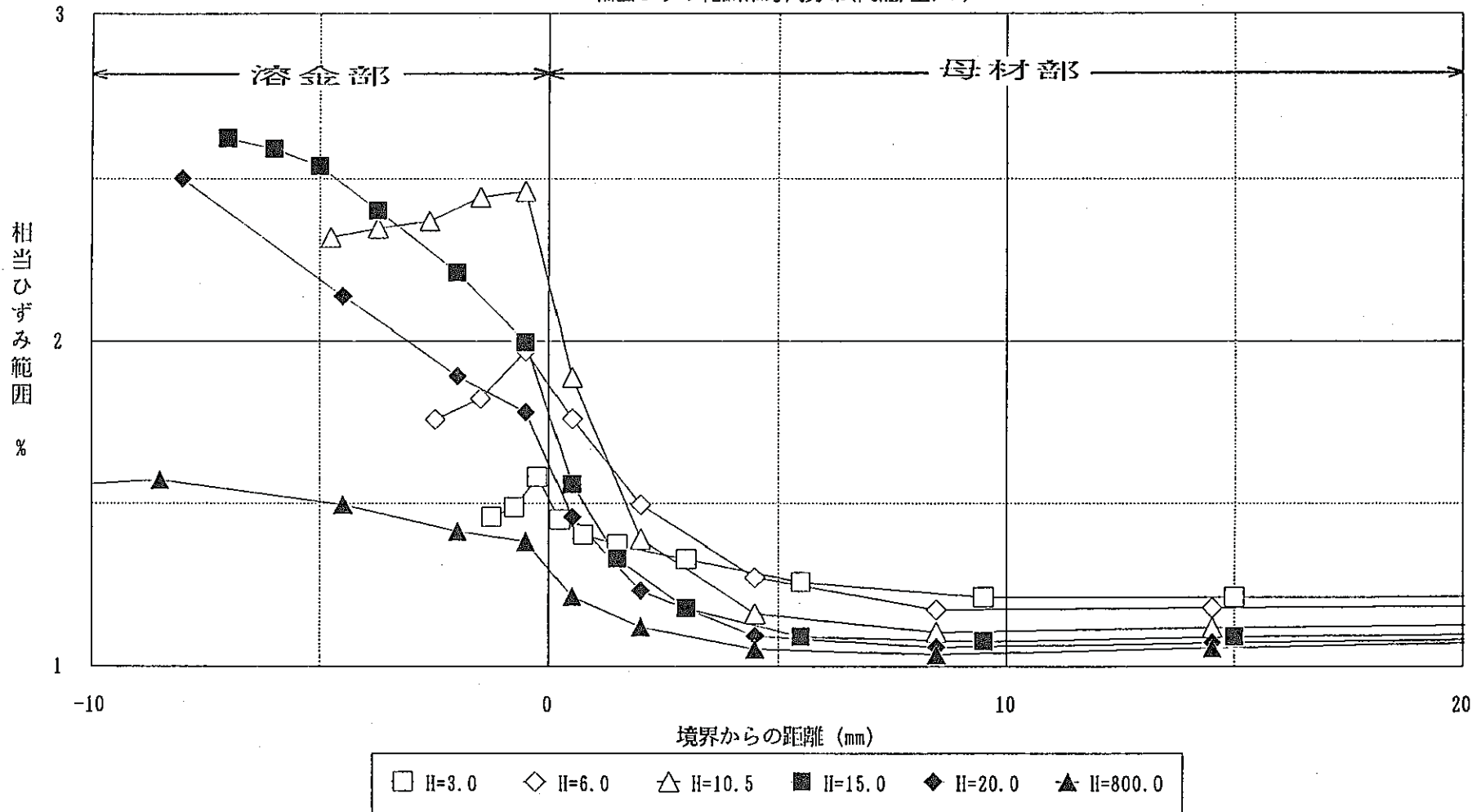


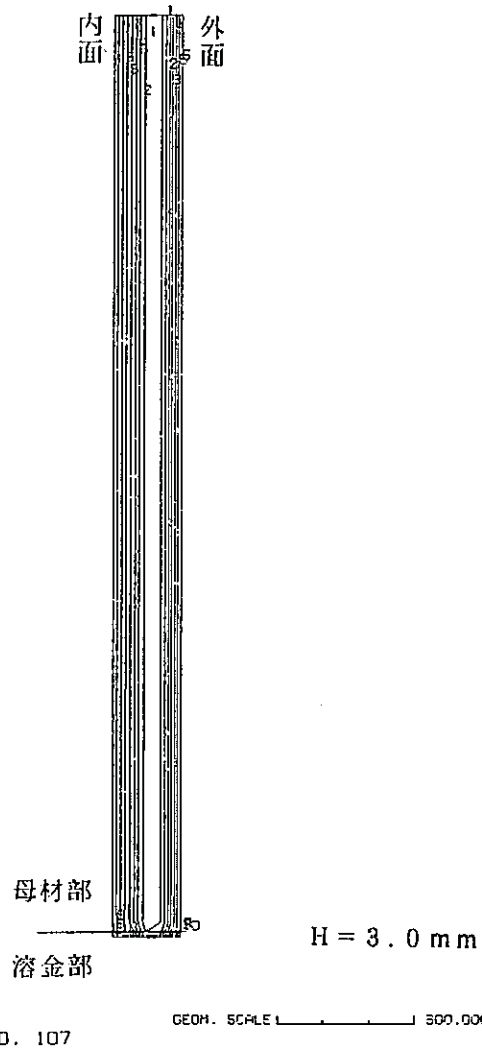
図 4.4.1 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大)

Fig. 4.4.1 Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

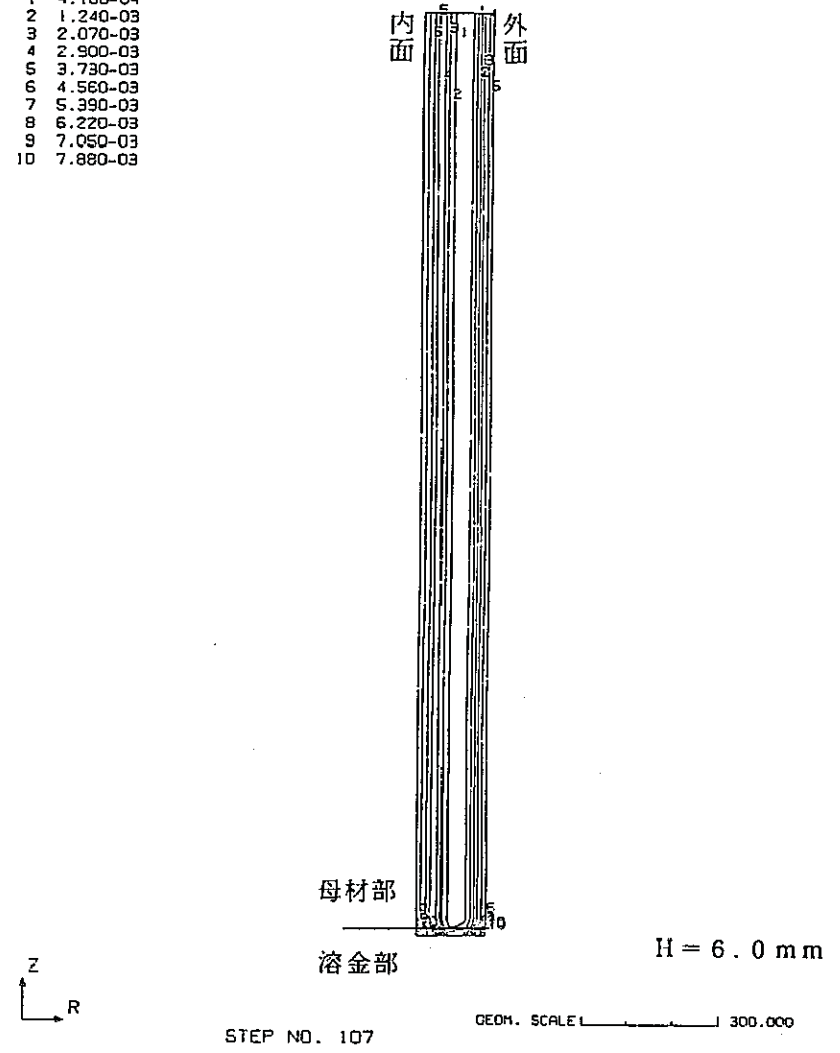
1	3.700-04
2	1.100-03
3	1.830-03
4	2.560-03
6	3.230-03
6	4.020-03
7	4.750-03
8	5.430-03
9	6.210-03
10	6.940-03



FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	4.100-04
2	1.240-03
3	2.070-03
4	2.900-03
5	3.730-03
6	4.560-03
7	5.390-03
8	6.220-03
9	7.050-03
10	7.880-03



CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-1

図 4. 4. 2 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、H=3.0mm、6.0mm)

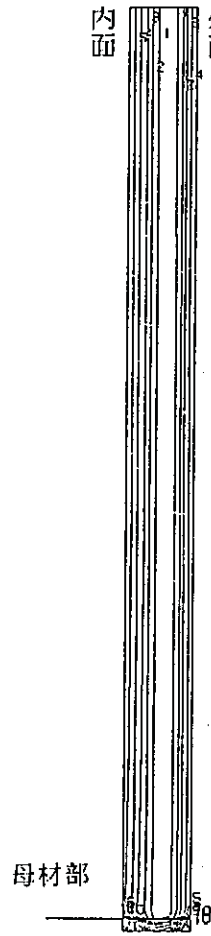
Fig. 4. 4. 2 (a) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B H=3.0mm, 6.0mm)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.500-03
3	2.500-03
4	3.500-03
6	4.500-03
5	5.500-03
7	6.500-03
8	7.500-03
9	8.500-03
10	9.500-03

内面 外面



H = 10.5 mm



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 300.000

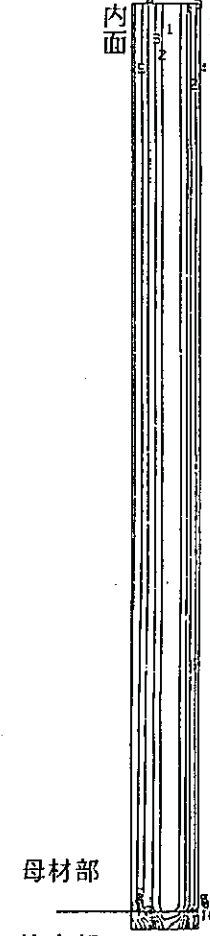
CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-5

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.600-03
3	2.700-03
4	3.800-03
5	4.900-03
6	6.000-03
7	7.100-03
8	8.200-03
9	9.300-03
10	1.040-02

内面 外面



H = 15.0 mm



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 300.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-4

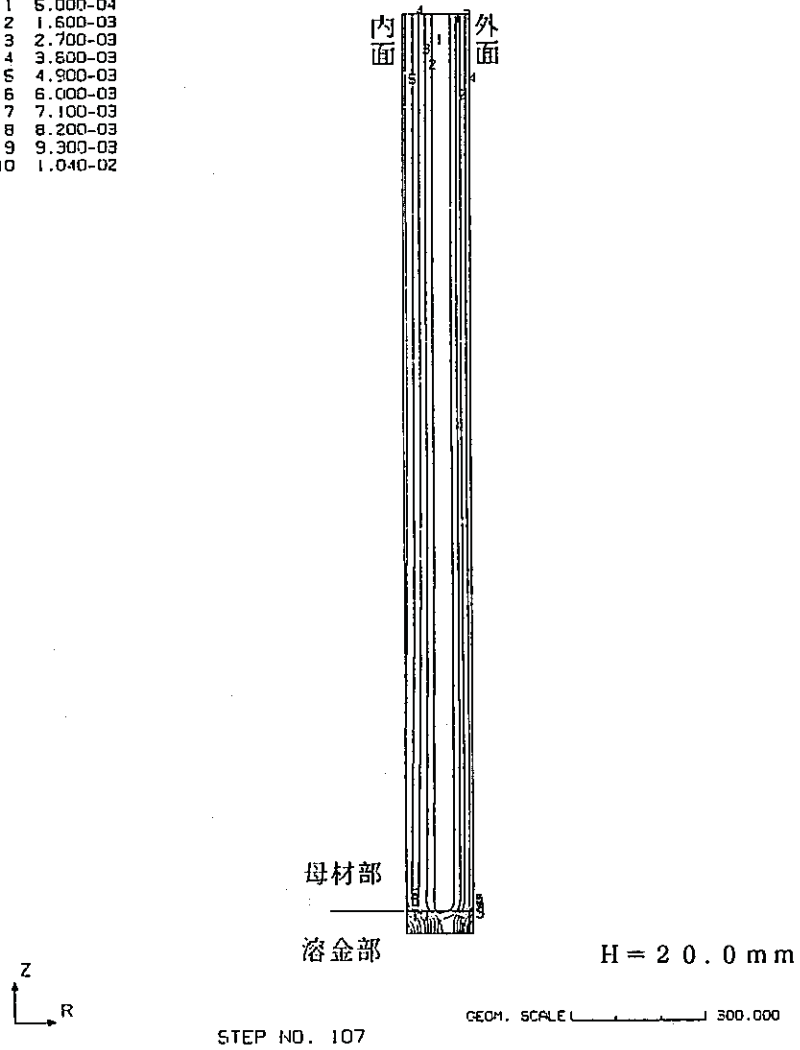
図 4. 4. 2 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、H=10.5mm、15.0mm)

Fig. 4. 4. 2 (b) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B H=10.5mm, 15.0mm)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.600-03
3	2.700-03
4	3.600-03
5	4.900-03
6	6.000-03
7	7.100-03
8	8.200-03
9	9.300-03
10	1.040-02



CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-3

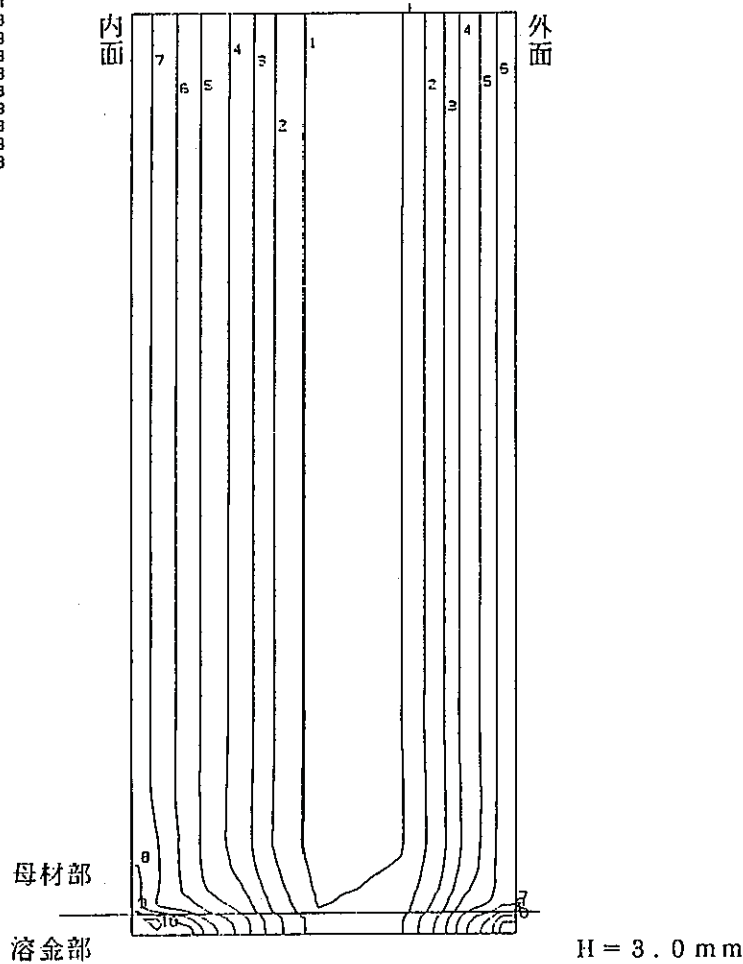
図 4. 4. 2 (c) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、H = 20.0mm)

Fig. 4. 4. 2 (c) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B H=20.0mm)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	3.700-04
2	1.100-03
3	1.630-03
4	2.560-03
5	3.290-03
6	4.020-03
7	4.750-03
8	5.480-03
9	6.210-03
10	6.940-03



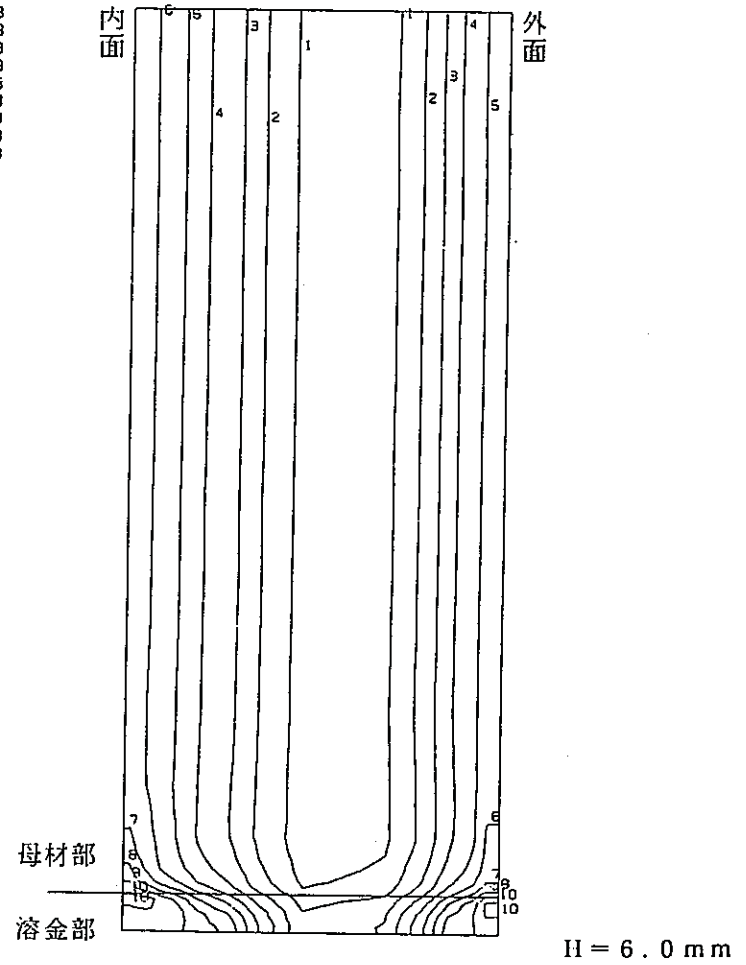
STEP NO. 107

GEOM. SCALE 1:50,000

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	4.100-04
2	1.240-03
3	2.070-03
4	2.900-03
5	3.730-03
6	4.560-03
7	5.390-03
8	6.220-03
9	7.050-03
10	7.880-03



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 1:50,000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-1

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-2

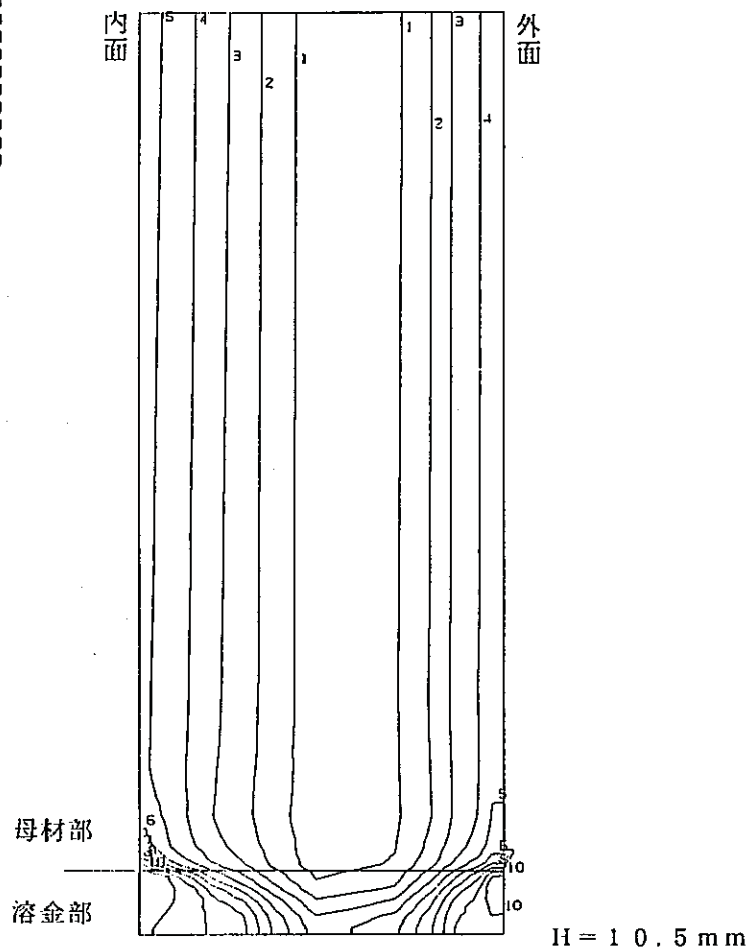
図 4. 4. 2 (d) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点B、境界部拡大、H=3.0mm、6.0mm)

Fig. 4. 4. 2 (d) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B enlargement for the portion of boundary, H=3.0mm, 6.0mm)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.500-03
3	2.500-03
4	3.500-03
5	4.500-03
6	5.500-03
7	6.500-03
8	7.500-03
9	8.500-03
10	9.500-03



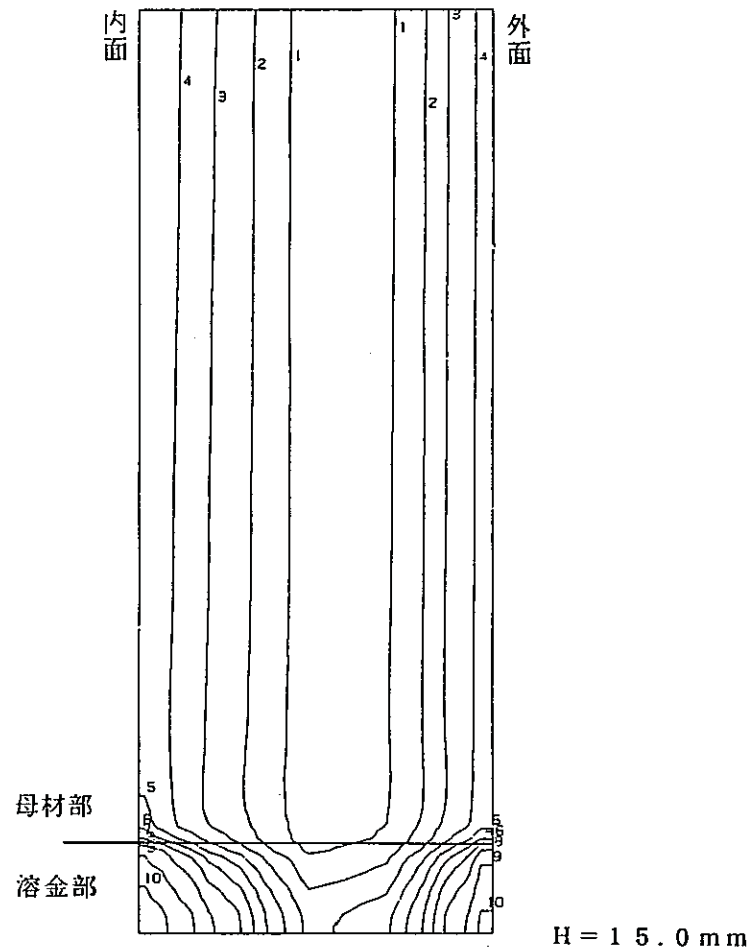
STEP NO. 107

GEOM. SCALE 1 50.0000

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.600-03
3	2.700-03
4	3.600-03
5	4.900-03
6	6.000-03
7	7.100-03
8	8.200-03
9	9.300-03
10	1.040-02



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 1 50.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-5

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-4

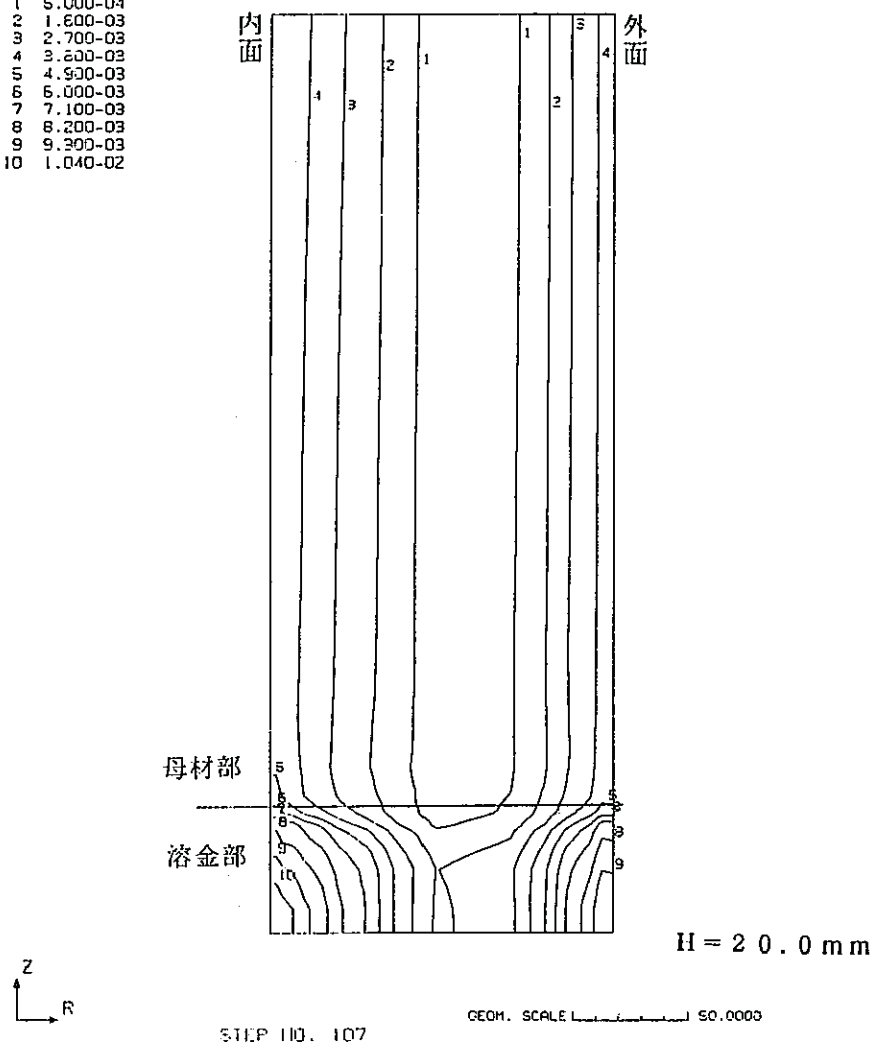
図 4. 4. 2 (e) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、境界部拡大、H=10.5mm、15.0mm)

Fig. 4. 4. 2 (e) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B enlargement for the portion of boundary, H=10.5mm, 15.0mm)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	5.000-04
2	1.600-03
3	2.700-03
4	3.600-03
5	4.900-03
6	6.000-03
7	7.100-03
8	8.200-03
9	9.300-03
10	1.040-02



CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-3-3

図 4. 4. 2 (f) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、境界部拡大、H=20.0mm)

Fig. 4. 4. 2 (f) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B enlargement for the portion of boundary, H=20.0mm)

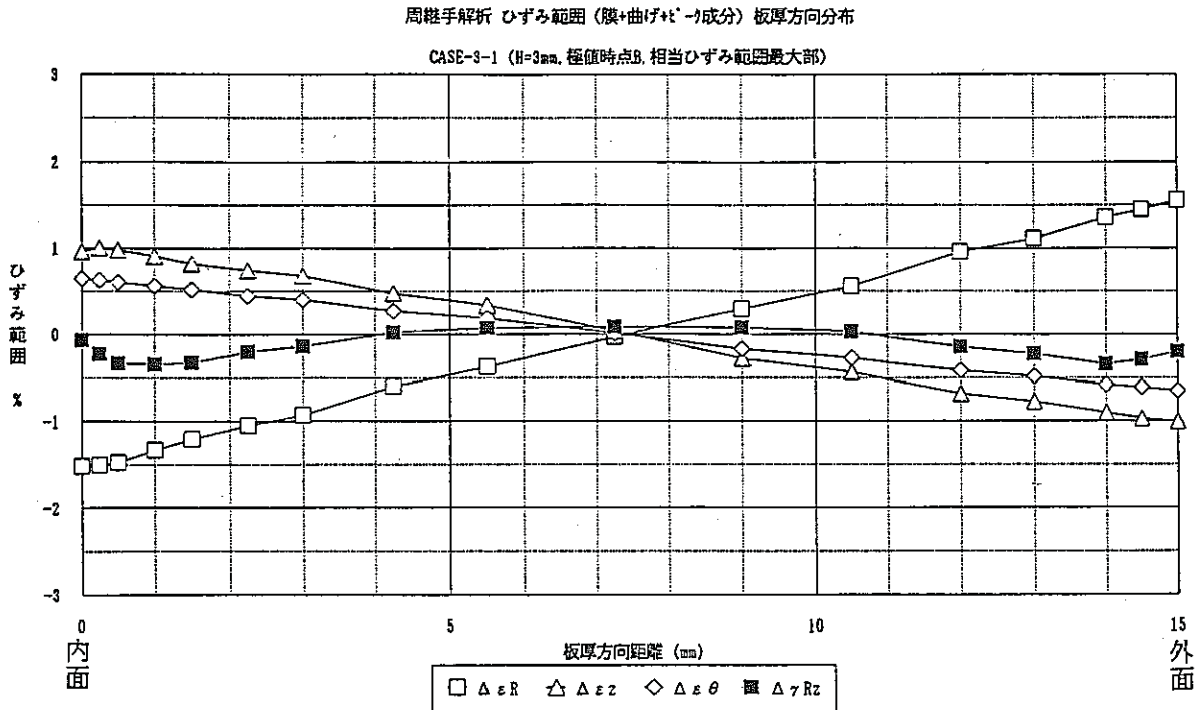


図 4. 4. 3 (a) ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点B、相当ひずみ範囲最大部、 $H=3.0\text{mm}$)

Fig. 4. 4. 3 (a) Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range, $H=3.0\text{mm}$)

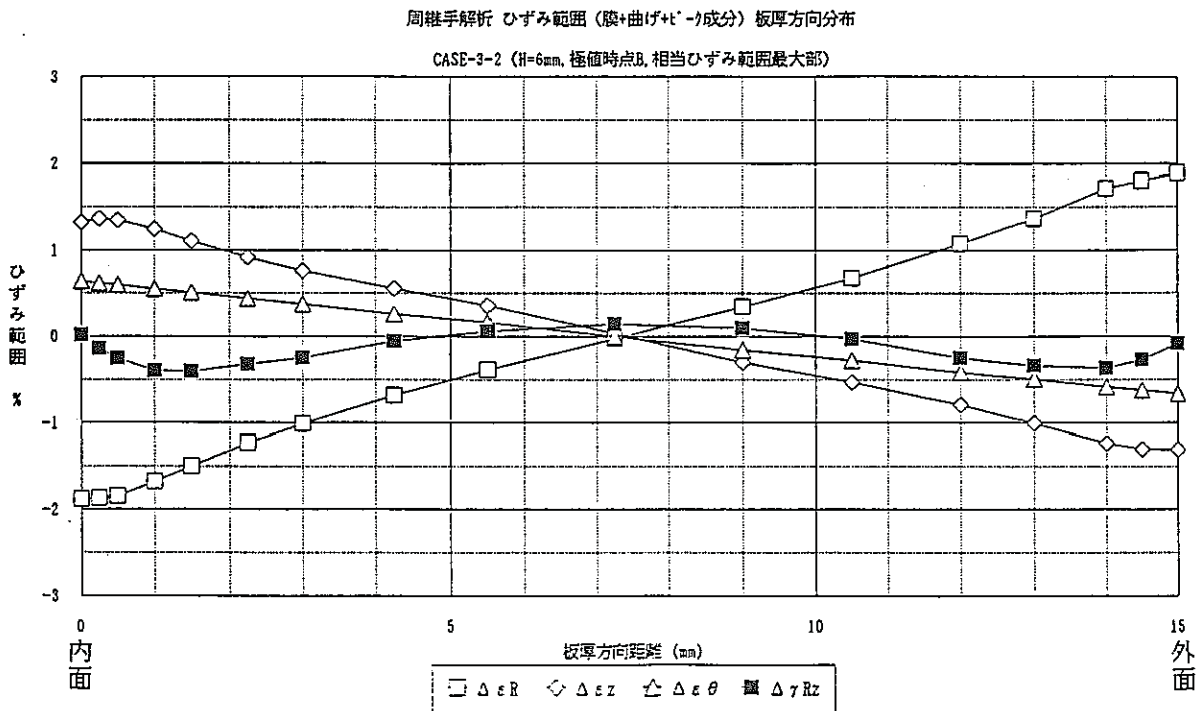


図 4. 4. 3 (b) ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点B、相当ひずみ範囲最大部、 $H=6.0\text{mm}$)

Fig. 4. 4. 3 (b) Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range, $H=6.0\text{mm}$)

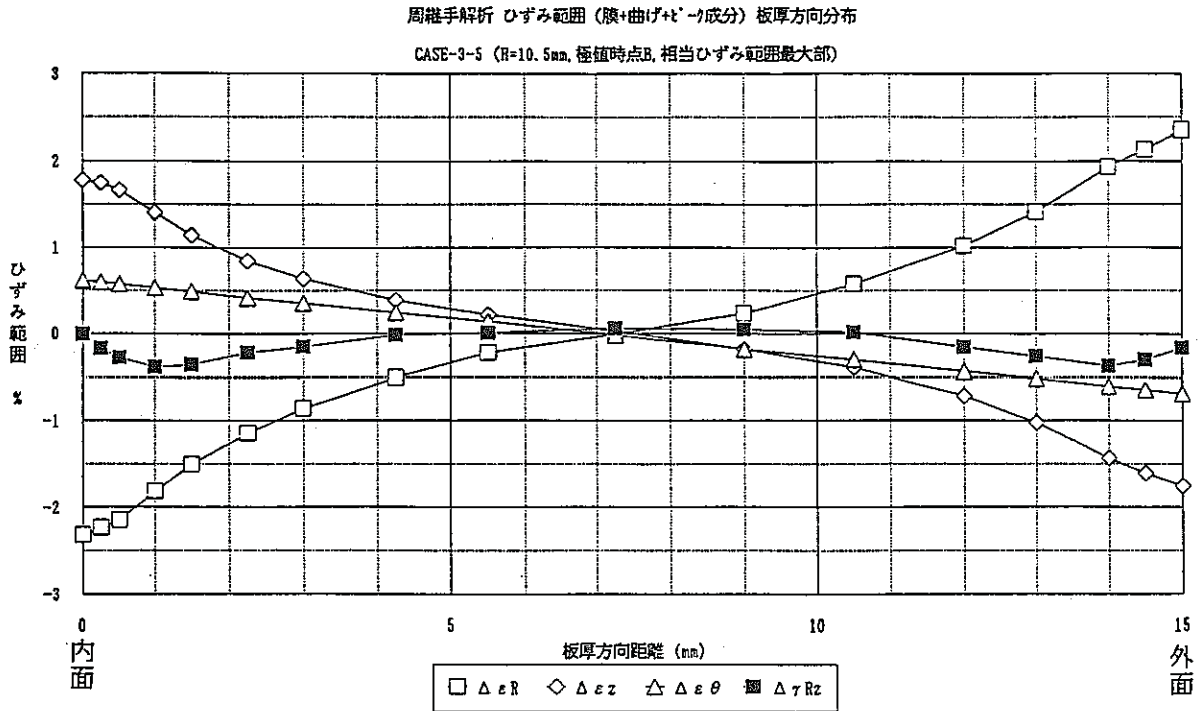


図 4. 4. 3 (c) ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点B、相当ひずみ範囲最大部、H=10.5mm)

Fig. 4. 4. 3 (c) Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=10.5mm)

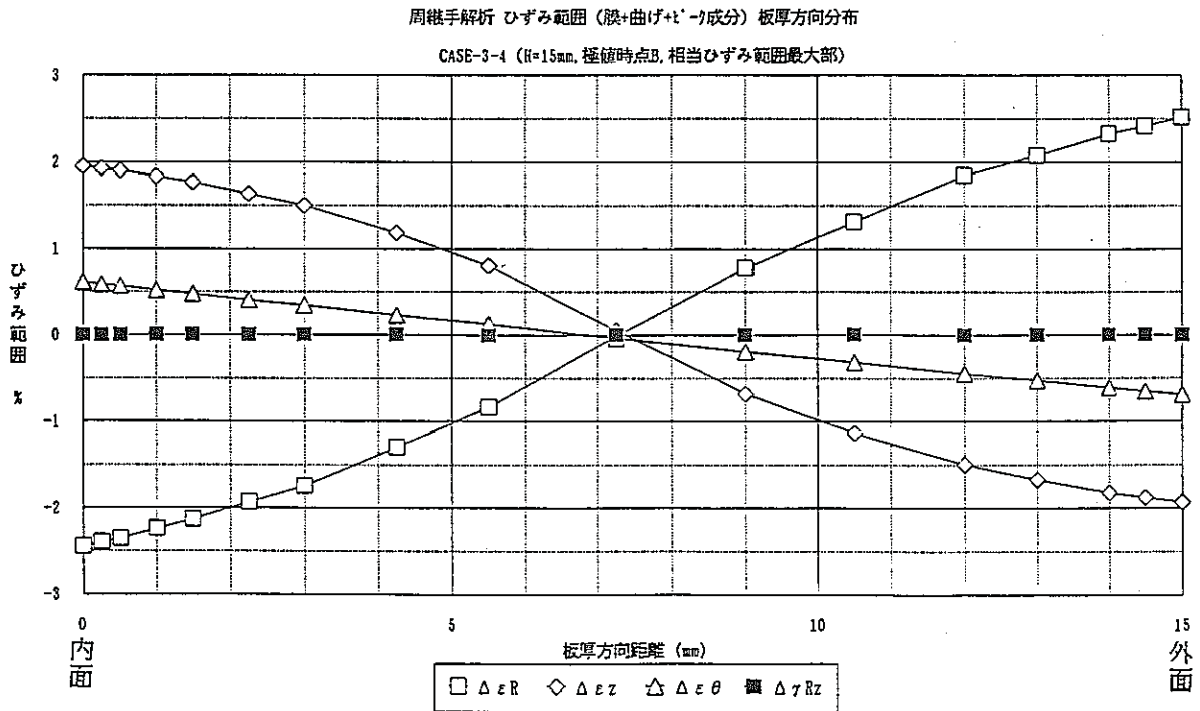


図 4. 4. 3 (d) ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点B、相当ひずみ範囲最大部、H=15.0mm)

Fig. 4. 4. 3 (d) Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=15.0mm)

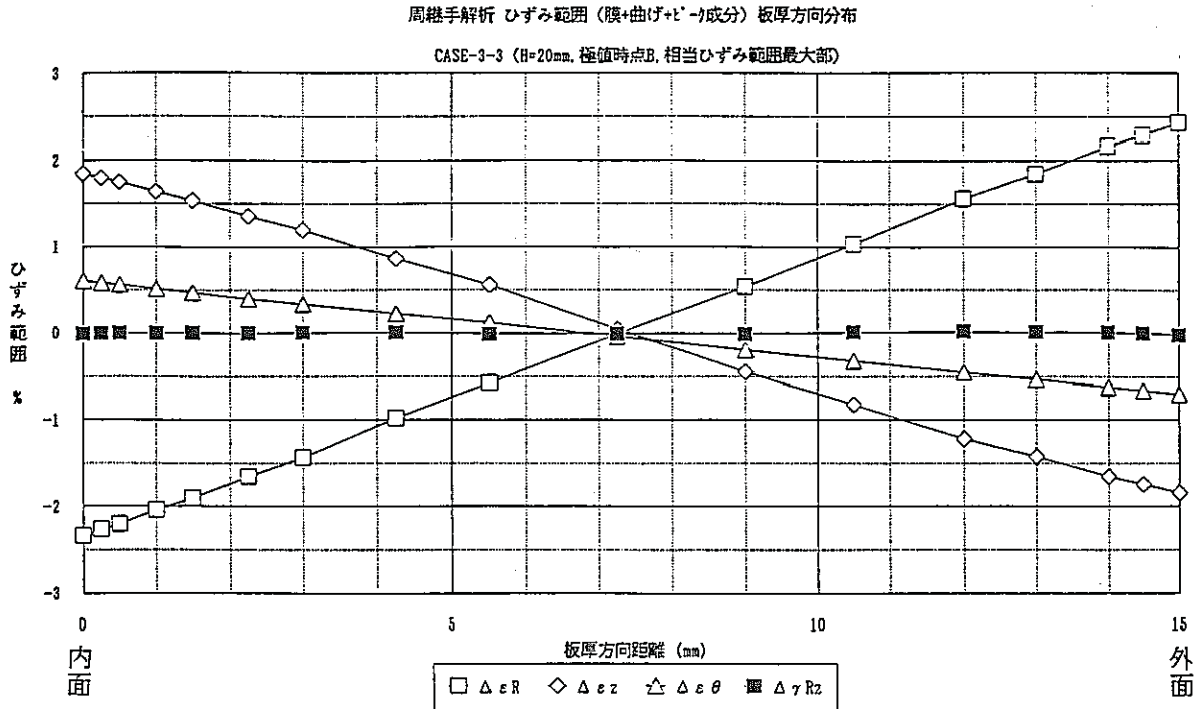


図 4. 4. 3 (e) ひずみ成分の板厚方向分布 (極値時点B、相当ひずみ範囲最大部、H = 20.0mm)

Fig. 4. 4. 3 (e) Strain component distribution through the wall thickness (at the stress extreme;B, at the portion of maximum equivalent strain range, H=20.0mm)

周継手解析 継手幅の影響

ひずみ集中係数 K_F の挙動(内面, 相当ひずみ範囲最大部)

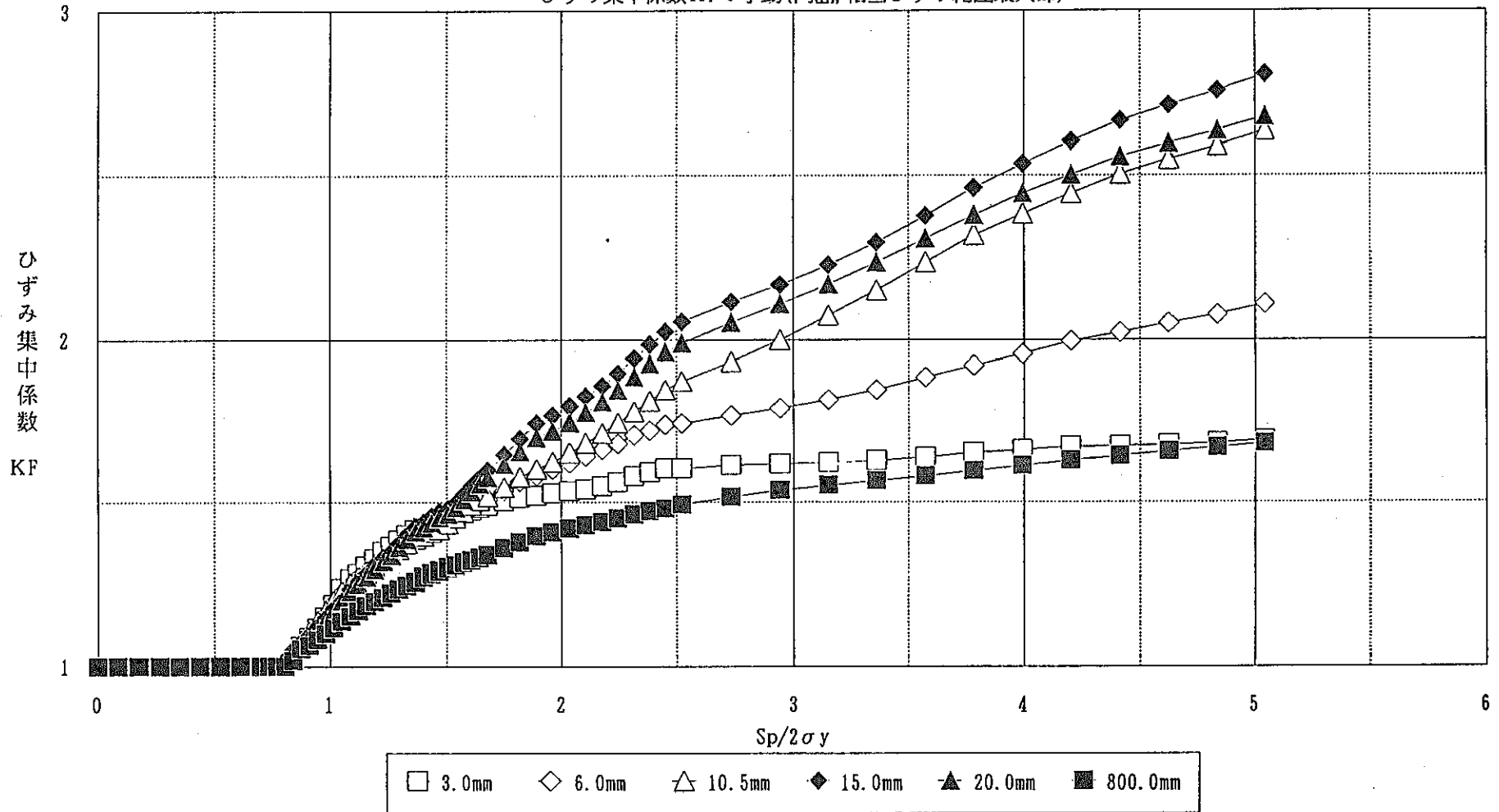


図 4.4.4 ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (全ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)

Fig. 4.4.4 History of strain concentration factor K_F (All cases, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p/2\sigma_y=5$)

4.5 降伏応力比の影響

4.5.1 目的

材料特性因子の1つである降伏応力比について、冶金的構造不連続によるひずみ増大挙動に及ぼす影響を把握する。

4.5.2 方法

3.2節で示した方法により、降伏応力比 r_y をそれぞれ0.75、0.85、0.9、0.95とした4ケースの弾塑性解析を行う。また、リファレンスモデル（CASE-1-1、 $r_y=0.8$ ）との比較を行う。

負荷の大きさは、弾性解析による内表面での相当応力範囲と母材の降伏応力の比 $S_p/2\sigma_y$ が5.0となるようにしている。

- 降伏応力比 $r_y=0.75$ … CASE-4-1
- 降伏応力比 $r_y=0.85$ … CASE-4-3
- 降伏応力比 $r_y=0.9$ … CASE-4-2
- 降伏応力比 $r_y=0.95$ … CASE-4-4
- 降伏応力比 $r_y=0.8$ … CASE-1-1 A（リファレンス）

4.5.3 結果

(1) 相当ひずみ範囲の軸方向分布

図には、上記3ケースの他にリファレンスケースも同時にプロットしている。

○相当ひずみ範囲の軸方向分布（内面、全ケース） … 図4.5.1(a)

○相当ひずみ範囲の軸方向分布（内面、全ケース、境界部拡大）
… 図4.5.1(b)

尚、横軸において、負方向が溶金側、正方向が母材側を示す。

これらの図より以下のことがわかる。

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、境界より9mm程度の位置の位置となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、その値は降伏応力比が小さくなるにつれて増大する傾向を示し、 $r_y=0.75$ で最大となる。

(2) 相当塑性ひずみコンター図

各ケースの相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。プロットした時点は相当ひずみ範囲が最大となる極値 2 時点の 1 つである B 時点である。

尚、本コンター図では、断面内をわかりやすくするために、板厚方向に拡大している。

また、図中のスケールは軸方向 (Z 方向) の距離を表わしている。

○相当塑性ひずみコンター図 ($r_y=0.75$ 、 0.85 、極値時点 B) … 図 4.5.2 (a)

○相当塑性ひずみコンター図 ($r_y=0.9$ 、 0.95 、極値時点 B) … 図 4.5.2 (b)

○相当塑性ひずみコンター図 ($r_y=0.75$ 、 0.85 、極値時点 B、境界部拡大) … 図 4.5.2 (c)

○相当塑性ひずみコンター図 ($r_y=0.9$ 、 0.95 、極値時点 B、境界部拡大) … 図 4.5.2 (d)

これらの図から以下のことがわかる。

- 降伏応力比が小さい場合、溶金部の相当ひずみ範囲最大部に相当塑性ひずみの顕著なピークが見られるが、降伏応力比が大きくなるにつれてピークが徐々になだらかになる傾向を示す。

(3) ひずみ集中係数 K_F の履歴

以下に各ケースにおける相当ひずみ範囲最大部のひずみ集中係数 K_F の履歴を示す。

縦軸はひずみ集中係数 K_F 、横軸は対応する時点での弾性解析による内表面での相当応力 (膜+曲げ+ピーク成分: S_p) の極値時点 A を基準にした増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で除した値を示している。

○ひずみ集中係数 K_F の履歴図 … 図 4.5.3

(各ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)

この図より以下のことがわかる。

- 各ケース共、弾性追従型のひずみ増大傾向を示す。

- ひずみ増大挙動は、降伏応力比が大きくなるにつれて増大し、 $r_y=0.75$ の場合で最大となる。

4.5.4 まとめ

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、境界より9 mm程度の位置の位置となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、その値は降伏応力比が小さくなるにつれて増大する傾向を示し、 $r_y=0.75$ で最大となる。
- ひずみ増大挙動は、降伏応力比が大きくなるにつれて増大し、 $r_y=0.75$ の場合で最大となる。

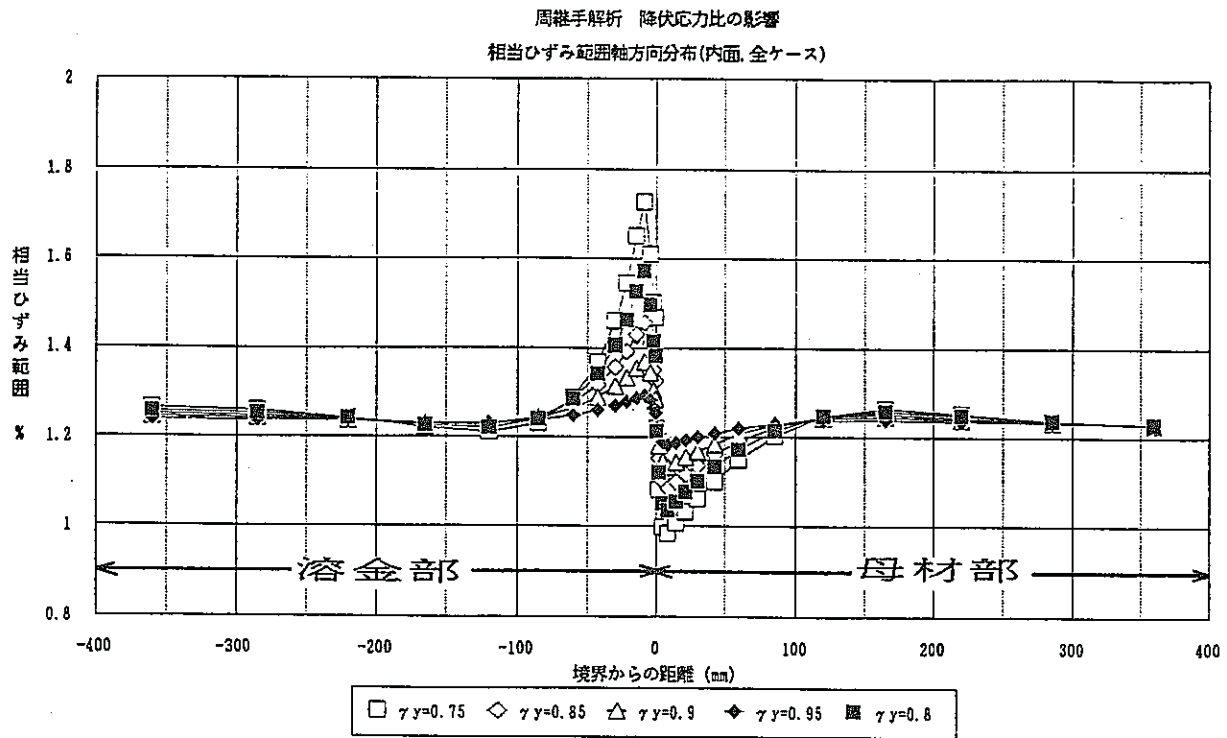


図 4.5.1 (a) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース)
Fig. 4.5.1 (a) Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases)

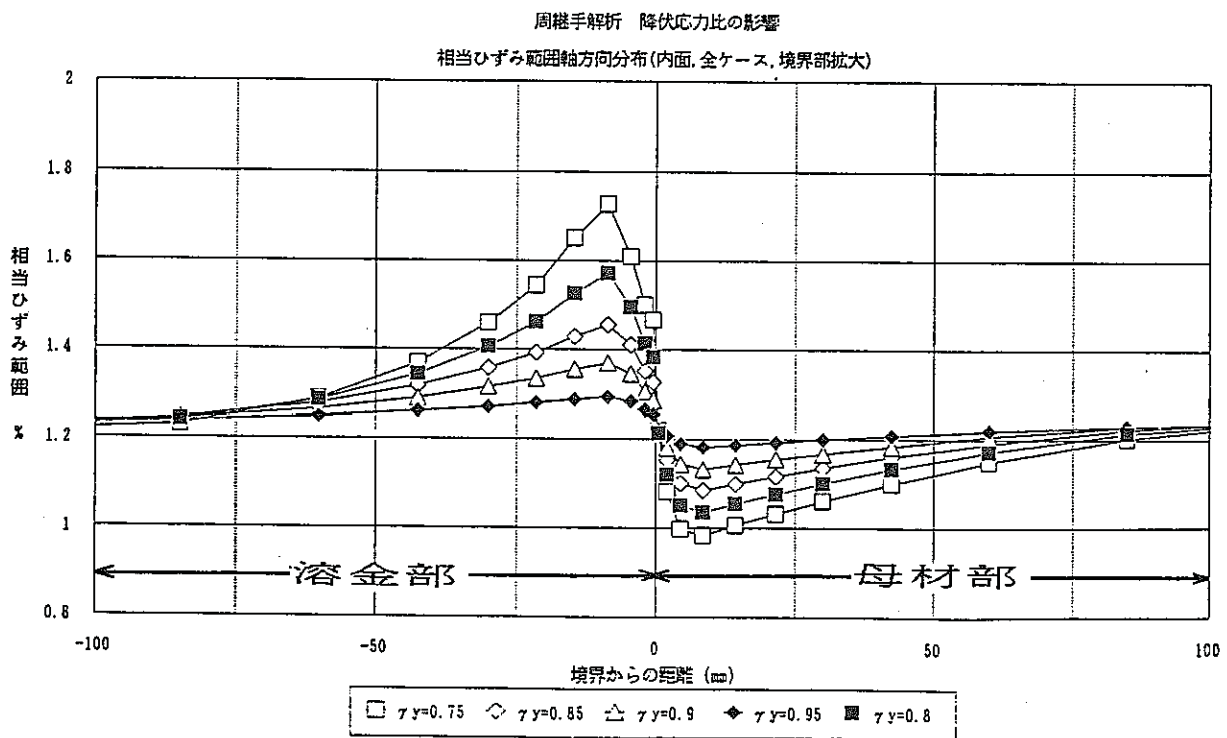
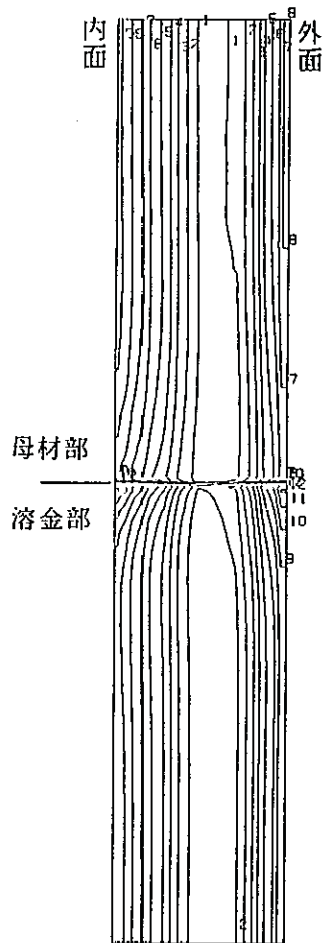


図 4.5.1 (b) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大)
Fig. 4.5.1 (b) Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.500-04
- 2 8.500-04
- 3 1.450-03
- 4 2.050-03
- 5 2.650-03
- 6 3.250-03
- 7 3.850-03
- 8 4.450-03
- 9 5.050-03
- 10 5.650-03
- 11 6.250-03
- 12 6.850-03
- 13 7.450-03



$\gamma_y = 0.75$

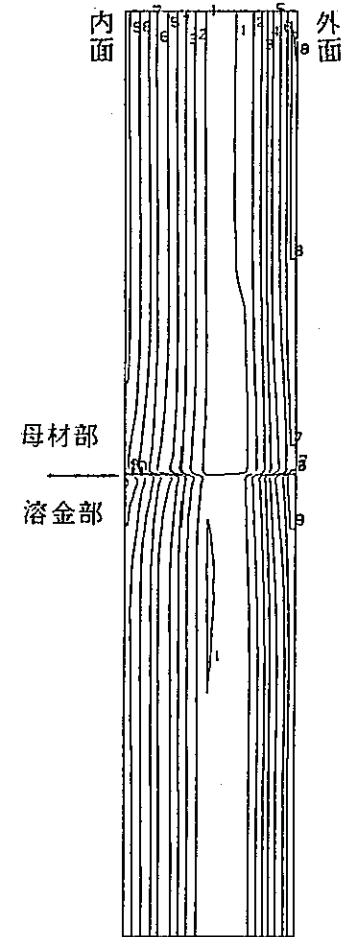
STEP NO. 107

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-1

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.500-04
- 2 8.500-04
- 3 1.450-03
- 4 2.050-03
- 5 2.650-03
- 6 3.250-03
- 7 3.850-03
- 8 4.450-03
- 9 5.050-03
- 10 5.650-03
- 11 6.250-03
- 12 6.850-03
- 13 7.450-03



$\gamma_y = 0.85$

STEP NO. 107

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-3

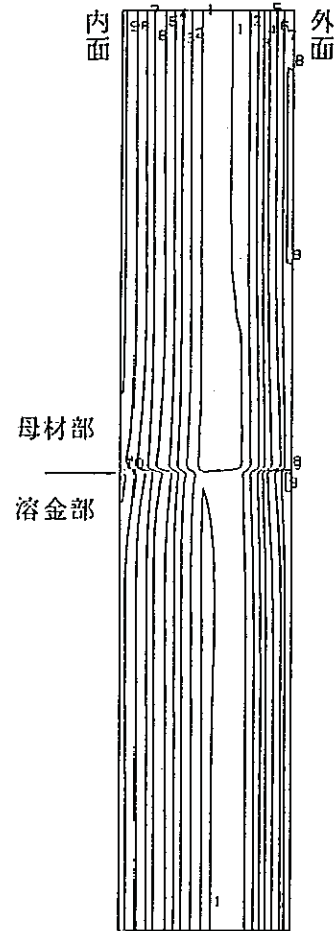
図 4.5.2 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $\gamma_y=0.75$ 、 $\gamma_y=0.85$)

Fig. 4.5.2 (a) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $\gamma_y=0.75$, $\gamma_y=0.85$)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.500-04
- 2 8.500-04
- 3 1.450-03
- 4 2.050-03
- 5 2.650-03
- 6 3.250-03
- 7 3.850-03
- 8 4.450-03
- 9 5.050-03
- 10 5.650-03
- 11 6.250-03
- 12 6.850-03
- 13 7.450-03



$\gamma_y = 0.9$

STEP NO. 107

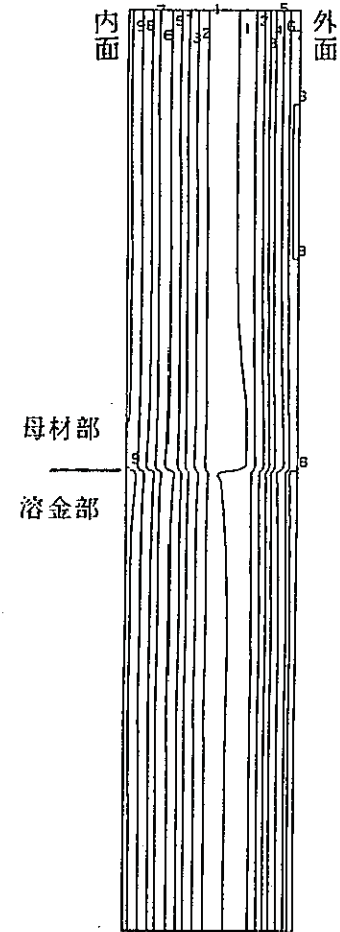
GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-2

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.500-04
- 2 8.500-04
- 3 1.450-03
- 4 2.050-03
- 5 2.650-03
- 6 3.250-03
- 7 3.850-03
- 8 4.450-03
- 9 5.050-03
- 10 5.650-03
- 11 6.250-03
- 12 6.850-03
- 13 7.450-03



$\gamma_y = 0.95$

STEP NO. 107

GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-4

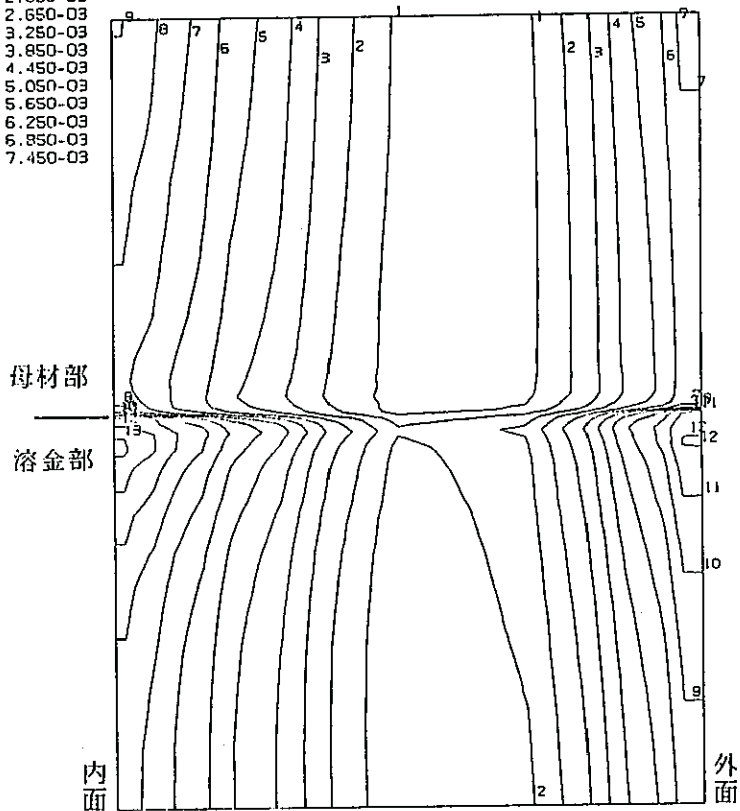
図 4.5.2 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $\gamma_y=0.9$ 、 $\gamma_y=0.95$)

Fig. 4.5.2 (b) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $\gamma_y=0.9$, $\gamma_y=0.95$)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.500-04
- 2 8.500-04
- 3 1.450-03
- 4 2.050-03
- 5 2.650-03
- 6 3.250-03
- 7 3.850-03
- 8 4.450-03
- 9 5.050-03
- 10 5.650-03
- 11 6.250-03
- 12 6.850-03
- 13 7.450-03



$\gamma_y = 0.75$

STEP NO. 107

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-1

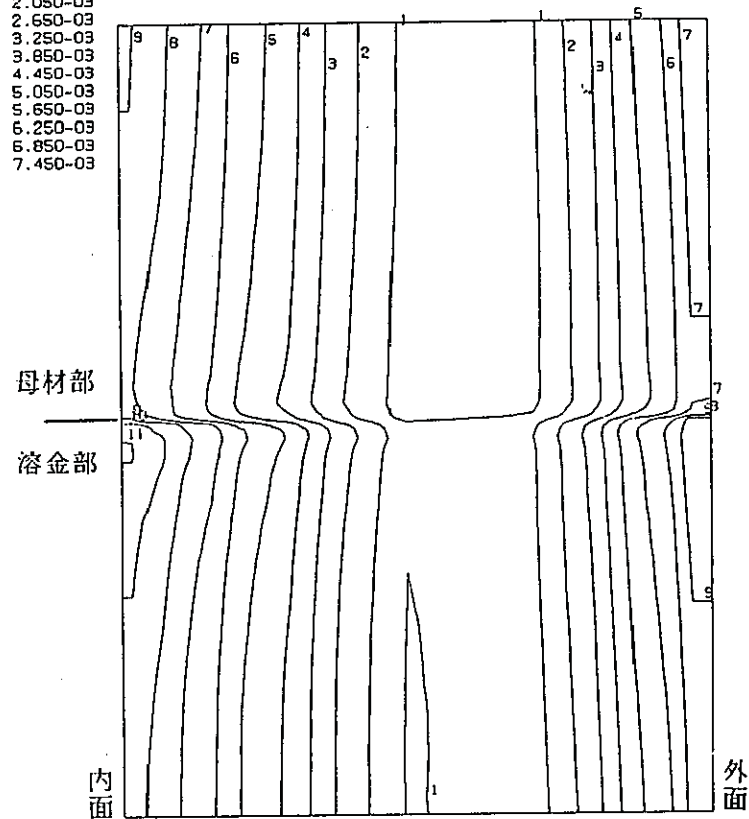
図 4.5.2 (c) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点B、 $\gamma_y = 0.75$ 、 $\gamma_y = 0.85$ 、境界部拡大)

Fig. 4.5.2 (c) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $\gamma_y = 0.75$, $\gamma_y = 0.85$, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.500-04
- 2 8.500-04
- 3 1.450-03
- 4 2.050-03
- 5 2.650-03
- 6 3.250-03
- 7 3.850-03
- 8 4.450-03
- 9 5.050-03
- 10 5.650-03
- 11 6.250-03
- 12 6.850-03
- 13 7.450-03



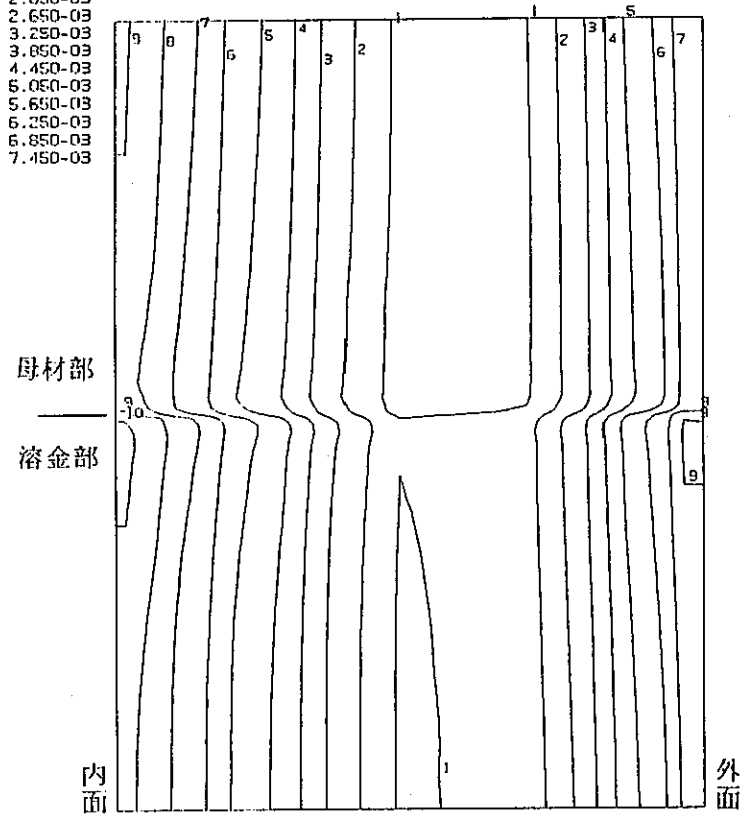
$\gamma_y = 0.85$

STEP NO. 107

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-3

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

- CONTOUR VALUES
- 1 2.500-04
 - 2 3.500-04
 - 3 1.450-03
 - 4 2.050-03
 - 5 2.650-03
 - 6 3.250-03
 - 7 3.850-03
 - 8 4.450-03
 - 9 5.050-03
 - 10 5.650-03
 - 11 6.250-03
 - 12 6.850-03
 - 13 7.450-03



$\gamma_y = 0.9$



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

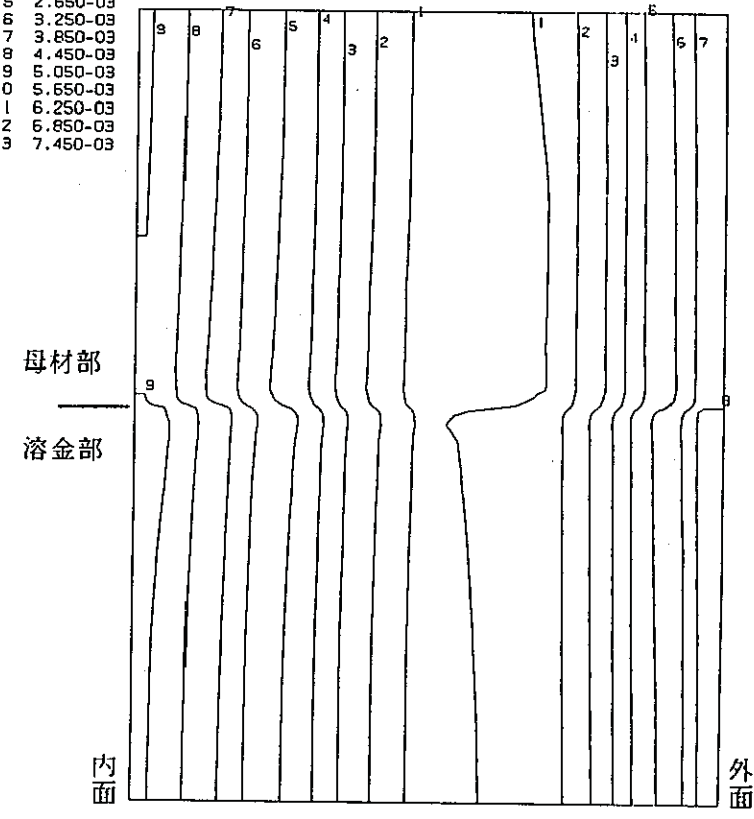
CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-2

図 4.5.2 (d) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点B、 $\gamma_y=0.9$ 、 $\gamma_y=0.85$ 、境界部拡大)

Fig. 4.5.2 (d) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme;B, $\gamma_y=0.9$, $\gamma_y=0.85$, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

- CONTOUR VALUES
- 1 2.500-04
 - 2 3.500-04
 - 3 1.450-03
 - 4 2.050-03
 - 5 2.650-03
 - 6 3.250-03
 - 7 3.850-03
 - 8 4.450-03
 - 9 5.050-03
 - 10 5.650-03
 - 11 6.250-03
 - 12 6.850-03
 - 13 7.450-03



$\gamma_y = 0.95$



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-4-4

周継手解析 降伏応力比の影響

ひずみ集中係数 K_F の挙動(内面, 相当ひずみ範囲最大部)

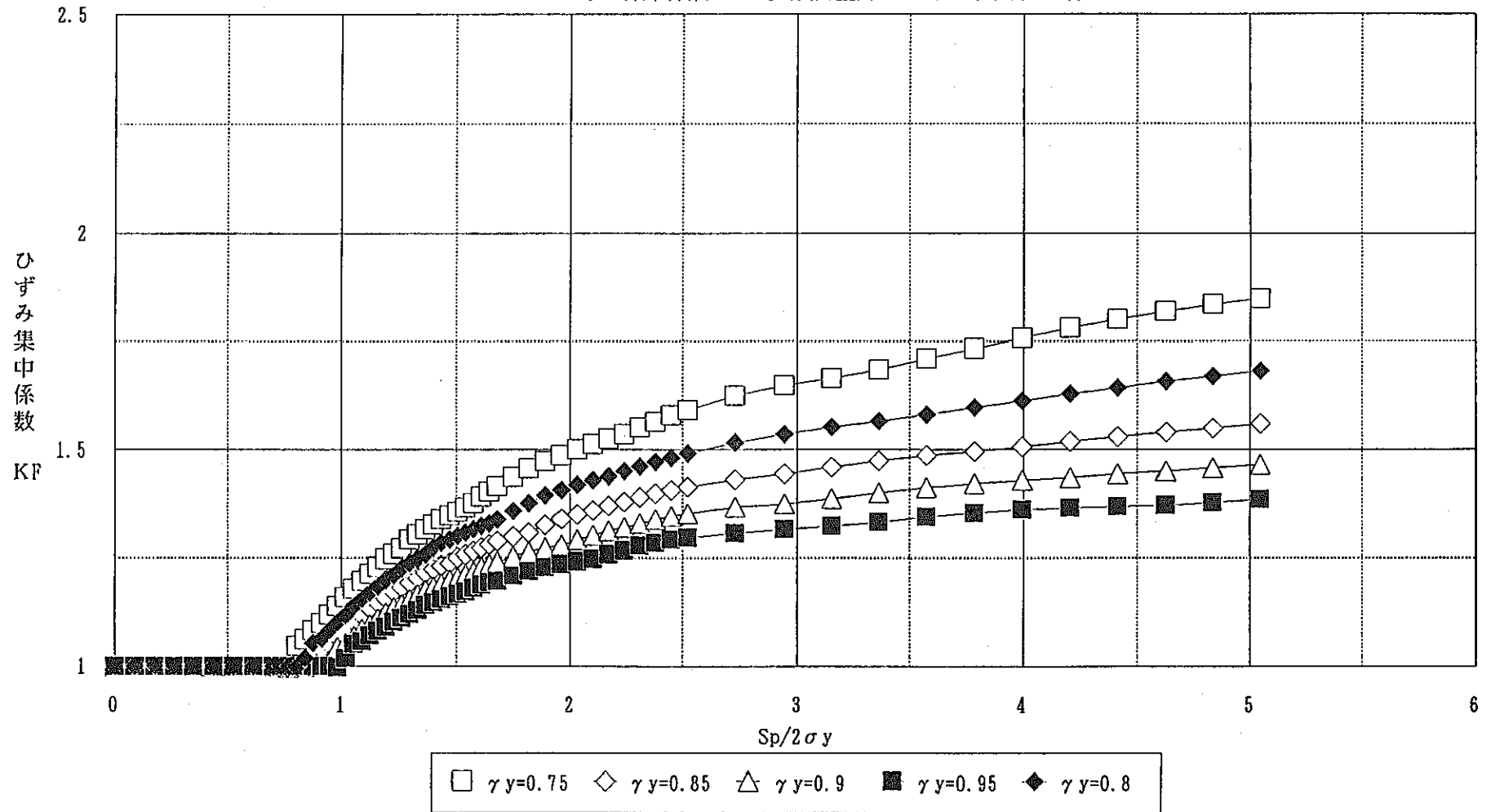


図 4.5.3 ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (全ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)
 Fig. 4.5.3 History of strain concentration factor K_F (All cases, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p/2\sigma_y=5$)

4.6 加工硬化係数の影響

4.6.1 目的

材料特性因子の1つである加工硬化係数について、冶金的構造不連続によるひずみ増大挙動に及ぼす影響を把握する。

4.6.2 方法

3.2節で示した方法により、加工硬化係数 H' をそれぞれ1620.0、2430.0、3240.0（それぞれ縦弾性係数 E の $1/10$ 、 $3/20$ 、 $1/5$ に相当）とした3ケースの弾塑性解析を行う。また、リファレンスモデル（CASE-1-1， $H'=16.2$ ）との比較を行う。

負荷の大きさは、弾性解析による内表面での相当応力範囲と母材の降伏応力の比 $S_p/2\sigma_y$ が5.0となるようにしている。

- 加工硬化係数 $H'=1620.0$ … CASE-5-1
- 加工硬化係数 $H'=2430.0$ … CASE-5-2
- 加工硬化係数 $H'=3240.0$ … CASE-5-3
- 加工硬化係数 $H'=16.2$ … CASE-1-1 A（リファレンス）

弾完全塑性体を想定

4.6.3 結果

(1) 相当ひずみ範囲の軸方向分布

図には、上記3ケースの他にリファレンスケースも同時にプロットしている。

- 相当ひずみ範囲の軸方向分布（内面、全ケース） … 図4.6.1(a)
- 相当ひずみ範囲の軸方向分布（内面、全ケース、境界部拡大） … 図4.6.1(b)

尚、横軸において、負方向が溶金側、正方向が母材側を示す。

これらの図より以下のことがわかる。

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、境界より9mm程度の位置となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、その値は加工硬化係数が小さくなるにつれて増大する傾向を示し、リファレンスケース（ $H'=16.2$ ）で最大

となる。

(2) 相当塑性ひずみコンター図

各ケースの相当塑性ひずみコンター図を以下に示す。プロットした時点は相当ひずみ範囲が最大となる極値 2 時点の 1 つである B 時点である。

尚、本コンター図では、断面内をわかりやすくするために、板厚方向に拡大している。

また、図中のスケールは軸方向 (Z 方向) の距離を表わしている。

○相当塑性ひずみコンター図 ($H' = 1620$ 、 2430 、極値時点 B) … 図 4. 6. 2 (a)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H' = 3240$ 、極値時点 B) … 図 4. 6. 2 (b)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H' = 1620$ 、 2430 、極値時点 B、境界部拡大) … 図 4. 6. 2 (c)

○相当塑性ひずみコンター図 ($H' = 3240$ 、極値時点 B、境界部拡大) … 図 4. 6. 2 (d)

これらの図から以下のことがわかる。

- 各ケース共、相当ひずみ範囲最大部で相当塑性ひずみのピークが生じている。
- 加工硬化係数が大きくなるにつれて、塑性域のピークは小さくなり塑性域の分布はなだらかになる傾向を示す。

(3) ひずみ集中係数 K_F の履歴

以下に各ケースにおける相当ひずみ範囲最大部のひずみ集中係数 K_F の履歴を示す。

縦軸はひずみ集中係数 K_F 、横軸は対応する時点での弾性解析による内表面での相当応力 (膜 + 曲げ + ピーク成分: S_p) の極値時点 A を基準にした増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で除した値を示している。

○ひずみ集中係数 K_F の履歴図 … 図 4. 6. 3

(各ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2\sigma_y = 5$ まで)

この図より以下のことがわかる。

- 各ケース共、弾性追従型のひずみ増大傾向を示す。

- ひずみ増大挙動は、加工硬化係数が小さくなるにつれて増大し、リファレンスケースの場合で最大となる。
- 加工硬化係数を1620以上とれば、 $S_p / 2 \sigma_y = 3$ 付近でひずみ増大挙動は飽和する。

4.6.4 まとめ

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、境界より9 mm程度の位置となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、その値は加工硬化係数が小さくなるにつれて増大する傾向を示し、リファレンスケース ($H' = 16.2$) で最大となる。
- ひずみ増大挙動は、加工硬化係数が小さくなるにつれて増大し、リファレンスケース ($H' = 16.2$) の場合で最大となる。

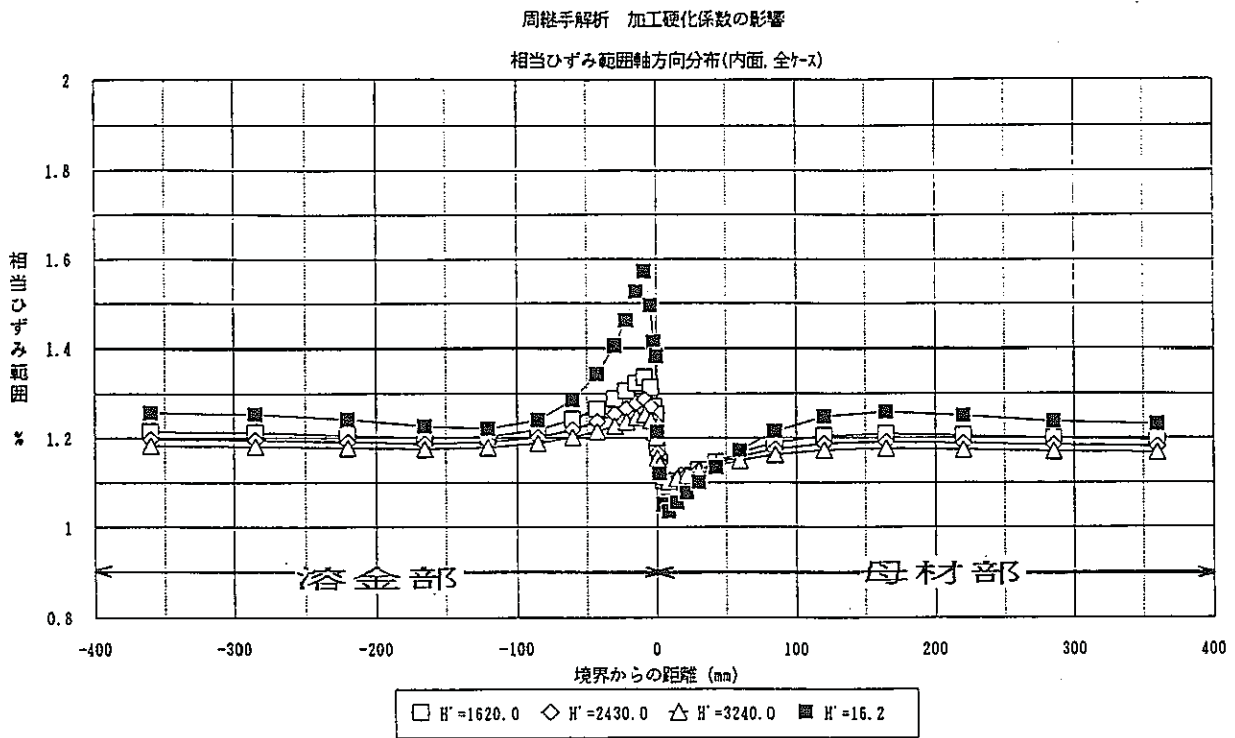


図 4. 6. 1 (a) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース)
Fig. 4. 6. 1 (a) Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases)

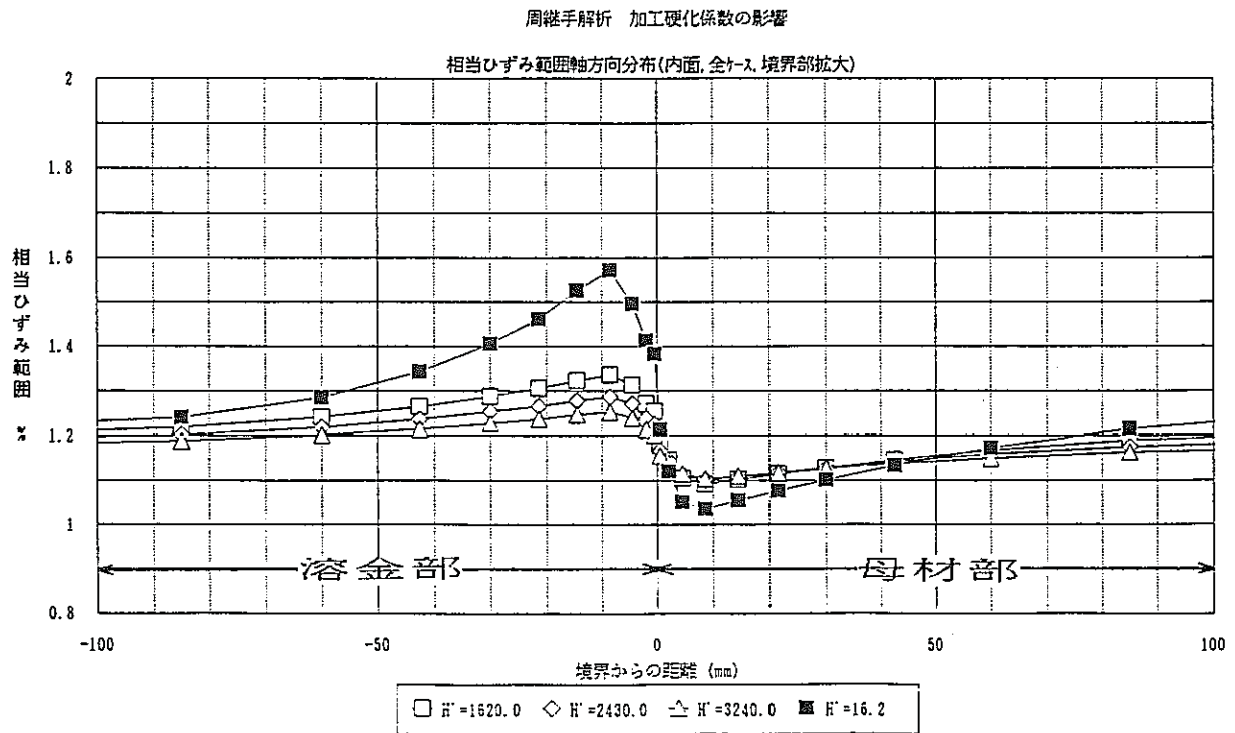
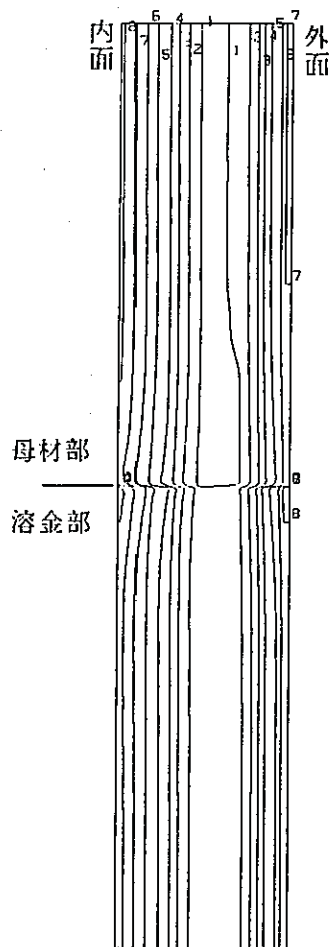


図 4. 6. 1 (b) 相当ひずみ範囲の軸方向分布 (内面、全ケース、境界部拡大)
Fig. 4. 6. 1 (b) Axial distribution of equivalent strain range (inner surface, all cases, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.000-04
- 2 8.000-04
- 3 1.400-03
- 4 2.000-03
- 5 2.600-03
- 6 3.300-03
- 7 3.900-03
- 8 4.500-03
- 9 5.100-03
- 10 5.700-03
- 11 6.300-03
- 12 6.900-03
- 13 7.500-03



$H' = 1620$

STEP NO. 107

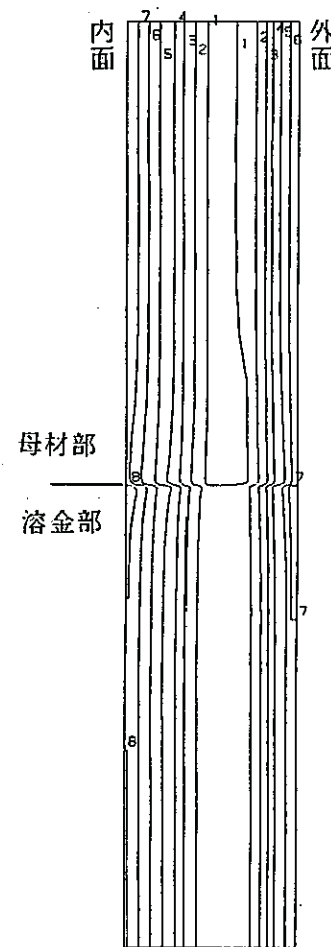
GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-5-1

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.000-04
- 2 8.000-04
- 3 1.400-03
- 4 2.000-03
- 5 2.600-03
- 6 3.300-03
- 7 3.900-03
- 8 4.500-03
- 9 5.100-03
- 10 5.700-03
- 11 6.300-03
- 12 6.900-03
- 13 7.500-03



$H' = 2430$

STEP NO. 107

GEOM. SCALE 100.000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-5-2

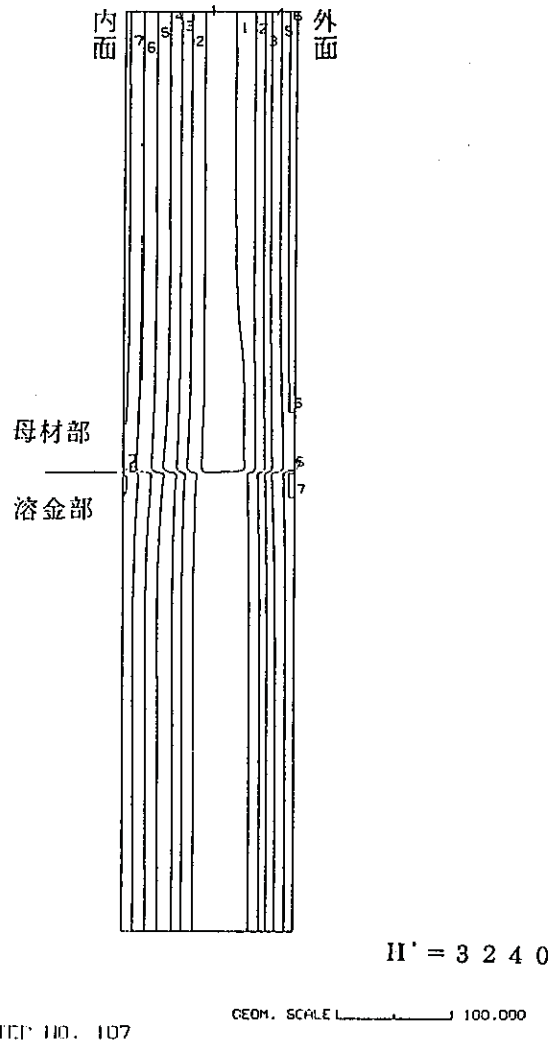
図 4.6.2 (a) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点B、 $H' = 1620.0$ 、 $H' = 2430.0$)

Fig. 4.6.2 (a) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme;B, $H' = 1620.0$, $H' = 2430.0$)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

1	2.000-04
2	8.000-04
3	1.400-03
4	2.000-03
5	2.600-03
6	3.300-03
7	3.900-03
8	4.500-03
9	5.100-03
10	5.700-03
11	6.300-03
12	6.900-03
13	7.500-03



CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-5-3

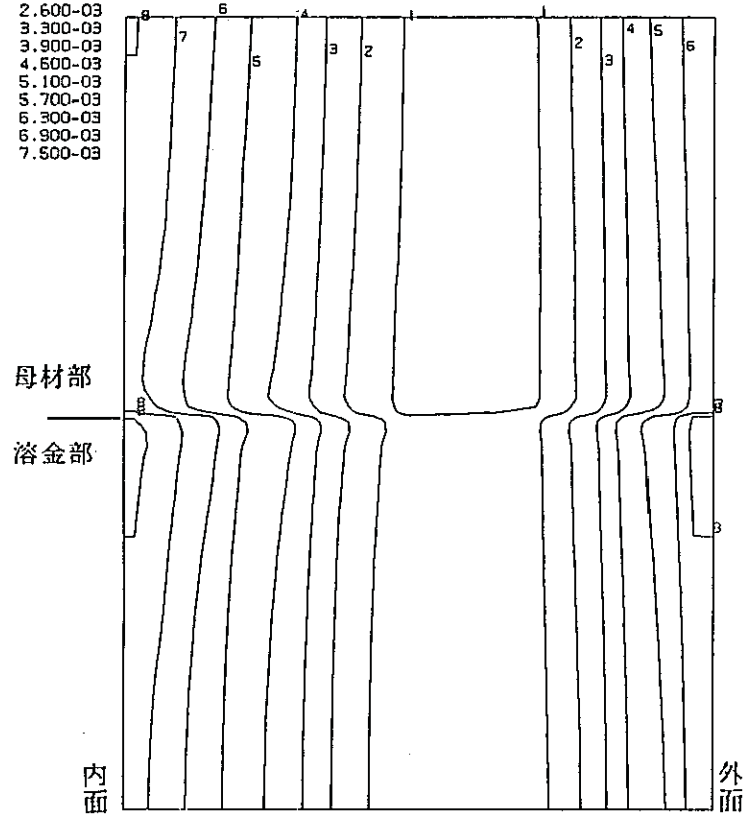
図 4. 6. 2 (b) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点 B、 $H' = 3240.0$)

Fig. 4. 6. 2 (b) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H' = 3240.0$)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.000-04
- 2 8.000-04
- 3 1.400-03
- 4 2.000-03
- 5 2.600-03
- 6 3.300-03
- 7 3.900-03
- 8 4.600-03
- 9 5.100-03
- 10 5.700-03
- 11 6.300-03
- 12 6.900-03
- 13 7.500-03



$H' = 1620$



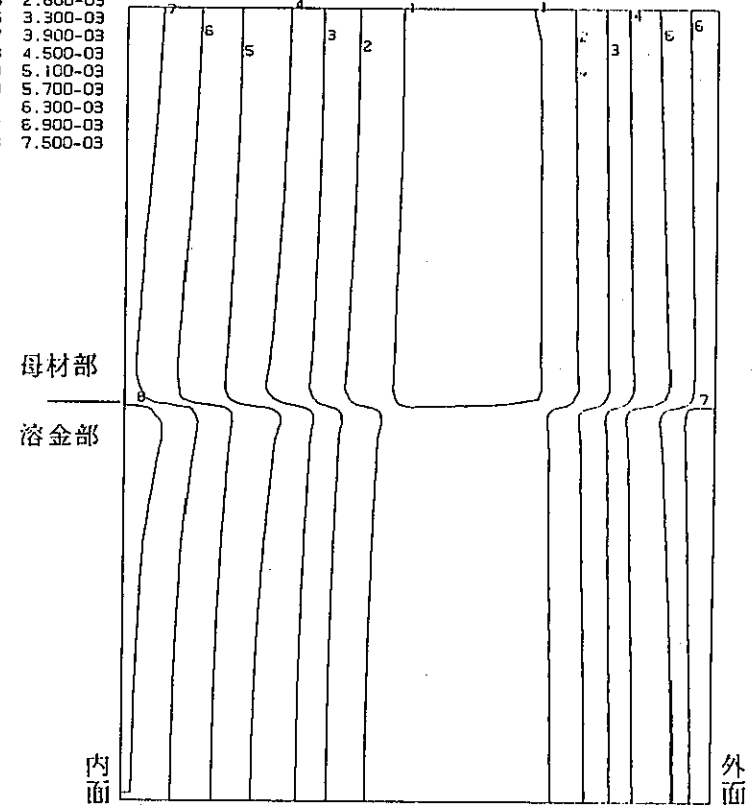
STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.000-04
- 2 8.000-04
- 3 1.400-03
- 4 2.000-03
- 5 2.600-03
- 6 3.300-03
- 7 3.900-03
- 8 4.500-03
- 9 5.100-03
- 10 5.700-03
- 11 6.300-03
- 12 6.900-03
- 13 7.500-03



$H' = 2430$



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-5-1

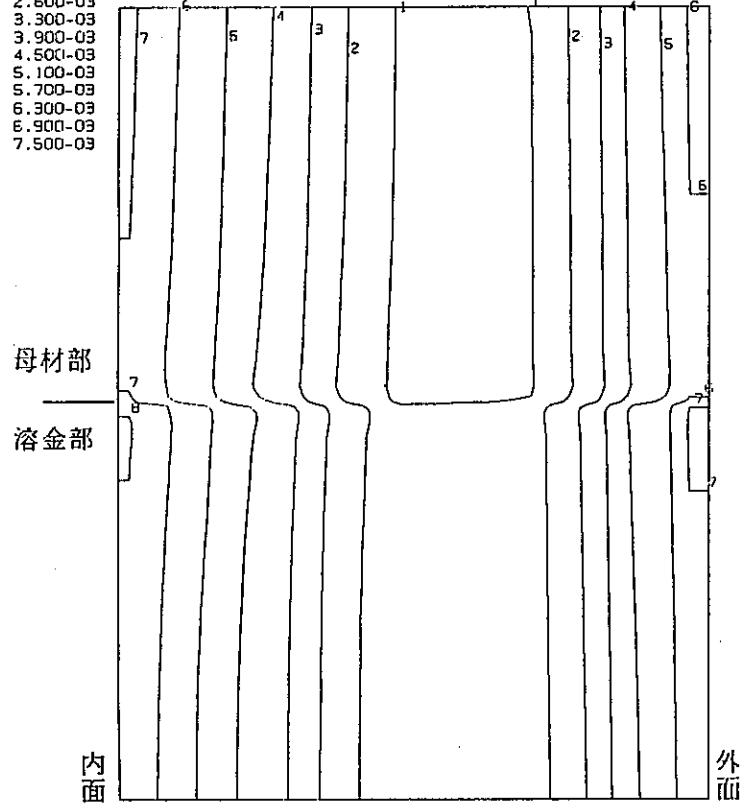
図 4.6.2 (c) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点B、 $H' = 1620.0$ 、 $H' = 2430.0$ 、境界部拡大)

Fig. 4.6.2 (c) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H' = 1620.0$, $H' = 2430.0$, enlargement for the portion of boundary)

FINAS
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

CONTOUR VALUES

- 1 2.000-04
- 2 8.000-04
- 3 1.400-03
- 4 2.000-03
- 5 2.600-03
- 6 3.300-03
- 7 3.900-03
- 8 4.500-03
- 9 5.100-03
- 10 5.700-03
- 11 6.300-03
- 12 6.900-03
- 13 7.500-03



$H' = 3240$



STEP NO. 107

GEOM. SCALE 30.0000

CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINT CASE-E-3

図 4.6.2 (d) 相当塑性ひずみコンター図 (極値時点B、 $H' = 3240.0$ 、境界部拡大)

Fig. 4.6.2 (d) Equivalent plastic strain contour (at the stress extreme; B, $H' = 3240.0$, enlargement for the portion of boundary)

周継手解析 加工硬化係数の影響

ひずみ集中係数 K_F の挙動(内面, 相当ひずみ範囲最大部)

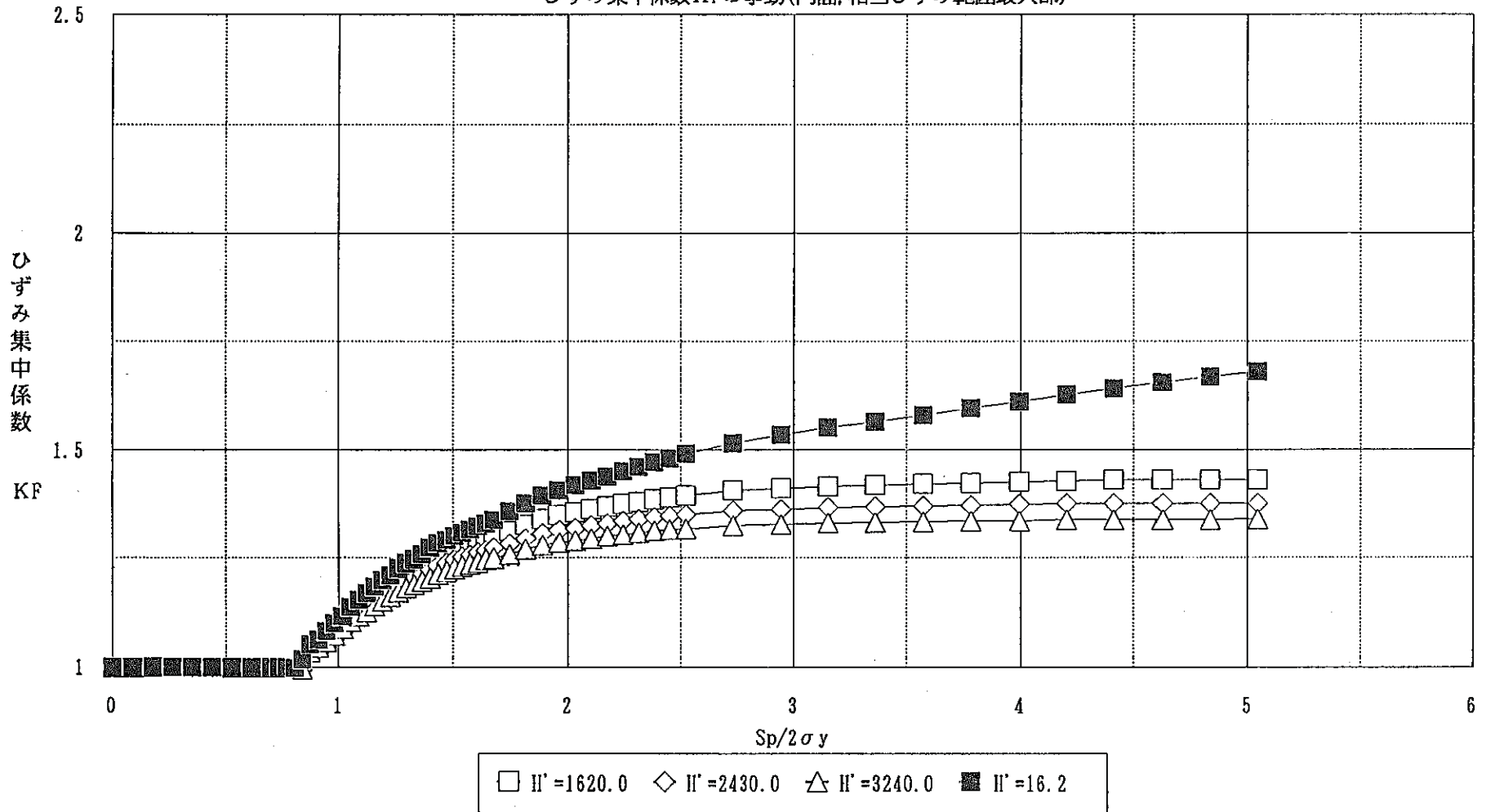


図 4.6.3 ひずみ集中係数 K_F の履歴図 (各ケース、内面、相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ まで)
 Fig. 4.6.3 History of strain concentration factor K_F (each case, inner surface, at the portion of maximum equivalent strain range, until $S_p/2\sigma_y=5$)

4.7 まとめ

冶金的構造不連続を2種材料弾完全塑性体でモデル化した周溶接継手についてリファレンス条件に対する解析及び形状、負荷、材料特性因子についてパラメータ解析を行った。

結果をまとめると以下のようなになる。

(1) リファレンス条件に対する解析 (CASE-1-1)

- 相当ひずみ範囲は溶金部の継手境界近傍の外表面で最大となる。これは、冶金的構造不連続に基づく再配分効果により主に曲げひずみが増大する共に外表面で膜成分と曲げ成分が同符号となるためである。また、相当ひずみ範囲の最大値発生位置の表面では、ピーク成分が殆ど見られず境界接合部における局所変形の影響は充分小さいことがわかる。

(2) 厚さ方向温度分布の影響 (CASE-1-1 ~ CASE-1-4)

- 相当ひずみ範囲の最大値は、 $n = 1 \sim 3$ で溶金部で境界より9 mm程度の位置に生じるが、 $n = 4$ では溶金部で境界より5 mm程度の位置に移行する。また、弾性解析による表面の相当応力値を同じにした場合 $n = 2$ で最大となる。
- 最大値発生位置における相当ひずみ範囲と溶金中央部または母材端部における相当ひずみ範囲の比に着目すると、 $n = 1$ の場合が最大となる。

(3) シェルパラメータの影響 (CASE-2-1 ~ CASE-2-5)

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で $\sqrt{Dt} = 10.0$ の場合、境界より3 mm程度の位置、 $\sqrt{Dt} = 50.0 \sim 500.0$ の場合、境界より9 mm程度の位置となる。
- 弾性解析による表面での相当応力範囲を同一とした場合、 $\sqrt{Dt} = 500.0$ で最大のひずみ増大挙動を示す。また、 \sqrt{Dt} が大きくなるにつれてひずみ増大挙動は増大する傾向を示す。

(4) 継手幅の影響 (CASE-3-1 ~ CASE-3-5)

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、 $H = 3.0 \sim 10.5$ では境界部、 $H = 15.0 \sim 20.0$ では溶金中央部となる。
- 各ケースの相当ひずみ範囲最大値は継手幅が大きくなるにつれて増大する傾向を

示し、 $H = 15.0$ で最大となる。以後、減少する傾向を示す。

これは、以下のような原因が考えられる。

- ◎ 継手幅が小さい場合、継手部の板厚方向ひずみの拘束により軸方向応力成分が増大する結果、軸方向曲げひずみの集中が抑えられる。但し、境界近傍で局部変形によるピークが生じる。
- ◎ 継手幅が大きくなると板厚方向ひずみの拘束効果の及ばない継手中央部にひずみ集中部が移行する。また、継手両側からのひずみ再配分が重畳し、ひずみ集中傾向が強まる。
- ◎ 継手幅がある程度大きくなると、継手両側からの重畳効果が減少するため、ひずみ集中は小さくなる。

(5) 降伏応力比の影響 (CASE-4-1 ~ CASE-4-4)

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、境界より9mm程度の位置となる。また、各ケースの相当ひずみ範囲最大部に着目すると、その値は降伏応力比が小さくなるにつれて増大する傾向を示す。

(6) 加工硬化係数の影響 (CASE-5-1 ~ CASE-5-3)

- 相当ひずみ範囲の最大値発生位置は、各ケース共溶金部で、境界より9mm程度の位置となる。また、各ケースの相当ひずみ範囲最大値は加工硬化係数が小さくなるにつれて増大する傾向を示し、リファレンスケース ($H' = 16.2$) で最大となる。

また、周溶接継手のひずみ集中挙動において各因子が及ぼす影響を定量的に検討する。

ここでは、相当ひずみ範囲最大部のひずみ集中係数 (膜+曲げ+ピーク成分) K_F に着目し、各パラメータとの関係をプロットする。縦軸はひずみ集中係数 K_F 、横軸は、各影響因子のパラメータ値である。尚、 K_F は、 $S_p / 2\sigma_y \approx 5$ の時点の値とした。

以下に図表を示す。

- 各影響因子に対するひずみ集中係数 K_F の挙動(1) … 表4.7(a)
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2\sigma_y \approx 5$ 時点)
- 各影響因子に対するひずみ集中係数 K_F の挙動(2) … 表4.7(b)
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_p / 2\sigma_y \approx 5$ 時点)
- 厚さ方向温度分布 (n) - ひずみ集中係数 K_F プロット図 … 図4.7.1

○シェルパラメータ (\sqrt{Dt})	-ひずみ集中係数 K_F プロット図	…	図 4.7.2
○継手幅 (H/t)	-ひずみ集中係数 K_F プロット図	…	図 4.7.3
○降伏応力比 (r_y)	-ひずみ集中係数 K_F プロット図	…	図 4.7.4
○加工硬化係数 (H')	-ひずみ集中係数 K_F プロット図	…	図 4.7.5

これらの図表より以下のことがわかる。

- 厚さ方向温度勾配に着目すると、そのひずみ集中係数 K_F の変動は他の因子の場合に較べ小さく、リファレンスとの差は10%以下である。
- シェルパラメータでは、 $\sqrt{Dt}=50$ より増加の割合が大きくなるが、リファレンスとの差は10%程度ある。
- 変動の度合いが最も大きくなるのは、継手幅によるものであり、リファレンスに対し最大70%程度大きくなる。
- 降伏応力比が小さくなるほど増加する傾向が大きくなる。 $r_y=0.75$ とリファレンスとの差は10%程度となる。
- 加工硬化係数では、 $H'=1620$ より減少の割合が大きくなる。 $H'=E/5$ でリファレンスに対し20%程度小さくなる。
- 全影響因子の中で変動の度合いが最も大きくなるのは、継手幅によるものである。

表 4.7 (a) 各影響因子に対するひずみ集中係数 K_F の挙動(1)
 (相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ 時点)

Table 4.7 (a) Strain concentration factor K_F on parameters (1)
 (at the portion of maximum equivalent strain range,
 at $S_p/2\sigma_y=5$)

影響因子	パラメータ値	ひずみ集中係数 K_F	相当ひずみ範囲最大部
厚さ方向温度分布 (n)	1	1.684	溶金部、境界より9mm
	2	1.71	
	3	1.632	
	4	1.568	溶金部、境界より3mm
シェルパラメータ (\sqrt{Dt})	10.0	1.505	溶金部、境界より3mm
	50.0	1.558	溶金部、境界より9mm
	100.0	1.632	
	173.2	1.684	
	500.0	1.74	
継手幅 (H/t)	0.2	1.692	溶金部境界付近
	0.4	2.109	
	0.7	2.635	
	1.0	2.808	溶金中央部
	1.33	2.677	
	53.33	1.684	溶金部、境界より9mm

表内太枠はリファレンスケース

表 4.7 (b) 各影響因子に対するひずみ集中係数 K_F の挙動(2)
 (相当ひずみ範囲最大部、 $S_p/2\sigma_y=5$ 時点)

Table 4.7 (b) Strain concentration factor K_F on parameters (2)
 (at the portion of maximum equivalent strain range,
 at $S_p/2\sigma_y=5$)

影響因子	パラメータ値	ひずみ集中係数 K_F	相当ひずみ範囲最大部
降伏応力比 (γ_y)	0.75	1.849	溶金部、境界より9mm
	0.8	1.684	
	0.85	1.559	
	0.9	1.466	
	0.95	1.385	
加工硬化係数 (H')	16.2	1.684	溶金部、境界より9mm
	1620.0	1.43	
	2430.0	1.377	
	3240.0	1.34	

表内太枠はリファレンスケース

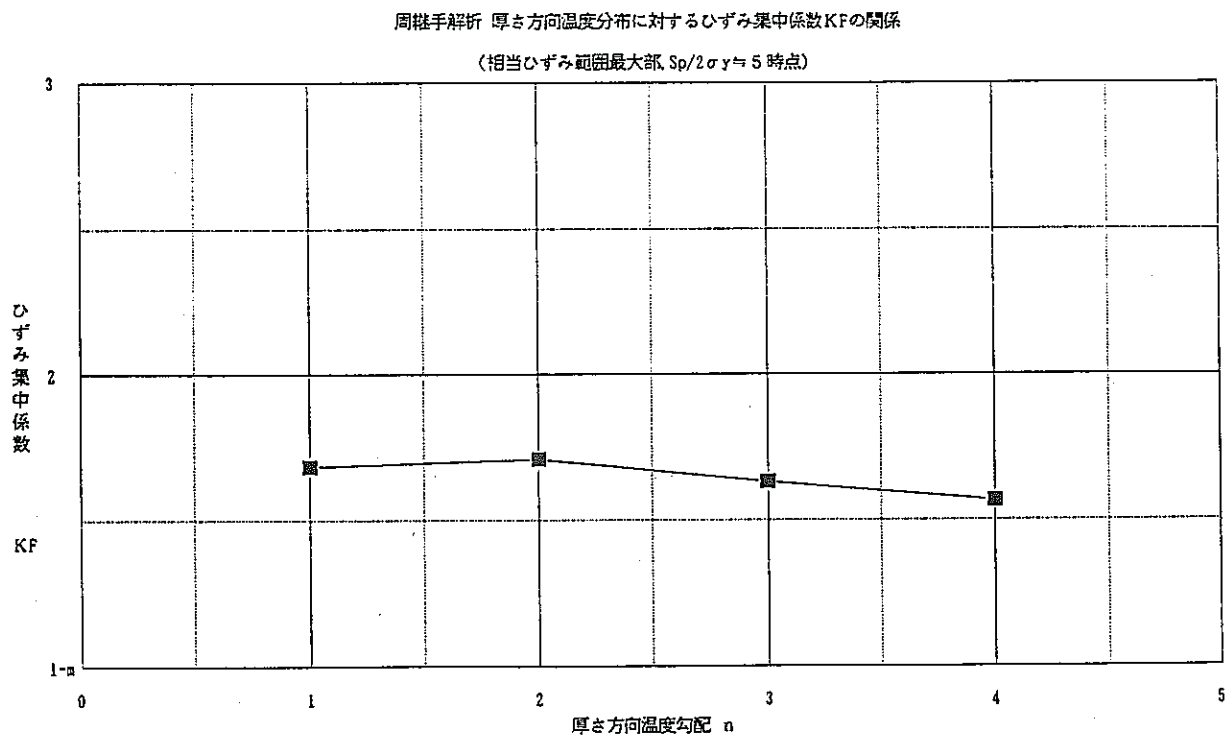


図 4.7.1 厚さ方向温度分布 (n) - ひずみ集中係数 K_F プロット図
 Fig. 4.7.1 Temperature distribution of through the wall thickness (n)
 - strain concentration Factor K_F

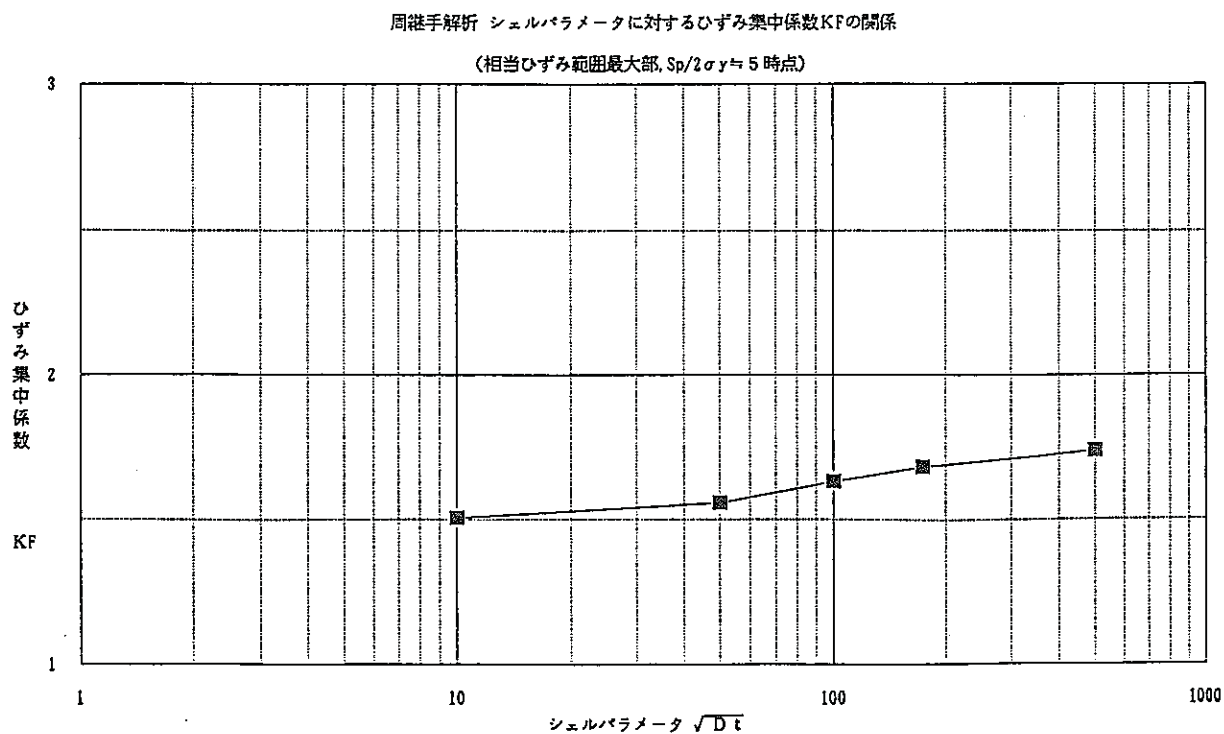


図 4.7.2 シェルパラメータ (\sqrt{Dt}) - ひずみ集中係数 K_F プロット図
 Fig. 4.7.2 Shell parameter (\sqrt{Dt}) - strain concentration factor K_F

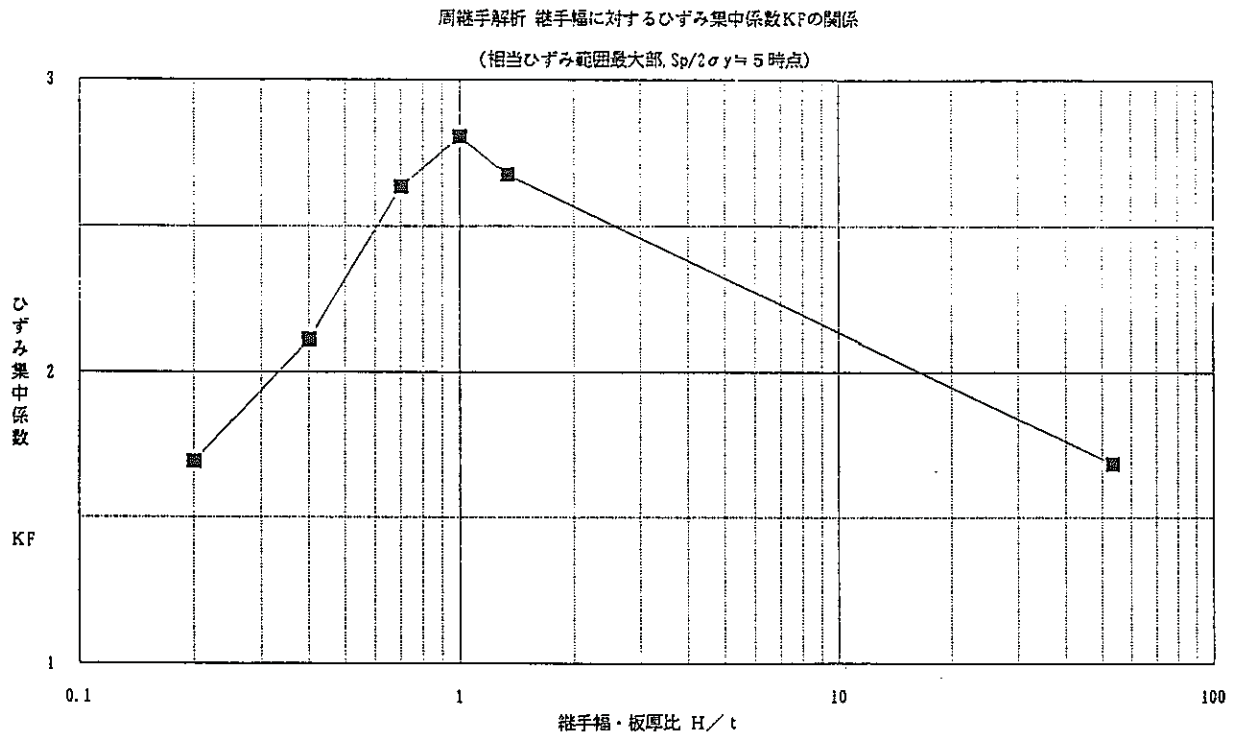


図 4.7.3 継手幅／板厚比 (H/t) - ひずみ集中係数 K_F プロット図
Fig. 4.7.3 Ratio of the joint width to the wall thickness (H/t) - strain concentration factor K_F

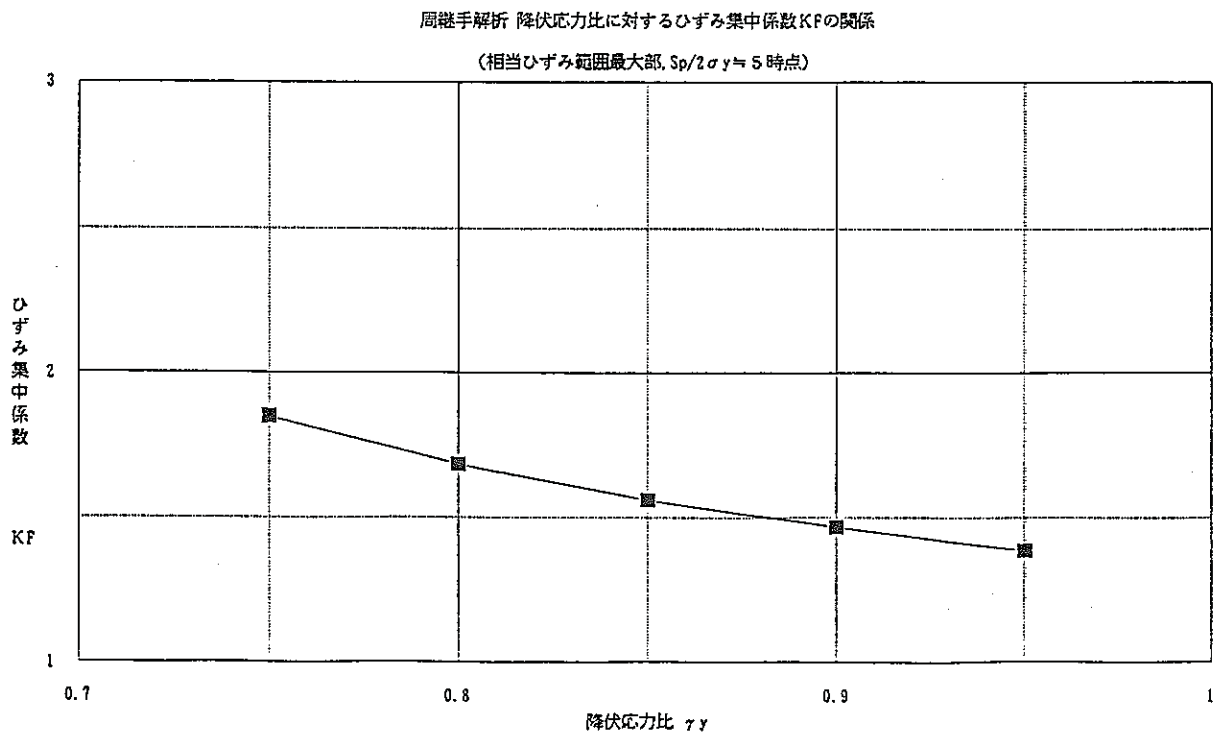


図 4.7.4 降伏応力比 (γ_y) - ひずみ集中係数 K_F プロット図
Fig. 4.7.4 Yield stress ratio (γ_y) of weld metal to base metal - strain concentration factor K_F

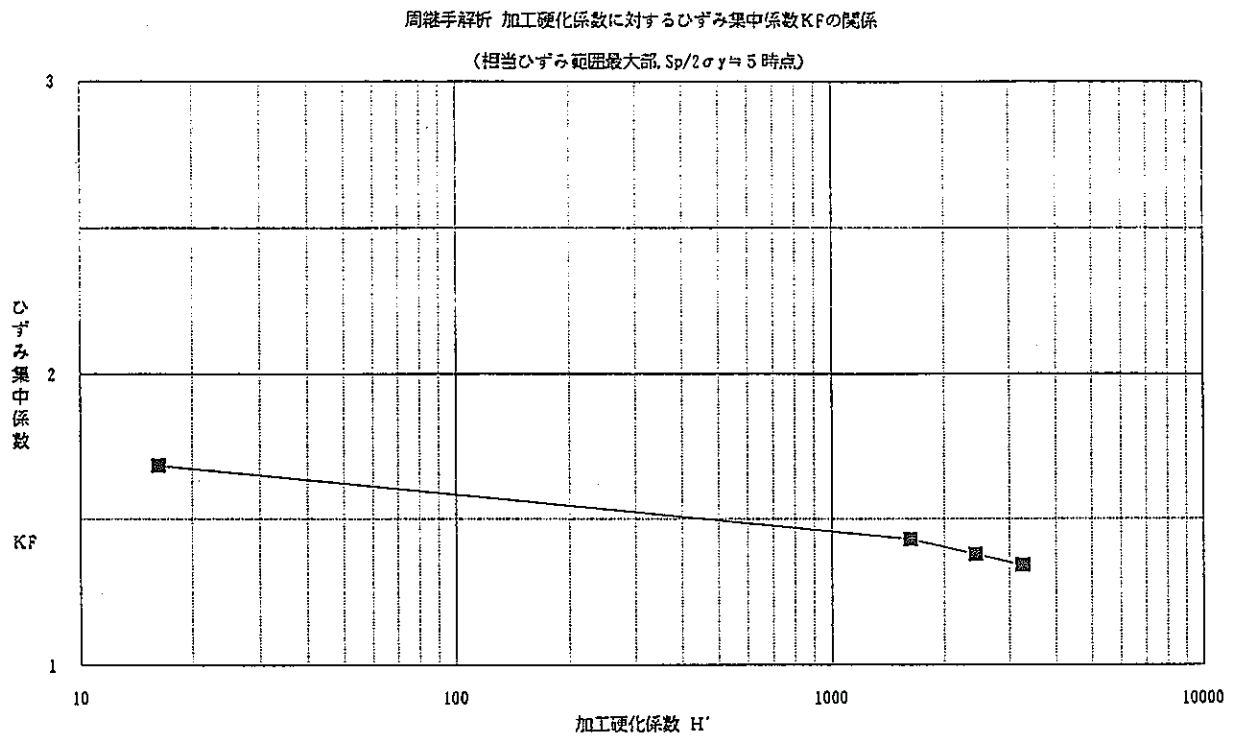


図 4.7.5 加工硬化係数 (H') - ひずみ集中係数 K_F プロット図
 Fig. 4.7.5 work hardening coefficient (H') - strain concentration factor K_F

5. 冶金的構造不連続効果に対するひずみ範囲算出式の検討

5.1 目 的

周溶接継手の厚さ方向温度分布による熱応力に対するひずみ集中挙動は、表面でのポアソン比効果、厚さ内応力再配分効果、冶金的構造不連続効果の乗算により評価出来ると考える。均一材料を仮定した円筒のパラメータ解析によりポアソン比効果及び厚さ内応力再配分効果については、算出式が提案されている⁽⁷⁾。

ここでは、冶金的構造不連続効果について、そのひずみ範囲算出式を提案しパラメータ解析結果を用いて、各因子の冶金的構造不連続効果への影響度を定量化する。

5.2 方 法

まず、周溶接継手におけるひずみ範囲算出式の考え方を述べる。

(1) 均一材料（母材）の平滑円筒におけるひずみ範囲算出式

冶金的構造不連続を考慮しない均一材料の平滑円筒における厚さ方向温度分布による熱応力に対するひずみ集中挙動について、設計に用いるひずみ範囲算出式の既に得られている知見を以下に示す。

ここでは、等2軸平面応力状態を考え、弾塑性応力ひずみ特性モデルとして弾完全塑性体を仮定している。

算出式で用いられるひずみ集中係数は、ポアソン比効果を表わす弾性追従パラメータ q_ν と厚さ内応力再配分効果を表わす弾性追従パラメータ q_{DT} を用いて表わすことが出来る。

$$K_T = \epsilon_t / \epsilon_F = K_\nu \times K_{DT} \dots\dots\dots (5.1)$$

K_T : 平滑円筒における厚さ方向温度分布によるひずみ集中係数

ϵ_t : 非弾性解析による相当ひずみ範囲

ϵ_F : 弾性解析による相当ひずみ範囲

K_ν : ポアソン比効果によるひずみ集中係数

$$K_\nu = 1 + (q_\nu - 1) \times (1 - 2\sigma_y / S_p) \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

q_ν : ポアソン比効果による弾性追従パラメータ

等 2 軸平面応力状態で $q_\nu = 2 \times (1 - \nu) \dots \dots (5.3)$

σ_y : 降伏応力

S_p : 弾性解析によるピーク応力強さ範囲

K_{DT} : 応力再配分効果によるひずみ集中係数

$K_{DT} = 1 + (q_{DT} - 1) \times (1 - 2\sigma_y / S_p) \dots \dots (5.4)$

ここで、

q_{DT} : 応力再配分効果による弾性追従パラメータ

σ_y : 降伏応力

S_p : 弾性解析によるピーク応力強さ範囲

(2) 平滑周溶接継手のひずみ範囲算出式

平滑周溶接継手では、上記均一材料としてのひずみ集中挙動に溶金・母材の冶金的構造不連続効果によるひずみ再配分が重畳する。以下にその算出式を示す。

ここでも平滑円筒と同様に等 2 軸平面応力状態を考え、弾塑性応力ひずみ特性モデルとして弾完全塑性体を仮定している。

$K_T = \epsilon_{tw} / \epsilon_F = K_\nu \times K_{DT} \times K_W \dots \dots (5.5)$

K_T : 平滑周溶接継手における厚さ方向温度分布によるひずみ集中係数

ϵ_{tw} : 非弾性解析における溶接継手部の相当ひずみ範囲

ϵ_F : 弾性解析による相当ひずみ範囲

K_ν : 平滑周溶接継手におけるポアソン比効果によるひずみ集中係数

$K_\nu = 1 + (q_\nu - 1) \times (1 - \gamma_y \times 2\sigma_y / S_p) \dots \dots (5.6)$

ここで、

q_ν : ポアソン比効果による弾性追従パラメータ

等 2 軸平面応力状態で $q_\nu = 2 \times (1 - \nu) \dots \dots (5.7)$

σ_y : 母材の降伏応力

S_p : 弾性解析によるピーク応力強さ範囲

γ_y : 降伏応力比

K_{DT} : 平滑周溶接継手における応力再配分効果によるひずみ集中係数

$$K_{DT} = 1 + (q_{DT} - 1) \times (1 - \gamma_y \times 2 \sigma_y / S_p) \dots\dots (5.8)$$

ここで、

q_{DT} : 応力再配分効果による弾性追従パラメータ

σ_y : 母材の降伏応力

S_p : 弾性解析によるピーク応力強さ範囲

γ_y : 降伏応力比

K_w : 平滑周溶接継手における冶金的構造不連続効果によるひずみ集中係数

$$K_w = \epsilon_{tw} / \epsilon_{tw0} = 1 + (f_w \times q_w - 1) \times (1 - \gamma_y \times 2 \sigma_y / S_n) \dots\dots (5.9)$$

ここで、

ϵ_{tw} : 非弾性解析における溶接継手部の相当ひずみ範囲

ϵ_{tw0} : 非弾性解析における均一材料（溶接金属）の相当ひずみ範囲

$$\epsilon_{tw0} = K_v \times K_{DT} \times \epsilon_F \dots\dots (5.10)$$

f_w : 冶金的構造不連続効果に係る効果係数

$$f_w = f_n \times f_s \times f_l \times f_r \times f_H \dots\dots (5.11)$$

f_n : 厚さ方向温度分布の効果係数

f_s : シェルパラメータの効果係数

f_l : 継手幅の効果係数

f_r : 降伏応力比の効果係数

f_H : 加工硬化の硬化係数

q_w : 冶金的構造不連続効果による弾性追従パラメータ

ここでは、リファレンス条件に対する値とする。

σ_y : 母材の降伏応力

S_n : 弾性解析における膜+曲げ応力強さ範囲

γ_y : 降伏応力比

本算出式の特徴を以下に示す。

- ① 応力の大きさを表わす値として S_n （膜+曲げ応力強さ範囲）を用いている。
- ② 冶金的構造不連続効果によるひずみ集中係数を表わす式（5.9式）において各影

響因子の効果は重畳すると考え乗算型としている。

- ③ 均一材料の平滑円筒に対し、平滑周溶接継手では溶金、母材から成る2種材料弾完全塑性体モデルとして考えており、最大ひずみ範囲が溶接部に生ずることから、各ひずみ集中係数を表わす式におけるシェークダウン基準値 ($2\sigma_y$) に溶金と母材の降伏応力比 r_y が乗じられる。

(3) 効果係数の定量化

本検討では、上記提案した冶金的構造不連続効果によるひずみ範囲算出式を基にパラメータ解析により得られた結果を用いて各影響因子の効果係数を求め、冶金的構造不連続効果を表わすひずみ範囲算出式の傾向を把握する。

以下にその方法を示す。

- ① リファレンスケースにおける K_w を算出する。ここでは、冶金的構造不連続による効果を抽出するため分母として均一材料（溶金）の非弾性解析による相当ひずみ範囲を用いる。

$$K_w = \epsilon_{tw} / \epsilon_{tw0} \dots\dots\dots (5.12)$$

ここで、

ϵ_{tw} : リファレンスケースの非弾性解析での溶金相当ひずみ範囲最大部の相当ひずみ範囲

ϵ_{tw0} : 均一材料とした場合の非弾性解析による相当ひずみ範囲
(リファレンスケースの非弾性解析での溶金中央部の相当ひずみ範囲)

- ② ①で算出された K_w と (5.9) 式よりリファレンスケースの q_{w0} を算出する。

q_{w0} を定める条件については検討の余地があるが継手幅 ∞ 、降伏応力比0.8、温度分布 $n=1$ のリファレンス条件は概ね基本条件として妥当と考えられる。

ここで、(5.9) 式より、 $f_w=1.0$ として

$$q_{w0} = \{ (K_w - r_y \times 2\sigma_y / S_n) / (1 - r_y \times 2\sigma_y / S_n) \} \dots\dots\dots (5.13)$$

- ③ 各影響因子に対し、①、②の手順により同様に q_w 値を算出する。

但し、①の K_w の算出において、 ϵ_{tw} 及び ϵ_{tw0} は以下の様になる。

ϵ_{tw} : 各影響因子の非弾性解析での溶金相当ひずみ範囲最大部の相当ひずみ範囲

ϵ_{tw0} : 均一材料とした場合の非弾性解析による相当ひずみ範囲
 (各影響因子の非弾性解析での溶金中央部の相当ひずみ範囲。但し、継手幅を小さくしたケースについては継手幅 ∞ のリファレンスケースの結果を用いる。)

④ リファレンスケースの q_{w0} 値と各影響因子の q_w 値の比を算出する。

$$f_w = q_w / q_{w0} \dots\dots\dots (5.14)$$

⑤ 縦軸に④で求めた f_w 、横軸に各影響因子のパラメータをとりリファレンスケースに対する効果係数の線図を作成する。

次節においてその算出結果について述べる。

5.3 結 果

5.3.1 冶金的構造不連続効果によるひずみ集 PNC TN9410 91-026

5.2節①の方法により冶金的構造不連続効果によるひずみ集中係数 K_w の履歴を示す。

縦軸はひずみ集中係数 K_w 、横軸は対応する時点での弾性解析による内表面での膜+曲げ応力強さ範囲 (S_n) の極値時点 A を基準とした増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で除した値である。

尚、プロット図中の最初のピークは、計算プログラムの数値計算誤差がプロットされたものである。

○厚さ方向温度分布パラメータ解析における $S_n / 2\sigma_y - K_w$ プロット図
… 図 5.3.1.1

○シェルパラメータ解析における $S_n / 2\sigma_y - K_w$ プロット図
… 図 5.3.1.2

○継手幅パラメータ解析における $S_n / 2\sigma_y - K_w$ プロット図 … 図 5.3.1.3

○降伏応力比パラメータ解析における $S_n / 2\sigma_y - K_w$ プロット図
… 図 5.3.1.4

○加工硬化係数パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y-K_w$ プロット図

… 図 5.3.1.5

これらの図より以下のことがわかる。

- 厚さ方向温度分布の影響では、ひずみ集中係数 K_w が最大の挙動を示すのが $n = 1$ の場合であり、以下 $n = 2, 3, 4$ の順で小さくなる。また、 $n = 4$ の場合、初期に増大するが、その後値が収束する傾向を示す。
- シェルパラメータの影響では、 $\sqrt{Dt} = 500$ の場合で K_w が最大となり、 \sqrt{Dt} の減少と共に小さくなる。また、 $\sqrt{Dt} = 10$ の場合、初期にひずみ集中係数 K_w が増大するがある応力時点より減少する傾向を示す。
- 継手幅の影響の場合では、継手幅 $H = 15\text{mm}$ ($H/t = 1$) の場合で K_w が最大の挙動を示す。また、継手幅 $H = 3\text{mm}$ ($H/t = 0.2$) の場合、ある応力時点より値が収束する傾向を示す。
- 降伏応力比の影響では、降伏応力比 $r_y = 0.75$ の場合で K_w が最大の挙動を示し、降伏応力比が大きくなるにつれて挙動は鈍化する傾向を示す。
- 加工硬化係数の影響では、弾完全塑性体を想定した加工硬化係数 $H' = 16.2$ (リファレンスケース) の場合で K_w は最大の挙動を示す。また、他のケースではある応力時点より K_w が減少する傾向が見られる。

5.3.2 リファレンスケースに対する各影響因子の効果係数

5.2 節③の方法により冶金的構造不連続効果を表わす弾性追従パラメータ q_w について各影響因子のリファレンスケースに対する効果係数 f_w を示す。

プロット図では、縦軸は効果係数、横軸は各影響因子のパラメータ値である。

また、プロットした応力時点は、各影響因子共 $S_n/2\sigma_y = 5$ としている。

○各影響因子のリファレンスケースに対する効果係数 … 表 5.3.2.1

(a)、(b)

○厚さ方向温度分布パラメータ解析における n - 効果係数プロット図

… 図 5.3.2.1

○シェルパラメータパラメータ解析における \sqrt{Dt} - 効果係数プロット図

… 図 5.3.2.2

- 継手幅パラメータ解析における継手幅・板厚比-効果係数プロット図
… 図 5.3.2.3
- 降伏応力比パラメータ解析における r_y -効果係数プロット図 … 図 5.3.2.4
- 加工硬化係数パラメータ解析における H' -効果係数プロット図
… 図 5.3.2.5

これらの図より以下のことがわかる。

- 厚さ方向温度分布による影響では、その効果係数 f_w の変動範囲は約 0.81~1.0 となる。
- シェルパラメータによる影響では、その効果係数 f_w の変動範囲は約 0.88~1.04 となる。
- 継手幅による影響では、その効果係数 f_w の変動範囲は約 1.0~1.77 となる。
- 降伏応力比による影響では、その効果係数 f_w の変動範囲は約 0.81~1.1 となる。
- 加工硬化係数による影響では、その効果係数 f_w の変動範囲は約 0.82~1.0 となる。

表 5.3.2.1(a) 各影響因子のリファレンスケースに対する効果係数(1)
 Table 5.3.2.1(a) Multiplication coefficient of influence factors to reference model (1)

影響因子	パラメータ値	パラメータの ($f_w \times q_w$) 値	リファレンスに対する効果係数 f_w
厚さ方向 温度分布 (n)	1	1.298	1.0
	2	1.187	0.915
	3	1.112	0.857
	4	1.059	0.816
シェルパラメータ (Dt)	10.0	1.147	0.885
	50.0	1.172	0.904
	100.0	1.251	0.965
	173.2	1.297	1.0
	500.0	1.351	1.042
継手幅 (H/t)	0.2	1.305	1.006
	0.4	1.658	1.278
	0.7	2.138	1.649
	1.0	2.308	1.774
	1.33	2.184	1.685
	53.33	1.297	1.0

網掛け部：リファレンスケース

表 5.3.2.1 (b) 各影響因子のリファレンスケースに対する効果係数(2)
 Table 5.3.2.1 (b) Multiplication coefficient of influence factors to reference model (2)

影響因子	パラメータ値	パラメータの ($f_w \times q_w$) 値	リファレンスに対する効果係数 f_w
降伏応力比 (γ_y)	0.75	1.430	1.103
	0.8	1.297	1.10
	0.85	1.197	0.923
	0.9	1.122	0.865
	0.95	1.055	0.813
加工硬化係数 (H'/E)	0.001	1.297	1.10
	0.1	1.118	0.862
	0.15	1.087	0.839
	0.2	1.069	0.825

網掛け部：リファレンスケース

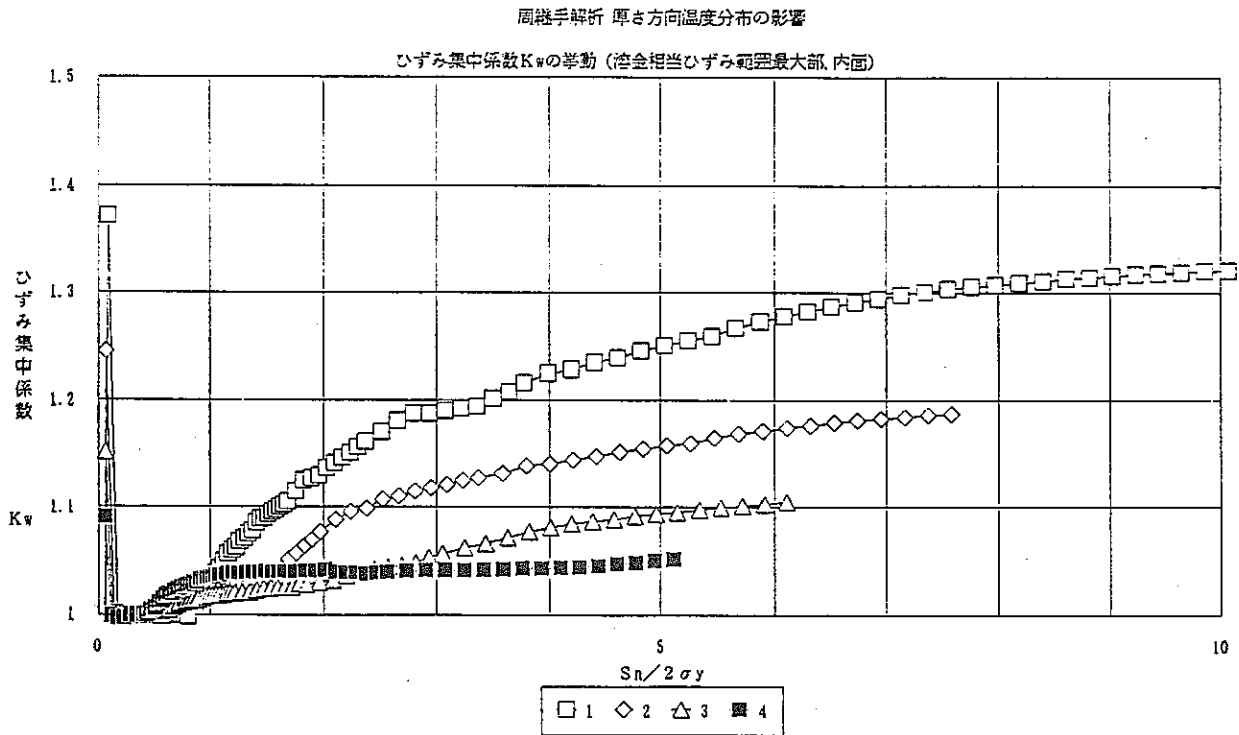


図 5.3.1.1 厚さ方向温度分布パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y - K_w$ プロット図
Fig. 5.3.1.1 $S_n/2\sigma_y -$ Strain concentration factor K_w in paratertic analysis of temperature distribution of through the wall thickness

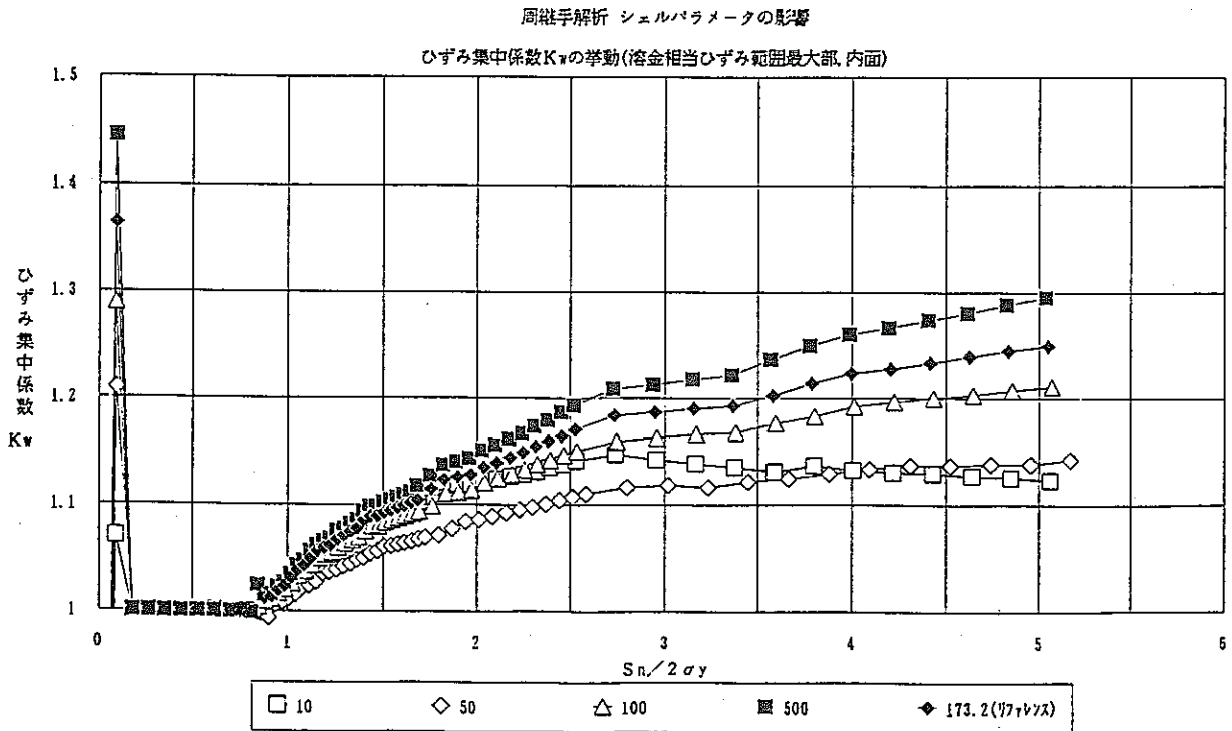


図 5.3.1.2 シェルパラメータパラメータ解析における $S_n/2\sigma_y - K_w$ プロット図
Fig. 5.3.1.2 $S_n/2\sigma_y -$ Strain concentration factor K_w in paratertic analysis of shell parameter

周継手解析 継手幅の影響

ひずみ集中係数 K_w の挙動(溶金相当ひずみ範囲最大部, 内面)

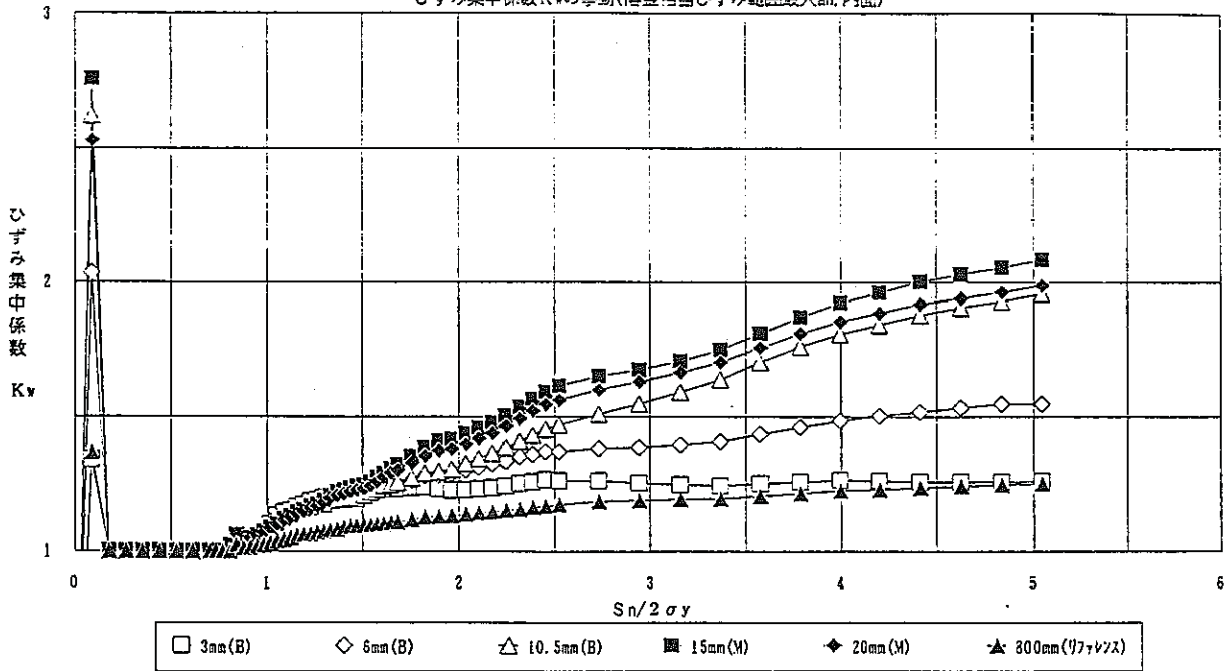


図 5.3.1.3 継手幅パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y - K_w$ プロット図
 Fig. 5.3.1.3 $S_n/2\sigma_y -$ Strain concentration factor K_w in paratertic analysis of joint width

周継手解析 降伏応力比の影響

ひずみ集中係数 K_w の挙動(溶金相当ひずみ範囲最大部, 内面)

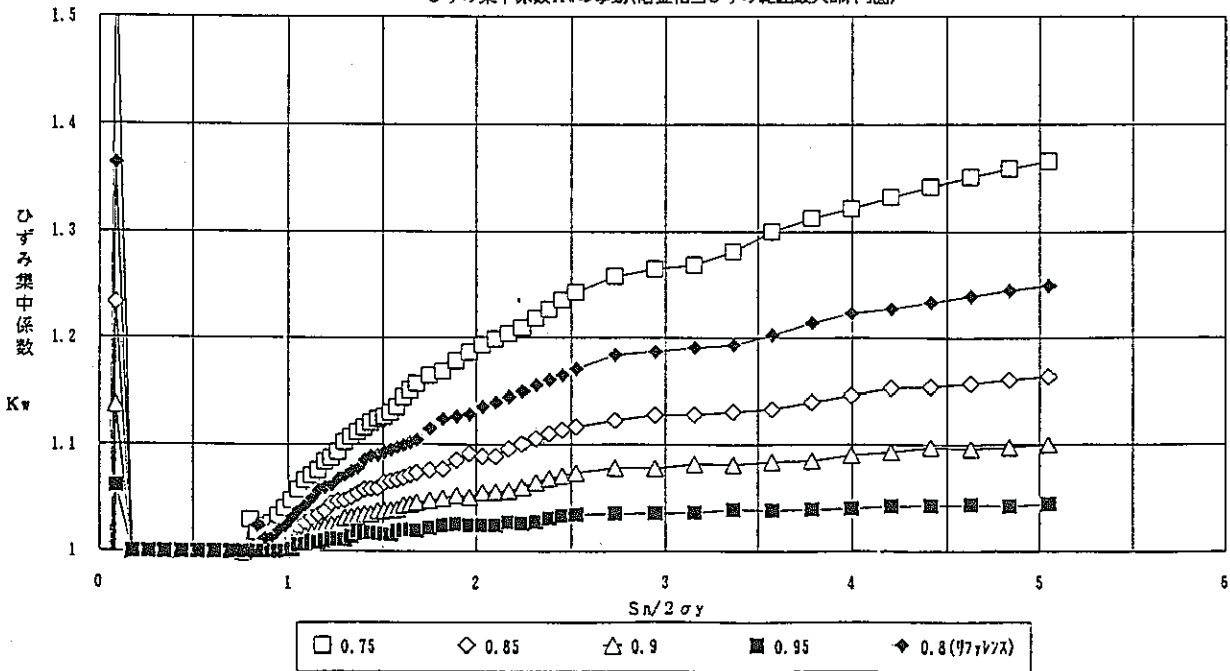


図 5.3.1.4 降伏応力比パラメータ解析における $S_n/2\sigma_y - K_w$ プロット図
 Fig. 5.3.1.4 $S_n/2\sigma_y -$ Strain concentration factor K_w in paratertic analysis of yield stress ratio of weld metal to base metal

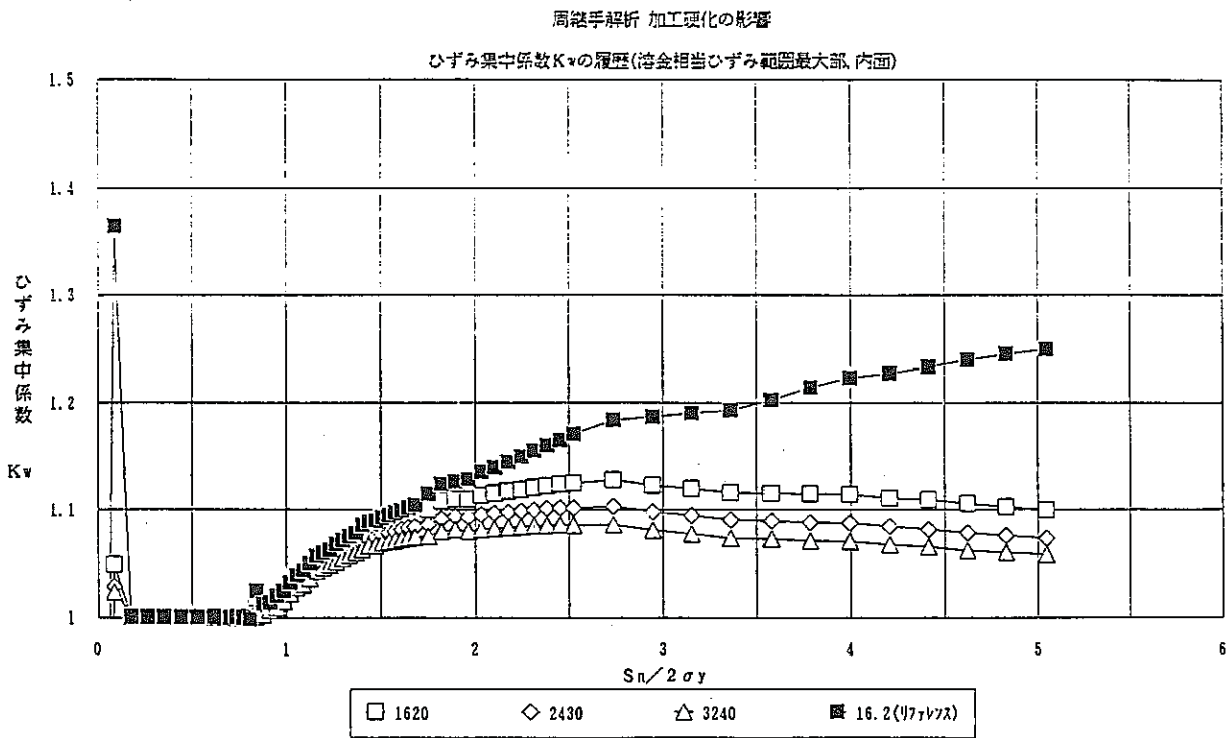


図 5.3.1.5 加工効果係数パラメータ解析における $S_n / 2\sigma_y - K_w$ プロット図
 Fig. 5.3.1.3 $S_n / 2\sigma_y -$ Strain concentration factor K_w in paratertic analysis of work hardening coefficient

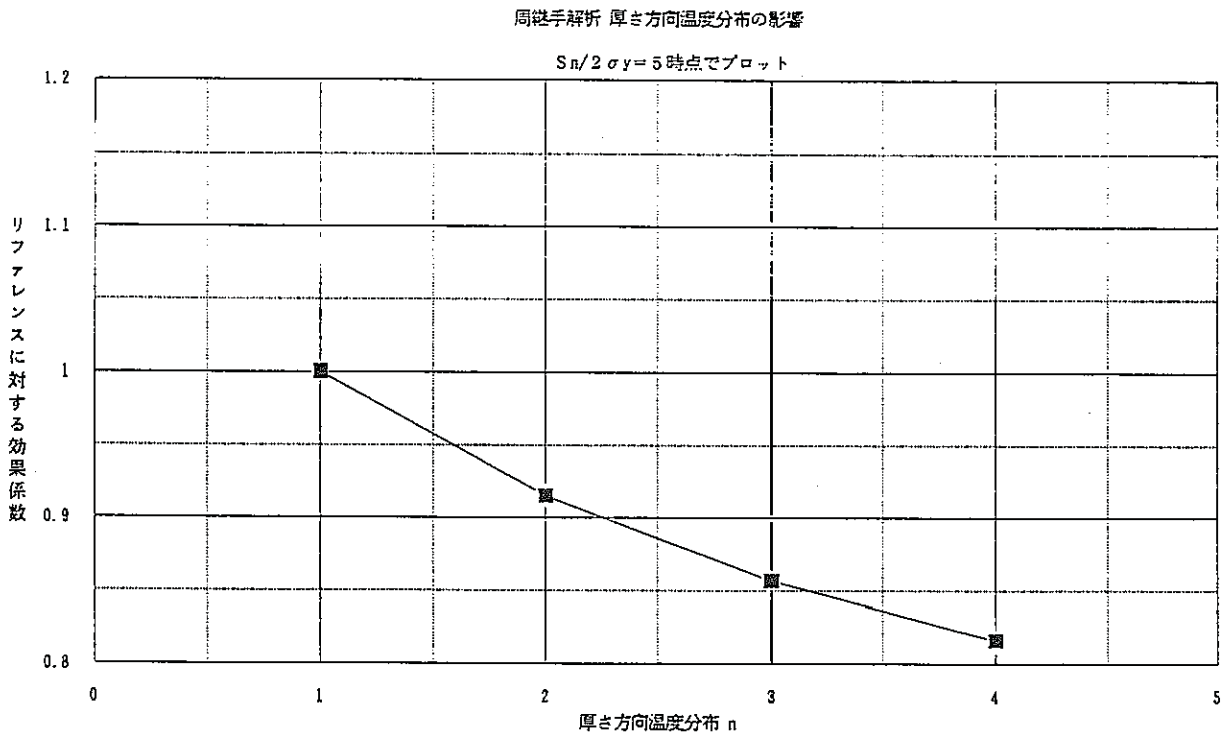


図 5.3.2.1 厚さ方向温度分布パラメータ解析における n - 効果係数プロット図
 Fig. 5.3.2.1 n - multiplication coefficient in parametric analysis of temperature distribution of through the wall thickness

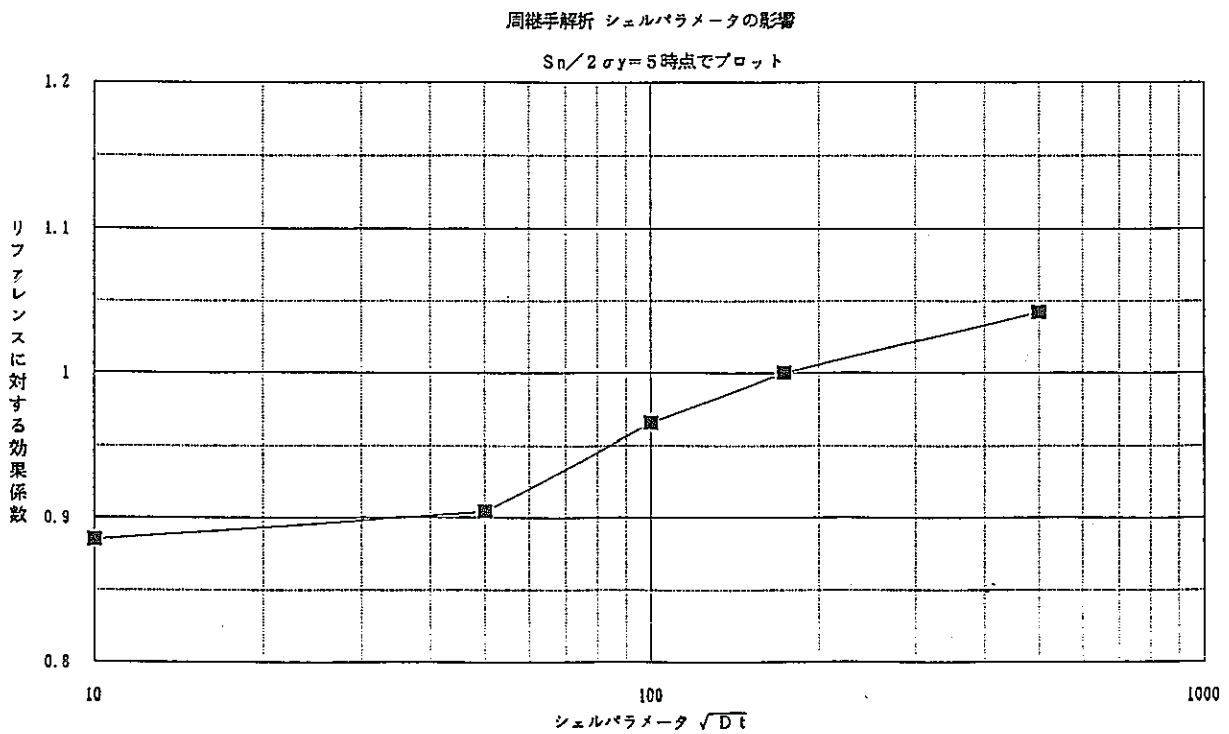


図 5.3.2.2 シェルパラメータパラメータ解析における \sqrt{Dt} - 効果係数プロット図
 Fig. 5.3.2.2 \sqrt{Dt} - multiplication coefficient in parametric analysis of shell parameter

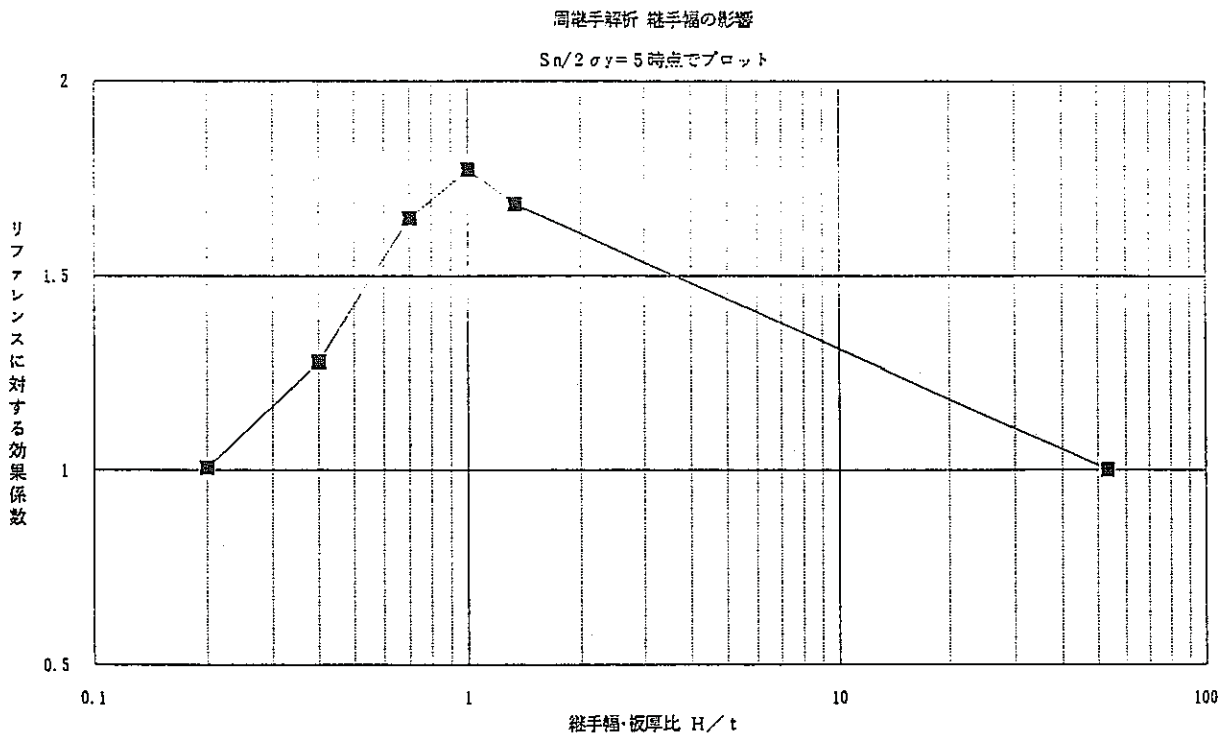


図 5.3.2.3 継手幅パラメータ解析における継手幅／板厚比－効果係数プロット図
Fig. 5.3.2.3 Ratio of the joint width to the wall thickness - multiplication coefficient in parametric analysis of joint width

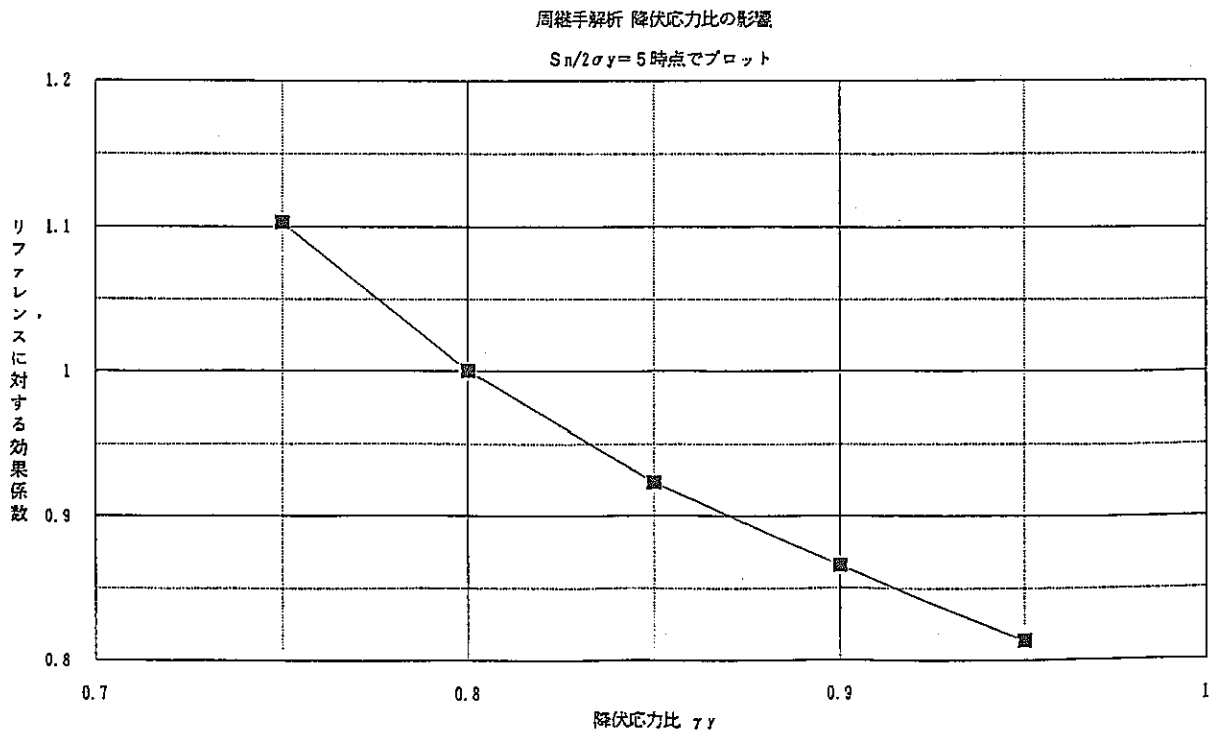


図 5.3.2.4 降伏応力比パラメータ解析における γ_y －効果係数プロット図
Fig. 5.3.2.4 γ_y - multiplication coefficient in parametric analysis of yield stress ratio of weld metal to base metal

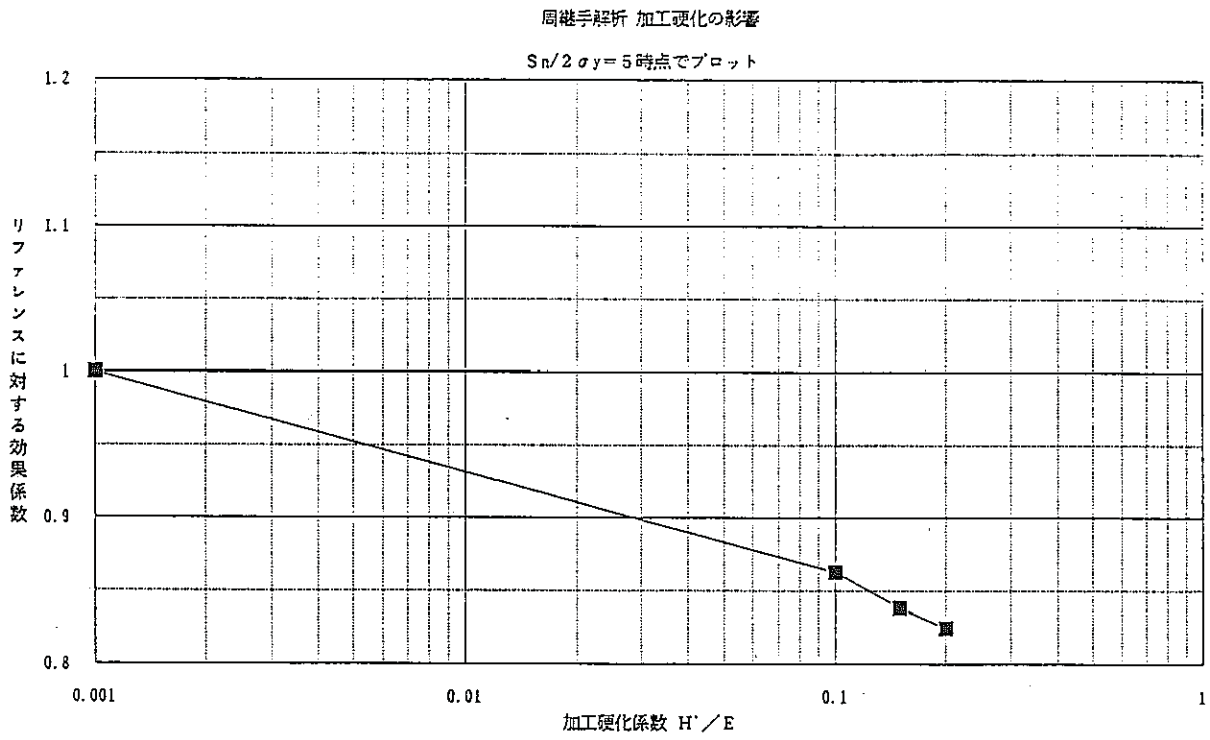


図 5.3.2.5 加工効果係数パラメータ解析における H' - 効果係数プロット図
 Fig. 5.3.2.5 H' - multiplication coefficient in parametric analysis of work hardening coefficient

5.4 まとめ

周溶接継手パラメータ解析結果を基に冶金的構造不連続効果のひずみ範囲算出式を提案し、各影響因子の冶金的構造不連続効果におけるリファレンスケースに対する効果係数の算出を試みた。以下にそのまとめを示す。

- 厚さ方向温度勾配の影響では、ひずみ集中係数 K_w が最大の挙動を示すのが $n = 1$ の場合であり、以下 $n = 2, 3, 4$ の順で小さくなる。また、効果係数の変動範囲は $0.81 \sim 1.0$ となる。
- シェルパラメータの影響では、 $\sqrt{Dt} = 500$ の場合で K_w が最大の挙動を示す。また、効果係数の変動範囲は、 $0.88 \sim 1.04$ となる。
- 継手幅の影響の場合では、継手幅 $H = 15\text{mm}$ ($H/t = 1$)の場合で K_w が最大の挙動を示す。また、効果係数の変動範囲は、 $1.0 \sim 1.77$ となる。
- 降伏応力比の影響では、降伏応力比 $r_y = 0.75$ の場合で K_w が最大の挙動を示し、降伏応力比が大きくなるにつれて挙動は鈍化する傾向を示す。また、効果係数の変動範囲は、 $0.81 \sim 1.1$ となる。
- 加工硬化係数の影響では、弾完全塑性体を想定した加工硬化係数 $H' = 16.2$ の場合で K_w が最大の挙動を示す。また、効果係数の変動範囲は $0.82 \sim 1.0$ となる。
- 周溶接継手におけるひずみ集中挙動において、形状因子である継手幅が最もその影響に寄与すると考えられる。

6. 結 言

厚さ方向温度勾配による熱応力を受ける平滑周溶接継手の冶金的不連続に基づくひずみ集中挙動について形状・負荷・材料因子に係わる非弾性パラメータ解析を行い、以下の知見を得た。

- ・ひずみ範囲算出式として冶金的不連続効果を表す弾性追従パラメータを用いた式を提示した。
 - ・継手幅無限大・線形温度分布をリファレンス条件として、各因子の影響度を弾性追従パラメータの増倍係数として定量化した。
 - ・検討した範囲では継手幅の影響が最も大きく継手幅／板厚比が1.0の付近で増倍係数は最大1.8程度となることがわかった。
- 今後は、形状不連続の重畳効果について検討を行う予定である。

謝 辞

本検討を進めるにあたり材料開発室 香川裕之氏、浅山泰氏、構造工学室渡士克己氏、笠原直人氏には有益な御意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」 PNC N241 84-01(1) 昭和59年9月
- (2) 永田、「高速炉用高温構造設計基準(案)」 PNC SN9410 88-074 1988年6月
- (3) 永田、「高速炉用高温構造設計基準(案) 解説」 PNC SN9410 88-074 1988年6月
- (4) 谷川他、「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅱ) 原子炉容器液面近傍縦溶接継手の解析(2)」 PNC SN9410 88-081 1988年6月
- (5) 霜越他、「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(Ⅱ) 周溶接継手の解析(1)」 PNC SN9410 88-128 1988年9月
- (6) 構造工学室・設計基準Gr、「溶接継手クリープ疲労強度評価法の開発 関連技術資料のまとめ(1)」 PNC 19410 89-003 1989年4月
- (7) 谷川他、「過渡熱応力に対する設計係数の策定に係わる解析 第1報 厚さ方向温度勾配による熱応力」 PNC 19410 89-021 1989年5月
- (8) 根岸他、「クリープ疲労損傷評価に用いる設計係数策定に係わる解析 第1報 切欠付き丸棒・フィレット付き帯板の解析」 PNC SN9410 89-164 1989年6月
- (9) 「汎用非線形構造解析システム FINAS 使用説明書 VERSION11.0」 PNC N9520 89-019 1989年11月

付録 A 各影響因子における弾性追従パラメータ q_F の挙動

本研究では、各因子の冶金的構造不連続効果による弾性追従パラメータへの影響を、リファレンスモデルでの冶金的構造不連続効果による弾性追従パラメータに係る係数として定量化した。

ここでは、単純に弾性解析の結果から非弾性状態の相当ひずみ範囲を推定するのに用いられる弾性追従パラメータ q_F に着目し、各因子における弾性追従パラメータ q_F の挙動について検討する。

A.1 ひずみ範囲評価式

「高温構造設計方針」では、弾性解析の結果から非弾性状態の相当ひずみ範囲を推定するために弾性追従パラメータを用いた評価式を次のように定義している。

$$\epsilon_t = \{ 1 + (q_F - 1) (1 - 2\sigma_y / \sigma_{EL}) \} \sigma_{EL} / E \dots\dots\dots (A.1)$$

ここで、

- ϵ_t : 非弾性状態での相当ひずみ範囲
- q_F : 弾性追従パラメータ
- σ_{EL} : 弾性解析によるMises型相当応力範囲
- σ_y : 降伏応力 ($2\sigma_y$ …シェークダウン基準値)
- E : ヤング率

また、弾性追従パラメータ q_F を算出する式は (A.2) 式に示す。

$$q_F = \Delta \epsilon_p / \{ (\Delta \sigma_{EL} - \Delta \sigma) / E \} \dots\dots\dots (A.2)$$

ここで、

- $\Delta \epsilon_p$: 極値 2 時点間において、極値時点の一つを基準としたMises型相当塑性ひずみ増分 (非弾性解析)
- $\Delta \sigma$: 極値 2 時点間において、極値時点の一つを基準としたMises型相当応力増分 (非弾性解析)
- $\Delta \sigma_{EL}$: 上記に対応する弾性解析におけるMises型相当応力増分

A. 2 各因子における弾性追従パラメータ q_F の履歴

以下に、(A. 2) 式より算出した各因子における弾性追従パラメータ q_F の履歴を示す。

縦軸は、弾性追従パラメータ q_F を示し、横軸は対応する時点での弾性解析による相当応力（内表面）の膜+曲げ成分 S_n における極値時点 A を基準とした増分を母材の降伏応力の 2 倍 ($2\sigma_y$) で除した値を示している。

(1) 厚さ方向温度分布の影響 (CASE-1-1 ~ CASE-1-4)

○厚さ方向温度分布における弾性追従パラメータ q_F の履歴 … 図A. 2. 1

(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

この図より以下のことがわかる。

- 溶金降伏後、各ケース共弾性追従パラメータ q_F は急激に立ち上がる傾向を示す。
- 全ケースを通じて、 $n=2$ の場合が最大の挙動を示し、その最大値は 1.9 程度となる。

(2) シェルパラメータの影響 (CASE-2-1 ~ CASE-2-5)

○シェルパラメータにおける弾性追従パラメータ q_F の履歴 … 図A. 2. 2

(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

この図より以下のことがわかる。

- 溶金降伏後、各ケース共弾性追従パラメータ q_F は急激に立ち上がるが、 $\sqrt{Dt}=10$ の場合、応力が増加するに連れて減少する傾向を示す。
- その他のケースでは、応力の増加に伴い、増大する傾向を示す。
- 全ケースを通じて、最大の挙動を示すのが $\sqrt{500}$ のケースで、その最大値は 1.9 程度となる。

(3) 継手幅の影響 (CASE-3-1 ~ CASE-3-5)

○継手幅における弾性追従パラメータ q_F の履歴 … 図A. 2. 3

(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

この図より以下の事がわかる。

- 溶金降伏後、各ケース共弾性追従パラメータ q_F は、急激に立ち上がる傾向を示す。

○ 継手幅が3mmのケースでは、降伏後一旦増大するが、母材降伏時点 ($S_n / 2\sigma_y = 1$) 付近より減少し始め、1.7程度で安定した値となる。それに対し、他のケースでは応力の増加に伴い増大する傾向を示す。

○ 全ケースを通じて、最大の挙動を示すのが15mmのケースで、その最大値は3.2程度となる。

(4) 降伏応力比の影響 (CASE-4-1 ~ CASE-4-4)

○降伏応力比における弾性追従パラメータ q_F の履歴 … 図A.2.4

(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

この図より、以下のことがわかる。

○ 溶金降伏後、全ケース共弾性追従パラメータ q_F は、急激に立ち上がる傾向を示す。

○ 降伏応力比が0.9以上のケースでは、比較的安定した値となるが、それ以下のケースでは応力の増加に伴い、増大する傾向を示す。

○ 全ケースを通じて、最大の挙動を示すのが降伏応力比0.75のケースで、その最大値は2.0程度となる。

(5) 加工硬化係数の影響 (CASE-5-1 ~ CASE-5-3)

○加工硬化係数における弾性追従パラメータ q_F の履歴 … 図A.2.5

(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

この図より以下のことがわかる。

○ 溶金降伏後、全ケース共弾性追従パラメータ q_F は、急激に立ち上がる傾向を示す。

○ 弾完全塑性体を仮定した $H' = 16.2$ のケースでは、応力の増加に伴い増大する傾向を示すが、他のケースでは、応力の増加に連れて減少する傾向を示す。

○ 全ケースを通じて、最大の挙動を示すのが $H' = 16.2$ のケースで、その最大値は1.8程度となる。

A.3 各因子に対する弾性追従パラメータの関係

各因子におけるパラメータ値と弾性追従パラメータ q_F の関係を把握するために、縦

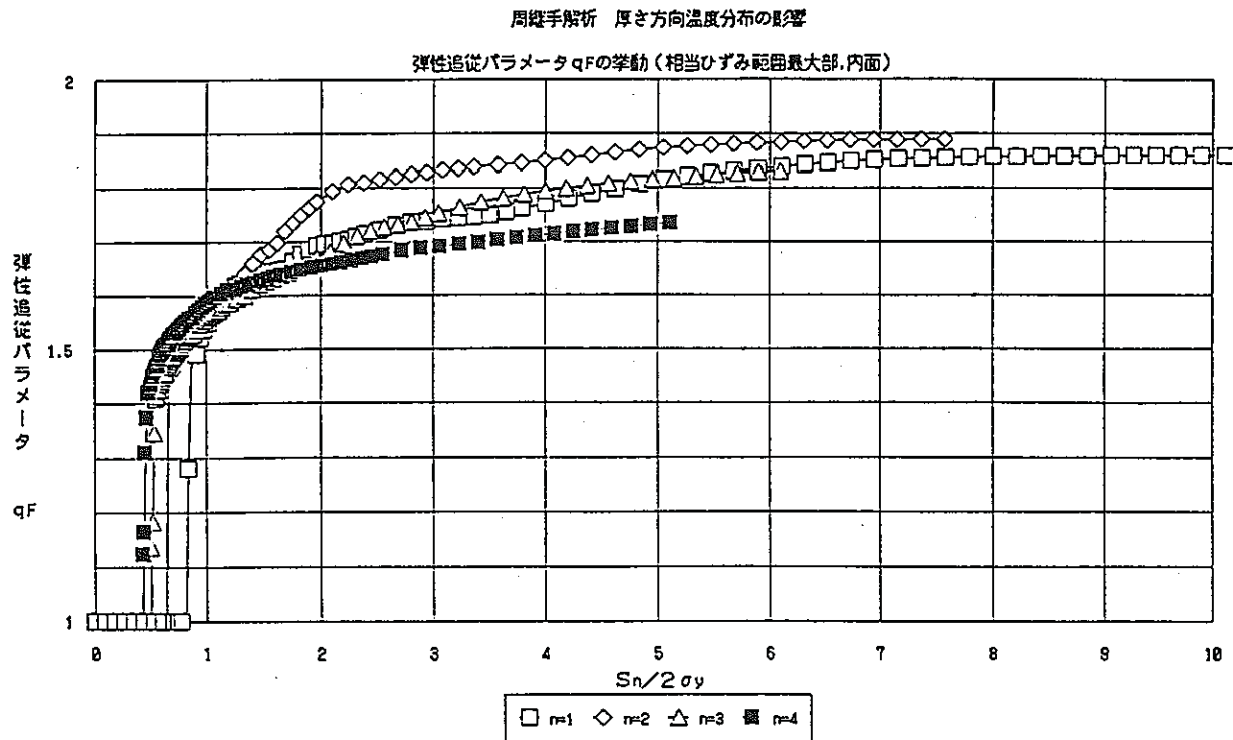
軸に弾性追従パラメータ q_F 、横軸に各因子のパラメータ値を表すプロット図を以下に示す。

各因子のパラメータ値に対する弾性追従パラメータ q_F のプロット時点は、 $S_n / 2\sigma_y = 5$ 時点とした。

- 厚さ方向温度分布 (n) パラメータ値－弾性追従パラメータ q_F プロット図
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_n / 2\sigma_y = 5$ 時点) … 図A. 3. 1
- シェルパラメータ (\sqrt{Dt}) パラメータ値－弾性追従パラメータ q_F プロット図
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_n / 2\sigma_y = 5$ 時点) … 図A. 3. 2
- 継手幅 (継手幅／板厚比、 H/t) パラメータ値－弾性追従パラメータ q_F プロット図
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_n / 2\sigma_y = 5$ 時点) … 図A. 3. 3
- 降伏応力比 (r_y) パラメータ値－弾性追従パラメータ q_F プロット図
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_n / 2\sigma_y = 5$ 時点) … 図A. 3. 4
- 加工硬化係数 (H') パラメータ値－弾性追従パラメータ q_F プロット図
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_n / 2\sigma_y = 5$ 時点) … 図A. 3. 5

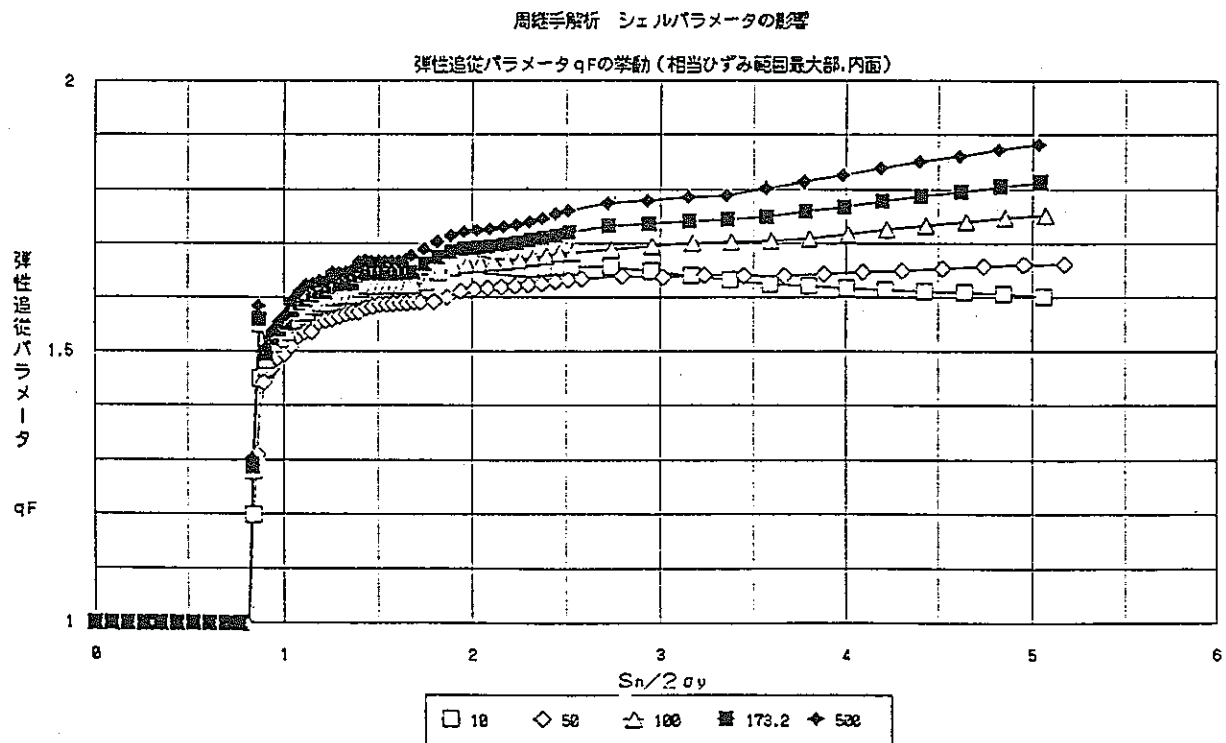
これらの図より、以下のことがわかる。

- 厚さ方向温度分布及び継手幅における弾性追従パラメータ q_F の挙動では、パラメータ値中にピークが現れる。
(厚さ方向温度分布では $n = 2$ 、継手幅では継手幅／板厚比 = 1.0)
- シェルパラメータの場合、パラメータ値の増加に伴い、弾性追従パラメータ値 q_F は増大する傾向を示す。また、降伏応力比及び加工硬化係数の場合、シェルパラメータとは、逆にパラメータ値の増加に連れて減少する傾向を示す。
- 全因子中、最大の挙動を示すのは、継手幅による場合でその最大値は $H/t = 1.0$ で3.2程度となる。



図A. 2.1 厚さ方向温度分布における弾性追従パラメータの q_F の履歴 (全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

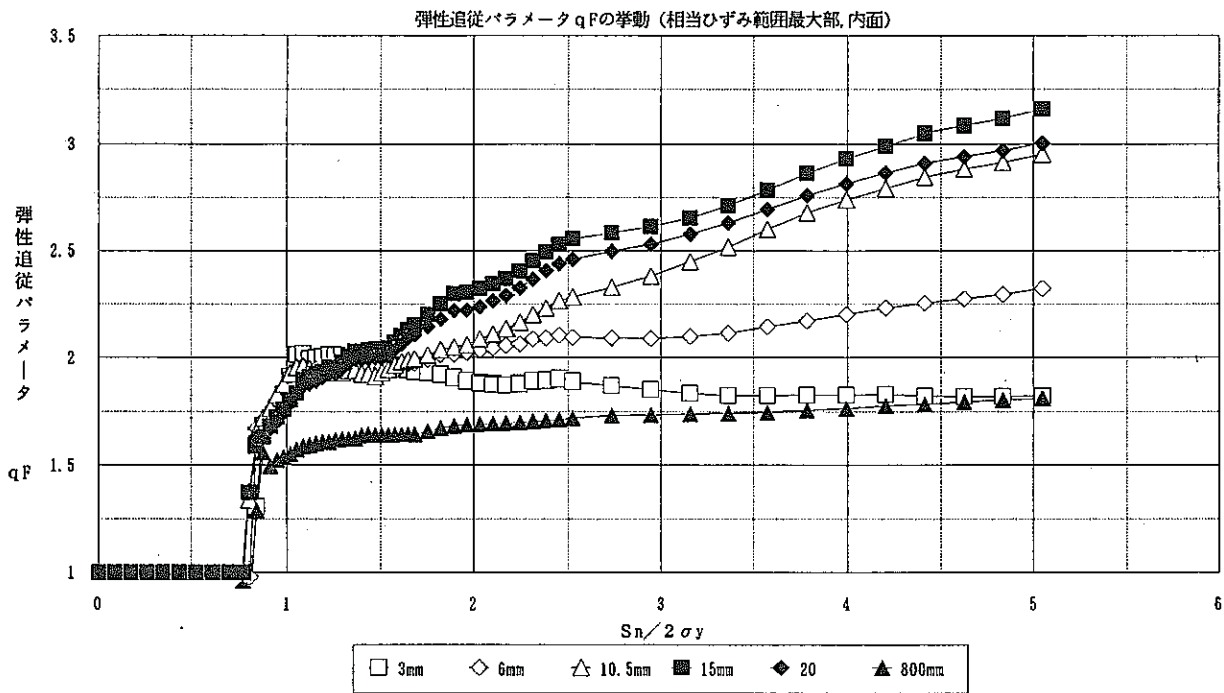
Fig. A. 2.1 History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of temperature distribution through the wall thickness (all cases, at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface)



図A. 2.2 シェルパラメータにおける弾性追従パラメータ q_F の履歴 (全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

Fig. A. 2.2 History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of shell parameter

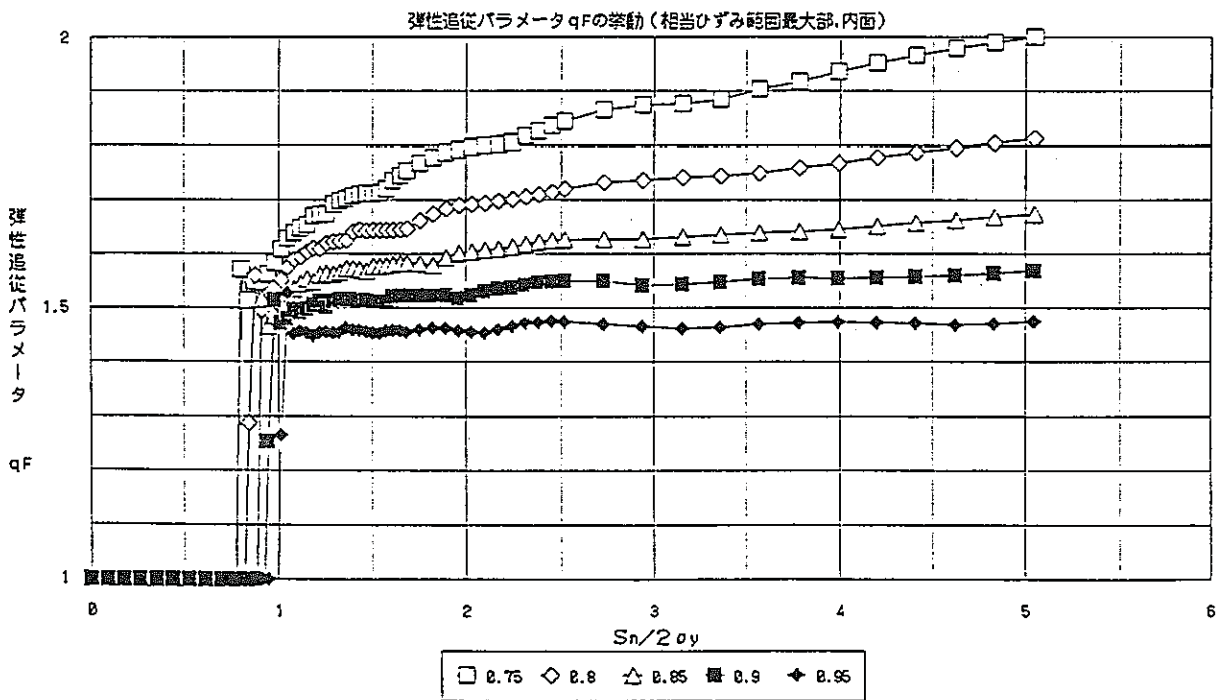
周継手解析 継手幅の影響



図A. 2.3 継手幅における弾性追従パラメータの q_F の履歴
(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

Fig. A. 2.3 History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of joint width (all cases, at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface)

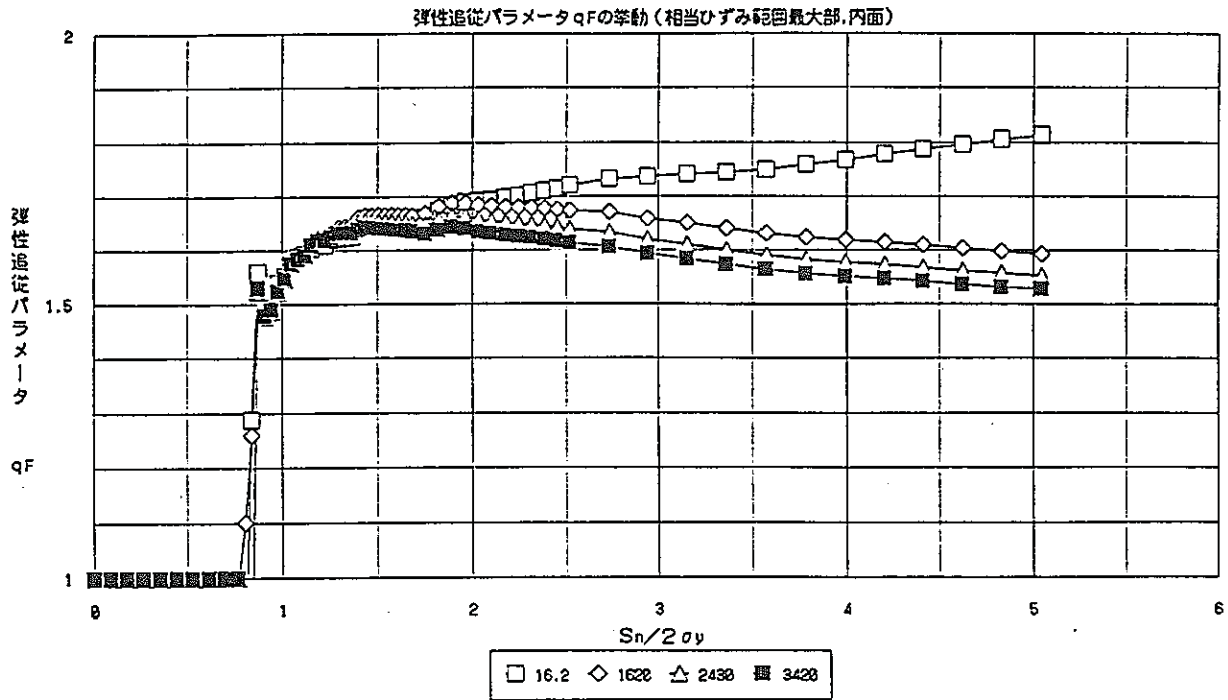
周継手解析 降伏応力比の影響



図A. 2.4 降伏応力比における弾性追従パラメータ q_F の履歴
(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

Fig. A. 2.4 History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of yield stress ratio

周縁手解析 加工硬化係数の影響

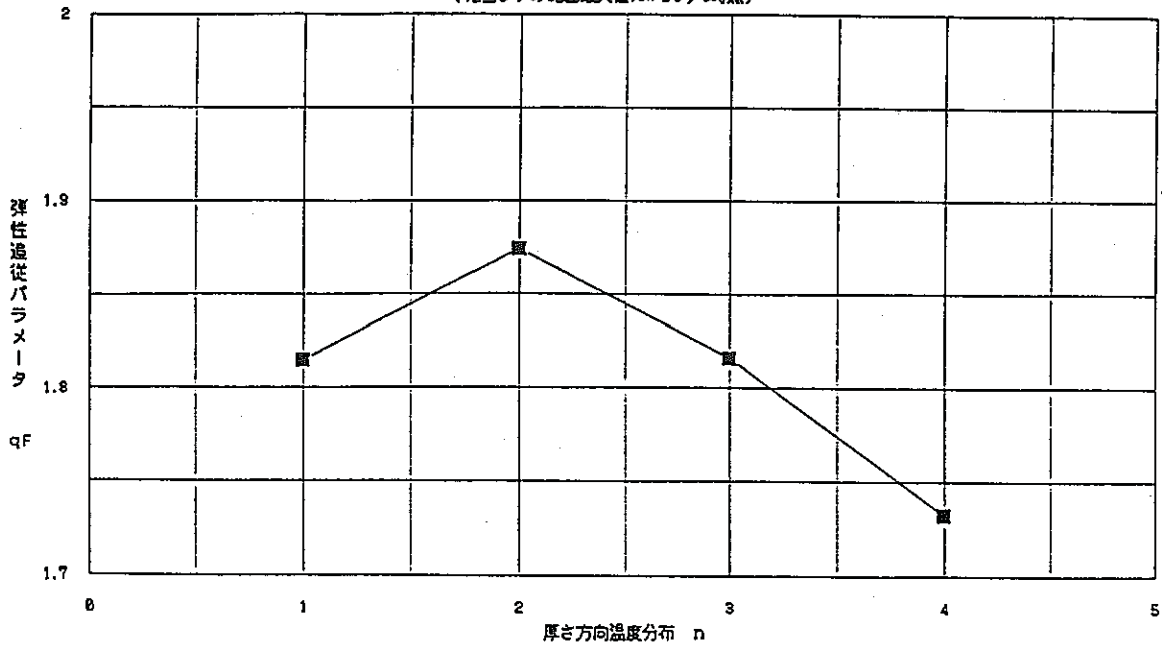


図A. 2. 5 加工効果係数における弾性追従パラメータの q_F の履歴
(全ケース、相当ひずみ範囲最大部、内面)

Fig. A. 2. 5 History of elastic-follow-up parameter q_F in parametric analysis of work hardening coefficient (all cases, at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface)

周継手解析 厚さ方向温度分布と弾性追従パラメータ q_F の関係

(相当ひずみ範囲最大値, $S_n/2\sigma_y=5$ 時点)

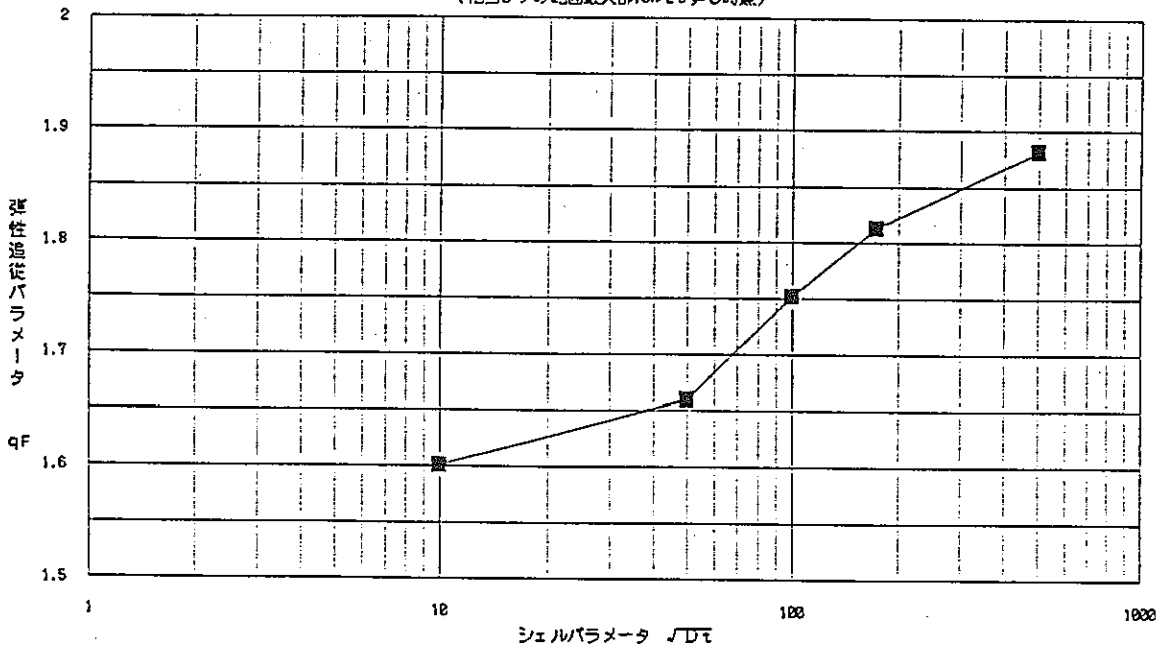


図A. 3. 1 厚さ方向温度分布 (n) パラメータ値 - 弾性追従パラメータ q_F プロット図 (相当ひずみ範囲最大部, $S_n/2\sigma_y=5$ 時点)

Fig. A. 3. 1 Temperature distribution through the wall thickness (n) - elastic-follow-up parameter q_F (at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)

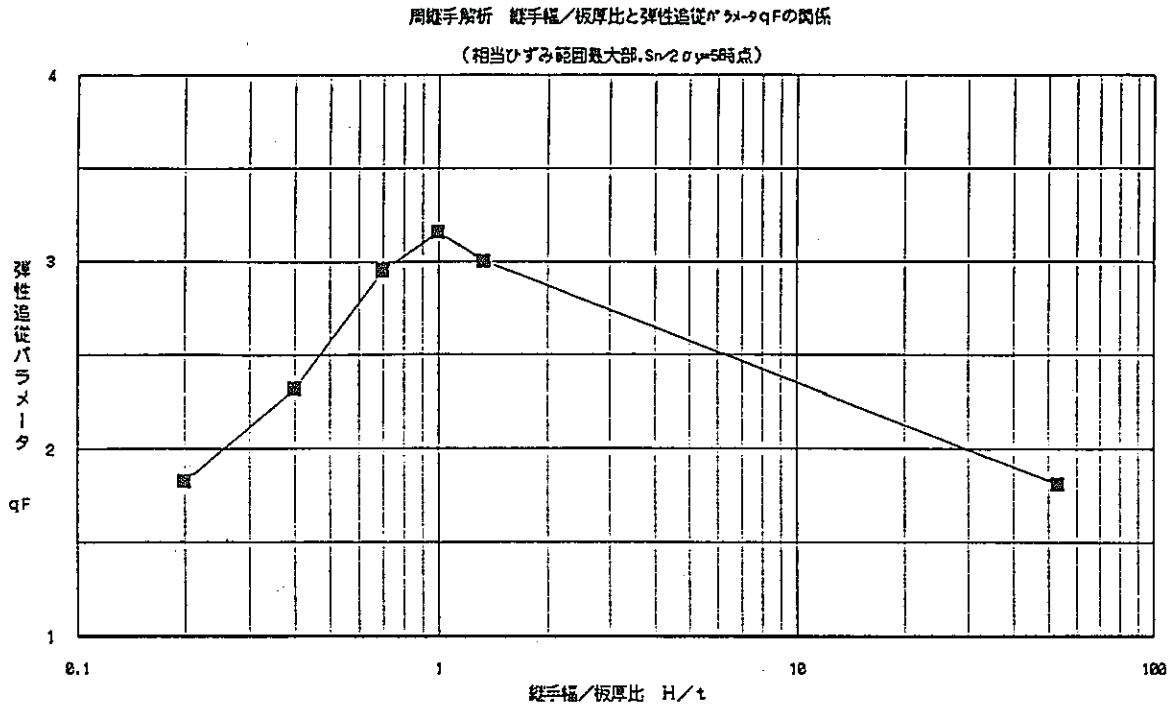
周継手解析 シェルパラメータと弾性追従パラメータ q_F の関係

(相当ひずみ範囲最大部, $S_n/2\sigma_y=5$ 時点)



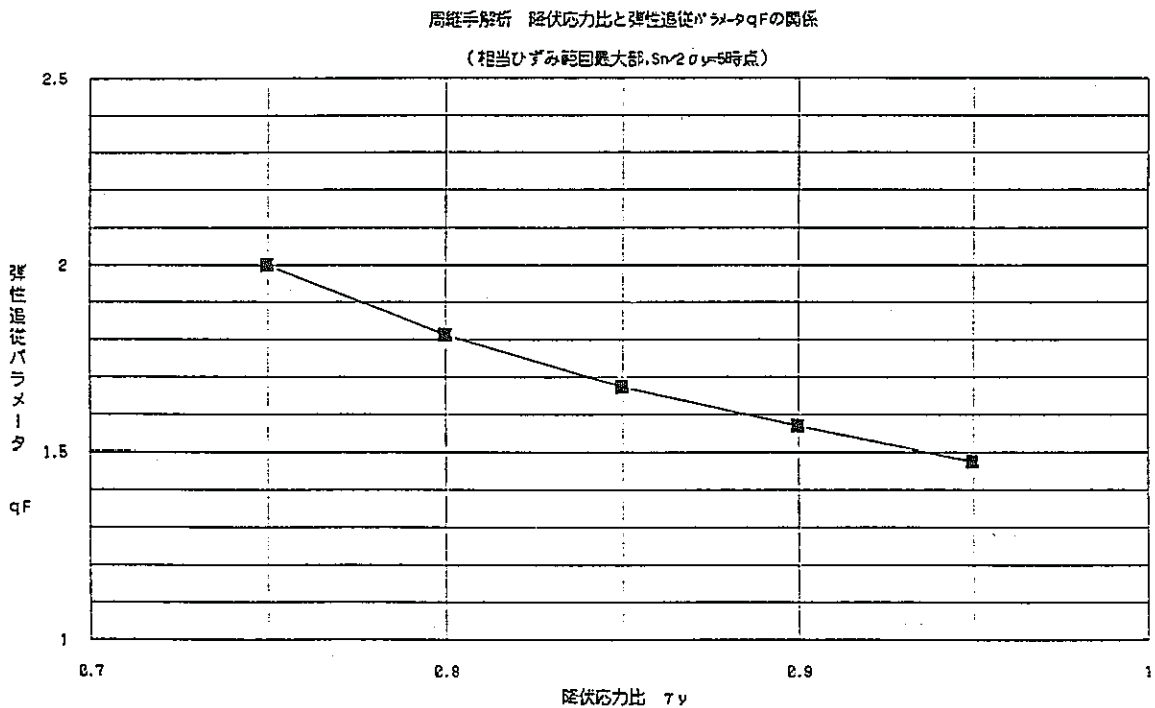
図A. 3. 2 シェルパラメータ (\sqrt{Dt}) パラメータ値 - 弾性追従パラメータ q_F プロット図 (相当ひずみ範囲最大部, $S_n/2\sigma_y=5$ 時点)

Fig. A. 3. 2 Shell parameter (\sqrt{Dt}) - elastic-follow-up parameter q_F (at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)



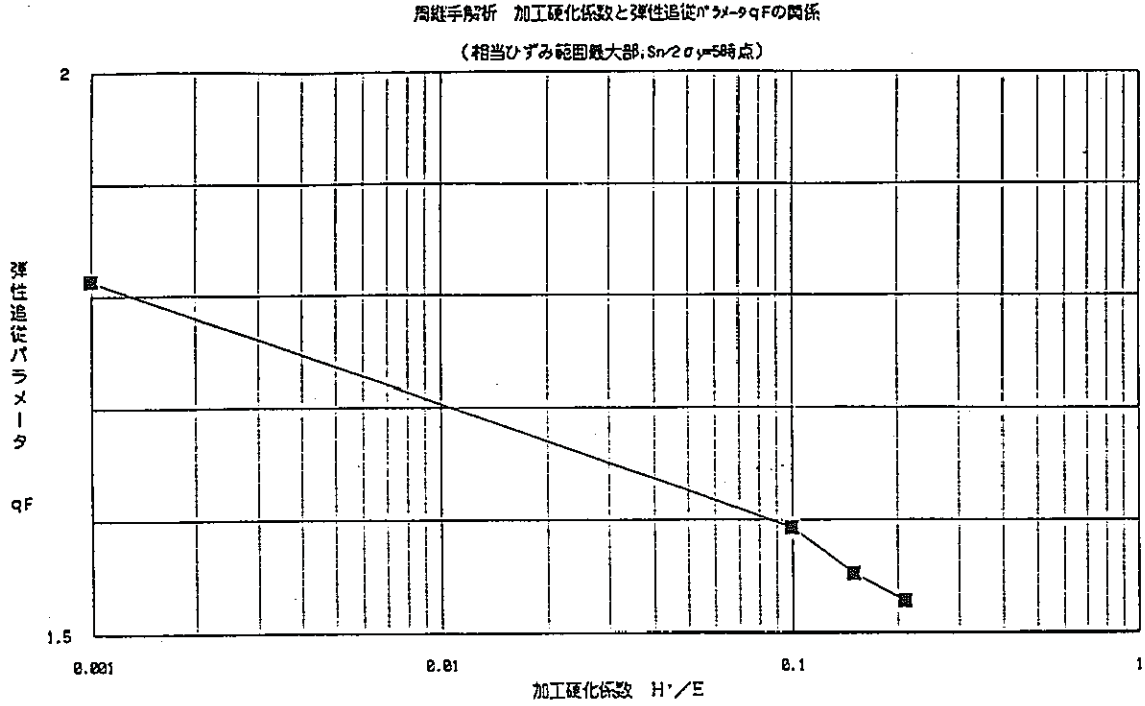
図A. 3. 3 継手幅（継手幅／板厚比、 H/t ）パラメータ値－弾性追従パラメータ q_F プロット図（相当ひずみ範囲最大部、 $S_n/2\sigma_y=5$ 時点）

Fig. A. 3. 3 Joint width (ratio of joint width to wall thickness: H/t) - elastic-follow-up parameter q_F (at the position of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)



図A. 3. 4 降伏応力比（ γ_y ）パラメータ値－弾性追従パラメータ q_F プロット図（相当ひずみ範囲最大部、 $S_n/2\sigma_y=5$ 時点）

Fig. A. 3. 4 Yield stress ratio (γ_y) - elastic-follow-up parameter q_F (at the position of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)



図A. 3. 5 加工効果係数 (H') パラメータ値 - 弾性追従パラメータ q_F プロット図
(相当ひずみ範囲最大部、 $S_n/2\sigma_y=5$ 時点)

Fig. A. 3. 3 Work hardening coefficient (H') - elastic-follow-up parameter q_F
(at the portion of maximum equivalent strain range, inner surface, until $S_n/2\sigma_y=5$)