

分置

# SUS316FR鋼溶接継手のクリープ疲労評価

— 日欧ベンチマーク解析 —

1994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)

# SUS316FR鋼溶接継手のクリープ疲労評価 — 日欧ベンチマーク解析 —

山下 卓哉\* 永田 敬\*

## 要 旨

各国で開発が進められているクリープ疲労損傷評価法の評価精度を比較するために、動燃で実施された高速炉構造用SUS316鋼（SUS316FR鋼）溶接継手試験体のクリープ疲労試験結果がベンチマーク問題として設定された。本報は、弾性解析結果に基づいて実施したSUS316FR鋼溶接継手試験体のクリープ疲労損傷評価結果についてまとめたものである。クリープ疲労損傷評価の対象部位として平滑部が設定されたが、溶接部についても動燃で提案している簡易評価手法を適用し評価を行った。計算されたクリープ疲労損傷値は、平滑部が1.06、溶接部が1.87である。評価結果と試験で得られたき裂の発生状況と比較すると、動燃が提案しているクリープ疲労損傷評価法の精度は、従来のSUS304鋼に対する評価精度と同等か幾分保守的になっており、SUS316FR鋼に対しても十分適用できるものと思われる。

---

\* 大洗工学センター 機器構造開発部 構造工学室

Creep fatigue damage evaluation of a SUS316FR welded joint specimen  
-Benchmarks Analysis for AGT9B/PNC Joint Program-

Takuya Yamashita \* , Takashi Nagata \*

Abstract

The result of the creep fatigue test of a SUS316FR welded joint conducted by PNC was proposed as a benchmarks problem in the AGT9B/PNC Joint Program to compare the accuracy of the creep fatigue damage evaluation methods developed in European countries and Japan. This paper describes the result of creep fatigue damage evaluation of the 316FR welded joint based on a thermo-elastic stress analysis carried out by PNC. Evaluated creep fatigue damages are 1.06 for the base metal and 1.94 for the weld metal. Comparing the calculated creep fatigue damage with observed cracks, it is found that the method is applicable to the evaluation of SUS316FR as well as SUS304.

---

\* Structural Engineering Section, Systems and Components Development Division  
O-arai Engineering Center

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	1
2. ベンチマーク問題 .....	1
2.1 試験体と熱過渡条件 .....	1
2.2 解析モデル及び材料定数 .....	1
3. クリープ疲労損傷評価法 .....	2
3.1 疲労損傷 .....	2
3.2 クリープ損傷 .....	3
4. 解析・評価 .....	4
5. 考 察 .....	4
6. 結 言 .....	5
参考文献 .....	5
付録－A 繰返し応力・ひずみ関係及びクリープ損傷評価線図 .....	22
付録－B 周溶接継手の弾性追従係数の設定根拠 .....	27

## List of Tables

	頁
Table 1	Input temperature history of SUS316FR welded pipe part ..... 6
Table 2	Material properties of SUS316 for heat transfer analysis ..... 7
Table 3	Material properties of SUS316 for elastic stress analysis ..... 7
Table 4	Material properties of SUS316 for creep analysis ..... 8
Table 5	Fatigue properties of SUS316 ..... 9
Table 6	Creep rapture properties of SUS316 ..... 9
Table 7	Maximum elastic strains generated at hot transient and cold transient ..... 10
Table 8(a)	Result of creep-fatigue damage evaluation ..... 10
Table 8(b)	Result of creep-fatigue damage evaluation ..... 10

## List of Figures and a Photograph

	頁
Fig. 1 Configuration of the model(SUS316 welded pipe part) .....	11
Fig. 2 Analysis model for SUS316FR welded pipe part .....	12
Fig. 3 Finite element mesh for the temperature response and elastic stress analysis .....	13
Fig. 4 Temperature history of the 316FR welded joint specimen at inner and outer surface .....	14
Fig. 5(a) History of the temperature distribution in the wall of the SUS316FR welded joint specimen at cold transient .....	15
Fig. 5(b) History of the temperature distribution in the wall of the SUS316FR welded joint specimen at hot transient .....	16
Fig. 6(a) History of the stresses at the inner surface of the SUS316FR welded joint specimen .....	17
Fig. 6(b) History of the stresses at the outer surface of the SUS316FR welded joint specimen .....	18
Fig. 7(a) History of the strains at the inner surface of the SUS316FR welded joint specimen .....	19
Fig. 7(b) History of the strains at the outer surface of the SUS316FR welded joint specimen .....	20
Photo. 1 Colour check result of the inner surface of the specimen .....	21

## 1. はじめに

動燃/CEA, KFK 及び動燃、原研/AEA の技術協力 (AGT9B) に基づき、以下に示す 3 問のベンチマーク解析が実施された。

- 溶接部熱疲労強度
- 熱応力繰り返し下でのき裂進展
- 流体圧力による半球殻の動的座屈

本報は、上記ベンチマーク解析のうちの『溶接部熱疲労強度』に関するものである。『溶接部熱疲労強度に関するベンチマーク解析』は、各国で開発が進められているクリープ疲労損傷評価法の評価精度を比較するために、動燃で実施された高速炉構造用 SUS316 鋼 (SUS316FR 鋼) 溶接継手試験体のクリープ疲労試験結果を基に実施された。クリープ疲労損傷評価の対象部位として、当初平滑部が設定されたが、溶接部についても動燃で提案している簡易評価手法を適用し評価を行った。

## 2. ベンチマーク問題<sup>1)</sup>

### 2.1 試験体と熱過渡条件

ベンチマーク解析の対象となる高速炉構造用 SUS316 鋼溶接継手試験体の形状を Fig. 1 に示す。試験体の寸法は、内径 53.5mm、肉厚 20.0mm、長さ 350mm (厚肉部 250mm) で、中央部に溶接継手を有する。クリープ疲労試験は、高温 (550 °C) と低温 (300 °C) の Na を繰り返し交互に流すことによって行われた。試験終了までの繰り返し数は 1600 サイクルで、保持時間は高温側が 5 時間、低温側が 1 時間である。試験体に負荷された温度履歴と解析に用いる熱伝達率を Table 1 に示す。

### 2.2 解析モデル及び材料定数

ベンチマーク解析用に設定された解析モデルを、Fig. 2 (a)~(c) に示す。使用する有限要素は、2 次元軸対象要素とする。要素分割は、軸方向 1 要素、半径方向 10 要素とする。熱的境界条件は、内表面は熱伝達境界とし、試験体の外表面は断熱材により保温されているため断熱境界とする。力学的な境界条件は、横断面の軸方向変位が一様になるような拘束を与える。

温度応答解析及び弾性応力解析に用いる材料定数を、それぞれ Table 2 及び Table 3 に示す。クリープ疲労損傷評価に必要な、クリープ式、最適疲労破損式及びクリープ破断式をそれぞれ Table 4 ~ Table 6 に示す。



3. クリープ疲労損傷評価法<sup>2) 3) 4) 5) 6) 7)</sup>

動燃が提案している弾性解析結果に基づく簡易クリープ疲労損傷評価の手順を以下に示す。  
なお、クリープ疲労損傷評価は設計基準で考慮される全ての安全率を取り除いた平均値ベースで行う。

## 3.1 疲労損傷

(a) 全ひずみ範囲  $\varepsilon_t$  を下式により求める。

$$\varepsilon_t = K_e' \times \varepsilon_n \quad (1)$$

$\varepsilon_n$  : 公称ひずみ

$K_e'$  : ひずみ割増係数

[平滑部]

$$K_e' = 1 + (q - 1) \left( 1 - \frac{\Delta\sigma_R}{S_n} \right) \quad (2-a)$$

$q$  : 弾性追従係数  $q = 1.67$

$\Delta\sigma_R$  : 動的応力-ひずみ関係から求めた応力範囲

$S_n$  : 弾性応力範囲

$$S_n = E \varepsilon_n$$

$E$  : ヤング率

[溶接部]

$$K_e' = 1 + (q_w - 1) \left( 1 - \gamma_y \frac{\Delta\sigma_R}{S_n} \right) \quad (2-b)$$

$q_w$  : 溶接部の弾性追従係数

$q_w = 2.48$  (周方向継手の評価) ( $\sqrt{Dt} = 12.7, H/t = 0.55$ )

$q_w = 3.0$  (液面近傍縦継手の評価)

$\gamma_y$  : 溶接材と母材の降伏応力比  $\gamma_y = 0.8$

周溶接継手の弾性追従係数の設定根拠を付録に示す。

公称ひずみ範囲及びミーゼスの相当応力は、それぞれ以下の式により求める。

$$\varepsilon_n = \frac{1.5}{1 + \nu} \Delta\varepsilon_{eq} \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2)^2 + (\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_3)^2 + (\Delta\varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_1)^2} \quad (4)$$

$\nu$  : ポアソン比

$\Delta \varepsilon_{e_0}$  : 弾性解析から得られるミーゼスの相当ひずみ範囲

$\Delta \varepsilon_i$  : 高温側と低温側の極値間のひずみ成分の差 ( $i=1, 2, 3$ )

(b) ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}$  を下式により求める。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_t}{\tau} \quad (5)$$

$\tau$  : 熱過渡緩和時間  $\tau = 160$  秒 (試験結果より)

(c) Table 5 の最適疲労破損式より許容繰返し数  $N_f$  を求める。

(d) 試験繰返し数  $N$  を許容繰返し数  $N_f$  で割った値を疲労損傷値  $D_f$  とする。

$$D_f = \frac{N}{N_f} \quad (6)$$

### 3.2 クリープ損傷

(a) クリープ損傷値は、中間保持を考慮して、動的応力-ひずみ関係から全ひずみ範囲  $\varepsilon_t$  の  $\frac{1}{2}$  のひずみ範囲に対して求めた応力範囲の  $\frac{1}{2}$  の値を緩和初期応力  $\sigma_i$  とする。

[中間保持]

$$\sigma_i = \frac{\sigma_R(\varepsilon_t/2)}{2} \quad (7)$$

参考のため、従来のピーク保持を仮定した場合のクリープ損傷値を併せて示すが、この場合の緩和初期応力は、ひずみ範囲を  $\varepsilon_t$  として求めた応力範囲の  $\frac{1}{2}$  の値とする。

[ピーク保持]

$$\sigma_i = \frac{\sigma_R(\varepsilon_t)}{2} \quad (8)$$

(b) 下式により初期応力  $\sigma_i$  からの緩和解析を行い、保持中の応力を求める。

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{E \dot{\varepsilon}_c}{q} \quad (9)$$

$E$  : ヤング率

$\dot{\varepsilon}_c$  : クリープひずみ速度

(c) 下式によりクリープ損傷値  $D_c$  を求める。

$$D_c = N \int \frac{dt}{t_R\{\sigma(t)\}} \quad (10)$$

$t_R$  : クリープ破断時間

#### 4. 解析・評価

温度応答解析及び弾性熱応力解析に用いた要素分割図をFig. 3に示す。温度応答解析から得られた試験体の内外表面の温度履歴をFig. 4に示す。コールドショック時及びホットショック時の板厚内温度分布の変化を、それぞれFig. 5 (a)及び(b)に示す。試験体の内表面及び外表面の応力履歴を、それぞれFig. 6 (a)及び(b)に示す。また、試験体の内表面及び外表面のひずみ履歴を、それぞれFig. 7 (a)及び(b)に示す。これらの図からわかるように、熱過渡を直接受ける試験体の内表面で発生応力とひずみが最大になる。ひずみが最大になる時点における、各ひずみ成分をTable 7に示す。

Table 8に、前章に述べた手順で行ったSUS316FR鋼溶接継手のクリープ疲労損傷評価結果を示す。平滑部は、疲労損傷値が0.97、クリープ損傷値が0.09で全損傷値が1.06となる。溶接部については、周方向溶接継手の評価法を適用すると、疲労損傷値は1.84、クリープ損傷値は0.03、全損傷値は1.87となる。また、参考のため実施した液面近傍の縦溶接継手の評価法を適用した場合には、疲労損傷値は2.35、クリープ損傷値は0.05、全損傷値は2.40となる。この結果から判断すると、本試験は疲労損傷が卓越しているものと言える。

#### 5. 考察（試験結果<sup>8)</sup>との比較）

Photo. 1に、試験終了後の試験体内表面のPT結果を示す。継手部にき裂の発生が見られる他、平滑部の特定の4ヵ所にき裂が偏在していることがわかる。調査の結果、き裂が特定の箇所に集中した原因は、熱処理の過程で $\delta$ フェライト相が残存したためとわかった。

試験体の外観検査の結果から、以下のことがわかっている。

- (a)  $\delta$ フェライトが認められない部分の平滑部にはき裂は認められなかった。
- (b)  $\delta$ フェライトが認められる部分の平滑部でき裂の発生・進展が認められた。
- (c) 溶接部に沿ったき裂の発生・進展が見られた。

SUS304鋼を用いて行われた従来の試験では、クリープ疲労損傷値が1になると、1mm程度の長さのき裂の発生が見られることが知られている。Table 8に示したように、SUS316FR鋼の平滑部におけるクリープ疲労損傷値は約1.1であるが、 $\delta$ フェライトが存在しない部分にはき裂の発生が見られないことから、クリープ疲労損傷はSUS304鋼より幾分保守的に評価されていると見なして良いであろう。また、 $\delta$ フェライトが存在する部分に発生したき裂のサイズは、損傷値が1のSUS304鋼のものと同程度であることから、 $\delta$ フェライトが存在する部分のクリープ疲労値はSUS304鋼とほぼ同等に評価されている。

溶接部のクリープ疲労損傷値は約1.9で、発生したき裂のサイズは従来のSUS304鋼の同程度

のクリープ疲労損傷値のものとほぼ同じであった。

以上の知見をまとめると、動燃が提案しているクリープ疲労損傷評価手法は従来のSUS304鋼に対する評価精度と同程度か幾分保守的になっているが、SUS316FR鋼に対して十分適用できる範囲にあるものと判断される。

## 6. 結 言

高速炉構造用SUS316鋼（SUS316FR鋼）溶接継手試験体のクリープ疲労試験結果に対して、動燃で提案している簡易評価手法を適用し評価を行った。計算されたクリープ疲労損傷値は、平滑部が1.06、溶接部が1.87であった。試験で得られたき裂の発生状況と評価結果を比較すると、提案しているクリープ疲労損傷評価法の精度は、従来のSUS304鋼に対する評価精度と同等か幾分保守的になり、SUS316FR鋼に対しても十分適用できるものと思われる。

## 参考文献

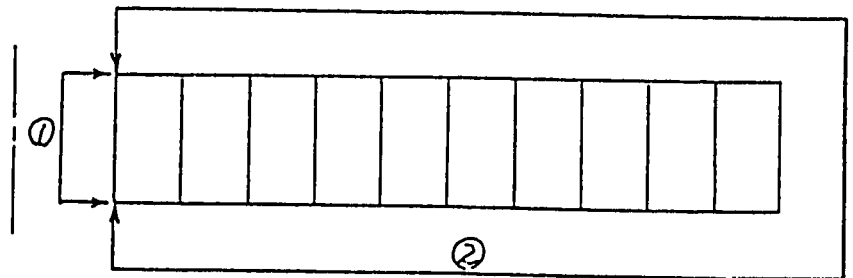
- 1) K. Watashi, "Reply to the AGT9B's questions concerning the Benchmark Analysis on the Nozzle Model thermal transient test in STST with an exercise of creep fatigue damage analysis in the SUS 316 welded pipe part", Fax from PNC dated on Jan. 24, 1992
- 2) M. Shimokoshi et al, "Strain Concentration Factors for Creep-Fatigue Design Evaluation of Welded Joints Considering Metallurgical and Geometrical Discontinuities", 1992, Proc. SMIRT, 11th, E06/3
- 3) 谷川他、高速増殖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(1)）、PNC SN9410 88-003
- 4) 谷川他、高速増殖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
- 5) 霜越他、高速増殖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
- 6) 永田他、溶接継手クリープ疲労強度評価法の開発、PNC SN9410 89-103
- 7) 霜越他、高速増殖炉の設計主要目に関する研究(II)（周溶接継手の解析(2)）、PNC SN9410 91-026
- 8) 石崎他、SUS316FR材溶接継手の熱過渡強度試験（一般部のき裂発生状況とクリープ疲労強度）、PNC ZN9410 93-\*\*\*（印刷手続き中）

Table 1 Input temperature history of SUS 316FR welded pipe part

TIME (sec)	Sodium Temp. ( °C )
0.0	550.00
10.0	550.00
18.5	545.00
23.0	542.29
25.5	537.01
28.5	430.92
30.0	381.83
32.0	359.17
35.0	335.10
37.0	327.16
43.0	315.43
60.0	309.00
90.0	307.29
120.0	308.00
150.0	307.00
180.0	307.00
300.0	302.50
500.0	300.00
900.0	302.50
1800.0	303.50
3600.0	302.50
3613.0	302.50
3619.0	302.71
3624.0	304.85
3625.5	310.84
3627.0	376.39
3628.5	414.64
3630.0	453.08
3631.5	484.11
3634.0	504.68
3636.0	514.69
3641.0	529.20
3649.0	537.42
3660.0	539.28
3690.0	543.56
3720.0	542.78
3750.0	541.92
3780.0	542.06
3900.0	545.56
4100.0	550.00
5400.0	550.00
7200.0	550.00
9000.0	550.00
13900.0	550.00
21600.0	550.00

Temp. 温度 [°C]	Heat Transfer Coefficient 熱伝達率 [Kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C]	
	①	②
20.0	—	ADIABATIC
210.0	—	
300.0	1.53 × 10 <sup>4</sup>	
400.0	1.45 × 10 <sup>4</sup>	
500.0	1.37 × 10 <sup>4</sup>	
550.0	1.33 × 10 <sup>4</sup>	

- ① Heat transfer was considered
- ② Adiabatic



(b) Thermal boundary condition for heat transfer analysis

Above sodium temperature were estimated from the values measured at the Nozzle Model-3, which located at the upstream side of the SUS316FR welded pipe

Table 2 Material properties of SUS 316 for heat transfer analysis

表6.5-3 オーステナイトステンレス鋼SUS316

Temperature (°C)	Heat Conductivity (kcal/min·sec·°C)	Specific Heat (kcal/kg·°C)	Density (kg/mm <sup>3</sup> )
20	$3.48 \times 10^{-4}$	0.108	$7.97 \times 10^{-6}$
50	3.53	0.112	7.96
100	3.73	0.118	7.94
150	3.89	0.122	7.92
200	4.05	0.125	7.89
250	4.21	0.128	7.87
300	4.37	0.129	7.85
350	4.53	0.131	7.83
400	4.70	0.132	7.80
450	4.86	0.133	7.78
500	5.02	0.134	7.76
550	5.18	0.136	7.74
600	5.34	0.138	7.72
650	5.51	0.140	7.69
700	5.67	0.142	7.67
750	5.83	0.145	7.65
800	5.98	0.147	7.63

Table 3 Material properties of SUS 316 for elastic stress analysis

表4.5-5 SUS316鋼のヤング係数、ポアソン比、線膨張係数

Temperature (°C)	Modulus of Elasticity (kg/mm <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio	Coefficient of Linear Expansion (1/°C)
20	$1.98 \times 10^4$	0.266	$15.15 \times 10^{-6}$
50	$1.96 \times 10^4$	0.268	$15.65 \times 10^{-6}$
100	$1.94 \times 10^4$	0.272	$16.48 \times 10^{-6}$
150	$1.91 \times 10^4$	0.275	$17.22 \times 10^{-6}$
200	$1.88 \times 10^4$	0.279	$17.85 \times 10^{-6}$
250	$1.84 \times 10^4$	0.283	$18.36 \times 10^{-6}$
300	$1.80 \times 10^4$	0.287	$18.79 \times 10^{-6}$
350	$1.76 \times 10^4$	0.291	$19.19 \times 10^{-6}$
400	$1.72 \times 10^4$	0.295	$19.57 \times 10^{-6}$
450	$1.67 \times 10^4$	0.298	$19.93 \times 10^{-6}$
500	$1.62 \times 10^4$	0.302	$20.28 \times 10^{-6}$
550	$1.57 \times 10^4$	0.306	$20.60 \times 10^{-6}$
600	$1.52 \times 10^4$	0.310	$20.87 \times 10^{-6}$
650	$1.47 \times 10^4$	0.314	$21.09 \times 10^{-6}$

Table 4 Material properties of SUS 316 for creep analysis

Candidate creep strain equation of SUS 316 FR stainless steel

$$\epsilon_c = C_1(1 - e^{-r_1 t}) + C_2(1 - e^{-r_2 t}) + \dot{\epsilon}_m t$$

T : Temperature (°C)             $425^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}$

$\sigma$  : Stress ( kgf/mm<sup>2</sup> )         $0.7 \text{ kgf/mm}^2 \leq \sigma$

$t_R$  : Creep rupture time ( hr )

$\dot{\epsilon}_m$  : Steady creep rate ( mm/mm/hr )

t : Time ( hr )

$$t_R \quad \log_{10}(\alpha_c t_R) = -25.82042 + \frac{32232.27}{T + 273.15} - \frac{39.74271}{T + 273.15} \log_{10} \sigma - \frac{3481.803}{T + 273.15} (\log_{10} \sigma)^2$$

$$\dot{\epsilon}_m = 241.33 \cdot \exp\left[-\frac{51222}{8.31 \cdot (T + 273.15)}\right] \cdot t_R^{-1.1032}$$

$$C_1 = 1.2692 \cdot \frac{\dot{\epsilon}_m^{0.74491}}{r_1}$$

$$C_2 = 0.48449 \cdot \frac{\dot{\epsilon}_m^{0.81155}}{r_2}$$

$$r_1 = 103.37 \cdot t_R^{-0.72607}$$

$$r_2 = 17.255 \cdot t_R^{-0.86775}$$

$$\alpha_c = 1.0$$

Table 5 Fatigue properties of SUS 316

Candidate fatigue curve for SUS 316 FR stainless steel  
( identical to that of SUS 304 )

$$(\log_{10}N_f)^{-\frac{1}{2}} = A_0 + A_1 \cdot \log_{10}\Delta\epsilon_t + A_2 \cdot (\log_{10}\Delta\epsilon_t)^2 + A_3 \cdot (\log_{10}\Delta\epsilon_t)^4$$

T : Temperature (°C)  $425^\circ\text{C} \leq T \leq 825^\circ\text{C}$

$\dot{\epsilon}$  : Strain rate ( mm/mm/sec )

$\Delta\epsilon_t$  : Total strain range ( mm/mm )

$N_f$  : The number of cycles to failure

$$A_0 = 1.621827 - 0.4567850 \times 10^{-7} \cdot T^2 \cdot R$$

$$A_1 = 1.131346 + 0.8665061 \times 10^{-8} \cdot T^2$$

$$A_2 = 0.3439663$$

$$A_3 = -0.1374387 \times 10^{-1} + 0.4910723 \times 10^{-4} \cdot R$$

$$R = \log_{10}\dot{\epsilon}$$

Table 6 Creep rupture properties of SUS 316

Creep rupture curve for SUS 316 FR stainless steel

$$(T + 273.15)(\log_{10}(\alpha_R t_R) + C) = A_0 + A_1 \log_{10}\sigma + A_2 (\log_{10}\sigma)^2$$

T : Temperature (°C)  $425^\circ\text{C} \leq T \leq 825^\circ\text{C}$

$\sigma$  : Stress ( kgf/mm<sup>2</sup> )  $2 \text{ kgf/mm}^2 \leq \sigma$

$\sigma$  should not exceed tensile strength.

$t_R$  : Creep rupture time ( hr )

$$C = 25.82042$$

$$A_0 = 32232.27$$

$$A_1 = -39.74271$$

$$A_2 = -3481.803$$

$$\alpha_R = 1.0$$



Table 7 Maximum elastic strains generated at hot transient and cold transient

	$\epsilon_1 (\epsilon_R)$	$\epsilon_2 (\epsilon_z)$	$\epsilon_3 (\epsilon_\theta)$	$\Delta \epsilon_{eq}$
Hot transient	$-2.12 \times 10^{-3}$	$2.70 \times 10^{-3}$	$2.63 \times 10^{-3}$	——
Cold transient	$2.11 \times 10^{-3}$	$-2.59 \times 10^{-3}$	$-2.55 \times 10^{-3}$	——
$\Delta \epsilon_1$	$-4.31 \times 10^{-3}$	$5.29 \times 10^{-3}$	$5.19 \times 10^{-3}$	$6.36 \times 10^{-3}$

unit : mm/mm

Table 8(a) Result of creep-fatigue damage evaluation

Method	q	$\sigma_R$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$K_s'$	$\epsilon_1$ (mm/mm)	$N_F$	$D_F$
Base metal	1.67	67.0	1.31	$9.63 \times 10^{-3}$	1646	0.97
Welded joint-1	2.48	73.8	1.78	$1.31 \times 10^{-2}$	871	1.84
Welded joint-2	3.0	76.7	2.01	$1.48 \times 10^{-2}$	682	2.35

Table 8(b) Result of creep-fatigue damage evaluation

Method	$\sigma_1$ (kg/mm <sup>2</sup> )* <sup>1</sup>	$\Delta D_c$	$D_c$	$D_F + D_c$
Base metal	26.0	$5.68 \times 10^{-5}$	0.09	1.06
	(33.5)	( $4.10 \times 10^{-4}$ )	(0.66)	(1.63)
Welded joint-1* <sup>2</sup>	23.4	$2.05 \times 10^{-5}$	0.03	1.87
	(29.5)	( $2.05 \times 10^{-4}$ )	(0.33)	(2.17)
Welded joint-2* <sup>3</sup>	24.5	$3.44 \times 10^{-5}$	0.05	2.40
	(30.7)	( $3.07 \times 10^{-4}$ )	(0.49)	(2.84)

\*1  $\sigma_1 = \gamma_s \times \sigma_R / 2$  ( $\gamma_s = 1.0$  Base metal,  $\gamma_s = 0.8$  for welded joints)

\*2 Evaluation method of a welded joint subjected to through wall thermal shock.

\*3 Evaluation method of a longitudinal welded joint near the sodium surface level.

\*4 The values in parentheses are evaluated assuming the peak holding.

Heat input was considered using heat transfer element at the inner surface with the specific heat transfer coefficients (Table 1)

Input temperature histories of sodium at the SUS316FR welded pipe part are shown in Table 1

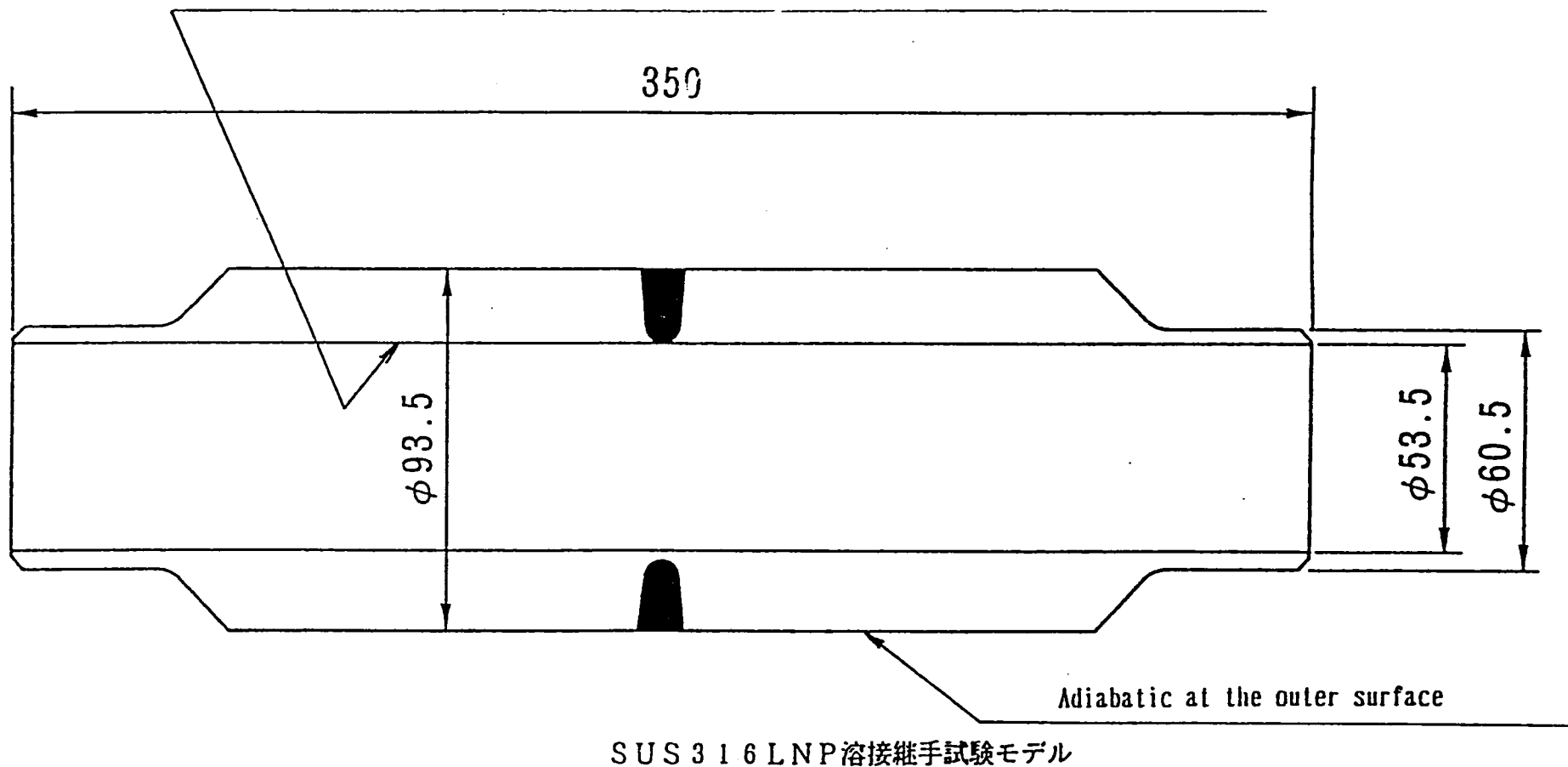
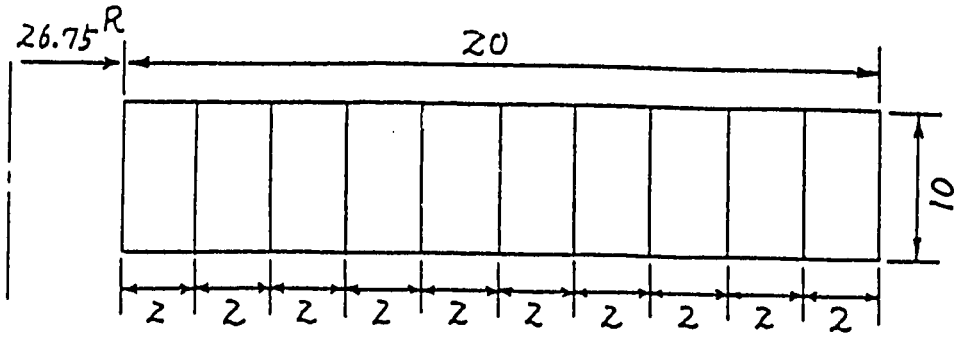
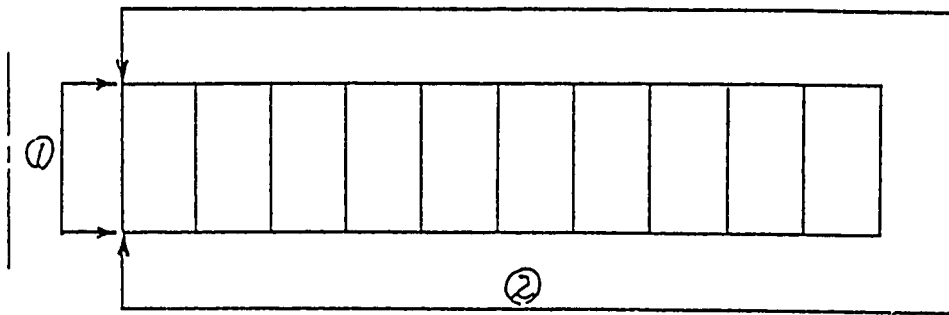


Fig. 1 Configuration of the model ( SUS 316FR welded pipe part )

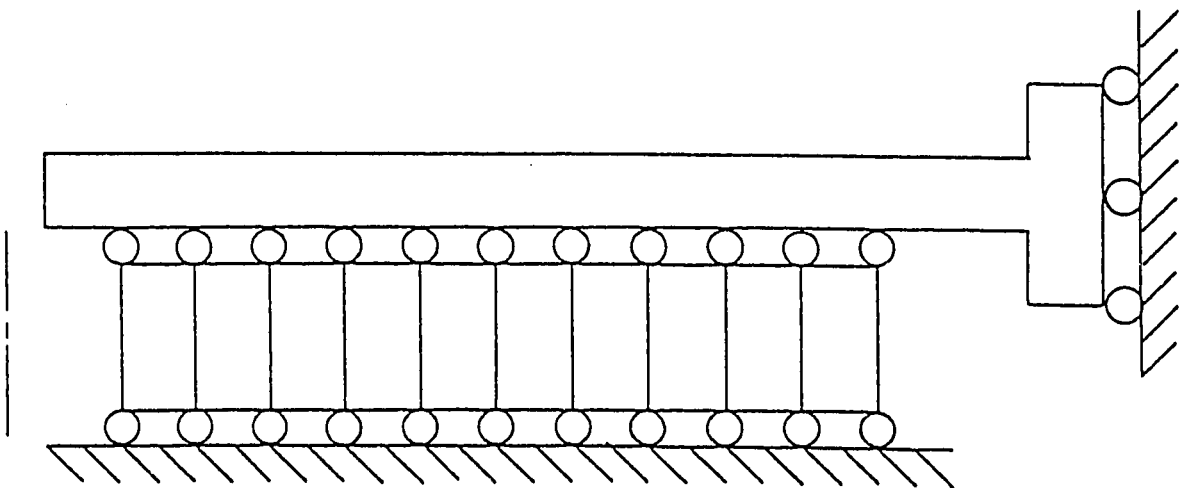


(a) Mesh division

- ① Heat transfer was considered
- ② Adiabatic



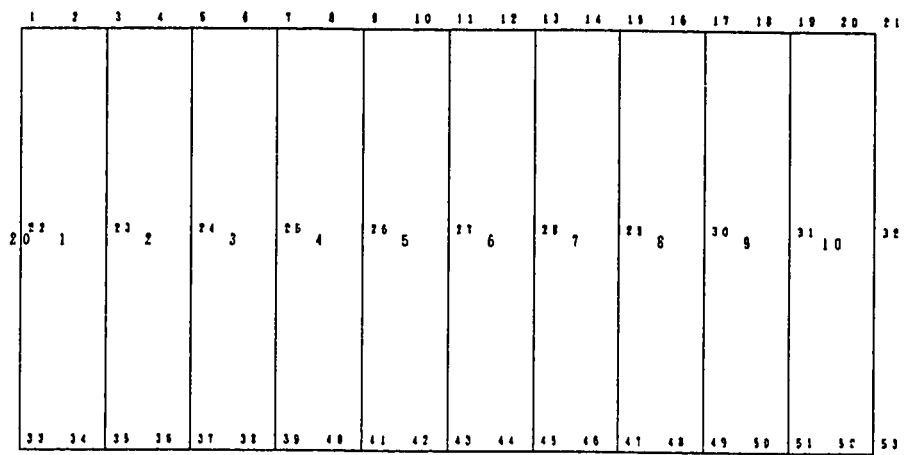
(b) Thermal boundary condition for heat transfer analysis



(c) Mechanical boundary condition for thermal stress analysis

Fig. 2 Analysis model for the SUS316FR welded pipe part model

FINAS




GEOM. SCALE  5.00000

Fig.3 Finite element mesh for the temperature response and elastic stress analysis

SUS316 各温度履歴

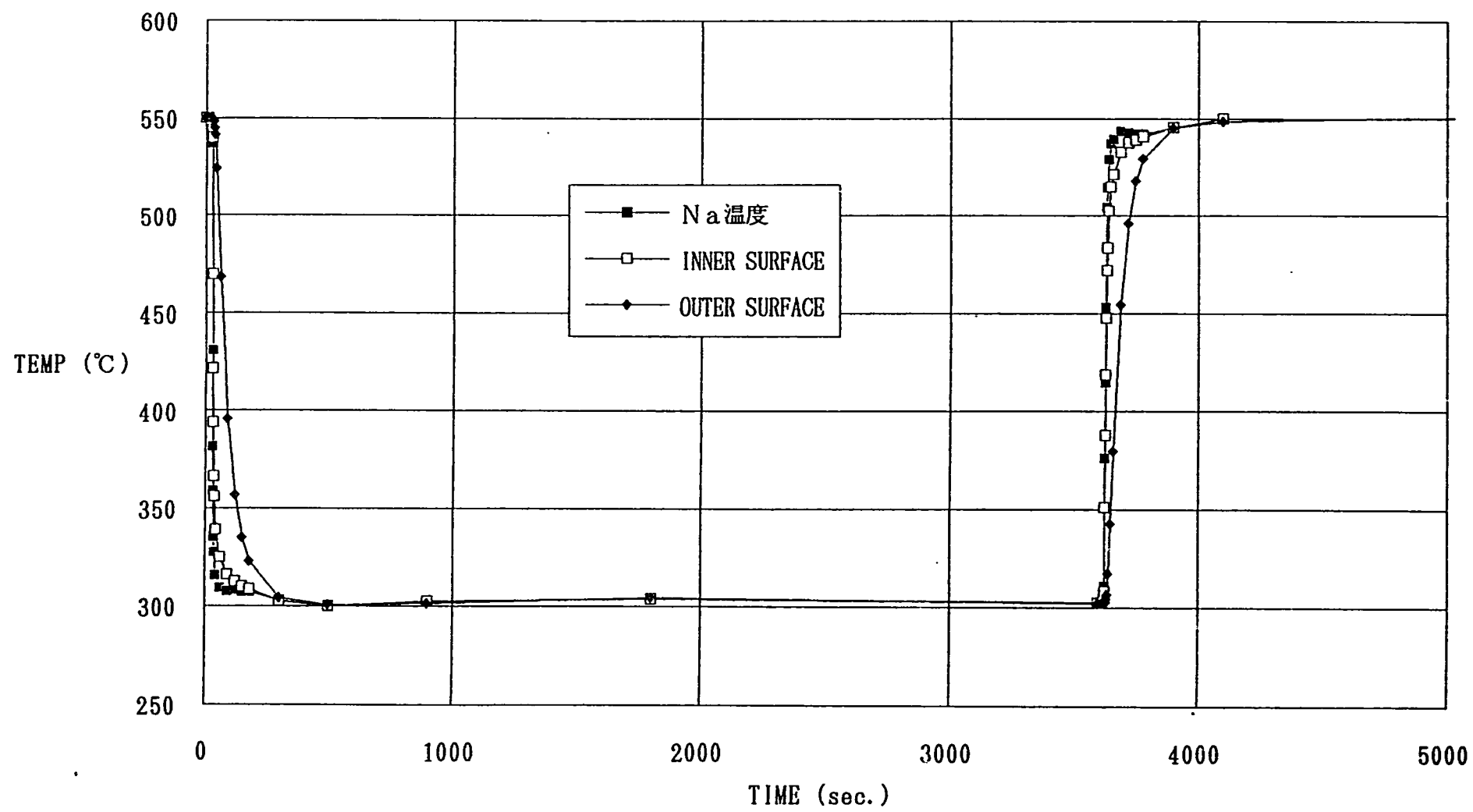


Fig.4 Temperature history of the 316FR welded joint specimen at inner and outer surfaces

FINAS

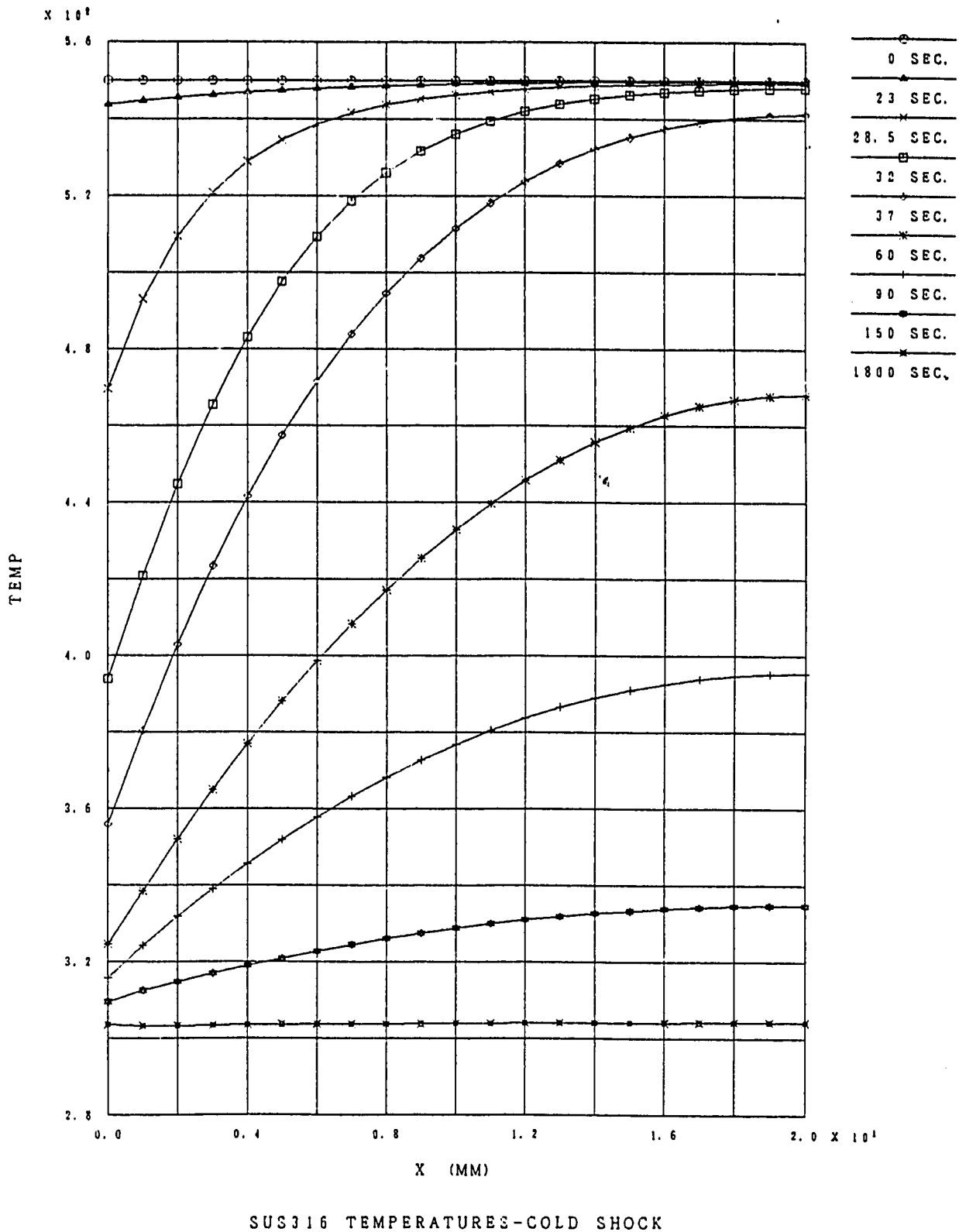
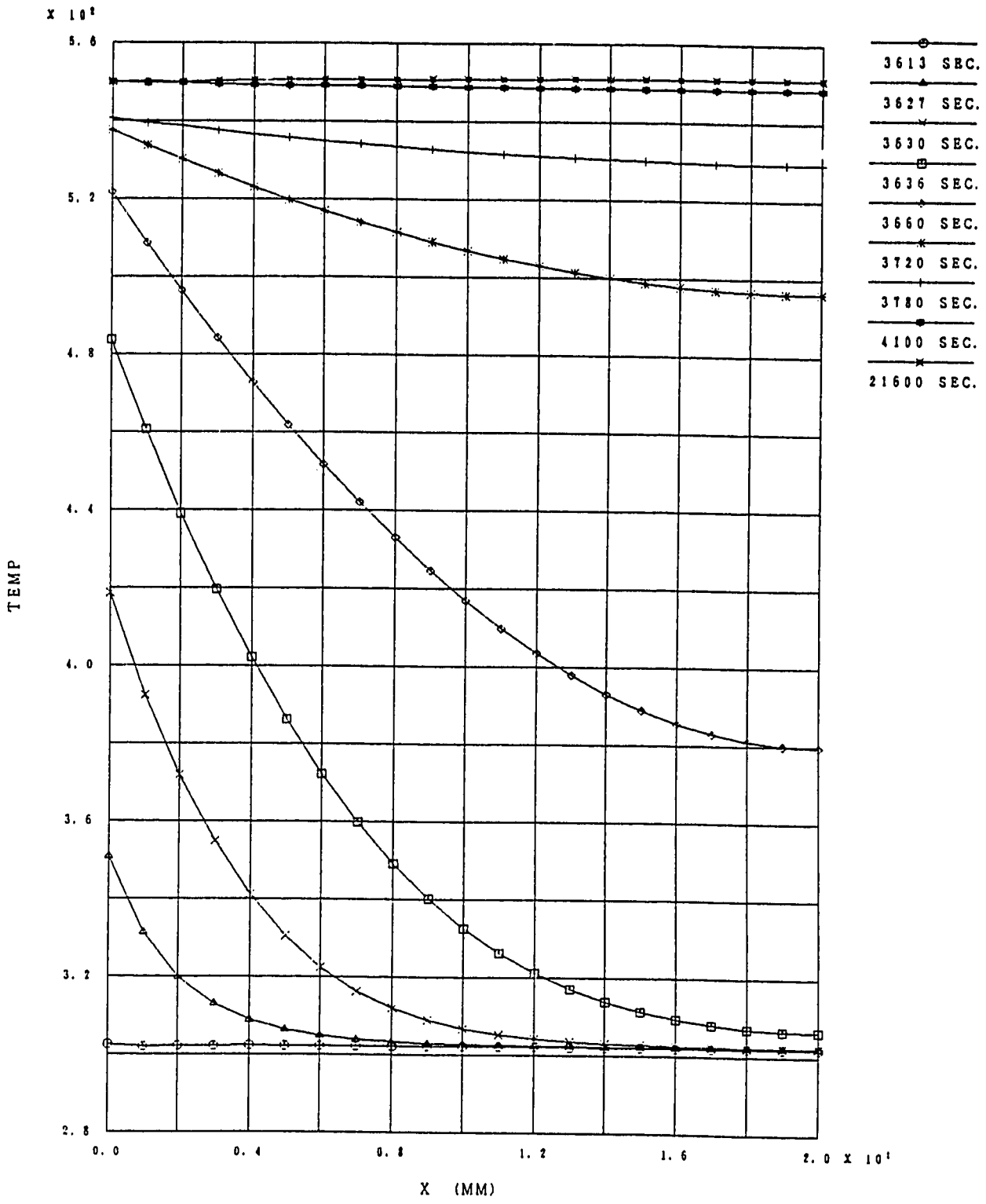


Fig. 5 (a) History of the temperature distribution in the wall of the 316FR welded joint specimen at cold transient

FINAS



SUS316 TEMPERATURES-HOT SHOCK

Fig.5 (b) History of the temperature distribution in the wall of the 316FR welded joint specimen at hot transient

FINAS

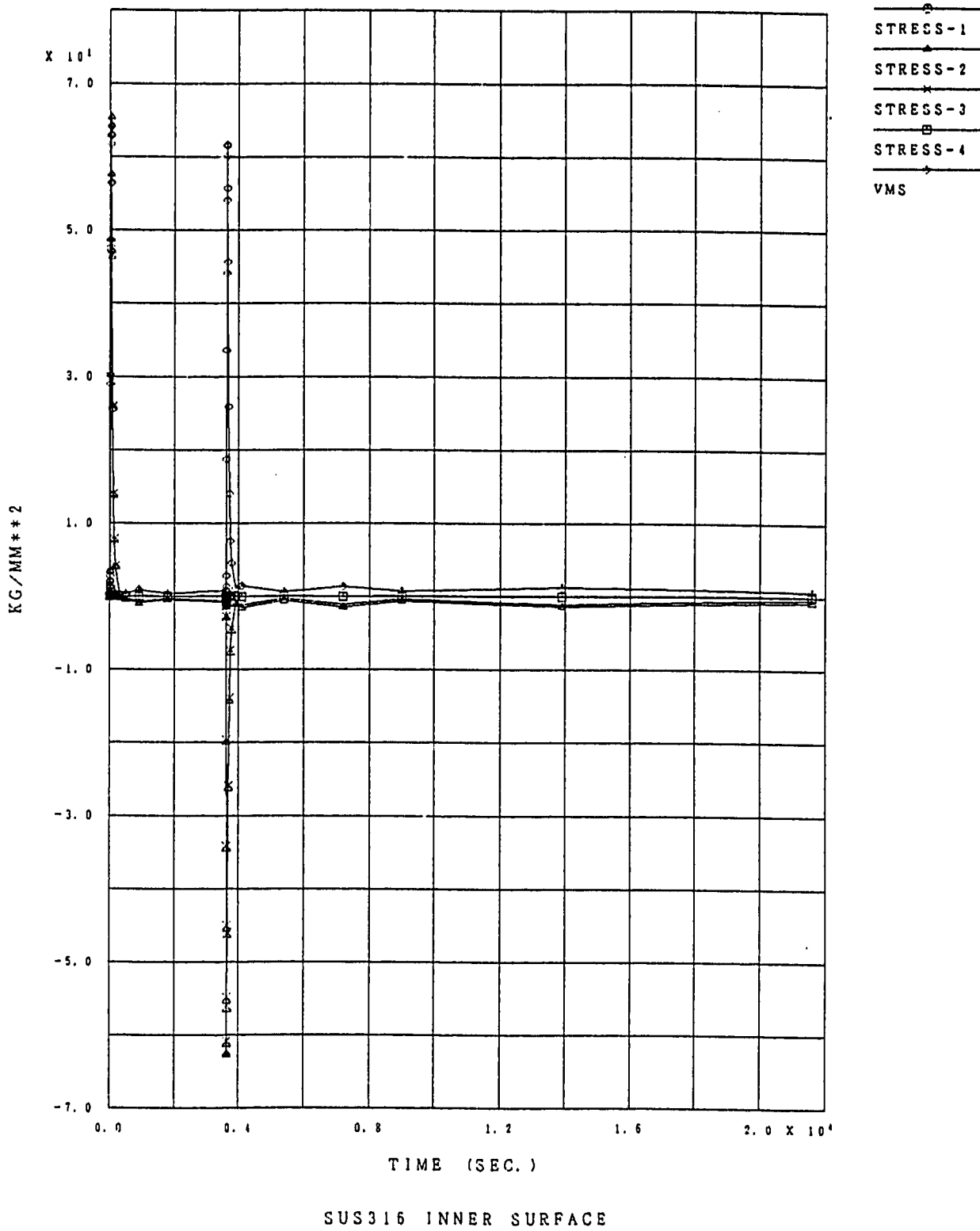


Fig. 6 (a) History of the stresses at the inner surface of the 316FR welded joint specimen



FINAS

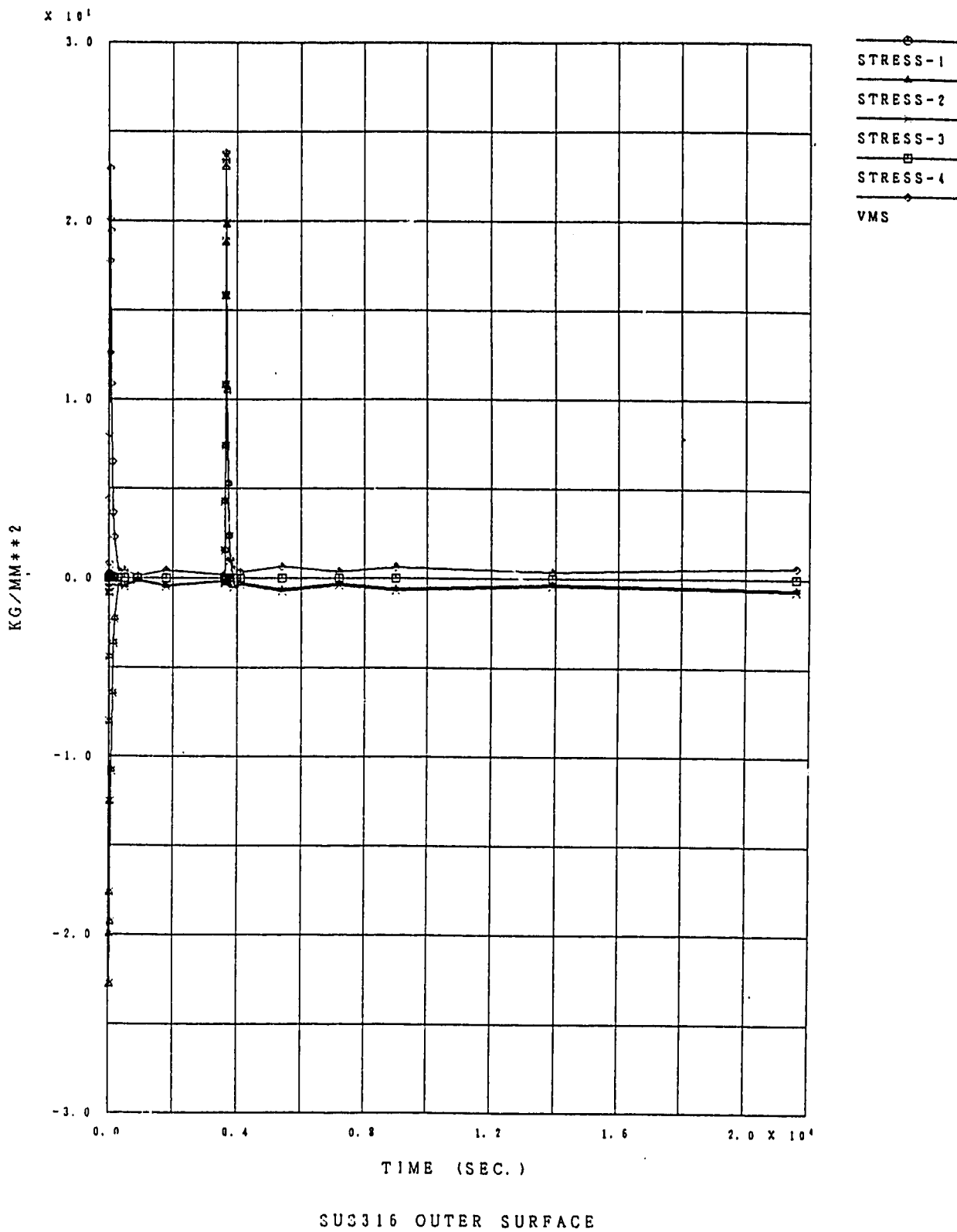


Fig. 6 (b) History of the stresses at the outer surface of the 316FR welded joint specimen

FINAS

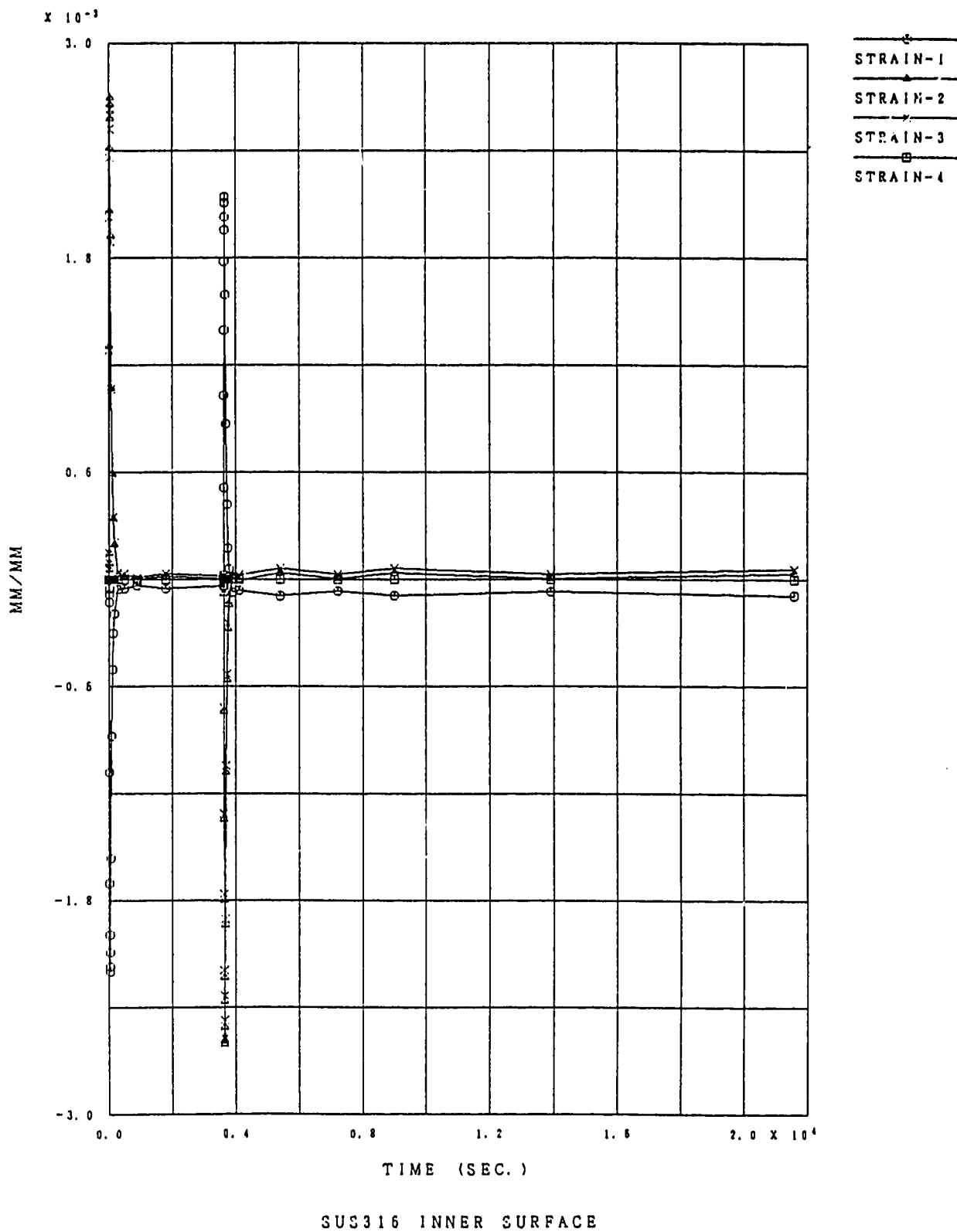


Fig. 7 (a) History of the strains at the inner surface of the 316FR welded joint specimen

FINAS

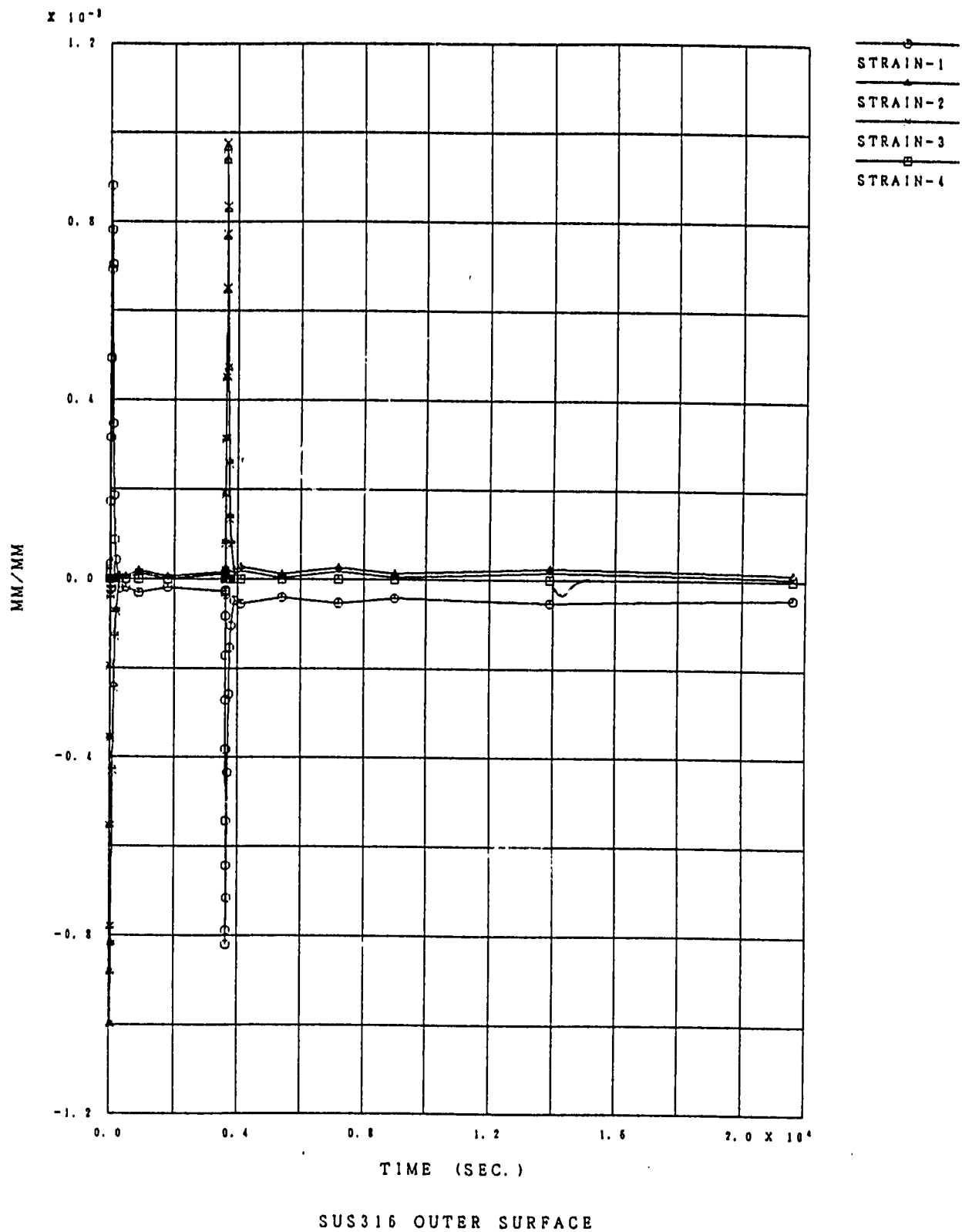
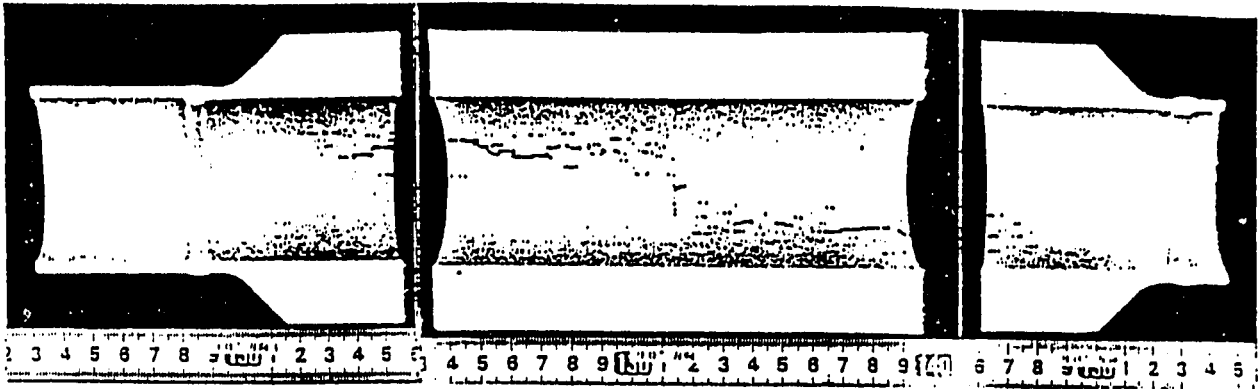
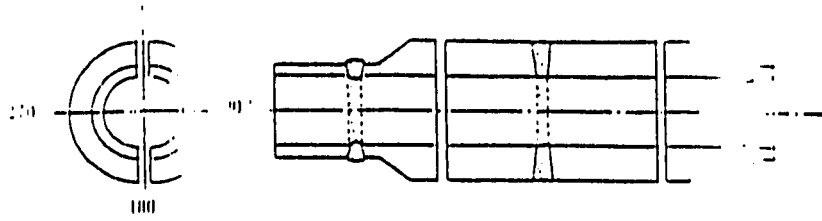
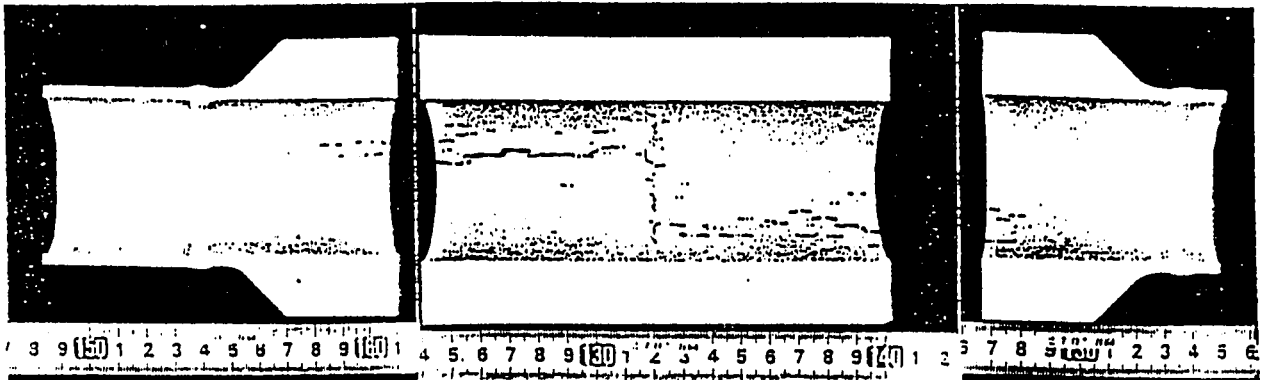


Fig.7 (b) History of the strains at the outer surface of the 316FR welded joint specimen



90° 方向



270° 方向

Photo. 1 Colour check result of the inner surface of the specimen

付録 - A

－繰返し応力・ひずみ関係及びクリープ損傷評価線図－

クリープ疲労損傷評価に用いたSUS316FR鋼の繰返し応力・ひずみ関係とクリープ損傷評価線図を添付する。

- ・ Fig. A-1 繰返し応力・ひずみ関係
- ・ Fig. A-2(a)  $q = 1.67$ に対する簡易クリープ損傷評価線図
- ・ Fig. A-2(b)  $q = 2.5$ に対する簡易クリープ損傷評価線図
- ・ Fig. A-2(c)  $q = 3.0$ に対する簡易クリープ損傷評価線図

A-2

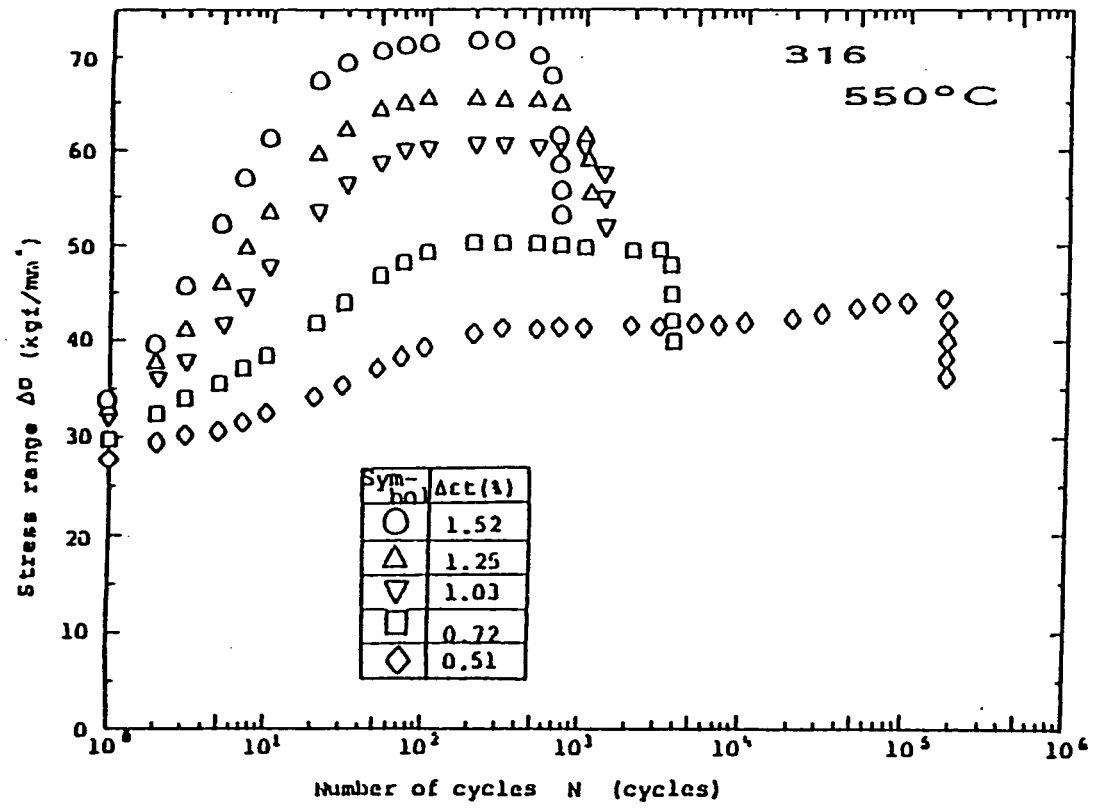


Fig. 2.2 繰返し中の応力範囲の変化, 316 鋼;  
550°C  
Change of stress range during cycling  
for 316 steel at 550°C

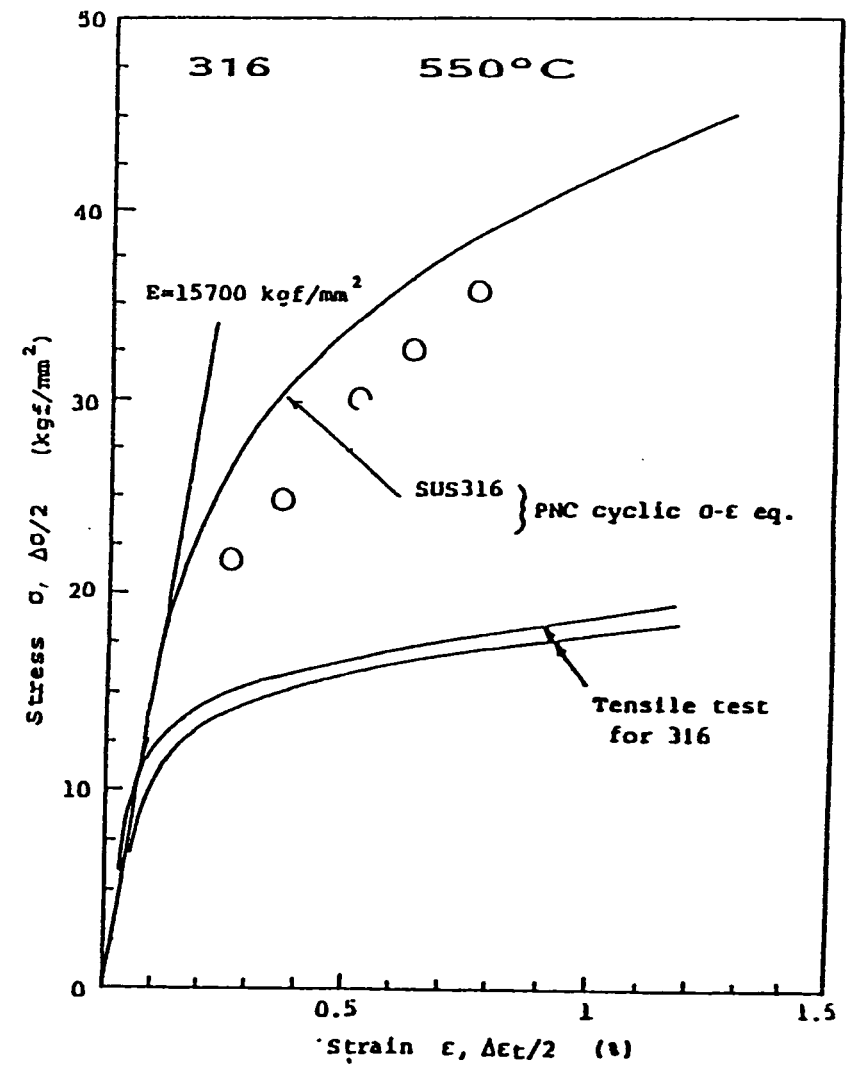


Fig. 2-3 繰返し応力ひずみ曲線 316 鋼  
Cyclic stress strain curve for 316 steel

緩和クリープ損傷 (SUS316FR : 550℃)

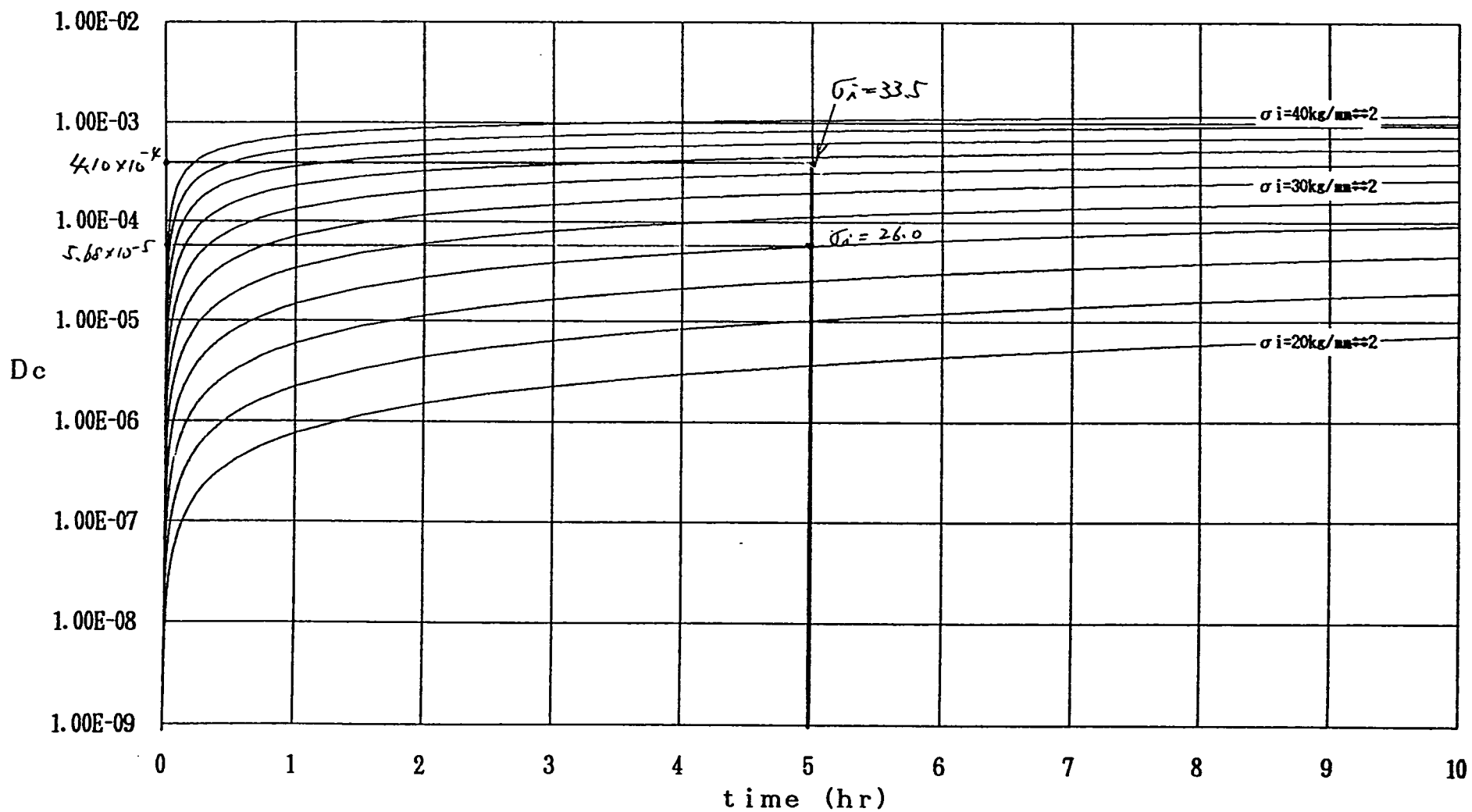


Fig. A-2(a) Creep damage diagram for  $q=1.67$

緩和クリープ損傷 (SUS316FR: 550°C: q = 2.5)

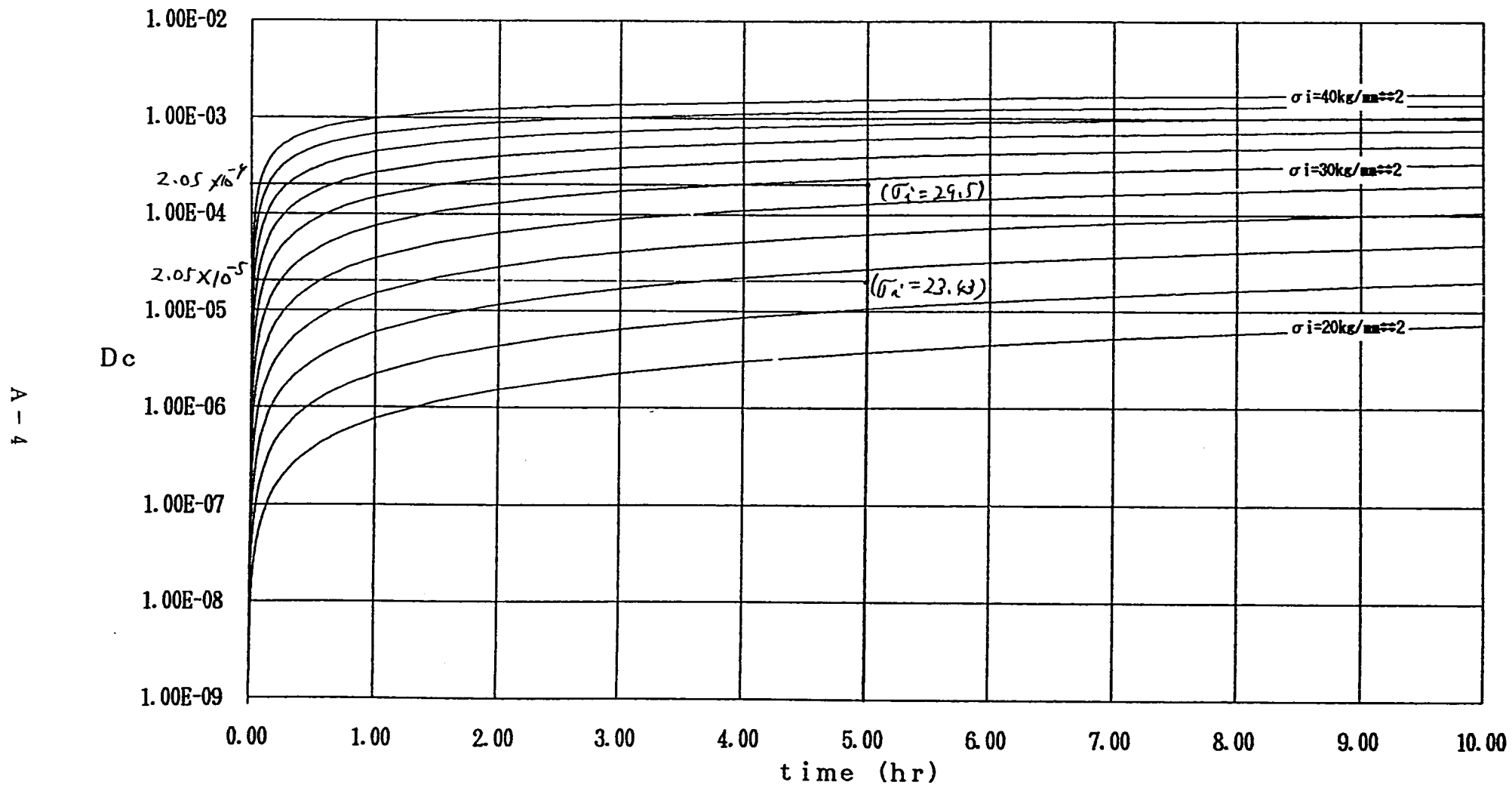


Fig. A-2(b) Creep damage diagram for  $q=2.5$



緩和クリープ損傷 (SUS316FR: 550°C: q = 3.0)

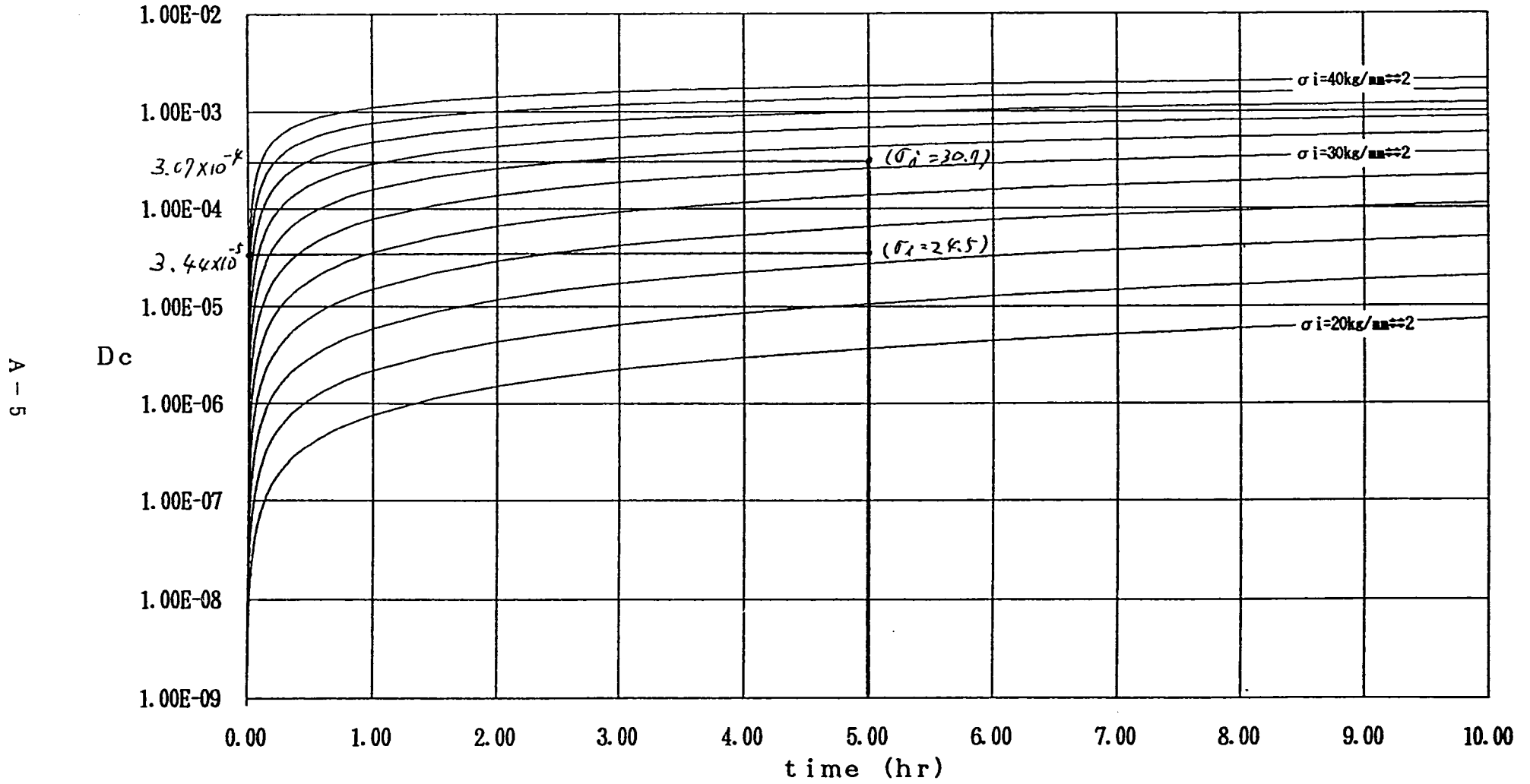


Fig. A-2(c) Creep damage diagram for q=3.0

## 付録 - B

## - 周溶接継手の弾性追従係数の設定根拠 -

溶接継手のクリープ疲労損傷を適切に評価するために、継手部の冶金的不連続と構造不連続の効果を考慮した評価手法の開発を行っている<sup>3) 4) 5) 6) 7)</sup>。過渡熱応力を受ける周方向継手について、容器径D、板厚t、継手幅H、溶金と母材の降伏応力比 $\gamma_r$ 、加工硬化係数H'をパラメータに弾塑性解析を行い、種々の要因によるひずみ集中の影響が調べられている。これらの解析結果は、ひずみ集中係数を以下に示す(B-1)式より求め、弾性追従係数の形で整理されている。

$$K_s' = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_n} \quad (B-1)$$

$K_s'$  : ひずみ集中係数

$\varepsilon_w$  : 継手部のひずみ範囲

$\varepsilon_n$  : 公称ひずみ範囲 (継手が無いとして計算した弾性ひずみ範囲)

弾性追従係数は、以下に示す(B-2)式を逆算することによって求められる。

$$K_s' = 1 + (q_w - 1) \times \left\{ 1 - \frac{2\sigma_r}{S_n} \right\} \quad (B-2)$$

$q_w$  : 継手部の弾性追従係数

$\sigma_r$  : 降伏応力

$S_n$  : 応力強さ範囲

Fig. B-1 及び Fig. B-2 は、降伏応力比 $\gamma_r = 0.8$ の場合に対する解析結果を整理して得られたものである。SUS304鋼の場合、降伏応力比を $\gamma_r = 0.8$ とすれば実際の溶金の弾塑性挙動を保守的に評価できることが材料試験と構造物熱過渡試験データの分析結果からわかっている。SUS316FR鋼については確認されていないが、現状ではこの値を用いるのが最も妥当と考えられる。

Fig. B-1 は、直径2000mm、板厚15mm ( $\sqrt{Dt} = 173.2$ )の容器について、継手幅をパラメータとして得られた弾性追従係数の計算結果を示している。縦軸は溶接継手部の弾性追従係数 $q_w$ で、横軸は継手幅と板厚の比 $H/t$ である。また、Fig. B-2 は弾性追従係数のシェルパラメータ $\sqrt{Dt}$ に対する依存性を示す。縦軸は溶接継手部の弾性追従係数に掛けられる補正係数で、 $\sqrt{Dt} = 173.2$ を基準にとってある。継手部の弾性追従係数は、容器の直径、板厚、継手幅に

依存するが、任意の形状の溶接継手の弾性追従係数がこの二つの図から計算できる。

以下に、SUS316FR鋼溶接継手試験体の弾性追従係数の設定根拠を示す。

SUS316FR鋼溶接継手試験体の形状

- ・直径（内径）：  $D = 53.5 \text{ mm}$
- ・板厚：  $t = 20.0 \text{ mm}$
- ・継手幅：  $H = 11.5 \text{ mm}$

より、継手幅と板厚の比及びシェルラメータはそれぞれ

$$H/t = 0.58$$

$$\sqrt{Dt} = 32.7$$

となる。Fig. B-1 より、 $H/t = 0.58$  に対する弾性追従係数を求めると、 $q_w = 2.75$ となる。

Fig. B-2 より、 $\sqrt{Dt} = 32.7$  に対する補正係数は0.9 であるから、上記の形状を持つ溶接継手の弾性追従係数は  $0.9 \times 2.75 = 2.48$ となる。よって、本文に示したクリープ疲労損傷評価にはこの値を用いた。

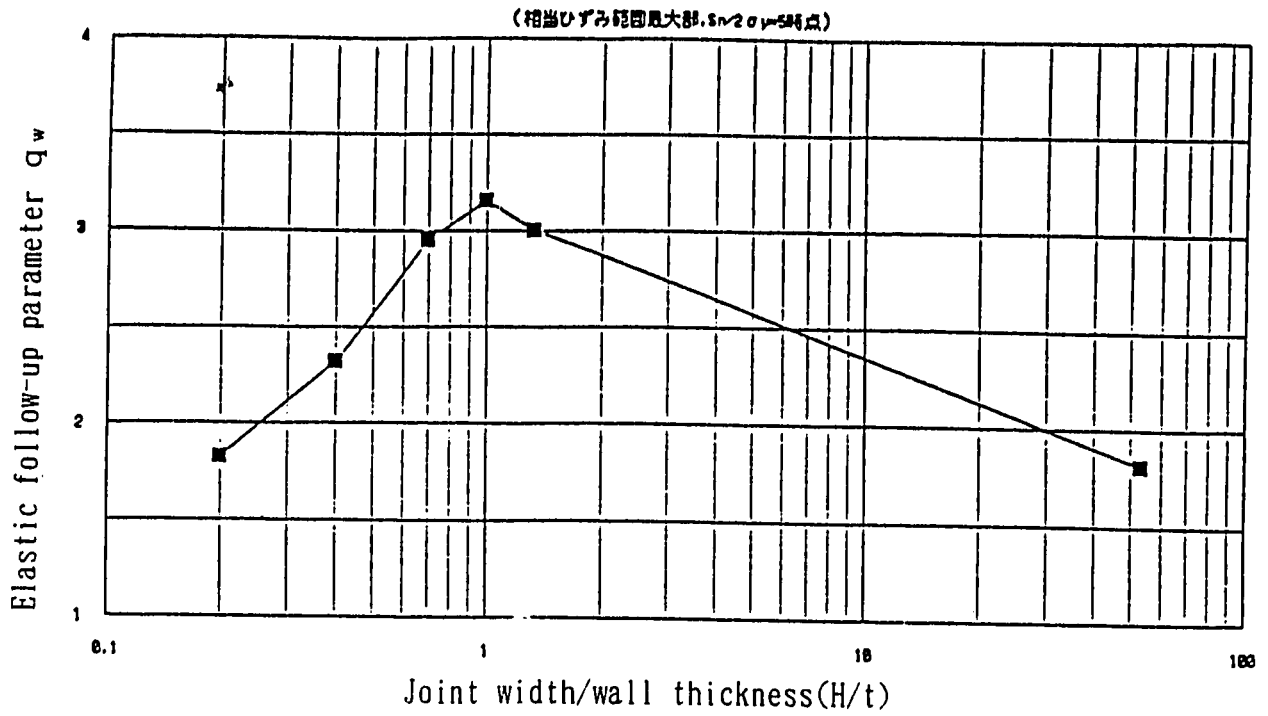


Fig. B-1 Dependence of the elastic follow-up parameter on the welding joint width

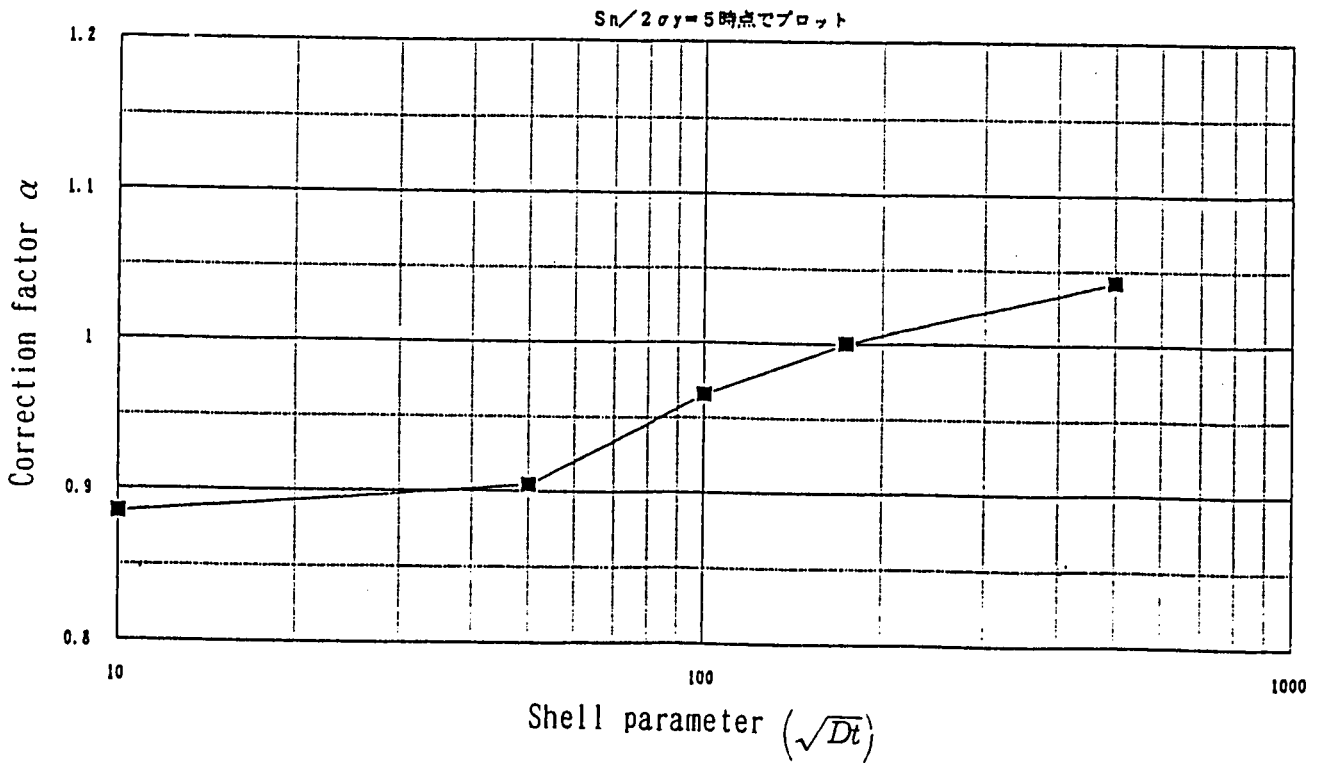


Fig. B-2 Dependence of the elastic follow-up parameter on the shell parameter