

Mod. 9 Cr-1 Mo 鋼 (NT) 設計疲労線図(1991年度暫定値) の策定

1992年3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)

Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT) の設計疲労線図(1991年度暫定値)の策定

小峰 龍司^{*}、川崎 弘嗣^{*}、青砥 紀身^{*}、
吉田 英一^{*}、一宮 正和^{**}、和田 雄作^{*}

要 旨

Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の許容ひずみ範囲は、平成元年度に材料強度基準等の高度化の中で、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼(NT)の値を代用して暫定値として与えてきた。これは、最適疲労破損式を定式化するためのMod. 9Cr-1Mo 鋼に対する疲労試験データが少なかったことと、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼(NT)の値を用いれば保守的に評価できるとの考え方からである。そこで、Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)について、クリープ疲労評価法の高度化の一環として、低サイクル疲労試験ならびに低ひずみ速度疲労試験や高サイクル疲労試験を実施し、本鋼における最適疲労破損式の策定と許容ひずみ範囲 ε_1 の暫定値を新たに提案した。

- (1) 最適疲労破損式の策定は、温度依存性やひずみ速度依存性を考慮するため、Mod. 9Cr-1Mo 鋼と類似鋼種である $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の疲労特性が有効であると判断し、同鋼の最適疲労破損式をベースに、汎用回帰解析により当てはめ性や温度・速度依存性の記述性等の検討を行った。その結果、高サイクル側に到るまでMod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労特性を適切に評価する最適疲労破損式が得られた。
- (2) Mod. 9Cr-1Mo 鋼に対する許容ひずみ範囲 A, B, C 線図(暫定値)を、新しい最適疲労破損式によって提案した。
- (3) 今回提案する 375°C の Mod. 9Cr-1Mo 鋼の許容ひずみ範囲に対し、従来暫定的に用いられてきた低合金鋼に対する通商産業省告示の設計基準線は非常に控え目で、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労特性はこの基準線を大きく上回っていることがわかった。また、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の設計疲労線図を告示で新たに規定する場合には、現在の低合金鋼に対する許容値よりもかなり高い値(10^6 サイクルでひずみ範囲にして約 2 倍)に改定できるものと考える。

* 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室

** 大洗工学センター 技術開発部 プラント工学室(1992年 4月から)

Determination of 1991 Interim Standard Values of Design Fatigue Curve for Mod.9Cr-1Mo (NT) steel

Ryuji Komine*, Hirotugu Kawasaki*, Kazumi Aoto*,
Eiichi Yoshida*, Masakazu Ichimiya**, Yusaku Wada*

Abstract

The allowable strain range ε_a of Mod.9Cr-1Mo (NT) steel has been substituted by that for $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo(NT)steel in last version of material strength standard in 1989. Because of the a small amount of fatigue test data on Mod.9Cr-1Mo(NT)steel, it is difficult to determine the best fit curve and allowable strain range ε_a of Mod.9Cr-1Mo (NT) steel can be evaluated conservatively by the values of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo (NT)steel.

Low-cycle fatigue tests by various strain rates and the high-cycle fatigue tests were carried out to determine the new best fit fatigue life equation of this material.

In this report, the fatigue life equation of Mod.9Cr-1Mo(NT)steel is and the interim new version of allowable strain range is proposed. The obtained results are as follows,

- (1) In the best fit fatigue life equation of Mod.9Cr-1Mo(NT)steel the effects by both of the temperature and low strain rate should be considerd. As the analytical methods to consider these dependency in the faitigue life equation, the correlation to the fatigue properties of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo(NT)steel is examined. Some data fitting methods based on the fatigue equation for $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo(NT)steel are tried and compared. One of these methods could give a good prediction for the fatigue properties of the Mod.9Cr-1Mo (NT)steel up to high cycle range.
- (2) The interim standard of allowable strain ranges A , B and C (for strain rate of 10^{-3} , 10^{-6} and 10^{-8} s^{-1}) for Mod.9Cr-1Mo(NT)steel could be proposed by the new best fit fatigue life equation.

- (3) The proposed allowable strain range at 375°C was compared to the present design fatigue curve of low alloy steel of MITI Notice No501, and it was clarified that the fatigue strength of Mod. 9Cr-1Mo steel was too higher. The design fatigue curve for Mod. 9Cr-1Mo(NT)steel will be revised to higher design value (twice for strain range at 10⁸cycles) than the present design fatigue curve of low alloy steel.

* Materials Development Section, Systems and Components Division, O-arai Engineering Center.

** Plant Engineering Office, Technology Development Division, O-arai Engineering Center. (from April. 1992)

目 次

1. はじめに	1
2. Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の疲労試験データベースの作成	2
2-1 収集試験データ	2
2-2 試験データの選別と疲労試験データベースの作成	2
3. 最適疲労破損式の策定	4
3-1 最適疲労破損式の策定方法	4
3-2 最適疲労破損式の策定結果	5
4. 許容ひずみ範囲の策定(別表と別図)	7
4-1 訸容ひずみ範囲の策定	7
4-2 告示との整合性	7
5. まとめと今後の課題	8
6. 参考文献	9
付録	41
付録-1 管仕様材料の低サイクル疲労特性の取扱い	41
付録-2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼大気中高温高サイクル疲労試験方法	47

表 リスト

表-1 供試材の化学成分	1 0
Table 1 Chemical compositions of test materials.	
表-2 供試材の機械的特性および熱処理条件	1 1
Table 2 Mechanical properties and heat treatment conditions of test materials.	
表-3 除外試験データリスト	1 2
Table 3 List of excluded fatigue test data.	
表-4 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の疲労試験データ出典リスト	1 3
Table 4 List of fatigue test data source for Mod. 9Cr-1Mo(NT)steel.	
表-5 疲労試験データ点数リスト	1 4
Table 5 List of fatigue test data points.	
表-6 回帰手法	1 5
Table 6 Conditions for regression analysis.	
表-7 回帰結果	1 5
Table 7 Results of regression analysis.	
表-8 回帰結果の総合評価	1 6
Table 8 Evaluation on results of regression analysis.	
表-9 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の最適疲労破損式	1 7
Table 9 Best fit fatigue life equation of Mod. 9Cr-1Mo(NT)steel.	

図 リスト

図-1 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の温度依存性	1 8
Fig. 1 Dependence on temperature for Mod. 9Cr-1Mo(NT) steel.	
図-2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)のひずみ速度依存性	1 8
Fig. 2 Dependence on strain rate for Mod. 9Cr-1Mo(NT) steel.	
図-3 標準偏差と等価温度との関係	1 9
Fig. 3 Relationship between standard deviation and equivalent temperature.	
図-4 各ケースと疲労寿命の関係	1 9
Fig. 4 Relationship between fatigue lives of regression analysis results and test data.	
図-5 各ケースと温度依存性の関係	2 0
Fig. 5 Relationship between temperature dependence of regression analysis results and test data.	
図-6 各ケースとひずみ速度依存性の関係	2 0
Fig. 6 Relationship between strain rate dependence of regression analysis results and test data.	
図-7 ケースAにおける疲労寿命の予測	2 1
Fig. 7 Predictability of fatigue life by CASE A	
図-8 ケースBにおける疲労寿命の予測	2 1
Fig. 8 Predictability of fatigue life by CASE B	
図-9 ケースCにおける疲労寿命の予測	2 3
Fig. 9 Predictability of fatigue life by CASE C	
図-10(1) ケースD 1における疲労寿命の予測	2 4
Fig. 10(1) Predictability of fatigue life by CASE D1	
図-10(2) ケースD 2における疲労寿命の予測	2 5
Fig. 10(2) Predictability of fatigue life by CASE D2	
図-11(1) A線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (375°C)	2 6
Fig. 11(1) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 375 °C (strain rate ; 0.1%/sec).	
図-11(2) A線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (500°C)	2 6
Fig. 11(2) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 500 °C (strain rate ; 0.1%/sec).	
図-11(3) A線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (600°C)	2 7
Fig. 11(3) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 600 °C (strain rate ; 0.1%/sec).	
図-12(1) B線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (375°C)	2 8
Fig. 12(1) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 375 °C (strain rate ; 0.0001%/sec).	

図-12(2) B線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (500°C)	28
Fig. 12(2) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 500 °C (strain rate ; 0.0001%/sec).	
図-12(3) B線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (600°C)	29
Fig. 12(3) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 600 °C (strain rate ; 0.0001%/sec).	
図-13(1) C線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (375°C)	30
Fig. 13(1) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 375 °C (strain rate ; >0.0001%/sec).	
図-13(2) C線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (500°C)	30
Fig. 13(2) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 500 °C (strain rate ; >0.0001%/sec).	
図-13(3) C線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (600°C)	31
Fig. 13(3) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 600 °C (strain rate ; >0.0001%/sec).	
図-14(1) ケースCに対する許容ひずみ範囲 (告示との整合性考慮)	32
Fig. 14(1) Allowable strain range by CASE C (consideration of consistency to MITI Notice).	
図-14(2) ケースCに対する許容ひずみ範囲 (告示無し)	32
Fig. 14(2) Allowable strain range by CASE C (consideration of separation from low alloy steel).	
図-15 375°C以下の疲労寿命特性	33
Fig. 15 Comparison of observed fatigue life with best fit curve (CASE C) at R.T~375°C.	

別表と別図

別表1 許容ひずみ範囲 ε_t (A)	3 5
App. Table 1 Allowable strain range ε_t (A)	
別表2 許容ひずみ範囲 ε_t (B)	3 6
App. Table 2 Allowable strain range ε_t (B)	
別表3 許容ひずみ範囲 ε_t (C)	3 7
App. Table 3 Allowable strain range ε_t (C)	
別図1 訸容ひずみ範囲 ε_t (A)	3 8
App. Fig. 1 Allowable strain range ε_t (A)	
別図2 訸容ひずみ範囲 ε_t (B)	3 9
App. Fig. 2 Allowable strain range ε_t (B)	
別図3 訸容ひずみ範囲 ε_t (C)	4 0
App. Fig. 3 Allowable strain range ε_t (C)	

1. はじめに

大型炉の蒸気発生器（S G）用材料として使用が予定されているMod. 9Cr-1Mo 鋼に関して、大型炉への適用性を明確にし、併せて高温構造設計評価に必要となる材料強度基準に反映させることを目的として、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の管、伝熱管、鋼板および鍛鋼品等の4製品形状について、試験計画に基づいた大気中および各種環境下での基本材料特性試験として一連の高温強度試験を実施してきた。

Mod. 9Cr-1Mo 鋼に関しては、昭和60年度にMod. 9Cr-1Mo 鋼の基準値の試算を行い、昭和61年度にその見直し結果をまとめて、これまでの設計研究用に供されてきた。さらに、平成元年には、クリープひずみ挙動データの蓄積を背景に、緩和クリープ損傷係数の見直しを行い、従来の試算値に対しその余裕度の適性化を図り、暫定値として提案されている。⁽¹⁾しかし、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の許容ひずみ範囲（設計疲労線図）の策定に関しては、従来の⁽²⁾2^{1/4}Cr-1Mo鋼の設計値をそのまま準用する方法を採用してきた。これは、最適疲労破損式を定式化するための本鋼に対する疲労試験データが少なかったためと、2^{1/4}Cr-1Mo鋼の値を用いれば十分に保守的であるとの考え方からであった。しかし近年、大型炉の設計研究が進められるに従い、クリープ疲労評価における設計裕度の合理化から許容ひずみ範囲の見直しが、さらにSG伝熱管におけるDNB評価やSG管板周辺におけるサーマルストライピング評価等に必要な高サイクル領域での設計対応を図ることがそれぞれ必要となってきている。

本報告は、これまでに得られたMod. 9Cr-1Mo 鋼の低サイクル疲労試験結果を中心に、高サイクル疲労領域への外挿や低ひずみ速度領域への外挿を、限られたデータベースの活用と既存の2^{1/4}Cr-1Mo鋼のデータとのアナロジイに基づいた最適な疲労破損式を提案し、その特性式により許容ひずみ範囲の暫定値策定を行ったものである。

2. Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の疲労試験データベースの作成

2-1 収集試験データ

今回の許容ひずみ範囲の策定には、下記のように、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の各供試材（9ヒート）に対して、平均ひずみ「零」の単軸引張・圧縮の三角波・定ひずみ制御で得られた疲労試験データを採用した。データベースは、ひずみ速度を0.1%/sec、破損繰り返し数が 10^6 cyclesまでの試験データを中心とした。また、ひずみ速度の効果を考慮するため、低ひずみ速度側の0.01%/sec～0.0001%/secまでのデータを用いた。さらに実機S Gの管に対するDNBポイント等の問題に対する高サイクル疲労評価の信頼性を確保するために、高サイクル側をひずみ速度1.0%/secの条件で試験を行ったデータを用いた。試験温度は、550°Cを中心に400°Cから650°Cまでの適用温度範囲を対象とし、さらに温度依存性を把握するため、室温から400°Cまでの温度域の試験データも対象とした。

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| (1) 供試材 | Mod. 9Cr-1Mo 鋼 |
| (2) 製品形状 | 4形状 (管形状材、伝熱管相当板、熱間圧延材(板)、鍛鋼品) |
| (3) ヒート数 | 9ヒート |
| 供試材の化学成分および製造条件と機械的特性を表-1および表-2に示す。 | |
| (4) 制御方式 | ひずみ制御 |
| (5) 負荷波形 | 三角波 |
| (6) ひずみ速度 | 1.0%/sec～0.0001%/sec |
| (7) 試験温度 | 室温～650°C |

2-2 試験データの選別と疲労試験データベースの作成

収集試験データに対し、動燃事業団が主として取得したF6材(鋼板)を基幹データとし、各ヒート、試験機関等による試験データのばらつきを調査した。その中で、試験機関、試験温度ともに同じでありながら、基幹データの母集団から1オーダ以上疲労寿命の低下が認められた試験データ1点があり、解析上不都合が生じないことから、これをデータベースから除外した。また、管形状試験片のデータは、FME委員会でも検討されたように(付録-1参照)、試験片内面仕上げ粗さ精度等の試験片製作上の問題で、板材等の他の製品形状の試験データと比較して、疲労寿命が低下する傾向を示していた。このため、管形状試験片デ

ータ 12 点をデータベースより除外した。除外された試験データリストを表-3 に示す。また、高サイクル疲労試験データに関しては、長時間に及ぶ試験のため試験機の精度維持等を図る必要から、定期点検等の止むを得ない事情から、試験を中断停止することがある。今回得られた試験データに関しても中断停止、再復帰等の作業を試験途中に実施している。このため、これらの影響による疲労寿命の低下がないことを確認し、今回の試験データベースとして加えた。高サイクル疲労寿命に及ぼす中断・復帰の影響について、試験方法から整理し、付録-2 に参考としてまとめた。

これらの結果、通常の低サイクル疲労試験データは 174 点、低ひずみ速度疲労試験データは 10 点、高サイクル領域の疲労試験データは 7 点で、合計 191 点を試験データベースとして解析に供した。

試験データの出典として材料開発室内部実施試験ならびに成果報告書一覧を表-4 に、疲労試験データ点数のまとめを表-5 に示す。

3. 最適疲労破損式の策定

3-1 最適疲労破損式の策定方法

ORNL提案のMod. 9Cr-1Mo鋼の最適疲労線図は、温度効果やひずみ速度効果に対しては影響がないものとして、1本の最適疲労線図で表されている。しかし、今回収集されたMod. 9Cr-1Mo鋼のデータベースを用いた解析結果では、図-1に示すように、従来鋼でみられたような温度効果が認められている。また、ひずみ速度の効果は、図-2に示すように、全ひずみ範囲1.0%では、低ひずみ速度側になるに伴い疲労寿命が低下する傾向を示しているが、0.5%ではその傾向が逆転しており、的確にひずみ速度効果を評価することは困難であった。しかし、許容ひずみ範囲を策定する上では、データのない低ひずみ範囲、低ひずみ速度領域での寿命を安全側に見積り、 10^6 サイクルを越える高サイクル領域までの適用を図る必要がある。このため、類似鋼種であり、かつMod. 9Cr-1Mo鋼に対して保守的な評価を与えることができる $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼のひずみ速度効果を取り入れ、従来の解析手法の一つである寿命比や等価温度の補正を行う方法を採用した。これにより、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の疲労破損式とMod. 9Cr-1Mo鋼のデータベースから、汎用回帰式によって適切な定数項を選定し、温度効果、ひずみ速度効果、さらに高サイクル側への外挿信頼性を考慮しつつMod. 9Cr-1Mo鋼の特性を活かした回帰式の策定を試みた。

最適疲労破損式の策定方法としては、表-6に示すように従来の $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の破損式やデータを用いたケースAからケースDの4つの方法を提案した。各ケースの概略を以下に示す。

- (1) ケースA ; $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼とMod. 9Cr-1Mo鋼との疲労強度差が温度に換算して約50°C差であることから、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の式を50°C平行移動させる。
- (2) ケースB ; ひずみ軸に対し、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の式を平行移動させる。
- (3) ケースC ; $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の式中の定数項を平行移動させる。
- (4) ケースD ; 不足しているひずみ速度のデータに対し、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の速度効果データを50°C読み換えて借用し、従来行ってきた汎用回帰解析手法に基づいて求める。なお、D1およびD2については、それぞれ温度やひずみ速度の定数項が最適と思われるものを選んで適用する。

なお、ケースAに対する温度差(約50°C)については、図-3に示すように標準偏差(S.E.E.)と温度差をパラメータにて確認した。標準偏差(S.E.E.)は、以下の式により求

めた。

$$SEE = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 / (n - m - 1)}$$

ただし、 x_j ; $\log_{10}(Nf_{obs} / Nf_{cal})$
 Nf_{obs} ; 実験値 Nf_{cal} ; 計算値 \bar{x} ; $\sum_{j=1}^n x_j / n$
 n ; データ数 m ; 自由度

この結果、概ね 50°C から 70°C で最も当てはめ性が良く、保守性を考慮してその温度を 50°C として解析に供したものである。

3-2 最適疲労破損式の策定結果

適用温度範囲を 400°C から 650°C とし、それぞれのケースで求めた最適疲労破損式を表-7 に示す。また、各ケースにおける疲労寿命の比較を図-4 に、温度依存性の比較ならびにひずみ速度依存性の比較を図-5、図-6 にそれぞれ示す。また、ケース毎に、疲労破損式の予測精度を図-7 から図-10 に示す。各ケースの優劣を比較するため、表-8 に示すような 4 つの項目を設け評価した。

これらの結果、

- (1) ケース A ; 評価項目①～④に対し、良好な適合性を示した。しかし、実験点に対する寿命予測線は、やや控え目な線となっている。
- (2) ケース B ; 高サイクル側の評価が保守的な評価にならず信頼性に欠ける。
- (3) ケース C ; 評価項目①～④に対し、良好な適合性を示した。特に、実験点に対する寿命予測線は良好な当てはめ性を示した。
- (4) ケース D ; 高サイクル側の評価が保守的にならず、また、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の許容値に対する合理化が図れない。

これらから、一部主観的な見方で評価した項目もあるが、ほぼそれぞれの優劣は比較できているものと考える。このように総合的な観点から、ケース A とケース C が最も適切な手法と判断した。

提案した策定方法の中で最も当てはめ性のよかったケース A とケース C に関し、設計疲労線図の A 線図、B 線図、C 線図に相当するひずみ速度の最適疲労線図を比較した。これらの結果、ケース A およびケース C の疲労線図は、図-11 から図-13 に示すように、いずれも $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の最適疲労線図よりも高めであり、高サイクル側では、ケース A よりケース C

の方がやや控え目な線となり保守的であった。また寿命予測線からもケースCの方が当てはめ性が良いことから、今回、暫定値として、ケースCの手法を提案するものとした。ケースCの最適疲労破損式を表-9に示す。

4. 許容ひずみ範囲の策定 (別表と別図)

4-1 許容ひずみ範囲の策定

今回提案された最適疲労破損式より、従来と同じ方法を用いて、最適疲労線の $\Delta \varepsilon_i$ に 2 と N_f に 20 のファクタを掛け合わせてフェアリングし、許容ひずみ範囲 ε_i (暫定値) を策定した。許容ひずみ範囲は、A線図 (10^{-3}mm/mm/sec 以上) と B線図 (10^{-6}mm/mm/sec 以上) 、C線図 (10^{-8}mm/mm/sec 以上) に分け、それぞれ別表 1～3 と別図 1～3 にそれぞれ示した。

4-2 告示との整合性

Mod. 9Cr-1Mo 鋼の告示化については、現在、別途検討を行っている段階である。平成元年度に材料強度基準等の高度化の中⁽²⁾で暫定的に用いられてきた $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼等の低合金鋼に対する告示の線 (375°C) と今回策定したMod. 9Cr-1Mo 鋼の許容ひずみ範囲を併せて図-14(1)、(2)に示した。図-14(1)は、告示を考慮した線図であり、400°C以下の線が告示の線を越えないものとしてフェアリングしたものである。図-14(2)は、告示の線とは無関係に375°Cから650°Cまでの線をフェアリングしたものである。現在の低合金鋼に対する告示の線は、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の許容値と比較すると非常に控え目であり、告示との整合性を考慮すると Mod. 9Cr-1Mo 鋼の優れた疲労特性を生かしきれていないことがわかった。また、図-15に示すように室温から300°Cまでの試験データと375°Cの最適疲労破損線とを比較すると、375°C以下の低サイクル疲労特性は、疲労寿命に有意な差が認められず、今回提案した最適疲労破損式で適切に評価できることがわかった。これらの結果、Mod. 9Cr-1Mo 鋼に対する告示化に際しても、現在の低合金鋼に対する許容値を十分合理化できるものと考える。

5.まとめと今後の課題

Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の 4 製品形状、9 ヒートに対して、適用温度範囲における低ひずみ速度疲労試験や高サイクル疲労試験データの収集を行った。収集された疲労試験データをベースに新しい最適疲労破損式ならびに許容ひずみ範囲 ε_t (暫定値) の策定を行った。

- (1) 収集された疲労試験データは、通常の低サイクル疲労試験データで 174 点、低ひずみ速度疲労試験データは 10 点、高サイクル領域の疲労試験データは 7 点で、合計 191 点の試験データを解析に供した。
- (2) 試験温度範囲 400°C から 650°C の温度範囲において、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の低サイクル疲労寿命は、高温側ほど低下する傾向を示し、温度に依存性が認められた。しかし、ひずみ速度効果については、現状の試験データからではデータ量が少なくその評価は困難であった。
- (3) 最適疲労破損式の策定は、類似鋼種である $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の破損式の定数項を Mod. 9Cr-1Mo 鋼の試験データに合うように平行移動させる方法を採用し、汎用回帰式により、温度効果、ひずみ速度効果、さらには高サイクル側への外挿信頼性を考慮し、最も当てはめ性の良い最適疲労破損式を策定した。
- (4) Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)に対する許容ひずみ範囲 ε_t の A, B, C 線図 (暫定値) を新しい最適疲労破損式によって提案した。
- (5) 今回提案する Mod. 9Cr-1Mo 鋼の許容ひずみ範囲から、従来暫定的に用いられてきた $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼等の低合金鋼に対する告示の線は非常に控え目で、Mod. 9Cr-1Mo 鋼の疲労特性を活かしきれていないことが分かった。また、Mod. 9Cr-1Mo 鋼に対する基準化に際しては、現在の告示における低合金鋼に対する許容値とは切り離して、別途独立して定めることで十分合理化できるものと考える。

今回の策定作業では、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のひずみ速度依存性に関する試験データが現状では少ないことから、十分な評価とは言いがたい。このため、ひずみ速度の効果が顕著にみられる低ひずみ速度領域での疲労試験データを早急に取得していく必要がある。今後は、告示化の動向を見ながら、ひずみ速度効果の評価と併せて、許容ひずみ範囲の見直しを図って行く予定である。

6. 参考文献

- (1) FBR 大型炉構造材料試験基本計画 -CAPELLA 計画-
動燃技報 No. 50 1984. 6 資料番号; 50-2 加納他
- (2) 高速炉高温構造設計基準 材料強度基準 -高度化案-
PNC SN9410 89-086 1989年 4月. 青砥他
- (3) 解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等
PNC SN241 85-08 昭和60年3月
- (4) 高速炉構造材料に関する疲労試験方法の標準化に関する試験技術のまとめ
PNC TN9440 91-004 1991年 2月. 小峰他

表-1 供試材の化学成分
Table 1 Chemical compositions of test materials.

製品形状	素材番号	製品番号 (E-ト No)	化学成分 (wt%)										
			C	S i	Mn	P	S	N i	C r	M o	V	N b	N
伝熱管板	F 2 *1	A5B1303	0.1	0.39	0.41	0.013	0.001	0.06	8.77	0.96	0.22	0.087	0.0502
鍛鋼品	F 4	10211	0.1	0.25	0.37	0.008	0.003	0.08	9.10	0.93	0.22	0.09	0.043
	F 8 *2	86-96008	0.094	0.23	0.37	0.015	0.001	0.18	8.82	0.97	0.20	0.066	0.0481
	F8-1*2	86-96008	0.094	0.23	0.37	0.015	0.001	0.18	8.82	0.97	0.20	0.066	0.0481
	FMEF		0.1	0.24	0.39	0.008	0.001	0.13	8.76	0.97	0.20	0.08	0.056
板	F 6 *1	A5B1303	0.1	0.39	0.41	0.013	0.001	0.06	8.77	0.96	0.22	0.087	0.0502
	F 7 *1	A5B1303	0.1	0.39	0.41	0.013	0.001	0.06	8.77	0.96	0.22	0.087	0.0502
	F 9	SX3071	0.1	0.26	0.42	0.006	0.001	0.10	8.84	0.96	0.08	0.22	0.0677
	FMEP		0.1	0.25	0.43	0.006	0.001	0.10	8.85	0.95	0.22	0.08	0.0643
	FSP1		0.09	0.30	0.37	0.011	0.001	0.36	8.66	0.89	0.22	0.08	0.0541
	FSP2		0.098	0.41	0.38	0.015	0.005	0.11	8.50	0.96	0.23	0.079	0.0391

*1,2 ; 同一ヒート材

表-2 供試材の機械的特性および熱処理条件
Table 2 Mechanical properties and heat treatment conditions of test materials.

製品 形状	素材 番号	製品番号 (t-t No)	製品形状寸法	熱処理条件	0.2%耐力 (Kg/mm ²)	引張強さ (Kg/mm ²)	試験 破断伸び (%)	絞り (%)	衝撃試験 吸収エネルギー (Kgf-m)	硬さ試験 Hv	結晶粒度
伝熱管 相当板	F 2	A5B1303	12t × 1000 × 1000	N 1050°C × 0.8Hr AC T 780°C × 1.0Hr AC SR 740°C × 10.6Hr FC	NT 49.7 SR 51.6	69.3 70.2	29.7 27.3	74.3 73.0	—	—	7.0
鍛鋼品	F 4	10211	250t × 1000 × 1000	N 1040°C × 6.0Hr WC T 760°C × 6.0Hr AC SR 725°C × 8.4Hr FC	NT 49.0 SR 51.0	66.0 68.0	24.0 24.0	75.0 74.0	23.2 21.2	—	8.5
	F 8	86-96008	250t × 1000 × 1000	N 1040°C × 10.0Hr Q T 775°C × 8.0Hr AC SR 740°C × 8.4Hr FC	NT 45.9 SR 44.4	64.5 64.2	32.0 30.0	74.0 74.0	18.5 19.7	187 191	7.0
	F8-1	86-96008	550t × 1000 × 1000	N 1040°C × Hr WQ T 770°C × Hr AC SR 740°C × 8.4Hr FC	NT SR 44.5	— 64.3	— 24.0	— 72.0	—	192	7.0
	FMBF		550t × 1000 × 1000	N 1040°C × 12.0Hr AC T 760°C × 5.0Hr AC SR 740°C × 8.4Hr FC	NT 50.3 SR 48.7	68.5 66.7	23.0 24.0	71.0 74.0	15.3	—	—
板	F 6	A5B1303	25t × 1000 × 1000	N 1050°C × 1.0Hr AC T 780°C × 1.4Hr AC SR 740°C × 10.6Hr FC	NT 49.9 SR 52.2	68.2 69.5	26.0 27.7	69.0 68.6	—	—	7.0
	F 7	A5B1303	25t × 1000 × 1000	N 1050°C × 1.0Hr AC T 780°C × 1.4Hr AC SR 740°C × 10.3Hr FC	NT 55.9 SR 58.5	72.9 74.7	26.2 25.0	69.4 69.0	—	—	8.5
	F 9	SX3071	25t × 1000 × 1000	N 1060°C × 1.0Hr AC T 760°C × 1.0Hr AC SR 740°C × 8.4Hr FC	NT 58.1 SR 53.9	75.0 71.4	26.0 27.0	75.0 74.0	26.4	—	10.5
	FMBP		25t × 1000 × 1000	N 1060°C × 1.0Hr AC T 760°C × 1.0Hr AC SR 740°C × 8.4Hr FC	NT 58.1 SR 52.5	75.6 69.2	26.0 28.0	70.0 72.0	23.8	—	—
	FSP1		20t × 250 × 500	N 1060°C × 1.0Hr AC T 760°C × 1.0Hr AC SR 740°C × 8.4Hr FC	NT 53.5 SR —	69.1 —	26.8 —	75.2 —	18.3 —	235	—
	FSP2		20t × 400 × 400	N 1040°C × Hr AC T 760°C × Hr AC SR 780°C × Hr	NT 50.9 SR —	68.2 —	25.0 —	75.0 —	20.0 —	—	—

表-3 除外試験データリスト
Table 3 List of excluded fatigue test data.

除外条件	鋼種	温度	$\Delta \varepsilon t(%)$	試験機関	試験点数
試験データバンドより著しく外れる試験データ	F7	500	0.4	バブ日立	1
管形状試験片データ	FMET	550		FME	12
合 計					13

表-4 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の疲労試験データ出典リスト
 Table 4 List of fatigue test data source for Mod. 9Cr-1Mo(NT)steel.

動燃事業団成果報告書	素材No
(1) 材料特性データ集 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(SR)大気中およびナトリウム中疲労特性 No. F01 1991年 7月 PNC PN9450 91-004	F2, F4 F6
(2) Mod. 9Cr-1Mo 鋼の高サイクル疲労試験 依頼書番号 ; 90-44G (報告書番号 ; - R 試験継続中)	F6
(3) Mod. 9Cr-1Mo 鋼のひずみ速度依存疲労試験 依頼書番号 ; 90-46G (報告書番号 ; - R 試験継続中)	F6
(4) Mod. 9Cr-1Mo 鋼板材の基本材料特性試験 低サイクル疲労試験(2) 依頼書番号 ; 91-20G (報告書番号 ; - R 試験継続中)	F7, F9
委託研究成果報告書	素材No
(1) SUS304溶接継手の高温強度試験(Ⅲ)及びMod. 9Cr-1Mo 鋼鍛造材の高温強度試験(Ⅰ) 1988年 4月 PNC SJ9124 88-001 (株)日立製作所	F8-1
(2) 9Cr 系鋼溶接継手の高温強度試験(Ⅱ) 1989年 1月 PNC SJ9055 89-001 川崎重工業(株)	F9
(3) Mod. 9Cr-1Mo 鋼の高温強度試験及びSUS304鋼の裂進展試験(Ⅰ) 1989年 1月 PNC SJ9068 89-001 富士電機(株)	F9
(4) Mod. 9Cr-1Mo 鋼の高温強度試験及びSUS304鋼の裂進展試験(Ⅱ) 1990年11月 PNC SJ9068 90-001 富士電機(株)	F9
(5) 9Cr 系鋼溶接継手のナトリウム中クリープ破断回数試験(Ⅱ) 1988年 2月 PNC SJ9124 88-003 パコック日立(株)	F7
(6) 9Cr 系鋼溶接継手のナトリウム中疲労試験(Ⅱ) 1988年 2月 PNC SJ9216 88-003 三菱重工業(株)	F7
(7) Mod. 9Cr-1Mo 鋼継手の高温強度試験(Ⅱ) 及びクリープ疲労き裂進展挙動試験(Ⅰ) 1989年 3月 PNC SJ9150 89-001 石川島播磨重工業(株)	F6
(8) 9Cr 系鋼溶接継手のナトリウム中短時間強度試験(Ⅱ) 1988年 2月 PNC SJ9164 88-002 (株)東芝	F7
(9) FBR蒸気発生器伝熱管用材料の水/蒸気中腐食疲労特性評価試験 1990年12月 PNC SJ9150 90-002 石川島播磨重工業(株)	F6
外部委員会研究成果報告書	素材No
(1) 改良9Cr 鋼材料データの評価研究 平成2年度 最終報告書 1991年 3月 JWES-AE-9105 FME 小委員会	FMET FMEP
(2) 蒸気発生器の構造材の品質向上の研究 昭和60年度下半期 最終報告 昭和61年3月 60FSG小委員会	FST1 FST2

表-5 疲労試験データ点数リスト
Table 5 List of fatigue test data points.

形 状	ヒ ー ト 番 号	試 験 温 度												合 計
		20.0	100.	200.	290.	300.	350.	400.	450.	500.	550.	600.	650.	
管	F2*								8	8	8	8		32
鍛 鋼 品	F4									8	10			18
	F8										5			5
	F8-1										6			6
	FMEF										4			4
板	F6								4	9 ①	4 ④	4 ②	4	32
	F7	3		1	7	2		2		7	9			31
	F9									5 ③	10 ③	6 ②		29
	FSP1									6	6	4		16
	FSP2									8				8
	FMEP										4 ②	4		10
* ; 伝熱管相当板 ○付 ; 速度効果試験データ（高サイクル、低ひずみ速度試験）												合計		191

表-6 回帰手法
Table 6 Conditions for regression analysis.

ケースA	$2^{1/4}$ Cr-1Mo鋼の式に、温度 $T = T - 50$ として計算した。
ケースB	$2^{1/4}$ Cr-1Mo鋼の式の $\Delta \varepsilon_t$ に α 倍し、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のデータにフィットさせた。
ケースC	$2^{1/4}$ Cr-1Mo鋼の式の A_0 を、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のデータにフィットさせた。
ケースD	$2^{1/4}$ Cr-1Mo鋼のひずみ速度データの温度を $T = -50$ と読み替えて、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のデータベースに加えて回帰した。

表-7 回帰結果
Table 7 Results of regression analysis.

ケースA	$2^{1/4}$ Cr-1Mo鋼の式 $(\log_{10} Nf)^{-1/2} = A_0 + A_1 S + A_2 S^2 + A_3 S^4 + A_4 T^2 R + A_5 RS^4 + A_6 TS^4$ $T = T - 50$
ケースB	$2^{1/4}$ Cr-1Mo鋼の式 $(\log_{10} Nf)^{-1/2} = A_0 + A_1 S + A_2 S^2 + A_3 S^4 + A_4 T^2 R + A_5 RS^4 + A_6 TS^4$ $\Delta \varepsilon_t = \Delta \varepsilon_t' * \alpha$ $\alpha = 0.79405743$
ケースC	$2^{1/4}$ Cr-1Mo鋼の式 $(\log_{10} Nf)^{-1/2} = A_0 + A_1 S + A_2 S^2 + A_3 S^4 + A_4 T^2 R + A_5 RS^4 + A_6 TS^4$ $A_0 = 1.0897913$
ケースD1	$(\log_{10} Nf)^{-1/2} = A_0 + A_1 S + A_2 S^2 + A_3 S^4 + A_4 RS^4 + A_{10} T + A_{20} T^2 R$ $A_0 = 0.1410191E+01$ $A_4 = -0.1354942E-01$ $A_{20} = -0.2195295E-07$ $A_1 = 0.9273953E+00$ $A_5 = -0.1112277E-03$ $A_2 = 0.2928558E-00$ $A_{10} = 0.3285473E-04$
ケースD2	$(\log_{10} Nf)^{-1/2} = A_0 + A_1 S + A_2 S^2 + A_3 S^4 + A_5 R + A_9 RS^4 + A_{20} T^2$ $A_0 = 0.1377399E+01$ $A_4 = -0.1324392E-01$ $A_{20} = 0.1163009E-06$ $A_1 = 0.9002480E+00$ $A_5 = -0.5490697E-02$ $A_2 = 0.2824291E+00$ $A_9 = -0.1524908E-03$
なお、 S ; $\log_{10} \Delta \varepsilon_t$ T ; 温度 R ; $\log_{10} \dot{\varepsilon}$	

表-8 回帰結果の総合評価
Table 8 Evaluation on results of regression analysis.

		ケース A	ケース B	ケース C	ケース D1	ケース D2
①当てはめ性	γ	◎	◎	◎	◎	◎
	S. D	◎	○	◎	○	○
	Factor	△	△	○	△	△
②温度・速度依存性の記述性	T	○	○	○	○	○
	$\dot{\varepsilon}$	○	○	○	○	○
③高サイクル外挿の信頼性		○	×	○	×	×
④許容値の合理化度	A 線図	○	◎	○	○	○
	B 線図	○	◎	○	△	△
	C 線図	○	◎	○	△	△
総合評価		◎		◎		

判定基準を以下に示す。

- | | | | |
|------------------|------------------|-----------------------|-------------|
| ① 相関係数 γ | ① 標準偏差 S. D | ① 寿命予測制度(OBS/CAL線図より) | ②③ 記述性 |
| $0.96 \leq$ | $0.18 \geq$ | Factor 2以内 | 記述性が比較的良いもの |
| $0.94 \sim 0.96$ | $0.18 \sim 0.20$ | Factor 2~3 | 記述性が悪いもの |
| $0.92 \sim 0.94$ | $0.20 \sim 0.22$ | Factor 3~5 | |
| $0.92 \geq$ | $0.22 \leq$ | Factor 5以上 | |
- ④ 合理化度 $\frac{N_f(2^{1/4}Cr-1Mo)}{N_f(2^{1/4}Cr-1Mo)} \Delta \varepsilon_t$
- $5.0 \text{倍} \leq$: ○
 $2.0 \sim 5.0 \text{倍}$: ○
 $2.0 \sim 1.0 \text{倍}$: △
 $1.0 \text{倍} \geq$: ×
- $\Delta \varepsilon_t$; Mod. 9Cr-1Mo の 3 Sm/E (500°C) の値から

表-9 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の最適疲労破損式
Table 9 Best fit fatigue life equation of Mod. 9Cr-1Mo(NT)steel.

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

使用単位

T = 溫度 (°C)

 $\dot{\varepsilon}$ = ひずみ速度 (mm/mm/sec) $\Delta \varepsilon_t$ = 全ひずみ範囲 (mm/mm)

Nf = 破損繰り返し数

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

適用温度範囲 375°C ≤ T ≤ 650°C

A ₀	1.0897913 - 0.2439730 × 10 ⁻⁷ × T ² × R
A ₁	0.5709357
A ₂	0.1874343
A ₃	-0.1445453 × 10 ⁻¹ + 0.7045986 × 10 ⁻⁵ × T - 0.6562716 × 10 ⁻⁴ × R

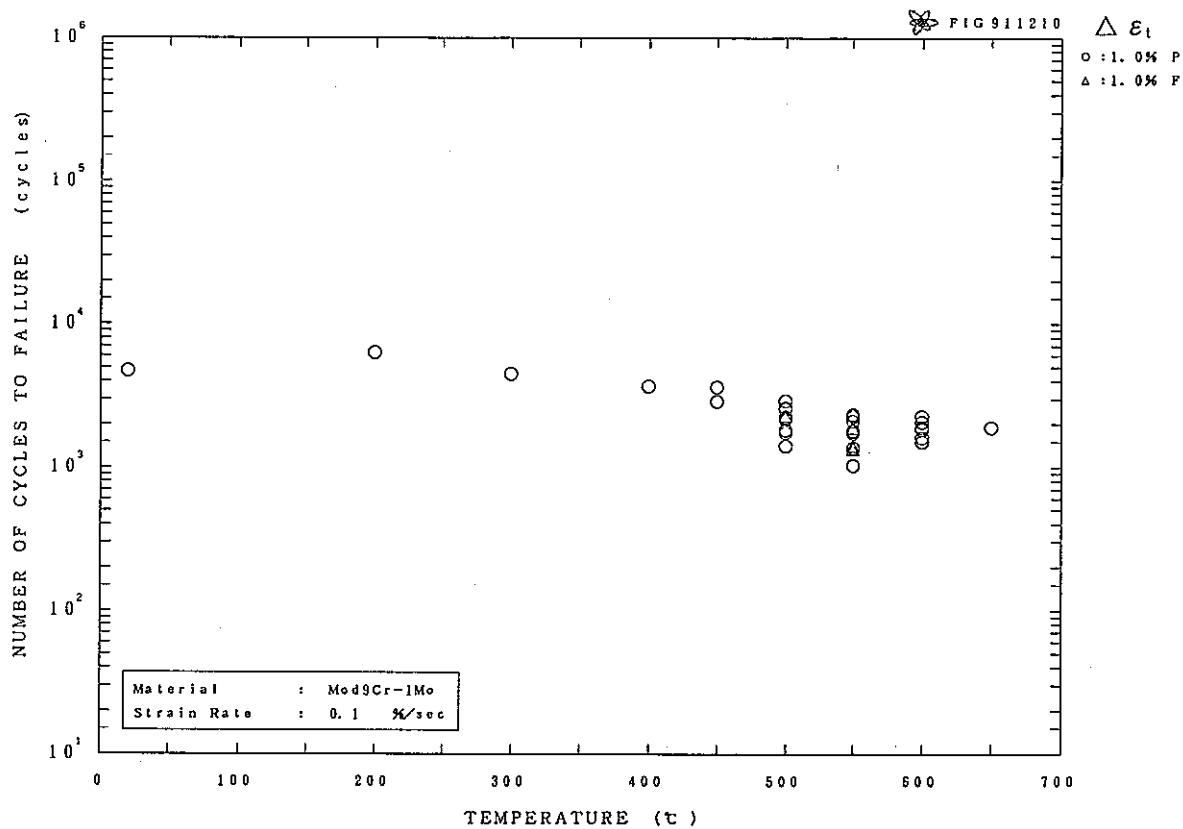


図-1 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の温度依存性
Fig. 1 Dependence on temperature for Mod. 9Cr-1Mo(NT) steel.

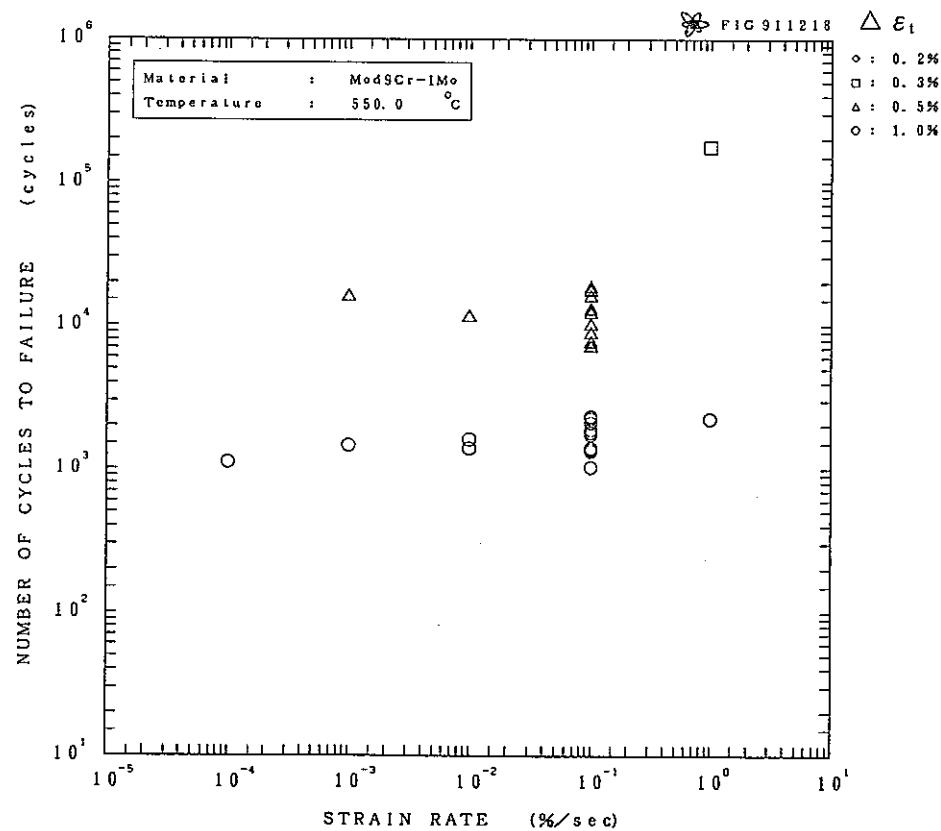


図-2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)のひずみ速度依存性
Fig. 2 Dependence on strain rate for Mod. 9Cr-1Mo(NT) steel.

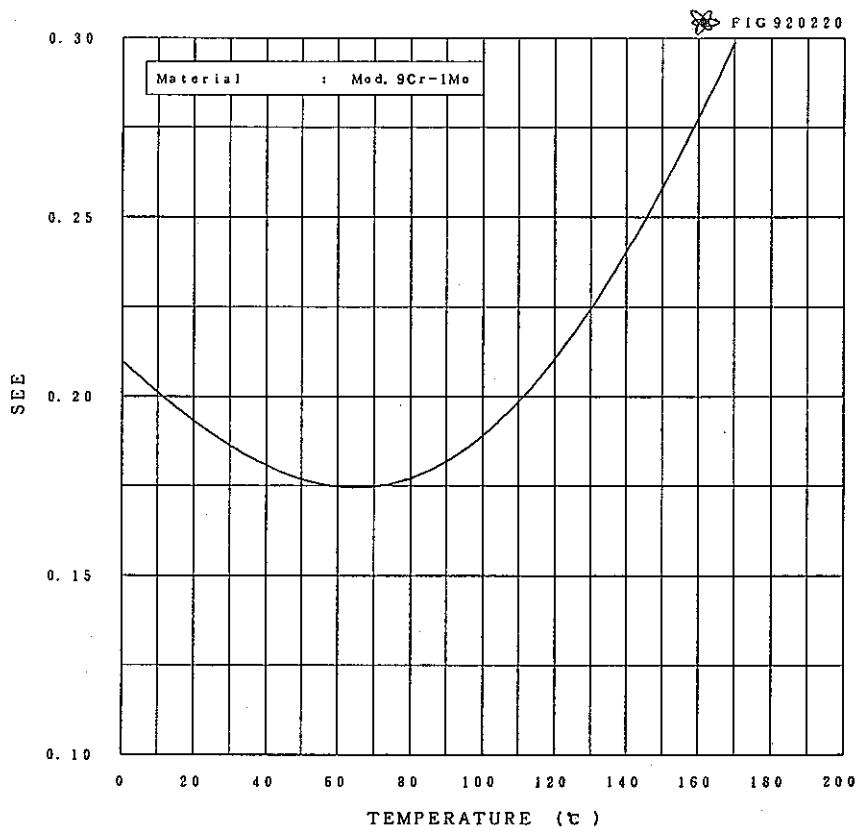


図-3 標準偏差と等価温度との関係

Fig. 3 Relationship between standard deviation and equivalent temperature.

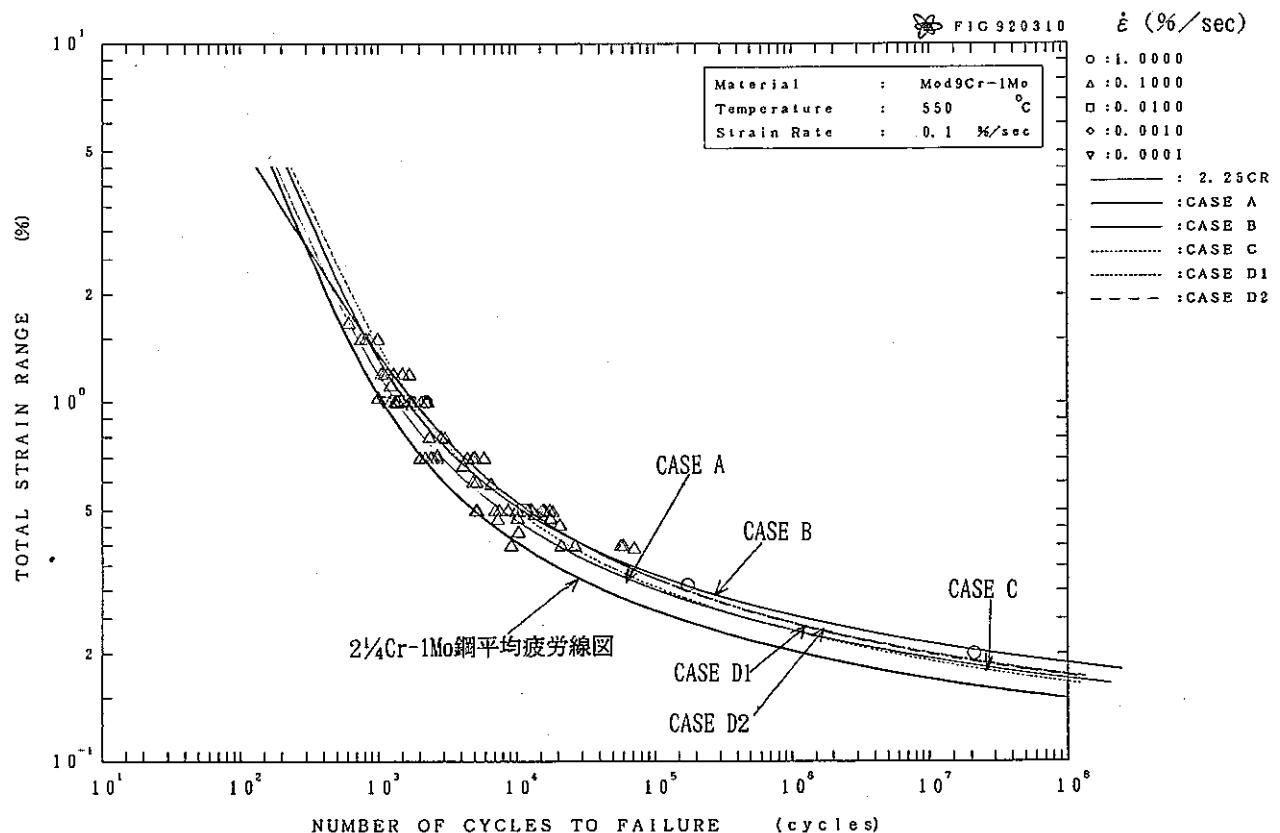


図-4 各ケースと疲労寿命の関係

Fig. 4 Relationship between fatigue lives of regression analysis results and test data.

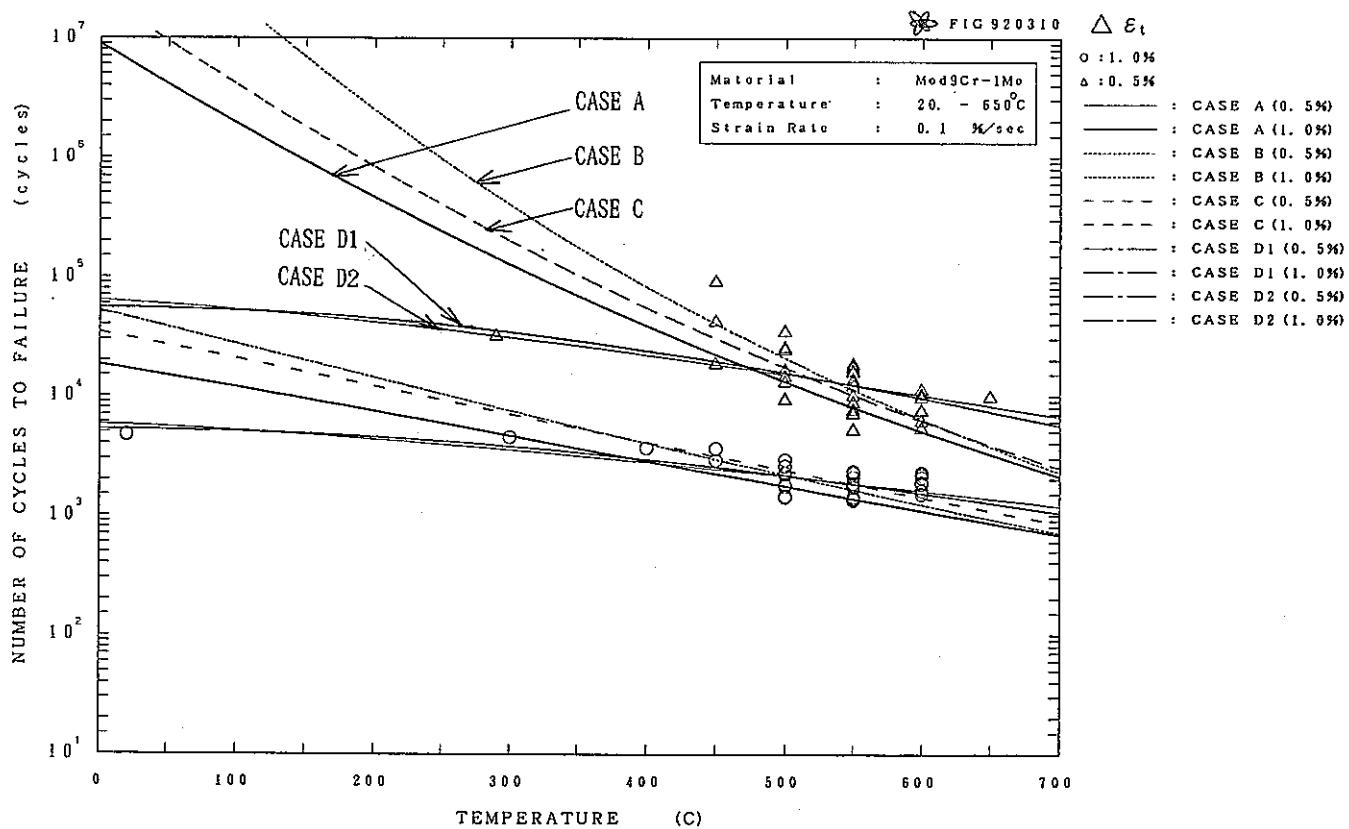


図-5 各ケースと温度依存性の関係
Fig. 5 Relationship between temperature dependence of regression analysis results and test data.

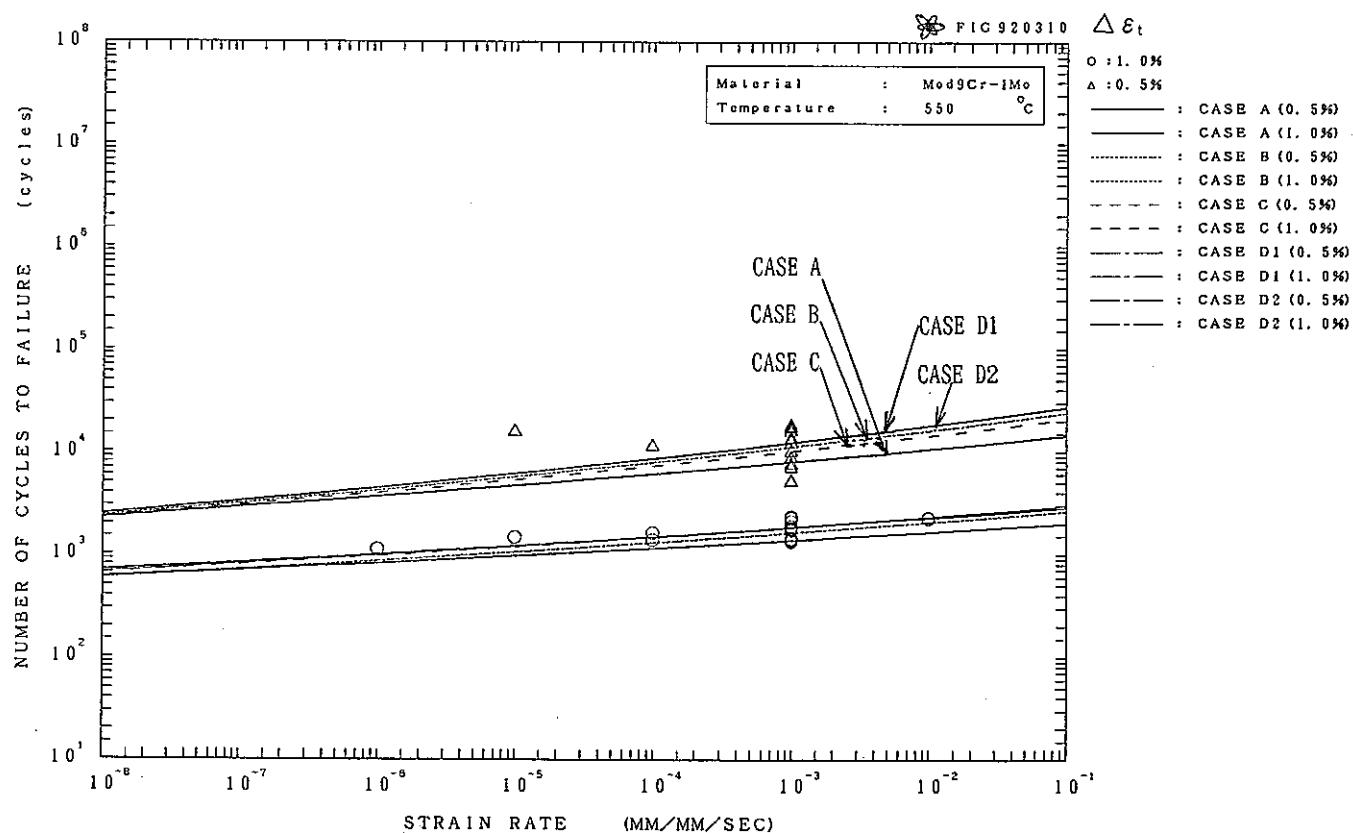


図-6 各ケースとひずみ速度依存性の関係
Fig. 6 Relationship between strain rate dependence of regression analysis results and test data.

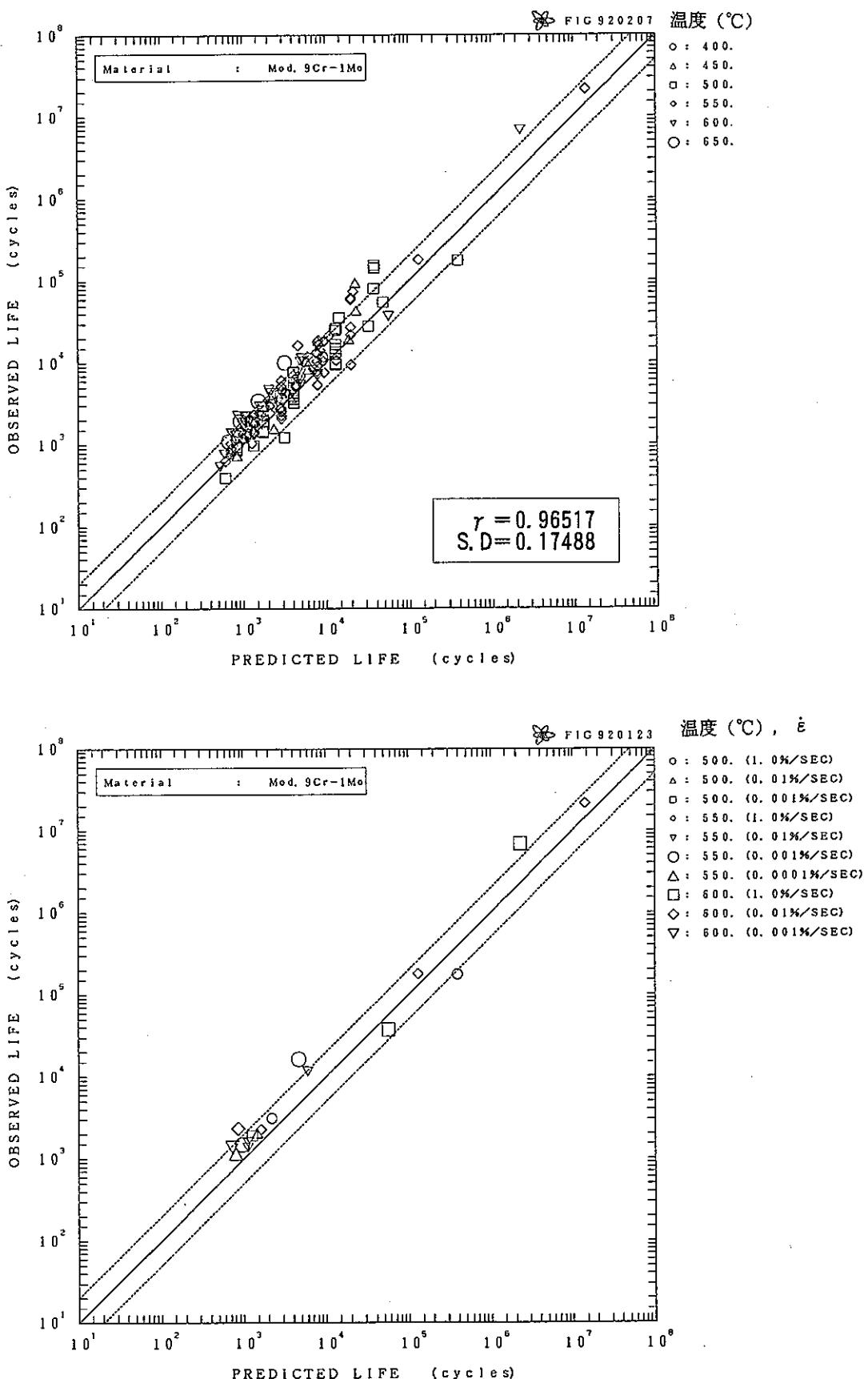


図-7 ケースAにおける疲労寿命の予測
Fig. 7 Predictability of fatigue life by CASE A

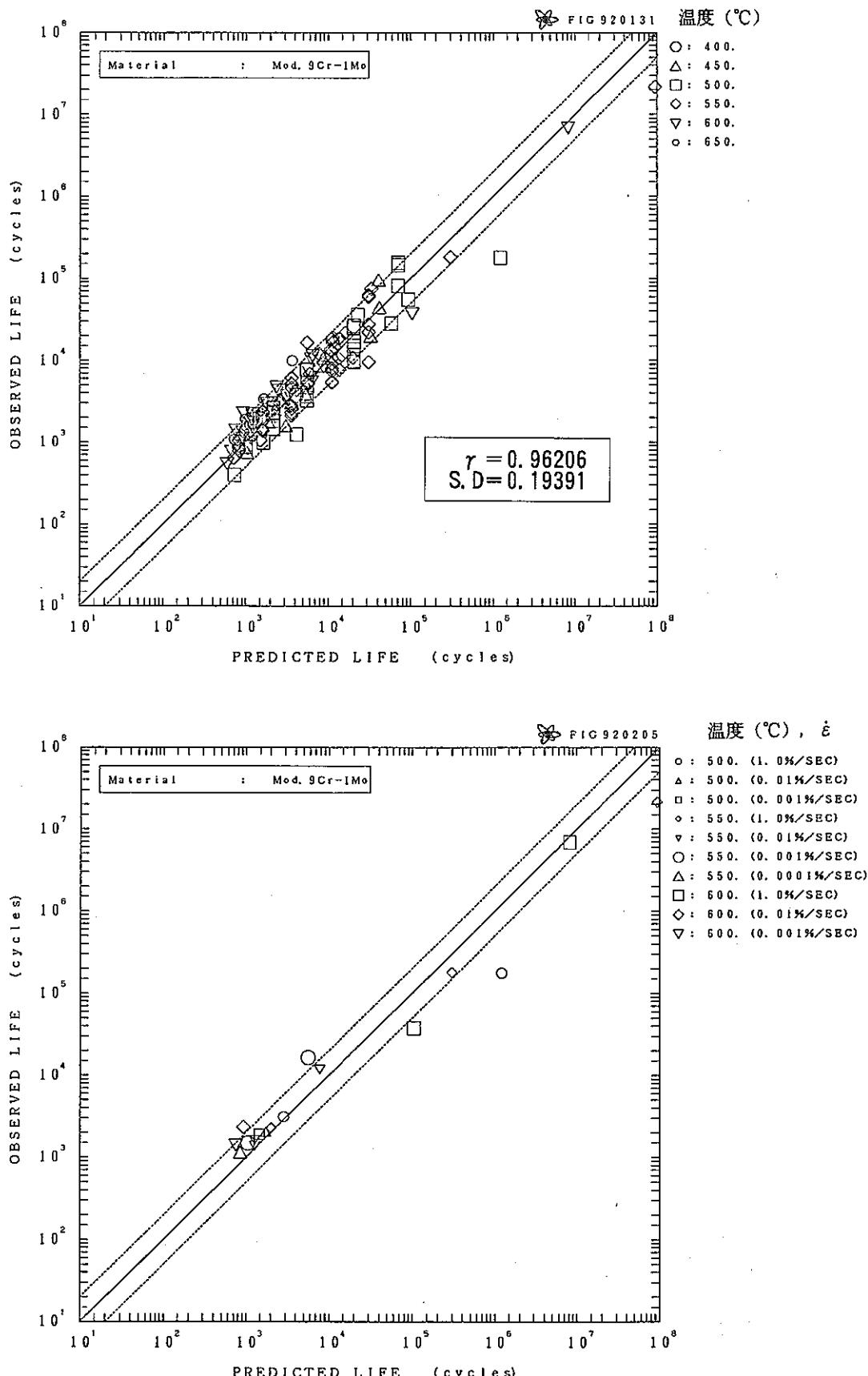


図-8 ケースBにおける疲労寿命の予測
Fig. 8 Predictability of fatigue life by CASE B

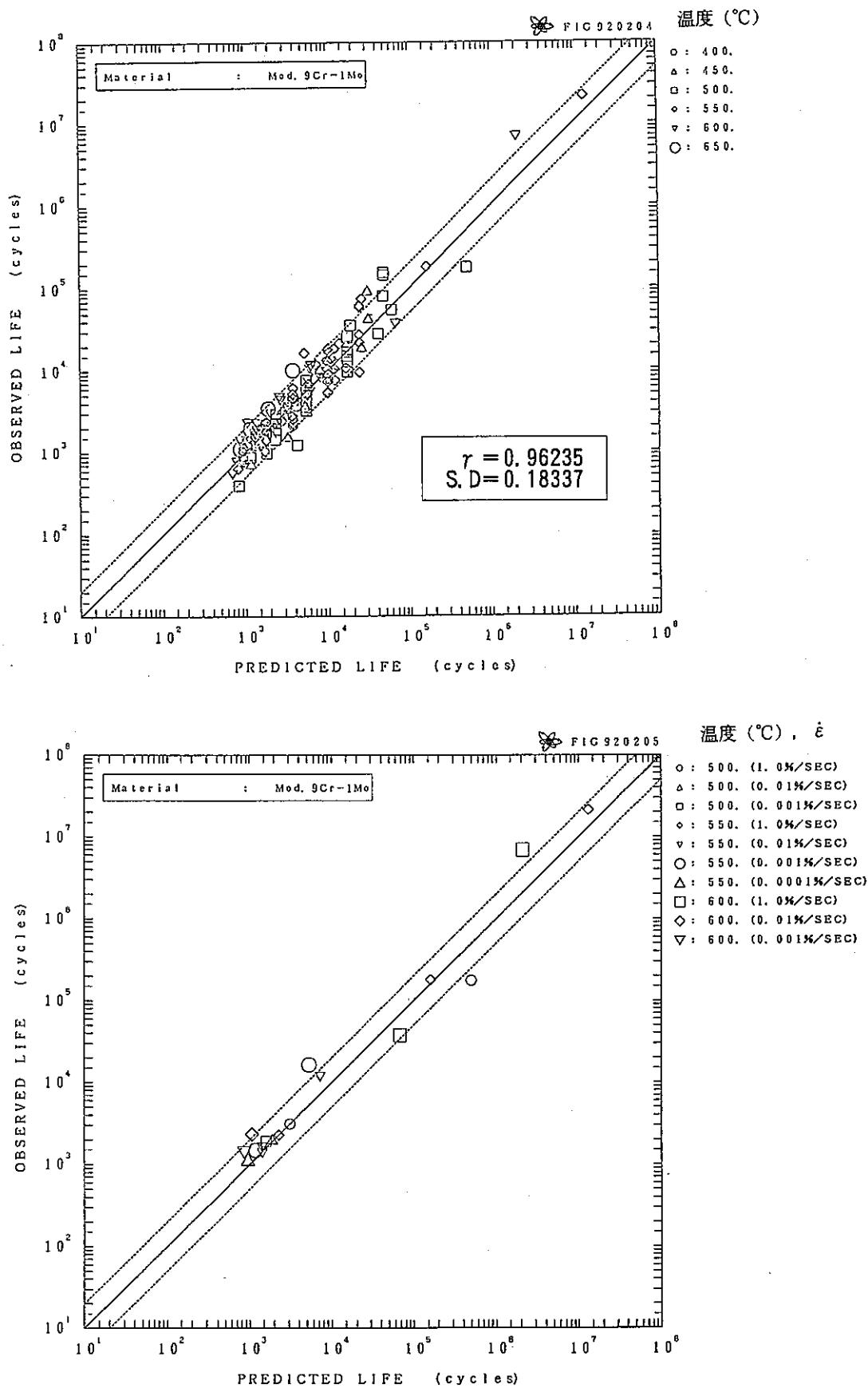


図-9 ケースCにおける疲労寿命の予測
Fig. 9 Predictability of fatigue life by CASE C

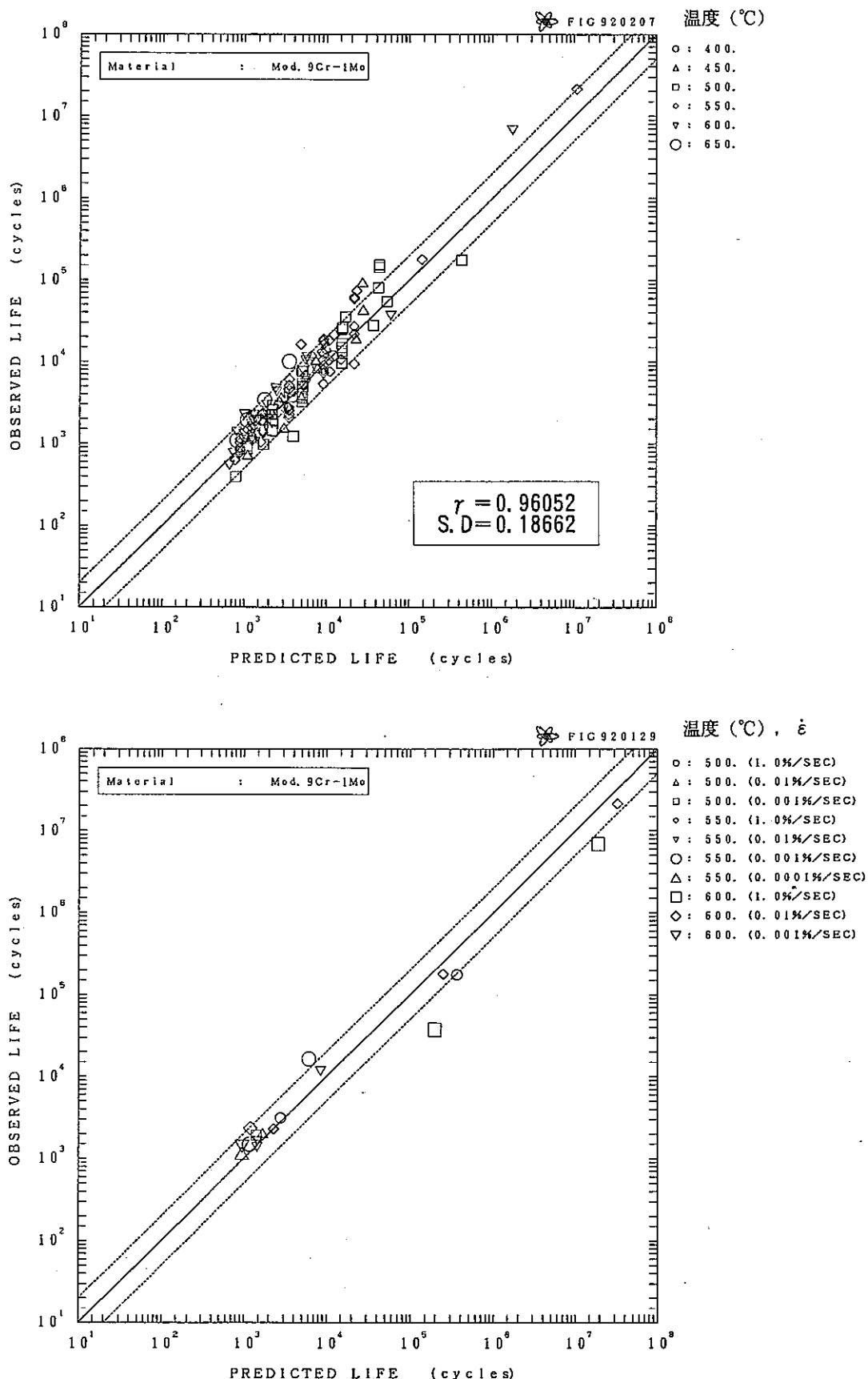


図-10(1) ケースD1における疲労寿命の予測
Fig. 10(1) Predictability of fatigue life by CASE D1

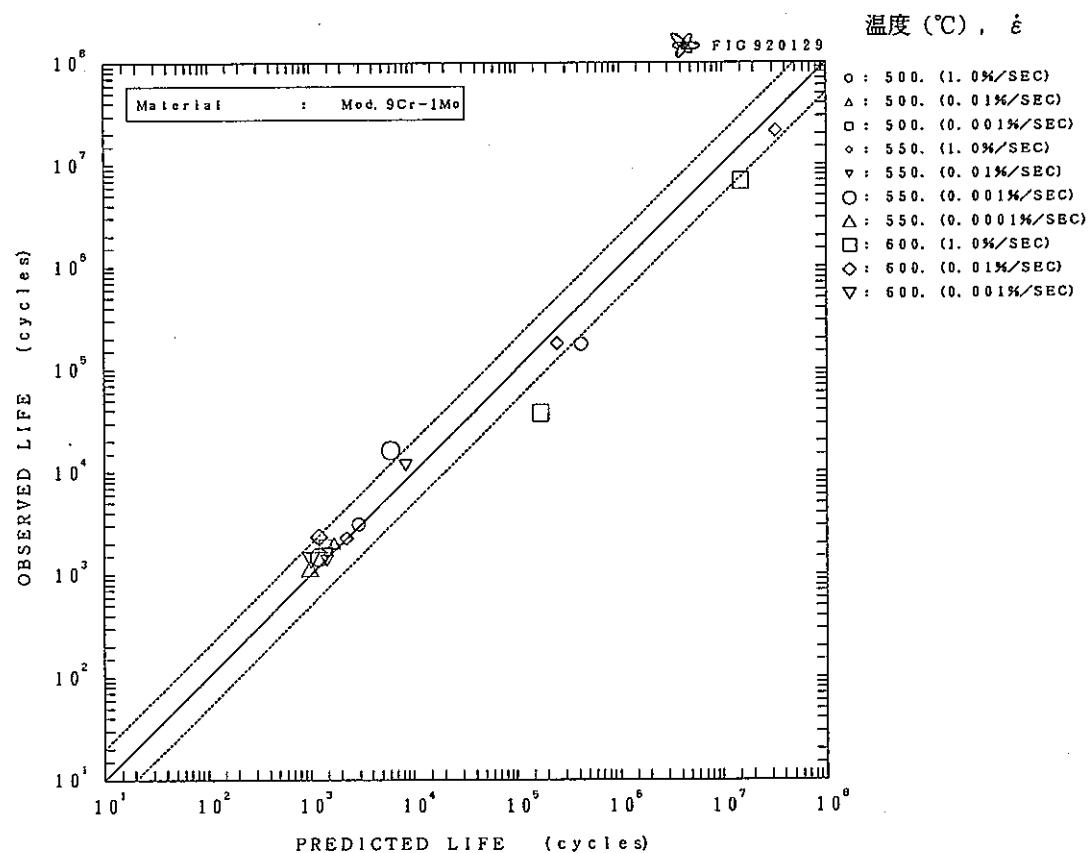
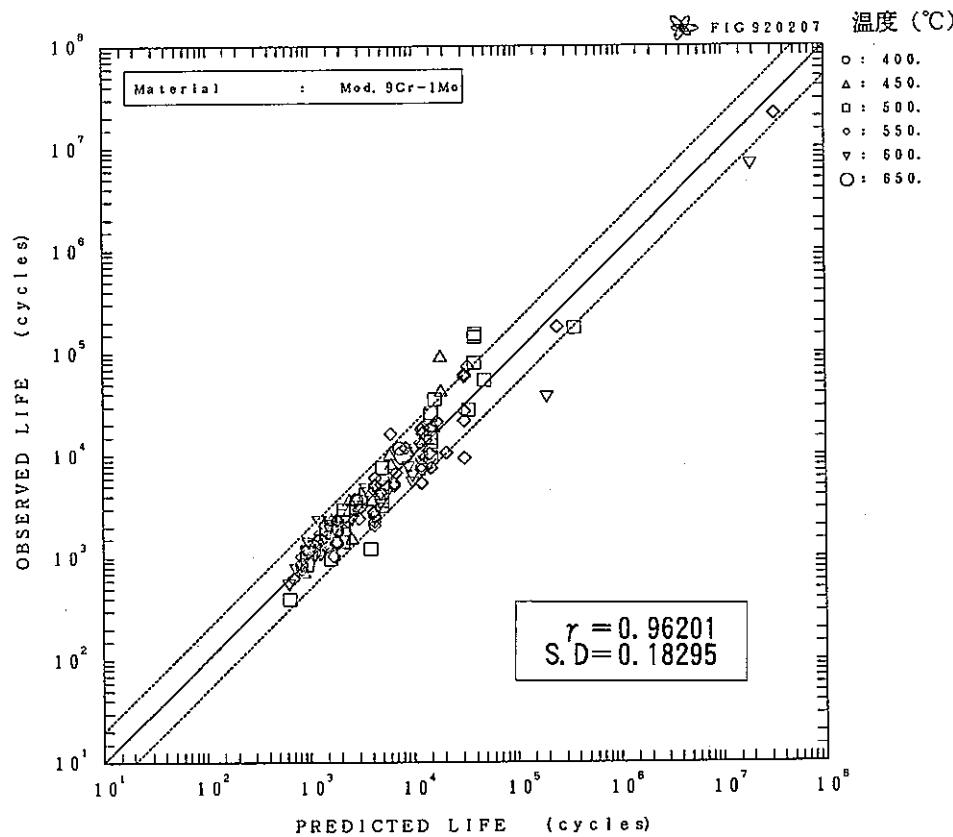


図-10(2) ケースD 2における疲労寿命の予測
Fig. 10(2) Predictability of fatigue life by CASE D2

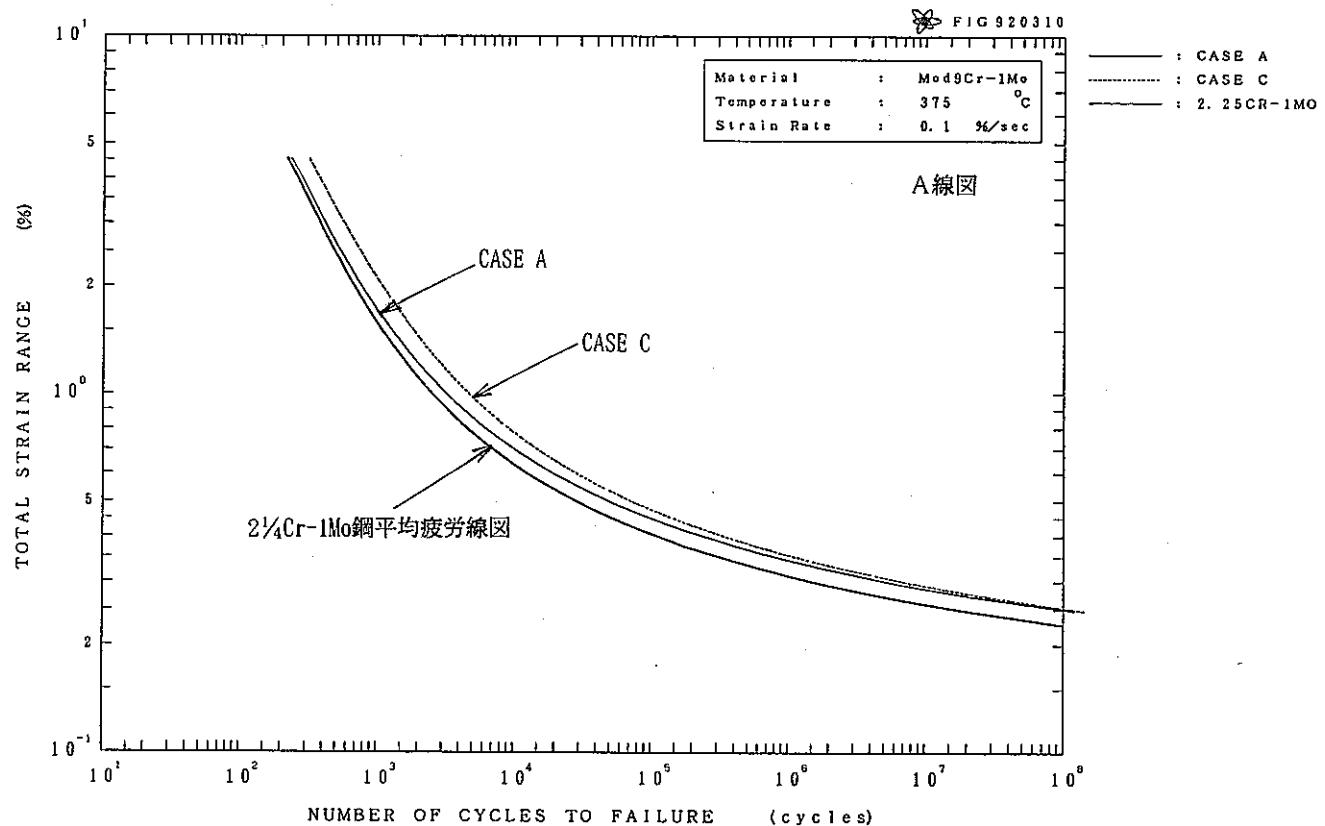


図-11(1) A線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (375 °C)
Fig. 11(1) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 375 °C (strain rate ; 0.1%/sec).

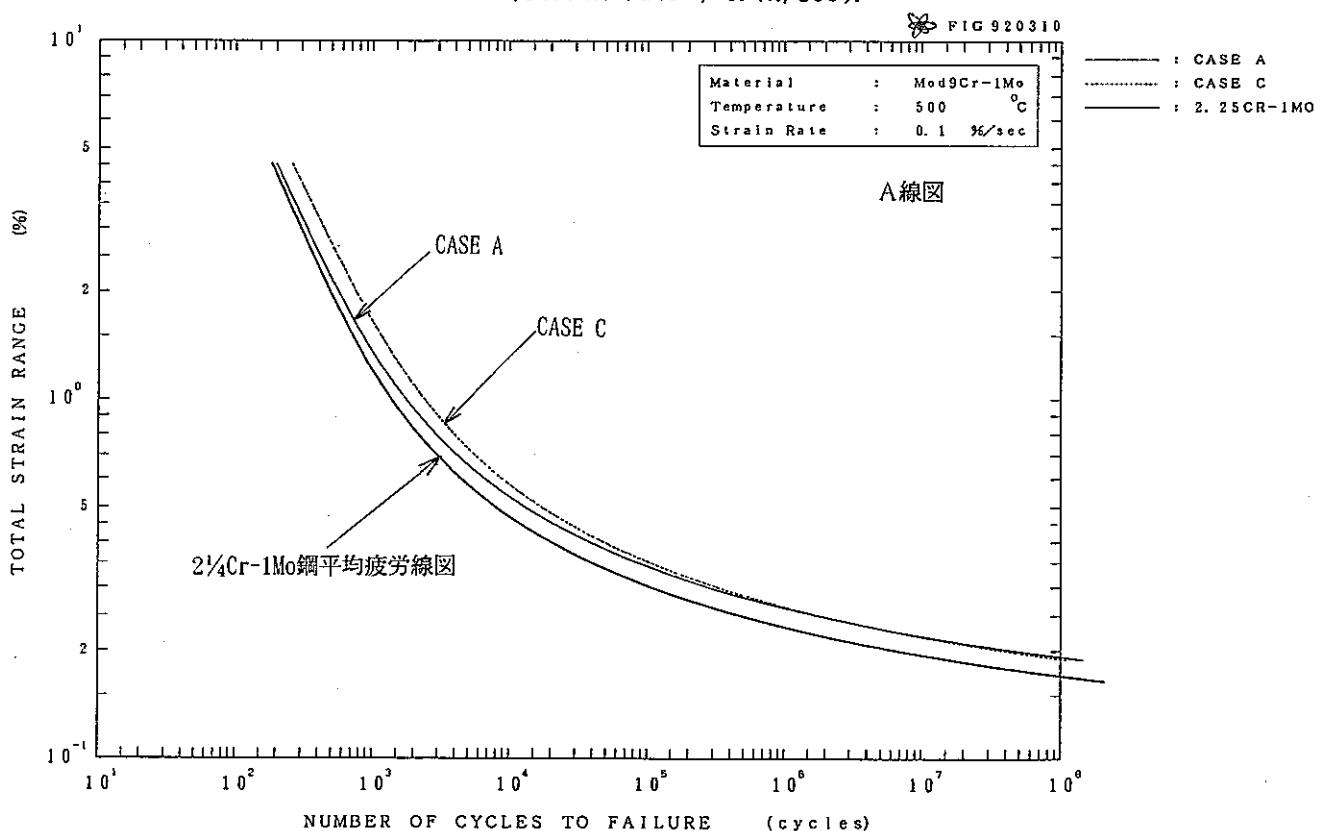


図-11(2) A線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (500 °C)
Fig. 11(2) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 500 °C (strain rate ; 0.1%/sec).

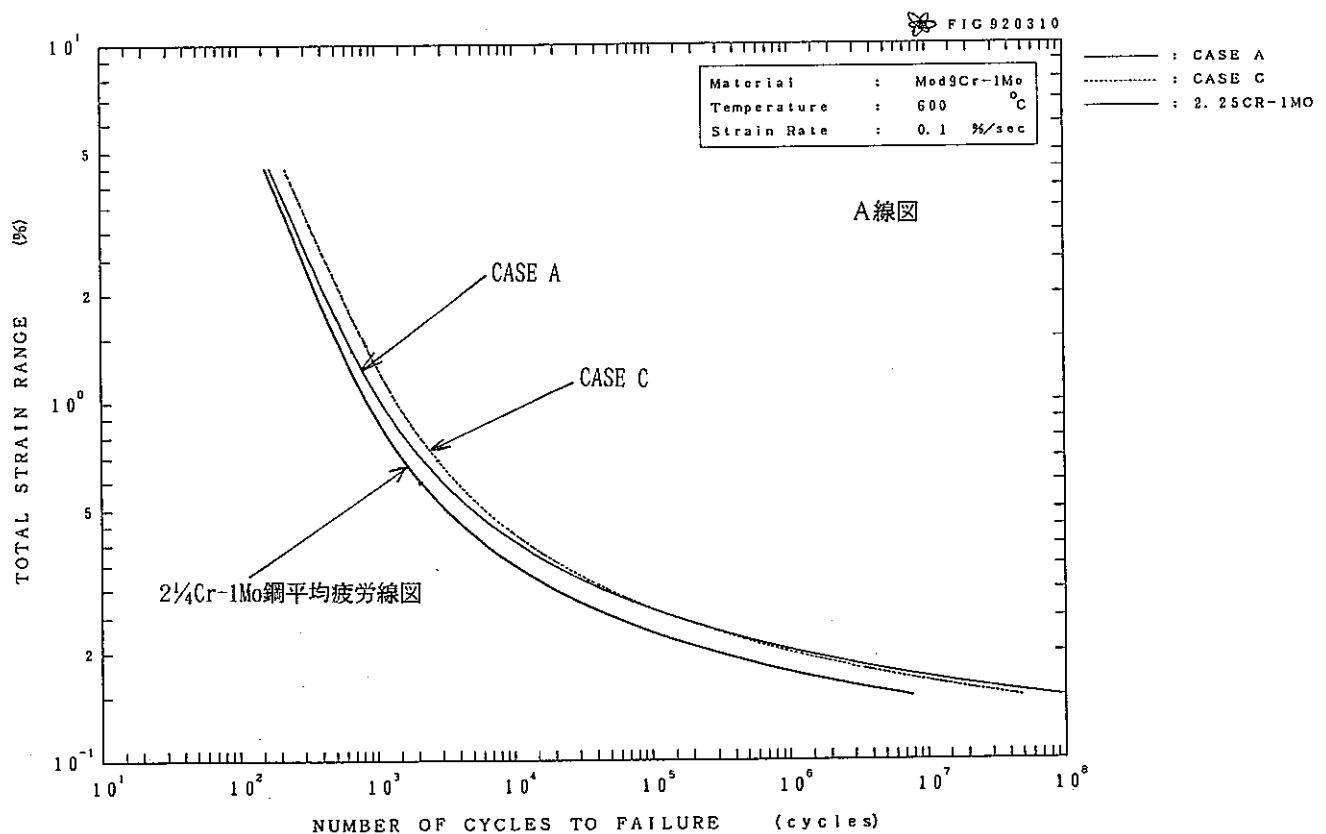


図-11(3) A線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (600 °C)
 Fig. 11(3) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and
 CASE C at 600 °C (strain rate ; 0.1%/sec).

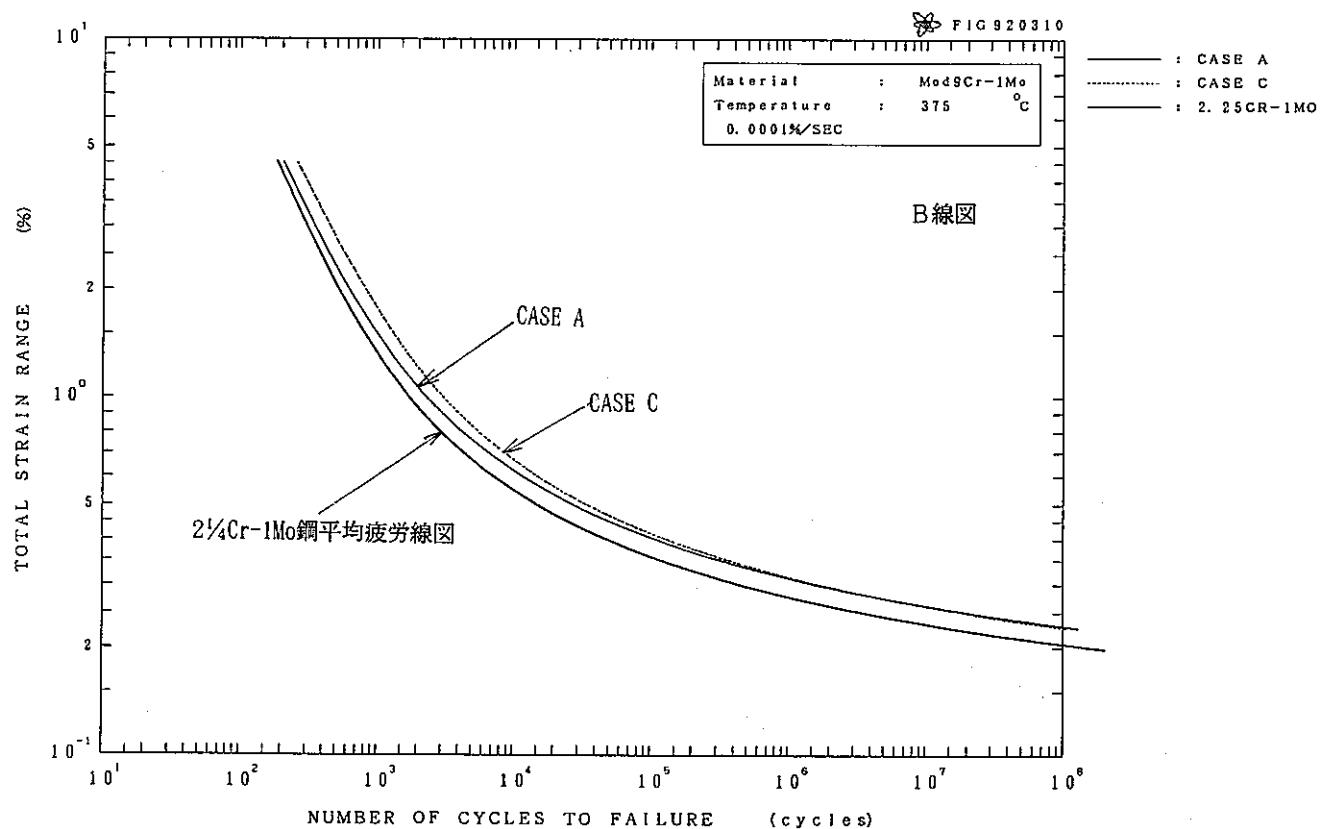


図-12(1) B線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (375°C)
Fig. 12(1) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 375 °C (strain rate ; 0.0001%/sec).

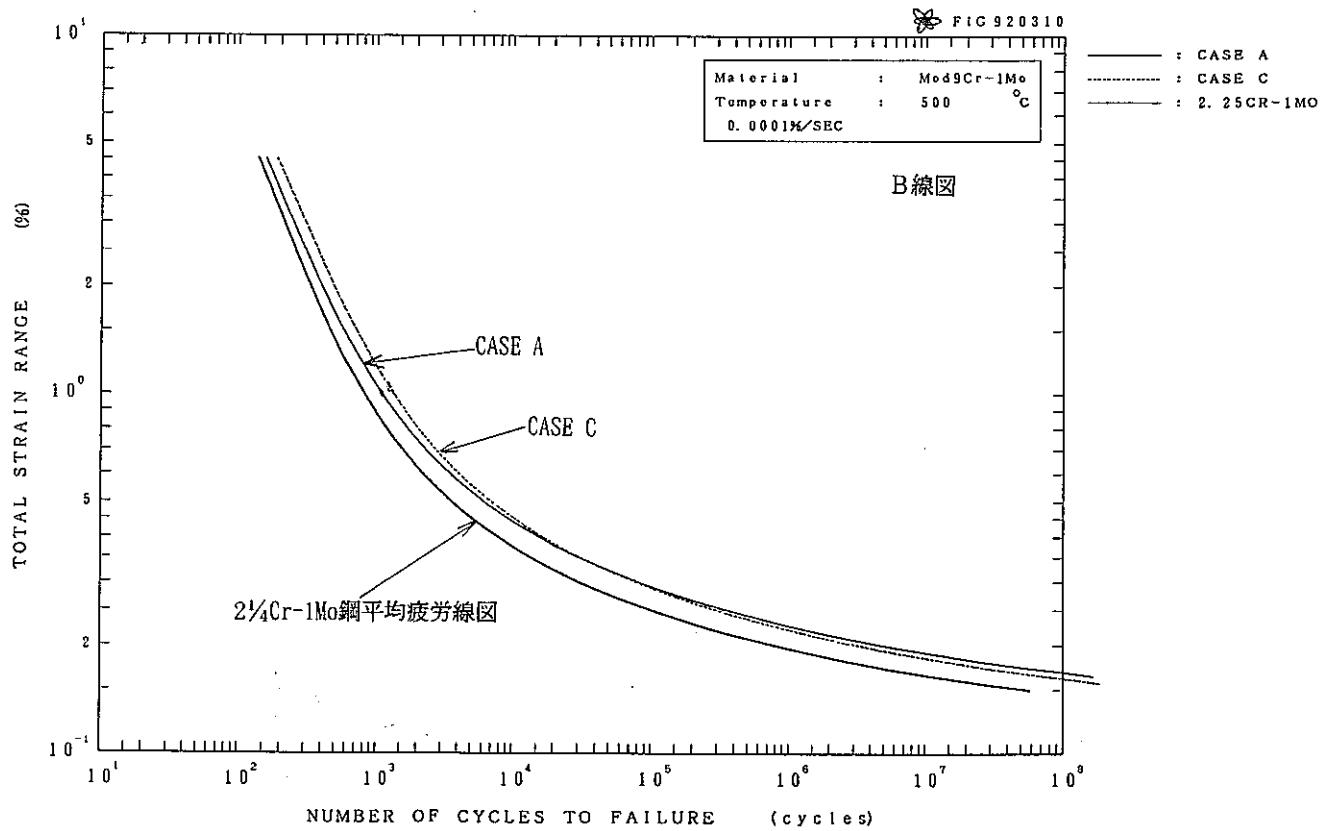


図-12(2) B線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (500°C)
Fig. 12(2) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 500 °C (strain rate ; 0.0001%/sec).

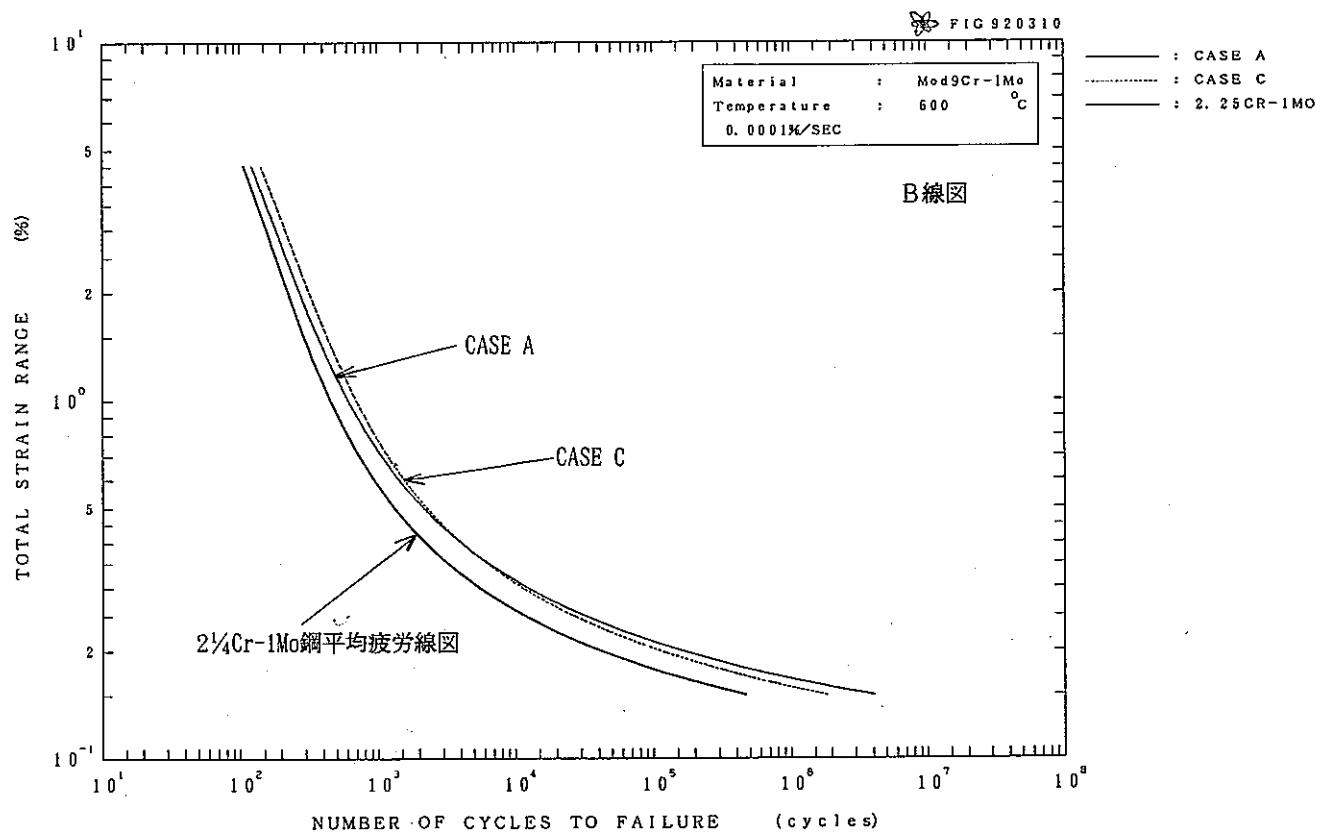


図-12(3) B線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (600°C)
 Fig. 12(3) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and
 CASE C at 600 °C (strain rate ; 0.0001%/sec).

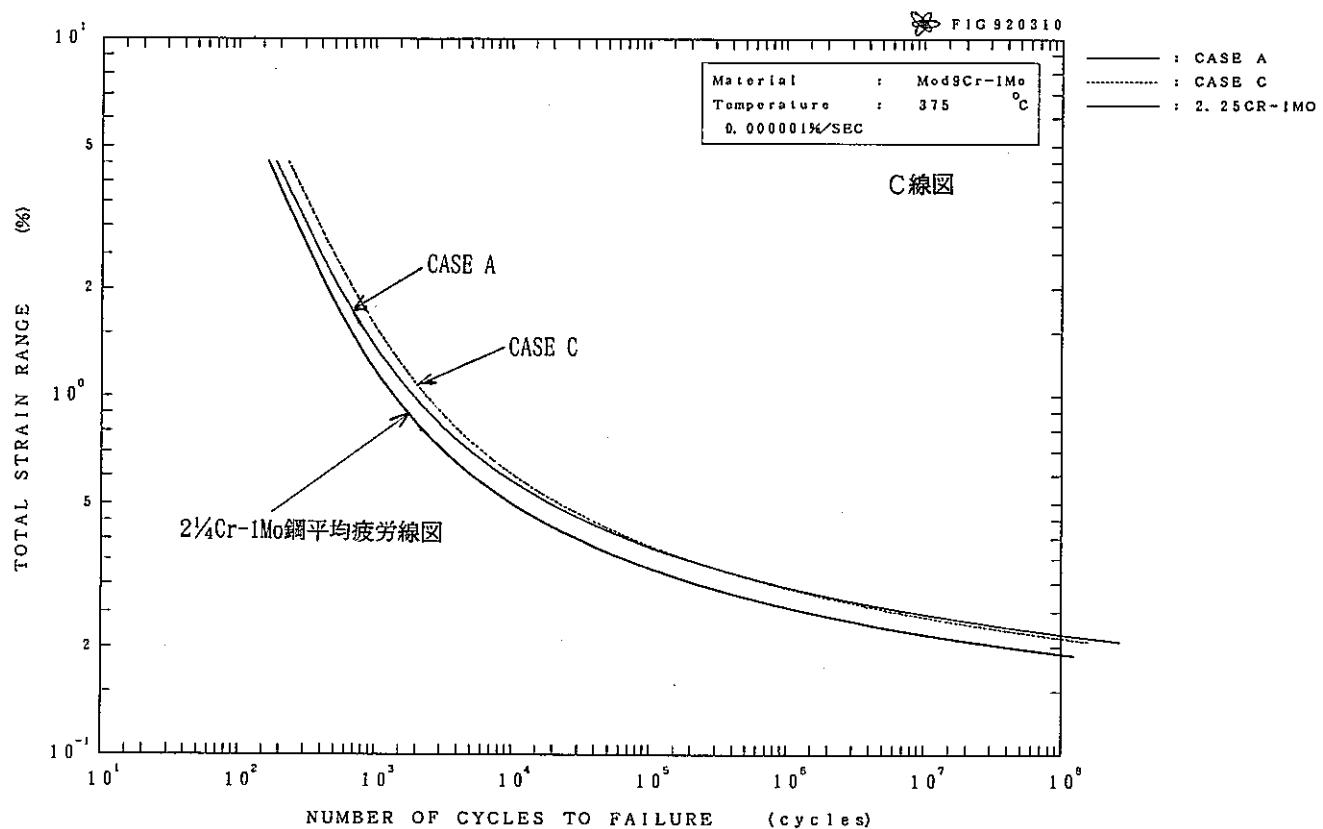


図-13(1) C線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (375 °C)
 Fig. 13(1) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and
 CASE C at 375 °C (strain rate ; >0.0001%/sec).

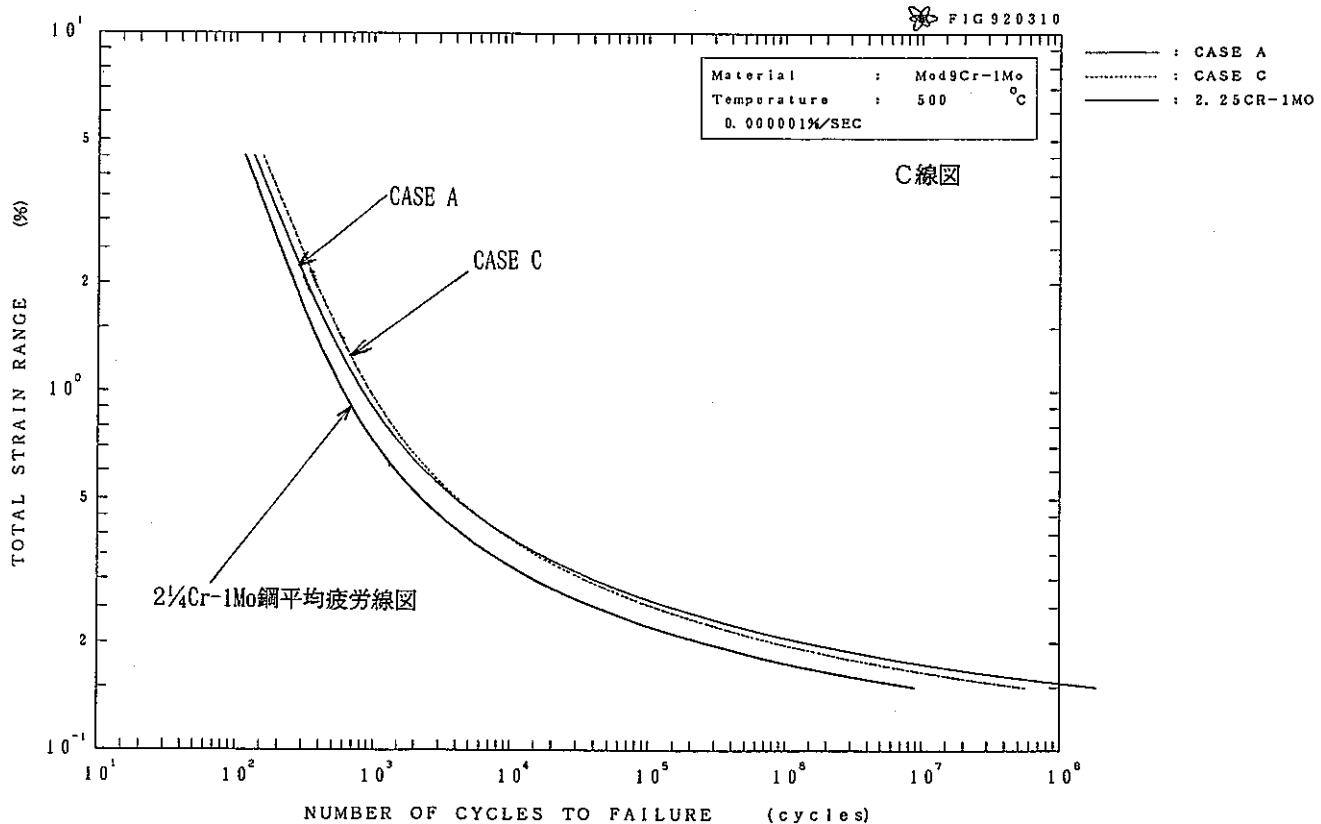


図-13(2) C線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (500 °C)
 Fig. 13(2) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and
 CASE C at 500 °C (strain rate ; >0.0001%/sec).

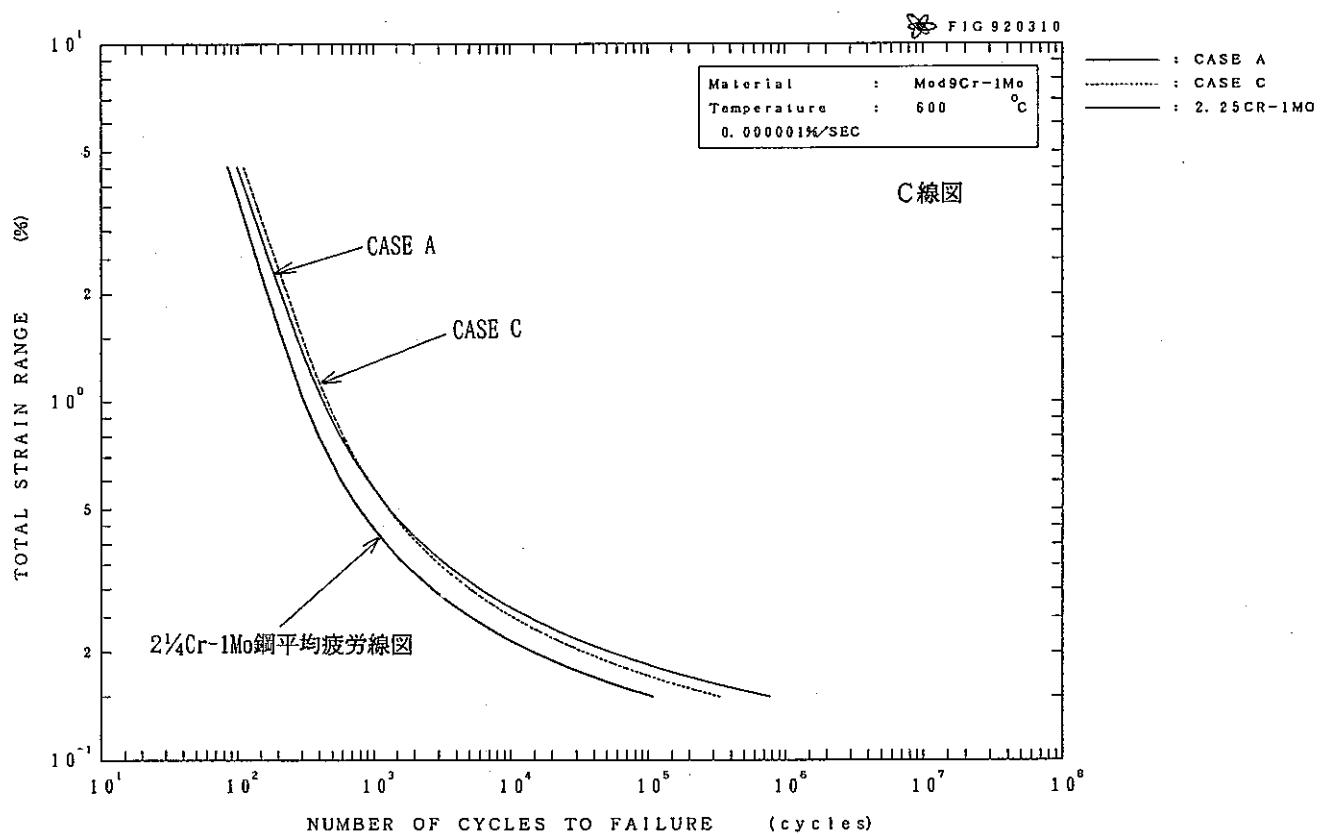


図-13(3) C線図に対するケースAとCの平均疲労線図の比較 (600°C)
 Fig. 13(3) Comparison of best fit fatigue life curve between CASE A and CASE C at 600 °C (strain rate ; >0.0001%/sec).

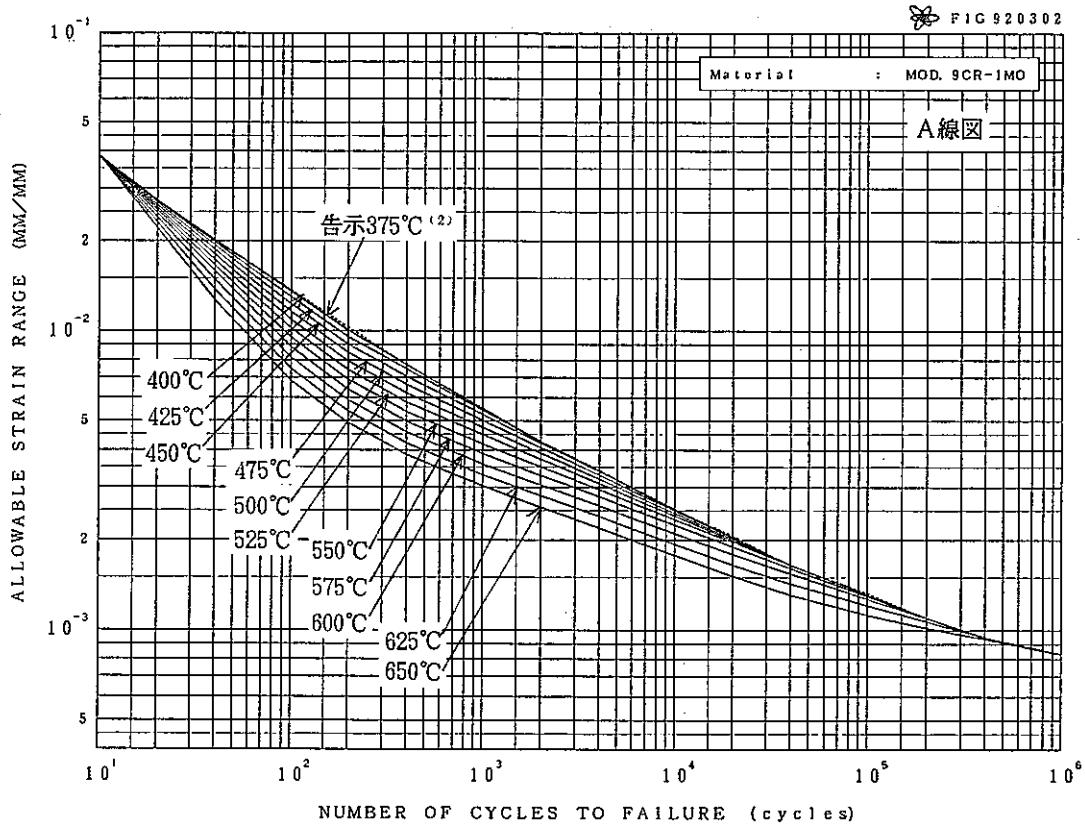


図-14(1) ケースCに対する許容ひずみ範囲（告示との整合性考慮）
 Fig. 14(1) Allowable strain range by CASE C
 (consideration of consistency to MITI Notice).

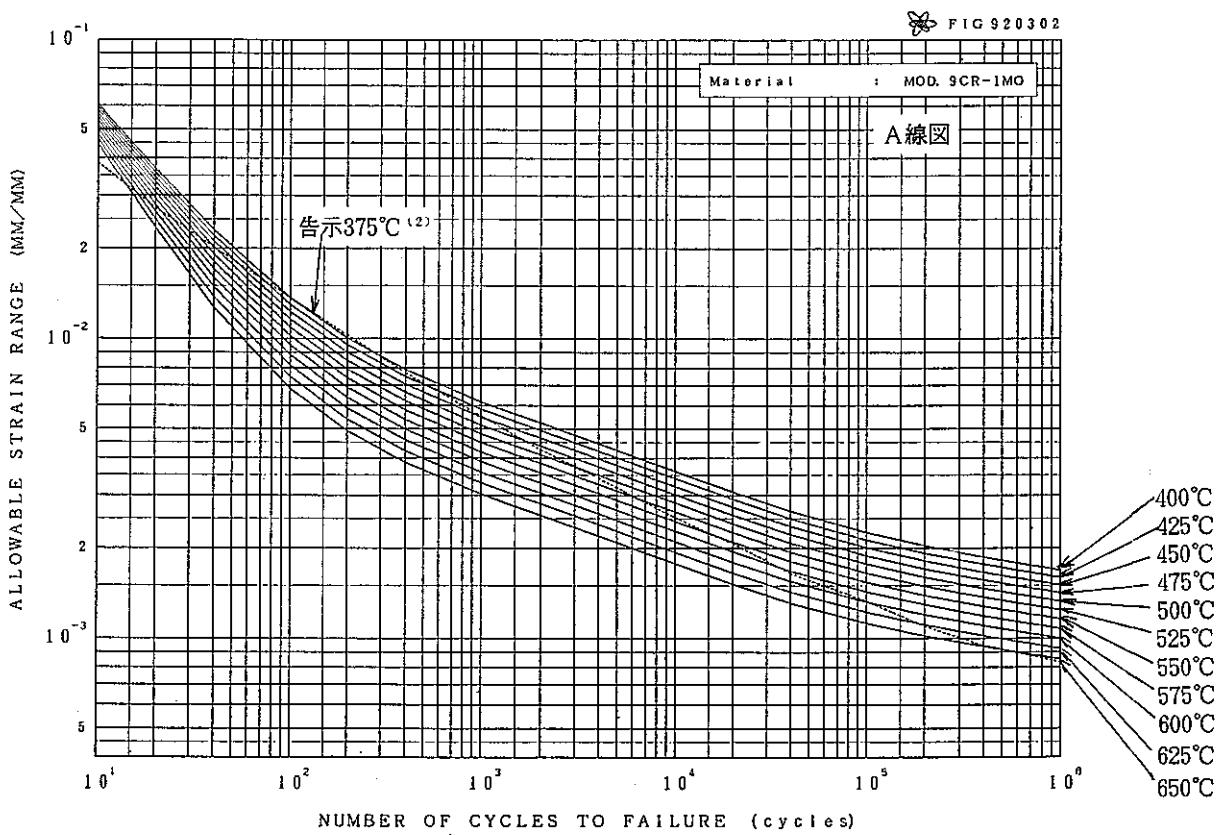


図-14(2) ケースCに対する許容ひずみ範囲（告示無し）
 Fig. 14(2) Allowable strain range by CASE C
 (consideration of separation from low alloy steel).

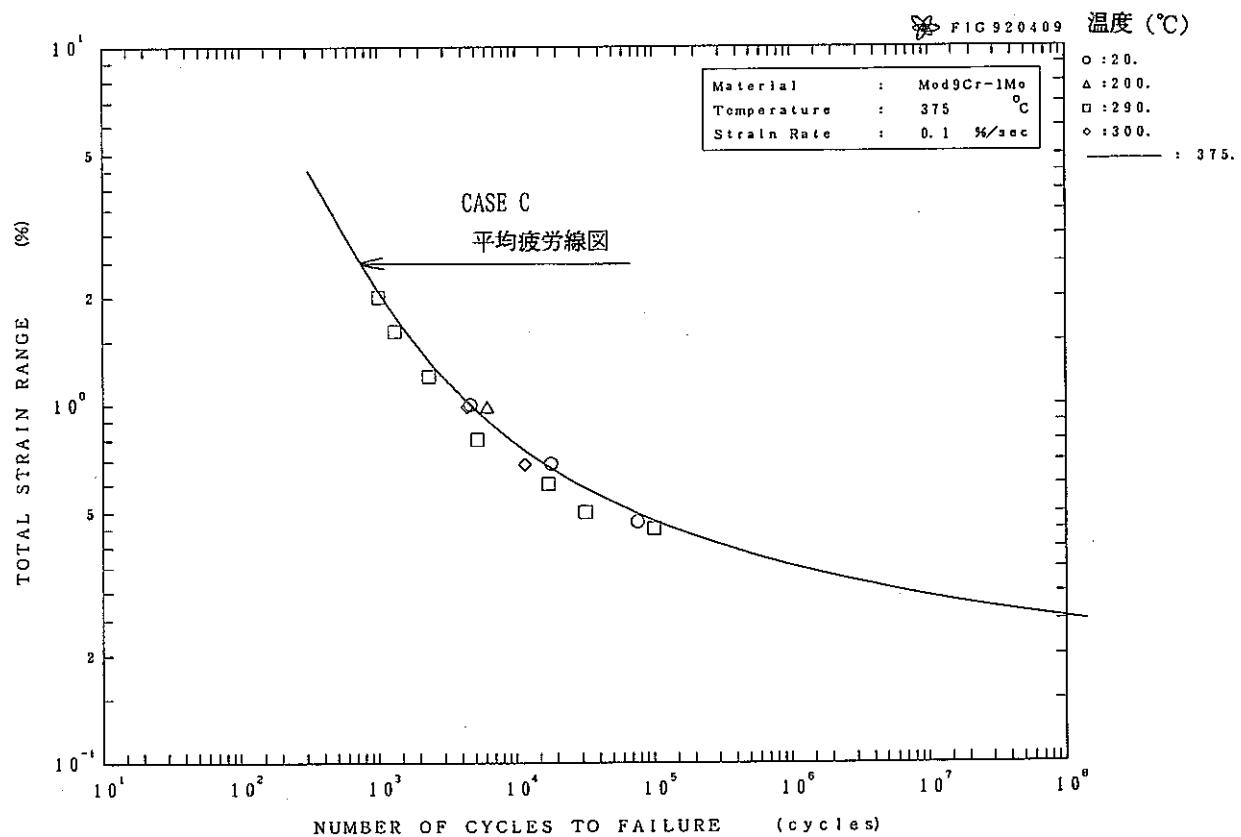


図-15 375°C以下の疲労寿命特性

Fig. 15 Comparison of observed fatigue life with best fit curve (CASE C) at R. T ~ 375°C.

許容ひずみ範囲 ε_t (暫定値)

(別表、別図)

別表1 許容ひずみ範囲 (A) ε_t

別表2 許容ひずみ範囲 (B) ε_t

別表3 許容ひずみ範囲 (C) ε_t

別図1 許容ひずみ範囲 (A) ε_t

別図2 許容ひずみ範囲 (B) ε_t

別図3 許容ひずみ範囲 (C) ε_t

別表1 許容ひずみ範囲 ε_t (A) (mm/mm)
 App. Table 1 Allowable strain range ε_t (A)

繰返し回数 Nd 温度°C	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0620	0.0607	0.0594	0.0580	0.0565	0.0550	0.0534	0.0517	0.0500	0.0483	0.0464	0.0446
2×10	0.0379	0.0369	0.0357	0.0345	0.0333	0.0320	0.0307	0.0294	0.0280	0.0265	0.0250	0.0235
4×10	0.0239	0.0230	0.0221	0.0211	0.0202	0.0191	0.0181	0.0170	0.0160	0.0149	0.0138	0.0127
10^2	0.0143	0.0137	0.0130	0.0123	0.0116	0.0109	0.0102	0.00952	0.00883	0.00815	0.00748	0.00682
2×10^2	0.0106	0.0101	0.00954	0.00900	0.00847	0.00794	0.00741	0.00689	0.00638	0.00588	0.00539	0.00493
4×10^2	0.00833	0.00790	0.00747	0.00704	0.00662	0.00620	0.00578	0.00538	0.00498	0.00459	0.00422	0.00386
10^3	0.00650	0.00616	0.00582	0.00548	0.00515	0.00482	0.00450	0.00419	0.00388	0.00359	0.00330	0.00303
2×10^3	0.00554	0.00525	0.00496	0.00467	0.00439	0.00411	0.00384	0.00357	0.00331	0.00306	0.00281	0.00258
4×10^3	0.00472	0.00447	0.00422	0.00398	0.00374	0.00350	0.00327	0.00304	0.00282	0.00260	0.00240	0.00220
10^4	0.00382	0.00362	0.00342	0.00322	0.00302	0.00283	0.00264	0.00246	0.00228	0.00211	0.00194	0.00178
2×10^4	0.00325	0.00308	0.00291	0.00274	0.00258	0.00241	0.00225	0.00209	0.00194	0.00179	0.00165	0.00151
4×10^4	0.00280	0.00265	0.00251	0.00236	0.00222	0.00208	0.00194	0.00181	0.00168	0.00155	0.00143	0.00131
10^5	0.00238	0.00226	0.00213	0.00201	0.00189	0.00177	0.00165	0.00154	0.00143	0.00132	0.00122	0.00112
2×10^5	0.00215	0.00204	0.00192	0.00181	0.00171	0.00160	0.00149	0.00139	0.00130	0.00120	0.00111	0.00102
4×10^5	0.00197	0.00186	0.00176	0.00166	0.00156	0.00146	0.00137	0.00128	0.00119	0.00110	0.00102	0.000938
10^6	0.00178	0.00169	0.00159	0.00150	0.00141	0.00133	0.00124	0.00116	0.00108	0.000999	0.000925	0.000853

(備考) 本表は繰り返しひずみ速度が 10^{-3} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

別表2 許容ひずみ範囲 ε_t (B) (mm/mm)
 App. Table 2 Allowable strain range ε_t (B)

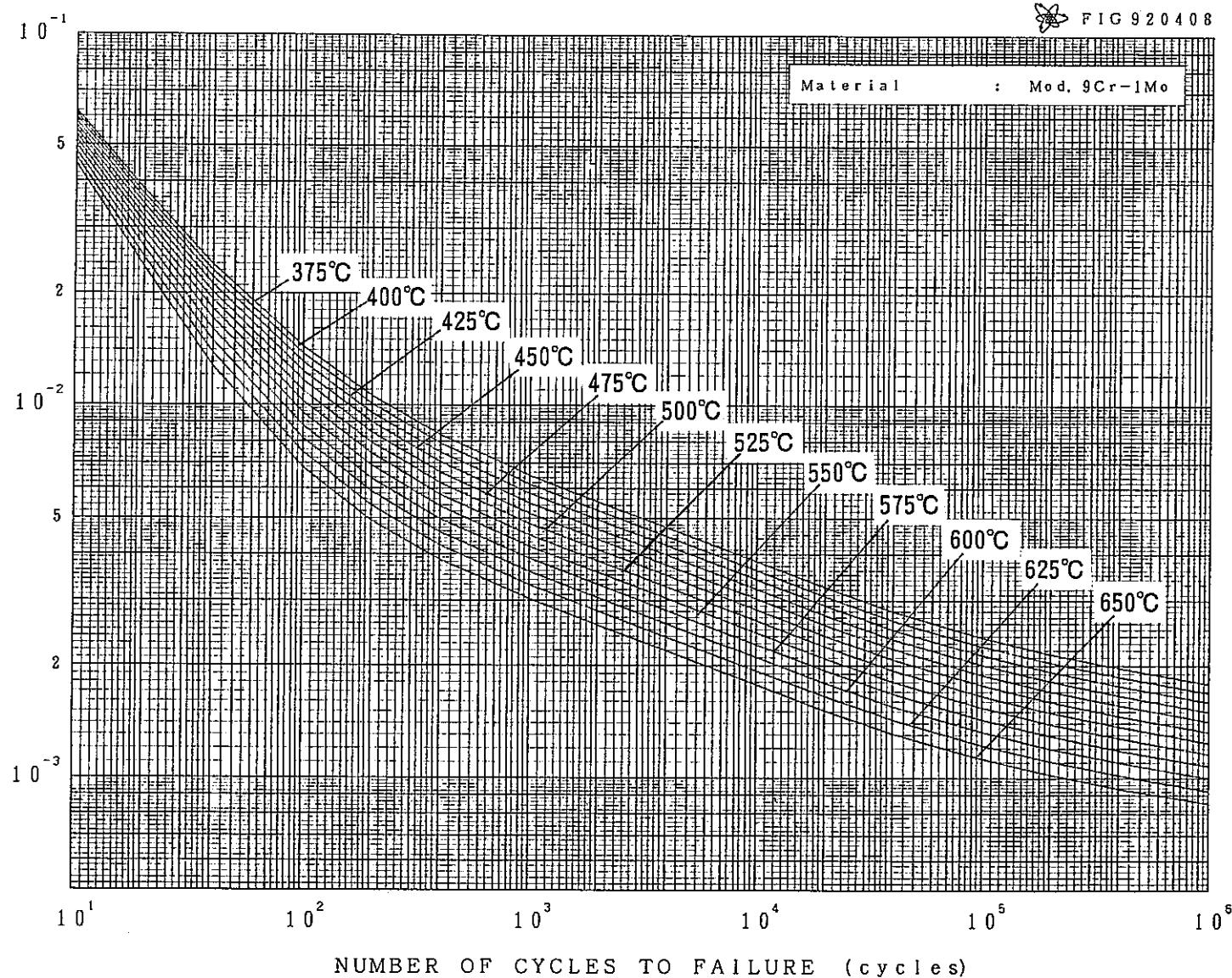
繰返し回数 Nd \ 温度°C	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0546	0.0524	0.0502	0.0478	0.0454	0.0429	0.0403	0.0377	0.0350	0.0322	0.0295	0.0267
2×10	0.0325	0.0309	0.0291	0.0273	0.0255	0.0237	0.0218	0.0199	0.0180	0.0162	0.0143	0.0126
4×10	0.0202	0.0189	0.0177	0.0164	0.0151	0.0138	0.0126	0.0114	0.0102	0.00903	0.00796	0.00696
10^2	0.0121	0.0113	0.0105	0.00965	0.00886	0.00809	0.00734	0.00663	0.00595	0.00532	0.00472	0.00417
2×10^2	0.00901	0.00839	0.00778	0.00718	0.00660	0.00604	0.00550	0.00498	0.00450	0.00404	0.00361	0.00321
4×10^2	0.00715	0.00666	0.00618	0.00572	0.00526	0.00483	0.00441	0.00401	0.00363	0.00327	0.00294	0.00263
10^3	0.00563	0.00526	0.00489	0.00453	0.00418	0.00384	0.00352	0.00321	0.00292	0.00264	0.00238	0.00213
2×10^3	0.00480	0.00448	0.00416	0.00386	0.00356	0.00327	0.00300	0.00274	0.00249	0.00225	0.00202	0.00181
4×10^3	0.00409	0.00381	0.00355	0.00329	0.00303	0.00279	0.00255	0.00233	0.00212	0.00191	0.00172	0.00154
10^4	0.00331	0.00309	0.00287	0.00266	0.00245	0.00226	0.00207	0.00189	0.00171	0.00155	0.00139	0.00125
2×10^4	0.00282	0.00263	0.00244	0.00226	0.00209	0.00192	0.00176	0.00161	0.00146	0.00132	0.00119	0.00107
4×10^4	0.00244	0.00228	0.00212	0.00197	0.00182	0.00168	0.00154	0.00141	0.00128	0.00117	0.00105	0.000951
10^5	0.00209	0.00195	0.00182	0.00169	0.00157	0.00145	0.00133	0.00122	0.00111	0.00102	0.000921	0.000832
2×10^5	0.00190	0.00177	0.00165	0.00154	0.00143	0.00132	0.00121	0.00111	0.00102	0.000930	0.000845	0.000765
4×10^5	0.00174	0.00163	0.00152	0.00142	0.00131	0.00122	0.00112	0.00103	0.000943	0.000861	0.000784	0.000711
10^6	0.00158	0.00148	0.00138	0.00129	0.00120	0.00111	0.00102	0.000941	0.000863	0.000789	0.000719	0.000653

(備考) 本表は繰り返しひずみ速度が 10^{-6} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

別表3 許容ひずみ範囲 ε_t (C) (mm/mm)
 App. Table 3 Allowable strain range ε_t (C)

繰返し回数 Nd 温度°C	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0499	0.0472	0.0445	0.0416	0.0387	0.0357	0.0327	0.0296	0.0266	0.0236	0.0206	0.0177
2×10	0.0292	0.0272	0.0252	0.0231	0.0211	0.0190	0.0170	0.0150	0.0132	0.0114	0.00972	0.00822
4×10	0.0180	0.0166	0.0152	0.0138	0.0124	0.0111	0.00987	0.00869	0.00760	0.00659	0.00568	0.00487
10^2	0.0108	0.00991	0.00905	0.00822	0.00742	0.00667	0.00595	0.00529	0.00467	0.00411	0.00360	0.00314
2×10^2	0.00809	0.00744	0.00681	0.00620	0.00562	0.00507	0.00456	0.00407	0.00363	0.00321	0.00284	0.00250
4×10^2	0.00645	0.00595	0.00546	0.00493	0.00454	0.00411	0.00371	0.00334	0.00299	0.00266	0.00236	0.00209
10^3	0.00512	0.00473	0.00436	0.00400	0.00365	0.00332	0.00300	0.00270	0.00241	0.00215	0.00191	0.00169
2×10^3	0.00436	0.00403	0.00371	0.00340	0.00311	0.00283	0.00255	0.00229	0.00206	0.00183	0.00163	0.00144
4×10^3	0.00372	0.00344	0.00316	0.00290	0.00265	0.00240	0.00217	0.00195	0.00175	0.00156	0.00139	0.00123
10^4	0.00301	0.00278	0.00256	0.00235	0.00214	0.00194	0.00175	0.00158	0.00142	0.00126	0.00112	0.000996
2×10^4	0.00256	0.00237	0.00218	0.00200	0.00183	0.00166	0.00151	0.00136	0.00122	0.00110	0.000979	0.000872
4×10^4	0.00223	0.00206	0.00190	0.00175	0.00160	0.00146	0.00133	0.00120	0.00109	0.000975	0.000874	0.000780
10^5	0.00192	0.00178	0.00164	0.00151	0.00139	0.00127	0.00116	0.00105	0.000952	0.000858	0.000772	0.000691
2×10^5	0.00174	0.00162	0.00150	0.00138	0.00127	0.00116	0.00106	0.000965	0.000875	0.000791	0.000713	0.000640
4×10^5	0.00160	0.00149	0.00138	0.00127	0.00117	0.00108	0.000983	0.000896	0.000814	0.000737	0.000665	0.000598
10^6	0.00146	0.00136	0.00126	0.00116	0.001072	0.000985	0.000902	0.000823	0.000749	0.000679	0.000613	0.000553

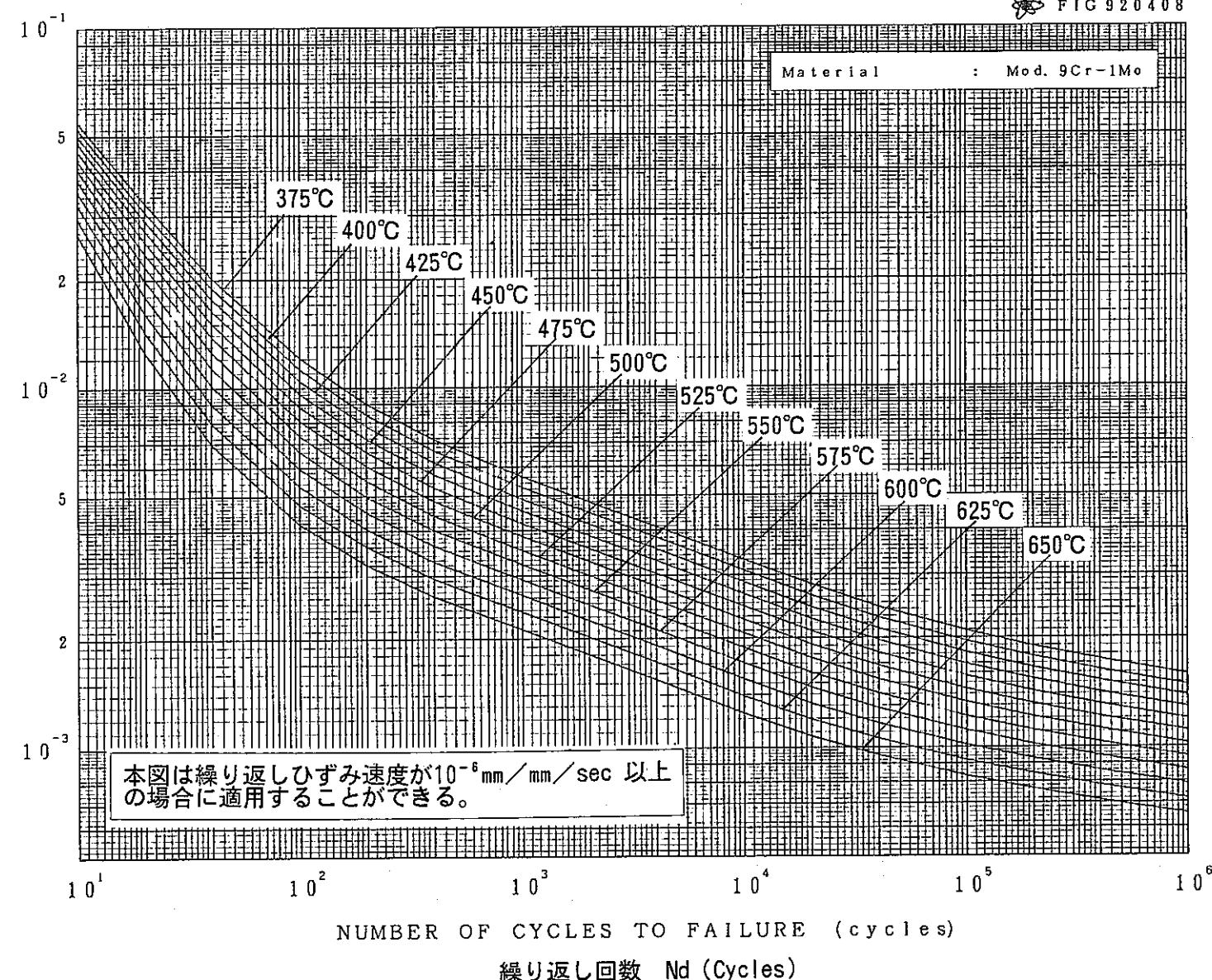
許容ひずみ範囲 ε_t (mm/mm)



繰り返し回数 Nd (Cycles)

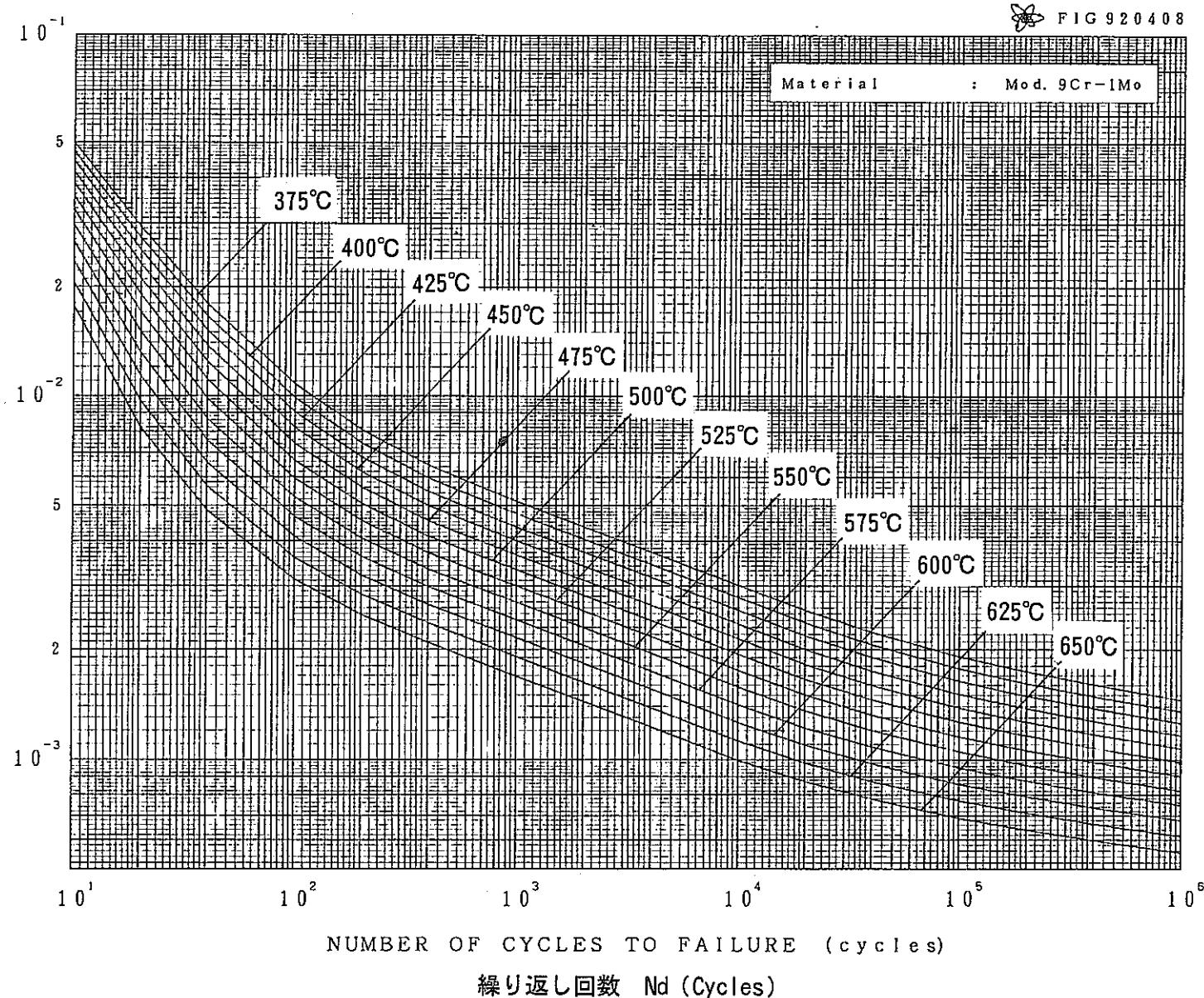
別図1 Mod. 9Cr-1Mo(NT)の許容ひずみ範囲 (A) ε_t (mm/mm)

許容ひずみ範囲 ε_t (mm/mm)



別図2 Mod. 9Cr-1Mo(NT)の許容ひずみ範囲 (B) ε_t (mm/mm)

許容ひずみ範囲 ε_t (mm/mm)



別図3 Mod. 9Cr-1Mo(NT)の許容ひずみ範囲 (C) ε_t (mm/mm)

付 錄

付録-1 管仕様材料の低サイクル疲労特性の取扱い

1. 高速原型炉用材料強度基準の策定時における基本的な考え方

材料強度基準値策定のため、管仕様材料の低サイクル疲労特性を調査する上で以下の基本的考え方を採用している。

- (1) 種々の製品形状の内、管仕様材料については、その加工過程を受けた相当板材によって低サイクル疲労特性は代表する。
- (2) 管形状の試験片に関する材料試験結果の取扱いについては、純粹な試験技術上の問題点（試験片内壁の表面粗さ処理、真円度および偏肉ならびに高ひずみ域における座屈等）が指摘されていることから、標準試験片（JIS およびASTMとも中実丸棒か平板試験片）結果との比較によって評価母集団への採用あるいは不採用を決定する。
- (3) 実機構造部材である管の軸方向引圧疲労寿命の低下については、設計基準値が有する安全裕度に含まれるものとする。

以上の考え方は、換言すれば、軸方向繰り返し負荷を受ける管形状試験片の疲労寿命の低下は管仕様材料の特性劣化を直接的に示すものではなく、種々の低下要因を含んだ結果であり、管仕様材料の低サイクル疲労特性は本質的に他の製品形状の特性と同等である（管相当板材の疲労寿命によって確認）という主張に他ならない。

2. 高速原型炉用材料強度基準策定時における管仕様材料データの取扱い

標準試験方法を規定している主な規格では、いずれも標準試験片は平行部の有無に関係なく、中実丸棒あるいは平板試験片としている⁽¹⁾、⁽²⁾、⁽³⁾。管形状を呈した材料試験片に関しては、わずかに「F B R 金属材料試験実施要領書」⁽¹⁾ およびASTM E606⁽³⁾に形状・寸法に留意することを条件に試験を許容する記述がみられる。特に後者のASTMでは、試験の実施は可能であっても、結果に係わる影響因子（き裂進展速度や粒径）を標準試験片結果と直接比較できないと解説されている。高速原型炉用材料強度基準の策定時には、「F B R 金属材料試験実施要領書」に準拠し、中実丸棒試験片を標準として、管形状（中空）試験片を許容するものとしてデータベースは構築している。一方、熱間圧延板から加工（ガン・ボーリングおよびホーニング）された管形状試験片の低サイクル疲労寿命に関しても、中実丸棒試験片を用いた試験結果と比較して短寿命となる傾向は見られる⁽⁴⁾。ただし、著しい寿命低下を示したオーステナイト系鋼においても内壁を試験片外表面と同程度に仕上げることで、疲

労寿命は標準試験片データと同程度に改善されることも指摘されている⁽⁵⁾。

こうした背景を踏まえて、オーステナイト系鋼に関しては、試験技術上の種々の問題点から短寿命側になりがちな管形状試験片データをデータベースから除いて（管相当板材試験データは採用している）評価の母集団としている。その結果、3鋼種（SUS304, 316および321）間にヒート間のばらつきを含めてデータのばらつきが無くなり、全鋼種をまとめた整理が可能となった。

他方、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT)鋼に関しては、策定時に管形状試験片データとその他の試験データとの間に有意な差が見出せないことから、収集データを一括して取り扱っている。それぞれの代表的なあてはめ結果を図-1および図-2に示した。図-1(a)、(b)はSUS304の評価結果であるが、管形状試験片データが特に高ひずみ領域において著しく短寿命側の試験結果となっていることが判る。しかし、実設計において重要となる高温低ひずみ領域では次第に管形状試験片データを除いた最適疲労破損線に近い結果となっており、実用上同式を用いても妥当な予測結果が得られるが期待できる。図-2(a)および(b)は、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT)鋼に関する試験結果ならびに評価結果である。管形状試験片データはいずれも全データのばらつき範囲に含まれ、データ間には有意な差が認められない。こうした結果は、データベースを一括で取り扱った策定過程が妥当であることを示している。

3. Mod. 9Cr-1Mo 鋼の管形状試験片による疲労試験結果

Mod. 9Cr-1Mo 鋼に関する管形状試験片の低サイクル疲労試験結果と、同一材料の丸棒試験片等を適用した低サイクル疲労試験結果、最適低サイクル疲労特性曲線ならびに設計許容値（1989年度に暫定的に与えられた低サイクル疲労曲線および同特性式に基づいて求められた暫定設計許容値を記載⁽⁶⁾した）との比較を図-3に示した。

SUS304や $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と比較して（図1および図2参照）、管形状試験片のデータそのもののばらつきが大きい。同試験片を適用した場合の疲労寿命低下は、高ひずみ側で大きくなる傾向があるが、最大でSUS304の場合よりやや大きく全体としてファクタ3～5程度である。また、図中には記載していないが、ORNLレポート記載の疲労特性からは1オーダ程度の低下を示している。

これらの結果から、今回の許容ひずみ範囲策定にともなう管形状試験データの取扱いについては、製造加工上の精度等の問題により、寿命のばらつきや低下をもたらしたものと判断されることから、試験データの削除を行ったものである。

参考文献

- (1) 「FBR 金属材料試験実施要領書」
動力炉・核燃料開発事業団、PNC N241 79-32(1979).
- (2) 「金属材料の疲れ試験方法通則」、JIS Z2273(1978)
- (3) "Standard Recommended Practice for CONSTANT-AMPLITUDE LOW-CYCLE FATIGUE TESTING", ASTM E606(1980).
- (4) 例えば、浅山、青砥、和田、「SUS304の軸力-ねじり重畠負荷下における多軸疲労およびクリープ疲労強度」、日本機械学会、機械学会論文集、A523(1990), pp. 532-536.
- (5) 「2 1/4Cr-1Mo鋼のPWHT効果およびSUS321鋼の高温強度試験」、
動力炉・核燃料開発事業団、PNC SJ218 82-01(1982).
- (6) 「高速炉用高温構造設計基準 材料強度基準等 高度化」
動力炉・核燃料開発事業団、PNC SN9410 89-086(1989).

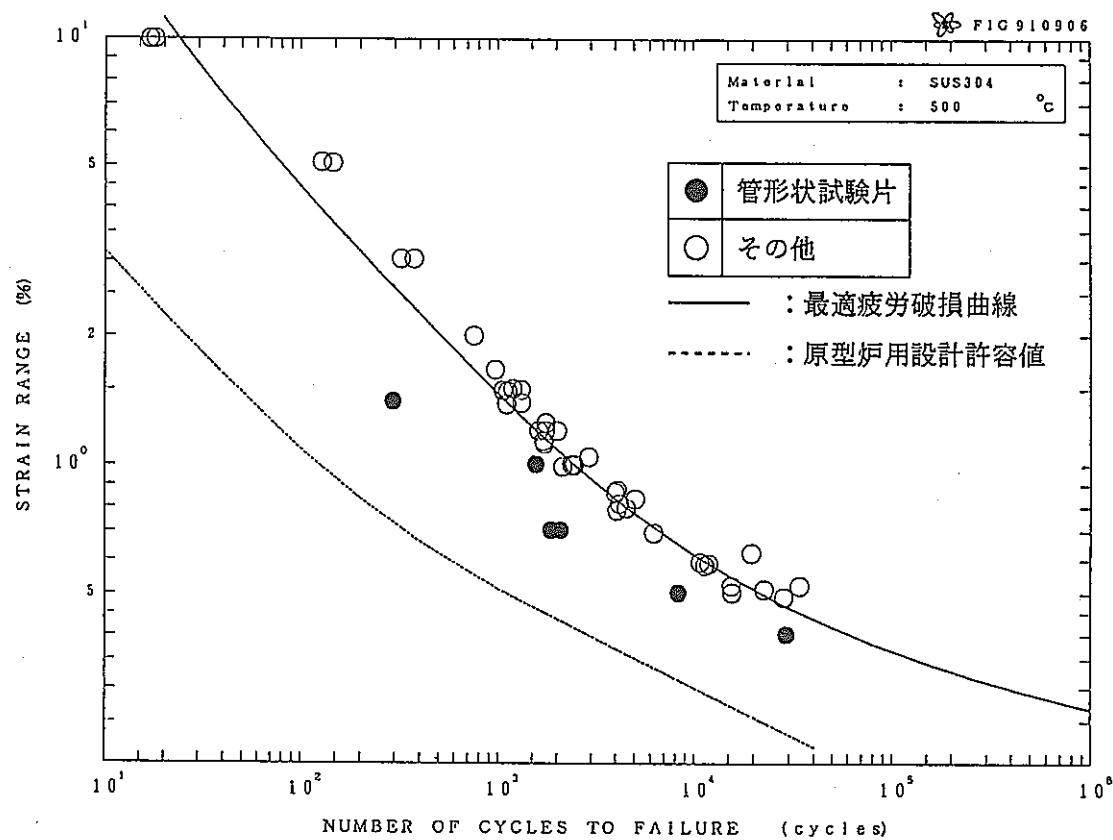


図-1(a) SUS304の低サイクル疲労特性 (500°C)

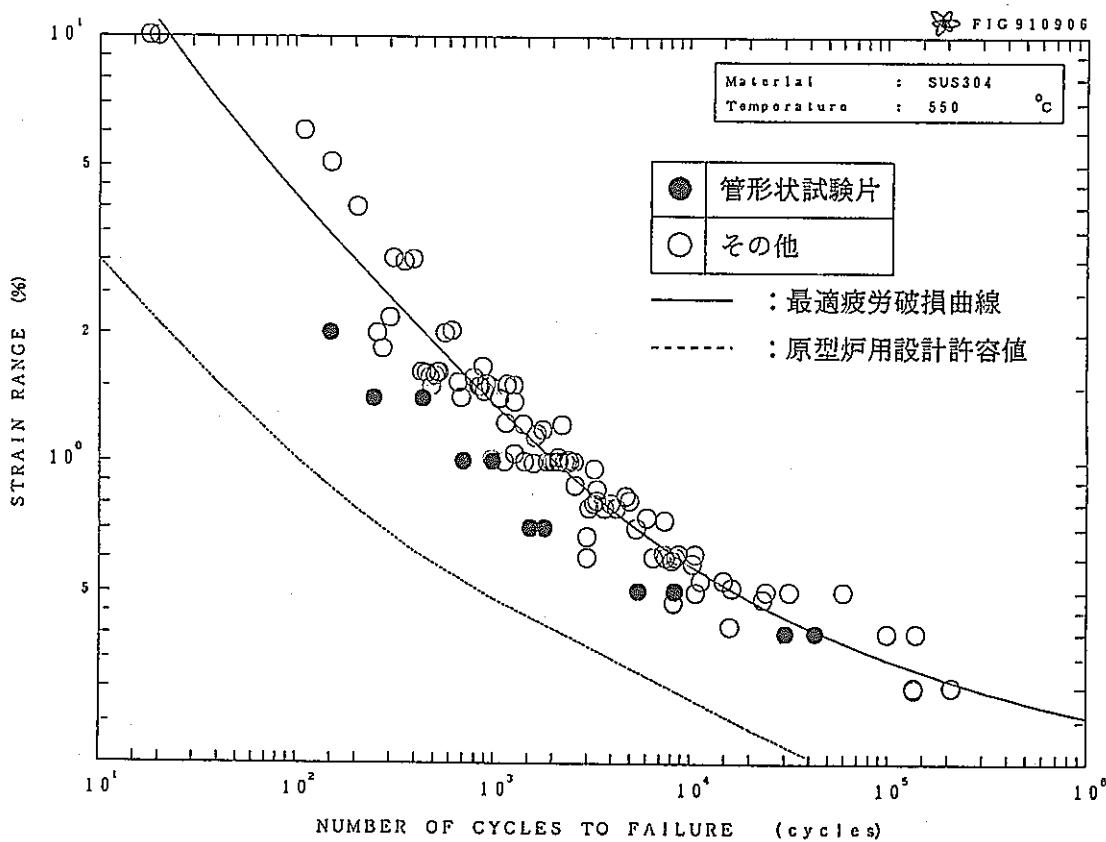


図-1(b) SUS304の低サイクル疲労特性 (550°C)

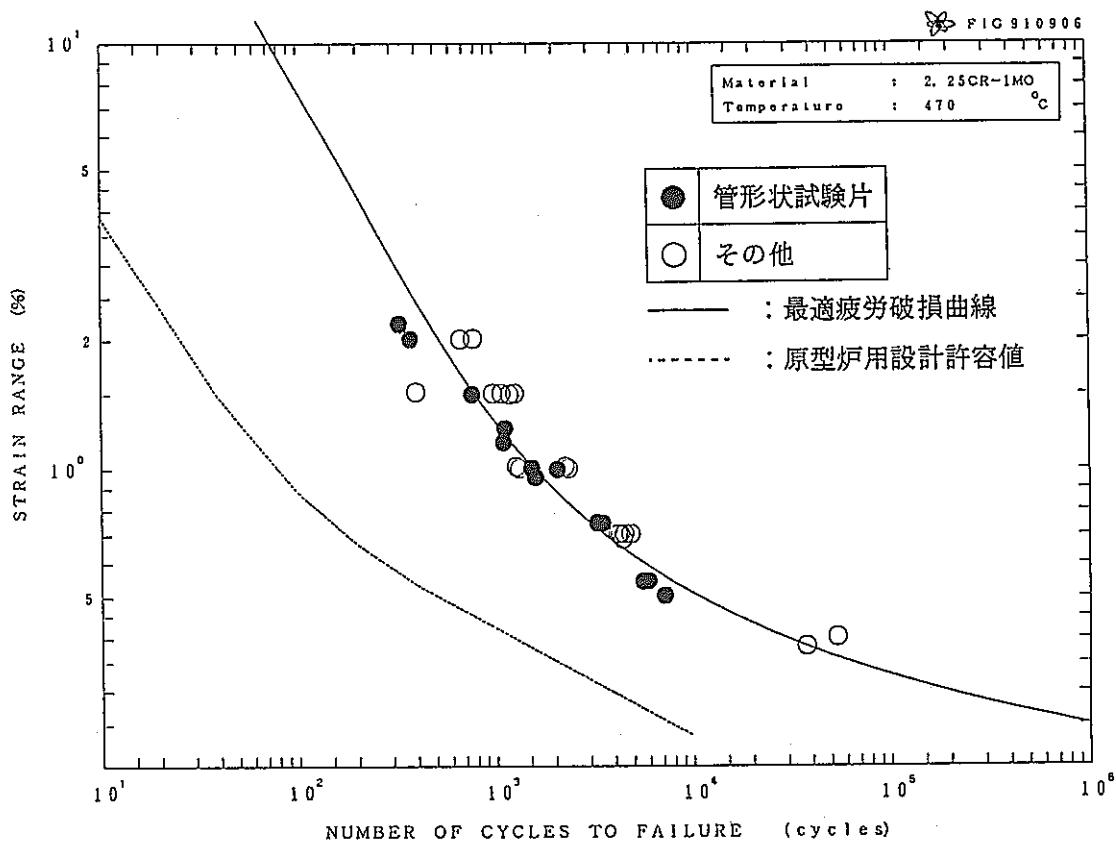


図-2(a) 2 1/4Cr-1Mo鋼の低サイクル疲労特性 (470°C)

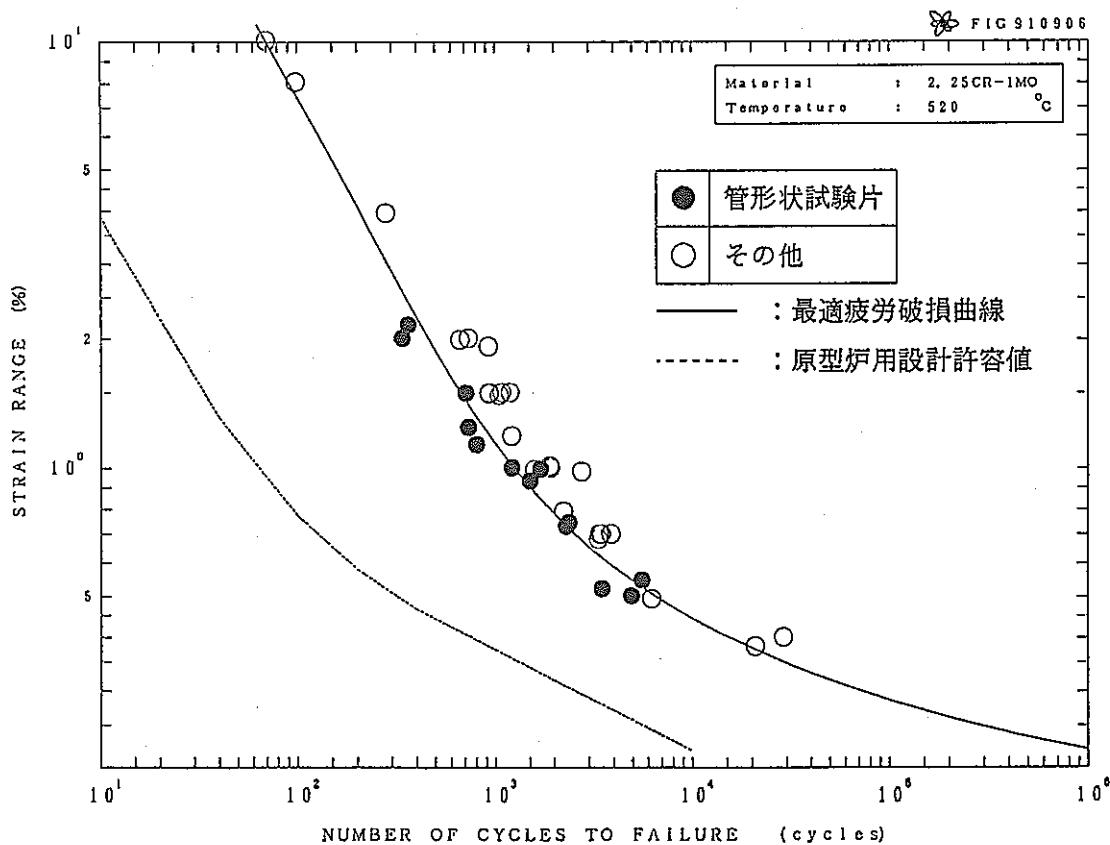


図-2(b) 2 1/4Cr-1Mo鋼の低サイクル疲労特性 (520°C)

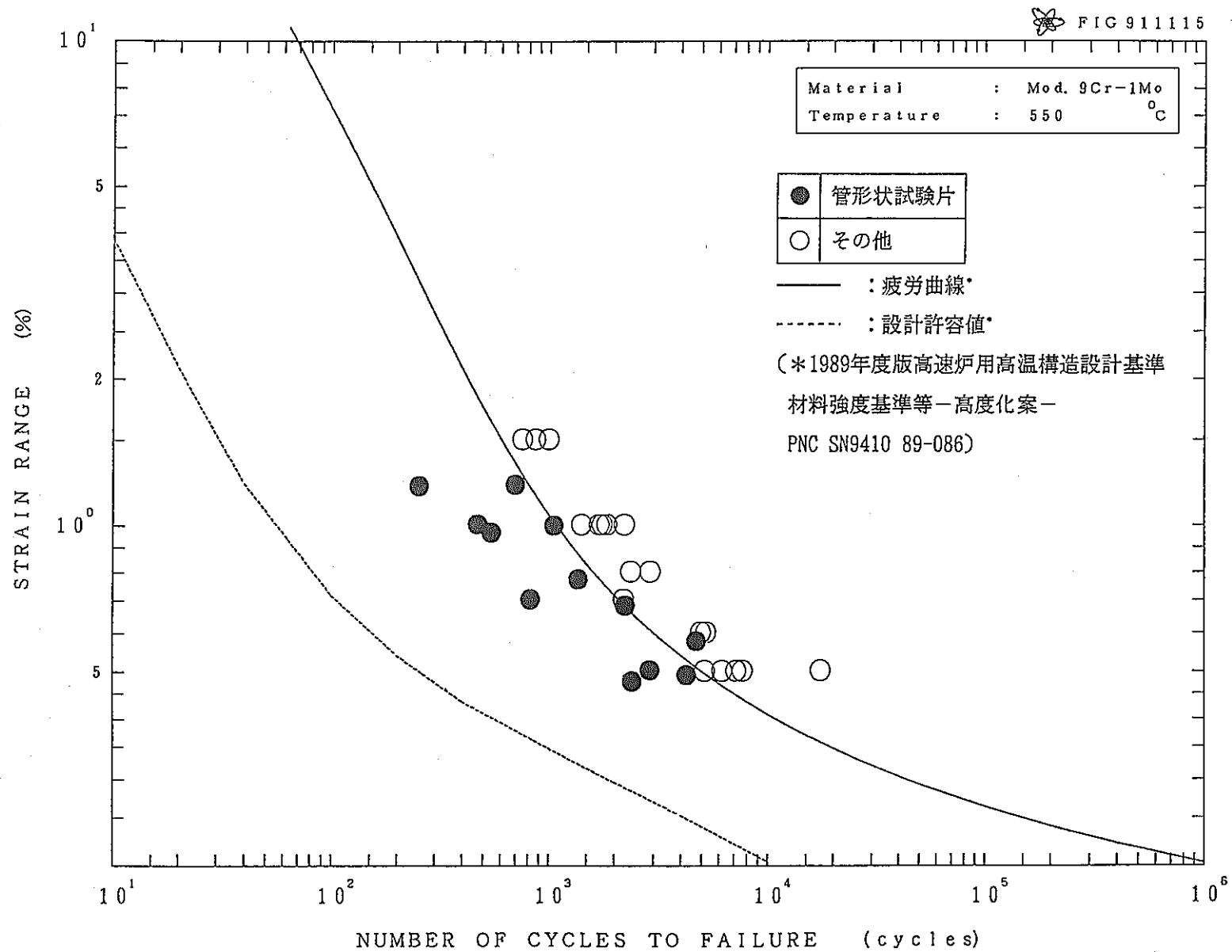


図-3 Mod. 9Cr-1Mo鋼の低サイクル疲労特性 (550°C)

付録-2 Mod. 9Cr-1Mo 鋼高温高サイクル疲労試験における試験中断・復帰方法による 疲労寿命への影響

1. 概要

Mod. 9Cr-1Mo 鋼(NT)の許容ひずみ範囲策定のために取得した高サイクル疲労試験データは、ORNL 規案の最適疲労破損線図と比較すると、長寿命側で本試験結果は低下する傾向を示した。高サイクル疲労試験の場合、長時間に及ぶ試験のため試験途中止むを得ない事象から、試験を中断停止することが多々ある。今回の試験に関しても中断停止、再復帰等の作業が試験途中発生しており、これらの影響による疲労寿命の低下がないことを、試験方法から整理し参考としてまとめたものである。

2. 試験方法

2-1 試験片の製作

試験片の採取位置は、Mod. 9Cr-1Mo 鋼素材が板材であることから、素材の仕上加工方向（ロール方向）に平行に採取した。また、本試験は、高周波加熱装置付の試験装置であり、装置上の都合から試験温度分布の調整が困難であったため、試験片全長寸法を通常より長く製作し、試験温度分布調整が容易になるように加工を施した。試験片は、平行部直径を 10 φ とし平行部長さ 25 mm、平行部評点間距離 (G L) 20 mmとした。試験片製作寸法図を図-1 に示す。なお。試験片製作方法および加工精度等は、FBR 金属材料試験実施要領書に従い製作している。

2-2 試験装置と試験方法

高サイクル疲労試験装置は、閉ループ電気油圧サーボ方式の負荷容量 ± 10 t の疲労試験機である。試験装置の概略仕様を表-1 に示す。

(1) 試験片拘み部

試験片の拘み部は、繰り返し引張・圧縮による試験片の座屈を防止するため、試験片の軸芯を保証する形状となっており、また装着時に過大なねじりモーメントを試験片に負荷しない構造としている。本試験に用いた高サイクル疲労試験装置用試験片拘み部を図-2 に示す。

(2) ひずみ検出器

試験片平行部のひずみの測定は、標点間距離に直接石英棒を押し当てる押し当て型ひず

み計を用いている。さらに、本試験の制御方法は軸ひずみ制御であるため、負荷速度に対し追従性を持たせるために抱き込み型を使用した。検出器には、ひずみゲージ方式を用いている。押し当て型ひずみ計の外観図を図-3に示す。

(3) 加熱装置

本試験に用いた加熱装置は、高周波加熱装置である。温度検出用熱電対は、直径0.3φのP R熱電対を採用し、温度の制御はP I D調節方式とした。試験片の標点間内温度分布は、試験前にダミー試験片（同一寸法・同一素材）にて温度分布を測定している。高周波加熱の場合、標点間内3点の熱電対を軸方向に点溶接し、試験片R部に制御用熱電対を取り付け温度分布を測定し、加熱装置の出力調整ならびにコイル形状を決定する方法を採用している。今回の試験における温度分布巾は、±5°Cと比較的良好な分布を示した。標点間内温度分布を測定した結果を図-4に示す。

試験時は、図-5に示すように熱電対を試験片のR部に点溶接してこれを制御し、標点間の温度は中心に1点の熱電対を縛り付けて試験温度までモニターする。昇温後の均熱（熱平行状態）時間は、ひずみ計の安定時間を考慮し、30分とした。

(4) 破断の定義

Mod.9Cr-1Mo鋼の低サイクル疲労試験の場合、繰り返し軟化材であることから、繰り返し数が引張側最大応力から約50%以上低下した時点で試験装置を停止させ、その後チャート紙（荷重-ひずみと時間の関係）から、停止した繰り返し回数の寿命中期（1/2N）に相当する引張側応力値の25%低下した時点を破断と定義している。しかし、高サイクル疲労試験の場合、発振周波数が高いためレコーダの追従性がなく、チャート紙から破断回数を導くことができない。このため、引張側最大応力値から50%低下した時点で試験装置を停止させ、その時までの繰り返し回数を破断回数と定義した。図-6に破断の定義の概要を示す。

3. 試験結果

3-1 試験条件

Mod. 9Cr-1Mo 鋼高サイクル疲労試験条件を表-2に示す。

3-2 試験の中断と復帰

本試験における試験の中断状況を表-4にまとめ、中断・再復帰方法について、図-10にその方法を記述した。これらから、試験機の異常等による中断停止はなく、定期点検等により止むを得ず試験片の取り出しを余儀無くされたものであり、なんら試験片に害を及ぼすような中断ではなかった。

3-3 試験結果

Mod. 9Cr-1Mo 鋼高サイクル疲労試験結果を表-3に示し、その繰り返し応力と繰り返し回数の関係を図-7に、高サイクル疲労寿命の関係を図-8にそれぞれ示す。また、試験片破断後の試験片外観写真を図-9に示す。これらの結果、今回行った高サイクル疲労試験結果では、そのほとんどが試験途中の中断もなく行われている。また、途中中断を余儀無くされた試験片の応力挙動には、中断復帰による影響はみられない。また、疲労寿命は、極端に短い等の傾向もなく、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の最適疲労破損線図とほぼ同じ傾向を示していることから、試験方法の違いや中断による影響、さらにはその再復帰方法等の影響による寿命の低下はないものと判断できる。

表-1 高サイクル疲労試験装置の概略仕様

(1) 形式	電気油圧サーボ制御方式
(2) 最大負荷容量	動的±10トン
(3) 最大ストローク	±50mm
(4) 制御方式	荷重、ひずみ、ストローク制御対応
(5) 制御波形	サイン波、三角波、台形波、矩形波
(6) 最大負荷速度	100Hz
(7) グリップ構造	水冷式メカニカルグリップ構造
(8) ロードセル	±10トン
(9) ひずみ計	
・型式	高温軸ひずみ計（抱き込み型押し当て式）
・制御測定範囲	GL = 20mm ±0.5mm
・最大周波数	3Hz（ひずみ制御）
(10) 加熱装置	
・形式	トランジスタ型高周波加熱方式
・最大出力	6kW
・制御温度範囲	0～800°C
・制御方式	PID制御

表-2 高サイクル疲労試験条件

(1) 供試材	Mod. 9Cr-1Mo 鋼板材
(2) 負荷形式	単軸引張・圧縮 (平均ひずみ"零")
(3) 制御方式	ひずみ制御
(4) 負荷波形	三角波
(5) ひずみ速度	1. 0 % / sec
(6) ひずみ範囲	0. 2 % ~ 0. 3 %
(7) 試験温度	500, 550, 600 °C
(8) 試験片本数	6本 (内 1本試験継続中)

表-3 大気中高サイクル疲労試験結果

注) *1 N=1742000(試験片取り外し)、N=24388000、N=342945000(試験片取り外し)で合計3回中断。

試験機定期点検のため、ただ今試験中断中。

*2 中断時年末のため試験試験片を取り外す。

表－4 試験中断状況

試験温度	試験片番号	中断時 繰り返し数	中断原因	試験片取り出し の有無	備 考
500°C	HTH6H1	1742000	別試験の必要から	有り	
		24388000	電気室定検（停電）	無し	
		342945000	試験機定検（年末）	有り	現在試験中
550°C	HTH6H5	1184500	試験機定検（年末）	有り	

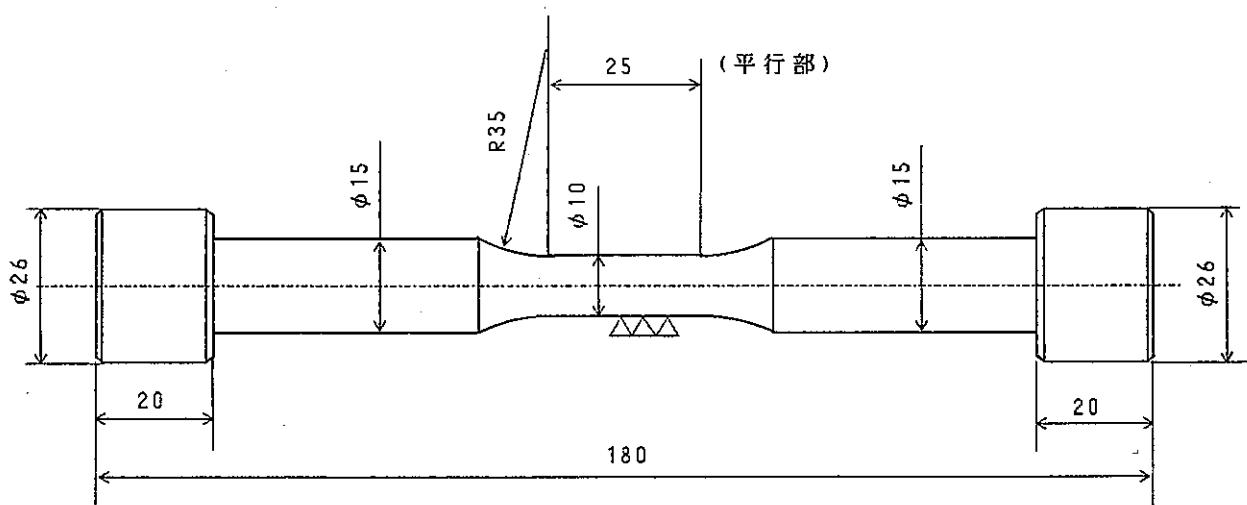


図-1 高サイクル疲労試験片外観図

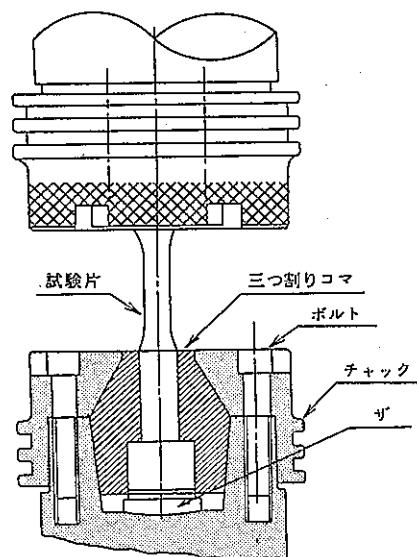


図-2 試験片掴み部の外観図

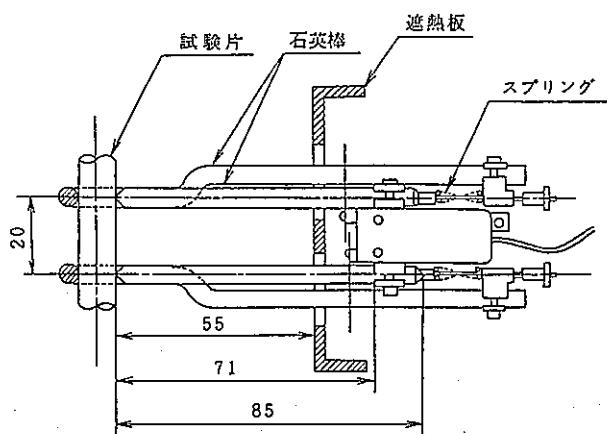


図-3 ひずみ計の外観図

600°Cの温度分布		550°Cの温度分布		500°Cの温度分布	
上部	594.0 °C	上部	544.0 °C	上部	494.0 °C
中部	600.3 °C	中部	551.0 °C	中部	502.0 °C
下部	595.0 °C	下部	544.0 °C	下部	493.9 °C

温度分布の測定方法
(R部制御のGL内3~5点測定)

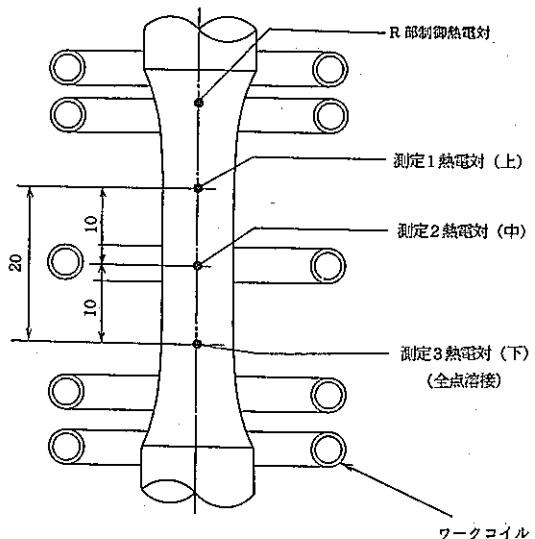


図-4 試験片温度分布測定方法及び結果

試験中の温度制御および温度モニター方法

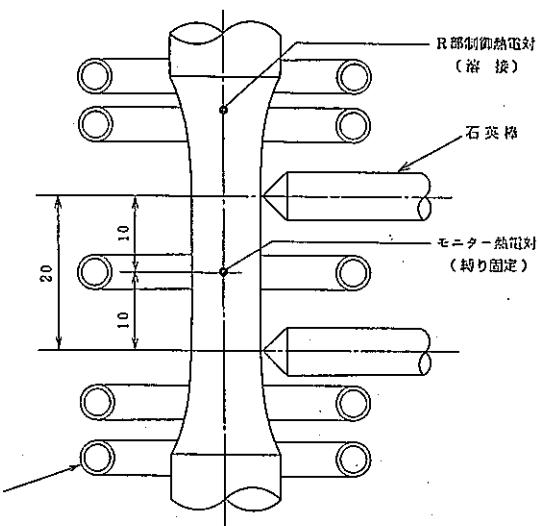


図-5 試験片温度制御方法

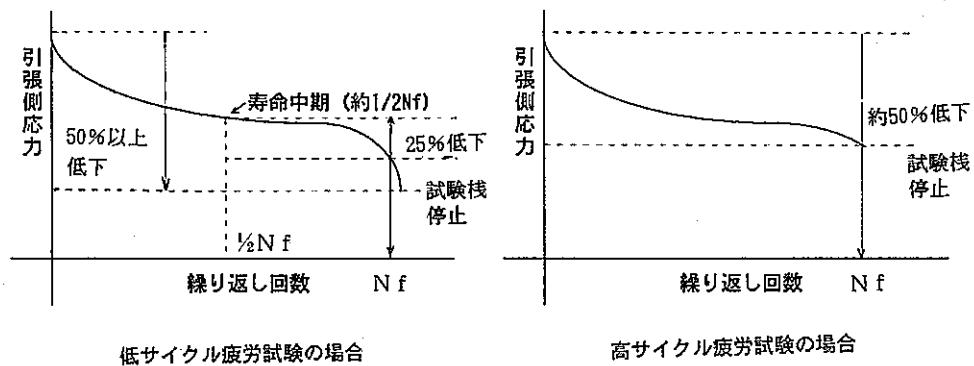


図-6 試験片破断の定義

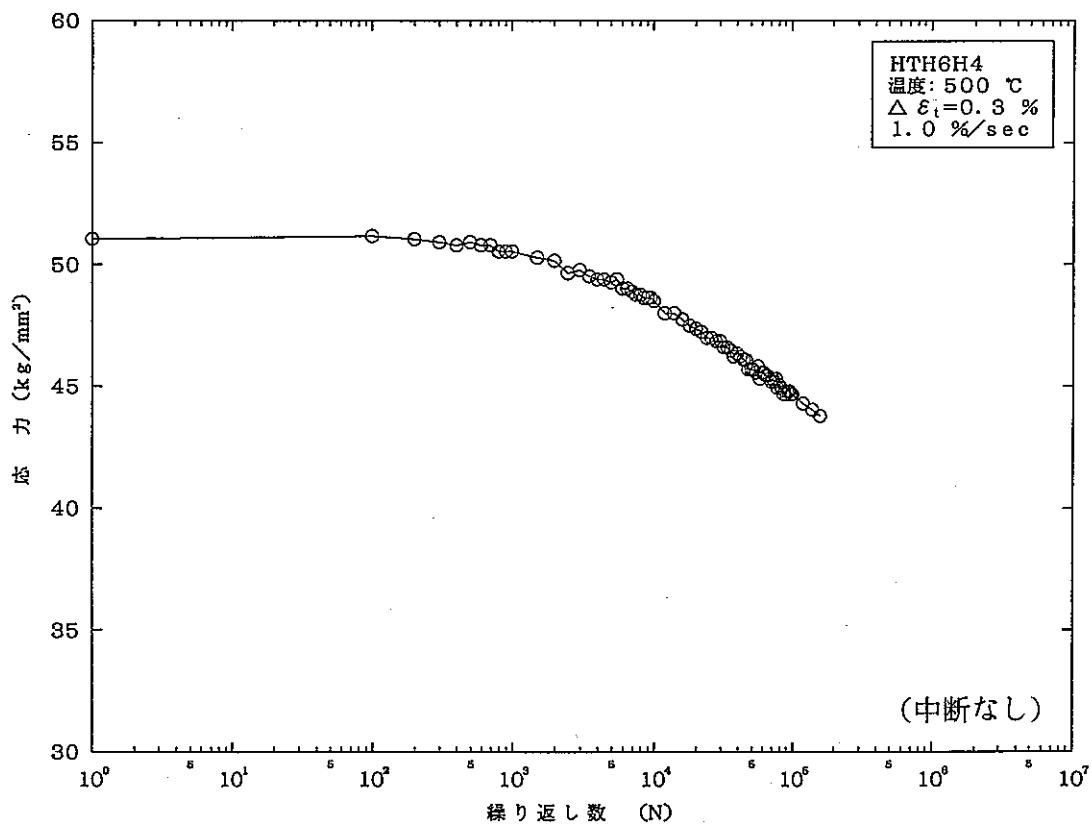


図-7(1) 繰り返し応力と繰り返し回数の関係 (500 °C)

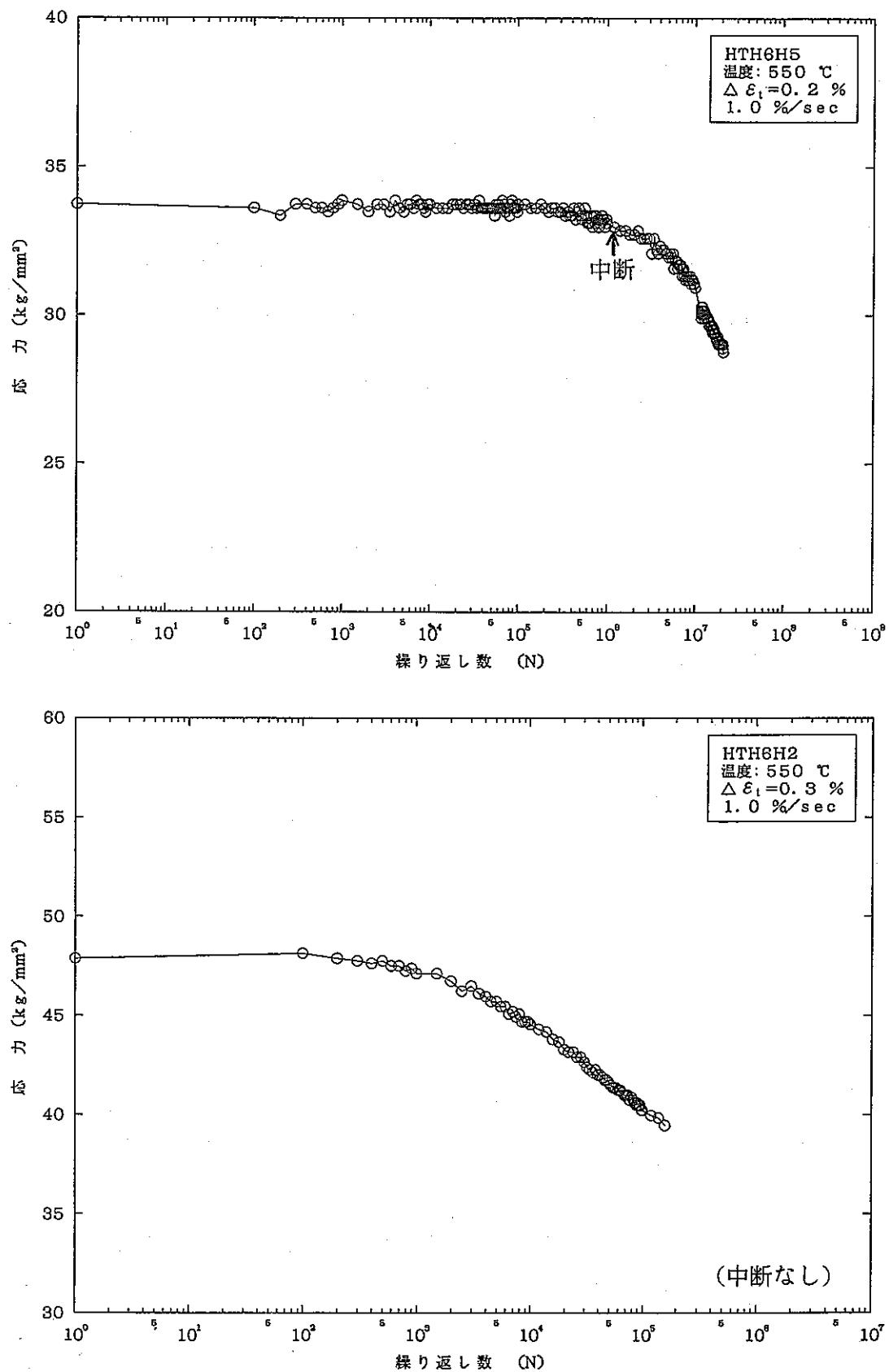


図-7(2) 繰り返し応力と繰り返し回数の関係 (550 °C)

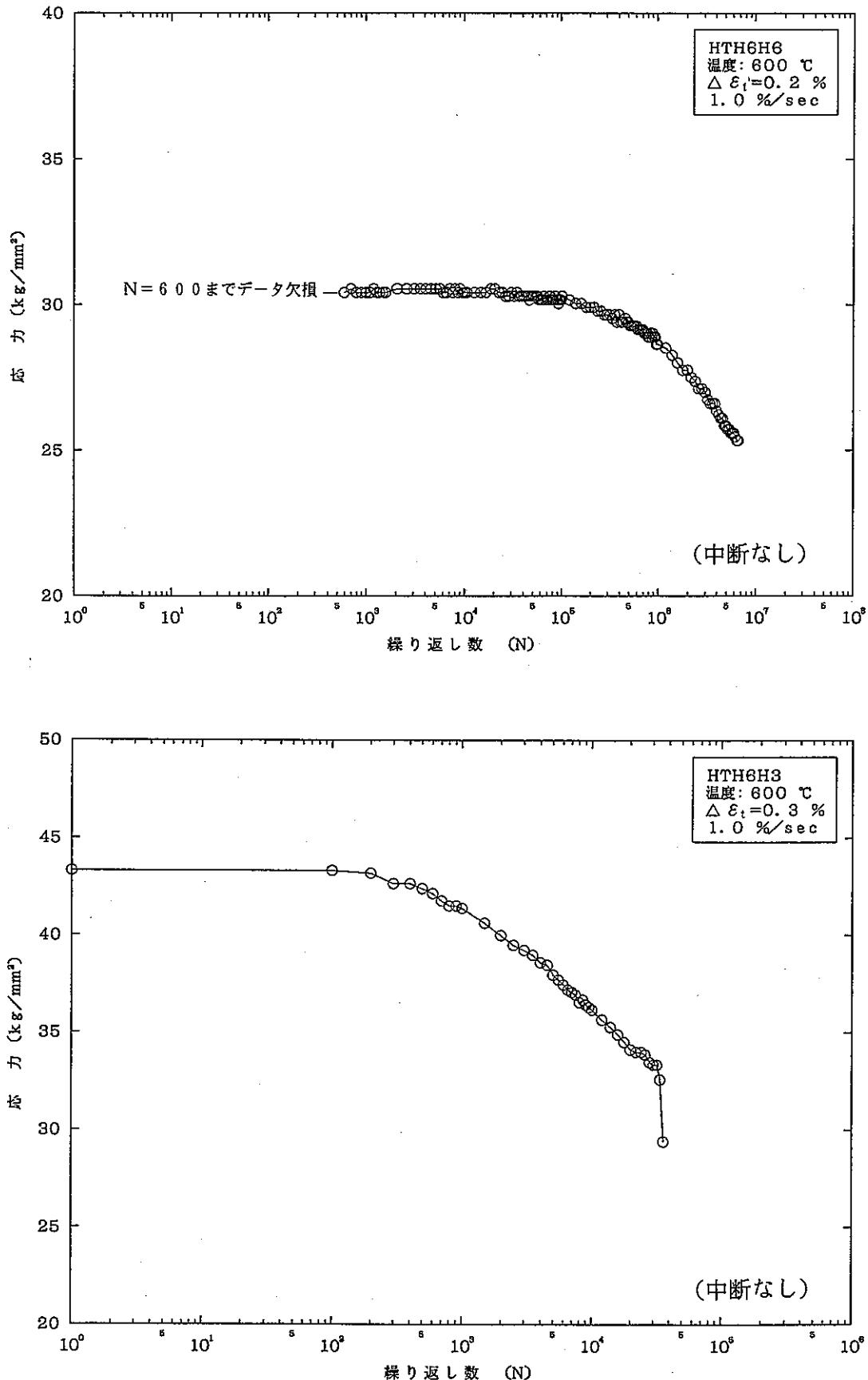


図-7(3) 繰り返し応力と繰り返し回数の関係 (600 °C)

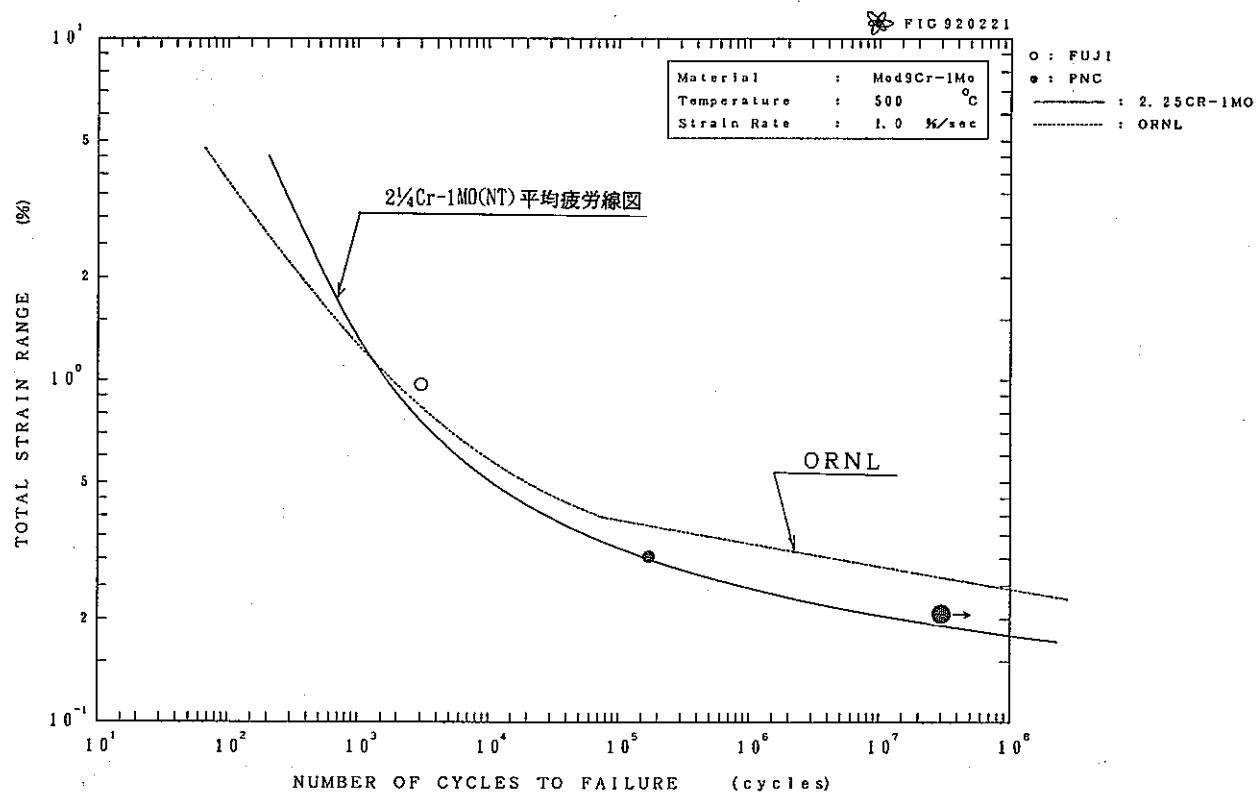


図-8(1) 高サイクル疲労寿命特性 (500°C)

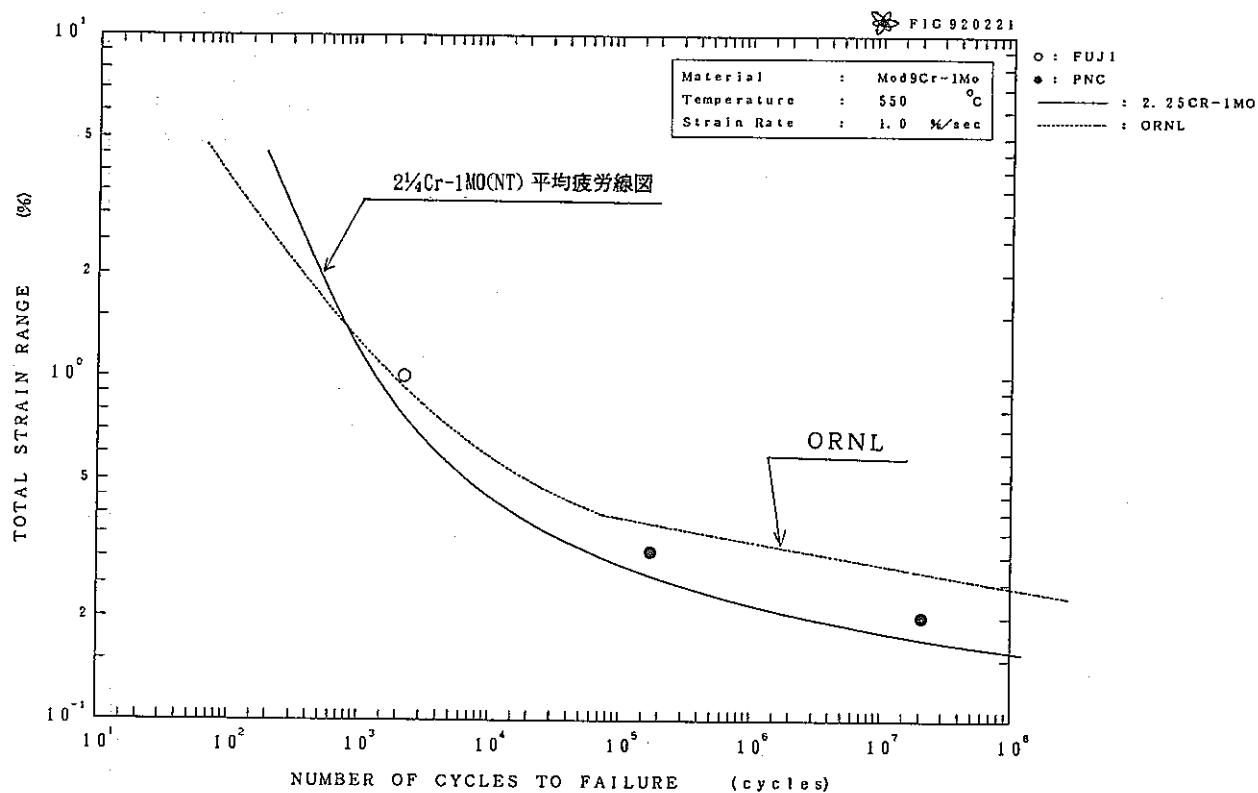


図-8(2) 高サイクル疲労寿命特性 (550°C)

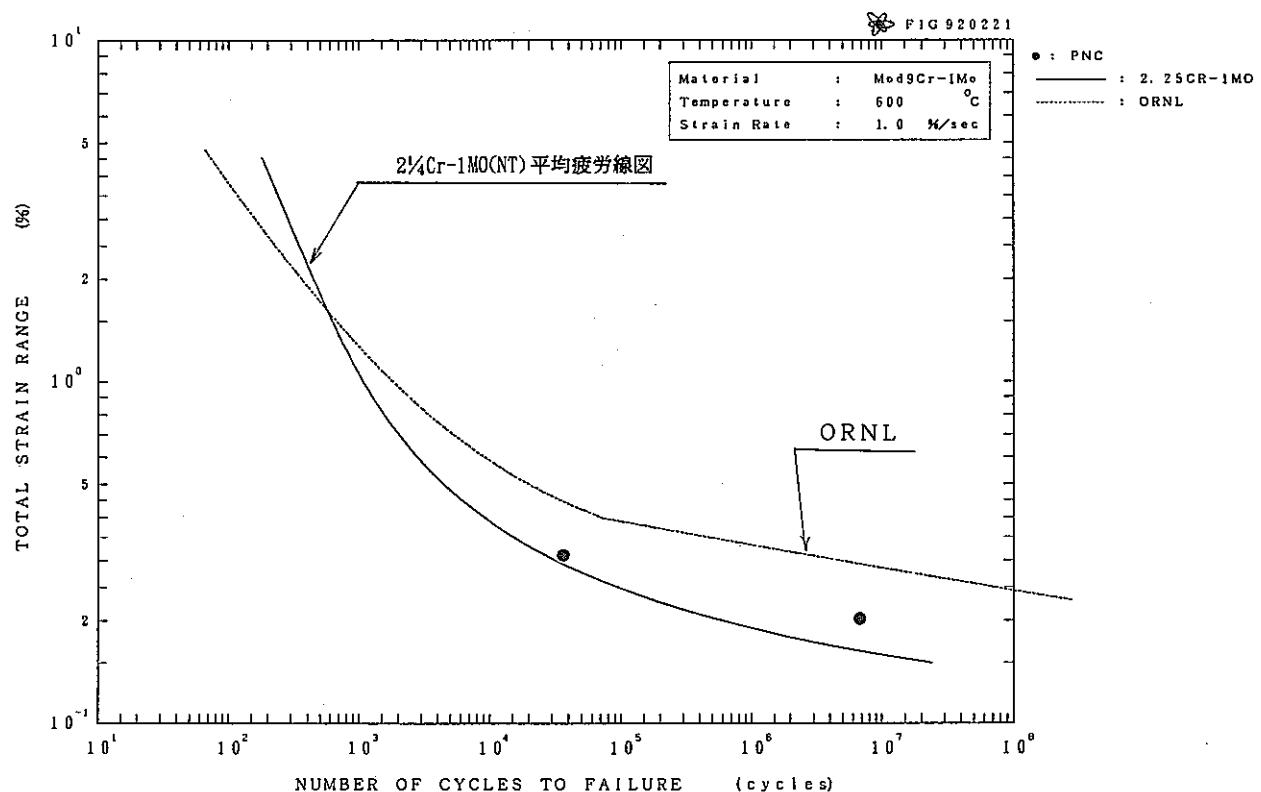


図-8(3) 高サイクル疲労寿命特性 (600°C)

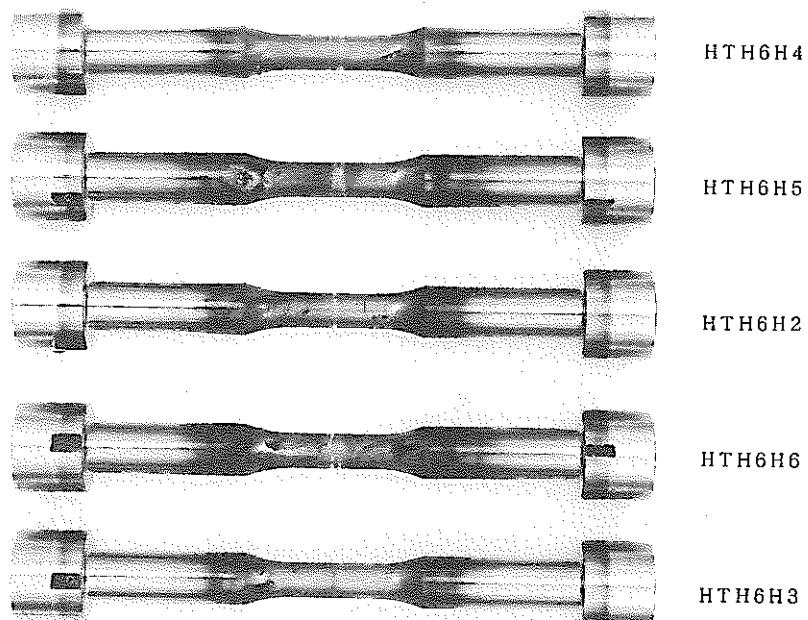


図-9 試験片破断後の試験片外観写真

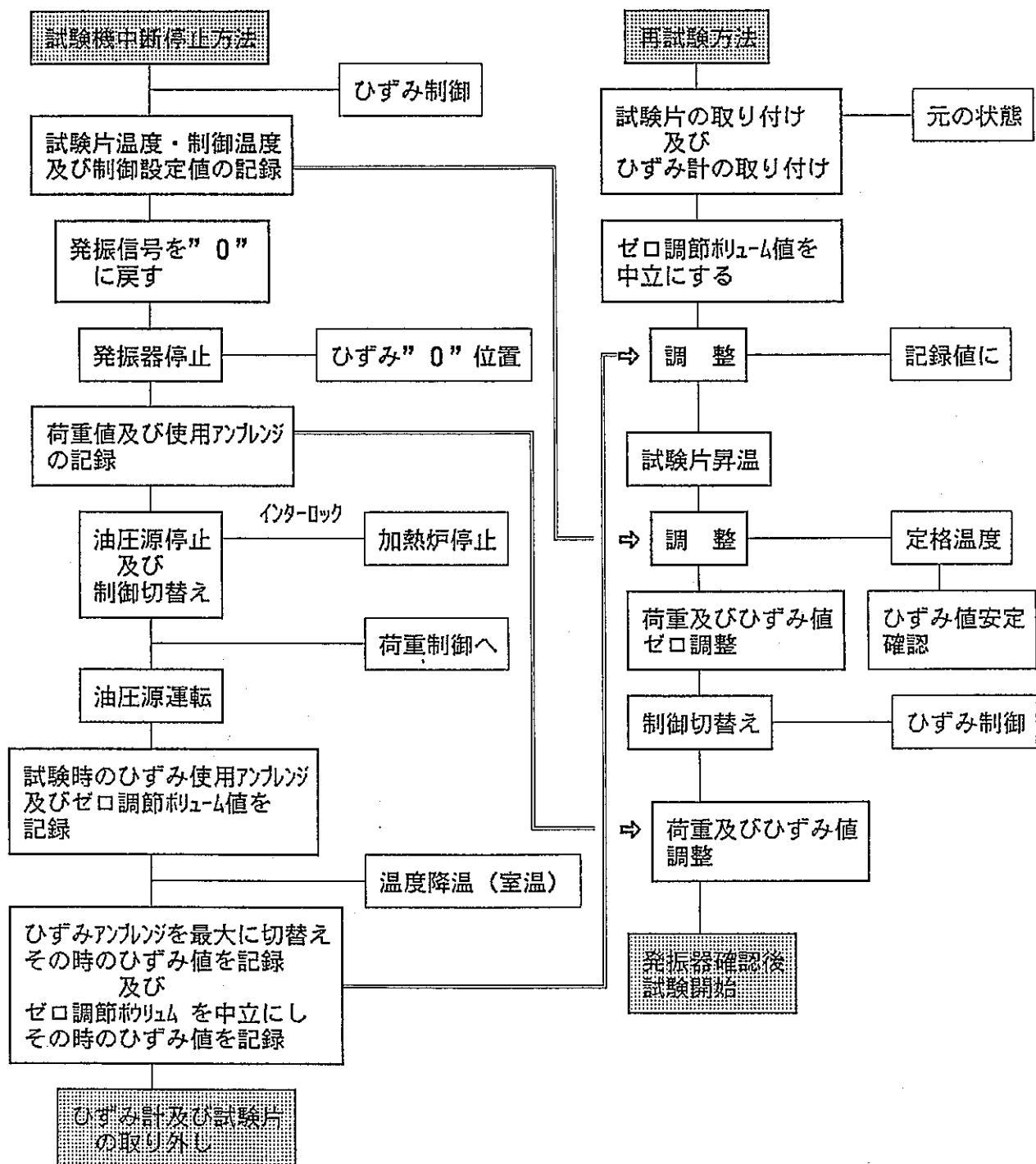


図-10 試験中断復帰方法