

システム化規格の開発（第4報）

— 確率論を用いた強度計算を目的とする材料の統計的特性：

316FR母材材料強度 —

（研究報告）



2002年5月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

システム化規格の開発 (第4報)
—確率論を用いた強度計算を目的とする材料の統計的特性：
316FR 母材材料強度—
(研究報告)

川崎 信史¹ 浅山 泰¹

要 旨

高速増殖炉の信頼性、安全性、経済性の三者を成立させるため、荷重の設定方法、製作方法、検査、維持といった従来の構造設計基準より広い分野を対象とする構造健全性評価手法であるシステム化規格の開発が開始されている。

異なる分野間を通じ信頼性・安全性を評価するためには、対象全分野を通し共通して適用できる定量的指標が必要となる。現在この指標案としてはき裂発生確率やき裂貫通確率といったものがあげられている。

き裂発生確率やき裂貫通確率の計算のためには、今後材料の分野において、材料特性の確率分布を提供していく必要がある。そのため、本報告書では、316FR 母材材料強度をサンプルとして、確率分布の策定対象、策定方法及び策定分布の評価方法を検討した。

策定確率分布対象は強度評価法との関係から降伏応力、引張強さ、縦弾性係数、ポアソン比、熱膨張係数、主クリープ破断関係式、クリープひずみ式、弾塑性応力-ひずみ関係式、動的応力-ひずみ関係式、最適疲労破損式、クリープ破断伸びとした。その上で、各々の特性について正規分布、対数正規分布、ワイブル分布のいずれかに分布を近似するとともに、策定方法をチャート化した。策定した分布については、策定に使用したデータ範囲、データ数、近似式との相関性の観点から3段階の評価を実施した。

¹ 大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

Development of System Based Code for Integrity of FBR, Part 4

-Statistical material property for probabilistic strength calculation:

316FR base metal material strength -

(Research report)

Nobuchika KAWASAKI¹ Tai ASAYAMA¹

Abstract

Both reliability and safety have to be further improved for the successful commercialization of FBRs. At the same time, construction and operation costs need to be reduced. To realize compatibility among reliability, safety and, cost, the Structural Mechanics Research Group in JNC started the development of System Based Code for Integrity of FBR. This code extends the present structural design standard to include the areas of load setting, fabrication, inspection, maintenance, and so on.

A quantitative index is necessary to connect different partial standards in this code. Crack initiation probability and crack penetration probability are considered as candidate indexes. In material field, probabilistic material distributions are requested to calculate those index probabilities. Therefore, using 316FR base metal material strength as a sample, a scope of necessary distributions, a method of distribution decision, and an evaluation method of decided distributions are considered.

The scope of distribution is decided by a comparison with strength evaluation methods. Those are yield stress, ultimate stress, creep rupture equation, creep strain equation, monotonic stress-strain equation, cyclic stress-strain equation, fatigue failure equation, creep rupture elongation, and so on.

The method of distribution decision is fixed during this sample trial, and by this procedure, above scoped characters were approximated into normal distributions, lognormal distributions or Weibull distributions.

Decided distributions are evaluated into three ranks from the view points of data range, the number of data, and the coefficient of correlations.

¹ Structural Mechanics Research Group, Advanced Technology Division, Oarai Engineering Center

目次

1. 緒言	1
2. 材料強度特性	
2. 1 降伏応力 σ_y	4
2. 2 引張強さ σ_u	5
2. 3 縦弾性係数 E	5
2. 4 ポアソン比 ν	6
2. 5 熱膨張係数 α	6
2. 6 主クリープ破断関係式	6
2. 7 クリープひずみ式	6
2. 8 弾塑性応力-ひずみ関係式	7
2. 9 動的応力-ひずみ関係式	7
2. 10 最適疲労破損式	8
2. 11 クリープ破断伸び	8
2. 12 確率分布のまとめ	9
3. 今後の課題	11
4. 結言	11
参考文献	12

List of the tables

Table 1	Yield stress from the test data (N/mm ²)
Table 2	Yield stress distribution (plate and forging) (N/mm ²)
Table 3	Yield stress distribution (proposal) (N/mm ²)
Table 4	Yield stress distribution (Minimum and Maximum) (N/mm ²)
Table 5	Ultimate stress from the test data (N/mm ²)
Table 6	Number of the test
Table 7	Ultimate stress distribution (proposal) (N/mm ²)
Table 8	Ultimate stress distribution (Minimum and Maximum) (N/mm ²)
Table 9	Poisson's ratio
Table 10	Creep rupture equation for 316FR
Table 11	Distribution of the time coefficient α_R
Table 12	Creep strain equation for 316FR
Table 13	Distribution of the time coefficient a_C
Table 14	Coefficient of correlation
Table 15	Monotonic stress-strain equation for 316FR
Table 16	Young's modulus E
Table 17	Distribution of the monotonic stress
Table 18	Cyclic stress-strain equation for 316FR
Table 19	Distribution of the stress range
Table 20	Optimum fatigue failure equation (316FR:plate)
Table 21	Optimum fatigue failure equation (316FR:forging)
Table 22	Distribution of the fatigue failure cycle (316FR:plate)
Table 23	Distribution of the fatigue failure cycle (316FR:forging)
Table 24	Proposed distributions
Table 25	Evaluation of distributions

List of the figures

- Fig. 1 Selected material properties
- Fig. 2 Procedure of distribution-decision
- Fig. 3 Probability of normalized yield stress(plate and forging: all temperature)
- Fig. 4 Probability of normalized yield stress(plate and forging: 20-350C.degree)
- Fig. 5 Probability of normalized yield stress
(plate and forging: 400-650C.degree)
- Fig. 6 Probability of normalized yield stress
(plate and forging: 400-650C.degree)
- Fig. 7 Weibull curve (plate and forging: 400-650C.degree)
- Fig. 8 Probability of normalized yield stress (tube)
- Fig. 9 Yield stress test data (plate and forging)
- Fig. 10 Yield stress test data (tube)
- Fig. 11 Probability of normalized ultimate stress
(plate, forging and tube: all temperature)
- Fig. 12 Probability of normalized ultimate stress
(plate, forging and tube: all temperature)
- Fig. 13 Ultimate stress test data (plate)
- Fig. 14 Ultimate stress test data (forging)
- Fig. 15 Ultimate stress test data (tube)
- Fig. 16 Creep rupture time (Estimated vs. Measured)
- Fig. 17 Probability of creep rupture time 1
- Fig. 18 Probability of creep rupture time 2
- Fig. 19 Creep strain rate (Estimated vs. Measured)
- Fig. 20 Probability of α_C 1
- Fig. 21 Probability of α_C 2
- Fig. 22 Probability of α_C 3
- Fig. 23 Monkman-Grant relationship
- Fig. 24 Relationship between α_R and α_C
- Fig. 25 Monotonic stress-strain relationship (500 C)
- Fig. 26 Monotonic stress-strain relationship (550 C)
- Fig. 27 Monotonic stress-strain relationship (600 C)
- Fig. 28 Probability of monotonic stress 1
- Fig. 29 Probability of monotonic stress 2
- Fig. 30 Dynamic stress-strain relationship (500 C)

- Fig. 31 Dynamic stress-strain relationship (550 C)
- Fig. 32 Dynamic stress-strain relationship (600 C)
- Fig. 33 Stress range (Estimated vs. Measured)
- Fig. 34 Probability of stress range (500-600C)
- Fig. 35 Probability of stress range (500C)
- Fig. 36 Probability of stress range (550C)
- Fig. 37 Probability of stress range (600C)
- Fig.38 Probability of stress range (500-600C)
- Fig.39 Fatigue tests result (550C)
- Fig.40 Fatigue average curves (550C)
- Fig.41 Probability of failure cycle (Plate: $\Delta \varepsilon_t \leq 0.5\%$)
- Fig.42 Probability of failure cycle (Plate: $0.5\% < \Delta \varepsilon_t$)
- Fig.43 Probability of failure cycle (Forging)
- Fig.44 Creep rupture elongation
- Fig.45 Tertiary creep rupture elongation
- Fig.46 Revised rupture elongation
- Fig.47 Creep rupture elongation 2
- Fig.48 Creep rupture elongation – Heats 1
- Fig.49 Creep rupture elongation – Heats 2
- Fig.50 Creep rupture elongation – Heats 3
- Fig.51 Probability of normalized creep rupture elongation
- Fig.52 Procedure of distribution-decision

1. 緒言

高速増殖炉(FBR)の実用化のために、必要とされる信頼性・安全性を確保した上で、プラントのコストダウンが可能となる設計手法が求められている。

そのため、高温構造設計の分野において、従来対象範囲としていたいわゆる強度計算の領域から対象範囲を拡大し、本来構造物の持っているであろう総合的な裕度を評価していこうとする検討がスタートした。これは、総合的な裕度を確保することで設計の自由度が拡大し、プラントのコストダウンを可能にする基準体系が新しく構築できると考えたからである。

総合的な裕度という観点からは、基準の対象範囲は従来の構造設計の上流である荷重の設定方法や構造物の製作方法にまで踏み込んでいくとともに、従来の構造設計の下流である検査や維持の分野も対象としていく必要がある。また、総合的な裕度を評価する方法^{1,2,3,5,6}及び、ひいては異なる基準間で裕度を配分、交換していく方法⁴の開発が必要となる。これらの新しい構造健全性における裕度概念をベースにした基準体系は、現在「システム化規格」^{1,2}として規格の骨格を検討中である。

一方、この総合的な裕度の評価のためには、従来の保守的な評価になるように設定された仮定や評価法の組合せからなる評価体系から、対象とする基準分野が個々に持つ裕度を陽に記述した評価体系に移行していく必要がある。

これは、荷重の設定方法、構造物の製作方法、検査や維持といった新しい基準対象分野においても求められることであるが、構造設計を実施する上で必要となる材料基準の分野においても当てはまることである。

そこで、本報告書では、総合的な裕度を評価する時に、材料の分野から必要となる情報を提供していく方法や内容を明確にしていく観点から、実用化 FBR の原子炉容器候補材である 316FR 鋼を例に取り、材料特性の分布を検討した。これは、材料強度基準がこれまで、材料の基準値を強度評価法に提供し保守的な必要強度(寿命)を評価してきたのに対し、構造物のき裂の発生確率や破損確率といった指標を用い総合的な裕度を今後検討していくためには、確率分布のようなこれまでと異なる形で材料の情報は提示される必要があるからである。

本報告書は、316FR 鋼母材の材料特性分析を通じ、材料の諸特性のうちどの特性が確率分布として強度評価の観点から必要となるのか、どの程度の量の材料特性がこれまでに取得されているのか、分析した確率分布の信頼性はどのように考えるべきなのか、今後必要となる新しい材料基準を構築していくのに際しどのような作業が必要となるのかという検討内容を取りまとめたものである。

2. 材料強度特性

従来の強度設計においては、材料特性を材料基準値という形で策定し、強度評価を実施する。各々の材料基準値は、試験データの分布から破損確率や安全係数に相当する補正を実施することにより決定されており、最終的に材料強度基準としてある一意の値に決定されている。

例えば、疲労強度評価においては、設計応力強さ S_m 及び許容ひずみ範囲 ε_f を用いて、評価を実施する。この S_m 及び ε_f は、降伏応力や引張強さ、最適疲労破損式といった材料特性から決定されている。

一方、確率論を用いた強度設計においては、降伏応力や引張強さ、最適疲労破損式といったような材料特性を正規分布や対数正規分布等の確率分布として策定し、強度評価を実施する。この場合の強度評価は、モンテカルロ法や2次モーメント法を用いた信頼性評価を実施し、構造物の破損確率を評価する内容となる。

従来の強度評価法と材料基準値の関係は、Fig.1 のようになるため、強度評価に必要な材料特性を以下の緒特性と考え、各々の確率分布を検討した。

- ・降伏応力
- ・引張強さ
- ・縦弾性係数
- ・ポアソン比
- ・熱膨張係数
- ・主クリープ破断関係式
- ・クリープひずみ式
- ・弾塑性応力-ひずみ関係式
- ・動的応力-ひずみ関係式
- ・最適疲労破損式
- ・クリープ破断伸び

なお、熱膨張係数が応力解析において必要となるため追加するとともに、クリープ破断伸びは延性損耗則の適用検討の際必要となるため追加している。

ナトリウム及び中性子環境効果については、以下の理由から確率分布の検討には考慮せず、大気中試験データのみを使用している。

- ・酸素濃度 10ppm 以下の環境においては、ナトリウムによる腐食量は有意ではない。疲労を除く材料特性に与える影響についても有意ではない。
- ・疲労特性については、ナトリウム環境中で大気中より寿命が延長する傾向があるが、従来の強度評価においては、保守的に大気中疲労特性を用いて評価している。これは、ナトリウム中の疲労試験データの数が少なく単独で最適疲労式を策定できないことにも一因がある(316FR 鋼ナトリウム中疲労試験データ数 5 点)。
- ・累積中性子照射量 $1 \times 10^{21} \text{n/cm}^2 (E > 0.1 \text{MeV})$ 以下、累積熱中性子照射量 $1 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 (E < 0.4 \text{eV})$ 以下のような領域では、中性子環境効果は、有意でない。
- ・上記により環境効果については、試験データ数が少なくエンジニアリングジャッジに頼る面が多くなる一方、大気中試験データのみを用いた評価でも保守的な評価は可能である。
- ・そこで、ナトリウム中疲労特性を含め環境効果については、大気中試験データと比較しデータ量が有意に少ないため、本報告の検討には加えないこととした。

なお、縦弾性係数、ポアソン比及び熱膨張係数についても試験データ数が少ないことが予測された。しかし、これらの材料特性は、強度評価を実施する際に必要となるため、検討対象とした。

確率分布策定の手順は、以下に示すとおりであり、その概念図を Fig.2 に示す。

1. 試験データの収集

316FR 鋼はナトリウム冷却型実証炉用の材料として開発され、その材料強度基準は高速増殖実証炉高温構造設計方針材料強度基準等⁷（以下 DDS）として取りまとめられている。そのため、試験データは、DDS の策定に際し使用された試験データ群⁸を母集団と考え使用した。ただし、システム化規格においては、非クリープ域となる低温領域も対象領域としているため、DDS の策定においては用いられなかった 375℃未満の引張試験データ、管材の引張試験データについても母集団に追加している。

2. データ範囲の検討

短時間のクリープ試験は、データベースから除外した。

3. データ分布の検討

試験データの正規化を実施する。正規化は、以下の応力等に基づいて実施した。

- ・各試験温度条件における平均降伏応力、平均引張強さ、
- ・各試験温度及び応力条件における平均クリープ破断時間、平均クリープひずみ量
- ・各試験温度における平均応力範囲（応力-ひずみ関係の分析時）
- ・各試験温度及びひずみ速度の平均最適破損サイクル

試験データは、正規分布及び対数正規分布に対し、近似を行った。

ワイブル分布の適用により相関係数が向上すると予測した場合は、ワイブル分布についても検討を実施した。

4. データ区分の検討

同一の傾向を示す温度域、ひずみ範囲、ひずみ速度、製品については、同一区分とし区分化を実施した。なお、区分範囲は、同一傾向を示す範囲内で多くの試験条件が同一区分となるように設定した。

5. 強度計算用分布の実施

近似した確率分布から強度計算用分布を決定した。これは、他の類似の材料分布と比較する等の確率分布を補正するエンジニアリングジャッジの作業である。

なお、標準偏差は有効数字以下を切り上げている。

本報告書の確率分布は、この手順に従って策定されている。

2. 1 降伏応力 σ_y

引張試験データより計算した降伏応力（0.2%耐力）の平均値(Ave.)、標準偏差(Std.)を温度域ごとに Table 1 に示す。試験データは、板(Plate)、鍛造(Forging)、管(Tube)の製品区分ごとに分析を実施した。表中、グレーにハッチングしているデータのみが 10 点以上の試験数を有する試験条件であり、その他の条件は試験数が少ない。そのため、特に標準偏差のデータが信頼性のないものとなっている。本表から、以下の 2 点の仮定を置いた。板と鍛造の平均値はほぼ同じと見なせる (Ratio : Ave(F)/Ave(P))。管の平均値は板の平均値と比較し、約 1.28 倍高い平均値をどの温度域でも取る (Ratio : Ave(T)/Ave(P))。

・板及び鍛造の分布

この仮定に基づき、板と鍛造両者のデータベースから導出した平均値と変動係数(Var.)、試験データ数(Num.)を Table 2 に示す。高温域になるにしたがって変動係数が大きくなる。温度による分布の違いを把握するために、Fig.3 に全温度域の確率分布、Fig.4 に 350℃以下の確率分布、Fig.5 に 400～450℃、500～550℃、600～650℃の確率分布を示す。なお、降伏応力は各温度の平均値で正規化し確率分布を計算したので、図中では標準偏差と変動係数が等しくなっている。Fig.3 から 350℃以下の試験データは、正規分布と高い相関性を持つ事がわかる。そのため、350℃以下の温度域に対し、0.06 の変動係数の持つ正規分布と考えることにした。400℃以上の試験データは、変動係数も大きくかつ 1%以下のような低確率の領域でのデータが理想的な正規分布と比較し少ない事がわかる。これは、高温度域で降伏応力の平均値が低下していくため、平均値で正規化したばらつき幅が相対的に大きくなること、ばらつきには下限があり極端に小さな降伏応力を持つデータはないことを示している。低応力側で下に凸となる分布形状を正規分布と近似することは、実際にデータが存在する領域より低い応力領域に対し極小の確率で存在確率密度を与え、保守的な損傷評価結果を与えることになる。そのため 350℃より高温の試験データは、0.12 の変動係数を持つ正規分布と考えることにした。本データ範囲の近似線は、Fig.6 に示すように変動係数が 0.11 である。しかし、相関係数¹が 0.973 と低いため、ここでは、400～650℃までのデータ範囲でもっとも大きい変動係数を採用している。Fig.6 に 400～650℃の温度領域全体に関する降伏応力の確率分布を示す。なお、正規化した降伏応力が 0.85 程度の領域から試験データがなくなるた

¹ 相関係数は、X 及び Y の 2 つの配列に対し、次の式で表される配列の相関性を示す関数より求められる係数である。(μ:平均値、σ:標準偏差、n:試験データ数)

$$\rho_{XY} = \frac{(1/n) \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

め、ワイブル分布として近似した図が Fig.7 である。このとき、形状母数 $a = 1.86$ 、尺度母数 $b = 0.20$ 、位置母数 $c = 0.82$ のワイブル分布となり、相関係数は、正規分布の 0.975 に対し、0.996 と上昇する。

・管の分布

管材の試験データ数は少ないため、管材の降伏応力の平均値は、板及び鍛造材の平均値の 1.28 倍とした。Fig.8 に全温度域に関する降伏応力の確率分布を示す。なお、降伏応力は各温度の平均値で正規化している。Fig.8 からわかるように分布は、正規分布と高い相関性を持っている。そのため、管材は、0.04 の変動係数を持つ正規分布と考えることとした。

・確率計算用の分布

Table 3 に確率計算において使用する降伏応力の提案値を示す。また、Table 4 に試験データの最小値(Min.)と最大値(Max.)を示す。

また、Fig.9 及び Fig.10 に各温度域の平均値と信頼下限値(L.C.L.=Lower Confidence Limit)、試験データ(Test data)を示す。90%、95%、99%の信頼下限値は、正規分布を仮定したときの提案値の信頼下限値であり、試験データの信頼下限値ではない。

2. 2 引張強さ σ_u

引張試験データより計算した引張強さの平均値、標準偏差を温度域ごとに Table 5 に示す。試験データは、板、鍛造、管の製品区分ごとに分析を実施した。また、Table 6 に試験データの数を示す。平均値については、製品区分ごとのデータを使用した。Fig.11 に製品ごとの平均値で正規化した引張強さの分布を示す（全温度域）。このように、引張強さに関しては、温度や製品によりばらつきの差は見られない。そのため、全温度域の試験データを Fig.12 のように平均値 1、変動係数 0.03 の正規分布に近似した（図中 0.023）。

・確率計算用の分布

Table 7 に確率計算において使用する引張強さの提案値を示す。また、Table 8 に試験データの最小値と最大値を示す。

また、Fig.13～Fig.15 に各温度域の平均値と信頼下限値(L.C.L.=Lower Confidence Limit)、試験データ(Test data)を示す。90%、95%、99%の信頼下限値は、正規分布を仮定したときの提案値の信頼下限値であり、試験データの信頼下限値ではない。

2. 3 縦弾性係数 E

縦弾性係数については、確率分布の策定に十分な数の試験データが入手できなかった。そのため、DDS に記載の基準値を標準偏差 0 の値として使用するものとする。

2. 4 ポアソン比 ν

DDS では、EPPIC データ集⁹に準拠し、ポアソン比を定めている。ただし、ポアソン比が 0.3 以下の場合は、0.3 として 375~650℃までのポワソン比を策定しなおしている。

ポワソン比の策定に用いた試験データを入手できなかったため、確率論的材料強度特性においては、EPPIC データ集のポアソン比を補正せずに標準偏差 0 の値として用いるものとする。該当するポアソン比を Table 9 に示す。

2. 5 熱膨張係数 α

熱膨張係数については、確率分布の策定に十分な数の試験データが入手できなかった。そのため、DDS に記載の基準値を標準偏差 0 の値として使用するものとする。

2. 6 主クリープ破断関係式

主クリープ破断関係式(Table 10)は、クリープ破断時間のばらつきを時間係数 α_R によって表現している。主クリープ破断関係式 ($\alpha_R=1$) から予測される破断時間と試験において計測された破断時間の関係を示したのが Fig.16 である(試験データの母集団は 100 時間以上の試験時間のデータを対象としている)。また、 α_R (予測破断時間/計測された破断時間) の対数平均値、対数標準偏差、最大試験データ、最小試験データ、試験データ数を Table 11 に示す。Table 11 に示した試験データの分布を温度ごとに示したのが Fig.17 である。温度ごとに多少のばらつきはあるものの、本図から全温度域ほぼ同等の傾向を示すと判断し、Fig.18 のように全温度域の試験データを対数正規分布として近似した。近似曲線は、対数平均値 $\ln(1.03)$ 、対数標準偏差 0.64、相関係数 0.996 の対数正規分布である。確率計算においては、Table 11 に示すように全温度域、対数平均値 $\ln(1)$ 、対数標準偏差 0.7 を用い計算するものとした。

2. 7 クリープひずみ式

Table 12 に示すクリープひずみ式は、破断時間 t_R の関数を用いて 1 次クリープひずみと定常クリープひずみを再現している。また、時間係数 α_C を用いてばらつきを考慮している。

一方、クリープ挙動試験結果からは、破断時間と定常クリープ速度の計測値が得られる。Fig.19 に定常クリープ速度の予測値 ϵ_{m-EST} と計測値 ϵ_{m-TEST} の関係を示す。この関係とクリープひずみ式から、 α_C の分布を検討した。各温度域の対数平均値、対数標準偏差、最大試験データ、最小試験データ、試験データ数は、Table 13 のようになる。温度ごとの分布は、Fig.20 に示す通りである。全温度域の分布は、Fig.21 に示すような対数平均値 $\ln(0.96)$ 、対数標準偏差 0.71、相関係数 0.988 の対数正規分布、あるいは、Fig.22

に示すような、形状母数 $a=1.79$ 、尺度母数 $b=1.32$ 、位置母数 $c=0$ のワイブル分布（相関係数 0.987）として近似できる。

α_c が大きい、つまりクリープひずみが大きく予測される条件の方が重要視されるような場合は、対数正規分布で十分精度良く近似されているため、確率計算には、Table 13 に示すように対数平均値 $\ln(1)$ 、対数標準偏差 0.8 の対数正規分布を使用することとした。

また、クリープ破断特性とクリープひずみ特性の間には、Fig.23 に示すような Monkman-Grant の相関性が成り立つ。この結果得られる破断時間の対数 $\ln(t_R)$ と定常クリープ速度の対数 $\ln(\dot{\epsilon}_{m-TEST})$ の相関性及び、 α_R と α_c の相関性を Table 14 に示す。

2. 8 弾塑性応力 - ひずみ関係式

Table 15～16 に示す DDS の弾塑性応力-ひずみ関係式は、単調引張試験結果 (0.3%/min) から策定された。Fig.25～27 に引張挙動の 0.5% と 1% 近傍の試験結果を温度ごとに示す。試験結果は、弾塑性応力-ひずみ関係式と同様に 0.3%/min の引張速度の試験からなるデータベースから取得しており、本ひずみ速度で実機の代表させている。弾塑性応力-ひずみ関係式で正規化した応力の分布を、Table 17 に示す。試験データは、温度によらずほぼ一定のばらつきを見せていることから、全温度域を一括して、近似した。全温度域の分布は、Fig.28 に示すように平均値 0.95、標準偏差 0.11 の正規分布として近似できる。なお、形状母数 $a = 1.54$ 、尺度母数 $b = 0.20$ 、位置母数 $c = 0.77$ のワイブル分布 (Fig.29) としても近似できるが、この場合は、相関係数が、正規分布の 0.994 に対し、0.985 と若干の低下を見せる。

2. 9 動的応力 - ひずみ関係式

Table 18 に示す動的応力-ひずみ関係式は、疲労試験の寿命中期つまり $1/2N_f$ サイクルの応力-ひずみ関係式であり、標準ひずみ速度 0.001mm/mm/sec の疲労試験結果を中心に策定されている。500℃ 及び 550℃、600℃ の試験データ (ひずみ速度 0.001 mm/mm/sec 以外の試験データも含む) と弾塑性応力-ひずみ関係式の比較を Fig.30～32 に示す。低ひずみ速度の試験データが高めの応力範囲を示している傾向が見られるものの、ひずみ速度ごとのばらつき幅が大きく、ひずみ速度ごとのデータ数も少ないため、ひずみ速度効果は考慮せず、全ひずみ速度の試験データを同一データベースとして取り扱った。また、動的応力-ひずみ関係式は、本来 $\gamma=1$ で平均傾向を再現するはずであるが、 $\gamma=1$ の曲線は試験データと比較し平均より下方になる傾向があるため、Table 18 の γ を補正し、試験結果と予測結果の比率の平均値がほぼ 1 になるようにした。その結果 γ は 1.08 となったので、 $\gamma=1.08$ の曲線を平均特性として使用することとした。なお、この傾向は、0.001 mm/mm/sec 以外のひずみ速度で実施した試験の結果を用いて比較した時も見受けられた。

Fig.33 に $\gamma=1.08$ の曲線を使用したときの応力の試験結果 (Measured stress range)

と予測値 (Estimated stress range) の比較を示す。応力は、ひずみ制御疲労試験における $1/2N_f$ サイクルの最大応力値である。

Table 19 に試験結果と予測値の比率の分布を示す。温度が上がるにつれ、ばらつき幅が小さくなる傾向がある。その結果 Fig.34 に示すように、温度ごとの分布は明らかに異なるものとなる。Fig.35~37 に各温度の分布を示す、温度ごとに正規分布として近似できる事がわかる。全温度域の試験データは、Fig.38 のように分布するため、ワイブル分布として近似することもできるが、各温度のばらつきの平均値を再現しているのに過ぎないため、確率計算においては、温度ごとに Table 19 に示す平均値と標準偏差をもった正規分布を入力として使用することとした。

2. 1 0 最適疲労破損式

DDS に記載してある設計疲労曲線 (Design curve) は、316FR、SUS304、SUS321、SUS316 のステンレス鋼疲労試験データに対し安全率を加えた上で包含するように設定されている。Fig.39 に示す 316FR の板及び鍛造試験データは、この設計曲線により包含されているが、この 2 種類の製品は、異なる疲労特性を示している。

そのため、Fig.40 及び Table 20 及び 21 に示すような製品ごとの最適疲労破損式を使用し、製品ごとに分布を策定した。正規化は、標準ひずみ速度 0.001mm/mm/sec 以外のひずみ速度も含む試験結果 (破損繰返し数) を Table 20 及び 21 の最適疲労破損式を用いて計算した予測破損繰返し数で除することにより実施した。

板材の試験データは、低ひずみ範囲でばらつき幅が大きくなる傾向を見せている。そのため、Table 22 に示すように 0.5% を境に対数平均値、対数標準偏差を分析し、全温度域の試験データをこの 2 領域をもって近似した。Fig.41 に 0.5% 以下、Fig.42 に 0.5% より大きい領域の破損サイクルの分布を示している。このように対数正規分布を持って近似できることから確率計算においては、Table 22 に示すように、対数平均値 $\ln(1)$ 、対数標準偏差 1.1 ($\Delta \varepsilon_f \leq 0.5$)、0.4 ($0.5 < \Delta \varepsilon_f$) の対数正規分布を用いることとした。

鍛造材の試験データについても Table 22 に示すように分析を実施した。鍛造材は、低ひずみ領域でばらつき幅が拡大する傾向を見せてはいるものも、試験データ数が少なく定量的な信頼性が高いとは判断できない。そのため、対数平均値を $\ln(1)$ とするとともに、板材と同じ対数標準偏差 1.0 ($\Delta \varepsilon_f \leq 0.5$)、0.4 ($0.5 < \Delta \varepsilon_f$) の対数正規分布として、確率計算においては見なすこととした。

2. 1 1 クリープ破断伸び

500°C 及び 550°C 、 600°C で試験されたクリープ破断伸びをプロットすると、Fig.44 のようになる。クリープ破断伸びは、高温使用時間とともに低下するよう見えるが、これは、1000 時間を下回るような短時間側では、比較的大きな第 3 期クリープ量が発生するのに対し、長時間側では第 3 期クリープ量が少ないことに起因している。Fig.45

は、破断延性から第3期クリープ開始時のひずみ量を引いたものを縦軸にプロットしてある。ばらつきが非常に大きいながらも、時間とともに第3期クリープひずみ量が減少していることがわかる（なお、500℃は、第3期クリープ開始時のひずみ量を計測したデータが1点しかないため割愛してある。）。

そのため、第3期クリープ開始後も定常クリープ速度でクリープひずみが発生すると仮定し、その場合の伸びと破断時間の関係を Fig.46 にプロットした。この破断時点の1次+2次クリープひずみに相当するひずみは、第3期クリープ開始時のひずみ+定常クリープ速度×(破断時間-第3期クリープ開始時間)の関係から計算した。ばらつきは大きいながらも低下の傾向は、ほとんどなくなっている。

このようなひずみ量を基に強度評価法を策定することも考えられるが、現状の延性損耗則は、クリープ破断伸びを基に策定されているため、ここでは、データベースを限定し、クリープ破断伸びに関して再評価を実施した。

実際にプラントが使用されるのは数十万時間オーダーの単位であるため、クリープ破断伸びの分布は、Fig.47 に示すような1000時間以上の破断時間の試験データをデータベースとして Fig.44 の試験データを再評価した。なお、Fig.48~50 までにヒートごとのクリープ破断伸びを示すが、ばらつきの多いヒートも存在しするため、各ヒートの平均傾向を使用する方法は採用しなかった。再検討の結果クリープ破断伸びの平均値は、Fig.47 のように550℃で26.7%、600℃で44.2%であった。この平均値で正規化したクリープ破断伸びの存在確率を示したのが Fig.51 である。正規分布との相関係数は、0.996 及び 0.993 と比較的高い。

これらの結果から550℃以下の破断伸びは、平均26.7%標準偏差0.32の正規分布として、600℃の破断伸びは平均44.2%標準偏差0.20の正規分布として近似することとした。

2. 1 2 確率分布のまとめ

検討した確率分布をまとめると Table 24 のようになる。

これらの確率分布は、実現象の近似性という観点から異なるレベルの分布が混在している。そのため、近似性の評価を以下のレベルに分類した。

- A. 試験データ範囲が強度評価法を用いる条件（試験時間、温度、ひずみ速度、製品区分）を適切に代表しており、試験データ数は10点を超える、また、近似した確率分布の相関係数は0.9以上である。
 - B. 試験データ範囲、試験データ数、相関係数のいずれかの観点からAの条件を満たさない項目が存在するが、試験データから定性的に当該分布に近似できると判断できる。
 - C. 類似の試験データ等から確率分布を仮定した。
- B、Cのレベルの確率分布は、確率計算に使用する際に何らかのペナルティを課すこ

とも考えられる。ペナルティ方法については、今後分布ごとに継続的な検討が必要であるが、例えば、Bは1.2倍、Cは1.5倍の補正を実施するといったペナルティのことである。Table 25に各確率分布の評価と評価理由を示す。

3. 今後の課題

強度評価に必要な確率分布の提供方法を明確にしていく観点からは、確率分布の策定方法及び近似性の評価方法の標準化が必要となる。確率分布の策定は、2章の検討から Fig.1 を改良した Fig.52 のような手順を踏むことで可能となる。一方、確率分布の近似性評価に関しては、検査等他の分野と比較検討の後、どの程度の近似性の不確定性までを同一区分と考え、どのようなペナルティを課していくかという検討が必要となる。特にペナルティに関しては、これまで各エンジニアが個人のジャッジに従って実施していた部分であり、標準化についてはシステム化規格において総合的な裕度の考え方と整合性を取りながら検討を進めていく必要があると思われる。

材料の分野において、総合的な裕度の判断に必要なデータを提供するという観点からは、構造物の強度評価のみならずき裂の進展、貫通をも視野に入れた寿命評価を実施するために必要な材料特性を提供する事が本来は望ましい。つまり、対象とする評価法がき裂の進展評価も含めた体系となり、進展特性を示す確率分布が必要となる。確率分布の策定にあたっては、策定方法及び近似性の評価方法の検討が必要となる。

最終的に FBR システム化規格を完成させるためには、実用化 FBR プラントの使用する 12Cr 系鋼を含む評価対象材料の強度評価及びき裂進展評価に必要な確率分布が必要である。この段階においては、各々の評価法が想定するプラント条件と試験データの範囲の差異を埋めるように、今後材料試験の実施を進めていく必要がある。

4. 結言

確率論を用いた強度評価において必要となる材料特性の確率分布は、強度評価と材料特性の関係から、

- ・降伏応力
- ・引張強さ
- ・縦弾性係数
- ・ポアソン比
- ・熱膨張係数
- ・主クリープ破断関係式
- ・クリープひずみ式
- ・弾塑性応力-ひずみ関係式
- ・動的応力-ひずみ関係式
- ・最適疲労破損式
- ・クリープ破断伸び

となると考えられる。

これらの材料特性に対し各々確率分布の分析を行うとともに、近似の手順を取りまとめた。316FR 母材材料強度に関しては、この手順に基づき、正規分布、対数正規分布あるいはワイブル分布として確率分布を同定した。

また、近似した確率分布の近似性については、試験データ範囲、試験データ数、近似線と試験データ間の相関係数の観点から評価を行えば良いと考え、3段階の評価区分を設定し、評価を実施した。

参考文献

1. Yasuhide Asada, et al., "System Based Code -Principal Concept", Tenth International Conference on Nuclear Engineering, 2002 April, (2002)
2. Yasuhide Asada, et al., "System Based Code - Basic Structure ", Tenth International Conference on Nuclear Engineering, 2002 April, (2002)
3. 浅山 泰, "システム化規格の開発—基本的な考え方—", JNC TN9400 2001-065, (2001)
4. 浅山 泰, "システム化規格の開発 - 第3報 裕度交換手法の開発(その1) -", JNC TN レポート (発行予定), (2002)
5. 川崎 信史, 浅山 泰, "システム化規格の開発—確率論の考え方(その1):クリープ疲労強度の確率論による試評価—", JNC TN9400 2001-090, (2001)
6. 中馬 康晴, 他, "確率論に基づくクリープ疲労設計評価法の検討", 日本材料学会 高温強度シンポジウム予稿集, (2001)
7. 日本原子力発電, "高速増殖実証炉高温構造設計方針 材料強度基準(案)", 日本原子力発電, (1999)
8. 社団法人 日本溶接協会 原子力研究委員会 FME 小委員会, "明日のエネルギーの礎に—高速炉新材料の実用化に向けて—", 社団法人 日本溶接協会, (1999)
9. 日本機械学会 非弾性構造解析法 実用化研究分科会, "非弾性構造解析法の実用化に関する研究(II)", 日本機械学会, (1979)

Table 1 Yield stress from the test data (N/mm²)

Temp. (C)	Ave.	Ave.	Ave.	Std.	Std.	Std.	Ratio	Ratio
	Plate	Forging	Tube	Plate	Forging	Tube	Ave(F) /Ave(P)	Ave(T) /Ave(P)
20	259	263	322	15.0	17.1	10.0	1.02	1.24
100	206	211	267	10.3	10.0	0.7	1.02	1.30
150	192	191	247	4.8	6.0	4.9	0.99	1.28
200	175	175	227	10.8	13.6	0.7	1.00	1.30
250	167	152	212	3.8	3.1	6.9	0.91	1.27
300	155	152	203	9.6	12.3	8.3	0.98	1.31
350	155	144	206	9.1	6.8	0.7	0.93	1.33
400	148	136	185	13.8	9.6	0.7	0.92	1.25
450	135	135	178	13.6	7.1	2.8	0.99	1.31
500	139	130	178	15.4	11.7	6.0	0.94	1.28
550	131	125	167	15.5	9.2	8.7	0.96	1.28
600	133	126	166	14.3	9.8	4.9	0.95	1.25
650	132	127	166	16.9	14.7	7.3	0.96	1.26

Ave.=Average, Std.=Standard deviation

Only gray-hatching conditions have more than 10 test data.

**Table 2 Yield stress distribution
(plate and forging) (N/mm²)**

Temp. (C)	Ave.	Var.	Num.	Num.
	Plate & Forging	Plate & Forging	Plate	Forging
20	260	0.06	22	9
100	207	0.05	12	4
150	192	0.03	4	4
200	175	0.06	14	5
250	159	0.05	4	4
300	154	0.06	16	5
350	149	0.06	4	4
400	145	0.09	16	5
450	135	0.09	12	4
500	136	0.11	23	9
550	129	0.11	24	9
600	131	0.10	20	9
650	130	0.12	19	9

Ave.=Average, Var.=Coefficient of variation
Num.=Number

Table 3 Yield stress distribution (proposal) (N/mm²)

Temp. (C)	Ave.	Ave.	Var.	Var.	Num.	Num.
	Plate & Forging	Tube	Plate & Forging	Tube	Plate & Forging	Tube
20	260	333	0.06	0.04	31	6
100	207	265	0.06	0.04	16	2
150	192	245	0.06	0.04	8	2
200	175	224	0.06	0.04	19	2
250	159	204	0.06	0.04	8	2
300	154	197	0.06	0.04	21	2
350	149	191	0.06	0.04	8	2
400	145	185	0.12	0.04	21	2
450	135	173	0.12	0.04	16	2
500	136	175	0.12	0.04	32	4
550	129	165	0.12	0.04	33	4
600	131	167	0.12	0.04	29	4
650	130	167	0.12	0.04	28	4

Ave.=Average, Var.=Coefficient of variation, Num.=Number

**Table 4 Yield stress distribution
(Minimum and Maximum) (N/mm²)**

Temp. (C)	Min.	Max.	Min.	Max.
	Plate & Forging	Plate & Forging	Tube	Tube
20	229	289	311	333
100	190	222	267	268
150	183	198	243	250
200	159	194	227	228
250	149	173	207	217
300	139	177	197	209
350	138	168	206	207
400	127	176	184	185
450	120	161	176	179
500	115	172	171	183
550	112	167	160	179
600	111	163	164	174
650	109	171	157	174

Table 5 Ultimate stress from the test data (N/mm²)

Temp. (C)	Ave.	Ave.	Ave.	Std.	Std.	Std.	Ratio	Ratio
	Plate	Forging	Tube	Plate	Forging	Tube	Ave(F) /Ave(P)	Ave(T) /Ave(P)
20	588	566	643	15.1	12.9	8.9	0.96	1.09
100	507	498	556	13.2	6.5	4.2	0.98	1.10
150	479	469	522	5.7	6.0	4.2	0.98	1.09
200	461	442	505	9.2	10.4	0.0	0.96	1.10
250	446	435	491	3.5	3.0	2.8	0.97	1.10
300	442	418	484	7.8	11.9	0.7	0.95	1.09
350	434	424	480	4.8	7.1	0.7	0.98	1.11
400	436	415	482	8.1	14.0	2.1	0.95	1.11
450	425	415	471	10.2	10.1	1.4	0.98	1.11
500	422	412	471	11.6	16.9	15.6	0.98	1.12
550	408	396	461	12.8	12.2	8.2	0.97	1.13
600	388	374	432	10.7	7.7	10.1	0.97	1.11
650	347	339	400	8.5	2.4	24.0	0.98	1.15

Ave.=Average, Std.=Standard deviation

Only gray-hatching conditions have more than 10 test data.

Table 6 Number of the test

Temp. (C)	Num.	Num.	Num.
	Plate	Forging	Tube
20	22	9	6
100	12	4	2
150	4	4	2
200	14	5	2
250	4	4	2
300	16	5	2
350	4	4	2
400	16	5	2
450	12	4	2
500	23	9	4
550	24	9	4
600	20	9	4
650	19	9	4

Num.=Number

Table 7 Ultimate stress distribution (proposal) (N/mm²)

Temp. (C)	Ave.	Ave.	Ave.	Var.	Var.	Var.
	Plate	Tube	Forging	Plate	Tube	Forging
20	588	643	566	0.03	0.03	0.03
100	507	556	498	0.03	0.03	0.03
150	479	522	469	0.03	0.03	0.03
200	461	505	442	0.03	0.03	0.03
250	446	491	435	0.03	0.03	0.03
300	442	484	418	0.03	0.03	0.03
350	434	480	424	0.03	0.03	0.03
400	436	482	415	0.03	0.03	0.03
450	425	471	415	0.03	0.03	0.03
500	422	471	412	0.03	0.03	0.03
550	408	461	396	0.03	0.03	0.03
600	388	432	374	0.03	0.03	0.03
650	347	400	339	0.03	0.03	0.03

Ave.=Average, Var.=Coefficient of variation

**Table 8 Ultimate stress distribution
(Minimum and Maximum) (N/mm²)**

Temp. (C)	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
	Plate	Plate	Forging	Forging	Tube	Tube
20	560	627	539	583	633	659
100	482	528	490	504	553	559
150	474	484	462	475	519	525
200	445	478	424	449	505	505
250	441	449	431	437	489	493
300	429	455	401	431	483	484
350	427	437	417	431	480	481
400	423	450	394	428	481	483
450	409	443	405	426	470	472
500	401	449	378	427	457	486
550	384	436	375	409	453	472
600	369	413	357	380	424	444
650	333	359	335	344	377	424

Table 9 Poisson's ratio⁹

Temp.(C)	Poisson's
20	0.266
50	0.268
100	0.272
150	0.275
200	0.279
250	0.283
300	0.287
350	0.291
375	0.293
400	0.295
425	0.297
450	0.298
475	0.300
500	0.302
525	0.304
550	0.306
575	0.308
600	0.310
625	0.312
650	0.314
700	0.318
750	0.321
800	0.325

Table 10 Creep rupture equation for 316FR^{7,8}

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

T : Temperature (°C) 425 < T ≤ 650

σ : Stress (N/mm²) 78.8 ≤ σ

t_R : Time to rupture (hr)

C	2.39623 × 10
A ₀	3.07082 × 10 ⁴
A ₁	2.91411 × 10 ³
A ₂	-2.46583 × 10 ³
α _R	Average value : 1 Design minimum value : 10
<p>Note: σ shall not be greater than ultimate tensile strength at the designated temperature</p>	

Table 11 Distribution of the time coefficient α_R

Temperature (C)	Logarithmic average	Logarithmic standard deviation	Maximum value in the test data	Minimum value in the test data	Number of the test data
500	$\ln(0.96)$	0.26	1.29	0.65	5
550	$\ln(1.07)$	0.75	6.70	0.22	84
600	$\ln(0.85)$	0.57	2.70	0.24	75
650	$\ln(1.28)$	0.44	3.56	0.49	56
ALL	$\ln(1.03)$	0.64	6.70	0.22	220

For calculation	$\ln(1)$	0.7
-----------------	----------	-----

Table 12 Creep strain equation for 316FR^{7,8}

$\epsilon_c = C_1 \{1 - \exp(-r_1 t)\} + C_2 \{1 - \exp(-r_2 t)\} + \dot{\epsilon}_m t$	
<p>T : Temperature (°C) σ : Stress (N/mm²) t_R : Time to rupture (hr) $\dot{\epsilon}_m$: Steady creep strain rate (mm/mm/hr) t : Time (hr)</p>	
t_R	$(T+273.15) \{ \log_{10}(\alpha_c \cdot t_R) + 2.39623 \times 10 \}$ $= 3.07082 \times 10^4 + 2.91411 \times 10^3 \log_{10} \sigma - 2.46583 \times 10^3 (\log_{10} \sigma)^2$
$\dot{\epsilon}_m$	$2.62247 \times 10^2 \exp\{-4.92390 \times 10^4 / 8.31441 / (T+273.15)\} t_R^{-1.13512}$
C_1	$1.2692 \dot{\epsilon}_m^{0.74491} / r_1$
C_2	$0.48449 \dot{\epsilon}_m^{0.81155} / r_2$
r_1	$103.37 t_R^{-0.72607}$
r_2	$17.255 t_R^{-0.86775}$
α_c	<p>Average value : 1 Design minimum value : 3</p>

Table 13 Distribution of the time coefficient α_c

Temp. (C)	Logarithmic average	Logarithmic standard deviation	Minimum value in the data	Maximum value in the data	Number of the data
500	ln(0.69)	0.24	0.49	0.85	5
550	ln(0.89)	0.78	0.14	5.15	73
600	ln(0.85)	0.76	0.04	4.41	70
650	ln(1.33)	0.48	0.51	3.96	48
ALL	ln(0.96)	0.72	0.04	5.15	196

For calculation	ln(1)	0.8
-----------------	-------	-----

Table 14 Coefficient of correlation

	$\ln(t_R) - \ln(\epsilon_{m-TEST})$	$\ln(\alpha_R) - \ln(\alpha_C)$
500	-0.950	0.768
550	-0.969	0.882
600	-0.960	0.756
650	-0.987	0.813
ALL	-0.950	0.832

Table 15 Monotonic stress-strain equation for 316FR^{7,8}

<p>(1) $\sigma \leq \sigma_P$</p> $\epsilon_e = \frac{\sigma}{E}$ $\epsilon_P = 0$ <p>(2) $\sigma > \sigma_P$</p> $\epsilon_e = \frac{\sigma}{E}$ $\epsilon_P = \left(\frac{\sigma - \sigma_P}{K} \right)^{\frac{1}{m}}$	<p style="text-align: right;">$315 < T \leq 650$</p> <p>T : Temperature (°C)</p> <p>ϵ_e : Elastic strain (mm/mm)</p> <p>ϵ_P : Plastic strain (mm/mm)</p> <p style="padding-left: 40px;">$(\epsilon_e + \epsilon_P)_{\max} \leq 0.03$ (mm/mm)</p> <p>σ : Stress (N/mm²)</p>
E (N/mm ²)	Table 16 Young's modulus E
σ_P (N/mm ²)	$\sigma_P = \sigma_y - K (0.002)^m$
σ_y (N/mm ²)	For average curve : $-9.08682 \times 10^{-7} T^3 + 1.38828 \times 10^{-3} T^2 - 7.40603 \times 10^{-1} T + 2.73364 \times 10^2$ For minimum curve: $\sigma_y =$ DDS Appendant Table 1.4 Yield strength S_y
K (N/mm ²)	$-5.80824 \times 10^{-2} T + 3.99777 \times 10^2$
m	$1.38879 \times 10^{-4} T + 2.05730 \times 10^{-1}$

Table 16 Young's modulus E^{7,8}

Temp.(C)	Young's modulus E (N/mm²)
20	195000
50	193000
75	191000
100	190000
125	188000
150	186000
175	184000
200	183000
225	180000
250	178000
275	177000
300	176000
325	174000
350	173000
375	171000
400	169000
425	167000
450	164000
475	161000
500	159000
525	156000
550	154000
575	151000
600	149000
625	146000
650	144000

Table 17 Distribution of the monotonic stress

Temperature (C)	Strain range (%)	Average stress (Test/Est.)	Standard deviation	Number of the points
500	0.5	0.98	0.12	23
	1.0	0.95	0.10	22
550	0.5	0.95	0.11	23
	1.0	0.92	0.11	23
600	0.5	0.97	0.11	21
	1.0	0.94	0.10	21
ALL	-	0.95	0.11	133

Table 18 Cyclic stress-strain equation for 316FR⁸

<p>(1) $\Delta\sigma \leq 2\sigma_p$</p> $\Delta\varepsilon_t = \Delta\sigma / E$ <p>(2) $\Delta\sigma > 2\sigma_p$</p> $\Delta\varepsilon_t = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p$ $\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E$ $\Delta\varepsilon_p = \{(\Delta\sigma - 2\sigma_p) / K_d\}^{1/m_d}$ <p style="text-align: right;"> T : Temperature (°C) $425 < T \leq 650$ $\Delta\varepsilon_e$: Elastic strain range (mm/mm) $\Delta\varepsilon_p$: Plastic strain range (mm/mm) $\Delta\varepsilon_t$: Total strain range (mm/mm) $\Delta\sigma$: Stress range (N/mm²) σ_p : Proportional limit (N/mm²) </p>	
E (N/mm ²)	Table 16 Young's modulus E
σ_p (N/mm ²)	$\sigma_p = \sigma_y - K (0.002)^m$
K (N/mm ²)	$-2.02022 \times 10^{-1} T + 4.72602 \times 10^2$
m	$1.18719 \times 10^{-5} T + 2.70149 \times 10^{-1}$
σ_y (N/mm ²)	$\sigma_y = \gamma \times (-9.08682 \times 10^{-7} T^3 + 1.38828 \times 10^{-3} T^2 - 7.40603 \times 10^{-1} T + 2.73364 \times 10^2)$ Average : $\gamma = 1.08$, Upper limit: $\gamma = 1.5$
K_d (N/mm ²)	$-1.26855 \times 10 T + 1.02059 \times 10^4$
m_d	$-7.76430 \times 10^{-4} T + 8.33186 \times 10^{-1}$

Table 19 Distribution of the stress range

Temp. (C)	Average Stress range (TEST/EST.)	Standard deviation	Minimum value in the data	Maximum value in the data	Number of the data
500	1.04	0.12	0.86	1.34	66
550	1.03	0.07	0.88	1.20	131
600	0.98	0.05	0.89	1.08	69
ALL	1.02	0.08	0.86	1.34	266

Table 20 Optimum fatigue failure equation (316FR:plate)

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

T : Temperature (°C) 425 ≤ T ≤ 650

$\dot{\varepsilon}$: strain rate (mm/mm/s)

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

Nf : Failure cycle

A ₀	$1.7234647 - 7.8357089 \times 10^{-8} \times T^2 \times R$
A ₁	$1.5002483 + 2.5843071 \times 10^{-8} \times T^2$
A ₂	5.6905530×10^{-1}
A ₃	$-2.9581603 \times 10^{-2} + 5.6804201 \times 10^{-4} \times R$
Note: $R = \log_{10} \dot{\varepsilon}$	

Table 21 Optimum fatigue failure equation (316FR:forging)

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

T : Temperature (°C) 425 ≤ T ≤ 650

$\dot{\epsilon}$: strain rate (mm/mm/s)

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

Nf : Failure cycle

A ₀	$1.8658903 - 5.9748335 \times 10^{-5} \times T \times R$
A ₁	1.5441800
A ₂	$5.1385016 \times 10^{-1} + 4.1612022 \times 10^{-3} \times R - 1.4612192 \times 10^{-5} \times T$
A ₃	$-1.8850731 \times 10^{-2}$
Note: $R = \log_{10} \dot{\epsilon}$	

Table 22 Distribution of the fatigue failure cycle (316FR:plate)

Temperature (C)	Strain range (%)	Logarithmic Average (Test/Est.)	Logarithmic Standard deviation	Number of the test data
500	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(1.25)	1.24	16
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(0.99)	0.24	38
	ALL	ln(1.06)	0.70	54
550	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(1.30)	0.94	29
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(1.05)	0.36	74
	ALL	ln(1.11)	0.59	103
600	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(0.82)	0.81	22
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(0.94)	0.23	41
	ALL	ln(0.89)	0.51	63
ALL	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(1.11)	0.99	67
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(1.00)	0.31	153
	ALL	ln(1.03)	0.60	220

For calculation	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(1.1)	1.0
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(1)	0.4

Table 23 Distribution of the fatigue failure cycle (316FR:forging)

Temperature (C)	Strain range (%)	Logarithmic Average (Test/Est.)	Logarithmic Standard deviation	Number of the test data
500	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(0.79)	0.12	4
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(1.13)	0.25	10
	ALL	ln(1.02)	0.27	14
550	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(1.19)	0.68	9
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(1.10)	0.16	14
	ALL	ln(1.14)	0.43	23
600	ALL	ln(0.76)	0.24	4
ALL	ALL	ln(1.05)	0.38	41

For calculation	$\Delta \varepsilon_t \leq 0.5$	ln(1)	1.0
	$0.5 < \Delta \varepsilon_t$	ln(1)	0.4

Table 24 Proposed distributions

データ種別	データ範囲	データ	データ分布	相関係数、データ数
降伏応力	板、鍛造:350°C以下	平均値(Table3)で正規化された降伏応力	正規分布:平均値 1、変動係数 0.06	0.995、111
	板、鍛造:400~650°C	同上	正規分布:平均値 1、変動係数 0.12	0.973、159
	同上	同上	ワイブル分布:a = 1.86、b = 0.20、c = 0.82	0.996、159
	管:650°C以下	同上	正規分布:平均値 1、変動係数 0.04	0.993、38
引張強さ	板、鍛造、管:650°C以下	平均値(Table7)で正規化された降伏応力	正規分布:平均値 1、変動係数 0.03	0.990、308
縦弾性係数	-	-	平均値 DDS、標準偏差 0	-
ポアソン比	-	-	平均値 EPICC(Table9)、標準偏差 0	-
熱膨張係数	-	-	平均値 DDS、標準偏差 0	-
主クリープ破断式	板、鍛造、管:500-650°C	α_R	対数正規分布:対数平均値 $\ln(1)$ 対数標準偏差 0.7、変動係数 0.80	0.996、220
クリープひずみ式	板、鍛造、管:500-650°C	α_C	対数正規分布:対数平均値 $\ln(1)$ 対数標準偏差 0.8、変動係数 0.95	0.988、196
	同上	同上	ワイブル分布:a = 1.79、b = 1.32、c = 0	0.987、196
α_R と α_C の相関関係	-	-	-	Table14
弾塑性応力-ひずみ関係式	板、鍛造:500~650°C (0.3%/minの試験条件のみ)	Table15の式により正規化された応力	正規分布:平均値 0.95、標準偏差 0.11	0.994、133
動的応力-ひずみ関係式	板、鍛造:500°C (ひずみ速度効果は考慮せず)	Table18の式により正規化された応力	正規分布:平均値 1.04、標準偏差 0.12	0.964、66
	板、鍛造:550°C(ひずみ速度同上)	同上	正規分布:平均値 1.03、標準偏差 0.07	0.989、131
	板、鍛造:600°C(ひずみ速度同上)	同上	正規分布:平均値 0.98、標準偏差 0.05	0.988、69
最適疲労破損式	板:ひずみ範囲 0.5%以下	Table20の式により正規化された繰返し数	対数正規分布:対数平均値 $\ln(1.1)$ 対数標準偏差 1.0、変動係数 1.31	0.952、67
	板:ひずみ範囲 0.5%より大	同上	対数正規分布:対数平均値 $\ln(1)$ 対数標準偏差 0.4、変動係数 0.42	0.905、153
	鍛造:ひずみ範囲 0.5%以下	Table21の式により正規化された繰返し数	対数正規分布:対数平均値 $\ln(1)$ 対数標準偏差 1.0、変動係数 1.31	-
	鍛造:ひずみ範囲 0.5%以下	同上	対数正規分布:対数平均値 $\ln(1)$ 対数標準偏差 0.4、変動係数 0.42	-
クリープ破断伸び	板、管、鍛造:550°C以下	クリープ破断伸び	正規分布:平均値 44.2%、標準偏差 0.32	0.996、55
	板、管、鍛造:600°C	同上	正規分布:平均値 44.2%、標準偏差 0.20	0.993、55

注)ワイブル分布:a = 形状母数、b = 尺度母数、c = 位置母数、対数正規分布の変動係数は、 $\exp\{(\text{対数標準偏差}^2)-1\}^{0.5}$ により計算した。

Table 25 Evaluation of distributions

データ種別	データ範囲	評価	評価理由
降伏応力	板、鍛造:350℃以下	A	試験データ範囲は適切、試験データ数は10点を超える、相関係数は0.9以上
	板、鍛造:400~650℃	A	同上
	同上	A	同上
	管:650℃以下	A	同上
引張強さ	板、鍛造、管:650℃以下	A	同上
縦弾性係数	-	C	DDSの基準値をそのまま使用しているため。 標準偏差が0のため、ペナルティとしては、数個の確認データと比較の上、0.05程度の変動係数を与えることが考えられる。
ポアソン比	-	C	EPICCの基準値をそのまま使用しているため。ペナルティ同上。
熱膨張係数	-	C	DDSの基準値をそのまま使用しているため。ペナルティ同上。
主クリープ破断式	板、鍛造、管:500-650℃	A	試験データ範囲は適切、試験データ数は10点を超える、相関係数は0.9以上
クリープひずみ式	板、鍛造、管:500-650℃	A	同上
	同上	A	同上
α_R と α_C の相関関係	-		評価対象外
弾塑性応力-ひずみ関係式	板、鍛造:500~650℃ (0.3%/minの試験条件のみ)	B	試験データ数は10点を超え、相関係数は0.9以上であるものの、データ範囲が、0.3%/minに限定されている。 強度評価において、その仮定を許容する場合は、ペナルティは必要ないと思われる。
動的応力-ひずみ関係式	板、鍛造:500℃ (ひずみ速度効果は考慮せず)	B	試験データ数は10点を超え、相関係数は0.9以上であるものの、ひずみ速度効果は考慮していない。 強度評価において、その仮定を許容する場合は、ペナルティは必要ないと思われる。
	板、鍛造:550℃(ひずみ速度同上)	B	同上
	板、鍛造:600℃(ひずみ速度同上)	B	同上
最適疲労破断式	板:ひずみ範囲0.5%以下	A	試験データ範囲は適切、試験データ数は10点を超える、相関係数は0.9以上
	板:ひずみ範囲0.5%より大	A	同上
	鍛造:ひずみ範囲0.5%以下	C	上記板材の確率分布を準用している。ただし、鍛造の低ひずみ範囲の試験データが示す標準偏差が小さいことを補正して大き目の標準偏差にしている。そのため、これ以上のペナルティは必要ないと思われる。
	鍛造:ひずみ範囲0.5%以下	C	同上
クリープ破断伸び	板、管、鍛造:550℃以下	A	試験データ範囲は適切、試験データ数は10点を超える、相関係数は0.9以上
	板、管、鍛造:600℃	A	同上

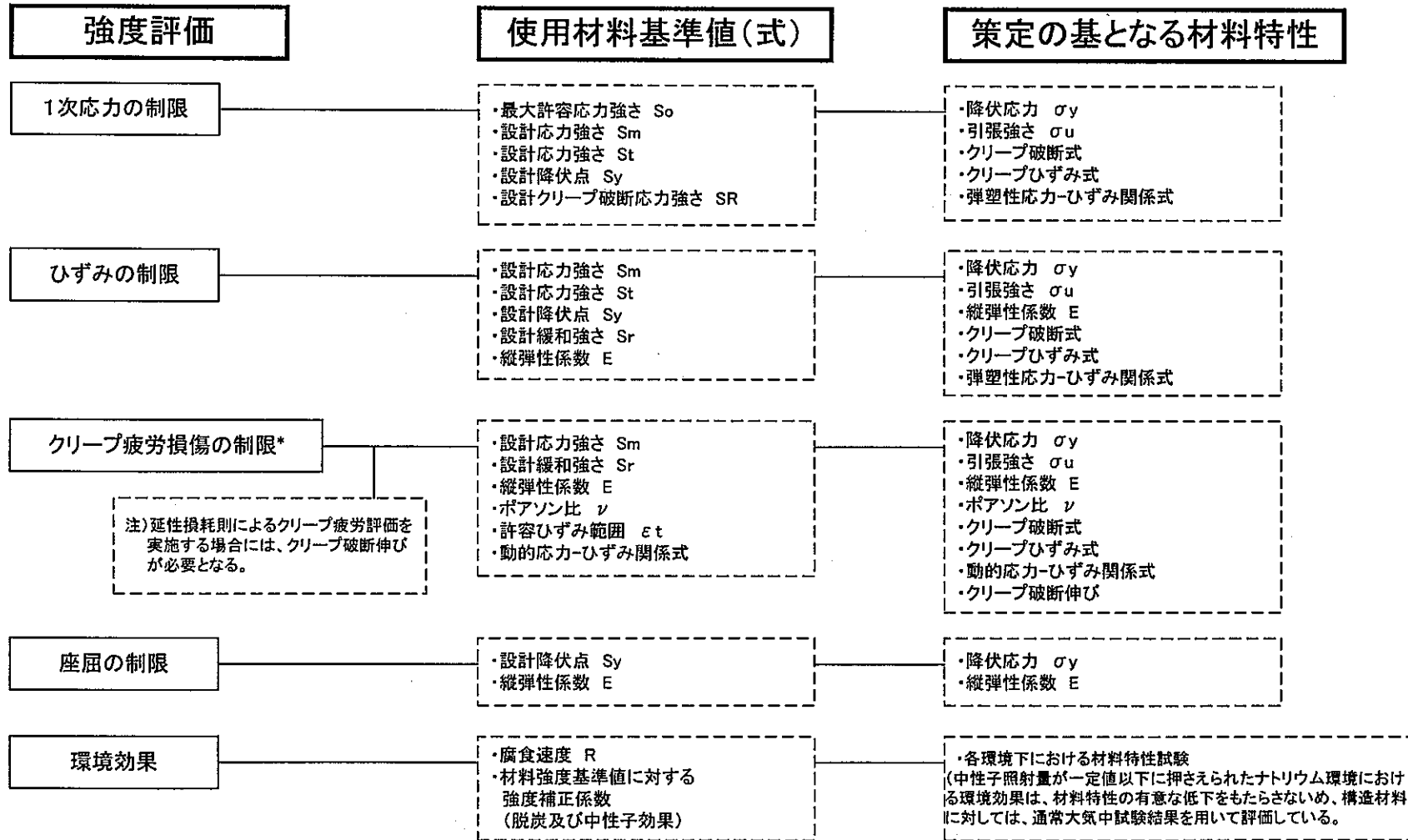


Fig. 1 Selected material properties

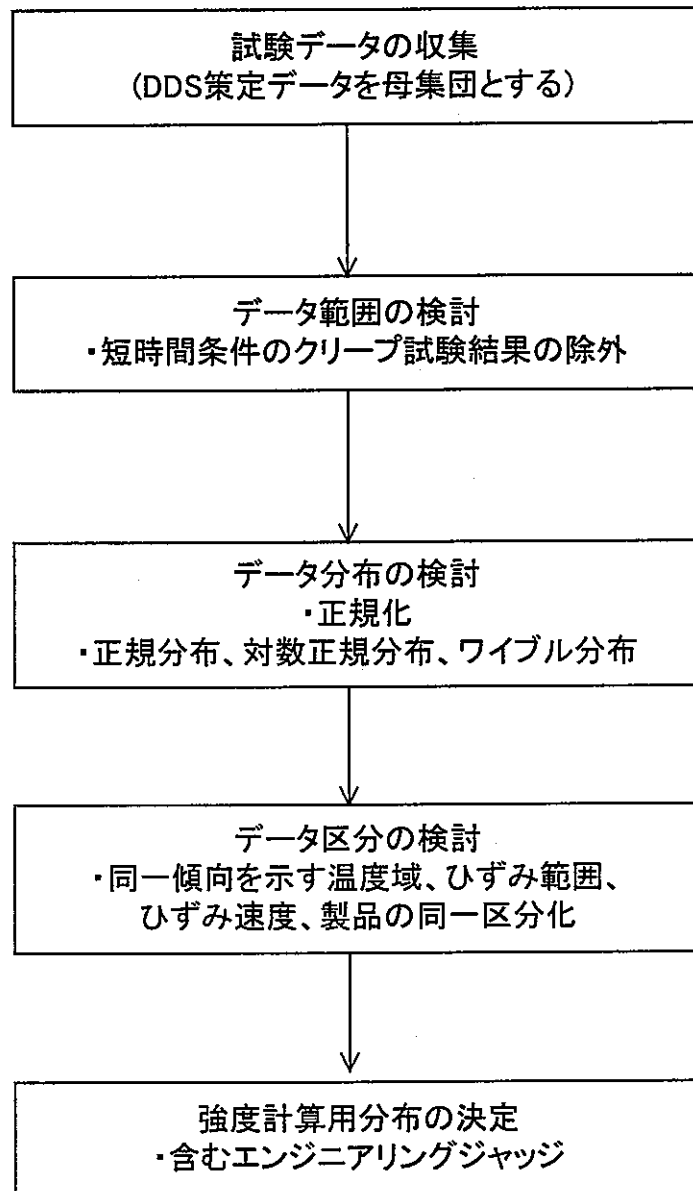
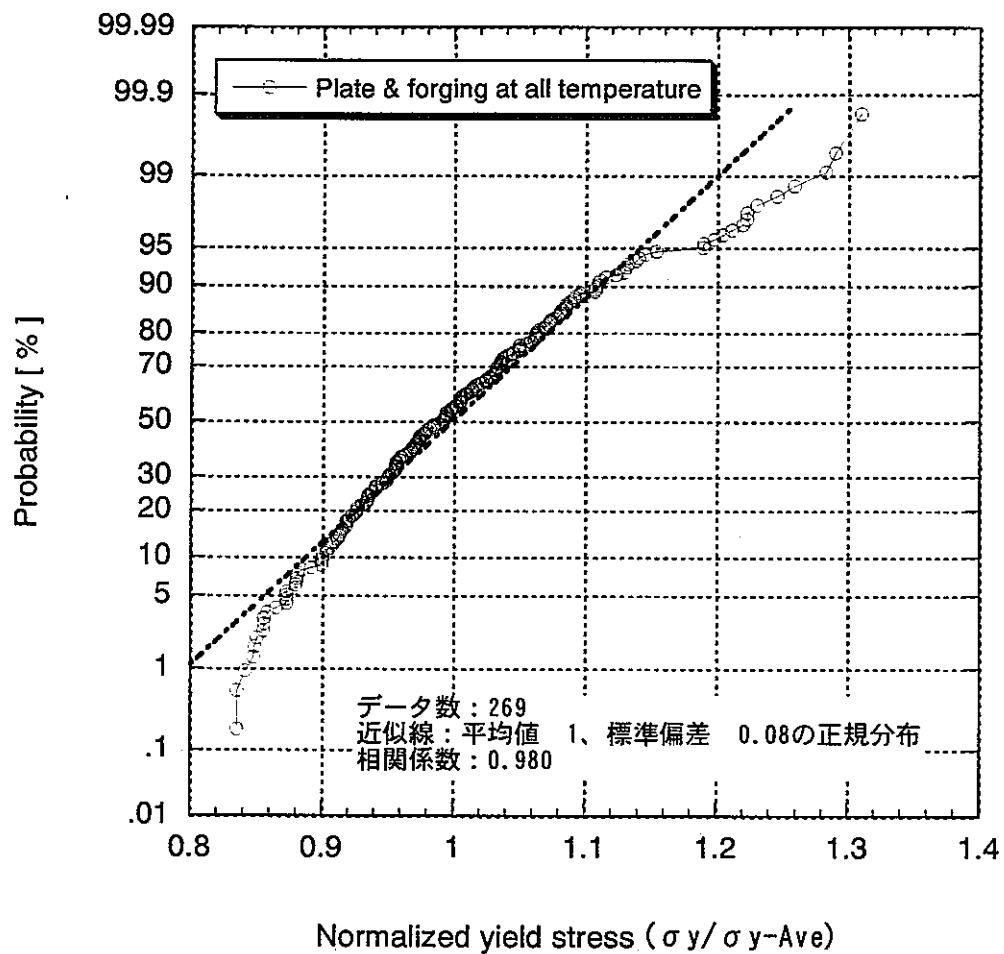
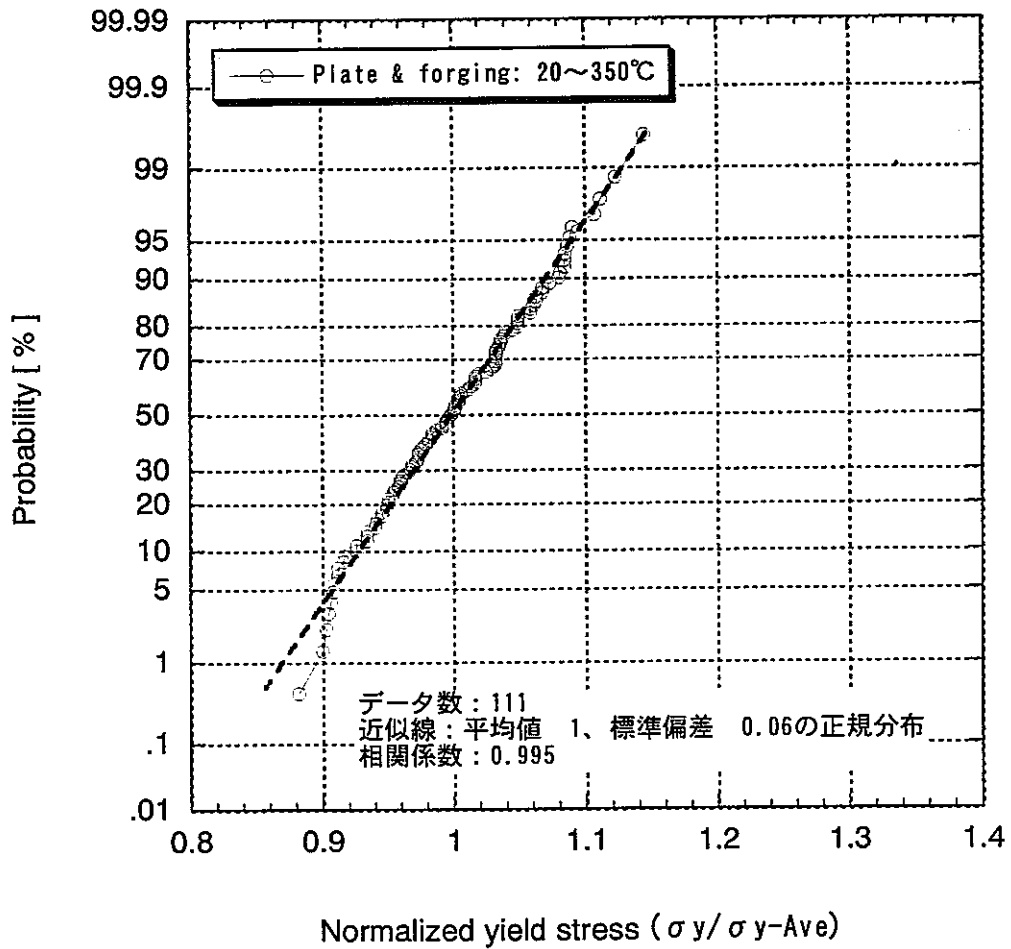


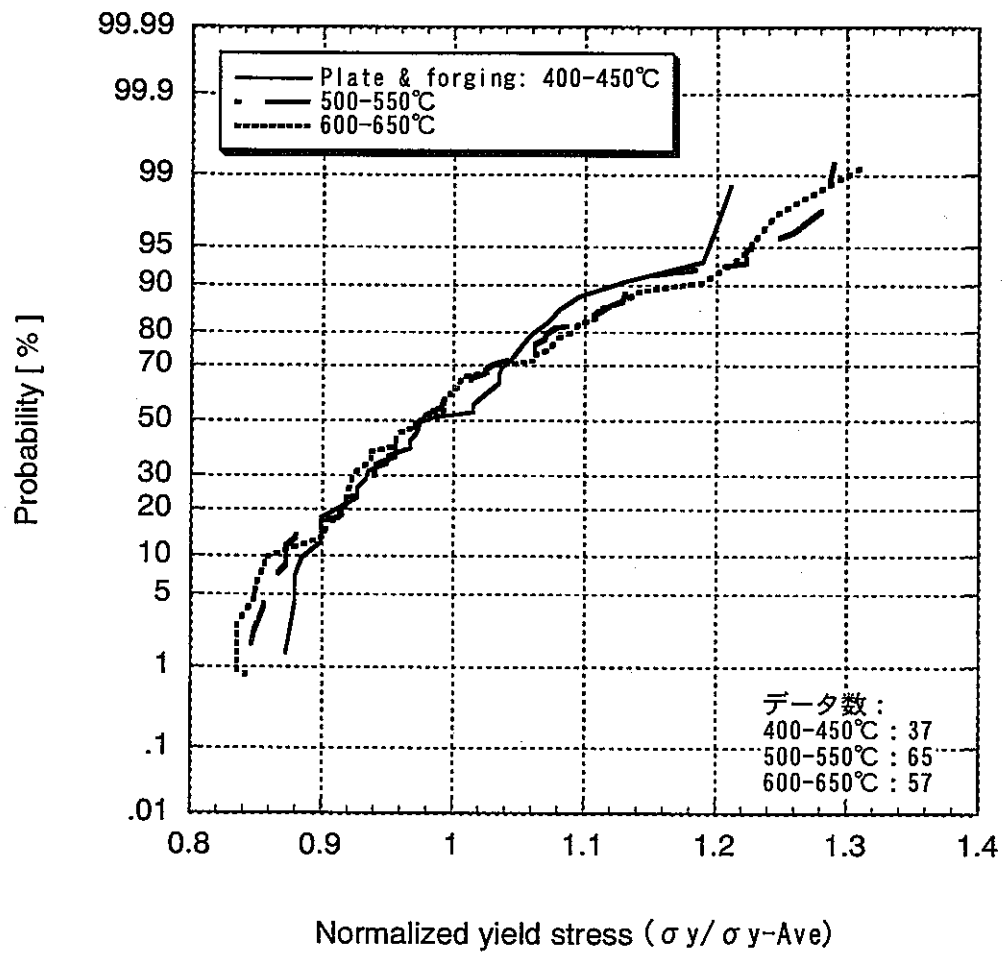
Fig. 2 Procedure of distribution-decision



**Fig. 3 Probability of normalized yield stress
(plate and forging: all temperature)**



**Fig. 4 Probability of normalized yield stress
(plate and forging: 20-350C.degree)**



**Fig. 5 Probability of normalized yield stress
(plate and forging: 400-650C.degree)**

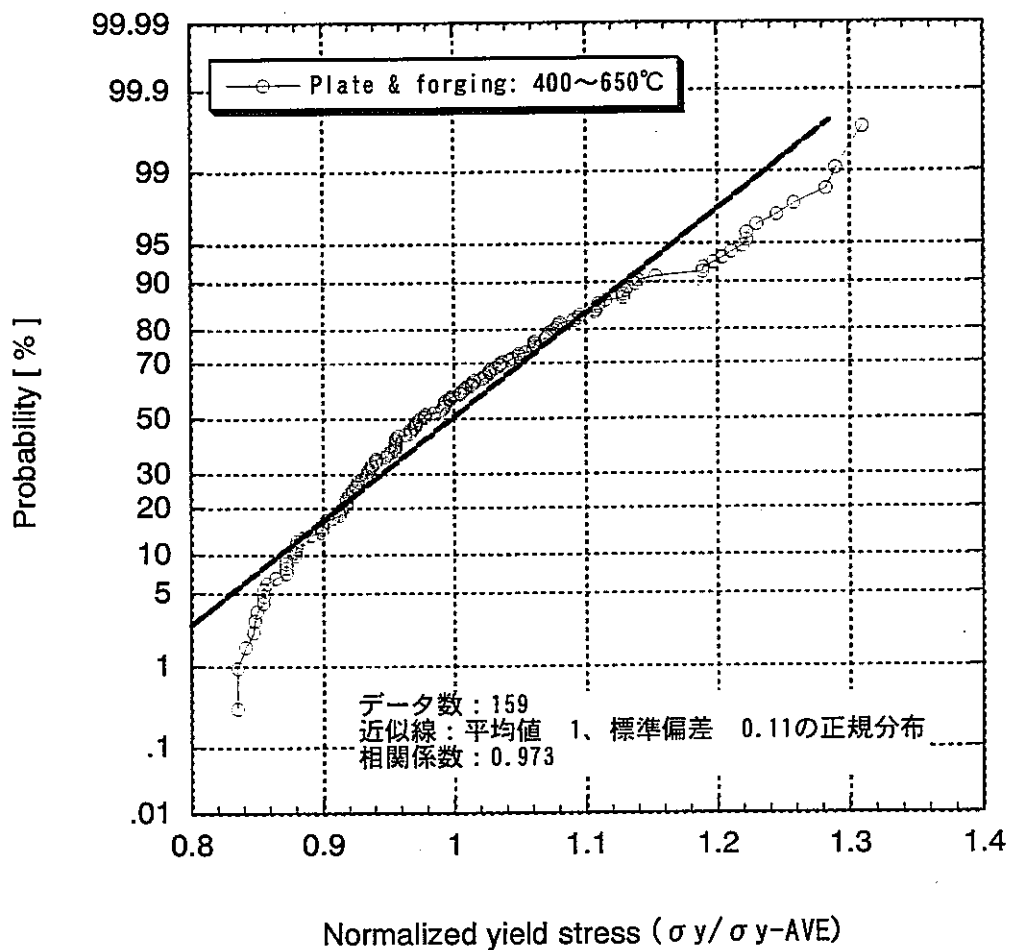


Fig. 6 Probability of normalized yield stress (plate and forging: 400-650C.degree)

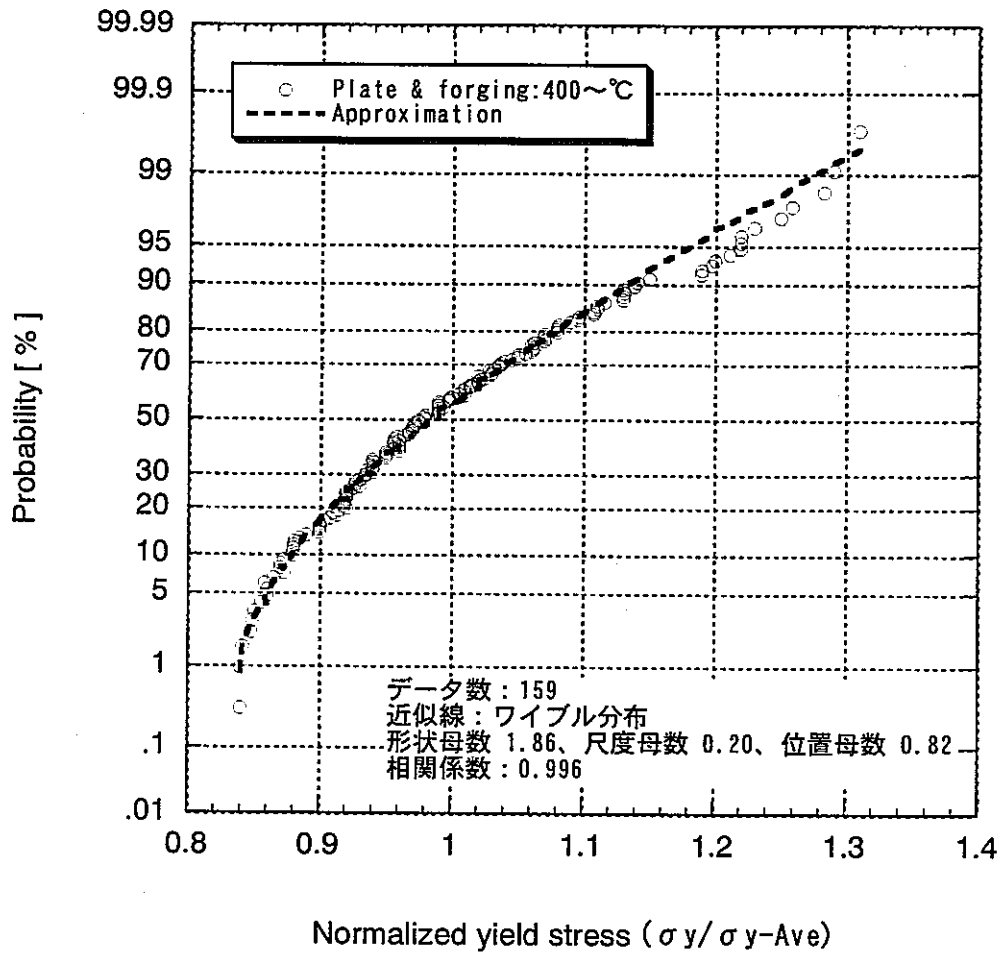


Fig. 7 Weibull curve
(plate and forging: 400-650C.degree)

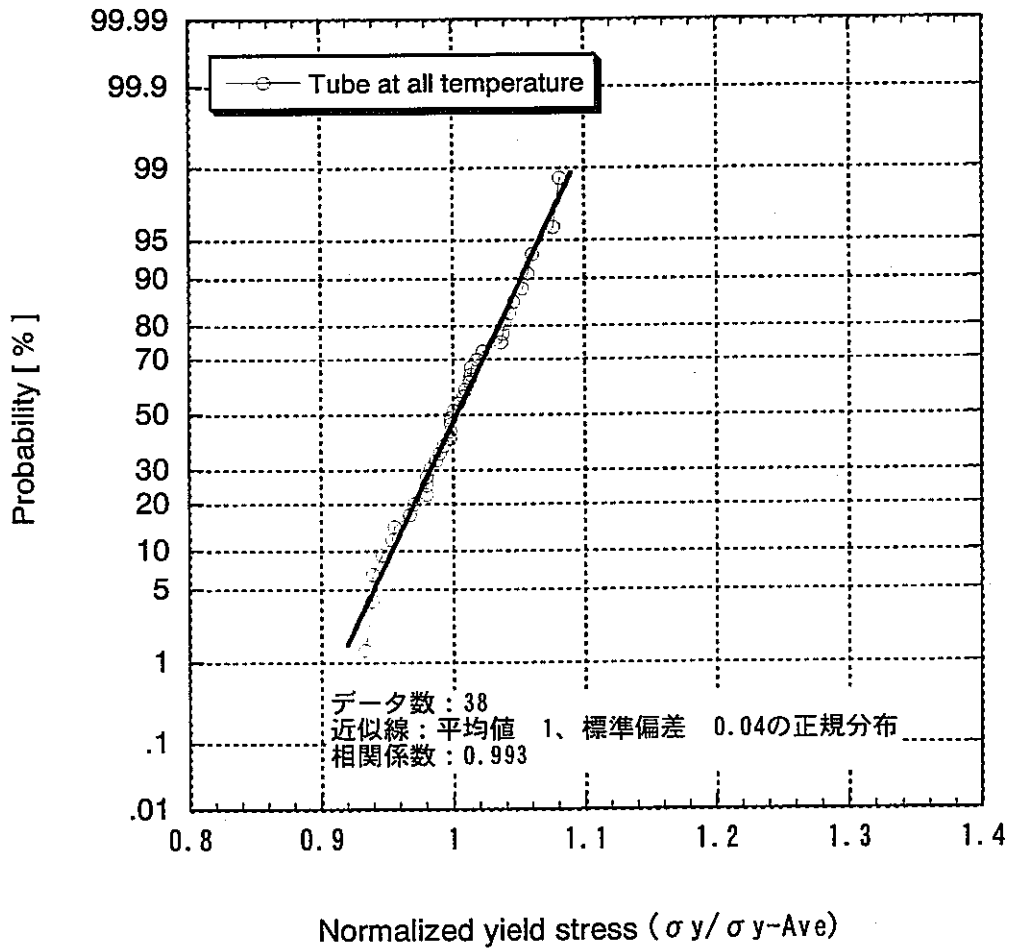
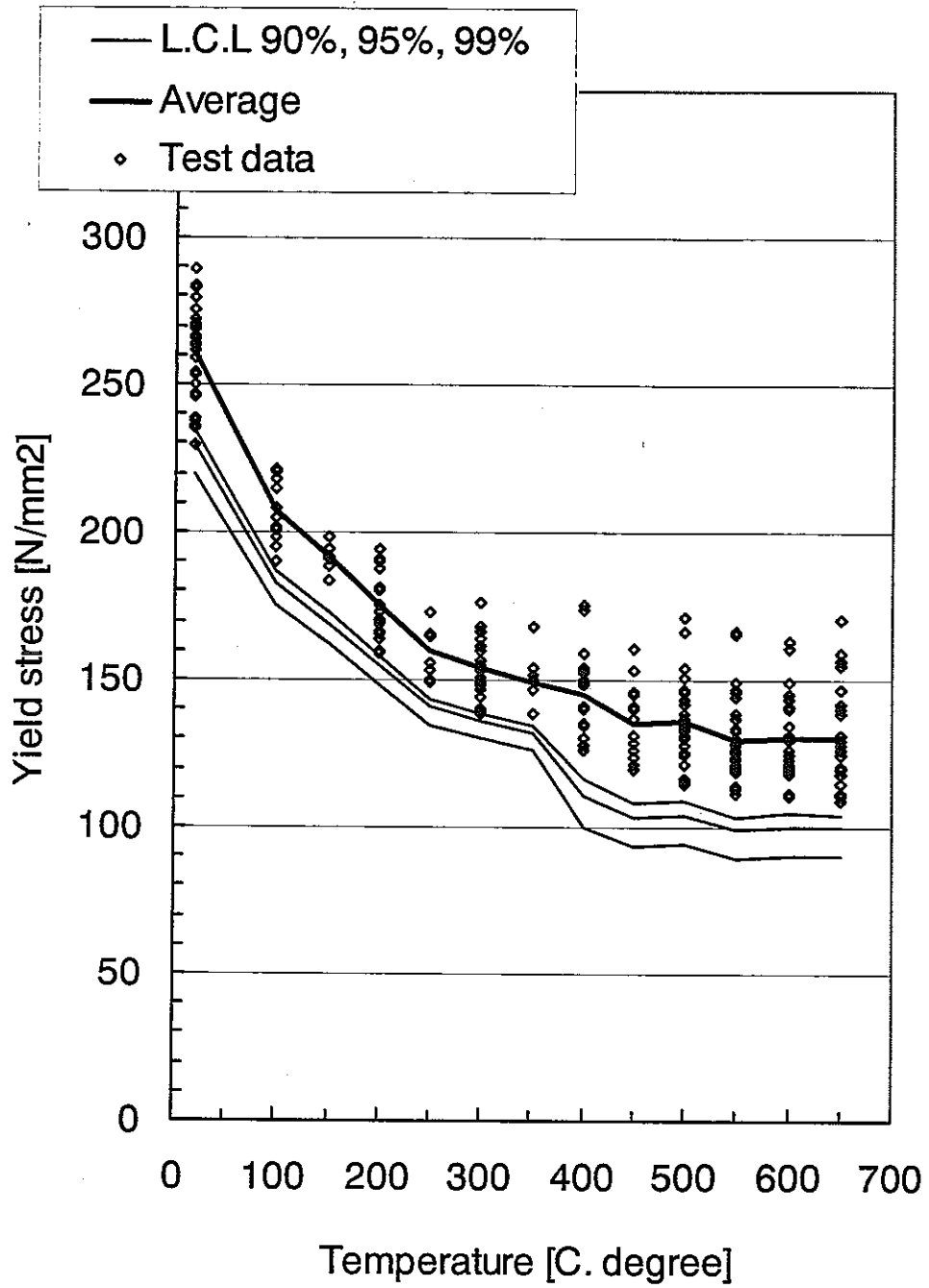
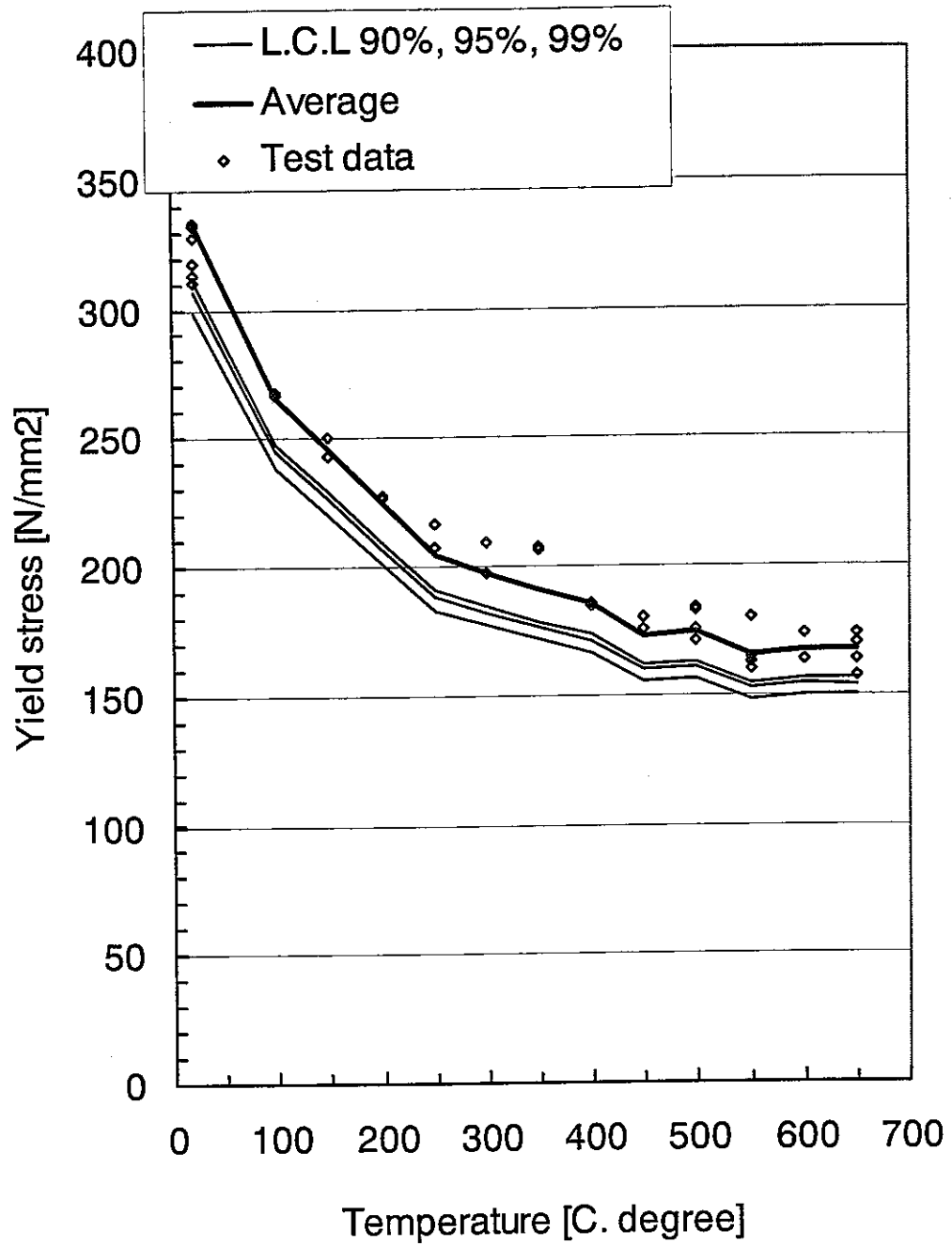


Fig. 8 Probability of normalized yield stress (tube)



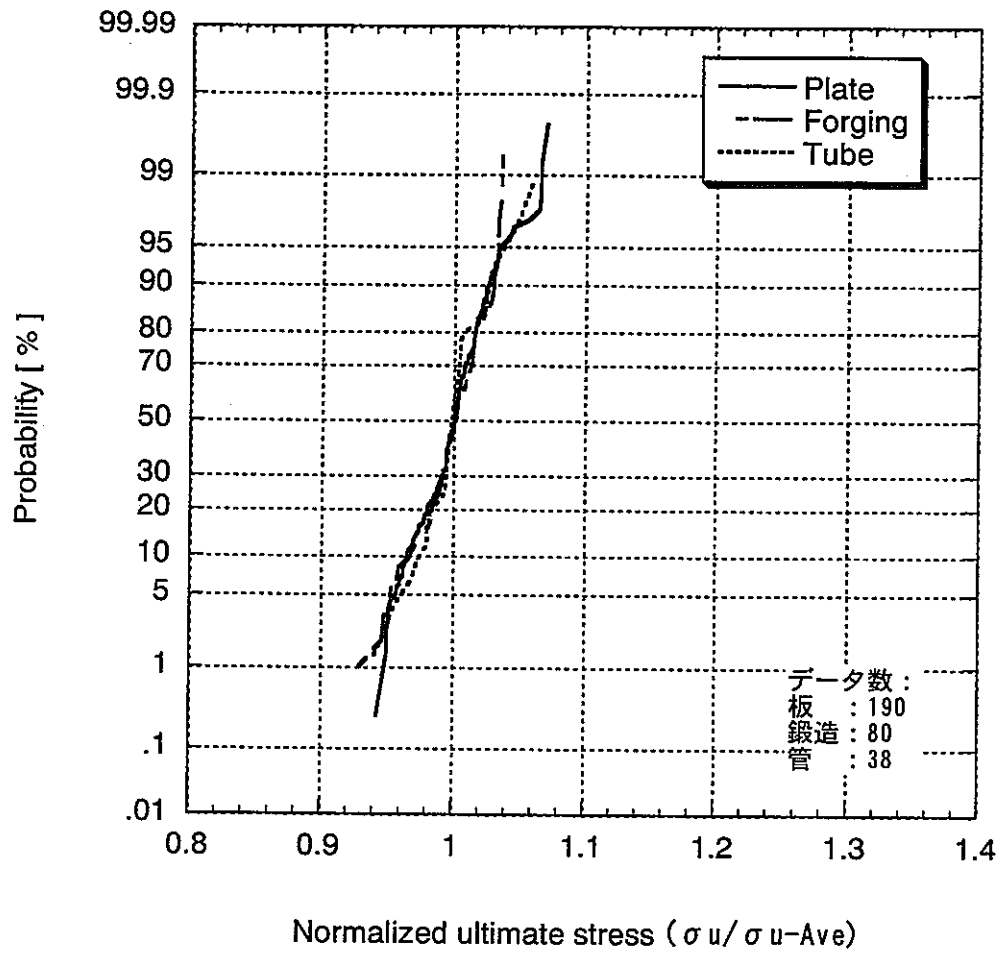
L.C.L = Lower Confidence Limit

Fig. 9 Yield stress test data (plate and forging)

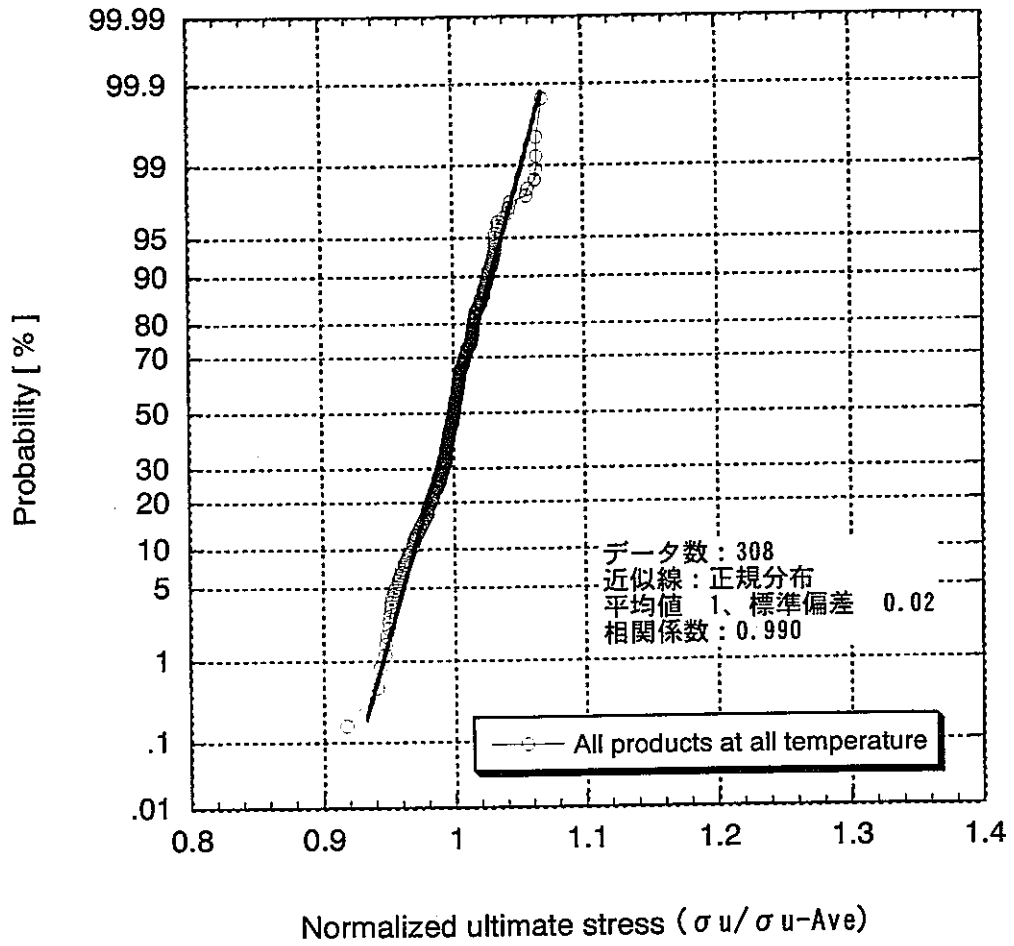


L.C.L = Lower Confidence Limit

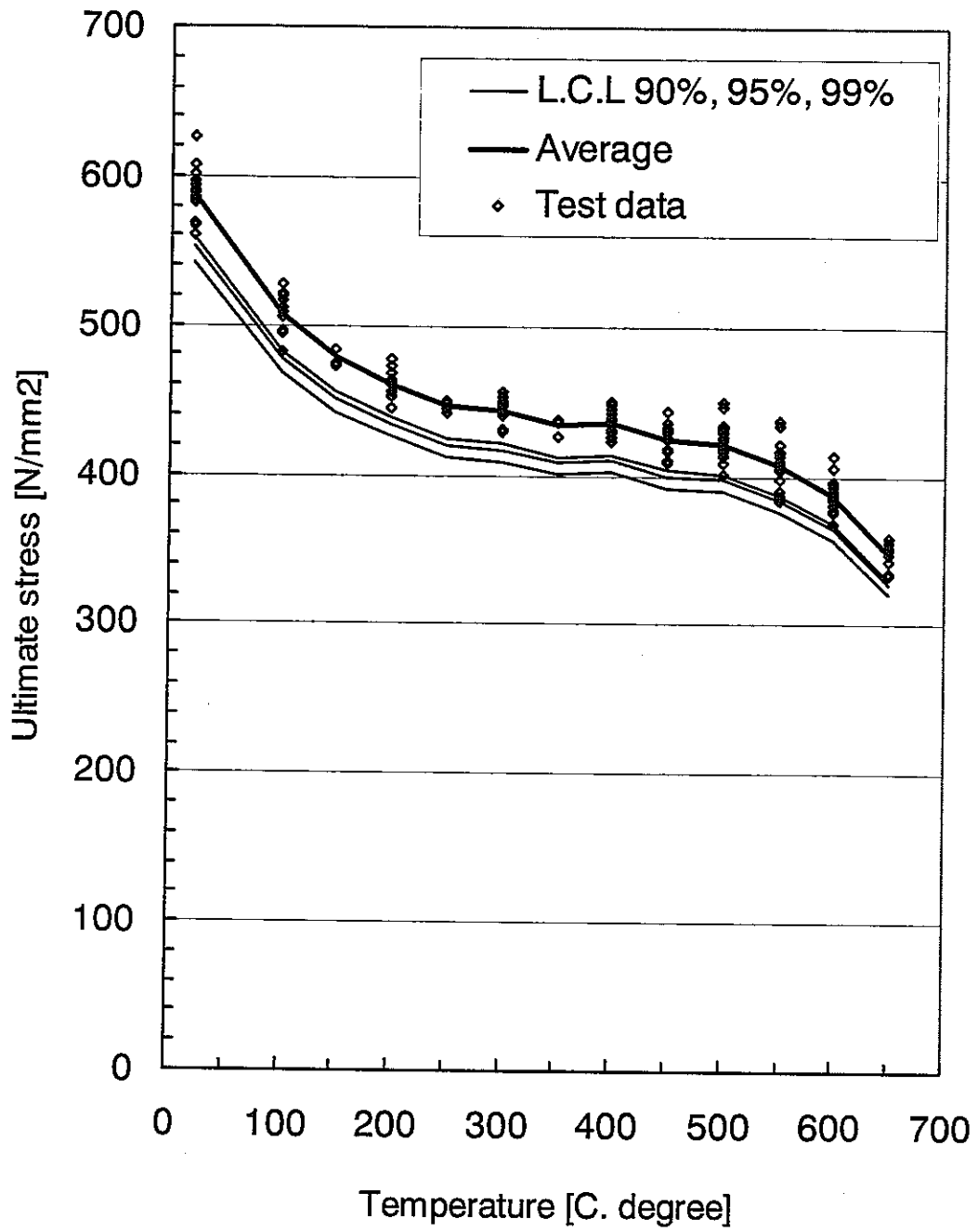
Fig. 10 Yield stress test data (tube)



**Fig. 11 Probability of normalized ultimate stress
(plate, forging and tube: all temperature)**

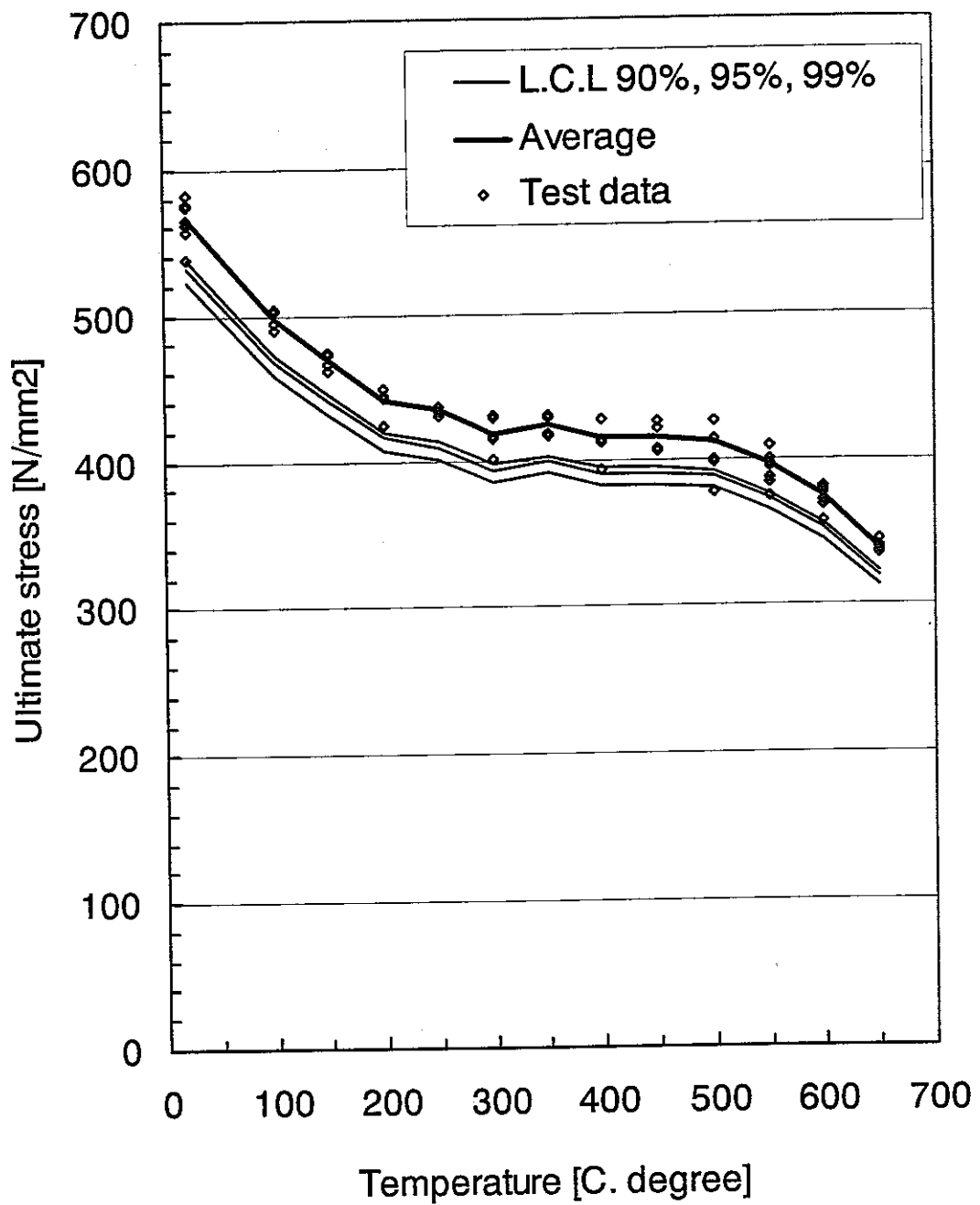


**Fig. 12 Probability of normalized ultimate stress
(plate, forging and tube: all temperature)**



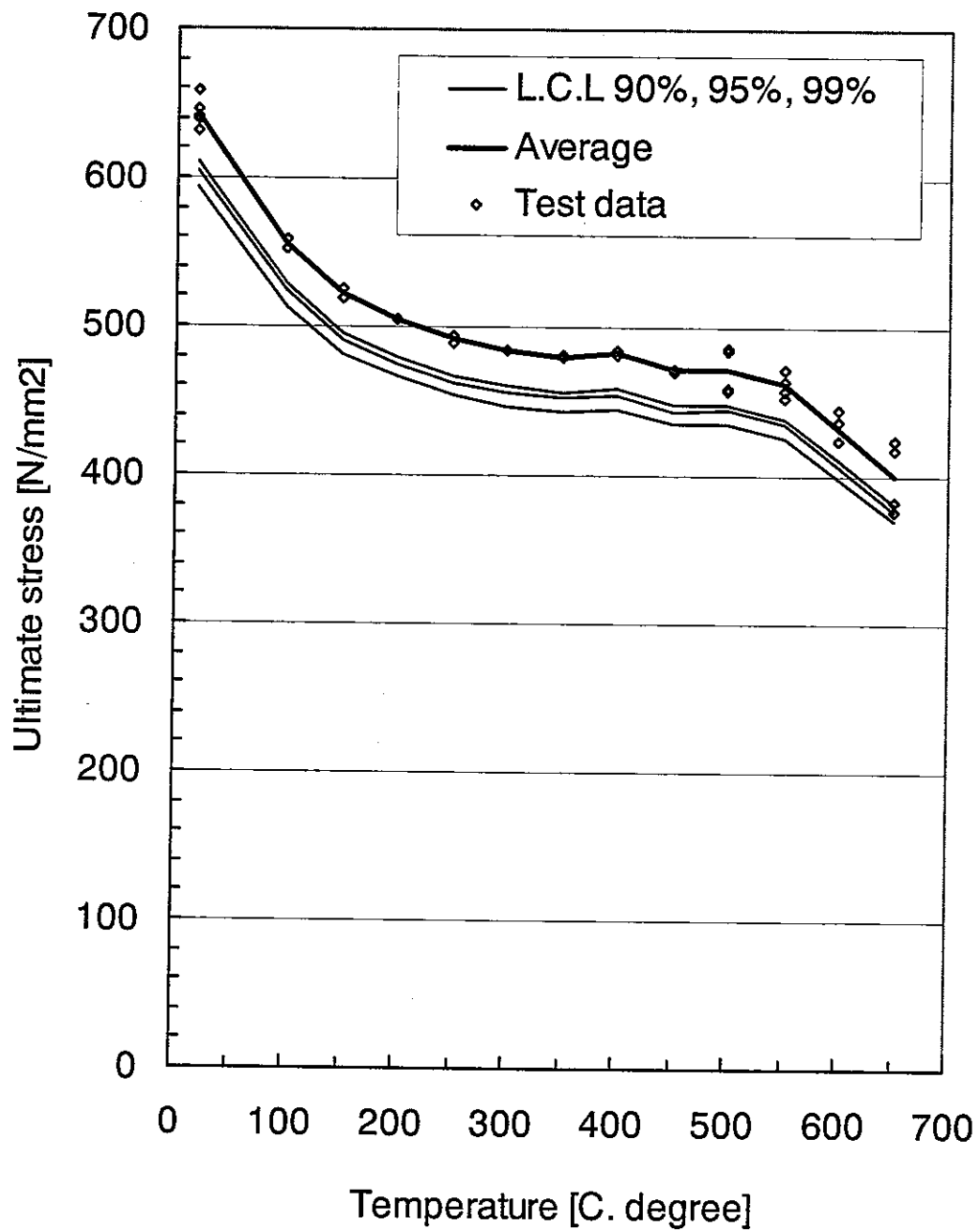
L.C.L = Lower Confidence Limit

Fig. 13 Ultimate stress test data (plate)



L.C.L = Lower Confidence Limit

Fig. 14 Ultimate stress test data (forging)



L.C.L = Lower Confidence Limit

Fig. 15 Ultimate stress test data (tube)

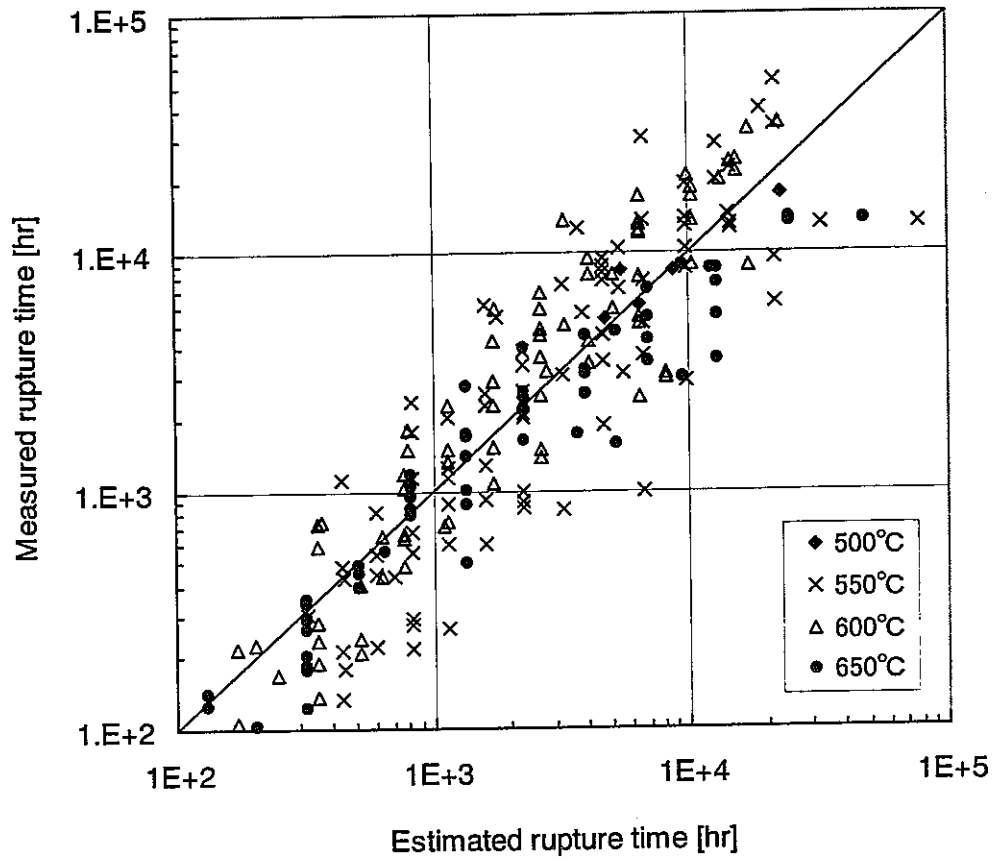


Fig. 16 Creep rupture time (Estimated vs. Measured)

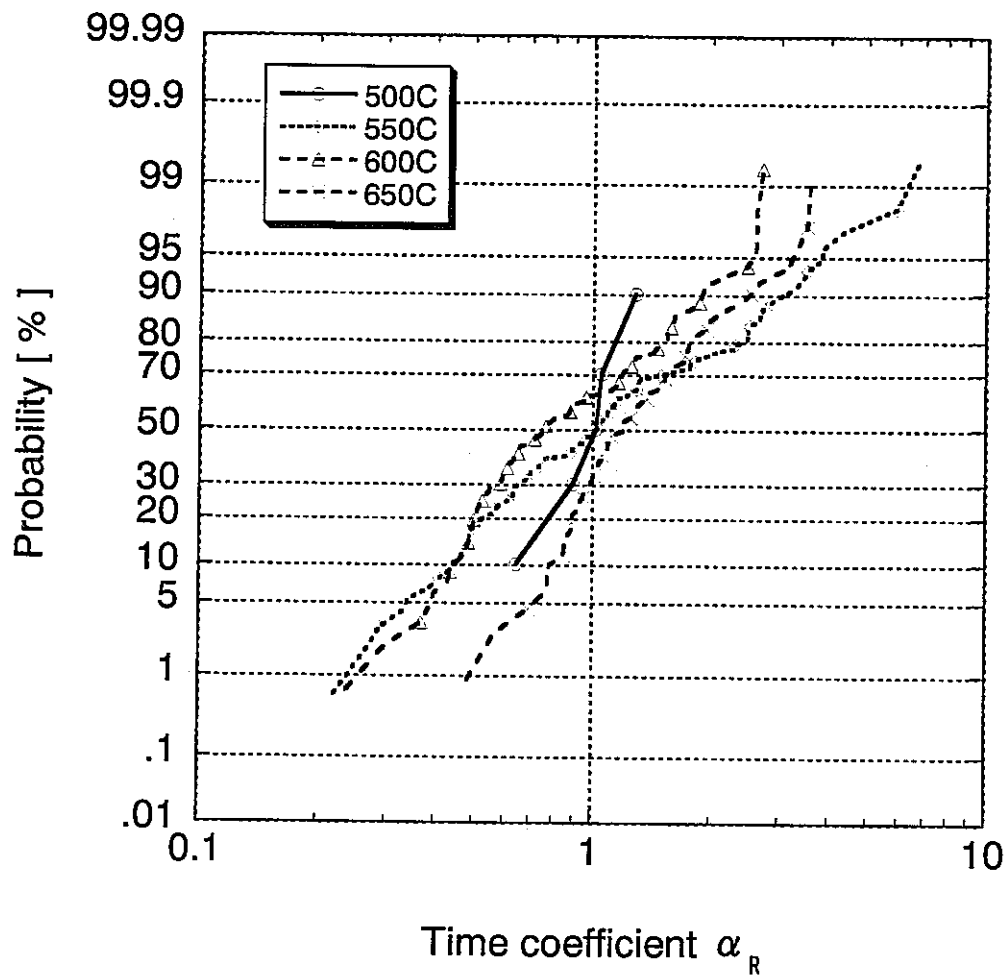


Fig. 17 Probability of creep rupture time 1

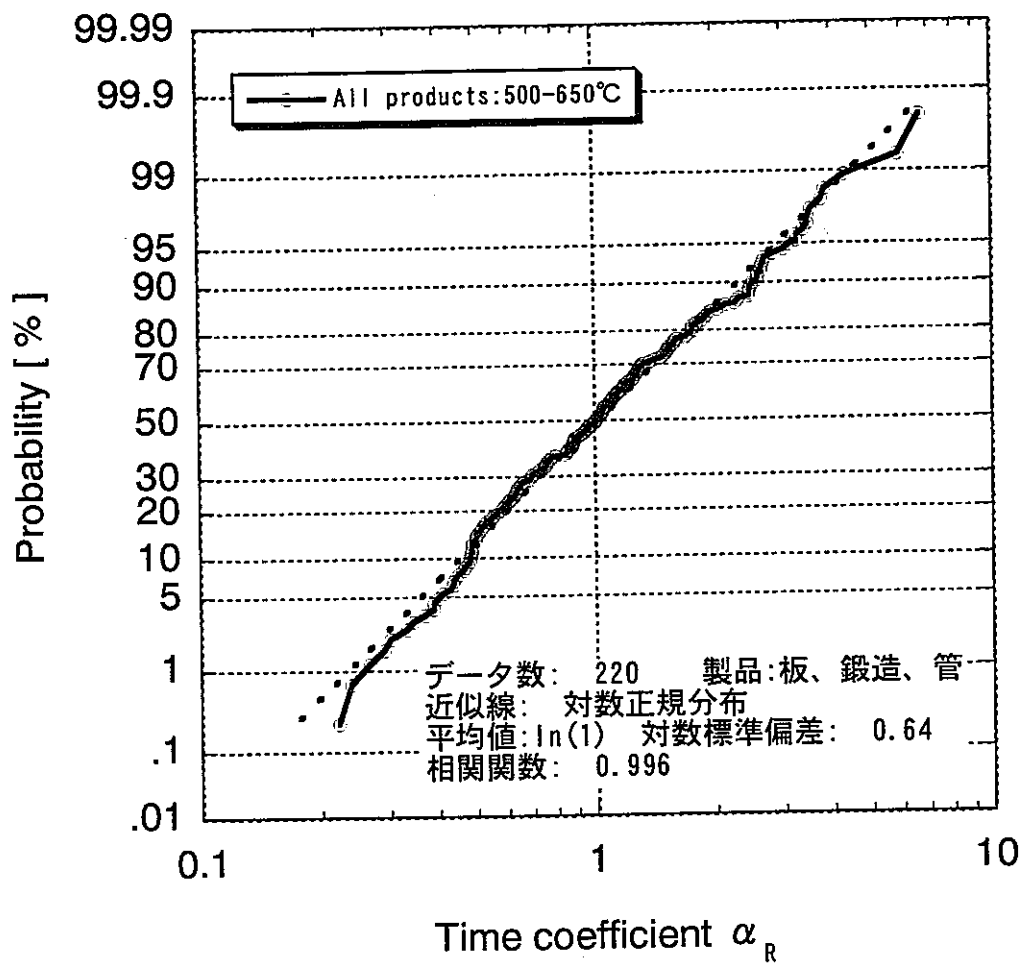


Fig. 18 Probability of creep rupture time 2

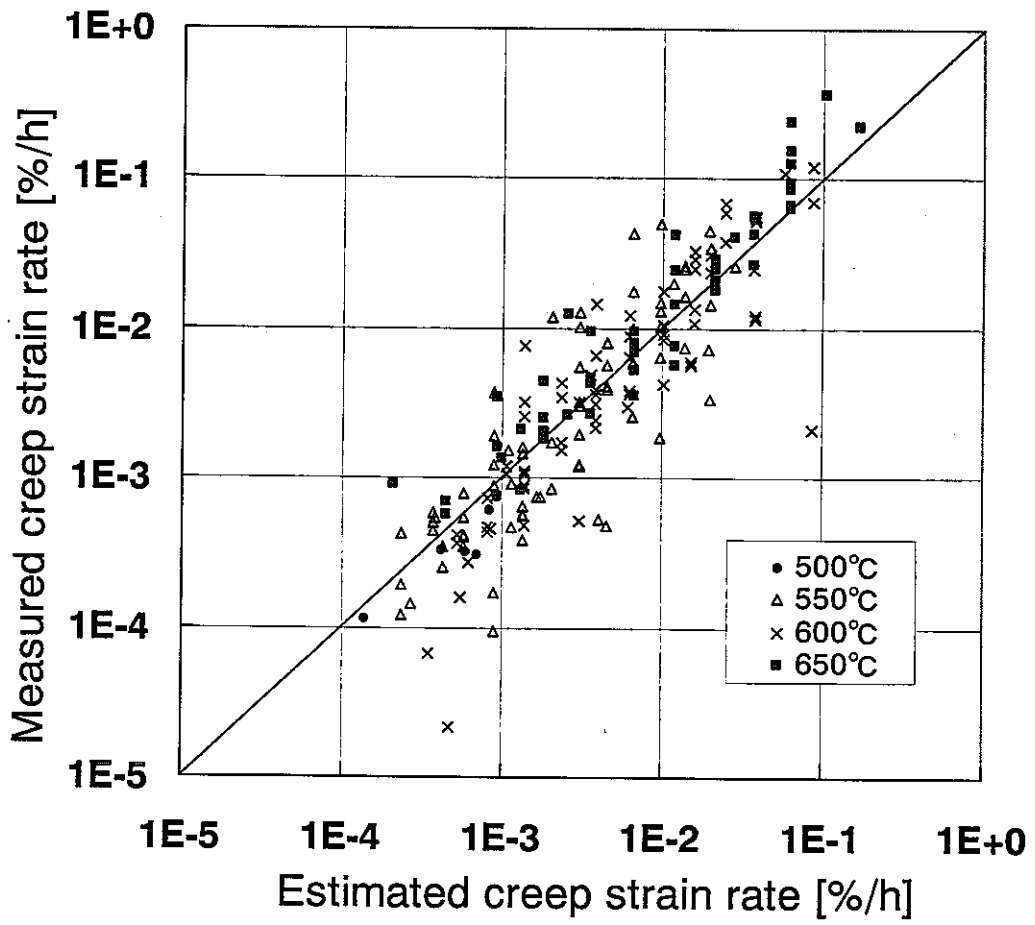


Fig. 19 Creep strain rate (Estimated vs. Measured)

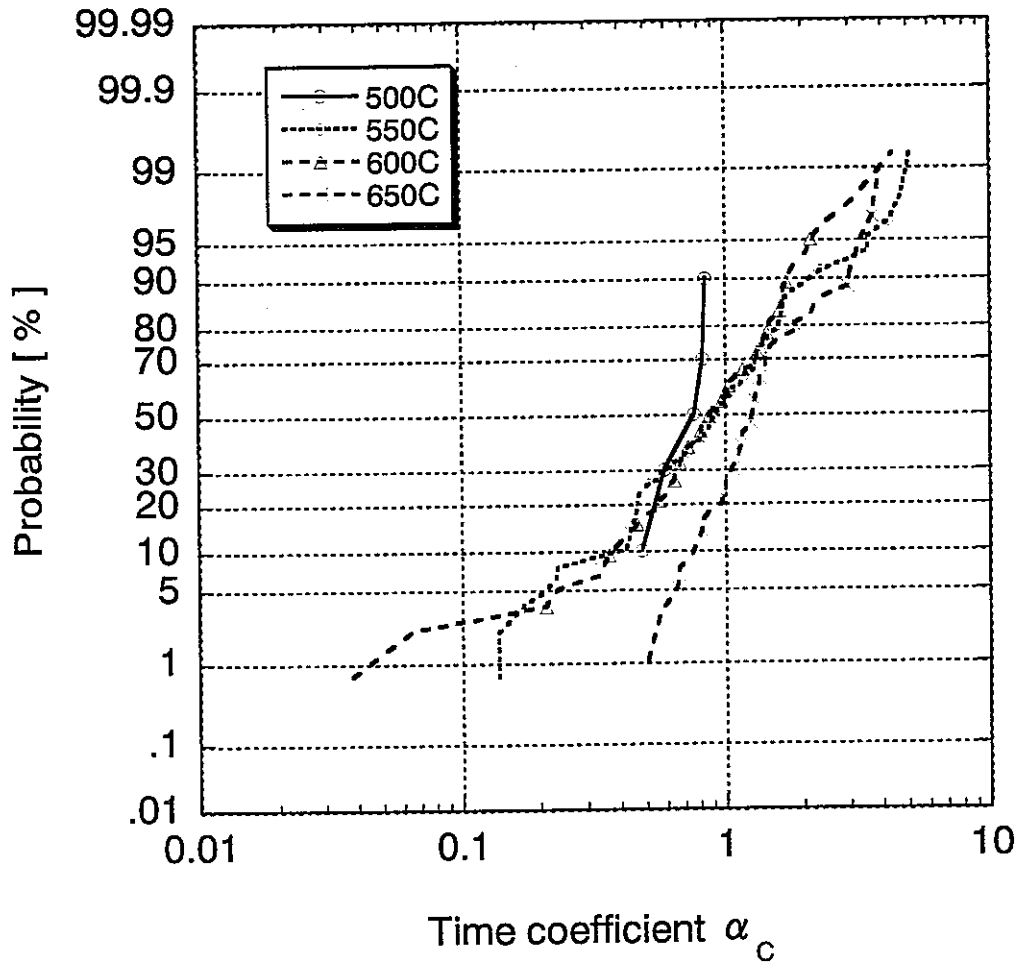


Fig. 20 Probability of $\alpha_c > 1$

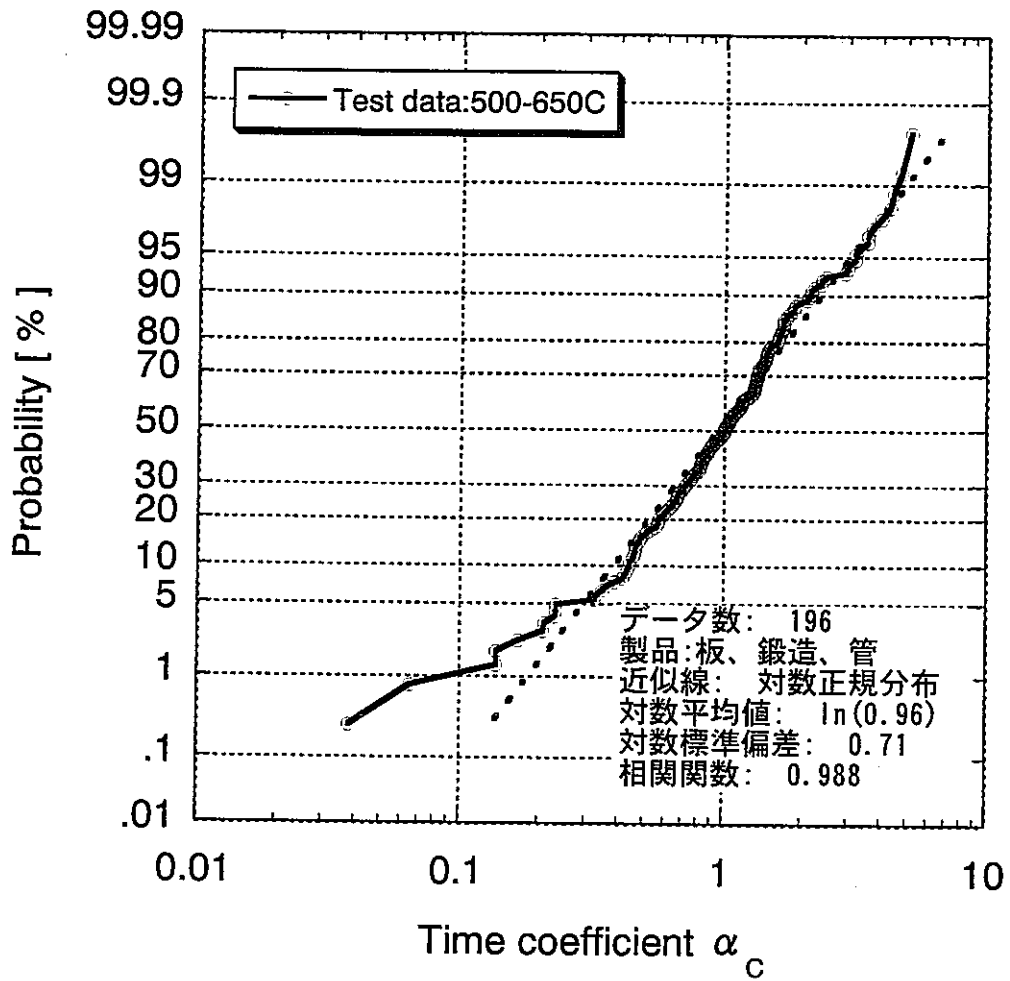


Fig. 21 Probability of α_c 2

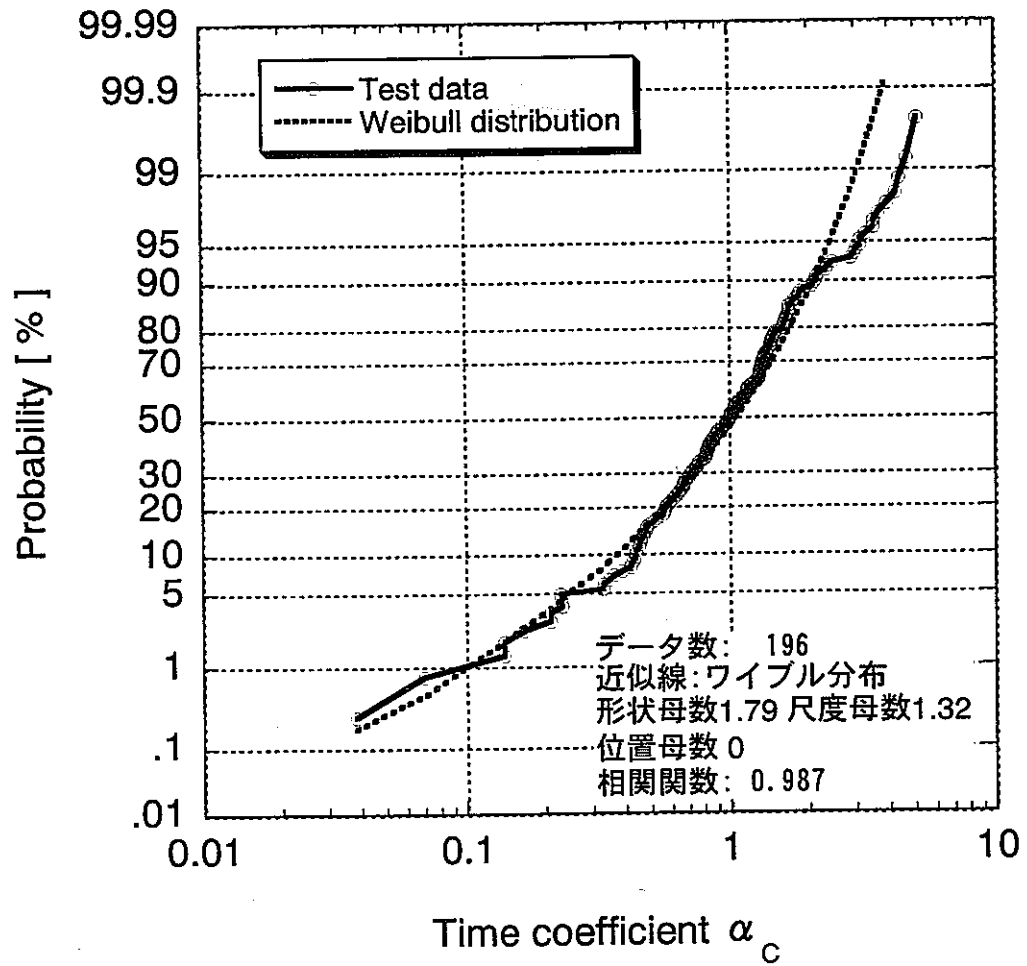


Fig. 22 Probability of α_c 3

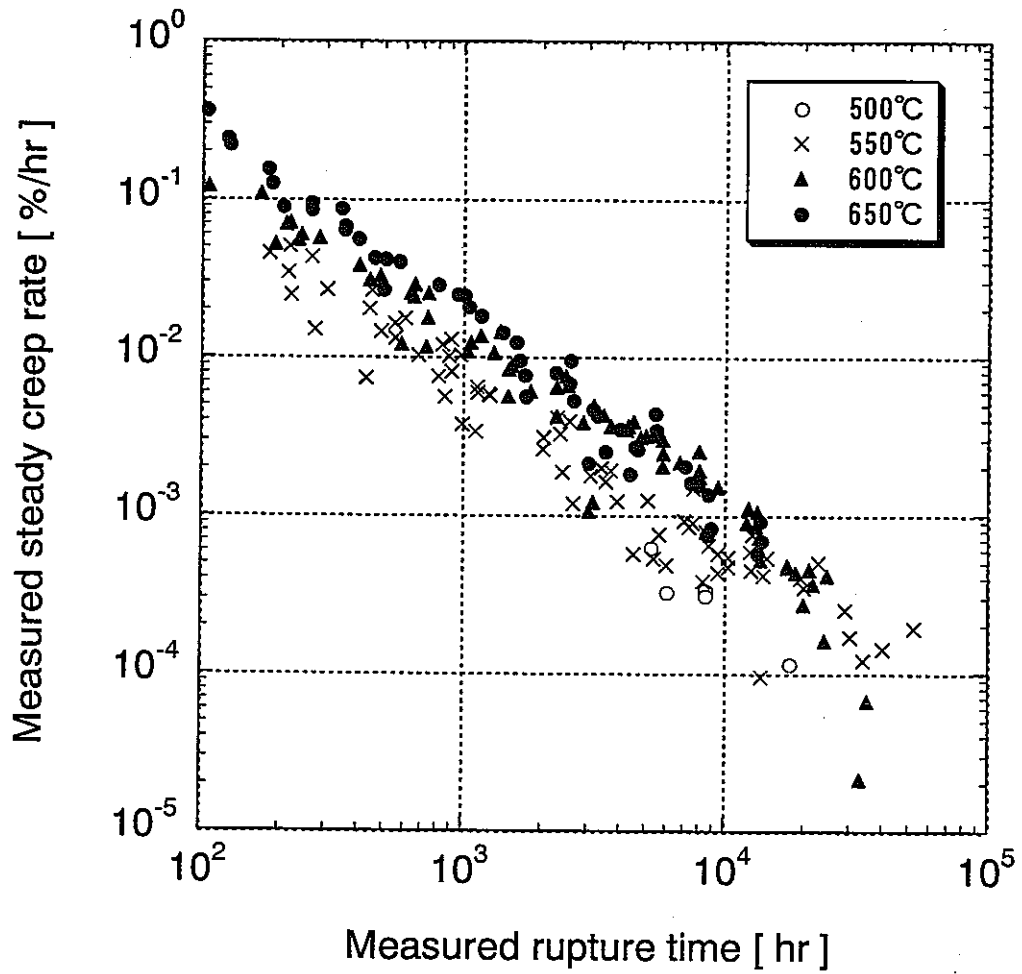


Fig. 23 Monkman-Grant relationship

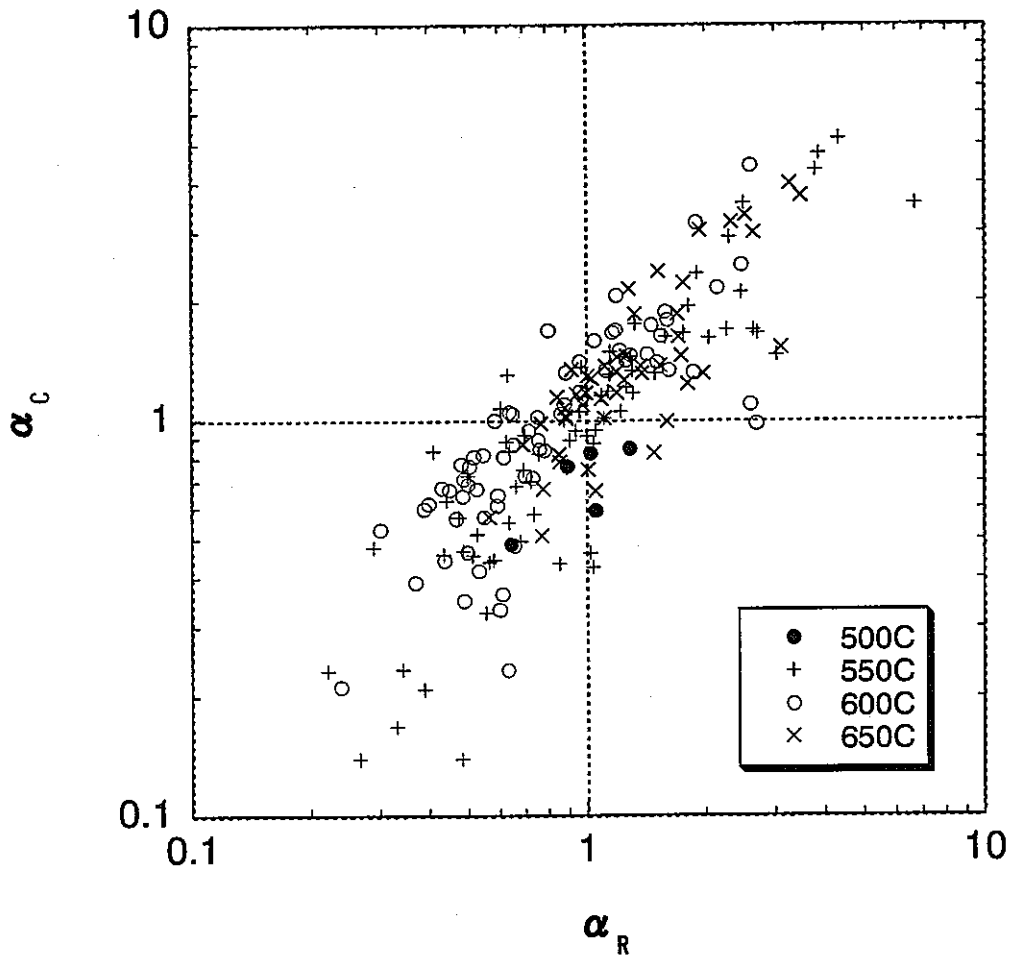


Fig. 24 Relation between α_R and α_C

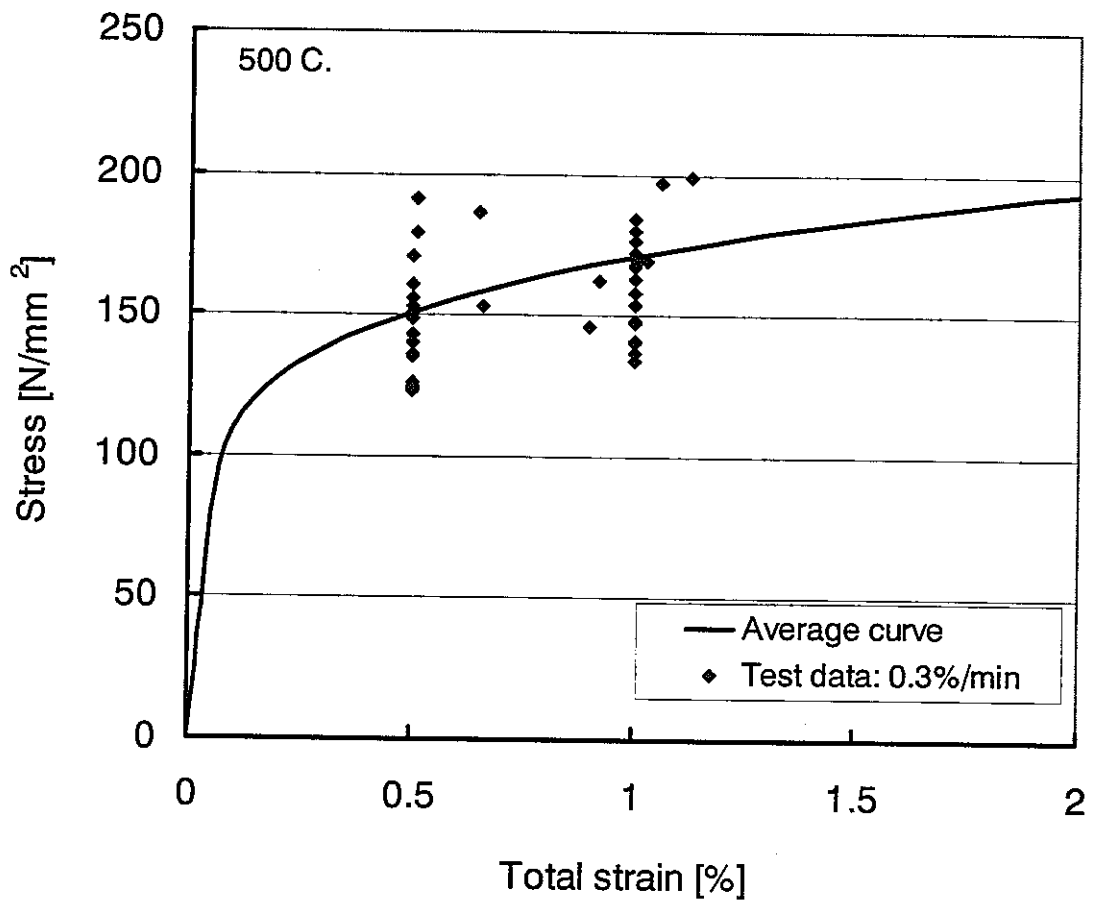


Fig. 25 Monotonic stress-strain relationship (500 C)

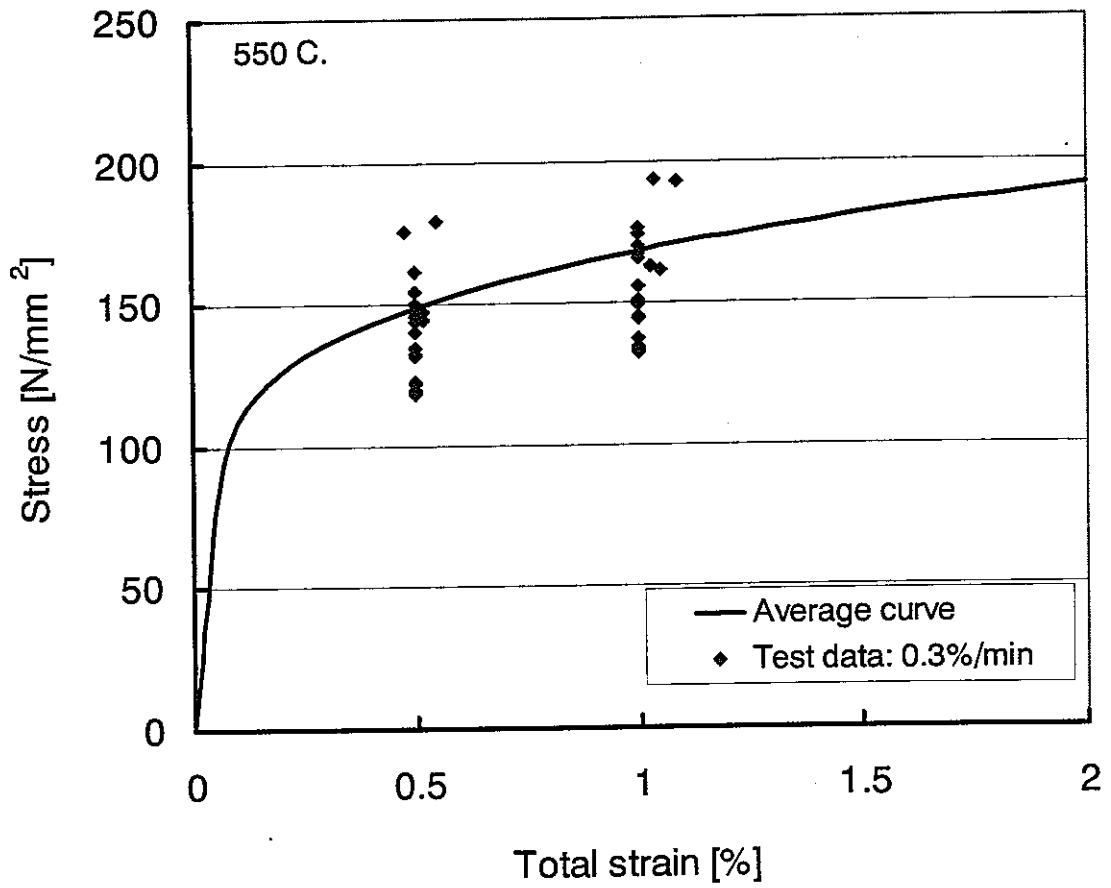


Fig. 26 Monotonic stress-strain relationship (550 C)

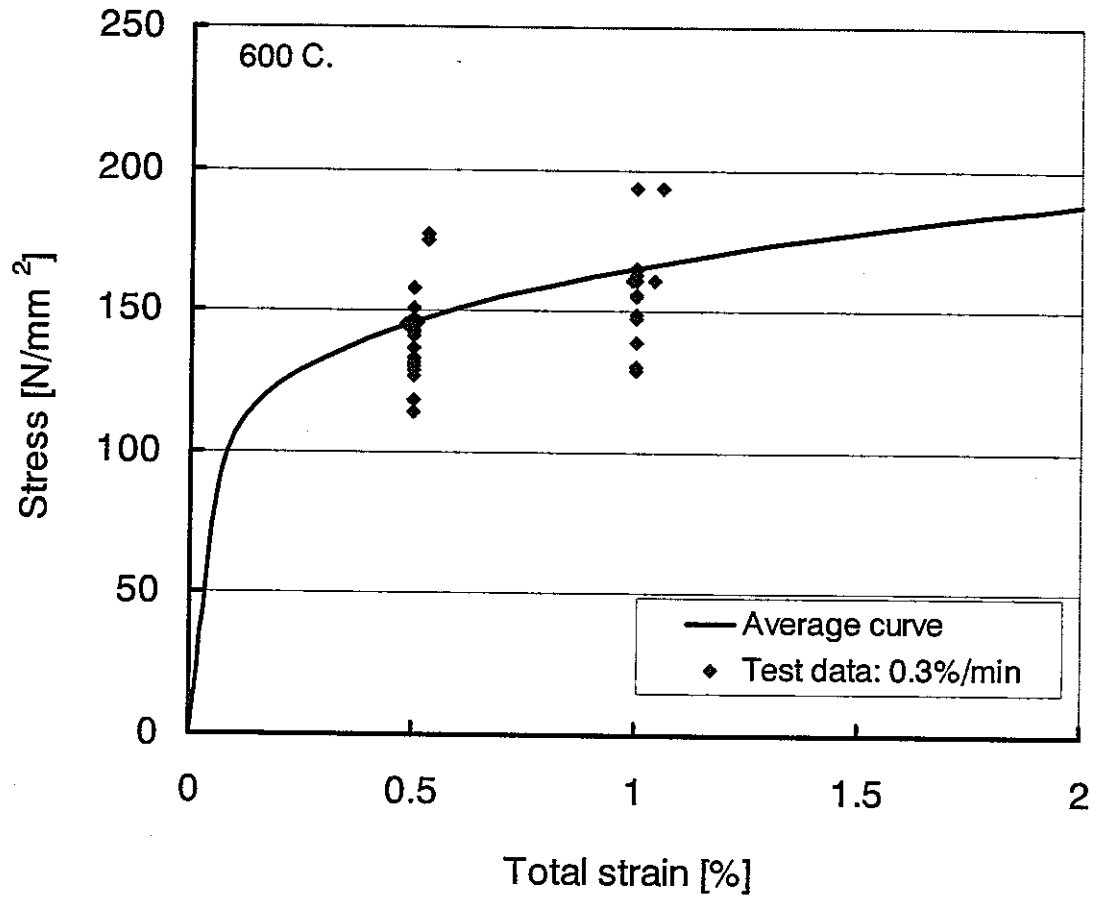


Fig. 27 Monotonic stress-strain relationship (600 C)

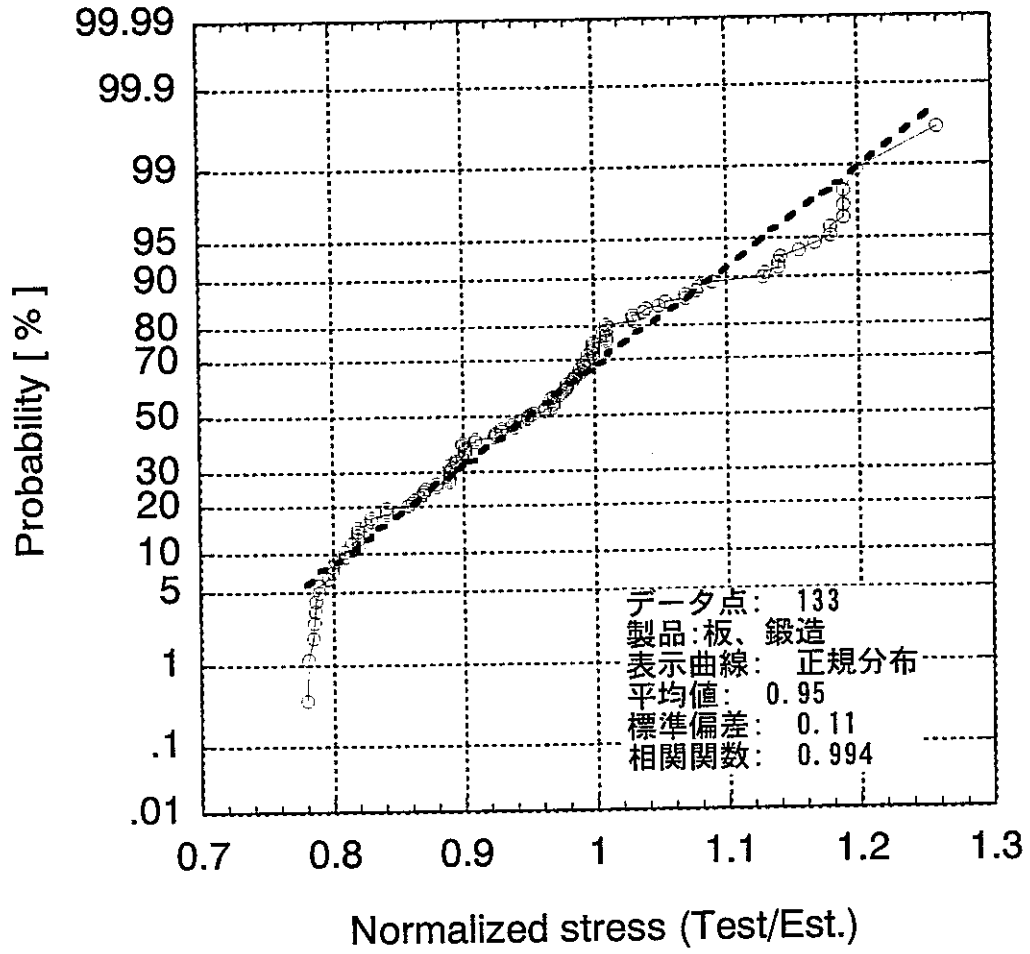


Fig. 28 Probability of monotonic stress 1

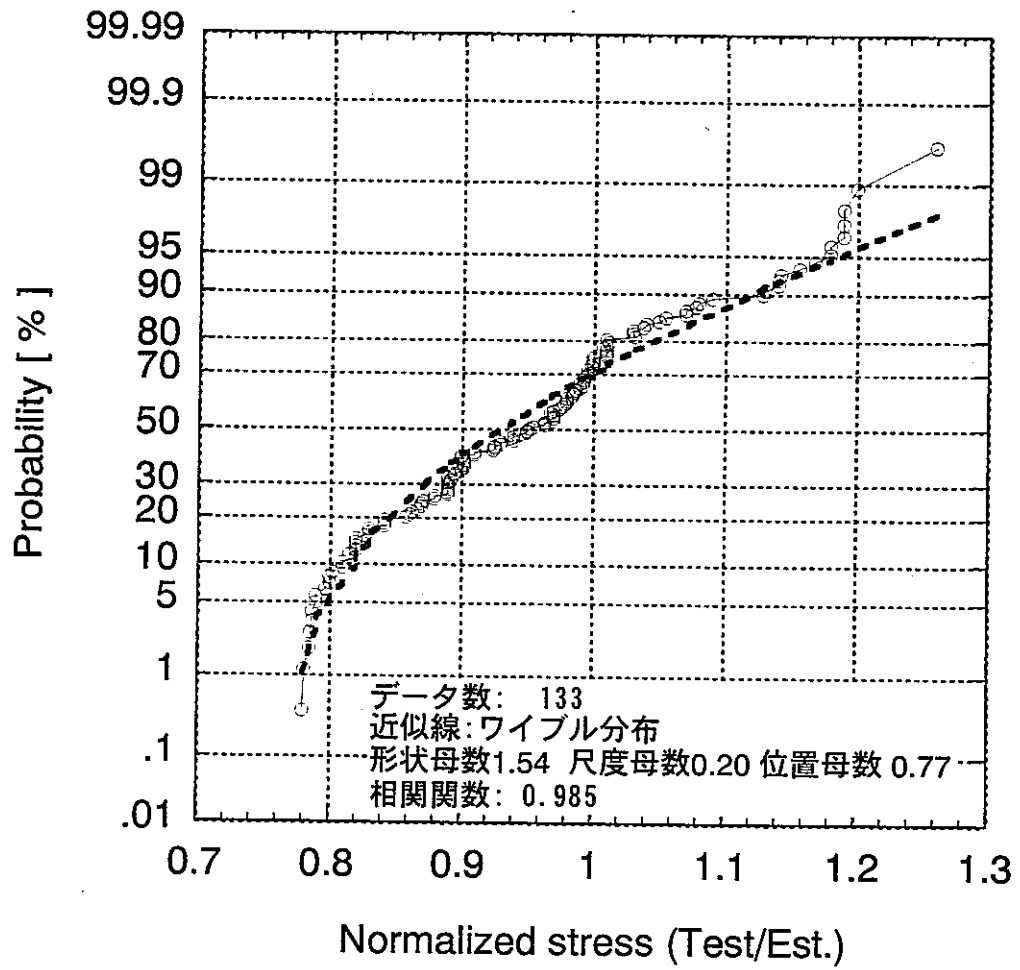


Fig. 29 Probability of monotonic stress 2

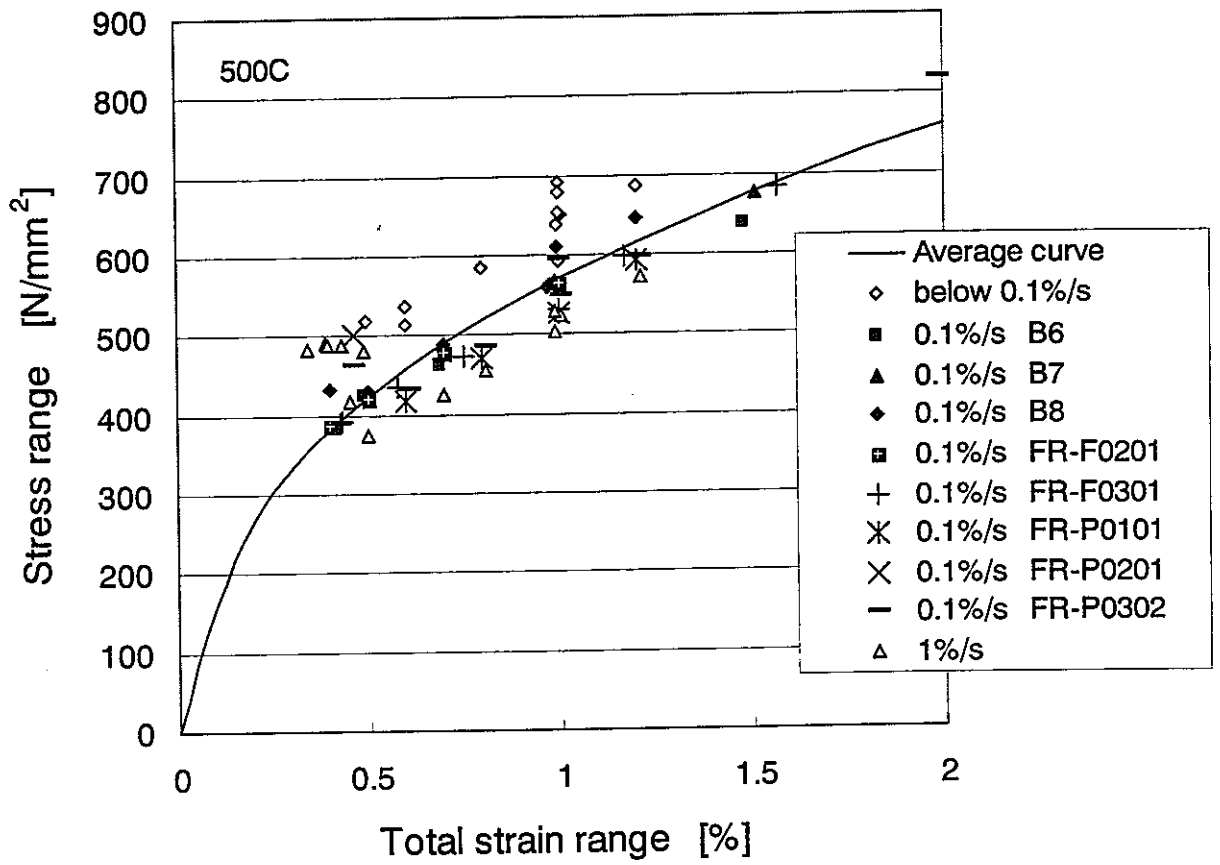


Fig. 30 Dynamic stress-strain relationship (500 C)

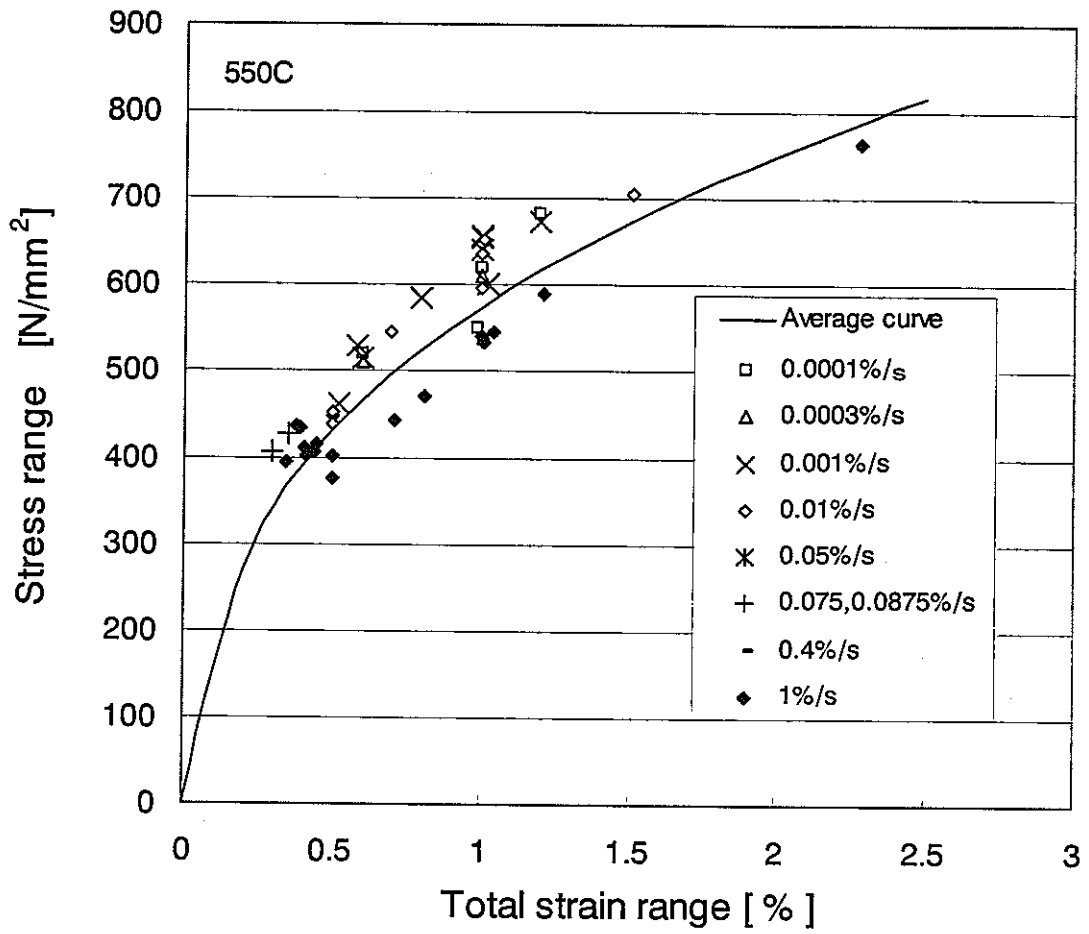


Fig. 31 Dynamic stress-strain relationship (550 C)

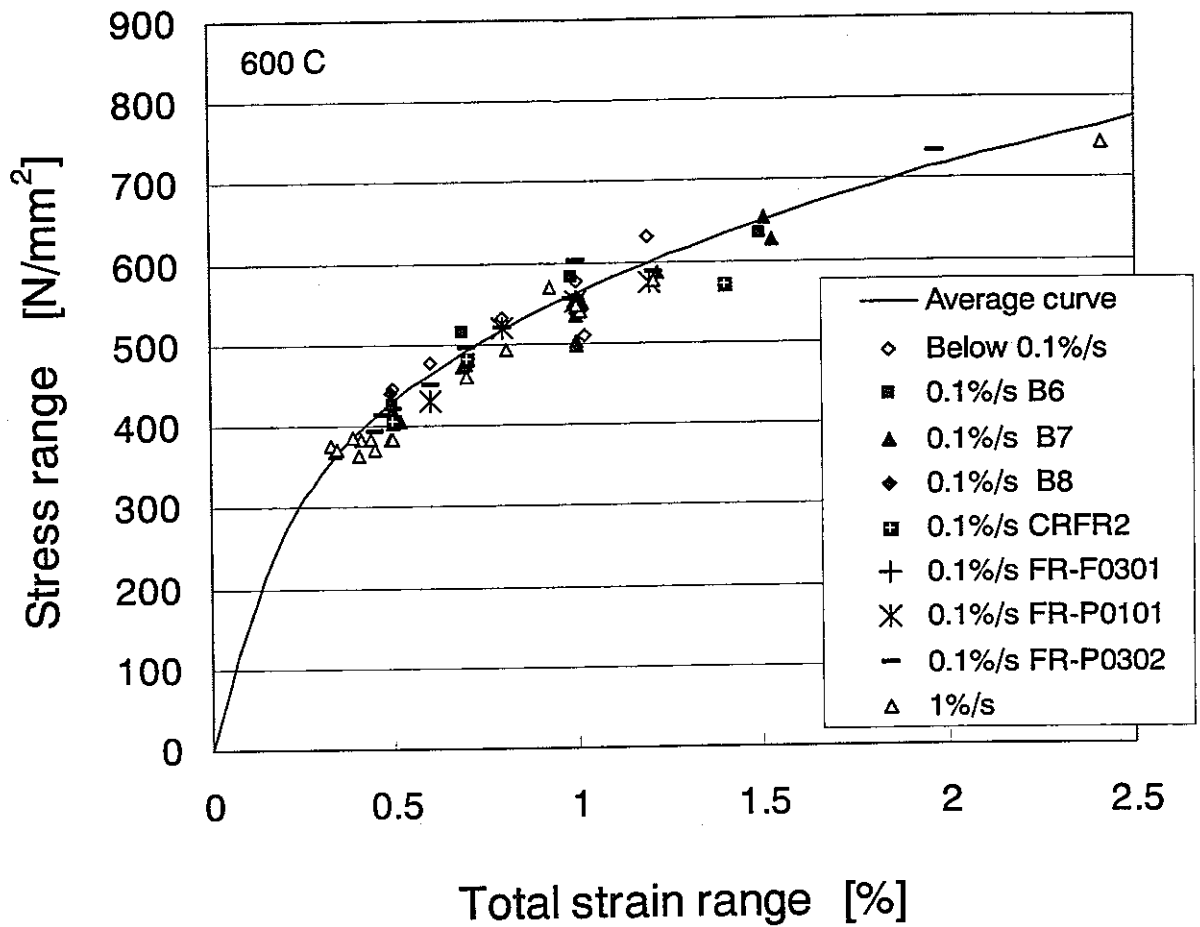


Fig. 32 Dynamic stress-strain relationship (600 C)

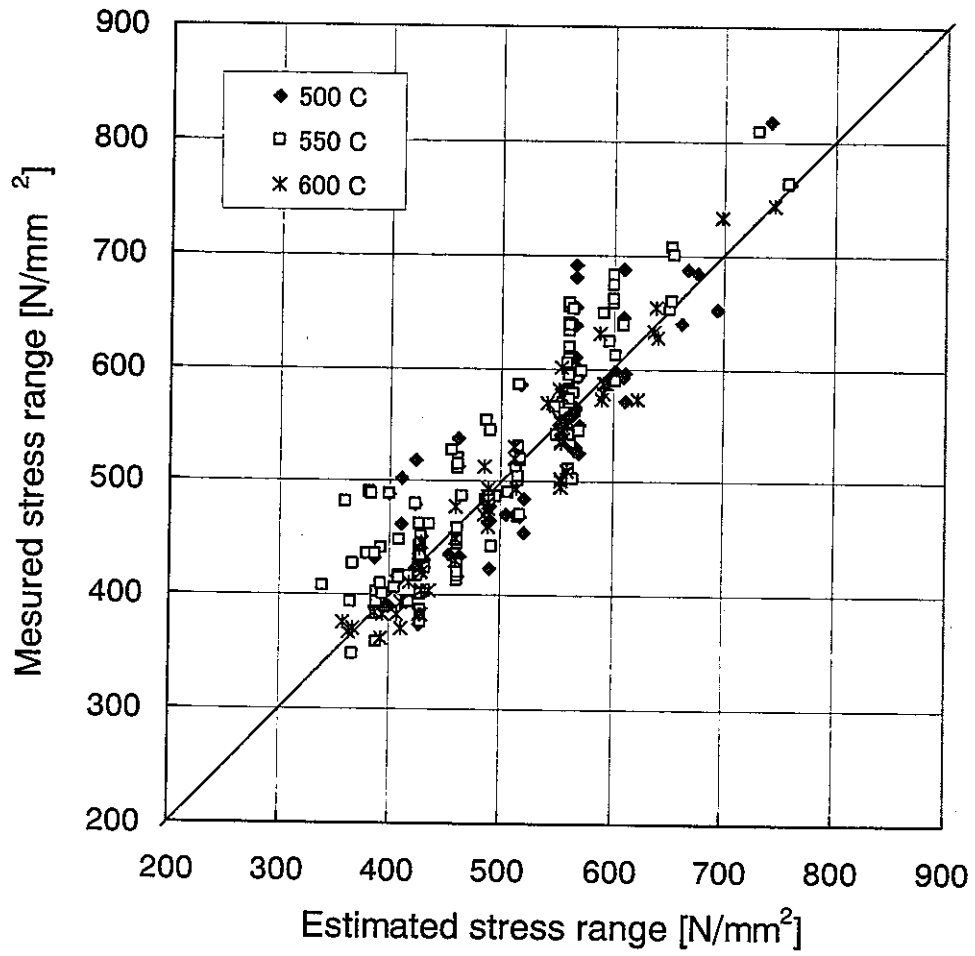


Fig. 33 Stress range (Estimated vs. Measured)

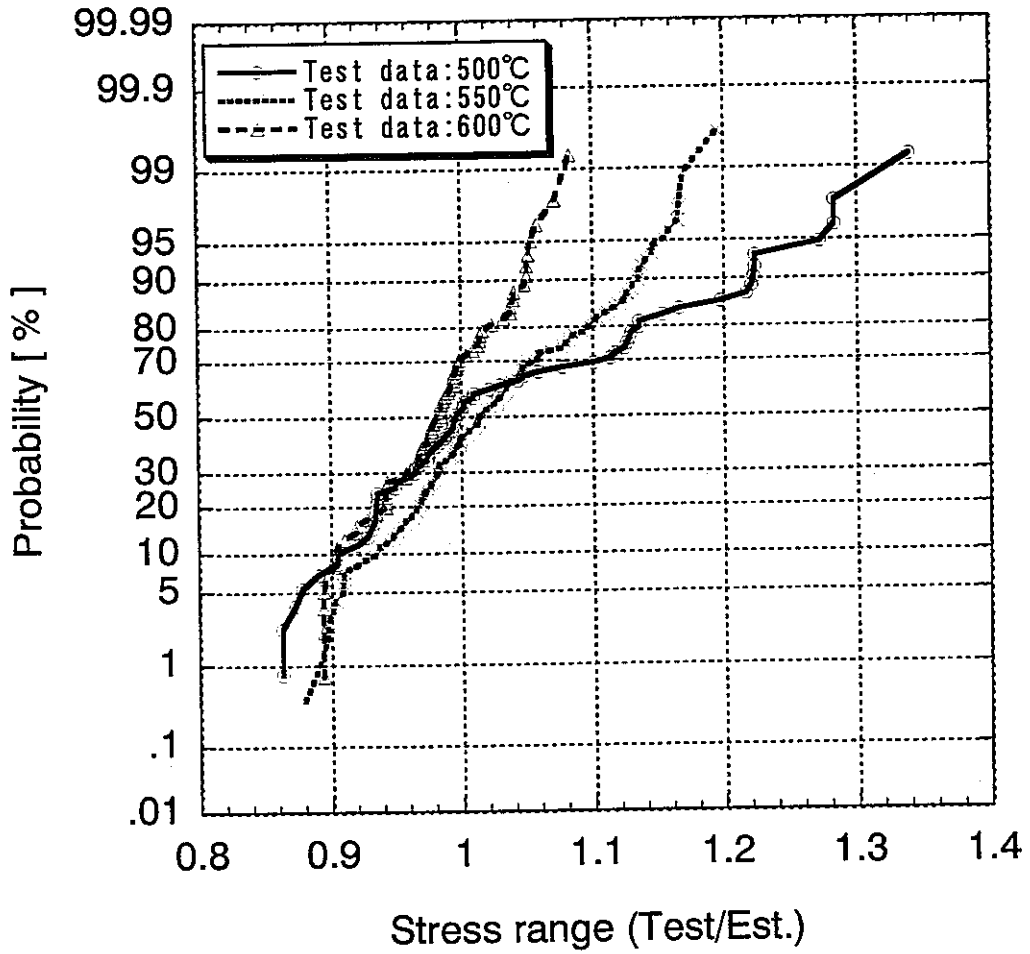


Fig. 34 Probability of stress range (500-600C)

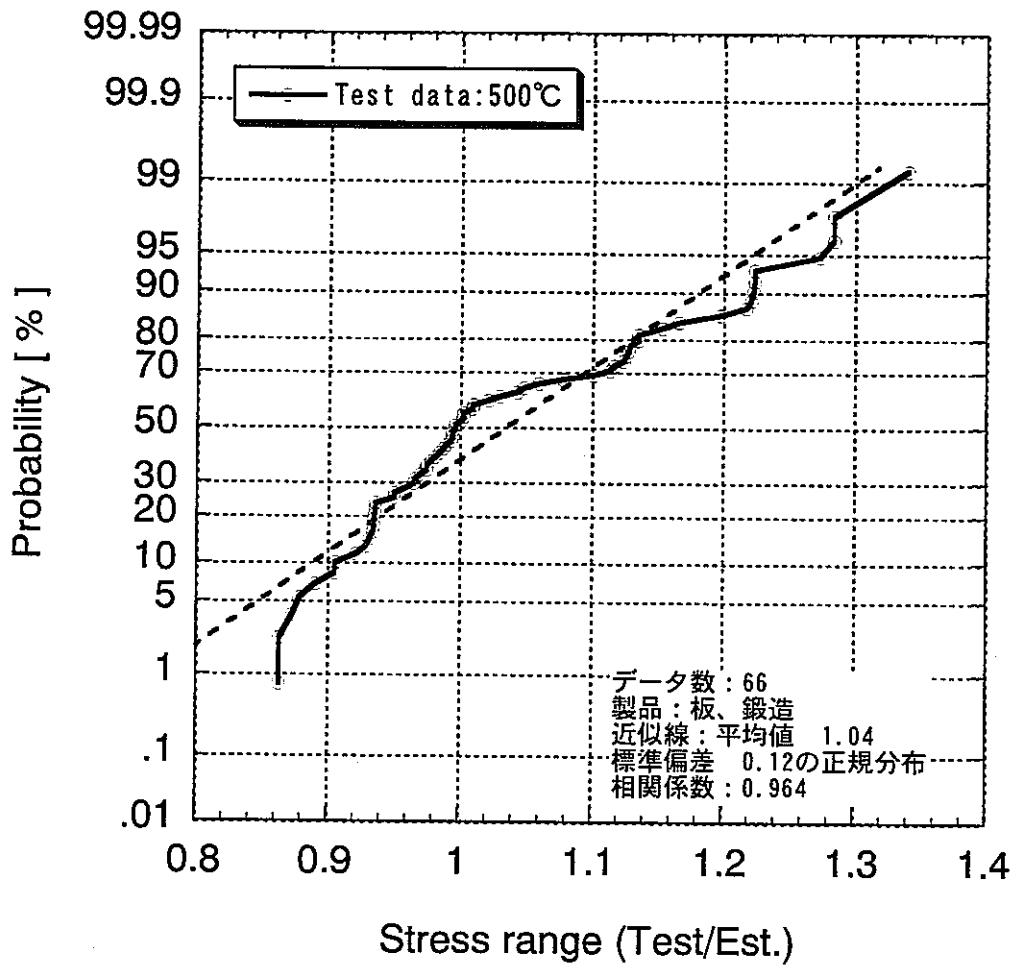


Fig. 35 Probability of stress range (500C)

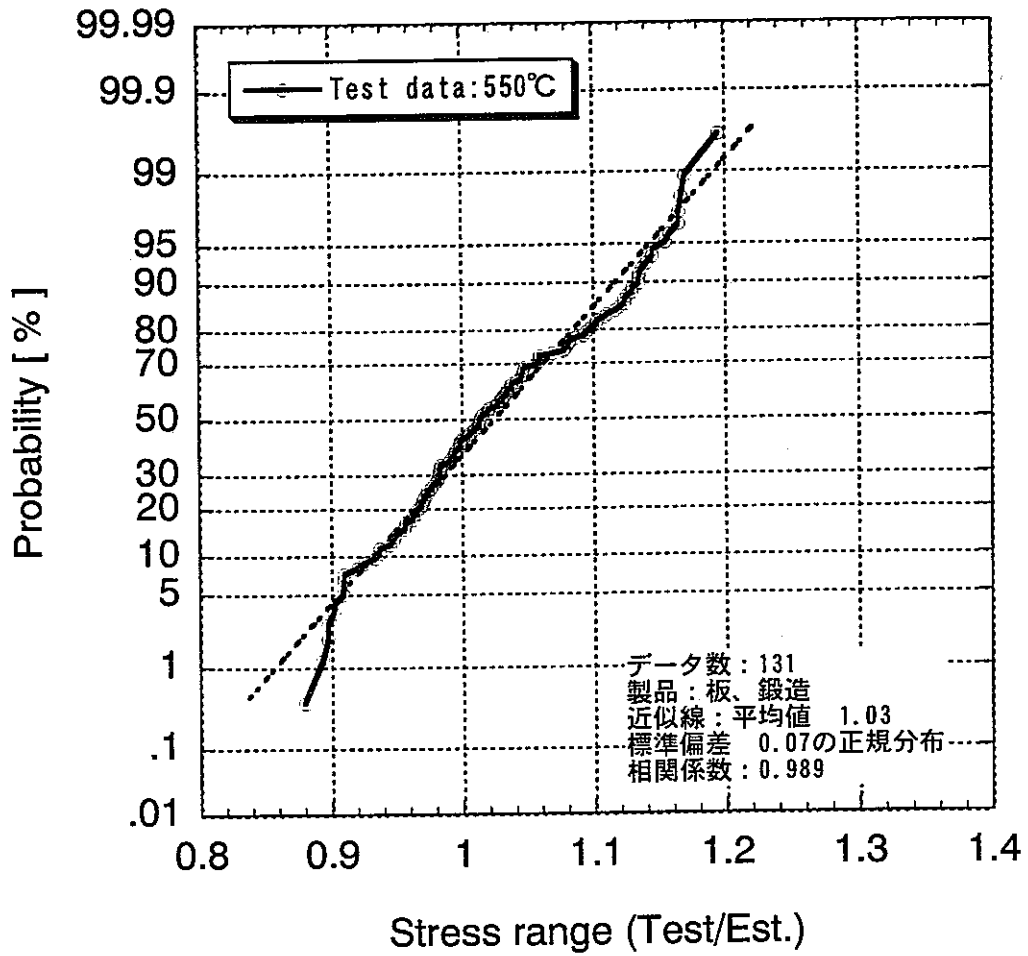


Fig. 36 Probability of stress range (550C)

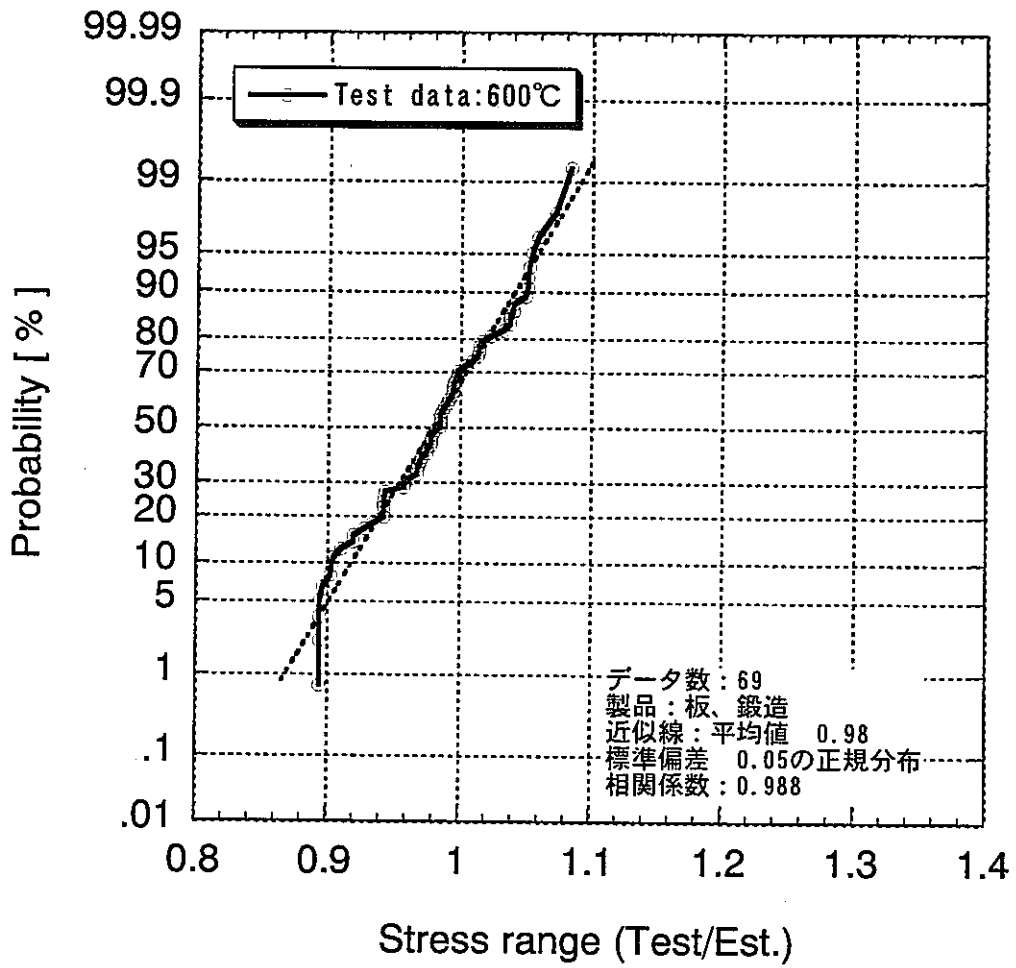


Fig. 37 Probability of stress range (600C)

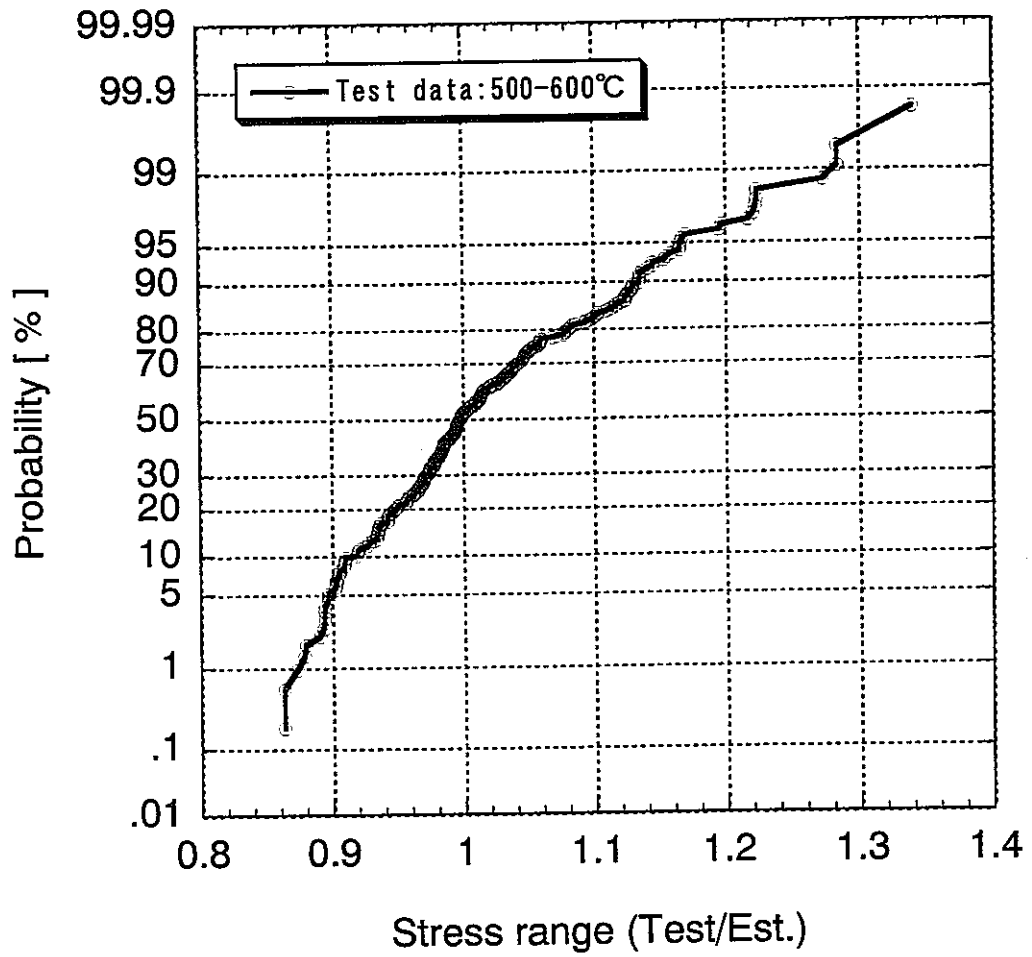


Fig.38 Probability of stress range (500-600C)

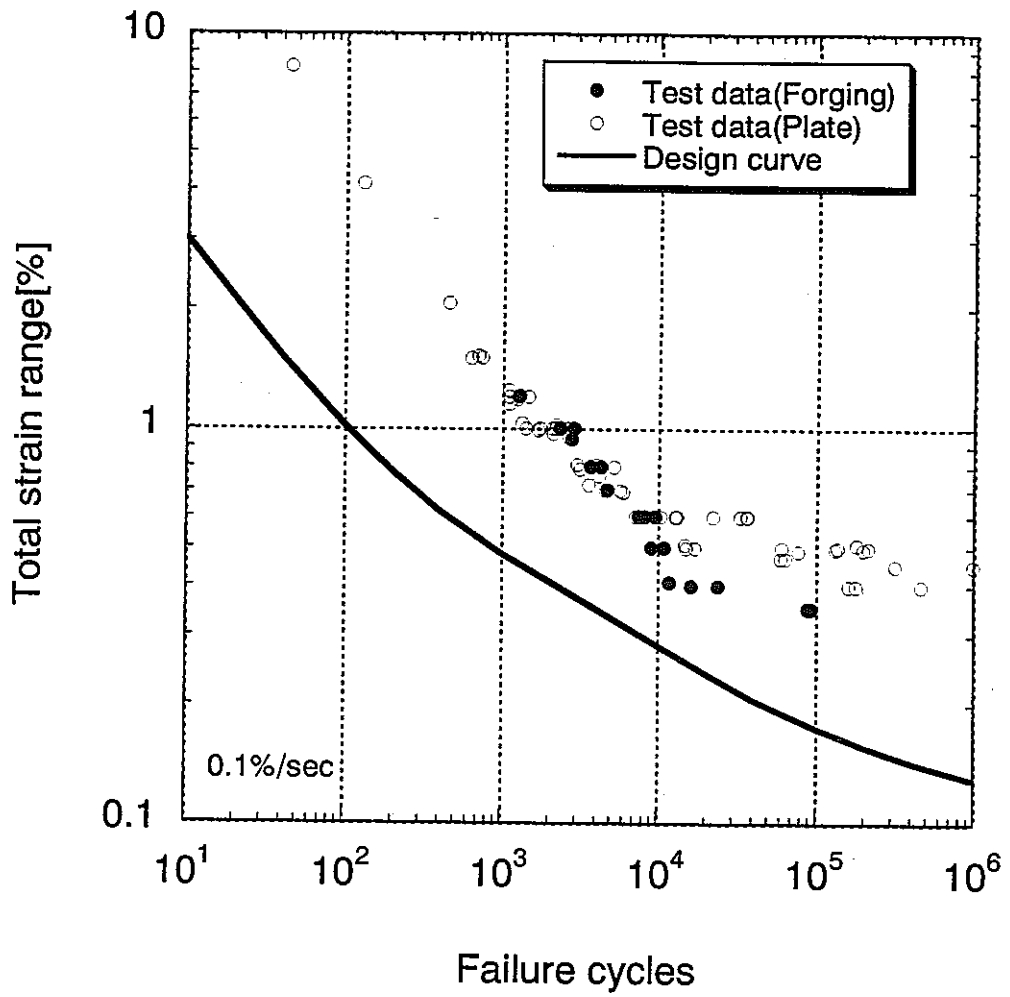


Fig.39 Fatigue tests result (550C)

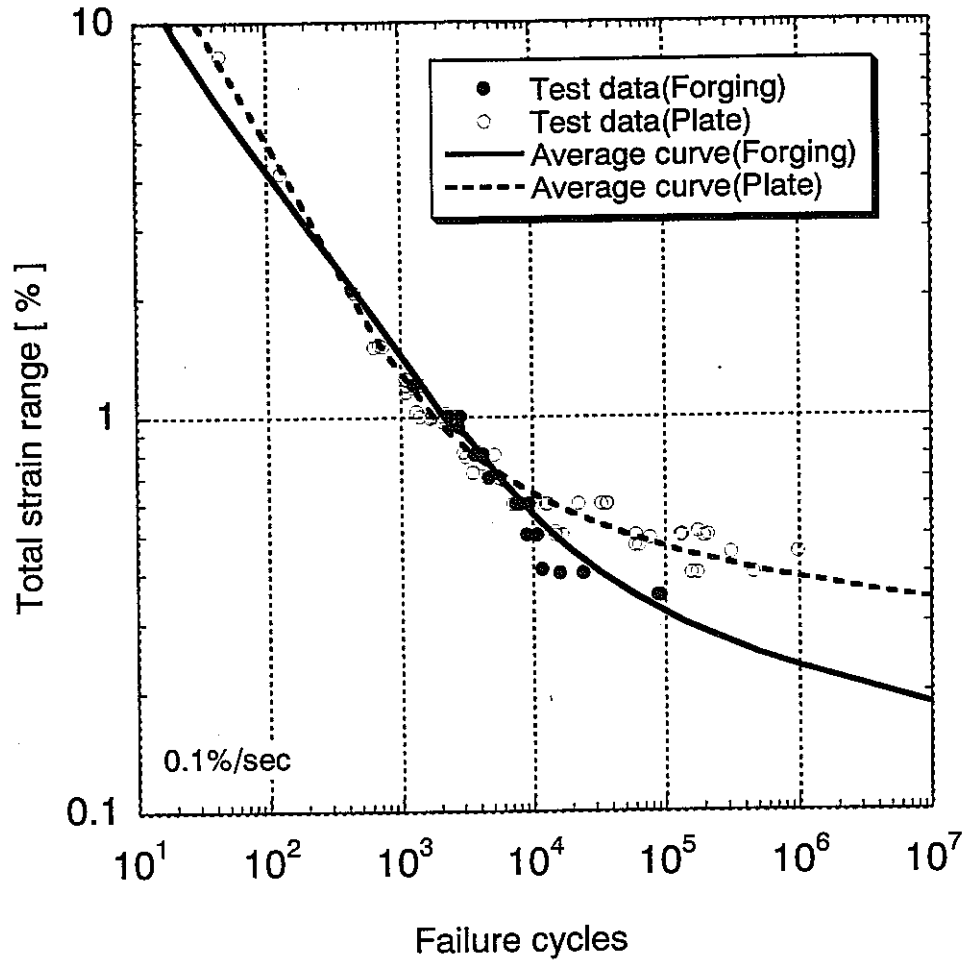


Fig.40 Fatigue average curves (550C)

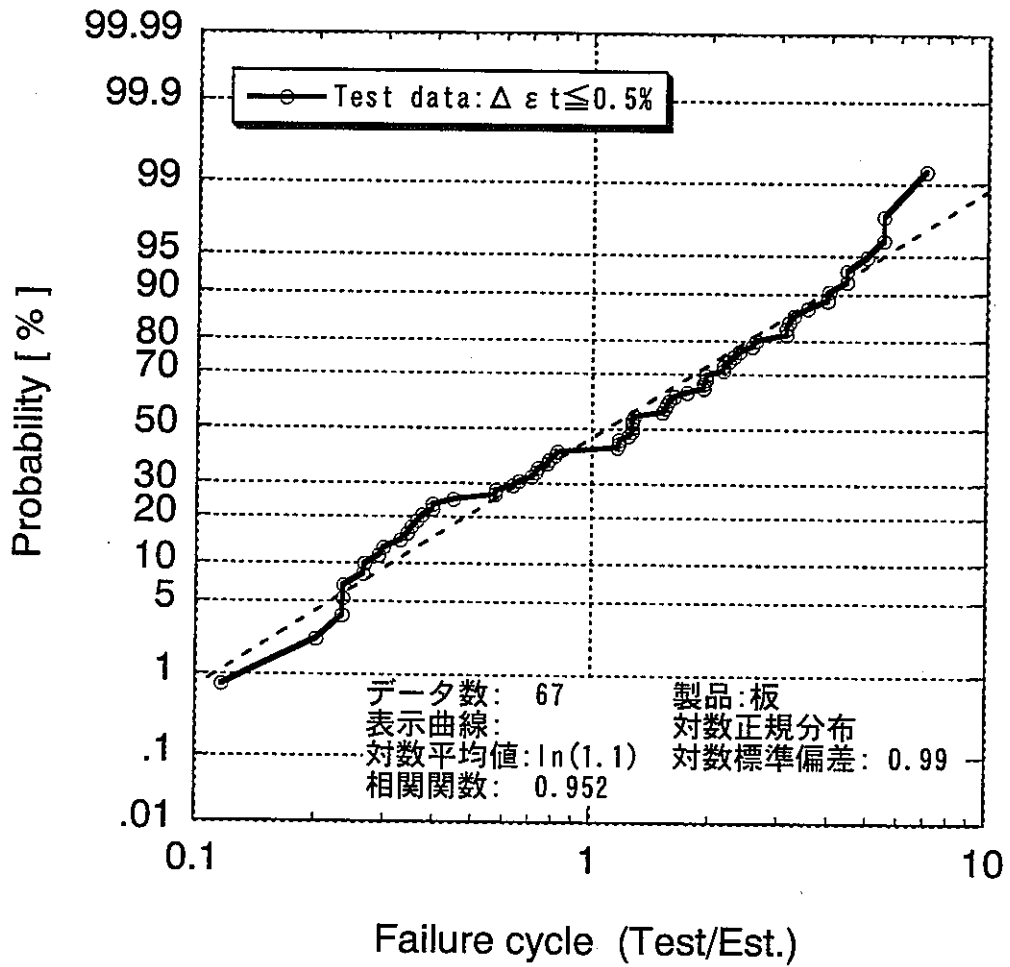


Fig.41 Probability of failure cycle (Plate: $\Delta \epsilon t \leq 0.5\%$)

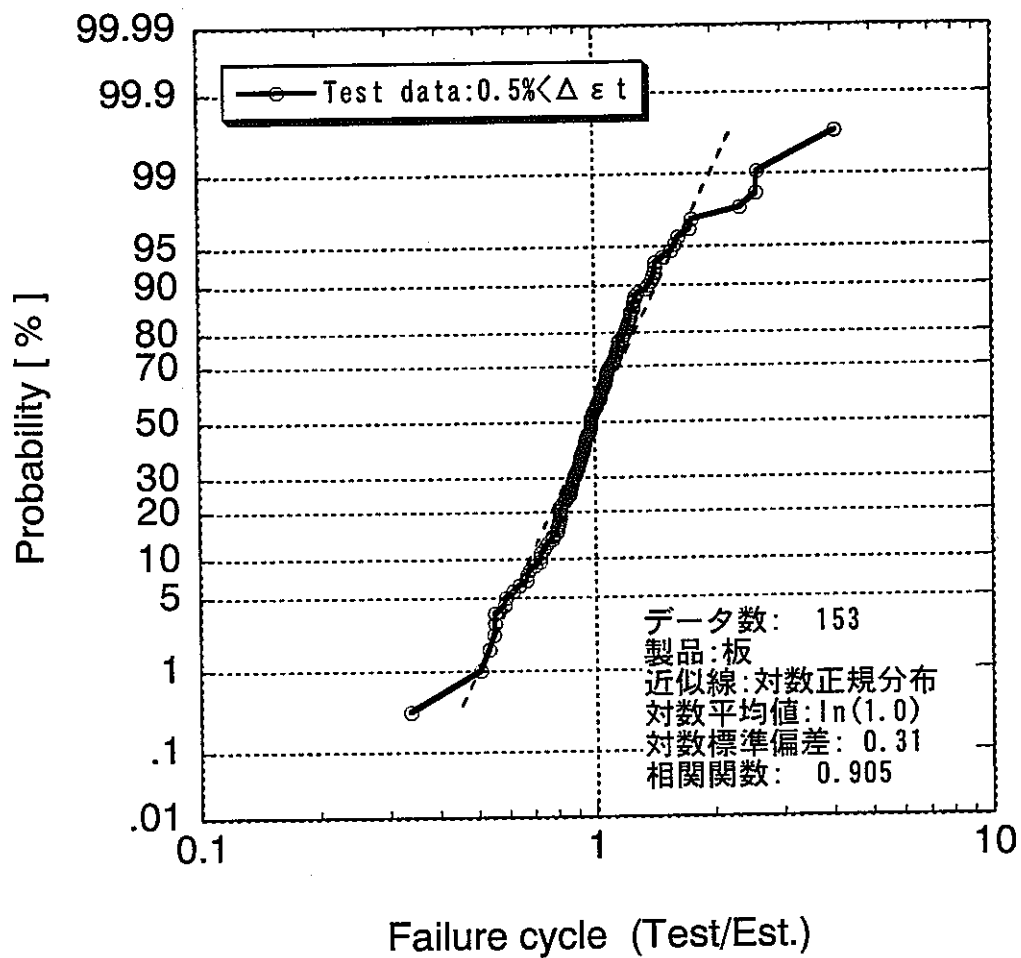


Fig.42 Probability of failure cycle (Plate: $0.5\% < \Delta \epsilon_t$)

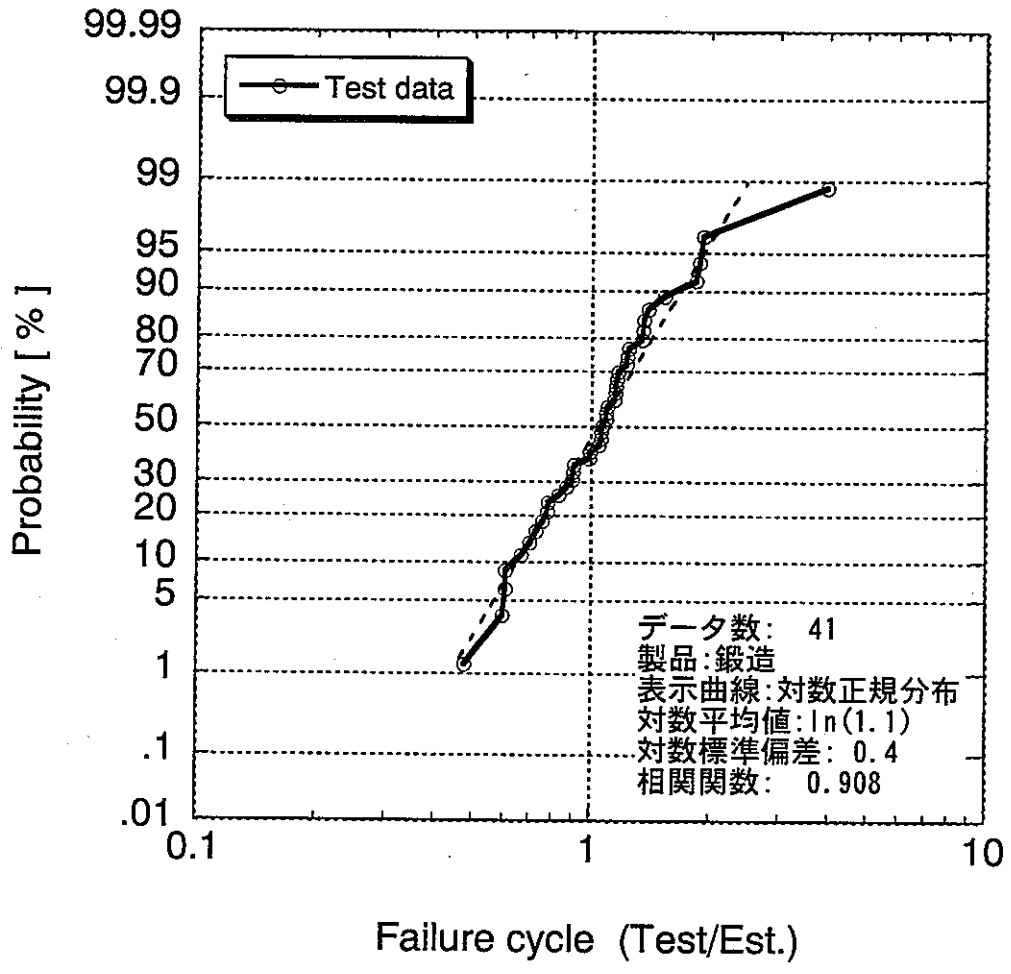


Fig.43 Probability of failure cycle (Forging)

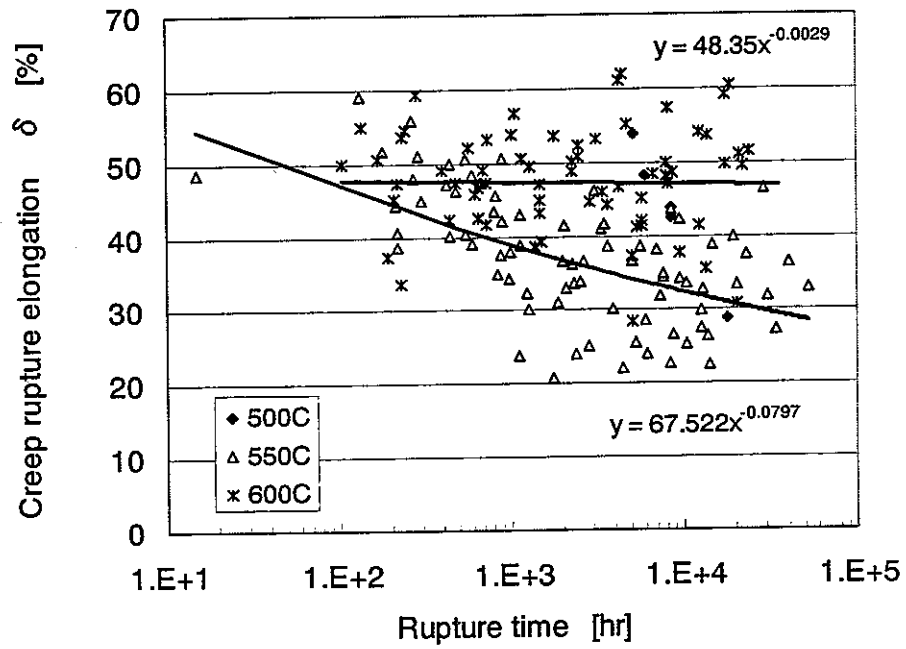


Fig.44 Creep rupture elongation

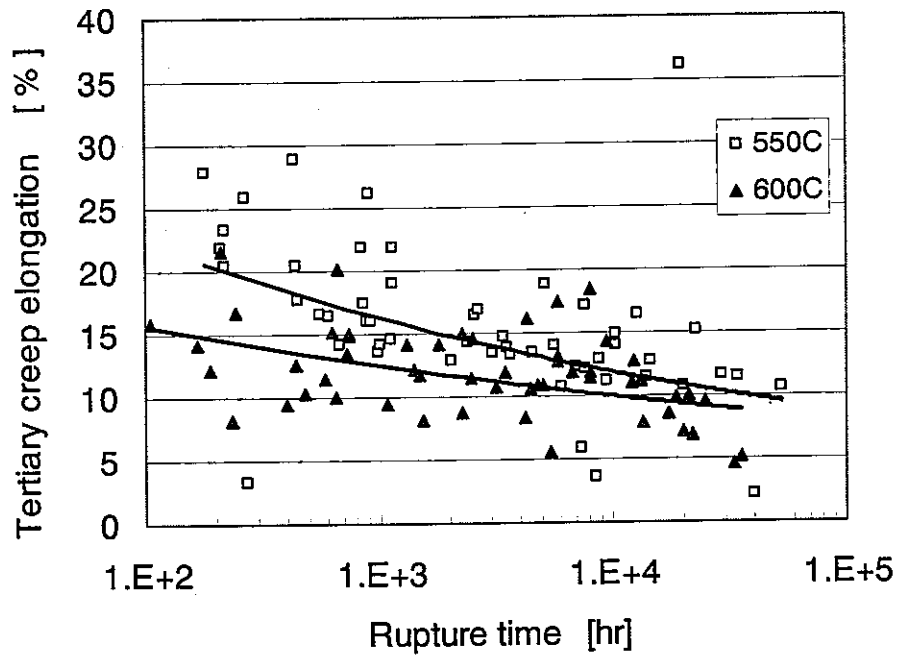


Fig.45 Tertiary creep rupture elongation

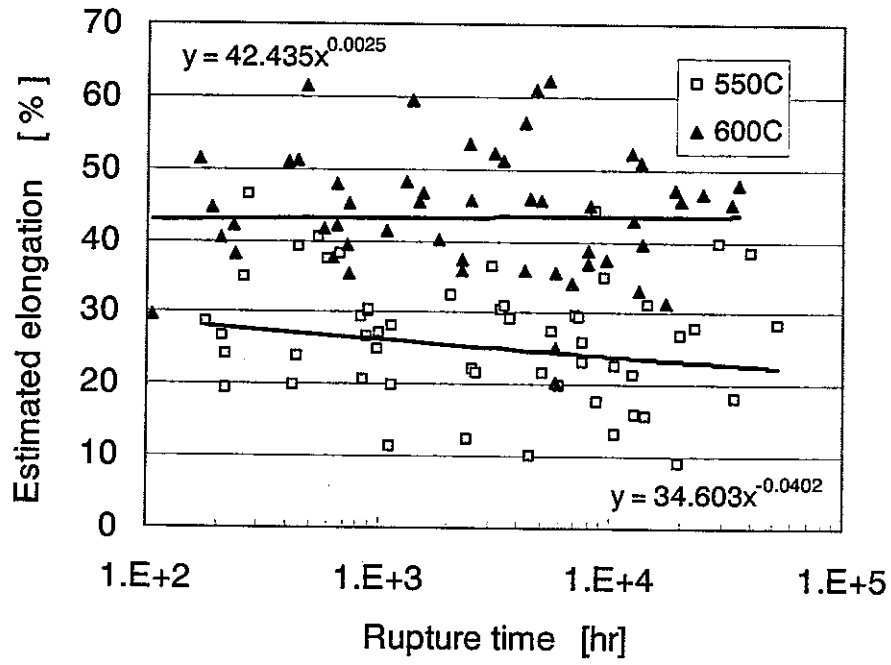


Fig.46 Revised rupture elongation

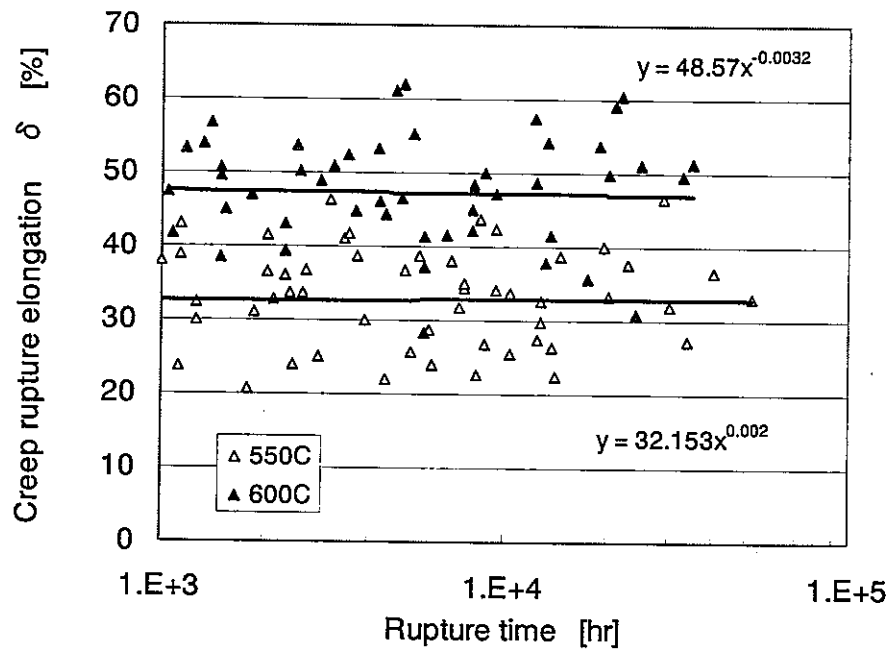


Fig.47 Creep rupture elongation 2

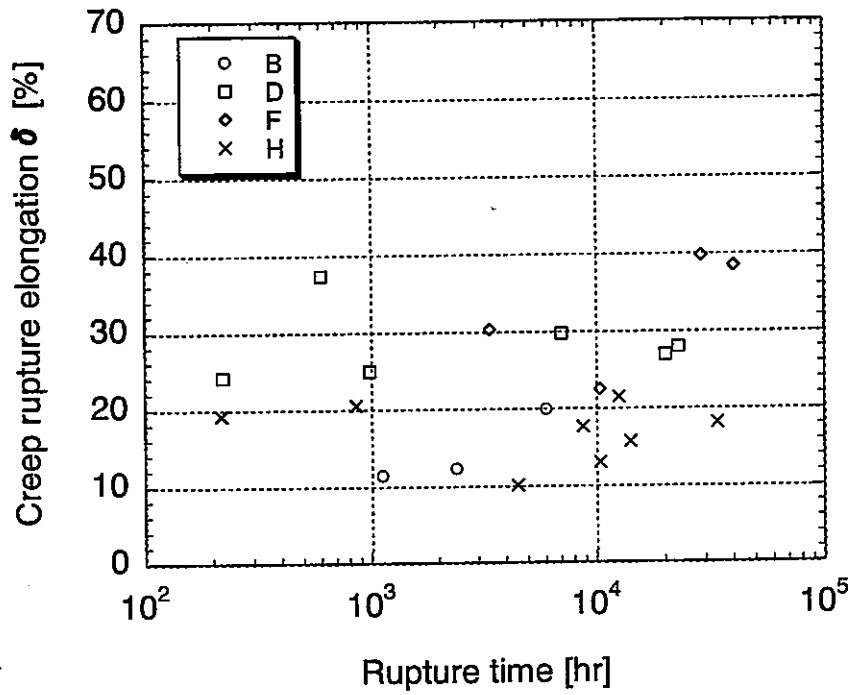


Fig.48 Creep rupture elongation – Heats A

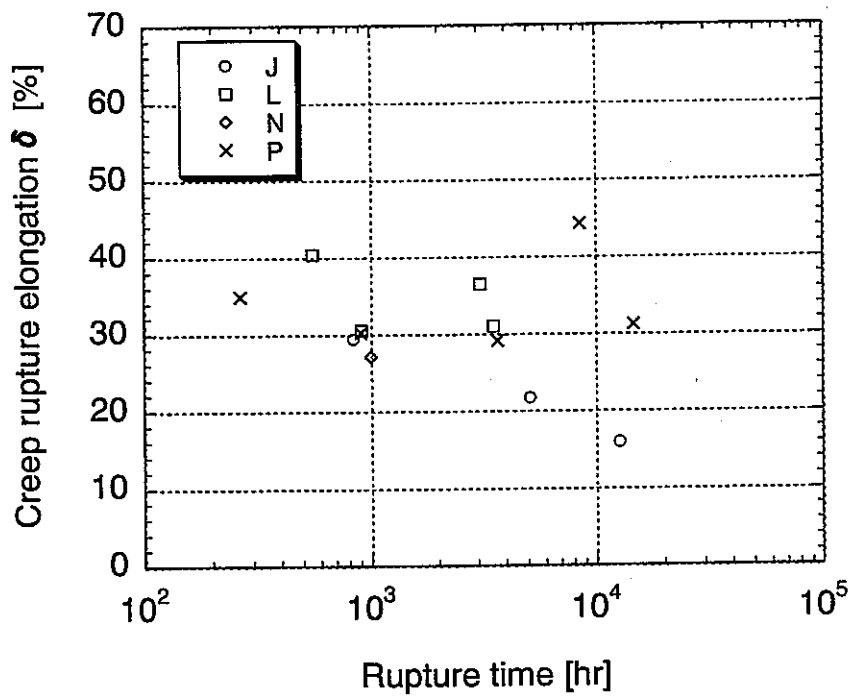


Fig.49 Creep rupture elongation – Heats B

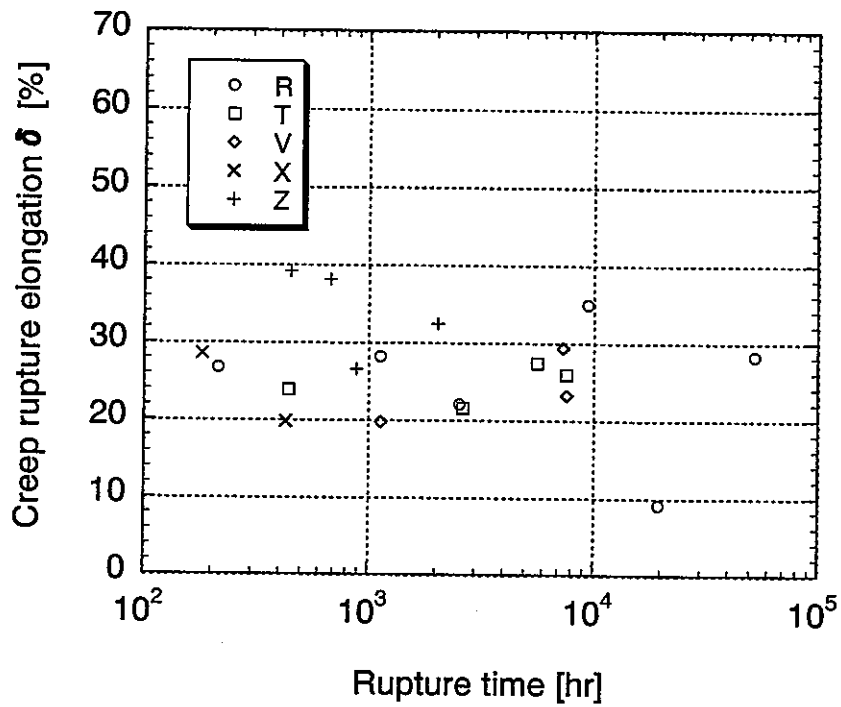


Fig.50 Creep rupture elongation – Heats C

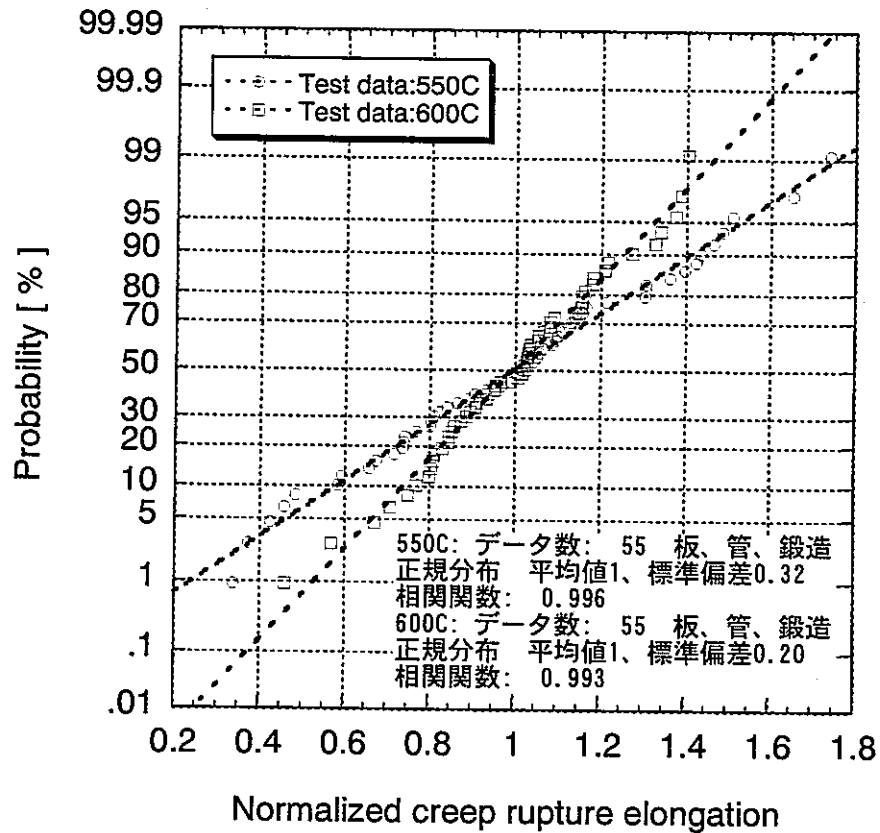


Fig.51 Probability of normalized creep rupture elongation

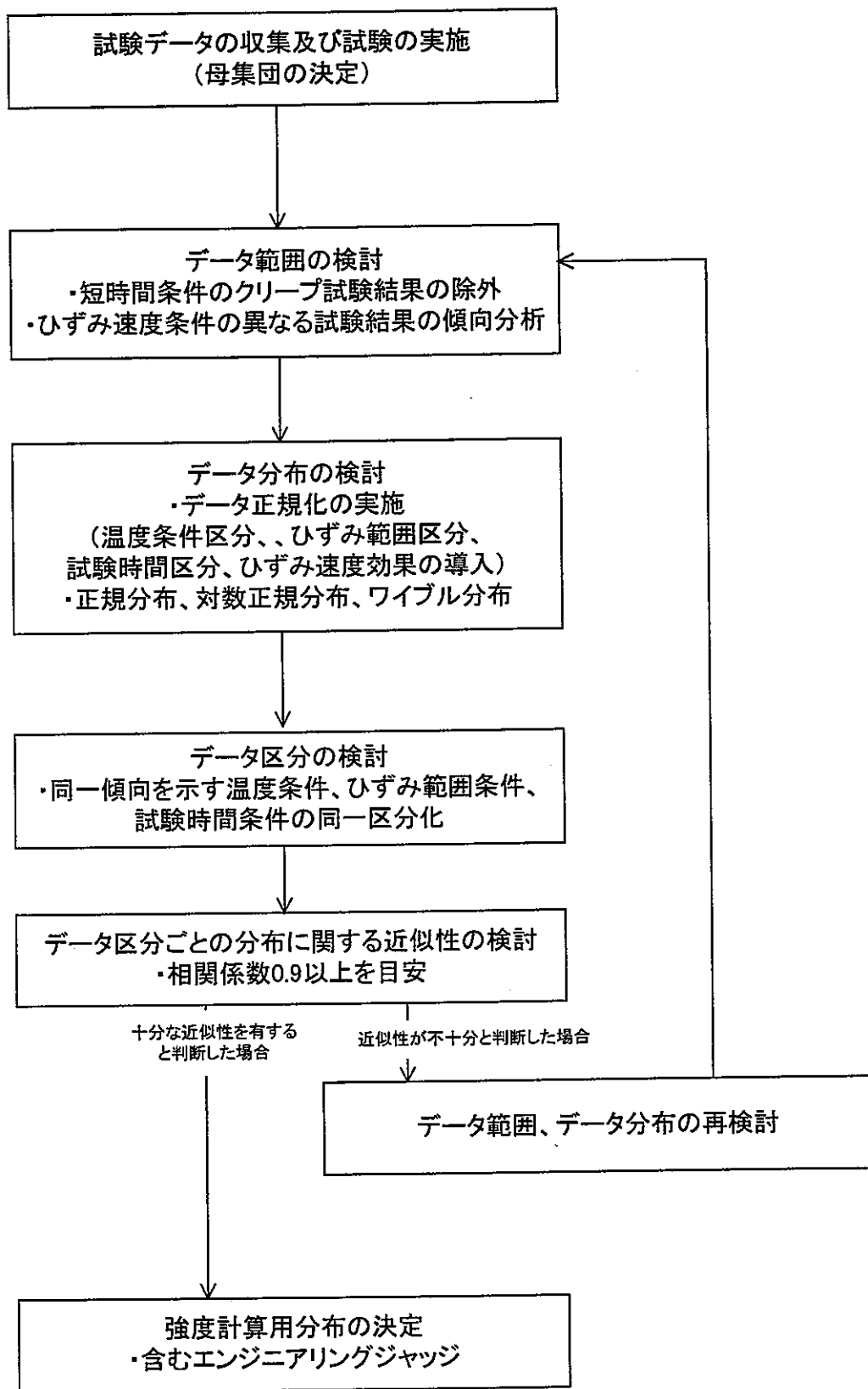


Fig. 52 Procedure of distribution-decision