

高温クリープ, 疲労, クリープ・疲労重畳条件下での き裂発生, 伝ば, 破壊各寿命特性*

横堀 寿光**, 横堀 武夫***, 栗山 卓****

Characterization for Crack Initiation Life, Propagation Life and Total Fracture Life, Respectively under High Temperature Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Conditions

by Toshimitsu YOKOBORI, Takeo YOKOBORI, and Takashi KURIYAMA

Characterization has been made of crack initiation life, propagation life and total life, respectively, under high temperature creep, fatigue and creep-fatigue interaction conditions for notched specimens of SUS 304 stainless steel. The main results are: (1) The equation for crack propagation life are derived. (2) Crack propagation life is well in accord with the thermal activation equation. (3) Crack propagation life and total life of the notched specimen are well characterized by the temperature-time equivalent parameter $T(\ln t + C)$ which looks like the Larson-Miller parameter in the case of the rupture life of the smooth specimen. (4) For prediction of the remaining life in the crack initiation stage, a new method is proposed by using relative notch opening displacement (RNOD).

Key Words: Fatigue, Equation for Crack Propagation Life, Temperature-Time Equivalent Parameter, Crack Initiation Life, Relative Notch Opening Displacement

1. 緒 言

高温クリープ, 疲労, クリープ・疲労重畳条件下での破壊に対する設計基準ないし寿命則としては, き裂の発生を尺度とすべきか, ないし, その後の伝ば寿命を加算した全寿命あるいはその一定の割合の寿命を尺度とすべきかなどは当該機器の種別や用途などの観点から決めるべきと考えられる。しかも, き裂発生寿命がその後の寿命すなわち伝ば寿命に比して無視できない場合には上述のいずれの観点からも, 発生寿命と伝ば寿命のそれぞれを支配する法則を明確にしておくことがとくに必要である。ところで, 従来, 発生寿命と伝ば寿命のそれぞれについての法則をしらべた結果は数少ない⁽¹⁾。

そこで本研究では SUS 304 ステンレス鋼について高温クリープ, 疲労, クリープ・疲労重畳条件下での切欠き材におけるき裂発生寿命, 伝ば寿命, および全寿命のキャラクタリゼーションを行った。さらに, き裂伝ば寿命および全寿命については構成方程式を導

き, 温度・寿命等価パラメータを提案した。さらにき裂発生寿命については測定容易なパラメータによる予測・評価方法を提案した。これらの式は, いずれも実験結果とよく一致することをしめした。

2. 材料, 実験装置および方法

供試材は 1050°C にて溶体化処理された SUS 304 ステンレス鋼であり, その化学成分および機械的性質は前報⁽²⁾におけると同じである。試験片は試験軸方向を圧延方向と一致させ, 平行部両側に 30°V 形切欠きを付けた試験片 (DEN) と試験片中央部に直径 0.5 mm の丸穴をあけた中央円形切欠き試験片 (CN) とを用いた。形状・寸法は前報と同じである⁽²⁾。

試験機は前報と同じで, 1.3 MPa の真空中にて試験を行った。き裂の発生およびその長さの測定は倍率 100 倍の顕微鏡にて運転を中止することなく任意の時刻に測定した⁽²⁾。試験片の温度はその切欠き近傍に取付けた熱電対にて連続的にモニタリングを行った。負荷応力波は台形波とし, 一定負荷保持時間 $t_H = 0 \sim \infty$ まで変えた⁽²⁾。 $t_H = 0$ における負荷周波数は 40 cpm とした。負荷形式は引張形式とし, 最小応力 $\sigma_{\min} = 0$, 最高引張応力 σ_{\max} としては 177 MPa から 205 MPa の範囲でパラメータとした。温度はそれぞれ, 600, 650

* 昭和 61 年 4 月 3 日 第 63 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 10 月 29 日。

** 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

*** 正員, 工学院大学 (〒982 仙台市青山 1-31-15)。

**** 正員, 東北大学大学院。

°C および 700°C とし、温度変動は ±1°C 以内に保持した。切欠き底から長さ 5 μm のき裂が観察されはじめた時期をもってき裂発生時期とした。き裂の長さとしては、試験片の両側におけるき裂長さの平均値を用いた。

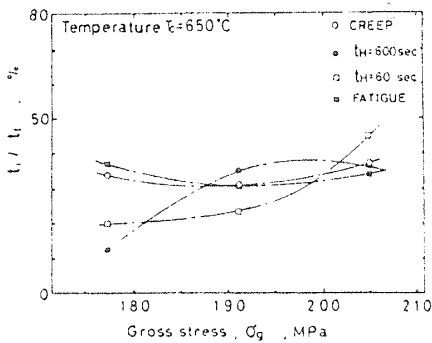
3. 実験結果、解析、考察

3・1 き裂発生寿命 き裂発生寿命 t_i の全寿命 t_f に対する比 (いずれも時間で表した) を公称応力 σ_g および温度に対してプロットするとそれぞれ図 1 (a) および (b) のようになる。図 1 からわかるように t_i/t_f の値は 30~50% になっており、発生寿命は全寿命に対して無視することはできないことがわかる。

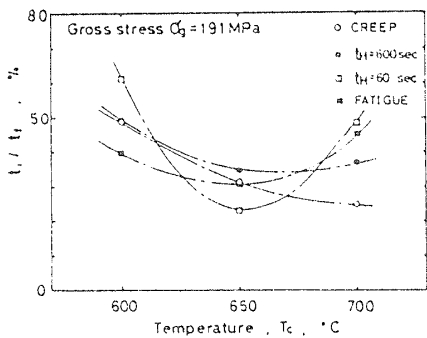
3・2 応力保持時間 t_H の影響 時間で表したき裂発生寿命 t_i 、伝ば寿命 t_p および全寿命 t_f をクリープ条件下でのそれぞれの寿命 t_{ic} 、 t_{pc} および t_{fc} に対する比として、応力保持時間 t_H に対してプロットすると図 2 (a)、(b) および (c) のようになる。図 2 (a)、(b) および (c) から t_H の短い、すなわち、疲労に近い条件下では各寿命の比は温度の増すほど増加する。この傾向は、き裂発生寿命においては、き裂伝ば寿命におけるよりも著しい。

3・3 累積寿命則 時間で表した寿命比と繰返し

数で表した寿命比を横軸を対数であらわした片対数でプロットすると図 3 (a)、(b) および (c) のようになる。ここで t_i 、 t_p および t_f はそれぞれき裂発生までの保持時間の総和、き裂伝ば期間における保持時間の総和および最終破壊までの保持時間の総和を表している。縦軸には、これら t_i 、 t_p および t_f の値をクリープ条件下でのき裂発生寿命 t_{ic} 、伝ば寿命 t_{pc} および全寿命 t_{fc} に対する比としてプロットした。また、 N_i 、 N_p および N_f はそれぞれき裂発生寿命、伝ば寿命および全寿命 (いずれも繰返し数で表した) を表す。横軸に

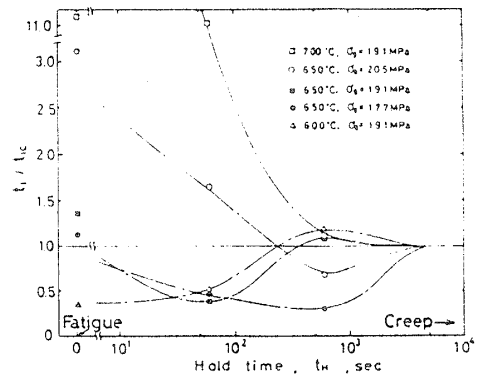


(a) き裂発生寿命割合 t_i/t_f と応力 σ_g

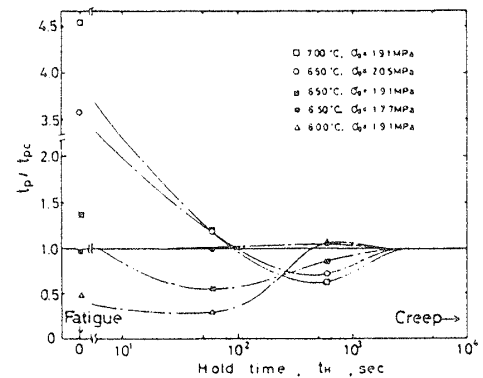


(b) き裂発生寿命割合 t_i/t_f と温度 T_c [°C]

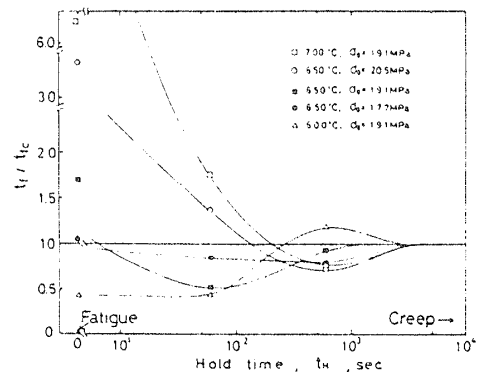
図 1



(a) き裂発生寿命 t_i と保持時間 t_H



(b) き裂伝ば寿命 t_p と保持時間 t_H



(c) 全寿命 t_f と保持時間 t_H

図 2

は、これら N_i , N_p および N_f の値を疲労だけの条件下でのき裂発生寿命 N_{if} , 伝ば寿命 N_{pf} および全寿命 N_{ff} に対する比としてプロットした。図 5 (a), (b) および (c) から、き裂発生寿命は、ばらつきが大きくなり、データは線形則から著しく偏りしていることがわかる。しかし、伝ば寿命のほうは線形則にはしたがわれないが、ばらつきはそれほど大きくはない。すなわち、き裂発生寿命のほうは伝ば寿命よりも、クリープ・疲労の相互作用に敏感であることがわかる。そして、全寿命は、発生寿命と伝ば寿命の平均的傾向をしめしている。図 6 には発生寿命の場合の例として $t_i/t_c - N_i/N_{if}$ の関係を線形座標でプロットした。クリープ条件の優勢な領域では曲線は線形則よりも著しく上方に存在する。

3.4 き裂発生寿命、伝ば寿命および全寿命の温度依存性 き裂発生寿命 t_i , 伝ば寿命 t_p および全寿命 t_f のそれぞれの逆数の対数を縦軸に、絶対温度の逆数を横軸にとってデータをプロットすると図 5 (a), (b) および (c) のようになる。図 5 (b) からわかるように $1/t_p \propto \exp(-Q/RT)$, すなわち Arrhenius 形の式にしたがっている。すなわち、伝ば寿命は熱活性化過程にしたがっていることがわかる。この図の直線の傾斜は活性化エネルギーに相当することになるが、図 5 (b) からわかるように、クリープ条件から、疲労が重畳して疲労条件へと条件が遷移するにつれて、活性化エネルギーの値が次第に減少していく。この特性は、この場合のき裂伝ば速度 da/dt 特性⁽³⁾と同様である。他方、図 5 (a) からわかるように、 t_i のほうはクリープ優勢の条件下でのみ Arrhenius 形の式にしたがいが、保持時間 t_H の短い、例えば疲労優勢の条件下ではこの式にしたがわれない。他方、図 5 (c) からわかるよう

に、全寿命のほうは Arrhenius の式にしたがっている。このことは全寿命が発生寿命と伝ば寿命の中間的様相をもつためと考えられる。

3.5 き裂伝ば寿命のパラメータ表示 高温クリープ、疲労、およびクリープ・疲労重畳条件での第 II 領域 (指数則関係の成り立つ領域) におけるき裂伝ば速度は次の式 (1)⁽³⁾ で表される。この式は、実験結果ときわめてよく一致する。

$$\frac{da}{dt} = B_i \sigma_g^m (\alpha \sqrt{a} \sigma_g)^n \exp \left[- \left\{ \Delta f_1 - \Delta f_2 \ln \left(\frac{\alpha \sqrt{a} \sigma_g}{G \sqrt{b}} \right) \right\} / RT \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで a_0 = 切欠き長さ, a^* = 実際のき裂の長さ, $a = a_0 + a^*$, G = 剛性率, b = バーガースベクトル, R = ガス定数, および

$$\alpha = 1.98 + 0.36(a/W) = 2.12(a/W)^2 + 3.42(a/W)^3 \dots \dots \dots (2)$$

B_i , m , n , Δf_1 および Δf_2 はそれぞれ t_H の関数であり、表 1 にしめす。式 (1) は書き換えると式 (3) となる。

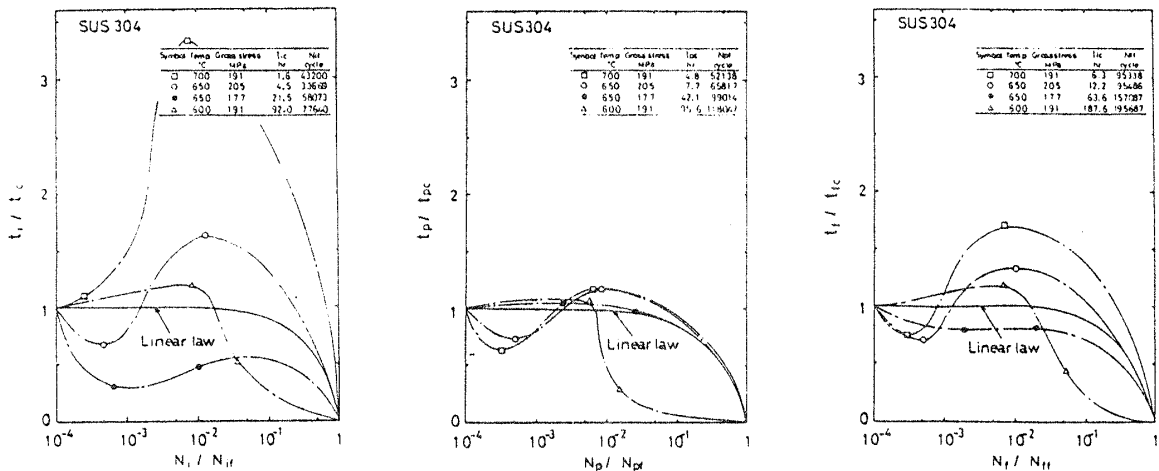
$$\frac{da}{dt} = B_i (G \sqrt{b})^n e^{-\Delta f_1/RT} \sigma_g^m \left(\frac{\alpha \sqrt{a} \sigma_g}{G \sqrt{b}} \right)^{n + (\Delta f_2/RT)} \dots \dots \dots (3)$$

a_i = 伝ば開始時のき裂長さ, a_f = 伝ば最終時のき裂長さ, とすると, $a_i/a_f < 1$. 他方、表 1 から

$$\frac{1}{2} \left(n + \frac{\Delta f_2}{RT} \right) > 1, \text{したがって} \left(\frac{a_i}{a_f} \right)^{(n + (\Delta f_2/RT))/2} \ll 1 \dots \dots \dots (4)$$

式 (3) を積分して、式 (4) の条件を用いると、次式を得る。

$$T \left[\ln t_p + \ln \frac{B_i}{a_i} + \ln \left\{ \frac{1}{2} \left(n + \frac{\Delta f_2}{RT} \right) - 1 \right\} \right]$$



(a) き裂発生寿命における累積損傷 (b) き裂伝ば寿命における累積損傷 (c) 全寿命における累積損傷

図 3 片対数座標表示

$$+\ln\{(\alpha\sqrt{a_i}\sigma_g)^n\sigma_g^m\} = \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2 \ln\left(\frac{\alpha\sqrt{a_i}\sigma_g}{G\sqrt{b}}\right)}{R} \dots\dots\dots(5)$$

式(5)は次の式(6)の形に書き表される。

$$T(\ln t_p + C) = \frac{Q(\sigma_g, a_i)}{R} \dots\dots\dots(6)$$

ここでC=式(5)の左辺の括弧内の第2項、第3項、第4項の和、この第4項が第2項と第3項の和に比して小さい場合には、Cの値は σ_g の値によってあまり影響されない。式(6)左辺のパラメータ $T(\ln t_p + C)$ は温度・寿命換算ないし温度、寿命等価パラメータと言える。なお、平滑材の高温破壊寿命に対しては、

Larson-Miller パラメータ⁽⁴⁾が提案されており、実験データの整理に有効に用いられているが、本提案のパラメータは切欠き材について、き裂伝ば寿命に関するものである点で従来存在しなかったものである。式(6)は任意の保持時間をもつ場合に提案したものであり、各々の場合にCおよびQの値がちがってくるだけである。ここでは、クリープ伝ば寿命の場合を例にとる。C=20ととり、横軸にパラメータ $T(\log t_p + C)$ をとって、本実験データをプロットすると図6(b)のようになり、実験データは、本パラメータによって、よく整理・表示できることがわかる。なお、図6(b)の中に更に試片形状の異なる中央スリット形切欠き試験片(CNS)に関する大谷らによるデータ⁽⁵⁾もプロットしてみたが、これも同一曲線上によくのっていることがわかる。

図6(b)から公称応力と温度が与えられた条件のもとでの寿命 t_p が求められる。したがって、ある時期までき裂が伝ばしたときに、それまでに要した時間がわかれば、今後の余寿命を予測・評価可能である。さらに図6(c)にしめすように、全寿命のほうも t_p の代わりに t_f を用いた温度・寿命等価パラメータ $T(\log t_f + C)$ によって評価可能であることがわかる。なお、図6(b)および(c)において $T(\log t + C)$ の大きな範囲での本パラメータの有効性については可能性が十分に考えられる。 $T(\log t + C)$ の大きいほど、クリープ優勢形の負荷条件となると考えられるからである。

他方、き裂発生寿命については、図6(a)にしめすように温度・寿命等価パラメータによって一義的に表

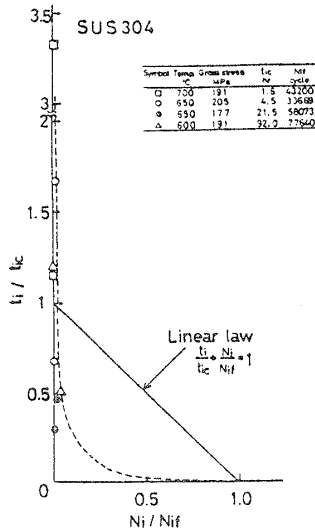
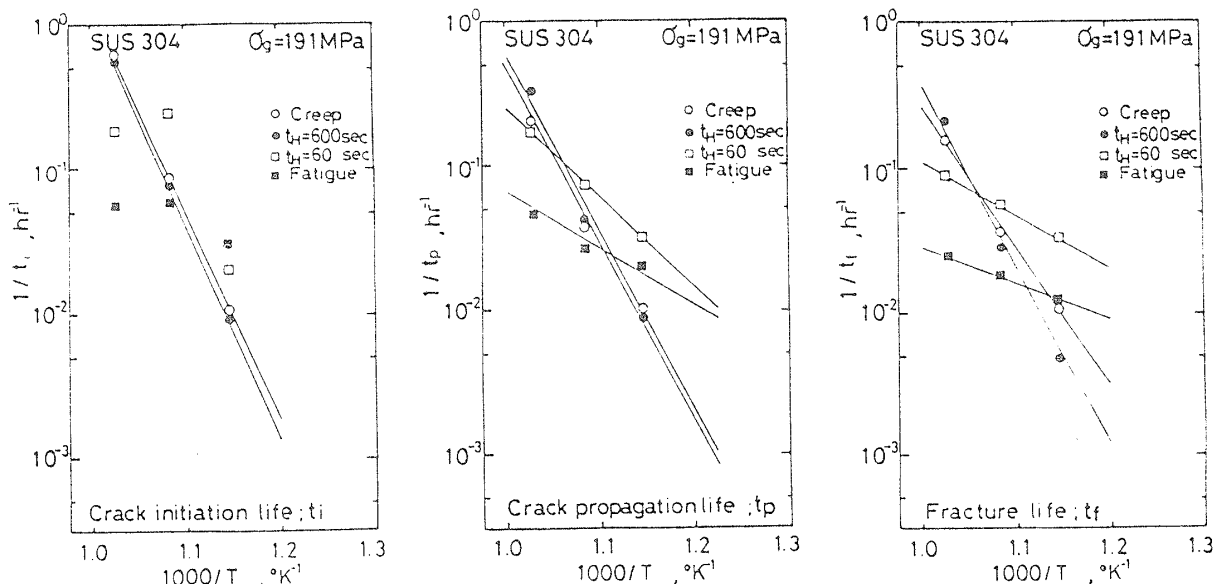


図4 き裂発生における累積損傷 (線形座標表示)



(a) き裂発生寿命の逆数 $1/t_i$ の温度依存性 (b) き裂伝ば寿命の逆数 $1/t_p$ の温度依存性 (c) 全寿命の逆数 $1/t_f$ の温度依存性

図5

すことはできないようである。この理由は図5に示めたように発生寿命のほうは、クリープ優勢の条件以外では単純な熟活性化式にしたがわないことに由来するものと考えられる。この問題については別に今後の研究が必要である。

3・6 き裂発生寿命の評価法 図2および図3に示められているように、き裂発生寿命ではばらつきが大きい。したがって、式(5)のような式を導くことが、たとえ可能であっても、実験結果と対比して特定することは必ずしも容易ではないであろう。そこで、本論文ではき裂発生寿命を測定容易な方法で簡単に評価できる方法を提案した。すなわち、切欠き相対開口変位

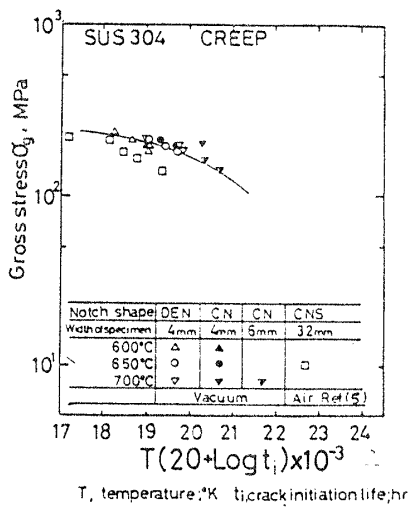
(Relative Notch Opening Displacement - RNOD) $\Delta\phi/\phi_0$ の限界値 $\Delta\phi_i/\phi_0$ を用いる方法である。ここで ϕ = 切欠き開口変位, ϕ_0 = 切欠き開口の初期値, $\Delta\phi = \phi - \phi_0$ = 切欠き開口変位の増分, き裂発生時の切欠き開口変位を ϕ_i とするとき, き裂発生時の RNOD: $\Delta\phi_i/\phi_0$ は高温クリープ、疲労およびクリープ・疲労の重畳条件のすべてに共通してほぼ0.25~0.38なる限界値 (RNOD_c) をとることがしめされている⁽²⁾。さらに、RNOD は実験的に、時間 t に対して図7に示めすように、直線的に増加することがしめされている⁽⁶⁾。すなわち、

$$\Delta\phi/\phi_0 = a^*t + b^* \dots\dots\dots(7)$$

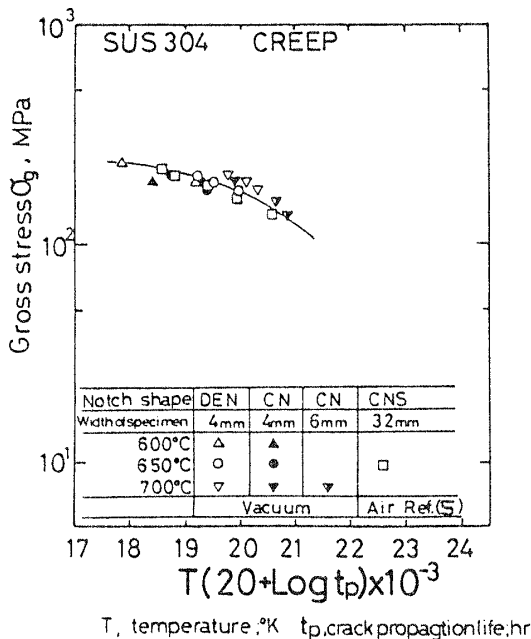
なる直線関係が成り立つ。ここで a^* および b^* は定数、個々の試験片によって係数 a^* , b^* のばらつきがあっても、それぞれの試験片について式(7)のような直線関係が成り立っている。したがって、当該材料使用期間中にあらかじめ適当な二、三の時期において、RNOD の値を測定してこれらのデータを図8に示めすように直線で結んで、外挿して、RNOD_c なる限界線との交点を求めこれに対応する時間として発生寿命 t_i が求

表1 式(1)における諸係数の値

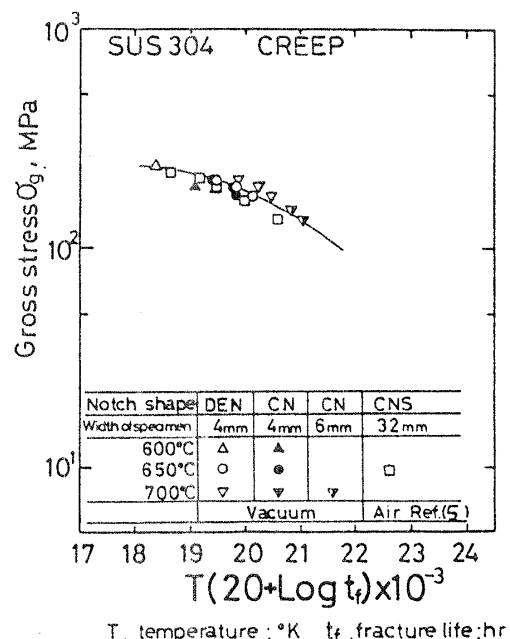
	B ₁	m	n	Δf_1 kJ/mol	Δf_2 kJ/mol
Creep ($t_i \rightarrow \infty$)	6.52×10^2	4.14	=0	359	72.5
$t_i = 600 \text{ sec}$	3.09×10^3	3.79	=0	356	71.2
$t_i = 60 \text{ sec}$	1.90×10^7	4.12	5.41	215	36.1
Fatigue ($t_i = 0$)	6.23×10^3	=0	4.62	71.4	7.67



(a) き裂発生寿命 t_i の温度・時間等価パラメータ表示法



(b) き裂伝ば寿命 t_p の温度・時間等価パラメータ表示法



(c) 全寿命 t_f の温度・時間等価パラメータ表示法

図6

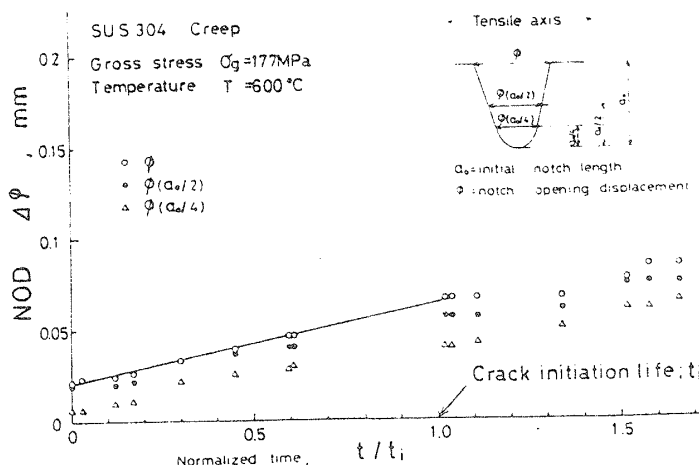


図 7 NOD の時間的变化

められる。このようにして、現時点 t^* までの時間 t^* を差引いて $t_i - t^*$ として余発生寿命を評価することができる。使用目的条件によって、き裂発生時を基準とするときには、これを律速条件として寿命予測が可能となる。

4. 結 論

SUS 304 ステンレス鋼切欠き試験片について、高温クリープ、疲労、およびクリープ・疲労重畳条件下でのき裂の発生、伝ばおよび最終破壊に寿命に関して実験および解析を行った結果次の結論を得た。

(1) き裂発生寿命 t_i は全寿命の 30~50% を占める。したがって、全寿命に比して発生寿命は無視できず全寿命特性にも影響する。

(2) き裂発生寿命 t_i 、伝ば寿命 t_p および全寿命 t_f のクリープ条件下でのそれぞれの寿命に対する比は疲労に近い条件下では温度が高くなるほど増加する。この傾向は発生寿命において、とくに著しい。

(3) 発生寿命、伝ば寿命、全寿命のいずれも直線則にはしたがわず、とくに発生寿命則の直線則からのずれは大きく、かつばらつきが大きい。

(4) き裂伝ば寿命は熱活性化過程として Arrhenius の式にしたがう。活性化エネルギーはクリープ条件から疲労の重畳によって疲労条件へとうつっていくにつれて減少する。この特性は、この材料のき裂伝ば速度 da/dt の特性と同様である。他方、き裂発生寿命のほうはクリープ優勢の条件下でのみ Arrhenius の式にしたがう。全寿命はき裂伝ば寿命と同様の特性をしめす。これは、全寿命がき裂発生寿命と伝ば寿命の中間の特性をしめすためである。

(5) 切欠き材のき裂伝ば寿命式が導かれた。本式

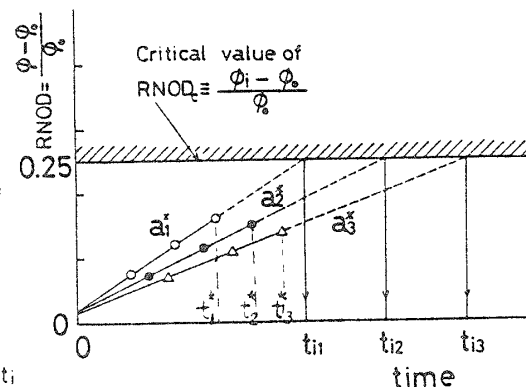


図 8 RNOD 法による残余発生寿命評価法

から、絶対温度 T とき裂伝ば寿命 t_p との等価パラメータ $T(\ln t_p + C)$ を提案した。実験データがよく整理される。

(6) さらに、全寿命 t_f も温度・時間等価パラメータ $T(\ln t_f + C)$ によってよく表される。発生寿命 t_i のほうはこのパラメータによって一義的には表されにくい。

(7) 上記 $T(\ln t + C)$ なる温度・時間パラメータ表示は Larson-Miller パラメータに類似しているが、後者は平滑材の高温破壊寿命に関するものであり、前者は、切欠き材の高温き裂伝ば寿命および全寿命に関するものである。

(8) き裂発生寿命評価としては、切欠き相対開口変位 (Relative Notch Opening Displacement - RNOD) がクライテリオンとなり、このクライテリオンを用いると、使用期間中に二、三の時点で RNOD を測定してこれを直線にて結び外挿することによって、ある時点にて、その後の残余寿命を評価することができる。最後に本研究に対して、種々ご助言いただいた東北大学大原秀晴教授に謝意を表す。

文 献

- (1) Yokobori, T. Kawasaki, T. and Horiguchi, M., *Proc 3rd. Nat. Cong. Fracture*, Law Tatry, Slovakia, (1976).
- (2) 横堀(寿)・横堀(武)・栗山・加古, 機論, 51-469, A (昭60), 2049.
- (3) Yokobori, A. T., Jr., Yokobori, T., Tomizawa, H. and Sakata, H., *Trans. ASME, J. Eng. Mater Technol.* 105-1 (1983), 13.
- (4) Larson, F. R. and Miller, J., *Trans. ASME*, 74-7 (1952), 765.
- (5) 大谷・新田・中村・奥野, 材料, 25-270 (昭51), 256.
- (6) 横堀(寿)・栗山・横堀(武)・加古, 機論, No. 840-9 (昭59-10), 134.