

時間・温度パラメータによるクリープ破断データ解析 のソフトウェア・パッケージ

門馬義雄¹, 芳須 弘²

¹ 高知工科大学 工学部
〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

² 独立行政法人物質・材料研究機構 材料ラボ
〒 305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

E-mail: ¹monma.yoshio@kochi-tech.ac.jp
²yoshizu.hiroshi@nims.go.jp

要約：時間・温度パラメータ法(TTP: Time-temperature Parameter)を用いて、統計的な手法によりクリープ破断データを解析するコンピュータ・ソフトウェアのアルゴリズムと解析システムの開発例(ECRTTP: Evaluation of Creep-Rupture Data Using TTP)を報告する。対象としたTTPはLarson-Miller(LM), Orr-Sherby-Dorn(OSD)そしてManson-Hafner(MH)のモデルによるものがある。これらの中で2つの材料定数を有するMHパラメータ法がもっとも良いあてはめ性を示した。典型的なクリープ破断曲線の例を提示する。このソフトウェアはMS-DOS(16 bit)用のFortranで開発されたが、Microsoft Windows(32 bit)の環境でも動作する。

1. はじめに

発電用ボイラやタービンの高温構造設計では、耐熱金属材料の10万時間クリープ破断強度が基準となっている。しかし、長時間クリープ破断データの取得には多大の時間とコストが必要である。1966年に着手された金材技研(現在は物材機構)クリープデータシート(NRIM/CDS)・プロジェクトにより、これまでに膨大なクリープ破断データが取得されている^{1,2)}。本書は、このようなデータを活用するために、時間・温度パラメータ(TTP)を用いて統計的なあてはめを行うソフトウェア・パッケージ(CRTTP: Evaluation of Creep-Rupture Data Using TTP)の開発と利用法³⁾の骨子を紹介するものである。

2. クリープ破断データ

クリープ破断(creep-rupture)あるいは応力破断(stress-rupture)とは、材料が一定の温度(T ℃)と応力(S MPa)の下で、時間の経過と共にクリープ変形が増大し、破断にいたる現象である。クリープ破断試験では、温度と応力を一定に保持して、破断時間

(t_R h)、破断伸び(EL %)および破断絞り(RA %)が観測される。一般に、クリープ破断データは一つのクリープ破断試験による、これらの5つの値の数値であり、 n 個のクリープ破断試験から得られるデータは、

$$(T_i, S_i, t_{Ri}, EL_i, RA_i, i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

の集合となる。このようなクリープ破断データは、一般に、3から5レベルの異なる温度で、それぞれの温度ごとに3から5程度の異なる応力レベルに対応するクリープ破断時間やクリープ破断延性(伸びおよび絞り)から構成される。

通常、クリープ破断データは横軸に破断時間の対数をとって、図1および図2のようなグラフとして、表示される。このデータでは温度レベル数は4である。

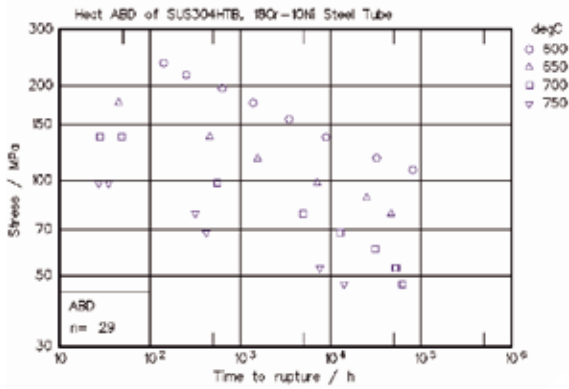


図1 304H ステンレス鋼 Heat ABD のクリープ破断データ

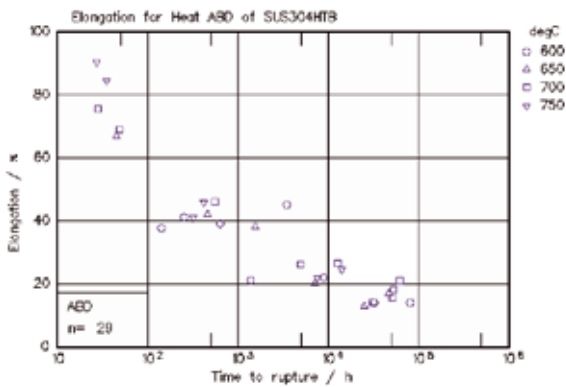


図2 304H ステンレス鋼 Heat ABD のクリープ破断伸び

3. TTP の関係式

TTP (Time-Temperature Parameter) とは、クリープ破断データ、式(1)の5つの値のうち、温度・応力・クリープ破断時間の関係を統一的に表すためのもので、TTPの基本式(主破断曲線 master rupture curve)は式(2)のように表される^{4,9)}。

$$P(t, T) = F(S) \quad (2)$$

この式は時間 t と温度 T を含む関数(TTP)が応力あるいは強度 S の関数として表現できるということを表している。

式(2)の左辺を表す TTP の具体例としては、様々な提案があるが、クリープ破断特性の分野では、次の3式が広く使われている。

Larson-Miller (LM)¹⁰⁾:

$$P(t_R, T) = T_K (\log t_R + C) \quad (3)$$

Orr-Sherby-Dorn (OSD)¹¹⁾:

$$P(t_R, T) = \log t_R - Q / RT_K \quad (4)$$

Manson-Haferd (MH)¹²⁾:

$$P(t_R, T) = (\log t_R - \log t_a) / (T_K - T_a) \quad (5)$$

ここで t_R はクリープ破断時間(h)、 $T_K = T + 273.15$, T は温度(°C)、 R はガス定数、そして C, Q, t_a, T_a などはパラメータ定数(parameter constants)と呼ばれる材料定数である。

TTP 式(2)の右辺(TTPの応力依存性)は、一般に対数応力 $X = \log S$ の多項式で表わすことができる。

$$P(Y, T_K) = c_0 + c_1 X + c_2 X^2 + \dots + c_k X^k \quad (6)$$

ここで、 (c_0, c_1, c_2, \dots) は回帰係数、 $k \leq 5$ は次数である。

式(6)を計算するのに、ECRTTPでは k 次の直交多項式を用いる。

$$P = B_0 A_0(X) + B_1 A_1(X) + B_2 A_2(X) + \dots + B_k A_k(X) \quad (7)$$

ここで、 B_k は次式で与えられる k 次の直交係数、 A_k は k 次の直交多項式である。

$$B_k = \sum_{i=1}^n P_i A_k(X_i) / \sum_{i=1}^n [A_k(X_i)]^2 \quad (8)$$

最適な直交多項式の次数は危険率5%の F 検定によって決定する。すなわち、次数 k を0次から最高5次まで、順次、上げて行き、各ステップで分散分析を行って、 F 検定で有意となった最高の次数を採用する¹³⁾。

それぞれの TTP について、クリープ破断時間の対数値は次のように書くことができる。

$$\text{LM} : Y = f(X) / T_K - C \quad (9)$$

$$\text{OSD} : Y = f(X) + Q / RT_K \quad (10)$$

$$R = 19.1446 [= \ln(10) \times 8.3144 \text{ (J/mol} \cdot \text{K)}]$$

$$\text{MH} : Y = f(X)(T_K - T_a) + \log t_a \quad (11)$$

ECRTTP の内部で TTP の種類は Method という変数により区別されている。

LM: Method = 1, OSD: Method = 2, MH: Method = 5
 そして、パラメータ定数は、次のように割り当てられる。

- Method = 1 (LM) のとき、 $C = PC(1)$
- Method = 2 (OSD) のとき、 $Q = PC(1)$
- Method = 5 (MH) のとき、
 $1.0 = PC(1)$, $T_a = PC(2)$, $\log t_a = PC(3)$

通常、クリープ破断データは温度ごとに応力とクリープ破断時間の二次元プロットとしてグラフ表示される。温度ごとのプロットの近似曲線を等温クリープ破断曲線 (isothermal creep-rupture curve) という。これは単にクリープ破断曲線とも呼ばれる。クリープ破断曲線の例は後述の第 4 節で説明する。ECRTTP は、当初、MS-DOS(16bit)用に開発されたが、最近の MS-Windows(32bit)環境のコマンドプロンプト (DOS 窓)でも動作するが、現在、Windows および Internet 対応版を開発中である。

4. TTP 式による計算: EVTTP (Evaluation of TTP)

いま TTP 式が与えられると、3つの変数(温度 T ・応力 S ・破断時間 t_R)のうちの2つを決めると、残りの1つは自動的に定まる。すなわち、次のような3種類の計算が可能である。

- (1) 指定する温度・応力に対するクリープ破断時間
 推定これは、式(9)~(11)で計算できる。
- (2) 指定する温度・時間に対するクリープ破断応力
 (時間強度)
 この場合は、Newton-Raphson 法などを用いて、対数応力の高次方程式(6)を解く必要がある。
- (3) 指定する応力・時間に対する温度
 この温度は、それぞれの TTP について、次式で計算できる。

$$LM : T_K = f(X)/(Y + C) \quad (12)$$

$$OSD : T_K = Q/(R(Y + f(X))) \quad (13)$$

$$MH : T_K = (Y - \log t_a)/f(X) + T_a \quad (14)$$

5. クリープ破断曲線

5.1 X 軸と Y 軸の選択

科学技術の分野では通常、原因あるいは指定した条件の値を説明変数あるいは独立変数として X 軸に、結果として得られる観測値を目的変数あるいは従属変数として Y 軸にプロットする。しかし、疲労やクリープ破断のデータでは寿命(繰り返し数あるいは時間)を横軸(X 軸)にとり、応力を縦軸(Y 軸)にとるのが通例である。

5.2 主破断曲線

まず、基本となる主破断曲線(master rupture curve)は TTP と対数応力 X との関係を表すもので、式(2)と式(6)を図示するものである。図 3~5 は 3 種類の TTP による主破断曲線の例である。一般に、主破断曲線では、対数応力を X 軸に TTP の値を Y 軸にとって表示されるのが慣習となっている。しかし、この表示は、上記の説明変数と目的変数という見知からすれば逆である。

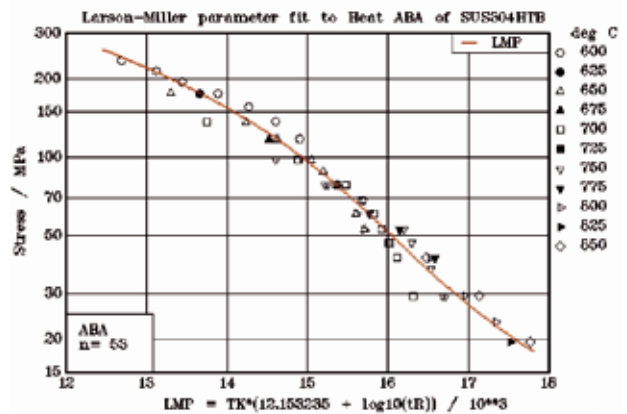


図 3 304H ステンレス鋼 Heat ABA の Larson-Miller パラメータによる主破断曲線

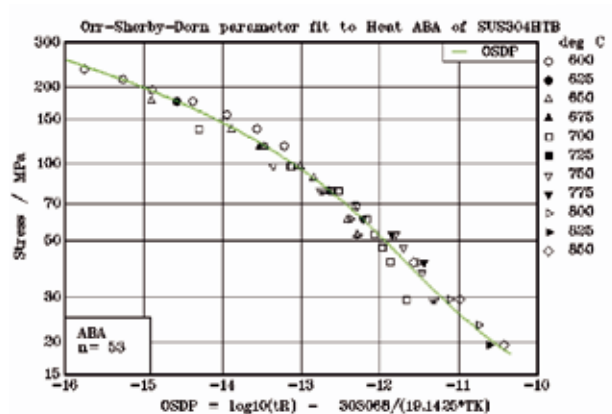


図 4 ステンレス鋼の Heat ABA の Orr-Sherby-Dorn パラメータによる主破断曲線

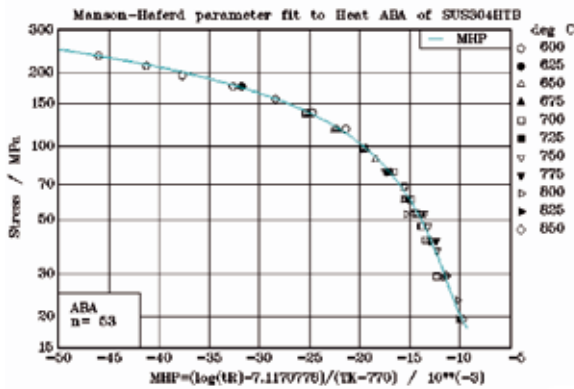


図5 304H ステンレス鋼 Heat ABA の Manson-Haferd パラメータによる主破断曲線

5.3 等温クリープ破断曲線

TTP 式が既に求められている場合、等温クリープ破断曲線を描くには、式(7)~(9)を使って、温度と応力を指定してクリープ破断時間を計算することになる。

等温クリープ破断曲線の XY 軸の選択として、次の2種類が可能である。

Type A : X 軸に対数クリープ破断時間、Y 軸に対数応力をとる。通常は、このタイプのグラフを等温クリープ破断曲線と呼んでいる。

Type B : X 軸に対数応力、Y 軸に対数クリープ破断時間をとる。

ECRTTP の内部では $X = \log S$, $Y = \log t_R$ としているのは、この軸選定を想定しているからである。

図6は304H ステンレス鋼 Heat ABA のクリープ破断データに対する3種類のTTPによる等温クリープ破断曲線の例である。一般に、クリープ破断曲線は、このように両対数目盛でプロットされる。

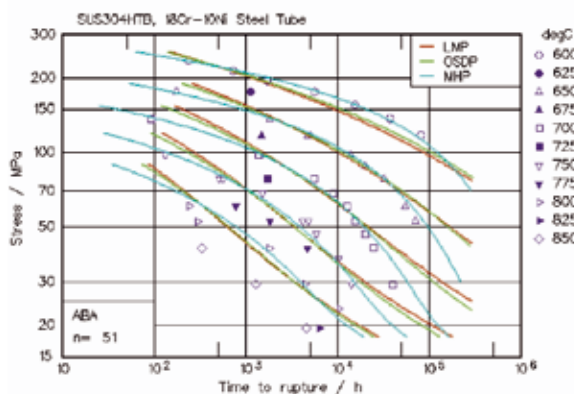


図6 304H ステンレス鋼 Heat ABA に対する3種類のTTPによる等温クリープ破断曲線

6. TTP 式の計算

式(1)のような一組のクリープ破断データを使ってTTP 式を求めるといことは、TTP 式のパラメータ定数(C, Q, T_a, t_a)と式(6)の回帰係数($c_0, c_1, c_2, \dots, c_k$)を決定することを意味する。

この計算はクリープ破断時間の残差平方和

$$S_E = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (15)$$

を最小にするように決定する。

一組のクリープ破断データが与えられると、LM と OSD の最適パラメータ定数は次式により、一意に定めることができる。

$$\text{LM} : C = \sum_{i=1}^n [-Y_i + (1/T_i) \sum_{j=0}^k B_j A_j(X_i)] \quad (16)$$

$$\text{OSD} : Q = 2.303R \sum_{i=1}^n T_i [Y_i - \sum_{j=0}^k B_j A_j(X_i)] \quad (17)$$

MH については、 Y_i の残差平方和を最小にするパラメータ定数は非線型方程式になるので、簡単には解けない。そこで、次のような繰り返し計算(iteration)を行う。具体的には、2つのパラメータ定数のうち、まず $T_a = \text{PC}(2)$ を指定して、SEE が最小になる $\log t_a = \text{PC}(3)$ を計算する。ECRTTP では $\text{PC}(2)$ の値を初期値(PC2I)、増分(DPC2)、終端値(PC2F)として、残差平方和を計算させる¹⁴⁾。

例えば、PC2I=500, DPC2=5, PC2F=800 と指定すると、次のような大量の計算を行う必要がある。

PC(2)= 500, 505, 510, 515, ..., 785, 790, 795, 800

実際の計算は、次式による Y に関する標準誤差(SEE: standard error of estimate)が一番小さくなったものを最適な TTP 式として採用する。

$$\text{SEE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - k - N_p - 1)} \quad (18)$$

ここで \hat{Y}_i は TTP 式から計算される Y_i の推定値、 n はデータ数、 k は対数応力依存性を示す多項式の次数($k \leq 5$)、そして N_p は TTP 式に含まれるパラメータ定数の数(LM および OSD で $N_p = 1$ 、NH では $N_p = 2$)である。

SEE は TTP 式へのあてはめの精度を表す尺度で、

単一ヒートからのクリープ破断データでは約 0.1 未満の値となるのが普通である。

TTP 式のあてはめに関する、もう一つの統計的パラメータとして、次の決定係数(COD: Coefficient of Determination、寄与率とも呼ばれる)も計算される。

$$R^2 = \text{COD} = S_R / S_Y = 1 - S_E / S_Y \quad (19)$$

ここで、 $S_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$ は回帰平方和、

$S_Y = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$ は総平方和、

$S_E = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ は残差平方和である。

($S_Y = S_R + S_E$ の関係がある。)

COD は回帰曲線の適合度の良さを表す尺度で、1.0 未満の値となるが、大きいほど、よい回帰といえる。

ECRTTP 中の CFRTTP などから出力される TTP 式を含む EQN ファイルには、この他に RMS (root mean square) および DWR (Durbin-Watson ratio) という統計パラメータが含まれるが、文献 3) に詳しく解説されているので、本稿では割愛する。

7. ECRTTP の応用

TTP を用いて、広範囲な温度・応力に対するクリープ破断データを解析するときに問題となるのが、クリープ破断機構の変化である。ECRTTP は、材料のクリープ変形や破壊機構の変化に応じてクリープ破断データを分ける「領域分割法」¹⁵⁾にも対応している。また、高温引張強度の温度依存性と TTP によるクリープ破断特性を組み合わせ、時間依存性の強度と静的な高温引張ヒート間の個性を区別する強度比曲線(Strength Ratio Curve)¹⁶⁾を描くこともできる。

検討した 3 種類の TTP の中で、どの TTP 式が一番ふさわしいかを定めるには、それぞれの TTP について計算された最適の標準誤差のうちの最小のものを選べばよい。

謝辞

この研究は、日本私立学校振興・共済事業団から私立大学等経常経費補助金の特別補助によって一部援助を受けた。

文献

- 1) 横井 信、田中千秋、門馬義雄ほか：“クリープデータシートの作成(I)”、金属材料技術研究所研究報告集 4 (1983)、pp.50-70。
- 2) 田中千秋、門馬義雄ほか：“クリープデータシートの作成(I)”、金属材料技術研究所 研究報告集 9 (1988)、pp.39-52。
- 3) 門馬義雄・芳須 弘：「ECRTTP 利用の手引き」、KUT-NIMS (Dec. 2008)。
- 4) Time-Temperature Parameters for Creep-Rupture Analysis, ASM Publ. No.D8-100 (1968)。
- 5) J. B. Conway: Stress-Rupture Parameters: Origin, Calculation and Use, Gordon & Breach Sci. Publ. (1969)。
- 6) R. M. Goldhoff: J. Testing and Evaluation, Vol.2 (1974), p.387。
- 7) 横井 信・門馬義雄：“長時間クリープ破断強さの推定”、鉄と鋼、Vol.65 (1979)、pp.831-842。
- 8) 藤田利夫ほか：「ISO6303 に準拠したクリープ破断データ外挿法の手引き」、日本鉄鋼協会(1983)。
- 9) VAMAS 材料標準研究部会：「金属材料のクリープ破断データ評価の標準化」、日本鉄鋼協会 (1994)。
- 10) F. R. Larson and J. Miller: A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses, Trans. ASME, Vol.74 (1952), p.765。
- 11) R.L.Orr, O. D. Sherby and J. E. Dorn: “Correlations of Rupture Data for Metals at Elevated Temperatures”, Trans. ASM, Vol.46 (1954), pp.113-118。
- 12) S. S. Manson and A. M. Haferd: “A Linear Time-Temperature Relation for. Extrapolation of Creep and Stress-Rupture Data”, NACA TN 2890 (1953)。
- 13) 芳賀敏郎：品質管理、Vol.16 (1965)、p.696。
- 14) A. Mendelson, E. Roberts, and S.S. Manson: NASA TN D-2795 (1965)。
- 15) 木村一弘：“安全性確保のための構造材料寿命評価・予測技術の最前線-2 耐熱鋼のクリープ破断寿命評価と設計基準”、ふえらむ Vol.13 (2008)、p.775。
- 16) 門馬義雄：“金属材料のクリープ寿命予測”、「寿命・余寿命と材料」、裳華房(2006)。

A Software Package for Analysis of Creep-Rupture Data Using TTP (Time-Temperature Parameter)

Yoshio MONMA¹ and Horoshi YOSHIZU²

¹ Faculty of Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami-city, Kochi 782-8502 JAPAN

² Innovative Materials Engineering Lab., National Institute for Materials Science (NIMS)
1-2-1 Sengen, Tsukuba-city, Ibaraki 305-0047

E-mail: ¹monma.yoshio@kochi-tech.ac.jp, ²yoshizu.hiroshi@nims.go.jp

Abstract: Using the TTP (time-temperature parameter) models a program package ECRTTP (Evaluation of Creep-Rupture data Using TTP) to analyze creep-rupture data has been developed. We present a statistical procedure to optimize the parameter constants in the TTP of Larson-Miller (LM), Orr-Sherby-Dorn (OSD) and Manson-Haferd (MH). Typical examples of creep-rupture curves are shown. Among the three TTP methods the MH showed best fit in almost every case. Originally the software was developed using MS-Fortran Ver.5.1 for MS-DOS, but we can run the software in the command prompt of Microsoft Windows.