



入門講座

材料試験法編 機械的性質-2

鉄鋼材料の高温強度

丸山公一

東北大学 大学院工学研究科 教授

Kouichi Maruyama

Strength of Steels at Elevated Temperature

1 はじめに

ここでは、高温で使う材料の強度、特に高温・一定応力下での挙動について紹介する。高温の定義は、2.1で述べる。室温で使う材料では、一定応力下なら、変形は進行しない。しかし高温では、一定応力下でも時間経過とともにひずみが累積され、ついには破壊する。そしてひずみの累積速度は、温度や応力によって変化する。これらが、高温で使う構造材料の特徴であり問題点である。この時間経過とともにひずみの累積はクリープと呼ばれる。2節では高温材料に関する基礎的事項、3節ではクリープ試験法について概説する。高温材料には、構造物設計での必要性から、10万時間以上にわたる長時間の変形や破壊挙動が材料データとして要求される。しかし、10万時間(11.4年)以上にわたる長時間の試験を実施するのは容易ではない。そこで、長時間挙動は、短時間の試験に基づいて、推定・評価する。いかにして推定するかは、重要な技術課題である。4節では、この長時間挙動の評価を取り扱う。高温強度に関する広範な事項が、いくつかの参考書¹⁻³⁾に紹介されている。

2 高温変形に関する基礎的事項

2.1 降伏応力の温度による変化と高温域の定義

降伏応力 σ_y の温度による変化を図1に示す。材料強度はその物質のヤング率に比例し、ヤング率は温度によって変化する。そこで、ヤング率の温度による変化に付随した強度変化を除外するために、ヤング率 E で規格化した応力を考える。低温の降伏応力は、格子摩擦などの障害を転位が熱活性化で乗り越えるプロセスで決まる。熱振動の助けが小さい低温では、障害物を越えるのにより大きな外力が必要となり、降伏応力が上昇する。中間温度では、熱振動で

は越えられない障害物(結晶粒界、転位、析出・分散粒子など)の間を外力で転位を通過させるプロセスが、降伏応力を決める。この温度域では、降伏応力は、温度にもひずみ速度にも依存しない一定値となる。この降伏応力を非熱的降伏応力 σ_a と呼ぶ。低いひずみ速度の変形では、図1に示すように、低温域の降伏応力が低下し、 $\sigma_y = \sigma_a$ となる温度域がより低温まで広がる。鉄鋼材料における室温は、 10^{-3}s^{-1} 程度のひずみ速度では低温域に、構造材料で予想される極低速の変形では中温域にある。したがって、常温構造材料の真の意味での降伏応力は、 σ_a である。

原子の拡散が十分な早さで進行する温度域を、高温と呼ぶ。この領域では、転位組織の回復で、加工硬化した材料は軟化する。また、拡散の助けで転位が粒子の間を通過することも可能になる。そのため、 σ_a 以下でも塑性変形が起き、一定ひずみ速度での降伏応力は σ_a 以下へ低下する。言い換えれば、 $\sigma_y < \sigma_a$ となる温度域が高温である。高温域の降伏応力は、低温あるいは高ひずみ速度ほど上昇する。中温域から高温域への遷移温度、すなわち $\sigma_y < \sigma_a$ となる温度は、おおよそその物質の融点の40~50%(450~630℃)にある。なおカッコ内に、鉄でのそれに対応する温度を示す。そして、低ひずみ速度(あるいは長時間の変形)ほど、遷移

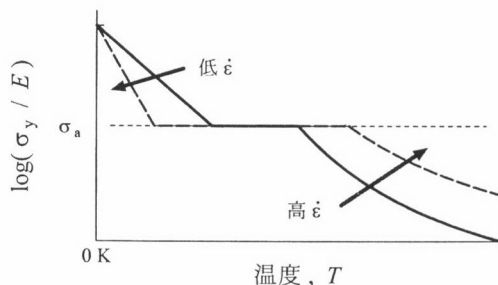


図1 降伏応力 σ_y の温度による変化
矢印はひずみ速度変化に伴う変化の方向を示す

温度は低温側に位置する。

高温での引張試験法は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱鋼の高温引張試験方法」に、規定されている。

2.2 非熱的降伏応力以下でのクリープ試験の重要性

ここで対象とする高温材料とは、高温域で使う材料である。高温材料の多くは、高温域への遷移温度より少し高い温度で使う。そのため、クリープ試験の負荷時(早く変形する)には、材料は拡散が関与しない中温変形をする。したがって、負荷時に起きることは、中温変形の非熱的な応力-ひずみ曲線に基づいて判断する。

図2 (a)の非熱的応力-ひずみ曲線を描く材料を考える。非熱的降伏応力 σ_a 以上の応力 σ_2 を負荷すると、まず点Bまで弾性変形し、次に拡散の関与しない機構で点Cまで塑性変形する。これらが負荷時に起きることである。この塑性変形の間に材料は加工硬化し、中温域なら、点Cのひずみ量で変形は停止する。しかし拡散が可能な高温では、加工硬化した材料は回復・軟化し、変形が継続して、ついには破壊する。中温域なら、 σ_a 以下の応力 σ_1 では、点Aのひずみまで弾性変形するのみである。しかし高温では、拡散が寄与する種々の機構による変形が可能となり、変形が継続して破壊する。以上のように高温材料の特徴は、 σ_a の上下にかかわらず、塑性変形と破壊が起きることである。この時間経過とともに進行する塑性変形がクリープである。

負荷時に起きることの違いから、クリープは2種類に分類される。1つは σ_a 以下の応力でのクリープである。他は σ_a 以上の応力でのクリープで、負荷時の塑性変形で転位組織が変化した後に、クリープが始まる。そして、 σ_a 以下でのクリープ試験の結果とは異なる挙動を示す⁴⁾。2.4項で述べるように、構造材料は σ_a 以下で使い、負荷時に塑性変形することはない。このような条件で使う構造材料のクリープデータを正しく取得するには、 σ_a 以下でクリープ試験を行う必要がある。

2.3 クリープ曲線

図2 (b)に示すクリープひずみの時間変化を記録したものを、クリープ曲線と呼ぶ。その傾きがクリープ速度に対応する。クリープ曲線には、クリープ速度が時間とともに低下する1次クリープ域、ほぼ一定に保たれる2次クリープ域、加速する3次クリープ域が現れ、破断時間 t_r で破壊する。2次クリープ域のクリープ速度(最小クリープ速度 $\dot{\epsilon}_m$)を変形の、破断時間を破壊の指標として、クリープ挙動を議論することが多い。

材料は、高温あるいは高応力ほど早く変形し、早期に破壊する。一般に、最小クリープ速度や破断時間は、次の形

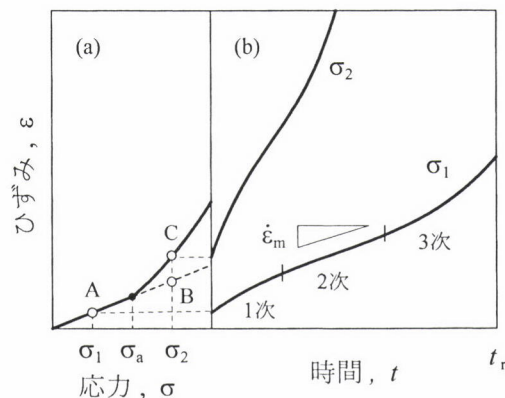


図2 (a)非熱的変形の応力-ひずみ曲線と、
(b)高温でのクリープ曲線の対応

で表現される。

$$\dot{\epsilon}_m = \dot{\epsilon}_0 (\sigma/E)^n \exp(-Q/RT) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$t_r = t_{r0} (\sigma/E)^{-n} \exp(Q/RT) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\dot{\epsilon}_0$ と t_{r0} は定数、 R は気体定数、 T は絶対温度である。応力指数 n と活性化エネルギー Q は、クリープ速度と破断時間で異なる値をとることもある。 $\dot{\epsilon}_0$ 、 t_{r0} 、 n と Q を実験的に決めれば、種々の条件でのクリープ速度や破断時間が推定できる。これが長時間挙動を評価する原理となる。

2.4 高温材料に必要な材料データ

ASMEコードを例にとると、高温機器の設計では、次の応力

- 降伏応力の2/3
- 引張強さの1/4
- 10万時間で1%(千時間で0.01%)のひずみを生ずる応力
- 10万時間破断応力の2/3

の最小値を、その材料を使用しうる上限の応力(許容応力)とする。aとbは、中温変形による降伏と破壊の防止、cとdはクリープによる変形と破壊の防止を目的とする。融点の約40%以上の高温では、cあるいはdの応力が許容応力を決める。したがって、高温構造材料では、これらのクリープに関する材料データが不可欠である。この他に、3次クリープ開始点に関する情報が要求されることもある。

1%変形する時間や3次クリープ開始点などの情報を提供するには、クリープ曲線全体を定式化し、種々の条件でのクリープ曲線を推定できるようにしておく必要がある。このことを目的として、クリープ曲線全体を表示する式^{3,5)}(θ 法など)が提案されている。金属材料技術研究所クリープデータシートには、以前は破断時間のみであったが、現在はクリープひずみのデータも掲載されている。

3 クリープ試験法

3.1 クリープ試験

クリープ試験では、一定の応力あるいは荷重を負荷し、試験片の伸びの時間変化を記録する。これを図示すれば、図2(b)のクリープ曲線が得られ、あるひずみに達する時間、クリープ速度や破断時間を決定できる。ひずみを計測せず、破断時間のみを得るクリープ破断試験を行うことも多い。JIS規格では、直径の5倍の標点間距離の試験片形状が標準で、直径10mmと6mmの試験片を使うことが多い。特定の目的があるとき以外は、大気中で試験する。試験方法等は、JIS Z 2271「金属材料の引張クリープ試験」と、JIS Z 2272「金属材料の引張クリープ破断試験」に規定されている。

クリープ試験自体は単純であるが、熱電対や温度制御装置、ひずみ測定装置などの長時間安定性は技術上の重要課題である。熱電対の起電力は時間経過とともに変化する。数万時間にわたる長期試験では、この変化を補正する必要がある。クリープ試験のノウハウが、文献6)に述べられており、試験を実施する上で役立つ。

3.2 定応力試験と定荷重試験

構造物の応力下での挙動を評価するには、一定応力下の試験で得たクリープデータを使うのが便利である。しかし、入手できるデータの大部分は、一定荷重のクリープ試験で得られている。均一変形を仮定すれば試験片の断面積 A は、次式にしたがって減少する。

$$A = A_0 / (1 + \epsilon_e) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで ϵ_e は公称ひずみ(伸び/初期長さ)、 A_0 は初期断面積である。その結果、定荷重試験では、変形とともに応力が増加し、定応力試験より早くひずみが累積して、早期に破壊する。定荷重試験でのクリープ速度 $\dot{\epsilon}$ の増加は、次式からおよそ見積もることができる。

$$\dot{\epsilon}_{\text{定荷重}} / \dot{\epsilon}_{\text{定応力}} = (1 + \epsilon_e)^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで n はクリープ速度の応力指数である((1)式参照)。 $n=5$ とすると、 $\epsilon_e=1\%$ では1.05倍、10%では1.6倍のクリープ速度となる。

ひずみには、上記の公称ひずみ ϵ_e と真(対数)ひずみ ϵ_t がある。両者は次式で関係づけられる。

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad \dots\dots\dots (5)$$

原理的には、真ひずみを使うのが望ましい。ただし、数%程度の微小なひずみでは、両者の違いは僅かである。

真ひずみ ϵ_t の時間 t 変化が、(1)式と類似の次式で与えられるクリープ曲線を考える。

$$\epsilon_t = \dot{\epsilon}_0 \sigma^n t \equiv \epsilon_c \quad \dots\dots\dots (6)$$

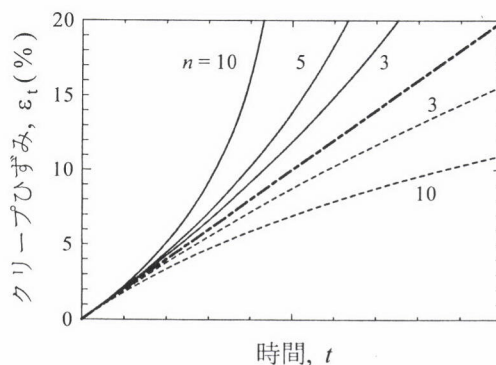


図3 一定荷重試験でのクリープ曲線
実線は引張クリープ、点線は圧縮クリープ
数字は応力指数の値

図3の一点鎖線はこのクリープ曲線で、ひずみが直線的に増加する。一定荷重のクリープ試験では、応力の変化のために、ひずみの時間変化は(6)式とは異なり、次式で与えられる⁵⁾。

$$\epsilon_t = -(1/n) \ln(1 - n\epsilon_c) \quad \dots\dots\dots (7)$$

図3の実線(引張クリープ)と点線(圧縮クリープ)は、(7)式を図示したものである。定荷重と定応力試験の違いは、応力指数 n が大きいほど、またひずみ量が大きいほど、大幅なものとなる。定荷重の試験結果には応力変化にともなうみかけのクリープ速度変化が含まれていること、および破断時間にも違いがあることを注意しなければならない。ただし、3%程度のひずみまでは、定応力と定荷重試験の差は僅かである。

大気中で行うクリープ試験では、酸化による断面減少も問題になる。この断面減少は、変形による断面減少と同じ影響を及ぼす。その結果、大気中では非酸化性雰囲気より早い速度でクリープ変形が進行し、早期に破断する。酸化の影響は試験片直径に依存し、直径10mmより6mmの方が酸化の影響を大きく受ける。更に細い直径のミニチュア試験片では、真空中での試験など、酸化の防止を考慮する必要がある。酸化の影響は、高温および長時間の試験ほど大きな問題である。

4 長時間挙動の評価

2.4で必要とされた長時間の材料データを提供するには、短時間の試験結果に基づいて、それらの値を評価しなければならない。ここでは、その手法がある程度確立されている破断時間に限って、長時間挙動の評価法を紹介する。クリープひずみに関する評価法は^{3,5)}、今後の課題である。

4.1 破断時間推定の原理

破断時間の推定では、まず短時間の試験を行い、図4(a)

に示すように、いくつかの温度 T で破断時間 t_r とクリープ
 応力 σ の関係を求める。次に、温度の違いを補正する破断
 パラメータを使って、図 4 (b) のように各温度のデータを
 重ね合わせ、実線のマスターカーブを得る。多くの破断パ
 ラメータが提案されてきたが、その主なものは、次のOrr-
 Sherby-Dorn、Larson-MillerとManson-Haferdパラメータ
 である。各破断パラメータが想定している破断時間と温
 度の関係を図 5 に、それぞれの換算式を次に示す。

$$P_r = \log t_r - Q \log e / RT \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$P_r = (\log t_r - \log t_0) T \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$P_r = (\log t_r - \log t_0) / (T - T_0) \quad \dots\dots\dots (10)$$

これらの P_r が温度の違いを補正した破断時間である。破断
 時間の活性化エネルギー Q と他の定数 t_0 および T_0 は、異な
 る温度のデータが最も良く重なり合うように決定する。な
 お、(8) 式は(2)式に基づく。図 4 (b) の P_r - σ 曲線から応力
 の関数 $F(\sigma)$ を決めれば、 t_r が σ と T の関数として次式で
 定式化される。

$$P_r(t_r, T) = F(\sigma) \quad \dots\dots\dots (11)$$

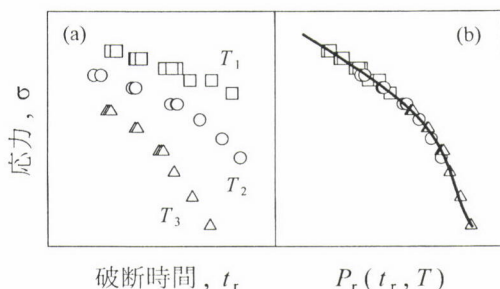


図4 破断時間の定式化手順
 (a)元のデータ、(b)破断パラメータ P_r を使った表示

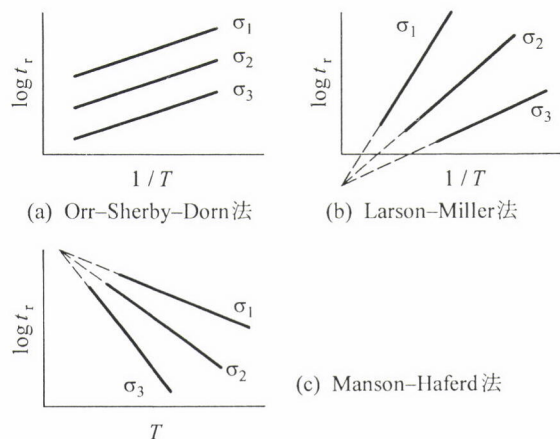


図5 (8)~(10) 式の破断パラメータが想定している破断時間の
 温度依存性
 応力は $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$

$F(\sigma)$ には、対数応力の多項式を使うことが多い。

$$F(\sigma) = \sum_{k=0}^n C_k (\log \sigma)^k \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで C_k は定数である。しかし、 P_r と σ の関係を記述でき
 れば、どんな式を使ってもかまわない。また、実測データ
 の定式化という点では、(8)~(10) 式のパラメータに大差は
 ない。

推定したい σ と T の条件を(11)式に代入すれば、任意の
 条件での t_r が推定できる。これが長時間挙動推定の原理で
 ある。クリープ破断データを解析して長時間挙動を推定す
 る手法は、文献 7) に具体的に紹介されている。Orr-Sherby-
 Dorn法を基準とすれば、低応力・長時間の破断時間を、
 Larson-Miller法は大幅ではないが長めに、Manson-Haferd
 法は逆に短めに推定する傾向がある。

4.2 破壊機構の変化

破壊機構領域図⁸⁾や変形機構領域図⁹⁾として知られてい
 るように、高温では、様々な機構による破壊や変形が起き
 る。そして、試験温度や応力の変化に伴って、破壊や変形
 の機構が変化する。図 6 ³⁾ に SUS 316 の破断時間と応力の
 関係を示す。図には、(2) 式の応力指数 n と活性化エネル
 ギー Q が異なる 3 領域が存在する(一点鎖線はその境界で、
 高応力から、高、中、低応力域と名付ける)。そして、一定
 温度では低応力ほど n が低下し、一定応力では低温(長時間
 破断)で Q が小さくなる。図 6 には、破壊様式の変化も示さ
 れている。高応力域では粒内破壊(T)し、低応力域は粒界 σ
 相界面にできたキャビティに起因する粒界破壊(σ)に対応
 する。中応力域では、くさび形き裂(W)や粒界炭化物界面
 に発生したキャビティによる粒界破壊(C)が観察される。

上記のように、破壊機構が変化すると破断時間の温度依

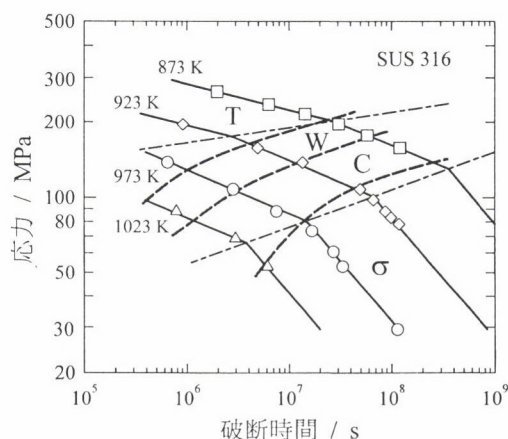


図6 SUS 316での破壊機構の変化と、破断時間の応力依存性の
 変化の対応
 破線は破壊機構が変化する境界

存性が変化することがある。(8)～(10)式は、破断時間の温度依存性が変化しないことを前提としている。そのため、破断時間の温度依存性の変化は、次に述べる長時間挙動の推定で、大きな障害となる。

4.3 破断時間の外挿限界

図7³⁾はSUS 304の例で、36Ms(10⁴h)以下のデータに基づいて(11)式の関数を決め、それを長時間に外挿した結果が、破線(Larson-Miller法)と実線(Manson-Haferd法)で示してある。973Kを例にとると、短めの推定結果を与えるManson-Haferd法でも、90Msの実測破断時間(約3倍の外挿)に対応する推定破断時間は240Msで、大幅にずれている。図7のデータは、一点鎖線を境として、破断時間の温度依存性が変化する。上記の実測値と推定値のずれは、(8)～(10)が想定しない温度依存性の変化(破壊機構の遷移)に起因している。破断時間の温度依存性が異なる領域の挙動を、短時間試験から推定することは不可能である。このことは、破断時間を推定する際に注意しなければならない。

図8³⁾は破断時間の温度依存性が変化しない例で、この場合には、約100倍長時間のことも精度よく推定できる。図には、3.6Ms(10³h)以下のデータを用い破断データを定式化し、長時間挙動を推定した結果を破線で示す。試験温度の違いは、式(8)のOrr-Sherby-Dorn法を用いて補正してある。推定値は実測値とよく一致している。

図8には注意すべきことがある。この解析では、一点鎖線より高い応力のデータのみを使って(11)式の $F(\sigma)$ を決定しており、実測データのない低応力域の $F(\sigma)$ は正しく推定できていない。そのため、一点鎖線より低応力の推定曲線は、実測値からずれる。このように、同一応力の短時間データが無い低応力へ外挿しても、正しい推定はできないことが多い。したがって、 $F(\sigma)$ を正しく決定するには、

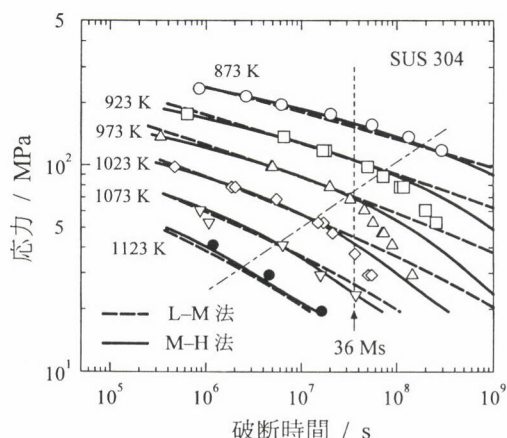


図7 SUS 304の推定破断時間(破線と実線)と実測値の比較
36Ms以下のデータに基づく

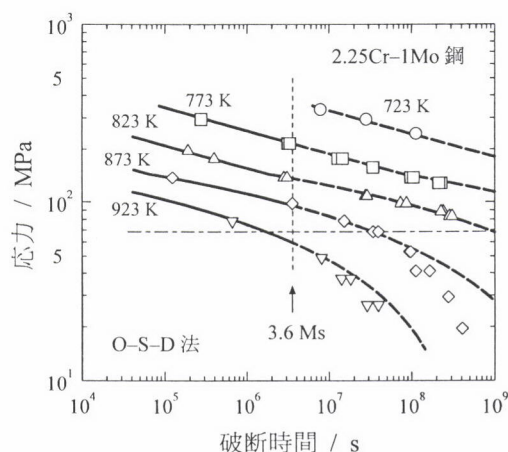


図8 2.25Cr-1Mo鋼の3.6Ms以下のデータから推定した破断時間と実測値の比較

推定したい応力までの高温でのクリープ試験データがぜひ必要である。

金属材料技術研究所クリープデータシートには、10万時間におよぶ長時間の試験結果が収録されている。これらは、破断時間の温度依存性の変化や、低応力域での破断時間の応力依存性などを検証する上で、有用な情報を与えてくれる。

使用する温度と応力が分かっているときには、使用応力で温度のみ(温度加速試験)を上げて、加速試験することがある。温度加速試験では、 $\log t_r = 1/T$ ((8)式)あるいは T ((10)式)に対してプロットして直線関係が得られれば、この直線を外挿して長時間挙動を推定することができる。

5 おわりに

実用に供される材料は、種々の組織を作り込むこと(変態や加工による多量の転位の導入、微細析出物の分散など)によって強化されている。原子の拡散が十分な早さで進行する高温で、このような材料を長期間使うと、その間に上記の組織が変化し(転位の消滅や、析出物の凝集・粗大化など)、材料が弱化する。その結果、十分長時間の試験では、全ての材料の強度が組織による強化を除いた母相本来の強度に収斂する。これが、木村らによって指摘された基底強度の概念である¹⁰⁾。実際の時間範囲(例えば10万時間)で、基底強度への強度低下が完了するかについては、議論の余地が残されている。しかし、基底強度に関する指摘は、高温材料を取り扱う上で忘れてはならない重要事項である。高温材料では、組織変化の影響を無視できない。組織変化がほとんど起きない高応力で短時間の試験から、高温材料の強度を評価するのは望ましくない。また、高温材料の開発では、組織の安定化を十分配慮する必要があるだろう。

参考文献

- 1) 大谷隆一, 駒井謙治郎: 環境・高温強度学, オーム社, (1984)
- 2) R. Viswanathan著, 増山不二光, 丸山公一訳: 高温機器部品の損傷メカニズムと寿命評価, 日刊工業新聞社, (1993)
- 3) 丸山公一, 中島英治: 高温強度の材料科学—クリープ理論と実用材料への適用, 内田老鶴圃, (1997)
- 4) K. Maruyama, K. Sawada, J. Koike, H. Sato and K. Yagi: Mater. Sci. Eng., A224 (1997), 166.
- 5) R. W. Evans and B. Wilshire: Creep of Metals and Alloys, The Inst. Metals, London, (1985)
- 6) 金材技研材料強度データ資料10, 金属材料技術研究所クリープデータシート作成の試験技術と試験計画, 金属材料技術研究所, (1996)
- 7) 日本鉄鋼協会VAMAS材料評価研究部会: 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)
- 8) M. F. Ashby, C. Gandhi and D. M. R. Taplin: Acta Metall., 27 (1979), 699.
- 9) H. J. Frost and M. F. Ashby: Deformation Mechanism Maps, Pergamon Press, Oxford, (1982)
- 10) 木村一弘: まてりあ, 35 (1996), 535.

(1999年4月27日受付)