



金属のクリープ

目次

1. クリープとは	1
2. クリープ試験	2
3. クリープ寿命評価	3

クリープ強度に関連するねじ締結技術ナビコンテンツもあわせてご覧ください。

[クリープ破壊](#)



ハードロック工業株式会社

1. クリープとは

材料を高温で静応力下におくと時間の経過とともにひずみが増加しますが、この現象をクリープと呼びます。金属では絶対温度表示による融点の 0.3-0.4 倍程度の高温域からクリープ現象が明確に起こり始め、鉄鋼材料ではおよそ 600°C 以上でクリープが顕著に起こります。もちろん厳密には、これ以下の温度でもクリープは起こりますが、変形速度が極めて小さいために通常の機械部品ではほとんど問題になることはありません。図 1 は材料を高温の荷重一定下の条件に置き、ひずみと時間の関係を表したものでクリープ曲線と呼ばれます。静応力の作用で時間の経過とともにひずみが次第に増加していき、このクリープ曲線の傾きがひずみ速度になります。クリープ曲線は最初の荷重負荷の瞬間に生じる瞬間ひずみ、時間の経過とともにひずみ速度が減少する遷移クリープ（第 I 期）、ひずみ速度がほぼ一定で変形が進む定常クリープ（第 II 期）、ひずみ速度が加速して破断に至る加速クリープ（第 III 期）のそれぞれに分類できます。第 II 期におけるひずみ速度は定常クリープ速度と呼ばれ、クリープ変形を特徴づける代表値として使われます。クリープ曲線の位置は応力が大きいほど、また温度が高いほど図の左上方向に移動します。

このクリープ変形は弾性限度以内の小さな応力でも発生し、最終的に破壊に至ります。また、クリープ現象は、クリープ速度が温度に依存する熱活性化過程で、クリープ変形を支配する基本則はひずみ速度であります。遷移クリープでは熱によって転位の移動が活発になり、応力集中部分に転位が集積して硬化が起こります。このため、ひずみ速度が減少します。定常クリープでは集積転位が再配置して軟化する現象が起こり始め、硬化と軟化がバランスした状態になります。加速クリープでは軟化が進行してひずみ速度が増加し破断に至ります。

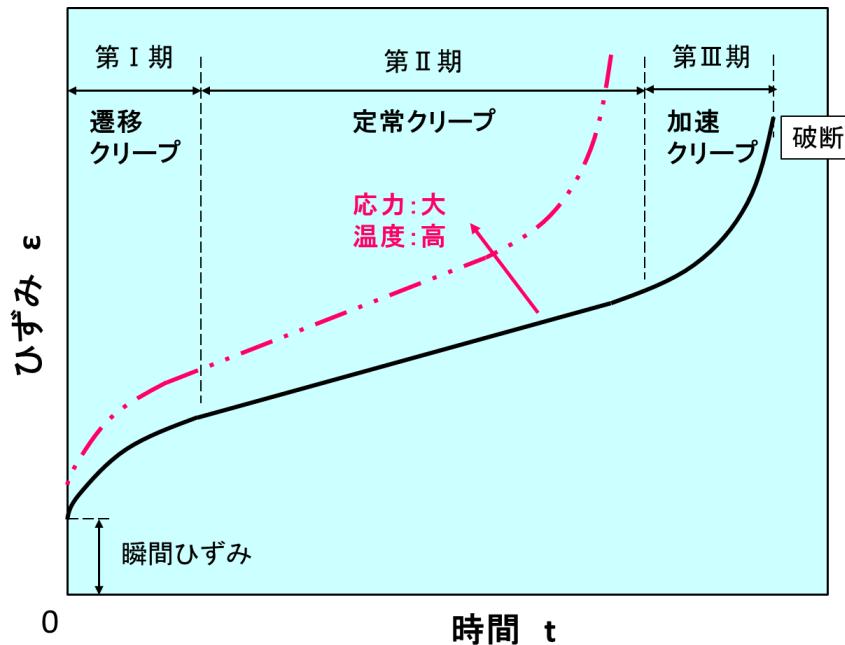


図 1 クリープ曲線（ひずみと時間の関係）

クリープ変形機構については以下のような考えがあります。応力が高い場合は、外力と熱振動によって転位のすべり運動が起こって塑性変形します。応力が低い場合は、応力に誘起された原子の流れが起こり、これを拡散クリープと呼びます。拡散クリープでは高温側で原子が格子内を流れて格子拡散クリ

ープと呼ばれる現象が起こり、低温側では原子が粒界を流れて粒界拡散クリープと呼ばれる現象が起こるといわれています。また、転位すべりと拡散クリープの中間として転位クリープがあります。転位クリープは転位のすべりによって変形する現象で、転位の拡散に律速される低温累乗則クリープと、格子拡散に律速される高温累乗則クリープがあります。

クリープ破断における破面について簡単に述べます。クリープ破断のマクロ破面は粒界から塑性変形を伴って割れることから分類的には延性破壊となります。マクロ破面観察でもって破壊原因がクリープと判断するのは困難です。一方、ミクロ破面は粒界割れ破面になります。この場合、割れ破面上に多数のディンプルが観察され、クリープに特徴的な破面模様になります。従って、ミクロ破面観察によってクリープ破壊であるかどうかの判断が比較的容易にできます。

2. クリープ試験

クリープ試験は通常、平滑試験片に引張力を加え、加熱炉中で試験片温度を一定に保持して行われます。クリープ試験結果は、各種試験温度に対して負荷応力と破断時間の関係で表示されます。材料をクリープが懸念される高温環境下で使用する場合は、同一材料について高温の特定温度における等温クリープ破断曲線を用意して寿命予測することが必要です。等温クリープ破断曲線とは縦軸が負荷応力、横軸がクリープ破断時間（対数）でクリープ試験結果を示した図です。これをもとに温度と応力を X、Y 軸として破断時間をパラメータとした線図も作成できます。前者は等温破断曲線と呼び、後者は等時破断曲線と呼ぶこともあります。両者についてのクリープ破断曲線の模式図を図 2 に示します。

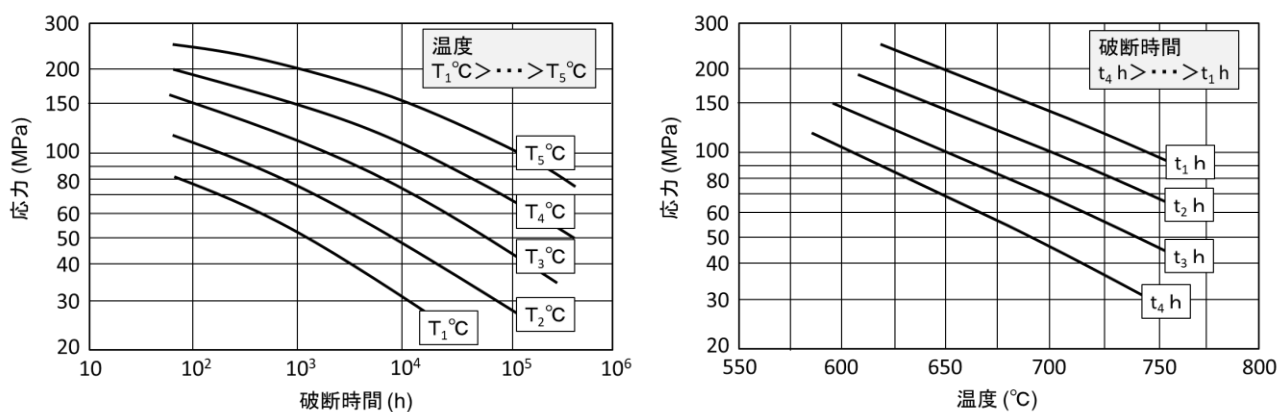


図 2 クリープ破断曲線の模式図（等温破断曲線および等時破断曲線）

図 3 は、代表的な鉄鋼材料である低炭素の炭素鋼、Cr-Mo 系低合金鋼、および SUS304 鋼について一般的に知られているクリープ破断曲線の一例であります。いずれも試験温度が上昇すると破断寿命が著しく低下しますが、耐クリープ性能は鋼種によって大きく変わっています。例えば、炭素鋼の 500°C での破断寿命に対して合金鋼では 600°C 近くまで、SUS 鋼では 700°C まで耐えられることがわかります。SUS304 鋼はクリープ強度がかなり高く、代表的な高温用材料として知られています。

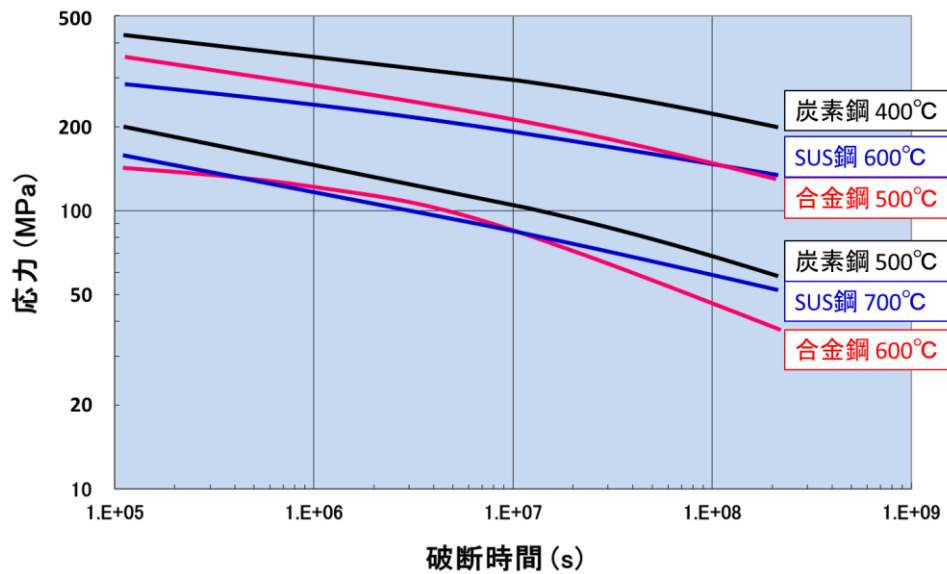


図3 代表的な鉄鋼材料のクリープ破断曲線の一部

3. クリープ寿命評価

高温構造用材料の性能評価や許容応力の決定には、その材料の高温における使用条件下での破断時間が必要であります。しかし、クリープ試験は非常に長い試験時間がかかります。そこで、温度を上げたり応力を上げたりして加速試験を行うこともあります。この短時間試験データを定式化することで長時間挙動を推定することになります。この定式化は広義的に時間-温度パラメータ (TTP) 法と呼ばれますが、クリープにおける具体的な手法としては Larson-Miller (ラーソン・ミラー) 法、Manson-Haferd 法および Orr-Sherby-Dorn 法と呼ばれる各手法があります。この中で Larson-Miller 法は古くから最も広く行われている一般的な手法です。ここでは Larson-Miller 法による主破断曲線について説明します。なお、Manson-Haferd 法は温度と破断時間に関するパラメータ定数をさらに増やした手法で、また Orr-Sherby-Dorn 法はクリープひずみについて温度の影響を修正した手法ですが詳細は省略します。

クリープ速度の温度依存性が熱活性化過程であることを利用しています。クリープ破断時間がクリープ速度に逆比例すると仮定して、Larson-Miller 法では $T(C + \log t)$ の値が一定値になることを利用します。ここで、 T : 絶対温度、 C : パラメータ定数、 t : 破断時間であり、この一定値を Larson-Miller パラメータと呼びます。

図4は Larson-Miller 法による主破断曲線の求め方を表した図です。低応力側のクリープ試験では加速試験として温度を高温にして破断までの時間を短くします。

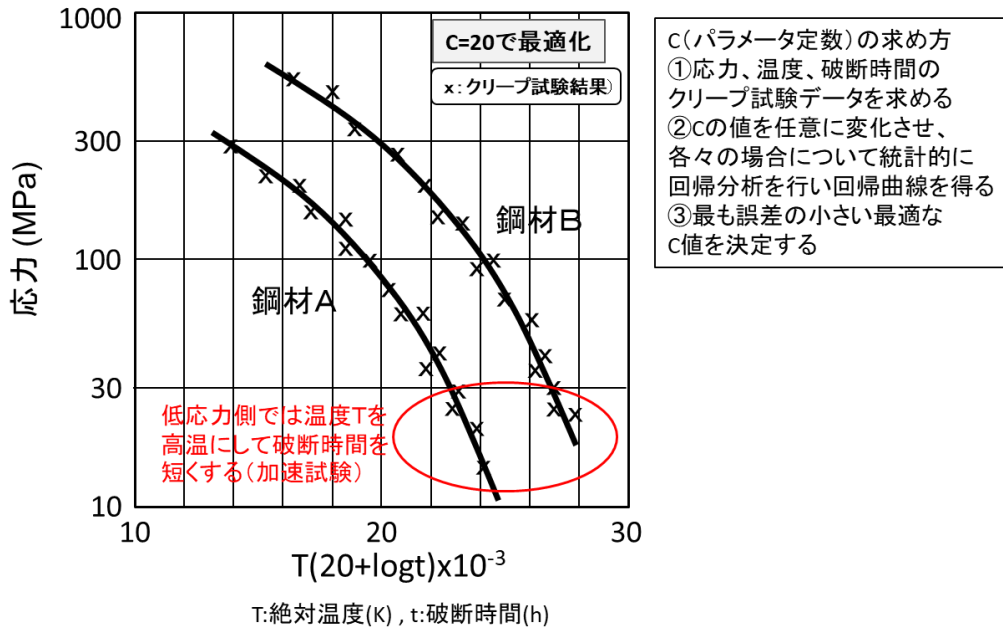


図4 Larson-Miller法による主破断曲線の求め方

主破断曲線では X 軸に Larson Miller パラメータ： $T(C + \log t)$ を取り、Y 軸に負荷応力を取ります。一本の曲線になるように統計的に最適化することでC値が求められます。そして同一鋼材毎に一本の曲線（主破断曲線）が得られることとなります。このようにして求めた主破断曲線を基に、低温かつ長時間側のクリープ強度と寿命を外挿することができます。

ここで、パラメータ定数Cの値が多数の鉄鋼材料ではほぼ 20 になることが知られています。代表的な鉄鋼材料の Larson-Miller 主破断曲線の分布域を図5に示します。図5には炭素鋼、フェライト系耐熱鋼、SUS304 鋼について各主破断曲線の分布域を示しました。炭素鋼やフェライト系耐熱鋼には種々の鋼材がありますが、図5に示した分布域の中にほとんど収まることが知られています。SUS304 鋼は通常、図中の点線で示した付近のグラフになります。一定応力、一定温度Tで見れば、X 軸の Larson-Miller パラメータが大きい材料ほど破断時間tが大きくなって長寿命になります。図中の鋼材では SUS304 鋼が最も耐クリープ性能に優れることを意味しています。

耐熱鋼としてはフェライト系耐熱鋼とオーステナイト系ステンレス耐熱鋼が代表的です。フェライト系耐熱鋼は熱膨張係数が小さく、熱伝導度が高い特長があり、Cr-Mo 系耐熱鋼などが有名です。オーステナイト系耐熱鋼は結晶構造が面心立方格子でCrを多量に含有するため、高温強度に優れています。オーステナイト系耐熱鋼では SUS304 鋼をベースにして種々の耐熱鋼が開発されています。

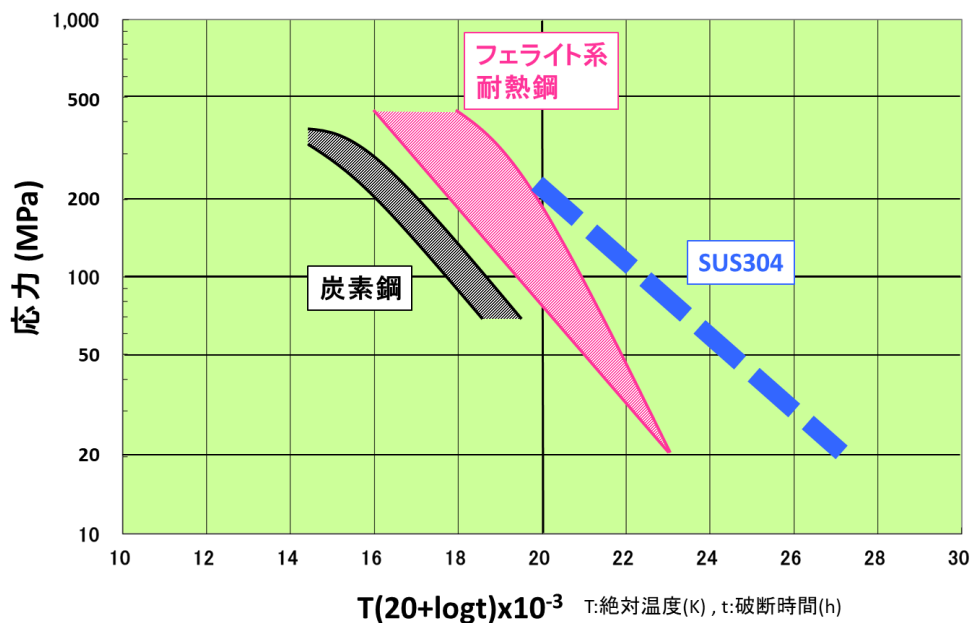


図5 代表的な鉄鋼材料の Larson-Miller 主破断曲線の分布域

次に、最小クリープ速度と破断時間との間に比較的良好な相関があることが一般的に知られています。図6は鉄鋼材料について最小クリープ速度と破断時間の関係を調べた図で、広い高温温度域で比較的狭い範囲の中に試験データが分布することが知られています。この関係図は Monkman-Grant の関係と呼ばれています。図1のクリープ曲線で第II期の定常クリープ域の勾配が求めれば、その値が最小クリープ速度になります。その値で図6を使えば、およそのクリープ寿命を推定することができますようになります。

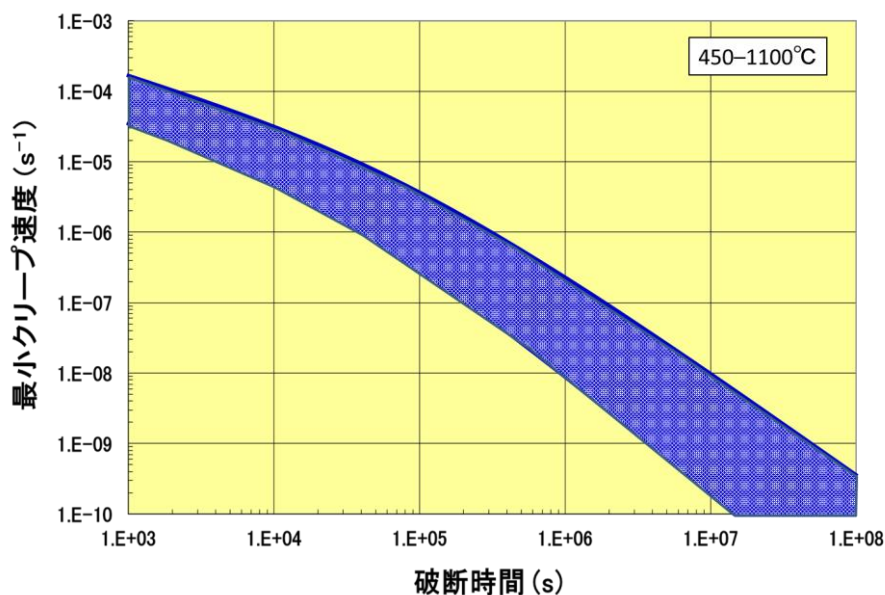


図6 鉄鋼材料の最小クリープ速度と破断時間の関係図