

名誉会員からのメッセージ

# クリープ破断データのばらつきとその解釈

## Scatter of Creep Rupture Data and its Interpretation

東北大学 名誉教授 丸山公一



### 1 はじめに

工業材料の性能を測った実験データは、あるばらつき幅を持って分布する。ここでは、材料性能の例として「応力下で材料がクリープ破断する時間」を選び、実験データには代表的耐熱鋼「9Cr-1Mo-V-Nb鋼 (Gr.91鋼と呼ぶ) のクリープ破断データ (クリープ試験温度  $T$ 、試験応力  $\sigma$ 、破断する時間  $t$  からなる)」を選ぶ。そして、高温プラント設計・管理分野と耐熱材料開発分野それぞれで、同じデータ点のばらつきがどのように取扱われてきたかを紹介し、いかに取扱うのが望ましいかを考えてみたい。

600と650°Cで一定応力を負荷した時に、Gr.91鋼がクリープ破断する時間と応力の関係の実例を図1<sup>1)</sup>に示す。太い線は図中のデータでの破断時間の平均値を表し、細い点線は分布する破断時間に対する99%信頼区間の上限と下限を示す。Gr.91鋼での  $\log \sigma - \log t$  曲線 (図中の太い線) には、その傾き (応力指数の逆数) が異なる3領域M, LとGが出現する。図では、線の種類を変え、領域の違いを区別している。世界中の多数の製造業者がこの工業材料を作るので、同じGr.91鋼でも、ある条件 ( $T, \sigma$ ) でクリープ破断する時間は25倍 (99%信頼区間の幅) 変動する。なお90%信頼区間なら、変動幅は7.8倍である。ここでは、このクリープ破断データのばらつきを議論の対象とする。

Gr.91鋼の化学組成や熱処理 (焼ならしと焼戻し) 条件は材料規格が決めるが、ある範囲の変動を許す。そのため、Gr.91鋼という「工業材料」は、化学組成、製品形状や製造方法 (大径のパイプ、小径のチューブ、板、鍛造品、鋳造品)、熱処理条件などが異なる多くの「素材」を含む。図1には、そのような多素材のデータ点をまとめて示した。ここでは、「工業材料としての性能の不確定性」、「素材間の性能差」と「単一素材での性能の不確定性」という3つの事柄の区別に注意して、Gr.91鋼でのクリープ破断データのばらつきを見ていく。な

お、プラント設計・管理分野では素材を区別しない一括した材料が、材料開発分野では素材が着目される傾向にある。

### 2 データばらつきの原因

文献<sup>2)</sup>に収録されているGr.91鋼の素材名801141Pを例として応力とクリープ破断時間の関係を図2に示す。この素材は、文献<sup>2)</sup>が含む多くの素材の中から、データ点数が多く、長時間までのデータ点があること、のみを条件として選択した。ばらつき幅が特別に広い例ではない。この図でも太い実線は破断時間の平均値で、細い実線は99%信頼区間の幅を示す。細い点線は、領域M, LとG間の境界線である。各領域の出現理由は文献<sup>3)</sup>に説明されている。図2に示す単一素材でのデータ点のばらつきは、多くの素材を含む図1より狭い。このことから、多素材の図1でデータ点がばらつく原因とし

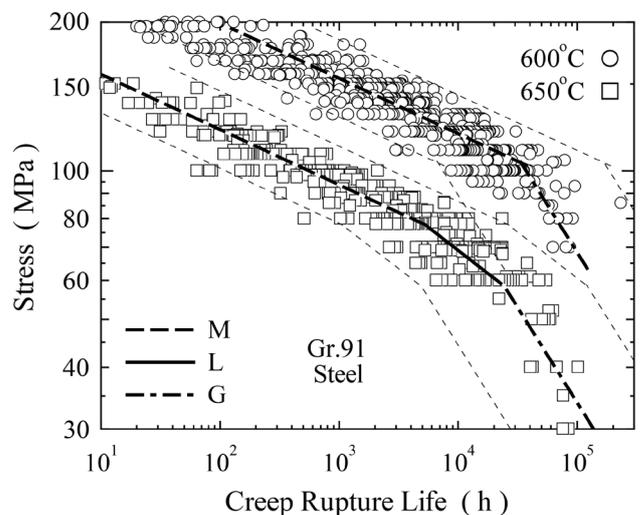


図1 多数の素材からなるGr.91鋼でのクリープ破断時間と応力の関係。太い線は破断時間の平均値、細い点線は99%信頼区間の上限と下限線

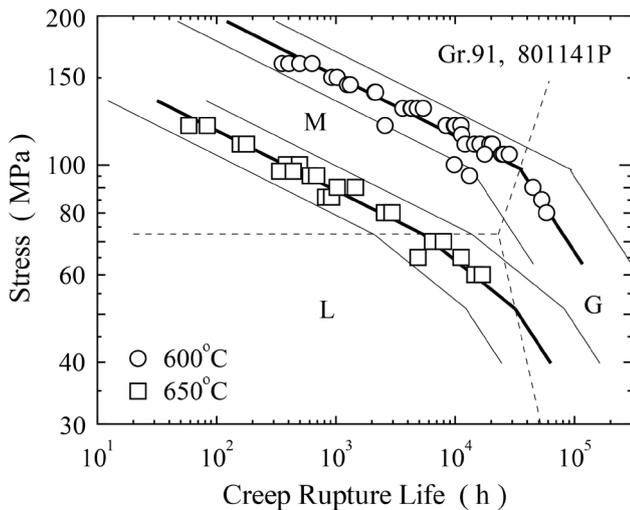


図2 平均的なばらつきを示すGr.91鋼素材801141Pでのクリープ破断時間と応力の関係。細い点線は領域M、LとG間の境界線

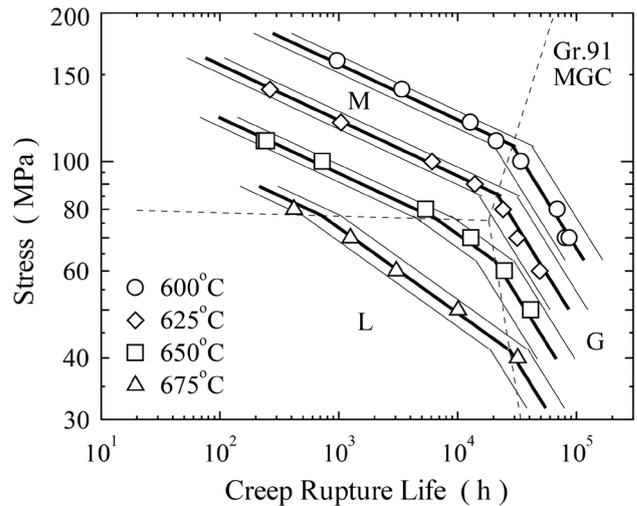


図3 Gr.91鋼素材MGC (ばらつきが少ない例)でのクリープ破断時間と応力の関係。細い実線は99%信頼区間の幅を示す

て、次のことが考えられる。(1) 素材間のクリープ破断時間差、(2) 素材内での破断時間の不確定性(本来のばらつき)、(3) 実験誤差。図2のばらつきに対する(2)と(3)の寄与割合を知ることは、以下の議論に不可欠である。実験誤差を可能な限り小さくしたときのばらつき幅を知れば、この寄与割合が推測できる。

クリープ破断時間 $t_r$ は次のように表現される。

$$t_r = t_0 \sigma^{-n} \exp(Q/RT) \dots\dots\dots (1)$$

$t_0$ はその素材の強度に依存する定数、 $n$ は応力指数、 $Q$ は活性化エネルギー、 $R$ は気体定数である。JIS規格では、600~800°Cでクリープ試験する場合、指定した温度と実際の試験温度の間に $\pm 4^\circ\text{C}$ のずれを許す。Gr.91鋼の短時間領域での典型的な値 $Q = 600\text{kJ/mol}$ の時、温度が $8^\circ\text{C}$ 変わると、破断時間は2.1倍変動する。この変動幅は、図2のばらつき(99%信頼区間の幅が6.7倍、90%信頼区間なら3.4倍)の全てではないが、半分程度に相当する。このように試験温度のずれは、実験誤差の重要な原因である。

物質・材料研究機構(NIMS)では、温度の許容ずれをJIS規格の半分とするなど、高精度なクリープ試験を行う工夫をしている<sup>4)</sup>。温度差が $4^\circ\text{C}$ なら、破断時間の変動幅を1.5倍に抑えることができる。図3<sup>3)</sup>に、NIMSが報告しているGr.91鋼素材名MGC<sup>5)</sup>での応力とクリープ破断時間の関係を示す。ここでも、太い実線は破断時間の平均値、細い実線は99%信頼区間の上限と下限、細い点線は領域間の境界線である。この図での破断時間の変動幅は2.1倍(99%信頼区間)から1.6倍(90%信頼区間)となる。図3のデータ点の変動幅自体が狭いことと、その幅が $4^\circ\text{C}$ の温度差による破断時間の変動幅1.5倍に近いことから、単一素材内での破断時間の本来の不確定性は小さいことが分かる。逆に図2のデータ点は、かなりの

実験誤差を含む。

99%信頼区間を例として、図3での破断時間の変動幅2.1倍と $4^\circ\text{C}$ の温度差による変動幅1.5倍の差、すなわち1.4倍が素材内での破断時間の不確定と仮定する。この不確定性1.4倍を基にすると、図2での破断時間の変動幅6.7倍との差、すなわち4.7倍が実験誤差に起因する変動幅となる。そして、図1の変動幅25倍と図2の6.7倍の差、すなわち3.7倍が素材間の破断時間差による変動幅である。これらの変動幅の値は、一例だけに基づく荒い見積もりであるが、データがばらつく3つの原因のおおよその大小関係を教えてくれる。

### 3 工業材料に着目した取組

世界全体を見れば、様々な素材で作ったGr.91鋼製の耐熱構造部材がある。プラントの設計では、どの素材が使われるか分からないという認識に立ち、全素材を単一の「工業材料」として扱う<sup>6,7)</sup>。そして、図1のように全ての素材のデータ点を同じ記号で表示する。すなわち、図1のデータ点のばらつきを工業材料(多素材の集合)としての破断時間の不確定性と捉える。米国機械学会(ASME)ボイラー・圧力容器(BPV)コードを例にとれば、図1のように破断時間に幅があるどの素材を使っても構造部材のクリープ破壊が起きないように、次の2つの応力のいずれか小さい値以下で、Gr.91鋼を使うことになっている。(1) 図1で平均破断時間が $10^5\text{h}$ となる応力の $2/3$ 。(2)  $10^5\text{h}$ でクリープ破断する応力の最小値の80%。高温でのクリープ強度に関するこの基準値を、許容応力と呼ぶ。ASME-BPVセクションXIのReliability and Integrity Managementコード<sup>8)</sup>でも、図1のデータ点のばらつきの全てを工業材料としての破断時間の不確定性と仮定し、ある時

間までにクリープ破断する確率を計算し、確率論に基づく高温構造部材の寿命診断を展開している。

図1の600°Cでのデータ点から30,000h以上で破断するもののみを選んで、図4<sup>1)</sup>にプロットした。(a)では、許容応力の設定を目的とした通例<sup>6,7)</sup>に倣って、全てのデータ点を同じ記号で表示している。クリープ試験は長時間を要し、図4には破断時間が10<sup>5</sup>hを超える点は1点しかない。しかし試験を行えば、10<sup>5</sup>hを超える所にも、多くのデータ点が出現する。我々は、そのような点を想像しながら、図4(a)のデータ点を見る。そして、図4(b)を見なければ、図4(a)の灰色の帯の中に未取得のデータ点が存在すると想像する。

欧州クリープ協同作業委員会 (ECCC)<sup>7)</sup>と経済産業省 (METI)<sup>9)</sup>が許容応力を決めるために提案した応力と破断時間の関係式を、図4中に破線と点線で示す。実線は、素材間で破断時間が違うことを意識してMaruyamaら<sup>1)</sup>が提案した応力と破断時間の関係である。灰色の帯の中央を通る破線と点線は、素材間の強度差を念頭に置かない許容応力の算定では、適切なものとされている<sup>6,7)</sup>。

## 4 クリープ破断時間の素材間差

2項で述べたように、図1でのデータ点のばらつきは、素材間のクリープ破断時間差と実験誤差が主原因で、単一素材内

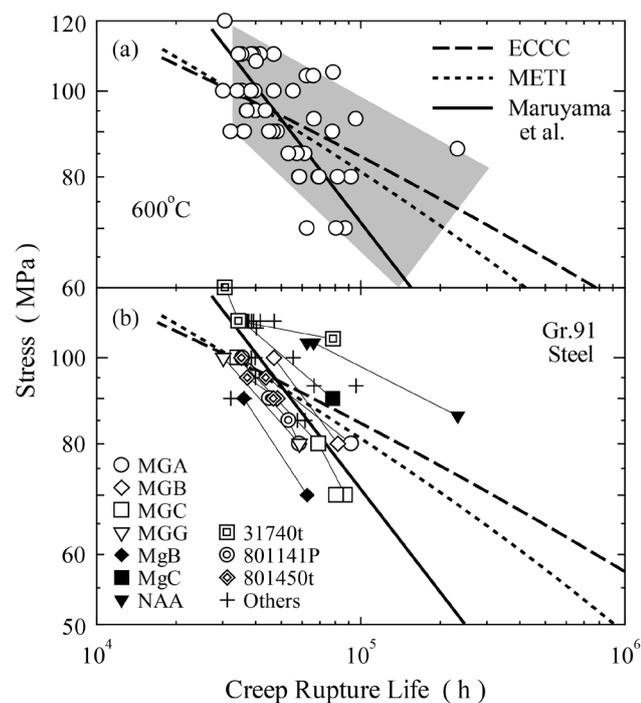


図4 600°Cで30,000hより長いGr.91鋼のクリープ破断データ。点線、破線と実線は破断時間の評価曲線。(a)は全データを同じ記号で表示、(b)は素材毎に異なる記号で表示

でのクリープ破断時間の不確定性の寄与は小さい。ただし実験誤差は注意深く実験すれば除けるので、工業材料のデータがばらつく本質的な原因は素材間の破断時間差である。前項で述べたプラント設計・管理分野の取組では、この素材間の破断時間差を多素材の集合である「工業材料」での破断時間の不確定性と考えた。素材間差は、工業材料としての性能の不確定性と考えてよいのであろうか。

図4(b)は(a)と同じデータ点であるが、素材毎に異なる記号を使い、同じ素材のデータ点を細い実線で結んでいる。図中に1つの応力のデータ点しかない素材をOthersという名前でもまとめた。ここでも、単一素材内での破断時間の不確定性は小さく、素材間の破断時間差が大きいことを確認できる。

図4(b)で明らかのように、同じ素材のデータ点の多くは太い実線に平行に並んでおり、更に低応力のデータ点は細い実線の延長上に出現すると推定される。このことは、図4(a)の灰色の帯の下限線以下にも未取得のデータ点が出現することを意味する。このように、データ点のばらつきを工業材料としての破断時間の不確定性ととらえた図4(a)と、素材間の破断時間差ととらえた図4(b)で、見えるものが異なる。図4(b)の観点に立てば、Gr.91鋼の10<sup>5</sup>hを超える実用域でのクリープ破断時間を記述するのに、破線や点線より実線の方が適切と言える。ただし、素材NAAのように、破線や点線にほぼ並行で、これらの線より長い破断時間となる素材もある。10<sup>5</sup>hを超える領域での各素材の挙動と素材間の破断時間差の原因を解明することは、ぜひ必要である<sup>1)</sup>。それは次項の余寿命評価の際にも役立つ。

## 5 素材に着目した取組

高温プラントで構造部材のクリープ余寿命を評価する際には、その部材を作った素材が特定できる。この場合には、素材を考慮しない図4の破線や点線を実用条件へ外挿して余寿命を評価するのではなく、個々の素材の特性に基づく応力-破断時間曲線を外挿するのがよい。この観点から、図4(b)のようなデータに基づいて10<sup>5</sup>hを超える領域での破断時間を定式化しておくことが求められる。

図4(b)のようにクリープ破断時間は素材毎に異なるので、破断時間の素材依存性を解明すれば、更に長い破断時間を持つ耐熱材料の開発へつながる。この観点から、耐熱鋼のクリープデータを、その素材の化学組成や熱処理条件あるいは材料組織の関数として定式化する試みがなされている<sup>10,11)</sup>。この機械学習に基づく手法は、計算材料学の一分野として最近注目されている。ただしまだ課題も残っており<sup>11)</sup>、今後の展開を期待したい。

## 6 終わりに

Gr.91鋼という名の工業材料が所定の温度・応力条件でクリープ破断する時間は、広い幅にばらつく。プラント設計・管理分野では、このばらつきを多素材からなる工業材料での性能の不確定性と捉え、設計許容応力の設定や破壊の確率論に基づく高温構造部材の寿命診断を展開する。しかし工業材料でのデータ点のばらつきは、クリープ破壊という現象の不確定性と、素材間の強度差に起因する。そしてここで取扱った耐熱鋼のクリープ破断時間では、前者に比べて後者の寄与が、非常に大きい。そのため、特定の部材でのクリープ余寿命の評価や、クリープ強度の材料学的評価では、素材毎に強度が違うことを認識して、データを取扱う必要がある。以上を総合すれば、個々の素材性能をまず理解し、それを基盤として素材の集合体である工業材料の性能を体系化し、構造物へと展開するのが理想と考える。

データ点のばらつきの第3の原因である実験誤差は、取除く必要がある。実験誤差を最小限にすれば、図3のようなばらつきの少ない実験結果を得ることができる。このような高精度データは、高温・高圧で使うプラントの安全・安心を確保するのに役立つ。NIMSのクリープデータシート作成活動では、クリープ試験温度の許容ずれをJIS規格の半分に抑えるなど多くの工夫をして、実験誤差が少ないデータを実現している。ただしその実現には、多くの知識や技術の蓄積が不可欠である。そして、そのようにして蓄積された貴重なノウハウを次の世代へ伝承していくこともぜひ必要である。

## 参考文献

- 1) K.Maruyama, D.Deweese, F.Abe and K.Yoshimi : Materials at High Temperatures, 投稿中.
- 2) R.W.Swindeman, M.J.Swindeman, B.W.Roberts, B.E.Thurgood and D.L.Marriott : ASME ST LLC Report, STP-NU-019-1, ASME Standards Technology, LLC, New York, (2009).
- 3) 丸山公一 : 鉄と鋼, 105 (2019), 767.
- 4) 大場敏夫, 澤田浩太, 木村一弘 : 金属, 81 (2011), 1006.
- 5) National Institute for Materials Science : NIMS Creep Data Sheet No.43A, 物質・材料研究機構, つくば, (2014).
- 6) K.Kimura and M.Yaguchi : Proceedings of ASME PVP Conference, ASME, New York, (2016), PVP2016-63355.
- 7) European Creep Collaborative Committee : ECCC data sheets-update-2019-1, <https://www.eccc-creep.com/wp-content/uploads/2019/12/datasheets-update-2019-1.pdf>, (accessed 2019).
- 8) J.T.Fong, N.A.Heckert, J.J.Filliben and S.W.Freiman : Int. J. Press. Vessels Piping, 173 (2019), 79.
- 9) 経済産業省 : 発電用火力設備における高クロム鋼に対する寿命評価式について, [https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/files/190704.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/190704.pdf), (accessed 2019-07-04).
- 10) A.K.Verma, J.A.Hawk, L.S.Bruckman, R.H.French, V.Romanov and J.L.W.Carter : Metall. Mater. Trans. A, 50 (2019), 3106.
- 11) 木津健一 : 日本機械学会論文集, 87 (2021) 895, 20-00428.

(2021年9月10日受付)