



# FEM解析による高温機器の寿命予測

高温機器の強度設計や寿命推定においてもっとも問題を複雑にしているのは、材料の強度や変形が時間依存性挙動を示す点である。高温ではたとえ一定の応力に保持しておいても、時間とともに部材の変形が進行し、また、逆に歪が保持されている場合には作用している応力が次第に緩和してしまう。このような時間依存の変形挙動を"クリープ"と称する。

いっぽう、負荷応力が頻繁に繰返されて材料が損傷する挙動は"疲労"と称されるが、高温での疲労はクリープが重畳するため応力波形や周波数効果などが現われ、常温とは異なる複雑な挙動を示す。

本稿では"クリープ"と"疲労"が重畳する高温機器を対象として、数値解析による強度設計 (Design by analysis) や寿命予測を行う場合に必要となる試験と解析方法について具体的な機器を例に紹介する。

## クリープ疲労相互作用が問題になる高温機器の事例

D-1

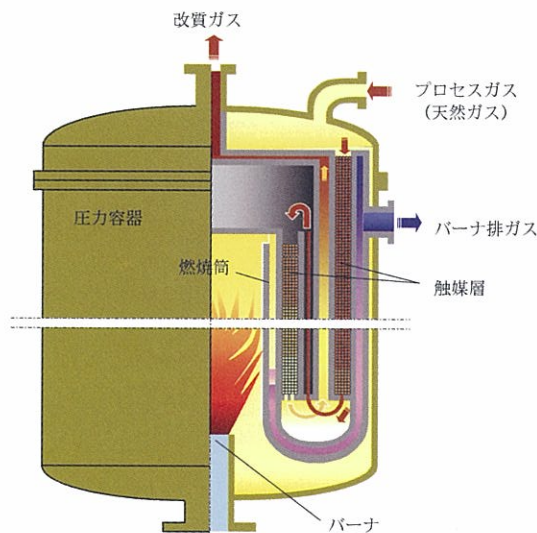
では一体どのような温度域において、クリープと疲労が重畳するような相互作用が問題になるであろうか。一般に材料の融点を $T_m$ とすると、概略 $0.3T_m$ 以上の温度域でクリープ現象が現れる。鉄鋼の場合約 $400^\circ\text{C}$ 以上で、アルミ合金の場合 $200^\circ\text{C}$ 以上、はんだでは常温で既にクリープが問題になる。

低合金鋼や耐熱合金製の発電用蒸気タービンロータ、車室、弁などでは最高温度が $550\sim 650^\circ\text{C}$ 付近で運転されるためクリープ疲労が問題になる代表的な機器であり、ASMEなどの設計コード<sup>1)</sup>や余寿命診断技術<sup>2)</sup>でクリープ疲労相互作用問題が取り扱われている。リン酸塩型燃料電池発電プラント用の改質器では、 $800\sim 900^\circ\text{C}$ の極めて高い温度で頻繁な起動停止が繰返されるため、よりいっそうのクリープ疲労対策が必要となる (第1図)<sup>3)</sup>。

自動車のエンジン部材やコンロッドにはアルミ合金鋳物やアルミ系複合材料が使用され、これらの使用温度は $200^\circ\text{C}$ 以上になることから、クリープ疲労現象が生じているであろう。

また、筆者らに身近なパソコンや電子機器など

の半導体実装部品には、はんだが使用されており、クリープが関与する熱疲労損傷により誤動作や故障が問題になる場合がある<sup>4)</sup>。



第1図 燃料電池断面模式図

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Code Case N-47(1974)
- 2) 藤井ほか：火力原子力発電、(1998), p.263
- 3) 横幕ほか：材料、Vol.37, (1988), p.308
- 4) 井上ほか：機械学会第74期総会講演論文集, (1997)

## 解析による高温機器の寿命推定の実際

D-2

上記のように、このようなクリープ疲労相互作用条件のもとで使用される高温機器の応力や変形の挙動は極めて複雑であるため、正確な寿命評価には有限要素法 (FEM) などによる数値計算が必須となる。

前述のASMEなどの設計コードでも従来の"経験による設計" (Design by rule) 手法に加えて、"解析による設計" (Design by analysis) 手法が記述されており、特に、近年の計算機や数値計算プログラムの発展により、解析による設計が日常的になりつつある。

しかし、解析に必要な材料の高温物性に対する理解が不十分であったり、前述のとおりクリープと疲労が重畳するなどの複雑な問題があって、クリープを考慮した解析は十分広く適用されるには至っていないのが現状である。

そこで、ここではタービン弁や燃料電池発電用

改質器の例をとって、FEM解析による寿命推定方法について紹介する。

### 寿命推定の流れ

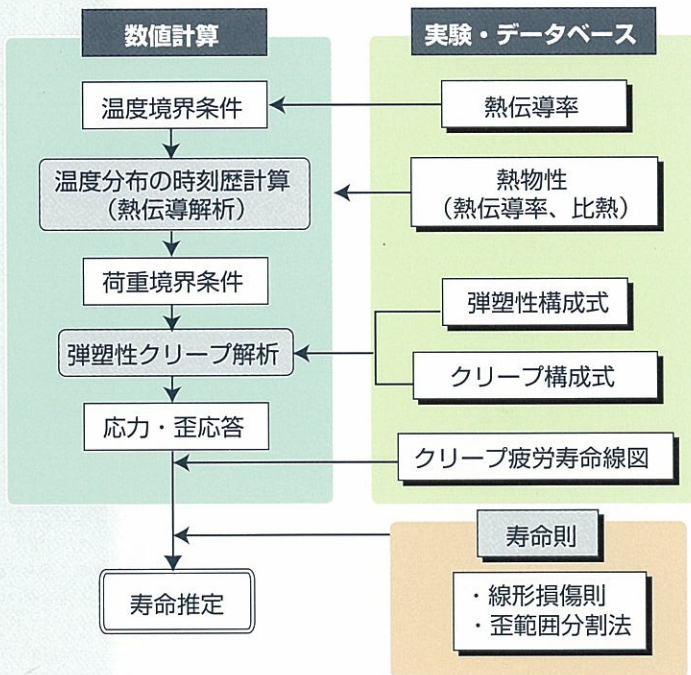
FEM解析による寿命推定は、第2図に示すように、大別して"数値計算"、"実験・データベース"および"寿命則"の三つのパートからなる。

ここでは紙面の制限から温度解析にかかわる部分は割愛し、クリープと疲労に関する部分を取り上げ、その留意点を述べる。

### 応力と歪の構成式

FEM解析を行うためには、まず対象温度領域における材料の応力と歪関係を記述する式 (これを構成式と呼ぶ) が必要となる。





第2図 寿命推定のフローチャート

高温においては降伏応力が低下すること、また熱応力はしばしば容易に降伏応力を越えてしまうことから弾塑性構成式が必要である。

ここで重要なことは静的引張試験で得られた応力・歪特性と繰返し状態のそれとは大きく異なる場合がある点である（第3図(a)）。

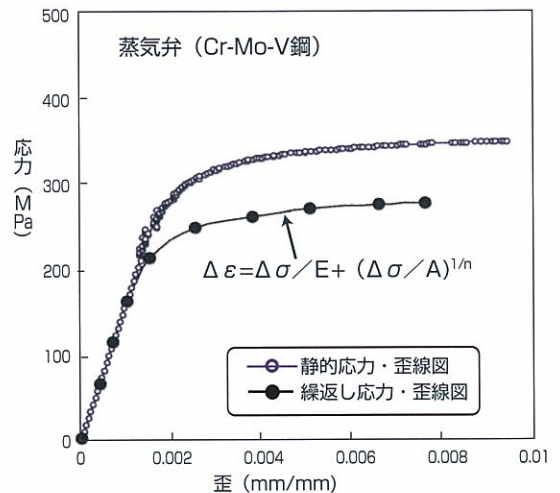
特に、高温では繰返しとともに組織変化が重畳して硬化や軟化がおきる場合があり、実験やデータベースにより、この点を確認しておくことが肝要である。

応力・歪特性が得られれば、これを例えば温度ごとに2直線近似や第3図(a)中に示したRamberg-Osgood式などで近似して、FEMプログラムの材料パラメータとして与える。

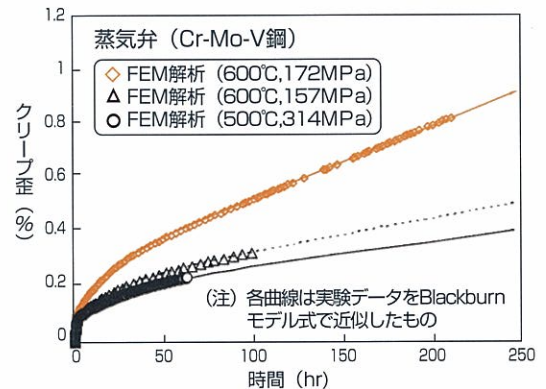
次に材料の応力、クリープ歪、温度および時間の関係を記述するクリープ構成式が必要である。クリープについては時間とともに歪速度が低下する遷移クリープ、ほぼ一定となる定常クリープ、増大する加速クリープの三つの挙動を生じるが、これらをすべて含んだモデル化は取り扱いを複雑にし計算時間が膨大になるため、目的に応じた適切な構成式のモデル化を行う。

定常クリープ域のみを近似するNorton則<sup>5)</sup>がもっとも一般的であるが、繰返し負荷の場合には遷移クリープも考慮したBlackburnのモデル式など<sup>6)</sup>が望ましく、これらの構成関係をFEMプログラムの材料パラメータとして与える。

第3図(b)は単軸引張クリープ試験でえられたBlackburn式を用いて、FEMプログラムによりクリープ解析を行った事例であり、同プログラムにより遷移、定常クリープ挙動が精度よく求められることがわかる。



(a) 弾塑性構成式



(b) クリープ構成式

第3図 蒸気弁材料に対する構成式の例

## 有限要素法による応力・歪解析

上記二つの構成式が得られれば、次に対象とする機器の構造データ（要素分割図）を作成し、この構造に対して運転中における

- ・温度分布
- ・荷重境界条件（圧力、外部荷重、自重）
- ・拘束、支持条件

を与えてFEM弾塑性クリープ解析を実施することになる。

なお、温度分布の時間的変化は図2に示したように事前にFEM熱伝導解析などで求めておく。弾塑性クリープ解析では微小経過時間ごとの繰返し計算が実行され、一般的な弾性解析に比べて計算時間が長くなるため、評価したい部位の形状や温度分布状況に応じた適切な要素寸法と要素数にすることが必要となる。

第1図に示した改質器のFEM要素分割図と解析で得られた変形図を第4図に示す。また、第5図(a), (b)に、ある時刻における温度と相当応力の分布を示す。これらの温度および応力分布から損傷の問題となる部位を明確にすることができる。

さて、寿命を予測するためには評価部位におけ

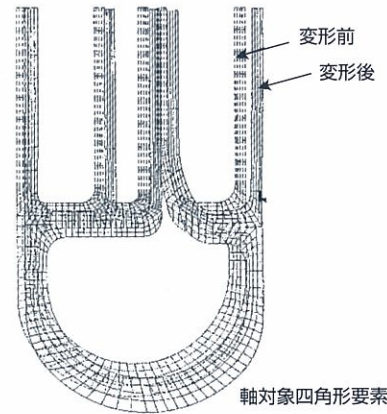
5) F.H. Norton, The Creep of Steel at High Temperatures, McGraw-Hill, (1929)

6) L.D. Blackburn: The Generation of Isochronous Stress-Strain Curves, ASME, (1972), p.15



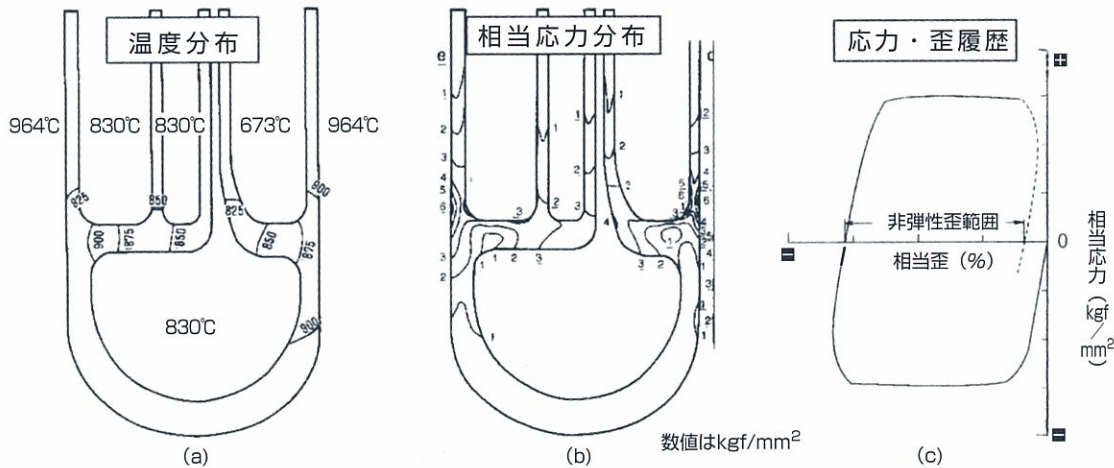
る時々刻々の応力と歪の履歴（応力・歪ヒステリシスループ）を明らかにする必要がある。クリープを伴う繰返し変形の場合にはこのループが閉じた形にならずサイクルごとにシフトする場合がある。この現象を"ラチェット変形"と称し、寿命推定にこの影響を配慮する必要があることは言うまでもない<sup>7)</sup>。そのため複数サイクルの解析が必要になる場合がある。第5図(c)に相当応力・相当歪のヒステリシスループの例を示す。

以上でFEM解析の工程は終了し、後は寿命評価用材料特性に上記の応力・歪応答解析結果を適用することにより寿命推定が可能となる。



第4図 要素分割図および変形図

7) 横幕ほか：材料、Vol. 46, (1997), p.288



第5図 温度、相当応力分布および応力・歪のヒステリシスループ（改質器の例）

## 寿命則と寿命推定

クリープ疲労重畳条件下での寿命則として最も単純でASMEコードにも採用されているのがRobinson-Taira則<sup>8),9)</sup>である。

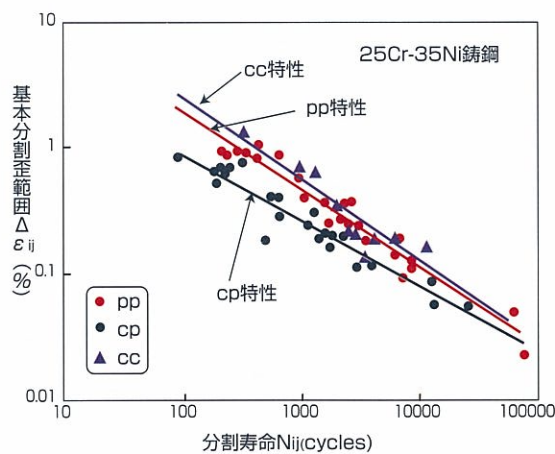
これは解析で得られた1サイクル中の応力・歪応答に対して、クリープと疲労損傷量 $\phi_c$ および $\phi_f$ をそれぞれ単独に算出し、両者の累積和 $\Sigma(\phi_c + \phi_f)$ が特定の値D（一般に1）に到達した時点で寿命とするものである。

この方法は取り扱いが容易であるが、寿命推定精度に難があり、場合によっては非安全側の寿命を与えるため、いくつかの改良手法が提案されている。特に歪範囲分割法<sup>10)</sup>と呼ばれる手法では、解析でえられた1サイクル中の非弾性歪範囲を四つの基本的成分 $\Delta \varepsilon_{ij}$  ( $i,j$ はpp, cp, pc, およびcc)に分割し、第6図に示す基本分割歪 $\Delta \varepsilon_{ij}$ と分割寿命 $N_{ij}$ の実験式( $\Delta \varepsilon_{ij} = A_{ij} N_{ij} B_{ij}$ )にこの分割歪を適用して $N_{ij}$ を求め、これをさらに

$$1/N = 1/N_{pp} + 1/N_{cp} \text{ (or } + 1/N_{pc}) + N_{cc}$$

に代入して寿命を推定する。

この方法は、寿命推定精度が前記のRobinson-Taira則に比べて優れているため、数値解析技術



第6図 歪範囲分割法のための基本寿命線図

の発展とあいまって適用されるケースが増えつつある<sup>11),12),13)</sup>。

当社ではタービン部品、自動車エンジン部品などの寿命推定に本手法を適用し、強度設計や余寿命診断に役立てている。

読者の皆様に本手法をご活用いただければ幸甚である。

[エンジニアリングメカニクス事業部 CAE技術部 横幕俊典]

8) E.L. Robinson : Trans. ASME, Vol. 160, (1938), p.253

9) S. Taira : Creep in Structures, Academic Press, (1962), p.96

10) S. S. Manson : ASTM STP520, (1973), p.744

11) 横幕ほか：材料、Vol.46, (1997), p.288

12) J. F. Delongほか：火力原子力発電, 35, (1984), p.1249

13) 早川ほか：材料、Vol.48, (1999), p. 604