クリープ疲労微小き裂発生・成長の数値シミュレーションによる高温構造材料の余寿命診断方法*

北村 隆行^{*1}, 多田 直哉^{*2}, 大谷 隆一^{*1}

Method for Evaluation of Remaining Life in High Temperature Component Based on Numerical Simulation of Small Crack Initiation and Growth in Creep-Fatigue

Takayuki KITAMURA, Naoya TADA and Ryuichi OHTANI

In order to achieve the objective of securing the reliability of high-temperature components, it is necessary to establish a method for predicting the remaining life of their materials subjected to severe creep-fatigue damage. It was reported by the authors that multiple small cracks initiated along grain boundaries on the specimen surface at the very early stage of life in creep-fatigue and their growth and coalescence formed the main crack which induced the failure. Moreover, the process of small crack initiation and growth showed random behavior due to microstructural inhomogeneity. A stochastic model was proposed and the failure process was numerically simulated by means of the Monte Carlo method. This paper provides a scheme of the small-crack-simulation-method for the evaluation of remaining life of the materials in high-temperature components, which is an integration of our previous studies and is summarized in a flow chart.

Key Words: Fatigue at High Temperature, Life Prediction, Creep, Crack Propagation (Crack Growth), Life Assessment, Remaining Life, High-Temperature Component, Creep-Fatigue, Small Crack, Crack Initiation, Numerical Simulation

1. 緒 言

火力発電プラント等においては、新規設備の立地難や経済的観点より経年高温機器・構造物の寿命延伸が重要な課題となっている。これらを長期にわたり安全かつ効率よく使用するためには、部材の余寿命を正確に把握し、適切な運用を行う必要がある。特に、高温機器ではクリープ疲労による破壊の防止が重要である。著者らは、耐熱金属のクリープ疲労試験の詳細な観察より、試験片表面上に一粒界長さ程度の微小き裂が多数発生し、それらの成長・合体により破損がもたらされることを明らかにしてきた^{(1)~(3)}。この微小なき裂は、寿命のごく初期（条件によっては試験片の破損寿命の10%以下）から発生し始めるため、高温機器・構造物の余寿命は微小き裂の挙動に基づいて合理的に予測されるものと考えられる。ただし、微小き裂発生・成長・合体過程は、材料の微視組織の影響を受けて不規則であるため、その予測は容易ではない。著者らは、この不規則な過程を確率論的にモデル化し、モンテカルロ法

を援用して数値シミュレーションを行う方法を開発した^{(3)~(6)}。本論文では、現在までに得られている成果を総合して、微小き裂シミュレーション法に基づく高温機器・構造物の合理的かつ簡便な余寿命診断方法を提案する。

2. 微小き裂発生・成長シミュレーションの概要

本余寿命診断法の中核をなす微小き裂発生・成長の計算機シミュレーションについては、前報⁽⁴⁾⁽⁵⁾にその詳細を示した。ここでは、その概要について簡単に説明する。

まず、計算機により核生成・成長法（付録参照）に基づいてランダムな結晶粒界ファセットを作成する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。三次元空間中の粒界ファセット分布を作成することも可能であるが、微小き裂は表面から発生する場合が多いことを考慮すれば、表面部分のファセットだけを作成して微小き裂シミュレーションを行うほうが効率がよい場合が多い（擬三次元粒界）。さらに簡便化する場合によっては、表面上の粒界（隣接三重点間の粒界）を応力軸に垂直な方向へ投影した線分を直線状に並べた一次元粒界を用いることもできる⁽⁴⁾。

作成した粒界ファセットを用いて以下の手順に従っ

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年1月7日。

^{*1} 正員、京都大学工学部（〒606 京都市左京区吉田本町）。

^{*2} 准員、京都大学大学院。

でシミュレーションを行う。なお、簡単のためここでは一次元粒界に対するシミュレーション手順を示す。擬三次元粒界については前報⁽⁵⁾に詳細が示されている。

(1) クリープ疲労微小き裂は、粒界ファセットを単位として発生・成長する。

(2) 各粒界ファセットは、ランダムな破壊抵抗 R を有する。すなわち、 R は確率変数である。

(3) 単位繰返し数ごとに各粒界ファセットに破壊駆動力 D を与える。ただし、 D は確定変数とし、駆動力がき裂による応力場の影響を受けることを考慮して

$$D(c/l) = F + K \cdot (c/l) \quad (F, K: \text{定数}) \quad \cdots (1)$$

とする。ここで、 c はき裂半長、 l は平均投影粒界長、 $D(0) = F$ はき裂に隣接していない粒界の駆動力である。き裂発生は F によって、き裂成長挙動は主に K によって特徴づけられている。

(4) 破壊駆動力は破壊抵抗値を単位繰返し数当たり D ずつ減少させる。

(5) 残存破壊抵抗の値が零ないしは負になったとき、その粒界が破壊する。破壊した粒界が他のき裂と隣接していないとき、その粒界の破壊を「き裂発生」と呼び、他のき裂と隣接しているとき「き裂成長」とする。

図1と図2に、304ステンレス鋼のクリープ疲労試験(923 K, ひずみ制御, slow-fast, 真空中)における試験片表面の微小き裂の様相と本シミュレーションによって得られたそれに対応する計算結果を示す。図より、シミュレーションは多数分布微小き裂の様相をよく再現していることがわかる。本シミュレーションは、き裂密度やき裂長さ分布等の定量比較においても試験観察結果と一致することが報告されている^{(3)~(6)}。

3. 余寿命診断方法

余寿命診断方法の流れ図を図3に示す。本方法は以

下の四つのStepからなっている。

Step 0 : 寿命予測解析の準備。

Step 1 : 微小き裂(長さ10~30 μm 程度、あるいは1結晶粒界長さ)の発生寿命予測。

Step 2 : き裂(30 μm ~数mm)成長過程のシミュレーションに基づく微小き裂成長寿命予測。

Step 3 : き裂(数mm以上)成長過程のシミュレーションに基づく巨視き裂成長寿命(最終破壊寿命)予測。

さらに、図3では、各Stepの作業内容をより明確にするため、現場において行うもの(実機調査)、実験室・研究室で行うもの(基礎解析)、シミュレーション計算を行うものの3種に分類して示した。なお、Step 1から3は、各々クリープ疲労破壊過程の初期、中期、末期寿命予測に対応するものと考えることができる。

Step 0 大きな構造物全体の詳細なシミュレーションは原理上可能であるが、計算時間や容量を考慮すれば現実的ではない。一般に、過去の事故・故障事例や応力解析等の結果を参照すれば、損傷の高い領域を選定することが可能であるから、シミュレーション領域を限定して詳細な解析を行うほうが賢明である。測定領域を限定し、極値統計等の援用を考えれば、パーソナルコンピュータでも本寿命予測は十分可能である。ただし、速い計算速度やわかりやすい入出力のためのグラフィックスが必要な場合、および、他のプログラム(例えば、材料や機器・構造物に関するデータベースや既存応力解析プログラム)と組合せて本診断方法を用いる場合には、エンジニアリング・ワークステーションまたは大型計算機が必要となる。

余寿命推定を行う構造物の部位が決定できれば、その危険部分のレプリカを採取する。これより結晶粒形状・寸法を測定し、その統計的なデータを得る。ここで、計算機援用画像処理システムを利用すれば、効率

図1 304ステンレス鋼平滑試験片のクリープ疲労における表面微小き裂の様相(923 K, 大気中, ひずみ範囲1%, $N=150$, $N/N_f=0.4$)

図2 数値シミュレーションより得られた図1に対応する微小き裂の様相

図 3 微小き裂発生・成長の数値シミュレーションに基づく余寿命診断方法の流れ図 (次ページへ続く)

図 3 微小き裂発生・成長の数値シミュレーションに基づく余寿命診断方法の流れ図（前ページの続き）

的な測定ができる⁽⁷⁾。この測定結果と統計的に結晶粒形状・寸法が一致するように、試行錯誤により核生成・成長法における適切な変数値 P, G を選択し、計算機により一次元（擬三次元、三次元）の結晶粒界を作成する（付録参照）。この P, G 値を用いれば、部材と統計的に同一の幾何学的形状を有する結晶粒を、微小き裂発生・成長シミュレーションに必要な任意面積（体積）分、数値的に発生させることができる。

次に、シミュレーション粒界に破壊抵抗値 R を与える。著者らは、304 ステンレス鋼のクリープ疲労試験におけるき裂密度変化より、一様分布乱数が破壊抵抗値の分布として適当であることを明らかにした⁽⁹⁾⁽⁴⁾。したがって、第一次近似として一様乱数を用いることができるが、正確には対象材の試験片を用いてあらかじめクリープ疲労試験を行い、そのき裂密度変化より破壊抵抗分布を決定するほうがよい。

Step 1 まず、運転条件・履歴を調査して各部の温度・圧力等を求め、シミュレーション領域の応力・ひずみ等を得る。実験室で別途行ったクリープ疲労試験結果（例えば、クリープひずみ範囲と F の関係）を参照することにより粒界の初期破壊駆動力 F が決定できる。第1回めのき裂発生シミュレーションではこの値を用いてき裂発生寿命を予測する。

各定期点検時に実機よりレプリカを採取し、微小き裂の密度およびき裂長さ分布を測定する。画像処理を用いれば、その測定は容易になる⁽⁷⁾⁽⁹⁾。測定結果より前回点検時に行ったシミュレーションに用いた破壊駆動力 F を修正し、この F を将来のき裂発生状態の予測に適用する。このように、駆動力の値に実機観察による修正を加えることで、予測精度の向上が期待される。

Step 1 における寿命基準としてき裂密度をとる。あ

らかじめ、許容されるき裂密度を定めておき、シミュレーションではそれに達する時点でき裂発生寿命として予測する。なお、図3中に破線で示したように、実際よりも過酷な条件を設定してき裂発生状態を予測し、実機の安全裕度を確認することもできる。また、運転条件を変える場合にも、第1回めの解析と同様に破壊駆動力 F を決定してき裂発生寿命を予測することができる。

発生したき裂の多くは停留するが、いくつかのき裂は単独あるいは他のき裂との合体を伴いながら成長する。したがって、2～3結晶粒界長さ以上のき裂が認められるようになると Step 2 の微小き裂成長解析が必要となる。

Step 2 き裂が発生すると、き裂による応力拡大のため隣接粒界の破壊（き裂成長）がおりやすくなる。この効果は、き裂成長の破壊駆動力 K としてシミュレーションに取り入れられている。Step 1 で得られた応力・ひずみと巨視き裂成長則⁽¹⁰⁾より微小き裂成長の初期破壊駆動力 K を求めることができる⁽¹¹⁾。Step 2 における第1回めき裂初期成長予測では、この値を用いる。

一方、Step 1 と同様に、各定期点検時に実機よりレプリカを採取し、微小き裂の密度および長さ分布を測定する⁽⁷⁾⁽⁹⁾。測定結果より前回のシミュレーションに用いた破壊駆動力 K を修正し、次の予測に適用する。これにより予測精度を向上させることができる。Step 2 における寿命基準として、最高き裂成長速度、最長き裂長さ、き裂密度の3基準値をとる。あらかじめ許容されるこれらの基準値を定めておき、そのうちいずれかが最初に満たされる時点を微小き裂成長寿命として予測する。また、Step 1 と同様に、実際よりも過酷な条件下や異なった運転条件下におけるき裂成長寿命を予測することもできる。

Step 3 巨視き裂（数 mm 以上）の成長についても Step 2 と同様の手順によりシミュレーションができる。しかし、大きなき裂の成長シミュレーションには広い計算領域を設定する必要があり、記憶容量等の点から効率的とは言えない場合がある。主き裂の成長のみを考えるならば、確定論的破壊力学法則⁽¹⁰⁾（クリープ疲労の場合は、き裂成長速度とクリープ J 積分範囲の関係）に基づいてき裂成長寿命を予測するほうが簡単かつ効率的である。例えば、2章で述べた微小き裂シミュレーションにかえて、図4に示すような手順により各サイクルにおけるき裂前縁の破壊力学量を計算しつつ、き裂成長を逐次計算してゆく方法がある⁽¹²⁾。

これを本寿命診断法の流れ図（図3、Step 3）中のき裂

図4 破壊力学法則に基づく巨視き裂成長の数値シミュレーションの流れ図

成長シミュレーション（図中*印）として用いることができる。ただし、主き裂が多数分布する微小き裂の合体によって形成される場合があることも報告されており⁽¹³⁾、このような合体を頻繁に伴う場合には破壊力学法則に基づく方法は有効ではなく、本論文で提案しているシミュレーションを Step 3 まで行う必要がある。

4. 結 言

著者らの開発した微小き裂発生・成長の確率的数値シミュレーションを用いて、高温機器・構造物のクリープ疲労余寿命を合理的に予測する方法を提案した。本方法では、微小き裂発生寿命、微小き裂成長寿命、巨視き裂成長寿命が予測できる。ただし、微小き裂のクリープ疲労下における発生・成長機構については、今なお不明な点も多く残されている。材料や試験条件によって微小き裂の様相が大きく異なる場合もあり、今後も地道な基礎試験によってそれらを解明する努力を続けてゆく必要がある。

一方、本方法におけるシステム構成上の主な課題としては、以下の点があげられる。

(1) 応力解析結果や非破壊探傷結果等の機器・構造物に関する各種情報のデータベース化と本寿命予測法におけるその利用。

(4) 他プログラム（応力、温度解析有限要素法プログラムや画像処理プログラム等）とのリンク。

(3) 現場での使用を考えた対話方式による入力や、わかりやすい結果の表示等のためのソフトウェア開発。

付録 核生成・成長法による結晶粒の作成⁽⁷⁾⁽⁸⁾

モデルは以下のように要約される。

- (1) 材料中に結晶核をランダムに配置する。
- (2) 各々の核にランダムな核生成時間 P を与える。すなわち、 P は確率変数である。
- (3) 各々の結晶核は核生成の後（時間 P の後）、等方的に速度 G で成長する。本来、 G は確率変数であるが、 G を確定変数としても適当な結晶粒形状が得られる場合が多いため、簡単には確定変数とすることができる。
- (4) 粒成長の途中で他の生成相に出会うと、その方向の結晶粒の成長は停止し、結晶粒界を形成する。

本方法では、結晶粒分布は P と G のみによって決定される。

文 献

- (1) 大谷・木南・坂本, 機論, 52-480, A(1986), 1824.
- (2) 大谷・北村・阿部・栗山・三木, 材料, 39-440(1990), 529.
- (3) 大谷・北村・多田・坂本, 機論, No. 880-2(1988-6), 43.
- (4) 大谷・北村・村山・多田, 機論, 54-503, A(1988), 1312.
- (5) 多田・北村・大谷, 機論, 56-524, A(1990), 708.
- (6) 大谷・北村・多田, 機論, No. 900-50(1990-8), 89.
- (7) 北村・多田・栗山・大谷, 文献(5)の702ページ.
- (8) Johnson, W. A. and Mehl, R. F., *Trans. AIME*, 135 (1939), 416.
- (9) 栗山・大谷, 第25回高温強度シンポジウム前刷集, (1989-12), 117, 日本材料学会.
- (10) Ohtani, R. and Kitamura, T., *CJMR*, 3(1988), 65, Elsevier Applied Science.
- (11) Kitamura, T., Ghosn, L. J. and Ohtani, R., *NASA-TM*, 101358(1989).
- (12) Ohtani, R., Kitamura, T., Sakanoue, Y. and Wakabayashi, M., *ISIJ Int.*, 30-10(1990), 838.
- (13) 大谷・北村・多田・阿部, 機論, No. 900-86(1990-11), 628.