



高温機器の余寿命予測システムの開発

—主に蒸気タービンロータを例にして—

大南正瑛*

Development of Remaining Service Life Prediction System for High-temperature Plant Components

—As an Example of Steam Turbine Rotor—

Masateru OHNAMI

1. 材料劣化とばらつき

今日、長年月稼動中の高温機器の余寿命 (remaining life, residual life) を精度よく予測する研究が必要になってきている。その理由は、機器の健全性が設計寿命内ではもちろんのこと、それを越えてどこまで保持できるかを知ることが、安全性と経済性の立場から要請されてきているからであり、また品質保証計画の重要性が再認識されてきているからである。

高温機器については、図1の模式図に示すように使用中の材料劣化、材料のばらつき (材料強度 x_R の分布)、熱・機械的負荷の変動 (荷重 x_L 分布) などによって使用中に不信頼性部分が発生し、それによって破損 (事故) の起こることがあるので、その余寿命推定は決して簡単ではない。

構造設計では、図において $x_L^* \leq x_R^*$ が成立するように設計寿命を決めるのがふつうであり、一般的には安全係数 S を $x_R^0/x_L^0 > 1$ で定義する。使用中に材料劣化が起こる場合、図1の t_2 では $x_L^* > x_R^*$ となつて材料強度と荷重の両分布曲線には重なり部分が生じ、破損 (事故) の確率が増大する。疲労強度を例にとれば、 t_2 における安全係数は \bar{x}_R/\bar{x}_L で与えられ、疲労強度と負荷の両分布から $x_{R-L} \equiv x_R - x_L$ を確率変数とする分布 $f(x_{R-L})$ は図2のようになる。 $x_{R-L} < 0$ では疲労破壊するので、安全係数 S のもとでの破壊確率は $P = \int_{-\infty}^0 f(x_{R-L}) dx_{R-L}$ で与えられる。したがって分布 $f(x_{R-L})$ を決めれば、 P したがって信頼度 $R = 1 - P$ が決まる。一般に S は、 x_R と x_L のばらつきが大きい場合大きく見積もる。このように材料劣化が起こる場合の設計寿命は、破壊確率 P あるいは信頼度 R を考慮した安全係数に基づいて決められる。

同様のことは高温機器におけるクリープ破断寿命や疲

労破壊寿命についてもいえよう。しかしその場合、高温機器が大型化し、多種多様であるうえに、高温長時間使用中の材質変化が一般的にいつて常温使用中のそれに比べて複雑であるので、ばらつき要因は多様であることを

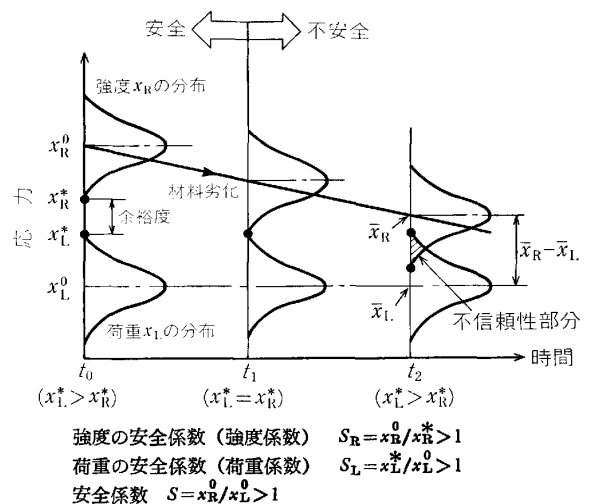


図1 使用中の材料劣化に伴う不信頼性部分の発生

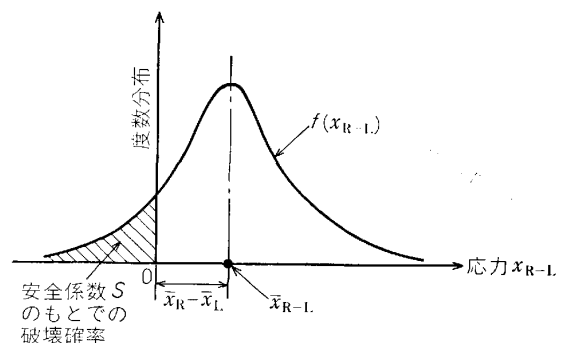


図2 疲労強度に対する安全係数 S のもとでの破壊確率 $P = \int_{-\infty}^0 f(x_{R-L}) dx_{R-L}$

昭和 58 年 4 月 18 日受付 (Received Apr. 18, 1983) (依頼解説)

* 立命館大学理工学部 工博 (Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 56-1 Toziin-Kitamachi Kita-ku Kyoto 603)

表 1 高温における材料損傷の尺度

損傷Dの尺度	特 徴	適 用
キャビティションによるもの (型式I) $D=f(V)$ V: キャビティ密度	(1) Vには粒界ボイドの核生成と成長およびき裂の発生と伝ばを含む。Vは負荷応力 σ , 温度 T, クリープひずみ ϵ の関数で表示できる。 (2) 与えられた寿命比に対してVに基づく損傷Dは必ずしも一定とはならない。	クリープ損傷 クリープ・疲労損傷
時効(加熱劣化)によるもの (型式II) $D=1-t_R'/t_R$ t_R : 非時効材の寿命 t_R' : 時効材の寿命	(1) 時効中の析出物密度, 転位密度, 粒界分離などによつて材料の寿命は変化する。 (2) 時効材(加熱劣化)材の損傷に照応した強度試験や寿命試験が行われる。	クリープ損傷 疲労損傷
材料劣化を表す巨視的力学変数によるもの (型式III) $D=1-(\sigma/\bar{\sigma})$ $D=1-(\epsilon_p/\bar{\epsilon}_p)^n$ $\bar{\sigma}$: 劣化材の正味応力 ϵ_p : 最大塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$: 劣化材の ϵ_p n: 繰り返し加工硬化係数	(1) 連続体力学(損傷力学)的アプローチであり, 損傷変数 ϕ の発展を支配する式(発展式)で表示される。 (2) 正味応力 $\bar{\sigma}$ は損傷による材料の有効断面積の減少によつて拡大された応力を指す。	クリープ損傷 疲労損傷 クリープ・疲労損傷
余寿命によるもの (型式IV) $D=1-t_R'/t_R$ t_R : 非劣化材の寿命 t_R' : 劣化材の寿命	(1) 損傷Dは使用材より寿命試験によつて求まり, Dは $\epsilon \times t$ と比較的よい相関があるが, σ, T, ϵ, t について一義的に決まらない。 (2) 手順は簡単であり, 非線形損傷則などを説明できる。	クリープ損傷 疲労損傷 クリープ・疲労損傷

じゆうぶん考慮しなければならぬ。たとえば 10 万 h でクリープ破断した¹⁾, また 12 万 h にわたり供用した²⁾, SUS 304 鋼では, 長時間クリープ中に生ずる σ 相界面でのき裂発生によつて, そのクリープ破断曲線が大きく下方へ屈曲し, 10 万 h 破断寿命のばらつきが大きくなる場合がある。このようにして図 1 の x_R のばらつきが大きくなつたり, 図 2 の $\bar{x}_R - \bar{x}_L$ が異常に小さくなると, 設計寿命においてすら健全性が損なわれる。

2. 損傷の定義と評価法

材料の損傷 (damage) を正確に定義することは容易ではないが, ここでは材料中に分布する微視的欠陥による材料劣化を伴う微視的組織変化を損傷とよぶことにする。それは, 巨視的き裂の発生と成長によつて最終破断に導くだけでなく, 材料の強度, 剛性やじん性の低下, あるいは余寿命の減少などを招く。余寿命推定を行うには, 何よりもまず構造用材料のこのような損傷の具体的な尺度 (measure) を明らかにし, その評価方法を定める必要がある。

表 1 に材料損傷の尺度例を示す。耐熱合金の高温クリープでしばしばみられる粒界微小空げき (キャビティ) 密度 V は, たとえば $V = \text{const. } \epsilon t \sigma^n \exp(-Q/RT)$ の形式³⁾ で表すことができるが, クリープ破断時の V が必ずしも一定とはならない難点もある³⁾。また時効材の劣化を評価する方法として, 計量可能な微視的組織変化による直接法と, 損傷に敏感な強度性質による間接法がある。耐熱合金の微視的組織変化の複雑さとその計量化の難しさからいえば, 後者は前者より適当ではあるが, 損傷に敏感な強度性質が必ずしも単一の力学的性質によつて表されるとは限らないという難点がある。破壊じん性やシャルピ衝撃特性などは, たとえば型式 I の損傷に

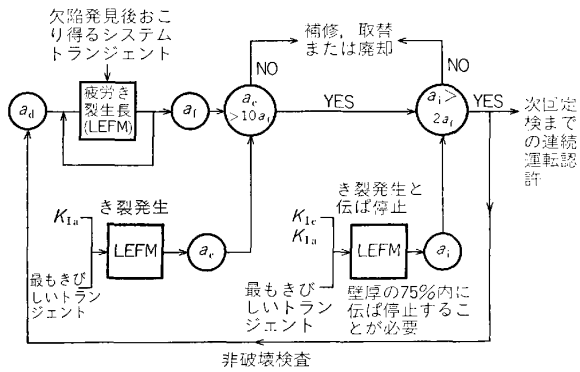
敏感であるが, 析出物の変化などにはさほど敏感ではなく, キャビティション (型式 I) と時効 (型式 II) の両損傷に敏感な力学的性質としては, やはりクリープ破断などの高温強度性質が適切であることがわかる。

表 1 の型式 III に示した尺度はいわゆる損傷力学⁴⁾ (damage mechanics) によるもので, 損傷状態をどのような数学的特性 (テンソル特性) をもつ量で表現するか, またそれをどのように定量化するかに関心が寄せられている。最後の型式 IV は本主題に係るもので, それは型式 II の“時効材” (加熱劣化材) を高温・腐食の複合環境および荷重下にさらされた“使用材”に置き換えたものといえよう。型式 IV の損傷 D は $\epsilon \times t$ とよい相関があるといわれている⁵⁾⁶⁾。

表 1 に示した損傷尺度は, 非破壊検査および破壊試験によつて求められる。前者は非破壊的であるという長所をもち, そこでは浸透探傷, 超音波探傷, 磁気探傷, うず電流探傷, AE 法, レーザー法, 電位差 (電気抵抗) 法, 放射線透過法, かたさ法, X線回折による半価幅法やミスオリエンテーション法などの方法が用いられる。さらに小試片の採取によつて, セルサイズや転位密度, 析出物密度, キャビティ密度などの変化も計測される。ASME のコードセクション V⁶⁾ の供用期間中検査 (ISI) では, 放射線, 超音波, 磁粉, 液体浸透, うず電流, 肉眼, 漏えいの 7 つの非破壊探傷法が採用されている。一方, 後者は加速試験という限界があるが, 直接に強度や寿命を評価できる利点がある。

3. フェールセーフ性と損傷許容設計

最近における機械構造設計では, 従来のセーフライフ (safe-life) 性, すなわち供用中に疲労き裂やクリープき裂を発生させないとする思考から, フェールセーフ (fail-



a_d : 評価される欠陥寸法
 a_f : 寿命末期の欠陥寸法
 a_c : 正常および異常運転状態における最大限界欠陥寸法
 a_i : 緊急状態および事故状態における非停止成長の始まる最小限界欠陥寸法
 LEFM: 線形弾性破壊力学解析
 K_{Ia} : モード I き裂に対する伝ば停止破壊じん性値
 K_{Ic} : モード I き裂に対する静的破壊じん性値

図 3 ASME セクション XI における欠陥評価のフローチャート¹⁰⁾

safe) 性, すなわちき裂発生の可能性の高くなることを認めるが, 発生したき裂は残りの構造部材の健全性がある水準以下になる前に通常検査で発見できることを前提とした思考へ, 変化がみられる. この変化は航空機構造 (たとえばアメリカ空軍の ASIP⁷⁾) や原子力機器構造 (たとえば ASME コードセクション III⁸⁾) において顕著である.

ASIP では, ①構造中には検査で発見できなかった欠陥が必ず存在する, ②構造には検査のしやすさの程度がある, ③検査の方法や程度によつて発見できる損傷の程度が異なる, という基本要素を基にして, 損傷許容設計 (Damage Tolerance Design) を行うようにしている⁹⁾. その場合の想定損傷としては, 製造中にすべての孔部分に 0.125 mm のコーナー欠陥が存在すること, 各部材の最も危険な孔および孔以外の場所に初期欠陥が存在すること, 使用中の検査完了後にも損傷が残存することなどを想定している. したがつて構造中に存在する損傷が使用中に進展しても, 次にそれが発見できるような検査までに危険寸法にはならないように設計される.

図 3¹⁰⁾は ASME セクション XI¹¹⁾における損傷評価のフローチャートを示す. a_f は原子力機器部品の耐用寿命末期における最大予測欠陥寸法で, セクション III では, 深さ $t/4$ (t は板厚), 長さ $1.5t$ の半だ円形の最大仮想欠陥が用いられるが, セクション XI では, その 1/10 相当寸法のものになっている¹⁰⁾. 原子力機器の各状態における限界寸法 a_c や a_f については線形破壊力学 (LEFM) を用いる方法が定められている.

4. 高温機器における経験と問題点

高温機器一般については, 3 でのべたような規格や基準を作るに至っていないのが現状である. しかしながら

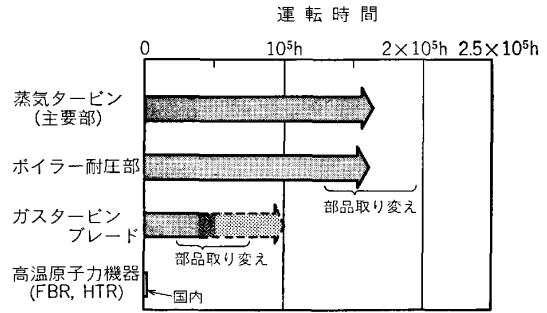


図 4 高温機器の運転実績¹²⁾

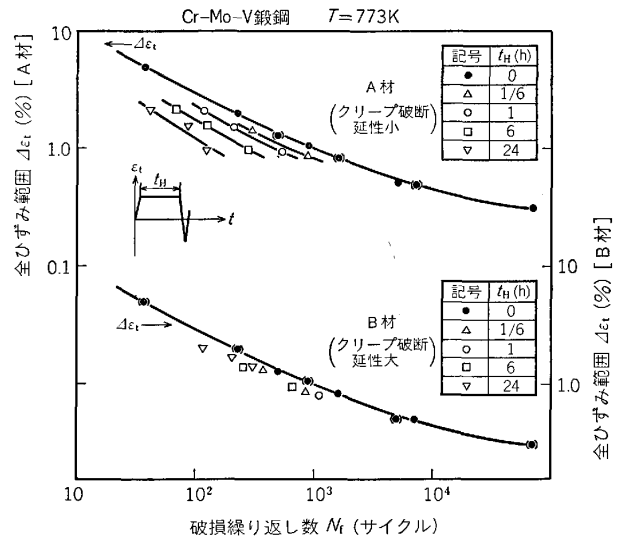


図 5 温度 773K, 大気中における Cr-Mo-V 鍛鋼の引張ひずみ保持を有する全ひずみ範囲制御引張・圧縮低サイクル疲労実験例¹³⁾

高温損傷の研究, LEFM や非線形破壊力学 (NLFM) の研究, 材料データベースの整備に支えられて, 高温機器の余寿命予測法の研究が着実にすすんできていることは確かである. そしてその方向は前述したようにフェールセーフ性の考えに沿うものであろう.

図 4¹²⁾は, 我が国における長期供用高温機器の運転実績例を示す. これら機器の経験から指摘される問題点を, 主に遠藤¹²⁾に沿つて以下に述べる.

(1) タービンやボイラー等の主要高温部品 (タービンロータや耐圧容器) の基本寸法を決めるのに最も重要な材料強度性質はクリープ破断性質であるが, それに対する十分な安全係数を用いてきた結果, 現在のところ問題になっていることがら, 主として材料の熱処理不良や長時間使用によるクリープ破断延性の低下 (切り欠き敏感性) などである¹²⁾.

(2) 長年月 (たとえば 15 万 h 以上運転して, 起動停止回数 100 回 といった場合が多い) 使用されるために, クリープと低サイクル疲労 (熱疲労) の重畳については, 長周期低サイクル疲労のデータベースを必要とすることである¹²⁾. 図 5¹³⁾は, ひずみ保持時間 t_H を有する

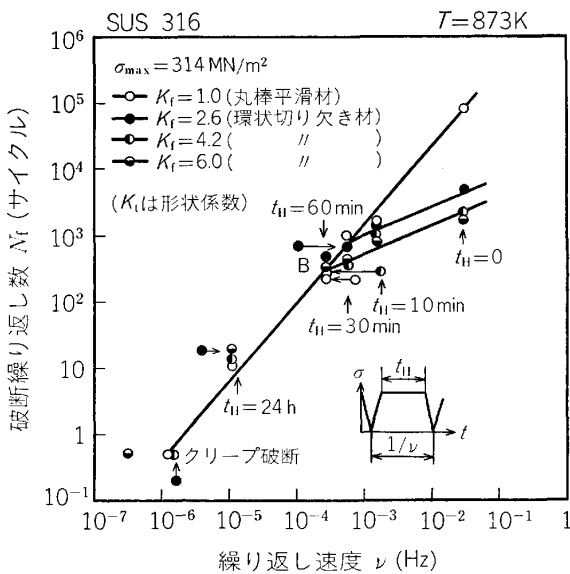


図 6 温度 873K, 大気中における SUS 316 鋼の, 引張保持時間 t_H を有する場合の片持引張低サイクル疲労寿命と, 静引張クリープ破断寿命との関連¹⁴⁾

全ひずみ範囲制御の両振り引張り・圧縮低サイクル疲労実験例を示し, 供試材のクリープ破断延性の差が高温低サイクル疲労寿命では無視しえない因子となることを示す一例である. また図 6¹⁴⁾は, 引張荷重保持時間 t_H を有する場合の片振り引張低サイクル疲労寿命と静引張クリープ破断寿命との関連を示す一例で, t_H の長時間側の N_f の極限值は, 静引張クリープ破断寿命 ($N_f=1/2$ とおく) にはほぼ対応する模様で, 静クリープ破断データはもつと活用されてよい.

(3) 長期使用高温機器で最もき裂事故の多い場所は溶接部ではないかと思われる¹²⁾. それは, 長期使用による部材表面の腐食(表面劣化)や変質層の発生(体積劣化)といった高温環境効果と並んでやつかいな問題であり, 研究は緒についたばかりである. 前者については, 溶接継手の強度は母材のそれと同等に評価したいところであるが, 現実には高温では種々の要因により必ずしも同等とはならない.

(4) 長時間供用されている機器には, 時としてき裂が発見される場合があり, クリープが顕著な領域ではクリープの影響は無視できない. したがって NLFM パラメータであるクリープ J 積分 \dot{J} や J 積分幅 $4J$ の適用に関する実験が最近多く行われるようになってきている. しかし, これらをそのまま使用するにはまだまだ問題が多く, 現状では低サイクル疲労領域といえども応力拡大係数 K_I 値を用いているのが実情である¹²⁾. 従来の火力機器では, クリープ破断に対して十分な安全係数をとってきたので, 通常の 1 次応力場に欠陥があつたとしても, き裂の成長量はきわめて小さいと予測される. たとえば, Cr-Mo 系低合金鋼が 500°C で使用されている場合, 1 次一般膜応力として許容される応力は約

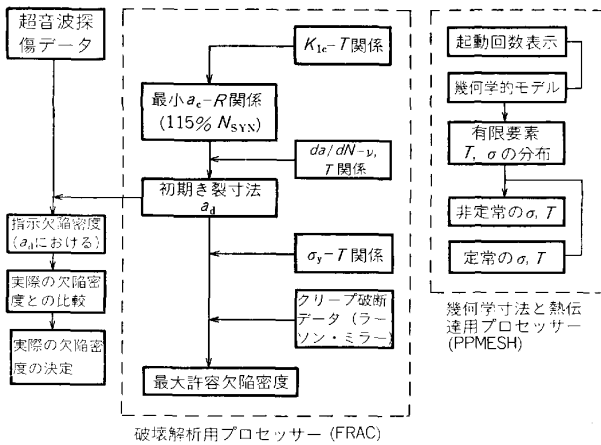
980 MN/m²以下であり, たとえ長半径 12.5 mm, 短半径 5 mm の半だ円形表面き裂があつても, K_I 値は高々 12.4 MN/m^{3/2} 程度にすぎず, き裂成長はほとんど問題とはならない. したがって, 問題となるのは過渡的熱応力等の応力の高い場合で, 少なくとも $K_I > 31$ MN/m^{3/2} の領域と思われる¹²⁾. このことに係る事故例の一つを以下に述べる.

1974 年 6 月 19 日, アメリカ TVA Gallatin 発電所にある 4 基の蒸気タービンのうち, No. 2 タービンが冷機起動後はば 3 400 rpm の回転数に達したとき, 中圧一低圧両用タービンのロータが破壊事故を起こした^{15)~17)}. このタービンの発電能力は 225 MW, 入口蒸気温度は 565°C で, 1957 年 5 月に設置して以来破壊するまで 17 年間 106 000 h 稼動していた. No. 2 タービンロータは 288 回の起動が繰り返され, そのうち 105 回が冷機起動, 183 回が暖機起動であつた. 問題のロータは 1954 年塩基性電気炉で溶解された Cr-Mo-V 鋼 (ASTM 470, Gr. 8 に相当) の鍛鋼品で, 鍛錬や熱処理は現在とほぼ同様の方法で行われた. しかし当時では, 現在必要とされているクリープ破断試験, 衝撃試験および円孔の非破壊検査は実施されていなかった. 事故解析の結果, 以下のことがら判明した¹⁷⁾.

- ①初期欠陥の発生位置は高応力の作用点と一致した.
- ②初期き裂直下で逆 V 偏析が認められ, これら領域では共晶型の MnS が非常に多く分布しており, 介在物間でき裂が生じ, クラスタ(欠陥群)を形成していた.
- ③初期欠陥部には, 粒界での $M_{23}C_6$ 型の炭化物析出部分とデンドライト領域が認められ, デンドライトの存在が初期欠陥の形成要因と推察された.
- ④初期き裂寸法 a_d から限界き裂寸法 a_c に達する前に, き裂の成長が阻止された形跡があり, $K_I = \sigma \sqrt{\pi a_d / C}$ (内部き裂, C は欠陥形状係数, σ はき裂が存在する位置での荷重応力) より求めた K_I 値は, $\sigma = 510$ MN/m² と推定して 51 MN/m^{3/2} となり, 事故時のロータ温度 (93°C) における破壊じん性 K_{Ic} 値と比較して, a_d の大きさでは直接ぜい破壊は生じないことが判明した.
- ⑤結局, ロータの破壊は, その中心孔内面近傍に存在した逆 V 偏析に誘起された初期欠陥から, クリープ・疲労相互作用によりき裂がほぼ限界寸法 a_c まで進行したのちいつたん停止し, その後冷機起動時に発生した熱応力のためにぜい性破壊を起こしたものと推定された.

(5) 最後に, 構造不連続部分の非弾性解析がすすんでいるが, 解析は行つても実証例の乏しいことと, 解析に有用な非弾性構成式の乏しいことが指摘されている¹²⁾. また非弾性解析は経費の点で問題もあり, 何らかの簡易解析法も必要である.

ASME のコードケース N-47¹⁸⁾ では, ノイバー則 $K_o K_e = K_I^2$ (ここで K_o と K_e はそれぞれ塑性域における応力集中係数とひずみ集中係数, K_e は形状係数) に



a_c : 限界欠陥寸法
 R : ロータ中心孔内面からの距離
 T : 温度
 σ : 負荷応力
 σ_y : 降伏応力
 ν : 繰返し速度
 N_{SYN} : ロータの同期回転速度

図 7 蒸気タービンロータの余寿命予測の解析システム²¹⁾

基づいて、切り欠き部分の全ひずみ範囲を求める簡易解析式を与えている。しかし、ASME の方法は過大に寿命を推定する傾向があり¹⁹⁾²⁰⁾、それに代わる評価法の検討も必要である。たとえば、COFFIN の繰返し速度 (ν) 修正疲労寿命式と修正ノイバー則 $K_\sigma K_\epsilon = K_t^b$ (ここで $1 < b < 2$) と組み合わせた、 $N_f = N_{f0} (\nu/\nu_0)^{1-k} K_t^{-b} \{bm/\beta(m+n-1)\}$ の提案がある²⁰⁾。ここに、 N_{f0} は $K_t=1$ (平滑材) および基準繰返し速度 ν_0 (たとえば 1 Hz) における基準破損寿命であり、 m と n は遷移クリープ式 $\epsilon_c = \alpha \sigma^m t^n$ の指数である。

5. 高温機器の余寿命予測システムの開発

TVA の事故は、アメリカにおける高温機器の余寿命推定のためのシステムを開発する契機となった。すなわち、鍛造蒸気タービンロータのスピンデルの健全性を保証する立場から、2年にわたる研究が Electric Power Research Institute において、Southwest Research Institute, Battelle-Columbus Lab., Westinghouse Electric Co. の協力を得て行われた²¹⁾。この研究では、1950年製作の Cr-Mo-V 鋼製のロータ (大気溶解材) の寿命推定のためのシステム、同材料データベース、稼動中の非破壊検査システムなどをつくり、比較的数少ない入力情報量によつて、連続稼動中の蒸気タービンの破損リスクを評価しうる包括的な解析システムを開発することが意図された。すなわち、それは、ロータ寸法と運転サイクルが与えられると、ロータに負荷されている熱応力や機械的応力の解析が行われ、材料データを用いて、運転サイクルおよび要求される寿命に対する限界および初期き裂寸法が決定できる。またその結果は ISI の検

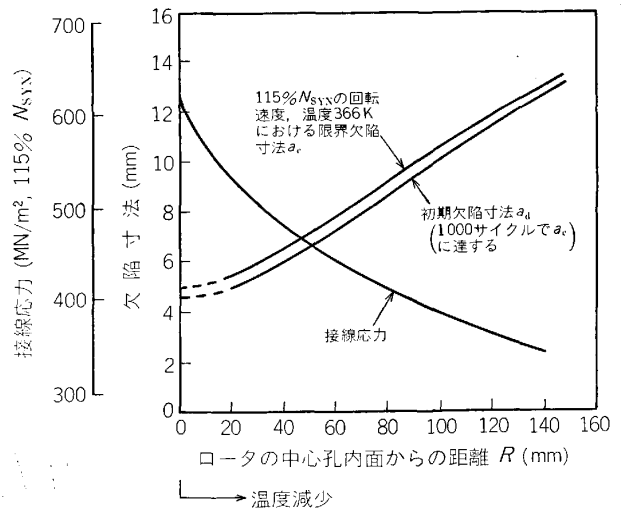


図 8 TVA Gallatin No. 2 中圧蒸気タービンロータを想定しての、初期欠陥寸法 a_d 、限界欠陥寸法 a_c および接線応力のロータ中心孔内面からの距離 R に伴う変化²¹⁾ (N_{SYN} はロータの同期回転速度)

査結果と比較され、検査結果が確定できるものである。

図 7²¹⁾は寿命評価解析システムを示し、それは、ロータの幾何学寸法と熱伝達用プロセッサ (PPMESH)、および汎用構造解析コンピュータコード (ANSYS) で書かれた、破壊解析用プロセッサ (FRAC) から構成されている。前者には、ロータ主要寸法、翼重量、中段シール形状、ロータの回転履歴、蒸気入口および出口温度や圧力、軸シール流体温度などが入力される。このプロセッサでは、ロータの有限要素モデルが作られ、翼荷重、蒸気リーケージ流れ、熱伝達が計算され、ANSYS コードによつて、非定常温度分布と熱的および機械的重畳応力のピーク値や定常値が求められる。一方、FRAC コードは、ぜい性破壊、延性破壊、低サイクル疲労き裂成長、クリープ破断寿命など、破損モードの計算に用いられる。それによつて、3次的に分布したあらゆる形状の欠陥の成長と、その限界寸法を推定することができる。

Cr-Mo-V 鋼の高温疲労き裂成長に関するデータが、繰返し速度と温度の関数として用意され (図 7)、Gallatin の中圧ロータに繰返しピーク応力が負荷されたと想定して、微小介在物から発生・成長するき裂寸法が推定された。LEFM 解析によれば、それは 1000 回の冷機起動に対して 0.66 mm となり、ほとんど無視できると判断された。なぜならば、その最小限界欠陥寸法 a_c は、 $a_c = C(K_{Ic}/\sigma)^2$ より計算すると、図 8²¹⁾ のようになり、明らかに $a_c \gg 0.66$ mm となるからである。 a_c の位置は、ふつう最大せん断応力の位置と一致する。しかしながら、その低応力部分は低温度域、したがって材料の K_{Ic} が低くなるので、その a_c は小さく見積もる必要がある。FRAC では、最小き裂長さを確認するた

めに、このような面積領域を調べることができる。Gal-latin NO. 2 の中圧ロータについていえば、き裂は半円形と仮定して、 $a_e=6.86 \text{ mm}$ となることがわかった。また評価されるべき初期欠陥寸法 a_d は、欠陥が個々に独立し、その半径および軸方向平面内でき裂状をなし、それがロータの最終破断につながるものとみなして、 a_e 同様に図8のように指示される。温度が 400°C 以上になれば、図7に示したラーソン・ミラーパラメータを用いて、クリープ条件を考慮する必要がある。

またクラスターにおける分布欠陥の相互連結は、以下のようなステップで評価された²¹⁾。すなわち、①隣接欠陥の相互作用距離の決定、②クラスターの有効面積率の計算、③ LEFM による連結の計算 (欠陥寸法は超音波探傷による)、④リガメント (非欠陥域) の降伏による非弾性不安定性およびリガメントのクリープ破断に対するクライテリア (条件式) の決定である。④のリガメント降伏が起こる場合、1回のサイクル中で過負荷 (オーバースピード) されると、リガメントは破損を起こすので、図7では降伏応力と温度間の関係を示す材料データが用意された。実際には、クラスターは連結が起こる前に累積繰り返し塑性ひずみに耐えることができるので、このクライテリアは過大評価のきらいはある。さらにクラスターの成長については、面分布した円盤状欠陥の成長が低サイクルおよびリガメント部分のクリープ破断条件下でそれぞれ検討され、前者の条件から、ロータの寿命内で限界寸法に達するときの介在物の面積率は極めて大きくなること、後者の条件から、推定破断寿命は TVA のロータのそれを約 10% 下廻ることが判明した。ただし後者では、クリープ・疲労相互作用を考慮して、ラーソン・ミラーパラメータの破断時間に 1/3 が乗せられた。

このような寿命推定システム例からわかるように、高温機器一般の余寿命推定法には、少なくとも以下の三つのステップが必要であろう²²⁾²³⁾。

(1) まず、高温機器の設計寿命がその供用中保証されるか否かの判定を、表 I の型式 IV の損傷概念に基づいて行う。この場合、材料強度データとしては、同一ヒート材の処女材のそれを用いることが望ましいが、不可能ならば該当ヒート材のデータベースの平均値あるいは最小値を用いる。機器が定常条件下で稼動しておれば、余寿命は、適切な安全係数を用いて求められた全寿命から、使用寿命を差し引いて求める。非定常条件下では、適切な累積損傷則を用いて推定することができる。

(2) 第 I のステップにおいて、応力集中部材から抽出した試片を用いて寿命を求める破壊試験は、加速試験という限界のうえに、時間も要するので、それに代わるものとして表 I の型式 I や II の損傷概念に基づいて、小試片抽出で済む微視組織検査を行うこともできる。さらに応力集中部材からの試験片抽出や非破壊検査が困難な

場合 (多くの場合がそうであるが)、その余寿命は、試片抽出や非破壊検査の可能な他の場所の結果から推定せざるをえない。このために、材料損傷と変形²⁴⁾、応力、かたさ²⁵⁾ などとの関連 (たとえば型式 I や IV) などが用いられるが、一般的にそれは外そう法によらざるをえない。

(3) 余寿命推定の精度を高めるため、多軸応力下の非弾性変形解析を行うことができる。その場合、クリープと塑性との相互作用やクリープ・疲労相互作用が考慮される。残存クリープ強度の他に、部材の残存延性の評価も極めて重要であり、このための低サイクル疲労試験、シャルピー衝撃試験、破壊じん性試験などを行うことができる。また溶接部の非弾性解析やその寿命試験を行うことができる。

6. おわりに

この分野の研究はその性格上、学際的で総合的な取り組みを必要とする。我が国では、科学技術振興調整費による「構造材料の信頼性評価技術に関するフィージビリティスタディ」(1982) が行われ、火力発電プラント、化学プラントおよび公共構造物 (鋼橋梁等) における構造材料の使用環境や劣化状況の調査分析、構造材料の寿命・余寿命予測技術に関する基盤的研究の現状調査と問題点の抽出、各種損傷因子の計測技術開発の状況調査と問題点の抽出、また寿命・余寿命予測に関する方法論などが検討された。この国家レベルにおける総合研究の今後の発展を期待したい。ASME はこの4月に「Advances in Life Prediction Methods」と題する国際会議を主催し、9月にはイギリスの金属学会が「Designing with High Temperature Materials」と題する会議を企画しており、この分野の研究の国際交流も盛んになってきている。

最後に、文献の引用等について便宜を与えていただいた、三菱重工業(株)高砂研究所の薄田 寛主管と遠藤忠良研究室長に対して、深甚の意を表するものである。

文 献

- 1) 新谷紀雄, 横井 信, 京野純郎, 村田正治, 田中秀雄: 耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, 22 (1981) 2, p. 189 [日本学術振興会]
- 2) 田中 勝, 半谷文雄, 近藤義宏, 行方二郎: 鉄と鋼, 69 (1983) 5, S 549
- 3) たとえば, D. A. WOODFORD: J. Engng. Mat. Tech., Trans. ASME, 101 (1979), p. 311
- 4) たとえば, 村上澄男: 材料(総説), 31 (1982) 1, p. 1
- 5) 小松周一, 中村新一, 中橋昌子, 松尾 孝, 新谷紀雄: 耐熱金属材料第 123 委員会研究報告, 24 (1983) 1, p. 17 [日本学術振興会]
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Nondestructive Examination (1971) [ASME]
- 7) MIL-STD-1530(A), Aircraft Structural Inte-

- grity Program. Airplane Requirements (1975)
- 8) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components (1972) [ASME]
 - 9) 新居健司: 日本機械学会第 516 回講習会「破壊力学の実際問題への応用」教材 (1981), p. 65 [日本機械学会]
 - 10) 薄田 寛: 同上, p. 97 [日本機械学会]
 - 11) T. U. MARSTON: Flaw Evaluation Procedures-Background and Application of ASME Section XI, Appendix A, NP-719-SR, P. B-14 (1978) [Electric Power Institute]
 - 12) 遠藤忠良: 日本機械学会第 529 回講習会「高温構造の設計技術」(1981), p. 97 [日本機械学会]
 - 13) 遠藤忠良, 西田 隆, 佐近淑郎, 富岡征四朗: 三菱重工技報, 18 (1981) 5, p. 603
 - 14) 坂根政男, 大南正瑛: 日本材料学会第 31 期総会講演会前刷集 (1982), p. 270
 - 15) L. D. KRAMER and D. RANDOLPH: 1976 ASME-MPC Symposium on Creep-Fatigue Interaction, ed. by R. M. CURRAN, MPC-3 (1976), p. 1 [ASME]
 - 16) D. A. WEISZ: 同上, p. 25
 - 17) 橋内良雄: 日本機械学会第 516 回講習会「破壊力学の実際問題への応用」(1981), p. 81 [日本機械学会]
 - 18) Case of ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-47, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Section III, Division 1 (1978) [ASME]
 - 19) S. MAIYA: Mat. Sci. Engng., 38 (1979), p. 289
 - 20) 坂根政男, 大南正瑛: 材料, 29 (1980), p. 458; 大南正瑛, 坂根政男: 材料, 30 (1981), p. 915; M. SAKANE and M. OHNAMI: J. Engng. Mat. Tech., Trans. ASME, 105 (1983) 2, p. 75
 - 21) T. S. COOK, H. G. PENNICK, and C. H. WELLS: Advances in Reliability and Stress Analysis (The ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, 1978), ed. by John J. BURNS, Jr. (1979), p. 217 [ASME]
 - 22) C. F. ETIENNE, H. C. van HELST, and P. MEIJERS: Creep of Engineering Materials and Structure, ed. by G. BERNASCONI and G. PIATTI (1979), p. 149 [App. Sci. Pub.]
 - 23) 大南正瑛: 日本機械学会第 500 回講習会「疲労・環境・高温強度と信頼性」(1980), p. 55 [日本機械学会]