Cr-Mo-V 高温ロータ材の X 線回折法による 疲労寿命評価法[†]

後藤 徹* 小西 隆** 春木 仁朗***
生野 健*** 山本 柁道***

Fatigue Life Assessment of High Temperature Cr-Mo-V Rotors Using X-Ray Diffraction

by

Toru GOTO*, Takashi KONISHI**, Nirou HARUKI***
Takeshi IKUNO*** and Masamichi YAMAMOTO***

In order to predict the crack initiation life at periphery grooves for high-temperature rotors in a fossil power plant, a study using X-ray diffraction was conducted. As a conclusion of the study, a diagram for estimating the fatigue life fraction was presented based on the following findings:

(1) The half-value breadth of X-ray diffraction line generally decreased with an increase in fatigue damage for Cr-Mo-V material at service temperature of about 500°C.

(2) For the constant strain cycling, it was possible to express the relation between the change in half-value breadth and the logarithm of cyclic number by a straight line except in the early part of life. The slope of the line seemed to take a constant value regardless the strain range. On the other hand, the relation between the half-value breadth and the number of cycles to crack initiation was able to be expressed using a straight line on the semi-log plotting.

(3) Based on the result of (2), it is possible to propose a method for estimating the fatigue life fraction for constant strain cycling.

(4) It was recognized that the method is also valid for estimating the fatigue life fraction for two-step multiple strain cycling and strain cycling with hold time.

Key words: X-ray diffraction, Half-value breadth, Fatigue, Turbine rotor, Cr-Mo-V forging

1 ま え が き

蒸気タービンロータでは、起動停止に伴って熱応力の繰返しが生じ、外周溝底応力集中部にき裂の発生する場合がある。その対処法として外周溝底を適宜機械的に削除（スキncット）することが行われ、それによりき裂発生の防止が図られている。

このような技術に対し、

a. 実施時期の最適化

b. スキンカット量（深さ）の最適化

が要求されることになり、それらは温度・応力解析とそれに基づく寿命計算をベースに行われているが、その精度については必ずしも十分とは言えないのが現状である。

一般に疲労損傷の進行過程は、最初に材質的な変化が生じ材質変化が進行すると共にマイクロなき裂が発生

・成長し、その後マクロなき裂を経て破損に至ると考えられている。スキncット技術はその目的上マイクロもしくは小寸法のき裂発生時点までに対処することが必要であり、その評価法は初期からの材質変化に着目したものであることが不可欠である。

筆者らの一人は長期使用済ロータを調査し、熱疲労き裂発生の徴候は溝底直下の軟化現象として現れることを見出した。そこで実機の熱疲労損傷の検出を硬さ測定にて行なうことを試みたが、溝底の硬さの精度良い測定は現状の硬さ測定技術では困難で実用化には至らなかった。そこで室温の高サイクル疲労損傷の検出法として既に利用されている X 線回折法¹⁾に着目し、実際ロータに適用しうる検査装置を開発した。そして半価幅測定の精度向上を図った結果、外周溝底の材質変化層が検出可能で、スキncット量の最適化に寄与

† 原稿受理 平成元年 9 月 4 日 Received Sep. 4, 1989

* 正会員 三菱重工業(株)技術本部高砂研究所 高砂市荒井町新浜, Takasago Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD., Shinham, Arai-cho, Takasago

** 三菱重工業(株)技術本部高砂研究所 高砂市荒井町新浜, Takasago Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD., Shinham, Arai-cho, Takasago

*** 関西電力(株)総合技術研究所 尼崎市若王寺, Technical Research Center, The Kansai Electric Power Co. INC., Wakaoji, Amagasaki

Fig. 1. Chord surface for X-ray observation and schema of the distribution of half-value breadth.

しうる検査法を作成した³⁾。

本報告は、さらにその検査技術をベースにして、スキナット実施時期の最適化、すなわち、疲労寿命評価法の開発を行ったものである。

2 X 線回折法による検査装置

検査装置は Fig. 1 に示すように、ロータ外周溝底を極く浅く水平に削り弦状の面を作成し、その弦状面を X 線観察するものである。この装置を用いて得られる水平方向の半価幅分布は表層下深さ方向のそれに換算しうる。そこで、弦状観察面の両端部 A あるいは B での半価幅 H_w と弦中央部（最深部に相当）で疲労損傷の影響を受けない深さでの半価幅 H_{w0} の比を用いて、評価位置である外周溝底の組織変化を表示しようとする。すなわち、本装置によれば検査位置の使用前初期値が不明であってよい。

3 実験方法

火力発電プラントは、各種の起動方式があって、その方法によりロータに生じるひずみ範囲は異なってくると共に、起動方式の組み合わせは一定ではない。また、場合によってはクリープが重畳する起動方式も存在する。そこで実機にて想定されるひずみ範囲をもとにして、

- 定ひずみ繰返し
- 2 段多重ひずみ繰返し

c. ひずみ保持付定ひずみ繰返し

の 3 種類の疲労試験を行い、その過程で生じる材質変化を X 線半価幅で観察した。

3・1 供試材と疲労試験

供試材の化学組成と機械的性質を Table I に示す。

疲労試験は、ひずみ保持付低サイクル疲労試験の場合長周期クリープ疲労試験機を、その他の場合油圧サーボ疲労試験機を用いた。なお、ひずみ速度は、長周期クリープ疲労試験機の場合 0.05 %/sec、その他の場合繰返し速度で 5 cpm にて行った。

なお、1 つの疲労過程の観察の為に、平均約 8 本の中途止め試験片を作成した。

3・2 X 線測定

X 線測定は疲労付与後試験片を縦方向に 2 分割し、その標点者部を電解研磨後実施した。使用した装置は 2 章で述べた検査装置の X 線回折部で、回折条件を Table II に示す。半価幅測定法については筆者らの方法による $K\alpha$ 2 重線分離処理を行ない $K\alpha_1$ 線の半価幅を用いた。すなわち、実測された回折強度曲線のプロファイル $g(x)$ 、 $K\alpha_1$ 線によるそれを $f_1(x)$ 、 $K\alpha_2$ 線によるそれを $f_2(x)$ とすると次式が成立する。

$$f_1(x) + f_2(x) = g(x) \quad (1)$$

ここで $f_1(x)$ と $f_2(x)$ が同じ関数形で表現し得ると仮定すると、

$$f_2(x) = K f_1(x - d) \quad (2)$$

ここで、

K : $K\alpha_1$ 線に対する $K\alpha_2$ 線の強度比

d : $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線の回折角の差

そこで測定角度範囲について次式で表わされる I が最小となるようパラメータ K を数値解析にて求める。

$$I = \int [f_1(x) - K f_1(x - d) - g(x)]^2 dx \quad (3)$$

ここで K が求まれば $f_1(x)$ は容易に決定できる。なお、Rachinger の方法は $K = 0.5$ とし $f_1(x)$ を図式解法で求める方法であるが、 K も変数として最確の $f_1(x)$ を求める本分離法が有利であると考えた。また、試験片表面のスケールを削除後、標点間部の表面レプリカを採取して、それより最長き裂長さを測長した。

Table I. Chemical composition and mechanical properties at room temperature.

(a)													
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Sn	As	Sb
0.33	0.28	0.85	0.005	0.007	0.34	1.12	1.13	0.24	0.05	0.004	0.002	0.005	0.0013
(b)													
0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)			Tensile strength σ_b (kg/mm ²)			Elongation ϵ (%)			Reduction of area ϕ (%)				
65.6			83.0			19.3			53.0				

Heat treatment; 950°C×25 hr. → Blast cool → 680°C×20 hr. → Furnace cool

Table II. X-ray conditions.

X-ray tube	Co
Diffraction plane	(310)
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Incident slit	1.0 mm single pin hole
Filter	Fe
X-ray detector	PSPC
	(50 mm window length)
Exposure hour	30 min

4 実験結果

Fig. 2 (a)~(d) に, 各種疲労過程における X 線半価幅の変化挙動の観察結果を示す。

Fig. 2 (a) は, 500°C における定ひずみ繰返し疲労の結果で, いずれの疲労過程においても, 付与繰返し数の増加に伴って X 線半価幅は減少している。繰返し数に対する半価幅の変化にはひずみ範囲の依存性が明らかに認められ, ひずみ範囲が大きいほど, 半価幅は繰返し初期から変化すると共に大きい変化量を示した。

Fig. 2 (b) は, 450°C における定ひずみ繰返し疲労の結果で, 同一ひずみ範囲で比較すると, 500°C に比して半価幅の変化は繰返し数に対して遅れて生じると共に, 変化量も小さくなっている。

Fig. 2 (c) は, 2 段多重ひずみ繰返しの結果で, 横軸には総繰返し数を取り示している。組み合わせひずみの内小ひずみ範囲の繰返し数が多いほど, 変化は繰返し数に対して遅れると共に変化量が小さくなっている。また, 各種組み合わせひずみを構成するひずみ範囲が単独で繰返された場合の変化線の間に位置している。

Fig. 2 (d) はひずみ保持の結果で, ひずみ保持のない場合に比較して破損繰返し数が約 1/2 に低下すると共に半価幅は繰返し数に対して早期から低下している。

5 考 察

Fig. 3 に破損繰返し数 N_f に対する寿命比と最大き裂寸法の関係を示す。疲労損傷評価の寿命として破損繰返し数 N_f を用いる考え方もあるが, その場合試験片表面での最大き裂寸法が 10 mm 程度になり, スキンカット量としては過大と考えられる。そこでロータ外周溝底での疲労損傷評価として, 表面き裂長さが 1 mm 相当のき裂発生時点 N_c を寿命とすることとした。本寸法は, 磁気探傷等の非破壊検査で検出可能な寸法であると共に, 発生しても必要なスキンカット量としては過大でない判断されるき裂寸法である。そこで, 途中止め試験片で観察された最大き裂寸法を付与繰返し数に対してプロットし, それより各疲労過程におけるき裂発生繰返し数 N_c を定めた。

なお, Fig. 3 よりき裂長さ 1 mm は破損繰返し数 N_f に対する寿命比でおおよそ 0.5~0.8 に相当することが

Fig. 2. Changes in half-value breadth during various kinds of strain cycling.

Fig. 3. Relationship between maximum crack length and fatigue life fraction.

認められる。また、本試験片の中では寿命比 0.4 程度でもき裂の発生していない場合があった。

以下、半価幅測定によるき裂発生に対する寿命比の推定法について検討した。

なお、半価幅は同一鋼種であっても初期値が異なる場合があり、一般性を持たせるため初期半価幅で規準化して整理した。また、各データ点はき裂発生繰返し数 N_c までのものを用いた。

まず、500°C で実施した定ひずみ繰返し結果から、半価幅の繰返し数に対する変化を極力簡便に表示することを試みた。Fig. 4(a) はその一法で、疲労過程の初期を無視すると、疲労過程の大半の半価幅変化は繰返し数の片対数線図上でひずみ範囲に依存せずほぼ一定な傾きをもつ直線で表示できるとする。本法を A 表

(a) A method.

(b) B method.

Fig. 4. Representation of change in half-value breadth during constant strain cycling.

Fig. 5. H_w/H_{w0} versus N_c for constant strain cycling.

示法と呼ぶことにする。

他の方法は同図 (b) に示すもので、疲労過程の比較的初期から半価幅変化が生じるが、その変化開始点はいずれのひずみ範囲でもほぼ同一でありかつ変化は繰返し数の対数に対して直線にて表現しうとする方法である。この方法によると、直線の傾きはひずみ範囲に応じて異なり、ひずみ範囲が大きいと傾きも大きい。本法を B 表示法と呼ぶことにする。

Fig. 5 は N_c における半価幅比 H_w/H_{w0} を 500°C および 450°C の定ひずみ繰返し結果から求めて、 N_c の対数に対してプロットしたもので、ひずみ範囲が小さいほど N_c における変化量は小さくなっており、右上りの直線による表示が可能である。そこで、図中に示す直線を半価幅比対 N_c 線とする。

以上から、A 表示法あるいは B 表示法と Fig. 5 に

(a) A method.

(b) B method.

Fig. 6. Estimated life fraction versus actual life fraction for constant strain cycling.

示す半価幅比対 N_c 線図を用いれば, 定ひずみ繰返しの場合繰返し数と半価幅比が既知であれば寿命比 n/N_c が推定しうる可能性がある。

そこで, これら方法によって推定される寿命比と実験的に求められたそれをプロットしてみた。結果を Fig. 6 (a) と (b) に示す。いずれの方法も疲労の極く初期を除くと factor of 2 の範囲内で寿命比がほぼ推定可能である。特に, 寿命中期以降の各点について比較してみると A 表示法の方がより精度上有利なことが認められる。そこで以後の検討は A 表示法で行なうこととした。すなわち, 定ひずみ繰返し疲労過程から求めた寿命推定法が定ひずみ繰返し以外のひずみ繰返しに対しどの程度適用可能であるかを検討してみた。

Fig. 7 は 2 段多重ひずみ繰返しとひずみ保持付定ひずみ繰返しの結果を示したものである。なお繰返し数については 2 段多重ひずみの場合, 大ひずみと小ひずみの繰返し数の和 (総繰返し数) を, またひずみ保持付定ひずみでは 1 サイクルを 1 回とした。この結果, いずれのひずみ繰返しについても factor of 2 の範囲内で本法の適用が可能なが認められる。

今まで, 高温ロータ Cr-Mo-V 材について, 長周期保持付き疲労試験が実施されているが, 保持効果によって寿命の顕著に低下するロータとそうでないロータにの存在することが報告されている。本研究で用いたロータ材は比較的保持効果による寿命低下の少ないものに相当する。そこで, 保持効果による寿命低下の大きなロータ材について, ひずみ保持有および無しと同様の実験を行い⁷⁾, Fig. 6~7 で採用したと同一の方法で寿命比を推定すると共に実際の寿命比に対してプロットした。結果を Fig. 8 に示す。危険サイドに推定される場合の多いことが認められるが, factor of 2 の範囲内にほぼデータが収まっている。なお, 本材の初期半価幅は 1.73 度であった。

以上から, Fig. 9 のごとく, 寿命評価時点での総繰返し数 n に対して半価幅比 H_w/H_{w0} をプロットし,

Fig. 7. Estimated life fraction versus actual life fraction for two stage multiple strain cycling and constant strain cycling with hold time.

Fig. 8. Estimated life fraction versus actual life fraction for the case of different charge of Cr-Mo-V forging.

以後の疲労繰返しに対する半価幅比の変化傾向を定ひずみ繰返し疲労で求められた半価幅比変化傾向と同一であるとし, その傾きでプロット点から直線をひく。その直線が定ひずみ繰返し疲労で求めた半価幅比対 N_c 線図と交わる点を N_c とし, 寿命比 n/N_c を求める方法は, 各種のひずみ繰返し疲労に対して有効であると考えられる。しかし, 実際には測定値にばらつきがあるので, 推定寿命に幅を持った表示が妥当であろう。そこで寿命比の表示法について以下の検討を行なった。

Fig. 9 の半価幅比対総繰返し数の対数線図上で, 総繰返し数に対する半価幅比変化がひずみ範囲に依存せずほぼ一定な傾きをもつ直線で表わせるとする A 表示法では, 等寿命比線は半価幅比対 N_c 線に平行に引きうる。そこで, 全実験データを同一図上にプロットすると共に, 各点に実際寿命比を符して半価幅比対 N_c 線に平行に領域区分分けを行った。領域の区分分けは寿命比ではほぼ 20% ごとの分割になるよう 5 つの領域に分け, それぞれを小寿命比側から領域 I, II, III, IV および V とした。ただしき裂発生寿命が繰返し数 10^4 回以上の範囲 (右上隅の領域) および実機では想定しにくい非常に大きなひずみ範囲繰返しによる場合 (左下隅の領域) は除いた。Fig. 10 にその区分分けを行った結果を実験点と共に示す。なお, 実験点は寿命比で 20% ごとの区分表示して示してある。

Fig. 10 において, 領域 I を除く各領域では複数の実験点寿命比表示が混在していることが認められる。

Fig. 9. Explanation of A method.

Fig. 10. Determination of life fraction zone.

Fig. 11. Probable life fraction for each zone.

そこでこれを各領域での寿命比幅として整理したものを Fig. 11 に示す。

この結果、各領域ごとの寿命比はそれぞれ 0～0.15, 0.1～0.3, 0.2～0.55, 0.45～0.85 および 0.7～1 となった。

以上、Fig. 10 に示すような領域区分に分けることによる推定寿命線図を提案するが、その結果各領域での寿命比の推定幅はおよそ ± 0.15 となった。

6 ま と め

各種の起動方式で発停される火力発電プラントの蒸気タービンロータの外周溝底に蓄積する疲労損傷に対して、X 線回折法による寿命評価法を検討した。その結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 表面き裂長さ約 1 mm の発生を寿命とし、500°C を代表温度とした実験検討を行った。
- (2) 定ひずみ疲労過程における半価幅の変化挙動は

繰返し数の対数に対して、疲労損傷の極く小さい領域を除くとほぼ直線的に変化し、その傾きはひずみ範囲にかかわらず一定で表示し得る。

(3) 定ひずみ疲労過程でのき裂発生時半価幅は繰返し数の対数に対してほぼ一定の関係があり、一本の直線で表示し得る。

(4) これより定ひずみ疲労に対する寿命評価が可能である。すなわち、現時点の付与繰返し数 n に対して半価幅比をプロットし、以後上記の一定の傾きで線を引くと、き裂発生寿命線との交点での繰返し数 N_c との比 n/N_c をもって疲労寿命評価ができる。

(5) 定ひずみ疲労過程から求めた上記寿命評価手法を 2 段多重ひずみ繰返し疲労、ひずみ保持付定ひずみ繰返し疲労および保持効果の異なるロータ材について適用した結果、いずれも Factor of 2 の範囲内で疲労寿命評価できることが認められた。

これより本寿命評価法は複雑なひずみ繰返し疲労が想定される実機に対してもある程度まで適用が可能と考えられるが、今後の課題としては長時間の保持を伴うひずみ繰返しや熱疲労等のデータの充実に図ることが必要であろう。

(平成元年 7 月 20 日 第 26 回 X 線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 山本達雄, 小川善朗, 水本幹雄, 広田良夫, 和気幹雄, 後藤 徹, 火力原子力発電, **34**, 6, 15 (1983).
- 2) 平 修二, 本田和男, 松本健次, 日本機械学会論文集, **28**, 1335 (1962).
- 3) 後藤 徹, 小西 隆, 前川卓三, 下篠 繁, 第 24 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 88 (1987).
- 4) 後藤 徹, 石原利郎, 平 修二, 第 20 期日本材料学会學術講演会前刷, 149 (1971).
- 5) W. A. Rachinger, J. Sci. Instr., **25**, 254 (1948).
- 6) 遠藤忠良, 西田 隆, 佐近淑郎, 富岡征四郎, 三菱重工技報, **18**, 603 (1981).
- 7) 角屋好邦, 後藤 徹, 川本和夫, 須貝克己, 材料, **39**, 516 (1990).