超音波法による長期使用蒸気タービンロータ材料の
クリープ損傷評価*松原 雅 昭^{*1}, 新 田 明 人^{*2}Creep Damage Detection for a Steam Turbine Rotor Material
after Long-Term Service Using Ultrasonic Technique

Masaaki MATSUBARA and Akito NITTA

The present paper describes an experimental study on a physical meaning of nondestructive creep damage detection for a steam turbine rotor material after long-term service using an ultrasonic technique. As a result of microstructure observation and density measurements, it was made clear that change in ultrasonic parameters such as attenuation and noise value was found to be attributed to nucleation, growth and coalescence of creep cavities with increasing creep damage. The ultrasonic technique was found to be valid for predicting remanent creep life of a fossil fuel plant steam turbine rotor.

Key Words: Creep, Life Prediction, Ultrasonic Inspection, Iron and Steel, Nondestructive Inspection

1. 緒 言

近年, 特に夏場の電力需要の急増に対処するために, 既設の火力発電プラントの多くは負荷変動あるいは毎日の起動・停止運転を強いられる状況にある。ところで, 既設火力の過半は累積運転時間が設置当初の設計耐用寿命である 10 万時間を越えるいわゆる経年火力ユニットであり, 発電コストの観点からは設備に対する減価償却が進んでいるために, その低減に対する期待が大きい。しかし, 経年火力の運用に当たっては, 当然のことながらユニットの長期使用に伴う構造健全性の確保が重要となる。

このような状況を考慮して経年火力の有効利用を行うためには, ユニットの的確な保守管理に基づく信頼性の高い運用が必要となる。すなわち, 経年火力の長寿命化に当たっては, 蒸気タービンロータやケーシングなど重要機器の余寿命評価, 管理を行うことが重要となる。昭和 62 年 5 月に通商産業省資源エネルギー庁公益事業部長通達として「電気事業法第 47 条による定

期検査の時期変更承認等の運用について」が出され, 経年火力の定期点検間隔が新設火力並みに延長できることとなったが, これを実現するためには適切な余寿命診断の実施が義務付けられている。よって, 経年火力の合理的運用の観点からも, 余寿命評価技術の確立が不可欠となっている。

ところで, 超音波法は米国機械学会ボイラ・圧力容器基準の中で体積検査法のひとつとして, X線検査法とともに取り上げられており, 現状供用期間中の欠陥検査法として最も確立した手法であると言える。したがって, 超音波法によって欠陥と認識されるまでの過程, すなわち損傷過程を検出できれば, 疲労き裂やクリープキャビティといった欠陥の発生とその成長挙動を追跡することができ, ロータなどの余寿命評価, 管理がかなりのレベルで可能となることが期待される。

著者らはこのようなことを考慮して, 超音波法による余寿命評価の実用化を目指して一連の試験研究を実施してきた^{(1)~(3)}。超音波法はクリープ疲労損傷検出を考えた場合には, 寿命後半における損傷検出に有効な方法であることが明らかとなっている⁽³⁾。これは, 特にクリープ損傷では寿命の後半において, 損傷を受けることにより起こるクリープキャビティの発生, 成長と合体によるき裂化が顕著となることを反映した結果

* 平成 4 年 9 月 2 日 平成 4 年度材料力学部門講演会において講演, 原稿受付 平成 5 年 2 月 2 日。

^{*1} 正員, 群馬大学工学部(〒376 桐生市天神町 1-5-1)。

^{*2} 正員, (財)電力中央研究所(〒201 柏江市岩戸北 2-11-1)。

であると考えられる。本報では超音波法によるクリープ損傷検出の物理的意味を検討するために実施した微視組織変化および密度変化測定などの観点からの実験的考察について述べる。

2. 実験方法

2.1 供試材料 供試材料は143 600時間使用された高中圧ロータの高圧高温部より採取された1 Cr-1 Mo-0.25 V 鋼であり、結晶粒の大きさは20 μm 程度である(図2および3参照)。本供試材料については、事前に破壊および非破壊の評価を行い、実機使用中のクリープ損傷は無視できることを確認している⁽⁴⁾。表1および表2に供試材料の化学成分と室温における

表1 供試材料の化学成分(重量%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	As	Sn
0.29	0.19	0.77	0.006	0.006	0.35	1.15	0.14	1.34	0.26	0.013	0.011

表2 供試材料の室温における機械的性質

0.2% proof stress MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Reduction of area %
623.2	766.9	15.1	47.4

機械的性質をそれぞれ示す。

2.2 試験片および試験条件 図1にクリープ試験片形状寸法図を示す。クリープ試験は温度859 K、応力147 MPaの条件で3体行い、そのうち1体を破断させたが(以後、これを破断材と呼ぶ)、他の2本は損傷材試料作成のためにそれぞれ2 000および3 500時間で中断した(以後、それぞれ損傷材Aおよび損傷材Bと呼ぶ)。本試験条件でのクリープ破断時間は5 133時間であったので、損傷材AおよびBのクリープ寿命消費率(クリープ破断時間 t_R に対する中断時間 t の比 t/t_R)はそれぞれ0.39および0.68である。

非破壊評価のために、それぞれの試験片の試験条件でのクリープ損傷が顕著となる平行部中央付近およびねじ部より7.5 mm角×長さ40 mm程度の試料が採取された。また、それぞれの試料の半径方向採取位置

図1 クリープ試験片形状寸法図

(a) $t/t_R=0$

(b) $t/t_R=0.39$

(c) $t/t_R=0.68$

(d) $t/t_R=1.00$

図2 試験片ねじ部の光学顕微鏡による金属組織観察結果

は試験片中心付近である。参考のため、クリープ試験がなされていない試料(以後、これを未試験材と呼ぶ)についても非破壊評価が行われた。

2.3 非破壊評価 超音波特性の計測については、公称周波数 15 MHz の超音波探触子を用いて減衰率測定およびノイズ分析を行った。減衰率測定においては、底面エコーの振幅値を測定しておき、隣合う 2 本の底面エコーの振幅値の比と測定試料板厚から減衰率を求めた。ノイズ分析は超音波が測定試料内を伝ば中に散乱して戻ってくる信号、すなわち後方散乱ノイズを周波数領域(本研究では、0.5 MHz から 25 MHz までの範囲)で評価する方法である。これらの超音波測定法の詳細については米山らの報告⁽⁶⁾を参照されたい。

密度測定では、電子天秤を用いてクリープ試験前の試料(未試験材)に対するクリープ損傷を受けた試料(損傷材および破断材)の密度の変化を求めるもので、すなわち相対的な密度変化量を測定するものである。密度測定用液にはフロリナートを用いた。測定方法の

詳細については貝瀬らの報告⁽⁶⁾を参照されたい。

非破壊的密度測定⁽⁷⁾の原理は材料のガンマ線吸収に基づいている。ある一定の強さのガンマ線を試料に透過させると吸収作用によりガンマ線は減衰する。材料の吸収係数および試料の厚さがあらかじめ判明していれば、減衰後のガンマ線の強さを測定することにより、次の吸収法則に基づいて密度が求められる。

$$\rho = \frac{1}{\mu x} \ln \frac{N_0}{N} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N_0 : 試料透過前のガンマ線の強さ、 N : 試料透過後のガンマ線の強さ、 ρ : 試料の密度、 μ : 試料の吸収係数および x : 試料の厚さである。ガンマ線の測定直径は 4.0 mm とした。

渦電流特性測定⁽⁸⁾の原理は材料が有する固有の導電率と透磁率の位相差とピーク値が異なっていることを利用して、導電率と透磁率による位相差のピーク値を求めるものである。測定は未試験材を補償試験片とする示差方式で行い、検査周波数は 2 kHz とした。

(a) $t/t_R = 0$

(b) $t/t_R = 0.39$

(c) $t/t_R = 0.68$

(d) $t/t_R = 1.00$

図 3 試験片平行部の走査電子顕微鏡による金属組織観察結果

3. 実験結果

3・1 光学顕微鏡および走査電子顕微鏡観察 図2にそれぞれの試料のねじ部の金属組織を光学顕微鏡で観察した結果を示す。すべての試料でロータ材料に特有な焼戻しベイナイト組織が観察され、それぞれの試料の間で金属組織の差異は見られない。したがって、無負荷で単に加熱されただけ、すなわち加熱時効だけでは加熱時間の長短に関係なく本供試材において顕著な損傷は見られない。図3には試験片平行部のクリープ損傷進行に伴う微視組織の変化状況を走査電子顕微鏡により観察した結果を示す。図2の場合とは異なり、クリープ損傷の増加(試験時間の増加)に伴い金属組織に差異が生じている。すなわち、損傷材Aでは未試験材と差異はない。損傷材Bでは図に示すようなクリープキャビティが所々に生じており、破断材の破断部近傍ではクリープキャビティが合体してき裂化しつつあるものがある。これより、クリープ損傷の進行に伴って、クリープキャビティは発生、成長および合体していくことがわかる。一般的に、1Cr-1Mo-0.25V鋼のような耐熱鋼において、クリープキャビティの発生はクリープ破断寿命に至るまでの期間の後半で顕著となるが⁽⁹⁾、本供試材でも実験点は少ないものの同様の傾向がうかがわれる。

図4 超音波特性測定結果

3・2 超音波測定結果 図4はクリープ寿命消費率と超音波パラメータである減衰率、ノイズ値との関係を示す。図においてそれぞれの超音波パラメータは未試験材の測定結果によって基準化されている。図より試験中にクリープ損傷を受ける試験片平行部ではどちらの超音波パラメータもクリープ寿命後半において増加するが、ノイズ値のほうがそれはより敏感であることがわかる。この減衰率とクリープ寿命消費率との関係は従来の結果⁽⁹⁾とよく一致している。試験中無負荷状態で加熱されていると考えられる試験片ねじ部では、クリープ寿命消費率に関係なく超音波パラメータはほぼ変化しない。これらの結果は、超音波パラメータの変化が加熱時効だけでは起こらず、クリープ損傷の進行によってもたらされるものであることを示している。

3・3 電子天秤による密度測定結果 図5はクリープ試験時間と電子天秤によって測定された密度変化の関係を示す。図5より、密度は試験片ねじ部では変化せず、試験片平行部ではクリープ試験時間の増加とともに減少することがわかる。密度の減少は超音波パラメータの場合と同様に、加熱時効だけでは起こらず、クリープ損傷の進行によってもたらされる。

図5 電子天秤による密度変化測定結果

図6 ガンマ線による密度変化測定結果

3.4 ガンマ線を用いた非破壊的密度測定結果

図6はクリープ試験時間とガンマ線を用いて非破壊的に測定された密度との関係を示す。図5に示した電子天秤による密度測定結果と同様に、密度は試験片ねじ部では変化せず、試験片平行部ではクリープ試験時間の増加とともに減少する結果となっている。この場合にも密度の減少は、加熱時効だけでは起こらず、クリープ損傷の進行によってもたらされるものであることを示している。

3.5 渦電流特性測定結果 図7は渦電流特性の測定結果を、導電率と透磁率による位相差のピーク値として示したものである。試験片平行部とねじ部では特性が明らかに異なっており、平行部でも破断材では損傷材A、Bと比較してその特性が大きく異なる。この渦電流特性の違いは一義的には上記の密度変化を反映しているものと考えられる⁽¹⁰⁾。

4. 考 察

以上の結果を基にして、超音波パラメータとクリープ寿命消費率の関係、超音波パラメータがクリープ損傷の進行に伴って変化する原因について考察する。

3.2節に記したように、超音波パラメータはクリープ破断寿命に至る期間の後半において顕著に変化し、加熱時効だけではほとんど変化しない。損傷材における金属組織の観察および密度、渦電流特性測定結果から考えると、このような超音波パラメータの変化はクリープキャビティの発生状況を反映した結果である。

クリープ損傷の進行に伴って、超音波パラメータである減衰率とノイズ値は物理的には次のような原因で変化すると考えられる。超音波は材料内を伝ばする間に減衰するが、材料内にクリープキャビティのような超音波の散乱をさらに促進するものがあれば減衰が加速されることになる。前述のごとく耐熱鋼においては、クリープキャビティの発生、成長はクリープ寿命後半で顕著となるので、これに伴って超音波の減衰もクリープ寿命後半で大きくなることになる。ノイズ値は超音波が材料内を伝ばするときになんらかの障害にぶつかり、後方に散乱してきた超音波の強度である。クリープ損傷を受けた材料において、この障害の主要因は発生、成長および合体してき裂化したクリープキャビティであると考えられる。よって、ノイズ値もクリープ寿命後半で大きくなることになる。

本研究で用いたロータ材のような耐熱鋼のクリープ損傷過程はクリープキャビティの発生、成長および合

図7 渦電流特性測定結果

体の過程であると言えるので、この現象を捉えることができる超音波法はロータ材料のクリープ寿命後半における非破壊的余寿命評価法として有効であると言える。

5. 結 言

本研究では、超音波法によるクリープ損傷検出の物理的意味について実験的に検討を行った。

クリープ損傷の進行に伴う超音波パラメータ、減衰率とノイズ値の変化は、金属組織の観察や密度測定などの結果から、クリープキャビティの発生、成長挙動を反映した結果であると考えられる。

この結果より、ロータ材料のクリープ損傷に関する余寿命評価に対して、超音波法の有効性が示された。

超音波測定にご協力いただいた石川島播磨重工業(株)技術研究所・米山弘志氏、中代雅士氏、密度測定にご協力いただいた金属材料技術研究所・田中秀雄氏、元(株)シーケービー・矢尾板達也氏、渦流特性測定にご協力いただいた(株)シーケービー・飯島伸一氏に深甚なる謝意を表す次第である。

文 献

- (1) 酒井・藤縄・岡村・松原・新田・高野, 機論, 55-515, A(1989), 1640.
- (2) 松原・新田・酒井・藤縄, 材料, 39-442(1990), 1049.
- (3) Matsubara, M., Shiotani, S., Nitta, A., Okamura, H., Sakai, S. and Ohko, S., *Mechanical Behavior of Materials-VI*, 4(1991), 779.
- (4) 新田・緒方・松原・塩谷, 第28回高温強度シンポジウム前刷集, (1990-12), 1.
- (5) 米山・中代・村上・芝田・大友, 石川島播磨技報, 28-5(1988), 306.
- (6) 貝瀬・江頭・岸本・新谷, 耐熱金属材料第123委員会研究報告, 26-1(1985), 11.
- (7) (株)シーケービー, Gamma Densomat カタログ, (1989).
- (8) (株)シーケービー, eddyliner カタログ, (1989).
- (9) 例えば, 丹・祐川・桜井・川崎, 日立評論, 72-8(1990), 725.
- (10) 飯島, 私信.