

オーステナイト系ステンレス鋼のクリープ 損傷中の非線形超音波量の変化

湘南工大 ○大谷 俊博, 湘南工大[院] 草薙 裕紀, 石井 優

Evolution of Nonlinear Acoustics during Creep Damage in an Austenitic Stainless Steel

Toshihiro OHTANI, Yuuki KUSANAGI and Yutaka ISHII

1 緒 言

火力発電プラントの構成材料の経年劣化においてクリープ損傷は重要な問題である¹⁾。クリープとは、高温、一定荷重(応力)下において、熱活性の助けで材料が徐々に連続的に変形し、最終的には壊れるという挙動である¹⁾。この変形は材料微視組織の変化とひずみの累積の相互作用に関連付けられ、ひずみの累積は転位運動や微視組織(Sub-structure)に支配される¹⁾。近年の地球温暖化防止対策による二酸化炭素量排出規制のため、火力発電プラント機器は、より高効率化が計られ、高温高压の過酷な運転が強いられる傾向にあり、これらの構成材料の損傷・劣化の懸念はますます増えてきている¹⁾。

このような状況下において、火力発電プラント設備の安全性と信頼性を保つためには、構成材料の健全性・余寿命を評価する技術が必要不可欠である。材料内部の組織変化が検出可能で、非破壊的に現場で広範囲の計測が容易な検査手法が強く望まれている¹⁾。

ここでは、非線形超音波法を用いて金属材料のクリープ損傷を評価しようとした。非線形超音波はクリープ進行中の転位組織の変化を捕らえられる可能性をもつので、その適用は、金属材料のクリープ特性特徴づける手法となる可能性を持つと考えられる。非線形超音波は、線形特性(音速や減衰など)よりもクリープ中の材料の微細組織の変化に敏感である²⁾。その非線形超音波法では、次のような音響特性 ①高調波の発生、②分調波の発生 ③共鳴周波数の移動 ④混合した周波数の応答、の観察から評価をしている。これまでの非線形超音波法を用いた疲労およびクリープ損傷の評価に関する研究においては、接触式の圧電超音波センサを用いて①高調波の成分の振幅の計測が多く行われていた。この手法では、接触による非線形性等の計測システムによる非線形性から、損傷に伴う非線形性を抽出する難しさがある。

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 のクリープ損傷中の非線形超音波量を、③共鳴周波数の移動(非線形超音波スペクトロスコピー: Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy: NRUS)³⁾を用いて評価した。NRUS法は、共鳴周波数の入力信号(加振力)を増加させ、共鳴周波数の振幅依存性を調べる方法である。ここでは、NRUS法に非接触で超音波を送受信できる電磁超音波センサ(EMAT)⁴⁾を適用し、接触による非線形性を考慮せず、また、損傷に伴う試料単体の微量な共鳴

周波数変動の計測が可能である。ここで用いた EMAT は、板状試験片の板厚方向に体積波の横波を送受信出来るセンサである。NRUS は、クリープ寿命の 50% で最大値を示した。この現象は超音波減衰の測定でも観察された。それらは転位による吸収減衰に支配されることが分かった。非接触 NRUS 法は、クリープ損傷評価および余寿命予測を高精度に行える可能性を示した。

2 実験方法

2.1 試験片と試験条件 本研究に用いた試験片の形状を Fig.1 に示す。ゲージ部は、幅 18 mm、長さ 35 mm、厚さ 5 mm であり、いずれも圧延方向は、長手方向である。素材はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いた。熱処理方法は、1423 K で 2 時間保持空冷である。室温での機械的性質は 0.2 % 耐力が 301 MPa、引張強さが 668 MPa、破断伸びが 61% であった。

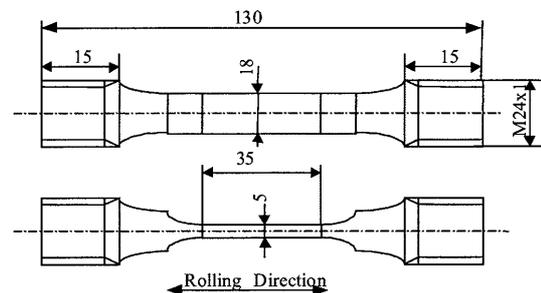


Fig.1 Specimen geometry

クリープ試験は、縦型単レバー式クリープ試験機と加熱電気炉を用い、大気中 973 K、120MPa で行なった。1本の試験片を用いて 30 h 毎にクリープ試験を中断し、室温で超音波特性を計測した後、再びクリープ試験を行う。これを破断まで繰り返す。

2.2 非線形超音波スペクトロスコピー (NRUS) NRUS法は、加振力の変化に伴う試料の共鳴周波数の移動を計測することである。加振力の増加につれて、弾性非線形性が、共鳴周波数の移動を引き起こしている。この方法の結果を Fig.2 に示す。ここでは、未損傷と損傷材における共鳴周波数の振幅依存性を示している。未損傷材では、共鳴周波数の移動が見られないが、損傷材では共鳴周波数に移動が見られる。ここでは、この周波数の移動量 Δf を非線形量として定義している³⁾。

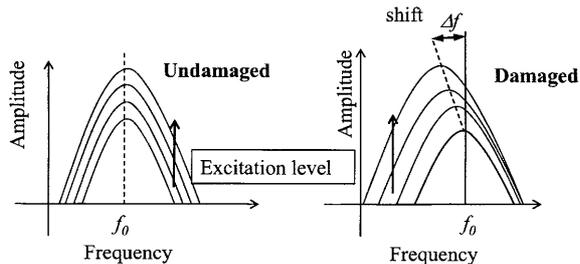


Fig. 2 NRUS changes from intact and damaged sample.

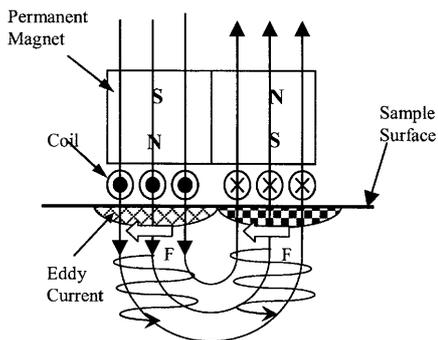


Fig. 3 Structure of the shear wave EMAT

この NRUS 法に非接触で超音波を送受信する電磁超音波センサ (EMAT)⁴⁾ を適用した。用いた体積波横波 EMAT を Fig.3 に示す。横波 EMAT は、トラック状に巻いた平面コイルと一対の永久磁石から成り、ローレンツ力を利用して、試料表面に垂直に伝播する横波を送受信する (Fig.3 参照)。ここで用いた横波 EMAT の受送信の有効面積は $10 \times 10 \text{ mm}^2$ である。

また同時に減衰係数も計測した。減衰係数は、各共鳴周波数で EMAT を励起して共鳴状態をつくり、励起後の残響を測定することで減衰曲線を得る⁴⁾。この曲線に指数関数を近似して減衰係数を決定する。

3 実験結果

Fig.4 に 120MPa の応力を負荷した時のクリープ損傷中のクリープひずみ、ひずみ速度、NRUS 法による非線形超音波量、相対音速比 $\Delta V/V_0$ (初期音速 V_0)、減衰係数 α の変化を示す。横軸は寿命消費率 t/t_r (t :クリープ時間) である。破断時間 t_r は 298 h であった。共鳴周波数は 2 次モードの共鳴周波数 (1.5MHz 近傍) の場合である。ここでの非線形超音波量 NRUS は $\Delta f/f_0$ を用いた。 $\Delta f/f_0$ は、Fig.2 に示した共鳴周波数の移動量 Δf を、振幅に依存しない共鳴周波数 f_0 で割った値である³⁾。NRUS は $t/t_r=0.5$ ピークを示し、その後減少し $t/t_r=0.70$ 付近から破断まで増加していく (Fig.4(a)参照)。 α は、非線形超音波量と同じ傾向であった。一方音速は単調に増加した。最大変化量は 7%程度であった (Fig.4(b)参照)。クリープひずみ速度は、クリープ開始から $t/t_r=0.3$ まで減少した後 $t/t_r=0.70$ まで一定になり、その後は破断まで増加している

(Fig.4(c))。この変化は遷移、定常と加速クリープに対応している。非線形音響量の変化は、減衰係数の変化と同じである。クリープ損傷にともなう多様な組織変化の中から、非線形音響量に影響を及ぼす因子として、転位組織の変化による非線形性の発現に起因すると考えられる。

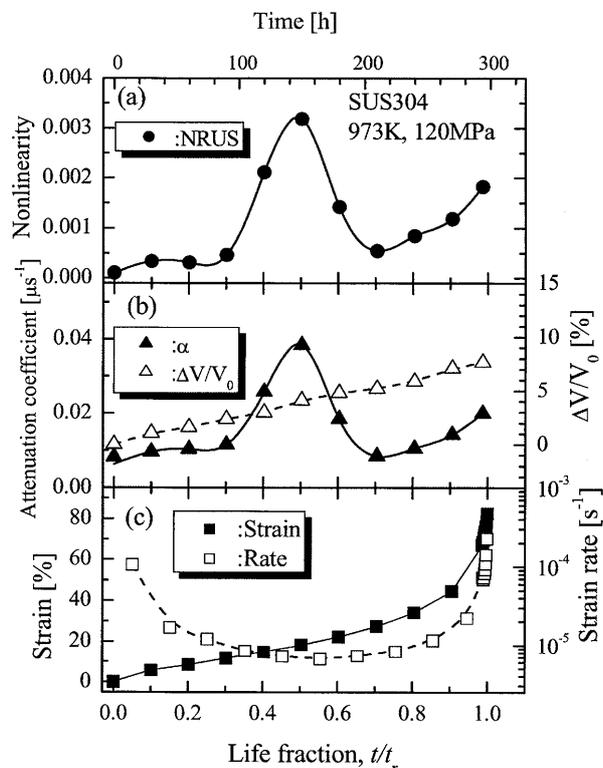


Fig.4 Evolutions of nonlinear acoustic parameter in NRUS and attenuation, velocity, creep strain and rate during creep progression in SUS304 (973 K, 120 MPa).

4 結論

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 のクリープ損傷を、非接触・NRUS 法による非線形超音波量の変化から評価した。非線形音響量はクリープ寿命の約 50%で極大値を、寿命の約 70%で極小値を示した。音響非線形量の変化は、超音波減衰の変化と同じであった。これらの変化は、転位組織の変化による非線形性の発現に起因する。

参考文献

- 1) R. Viswanathan, "Damage mechanism and life assessment of high temperature components", pp.1-20. and pp.225-228 (1989) ASM International, Metals Park, Ohio.
- 2) K.Y. Jhang, *IEEE-UFFC*, Vol.47, No.3. pp.540-548 (2000).
- 3) K.E. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J.A. Ten Cate and P.A. Johnson, *Re. Nondestr. Eval.* Vol. 12, No.1, pp.31-42, (2000).
- 4) M. Hirao, and H. Ogi, "EMATs for Science and Industry: Nondestructive Ultrasonic Measurements", pp.1-92 and pp.135-196 (2003) Kluwar Academic Publishers, Boston.