高温機器における余寿命診断技術開発の最前線

4. 電磁超音波共鳴法を用いた余寿命診断技術の開発[†]

大谷 俊博*

The Frontier of Technology Development in Remaining Life Assessment for High Temperature Components

IV : Technology Development in Remaining-Life Assessment with Electromagnetic Acoustic Resonance

by

Toshihiro OHTANI*

Key words : Creep, Heat-resistant steel, Superalloy, Non-destructive evaluation, Remaining-life prediction, Damage evaluation, Electromagnetic acoustic resonance, Ultrasonic attenuation, Non-linear acoustics

1 緒 言

高温高圧下で使われる火力発電プラント機器の多くは、実働時間が10万時間を越えても運転されている。これらの機器は、20～30年前に建設されたものが多く、経年劣化が進んでいるにもかかわらず過酷な運転を強いられている。また近年の地球温暖化の原因となっている二酸化炭素の排出量を押さえる目的から、これらエネルギープラントにおいては、現状のエネルギー供給量を維持しつつ高効率化が図られ、さらに高温・高圧力の運転に移行する傾向がある。また、1980年代の電力需要形態の変化により、従来のベースロードの運転から中間負荷運転へ移行され、DSS (Daily Start and Stop) WSS (Weekly Start and Stop) のような頻繁な起動停止や急速な負荷変動などの苛酷な運転が強いられるようになり、これらエネルギープラントの構成材料の損傷・劣化はますます加速する傾向にある。また、高度経済成長時代のように、経年劣化が生じる以前に新しい設備に取換え、更新することは経済的、社会的にも難しくなっている。さらに3月11日東日本大震災以降の電力不足により、休止していた老朽化した火力発電所の再稼働が起きている。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非破壊的に構成材料の健全性・余寿命を評価する技術が必要不可欠である。^{1)~4)}

火力発電プラント等の高温機器に使用される金属材料に発生する代表的な損傷は、クリープ損傷、疲労損傷、酸化、熱脆化、水素侵食そして脱炭などである。¹⁾それら損傷劣化の中でクリープ損傷は重要な問題であり、従来から多くの研究が行われてきた。クリープとは、高温において材料が一定荷重または応力下で時間の経過と

もに変形（クリープ変形）が進み、最終的には破壊（クリープ破壊）に至る現象である。^{5), 6)}これらは材料、温度、荷重条件により異なった機構で発生する。クリープ変形の要因は、拡散クリープと転位クリープに大別される。拡散クリープは融点 (T_M) 近傍の低応力で生じるので、工学的にはあまり重要ではない。 $0.5T_M$ 以上の中・高応力下で起き、工業材料では重要な変形機構である転位クリープによる変形は、空孔拡散による転位の非保存運動（上昇運動）あるいは交差すべりによって律速される。^{5), 6)}破壊は、き裂が結晶粒内を横切る粒内破壊か結晶粒界を通る粒界破壊のいずれかである。

クリープによる損傷は、通常的手段で検出される欠陥よりかなり小さく、運転時間の経過とともに累積され、構成材料全体に広がる。主に表面から進行する疲労損傷とは異なり、必ずしも表面から損傷して行くとは限らないという特徴をもつ。⁷⁾さらに損傷形態が複雑であり、変形、ボイド・微視き裂の発生、炭化物や σ 相の析出などの組織変化が現れる。また、実機では、材質、温度、応力および時間に依存した内部組織の変化を含む複合的な損傷形態が現れる。そのため、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。

本連載講座「高温機器における余寿命診断技術開発の最前線」では、高温機器の損傷評価および余寿命技術の最前線の話について概説してきた。最終回となる本稿では、材料の組織変化が検出可能であり、実機部材への適用が将来有望な非破壊評価法である電磁超音波共鳴法 (Electromagnetic Acoustic Resonance : EMAR)⁸⁾によるクリープ損傷評価適用例について概説する。EMAR法は、

[†] 原稿受理 平成24年6月5日 Received June 5, 2012 ©2013 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 湘南工科大学工学部機械工学科 〒251-8511 藤沢市市辻堂西海岸, Dept. Mech. Eng., Shonan Inst. Tech., Tsujido-Nishikaigan, Fujisawa, 251-8511

非接触で超音波を送受信できるので、材料内部の超音波減衰と非線形超音波特性の高精度な計測が可能となる。これまで EMAR 法による超音波減衰からのクリープ損傷評価の研究は、2.25Cr-1Mo 鋼, Cr-Mo-V 鋼, オーステナイト系ステンレス鋼, マルテンサイト系ステンレス鋼, Ni 基超合金について行われ^{9)~16)}超音波減衰がクリープ寿命の特定の時期にピークを示すことが明らかになってきた。これらは転位の可動性や再配列に起因することを示した。また最近、従来の線形超音波特性よりも組織変化に敏感な非線形超音波法¹⁷⁾へ EMAR 法を適用したクリープ損傷評価の研究がおこなわれ始めている。¹⁸⁾そこで今回の解説では、EMAR 法を用いたクリープ損傷評価を、超音波減衰、非線形超音波特性と材料の微細組織の変化から評価した適用例 (Ni 基超合金, Cr-Mo-V 鋼) について概説する。^{12), 13), 18)}

2 電磁超音波共鳴法 (EMAR)

EMAR 法は、非接触で超音波を送受信できる電磁超音波センサ (Electromagnetic acoustic transducer : EMAT)⁸⁾を用いて金属内に超音波共鳴を発生させ、その共鳴スペクトルから材料を評価する非破壊検査法である。この方法は EMAT の非接触性と超音波共鳴のコヒーレント性がお互いの短所を補い合う。当初は薄板の集合組織検出に適用されていた^{19), 20)}が、スーパーヘテロダインによる信号処理法²¹⁾や EMAT の高感度化が進み圧電探触子に匹敵するほどの感度が得られるようになった。しかも非接触性は保たれており、被測定物表面の汚れや錆などの影響は受けにくく簡便かつ迅速に測定を行うことができる。また EMAT には送受信効率の低いという欠点があるが、これは受信時に超音波のエネルギーの損失がほとんどないことになる。このため圧電探触子では測定が極めて困難であった高精度の超音波減衰や非線形超音波量などの貴重な情報を容易に得ることができる。⁸⁾

超音波減衰による損傷評価では、図 1 に示す体積波横波 EMAT を用いて、試験片の板厚方向に超音波を送受信した。トラック状コイルと 1 対の永久磁石から構成され、ローレンツ力により超音波を非接触で送受信する。また、非線形超音波による損傷評価では、図 2 に示す軸対称 SH 波を送受信する EMAT を用いて、丸棒試験片の外表面を軸方向に偏向しながら、周方向に伝搬する表面

図1 体積波横波 EMAT の構造と送受信原理

図2 軸対称 SH 波 EMAT の構造と送受信原理

SH 波を送受信した。この EMAT は、蛇行コイルとソレノイドコイルから構成され、磁わい効果により音波を非接触で送受信する。これら EMAT の超音波の送受信の原理、超音波減衰や非線形超音波の計測法の詳細は参考文献を参照のこと。⁸⁾

3 超音波減衰による余寿命診断技術

ガスタービンやガスエキスパンダーの部材として良く使われる Ni 基耐熱合金ワスパロイのクリープ損傷と減衰係数と微細組織の変化の関係について述べる。^{12), 13)}

クリープ試験片は文献 12), 13) に示すようなゲージ部長さ 35mm, 幅 18mm, 厚さ 5mm の板状の試験片を用いた。クリープ試験は、多数の試験片を用意し、それぞれを所定のクリープひずみに至るまでクリープ試験 (大気中 800°C, 応力 140MPa) を行い、その後、室温にて超音波特性を計測した。それぞれの試験片の破断寿命 t_b は、修正 θ 法²²⁾と破断パラメータ P_{α} ²³⁾を用いて推定した。クリープ時間 t を推定破断寿命 t_b で除した値が推定寿命消費率 t/t_b である。

図 3 に Ni 基耐熱合金ワスパロイのクリープ試験にともなう減衰係数の変化 (単位時間あたりの超音波減衰) を推定寿命消費率 t/t_b について整理した結果を示す。^{12), 13)} 共鳴周波数が 5 次 (共鳴周波数 1.5MHz 近傍), 8 次 (2.5MHz 近傍), 11 次 (3.5MHz 近傍) と 14 次 (4.5MHz 近傍) モードの例を示す。個々の点がそれぞれ一つの試験片を表す。減衰係数は寿命の 30% でピークを示し、その

図3 ワスパロイのクリープ損傷中の 5, 8, 11, 14 次モードの減衰係数と推定寿命消費率の関係 (800°C, 140MPa)

後減少した後ほぼ一定になる。他の応力や他の共鳴モードでも同様な傾向を示していた。

図4 (a)に第11次共鳴モードの減衰係数 α 、相対音速比 $\Delta V/V_0$ ($\Delta V = V - V_0$, V :各クリープ試験終了時の音速, V_0 :初期音速), クリープひずみと推定寿命消費率 t/t_r の関係を示す。^{12), 13)} また図4 (b)には、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察によって測定した微細な γ' 粒子 (Al-Ti-Niの金属間化合物) の平均粒径と数密度の変化を示す。 $\Delta V/V_0$ は寿命の30%までは0.4%程度増加し、その後寿命の50%で減少し、その後はほとんど変化せず、破断直前で減少する。最大変化量は0.4%程度である。 α の最大値と $\Delta V/V_0$ の極大値が同時期 $t/t_r = 0.3$ で現れた。このような α や $\Delta V/V_0$ の変化は単調ではないため、クリープ損傷評価には $\Delta V/V_0$ と α を併用することが有効な手段となる。また γ' 粒子はクリープ開始から粒径が増大し、数密度は低下していく (図4 (b)参照)。寿命の約30%でその変化率はほぼ一定になる。これは、 γ' 粒子の凝集粗大化が飽和する時点が、 α がピークを示す時点と一致していることを示している。

透過型電子顕微鏡 (TEM) によって観察されたクリープ進行中の内部組織の変化を図5に示す。^{12), 13)} この観察と減衰係数の変化の関係を調べたところ以下のような事柄がわかった。

- クリープ前の組織 [図5 (a)] では、粒径が $0.05\mu\text{m}$ 以下の微細な γ' 粒子が緻密かつ均一に分布している。その間隔は $0.05\mu\text{m}$ 程度である。転位密度は低く、転位は γ' 粒子間を連なるように分布している。転位長さは $0.5\mu\text{m}$ から $0.6\mu\text{m}$ である。
- 図4において α が極大値を示した組織が図5 (b)である。転位密度は高くなり、 γ' 粒子に絡みついた転位線が見られる。 γ' 粒子の凝集・粗大化により、数密度が減少し、粒径は増加している。その大きさは $0.2\mu\text{m}$ 程

図4 ワスパロイのクリープ損傷中の (a) 11次モードの減衰係数、相対音速比、クリープひずみと (b) γ' の平均粒径および数密度の関係 (800°C , 140MPa)。

図5 ワスパロイのクリープ試験前とクリープした試験片 ($t/t_r = 0, 0.31, 0.68$ と 0.83) の TEM による組織観察 (800°C , 140MPa)

度のものが多い。この結果として γ' 粒子の間隔は広がり、 $0.2\mu\text{m}$ 以上になっている。

- α が減少している時点の組織が図5 (c)である。 γ' 粒子の凝集・粗大化はいっそう進み、転位密度はさらに増加し、 γ' 粒子に絡みついた転位線や転位線同士が絡まっているのが多く見られる。
- 破断直前の組織 [図5 (d)] においては、ほとんどの転位が複雑に絡み合い、 γ' 粒子に幾重にも絡まり堆積している。クリープ損傷中のTEM観察において、転位は粒界に少なく、粒内に転位量が多かった。

図5で示した組織観察結果と図4の減衰係数 α の関係について、GranatoとLuckeの弦モデルを用いて説明する。²⁴⁾ 超音波による変動応力が加わったとき、転位はこれとともに振動し、超音波エネルギーが吸収されると考えられている。このような転位の振動を、粘弾性体中の弦の振動としてモデル化し、減衰係数 α と転位密度 Λ 、平均転位長さ L との関係を式(1)のように導いた。

$$\alpha = A_1 \Lambda L^4 f^2 \quad (1)$$

ここで、 A_1 は正の定数であり、剛性率、ポアソン比、転位運動の比粘弾性係数、バーガースベクトルに依存する。 f は周波数である。このモデルによると、減衰係数は転位密度 Λ と転位の平均長さ L の4乗に比例する。転位を釘付けする因子として転位網、格子間不純物原子や点欠

陥がある。ただし、注意すべきことは、式 (1) がすべての転位を対象としているわけではなく、可動転位すなわち超音波のような低応力波に対しても振動できる転位だけを対象にしていることである。結晶粒界や γ 粒子周辺に堆積している転位は、 α に貢献できない。

ワスパロイにおいて、クリープ初期から転位の運動（すべり、増殖）（図5参照）が起こっている。また、 γ 粒子の凝集・粗大化が起きて（図4(b)参照）、 γ 粒子同士の間隔が広がっている。転位の固着点長さが大きくなり転位が動きやすくなる。その結果、 Λ が増大し、 L が大きくなり α が増加する。そして寿命の30%を超えても、クリープ進行とともに全転位密度はさらに増加する。 γ 粒子の凝集・粗大化の速度は低下し（図4(b)参照）、 γ 粒子同士の間隔の広がりも鈍る。その結果、 γ 粒子への転位の堆積や転位同士の絡み合いが多くなり（図5(c)参照）、転位間隔も狭くなっていく。また転位間の相互作用が強くなり転位の運動に抗する応力を生じさせる。²⁵⁾それにより可動転位密度が急激に低下し、 α の極大値が現れる。寿命の50%以降は、 γ 粒子の凝集・粗大化はほぼ終了する。クリープ進行とともに全転位密度は増加し続け、 γ 粒子への転位の堆積や転位同士の絡み合いがさらに進み（図5(d)参照）、可動転位がなくなり、 α はほぼ一定になる。また、これまでステンレス鋼、2.25Cr-1Mo鋼、Cr-Mo-V鋼のような全く異なる材料においても、クリープ損傷中、減衰係数がピークを示すことが観察された。^{9)~16)}その結果をまとめた結果を表1に示す。このことは本測定法の普遍性を示すものである。

4 非線形超音波による余寿命診断技術

非線形超音波法による診断技術では、次のような4つの音響特性の観察から評価をしている。¹⁷⁾

- 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

これまでの非線形超音波法を用いた疲労や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。^{26)~32)}この手法では、接触による非線形性や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。¹⁷⁾本講ではEMAR法を用いて接触による影響を除いた①高調波の発生を検出する手法による評価例を示す。¹⁸⁾

EMAR法を用いた第二次高調波の非線形超音波量の測

表1 種々の金属材料におけるクリープ損傷中の減衰係数がピークを示す寿命比

材料	SUS304	SUS316L	2.25Cr-1Mo	Waspaloy	Cr-Mo-V	SUS403
減衰係数のピークがでる寿命比	0.4-0.5	0.6-0.7	0.5-0.6	0.3-0.4	0.3-0.4	0.2
試験温度 (°C)	700	700	650	800	650	600
応力 (MPa)	100,120	100,110,120	45,65	140,150,160	25,35,45,55	100,120,140,160

定方法を以下に示す。^{18), 32)}まず共鳴周波数 f_r （1次共鳴モードの約3.9MHzを用いた。浸透深さはおよそ0.5mmと推定）での振幅強度を測定し、この最大振幅を基本周波数の振幅 $A_1(f_r)$ とする（図6参照）。次に入力電力を保持したまま、半分の周波数 $f_r/2$ で蛇行コイルを駆動し、周波数 $f_r/2$ の軸対称SH波を発生させる。この周波数では共鳴条件を満足しないが、非線形効果によって発生した $f_r/2$ の2倍の周波数(f_r)を持つ成分は共鳴するので、その振幅を測定する。この最大振幅を第二次高調波の振幅 $A_2(f_r)$ （図6参照）とする。ここでは A_2/A_1 を非線形超音波量と定義して測定対象とした。 A_2/A_1 の値は 10^{-3} オーダーの値を示す。この非線形超音波量の測定はRITEC社製のSNAP装置を用いた。また非線形超音波量以外に、1次の共鳴周波数での減衰係数も測定した。

丸棒試験片のゲージ部は、直径14mm、長さ60mmである。³³⁾素材は市販のCr-Mo-V鋼、SNB16を用いた。大気中650°C、応力25MPaの条件下でクリープ試験を行い、前述のワスパロイと同様な方法で種々の寿命消費率を有する試験片を作成した。

図7にクリープひずみおよびひずみ速度、減衰係数 α 、相対音速比 $\Delta V/V_0$ 、非線形超音波量 A_2/A_1 と推定寿命消費率 t/t_r との関係を示す。¹⁷⁾クリープひずみ速度は、クリー

図6 EMAR法による第二次高調波の計測方法

図7 Cr-Mo-V鋼のクリープ損傷中の (a) クリープひずみとひずみ速度、(b) 減衰係数、相対音速比と (c) 非線形超音波量 A_2/A_1 の関係 (650°C, 25MPa)

ブ開始から寿命の20%まで減少した後50%まで一定になり、その後は破断まで増加している。この変化は遷移、定常と加速クリープに対応している[図7(a)]。

図7(b)に1次共鳴周波数での線形特性(減衰係数と音速)の変化を示す。 α は $t/t_r = 0.3$ でピークを示し、その後 $t/t_r = 0.5$ まで減少し、破断まで急増する。一方、 $\Delta V/V_0$ は徐々に減少し、 α がピークを示したところで極小値を示した。その後僅かに増加後、破断まで急激に減少していく。最大変化量は2%程度である。

図7(c)に非線形超音波量 A_2/A_1 の変化を示す。ここでは2つの重要な事象を示している。(1) A_2/A_1 は、 $t/t_r = 0.3$ でピークを示し、 $t/t_r = 0.5$ で極小値を示す。(2) A_2/A_1 の変化は減衰係数の変化と類似しており、その変化量は、減衰係数の変化量よりも大きい。

TEMによって観察されたクリープ試験中の転位組織の変化を図8に示す。¹⁷⁾図8(a)はクリープ前の状態を、図8(b)~(d)はそれぞれ $t/t_r = 0.33, 0.57, 0.84$ 付近の組織を示す。図の上下方向が負荷方向である。クリープ前の組織では、伸長的なセル構造が数多く見られた。一部分、等軸的なセル構造も見られた。いずれのセル境界も明瞭ではない。セル内の転位同士は絡み合い、転位密度は高い。図8(b)では、等軸的なセル構造が多く見られる。一部伸長的なセル構造が見られた。セル内の転位密度は高

い。図8(c)は、図8(b)と同様に大部分が等軸的なセル構造で、一部伸長的なセル構造や亜結晶が見られる。亜結晶のサイズは図8(b)と同等程度であるが、セル構造のサイズは大きくなっている。セルおよび亜結晶の境界は、図8(b)より明瞭になり、セルや亜結晶内の転位密度は低くなっている。図8(d)は、大部分が亜結晶で、一部等軸的なセル構造や伸長的なセル構造が見られる。セルおよび亜結晶の境界はより一層明瞭になっている。セルや亜結晶内の転位密度は図8(c)よりかなり低くなっている。

固体が示す非線形音響現象の原因はさまざまであるが、古くから次のような3つの要因が知られている。^{34)~38)}

- (1) 固体を構成する結晶格子が有する非対称性
- (2) 転位の運動による非線形性
- (3) 固体に内在する欠陥やき裂により生じる非線形性

今回は、クリープのほとんどの過程において、き裂は観察されなかったことから、観察された非線形性は(1)と(2)によると考えられるが、観察結果から、この2つの要因を分けることは難しい。この2つによって高調波、特に2次高調波が発生していると考えられる。転位の運動に関して、Hikataら³⁹⁾は非弾性振動により引き起こされる高調波の発生を研究し、2次高調波の振幅が、可動転位の密度や長さの増加により増大することを示している。これまでの我々のクリープ中のTEMによる組織観察や超音波減衰の変化の研究から、非線形超音波量 A_2/A_1 の変化は、転位の運動、特に、可動転位の振動に起因すると考えられる。

また現在、③共鳴周波数の移動や④混合した周波数の応答を疲労やクリープ損傷評価に適用しつつある。その結果について今後発表していく予定である。

5 ま と め

電磁超音波センサと超音波共鳴法の組合せにより、クリープ中の超音波減衰と非線形超音波量を、非接触で計測し、材料の微細組織の変化との関係について説明をした。これまでの結果をまとめると以下ようになる。

(1) 超音波減衰が金属材料のクリープ過程を反映し最終的な破断に直接結びつく微視的特徴を検出できること、さらにそれらの変化が全寿命の特定の割合(寿命消費率)を再現性よく指し示している。

(2) 非接触で軸対称SH波の2次高調波を捕らえることができ、その非線形超音波量は、クリープ寿命の約30%でピークを、50%で極小値を示した。これは転位の運動と再構築によると理解できる。SEMやTEM観察による結果から裏付けられる。そのクリープ中の非線形超音波量の変化は、減衰係数の変化と同じであり、その変化量は、減衰係数の変化量よりも大きい。

(3) 電磁超音波センサと超音波共鳴法の組合せた手法は構造用金属材料のクリープ損傷評価と寿命予測を行える可能性を持っている。

(4) 現状は実験室段階での試験片ベースの評価であるため、実機測定部の複雑な形状に適したEMATの改良や計測装置の小型化が必要である。今後は、溶接部のような材質の不均一な部分への適用も検討課題である。

図8 Cr-Mo-V鋼のクリープ試験前とクリープした試験片($t/t_r = 0, 0.33, 0.57$ と 0.84)のTEMによる組織観察(650℃, 25MPa)

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) B. Raj, V. Moorthy, T. Jayakumar and R. K. Bhanu Sankara, "Assessment of microstructures and mechanical behavior of metallic materials through non-destructive characterization", International Materials Review, Vol.48, pp.273-325 (2003).
- 3) R. B. Dooley and R. Viswanathan, editors, "Life extension and assessment of fossil power plants", Proceedings of Conference in Washington, ERPICS5208, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (1987).
- 4) G. Sposito, C. Ward, P. Cawley, P. B. Nagy and C. Scruby, "A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels", NDT & E International, Vol.43, pp.555-567 (2010).
- 5) J. Cadek, "Creep in metallic materials", Elsevier, Amsterdam, pp.95-114 (1988).
- 6) F. R. N. Nabarro and H. L. de Villier, "The physics of creep : creep and creep-resistant alloys", Taylor & Francis Publisher, London, pp.15-43 (1995).
- 7) C. E. Jaske, F. A. Simonen and D. B. Roach, "Predict reformer furnace tube life", Hydrocarbon Processing, Vol.62, pp.63-68 (1983).
- 8) M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for science and industry: nondestructive ultrasonic measurements", pp.1-92 and pp.135-196 (2003) Kluwer Academic Publishers, Boston.
- 9) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Change of ultrasonic attenuation and microstructure evolution in crept 2.25%-1%Mo steels", Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.51, pp.195-201 (2002).
- 10) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Change of ultrasonic attenuation and microstructure evolution during creep of 2.25%Cr-1%Mo steels", Metallurgical and Metal Transaction A, Vol.36A, pp.411-420 (2005).
- 11) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Creep-induced microstructural change in 304-type stainless steel", Transaction of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.128, pp.234-242 (2006).
- 12) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Ultrasonic attenuation peak during creep of a nickel-base superalloy with electromagnetic acoustic resonance", Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.53, No.6, pp.692-698 (2004).
- 13) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Acoustic damping characterization and microstructure evolution of Ni-based superalloy during creep", International Journal of Solids and Structures, Vol.42, pp.2911-2928 (2005).
- 14) T. Ohtani and K. Takei, "Change of ultrasonic attenuation and microstructure evolution during creep of SUS316L austenitic stainless steels", Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.54, pp.607-614 (2005).
- 15) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Acoustic damping characterization and microstructure evolution during creep of a high temperature bolting steel", Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.4, pp.416-423 (2006).
- 16) T. Ohtani, "Acoustic damping characterization and microstructure Evolution during creep of a martensitic stainless steel", Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.2, pp.114-120 (2007).
- 17) K. Y. Jhang, "Nonlinear ultrasonic technique for nondestructive assessment of micro damage in material : a review", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol.11, No.1, pp.123-135 (2009).
- 18) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, "Noncontact evaluation of surface-wave nonlinearity for creep damage in a Cr-Mo-V steel", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48 No.7, 07GD02-1-6 (2009).
- 19) K. Kawashima, "Nondestructive characterization of texture and plastic strain ratio of metal sheets with electromagnetic acoustic transducers", Journal of Acoustical Society of America, Vol.87, pp.681-690 (1990).
- 20) K. Kawashima and O. B. Wright, "Resonant electromagnetic excitation and detection of ultrasonic waves in thin sheets", Journal of Applied Physics, Vol.72, pp.4830-4839 (1992).
- 21) G. L. Petersen, B. B. Chick, C. M. Fortunko and M. Hirao, "Resonance techniques and apparatus for elastic-wave velocity determination in thin metal plates", Review of Scientific Instruments, Vol.65, pp.192-198 (1994).
- 22) K. Maruyama, C. Harada and H. Oikawa, "A strain-time equation applicable up to tertiary creep stage", Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol.34, pp.1289-1295 (1985).
- 23) K. Maruyama and H. Oikawa, "An extrapolation procedure of creep data for st determination : with special reference to Cr-Mo-V steel", Transaction of American Society of Mechanical Engineering, Journal of Pressure and Vessel Technology, Vol.109, pp.142-148 (1987).
- 24) A. Granato and K. Lucke, "Theory of mechanical damping due to dislocation", Journal of Applied Physics, Vol.27, pp.583-593 (1956).
- 25) S. Karashima, "Recent studies on mechanism of high temperature creep of metals", Tetsu-to-Hagane, Vol.65, pp.820-830 (1979).
- 26) J. H. Cantrell, "Quantitative assessment of fatigue damage accumulation in wavy metals from acoustic harmonic generation", Philosophical Magazine, Vol.86, pp.1539-1554 (2006).
- 27) J. H. Cantrell, "Ultrasonic harmonic generation from fatigue-induced dislocation substructures in planar slip metals and assessment of remaining fatigue life", Journal of Applied Physics, Vol.106, Article number 093516 (2009).
- 28) S. Baby, B. Nagaraja Kowmudi, C.M. Omprakash, D. V. V. Satyanarayana, K. Balasubramaniam and V. Kumar, "Creep

- damage assessment in titanium alloy using a nonlinear ultrasonic technique”, *Scripta Materialia*, Vol.59, pp.818-821 (2008).
- 29) J. S. Valluri, K. Balasubramaniam and R. V. Prakash, “Creep damage characterization using non-linear ultrasonic techniques”, *Acta Materialia*, Vol.58, pp.2079-2090 (2010).
- 30) K. Balasubramaniam, J. S. Valluri and R. V. Prakash, “Creep damage characterization using a low amplitude nonlinear ultrasonic technique”, *Materials Characterization*, Vol.62, pp.275-286 (2011).
- 31) K. Y. Jhang, “Application of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation”, *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol.47, No.3, pp.540-548 (2000).
- 32) H. Ogi, M. Hirao and S. Aoki, “Noncontact monitoring of surface-wave nonlinearity for predicting the remaining life of fatigued steels”, *Journal of Applied Physics*, Vol.90, pp.438-442 (2001).
- 33) T. Ohtani, H. Ogi and M. Hirao, “Electromagnetic acoustic resonance to assess creep damage in Cr-Mo-V steel”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, No.5B, pp.4526-4533 (2006).
- 34) H. Hirao, “Nonlinear interaction of elastic waves and stress effect”, *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.56, No.6, pp.292-296 (2007).
- 35) D. C. Wallace, “*Thermodynamics of crystals*”, Dover Publisher, pp.14-18 (1972).
- 36) K. Y. Kim, “Thermodynamics at finite deformation of an anisotropic elastic solid”, *Physical Review B*, Vol.54, pp.6245-6254 (1996).
- 37) R. A. Guyer, P. A. K. McCall and G. Boitnott, “Hysteresis, discrete memory and nonlinear wave propagation in rock : A new paradigm”, *Physical Review Letters*, Vol.74, pp.3491-3494 (1995).
- 38) O. Buck, W. L. Morris and J. M. Richardson, “Acoustic harmonic generation at unbounded interfaces and fatigue cracks”, *Applied Physics Letter*, Vol.33, Issue 5, pp.371-373 (1978).
- 39) A. Hikata, F. A. Sewell Jr. and C. Elbaum, “Generation of ultrasonic second and third harmonics due to dislocation II”, *Physical Review*, Vol.151, pp.442-449 (1966).