

## クリープ損傷評価のためのノイズ分析法

荒川 敬弘 \*  
*Takahiro Arakawa*

畠中 宏明 \*\*  
*Hiroaki Hatanaka*

芝田 三郎 \*\*\*  
*Saburo Shibata*

高温構造物のクリープ損傷を非破壊的に評価する手法が望まれている。特に、近年高Cr鋼の使用に伴って、内部におけるクリープ損傷を評価する手法の確立が望まれている。そこで、当社が石川島播磨重工業(株)の協力の下で実施している超音波ノイズ分析法について紹介する。

キーワード：超音波、クリープ、ノイズ分析、Cr-Mo鋼

### 1. はじめに

人は年を取ると、いやおうなしに体力の衰えを感じる。これを無視してがんばり過ぎると、時には突然の悲劇に見舞われる。構造物の体力の衰えとして、時効脆化やクリープ損傷などがある。

特に、クリープ損傷は、末期においては急激な破断に至る恐れがあり、各種の予防保全などの対策が行われてきている。クリープとは、一定の応力のもとで塑性ひずみが時間的に増加する現象をいい、最終的に破壊した場合をクリープ破壊といっている。普通、クリープ現象は材料の融点（絶対温度）の約40%以上で顕著になるとされている。

しかし、体力の衰えにおいても、人によって大きな個人差があるように、構造物においても、受ける損傷の度合は異なってくる。特に、発電用ボイラにあっては、原子力発電を電力のベースロードとし、

電力の需要に応じて始動と停止を繰り返す場合もあり、使用環境においても損傷の度合は異なってくる。このために、非破壊検査によって、損傷の度合を正確に把握することが、求められている。

この目的で、石川島播磨重工業(株)では、超音波ノイズ分析法と称するクリープ損傷評価手法を開発し、当社も計測に携わりつつ、実機計測を行ってきた。ここでノイズ分析法について紹介したい。

### 2. 各種評価手法とノイズ分析法

クリープ損傷の評価方法として多くの研究報告があり、実機計測に用いられているものも多い。例えば、ポイド面積率法、結晶粒最大径角度法、結晶粒フェレ径比法や微視き裂法と呼ばれる組織検査法、硬さ測定法や、ミニチュアのサンプルを構造物から採取して、炭化物の組成を測定する方

\* 技術研究所 所長 工学博士

\*\* 石川島播磨重工業株式会社 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部

\*\*\* 元検査事業部 技術部 課長（現株式会社アデルコ）

法や、ミニチュアのクリープ試験を行う方法などが検討されてきている。

この他、X線回折を利用して結晶粒の変形を評価する方法、バルクハウゼン法などの磁気を利用する方法や、陽電子が電子とで消滅するときに発生する $\gamma$ 線の強度分布を評価する陽電子消滅法などの研究も進められてきている。しかし、ここに示した方法は、いずれも試験体表面部のクリープ損傷を評価するための手法である。

クリープ損傷は、従来表面部から損傷が始まると考えられていた。事実、応力が集中しやすい外表面の止端部においてクリープ損傷が先行することが確認されてきている。しかし、近年、更に9%あるいは12%などのCrを含有する高Cr鋼が用いられ始めるに連れて、クリープ損傷がより内部で先行して起こることが懸念されている。いわゆるType IIIやType IVと呼ばれるクリープ損傷である。なお、Type IIIクラックとは、溶接熱影響部の硬化した粗粒域で起こる割れをいい、Type IVクラックは、溶接熱影響部の幅の狭い軟化した細粒域で生じるものを指している。

内部の損傷を評価するには、エネルギーを内部に伝播させ、変化する物理量を監視しなければならない。この目的で、超音波探傷試験が唯一の可能性のある方法と考えられる。

Cr-Mo鋼などのクリープ損傷では、クリープの進行と共に、結晶粒界に微小ボイドが発生し、やがてボイドの数が増えると共に連結して破断に至ると考えられている。図1には、2・1/4Cr-1Mo鋼におけるクリープ残存寿命とボイド面積率との関係を示している。従って、ボイドの発生状況を監視すれば、クリープの残存寿命の予測が可能になる。

理論的には、ボイドの発生頻度と音速及び減衰には相関がある。しかし、発生するボイドの大きさは、10  $\mu\text{m}$ 程度と小さく、使用する超音波の波長よりもはるかに小さい。このために、変化する

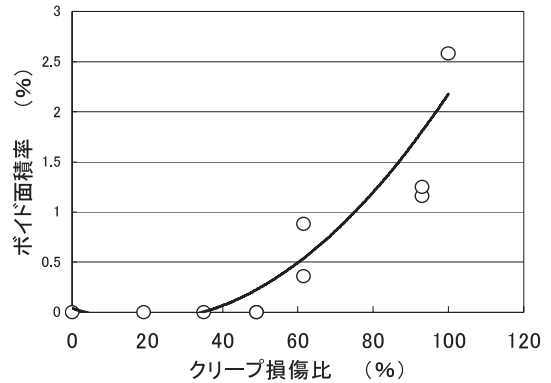


図1 溶接熱影響部のクリープ損傷比とボイド面積率の関係

量は小さく、極めて高精度の測定が要求される。

また、超音波の音速や減衰の測定は、超音波を試験体に入射させ、裏面で反射する底面エコーを用いて測定する。しかし、裏面は構造物の使用中に磨耗や腐食で変化する。この変化に影響される音速や減衰の変化は、損傷評価に必要な測定精度よりも一般に大きく、実機での適用の大きな障害となる。

そこで、裏面の環境変化に影響されない評価手法として超音波ノイズ分析法が提案されている。この方法は、図2に示すように、底面エコーの手前にゲートを設けてノイズ波形を採取し、周波数解析する方法である。クリープ損傷によって微小ボイドが発生すると、微小ボイドによる散乱エコーもノイズ成分を形成する。特徴の最も現れる高い周波数成分範囲の積分強度を求めて、ノイズ値とする。超音波ノイズ分析法とは、このノイズ値を監視する方法である。

材料中のノイズは、結晶粒界における超音波の散乱が主な原因である。Reyleighによって、図3に示すように粒子で散乱される超音波の振幅 $\xi_r$ は次式で与えられる<sup>(1)</sup>。

$$\xi_r / \xi_a = \{ \pi T / (r \lambda^2) \} \{ (\Delta K / K) + (\Delta \rho / \rho) \cos \theta \} \quad (1)$$

ここで、 $\xi_a$ ：入射波の振幅値

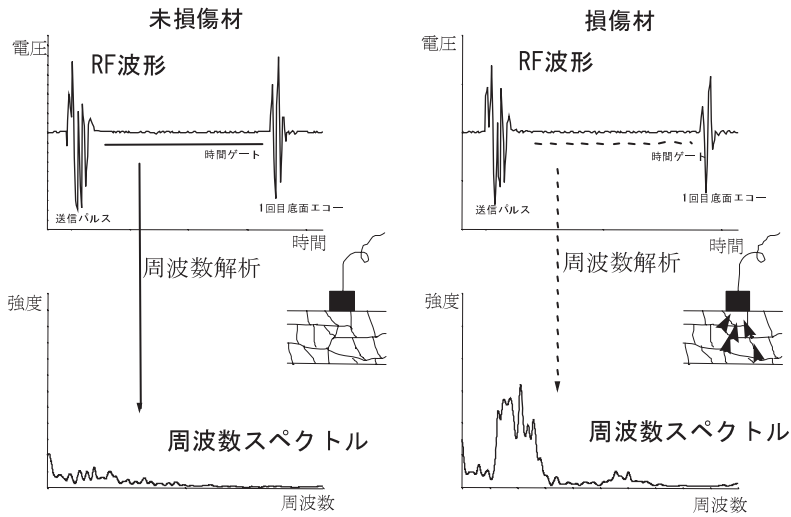


図2 超音波ノイズ法の原理

$\lambda$  : 波長

$K$  : 媒体の弾性率

$\Delta K$  : 粒子と媒体の弾性率の差

$\rho$  : 媒体の密度

$\Delta\rho$  : 粒子と媒体の密度の差

$\theta$  : 入射波と散乱波のなす角

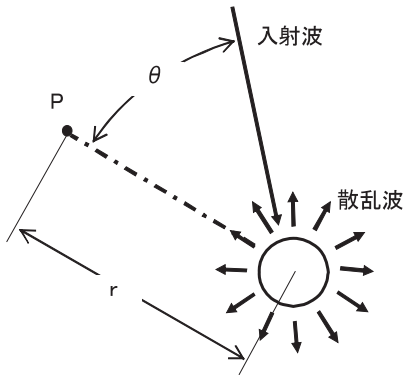


図3 粒子での散乱の様子

一つの結晶粒に着目して考えると、粒界における密度差は無視できる ( $\Delta\rho/\rho \approx 0$ ) ので、後方への散乱波の振幅は次式で示される。

$$\xi_r / \xi_a = \{ \pi T_{\text{Grain}} / (r\lambda^2) \} (\Delta K / K) \quad (2)$$

ここで、 $T_{\text{Grain}}$  は一つの結晶粒の体積である。また、 $(\Delta K / K)$  は粒界においてそれぞれの結晶粒の成長方向が異なることによる弾性率の差と考えられる。

一方、微小ボイドに対する散乱波の振幅値は、ボイドと媒体とで弾性率及び密度共に差が大きく、 $(\Delta K / K) = 1$ 、 $(\Delta\rho / \rho) = 1$  と考えることができる。従って、微小ボイドの後方への散乱波の振幅値は次式で示される。

$$\xi_r / \xi_a = 2 \cdot \pi T_{\text{Void}} / (r\lambda^2) \quad (3)$$

ここで、 $T_{\text{Void}}$  は発生したボイドの体積である。1個の結晶粒に対して、 $n$ 個のボイドが発生したときの後方への散乱波の振幅値は、(2)式と、(3)式を $n$ 倍した値との和と考えると、クリープ損傷前のノイズ値と、クリープ損傷によってボイドが発生した後のノイズ値比  $\alpha$  は次式で与えられる。

$$\alpha = 1 + \{ 2n / (\Delta K / K) \} (T_{\text{Void}} / T_{\text{Grain}}) \quad (4)$$

結晶粒界における結晶方位の違いによる弾性率の違いである  $\Delta K / K$  は、1より相当小さいと考えられる。従って、ボイドの体積が、結晶粒の体積よ

りはるかに小さくても、ノイズの振幅値に十分に影響力を持つものと考えられる。

このことは、いるかなどが海中で超音波を用いて魚を捕らえるときに、標的としているのは、魚の体全体ではなく、はるかに小さな空気袋であるのと現象が似通っている。魚の体はほとんどが水分であり、体の界面での音圧反射率ははるかに小さい。水とはるかに音響インピーダンスの異なる、小さな空気袋での散乱波を受信して捕獲するといわれている。

このように、結晶粒に比べて、クリープで発生するボイドの大きさが小さくても、ノイズのレベルを監視することで、クリープによる微小ボイドの発生状況を監視でき、またボイド発生率と相関の高いクリープ損傷の残存寿命を監視できると考えられる。

### 3. ノイズ分析法の確認試験

2・1/4Cr-1Mo鋼に対して行われた、ノイズ分析法の確認試験の例を紹介する(2)~(5)。図4に示す形状の突合せ溶接継手試験片を作製して、クリープ試験に供している。表1には、試験に用いた鋼材の化学組成及び溶接の条件を示している。

試験片に高温でクリープ損傷を与え、常温でノイズ分析法を用いてノイズ値を測定した。試験片がクリープ破断した時のクリープ破断時間をクリープ損傷比100%として、ノイズ分析を行った時

点でのクリープ損傷比を求めた。測定時のノイズ値と、試験前の初期のノイズ値との比をノイズ値比として、クリープ損傷との関係を求めた。

得られた結果を図5に示した。測定は、溶接部を挟んで両側(図中A側及びB側)の溶接熱影響部の他に、母材部と溶接金属部で測定している。Cr-Mo鋼のクリープ損傷は溶接熱影響部において進行することが知られている。従って、母材部や溶接金属部で測定したノイズ値比にはほとんど変化が見られていない。これに対して、溶接熱影響部で測定したノイズ値比は、クリープ損傷比が約50%を超えてより増大し、クリープボイドの発生が、損傷比50%を超えてより発生することを伺わせている。

図6は、応力を加えないで、熱履歴のみを同一条件で与えた試験体でのノイズ値比を測定した結果を示している。このときのノイズ値比の変化は

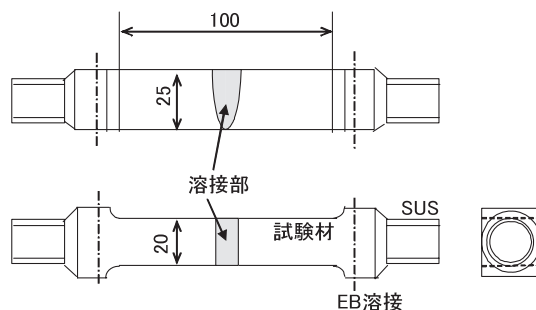


図4 加速クリープ試験に供した試験体の形状

表1 試験体の化学組織と溶接条件

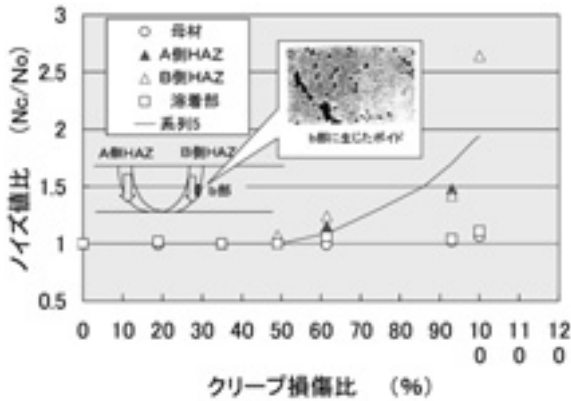
(a) 供試材: 2.25Cr-1Mo鋼鋼板(STPA24相当材)の化学組成

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	Sn	As	Al	N
0.11	0.31	0.54	0.016	0.011	0.18	0.16	2.14	1.02	0.015	0.032	0.018	0.001	0.013

熱処理: 焼ならし 970°C-2h、焼戻し: 750°C-7h)

(b) 溶接条件

パス数	溶接方法	予熱
1	TIG	200~
2~4	SMAW	400°C
残部	SAW	



クリープ損傷比: (クリープ試験時間/クリープ破断時間) × 100

図5 クリープ損傷材のクリープ損傷比とノイズ値比の関係

全く見られておらず、図7の溶接熱影響部で見られたノイズ値比の変化は、単に析出物の影響によるのではなく、クリープボイドの発生に起因していると考えられる。

図7は、クリープボイドの面積率とノイズ値比との関係を求めた結果であるが、よい相関が見られており、クリープボイドの発生状況を超音波ノイズ分析法で監視していたと考えられる。

なお、図中の線は、試験結果をボイド面積率の(3/2)乗で近似した結果である。試験結果とよい一致が見られており、このことは、横軸をボイドの体積率 ( $T_{Void} / T_{Grain}$ ) で表すと、直線関係が得

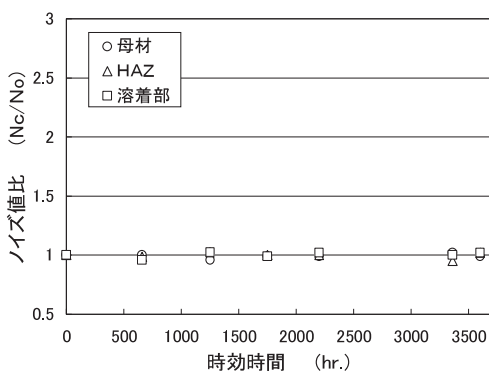


図6 時効材の時効時間とノイズ値比の関係 (時効材: 時効により組織変化のみを与え、クリープ損傷の無い材料)

られることを意味し、(4)式の関係が成り立っていることがわかる。

#### 4. 画像化ノイズ分析法

板厚の全体に渡って同様にクリープボイドが発生すれば、前項で述べた板厚のほぼ全領域に一つのゲートを設けたノイズ分析法が有効である。しかし、内部の局部にクリープ損傷が集中するとすれば、全厚にゲートを設けると、全体としてのノイズ値の変化は薄められてしまう。もし、局部に集中したクリープ損傷が急激に全板厚に進行するとすれば、クリープ損傷の末期しか評価できないことが危惧される。

このために、ゲートを板厚方向に分割してクリープ損傷を評価する方法が開発されている(6)(7)。また、溶接熱影響部の位置は、外表面からは必ずしも特定できない場合もある。特に溶接熱影響部近傍に補修溶接が行われている場合など、本来クリープ損傷が最も危惧される位置と異なる位置を測定する恐れも拭いきれない。このために、溶接線に直行する方向に順次計測位置を変えて計測することが望まれる。

溶接線方向に順次探触子を移動させて計測し、かつ板厚方向に分割した複数のゲートを設けることで、溶接断面におけるクリープ損傷の進行状況

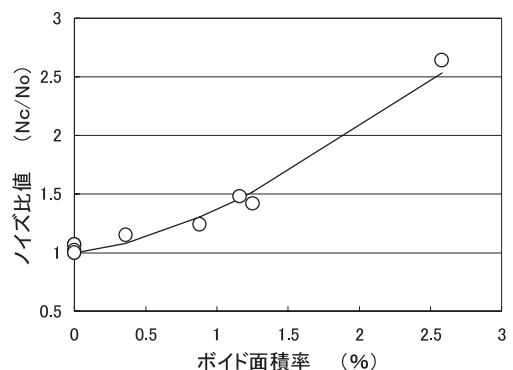


図7 ボイド面積率とノイズ値比の関係

を正確に把握することができる。図8に測定例を示している。本方法によって、クリープ損傷をより正確に評価できると考えている。

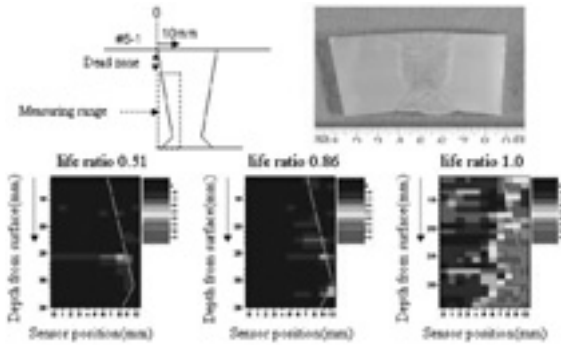


図8 画像化した超音波ノイズ分析法の例  
(寿命比と超音波ノイズ値画像)

## 5. まとめ

クリープ損傷を評価するための超音波を用いたノイズ分析法について紹介した。ノイズ分析法は、クリープ損傷に伴うクリープボイドの発生状況を直接に評価でき、特に内部のクリープ損傷評価に極めて有効な方法である。

我々が体力の衰えを認識する目的で、12分間歩行や前屈を測定しているように、構造物の衰えを評価するのにノイズ分析法での評価が推奨される。しかし、12分間歩行で、Aさんが2,300 mを、Bさんが1,800 mを歩いたとする。この結果を持って、Bさんの体力が衰えたとはできない。人にはそれぞれ個人差があり、Bさんの日頃の能力は1,500 mであったかも知れない。定期的に測定が行われ、管理されることで評価が可能になる。

構造物にも個人差がある。一回の測定結果のノイズ値を持って評価するには慎重である必要がある。もちろん、クリープ損傷がどのような部位に優先的に発生するかをよく理解しているので、測定値を、クリープ損傷の起こらない応力の小さな

部位や、母材部と比較することで予測は可能である。しかし、定期的にノイズ分析法が行われ、測定結果が管理されることが強く望まれる。

また、測定したノイズ値は、用いる探触子の種類や、測定時の表面粗さなどにも影響される。このことは、測定が完全に管理された状態で行われることが必要であることを意味している。特に、用いる探触子の特性は厳密に評価されている必要がある。

当社は、今後も石川島播磨重工業(株)の協力の下、手順化した超音波ノイズ計測を継続し、これによって、安全で経済的な構造物の運用に寄与していく所存である。

## 参考文献

- (1) L. Rayleigh: The Theory of Sound Vol. II p.152 (1929)
- (2) 米山、中代、村上、芝田、大友：石川島播磨技報 第28巻(1988)第5号
- (3) 中代、芝田、米山、木原、馬木、佐久間、渡部、奥山：耐熱金属材料第123委員会研究会報告 Vol.35 No.1：第1・2分科会 pp.13-21
- (4) 芝田、中代、米山、馬木、佐久間、渡部、奥山：日本非破壊検査協会平成5年度秋季大会後援概要集 pp.19-26
- (5) 荒川、米山：超音波による経年劣化評価、圧力技術、第39巻、第5号、(2001)、pp.311-316
- (6) 井戸伸和 畠中宏明 上道良太 伊藤拓哉「火力発電プラント高温部材の非破壊検査」第52期 第5回高温強度部門委員会 講演会 2004年5月
- (7) 井戸伸和、畠中宏明、上道良太 (IHI)、齊藤健介、宮地良和、鍵谷幸生「改良9Cr鋼ボイラ高温配管の寿命評価(その3 実機サイズ試験体の損傷プロセスと非破壊損傷計測)」第41回高温強度シンポジウム 2003年12月