

電磁超音波を利用したクリープ損傷モニタリング 手法の検討

池津 和輝^{*1} 浅海 雄人^{*2} 佐々木孝明^{*3}
Ikezu Kazuki Asaumi Yuto Sasaki Takaaki

火力発電プラントのメンテナンスにおいて、溶接熱影響部に生じるクリープ損傷のモニタリングは重要な問題である。クリープ損傷は、初期に微小なボイドが発生し、運転時間の増加に伴い溶接熱影響部に多数発生・合体し、き裂となるため、材料の強度が急激に低下する特徴がある。昨今では、配管減肉のモニタリングとして、電磁超音波探触子を用いた共鳴法(EMAR法)による手法が研究されている。EMAR法は塗膜上からの測定が可能であり、測定面の凹凸による影響が少ない長所がある。

本稿では、EMAR法のクリープ損傷モニタリングへの適用を目指し、材料損傷に応じた超音波特性の変化を確認した結果を報告する。

キーワード：クリープ損傷、ボイド、共鳴法(EMAR法)、超音波特性

1. はじめに

各種インフラ設備や高温高圧下で使用されている配管では、経年劣化による材料損傷が問題となっており、安全性を保つためには、非破壊的に損傷のモニタリングを行う必要がある。損傷の中でも、高温高圧下で発生するクリープ損傷は、溶接熱影響部に発生したボイドが運転時間の増加に伴い肥大化し、最終的に破断に至る損傷形態である。クリープ損傷の程度を定量的に評価する手法として、超音波フェーズドアレイ(Ultrasonic Phased Array, UPA)法や超音波ノイズ法など、圧電型の振動子を用いた超音波探傷方法が知られている。しかし、これらの手法は評価対象物の塗膜層をグラインダーなどで取り除く必要があるため、作業

負荷が大きい。

一方、非接触で検査可能な手法として電磁超音波探触子(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)⁽¹⁾を用いた配管減肉のモニタリング手法の検討が進められている。EMATは非接触で検査が可能であり、塗膜を除去する必要がないため、探傷面の状態(凹凸など)に左右されにくいという利点がある。さらに、通常の圧電型探触子では難しい横波や板波といったさまざまなモードの超音波を単純な設計で発生させることができる。しかし、圧電型探触子と比べ電気音響変換効率が低いため、得られる減肉指示のSN比が小さい。

SN比を改善する手法として、EMATを用いた電磁超音波共鳴法(Electromagnetic acoustic resonance method, EMAR)がある。EMAR法は音響共鳴を利

*1：検査事業部 技術部 NDEグループ

*2：元検査事業部 技術部 NDEグループ (現株式会社 IHI 技術基盤センター 検査・計測グループ)

*3：検査事業部 副事業部長 兼 技術部長

用し明瞭な底面エコーを得ることができる。クリープ損傷のモニタリングでは、損傷に至るまでの物性の把握が重要視されており、EMAT の特徴を生かすことで従来では難しかった材料特性を得られる可能性がある。

本稿では、クリープ損傷を発生させた試験体を対象に EMAR 法を適用し、試験体の損傷率に対する超音波横波音速の変化を確認した。また、同試験体に超音波ノイズ法を適用し、EMAR 法との損傷状態の検出性を比較した。

2. 技術開発

2.1 EMAT の超音波発生原理

EMAT (図 1) は磁石、渦巻き状の 2 つのコイルおよび銅板で構成されており、コイルの上方に磁石、コイル半分を隠し逆方向の力が発生しないように銅板が設置されている。コイルに電流を流すと、材料の表面近傍に渦電流が誘導される。渦電流と、永久磁石により生じている試験体表面に垂直な静磁場との相互作用により、ローレンツ力が発生し、材料内に超音波が生じる。超音波の受信は上記の逆過程により行う。

2.2 試験方法

本稿では、Southwest Research Institute (SwRI) 内で行った試験を紹介する⁽²⁾。図 2 に試験システム

を示す。このシステムはディスプレイ、パルサー／レーザー (RAM 5000、RITEC 社製) および EMAT から構成されている。本システムを用いて、試験体に超音波を入射し、試験体の厚みに応じて生じる共鳴周波数を測定する。

共鳴周波数は、試験体の厚さが、入射した超音波の半波長の整数倍の時の周波数であり、式 (1) で表せる。ここで、 d は試験体の厚さ、 n は整数、 λ は超音波の波長である。

$$d = n\lambda/2 \quad (1)$$

式 (1) は超音波の周波数と波長の関係式 (2) を用いて、式 (3) に変形できる。

$$\lambda = c/f_r \quad (2)$$

$$c = 2f_r d/n \quad (3)$$

ここで、 c は超音波の音速、 f_r は共鳴周波数で

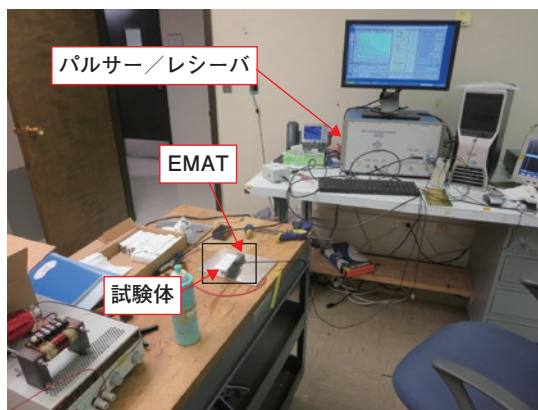
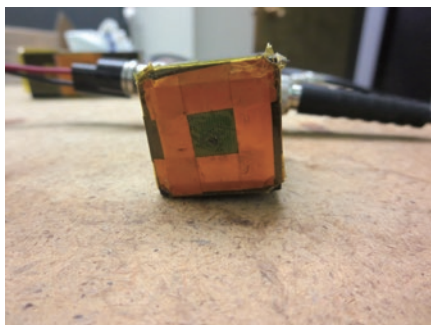
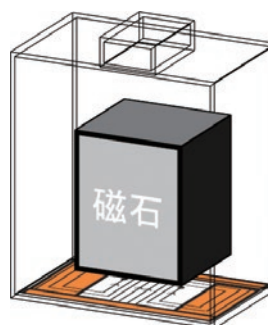


図 2 試験システム



(a) 外観



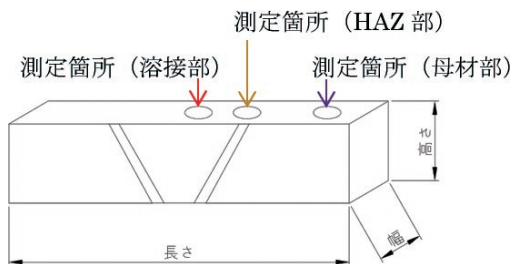
(b) モデル図

図 1 EMAT

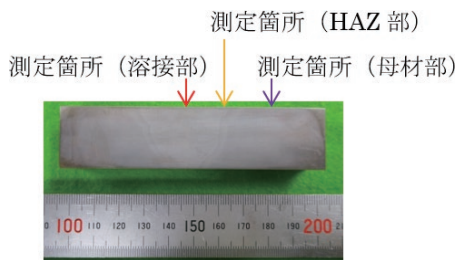
ある。式(3)より試験体の厚さ d が既知であれば、共鳴周波数 f_r を測定することで超音波の音速 C を算出できる。

測定箇所はボイドの検出を目的として、**図3**に示す2.25Cr鋼試験体の熱影響部(Heat affected zone、HAZ)とし、超音波ノイズ法と比較する。また、EMAR法の材料損傷の検出性を調べるため、同様

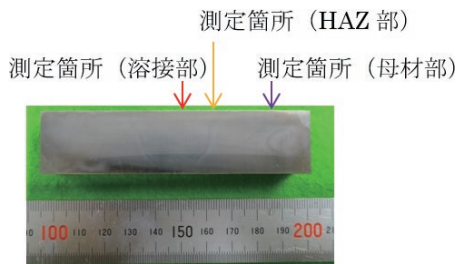
の試験体の母材部および溶接部においても測定した。この試験体の製作条件を**表1**に示す。損傷率は各試験体を任意の負荷時間を取り出し、100%時の負荷時間から算出している。伸び率は、各試験体の負荷時間0hと比較して、長さ方向に伸びた割合を示し、縮小率は同様に幅方向に縮小した割合を示している。



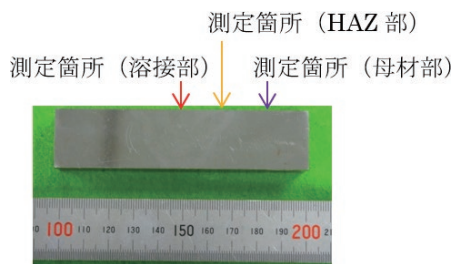
(a) 試験体イメージ



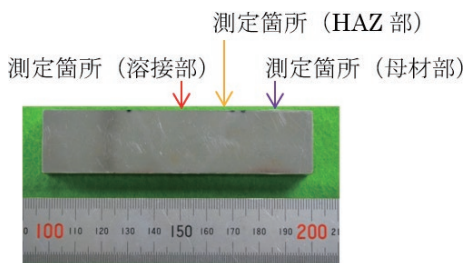
(b) 試験体 No.1 (損傷率 0%)



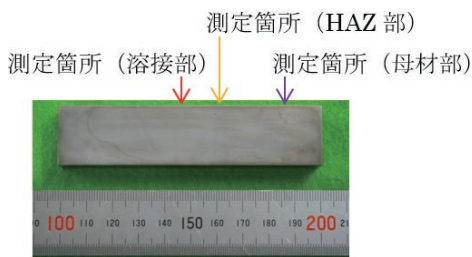
(c) 試験体 No.2 (損傷率 19%)



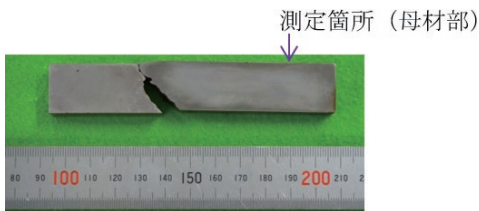
(d) 試験体 No.3 (損傷率 35%)



(e) 試験体 No.4 (損傷率 49%)



(f) 試験体 No.5 (損傷率 61%)



(g) 試験体 No.6 (損傷率 100%)

図3 試験体外観

表 1 試験体製作条件

試験体No.	図番号	温度[°C]	応力[kgf/mm ²]	時間[h]	損傷率[%]	伸び率[%]	縮小率[%]	幅[mm]	高さ[mm]	長さ[mm]
1	図3 (b)	-	-	-	-	-	-	17.457	23.796	102.222
2	図3 (c)	630	5	665.7	19	0.98	3.3	17.203	24.050	102.235
3	図3 (d)	630	5	1249.8	35	0.86	4.9	17.283	23.957	102.210
4	図3 (e)	630	5	1750.2	49	0.92	5.2	17.591	24.060	102.210
5	図3 (f)	630	5	2199.8	61	2.51	12.1	12.676	23.383	102.184
6	図3 (g)	630	5	3598.1	100	12.3	29.5	11.146	20.091	-

2.3 超音波ノイズ法

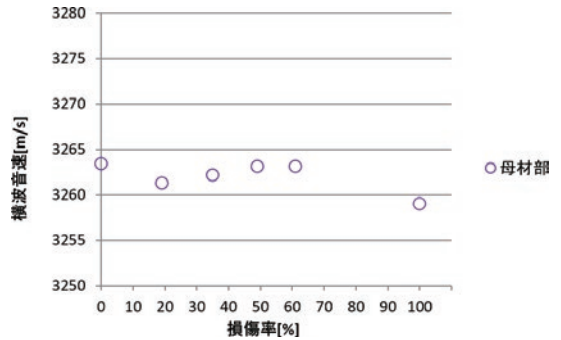
超音波ノイズ法は送信エコーと底面エコーの間にゲートを設けてノイズ波形を採取し、周波数解析する手法である。クリープ損傷によって微小ボイドが発生した試験体を探傷すると、試験体内部を透過した超音波信号には、微小ボイドによる散乱エコーがノイズ成分として表れる。ノイズ法では、散乱エコーを拾いやすくするため、高い周波数成分の積分値をノイズ値として評価する。通常、ボイドの体積は結晶粒の体積よりはるかに小さいが、ノイズ値に影響を与えるには充分と考えられる⁽³⁾。そのため、ノイズ値のレベルを監視することで、クリープによる微小ボイドの発生状況を監視できる。ボイド発生状況とクリープ損傷度合いには相関が認められるため、超音波ノイズ法によりクリープ損傷を監視できると考えられる。

本稿の試験では、クリープ損傷をノイズ値比で評価する。ノイズ値比は未損傷の試験体 No.1(損傷率0%)と、試験体 No.2～6の測定結果の比である。

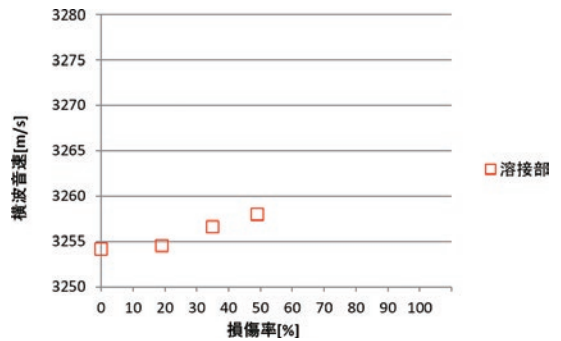
2.4 試験結果と考察

図4に各試験体の各測定箇所(母材部(a)、溶接部(b)およびHAZ部(c))をEMAR法で測定した横波音速に対する損傷率との関係を示す。それぞれ横軸に損傷率[%]、縦軸に音速[m/s]をとっている。ただし、損傷率100%は破断したため、溶接部とHAZ部は計測できなかった。

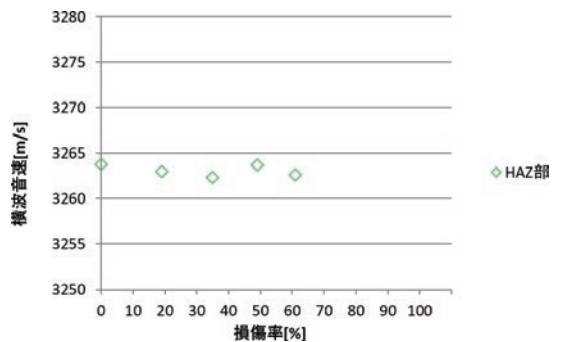
HAZ部では損傷率と横波音速の明確な関係が確認できなかった。母材部では、微弱な変化だが損傷率の増加に応じて音速が低下している。溶接



(a) 母材部



(b) 溶接部



(c) HAZ部

図4 各測定箇所の横波音速と損傷率の関係

部では損傷率の増加に応じて、音速が増加している。また、その時の母材部と HAZ 部の音速が同程度であった。

次に、超音波ノイズ法による HAZ 部での試験結果を図 5 に示す。横軸に損傷率 [%]、縦軸にノイズ値比をとっている。損傷率の増加に応じて、ノイズ値比が低下しており、損傷率とノイズ値比との明確な相関関係が確認できた。

超音波ノイズ法による試験結果では、明確な相関が得られているが、EMAR 法では変化が微小であり、クリープ損傷の検出が難しいことが確認された。

3. おわりに

クリープ損傷を付与した試験体を対象に、EMAT を用いた EMAR 法を適用し、測定した共鳴周波数から音速を算出し、損傷率との関係性を調べた。

また、現行のクリープ損傷を測定する手法である超音波ノイズ法を同試験体に適用し、EMAR 法との検出性の比較を行った。EMAR 法の横波音速測定によるクリープ損傷の検出は、現行の手法である超音波ノイズ法の結果と比較すると検出性が劣り、材料損傷においても、音速の差も明確に検出できなかった。このため、実機適用に向けた SN 比向上等の探触子再設計などの検討が必要である。

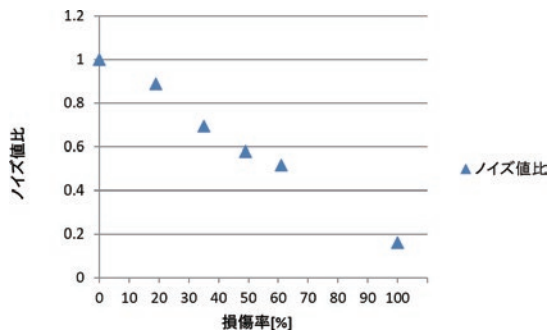


図 5 ノイズ法によるノイズ値比と損傷率の関係

参考文献

- (1) 小島史男：電磁超音波を用いた探傷の基礎と最新動向、計測と制御、第 56 巻、第 11 号、2017 年 11 月号
- (2) Adam Cobb, Erica Macha, Jonathan Bartlett and Yanquen Xia : Detecting sensitization in aluminum alloys using acoustic resonance and EMAT ultrasound, AIP Conference Proceedings 1806, 050001, 2017
- (3) 荒川敬弘、畠中宏明、芝田三郎：クリープ損傷評価のためのノイズ分析法、IIC REVIEW、2005/10、No.34、pp.26-31



検査事業部
技術部 NDE グループ

池津 和輝

TEL. 045-791-3523

FAX. 045-791-3547

検査事業部
副事業部長
兼 技術部長

佐々木孝明

TEL. 045-791-3523

FAX. 045-791-3547

元検査事業部
技術部 NDE グループ
(現株式会社 IHI 技術基盤センター 検査・計測グループ)

浅海 雄人

TEL. 045-791-3523

FAX. 045-791-3547