

超音波ノイズ B-scan 解析法 (I-CLAT®) の開発と実機適用 — 火力発電用蒸気配管のクリープ余寿命評価 —

Development and Application of Ultrasonic Noise B-scan Analysis (I-CLAT®) — Creep Damage Assessment for Fossil-Fuel Boiler Piping —

畠 中 宏 明 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部
 (現 石川島検査計測株式会社技術研究所 課長)
 井 戸 伸 和 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部
 伊 藤 拓 哉 技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 博士 (学術)
 上 道 良 太 エネルギー事業本部電力事業部相生工場製造部
 田 上 稔 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部 主査 博士 (工学)

クリープ損傷評価のパラメータとして、超音波信号の特定周波数帯域のスペクトル強度を用いた。単軸クリープ試験体を供試体とした探傷試験を実施した結果、超音波の特定周波数成分は溶接継手の寿命消費率と良い相関があることを確認した。また、実機において本手法の適用を開始した。本評価技術は既設の主蒸気配管の余寿命を予測し、実機発電設備の重要な維持管理技術になることが期待できる。本稿では超音波探傷による火力発電設備の主蒸気配管のクリープ損傷検出技術を報告する。

A precise creep damage assessment method has been required for boiler plants using fossil fuel. This paper proposes a nondestructive testing for creep damage detection of piping of boilers by an ultrasonic testing method for the damage assessment. It was estimated as the following procedure. Ultrasonic signals were used by transforming to signals in the frequency domain by Fourier transform, and a specific frequency band was chosen. To determine the creep damage, the spectrum intensities were calculated. Calculated intensities had good correlation to life consumption of the weld joints, which permitted the method to predict the remaining life of pipes of boilers in service.

1. 緒 言

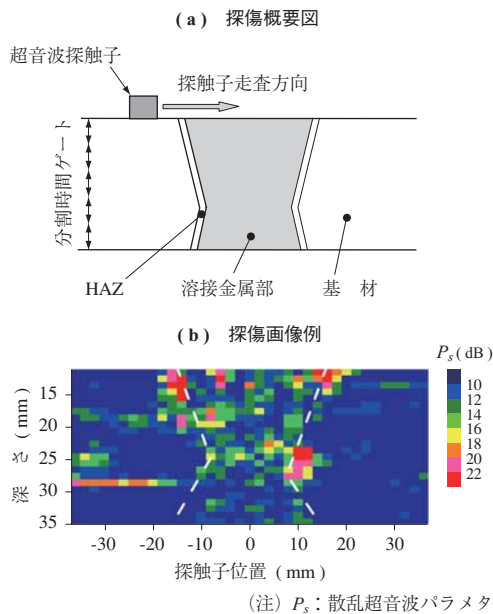
火力発電設備の主蒸気管や高温再熱蒸気管などの高温蒸気配管は、運転中に高温・高圧環境下にさらされる。さらに、発電の高効率化のために、これらの配管の設計温度と圧力は増大する傾向にあり、従来の低合金鋼に代わり、高 Cr 量の材料が採用されるようになってきている。温度と圧力の上昇に伴い、溶接熱影響部 (HAZ) のクリープ損傷による配管のリークも懸念されており、計画的な修理、交換を可能にし、効率的な発電設備の運用の手助けのためにも、より正確な損傷評価手法が求められている。

クリープ損傷の初期においては結晶粒界にボイドが発生する。次に、ボイドの発生量の増加、成長によって互いに連結し、最終的にはき裂となり、これらのき裂が連結、進展し破断に至る。従来、主に低合金鋼の実機配管のクリープ損傷評価には部材表面のレプリカによるボイド観察や硬

さ試験による評価などが使用されている^{(1),(2)}。

Type IV クラックは溶接継手部材料内部の HAZ 細粒域に発生するき裂であり、このタイプの損傷は部材表面の観察による評価は非安全側の評価をする可能性がある。超音波探傷試験 (UT) は、部材内部の割れ、さびおよび介在物を検出するためには非常に有用であり、既設プラントの非破壊検査にすでに多く使用されている。しかし、従来の超音波探傷試験ではクリープボイドなどの非常に小さいきびを検出するのは困難である。

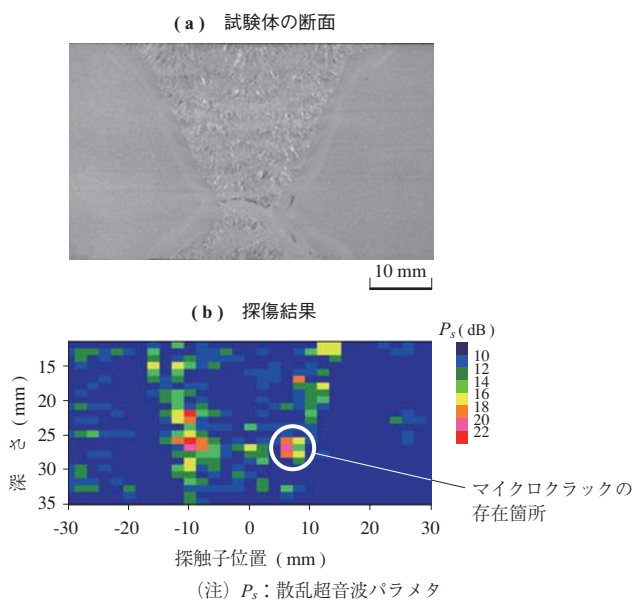
本稿では、火力発電設備の高温蒸気配管に使用されている改良 9Cr-1Mo 鋼溶接熱影響部の超音波によるクリープ損傷評価手法 I-CLAT® (IHI Creep Life Assessment Technique) について報告する。超音波探傷には垂直探傷法を採用し、送信パルスと底面反射波の超音波信号を記録する。記録された信号をフーリエ変換によって周波数領域の信号に変換し、特定の周波数帯域におけるスペクトル強



第2図 I-CLAT[®] 計測の概略
Fig. 2 Outline of measurement by I-CLAT[®]

溶接試験体には改良 9Cr-1Mo 鋼 (ASME A387 Gr.91 相当) を基材とし, AWS A5.23 F10PZ-EG-G 相当の溶加材を使用した. 第1表に基材と溶加材の化学成分を示す. 試験体は溶接熱処理後, 厚さ 36 mm, 幅 18 mm のクリープ試験体として加工した.

超音波探傷試験は, クリープ試験中断材の探傷および1体の試験体において, クリープ試験データ採取を破断に至るまでに複数回繰り返した(断続)試験も実施した.



第3図 クリープ中断試験片の切断詳細結果
Fig. 3 Results for aborted specimen (650°C, 58.8 MPa, 3 449 h)

第1表 基材と溶加材の化学成分
Table 1 Chemical component of base and filler metals

	化学成分 (wt%)							
	C	Si	Mn	Ni	V	Nb	Cr	Mo
基材*1	0.09	0.36	0.46	0.13	0.20	0.08	8.45	0.99
溶加材*2	0.08	0.13	1.73	0.60	0.23	0.05	8.91	0.90

(注) *1: 改良 9Cr-1Mo 鋼 (ASME A387 Gr.91 相当)
*2: AWS A5.23 F10PZ-EG-G 相当

4. 試験結果

4.1 クリープ試験中断材の試験結果

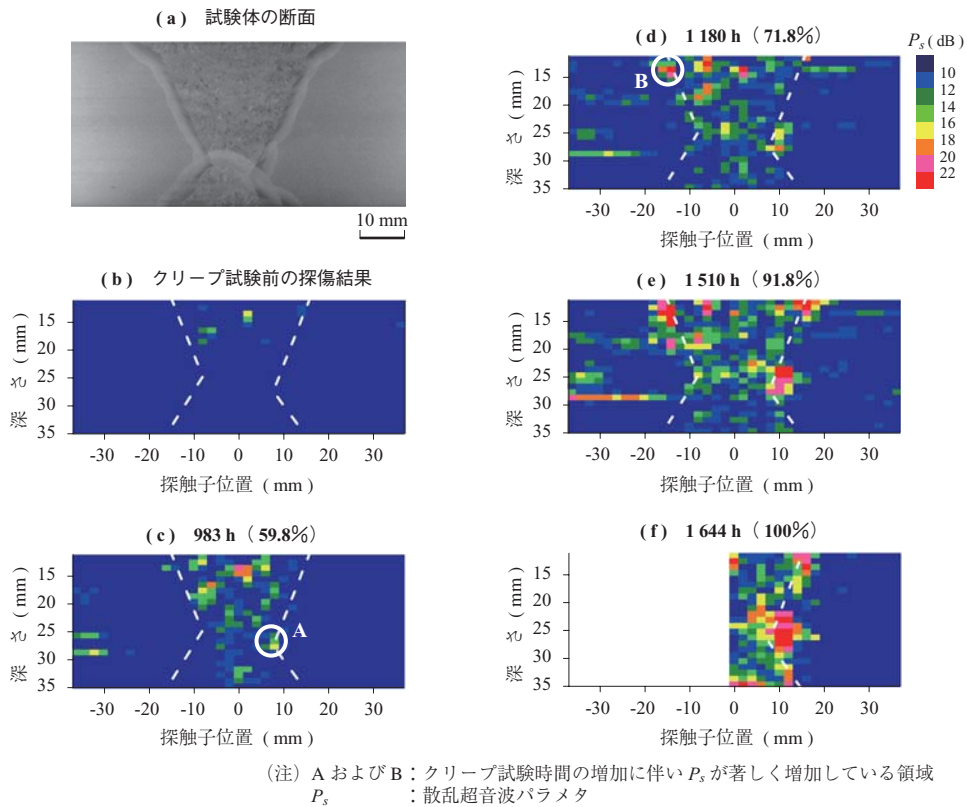
クリープ試験の前に, 試験温度と負荷応力から破断時間を推定し, その破断時間の 60, 80%時に中断し, 超音波データの採取を行った. 第3図に温度 650°C, 応力 58.8 MPa でクリープ試験を行い, 3 449 時間(推定寿命消費率約 60%)で中断した試験体の I-CLAT[®] 計測結果を示す. 第3図-(b)に示すカラーマップは各位置における P_s を示している. 探傷試験終了後, 試験体を切断し, P_s が高い領域を光学顕微鏡で観察した. 第3図-(c)の観察結果から第3図-(b)の白丸部にマイクロクラックの存在を確認した.

4.2 クリープ断続試験の試験結果

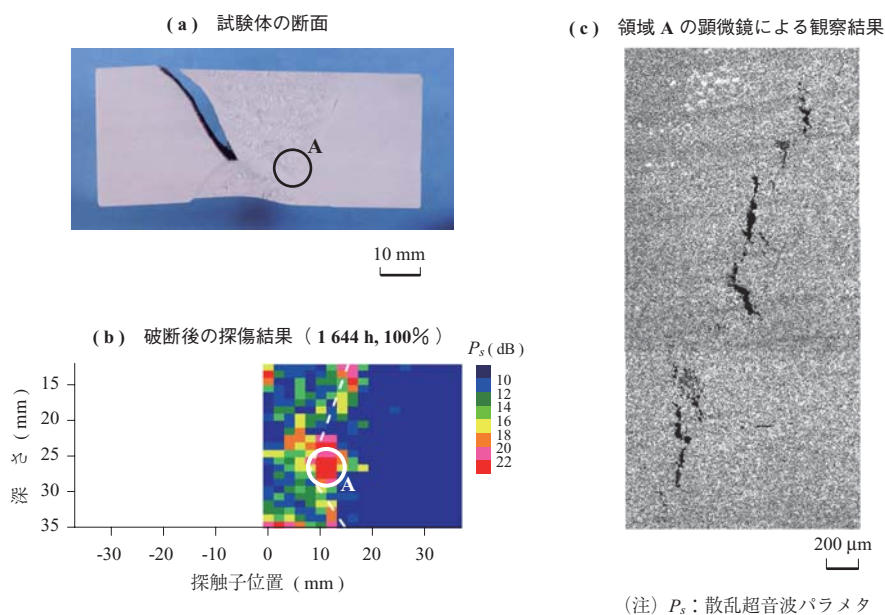
第4図に断続試験によって得られた I-CLAT[®] 計測結果を示す. クリープ試験の前に初期値としての I-CLAT[®] 計測を行い, 破断に至るまでに途中 3 回クリープ試験を中断し, 計測を実施した. クリープ試験温度と応力はそれぞれ 650°C, 66 MPa とした. 白丸で示す領域 A (第

4 図 - (c)) と B (第 4 図 - (d)) において、クリープ試験時間の増加に伴い、 P_s が著しく増加していることが分かる。最終的にこの試験体は左側の HAZ から破断した (第 4 図 - (f))。クリープ破断の起点は、領域 B の損傷であると考えられる。第 5 図に破断した試験体の断面 (- (a)),

破断後の探傷結果 (- (b)) および 領域 A の顕微鏡による観察結果 (- (c)) を示す。このように本手法によってクリープ損傷程度の探知と位置を同時に評価が可能である。



第 4 図 クリープ断続試験の試験結果
 Fig. 4 Results by B-scan method for continuous creep test (650°C, 66 MPa)



第 5 図 クリープ断続試験片の切断詳細結果
 Fig. 5 Cutting test results for continuous creep test specimen after rupturing

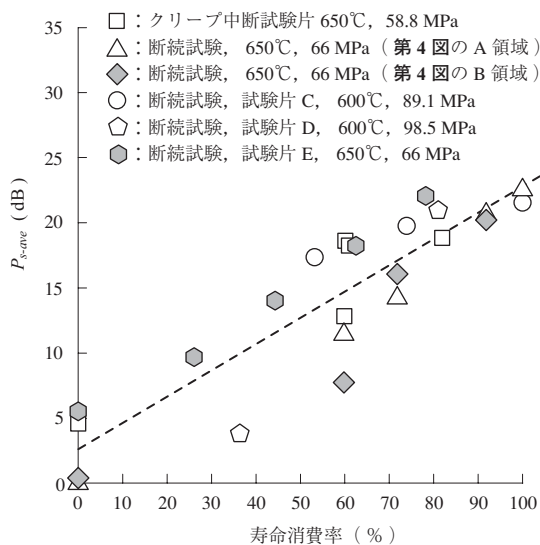
5. 考 察

ボイドの発生やマイクロクラックへの進展によって超音波の透過が妨げられ、見かけ上の超音波の音速は低下し、また、これらのきずによって超音波が散乱され、超音波の減衰率も大きくなる。超音波の音速と減衰の計測は部材底面の反射エコーの時間差やエコー高さの変化から測定する。しかし、実機のボイラ部材の場合では正確な肉厚の計測が困難である。よって、実機において、音速や減衰率の変化からクリープ損傷評価を行った結果は精度的に問題があると考えられる。

本手法は、送信パルスー底面反射エコー間の信号に注目し、部材内部のマイクロクラックなどを捕らえているため、底面の状態には影響されない手法である。

第6図に超音波パラメタと寿命消費率の相関を示す。ここで、縦軸は計測した P_{s-ave} が最大の箇所とその周囲8セル、計9セルの平均値 P_{s-ave} としている。このようにパラメタ P_{s-ave} は寿命消費率の増加に伴い、増加する傾向があることが分かる。

寿命消費率36%における P_{s-ave} (五角形のシンボル) はクリープ試験前(0%)の P_{s-ave} と同等のレベルである。本手法ではクリープの進行過程の初期段階において、材料ノイズや溶接時から存在している微細な溶接きずや介在物などの存在のために、誤差が大きくなっていると考えられる。よって、本手法を実機配管に適用し、損傷度を予測、余寿命評価する場合には、実機運用前の情報をもっておくことが重要である。



第6図 超音波パラメタと寿命消費率の相関

Fig. 6 Correlation between averaged scattered ultrasound parameters and life consumption

クリープ損傷の進行過程の中期以降ではこのパラメタのばらつきも小さくなっていく。これは材料ノイズや微細な溶接きずと比べて、クリープ損傷による指示が支配的になるためと考えられる。したがって、クリープ損傷の進行過程の中期以降から、より正確な余寿命評価を行えると考えられる。

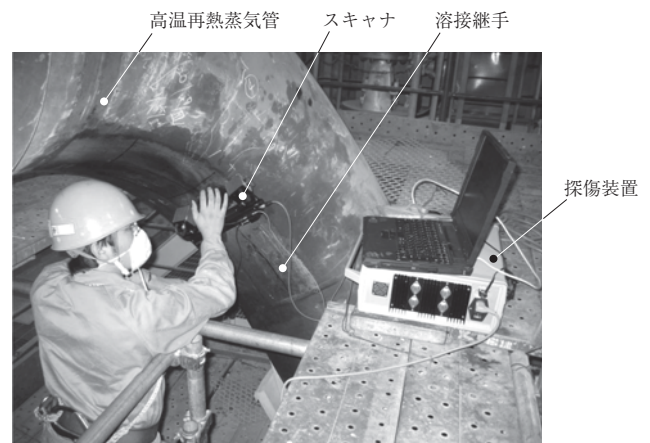
第7図に実機での試験状況を示す。本手法の実機適用を開始し、今までに5基の発電設備の主蒸気管、高温再熱蒸気管の溶接継手部のデータの採取を行った。今までのデータ採取は、製作時点での初期きずの有無を確認することを大きな目的として実施してきた。以後、定期検査時の計測ではすでに取得済みのデータと第6図に示す超音波パラメタと寿命消費率の相関から、余寿命評価を実施していく。

今後、さらに精度の高い余寿命評価を実施するためにはクリープ試験体のみならず実機計測データのデータベースを構築する必要がある。

6. 結 言

改良9Cr-1Mo銅溶接熱影響部のクリープ損傷を評価する超音波探傷法を開発した。超音波信号の特定の周波数成分のスペクトル強度は継手の寿命消費率と良い相関があることを確認した。

今後は超音波パラメタと実際のボイドの存在(たとえばボイド体積率など)との定量的相関を把握することが必要である。また、補修溶接による部材が受けた熱履歴や、熱時効による介在物析出の影響などが計測を妨げるノイズとなり得る可能性がある。本計測におけるノイズの要因が何であるかを把握しておくことも重要である。



第7図 実機での試験状況

Fig. 7 Measurement under conditions of operating boiler

本手法を今後確立していくことで、発電設備の運用面において計画的な補修、交換時期の決定が可能になり、実機発電設備にとって重要な維持管理技術となるものと考えらる。

参 考 文 献

- (1) B. Neubauer and U. Wedel : Advances in Life Prediction Methods ASME (1983) p. 307
- (2) B. J. Cane and R. D. Townsend : Flaw and Fracture at Elevated Temperature Proc. ASME

Materials Seminar ASME (1983) p. 279

- (3) 米山弘志, 中代雅士, 村上晃一, 芝田三郎, 大友 暁 : 超音波によるクリープ損傷評価技術の開発 石川島播磨技報 第28巻第5号 1988年9月 pp. 306 - 311
- (4) Hatanaka et al. : Ultrasonic Examination by Frequency Analysis for Creep Damage Detection of Boiler Piping Proceedings from the 9th European Conference on Non-Destructive Testing (2006)