

高 Cr 鋼溶接部クリープ損傷評価の 信頼性向上に関する検討

畠中 宏明^{*1} 長沼 隼人^{*2} 菅井 孝郎^{*3} 荒川 敬弘^{*4}
Hatanaka Hiroaki Naganuma Hayato Sugai Takao Arakawa Takahiro
 柳原 有紗^{*5} 野瀬 裕之^{*6} 田上 稔^{*7}
Yanagihara Arisa Nose Hiroyuki Tagami Minoru

本報では火力発電用ボイラに使用されている蒸気配管のクリープ損傷評価法の一手法である I-CLAT[®]を現地で適用する場合に信頼性を確保するための装置の自作化、および数値計算による散乱現象の把握についての検討結果を報告する。装置の自作においては現有装置と同様な結果が得られる装置系を構築することが実現でき、数値計算による検討では、材料ノイズと比較して損傷部からの散乱波は十分に識別できる強度で得られることを確認した。

キーワード：火力発電用ボイラ、クリープ損傷、超音波探傷試験、装置化、シミュレーション

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主蒸気配管は運転中に高温・高圧に曝され、発電のさらなる高効率化のために蒸気条件はますます高温高圧化に進み、これらの配管の設計温度と圧力が高くなる傾向にある。

従来、当該部には低合金鋼が使用されていたが、Cr 含有量の高い材料も使われるようになり、温度と圧力が高くなるとともに、溶接熱影響部 (HAZ) のクリープ損傷による配管のリークが懸念されている。このような背景から、計画的な修理・交換を可能にし、発電設備の効率的な運用を支援するためにも、より正確な損傷評価手法が求められている。

I-CLAT[®] (IHI Creep Life Assessment Technique)

は IHI 製火力発電用ボイラの高温蒸気配管に使用されている高 Cr 鋼の継手部のクリープ損傷評価手法として現在採用されている。本手法は超音波を入射し、損傷部位からの散乱波を捕らえる手法で、さらに探触子を走査することにより、材料内部の損傷部位を可視化することができる。また、検定曲線を予め作成しておくことにより、溶接継手の余寿命評価を行うことができる IHI オリジナルの診断手法である。

IIC では IHI からの技術移管を受け、2005 年から IHI 製ボイラの定期検査工事時に I-CLAT[®] による検査を実施している。しかし、現在使用している装置は市販の探傷器をベースにした機材であ

*1：株式会社 IHI 技術開発本部 生産技術センター 生産基盤技術部 主査 博士 (工学)
(兼 IIC 研究開発センター 研究開発グループ 次長)

*2：検査事業部 技術部

*3：機器装置事業部 X線検査装置部 課長

*4：フェロー 工学博士 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 客員教授

*5：株式会社 IHI 技術開発本部 生産技術センター 生産基盤技術部

*6：株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 応用理学研究部 課長代理 博士 (工学)

*7：株式会社 IHI 技術開発本部 生産技術センター 生産基盤技術部 部長 博士 (工学)

り、現地での使用時に故障が発生した場合には修理に多大な時間がかかり、工事に遅延をきたすなどの大きな支障があった。本報では現地検査工事の信頼性向上を目的として装置の自作化、および実機適用に向けた検討結果について報告する。また、損傷部位からの散乱波を評価する本手法では、結晶粒界からの散乱波（材料ノイズ）との識別も課題であった。併せて数値計算による散乱現象を定量的に把握するための検討結果についても紹介する。

2. I-CLAT[®] 測定原理⁽¹⁾⁻⁽³⁾

部材に超音波を入射すると部材底面からの反射エコーを観測することができる。この底面エコーと送信パルスとの間の領域には部材内部からの情報が含まれている。部材が損傷していない場合は、送信パルスと底面エコーの間に結晶粒界からの散乱波が観測される。部材の損傷が進行していくと、結晶粒界からの散乱のみならず、ボイドやマイクロクラックなどからの散乱波も観測される。この送信パルスと部材底面エコーの間の散乱波を定量的に評価するために、この領域に時間ゲートをかけ、超音波信号を抽出し、周波数解析を導入する。部材内部の微小なきずなどを探知するには、波長を小さくするために周波数が高い超音波が必要である。クリープ損傷初期では、超音波の高周波数成分の変化が顕著になると考えられる。損傷が進行していくと、ボイドも増大し、ボイドが互いに連結しマイクロクラックへと進展するため、低周波数成分の変化も大きくなる。

I-CLAT[®] では損傷部位の位置を特定するために図1(a)のように探触子を溶接線に対して直交に走査し、さらに時間ゲートを深さ方向に1mmピッチで区切り、各々の位置における超音波信号の周波数スペクトル強度に着目し、そのスペクトル強度の面積値を散乱超音波パラメータPsとして計

算する。得られた結果例は図1(b)のような二次元マップ(B-scan画像)として表示できる。横軸が探触子位置、縦軸が深さ、マップの色はPsの大きさを表している。図1(b)で示された赤い領域はPsが大きい箇所であり、溶接会合部で損傷が進行していることが視覚で認識できる。

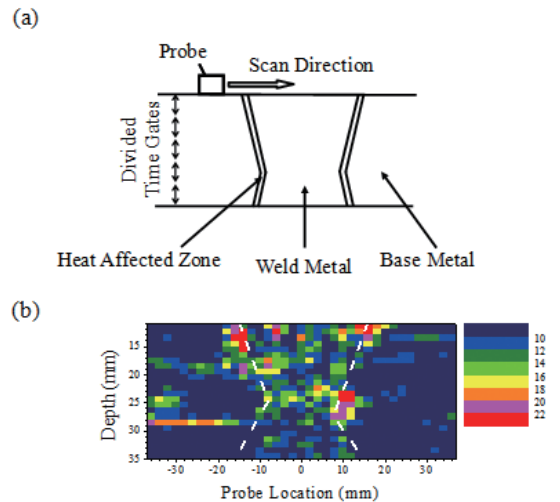


図1 I-CLAT[®] 概略図

(a) 探触子走査、ゲート設定概要、(b) 探傷結果例⁽³⁾

3. 装置自作化の検討

最近では、装置の自作によるシステム化が比較的容易になり、各損傷に対する独自の評価システムを構築し、工事を円滑に進めることや、他社との差別化を図ることが可能になっている。現有装置は市販の探傷器を使用して製作しているため故障時にはメーカーに修理を依頼するため時間がかかり、その結果定期検査工事の工程にも影響を与えていた。

また、採取したデータへのアクセスにも制約があり、データ整理、報告書作成にも多大な時間を費やしていた。そこで、現地検査工事の高効率化、評価の高精度化、信頼性向上に貢献するために、I-CLAT[®] 装置を自作した。

3.1 装置系の構築

製作した I-CLAT[®] 装置を図 2 に、および本装置による探傷フローを図 3 に示す。本装置の特徴としては以下が挙げられる。

- ・ 故障に迅速に対応するため、パーツ単位で交換可能なハードウェア仕様にした。
- ・ 後処理（例えば減衰補正值の変更）が可能となるよう、データ採取時には探傷原信号を保存するプログラム構成とした。
- ・ データ採取時に探触子の接触不良によるデータ採取ミスを回避できるようデータ取り直し機能を付加した。
- ・ 同一探傷箇所での前回のデータと容易に比較できるようにするため、データ呼び出し機能を付加した。

現地配管に取り付けられる探触子ホルダを備えたスキャナは二台社内製作し、故障時に交換する

こともでき、また修理を容易に行うことが可能となった。図 2 のノートパソコンの下部にあるハードウェアボックス（黒い筐体）の中にはデジタイザ、およびスキャナの動作制御用の機器が収納されている。



図 2 製作した I-CLAT[®] 装置

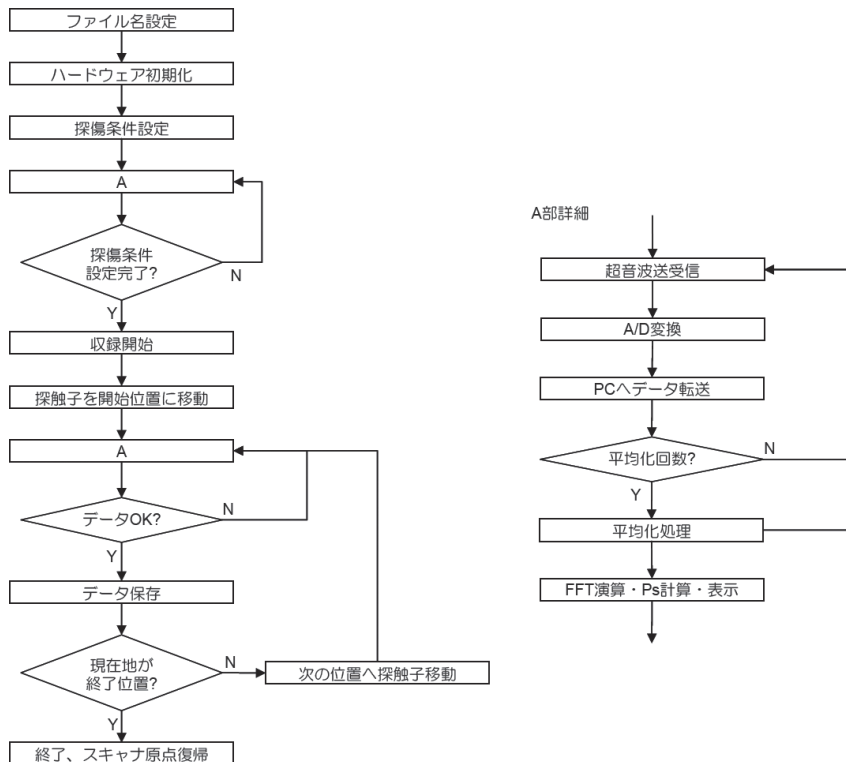


図 3 製作した I-CLAT[®] 装置による探傷フロー

3.2 従来装置で得られた結果との比較

溶接クリープ試験体での探傷結果を図4に示す。

図4 (a) はパルサーレーザに 5077PR (Olympus 社製) を用いて今回製作した装置で探傷した結果を、図4 (b) に現有の I-CLAT® 装置での探傷結果を示す。

どちらの装置においても、溶接部左側の溶接熱影響部の深さ 22mm 付近と、右側溶接会合部 (深さ 30mm 付近) に Ps 値が高い (赤色部や桃色部) クリープ損傷部を検出することができている。B-scan 画像を見比べるとおおよそ同じ傾向で、例えば母材部の介在物の指示なども得られていることがわかる。

今後はパルサーレーザの選定や、現有装置での探傷結果との整合性をとるための細かな条件設定を行い、現有装置に代わる現地計測用の機器として実用化できるよう詳細な検討を進めていく。

4. シミュレーションによる検証

I-CLAT® は損傷部 (クリープポイドの密集部、マイクロクラックなど) からの超音波の散乱波によりクリープ寿命を評価する。したがって、損傷部からの散乱波と材料ノイズとを識別することが評価の精度向上に大きく寄与する。そこで、結晶粒と損傷部位のモデル化手法を検討し、損傷部位での超音波散乱の基礎的な数値解析を行った。改良型 9Cr 鋼を対象とし、ツールとして ComWAVE ver3.0 (伊藤忠テクノソリューションズ社) を使用した。

4.1 シミュレーションモデル概要

モデル概要を図5 (a) に示す。メッシュサイズは $10\mu\text{m}$ とし、クリープ試験体の断面の顕微鏡観察より損傷部を特定し、モデルに組み入れた。実際の探傷においてはクリープ損傷部からの散乱波に材料ノイズが加わった波形が観測される。本モデルでは、結晶粒モデル化領域の各メッシュに異なる音速を割り当てることにより、メッシュの界面で超音波の散乱を生じさせる方法を採用し、材料ノイズを模擬した。結晶粒と損傷部を模擬した系を図5 (b) に示す。黒い部分が損傷部、その他は結晶粒となっており、音速の違いを色で表現し

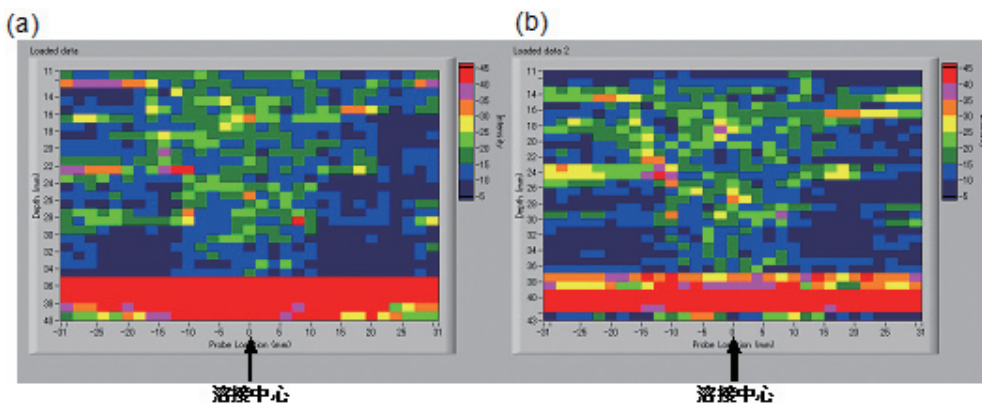


図4 溶接クリープ試験体での探傷結果比較
(a) 新装置での探傷結果、(b) 現有装置での探傷結果

ている。探触子は送信部と受信部から成るモデルとし、探傷面から垂直に超音波を入射させ、受信部における反射波を評価した。また、シミュレーション次元は二次元で行った。

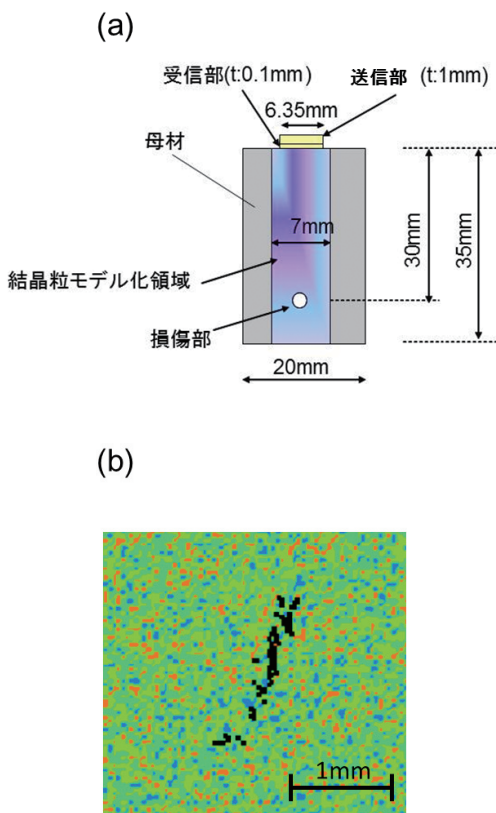


図5 超音波シミュレーション概略図
(a) モデル概要、(b) 損傷部のモデル化例

4.2 シミュレーション結果

上述の系において損傷状態の異なる試験体を用いて超音波散乱強度を比較した。シミュレーション結果のA-scope波形例を図6に示す。材料ノイズおよび損傷部からの指示が確認できる。また、散乱強度の比較を図7に示す。横軸は探傷面からの深さ、縦軸は散乱強度パラメータPsを示している。寿命消費率60%程度である試験体に含まれている損傷部からの指示は材料ノイズに比べて約3倍大きくなる結果となり、損傷部からの散乱波は有意な信号レベルで材料ノイズと識別可能であると考えられる。

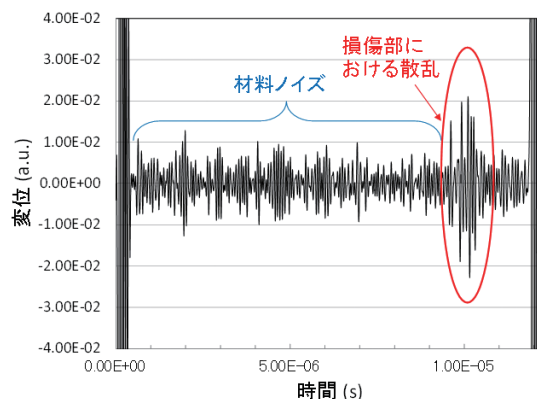


図6 数値計算によるA-scope波形例

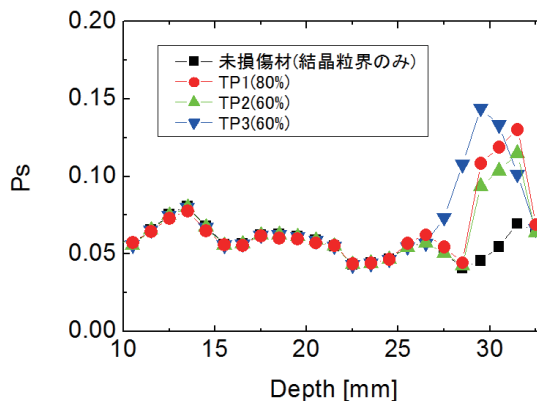


図7 損傷部からの超音波散乱強度の分布

5. まとめ

火力発電用ボイラに使用されている蒸気配管（主蒸気管、高温再熱蒸気管など）のクリープ損傷評価法として採用されている I-CLAT® の現地使用時における信頼性を向上させるために、装置の自作、および数値計算による散乱現象の把握を行った。装置の自作においては現有装置との同様な結果が得られる装置系を構築した。また、数値計算による検討結果より、材料ノイズと比較して損傷部からの散乱波が識別できる信号強度であることを確認した。

本報に記した装置は今後の定期検査工事への本格的な適用を目指し、データの蓄積を継続していく。また、数値計算については、三次元での解析の検討や、より広い領域に対する損傷部のモデル化の検討が今後の検

討課題として挙げられる。いずれも計算時間・使用メモリが膨大となるため、小さな領域での基礎的な評価計算による精査を行っていく必要があると考えている。

参考文献

- (1) 米山他、“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 Vol.28 No.5 pp.306-311 (1998)
- (2) 畠中他、“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 -” IHI 技報 Vol.47 No.4 pp.147-152 (2007)
- (3) Hatanaka *et al.* “Ultrasonic Creep Damage Detection by Frequency Analysis for Boiler Piping” ASME PVT Vol.129, pp.713-718 (2007)



株式会社 IHI 技術開発本部
生産技術センター 生産基盤技術部
主査 博士 (工学)
(兼 IIC 研究開発センター
研究開発グループ 次長)

畠中 宏明
TEL. 045-759-2810
FAX. 045-759-2209



検査事業部
技術部

長沼 隼人
TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547



機器装置事業部
X線検査装置部
課長

菅井 孝郎
TEL. 045-791-3521
FAX. 045-791-3538



フェロー 工学博士
横浜国立大学 安心・安全の科学
研究教育センター 客員教授

荒川 敬弘
TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



株式会社 IHI
技術開発本部 生産技術センター
生産基盤技術部

柳原 有紗
TEL. 045-759-2810
FAX. 045-759-2209



株式会社 IHI 技術開発本部
基盤技術研究所 応用理学研究部
課長代理 博士 (工学)

野瀬 裕之
TEL. 045-759-2819
FAX. 045-759-2208



株式会社 IHI
技術開発本部 生産技術センター
生産基盤技術部
部長 博士 (工学)

田上 稔
TEL. 045-759-2810
FAX. 045-759-2209