

超音波による溶射皮膜膜厚計測へのリアルタイム ウェーブレット解析の実機適用

畠中 宏明 * 中島 富男 * 荒川 敬弘 **
Hiroaki Hatanaka *Tomio Nakajima* *Takahiro Arakawa*
 梶ヶ谷 一郎 † 熊谷 友良 †† 井戸 伸和 ‡
Ichiro Kajigaya *Tomoyoshi Kumagai* *Nobukazu Ido*

本報では実機ボイラに施工されている溶射皮膜の膜厚計測技術について紹介する。解析方法には離散ウェーブレット解析を適用し、超音波信号のリアルタイム処理を実現し、現地での即時膜厚算出を可能にした。本手法は、今後実機ボイラの維持管理に貢献できる技術である。

1. はじめに

発電の高効率化を目的として、ボイラの構造の多様化、燃料の多様化が進んでおり、ボイラ部材の高温腐食対策、摩耗対策で溶射皮膜が広く施工されてきている¹⁾。蒸発器管、過熱器管などの伝熱管はボイラの主要耐圧部のうち最も重要な部位であるが、その表面は燃料中に含まれる硫黄分、アルカリ金属化合物の溶融塩による高温腐食環境雰囲気におかれるなど最も過酷な条件下で使用されている。また、化石燃料の有効利用、発電の高効率化、低公害化を達成するために流動層ボイラなどの新しい機種種のボイラが開発、実用化されてきている。流動層ボイラの伝熱管は流動層内に設置されているため、流動媒体（ベッド材）の連続的な衝突による摩耗が課題となっている。

伝熱管の表面を保護する手法としては、溶射、メッキ、肉盛溶接等が挙げられるが、材料選択の自由度が大きい、形状、寸法の制約が少ない、現地での施工が可能であることなどから、溶射が広く採用されるようになってきている²⁾。

溶射皮膜は、割れ、剥離の発生、密着強度低下、減肉等による劣化が懸念されているが、従来溶射皮膜の経年劣化評価、健全性評価は目視試験、破壊試験により行われてきており、現在でも主流である³⁾。

本報では溶射皮膜の減肉の把握を目的として、超音波信号のリアルタイム処理を用いた 17Cr-Fe 溶射皮膜の膜厚計測技術について報告する。また、本手法の実機ボイラへの適用試験についても述べる。

* 技術研究所 課長 ** 技術研究所 所長 工学博士 † 検査事業部 技師長 博士（工学）
 †† 株式会社 IHI エネルギー事業本部 電力事業部 基本設計部
 ‡ 株式会社 IHI 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部

2. 超音波信号のリアルタイム処理を用いた溶射皮膜膜厚計測技術の必要性

溶射皮膜の膜厚計測手法としては電磁膜厚計が広く用いられている。この電磁膜厚計の原理は、磁性材料の基材の上に非磁性材の溶射皮膜が施工されている場合、基材と電磁膜厚計センサの距離（リフトオフ）を感知し、膜厚を算出する。よって、溶射皮膜が磁性材料の時や、基材が非磁性材料の時には電磁膜厚計による皮膜膜厚計測は大きな制約を受ける。

本報で取り上げる 17Cr-Fe 溶射は鉄基の材料であり、CFB（Circulating Fluidized Bed: 循環流動層）ボイラ⁴⁾の磨耗対策のため、火炉壁管、蒸発器管等の表面に施工されている。この溶射が磨耗し、減肉すると急速に母管が磨耗していく。前述のようにこの溶射皮膜は磁性材料であるため、電磁膜厚計の使用は困難である。

磁性材料の溶射を実構造物において施工し、膜厚を計測する場合には施工される実機部材のそばにサンプル材を配置し、同条件でそのサンプル材にも溶射を施工し、後にサンプル材を切断、断面観察を行い、規定の膜厚を満たしているかを判定する方法が取られている。しかし、この方法では経年時の膜厚を監視することはできない。よって、ここで紹介する膜厚計測技術は溶射管を使用しているボイラを維持管理する上では非常に重要な技術となる。

3. ウェーブレット解析処理を用いた超音波による溶射皮膜膜厚計測技術^{5),6)}

表面近傍のきずの探知や、組織が粗い材料のきず検出は超音波探傷試験では難しいとされている。理由としては、表面近傍の場合はきず信号が送信パルスに埋もれてしまうこと、組織が粗い材料の場合は超音波の減衰が著しく、ノイズが発生

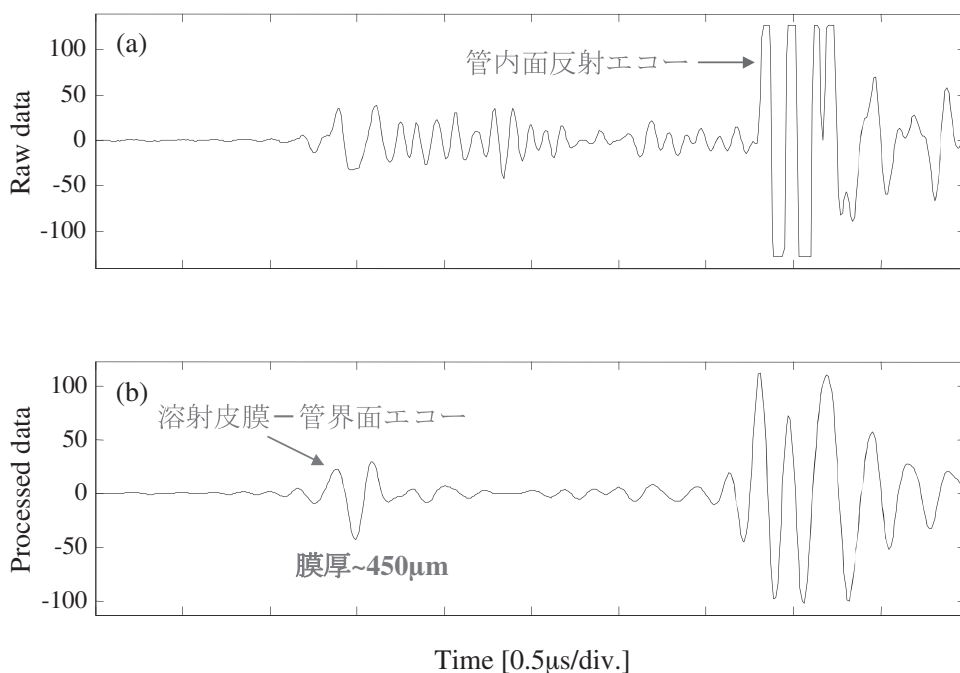


図1 信号解析例 (a) 原信号、(b) 信号処理後

し、計測が困難になることが上げられる。溶射皮膜は一般に薄く（通常 1mm 前後）、さらに皮膜が多孔質であり、減衰も大きい。そのため、従来の超音波探傷技術での膜厚計測は非常に難しい。

ここで述べる膜厚計測技術は既に IHI で開発された技術であり⁷⁾、送信パルスの影響を低減するために、分割型の垂直超音波探触子を採用し、さらにノイズ低減のために、分散ウェーブレット解析を超音波信号に適用することを特徴としている。信号処理例を図 1 に示す。図 1 (a) は超音波の原信号であり、これに分散ウェーブレット解析を用い、特定の周波数帯域（6.3MHz 以下）の信号を抽出した信号を図 1 (b) に示す。

現地での計測を行うためには、膜厚を変えた試験体を複数製作し、図 1 と同様のことを行い、分散ウェーブレット解析後の超音波信号（抽出された皮膜 - 基材界面からの反射信号）の時刻と実膜厚の相図を検定線として事前に作成しておく必要がある。

4. リアルタイム化の検討

現地では溶射部の超音波信号を採取し、その後、post 処理で信号処理を実施し、抽出した特定周波数帯域の皮膜 - 膜厚界面のエコーの発生時刻を読み取り、前述のように事前に作成した検定線より膜厚を算出していた。

従来、現地での膜厚計測は信号採取用 PC と信号解析用 PC が別個であったため、信号採取は例えば火炉内で、その後の信号解析は事務所等で行っていた。後の表 1 にあるように従来の膜厚計測方法では信号採取後の信号解析時間が信号採取時間のおおよそ半分も費やしていた。

現地でのトータルでの計測、膜厚算出時間を短縮し、効率のよい膜厚計測を実施するには、今まで post 処理であった信号処理のリアルタイム化を実現することが最善手段と考えられる。

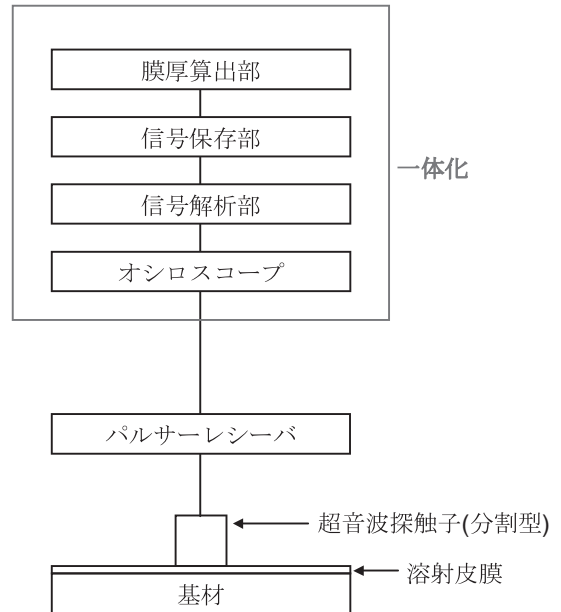


図 2 測定系のブロックダイアグラム

このたび IIC では、オシロスコープに LeCroy Waverunner 44Xi を採用した、膜厚計測のリアルタイム化を実現した計測器を試作した。このオシロスコープは PC (WinXP) 上で制御することができる。超音波の信号解析には Matlab のプログラミングを用いた。

図 2 に装置系のブロックダイアグラムを示す。今回試作したリアルタイム計測器では信号採取、解析、膜厚算出部を WinXP base の PC で一体化することができ、すべての処理を一連で行うことができる。

図 3 に探傷時に使用する装置の画面（フロントパネル）を示す。ここに示したフロントパネルは、4 信号を表示することができるようにしたものである。最上段に原信号、他 3 段には分散ウェーブレット解析後の特定のレベル（周波数帯域）の信号を表示することができるようにしたものである。このフロントパネルに表示される信号は、オシロスコープの信号採取ごとに更新される。フロ

ントパネルに表示される信号、および段数は、任意に変更することも可能である。

信号採取を停止すると最後に採取した信号とその信号処理結果がフロントパネルに残り、基材 - 皮膜界面エコーの時刻をカーソルで読み取ることが可能になっている。

フロントパネルの "Slope" と "Intercept" は事前に作成した検定線のパラメータであり、エコーの時刻 ("Echo Time") を読み取ると同時に膜厚 ("Thickness") を計算することができる。

また、算出された膜厚の数値は算出と同時にクリップボードにコピーされるようになっており、膜厚算出後のデータ整理も Excel 等のソフトウェアで同時進行することができる。

5. 実機での適用試験

本手法での実機 CFB ボイラ火炉壁管に施工されている 17Cr-Fe の膜厚計測を実施した。図 4 に

現地計測状況を示す。探触子を持ち、検査対象箇所を探傷する計測員と、PC を操作し、記録を残す計測員 2 人で 1 チームとなり計測する。この図 4 の写真に写っている 2 人は、JISZ2305 に基づき、認証された非破壊試験技術者である。今後計測工事を展開していくに当たり、1 チーム (2 人) のうち、最低でも一人は認証された技術者であることが望ましい。

従来法での計測時間と本手法での計測時間の比較結果を表 1 に示す。A ボイラでは従来法のみで計測工事を行い、B ボイラでは従来法とリアルタイム 2 つを併用した。従来法におけるデータ整理時間とは、火炉で採取したデータを事務所で信号解析、膜厚算出、データ整理する時間を示している。ここで特記すべきことは今回適用を開始したリアルタイム法では、データ整理の時間が 0 である。また、探触子の接触不良などによる不具合を現場で確認することができ、データの取り落と

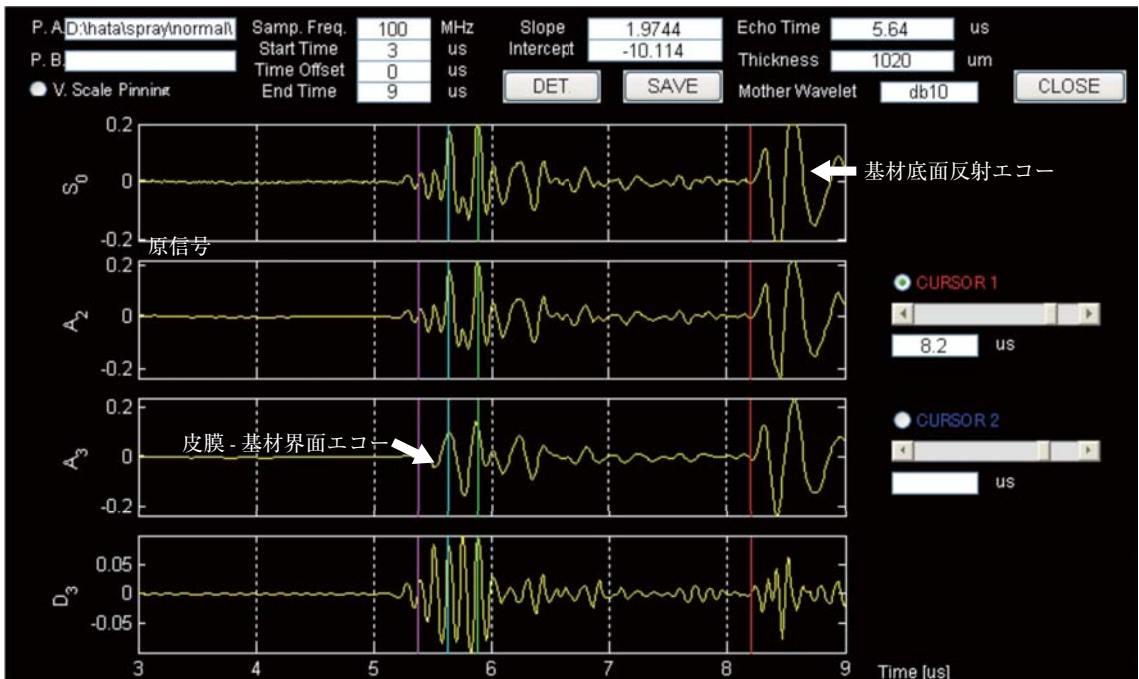


図 3 リアルタイム計測装置のフロントパネル



図4 現地計測状況

表1 計測時間比較結果

ボイラ	手法	日付		計測点数	データ採取 時間(hrs.)	データ解析 時間(hrs.)	平均 (計測点/hrs.)	
A	従来法	○月10日	午前	12	1	1.5	8.0	8.8
			午後	20	1.5			
	従来法	○月11日	午前	31	1.5	3.5	9.9	
			午後	48	3			
B	従来法	△月6日	午後	34	3	1	8.5	12.8
	リアルタイム	△月6日	午後	61	4	0	15.3	
	リアルタイム	△月15日	午前	12	1	0	12.0	
			午後	16	1.5	0	10.7	
	リアルタイム	△月16日	午前	20	1.5	0	13.3	

し、取り直しがなくなり、データの信頼性も向上できている。結果、単位時間あたりに膜厚を算出できる点数は、従来法では9点に対して、リアルタイム法で13点と単純計算で約1.5倍に増加することとなった。データ採取は火炉内での計測作業であるため、作業環境（足場や照明の状態等）に大きく依存するが、リアルタイム化により計

測の効率が向上することは確認できたと考えている。

6. まとめ

本報では溶射皮膜の膜厚計測技術のリアルタイム化について紹介した。今回試作した計測器は信号採取、解析、膜厚算出部を一体化させ、信号採

取から膜厚算出までの処理を一連で行うことができる。

本手法による計測は実機適用を開始したばかりであり、実績を増やし、さらに現地での適用性を考慮した改良を加え、実機ボイラの維持管理技術の一つとなるよう確立していく所存である。

Reference

- 1) A. P. Bennett and M. B. C. Quigley, "The Spraying of Boiler Tubing in Power Stations", *Welding and Metal Fabrication*, Vol. 58, No. 9, pp. 485-490, (1990) .
- 2) 難波一夫、溝豊、梶谷一郎、"耐高温腐食・耐摩耗溶射材のボイラへの適用"、*石川島播磨技報*、Vol. 38, No. 3, pp. 181-188, (1998) .
- 3) C. K. Lin and C. C. Berndt, "Measurement and Analysis of Adhesion Strength for Thermally Sprayed Coatings", *Journal of Thermal Spray Technologies*, Vol. 3, No. 1, pp. 75-104, (1994) .
- 4) 渡辺修三、熊谷友良、"廃棄物系燃料を主燃料とした高温蒸気ボイラの開発"、*日本エネルギー学会誌*、Vol. 84, No. 4, pp. 278-283, (2005) .
- 5) H. Hatanaka, K. Namba, I. Kajigaya and T. Arakawa, "Ultrasonic Examination of Thermal Sprayed Coatings with Frequency Analysis", *Proceedings from the 15th World Conference on Non-destructive Testing*, (2000) .
- 6) H. Hatanaka, I. Kajigaya and T. Arakawa, "Ultrasonic Examination with Signal Processing Method for Thermal Sprayed Coatings", *Materials Evaluation, The American Society for Nondestructive Testing*, Vol. 62, No. 6, pp. 683-689, (2004) .
- 7) 畠中宏明、荒川敬弘、公開特許広報、特開2001-66130



技術研究所 課長

畠中 宏明

TEL. 045-759-2927
FAX. 045-759-2155



技術研究所 課長

中島富男

TEL. 045-759-2927
FAX. 045-759-2155



技術研究所 所長 工学博士

荒川 敬弘

TEL. 045-759-2927
FAX. 045-759-2155



検査事業部 技師長
博士 (工学)

梶ヶ谷 一郎

TEL. 03-3778-7913
FAX. 03-3778-7951



株式会社 IHI
エネルギー事業本部 電力事業部
基本設計部

熊谷友良

TEL. 03-6204-7525
FAX. 03-6204-8789



株式会社 IHI
技術開発本部 生産技術センター
生産技術開発部

井戸 伸和

TEL. 045-759-2812
FAX. 045-759-2205