

設備の健全性評価技術 —架空配管・埋設配管の診断—

Evaluation Technology for Reliability of Equipments —Diagnosis Technology for Overhead and Buried Piping—

檀上 武克 DANJO Takeyoshi JFE スチール 西日本製鉄所(福山地区) 設備部鋼材設備室 統括マネージャー
横山 康雄 YOKOYAMA Yasuo JFE スチール 西日本製鉄所(倉敷地区) 設備部開発・設計室 主任部員(副課長)
明智 吉弘 AKECHI Yoshihiro JFE スチール 東日本製鉄所(千葉地区) 設備部保全技術室 主任部員(副課長)
壁矢 和久 KABEYA Kazuhisa JFE 技研 機械研究部 主任研究員(課長)
卯西 裕之 UNISHI Hiroyuki JFE エンジニアリング エネルギーエンジニアリング事業部 ガス技術部技術室長

要旨

製鉄所では多量の高圧ガスや工業用水を使用しており、これらのユーティリティ配管の漏洩を未然に防ぐことは、省資源という観点だけでなく、社会的責任を果たす上からも重要な課題である。JFE グループでは、特に点検・検査の困難な架空配管、埋設配管を対象とした測定精度、効率に優れた診断・検査装置を開発し、製鉄所を含む社内外で有効活用している。

Abstract:

A large amount of gas and water is used in iron- and steelworks. Therefore, it is very important to prevent the leakage from those pipings beforehand, not only to save resources and but also to fulfill social responsibility. JFE Steel Group has developed new inspection devices for overhead and buried piping which are installed at difficult-to-inspect location with excellent measurement accuracy and efficiency. They have been used effectively in various sites including iron- and steelworks at JFE Steel.

1. はじめに

わが国では、'60~'70年代の高度成長期に多くのプラントが建設されたが、すでに30年以上が経過している。JFE スチールの各製鉄所においても、ユーティリティ配管を含む主要設備の多くはこれらの年代に建設されている。

JFE グループではこれらの配管の中でも、点検や検査の難しい架空配管および埋設配管を対象とした劣化診断技術を開発した。これらの有効活用により、ガスの漏洩などの事故やユーティリティの供給トラブルによる生産障害の防止を図っており、信頼性の高いメンテナンスを実現している。このことは、省資源だけでなく、社会的責任という観点からも非常に重要である。

本報告では、これらの診断技術について紹介する。

2. 架空配管腐食診断装置 「Scan-WALKER」の開発

製鉄所内のコークス炉や高炉、転炉などで発生するガスは所内の各設備へ輸送され、燃料として利用されている。

これらの輸送には直径1000～4500mm程度の鋼製の配管が用いられ、地上4～5mの架台上に設置されている。JFE スチール西日本製鉄所(福山地区)では、この配管長は75kmにも及ぶ。

ガス配管の劣化原因の主なものとして、ガス中の腐食性成分による内部からの腐食進行があげられる。この腐食は、広範囲にわたってほぼ均一に進行する場合と局所的に進行する場合(以下、孔食)がある(Photo 1)。この広範囲の配管群の局所的に発生する孔食を、定量的かつ効率的に把握する手法が強く望まれている。

2.1 「Scan-WALKER」の主仕様

JFE スチールでは、このような架空ガス配管のための診断装置「Scan-WALKER」を開発し、JFE スチールの各製鉄所で定期的な配管の検査に用いている(Photo 2)。診断装置の構成は、肉厚測定センサとそれを搭載して配管上を走行する自走装置からなる。それぞれの主仕様をTable 1に示す。

2.2 配管内面の肉厚測定技術の開発

測定原理は、電磁誘導法を採用した。電磁誘導法とは、

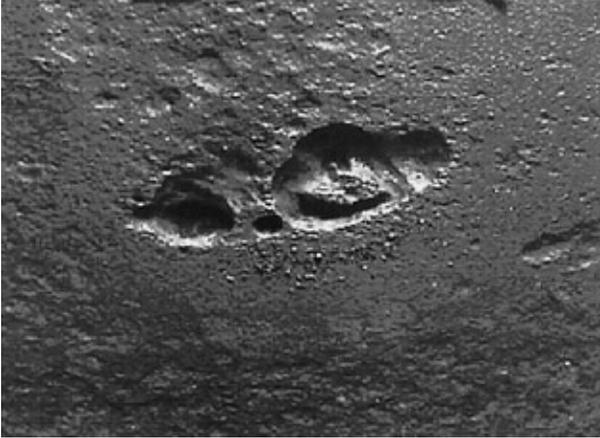


Photo 1 An example of local corrosion on the inner surface of a pipe

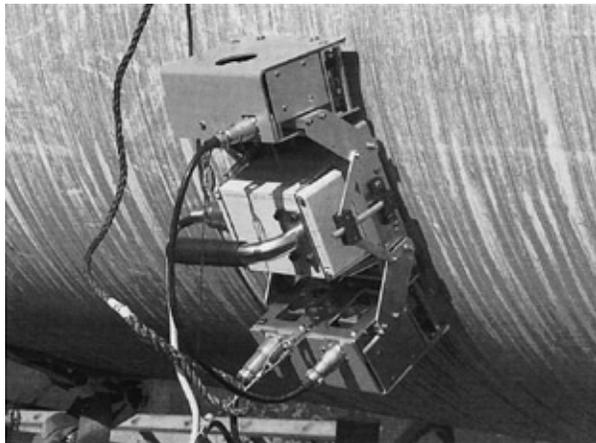


Photo 2 View of "Scan-WALKER"

Table 1 Specification of Scan-WALKER

(1) Specification of sensor

Principle of measurement	Electromagnetic induction method
The main function	Detecting corrosion in the pipe by the measurement from the outside and painting and rust
	Presuming the thickness of the corrosion part automatically Displaying the color map of the inspection result
Specification	Thickness of piping: under 19 mm
	Diameter of corrosion: over 5 mm
	Error margin for thickness: $\pm 20\%$

(2) Specification of running device

Mechanism	Drive the eight magnetic wheels Run on 3D curved surface
	Radius of curved surface on which device can run: over 250 mm
Specification	Running speed: 1.5 m/m Carrying ability: maximum 100 N
	Operation: Remote control with cable (20 m)

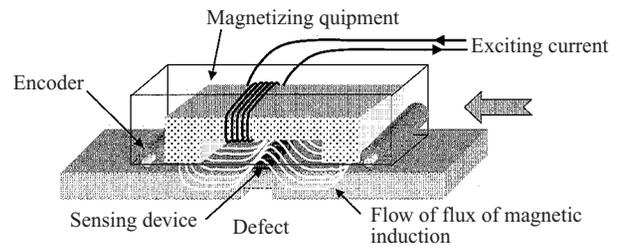


Fig. 1 Composition of sensor of "Scan-WALKER"

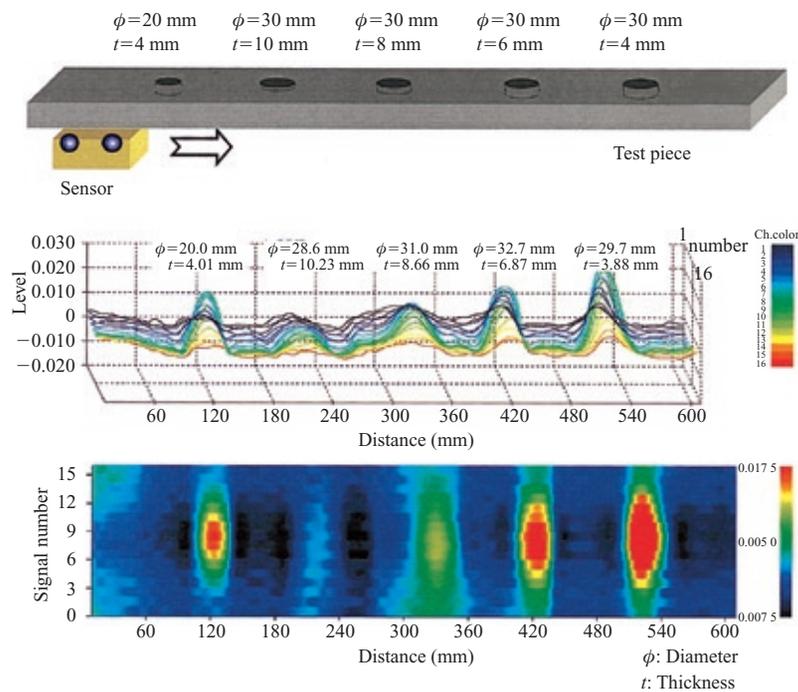


Fig. 2 Result of inspecting test piece with "Scan-WALKER"

被測定物に励磁磁束を印加することにより、欠陥部に発生する漏洩磁束を検出、解析する手法である。電磁誘導法は、従来からこのような配管の内部腐食の進行を把握するために用いられる超音波センサと比較すると、(1) 厚い錆や塗料の除去などの下地処理が不要、(2) 接触媒質が不要である点で優れている。そのため、架空配管の測定時に足場設置の必要がなく、測定の手間やコストが大幅に削減できる。また多数の感磁センサを密に並べることにより、小さな孔食を見逃すことなく腐食状態を評価することができる。

しかし、電磁誘導法には、個別の感磁センサから得られる信号からは、原理上肉厚や欠陥の大きさを推定することができないという大きな問題があった。

JFE スチールの開発した肉厚測定センサの構造を Fig. 1 に示す。磁化器の内部に 16 個の感磁センサを並べ、それぞれのセンサで検知された信号を総合的に解析することにより、配管内面の腐食欠陥の大きさと肉厚を評価することができる（特許出願中）。一定以上の深さに達した欠陥は、パーソナルコンピュータ（PC）上の画面に表示される肉厚分布のカラーマップ上の該当する位置に自動的にマッピングされ、欠陥の大きさと肉厚が表示される（Fig. 2）。これらすべての処理と解析は、新開発のプログラムを搭載した

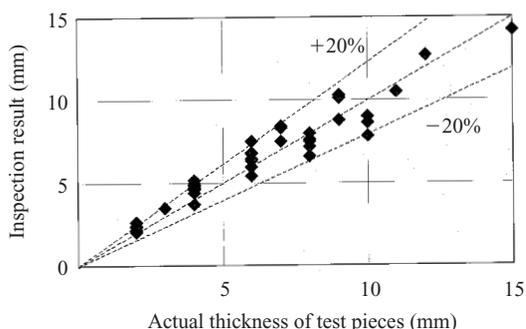


Fig. 3 Result of evaluating inspection accuracy of sensor of "Scan-WALKER"

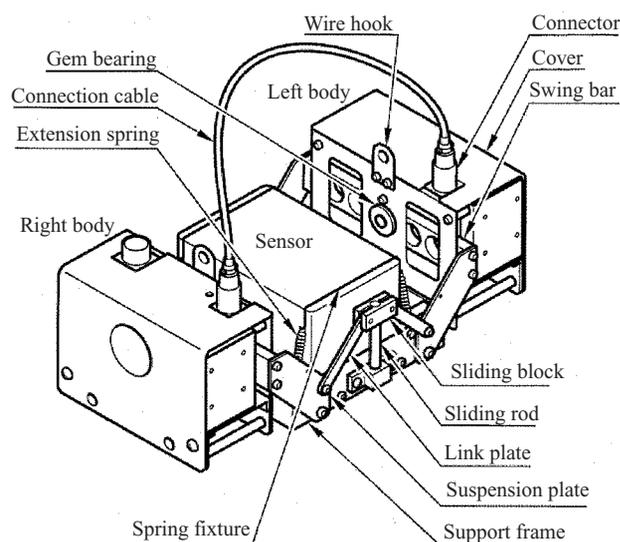


Fig. 4 Details of running machine of "Scan-WALKER"

汎用のノート型 PC によってリアルタイムで行われる。

上記のセンサを用いて、実際に発生した孔食部の肉厚を評価した結果を Fig. 3 に示す。管厚は 6～19 mm、孔食部の直径は概略 7～30 mm 程度の評価対象に対し、±20% の誤差内で肉厚を評価することが可能である。これは配管の腐食劣化状況を把握し、補修や老朽更新の要否判断をするためには十分な精度である。

2.3 自走装置の開発

自走装置の構造を Fig. 4 に示す。強力な磁輪によって、鋼板などにしっかりと吸着するため、垂直面や配管下面の走行も可能であり、溶接部や補強プレートなどの数ミリメートル程度の段差もまったく問題にならない。走行駆動部はセンサの両側で完全に独立しており、あらゆる方向にスイングできる構造となっている。そのため、球面形状においても走行車輪が密着し、安定した旋回走行が可能である。さらに、センサは自走装置とスプリングで連結、保持されており、走行面の凹凸による計測データへの影響はない。前進、後退、旋回などの動作は有線で遠隔操作する。

3. 埋設配管塗覆装損傷診断技術

JFE スチールの製鉄所埋設配管のほとんどは水配管であり、大径配管にはアスファルトビニロンクロスやタールエポキシ系の塗料で塗覆装された鋼管などを使用し、小径配管にはプラスチックライニング鋼管などが使用されている。また配管長は、各地区とも数十キロメートルの規模である。これらの配管の損傷は、主に塗覆装損傷に起因する配管外面腐食であり、外面塗覆装の健全性を診断することが埋設配管の劣化判定を行う上で重要な要素となっている。

JFE グループでは、ガス・石油・水などのパイプラインの塗覆装損傷を非掘削で検出可能な探査装置の開発に早くから着手しており、現在、磁界法によるシステム「PICO-FINDER II（ピコ ファインダー II）」と電位法によるシステム「MS マイケル」を有している。JFE スチールの各製鉄所でも本システムを適用し、埋設配管の塗覆装損傷状況把握を行っている。

3.1 塗覆装損傷診断装置概要

Fig. 5 に磁界法による塗覆装診断装置の概要を示す¹⁾。本装置は、塗覆装された金属埋設配管の外面塗覆装損傷状況を地上から非接触で検査する装置であり、埋設管に交流電流を流し、塗覆装損傷部における漏洩電流によって起こる磁場の乱れを 2 個／組の差分出力として検出し、塗覆装損傷部を特定する。本装置は微弱な漏洩磁場の検出によって、高精度な計測を可能としたもので、鉄筋コンクリート舗装下の埋設管にも適用可能である。Fig. 6 に電位法による塗覆装診断装置の概要を示す²⁾。本装置は、埋設配管へ

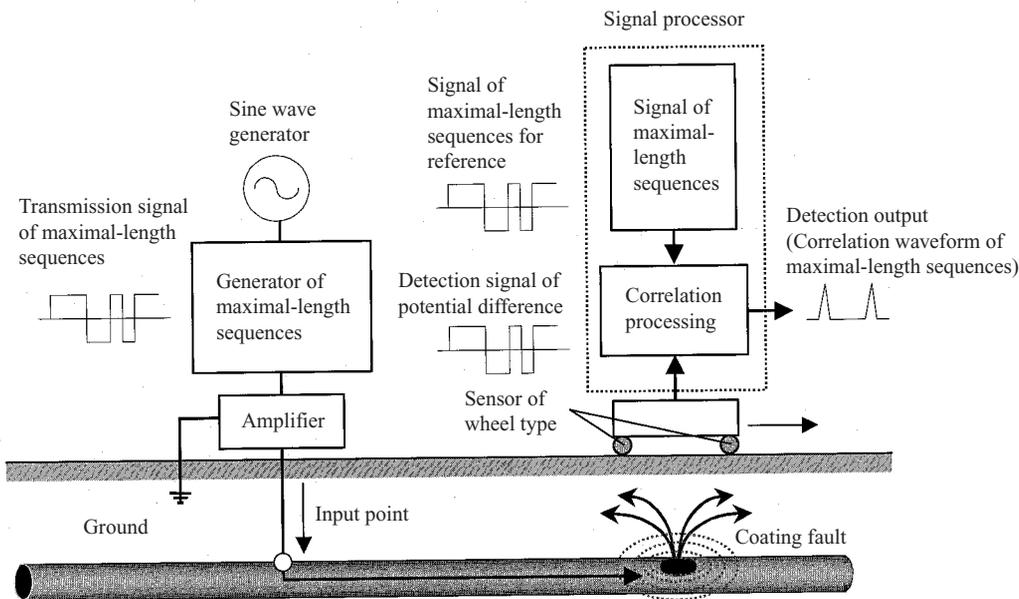


Fig. 6 Schematic of electric potential method

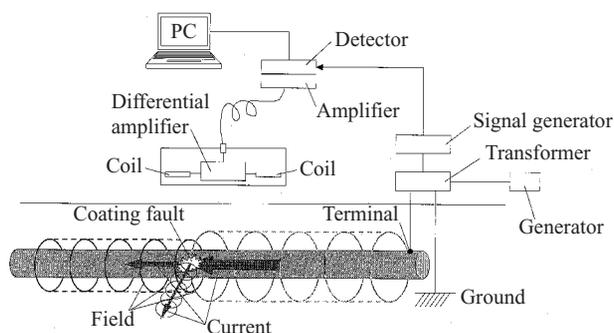


Fig. 5 Schematic of magnetic field method

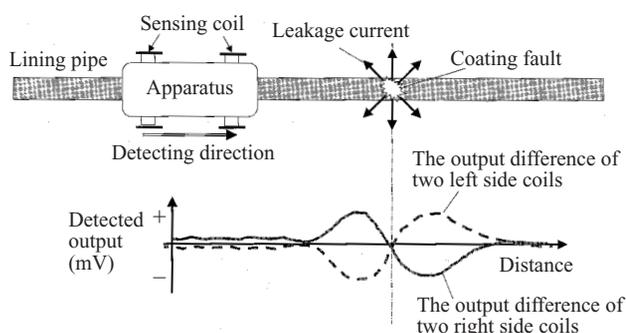


Fig. 7 Coating defect detection by magnetic field method

の印加信号として擬似ランダム信号の一種である M 系列信号（交流電流）を使用し、地表面における検出信号に対して相関処理を行うことにより地電流、誘導電流などのノイズ信号の影響を抑制し、高感度な信号検出を実現している。本方式は主として通常舗装下の埋設管に広く適用される。

3.2 塗覆装損傷判定方法

Fig. 7 に、磁界法による塗覆装損傷判定方法の概要を示す。本装置は、埋設管に沿って真上を移動して検査を行う。前後左右に検出コイルを有しており、塗覆装に損傷がある場合、漏れ電流の向きが左右逆方向となり、右側と左側の前後コイル差分出力は逆方向に振れるため、損傷位置を特定することができる。電位法では、塗覆装損傷部に流れ込む信号電流により生じる地表面電位勾配を 2 個の車輪センサで連続計測し、得られた信号パターンの変化から損傷位置を特定することができる。

3.3 塗覆装劣化診断システム適用例³⁾

Fig. 8 は、東日本製鉄所（京浜地区）扇島の埋設配管を

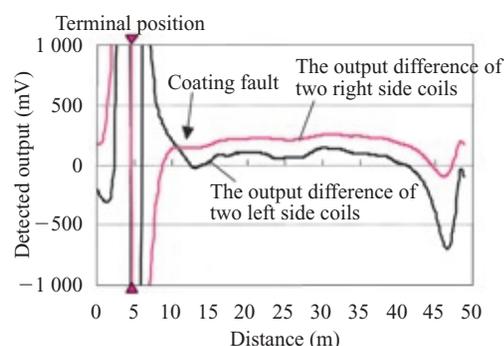


Fig. 8 Example of detection signal

磁界法により評価した時のデータである。これから小さな塗覆装損傷があると推定できたため、該当部位を掘削点検したところ、Photo 3 に示すとおり判定どおりの状況を確認することができた。

埋設水配管の日常のメンテナンスにおいて、土中の漏水部を正確に探知し、速やかに処置することは、水資源保護、設備補修効率化の観点から非常に重要である。埋設配管の漏水探知法としては漏水箇所から発生する音・振動

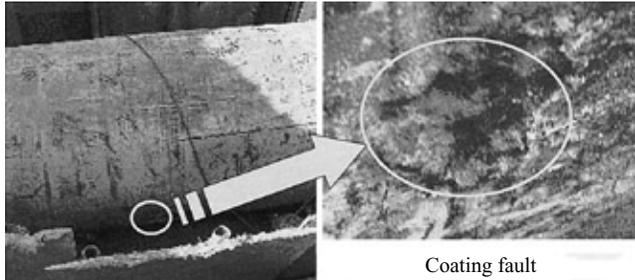


Photo 3 Coating fault detected by "PICO FINDER II"

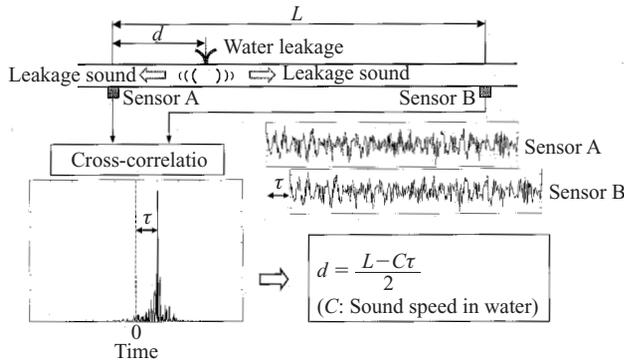


Fig. 9 Water leakage detection by cross-correlation method

(以下、漏水音)を測定する手法がある。中でも相関式漏水探知法(以下、相関法)は高精度な漏水位置同定が可能で、機器の市販もされており⁴⁾、製鉄所などにおける適用も期待できる。**Fig. 9**は相関法の原理を示している。配管上の離れた2点(センサA、B)で測定した漏水音信号の相互相関関数から伝播時間差 τ を求め、(1)式に基づいて漏水位置 d を算出するものである。ここで、 L は2点のセンサ間距離、 C は管内水中音速である。一般に、 C は1000～1400 m/sで、 τ は1 ms以内の精度で十分求められるので、漏水位置は1 m程度の精度で推定可能となる。

$$d = (L - C\tau) / 2 \dots \dots \dots (1)$$

しかし、製鉄所のように設備振動などノイズの多い環境下では、センサにノイズが混入し、相互相関関数による伝播時間差 τ の特定が困難となるため、探知性能が著しく低下する。市販の相関式漏水探知器にはノイズ除去用のフィルタが搭載されているが、漏水音やノイズの周波数成分によっては有効に機能しないことも多い。本開発では相関法に漏水音抽出およびノイズ除去機能を付加し、ノイズの多い環境下でも使用可能な漏水探知システムを構築した。

4.1 送水昇圧時の漏水音変化情報を利用した信号抽出

配管上のセンサで測定された信号には漏水音とノイズが混在している。本節では、送水圧を上昇させた際のセンサ信号の変化に着目し、この情報に基づいてノイズに埋もれ

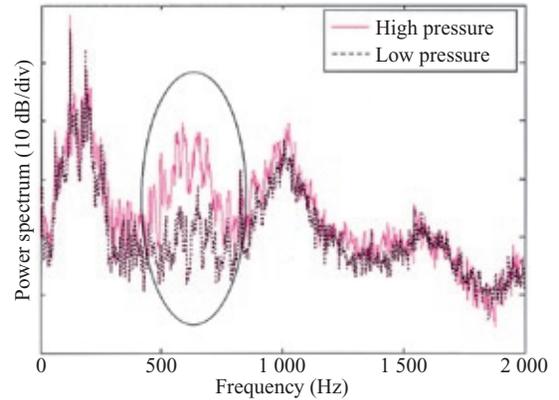


Fig. 10 Influence of water pressure on leakage sound

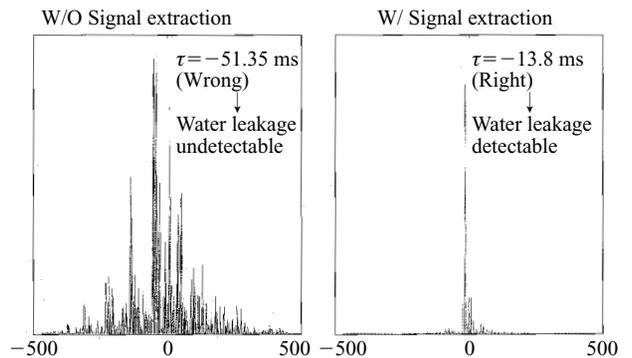


Fig. 11 Effect of leakage sound signal extraction

た信号から漏水音成分を抽出する技術について述べる。

Fig. 10は実配管において送水圧の上昇がセンサ信号のパワースペクトルに及ぼす影響を示している。この例で、楕円で囲った450～750 Hz付近の周波数成分が、送水圧上昇にともない、変化していることが分かる。ノイズ成分は送水圧に無関係なので、これが漏水音成分であると推測できる。そこで、この周波数域をバンドパスフィルタで抽出して得られるセンサ信号に対して相互相関関数演算を試みた。**Fig. 11**は信号抽出処理を施さない場合(従来法)と施した場合(本手法)との相互相関関数を比較したものである。従来法では、漏水音成分に比べて20 dB(10倍)以上大きい200 Hz以下のノイズ成分などの影響で、正確な伝播時間差 τ を求められていない。しかし、本手法では明瞭な相互相関関数が得られ、漏水探知が可能となっている。市販の相関式漏水探知器に搭載されている周波数固定のバンドパスフィルタと異なり、本手法では送水昇圧時の変化情報に基づき最適な周波数帯域を設定していることが優れた性能につながっていると考えられる。

4.2 適応デジタルフィルタを用いたノイズ除去

現場振動計測の結果、配管上のセンサに混入する設備振動などのノイズは地盤を通して伝播することが確認された。本節ではその知見に基づき、適応デジタルフィルタを用いてノイズを積極的に除去する技術について述べる。

Fig. 12は、そのノイズ除去システムの構成を示してい

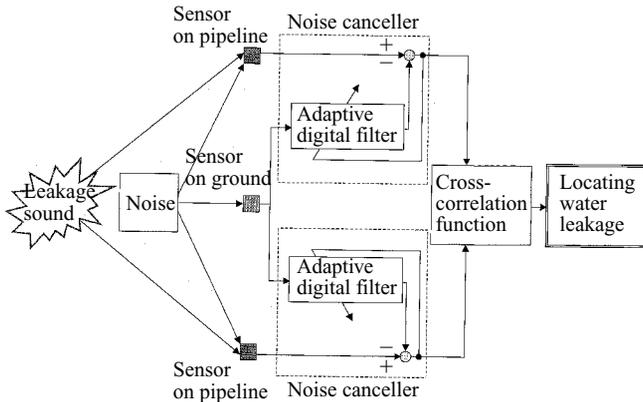


Fig. 12 Schematic of noise cancellation system

る。配管付近の地盤上に新たなセンサを設置し、その地盤振動を参照信号とする適応デジタルフィルタによって、配管上のセンサ信号に含まれるノイズを除去するものである。適応デジタルフィルタによるノイズ除去が有効に働くためには、(1) ノイズと参照信号（地盤センサ）の相関が強いこと、(2) 漏水音と参照信号の相関が弱いことが必須条件となる⁵⁾。地盤を通して伝播するノイズは、(1) の条件を満たす。一方、漏水音は基本的に管内の水中を伝播するもので、地盤への到達はほとんどないため、(2) の条件も満たす。したがって、良好なノイズ除去が可能となる。

実際の漏水探知において、ほとんどの場合は前節の信号抽出で十分であると考えられるが、漏水音とノイズの周波数帯域が重なるような場合には、本節で述べたノイズ除去が威力を発揮する。著者らは、従来の相関法に前節で述べた漏水音抽出およびノイズ除去機能を付加し、製鉄所のようなノイズの多い環境下でも使用可能な漏水探知システム「WALTZ (water leakage tester for zero waste)」を開発した。すでに、製鉄所内埋設配管における $3 \text{ m}^3/\text{h}$ の漏水箇所を誤差 1 m で探知するなどの実績がある。

5. まとめ

本報告では架空配管、埋設配管を対象とした JFE スチー

ルグループの技術開発事例を紹介した。これらの技術はいずれも JFE スチールの各製鉄所で有効活用中であり、生産阻害の防止、資源の有効活用、信頼性の高いメンテナンスの実現に大いに寄与している。

参考文献

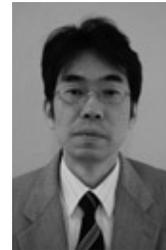
- 1) 増田敏一ほか. 埋設管塗覆装損傷探索システムの開発. 全国水道研究発表会. 1998.
- 2) 手塚浩一ほか. NKK 技報. no. 177, 2002-06.
- 3) 明智吉弘, 山科修一, 牧野高大, 片岡経明, 原賢次, 山本友義. 材料とプロセス. vol. 17, no. 5, 2004, p. 965.
- 4) たとえば, フジテコム(株) 相関式漏水探知器 LC-2500 カタログ. 2004.
- 5) Widrow, B.; Stearns, S. D. Adaptive Signal Proc. Prentice Hall, 1985.



檀上 武克



横山 康雄



明智 吉弘



壁矢 和久



卯西 裕之