



ハイブリッド計測による配管ヘルスマニタリング法の研究

Study on pipe health monitoring method by hybrid measurement
using electromagnetic ultrasonic

(独)日本原子力研究開発機構* 田川 明広 Akihiro TAGAWA Member
神戸大学大学院 小島 史男 Fumio KOJIMA Member

The purpose of this study is to develop a hybrid sensor to be able to measure two or more physical values (the pipe surface temperature, the pipe wall thinning and the temperature of an internal fluid) with one sensor with an electromagnetic acoustic transducer. Each result of a measurement can improve the measurement precision by doing working that calibrate each other.

The piping surface temperature was measured by converting the direct current resistance at the temperature by using the EMAT coil. As a result, it was confirmed that coefficients of determination reproduced by the accuracy of 0.99 or more and it was in the proportion the temperature and resistance. It was confirmed the amount of the pipe wall thinning is to be able to measure the board thickness of the piping of 10mm at 200°C by using the pulse echo method and the pulse echo resonance method. Water temperature was calculated by using the distance between EMATs which carried out opposite arrangement and ultrasonic time of concentration.

Keywords: CBM, TBM, EMAT, Pulse echo method, Pulse echo resonance method

1. 緒言

臨床医の病理診断(循環器疾患を例)は、1.病歴聴取、2.身体所見、3.胸部レントゲン、4.心電図、5.心エコー図の主なる5つの手段から成り立つ。医師は、各々の検査の各疾患に対する限界を考慮し、総合的に診断する。[1]

これを原子力発電所に当てはめて考えると、1.過去の保守・補修履歴、2.プラント所見、3.非破壊検査、4 & 5.状態監視(以下、モニタリング)となる。今後、原子力発電所でプラント診断を実施する場合、これら各々の検査、モニタリングに対する限界を考慮し、総合的に診断する技術者、もしくは診断システムが求められる。医学分野においても診断システムの研究[2]はなされているが、未だ完全な診断手法の確立には至っておらず、臨床医判断が大であることから原子力分野でも診断技術者の育成とそれをサポートする診断システムの研究は不可欠である。特に、医師の場合、身体所見把握は、問診により情報収集、情報評価、仮説生成、仮説評価し、診断戦略を立て検査に繋げられる[3]が、原子力発電所の場合に直接問診はできないことから、モニタリングによりプラント挙動を把握し、運転員や保守員が所見として把握できることが重要となる。人間が、診断や判断を行う過程は、様々な情報を総合的に判断している。これにはマルチモーダル情報処理が必要である。しかし、これを行うには既存プラントに新たなセンサを取り付ける必要もあり、事業者としては設備投資は必要最小限に留めたい。モニタ

リングによる状態基準保全(以下、CBM: Condition Based Maintenance)導入に対し、コストミニマムで従来の時間基準保全(以下、TBM: Time Based Maintenance)よりも安全性が向上することは事業者がTBMからCBMをスムーズに導入する必要条件にもなる。そして、CBMのモニタリング間隔とコスト、安全性の最適解は数学的に求まり、CBMの優位性は確認されている[4]が、動的機器のモニタリング技術[5, 6]に比べ、配管などの静的機器のモニタリング技術の導入は設置点数が多いことから遅れている。また、静的機器のモニタリング実施には広範囲をスクリーニングする技術[7, 8, 9]と局所的だが高精度で測定し事象の進展を確認する技術が必要となる。

このため、複数のセンサを1ユニット化し、設置箇所を少なく、得られる情報を総合的に評価するセンサフュージョン技術や1つのセンサの能力を最大限に発揮し複数の物理量を求めるハイブリッドセンシング技術の研究が行われている。本研究では、電磁超音波探触子(以下、EMAT: Electromagnetic acoustic transducer)を用いたハイブリッドセンシングの研究を実施するものである。

これまでのEMATの利用方法は、高温でありながら、接触媒質が不要である長所を活かし、減肉測定[10]、欠陥検出[11]、疲労検知[12]、ガイド波発生による広域モニタリング[13]などの研究が行われてきた。しかし、いずれも1組、もしくは1つのセンサで1つの物理量の測定に用いるものであった。本研究では、EMAT構造を見直し、シンプルな構造ながらも複数の物理量の測定が可

連絡先: 田川明広, 独立行政法人日本原子力研究開発機構,
*神戸大学大学院工学研究科後期博士課程, 〒919-1279 福井
県敦賀市白木1丁目, E-mail: tagawa.akihiro@jaea.go.jp

能であるセンサを研究した。具体的には、1組の EMAT により板厚、配管表面温度、内部流体温度の 3 種類の物理量の高精度測定を行うものである。本研究の成功により、安価でありながら、高精度な局所モニタリングを実施することができるセンサ提供が可能となる。

2. 設計・試作

2.1 設計条件

センサ設計条件は、配管減肉モニタリングの必要性が高まった関西電力美浜発電所 3 号機、配管減肉による破断事故の条件[14]を参考とした。なお、高速増殖炉(以下、FBR)においても水系配管の条件は同じであるため適用できる。FBR のナトリウム配管は、軽水炉よりも高温であるが、Fig.1[15]に示すとおり、配管材料として高温強度に優れたステンレス鋼を採用しており、炭素鋼の高温水中の腐食速度に比べて、高温ナトリウム中の腐食減肉の速度は桁違いに小さい。また、ナトリウム中の酸素濃度を管理することによりナトリウム環境下では有意な腐食が生じないことが確かめられている。そのため、運転中の酸素濃度は、1 次系で 3ppm 以下、2 次系で 10ppm 以下であることを監視し、腐食減肉を防止している。これらのことから、水系配管での減肉をターゲットとし、温度 200°C、配管材質炭素鋼 (SS400)、板厚 10mm としてセンサ設計を行った。

EMAT は、永久磁石を用いた構造であることから、Fig.2 のように磁石の保持力を利用し、パッケージ保温材との組み合わせにより、着脱が容易で保守性の高い取り付け設計を採用する。

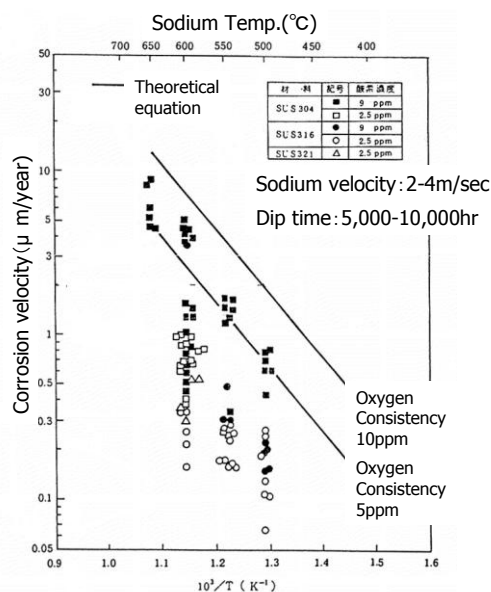


Fig.1 Corrosion velocity of stainless steel [15]

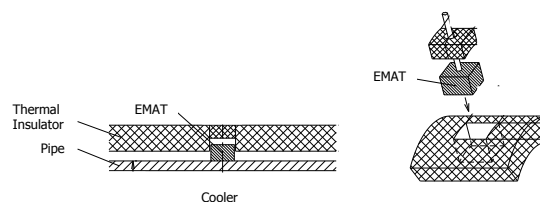


Fig.2 Image of EMAT establishment under Thermal insulator

2.2 測定フロー

従来は、高温用 EMAT センサにより測定を行う場合、配管表面温度の測定には別途温度計を取り付けることが必要であった。本研究の EMAT では、他手法とは異なり、EMAT 構造材であるコイルの直流抵抗を測定することで、温度を測定し、その温度を用いて音速の補正を行う。補正された音速を用いて板厚を測定し、測定した板厚で補正した配管内径を用いて流体を伝播した超音波を捕らえることで、流体温度を測定する。本研究では、水系配管が対象であるため、内部流体は、水とした。測定フローを Fig.3 に示す。

温度計、板厚計、水温計が同位置に存在することで、場所に依存した誤差がなくなる。そのため、測定精度は相対的に高くなる。

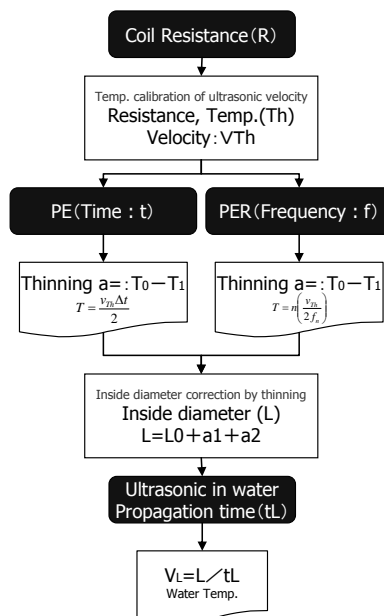


Fig.3 Measurement flow

2.3 センサ試作

システム測定系を Fig.4 に示す。

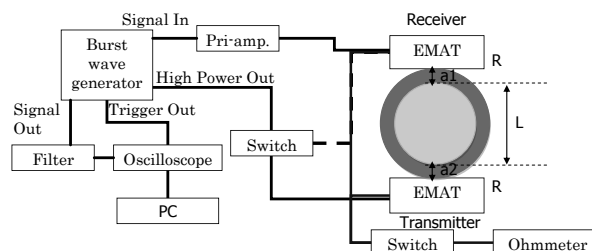


Fig.4 Measurement system for hybrid sensing

このとき、2 個の EMAT を対面配置し取り付ける。それぞれのセンサから得た信号を Fig.3 のフローに従って測定する。ここで、配管温度は各々の EMAT コイルの直流抵抗から求め、板厚は、送信用、受信用を切替器でコントロールし、一振動子型 EMAT として独立に計測する。最後に、送信 EMAT から受信 EMAT に水を介して超音波を伝播し、水温を計測する。そこで、Fig.5 のセンサを試作した。磁石を 3 個並べ、縦波発生時には 3 個の磁石からの磁束密度とコイルから発生する誘導電場を用いる。SH (Shear Horizontal) 波発生は、2 個の磁石とコイルから発生する誘導電場を用いることができる配置とした。各コイルへの印加電圧のタイミングを変えることで、縦波、SH 波発信の相互作用を回避する。また、渦電流のリフトオフの影響を考慮し、板厚測定用コイルを被検体側とした。

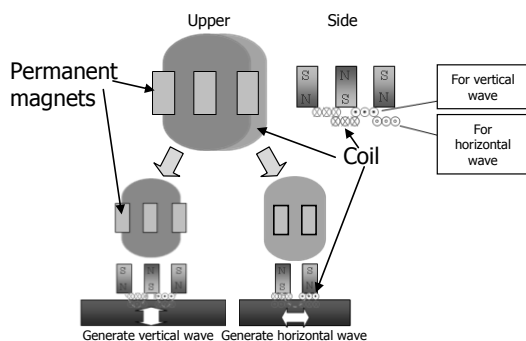


Fig.5 Structure of trial EMAT

Table.1 にコイル構造 (線径と巻数) を記す。コイルは、Fig.6 のように真ん中にコイルからの誘導電場の影響を隔離するスペースを空ける構造とし、楕円形に線を巻く。また、線間は、密になるようにする。

Table.1 Coils structure

Type	Wire diameter	Turn number of coil
①	φ0.2	44
②	φ0.1	79

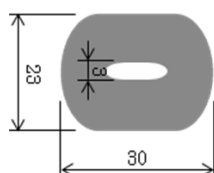


Fig.6 Coil turns

Table.2 Arrangement of coils for EMAT

Water Temp. (Longitudinal wave)	Wall thinning (Shear (horizontal) wave)
Type ① (Transmitter)	Type ① (Transmitter/Receiver)
Type ② (Receiver)	Type ① (Transmitter/Receiver)

縦波受信用は、Table.1②のコイルを用いる場合、①のコイルより高感度であることが予備試験によりわかった。よって、Table.2 のコイル配置を採用した。

2.4 測定原理

①コイル直流抵抗測定

金属などの導体は温度によって抵抗値が変化することを利用する。

②板厚測定

a)パルスエコー法 (以下、PE 法 : Pulse echo method)

超音波が鋼材中を伝播し、多重反射する時間差を利用する。板厚は、(1) 式の通り計算できる。

$$T = \frac{v(t_{n+1} - t_n)}{2} = \frac{v\Delta t}{2} \quad (1)$$

T : Thickness (mm), t : Time (μs), v : Velocity (km/s)

b)パルスエコー共振法 (以下、PER 法 : Pulse echo resonance method)

受信した超音波を周波数解析し、共振周波数を求めることで板厚に変換する。このとき、板厚は、(2)式[16]の通り計算できる。電磁超音波共鳴法[16]の原理は、送信周波数を掃引し、共鳴スペクトルを変化させ個々の周波数の振幅を検出することに対し、本研究では広帯域の周波数を送信し、板厚に応じて共鳴する周波数を周波数解析により検出するため、「パルスエコー共振法」と言う。

$$T = \frac{n\lambda}{2} = n \left(\frac{v}{2f_n} \right) \quad (2)$$

n : Number of resonance, f : Frequency (Hz)

③水温測定

液体中の超音波音速は、温度に依存することを利用する。水中を伝播する超音波は、配管内面からの反射もあり、内径が小さいほど顕著なピークは現れない。よって、あらかじめ温度のわかった状態で、波形を取得し、得られた波形と取得した波形の相互相関を計することで水温を特定する。データ x(n) と y(n) {ともに n=0, 1, 2, ..., N-1} の相互相関関数 R_{xy} は(3)式で定義される。ここで、データ y(n)は観測される波形であり、データ x(n)は相関を取るための参照波形である。同式から明らかなように、相互相関関数の値は両波形の相対位置をずらしながら計算した観測波形と参照波形の積和である。

相関法は、管内の乱反射の中から必要な波形を抽出するのに有効である。

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n) \cdot y(n+k) \quad (k=0,1,\dots,N-1) \quad (3)$$

3. 試験

3.1 試験条件

①コイル直流抵抗測定試験

EMAT と校正された熱電対を Fig.7 に示すように配置し、試験体をヒータで常温から 200℃まで加熱し、デジタルマルチメータにより直流抵抗値を測定した。

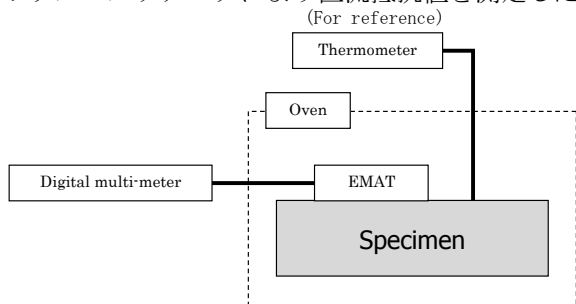


Fig.7 Measurement system for coil DC resistance

②板厚測定試験

EMAT と校正された熱電対を Fig.8 に示すように配置し、試験体をヒータで常温から 200℃まで加熱し、PE 法と PER 法を用いて板厚を測定した。

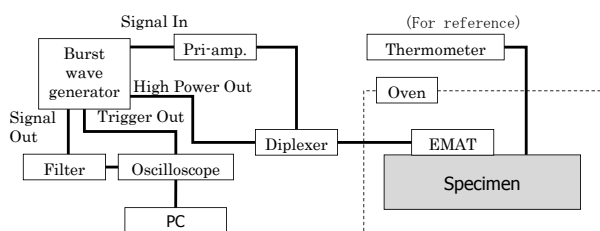


Fig.8 Measurement system for board thickness

③水温測定試験

Fig.4 の測定系を用いて、常温から 90℃程度までの水温を測定した。参照データは、熱電対の値を利用した。200℃までの測定は水を加圧・加熱する必要があるが、試験装置に加圧器がないことと、本研究では水温測定の原理確認に主眼を置くことから加圧・加熱は実施しない。

3.2 試験結果

①コイル直流抵抗測定試験

Fig.9 は、コイルの直流抵抗値と温度の関係である。計測は 4 回実施し、全てをプロットした後、最小二乗法により関数 $y(x)$ (y : coil DC resistance, x : temperature) を求めた。また、給変動に対する予測値による変動の比を決定係数 R^2 とした場合、(4)式より 0.9993 で一致しているため、再現性も十分確保できたと考える。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

y : Experiment value, \hat{y} : Guess value, \bar{y} : Average value

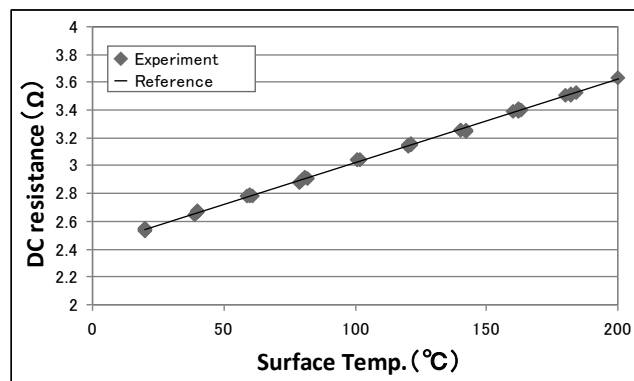


Fig.9 Relationship between the coil DC resistance and temperature

②板厚測定試験

Fig.10 は、励磁周波数 2MHz、板厚 10mm、常温 (20℃)、Fig.11 は、温度 200℃における板厚測定結果である。40μsec から約 6.1~6.2μsec の間隔でピークが出ており、超音波の音速は約 3230m/sec であるため、板厚は約 10mm となる。また、PER 法でも、基本周波数 160~165kHz でピークが現れており、(2)式より板厚は、約 10mm となる。

Fig.11 では、PE 法により板厚は測定できるものの、ノイズが高くピークが判別しづらい。一方 PER 法は、周波数のピークが不規則に出ており、共振周波数を判別できない。この不規則に出るピークを分析したところ、磁石中を超音波が伝播した信号であることがわかった。また、磁石と試験片で板厚、音速は異なるが、100℃を超えた辺りから磁石の反射波が目立ってくる。そこで、磁石成分をカットするフィルタ処理を行った。フィルタは、磁石の反射波の共振周波数を高速フーリエ変換 (FFT) で求め、磁石に該当する周波数成分を除去したあとで、逆 FFT 変換するものである。

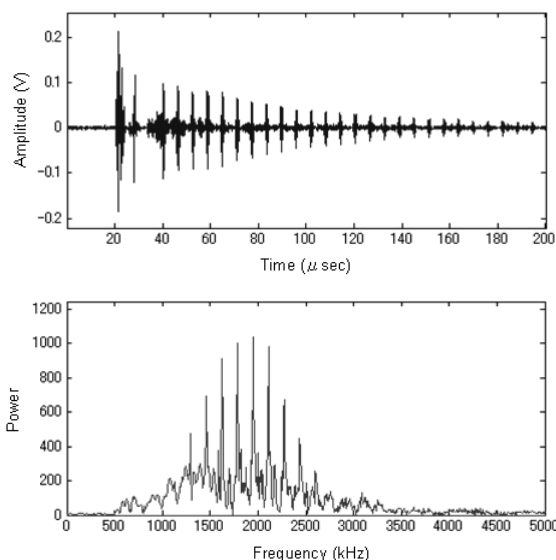


Fig.10 10mm, 20°C waveform (upper: PE, under: PER)

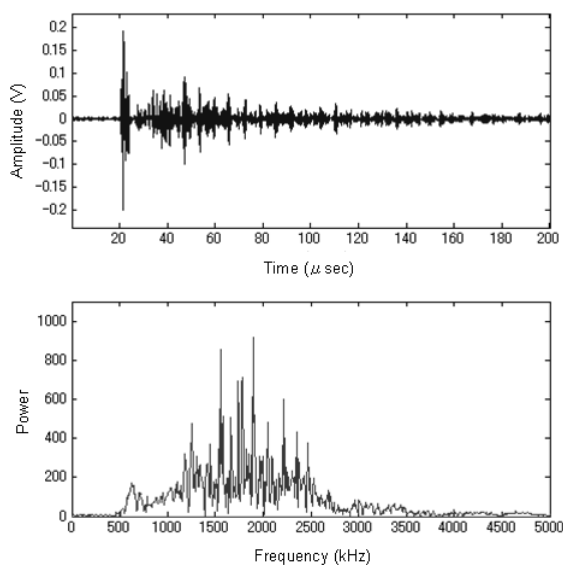


Fig.11 10mm, 200°C waveform (upper: PE, under: PER)

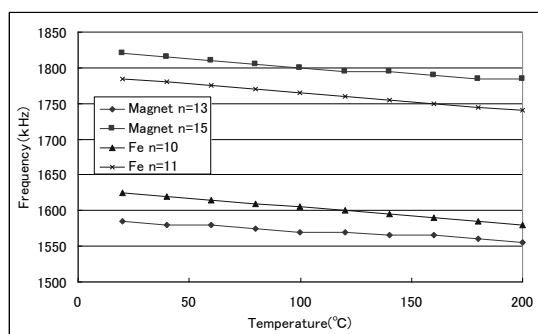


Fig.12 Relationships between the temperature and resonance freq. about magnet and specimen

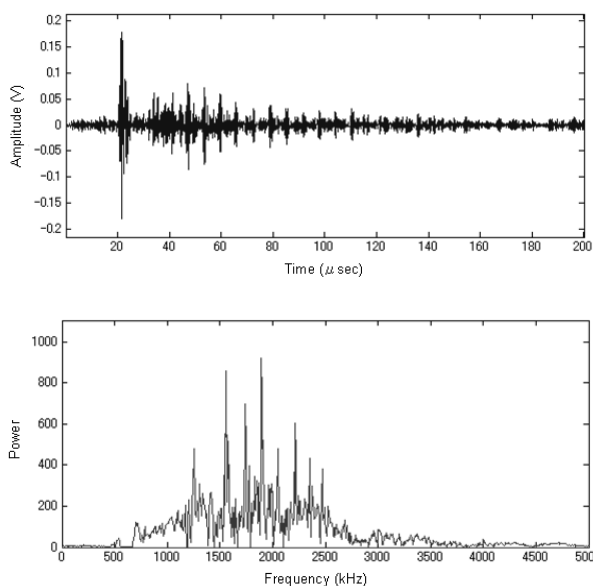


Fig.13 10mm, 200°C waveform after magnet noise cutting (upper: PE, under: PER)

Fig.12 は、磁石と試験片の共振周波数が近接かつピーク値も大きい 2 点を抜き出し、温度変化による共振周波数のピーク値を観察したものである。試験片と磁石では、超音波の音速は異なるが、温度変化の勾配に大きな差はなく、最小二乗法による直線近似の傾きを求めたところ、磁石 (Magnet) が $(-) 2.0 \sim (-) 1.6 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 、試験片 (Fe) が $(-) 0.25 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ の関係があることがわかった。これは、音速の温度変化に対応している。

磁石信号を除去するフィルタ処理後の波形が Fig.13 である。PE 法は、58 μsec 近辺の磁石からの反射が除去され SN 比が向上した。PER 法でも磁石信号が消えたことにより試験片の共振周波数の判別が容易になった。

高温では、磁石信号を除去するフィルタ使用や高温減磁の影響により、常温に比べ感度は低下するが、測定には十分な感度を有することがわかった。

③水温測定試験

水温と音速の関係を Fig.14 に示す。EMAT で測定した水中音速と文献値[17]を重ねてプロットした。その結果、測定値と文献値では、実験値の傾きの方が緩やかであるが、これは系内の水温分布を考慮していないことが原因であると考えられる。今後、誤差の補正方法を検討する必要があるが、文献値と実験値はよく一致した。冷却材流速の影響は、音速に対し小さいため無視できる。また、測定した水温と音速がよく一致することも確認している。

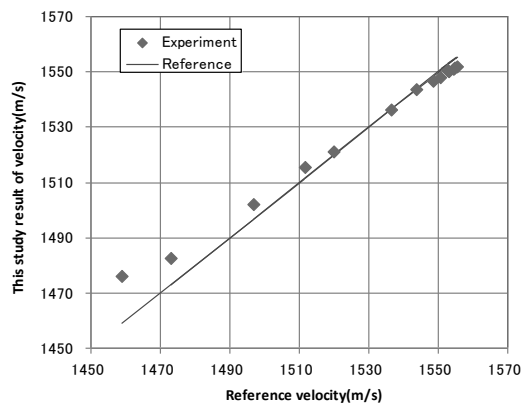


Fig.14 Relationship between theoretical velocity and experimental velocity in water from 13°C to 90°C

4. 結言

本研究では、1つのセンサで複数の物理量測定が可能な配管ヘルスマニタリング用ハイブリッドセンサの成立性を実証した。センサ設計・試作、各種物理量の測定、得られた信号の処理方法を検討することで、コイルの直流抵抗の温度変化を利用した配管表面温度計

により超音波音速を補正し、EMAT から発生する SH 波を用いて PE 法と PER 法の 2 種類の測定方法で配管板厚（減肉量）を測定することで配管内径を補正し、配管内部の流体内に縦波を発生させ対向配置した EMAT で受信し、EMAT の欠点である低感度ながらも送信波との相互相関法を導入した超音波温度計とすることで内部流体温度を測定できることを確認した。その結果、配管表面温度は、EMAT コイルを用いた直流抵抗値を温度に変換する測定方法により、決定係数 0.99 以上の精度で再現し、温度と抵抗値が比例関係であることを確認した。配管減肉量は、パルスエコー法と電磁超音波共鳴法を用いて 200℃でも 10mm の配管の板厚測定が可能であることを確認した。水温は、先の 2 つの測定結果を用いて補正を行い、対向配置した EMAT の超音波波を相関係数を用いて求めることで音速を求める。予め、音速と温度の関係がわかっているため、音速から温度を逆算できることがわかった。これより、1 つのセンサで 3 種類の物理量の高精度測定が可能であることを確認した。本研究結果は、経済性を考慮したプラントの配管ヘルスマモニタリングに適用できる。

謝辞

本研究に際し、日本原子力研究開発機構山下卓哉氏、宮原信哉氏、上田雅司氏、藤木一成氏に謝意を表す。

参考文献

- [1] 伊賀幹二, 小西孝, “診察から診断に至るために必要な一般的検査の選択とその思考過程”, 救急医学, Vol.19, pp504-507(1995)
- [2] Mahathir B M., Yamada K., Higuchi Y., “Clinical reasoning system based on clinicians diagnostic process”, Biomedical fuzzy systems association, Vol.10, No.1, pp1-10(2008)
- [3] 小山照夫, 大江和彦, “初診患者問診時の疾患仮説生成プロセスタスク構造の考察”, 学術情報センター紀要第 5 号(1992)
- [4] 凌元錦, 真木紘一, 遊佐訓孝, 宮健三, “TBM と CBM を併用した保全方式における TBM 実施間隔最適化モデルの開発”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 6, No. 3, pp312-319 (2007)
- [5] Kenichi OSAKI, Yukio WATANABE, Hidekazu USUI, “Development of Diagnostic System for Reactor Water Clean-up Pump”, Proceedings of the International Symposium on Machine Condition Monitoring and Diagnosis, pp.30-35
- [6] Rimlyand, V. I. Kazarbin and A. V. Dobromyslov, “Active Ultrasonic Nondestructive Testing of Rotating Parts and Bearings”, RESEARCH IN NONDESTRUCTIVE EVALUATION, VOL 15, PART 1, pp. 19-30(2003)
- [7] Joseph L. Rose, Michael J. Avioli, Peter Mudge and Ruth Sanderson, “Guided wave inspection potential of defects in rail”, NDT & E International, Volume 37, Issue 2, Pages 153-161(2004)
- [8] J. Degrieck, W. De Waele and P. Verleysen, “Monitoring of fibre reinforced composites with embedded optical fibre Bragg sensors, with application to filament wound pressure vessels”, NDT & E International, Volume 34, Issue 4, Pages 289-296(2001)
- [9] 佐々木一正, 太田敏彦, 佐藤秀樹, 共放鳴, 日向洋一, “光ファイバグレーティング歪みセンサによる構造物変形監視システムの開発”, Technical report of IEICE. OFT, 100(85), pp.7-11(2000)
- [10] Akihiro TAGAWA, Kazunari FUJIKI and Takuya YAMASHITA, “Investigation of the On-line Monitoring Sensor for a Pipe Wall Thinning with High Accuracy”, E-Journal of Advance Maintenance Vol.1 (2009) p.52 - p.62
- [11] Yang XU, Akihiro TAGAWA, Masashi UEDA and Takuya YAMASHITA, Yusuke OHTSUKA, Kazunori OSAFUNE and Masahiro NISHIKAWA, “Characterization of SH Wave Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) at Elevated Temperature, in Recent Advances in Nondestructive Evaluation Techniques for Material Science and Industries”, ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol.484, pp.177-184(2004)
- [12] T. Ohtani, H. Ogi, Y. Minami and M. Hirao, “Ultrasonic attenuation monitoring of fatigue damage in low carbon steels with electromagnetic acoustic resonance (EMAR)”, Journal of Alloys and Compounds, 310, pp440-444(2000)
- [13] Masahiko Hirao, Hirotsugu Ogi, “An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection”, NDT & E International, Volume 32, Issue 3, Pages 127-132(1999)
- [14] 美浜発電所 3 号機事故の概要と原因
(http://www.kepco.co.jp/notice/mihama/jiko_img/gaiyou.pdf)
- [15] 動力炉・核燃料開発事業団, 解説 高速原型炉高温構造設計指針 材料強度基準等, PNC-TN241-85-08, pp.201
- [16] M. HIRAO, H. OGI, “Electromagnetic acoustic resonance and materials characterization”, Ultrasonics, Vol. 35, No.6, pp. 413-421(1997)
- [17] V.A. Del Grosso and C.W. Mader, “Speed of sound in pure water”, J. Acoust. Soc. Am. 52, pp 1442-1446. (1972)

(平成 21 年 6 月 15 日)