

# 電磁超音波探触子を用いた多重センシング

## Multiple sensing using electromagnetic acoustic transducer

東北大学

小島 史男

Fumio KOJIMA

Member

**Abstract.** Ultrasonic testing using the electromagnetic acoustic transducer (EMAT) has great advantages on remote capabilities, non-contacting device, and robustness to high temperature. In application of thickness measurements of pipe wall thinning to online monitoring, it is necessary to measure the temperature of pipe wall due to the temperature dependency of sound velocity. For the limitation of the sensor allocation, the multiple sensing using a single device is recommended. Taking into remind that, this study is aimed at the identification of temperature of pipe wall as well as the thickness measurements using EMAT. The problem treated here is converted into the characterization of elastic properties using ultrasonic data obtained from EMAT devices. Then the temperature can be estimated from the inverse mapping of temperature-to-elastic dependency. First, the mechanisms of EMAT device are derived from Maxwell equations. Secondly, the dynamics of ultrasonic wave propagation is given by an elastic equation with unknown parameters. The applicability and validity of the proposed method are shown using syntheses data.

**Keywords:** Nondestructive testing, online monitoring, pipe wall management, sensing, inverse problem.

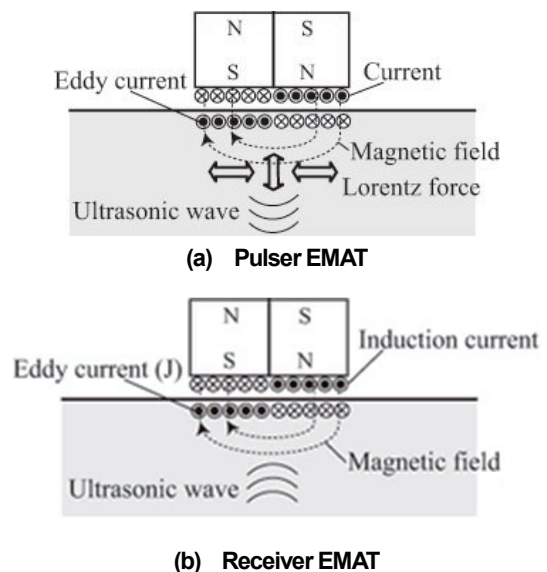
### 1. はじめに

発電プラントにおける配管減肉管理は定期点検を基本としているが、点検箇所が広範囲に及ぶこと、また点検時の前処理・後処理に多くの時間を費やすため、計測システムの常時設置や運転期間中でのオンライン監視により、安全性を高めることが期待される。しかしながら運転中の常時監視を実現するにはセンサの環境耐用性に加え、内部流体の温度変化から、超音波による厚み計測時には温度補正を行う必要がある。超音波計測計に合わせて、温度計測センサを併設することも考えられるが、常時監視での多種のセンサ配置は運用上望ましいとはいえない。

電磁超音波探触子(EMAT)は、デバイス技術と信号処理技術の発展により、高温環境下での計測が可能になったことや、操作者を介さない遠隔監視技術との親和性が高いなどの利点から、再び注目されるようになってきている<sup>1)</sup>。本研究では配管減肉の寸法計測に関するオンラインモニタリングの環境下で、温度計測センサを配置することなく、EMATの計測結果のみから直接音速補正が可能かについて、数値シミュレーションを通じてその適用可能性を検討する。

### 2. シミュレーションモデル

本研究では配管表面に常時設置された単一のデバイスで送受信を行うものとする。Fig. 1にEMATの送受信機構の概要を示したものである。送信時にコイルに交流電圧を印加すると永久磁石によるバイアス磁場のもとで配管表面にローレンツ力および磁歪力が発生する。配管内面からの反射波は、材料表面での振動とバイアス磁場との相互作用による反作用磁場からコイル内に誘起電圧が生じる。



(b) Receiver EMAT  
Fig. 1 Basic strategies of EMAT

連絡先: 〒980-0812 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1、  
東北大学・流体科学研究所、  
E-mail: kojima@koala.kobe-u.ac.jp

## 2.1 EMAT 送受信機構のモデル

解析モデルでは、簡単のため空間2次元の配管断面を考察の対象とする。この場合 EMAT の送受信機構のモデルは以下の磁気ベクトルポテンシャルに関する方程式で記述できる<sup>3)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ v_{x_2}(M) \frac{\partial A_3}{\partial x_1} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ v_{x_1}(M) \frac{\partial A_3}{\partial x_2} \right\} + J = 0 \quad (1)$$

EMAT の永久磁石によるバイアス磁場は磁化強度と固有の磁気抵抗率によって

$$J = \nabla \times v_0 M \quad (2)$$

で与えられる。また送信機構はコイル内に印加する交流電圧  $V$  により駆動され

$$J = J_0(V) - \sigma \left( \frac{\partial A_3}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right) \quad (3)$$

で与えられる。また受信機構は反射波の粒子速度により駆動され

$$J = J_s(\dot{u}) - \sigma \left( \frac{\partial A_3}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right) \quad (4)$$

で与えられる。シミュレーションにおいては、離散時間有限要素法をもちいて時間領域において計算を実行した。

## 2.2 配管内の超音波伝搬モデル

配管厚さ方向に関する材料内部の超音波伝搬は弾性の法則にしたがう。材料内部の応力を  $\tau$ 、変位を  $u$  とすると Cauchy の平衡式より

$$\nabla \cdot \tau + \rho \ddot{u} - f(A_3) = 0 \quad (5)$$

が成立する。ここで  $\rho$  は配管材料の密度、 $f = f(A_3)$  は送信機構で発生する励起力である。(5)式の応力と変位は歪  $\varepsilon$  の関係式を介して、以下の構成式から求めることができる。

$$\varepsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = E \varepsilon_{ij}(u) \quad (7)$$

上式で  $E$  は配管材料のヤング率である。

## 3. 配管温度の推定手法

EMAT 受信機構の検出信号は、コイル内の磁気ベクトルポテンシャルから、ビオサバールの公式により

$$V_0(t) = k \sum_n \frac{d}{dt} \oint A_c dl_n \quad (8)$$

で計算できる。 $A_c$  はコイル内の磁気ベクトルポテンシャルで式(1-7)の解から評価できる。また  $dl_n$  は  $n$  番目のコイル線素を表す。(8)式は決定すべき未知パラメータであるヤング率  $E$  の関数であるので、これに対応する非破壊検査データ  $V_d(t)$  が与えられれば、以下の最小誤差二乗問題

$$F(E^*) = \min_E \frac{1}{2} \|V_0(E) - V_d\|^2 \quad (9)$$

を解くことで、材料定数の推定値  $E^*$  を求めることができる<sup>4)</sup>。この推定値を利用することで、配管材料のヤング率の温度依存が先験的に  $G(T)$  で与えられたとすると、配管温度は

$$T^* = G^{-1}(E^*) \quad (10)$$

によって評価することが可能となる。

## 4. おわりに

本研究では、シミュレーションと逆問題解析を併用することにより、電磁超音波探触子を用いた非破壊検査により配管温度を同定することで、オンラインで配管寸法のモニタリングを行う計算手法を提案した。シミュレーション結果については当日報告する。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会の研究拠点形成事業 (A. 先端拠点形成型) 「省エネルギーのための知的層材料・層構造国際研究拠点」の助成を得た。

## 参考文献

- [1] D. Kosaka, F. Kojima, H. Yamaguchi, and K. Umetani, "Quantitative evaluation of wall thinning in pipe wall using electromagnetic acoustic transducer", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol. 2, No. 1, 2010, pp.34-42.
- [2] A. Furusawa, F. Kojima, and A. Morikawa, "Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 47, No. 2, 2015, pp. 196-203.
- [3] 坪井始、内藤督、"数値電磁解析法の基礎"、養賢堂、1994
- [4] 小島史男、"シミュレーションと計測技術を融合した逆問題解析統合法"、計測と制御、計測自動制御学会, Vol. 51, No. 9 (2012), pp. 821-827