

# EMAT を用いたガイド波送受信機構の解析

## Analysis of transmit-receive mechanism of EMAT for the guided wave

神戸大学大学院	古澤 彰憲	Akinori FURUSAWA	Student Member
神戸大学大学院	森川 惇	Atsushi MORIKAWA	
神戸大学大学院	小島 史男	Fumio KOJIMA	Member

### Abstract

This paper is concerned with transmit-receive mechanism of the electromagnetic ultrasonic transducer (EMAT) for the guided wave. First, the three-dimensional guided wave propagation simulator is developed. This simulator calculates the particle velocity from the force which are excited by EMATs with FDTD method. Second, configuration of EMATs is designed based on our study of the excitation mechanism of an EMAT, in order to transmit and receive the longitudinal mode (L-mode) or the torsional mode (T-mode) guided wave. Finally, we developed the guided wave transmit-receiving system using EMATs and confirmed performance of this system with comparing between the results of laboratory experiments and the simulation results. These experiments were to transmit and receive the L-mode and the T-mode guided wave.

**Keywords:** Guided Wave, EMAT, Structure Health Monitoring, FDTD Method, T-mode, L-mode

## 1. 諸言

発電・化学プラント内部の配管に対する検査の作業性の向上のため、配管の長軸方向に瞬時に長距離伝播可能なガイド波を用いた広域スクリーニング検査手法が注目されている。

現在、ガイド波を用いた探傷試験方法として、圧電形探触子（横波垂直探触子）を用いた方法や磁わい形センサを用いた方法が日本非破壊検査協会によって規定されている[1]。しかし、これらの探触子、センサには

- ・接触媒体が必要である。（圧電形探触子）
- ・送受信するガイド波の伝播モードによってセンサ形状が大きく異なるため、汎用性が低い。（磁わい形センサ）

といった短所も見られる。

そこで、接触媒体が必要ない電磁超音波探触子（EMAT）に着目し、EMAT を用いたガイド波の送受信システムを構築する。ここで、日本非破壊検査協会によって規定される L モードと T モードのガイド波を送受信の対象とする。

また、送受信実験の結果と比較、検証するために、EMAT を用いた場合の強磁性体配管に対する L モー

ドおよび T モードのガイド波の伝播シミュレーションを行う。その後、本システムを用いたガイド波送受信実験の結果を検証し、L モード、T モードのガイド波を EMAT により選択的に送受信可能であることを実証する。

## 2. EMAT によるガイド波送信の解析

### 2.1 ガイド波の 3 次元伝播解析

ガイド波伝播シミュレータは円柱座標系のフックの法則(式(1))と運動方程式(式(2))に対して FDTD 法を適用し、構築する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{T} = [c] \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & \frac{1}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial r} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}. \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} & -\frac{1}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{2}{r} + \frac{\partial}{\partial r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{T} + \mathbf{F}. \quad (2)$$

ここで、

$$\mathbf{T} = [T_{rr} \quad T_{\theta\theta} \quad T_{zz} \quad T_{\alpha z} \quad T_{zr} \quad T_{r\theta}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = [\dot{u}_r \quad \dot{u}_\theta \quad \dot{u}_z]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = [F_r \quad F_\theta \quad F_z]^T \quad (5)$$

連絡先:古澤 彰憲、  
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1、  
神戸大学大学院システム情報学研究所  
E-mail: akinori.furusawa@kojiimlab.com

$[c]$ はスティフネステンソルである。境界は全て自由境界とし、自由境界条件は式(6)で与えられる。

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{n}$ は境界に対する法線ベクトルである。境界条件の実装には、Ohminato ら[2]の方法を用いる。EMAT の励起機構の解析によって得られた力を送信部に入力し、L モード、T モードのガイド波を励起する。受信点では FDTD 法の解である粒子速度を出力する。

## 2.2 EMAT による励起モデル

強磁性体である試験体表面には、Fig.1 のような磁石構造を持つ EMAT によって、図中の x 方向にローレンツ力、磁化力、磁わいによる力の合力が磁石直下の領域に励起されることが、我々の先の研究によって明らかになっている[3]。

この励起力の向きに着目して、L モード、T モードのガイド波を送信可能な EMAT の配置を決定する (Fig. 2)。受信は送信と同様の配置で行うこととする。

これらの励起力をガイド波の伝播シミュレータの入力とすることで、EMAT による L モード、T モードのガイド波の送受信解析を行う。

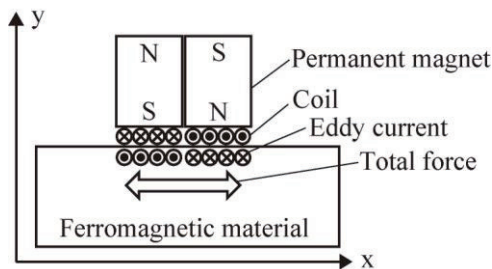


Fig.1 Principle of EMAT

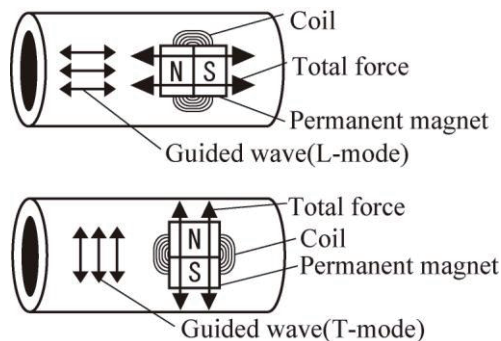


Fig.2 Principle of transmission of the guided wave using EMATs

## 3. ガイド波送受信システム

### 3.1 ガイド波送受信システムの構成

ガイド波送受信システムの構成を Fig.3 に示す。パルサ・レシーバ (ジャパンプローブ社製、JPR-600C) によって送信用 EMAT のコイルに交流電流を励起する。受信用 EMAT で得られた電気信号をプリアンプ (ジャパンプローブ社製、PR-60) によって増幅する。その後、パルサ・レシーバに入力し、さらに増幅した後に A/D 変換を行う。また、PC によってパルサ・レシーバとデジタルフィルタの制御も行う。

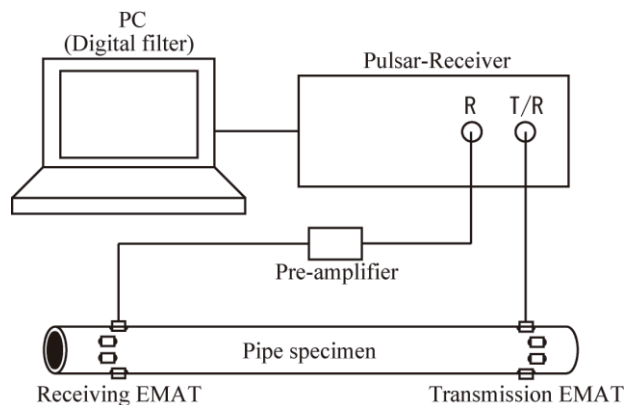


Fig.3 Configuration of the guided wave system using transmit and receiving EMATs

### 3.2 EMAT の形状

送信用 EMAT と受信用 EMAT を配管の円周方向に各 8 個、等間隔に設置し同時駆動する。ここで、EMAT に用いるコイルの形状は楕円形とし、1 方向に偏った合力を発生させることができるようにする。また、より強い信号を得るために送信用 EMAT のコイルどうしは直列に接続し、受信用 EMAT のコイルどうしは並列に接続する[4]。

送信用 EMAT に用いるコイルと受信用 EMAT に用いるコイルのそれぞれの仕様を Table.1 に示す。

Table.1 Parameter of EMAT coils  
(a)Transmission EMAT coils

Internal diameter [mm]	Major	21.0
	Minor	1.0
Wire diameter [mm]		0.26
Number of turns		15

(b)Receiving EMAT coils

Internal diameter [mm]	Major	18.0
	Minor	1.0
Wire diameter [mm]		0.18
Number of turns		30

EMAT に用いる永久磁石には、送信用 EMAT、受信用 EMAT とともに Fig.4 に示すような寸法のサマリウムコバルト磁石を用いる。

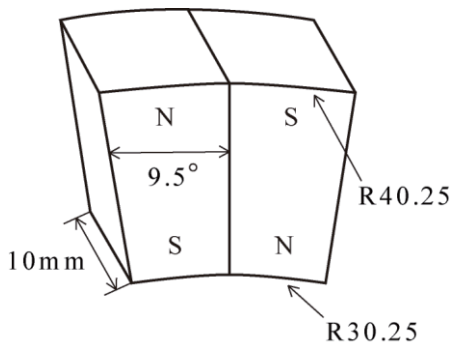


Fig.4 Shape of permanent magnets

## 4. 実験

### 4.1 伝播解析の条件

シミュレーションにおけるガイド波の送信位置と受信位置および EMAT の配置 Fig.5 に示す。ここで、配管試験体は材質 SS400、長さ 1000mm、外径 60.5mm、内径 49.5mm である。

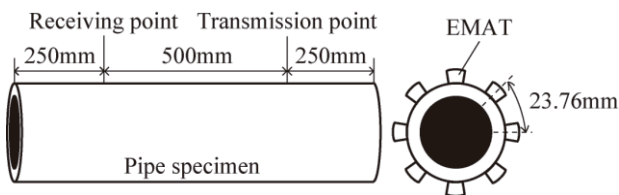


Fig.5 Experimental setup

L モードの場合、送信位置には式(7)を入力し、受信位置では式(8)を出力とする。T モードの場合、入力を式(9)、出力を式(10)とする。

$$\mathbf{F} = [0 \quad 0 \quad W(t) \sin(2\pi ft)]^T \quad (7)$$

$$y = \dot{u}_z \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = [0 \quad W(t) \sin(2\pi ft) \quad 0]^T \quad (9)$$

$$y = \dot{u}_\theta \quad (10)$$

ここで、 $W(t)$  はガウス窓関数であり、入力波形

の周波数  $f$  は 100kHz で波数は 5 である。

### 4.2 実験の条件

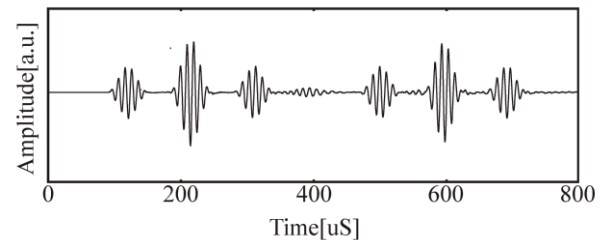
実験におけるガイド波の送受信位置および EMAT の配置はシミュレーションと同様に Fig.5 で示される位置とし、配管試験体も同じ仕様のものを用いる。実験の条件を Table.2 に示す。

Table.2 Experimental condition

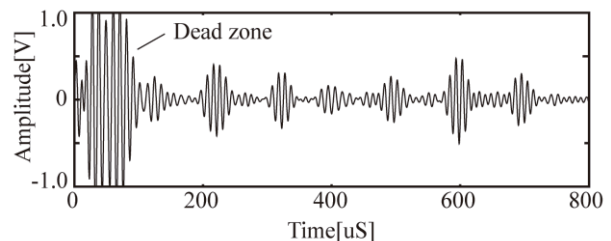
Frequency [kHz]		100
Wave number		5
Voltage [V]		300
Bandpass filter [kHz]	H.P.F	70
	L.P.F	130
Signal amplification [dB]		80.1

### 4.3 結果

L モードと T モードのガイド波を送受信した場合のシミュレーション結果と実験結果をそれぞれ Fig.6 と Fig.7 に示す。また、それぞれの結果の波形から波束の到達時間を読み取り、Table.3 と Table.4 に示す。ここで、L モードは初めから 4 つ目までの波束、T モードの場合は初めから 3 つ目までの波束の到達時間のみを示すことにする。



(a)Simulation result



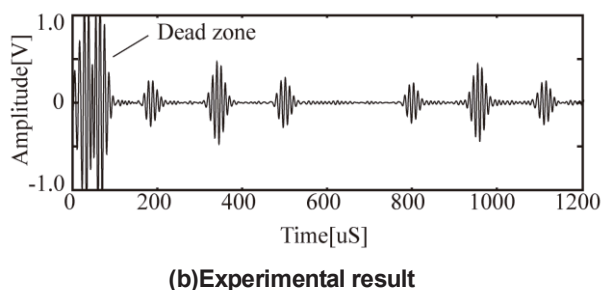
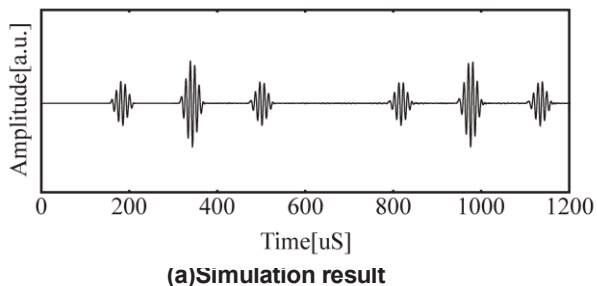
(b)Experimental result

Fig.6 L-mode

**Table.3 Time of flight of L-mode guided wave**

Number	1	2	3	4
Simulation [uS]	90.0	185.2	289.8	355.2
Experiment [uS]	×	184.6	288.4	368.0

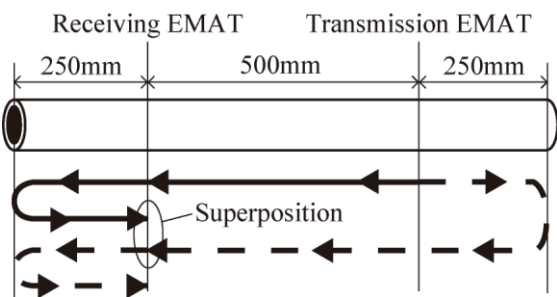
表中の“×”は、不感帯のため到達時間の読み取りが出来なかったことを表す。



**Fig.7 T-mode**

**Table.4 Time of flight of T-mode guided wave**

Number	1	2	3
Simulation [uS]	153.6	312.3	468.8
Experiment [uS]	153.6	308.2	465.4



**Fig.8 Propagation of guided wave**

本実験の条件により発生するガイド波の音速は、L(0,1)モード 2822.2m/s、L(0,2)モード 5272.5m/s、T(0,1)モード 3166m/s であるので、本実験で発生するガイド波もこれらのモードのガイド波であると考えられる。また、Fig.8 より本実験においては送信用

EMAT から両側に送信されたガイド波が管端で反射し、受信位置で重なることが分かる。Fig.6 と Fig.7 を見ると、確かに合成波の到達時間に見られる波束の振幅が大きくなっていることが確認できるので、本システムによりガイド波が正しく送信され伝播し受信されているといえる。

## 5. 結言

EMAT を用いたガイド波の送受信システムを構築した。EMAT による励起力の解析結果をもとに任意の伝播モードを送受信できる EMAT の配置を決定した。決定した EMAT の配置による励起力をガイド波伝播シミュレータの入力とし L モード、T モードガイド波の伝播解析を行い、実験結果を比較することで、構築したシステムによって送受信した任意の各モードのガイド波を送受信できていることを実証した。

実際に、減肉などの欠陥を持つ配管に対するガイド波の送受信を行い、探傷試験への実用性を検証することが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 社団法人 日本非破壊検査協会, “ガイド波を用いたパルス反射法による配管の探傷試験方法通則”, NDIS 2427
- [2] T. Ohminato and Bernard A. Chouet, “A Free-Surface Boundary Condition for Including 3D Topography in the Finite-Difference Method”, Bulletin of the Seismological Society of America, vol.87, no.2, 1997, pp.494-515.
- [3] Fumio Kojima and Takafumi Ito, “Numerical Simulation of Ultrasonic Source Mechanism for EMAT based NDE System Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics”, IOS Press, Amsterdam (to be submitted)
- [4] 村山理一, 今井健介, 園田尚人, 小林牧子, “偏波横波型電磁超音波探触子を利用したパイプガイド波送受信システムの開発とガイド波の特性評価”, 第22回 MAGDA コンファレンス予稿集, 宮崎, 2013, pp.385-390.