



# 電磁超音波探触子を用いたガイド波検査システムの開発とその高度化に関する研究

古澤, 彰憲

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2016-03-25

(Date of Publication)

2017-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6648号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006648>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

電磁超音波探触子を用いたガイド波検査システム  
の開発とその高度化に関する研究

2016 年 1 月

神戸大学大学院システム情報学研究科

古澤 彰憲

# 目次

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>第1章 序章</b>                    | <b>1</b>  |
| 1.1 研究の背景                        | 1         |
| 1.2 超音波ガイド波に関わる先行研究調査            | 6         |
| 1.2.1 超音波ガイド波および検査法              | 6         |
| 1.2.2 超音波ガイド波の数値計算               | 7         |
| 1.2.3 EMAT                       | 7         |
| 1.3 研究の目的                        | 8         |
| 1.4 本論文の構成                       | 9         |
| <b>第2章 配管を伝播する超音波ガイド波</b>        | <b>10</b> |
| 2.1 はじめに                         | 10        |
| 2.2 配管を伝播するガイド波のモード              | 10        |
| 2.3 特性方程式の導出                     | 13        |
| 2.4 分散曲線および Wave Structure の数値計算 | 19        |
| <b>第3章 3次元超音波ガイド波シミュレータの構築</b>   | <b>31</b> |
| 3.1 はじめに                         | 31        |
| 3.2 支配方程式                        | 32        |
| 3.3 FDTD 法による離散化                 | 34        |
| 3.3.1 FDTD 法による数値計算アルゴリズム        | 34        |
| 3.3.2 自由境界条件の設定                  | 39        |
| 3.4 ガイド波伝播シミュレーション               | 41        |

|            |                              |           |
|------------|------------------------------|-----------|
| <b>第4章</b> | <b>EMATを用いたガイド波検査システムの構築</b> | <b>48</b> |
| 4.1        | はじめに . . . . .               | 48        |
| 4.2        | システム概要 . . . . .             | 49        |
| 4.3        | ガイド波送受信実験 . . . . .          | 50        |
| 4.3.1      | Tモードガイド波 . . . . .           | 51        |
| 4.3.2      | Lモードガイド波 . . . . .           | 59        |
| 4.4        | まとめ . . . . .                | 62        |
| <b>第5章</b> | <b>配管減肉検出実験</b>              | <b>63</b> |
| 5.1        | はじめに . . . . .               | 63        |
| 5.2        | T(0,1)モードによる減肉検出実験 . . . . . | 65        |
| 5.3        | L(0,2)モードによる減肉検出実験 . . . . . | 70        |
| 5.4        | まとめ . . . . .                | 74        |
| <b>第6章</b> | <b>逆解析法による減肉形状推定</b>         | <b>75</b> |
| 6.1        | はじめに . . . . .               | 75        |
| 6.2        | 減肉形状推定問題の定式化 . . . . .       | 76        |
| 6.2.1      | 減肉形状モデル . . . . .            | 76        |
| 6.2.2      | POD近似モデル構築と逆解析手順 . . . . .   | 78        |
| 6.3        | 減肉形状推定実験 . . . . .           | 80        |
| 6.3.1      | POD近似モデルの有効性 . . . . .       | 80        |
| 6.3.2      | 減肉形状推定結果 . . . . .           | 83        |
| 6.4        | まとめ . . . . .                | 87        |
| <b>第7章</b> | <b>結言</b>                    | <b>88</b> |
|            | <b>参考文献</b>                  | <b>90</b> |
|            | <b>研究業績</b>                  | <b>98</b> |



# 第1章 序章

## 1.1 研究の背景

原子力発電所, 製鉄所, 各種化学プラントをはじめ, 公道の照明柱やガードレール支柱など, その高経年化に伴う配管構造部の劣化, 減肉事象が大きな問題となっている. 原子力発電所においては2004年8月の関西電力美浜発電所3号機の配管破断事故 [1](Fig.1.1)を受けて, 原子力安全・保安院(現在の原子力規制委員会)が日本機械学会(以下,JSME)に配管減肉管理に関わる規格策定の要請を行い, 2005年, 2006年にJSMEにて配管減肉に係る規格が策定された [2, 3, 4]. 製鉄所および化学プラントにおいては各社独自に検査・保全規格を定め運用している. 公道の照明柱に関しては道路法の平成25年6月の改正により5年に一度の目視検査が義務化された. このように, 配管構造物の経年化にともなう劣化・減肉減少は大きな社会問題となっており, さらなる問題の顕在化が懸念される.



Fig. 1.1: Pipe fracture accident in Mihama Nuclear Power Plant.

現在の配管の検査方法は主に UT(Ultrasonic Testing) を用いて行われる。UT は配管表面にカップラントと呼ばれるジェルを塗布した上でプローブを押し付け、超音波の波形及び伝播時間から配管肉厚および疵の有無を測定するものである (Fig.1.2)。しかしながら、UT を用いた配管検査方法には以下の問題がある。

1. 検査官が測定点を 1 点 1 点手作業で検査するため時間がかかる。
2. 検査官の作業のため、プラントを停止させる必要がある。
3. 高所の配管に対して作業用足場の設置などの付帯工事が必要となる。
4. カップラントを塗布するために配管保護カバー、塗料の除去が必要である。
5. 検査結果は検査官の技量に依存し、検査の一貫性がない [5]。



Fig. 1.2: Measuring method of the pipe wall thickness under the current technical standard[2, 3, 4]. Yellow circles in the picture represent the measuring point.

UT の持つこれら課題を要約すれば、検査に多大な時間的、経済的コストが必要かつ作業自体が危険であることである。検査対象となる配管の増加に伴って無視できない問題となることが明らかであり、早急な解決策の策定が求められる。

UTにおける上記の課題の解決方法として期待されている検査技術の1つに、超音波ガイド波 [6] が挙げられる。超音波ガイド波とは配管や平板の長手方向に長距離にわたって限なく伝播する超音波の総称であり、1度の送信で数十メートル伝播し、高速な配管の検査が可能である。ガイド波送受信素子は配管に固定され、一度固定すれば取り外しの必要がなく、検査毎の一意性を保つことが可能である。これらのガイド波配管検査法の特徴より、UTにおける時間的、経済的コストの問題を解決することが可能であると考えられる。しかし、超音波ガイド波を用いた配管検査法の確立には課題も多く残されている。ガイド波を用いた配管の検査方法は日本非破壊検査協会規格 (NDIS) により規定されている [7] が、同規格にて規定されているガイド波検査装置は、

1. 圧電素子 (PZT) を用いたもの
2. MsS (Magnetostrictive Sensors: 磁歪素子) を用いたもの

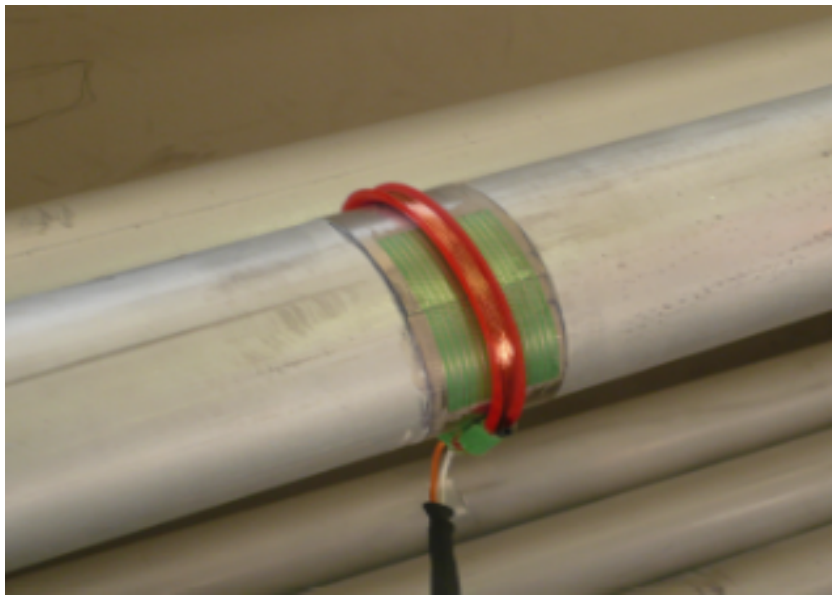
の2種類となっている。Fig.1.3 にこれらの検査装置を示す。PZTを用いたガイド波検査装置は、素子毎に独立してガイド波の励起・受信が可能であり、SNR (Signal Noise Ratio) も良好なことから、高度なガイド波検査法への適用可能性がある。その一方、装置自体が高価であること、設置に専用の治具が必要となること、カップラントと呼ばれるジェルを検査対象物に塗布する必要があり、実際の現場で使用するにはやや使いにくい。MsSを用いたガイド波検査装置は、安価でカップラントも必要でないが、MsSが磁化したニッケル等を配管に直接貼り付け、コイルによって交流磁場を与えることによってガイド波を励起、受信するそのメカニズムから高度なガイド波の制御が難しい。すなわち、ガイド波の励起は配管に対して一様に行われ、ガイド波の受信は貼り付けられたセンサの平均値を取ることになる。MsSを用いたガイド波検査システムでは、今後高度化すると考えられるガイド波検査法に対して十分な余力があるとは考えにくい。

また、同規格にて策定されている検査方法は、TOF (Time of Flight) と呼ばれる、送信したガイド波が欠陥部位で反射するのにかかる時間を用いた、簡便な欠陥検査方法のみであり複雑な形状の欠陥には対応していない。一方実際の配管減肉は円周方向に肉厚の偏りがあり、配管長手方向には楕円形に減肉する。Fig.1.4 に美浜原子力発電所における配管破断事故の破断配管の実測値を示す。



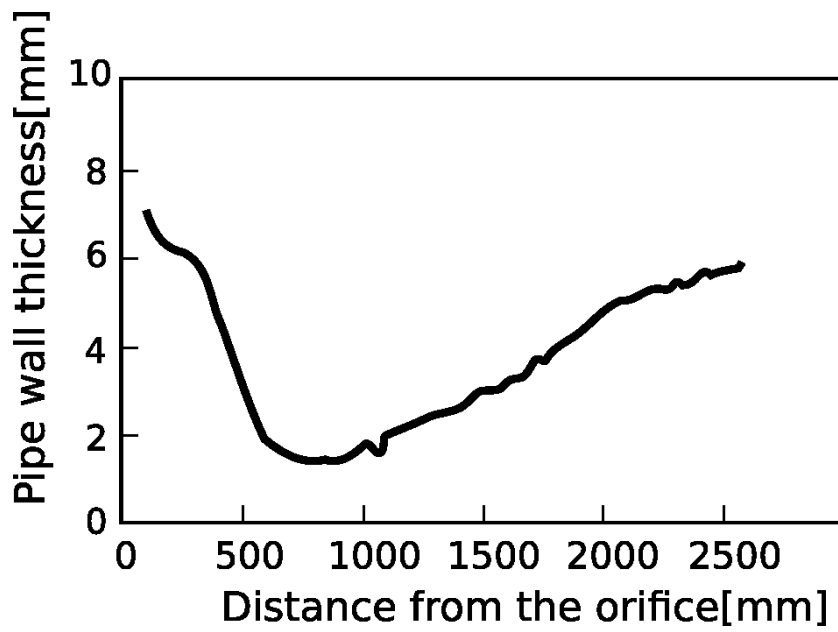


(a) PZT Guided Wave Testing System.

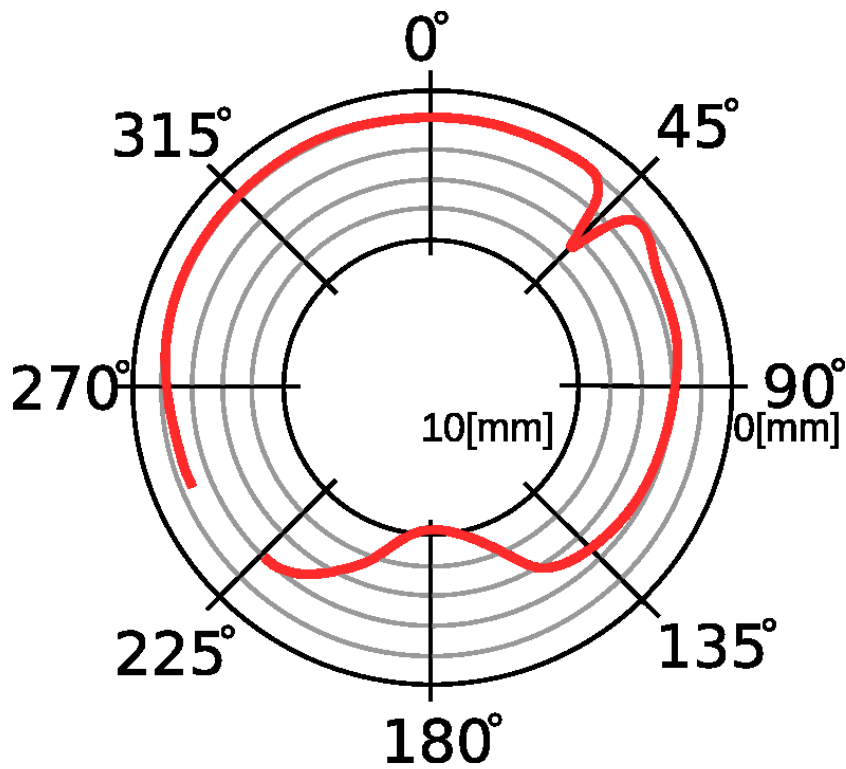


(b) MsS Guided Wave Testing System.

Fig. 1.3: Current Guided Wave Testing system.



(a)



(b)

Fig. 1.4: Pipe wall thickness distribution diagrams drawn up based on the report[1]. (a) and (b) shows residual distribution by the distance 1 outer diameter downstream from orifice. (c) shows longitudinal distribution.

## 1.2 超音波ガイド波に関わる先行研究調査

### 1.2.1 超音波ガイド波および検査法

配管を伝播する超音波ガイド波研究は 1959 年の Gazis[8] の理論的な研究, 1963 年の Fitch[9] の実験に遡る. Gazis の研究は, 配管を伝播するガイド波の位相速度, 群速度および伝播モードの理論解とその数値計算方法について言及されており, 現在においても超音波ガイド波解析の土台となっている. 1970 年代になると, 配管に施した人工的な欠陥を超音波ガイド波を用いて検出する実験が行われ [10, 11], 1990 年代に入ると Cawley[12, 13] や Rose[14] らによるガイド波の応用研究が報告されるようになった. 2000 年前半には, Guided Ultrasonics Ltd., Plant Integrity Ltd., South West Research Institute による, 商用の超音波ガイド波測定装置が開発, 販売されるようになった [15, 16]. このころから超音波ガイド波の実測定, 伝播特性の解析の報告がされるようになった [17]. 超音波ガイド波の駆動方式は PZT 式 [12] と MsS 式 [15, 16] に大別され, その駆動方式によって励起されるモードが異なることが示されている [18]. 超音波ガイド波のモードは Longitudinal mode(縦モード), Flexural mode(曲げモード) および Torsional mode(ねじりモード) に分類され, 配管円周方向に欠陥が伸びた場合の Longitudinal mode および Flexural mode の挙動は, 理論的には Ditri[19], Bai ら [20], Velichko ら [21], 実験的には Lowe ら [22], Alleyne ら [23], シミュレーションは Zhu ら [24] によって報告されている. Torsional mode についても同様に報告されており [25], 配管の長手方向に欠陥部位が伸びた場合の挙動 [26], 欠陥深さの増大に伴う超音波ガイド波の挙動 [22, 22, 25] についての報告がなされている. 至近では, 実際の欠陥形状に近い人工欠陥を測定・検出するための実験・シミュレーションやガイド波検査法の高度化のための試みが報告されている. 実験・シミュレーションについては Carandente ら [27], Ma ら [28] によってなされている. 検査の高度化に関する報告では, 反射板を用いて簡便・実用的な方法でガイド波の励起効率を高めるための方法が Nishino ら [29] によってなされたり, Uppa らによって MP 法 (Matching pursuits 法) を用いて局所的な欠陥の可視化を行う方法 [30], 逆解析的な方法を適用したもの [31] が報告されている.

## 1.2.2 超音波ガイド波の数値計算

超音波の伝播を数値計算する場合に、現在一般的に用いられるのは FEM(Finite Element Method:有限要素法)である。至近では古川ら [32] が FEM を用いた大規模計算の報告をしているものの、超音波ガイド波はその波長の短さと比較して検査範囲が広大であり、FEM ではその要素数が膨大になるため容易に計算することが難しい。林ら [33] はこの問題を半解析的有限要素法を用いて解決したが、軸方向に非対称な領域は従来の FEM を用いるため、配管、減肉形状や減肉領域の設定によっては半解析的有限要素法の利点を生かしくくなる場合があると考えられる。

## 1.2.3 EMAT

EMAT[34] とは、磁石とコイルで構成された、非接触で対象に超音波を送受信させることが可能な素子である。その動作原理は、コイルに交流電流を流すことにより、超音波発生対象となる媒質に変動磁場と渦電流を生じさせ、磁石とコイルから発生した磁場と渦電流の相互作用によって媒質に振動を生じさせるものである。超音波の受信は、媒質の振動と磁場の相互作用により渦電流が生じ、この渦電流をコイルでピックアップし電圧変化として検出する。EMAT を非破壊検査に応用する研究が本格的になされたのは 1970 年代になってからである。Thompson ら [35] によって大規模ガス配管設備の検査装置として研究された後、理論的・基礎的な研究が広くなされた [36, 37]。EMAT は従来 SNR が低く、長く実用化には至らなかったが、Hirao, Ogi ら [38] の報告した EMAR 法 (Electromagnetic Acoustic Resonance 法) によって大きくその SNR を改善させた。その後、原子力発電プラントにおける高経年化問題と相まって配管肉厚用検査素子としても広く研究され、Kosaka ら [39, 40, 41], Tagawa ら [42, 43] などが EMAT を用いた配管減肉の寸法測定について報告している。肉厚検査だけでなく、EMAT をガイド波用の素子として適用した研究も報告されている。Murayama らはアルミ配管における EMAT ガイド波の挙動 [44] について報告し、Sugiura ら [45] は EMAT ガイド波を用いたワイヤー検査装置の開発をしている。

## 1.3 研究の目的

前節で述べたように、配管の超音波ガイド波検査法は社会的な需要が多く期待される技術である一方、その装置及び検査方法には多くの改善の余地がある。そこで、本研究の目的を以下の様に設定する。

1. 実装の容易さ及び計算コストに配慮したガイド波検査シミュレータの開発。
2. 現場での使用に適した、ガイド波の制御性の高いガイド波検査装置の開発。
3. 現実の配管欠陥形状をに対応したガイド波配管検査方法の開発。

第1項目である、実装が容易であって計算コストが少ないガイド波検査シミュレータの開発には、FDTD(Finite Difference Time Domain)法 [46, 47] を用いる。FDTD法は、スタガートグリッド(入れ子型格子)を用いた時間発展型の差分法である。従来は電磁気数値解析の分野で発展した手法である。1990年頃より弾性波動の解析にも応用されるようになり、2000年以降関連文献が多く見られるようになった。本研究で取り扱うガイド波の解析は直管を対象としており、円柱座標系を用いることで簡便な表現が可能であること、境界条件や精度についての先行研究が豊富である [49, 50, 51, 52] こと、陽解法であることから計算速度が速く、使用メモリがFEMに比べて少ないことから採用した。構築したガイド波検査シミュレータの精度についてはガイド波の伝播速度の解析解を通じて確認する。

第2項目である、現場使用に適したガイド波検査システムの開発について述べる。ここで現場とは、各種プラント屋内外の配管敷設場所を指す。現場においては既存のガイド波検査システムの適用を困難にする多くの課題がある。特に製鉄所で顕著であるが、粉塵、水蒸気、油、振動および気温である。これらが容易に精密機器の寿命を縮めるため、本研究で開発するガイド波検査システムは対環境性能に優れている必要がある。また、実際の検査・保全業務の簡便化のため設置が容易であり、オンラインでの使用、つまりプラント設備稼働中でも使用可能である必要がある。そこで本研究では、ガイド波送受信素子としてEMAT(Electromagnetic Acoustic Transducer:電磁超音波探触子)を

用いたガイド波検査システムの開発を行う。EMAT とはコイルと磁石からなる探触子であって、丈夫で安価であり、EMAT 自体の持つ自己保持力にて配管に設置可能な探触子である。超音波ガイド波の送受信にもカップラントが必要なく、高温環境においても安定した動作が可能 [53] である。この EMAT を用いて現場使用に適したガイド波検査システムを開発し、その有効性を検証する。

次に、第 3 項目の現実の配管欠陥形状に適したガイド波検査方法について述べる。文献 [7] に策定されている現行の検査方法は TOF を用いた簡便なものである。至近の研究では MP 法を始めとした信号処理技術を適用した提案 [30] や逆解析法を適用したものの [31] など、ガイド波検査方法の高度化に関する報告も種々なされ始めている。本研究では逆解析法と正規直行分解法を用いて、部分的 (局所的) に発生した配管減肉の形状を推定する方法を提案する。前述の美浜原発 3 号機で破断した配管の実測データより局所配管減肉モデルを作成し、逆解析法と正規直行分解法を用いた提案方法でその局所減肉形状を推定出来るかを検証する。

上記 3 項目の達成をもって、本研究が超音波ガイド波を用いた配管検査システムおよび検査方法の高度化の一助とすることを目的とする。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成について述べる。これまでに研究の背景、研究の目的、先行研究の文献調査結果について述べた。2 章では、超音波ガイド波に関する理論および位相速度、群速度の分散曲線の理論と数値計算法および超音波ガイド波の既存検査法についてレビューする。3 章では、配管を伝播する超音波ガイド波のための 3 次元シミュレータの開発について述べる。4 章では、EMAT を用いた配管のガイド波検査システムの開発、配管減肉検査実験を通じて同システムの有効性検証を行う。5 章では、逆問題解析法を用いた局所的な減肉の形状推定法について述べる。6 章では、結論を述べる。

## 第2章 配管を伝播する超音波ガイド波

### 2.1 はじめに

配管を伝播する超音波ガイド波の理論的な研究は Gazis[8] に遡ることは前述の通りである。Gazis は初めて配管を伝播する超音波ガイド波の、半径方向、円周方向、長手方向の3次元の変位の理論解を導出した。文献 [8] によれば配管を伝播する超音波ガイド波の理論解は、配管を伝播する弾性波動を自由境界条件で解くことで得られる。具体的には、特性方程式の固有値と固有ベクトルを求めることで配管を伝播する超音波ガイド波の速度分散曲線と Wave Structure が得られる。固有値、固有ベクトルがそれぞれ、速度分散曲線、Wave Structure に対応する。ここで Wave Structure とは伝播する超音波ガイド波の半径、円周、長手方向の変位の比を表すものである。本章では配管を伝播する超音波ガイド波の代表的なモードについて概説した後、速度分散曲線と Wave Structure について Gazis の方法に沿って導出する。また、速度分散曲線と代表的なガイド波のモードの Wave Structure について計算例を示し、その結果について議論する。

### 2.2 配管を伝播するガイド波のモード

配管を伝播するガイド波には Torsional mode, Longitudinal mode, Flexural mode の3種類のモードが存在する。Torsional mode および Longitudinal mode はそれぞれ配管のねじり方向成分、長手方向成分で主に構成されるモードであり、Flexural mode はそれらに加えて配管全体の振動方向成分を持つモードである (Fig.2.1)。それぞれのモードはさらに円周方向モードパラメータ  $n$ 、肉厚方向モードパラメータ  $m$  によってさらに細分化される [54]。このモードパラメータ  $n, m$  はそれぞれの方向における共振位置の

数を意味している。Torsional mode であって  $n = 0, m = 1$  である場合は T(0,1) モードと表記し, Longitudinal mode であって,  $n = 0, m = 1$  である場合は, L(0,1) モード表記する。T(0,1) モード, T(0,2)L モード, L(0,1) モード, L(0,2) モードにおける振動形態を Fig.2.2 - Fig.2.3 に示す。  $n \neq 0$  である場合には必然的に配管全体の振動モードを持つので必ず Flexural mode となる。



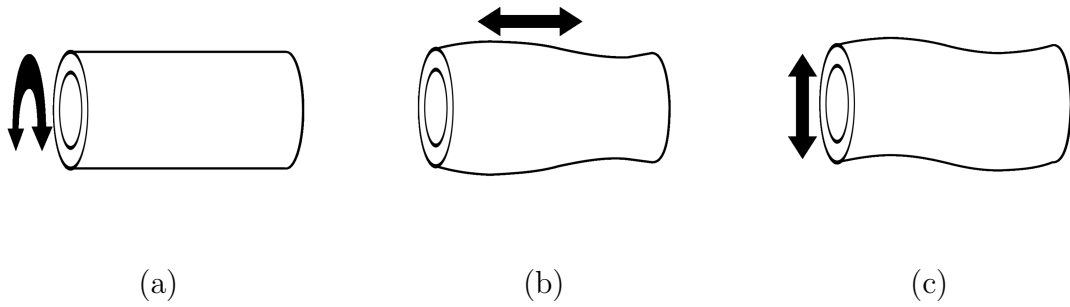


Fig. 2.1: Schematic illustration of the Guided wave vibration modes:(a), (b) and (c) represent torsional mode, longitudinal mode and flexural mode, respectively. Arrows indicate each direction of the vibration.

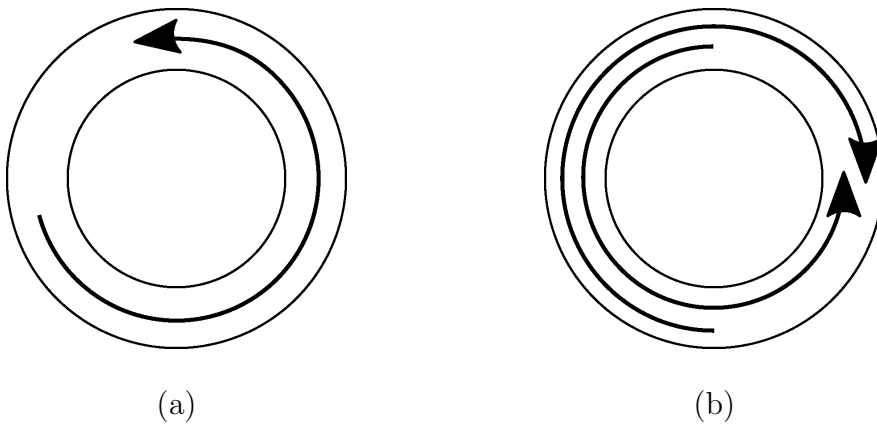


Fig. 2.2: Cross-sectional ( $r-\theta$  plane) drawing of the torsional mode guided wave vibration modes. (a) represents  $T(0,1)$  mode and (b)  $T(0,2)$  mode. Arrows represent the direction of the vibration.

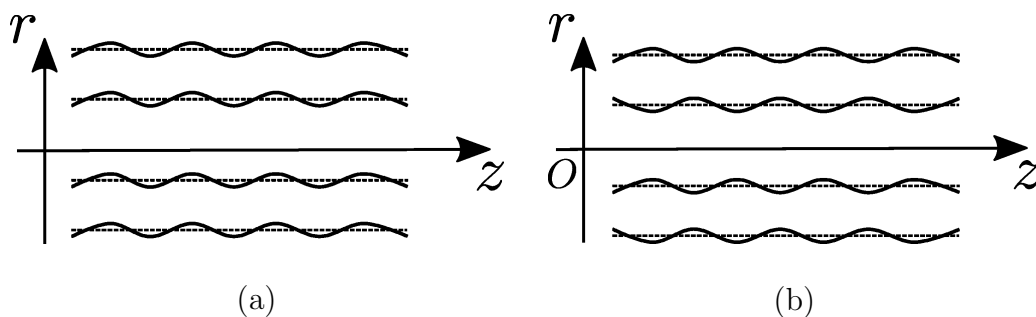


Fig. 2.3: Cross-sectional ( $r-z$  plane) drawing of the longitudinal mode guided wave vibration modes. (a) represents  $L(0,1)$  mode and (b)  $L(0,2)$  mode. Arrows represent the direction of the vibration.

## 2.3 特性方程式の導出

Fig.2.4 に配管と 3 次元円柱座標を示す. Fig.2.4 の  $r, \theta, z$  はそれぞれ, 半径方向, 円周方向, 長手方向の軸を表す.  $a, b, h$  はそれぞれ配管の内半径, 外板径, 配管肉厚を表す. 等方弾性体の運動を表すナビエの方程式は以下の式 2.1 で表される.

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho (\partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2) \quad (2.1)$$

ただし,  $\mathbf{u}$  は変位ベクトル,  $\rho$  は密度 [ $g/cm^3$ ],  $\lambda, \mu$  はラメ定数,  $\nabla^2$  は 3 次元ラプラス演算子である. また, ラメ定数  $\lambda, \mu$  はヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  を用いて以下のように表される.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (2.2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

体積膨張スカラーポテンシャル  $\phi$  と等体積ベクトルポテンシャル  $H$  によってベクトル  $\mathbf{u}$  は以下のように表現される.

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times H. \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot H = F(r, t). \quad (2.4)$$

式 (2.4) において,  $F$  は座標ベクトル  $\mathbf{r}$  と時間  $t$  の関数である. 変位運動方程式は, ポテンシャル  $\phi$  と  $H$  が以下の式を満たすときに成り立つ.

$$v_1^2 \nabla^2 \phi = \partial^2 \phi / \partial t^2. \quad (2.5)$$

$$v_2^2 \nabla^2 H = \partial^2 H / \partial t^2.$$

ただし,

$$v_1^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho, \quad (2.6)$$

$$v_2^2 = \mu / \rho.$$

である. さらに,

$$\begin{aligned}
\phi &= f(r) \cos n\theta \cos(\omega t + \xi z), \\
H_r &= g_r(r) \sin n\theta \sin(\omega t + \xi z), \\
H_\theta &= g_\theta(r) \cos n\theta \sin(\omega t + \xi z), \\
H_z &= g_z(r) \sin n\theta \cos(\omega t + \xi z).
\end{aligned} \tag{2.7}$$

とおくと, 式 (2.5) は以下のように変形できる.

$$\begin{aligned}
(\nabla^2 + \omega^2/v_1^2)\phi &= 0. \\
(\nabla^2 + \omega^2/v_2^2)H_z &= 0. \\
(\nabla^2 - 1/r^2 + \omega^2/v_2^2)H_r - (2/r^2)(\partial H_\theta/\partial\theta) &= 0. \\
(\nabla^2 - 1/r^2 + \omega^2/v_2^2)H_\theta - (2/r^2)(\partial H_r/\partial\theta) &= 0.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

従って, 以下に示す微分演算子表記法を用いると,

$$\mathfrak{B}_{n,x} = \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} - \left( \frac{n^2}{x^2} - 1 \right) \right].$$

式 (2.7), 式 (2.8) から Bessel の微分方程式が得られる.

$$\begin{aligned}
\mathfrak{B}_{n,\alpha r}[f] &= 0. \\
\mathfrak{B}_{n,\beta r}[g_3] &= 0. \\
\mathfrak{B}_{n+1,\beta r}[g_r - g_\theta] &= 0. \\
\mathfrak{B}_{n-1,\beta r}[g_r + g_\theta] &= 0.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

ただし,

$$\alpha^2 = \omega^2/v_1^2 - \xi^2, \quad \beta^2 = \omega^2/v_2^2 - \xi^2. \tag{2.10}$$

である. 式 (2.10) は引数が  $\alpha_1 r = |\alpha r|$  と  $\beta_1 r = |\beta r|$  の Bessel 関数  $J, Y$  あるいは変形 Bessel 関数  $I, K$  で与えられる. ただし,  $\alpha$  と  $\beta$  は実数あるいは虚数である. 用いる Bessel

関数の適切な選択には Table 2.1 を参照する. 式 (2.10) の一般解は,

$$\begin{aligned}
f &= AZ_n(\alpha_1 r) + BW_n(\alpha_1 r), \\
g_3 &= A_3 Z_n(\beta_1 r) + B_3 W_n(\beta_1 r), \\
2g_1 &= (g_r - g_\theta) = 2A_1 Z_{n+1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{n+1}(\beta_1 r), \\
2g_2 &= (g_r + g_\theta) = 2A_2 Z_{n-1}(\beta_1 r) + 2B_2 W_{n-1}(\beta_1 r).
\end{aligned} \tag{2.11}$$

と表せる. ただし,  $Z$  は  $J$  あるいは  $I$  の関数,  $W$  は  $Y$  あるいは  $K$  の関数とする. 変位場は等体積ポテンシャル  $g_i$  ( $i=1,2,3$ ) に対応する. ここで,  $g_2=0$  とすると,

$$g_r = -g_\theta = g_1. \tag{2.12}$$

となる. 従って変位場は,

$$\begin{aligned}
u_r &= [f' + (n/r)]g_3 + \xi g_1] \cos n\theta \cos(\omega t + \xi z), \\
u_\theta &= [-(n/r)f + \xi g_1 - g_3'] \sin n\theta \cos(\omega t + \xi z), \\
u_z &= [-\xi f - g_1' - (n+1)(g_1/r)] \cos n\theta \sin(\omega t + \xi z).
\end{aligned} \tag{2.13}$$

と表せる. 歪み-変位関係式は,

$$\begin{aligned}
\epsilon_{rr} &= \partial u_r / \partial r, \\
\epsilon_{rz} &= (1/2)[\partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r], \\
\epsilon_{r\theta} &= (1/2)[r \frac{\partial}{\partial r} (\frac{u_\theta}{r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta}].
\end{aligned} \tag{2.14}$$

となり, そして応力-歪み関係式,

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \lambda \Delta + 2\mu \epsilon_{rr}, \\
\sigma_{rz} &= 2\mu \epsilon_{rz}, \\
\sigma_{r\theta} &= 2\mu \epsilon_{r\theta}.
\end{aligned} \tag{2.15}$$

はポテンシャル  $f, g_1, g_3$  に関する境界応力を表すために利用される. 式 (2.15) において,  $\Delta$  は以下で与えられる.

$$\Delta = \nabla^2 \phi = -(\alpha^2 + \xi^2) f \cos n\theta \cos(\omega t + \xi z). \tag{2.16}$$

配管の内表面及び外表面における境界条件は応力が0となり,それぞれ配管の内半径  $a$  及び外半径  $b$  を用いて,

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad (r = a, \quad r = b). \quad (2.17)$$

と表せる. また式 (2.15) は以下のように変形できる.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \left\{ -\lambda(\alpha^2 + \xi^2)f + 2\mu\left[f'' + \frac{n}{r}(g'_3 - \frac{g_3}{r}) + \xi g'_1\right] \right\} \\ &\quad \times \cos n\theta \cos(\omega t + \xi z). \\ \sigma_{rz} &= 2\mu\left\{ -\frac{2n}{r}(f' - \frac{f}{r}) - (2g''_3 - \beta^2 g_3) - \xi\left(\frac{n+1}{r}g_1 - g'_1\right) \right\} \\ &\quad \times \sin n\theta \cos(\omega t + \xi z). \\ \sigma_{r\theta} &= \mu\left\{ -2\xi f' - \frac{n}{r}[g'_1 + (\frac{n+1}{r} - \beta^2 + \xi^2)g_1] - \frac{n\xi}{r}g_3 \right\} \\ &\quad \times \cos n\theta \sin(\omega t + \xi z). \end{aligned} \quad (2.18)$$

式 (2.18) を式 (2.17) に代入することで振幅係数  $A, A_1, A_3, B, B_1, B_3$  の行列式によって与えられた以下の特性方程式,

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ A_1 \\ A_3 \\ B \\ B_1 \\ B_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (2.19)$$

が得られ, 方程式が解を持つ条件は,

$$\det[\mathbf{C}_{ij}] = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{vmatrix} = 0. \quad (2.20)$$

となる.

行列式における初めの3行の要素を以下に示す.

$$c_{11} = [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2)a^2]Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 \alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a). \quad (2.21)$$

$$c_{12} = 2\xi\beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) - 2\xi a(n+1)Z_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.22)$$

$$c_{13} = -2n(n-1)Z_n(\beta_1 a) + 2\lambda_2 n\beta_1 Z_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.23)$$

$$c_{14} = [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2)a^2]W_n(\alpha_1 a) + 2\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a). \quad (2.24)$$

$$c_{15} = 2\lambda_2 \xi\beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) - 2(n+1)\xi a W_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.25)$$

$$c_{16} = -2n(n-1)W_n(\beta_1 a) + 2n\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.26)$$

$$c_{21} = 2n(n-1)Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 n\alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a). \quad (2.27)$$

$$c_{22} = -\xi\beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) + 2\xi a(n+1)Z_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.28)$$

$$c_{23} = -[2n(n-1) - \beta^2 a^2]Z_n - 2\lambda_2 \beta_1 a Z_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.29)$$

$$c_{24} = 2n(n-1)W_n(\alpha_1 a) - 2n\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a). \quad (2.30)$$

$$c_{25} = -\lambda_2 \xi\beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) + 2\xi a(n+1)W_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.31)$$

$$c_{26} = -[2n(n-1) - \beta^2 a^2]W_n(\beta_1 a) - 2\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.32)$$

$$c_{31} = 2n\xi a Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 \xi\alpha_1 a^2 Z_{n+1}(\alpha_1 a). \quad (2.33)$$

$$c_{32} = -n\beta_1 a Z_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - \xi^2)a^2 Z_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.34)$$

$$c_{33} = n\xi a Z_n(\beta_1 a). \quad (2.35)$$

$$c_{34} = -2n\xi a W_n(\alpha_1 a) + 2\xi\alpha_1 a^2 W_{n+1}(\alpha_1 a). \quad (2.36)$$

$$c_{35} = -\lambda_2 n\beta_1 a W_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - \xi^2)a^2 W_{n+1}(\beta_1 a). \quad (2.37)$$

$$c_{36} = n\xi a W_n(\beta_1 a). \quad (2.38)$$

行列式の残りの3行に関しては式(2.38)における配管の内半径  $a$  を外半径  $b$  に置換する. また,  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  に関しては Table.2.2 を参照する.  $n=0$  のとき, ガイド波のモードは軸対称モードとなり, 以下の周波数方程式に分解できる.

$$\mathbf{C}_{ij} = \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{D}_2 = 0. \quad (2.39)$$

ただし,

$$\mathbf{D}_1 = \det \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{14} & c_{15} \\ c_{31} & c_{32} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{44} & c_{45} \\ c_{61} & c_{62} & c_{64} & c_{65} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \mathbf{D}_2 = \det \begin{bmatrix} c_{23} & c_{26} \\ c_{53} & c_{56} \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

である. ここで,  $D_1=0$  と  $D_2=0$  を解くことはそれぞれ L モードと T モードの位相速度分散曲線を導出することに相当する. それぞれの行列式は, 波数  $\xi$  と角周波数  $\omega$  の方程式となる. 数値計算を用いて方程式を満たす波数  $\xi$  と角周波数  $\omega$  を探索し,  $D_1=0, D_2=0$  となるときに波数  $\xi$  と角周波数  $\omega$  の値から位相速度及び群速度を求める. 位相速度  $v_p$  と群速度  $v_g$  はそれぞれ波数  $\xi$  と角周波数  $\omega$  で以下のように求めることができる.

$$v_p = \frac{\omega}{\xi}, v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \xi}. \quad (2.41)$$

求めた解のうち, 対応する波数  $\xi$  の値が大きい方から肉厚方向のモードパラメータ  $m$  となる.

Table 2.1: Bessel functions used at different intervals.

| Interval                   | Functions used   |
|----------------------------|--|
| $v_1\xi < \omega$          | $J(\alpha r), Y(\alpha r), J(\beta r), Y(\beta r)$         |
| $v_2\xi < \omega < v_1\xi$ | $I(\alpha_1 r), K(\alpha_1 r), J(\beta r), Y(\beta r)$     |
| $\omega < v_2\xi$          | $K(\alpha_1 r), K(\alpha_1 r), J(\beta_1 r), Y(\beta_1 r)$ |

Table 2.2: Parameters used at different intervals.

| Interval                   | Parameters used                  |
|----------------------------|----------------------------------|
| $v_1\xi < \omega$          | $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1$   |
| $v_2\xi < \omega < v_1\xi$ | $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = 1$  |
| $\omega < v_2\xi$          | $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = -1$ |

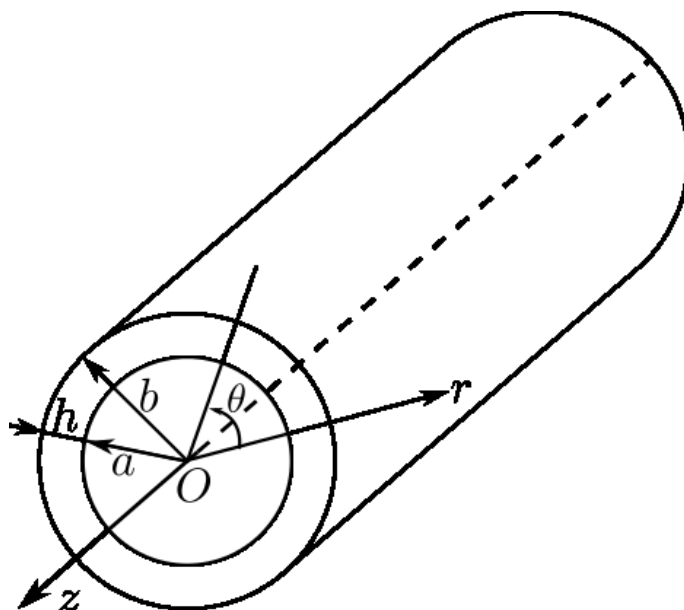


Fig. 2.4: Cylindrical coordinate

## 2.4 分散曲線および Wave Structure の数値計算

本節では, 前節で説明した周波数方程式を解き, Lモード, Tモードの位相速度分散曲線, 群速度分散曲線, Wave Structure を導出する. 対象とする配管の材質はSS400のとし, その物性値を次のように想定する. ヤング率  $E = 201 \times 10^9$ , 密度  $\rho = 7.90 \times 10^3$ , ポアソン比  $\nu = 0.3$  とする. 配管の寸法は, 配管の内半径を  $a = 0.025[\text{m}]$ , 外半径を  $b = 0.0325[\text{m}]$  とする. Fig.2.5 - Fig.2.8 に上記配管における T(0,1) モードから T(0,4) モード, L(0,1) モードから L(0,4) モードの位相速度, 群速度分散曲線を示す.



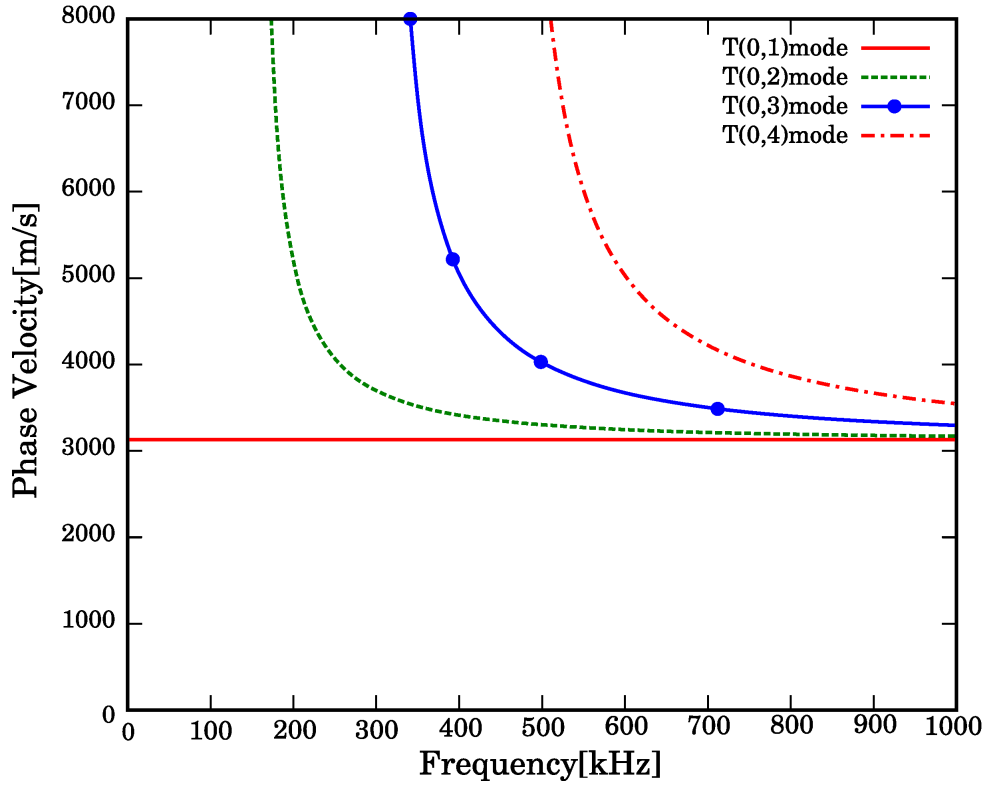


Fig. 2.5: Phase velocity dispersion curves of Torsional mode guided wave. Red solid line, Green dashed line, blue solid line with circle and Red chain line represent T(0,1) mode, T(0,2) mode, T(0,3)mode and T(0,4) mode, respectively. Dimensions and of the pipe specimen are followings: inner radius and outer radius are  $0.0255[m]$  and  $0.0325[m]$ . Young's Modulus, Poisson ratio and Density is  $201 \times 10^9$ ,  $0.3$  and  $7.90 \times 10^3$ , respectively.

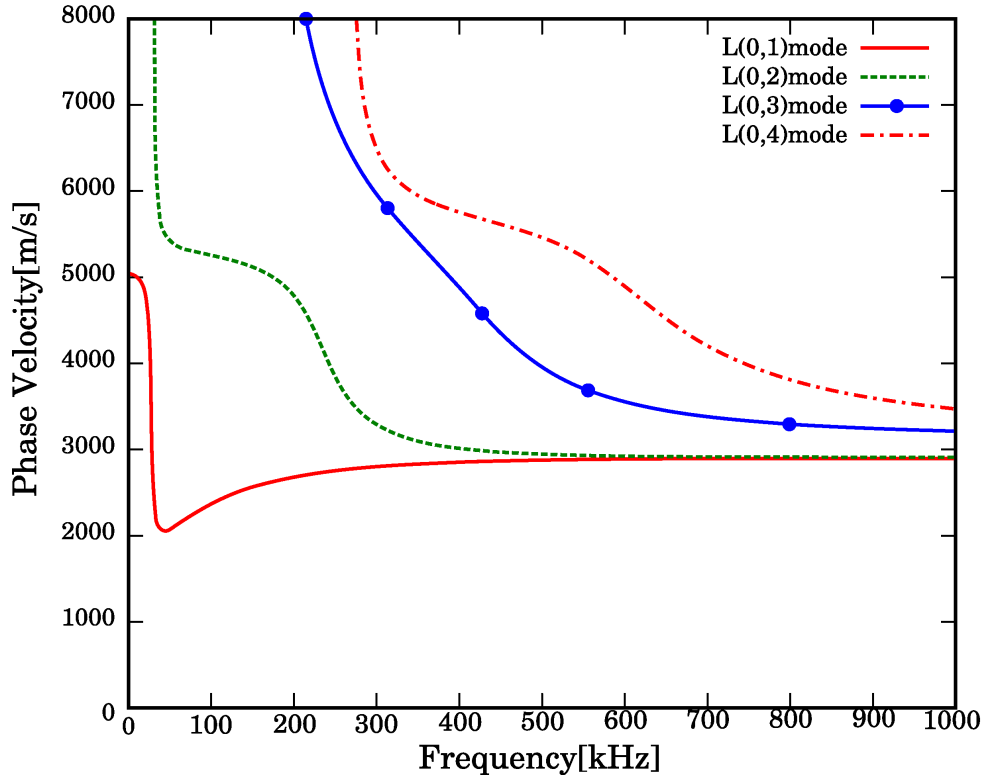


Fig. 2.6: Phase velocity dispersion curves of Longitudinal mode guided wave. Red solid line, Green dashed line, blue solid line with circle and Red chain line represent L(0,1) mode, L(0,2) mode, L(0,3)mode and L(0,4) mode, respectively. Dimensions and of the pipe specimen are followings: inner radius and outer radius are  $0.0255[m]$  and  $0.0325[m]$ . Young's Modulus, Poisson ratio and Density is  $201 \times 10^9$ ,  $0.3$  and  $7.90 \times 10^3$ , respectively.

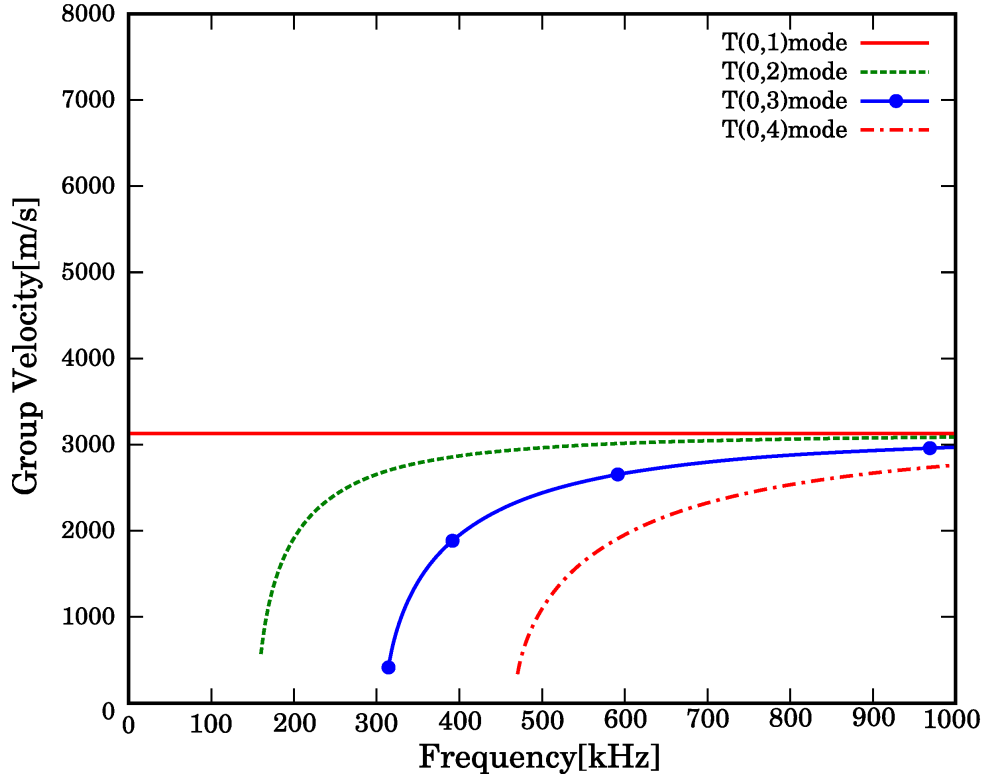


Fig. 2.7: Group velocity dispersion curves of Longitudinal mode guided wave. Red solid line, Green dashed line, blue solid line with circle and Red chain line represent L(0,1) mode, L(0,2) mode, L(0,3) mode and L(0,4) mode, respectively. Dimensions and of the pipe specimen are followings: inner radius and outer radius are  $0.0255[m]$  and  $0.0325[m]$ . Young's Modulus, Poisson ratio and Density is  $201 \times 10^9$ ,  $0.3$  and  $7.90 \times 10^3$ , respectively.

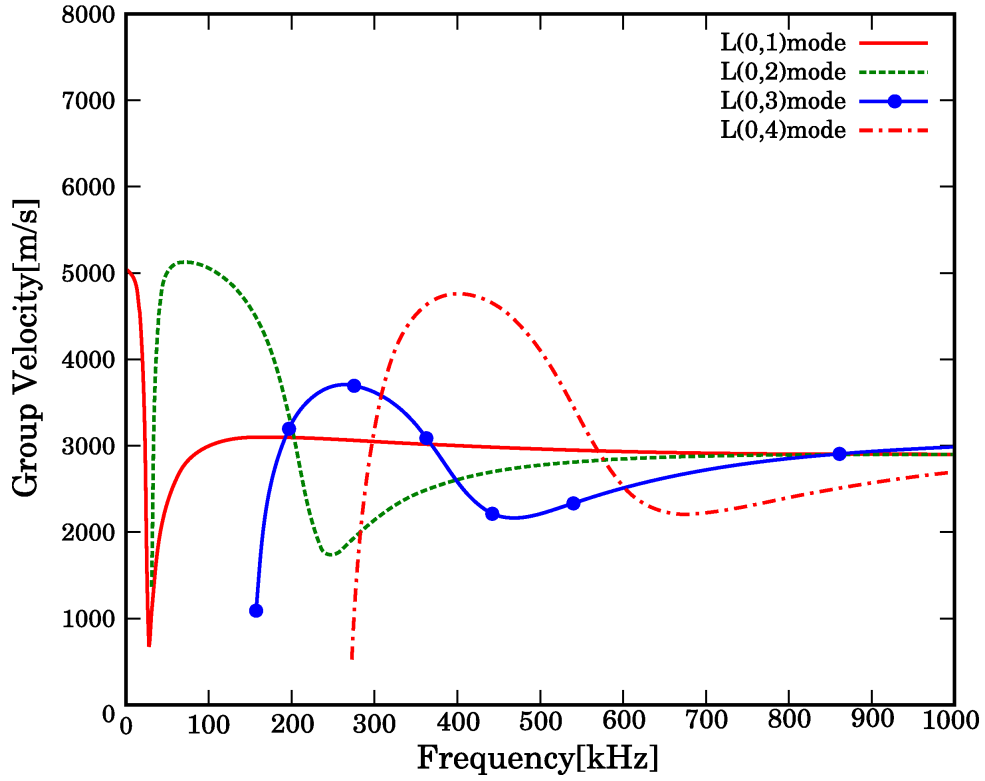


Fig. 2.8: Group velocity dispersion curves of Longitudinal mode guided wave. Red solid line, Green dashed line, blue solid line with circle and Red chain line represent L(0,1) mode, L(0,2) mode, L(0,3) mode and L(0,4) mode, respectively. Dimensions and of the pipe specimen are followings: inner radius and outer radius are  $0.0255[m]$  and  $0.0325[m]$ . Young's Modulus, Poisson ratio and Density is  $201 \times 10^9$ ,  $0.3$  and  $7.90 \times 10^3$ , respectively.

Fig.2.9 - Fig.2.20 に Wave Structure の計算例を示す. 今回は周波数  $f=200[\text{kHz}]$  における場合と  $f=600[\text{kHz}]$  における場合の T モードガイド波および L モードガイド波の Wave Structure を示す. 具体的には  $f=200[\text{kHz}]$  における T(0,1) モード, T(0,2) モード, L(0,1) モード, L(0,2) モード, L(0,3) モードおよび  $f=600[\text{kHz}]$  における T(0,1) モード, T(0,2) モード, T(0,3) モード, T(0,4) モード L(0,1) モード, L(0,2) モード, L(0,3) モード, L(0,4) モードである. 図中の赤実線が配管半径方向変位  $u_r$ , 緑点線が配管円周 (ねじり) 方向変位  $u_\theta$ , 青鎖線が配管長手方向変位  $u_z$  である.

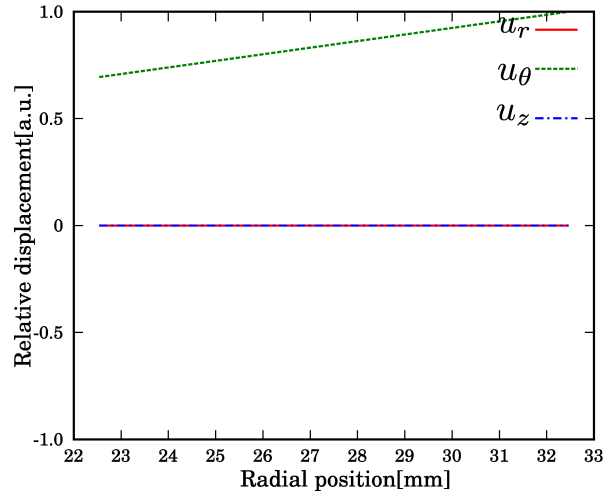


Fig. 2.9: Wave structure of the T(0,1) mode guided wave at 200[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

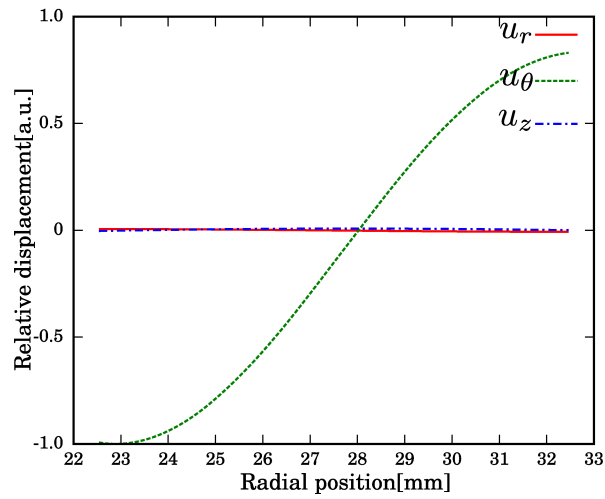


Fig. 2.10: Wave structure of the T(0,2) mode guided wave at 200[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

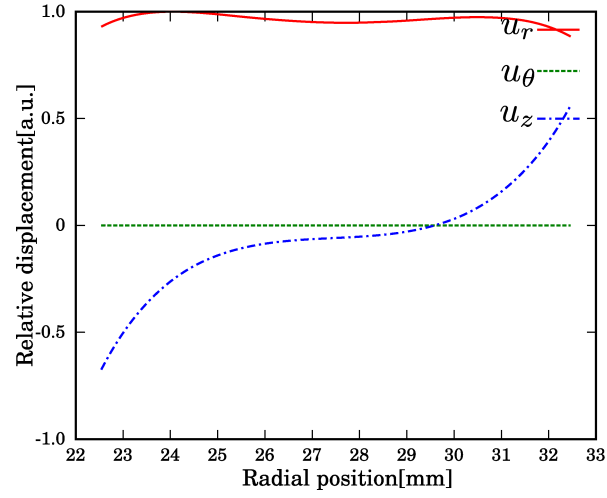


Fig. 2.11: Wave structure of the L(0,1) mode guided wave at 200[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

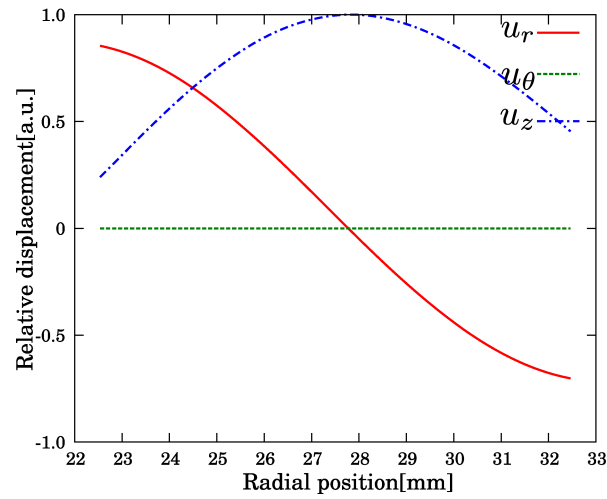


Fig. 2.12: Wave structure of the L(0,2) mode guided wave at 200[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

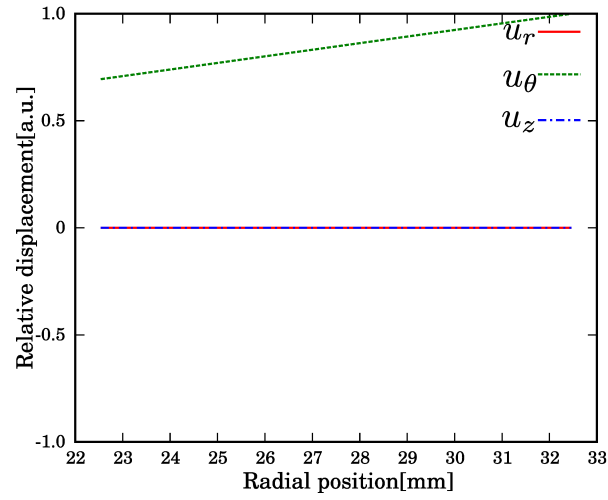


Fig. 2.13: Wave structure of the T(0,1) mode guided wave at 600[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

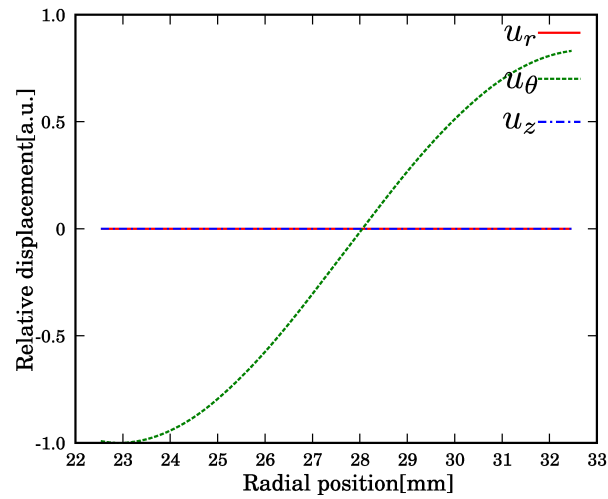


Fig. 2.14: Wave structure of the T(0,2) mode guided wave at 600[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.



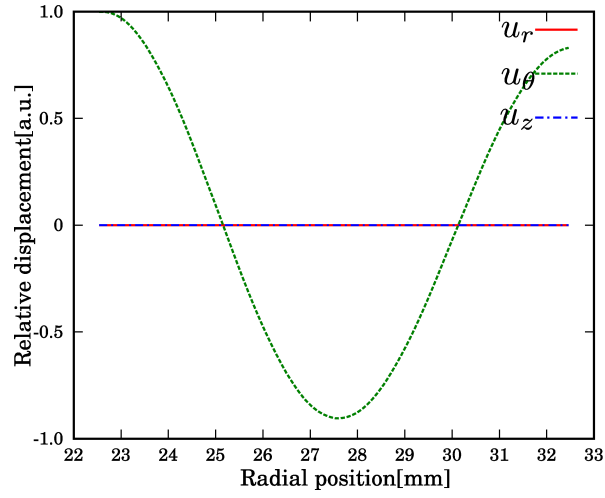


Fig. 2.15: Wave structure of the T(0,3) mode guided wave at 600[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

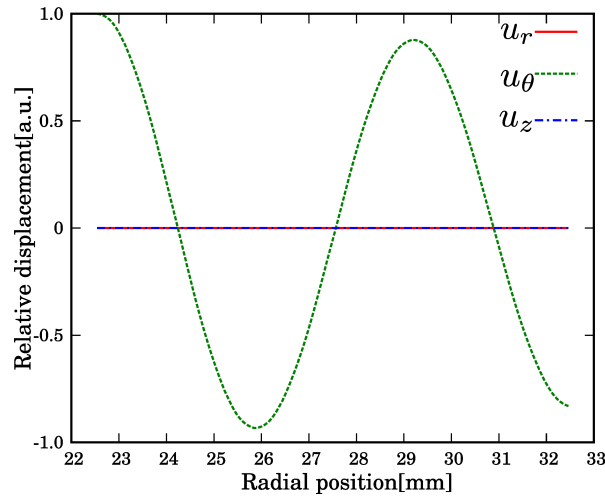


Fig. 2.16: Wave structure of the T(0,4) mode guided wave at 600[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

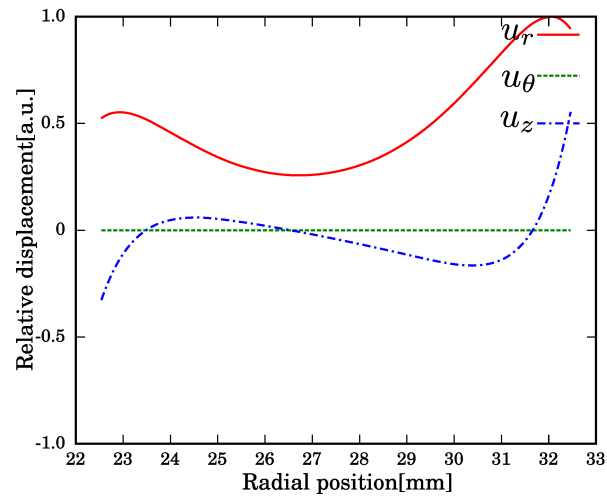


Fig. 2.17: Wave structure of the L(0,1) mode guided wave at  $600[kHz]$  excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

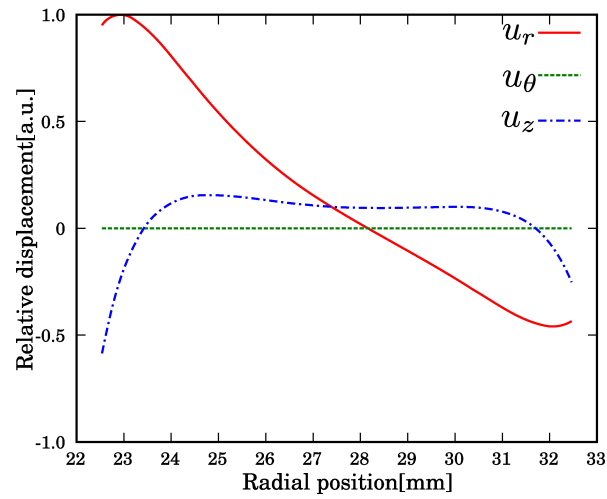


Fig. 2.18: Wave structure of the L(0,2) mode guided wave at  $600[kHz]$  excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

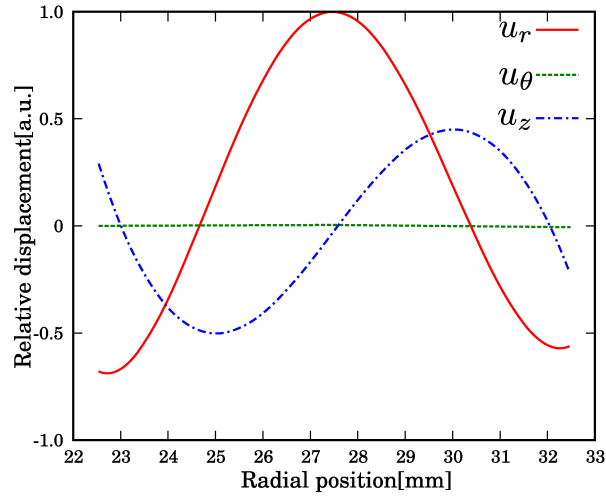


Fig. 2.19: Wave structure of the L(0,3) mode guided wave at 600[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

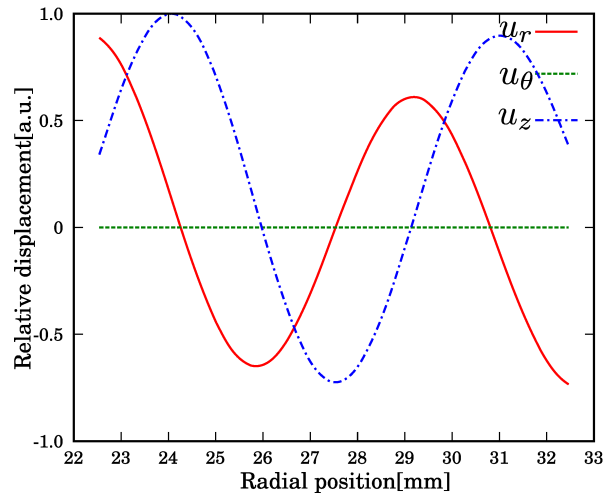


Fig. 2.20: Wave structure of the L(0,4) mode guided wave at 600[kHz] excitation. Red solid line, Green dashed line and blue chain line represent the relative displacement of radius, circumferential and longitudinal direction.

# 第3章 3次元超音波ガイド波シミュレータの構築

## 3.1 はじめに

本章では, FDTD 法 [46, 47, 49, 50, 51, 52] を用いたガイド波検査シミュレータの構築について述べる. 1章で述べたように, 弾性波動の伝播解析には FEM を使用するのが一般的であるが特にガイド波においてはその波長に対して解析領域が広く, 計算時間と使用メモリの増大が問題となった. 林ら [33] の半解析的有限要素法でも解析領域が非対称である場合には従来の有限要素法を適用する必要がある, その効果が限定される場合があった. そこで本研究では, 至近弾性波動伝播の解析に適用されはじめた FDTD 法を用いたガイド波検査シミュレータを構築し, これらの問題の解決を図る.

FDTD 法はスタガードグリッド (入れ子格子) と蛙とび差分を用いた時間発展型の数値計算スキームである. スタガードグリッドとは, 弾性波動の数値計算に必要な粒子速度節点と応力節点を空間方向に半ステップづつずらして配置した格子である. 蛙とび差分とは, 粒子速度節点と応力節点を時間方向に半ステップずらした差分スキームであり, 前ステップの値を用いて次ステップの値を更新することで各時間ステップの解を求めることが可能となる. スタガードグリッドを使用することで弾性体の基礎方程式であるフックの法則と運動方程式に対して中心差分を自然な形で適用可能とし, 蛙飛び差分によって前ステップの値の保持が必要ないことからメモリの使用量を削減することが可能となっている.

自由境界の設定方法について述べる. 配管を伝播するガイド波はそのほとんどが自由境界上を伝播すると考えて良いため, 精度よく近似する必要がある. FDTD 法による弾性波動伝播解析において, 自由境界条件の設定方法や精度については地震学の分野で

研究が進んでおり, 2000 年代前半までの研究成果については Moczo ら [55] による報告が詳しい. FDTD 法による自由境界の設定には境界上での応力の平均値が 0 となるように仮想節点を用いる, いわゆる ZSF (Zero Stress Formulation) が簡便かつ精度が良いとの報告があるが [50], 単純な ZSF ではメッシュの歪みがある場合にその取り扱いが難しいといった問題がある. 本研究におけるガイド波検査シミュレータにおいては配管減肉部の自由曲面をガイド波が伝播する場合を想定するため, 自由曲面における自由境界の設定まで留意する必要がある. この問題に関しては Ohminato ら [51] が従来の ZSF に対して修正を加えて解決しており, 本研究でも Ohminato らの手法を用いて自由境界を設定する.

### 3.2 支配方程式

円柱座標系 (Fig.3.1) におけるフックの法則と運動方程式は以下の式 3.1, 式 3.2 のように表される.

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{T} = [c] \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} & 0 & \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}. \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} & -\frac{1}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{2}{r} + \frac{\partial}{\partial r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial r} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{T} + \mathbf{F}. \quad (3.2)$$

ただし,

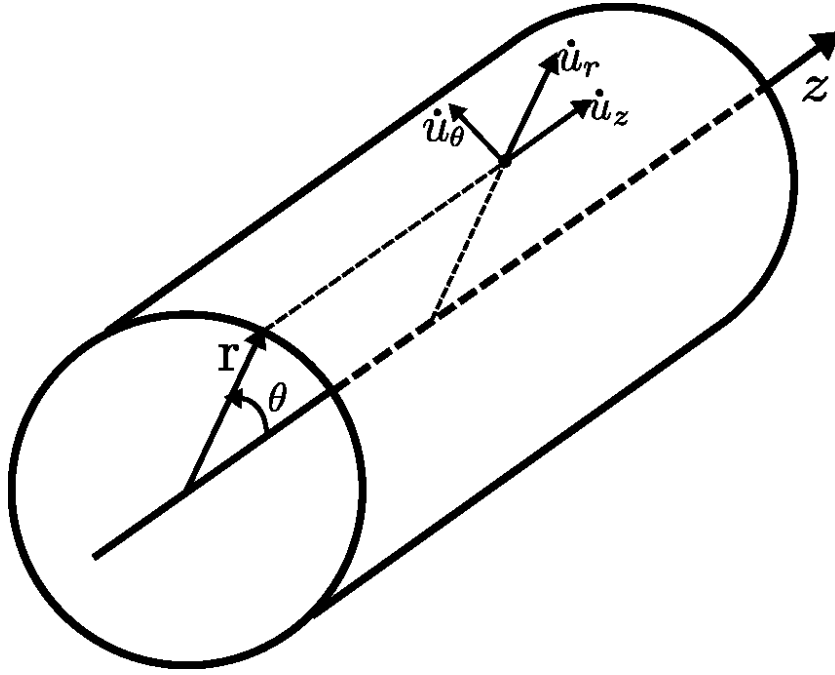


Fig. 3.1: Cylindrical coordinate.

$$\dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \dot{u}_r \\ \dot{u}_\theta \\ \dot{u}_z \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_r \\ F_\theta \\ F_z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

であり,  $\rho$  は密度,  $[c]$  はスティフネステンソル,  $\dot{\mathbf{u}}$  は粒子速度ベクトル,  $\mathbf{F}$  は外力ベクトルである.

今回は等方弾性体を仮定するので, スティフネステンソルは

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{rr} & c_{r\theta} & c_{r\theta} & 0 & 0 & 0 \\ c_{r\theta} & c_{rr} & c_{r\theta} & 0 & 0 & 0 \\ c_{r\theta} & c_{r\theta} & c_{rr} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{\theta z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\theta z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\theta z} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

となる. ただし,  $c_{rr} = \lambda + 2\mu$ ,  $c_{r\theta} = \lambda$ ,  $c_{\theta z} = \mu$  であり,  $\mu, \lambda$  はラーメの定数である. ラー

メの定数はヤング率  $E$ , ポアソン比  $\nu$  を用いて

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.5)$$

と表される.

今回作成するシミュレータでは, 弾性体はすべて真空と接していると仮定する. 真空と接する境界条件 (自由境界条件) は以下の式で与えられる.

$$[T] \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (3.6)$$

ただし,  $\mathbf{n}$  は真空から弾性体へ向かう単位法線ベクトル,  $\mathbf{0}$  はゼロベクトルである.

### 3.3 FDTD 法による離散化

#### 3.3.1 FDTD 法による数値計算アルゴリズム

式 3.1-3.2 の展開を行い, 以下の式 3.7-3.15 を得る.

$$\rho \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial t} = \frac{T_{rr}}{r} + \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} - \frac{T_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial T_{zr}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial \theta}. \quad (3.7)$$

$$\rho \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2T_{r\theta}}{r} + \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial r}. \quad (3.8)$$

$$\rho \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} = \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{T_{zr}}{r} + \frac{\partial T_{zr}}{\partial r}. \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial T_{rr}}{\partial t} = c_{rr} \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} + \frac{c_{r\theta}}{r} \dot{u}_r + \frac{c_{r\theta}}{r} \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial \theta} + c_{r\theta} \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z}. \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial T_{\theta\theta}}{\partial t} = c_{r\theta} \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} + \frac{c_{rr}}{r} \dot{u}_r + \frac{c_{rr}}{r} \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial \theta} + c_{r\theta} \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z}. \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial T_{zz}}{\partial t} = c_{r\theta} \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} + \frac{c_{r\theta}}{r} \dot{u}_r + \frac{c_{r\theta}}{r} \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial \theta} + c_{rr} \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z}. \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial T_{\theta z}}{\partial t} = c_{\theta z} \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial z} + \frac{c_{\theta z}}{r} \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial \theta}. \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial T_{zr}}{\partial t} = c_{\theta z} \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial z} + c_{\theta z} \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial r}. \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial T_{r\theta}}{\partial t} = \frac{c_{\theta z}}{r} \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial \theta} + c_{\theta z} \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial r} - \frac{c_{\theta z}}{r} \dot{u}_\theta. \quad (3.15)$$

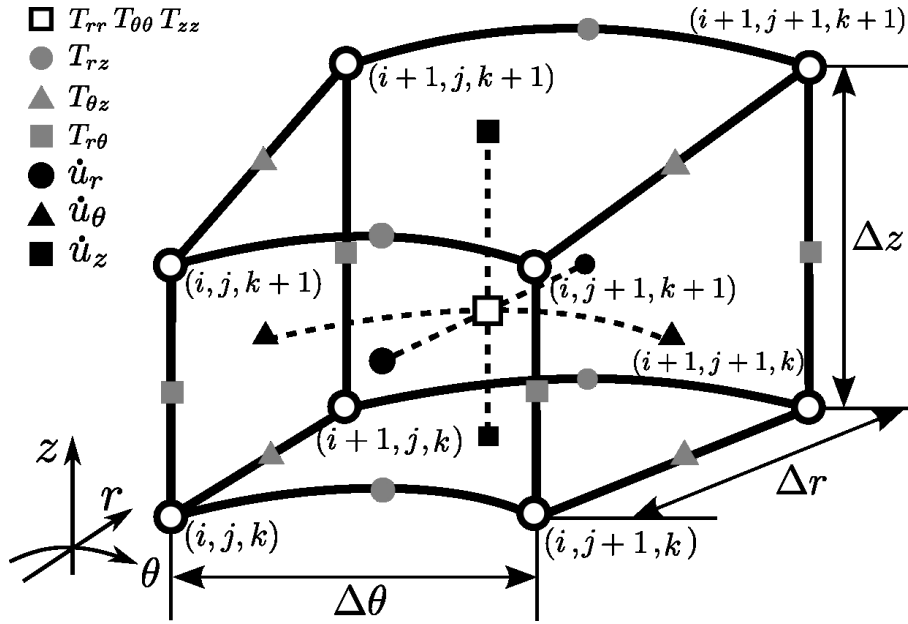


Fig. 3.2: Variable arrangement for FDTD method in three dimensional cylindrical polar coordinates. The indices  $(i, j, k)$  represent values of the coordinates  $(r, \theta, z)$  respectively.

FDTD 法では解析領域を微小セルに分割し、併せて時間も離散化されることから点  $(r, \theta, z, t)$  は  $(r, \theta, z, t) = (i\Delta r, j\Delta\theta, k\Delta z, n\Delta t)$  のように各格子点に割り当てられる。ここで、 $\Delta r, \Delta\theta, \Delta z$  は各セルのサイズを表し、 $\Delta t$  は時間ステップである。FDTD 法では  $\Delta r, \Delta\theta, \Delta z, \Delta t$  を表記せず

$$f(r, \theta, z, t) = f^n(i, j, k) \quad (3.16)$$

のように表記し、添字  $(i, j, k)$  は格子点の節点番号を表す。3次元円柱座標系における応力変数と粒子速度変数の空間配置については Fig.3.2 に示す。

FDTD 法にて弾性波動場を計算する際の時間方向への変数配置について考える。式 3.10 左辺における応力に関する時間微分は、 $n$  を解析の繰り返し回数とし、応力の存在する時刻を  $t = (n - 1)\Delta t, n\Delta t, \dots$  とすると、 $t = ((n - \frac{1}{2})\Delta t, (n + \frac{1}{2})\Delta t), \dots$  で行う必要がある。同様に式 3.7 左辺における粒子速度に関する時間微分は、粒子速度の存在する時刻を  $t = (n - \frac{1}{2})\Delta t, (n + \frac{1}{2})\Delta t, \dots$  とすると  $t = n\Delta t, (n + 1)\Delta t$  で行う必要がある。したがって応力及び粒子速度の時間微分はそれぞれ



$$\left. \frac{\partial T_{rr}}{\partial t} \right|_{t=n\Delta t} = \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}} - T_{rr}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad (3.17)$$

$$\left. \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial t} \right|_{t=(n+\frac{1}{2})\Delta t} = \frac{\dot{u}_r^n - \dot{u}_r^{n-1}}{\Delta t} \quad (3.18)$$

となる. その他の応力, 粒子速度に関しても同様である.

式 3.7 を例に挙げて離散化を行う. 式 3.7 の左辺は式 3.16, 式 3.18, Fig.3.2 から

$$\rho \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial t} = \rho \frac{\dot{u}_r^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - \dot{u}_r^n(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta t} \quad (3.19)$$

となり, 右辺は

$$\begin{aligned} \frac{T_{rr}}{r} + \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} - \frac{T_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial T_{zr}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial \theta} = & \\ & \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{2r(i)} \\ & + \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{\Delta r} \\ & + \frac{T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{2r(i)} \\ & + \frac{T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta z} \\ & + \frac{1}{r(i)} \frac{T_{\theta r}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + 1, k + \frac{1}{2}) - T_{\theta z}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta \theta} \end{aligned} \quad (3.20)$$

となる. 式 3.19, 式 3.20 から式 3.7 の離散式である以下の式 3.21 が得られる.

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\dot{u}_r^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - \dot{u}_r^n(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta t} = & \\
& \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{2r(i)} \\
& + \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{\Delta r} \\
& + \frac{T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{2r(i)} \\
& + \frac{T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta z} \\
& + \frac{1}{r(i)} \frac{T_{\theta r}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + 1, k + \frac{1}{2}) - T_{\theta z}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta \theta} \quad (3.21)
\end{aligned}$$

式 3.8-式 3.14 についても同様に離散化され以下の式 3.22-式 3.28 を得る.

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\dot{u}_\theta^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - \dot{u}_\theta^n(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta t} = & \\
& \frac{1}{r(i + \frac{1}{2})} \frac{T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta \theta} \\
& + \frac{T_{\theta z}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + 1) - T_{\theta z}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta z} \\
& + \frac{2}{r(i + \frac{1}{2})} \frac{T_{r\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i + 1, j, k + \frac{1}{2}) + T_{r\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2})}{2} \\
& + \frac{T_{r\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i + 1, j, k + \frac{1}{2}) - T_{r\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta r}. \quad (3.22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\dot{u}_z^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - \dot{u}_z^n(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta t} = & \\
& \frac{T_{zz}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - T_{zz}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta z} \\
& + \frac{1}{r(i + \frac{1}{2})} \frac{T_{\theta z}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + 1, k + 1) - T_{\theta z}^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + 1)}{\Delta \theta} \\
& + \frac{1}{r(i + \frac{1}{2})} \frac{T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i + 1, j + \frac{1}{2}, k) + T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + 1)}{2} \\
& + \frac{T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i + 1, j + \frac{1}{2}, k) - T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k)}{\Delta r}. \quad (3.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - T_{rr}^{n-1}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta t} = \\
& \quad (\lambda + 2\mu) \frac{\dot{u}_r^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta r} \\
& + \frac{\lambda}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_r^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) + \dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{2} \\
& + \frac{\lambda}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_\theta^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_\theta^n(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta \theta} \\
& \quad + \lambda \frac{\dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+1) - \dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta z}. \quad (3.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - T_{\theta\theta}^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta t} = \\
& \quad c_{r\theta} \frac{\dot{u}_r^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta r} \\
& + \frac{c_{rr}}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_r^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) + \dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{2} \\
& + \frac{c_{rr}}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_\theta^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_\theta^n(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta \theta} \\
& \quad + c_{r\theta} \frac{\dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+1) - \dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta z}. \quad (3.25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{T_{zz}^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - T_{zz}^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta t} = \\
& \quad c_{r\theta} \frac{\dot{u}_r^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta r} \\
& + \frac{c_{r\theta}}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_r^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) + \dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{2} \\
& + \frac{c_{r\theta}}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_\theta^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_\theta^n(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta \theta} \\
& \quad + c_{rr} \frac{\dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k+1) - \dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta z}. \quad (3.26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{T_{\theta z}^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k) - T_{\theta z}^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta t} = & \\
& c_{\theta z} \frac{\dot{u}_{\theta}^n(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_{\theta}^n(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2})}{\Delta z} \\
& + \frac{c_{\theta z}}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - \dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k)}{\Delta \theta}. \quad (3.27)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{T_{zr}^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k) - T_{zr}^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta t} = & \\
& c_{\theta z} \frac{\dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_r^n(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2})}{\Delta z} \\
& + c_{\theta z} \frac{\dot{u}_z^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - \dot{u}_z^n(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta r}. \quad (3.28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{T_{r\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, z+\frac{1}{2}) - T_{r\theta}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, z+\frac{1}{2})}{\Delta t} = & \\
& \frac{c_{\theta z}}{r(i)} \frac{\dot{u}_{\theta}^n(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - \dot{u}_{\theta}^n(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta r} \\
& - \frac{c_{\theta z}}{r(i+\frac{1}{2})} \frac{\dot{u}_{\theta}^n(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) + \dot{u}_{\theta}^n(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{2}. \quad (3.29)
\end{aligned}$$

式 3.21-式 3.28 より応力と粒子速度を交互に計算する.

### 3.3.2 自由境界条件の設定

$\mathbf{n}$  を真空領域から  $\theta z$  平面に向かう単位法線ベクトル  $\mathbf{n} = [-1, 0, 0]$  として式 3.6 を展開することで次の式を得る.

$$T_{rr} = 0, T_{r\theta} = 0, T_{\theta z} = 0. \quad (3.30)$$

Fig.3.3 に  $r\theta$  平面における応力変数と粒子速度変数の配置を示す. Fig.3.3 中の太線部が自由境界であり, 高精度に表面波を近似するために主応力を含まない平面に自由境界を設定した [58]. ZSF を用いて自由境界を設定すれば, 境界上及び境界前後の応力変数について式 3.30 より,

$$T_{rr}|_{ii=i-\frac{1}{2}} = -T_{rr}|_{ii=i+\frac{1}{2}}, T_{r\theta}|_{ii=i} = 0, T_{rz}|_{ii=i} = 0. \quad (3.31)$$

となる. 本シミュレータでは2次精度の中心差分を用いるので, 式 3.31 にある3つの式で自由境界を設定できる. 高次精度の中心差分を用いる場合には自由境界上での応力が0となるように適宜仮想点の数を増やせば良い. 粒子速度変数  $\dot{u}_\theta$  は自由境界上に存在しないため, 真空領域中の  $\dot{u}_\theta$  と弾性体内部の  $\dot{u}_\theta$  との相加平均をとることで自由境界上における  $\dot{u}_\theta$  とする. 式 3.15, 式 3.31 より,

$$0 = \frac{c_{\theta z}}{r} \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial \theta} + c_{\theta z} \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial r} - \frac{c_{\theta z}}{r} \dot{u}_\theta \quad (3.32)$$

となる. 式 3.32 を離散化することで,

$$0 = \frac{1}{r(i)} \frac{\dot{u}_r(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - \dot{u}_r(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta \theta} + \frac{\dot{u}_\theta(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - \dot{u}_\theta(i - \frac{1}{2}, j - 1, k + \frac{1}{2})}{\Delta r} - \frac{1}{r(i)} \frac{\dot{u}_\theta(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) + \dot{u}_\theta(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})}{2} \quad (3.33)$$

となる. 式 3.33 を  $\dot{u}_\theta(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})$  について解けば,

$$\dot{u}_\theta(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) = \frac{2\Delta r}{(\Delta r - 2r(i))} \frac{\dot{u}_r(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - \dot{u}_r(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta \theta} - \frac{(2r(i) + \Delta r)}{(\Delta r - 2r(i))} \dot{u}_\theta(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) \quad (3.34)$$

となり,

$$\dot{u}_\theta(i, j, k + \frac{1}{2}) = \frac{\dot{u}_\theta(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) + \dot{u}_\theta(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})}{2} \quad (3.35)$$

であるから, 自由境界上の粒子速度  $\dot{u}_\theta(i, j, k + \frac{1}{2})$  は式 3.34, 3.35 から求めることが可能である.

自由境界上の主応力  $T_{rr}(i)$  は

$$T_{rr}(i) = \frac{T_{rr}(i + \frac{1}{2}) + T_{rr}(i - \frac{1}{2})}{2} = T_{rr}(i - \frac{1}{2}) + \frac{T_{rr}(i + \frac{1}{2}) - T_{rr}(i - \frac{1}{2})}{\Delta r} \frac{\Delta r}{2} \quad (3.36)$$

と表せる. 文献 [51] にて Ohminato らは自由境界直下の弾性体セルにおける主応力の勾配を 2 倍にすること, 式 3.31 は等価であると示した. 式 3.36 における主応力の勾配を 2 倍にすると

$$T_{rr}(i) = T_{rr}(i - \frac{1}{2}) + 2 \frac{T_{rr}(i + \frac{1}{2}) - T_{rr}(i - \frac{1}{2})}{\Delta r} \frac{\Delta r}{2} = T_{rr}(i + \frac{1}{2}) \quad (3.37)$$

となり, 真空領域中における主応力変数  $T_{rr}(i + \frac{1}{2})$  の値を 0 とすることで, 自由境界条件を満たすことが分かる. 式 3.21, 式 3.31 及びこの修正から自由境界上の  $\dot{u}_r$  は以下の式 3.38 のように表される.

$$\begin{aligned} \dot{u}_r^{n+1} = & \dot{u}_r^n(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \\ & + \frac{\Delta t}{\rho} \left\{ \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}}{2r(i)} - 2 \frac{T_{rr}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{\Delta r} + \frac{T_{\theta\theta}^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})}{2r(i)} \right\}. \end{aligned} \quad (3.38)$$

$\theta z$  平面,  $r\theta$  平面についても同様の方法で修正 ZSF を用いた自由境界条件の設定が行える.

### 3.4 ガイド波伝播シミュレーション

本節では, 構築したガイド波シミュレータを用いて配管を伝播するガイド波を計算し, 2 章 4 節で述べた群速度分散曲線と Wave Structure により本シミュレータの検証を行う. シミュレーションにおける配管寸法および送受信位置について Fig.3.4 に示す. 配管内径, 外径はそれぞれ  $0.495[m]$ ,  $0.605[m]$  とし, 配管肉厚は  $5.5[mm]$  である. 配管材質は SS400 を想定し, その物性値はヤング率を  $201[GPa]$ , ポアソン比を  $0.3$ , 密度を  $7900[kg/m^3]$  とした. メッシュ分割サイズは  $dr = 1[mm]$ ,  $d\theta = 0.0327[rad]$ ,  $dz = 1[mm]$  とし, 極力一辺が  $1[mm]$  の立方体に近づくように設定した. 配管端部にガイド波励起部を設け, ガイド波受信点をガイド波送信部から  $200[mm]$  毎に配置する. 今回のシミュレーションでは, ガイド波励起力は配管円周方向に均等に発生するものとした. T モードおよび L モードの励起を想定しそれぞれのモードにおいて以下の式で表される励起力を入力とした. 励起する波の数は 5 つである.

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 \\ W(t) \times \sin(2\pi ft) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ W(t) \times \sin(2\pi ft) \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

ここで,  $W(t)$  は窓関数であって, その式は,

$$W(t) = \exp \left\{ - \left( \frac{t - 2.5 \times 10^{-6}}{1.75 \times 10^{-6}} \right)^2 \right\} \quad (3.41)$$

である. ガイド波の受信については, 受信点における粒子速度とし, Tモードガイド波においては,

$$Y_{observe:Tmode} = \dot{u}_\theta(\mathbf{r}, \mathbf{t}), \quad (3.42)$$

Lモードガイド波については

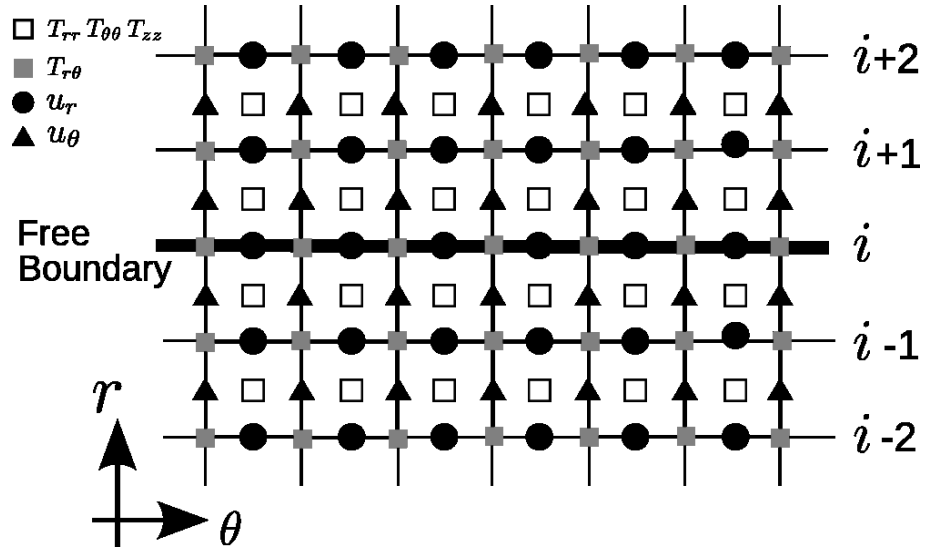
$$Y_{observe:Lmode} = \dot{u}_z(\mathbf{r}, \mathbf{t}), \quad (3.43)$$

とする. ここで,  $\mathbf{r} = (\mathbf{r}_{obs}, \theta_{obs}, \mathbf{z}_{obs})$  であり, ガイド波受信点の位置を表す位置ベクトルである.

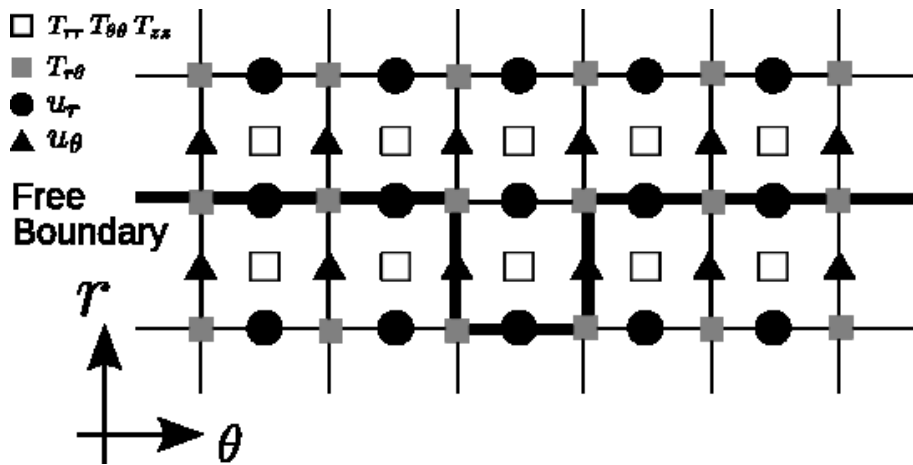
式 3.39-式 3.42 を用いてガイド波を励起, 受信した場合のシミュレーション結果を Fig.3.5 に示す. Fig.3.5 中の波形はそれぞれの受信点にて観測された波形である. Fig.3.5 中の波束の伝播速度は図の読み取り値から  $3167[m/s]$  であり, どの観測点においてもその波束は分散しておらず励起時の波形を保っている.  $4[m]$  の伝播を経てガイド波の伝播速度および励起時の波形を保持出来ていることから本シミュレータが T(0,1) モードガイド波の伝播を精度良くシミュレーション出来ていることが確認できた. 式 3.40 をもちいてガイド波を励起した場合の波形を Fig.3.6 に示す. Fig.3.6 では波束が2つ見られるが, それぞれの波束の伝播速度がそのゼロクロス値より  $5327[m/s]$ ,  $2617[m/s]$  である

ことからそれぞれ  $L(0,1)$  モードおよび  $L(0,2)$  モードであると考えられる。  $L(0,1)$  モードの波束においては後半波形の乱れが見られるが、これは 2 章 4 節にて述べたように、  $L(0,2)$  モードガイド波が周波数による速度分散性を比較的大きく持つからである。ゼロクロス値によるガイド波の伝播速度がよく一致していることから  $L(0,1)$  モード、  $L(0,2)$  モードガイド波についても本シミュレータは精度良くシミュレーション出来ていることが確認できた。





(a)



(b)

Fig. 3.3: Layout of the variables in an  $r\theta$  plane. The location of the zero-stress free boundary is shown by heavy solid line. (a) is planar free surface, (b) is with a concave corner in which the normal stress component in the cell is shared by adjacent cells.

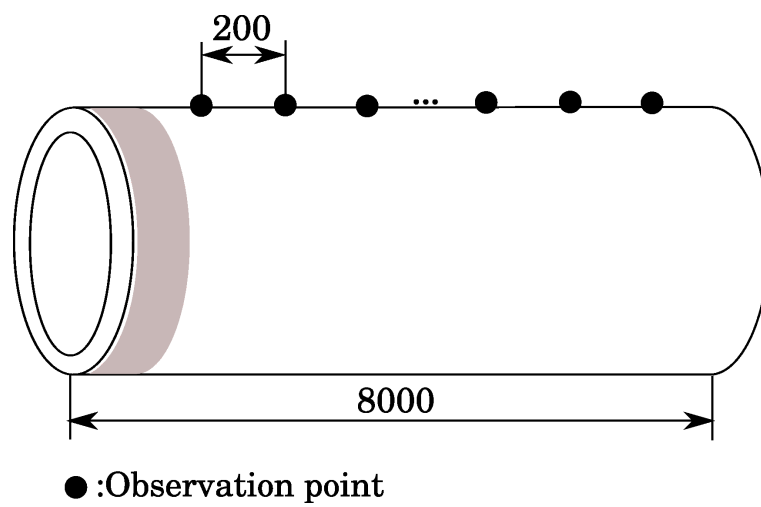


Fig. 3.4: Schematic illustration of the simulation experiment. Black circles represent the observation points and the hatching area represents the guided wave excitation area.

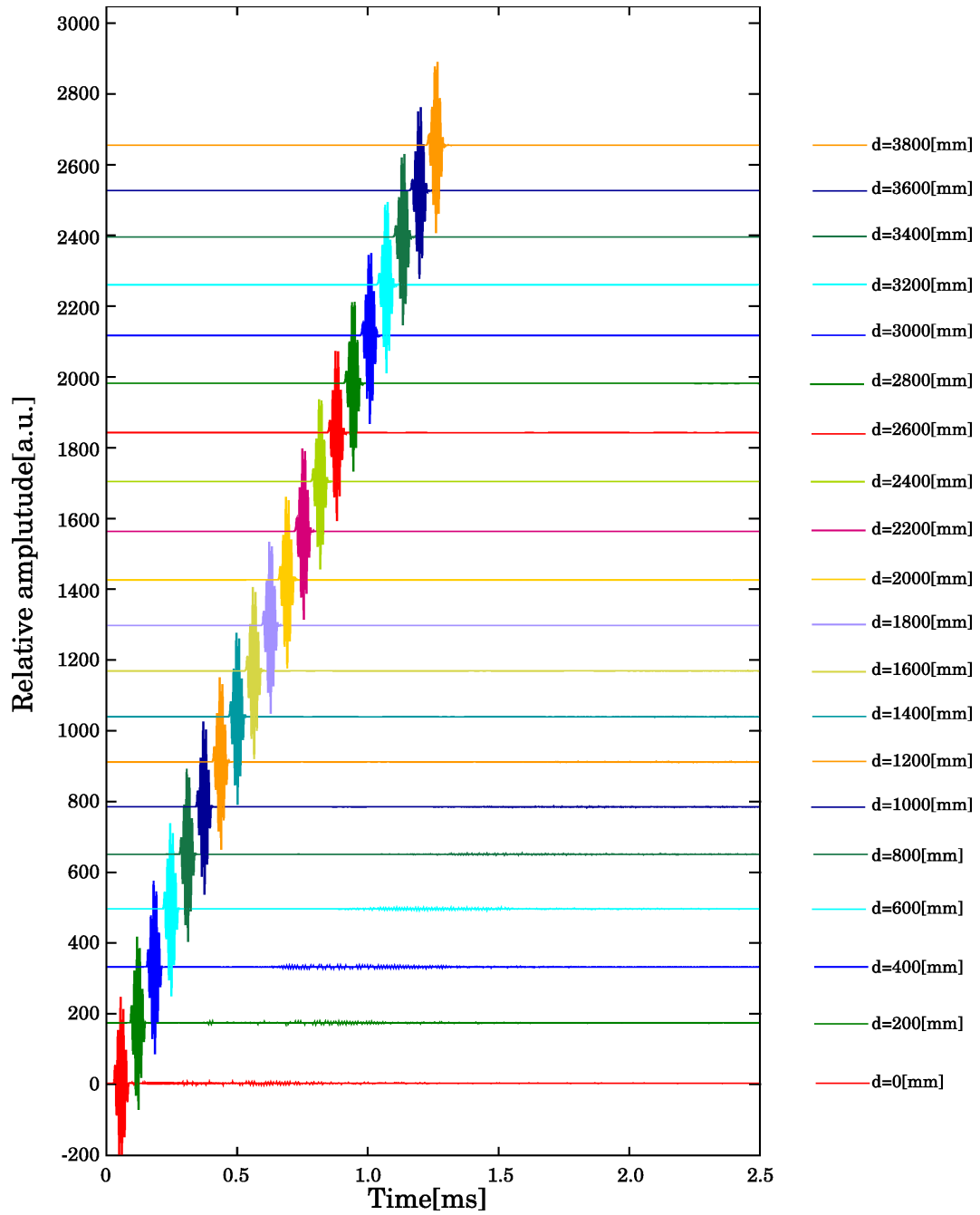


Fig. 3.5: Simulation experiments results: T(0,1) mode guided wave.

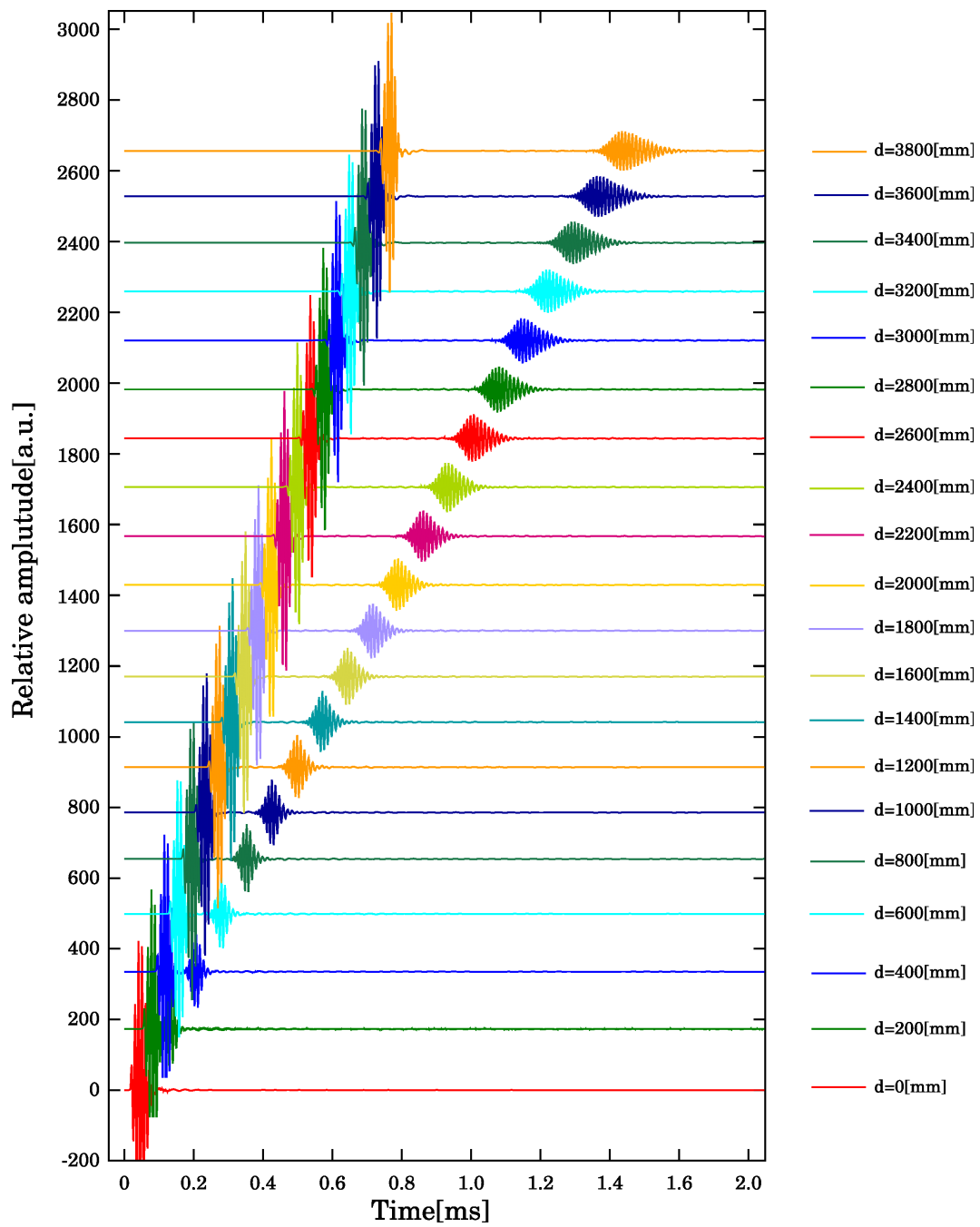


Fig. 3.6: Simulation experiment results: L(0,1), L(0,2) mode guided wave.

# 第4章 EMATを用いたガイド波検査システム の構築

## 4.1 はじめに

本章では, EMAT を用いたガイド波検査システムについて述べる. 1章で述べたように, 現状のガイド波検査システムはPZT素子を用いたものとMsSを用いたものが主流であるが, PZT素子を用いたものは高価で治具, カップラントが必要など現場適用性が低く, MsSを用いたものはガイド波の制御性が低いといったデメリットがあった. ガイド波検査法の持つ可能性をさらに引き出すためには, これらのデメリットを克服し, 安価, 丈夫, 耐環境性能が良く, ガイド波の制御性の高いガイド波検査システムの開発が必要であり, 本研究ではEMATを用いてガイド波検査システムを構築することで解決を図る.

ガイド波検査法においてはTモードガイド波およびLモードガイド波が一般に使用される [7]. この理由は, Tモードガイド波はガイド波にみられる速度分散性が全くなく, 単一のモードが励起しやすい, 振動方向が配管ねじり方向であって, 配管内部に液体があった場合でも減衰が少ないことが挙げられる. 速度分散性がないことや単一のモードの励起が容易なことから検査後の波形の解析・解釈が容易であって, 非破壊検査によく適合したモードであるからである. Lモードガイド波は速度分散性があり, 2つのモードが同時に励起するもののその速度差は大きく, 速度分散も周波数帯域によっては十分小さいことから非破壊検査に使用されることが多い. 特にTモードと比較して反射波の強度が大きいといった特徴がある. また Udpa ら [30] によって2つのモードを信号処理技術によって分離しそれぞれの波形解析を行うことで欠陥形状を可視化する方法が報告されるなど, その特徴を活かした高度な検査方法も報告され始めていること

から大きな潜在能力をもつモードであると言える。開発するガイド波検査システムは、従来の PZT, MsS 型ガイド波検査システムのデメリットを克服しかつ非破壊検査に有用な T モード, L モードガイド波の両方を励起可能であることが望ましい。

## 4.2 システム概要

本節では作成した EMAT ガイド波検査システムの概要について述べる。Fig.4.1 にガイド波検査システムの構成を示し、実際の装置を Fig.4.2 に示す。本システムはパルスレシーバ、プリアンプ、ガイド波送信用 EMAT アレイ、ガイド波受信用 EMAT アレイ、デジタルオシロスコープから構成される。パルスレシーバ、プリアンプはそれぞれジャパンプローブ製 JPR-600C, PR-60 を使用する。パルスレシーバによって交流電流を励起し、受信用 EMAT で得られた電圧をプリアンプで増幅、PC でフィルタ処理を施し表示する。

送信用 EMAT および受信用 EMAT には高温環境でも使用可能なサマリウムコバルト磁石 [53] を使用する。EMAT の形状は、2 つの磁石を使用したいわゆる水平 SH 波型 EMAT を使用する。この理由は、水平 SH 波型 EMAT は磁性体材料に対してその励起力が概ね磁束に沿った方向に働き [56]、T モードおよび L モードガイド波を選択的に励起しやすいと考えたからである。送信用 EMAT アレイ、受信用 EMAT アレイは配管の円周方向に対してその数を増やせば増やすほど励起するガイド波の強度と受信信号の強度を上げることが可能であるが、本研究においては配管の寸法的な制約から、円周方向に等間隔に 8 つ設置することとした。ガイド波励起強度および受信感度を向上させるため、送信用 EMAT アレイは直列に、受信用 EMAT は並列に接続 [44] することとした。送信用 EMAT のコイルの詳細については Table.4.1 にまとめ、実際に使用したコイルを Fig.4.3 に示した。EMAT の形状、寸法に関する詳細は Fig.4.4 に示した。

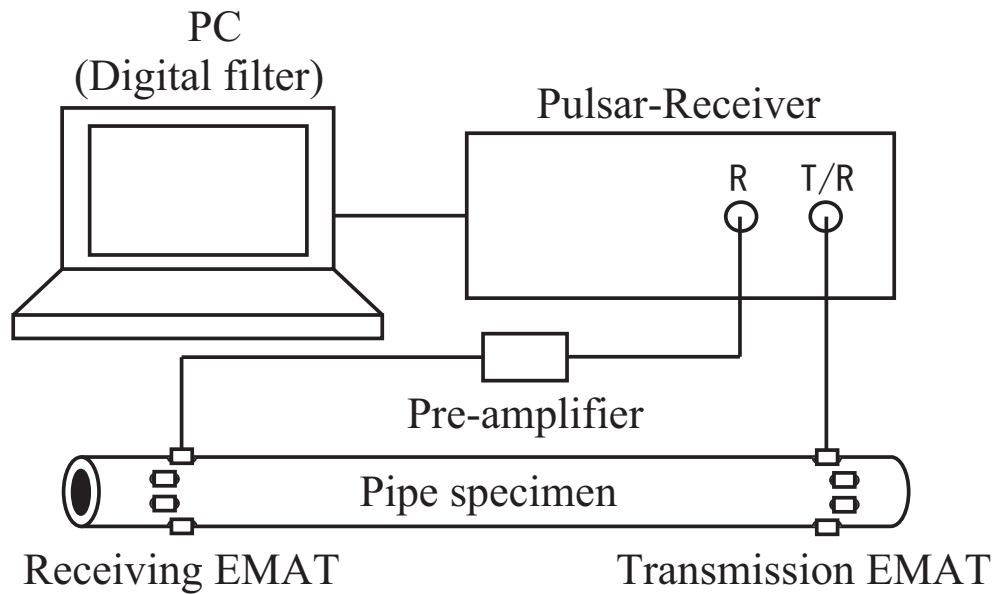


Fig. 4.1: Schematic illustration of the guided wave testing system for guided wave transmitting and receiving experiment. The system is composed of the Digital Oscilloscope and filter, pulse-receiver, pre-amplifier, transmitting and receiving EMAT ring array. The pulser-receiver and pre-amplifier is made by Japan Probe Co. Ltd. :JPR-600C and PR-60.

### 4.3 ガイド波送受信実験

本節では、構築したガイド波検査システムを用いて T モード, L モードガイド波送受信実験を行う. 3 章 3 節で構築したガイド波シミュレータを用いて実験で得られた結果の検証を行う. ガイド波検査システムの構成は 4 章 2 節で示した通りとし, パルサレシーバ, プリアンプの設定を以下の Table.4.2 に示した通りとする. 試験体の材質, 寸法については Table.4.3 に示す.

実験にあたって, 今回使用する試験配管に対応するガイド波の群速度分散曲線を導出し, 群速度の理論値を示しておく. 実験で用いる配管試験材 No.1, 群速度分散曲線をそれぞれ Fig.4.5 に示した. また, 今回の実験で使用する周波数 100[kHz] における試験体 No.1 の T(0,1) モード, L(0,1) モード, L(0,2) モードの群速度はそれぞれ, 3166[m/s], 2822[m/s], 5273[m/s] である.

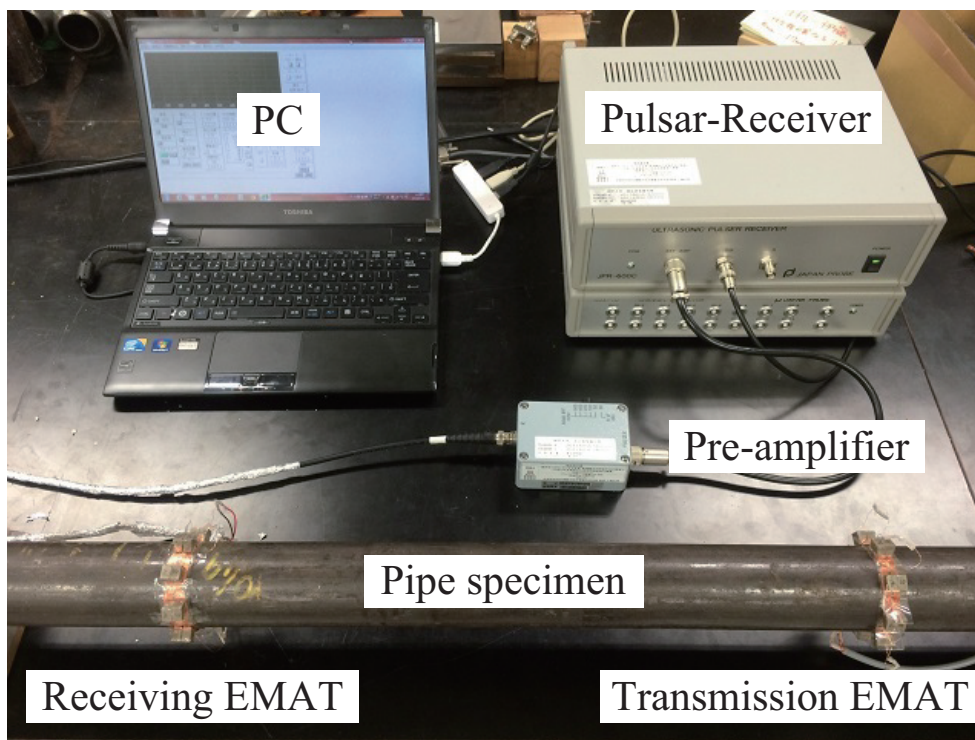


Fig. 4.2: Overview of the guided wave testing system.

### 4.3.1 Tモードガイド波

最初に、配管試験体 No.1 を用いて実験と対応したシミュレーションを行う。本実験で用いる水平 SH 波型 EMAT ではその超音波励起力は磁性体に対して概ね磁束に沿って働く [56]。Tモードガイド波を励起させるため磁束方向が配管円周方向に沿うように配置し、その具体的な EMAT の配置方法の模式図を Fig.4.6 に、送信用 EMAT アレイと受信 EMAT アレイの位置を Fig.4.7 に示す。シミュレーション実験における EMAT 励起力のモデルは、単純に EMAT 直下の領域に円周方向の超音波励起力が発生するものとし、以下の式のように設定する。

$$\mathbf{F} = [0, W(t) \cdot \sin(2\pi ft), 0] \quad (0 < t < 5T_s), \quad (4.1)$$

ここで、 $\mathbf{F}$  は外力ベクトル、 $W(t)$  は窓関数、 $T_s$  は超音波励起時間である。今回は窓関数としてガウス窓を使用し、以下の式で表される。

$$W(t) = \exp \left\{ - \left( \frac{t - 2.5 \times 10^{-6}}{1.75 \times 10^{-6}} \right)^2 \right\} \quad (0 < t < 5T_s). \quad (4.2)$$





Fig. 4.3: Coils for the EMAT used in the guided wave testing system. (a) is for transmitting EMAT ring array, (b) is for receiving EMAT ring array.

Table 4.1: Dimension of EMAT coils

|                           |       | For transmitter | For receiver |
|---------------------------|-------|-----------------|--------------|
| Internal diameter<br>[mm] | Major | 20.0            | 20.0         |
|                           | Minor | 1.0             | 1.0          |
| Wire diameter [mm]        |       | 0.26            | 0.18         |
| Number of turns           |       | 15              | 30           |

超音波受信モデルについては、受信点における円周方向の粒子速度とし、以下の式で表す。

$$y_{Tmode}(\mathbf{r}, t) = \dot{u}_\theta(\mathbf{r}, t). \quad (4.3)$$

ここで、 $\mathbf{r} = (r_{obs}, \theta_{obs}, z_{obs})$  は観測点の位置ベクトルであり、 $r_{obs}, \theta_{obs}, z_{obs}$  はそれぞれ観測点の  $r$  方向座標、 $\theta$  方向座標、 $z$  方向座標である。シミュレーション時の設定は以下の Table.4.4 に纏める。

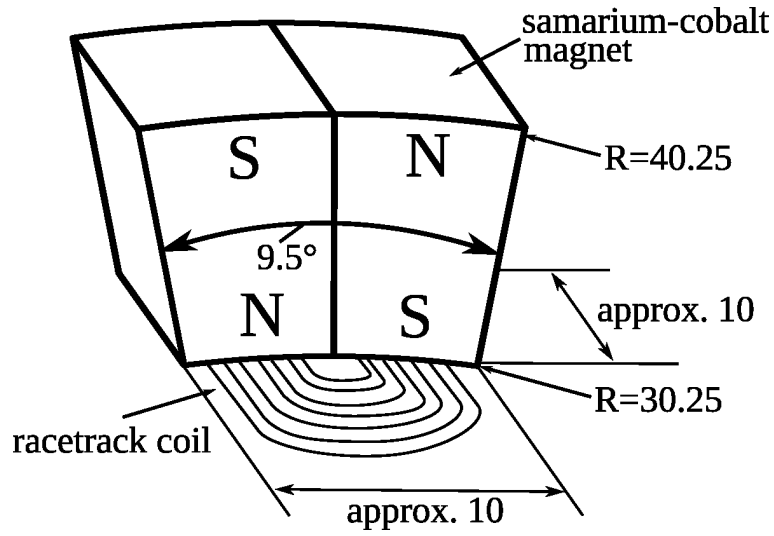


Fig. 4.4: Schematic illustration of the pair of the magnet used in the guided wave testing system and its dimensions. The material is samarium-cobalt.

Table 4.2: Experimental setup of the EMAT devices

| Mode   | Pulsar         |     | Receiver |      | Pre-amplifier |    |
|--------|----------------|-----|----------|------|---------------|----|
| T-mode | Voltage[V]     | 450 | Gain[dB] | 30.1 | Gain[dB]      | 60 |
|        | Frequency[kHz] | 100 | HPF[kHz] | 70   | -             | -  |
|        | Cycle          | 5   | LPF[kHz] | 130  | -             | -  |
| L-mode | Voltage[V]     | 600 | Gain[dB] | 40.2 | Gain[dB]      | 60 |
|        | Frequency[kHz] | 100 | HPF[kHz] | 70   | -             | -  |
|        | Cycle          | 5   | LPF[kHz] | 130  | -             | -  |

Table 4.3: Dimension of test pipe specimens

| Parameter             | Specimen No.1        |
|-----------------------|----------------------|
| Material              | Carbon Steel (SS400) |
| Length[mm]            | 1000                 |
| Outer Diameter        | 60.5                 |
| Inner Diameter        | 49.5                 |
| Young's Modulus [GPa] | 207                  |
| Poisson Ratio         | 0.3                  |
| Density[ $kg/m^3$ ]   | 7900                 |

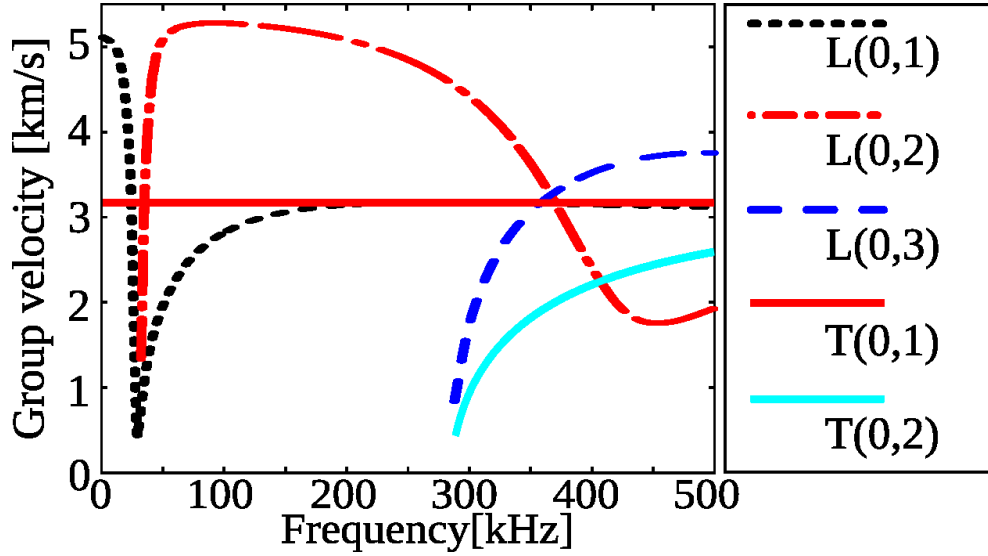


Fig. 4.5: Group velocity dispersion curves of the pipe specimen used in the experiments. Black dashed line, red chain line, blue dashed line, red solid line and Gray solid line represent L(0,1) mode, L(0,2) mode, L(0,3) mode, T(0,1) mode and T(0,2) mode. Dimensions of the pipe specimen is follows: the inner and outer diameter are  $0.495[m]$  and  $0.605[m]$ . Young's Modulus, Poisson ratio and Density is  $207 \times 10^9$ ,  $0.3$ ,  $7.9 \times 10^3$ , respectively.

Table 4.4: Parameters in the simulation experiment

|                      |        |
|----------------------|--------|
| Frequency[kHz]       | 100    |
| dt[ $\mu s$ ]        | 10     |
| Young's modulus[GPa] | 207    |
| Poisson ratio        | 0.3    |
| Density [ $kg/m^3$ ] | 7900   |
| dr, dz [mm]          | 1      |
| d $\theta$ [rad]     | 0.0327 |

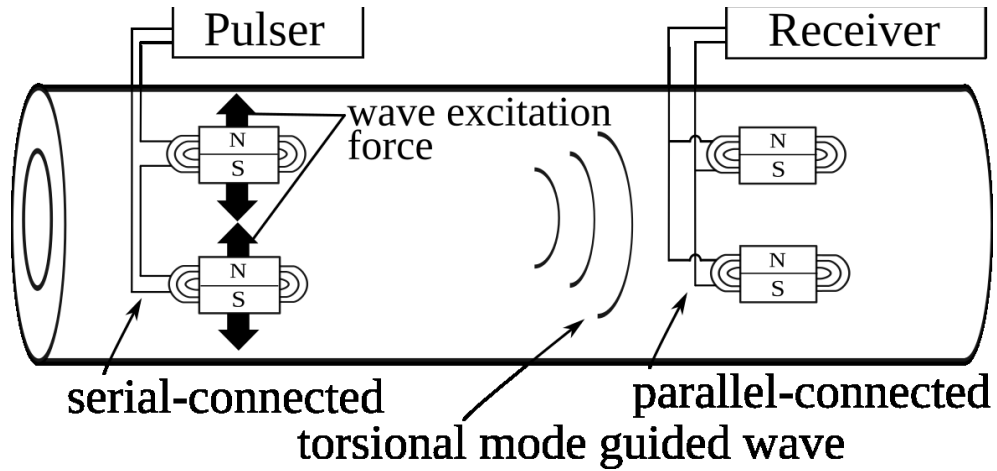


Fig. 4.6: Layout method for torsional mode guided wave excitation and reception using EMAT ring array. EMATs for transmitter are serial-connected and EMATs for receiver are parallel-connected in order to enhance the signal intensity. Black arrows represent the direction of the guided wave excitation force.

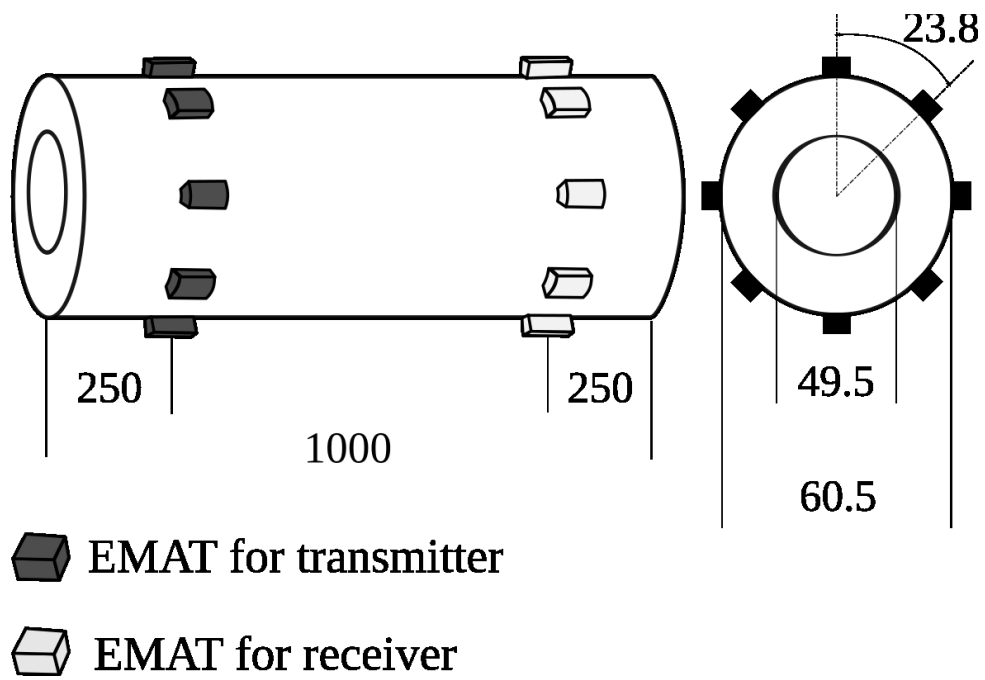


Fig. 4.7: Simulation and Experimental setup. The dark gray cubes are EMATs for transmitter and the light gray cubes are for receiving EMATs. 8 EMATs are allocated at regular interval in the circumferential direction. The pipe length, inner and outer diameter are  $1.0[m]$ ,  $0.495[m]$  and  $0.605[m]$ , respectively.

実験波形と同シミュレーション波形を Fig.4.8 に示す. Fig.4.8 中の緑色点線がシミュレーション波形, 赤実線が実験波形である. 実験波形にある最初のサチュレーション部分は不感帯である. Fig.4.8 中のからは Fig.4.9 に示した伝播経路を通して観測点で観測された波束 (Wave Bullet) である. にあたる波束は観測されるものと配管端で反射した波束が重複して観測されており, 他の波束より大きく観測される. T(0,1) モードの群速度から求めた理論的な TOF(Time of Flight), 実験波形の TOF, シミュレーション波形の TOF を Table.4.5 にまとめる. 実験波形とシミュレーション波形のからの波束の群速度は理論値とよく一致しており, その波形プロファイルもよく一致している.

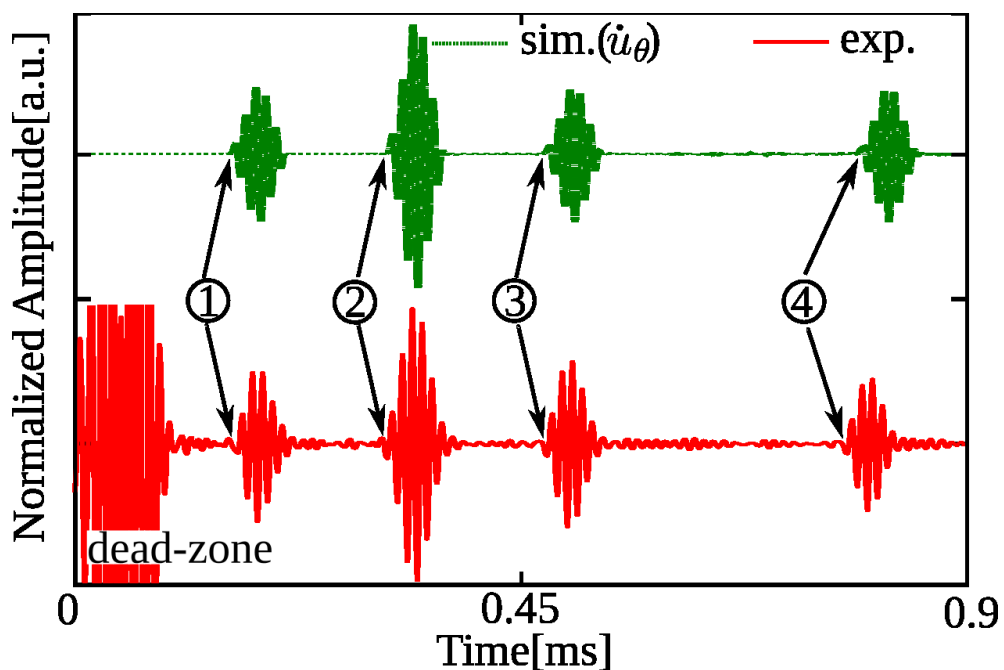


Fig. 4.8: Comparison between simulation and experimental result: dashed green line and solid red line represent simulation waveform and experimental waveform. The circled numbers represent the propagation path of the guided wave shown in the Fig.4.9.

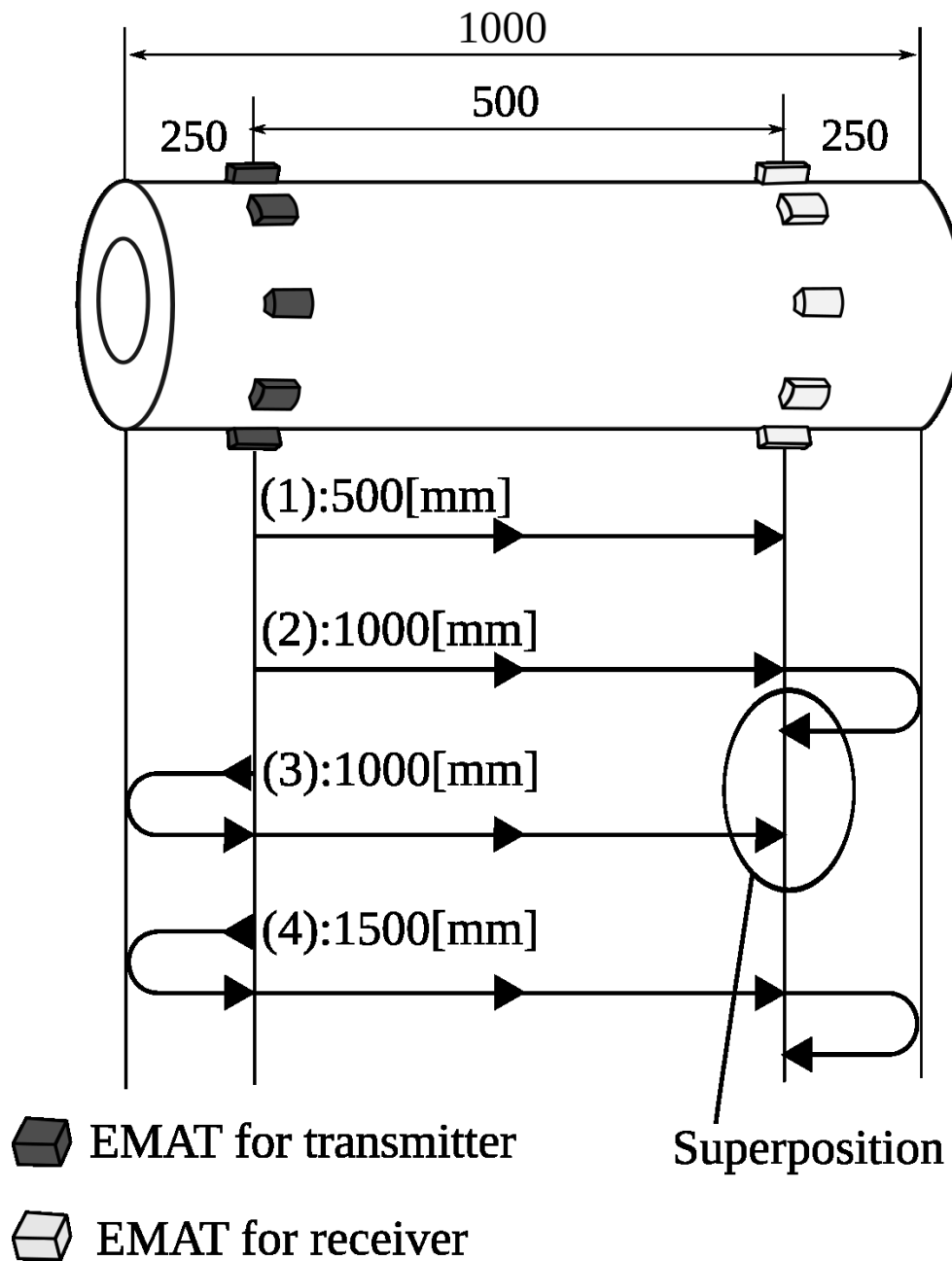


Fig. 4.9: Schematic illustration of the propagation paths and the superposition of that the guided wave reflected from the left-end and right-end of encounter at. Dark gray cubes represent transmitting EMAT and light gray represent receiving EMAT.

Table 4.5: Comparison between Time of Flights and group velocities form simulation and experiments (torsional mode guided wave).

| Wave Bullet Index           | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| TOF(Simulation)[ $\mu s$ ]  | 153.6 | 312.3 | 458.8 | 785.8 |
| TOF(Experiment)[ $\mu s$ ]  | 153.6 | 308.2 | 465.4 | 774.9 |
| TOF(Theoretical)[ $\mu s$ ] | 157.9 | 315.8 | 473.7 | 789.6 |

### 4.3.2 Lモードガイド波

Lモードガイド波送受信実験について述べる. Lモードガイド波は配管長手方向の変位成分からなるモードであるから EMAT の超音波励起力が長手方向に発生するように Fig.4.10 に示すように配置する. 最初に配管試験体 No.1 を対象にし, 実験とシミュレーション波形の比較と TOF の解析を行う. 送受信用 EMAT の配置位置は Fig.4.7 と同様である. シミュレーションにおける励起モデルは, 超音波励起力が配管長手方向に働くことから, EMAT 直下に以下の式で表される力が働くとする.

$$\mathbf{F} = [0, 0, W(t) \cdot \sin(2\pi ft)] \quad (0 < t < 5T_s). \quad (4.4)$$

ここで, 窓関数  $W(t)$  は式 4.2 と同様である. ガイド波受信モデルについても Tモードガイド波と同様に考え, 観測点における粒子速度の長手方向成分とし, 以下の式のようにする.

$$y_{Lmode}(\mathbf{r}, t) = \dot{u}_z(\mathbf{r}, t). \quad (4.5)$$

Fig.4.11 に配管試験体 No.1 における実験とシミュレーション波形を示す. Fig.4.11 中の青破線がシミュレーション波形であり, 赤実線が実験波形である. Fig.4.5 に示した群速度分散曲線より, 本実験で用いた 100[kHz] の励起周波数では L(0,1) モードと L(0,2) モードの2つのモードが励起する. Fig.4.11 中のからの波束の TOF におよび L(0,1) モー



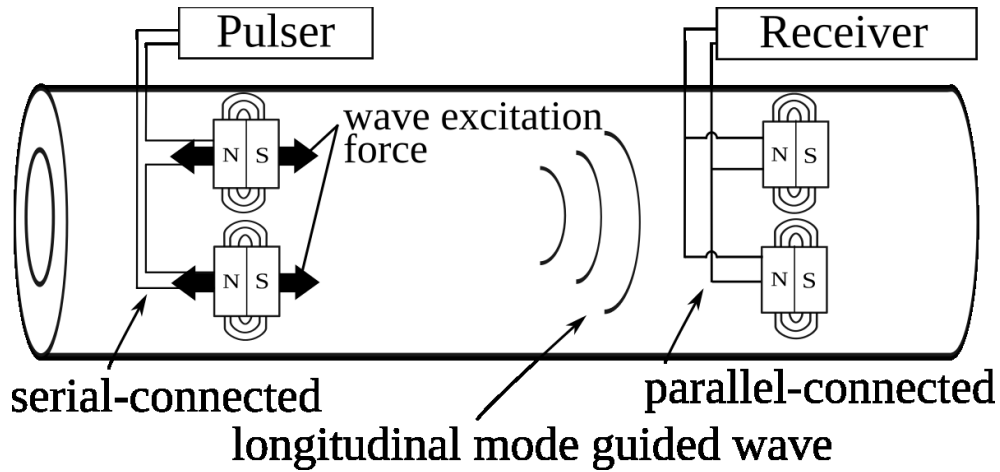


Fig. 4.10: Layout method for longitudinal mode guided wave excitation and reception using EMAT ring array. EMATs for transmitter are serial-connected and EMATs for receiver are parallel-connected in order to enhance the signal intensity. Black arrows represent the direction of the guided wave excitation force.

ド,  $L(0,2)$  モードの群速度理論値より求めた TOF について Table.4.6 にまとめた. 波束については不感帯によってその立ち上がりを確認出来ないため NA とした. Fig.4.9 に示したガイド波の伝播経路と併せて考察すれば, からの波束は, が  $L(0,2)$  モードの経路 (1), が  $L(0,2)$  モードの経路 (2) と経路 (3) および  $L(0,1)$  の経路 (1) の合成波, が  $L(0,2)$  モードの経路 (4), が  $L(0,1)$  モードの経路 (2) および経路 (3) の合成波となる.  $L$  モードガイド波送受信実験においても波束の TOF と波形のプロファイルはよく一致しており, TOF の解析結果もよく一致している.

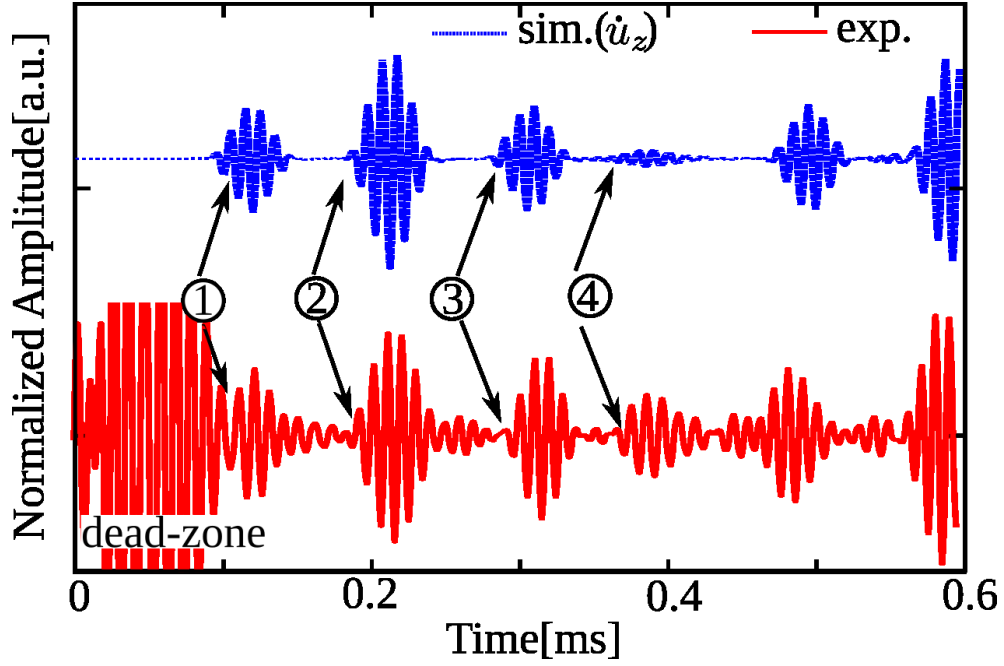


Fig. 4.11: Comparison between simulation and experimental result of longitudinal mode guided wave. Blue dashed line and red solid line represent simulation waveform and experimental waveform. The circled numbers represent the guided wave propagation path in Fig.4.9.

Table 4.6: Comparison between Time of Flights and group velocities from simulation and experiments (longitudinal mode guided wave).

| Wave Bullet Index                  | 1    | 2     | 3     | 4     |
|------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| TOF(Simulation)[ $\mu s$ ]         | 90.0 | 185.2 | 289.8 | 355.2 |
| TOF(Experiment)[ $\mu s$ ]         | NA   | 184.6 | 288.4 | 368.0 |
| TOF(Theoretical:L(0,1))[ $\mu s$ ] | NA   | NA    | NA    | 354.3 |
| TOF(Theoretical:L(0,2))[ $\mu s$ ] | 94.8 | 189.6 | 284.4 | NA    |

## 4.4 まとめ

本章では, EMAT を用いてガイド波検査システムを構築し, 同ガイド波検査システムでガイド波非破壊検査法に有用な T モードガイド波および L モードガイド波の送受信が可能であることを確認した. 送受信実験に用いた配管は一般的は SS400 炭素鋼配管である. T モードガイド波の送受信では, 送信用 EMAT の磁束が配管円周方向となるように配置し, 配管円周方向に超音波励起力が発生するようにした. 受信用 EMAT も同様に配置し, 配管円周方向の振動成分に対して信号を得るようにした. 実験波形はシミュレーション波形および群速度分散曲線を用いて評価し, ガイド波の伝播経路とその TOF から T(0,1) モードの送受信が行われていることを確認した. L モードガイド波の送受信では, 送信用 EMAT の磁束が配管長手方向と成るように配置した. 配管長手方向に超音波励起力が発生するようにし, 受信用 EMAT も同様に配置した. 実験波形はシミュレーション波形および群速度分散曲線を用いて評価した. ガイド波の伝播経路とその TOF から L(0,1) モード, L(0,2) モードガイド波が励起されていることを確認した. 本システムによって励起される T モードガイド波は T(0,1) モードが支配的であって, L モードガイド波は L(0,1) モードと L(0,2) モードが支配的であることを確認した.

# 第5章 配管減肉検出実験

## 5.1 はじめに

本章では4章で構築したガイド波検査システムを用いて配管減肉検査実験を行う。ガイド波非破壊検査法に有効な  $T(0,1)$  モード,  $L(0,2)$  モードガイド波を用いて配管内部に設けた人工減肉の検出とそれぞれのモードでの検出信号の強度について考察する。人工減肉は配管内部に全周にわたって施し, 実際の配管減肉を模する。3章で構築したシミュレータによる数値実験を行い, 実験結果の検証を行う。ガイド波検査システムは4章と同様なシステムを使用する。減肉検出実験に使用したパルスレシーバ, プリアンプ, フィルタの設定は Table.5.1 に示し, シミュレーションにおける各種パラメータは Table.5.2 に示す。減肉検出実験に使用する配管試験体は2本であって, その寸法を Table.5.3 にまとめる。Table.5.3 の配管減肉寸法に関するパラメータは Fig.5.1 中に示した。

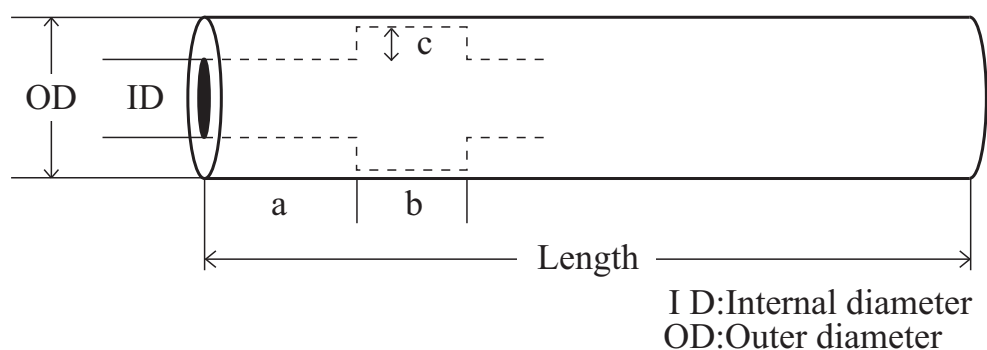


Fig. 5.1: The Guided Wave Testing model.

Table 5.1: Experimental setup of the EMAT devices

| Mode   | Pulsar         |     | Receiver |      | Pre-amplifier |    |
|--------|----------------|-----|----------|------|---------------|----|
| T-mode | Voltage[V]     | 450 | Gain[dB] | 30.1 | Gain[dB]      | 60 |
|        | Frequency[kHz] | 100 | HPF[kHz] | 70   | -             | -  |
|        | Cycle          | 5   | LPF[kHz] | 130  | -             | -  |
| L-mode | Voltage[V]     | 600 | Gain[dB] | 40.2 | Gain[dB]      | 60 |
|        | Frequency[kHz] | 100 | HPF[kHz] | 70   | -             | -  |
|        | Cycle          | 5   | LPF[kHz] | 130  | -             | -  |

Table 5.2: Simulation setup in the crack detection experiment.

|                      |        |
|----------------------|--------|
| Frequency[kHz]       | 100    |
| dt[ $\mu s$ ]        | 10     |
| Young's modulus[GPa] | 207    |
| Poisson ratio        | 0.3    |
| Density [ $kg/m^3$ ] | 7900   |
| dr, dz [mm]          | 1      |
| d $\theta$ [rad]     | 0.0327 |

Table 5.3: Dimension of test pipe specimens

| No. | Material            | Length<br>[mm] | OD<br>[mm] | ID<br>[mm] | Corrosion |       |       |
|-----|---------------------|----------------|------------|------------|-----------|-------|-------|
|     |                     |                |            |            | a[mm]     | b[mm] | c[mm] |
| 1   | Carbon steel(SS400) | 1200           | 57.0       | 46.0       | 100       | 50    | 2.75  |
| 2   | Carbon steel(SS400) | 1200           | 57.0       | 46.0       | 100       | 50    | 0.55  |

## 5.2 T(0,1) モードによる減肉検出実験

最初に T(0,1) モードガイド波を用いた配管減肉検出実験を行う。配管減肉検出実験におけるシステムの概要図, 配管寸法, EMAT の配置を Fig.5.2 に示す。T(0,1) モードガイド波の送受信を行うために EMAT をその磁束が配管円周方向となるように配置する (Fig.4.6)。EMAT は円周方向に等間隔に 8 つ並べ, 送信用 EMAT アレイではそれぞれの EMAT を直列に, 受信用 EMAT アレイではそれぞれの EMAT を並列に接続する。Fig.5.3 - Fig.5.4 に実験結果とシミュレーション結果を示す。Fig.5.3 は減肉パラメータ  $c = 2.75[mm]$  であり, Fig.5.4 は  $c = 0.55[mm]$  に対応する。

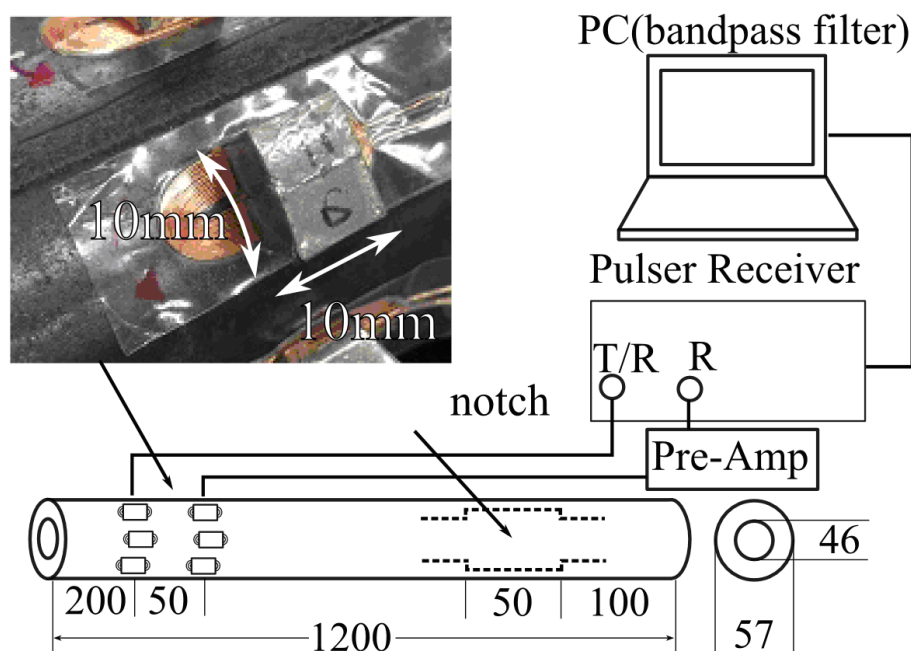


Fig. 5.2: Schematic illustration of the experimental setup of the pipe wall thinning detection experiment. The system is composed of pulser receiver(JPR-600C), pre-amplifier(PR-60), transmitting and receiving EMAT ring array. The pipe specimen is SS400 carbon steel: 1200[mm] length, 0.495[mm] inner diameter and 0.605[mm] outer diameter

Fig.5.3, Fig.5.4 中に見られる, 波束は大きく分けて 4 つである。伝播時間の早い方からそれぞれ不感帯, 送信用 EMAT から直接観測された波束, 配管減肉からの反射波, 配

管端からの反射波である。分散曲線より求めた当該配管試材における  $T(0,1)$  モードガイド波の伝播速度より配管減肉端からの反射波到達位置を Fig.5.3, Fig.5.4 中に縦線で示してある。  $c = 0.55[mm]$  に対応する Fig.5.4 では、シミュレーション波形においては小さな減肉端からの反射波のピークが確認出来るものの、実波形においては確認が困難である。実波形においては本来信号のないはずの位置に幾つかのピークが見られ、これらに減肉検出信号が埋もれているためである。このようなピークの原因であるが、まず EMAT の配置による隙間によって、配管に対して超音波励起力が均一に発生していないことが挙げられる。配管円周方向にガイド波の強度の差が存在し、受信用に配置した EMAT の位置と相まってこのような信号を受信していると考えられる。2点目としては本実験にて用いた EMAT の精度が挙げられる。EMAT のコイルの形状、コイルと磁石の位置およびその向きによってこれらの信号を受信したと考えられる。  $c = 2.75[mm]$  に対応する Fig.5.3 では、Fig.5.4 と同様にシミュレーションでは見られない波束が見られるものの、その減肉からの反射波の強度から十分に視認が可能である。その減肉からの反射波のピークの位置がシミュレーション及び理論値よりも早くに観測されているのは物性値の違いによるものであると考えられる。

減肉からの反射波のピーク値と受信用 EMAT で観測される波束のピークの比を反射率とし、減肉率と反射率をグラフにしたものを Fig.5.5 に示す。ここで、Fig.5.5 の黒丸が実験値、緑十字がシミュレーション値であって、赤実線がシミュレーション値の補間値である。実験における反射率の値はそれぞれ 0.085, 0.27 である。  $c = 2.75[mm]$  時においてシミュレーション値と値が異なるのは、EMAT の隙間によって発生した高次モードガイド波の円周方向成分を受信しているからであると考えられる。

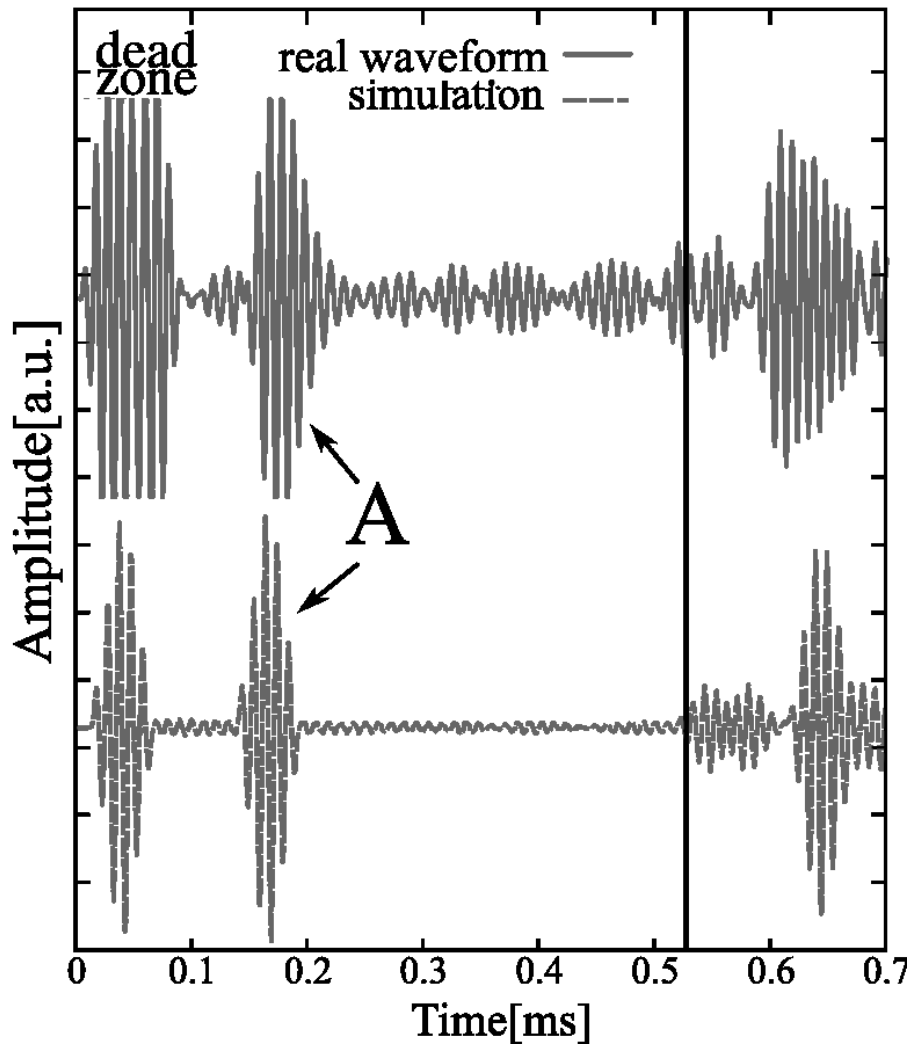


Fig. 5.3: Simulation and experimental results of pipe wall thinning detection with L(0,2) mode guided wave. The pipe wall thinning rate is 50%. Green solid line, red solid line and blue solid line represent experimental waveform, simulation (with 50% pipe wall thinning) waveform and simulation (without pipe wall thinning) waveform.



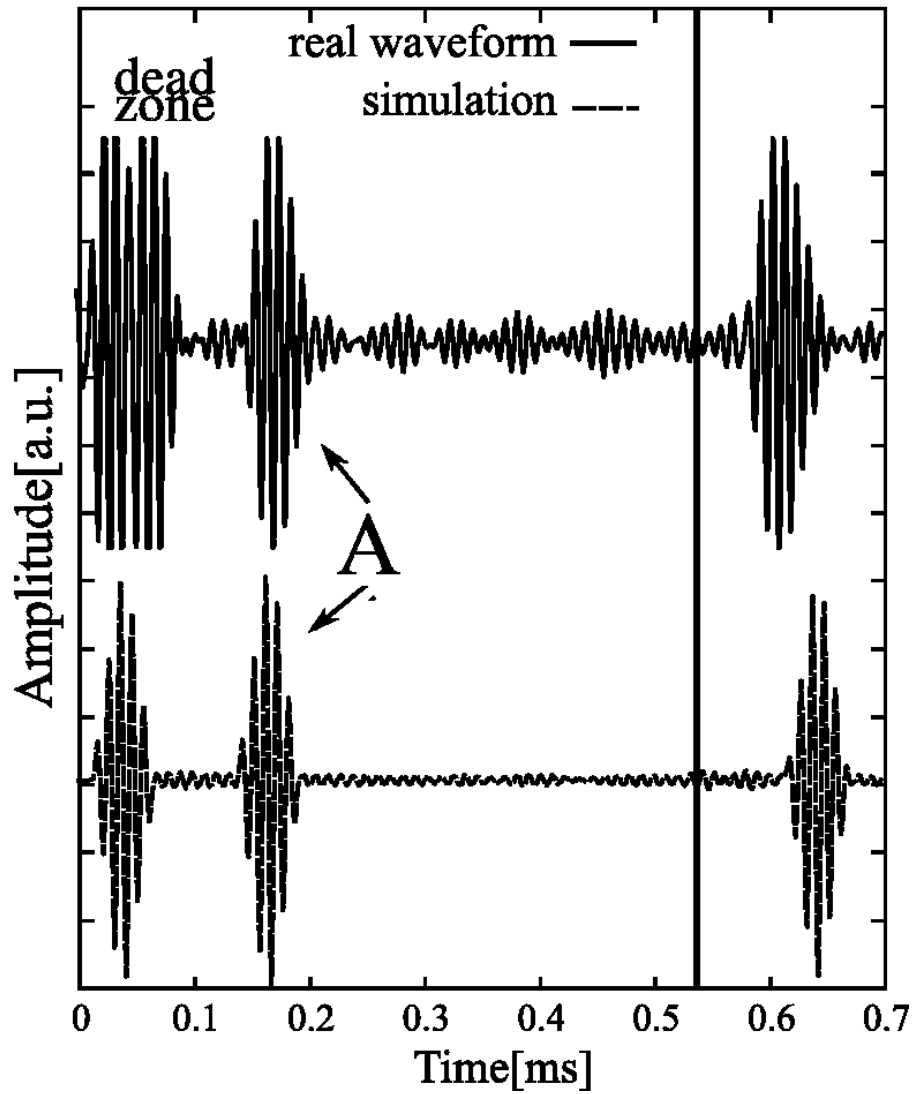


Fig. 5.4: Simulation and experimental results of pipe wall thinning detection with L(0,2) mode guided wave. The pipe wall thinning rate is 50%. Green solid line, red solid line and blue solid line represent experimental waveform, simulation (with 50% pipe wall thinning) waveform and simulation (without pipe wall thinning) waveform.

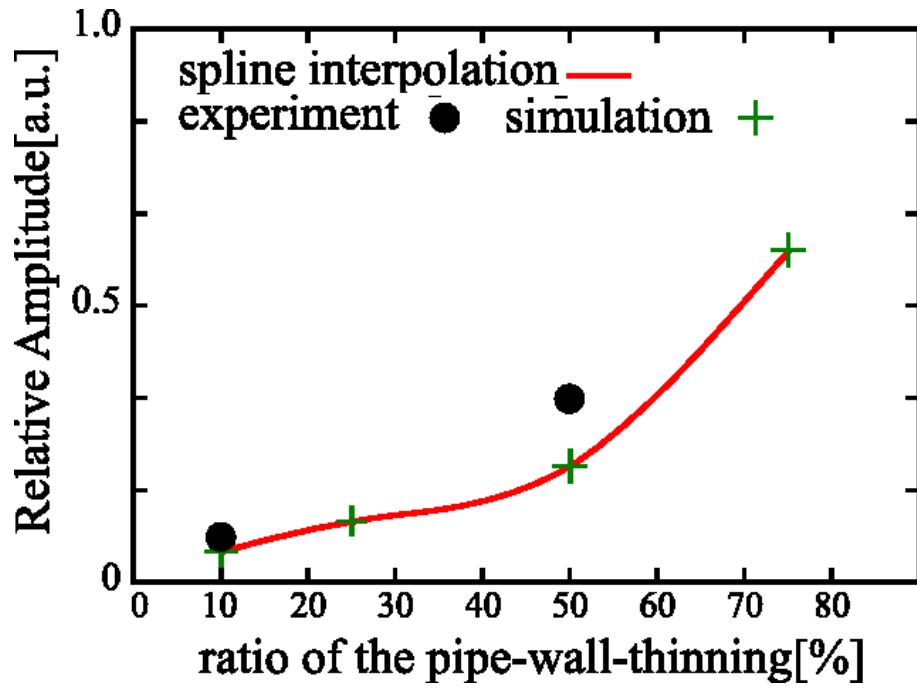


Fig. 5.5: The relation between Pipe wall thinning detection signal intensity and the actual pipe wall thinning rate. Black circles, green crosses and red solid line represent experimental results simulation results and interpolation of the simulation results.

### 5.3 L(0,2) モードによる減肉検出実験

次に L(0,2) モードガイド波を用いて配管減肉検査実験を行った場合の実験結果とシミュレーション結果を示す。実験条件は T(0,1) モードにおける減肉検出実験と同様であるが、減肉部からの信号の判別のため、減肉を有さない健全な配管に対してのシミュレーションを同時に行った。Fig.5.6 が  $c = 2.75[mm]$  減肉 (減肉率 50%) であり、Fig.5.7 が  $c = 0.55[mm]$  (減肉率 10%) である。図中の緑実線が実験波形であり、赤実線が減肉を有する配管に対するシミュレーション波形、青実線が減肉を有さない配管に対するシミュレーション結果である。Fig.5.6, Fig.5.7 中にみられる波束は、大きく分けて 5 つである。時間の早い方から順に不感帯、受信点で直接観測された L(0,2) モード、受信点で直接観測された L(0,1) モード、減肉部から反射した L(0,2) モード、配管端部から反射した L(0,2) モードガイド波である。実験波形およびシミュレーション波形はその波形のプロファイルはよく一致しており、L(0,2) モードガイド波において配管減肉を検出出来ていることが確認できる。

$c = 0.55[mm]$  および  $c = 2.75[mm]$  どちらの場合においても減肉検出信号を十分に視認できているが、シミュレーション波形における減肉検出信号強度は実験波形と比較して小さい。これは EMAT の受信メカニズムによるものである。EMAT は超音波を以下の式に基づいて検出する。

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}_m \times \frac{\partial \dot{\mathbf{u}}}{\partial t}. \quad (5.1)$$

磁石の発生させる環境磁場に対して、配管媒質の変位との外積により求められる誘導起電力をそのコイルでピックアップするそのメカニズムのため、L モードガイド波のための EMAT 配置方法では長手方向変位及び半径方向変位の両方を誘導起電力として得る。シミュレーションでは、その出力を単純に受信点における長手方向変位としているためこのような強度に差が発生したと考えられる。T(0,1) モードを用いた減肉検出実験と同様に、EMAT の隙間による高次モードガイド波の影響が見られるが、T モードガイド波に比べてその影響は小さい様に思われる。波束の位置のずれに関しても物性値による音速の違いが原因と考える。受信用 EMAT で直接観測される波束のピークと減

肉部からの反射波のピークの比を反射率として、減肉率と反射率の関係をグラフにしたものを Fig.5.8 に示す。図中の緑丸が実験値であって図中の赤四角がシミュレーション値であって黒実線が補間である。  $c = 0.55[mm]$ ,  $c = 2.75[mm]$  における反射率は 0.18, 0.41 であり、いずれも実験値がシミュレーション値を上回っているがこの原因は今述べた通りである。

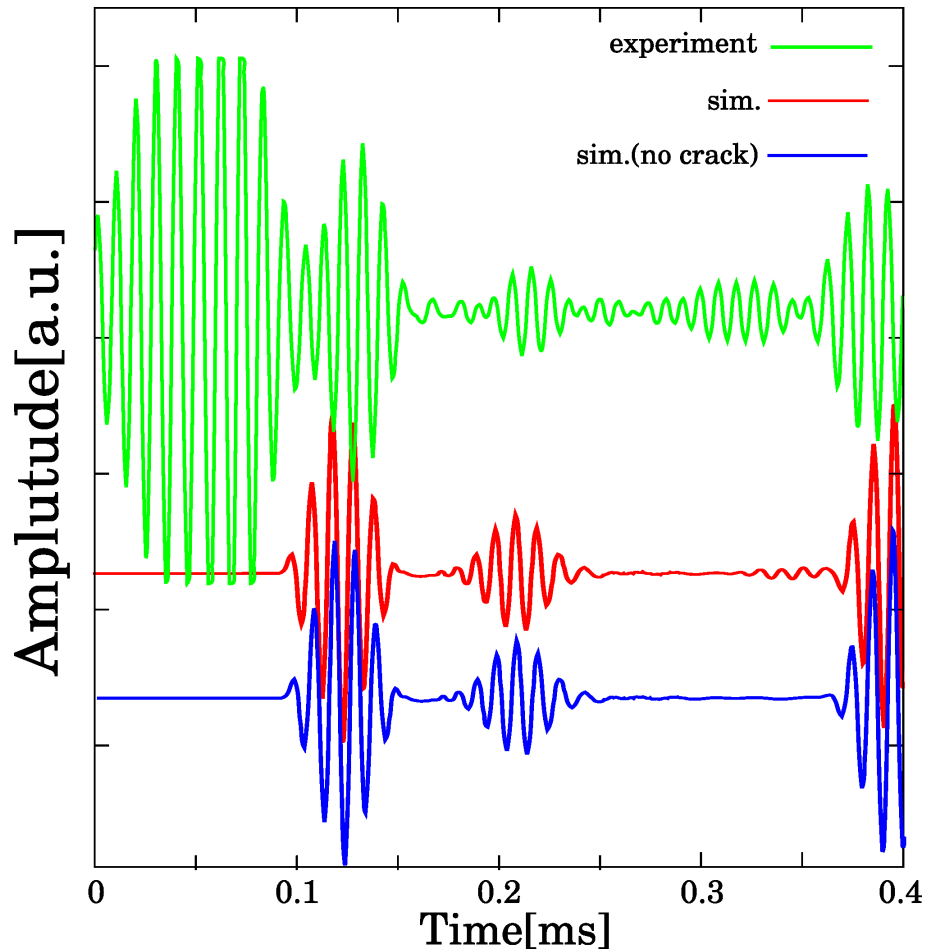


Fig. 5.6: Simulation and experimental results of pipe wall thinning detection with L(0,2) mode guided wave. The pipe wall thinning rate is 50%. Green solid line, red solid line and blue solid line represent experimental waveform, simulation (with 50% pipe wall thinning) waveform and simulation (without pipe wall thinning) waveform.

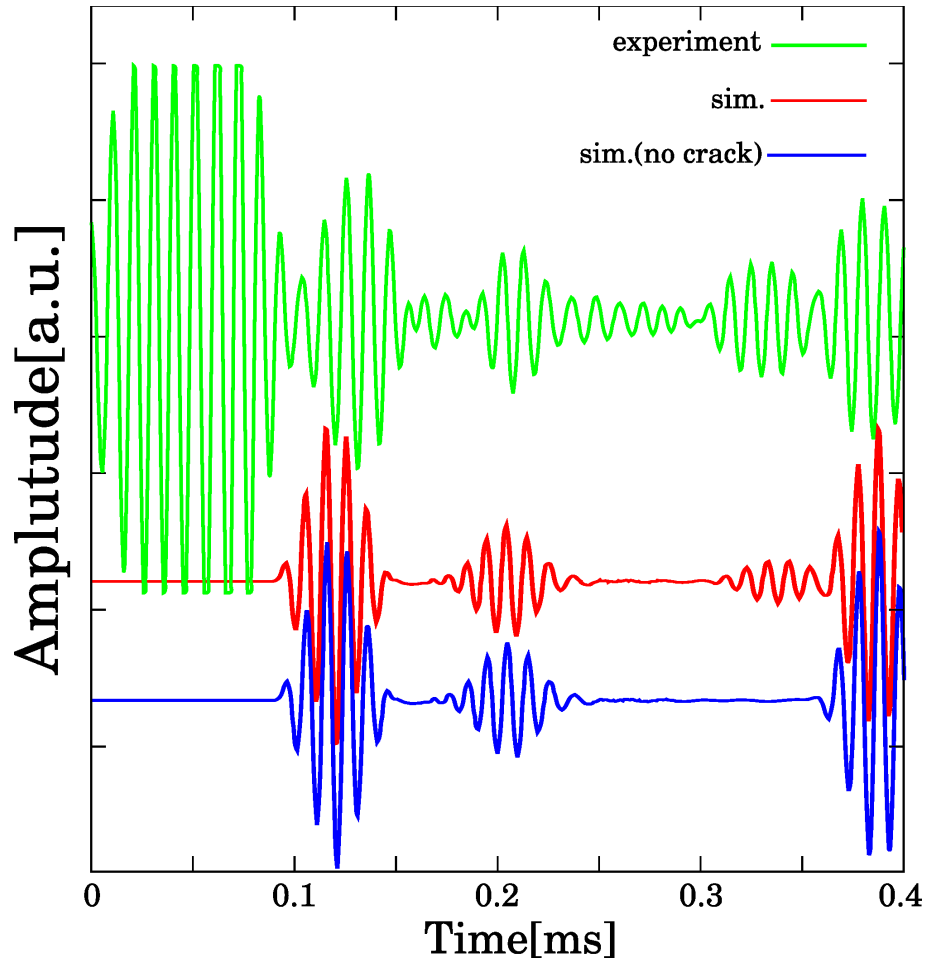


Fig. 5.7: Simulation and experimental results of pipe wall thinning detection with  $L(0,2)$  mode guided wave. The pipe wall thinning rate is 10%. Green solid line, red solid line and blue solid line represent experimental waveform, simulation (with 10% pipe wall thinning) waveform and simulation (without pipe wall thinning) waveform.

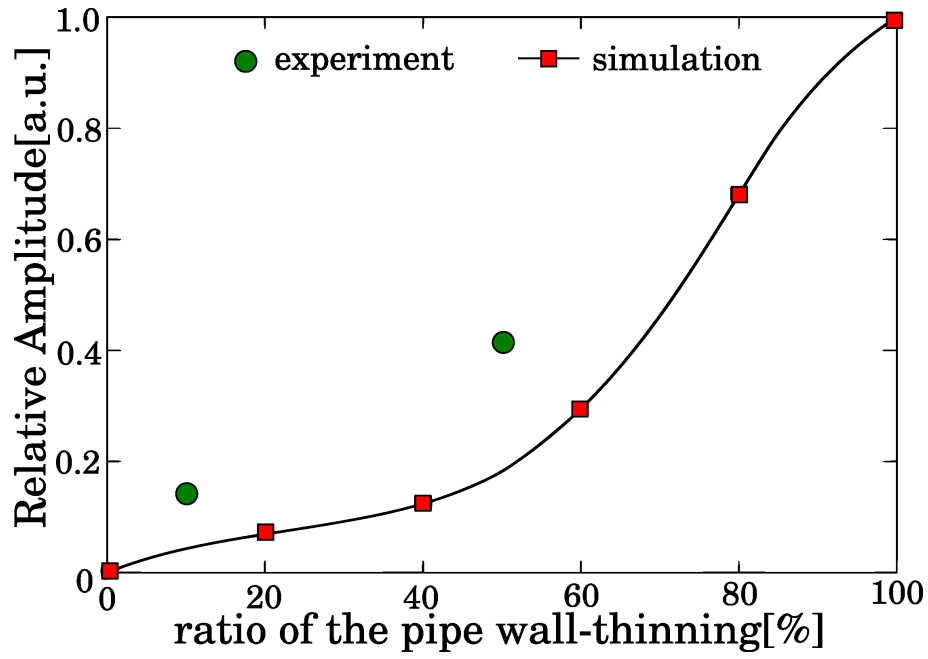


Fig. 5.8: The relation between Pipe wall thinning detection signal intensity and the actual pipe wall thinning rate. Black circles, green crosses and red solid line represent experimental results simulation results and interpolation of the simulation results.

## 5.4 まとめ

本章では, EMAT を用いたガイド波検査システムを用いて配管減肉が検出可能であることを検証した. 配管減肉検出実験にもちいたガイド波のモードはガイド波非破壊検査法に一般に使用される  $T(0,1)$  モードおよび  $L(0,2)$  モードを使用した. 検査対象とした配管試験体の材質は一般的な炭素鋼配管とし, 実験に際して設けた人工減肉の形状は全周型のノッチ形状とし配管内部に設けた. 減肉深さは配管健全部肉厚に対して 10% および 50% とした.  $T(0,1)$  モードガイド波を用いた配管減肉検出結果では, 減肉率が 10%, 50% の場合それぞれで検出信号強度が 0.085, 0.27 であった. 減肉率 10% であった場合にはほぼ検出信号が視認できない程度の強度となった. 減肉率が 50% であった場合には十分に検出信号を視認出来る程度の強度であり, 波束のピークが 2 つ確認出来ることから, 減肉の両端から反射を確認できる.  $L(0,2)$  モードを用いた配管減肉検出実験においては, 減肉率が 10%, 50% の場合, それぞれの検出信号強度は 0.18, 0.41 であり, いずれも十分に視認可能なレベルの強度が得られた. 十分な強度が得られた一方  $L(0,2)$  モードガイド波を用いた検出信号は, 実験シミュレーションとともにその波束のピークが一つであり, 今回の実験条件においては, 減肉両端からの反射を検出信号から確認出来なかった. これらの結果は,  $T(0,1)$  モードガイド波による減肉検出はその欠陥検出感度が低いものの分解能が  $L(0,2)$  モードと比較して高く,  $L(0,2)$  モードは検出信号強度が  $T(0,1)$  モードと比較して高いものの分解能が低いことを示している. ガイド波検査においては検査状況や目的によって適切なモードを選択することが効果的であり, 本システムでは励起モードの選択が容易に出来ることから十分にそのポテンシャルがあることが確認できた.

## 第6章 逆解析法による減肉形状推定

### 6.1 はじめに

日本非破壊検査協会の非破壊検査通則 NDIS[7] に規定される通り、現行のガイド波非破壊検査法は TOF(Time of Flight) をもちいたパルスエコー法が主流である。しかしながらパルスエコー法では欠陥の大まかな位置しか特定することが出来ず、配管減肉の形状、特にその深さについて同定することが難しい。実際の配管減肉形状は円周方向に偏りがあり、長手方向に概ね半楕円形になることが知られている [1]。

1 章でも述べたように、現行の配管減肉管理規程 [2, 3, 4] ではこのような配管減肉に対して円周方向に 8 点、長手方向には 20[mm] 毎 (場合によってはさらに詳細に) に配管肉厚を測定している。しかしながら測定点が離散的であって、配管減肉形状に偏りが存在する以上、現行の検査方法では配管減肉の最大減肉点を見落とす可能性がある。配管破断は最大減肉部位より発生すると考えられるので、配管減肉形状、特にその最大減肉部位とその深さを同定することが重要である。ガイド波はその性質上配管全体に限なく伝播するので、ガイド波の減肉検出信号から最大減肉部位の深さや減肉形状を復元することが可能であると考えられる。

ガイド波を用いた欠陥形状の復元については至近いくつかの報告がある。Udpa ら [30] は MP 法を用いて励起したガイド波のモードを分離し、それぞれのモードの伝播速度の違いや欠陥検出信号の強度の変化などを総合的に利用して欠陥部位を可視化する方法を報告している。Nishimura ら [31] は簡易モデルに対して欠陥部の配管長手方向の長さをパラメータとして与え、欠陥部からの超音波ガイド波反射率のルックアップテーブルを作成し行う方法を報告している。Wang ら [57] は解析的な逆問題方法で欠陥形状を復元する方法を提案している。しかし文献 [30],[57] に報告された方法は適用対象が



平板であり, [31] の報告では減肉形状の同定を対象としていない。

POD(Proper Orthogonal Decomposition:正規直行分解)法はKarhune Loeve展開[59], または主成分分析[60]として知られ, 様々な領域で応用されている。POD法は動的な系に対する実験または数値計算により準備された測定データ集合から, そのデータ集合をはる基底(POD基底)を求める手法である。POD基底を用いて元の系の禁じモデルを構築することが可能であり, 流体の時間発展型数値計算, 最適制御, 人の表情認識など応用は多岐に渡る[61, 62, 63]。非破壊検査に対するPOD法の応用はBanksら[64], Nguyenら[65]が報告している。Banksらは数値計算によって準備した事前データからPOD法による近似モデルを構築し, その近似モデルを用いた逆解析を測定データを行うことで欠陥形状の同定が可能であることを示した。NguyenらはBanksらの手法を3次元に拡張し同手法による欠陥形状同定精度を向上させている。

本章では超音波ガイド波非破壊検査法にPOD法を用いた逆問題解析を適用することで, 配管内部の欠陥(減肉)形状推定する方法を示し, 数値計算実験によって本手法の有効性を検証する。形状推定対象とする減肉形状は長手方向長さ, 最大限肉深さ, 円周方向減肉幅および円周方向減肉位置の4つのパラメータを用いて表現することとし, 実際の配管減肉形状を模する。3次元ガイド波検査シミュレータに複数の減肉形状パラメータを与えて事前データセットを用意し, POD法による近似モデルを構築する。同シミュレータによる検査データにノイズを付加することで文字測定データを準備し, 模擬測定データに対して逆問題解析を行い減肉形状パラメータを推定する。

## 6.2 減肉形状推定問題の定式化

### 6.2.1 減肉形状モデル

本研究では, 徐々に配管肉厚が薄くなる減肉部が直管内に一つあり, ガイド波励起部, ガイド波受信部, 減肉部がこの順に配置される場合を対象とする(Fig.6.1)。ガイド波励起部では配管の円周方向に一様に力が加わり, 理想的なねじりモードガイド波(Tモードガイド波)が励起されるものとする。本研究でねじりモードガイド波が励起される場

合を対象としたのは、このモードがガイド波特有の速度分散を起こさず、配管内部に液体があった場合にも減衰しにくい特徴を持つことから非破壊検査への応用、特にオンラインでの使用に適していると考えられるためである。ガイド波受信部では、配管のねじり方向の変位のみ測定し、受信部は円周方向に複数点設置されるものとする。減肉部は配管長手方向長さ、最大減肉深さ、円周方向減肉幅および円周方向減肉開始位置の4つのパラメータを用いて、長手方向に楕円型、円周方向には矩形型に近似する (Fig.6.2)。ここで、 $q_1, q_2, q_3$  および  $q_4$  はそれぞれ配管長手方向長さ、最大減肉深さ、円周方向減肉幅および円周方向減肉開始位置を表す。減肉形状推定問題は、この配管減肉形状パラメータ  $q_1, \dots, q_4$  の値をガイド波検出信号から推定する問題として定義する。

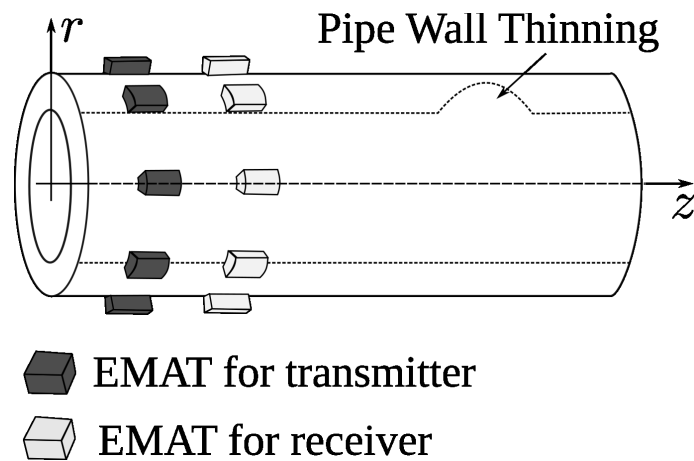


Fig. 6.1: The Guided Wave Testing model.

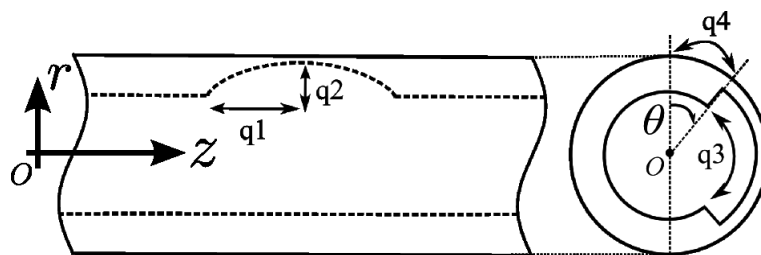


Fig. 6.2: Shape of the simulated Pipe-Wall-Thinning and parameters.

## 6.2.2 POD 近似モデル構築と逆解析手順

最初に,3章で述べたガイド波検査シミュレータを用いて減肉形状パラメータベクトル  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4)$  に対する, 減肉検出波形データセット  $\{y(\mathbf{q})\}_j^{N_s}$  を作成する. ここで,  $1 \leq j \leq N_s$  であり,  $N_s$  は減肉形状パラメータの組み合わせの総数である. 次に以下の式に示す様に固有値と固有ベクトルを求め, 正規直交化する.

$$\mathbf{C}\mathbf{V} = \lambda\mathbf{V}. \quad (6.1)$$

$$\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq 0. \quad (6.2)$$

$$\mathbf{V}_i \cdot \mathbf{V}_j = \frac{\delta_{ij}}{N_s \cdot \lambda_i}, \delta_{ii} = 1, \delta_{ij} = 0 (i \neq j). \quad (6.3)$$

但し, 式 (6.1) 中の行列  $\mathbf{C}$  の要素  $[C]_{ij}$  は以下の様に求める. ここで,  $\langle \rangle$  は内積を表す.

$$[C]_{ij} = \langle y(\mathbf{q}_i), y(\mathbf{q}_j) \rangle. \quad (6.4)$$

式 (6.1) より得られた固有ベクトル  $\mathbf{V}_i$  を用いて以下の様に POD 基底ベクトル  $\Phi$  を求める.

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^{N_s} \mathbf{V}_i(j) \cdot y(\mathbf{q}_j). \quad (6.5)$$

但し,  $\mathbf{V}_i(j)$  は固有値  $\lambda_i$  に対する固有ベクトルの  $j$  番目の要素を表し,  $\Phi_i$  は POD 基底ベクトルの  $i$  番目の要素を表す. 式 (6.5) を用いて計算した POD 基底ベクトルを用いて, 減肉検出波形は以下の様に表される.

$$y(\mathbf{q}_j) = \sum_{k=1}^{N_s} \alpha_k(\mathbf{q}_j) \Phi_k. \quad (6.6)$$

ここで,  $\alpha$  は以下の式で表される係数ベクトルである. 但し, 添字  $k$  は  $\Phi$  の  $k$  番目の要素を表す.

$$\alpha_k(\mathbf{q}_j) = \langle y(\mathbf{q}_j), \Phi_k \rangle. \quad (6.7)$$

ここまでで, POD 基底ベクトル  $\Phi$  と係数ベクトル  $\alpha$  を用いて, 元のデータセット  $\{y(\mathbf{q})\}_i^{N_s}$  を復元可能となった. 次に, 元のデータセットにおける減肉形状パラメータ  $\mathbf{q}$  の範囲で, 任意の減肉形状パラメータ  $\tilde{\mathbf{q}}$  に対応する減肉検出波形を近似可能とするよう以下の様に係数ベクトルの拡張を行う.

$$\alpha(\tilde{\mathbf{q}}) = \frac{1}{16} \sum_{t=1}^{16} (1 \pm \tilde{q}1)(1 \pm \tilde{q}2)(1 \pm \tilde{q}3)(1 \pm \tilde{q}4)\alpha_t \quad (6.8)$$

但し,

$$\tilde{q}1 = \frac{(2(q1 - q1_m))}{q1_{m+1} - q1_m} - 1, \quad (6.9)$$

$$\tilde{q}2 = \frac{(2(q2 - q2_n))}{q2_{n+1} - q2_n} - 1, \quad (6.10)$$

$$\tilde{q}3 = \frac{(2(q3 - q3_p))}{q3_{p+1} - q3_p} - 1, \quad (6.11)$$

$$\tilde{q}4 = \frac{(2(q4 - q4_r))}{q4_{r+1} - q4_r} - 1, \quad (6.12)$$

$$\alpha_t = \alpha(q1_i, q2_j, q3_k, q4_l), \quad (6.13)$$

$$i \in m, m+1, j \in n, n+1, k \in p, p+1, l \in r, r+1, \quad (6.14)$$

$$\tilde{q}1_m \text{ and } \tilde{q}1_{m+1} \in q1 : q1_m \leq \tilde{q}1 \leq q1_{m+1}, \quad (6.15)$$

$$\tilde{q}2_n \text{ and } \tilde{q}2_{n+1} \in q2 : q2_n \leq \tilde{q}2 \leq q2_{n+1}, \quad (6.16)$$

$$\tilde{q}3_p \text{ and } \tilde{q}3_{p+1} \in q3 : q3_p \leq \tilde{q}3 \leq q3_{p+1}, \quad (6.17)$$

$$\tilde{q}4_r \text{ and } \tilde{q}4_{r+1} \in q4 : q4_r \leq \tilde{q}4 \leq q4_{r+1}. \quad (6.18)$$

式 (6.6) と同様に, 以下の様に  $y(\tilde{\mathbf{q}})$  を求めることが可能となる.

$$y(\tilde{\mathbf{q}}) \approx \sum_{k=1}^{N_s} \alpha_k(\mathbf{q}_j) \Phi_k. \quad (6.19)$$

ガイド波検査シミュレータにより事前に用意した減肉検出波形データセットから 6 章 2 節にて示した POD 近似モデルを構築する. POD 近似モデルに対して任意の減肉形状パラメータを与え対応する減肉検出波形を得る. 解析対象となる測定信号と POD 近似モデルより得た信号との差を最小にする波形に対応する減肉形状パラメータを求め, ここから減肉形状を推定する. 信号間の差は以下の式のように, 測定信号と POD 近似モデルによる信号との残差平方和によって評価する. この一連の逆問題解析手順を Fig.6.3 に示す.

$$\min J(\tilde{\mathbf{q}}) = \sum |y_d - y(\tilde{\mathbf{q}})|^2 \quad (6.20)$$

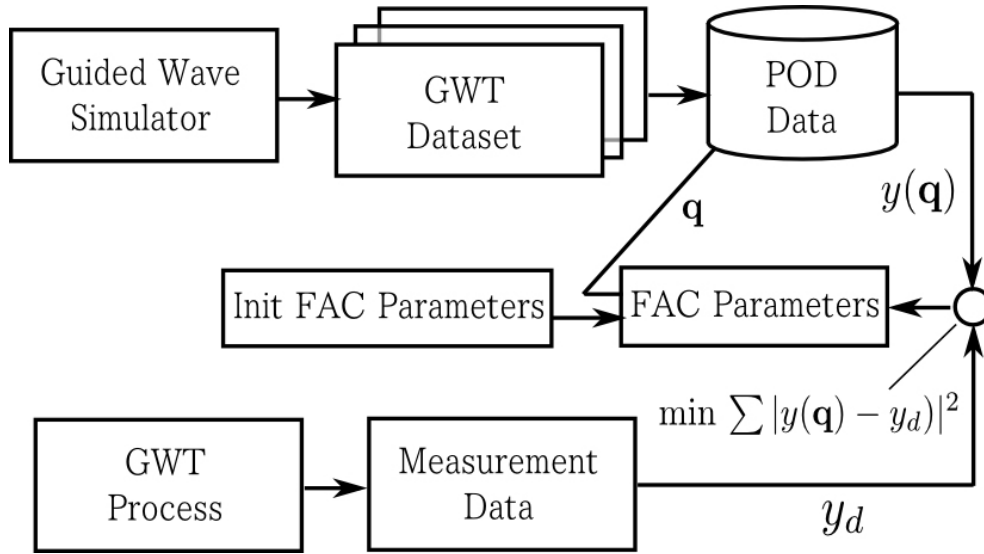


Fig. 6.3: Schematic illustration of the algorithm to identify the shape of pipeline defect with POD reduced order model and inverse analysis.

## 6.3 減肉形状推定実験

### 6.3.1 POD 近似モデルの有効性

提案手法の有効性を数値実験にて確認するため、最初に3章にて構築したPOD近似モデルの有効性を検証する。ガイド波検査シミュレータに以下に説明する寸法パラメータと減肉形状パラメータを入力し得られる減肉検出波形と、POD近似モデルに対して同様の減肉形状パラメータを入力し得られる減肉検出波形とを比較し、そのプロファイルの違いの程度を確認する。対象とするガイド波検査モデルはFig.6.1示した直管に一つのガイド波送信部と円周方向に等間隔に配置されたガイド波受信部と減肉部がこの順に配置されるものとし、その寸法をFig.6.4に示す。但し、今回は配管の両端からの反射波の影響を無くするため配管の長さは十分に長いものとし、配管材質はSS400とした。

ガイド波励起部では以下の式(6.21)に示す外力が働くとする。

$$\mathbf{F} = [F_r \ F_\theta \ F_z]^T = [0 \ W(t) \cdot \sin(2\pi ft) \ 0]^T. \quad (6.21)$$

ここで、 $W(t)$  はガウス型の窓関数であり、周波数  $f$  はこのスケールの検査において通常使われる  $50[\text{kHz}]$  から  $100[\text{kHz}]$  のうち  $75[\text{kHz}]$  とした。ガイド波受信部は円周方向に

等間隔に8点設置するものとし、配管の円周方向の変位のみ測定する。減肉形状パラメータ  $q$  は以下の式 (6.22) の様に選定した。

$$q1 = 70, 105, 140, 175\text{mm},$$

$$q2 = 10, 30, 50, 70, 90\%,$$

$$q3 = 25, 50, 75, 100\%,$$

$$q4 = 0, 90, 180, 270^\circ$$

$$N_s = 320. \tag{6.22}$$

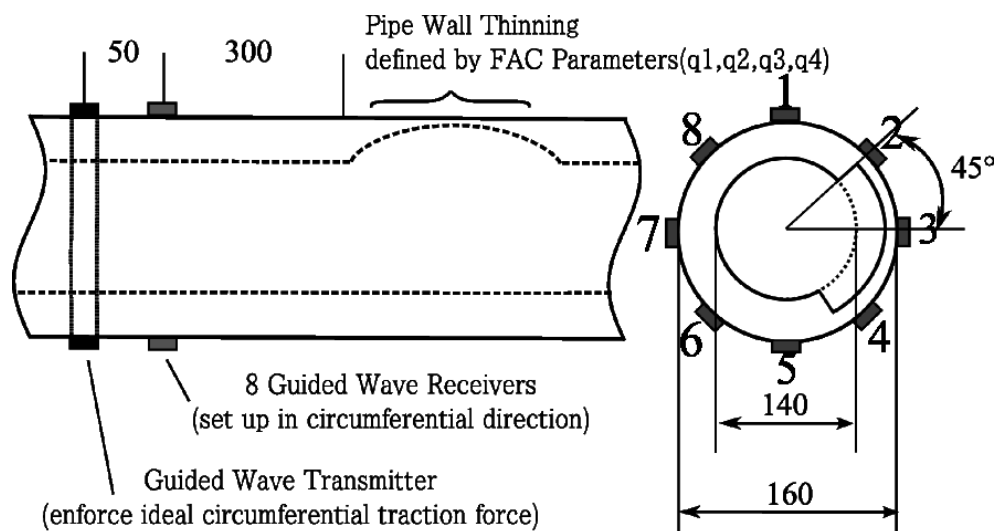


Fig. 6.4: Dimensional set up in numerical experiment.

ガイド波シミュレータにより求めた  $q = \{ 105[\text{mm}], 50\%, 50\%, 180^\circ \}$  に対する減肉検出信号と同減肉形状パラメータに対する POD 近似モデルの近似波形との比較を Fig.6.5 に示す。Fig.6.5 中の太線部がガイド波シミュレータによる減肉検出波形であり、細線部が POD 近似モデルによる波形である。二つの波形は良く一致しており、先に構築した POD 近似モデルは事前に用意したデータセットに含まれる減肉検出信号を高い精度で近似することが可能であることを示している。Fig.6.5 中の8つの波形は8つのガイド波受信部にそれぞれ対応しており、Fig.6.5 中右の数字が Fig.6.4 の受信点の番号を示す。

Fig.6.5 の検出信号は、検出信号の包絡線をとる信号処理を事前に施してある。これは、ガイド波が減肉部や管端で反射する時に発生する他モードのガイド波の影響を小さくするためである。ガイド波送信部に対する配管減肉の位置は、ねじりモードガイド波が速度分散性を持たないことから、受信点で観測される信号のうち最も到達時間の早かったものを用いて求めれば良い。

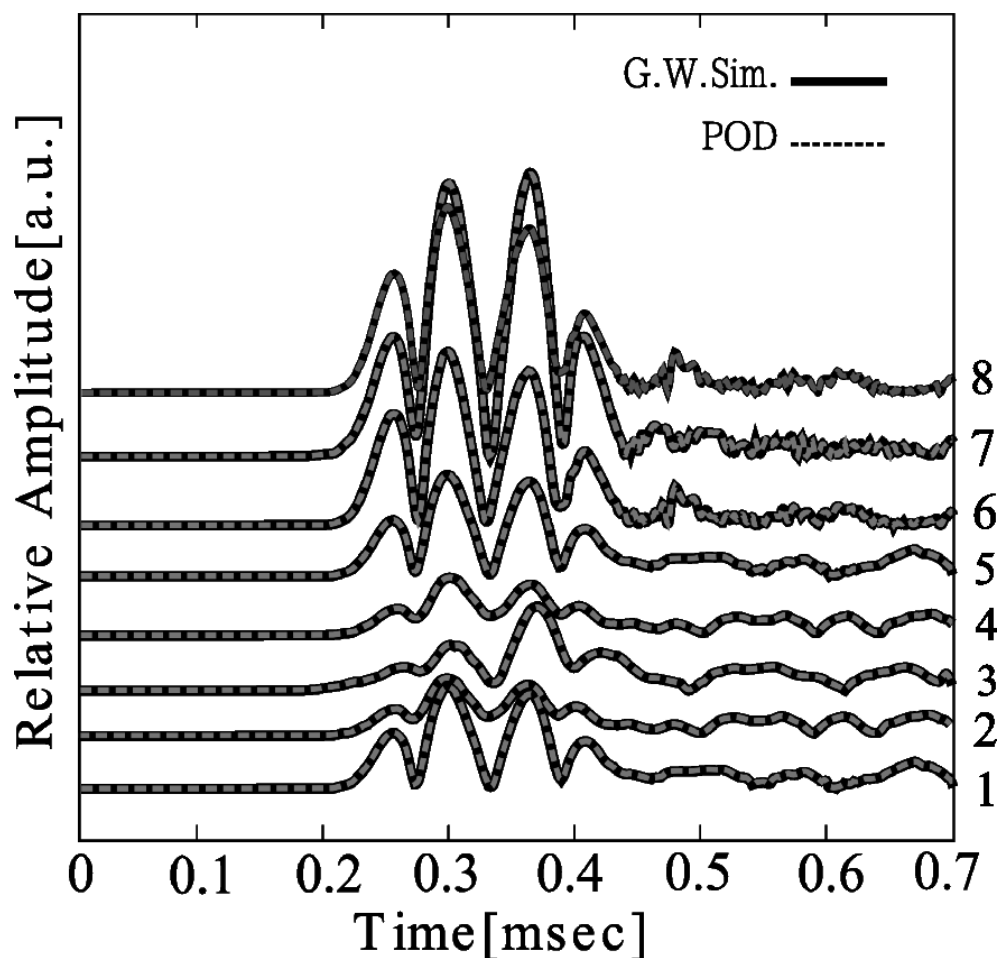


Fig. 6.5: Comparison of the profile of detected signal between Guided Wave Simulator and POD Reduced Order model. Black solid line is simulation waveform and gray dashed line is the reconstructed waveform using POD reduced order model.

### 6.3.2 減肉形状推定結果

次に, 事前に準備したデータセットに含まれていない, 任意の減肉形状パラメータを POD 近似モデルの入力とし, 3 章で説明した逆問題解析法により, ガイド波検出信号から減肉形状パラメータを推定可能であることを示す. 逆問題解析の対象となる測定データ  $y_d$  は減肉形状パラメータ  $\mathbf{q}_{target}$  に対する減肉検出波形をシミュレータを用いて作成し, ホワイトノイズを付加することで作成した (式 (6.23)).

$$y_d = y(\mathbf{q}_{target}) \times (1 + e \times n(\mu, \sigma)). \quad (6.23)$$

但し,  $q(\mathbf{q}_{target}) = (123\text{mm}, 60\%, 60\%, 180^\circ)$ ,  $n(\mu, \sigma)$  は平均  $\mu = 0$ , 分散  $\sigma = 1$  のホワイトノイズ. ノイズ強度  $e$  は 0.05 とした. 作成した測定データを Fig.6.6 に示す. 但し, 図中の 1-8 は図 6.4 における受信点に対応しており, それぞれの信号は Fig.6.5 と同様に POD 近似モデルの精度を向上させるため包絡線を取っている.



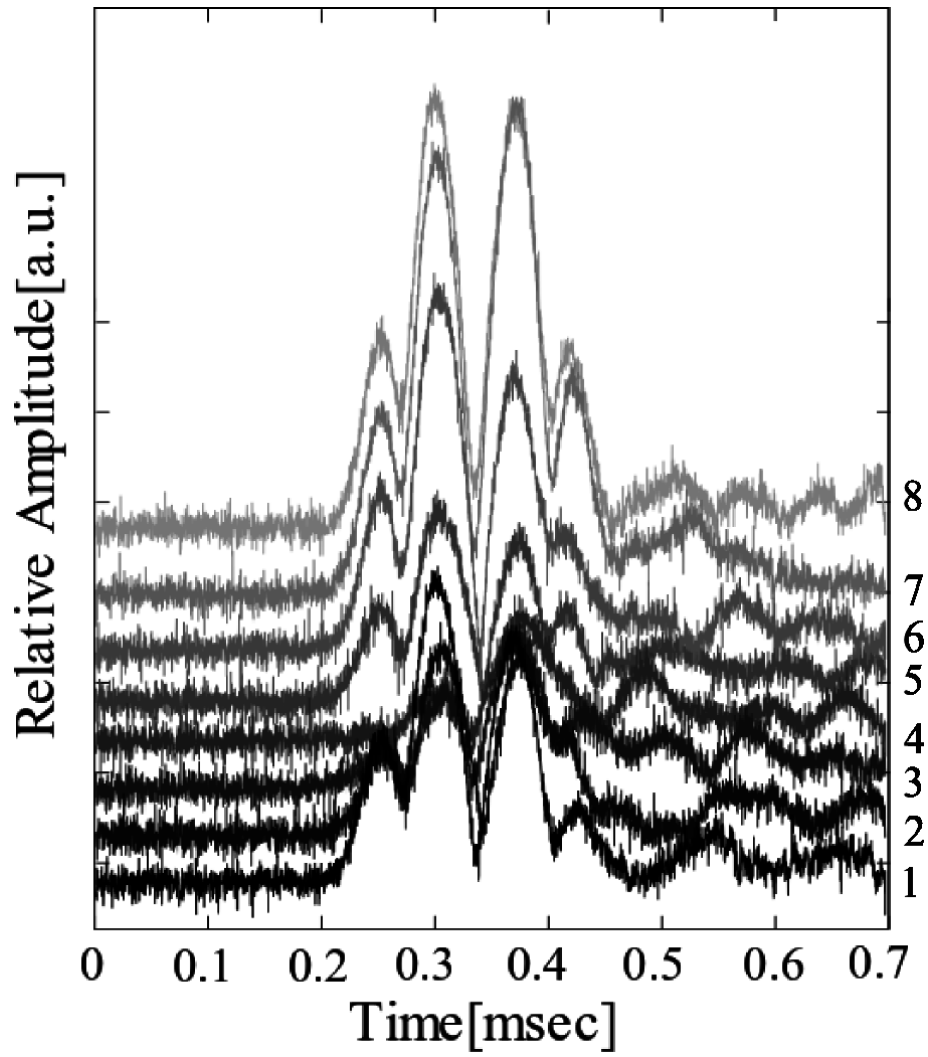


Fig. 6.6: Time-domain simulated detected signal profiles under the dimension in Fig.5.

本手法を用いて推定した, 減肉形状パラメータ  $q_{estimate}$  を以下の式 (6.24) に示す.

$$q_{estimate} = (112[mm], 57\%, 59\%, 178^\circ). \quad (6.24)$$

推定結果は, 最も精度の悪い  $q_1$  についてでも 11[mm](相対誤差 9.3%) に留まっていた. 現行の配管減肉管理基準における詳細検査が長手方向に 20[mm] 間隔で肉厚を測定するものであることから, 本手法による配管減肉形状の推定精度は十分であると言える. 本手法により推定された減肉検出信号を Fig6.7 に示す. それぞれのガイド波受信部における減肉検出信号プロファイルについてもその形状を良く近似できており, 本手法のガイド波非破壊検査法に対する適用可能性が確認できた.

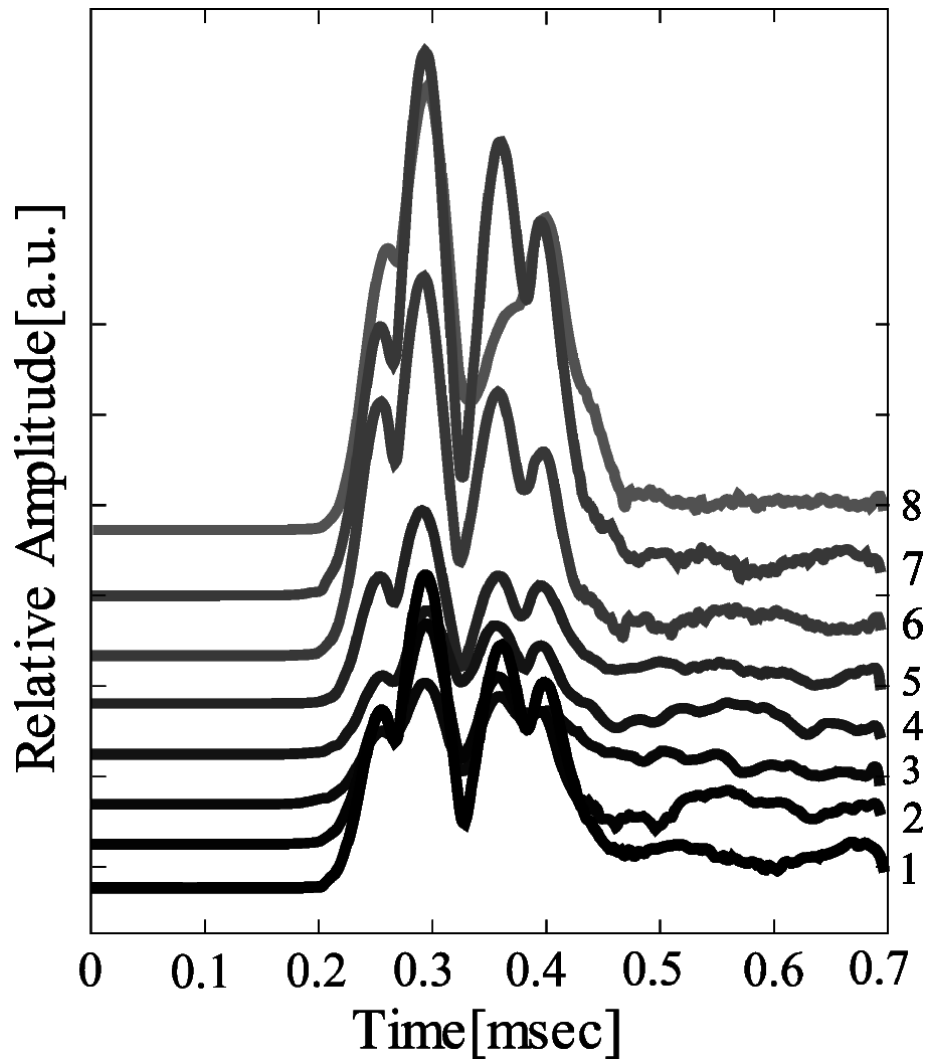


Fig. 6.7: Reconstructed detected signal profiles with inverse analysis using POD reduced order model.

## 6.4 まとめ

本章では、POD を用いた逆解析法を用いて、局所的な配管減肉の形状推定法を開発しその有効性の検証を行った。推定対象とした減肉の形状は、長手方向に徐々に肉厚の薄くなる楕円形とし、実際の配管減肉形状に則したものとした。減肉形状パラメータベクトルを導入し、同パラメータで局所的な減肉形状を近似する方法を提案した。検査モデルには、 $T(0,1)$  モードガイド波を励起するガイド波送信部、円周方向に 8 点等間隔に  $T(0,1)$  モードガイド波を受信可能な素子、部分的な配管減肉がこの順に並んだ場合を想定し、4 章、5 章におけるガイド波検査システムでの適用を想定したものとした。3 章で構築した 3 次元ガイド波シミュレータによる減肉検出信号を用いて POD を用いた次元削減モデルの構築の構築を行った。減肉形状推定実験は、同シミュレータに、POD 次元削減モデル構築時に使用していない減肉形状を入力し、そのシミュレーション波形に対してノイズを伏して作成した模擬検出データを用意し、そのデータに対して提案する逆解析法を適用した。適用結果は、復元された波形のプロファイル、減肉形状パラメータベクトルの値ともによく一致しており、最大の推定誤差が長手方向長さの 11[mm] であり、現行の配管減肉管理規定からも十分な精度であると考えられる。

## 第7章 結言

本研究のまとめを述べる。第一章では、本研究の背景と位置づけについて述べた。原子力発電所をはじめとした、各種プラントの配管構造物の検査法とその問題点および超音波ガイド波検査法の有効性について述べた。超音波ガイド波関連技術の先行研究を調査し、超音波ガイド波検査法を配管減肉検査に適用するための課題を整理した。現行のガイド波検査装置の特徴を整理し、ガイド波非破壊検査法の現場適用性を向上させるため、EMAT を用いた超音波ガイド波検査システムの開発と局所的な配管減肉の形状推定法を研究の目的として述べた。

2章では、配管を伝播する超音波ガイド波の理論的な側面について述べた。最初に配管を伝播する超音波ガイド波のモード(振動形態)についてにまとめ、それぞれのモードの特徴について述べた。次に配管を伝播する超音波ガイド波の特性(周波数)方程式を導出し、配管を伝播する超音波ガイド波のそれぞれのモードの位相速度、群速度、Wave structure を求めた。導出した式より数値計算を行い具体的な計算例を示した。

3章では、直管を伝播するガイド波検査シミュレータを開発した。円柱座標におけるフックの法則と運動方程式に対して Finite Difference Time Domain(FDTD)法を用いて数値計算スキームを構築し、修正 ZSF を用いて自由境界条件を実装した。具体的なシミュレーション例を示し、そのシミュレーション結果を2章で求めた群速度分散曲線を用いて評価し、構築したシミュレータの有効性を確認した。

4章では、EMAT を用いたガイド波検査システムを構築し、非破壊検査に有効な  $T(0,1)$  モード、 $L(0,1)$  モード、 $L(0,2)$  モードの送受信が可能であるかを評価した。構築したシステム構成、使用した機材、寸法について詳細に述べた。炭素鋼配管を用いて超音波ガイド波送受信実験を行い、その実験結果を3章で構築したシミュレータを用いて評価した。 $T(0,1)$  モード、 $L(0,1)$  モード、 $L(0,2)$  モードそれぞれの送受信が可能であることを

確認した。長尺配管を用いて送受信実験を同様に行い、十分な距離のガイド波の送受信が可能であることを確認した。

5章では4章で構築したガイド波検査システムを用いて配管減肉検査実験を行った。炭素鋼配管の内部に円周方向に一様にな矩形の人工欠陥を設け、同システムによるガイド波でその検出実験を行った。実験は $T(0,1)$ モード、 $L(0,2)$ モードについて行い、それぞれの実験結果は3章で開発したガイド波検査シミュレータを用いてその結果の評価解析を行った。 $T(0,1)$ モード、 $L(0,2)$ モードともに配管減肉の検出が可能であることを確認し、それぞれのモードにおける減肉検出信号強度と配管減肉深さの関係について調査した。

6章では逆解析法を用いた局所的な配管減肉の形状推定法について述べた。実際の配管減肉形状を基に局所的な配管減肉の形状を4つの形状パラメータを用いて近似し、配管減肉検出信号に対して逆解析を行うことで、その4つの形状パラメータを推定した。減肉検出信号に対する逆解析を行うにあたって、最初に3章で構築したシミュレータを用いてPOD(Proper Orthogonal Decomposition)データベースを構築し、その精度を確認した。シミュレータを用いて模擬局所減肉検出データを用意し、その模擬データに対して構築したPODデータベースを用いて逆解析を行い、配管減肉形状パラメータの推定の精度を検証した。

安価で丈夫なEMATを用いてガイド波検査システムを開発し、ガイド波検査法の現場適用性を高めた。実際の配管減肉に形状に近い局所減肉の形状推定法を開発し、ガイド波非破壊検査法の高度化の一助とした。

## 参考文献

- [1] M. Matsumura, “A case study of a pipe line burst in the Mihama Nuclear Power Plant”, *Materials and Corrosion*, vol. 57, no.11, pp.364-370, (2006).
- [2] 日本機械学会, “発電用設備規格 配管減肉管理に関わる規格”, (2005).
- [3] 日本機械学会, “発電用原子力規格 加圧水型原子力発電所配管減肉規格に関する技術規格”, (2006).
- [4] 日本機械学会, “発電用原子力規格 沸騰水型原子力発電所配管減肉規格に関する技術規格”, (2006).
- [5] H. Nakamoto et al, “Probability of Detection を用いた非破壊検査の信頼性評価法”, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会要旨集.
- [6] Joseph L. Rose, “A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol.124, pp273-282, (2002).
- [7] 日本非破壊検査協会規格 NDIS 2427, “ガイド波を用いたパルス反射法による配管の探傷試験通則”, (2010).
- [8] D. C. Gazis, “Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I.Analytical Foundation”, *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 31, pp. 568-573, (1959)
- [9] A.H.Fitch, “Observation of Elastic-Pulse Propagation in Axially Symmetric and Non-axially Symmetric Longitudinal Modes of Hollow Cylinders.”, *Journal of Acoustical Society of America*, vol.35, pp. 706-708, (1963).

- [10] W. Mohr and P. Höller, “On inspection of Thin-walled tubes for transverse and longitudinal flaws by guided ultrasonic waves”, *IEEE trans.Son.and Ultrason.*, vol. 23, pp. 369-375, (1976).
- [11] M. G. Silk and K. F. Bainton, “The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves”, *Ultrasonics* vol.17, pp. 11–19, (1979).
- [12] D. N. Alleyne and P. Cawley, “The excitation of Lamb waves in pipes using dry-coupled piezoelectric transducers”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol.15, pp. 11-20, (1996).
- [13] D. N. Alleyne and P. Cawley, ‘Long range propagation of Lamb waves in Chemical Plant pipework”, *Materials Evaluation*, vol.55, pp. 504- 508, (1997).
- [14] J. L. Rose, “Ultrasonic waves in solid media”, Cambridge University Press, (1999).
- [15] H. Kwun and C. M. Teller, “Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional, and flexural waves in a steel rod”, *Journal of Acoustical Society of America*, vol.96, pp. 1202-1204, (1994)
- [16] H. Kwun and K. A. Bartels, “Magnetostrictive sensor technology and its applications”, *Ultrasonics*, vol.36, pp. 171-178, (1998).
- [17] H. Nishino et al, “Modal analysis of hollow cylindrical guided waves and applications”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.40, pp.364, (2001).
- [18] H. Nishino et al, “Defect detection of a pipe using a guided wave generated by an efficient transduction with a reflector”, *Japanese Journal. Applied Physics*, vol.48, pp. 094501-094501-7, (2009).
- [19] J. J. Ditri, “Utilization of guided elastic waves for the characterization of the circumferential cracks in hollow cylinders”, *Journal of Acoustical Society of America*, vol.96, pp. 3769-3775, (1994).



- [20] H. Bai et al, “Scattering of guided waves by circumferential cracks in steel pipes”, J. Appl. Mech., vol.68, pp. 619–631, (2001) .
- [21] A. Velichko and P. D. Wilcox, “Excitation and scattering of guided waves: Relationships between solutions for plates and pipes”, Journal of Acoustical Society of America, vol.125, pp. 3623-3631, (2009).
- [22] M. J. S. Lowe et al, “Defect detection in pipes using guided waves”, Ultrasonics, vol. 36, pp. 147-154, (1998).
- [23] D. N. Alleyne et al, “The reflection of guided wave from circumferential notches in pipes”, Journal of Applied Mechanics, vol.65, pp.635-641, (1998).
- [24] W. Zhu, “An FEM simulation for guided wave generation and reflection in hollow cylinders with corrosion defects”, Journal of Applied Mechanics, vol.65, pp.649-656, (1998).
- [25] A. Demma et al, “The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes”, Journal Acoustical Society of America, vol.114, pp.611-625, (2003).
- [26] A. Demma et al, “The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements”, NDT & E Int'l, vol.37, pp.167-180, (2004).
- [27] R. Carandente et al, “The scattering of the fundamental torsional mode from axi-symmetric defects with carrying depth profile in pipes”, Journal Acoustical Society of America vol.127, pp.3440-3448(2010).
- [28] J. Ma and P. Cawley, “Low-frequency pulse echo reflection of the fundamental shear horizontal mode from part-thickness elliptical defects in plates”, Journal of Acoustical Society of America, vol.127, pp.3485-3493, (2010).

- [29] H. Nishino, K. Ogura, T. Tanaka and K. Yoshida, “Highly Sensitive Detection of Defects in Pipeng Using Multireflecting Guided Wave Energy Trapping Method”, *Japase Journal of Applied Physics*, vol.49, pp. 0666021-0666027, 2010.
- [30] O. KARPENKO, G. DIB, M. HAQ, L. Udpa and S. UDPA, “Novel Mode Decomposition Algorithms for Lamb Wave Signal Analysis in Online Monitoring of Structures”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, vol.5-1, pp. 51-61, 2013.
- [31] H. Nishino and H. Saito, “Reflection coefficients of the T(0,1) mode guided waves at axisymmetric defects”, *Abstract Book of QNDE*, vol.66, pp.66, (2012).
- [32] 古川 敬, 古村 一郎, 西野 秀郎, “ガイド波探傷の大規模 FEM シミュレーション解析”, *溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー*, vol.6, pp. 5-12, (2010).
- [33] T.Hayashi and J.L.Rose, “Guided Wave Simulation and Visualization by a Semi-analytical Finite Element Method”, *Materials Evaluation*, vol.61, pp75-79, (2003).
- [34] R. B. Thompson, “Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers”, *Physical Acoustics*, Vol. 19, pp 157-200, R.N. Thurston and A.D. Pierce, eds, Academic Press, New York, (1990).
- [35] R. B. Thompson, G. A. Alers and M. A. Tennison, “Application of Direct Electromagnetic Lamb Wave Generation to Gas Pipe line Inspection”, *Ultrasonic symposium proceedings*, NY:IEEE, (1972).
- [36] R. B. Thompson, “A model for the Electromagnetic generation and detection of Rayleigh and Lamb waves”, *IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics*, SU-20, pp.340-346, (1973).
- [37] B. W. Maxfield and C. M. Fortunko, “The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers(EMATs)”, *Materials Evaluation*, vol.41, pp. 1399-1408, (1983).

- [38] M. Hirao, H. Ogi and H. Fukuoka, “Resonance EMAT system for Acoustoelastic Stress Evaluation in Sheet Metals”, *Review of Scientific Instruments*, vol.64, pp. 3198-3205, (1993).
- [39] D. KOSAKA and F. KOJIMA, “Quantitative Evaluation of Corrosion Shape on Back Surface of SUS Samples by EMAT”, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 32, pp. 388-393, (2009).
- [40] D. KOSAKA, F. KOJIMA and H. YAMAGUCHI, “Application to sizing methodologies for pipe wall thinning and visualization of wave propagation by EMAT simulator in nuclear power plant”, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 33, pp. 111-118, (2010).
- [41] D. KOSAKA, F. KOJIMA, H. YAMAGUCHI and Kosuke UMETANI, “Monitoring System for Pipe Wall Thinning Management using Electromagnetic Acoustic Transducer”, *Japan Society Maintenance, E-Journal of Advanced Maintenance*, vol.2, pp. 34-42, (2010).
- [42] 田川明広, 小島史男, “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”, *日本保全学会論文集*, vol.9, pp.45-50, (2010).
- [43] A. Tagawa, K. Fujiki and F. Kojima, “Investigation of an on-line pipe wall defect monitoring sensor”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol.33, pp.639-647, (2010).
- [44] 村山利一, 今井健介, 園田直人, 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コンファレンス講演論文集, pp.385-390, (2013).
- [45] 神田昂亮, 岡崎広大, 杉浦壽彦, “電磁超音波探触子を用いたワイヤロープの探傷(ガイド波の伝播実験及び磁場解析)”, 第26回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, pp. 430-435, (2014).

- [46] 橋本修, 阿部琢美, “FDTD 時間領域差分法入門”, 森北出版, (1996).
- [47] 佐藤雅弘, “FDTD 法による弾性振動・波動の解析入門”, 森北出版, (2003).
- [48] M.Sato, “Comparing three methods of free boundary implementation for analyzing elastodynamics using the finite-difference time-domain formulation”, *Acoustical Science and Technology*, vol.28, no.1, pp.49-52, (2007).
- [49] E. Gottschammer and K. B. Olsen, “Accuracy of the Explicit Planar Free-Surface Boundary Condition Implemented in a Fourth-Order Staggered-Grid Velocity-Stress Finite-Difference Scheme”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.91, no.8, pp617-623, (2001).
- [50] Robert W. Graves, “Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences”, *Bulletin of the Seismic Society of America*, vol.86, no.4, pp1091-1106, (1996).
- [51] 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, pp494-515, (1997).
- [52] Arben Pitarka, “3D Elastic Finite Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.89, no.1, pp54-68, (1999).
- [53] H. Nakamoto, F. Kojima, A. Morikawa, H. Tabata and D. Kosaka, “Pipe-wall thickness measurement at high temperature by electromagnetic acoustic transducer”, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 39, pp. 256-262, (2014).
- [54] H. Nishino, S. Takeshina, F. Uchida, M. Takemoto and K. Ono, “Modal Analysis of Hollow Cylindrical Guided Wave and Application”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.40, no.1A, pp364-370, (2001).

- [55] Moczo P., Robertsson J.O., Eisner L. “ The finite-difference time-domain method for modeling of seismic wave propagation. In: Ru-Shan Wu V.M., Dmowska R., editors. *Advances in Wave Propagation in Heterogenous Earth*”, *Advances in Geophysics*. Vol. 48. p.p. 421-516 (2007).
- [56] F. Kojima and T. Ito, “Numerical Simulation fo Ultrasonic Source Mechanism for EMAT Based NDE System”, *Proceedings of the 19th Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, pp 42-43, (2014).
- [57] B. Wang and S. Hirose, “Inverse problem for shape reconstruction of plate-thinning by guided SH-waves”, *Materials Transactions*, vol.53, pp.1782-1789, (2012).
- [58] E. Gottschammer and K. B. Olsen, “Accuracy of the Explicit Plannar Free-Surface Boundary Condition Implemented in a Fourth-Order Staggered-Grid Velocity-Stress Finite-Difference Scheme”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.91, no.8, pp617-623, (2001).
- [59] K. Karhunen, “Zur spektral theorie stochasticher prozesse”, *Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Series A1, Vol.34*, pp.1-7, (1946).
- [60] M. Loeve, “Fonctions aleatoire de second ordre” *Revue Science*, Vol. 84, pp. 195–206, (1946).
- [61] G. Berkooz et al., “The Proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows”, *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 287, pp. 338–384, (1997).
- [62] S. S. Ravindran, “Proper Orthogonal Decomposition in Optimal Control of Fluids”, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 34, pp.425-448, (1999).

- [63] M. Karby and L. Sirovich, “Application of the Karhunen-Loève procedure for the characterization of human face”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, pp.103-108, (1990).
- [64] H. T. Banks et al, “Evaluation of material integrity using reduced order computational methodology”, CRSC Technical Reports, CRSC-TR99-30, pp. 5–11, (1999).
- [65] T. D. Nguyen and F. Kojima, “Forward method for crack profiles identification using reduced order decomposition techniques arising in eddy current testing”, SICE Journal of Control, Vol.2, pp.401-407, (2009).

# 研究業績

## 論文

1. 古澤 彰憲, 小島 史男, “正規直行分解と逆問題解析法を用いたガイド波非破壊検査方による配管減肉寸法推定”, 計算数理工学論文集, vol.13, pp.7-12, (2013).
2. Akinori Furusawa, Fumio Kojima, Atsushi Morikawa, “Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array”, Nuclear Engineering and Technology, vol. 47, no.2, pp.196-203, (2015).
3. 古澤 彰憲, 三輪 有弘, 森川 惇, 小島 史男, “電磁超音波探触子を用いた超音波ガイド波による配管減肉検査”, 日本 AEM 学会誌, vol.23, no.2, pp.102-107, (2015).

## 国際会議

1. Akinori Furusawa, Atsushi Morikawa and Fumio Kojima, “Pipe Wall Thinning Detection and Sensitivity Investigation of Longitudinal Guided Wave Using EMAT Guided Wave Testing System”, International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems (STSS/ISSNP 2015), Kyoto, (2015).
2. Akinori Furusawa, Atsushi Morikawa and Fumio Kojima, “Development of Guided Wave Testing System Using Electromagnetic Acoustic Transducer Array”, Eleventh International Conference of Flow Dynamics(11th ICFD), Sendai, (2014).

3. Akinori Furusawa, Fumio Kojima and Atsushi Morikawa, “Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array”, Proceedings of International Symposium on Future I&C for Nuclear Power Plants and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems (ISOVIC/ISSNP 2014), Cheju, (2014).

## 国内会議

1. 古澤 彰憲, 三輪 有弘, 中島 大岳, 中村 大地, 小島 史男, “EMAT を用いた L-mode ガイド波の配管検査への応用”, 第 27 回電磁力関連のダイナミクス (SEAD27), ハウステンボス, (2015).
2. 古澤彰憲, 森川 淳, 小島史男, “EMAT を用いたガイド波送受信機構の解析”, 日本保全学会第 11 回学術講演会, 八戸工業大学, (2014).
3. 古澤彰憲, 森川 淳, 小島史男, “電磁場による励起機構を有するガイド波検査のモード解析と可視化”, 第 26 回電磁力関連のダイナミクス, アイーナ岩手県民センター, (2014).
4. 古澤彰憲, 小島史男, “ガイド波を用いた直管内部分減肉の 3 次元形状同定法”, 日本保全学会第 10 回学術講演会, ホテル阪急エキスポパーク, (2013).
5. 古澤彰憲, 小島史男, 高橋良介, “ガイド波シミュレーションにもとづく流れ加速型腐食の形状同定”, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会, 兵庫県民会館, (2013).



## 受賞

1. International Symposium on Future I&C for Nuclear Power Plants and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems (ISOFIC/ISSNP 2014), Best Paper Award, Akinori Furusawa, Fumio Kojima and Atsushi Morikawa, “Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array”.

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、終始懇切なご指導およびご鞭撻を賜りました神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部 小島史男 教授に謹んで感謝を申し上げます。また、本論文をまとめるにあたり貴重なご教授を賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科計算科学専攻 的場修 教授ならびに神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 有木康雄 教授に深く感謝の意を表します。

神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻 小林太 准教授には、本研究の内容の詳細にわたって様々な角度からのご助言を賜りました。ここに深謝の意を申し上げます。本研究を進めるにあたり的確な助言を賜り、また業務の合間を縫って議論の場を設けていただきました神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻 中本 裕之 助教に心からお礼申し上げます。このほか、小島研究室の学生諸氏には、有意義な議論の場を作っていただきました、ここで厚くお礼を申し上げます。

最後に、社会人から学生に戻る事に理解を示し、絶え間ないご支援・ご協力を賜りました家族に心からの感謝の意を表します。

神戸大学博士論文「電磁超音波探触子を用いたガイド波検査システムの開発とその高度化に関する研究」全 101 頁

提出日 2016 年 1 月 22 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に記載されます。

©古澤彰憲

本博士論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。