

論文題目

縦波および横波を用いる非破壊検査のための  
3自由度を有する超音波プローブに関する研究

2017年 3月

青柳 将史

縦波および横波を用いる非破壊検査のための  
3自由度を有する超音波プローブに関する研究

青柳 将史

システム情報工学研究科

筑波大学

2017年 3月

# 概要

超音波プローブは非破壊検査や超音波診断などの分野において、圧電効果を利用し、音波を送受信する電気-機械および機械-電気の変換器として用いられている。探傷に用いるデバイスである超音波アレイプローブは複数個の圧電素子で構成されている。この各素子の位相を制御することで、メカニカルな走査なくビームを形成、曲げることができるため、すばやくイメージングができる。しかし、固体中において特定の方向にビームを形成すると、別の方向にも副次的にビームが形成されてしまう。このため、送信時においては不必要な音波を送信することで、測定精度やSN比の悪化の原因となる可能性がある。受信時においても、モード変換によって発生した音波を副次的に発生するビームの方向から音波を受信することで、アーティファクトが発生する可能性がある。このモード変換によって発生したアーティファクトは受信波形が縦波か横波かを判別できれば、アーティファクトの判別が可能であるが、時間的に縦波と横波の分離が困難な状況下においては、既存プローブは単一の感度しか有していないため、縦波と横波かを推定することは出来ない。そこで、筆者は3自由度を有する超音波プローブを提案し、この3自由度プローブとアレイ信号処理を組み合わせることでその有効性を検証することを目的とする。これらの組み合わせによって、粒子変位の向きと伝搬方向が測定可能であり、到来波が縦波か横波かを推定可能である。以上から、アーティファクトを判別できる。既存研究において、縦波と横波を送受信することのできるプローブの報告例があるが、受信波形が縦波か横波なのかを判別することはできない。なぜなら、粒子変位の方向を測定できないからである。縦波および横波を分離する研究例は少ない。また、これまでに3軸方向の振動を検出する圧電デバイスや3軸方向の振動を発生するアクチュエータが提案されてきたが縦波および横波の送受信を行った例は初めての試みである。

第1章については問題点であるアレイ超音波探傷法(フェイズドアレイ法)においてモード変換によって発生するアーティファクトを説明し、時間的に分離できないような場合においても受信信号が縦波か横波かを判別できれば、アーティファクトが判別可能であることを述べた。

第2章にて、3自由度プローブの目標仕様および動作原理を示した。2.2節では圧電基本式について述べ、分極軸の向きと入力する電界の向きによって発生する複数の振動モードについて述べた。この関係を利用して、複数の電極および圧電素子本体の形状を工夫することで、分極軸の向きと電界の向きの関係が可変となる。2.3節では圧電素子の形状および複数の電極を工夫することで、この関係を可変とし、一つのプローブで複数の振動モードを送受信可能となる3自由度プローブの原理について述

べた。2.4節ではこの3自由度プローブを複数用いてアレイとし、3自由度プローブアレイとアレイ信号処理を用いて到来波が縦波か横波であるのかの判別方法について述べた。1.1節で述べたアーティファクトは到来波が縦波か横波か判別できれば、アーティファクトを識別可能である。到来波の判別には、到来波の粒子変位の向きと到来波の伝搬方向を推定する必要がある。3自由度プローブが粒子変位の向きを測定し、アレイ信号処理によって到来波の伝搬方向を測定し、到来波が縦波か横波かの推定原理を述べた。2.5節では本論文で扱う有限要素解析のモデルを示した。有限要素法は領域分割に基づく数値計算法であり、任意の形状に対応できるという点が特徴であるが、3次元モデルにおいては計算量の莫大さが問題となる。そこで、本論文で主として取り扱う2次元有限要素解析の妥当性について述べた。

第3章では、3自由度プローブを設計し、縦波および横波を選択的に送受可能であるか評価した。現段階では、2.3節で述べた原理に基づき縦波および横波が選択的に送受信可能なのかの原理の検証にとどまっているが、将来的にはどのような形状が最適であるのかの検討を行い、従来の非破壊検査用のプローブの代わりとなることを目標としている。3.2節では、3自由度プローブの目標仕様を述べた。3.3では2.3節で述べた原理に基づき縦駆動および横駆動のときの振動状態をシミュレーションし、圧電素子にバッキング材を付加することで、所望の振動モードが発生することを3次元の有限要素解析法を用いて示した。2.5節で述べたように、計算量の問題から、これ以降のシミュレーションは2次元モデルで行った。次に媒質とプローブが接触している状況を想定した解析を行った。送信時において、縦駆動および横駆動のとき、媒質との接触境界上でそれぞれ法線変位のみ接線変位のみが発生することを検証した。受信時においては、接触境界に対して強制変位を入力したときに3自由度プローブからの出力電圧を計算し、法線変位成分と接線変位成分を別々に測定できることを検証した。これらの結果より、送信時においては、縦波および横波を任意の比率で組み合わせる送信することができる。また、受信時においては、プローブの底面に対して、垂直変位成分と接線成分を別々に測定することができることを示した。

これまでは単一の3自由度プローブを取り扱った。次の章からは、送信時と受信時において着目し、3自由度プローブアレイおよびアレイ信号処理を用いた非破壊検査への適用することの有用性を検証した。

第4章にて、送信時における3自由度プローブアレイとアレイ信号処理の適用例を示した。4.2節ではビームフォーミング時の非破壊検査を想定し、アレイから送信される縦波および横波を計算することで、副次的に発生するビームが抑制可能であるかについて述べた。3自由度プローブアレイの振動方向を変化させることで主ビームと副次的に発生するビームを2次元の有限要素解析を用いて計算し、従来の1自由度プローブアレイと比較した。その結果、3自由度プローブアレイの振動方向を狙った方向に対して平行にすることで、副次的に発生する横波のビームを抑制できることを示した。対照的に、狙った方向に対して垂直に振動することで、副次的に発生する縦波のビームを抑制できることを示した。これらの結果より、送信時における非破壊検査に対しての3自由度プローブの有用性を示した。

第5章にて、受信時における3自由度プローブアレイとアレイ信号処理の適用例を示す。3自由度プローブアレイを含んだ信号受信の波動伝搬シミュレーションより縦波と横波の判別が可能であるか検証した。5.2節では3.3節より得られた提案プローブの変位-電圧感度を用いて、受信した音波の粒子変位方向の向きを測定した。その結果、3自由度プローブの接触境界に対する法線成分と接線成分の変位から得られたリサージュ図形を描くことで、粒子変位の向きが測定された。横波臨界角付近から斜入射されたパルス波は縦波か横波かを推定可能であるということが示された。3自由度プローブのずり変形は縦変形よりも生じにくいいため、上端を固定端することで、上端を自由端としたときよりも推定結果が改善可能であることが分かった。また、プローブの厚み縦振動と厚みすべり振動の共振周波数が異なるので、位相の回転量が異なった。したがって、位相特性を補正することで推定結果が改善可能であるということが分かった。また、3自由度プローブの減衰量を増加することで、3自由度プローブの共振を抑制することが重要であることが分かった。これらの結果より、受信時の非破壊検査における3自由度プローブの有用性を示した。以上の結果より、3自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いて、音波の送受信における有用性が示された。これにより、ビームフォーミング時に発生しうるモード変換によるアーティファクトが判別可能なことが示された。

第6章にて、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題と展望を示した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	1
1.1.1	超音波プローブ	1
1.1.2	超音波フェイズドアレイ技術の適用分野と事例	1
1.1.3	妨害エコーと対策	2
1.1.4	副次的に発生する別の伝搬モードのビーム	3
1.2	研究目的	6
1.3	論文構成	6
<b>第2章</b>	<b>原理</b>	<b>8</b>
2.1	はじめに	8
2.2	圧電基本式とテンソル表示に関して	8
2.3	3自由度プローブの動作原理	10
2.4	3自由度プローブおよびアレイ信号処理による縦波と横波の判別方法	11
2.5	有限要素解析のモデル	15
2.6	まとめ	17
<b>第3章</b>	<b>縦波および横波を選択的に送受信することのできるプローブの設計と評価</b>	<b>18</b>
3.1	はじめに	18
3.2	提案プローブの目標仕様	18
3.3	有限要素法を用いた際の3自由度プローブの動作検証および感度評価	19
3.3.1	シミュレーション条件	19
3.3.2	縦波および横波を送信する際の提案プローブの振動状態	21
3.3.3	3自由度プローブの周波数特性及び感度評価	22
3.4	まとめ	23
<b>第4章</b>	<b>3自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いた副次的に発生するビームの抑制</b>	<b>25</b>
4.1	はじめに	25
4.2	有限要素法を用いた2次元音場の解析	25
4.2.1	シミュレーション条件	25

4.2.2	3自由度プローブアレイおよび1自由度プローブアレイによる放射パターン	26
4.2.3	2次元フーリエ変換を用いた音場の空間周波数スペクトル評価	32
4.3	まとめ	33
<b>第5章</b>	<b>3自由度プローブ及びアレイ信号処理を用いた縦波と横波の判別</b>	<b>35</b>
5.1	はじめに	35
5.2	有限要素法を用いた縦波及び横波の判別シミュレーション	35
5.2.1	シミュレーション条件	35
5.2.2	縦波と横波の判別結果	36
5.3	まとめ	42
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>44</b>
	<b>謝辞</b>	<b>45</b>
<b>付録A</b>	<b>3自由度プローブの形状による周波数特性の変化</b>	<b>49</b>
A.1	目標仕様	49
A.2	シミュレーション方法	49
A.3	シミュレーション結果	51
A.4	まとめ	54
	<b>著者論文リスト</b>	<b>55</b>

# 目次

1.1	本研究のアウトライン: (a) 背景; (b) 問題; (c) 解決策. . . . .	4
1.2	本論文の構成. . . . .	7
2.1	応力, 歪み, 電界および電束密度の成分. . . . .	9
2.2	弾性, 圧電および誘電定数を表す行列 (a) 各部分行列を表す指数 (b) $x_3$ 軸方向分極されたジルコンチタン酸鉛. . . . .	9
2.3	提案プローブの動作原理: (a) 縦駆動; (b) 横駆動; (c) 受信機. . . . .	10
2.4	縦波および横波の判別方法: (a) ビームフォーミングの概要図; (b) 提案プローブアレイの設置状況. . . . .	13
2.5	縦波および横波の判別過程. . . . .	14
2.6	3自由度プローブの形状: (a) 実際のプローブ; (b) 平面歪み近似モデル; (c) 2次元モデル. . . . .	15
3.1	提案プローブの外観図. . . . .	19
3.2	3自由度プローブの周波数特性および感度評価のための計算領域の概要図. . . . .	20
3.3	プローブの振動状態: (i) 横駆動; (ii) バックキングを付加した際の横駆動; (iii) 縦駆動; (iv) バックキングを付加した際の縦駆動. . . . .	21
3.4	微小電圧入力時の単位電圧あたりの縦および横駆動時における提案プローブの底面の法線方向変位および接線方向変位の周波数特性: (i) 縦駆動, (ii) 横駆動, (a) 接線方向変位, (b) 法線方向変位. . . . .	22
3.5	プローブに入力された強制変位の向きに対する変位-出力電圧感度特性. . . . .	23
4.1	シミュレーションの概要図. . . . .	25
4.2	アレイの真下方向を狙った際の音場: (i) 縦波音場; (ii) 横波音場; (a) 法線方向振動; (b) 接線方向振動. . . . .	27
4.3	図 4.2 の空間周波数スペクトル: (i) 縦波音場; (ii) 横波音場; (a) 法線方向振動; (b) 接線方向振動. . . . .	27
4.4	強制変位の向きが (a) (従来プローブ) 接触境界に対して法線方向のときと, (b) (3自由度プローブ) 狙った方向に対して平行に振動しているときの (i) 縦波ビームと (ii) 副次的に発生する横波ビームの音場の計算結果の比較. . . . .	28



4.5	強制変位の向きが (a)(従来プローブ) 接触境界に対して法線方向のとき, (b)(3 自由度プローブ) 狙った方向に対して平行に振動しているときの (i) 縦波音場および (ii) 副次的に発生する横波音場の 2 次元フーリエ変換の結果の比較. . . . .	29
4.6	強制変位の向きが (a)(従来プローブ) 接触境界に対して接線方向のときと, (b)(3 自由度プローブ) 狙った方向に対して垂直に振動しているときの (i) 副次的に発生する縦波ビームと (ii) 横波ビームの音場の計算結果の比較. . . . .	30
4.7	強制変位の向きが (a)(従来プローブ) 接触境界に対して接線方向のとき, (b)(3 自由度プローブ) 狙った方向に対して垂直に振動しているときの (i) 縦波音場及び (ii) 副次的に発生する横波音場の二次元フーリエ変換の結果の比較. . . . .	31
5.1	シミュレーションの概要図. . . . .	35
5.2	縦波パルスと横波パルスが $0^\circ$ 方向から 3 自由度プローブアレイに入力されたときの, 到来波のリサージュ図形. . . . .	37
5.3	(i) 縦波および (ii) 横波が入力されたときの時間波形 $V_{L25}$ および $V_{R25}$ のシミュレーション結果:(a) $\tau=\tau_{125}$ ; (b) $\tau=\tau_{s25}$ . . . . .	38
5.4	(i) 縦波および (ii) 横波が入力されたときの時間波形 $V_{L65}$ and $V_{R65}$ のシミュレーション結果:(a) $\tau=\tau_{165}$ ; (b) $\tau=\tau_{s65}$ . . . . .	39
5.5	$\theta = 25^\circ$ 方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの図 5.3(i-a) および 5.3(ii-b) のリサージュ図形:プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端. . . . .	40
5.6	$\theta = 25^\circ$ 方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの $D_{\parallel}$ および $D_{\perp}$ の比較:プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端. . . . .	41
5.7	$\theta = 65^\circ$ 方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの図 5.4(i-a) および 5.4(ii-b) のリサージュ図形:プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端. . . . .	42
5.8	$\theta = 65^\circ$ 方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの $D_{\parallel}$ および $D_{\perp}$ の比較:プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端.+. . . . .	43
A.1	シミュレーションの概要図. . . . .	50
A.2	3 自由度プローブの形状 . . . . .	50
A.3	評価点における縦駆動時の縦波成分の周波数応答のシミュレーション結果. . . . .	51
A.4	縦駆動時の時間波形のシミュレーション結果. . . . .	52
A.5	横駆動時の周波数応答のシミュレーション結果. . . . .	53
A.6	横駆動時の周波数応答のシミュレーション結果. . . . .	54

## 本文中で使用するパラメータ一覧

Symbol	Unit	Description
$c_l$	m/s	縦波の音速
$c_s$	m/s	横波の音速
$\tau$	s	到来時間差
$d$	m	プローブ間の距離
$\theta$	deg	ビームの方向
$\phi$	deg	プローブの振動方向
$N$		単一の 3DOF プローブの山の数
$N_a$		プローブの個数
$v_{Rn}(t)$	V	$N_a$ 個並べたプローブ $n$ 番目のプローブの左側電極の出力信号
$v_{Rn}(t)$	V	$N_a$ 個並べたプローブ $n$ 番目のプローブの右側電極の出力信号
$V_{R\theta}(t)$	V	角度 $\theta$ 方向が強調された左側の電極の遅延和信号
$V_{R\theta}(t)$	V	角度 $\theta$ 方向が強調された右側の電極の遅延和信号
$D_{\parallel}$	m	音波の伝搬方向に平行な変位成分
$D_{\perp}$	m	音波の伝搬方向に垂直な変位成分

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 超音波プローブ

超音波プローブなどの圧電デバイスは圧電効果を用いて音波を送受信する電気-機械および機械-電気の変換器として医療分野 [1, 2, 3, 4] や非破壊検査などの工業分野 [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] など多岐にわたって用いられている。これらの分野では、超音波プローブは、縦波や横波もしくは縦波と横波の両方を用いて、生体組織や材料の物性を測定することに用いられている。さらに、地中の物理探査の分野では、縦波と横波の両方を用いて、ガスおよび油の貯留層や構造を調査できる [17]。また、これまでに3軸方向の振動を検出する圧電デバイス [18, 19, 20] や3軸方向の振動を発生する圧電アクチュエータ [21] が報告されている。非破壊の欠陥検出用の圧電デバイスとして、超音波アレイプローブがある。これは複数個の圧電素子で構成されおり、各素子の位相を制御することで、ビームを形成・曲げることができる。それゆえ、機械的な操作を必要としないので従来の超音波プローブと比較すると超音波アレイプローブは広い範囲にわたって迅速なイメージングを行うことができる。 [22, 8, 7, 6, 23, 24]

### 1.1.2 超音波フェイズドアレイ技術の適用分野と事例

超音波フェイズドアレイ技術は発電設備の問題点の解決を図ることをきっかけにしている。その他の航空宇宙、防衛、石油化学、製造産業でも応用が必要とされる具体的な事項はそれぞれ異なるが、深さ方向の異なる亀裂の検出、到達の困難な原子炉の部品や複雑な形状を持つタービン等の部品へのアクセス性の向上、探傷時間やセットアップの時間の削減、重大な欠陥の検出、欠陥の長さや高さの測定（欠陥サイジング）、欠陥位置の測定、および欠陥位置の測定精度の向上が求められている。 [25]

フェイズドアレイ法はビームの方向、フォーカシング点を自由に変える事ができ、また電子的な高速走査が可能であること、可視化が容易で識別性に優れていることなどから様々な分野で適用されつつあるが、その目的は以下の通りである。 [25, 26]

#### 1. 欠陥の検出およびサイジング

従来の探触子で使用している周波数と同等の周波数を選択することでほぼ同じ

性能を發揮できる（欠陥検出能力，探傷可能レンジ）高い周波数の選択，およびプローブの開口径の大型化により SN 比が向上する。

2. 電子走査の活用

フェイズドアレイ法の特徴の一つはフォーカシングされたビームの高速電子走査ができることである。通常の超音波探傷において探触子の機械的な操作が困難な場合においては有効な解決手段となる可能性がある

3. 複雑形状部に対する適用

フェイズドアレイ法では超音波ビームを曲げたり，フォーカシング点を変化させたり，自由に高速走査することが可能である。これにより，探触子を固定した状態で検査部位の断面画像を表示させることができ，検査結果の合否を判断できる可能性がある。

4. 減衰材への適用

任意の位置にフォーカシング点を設定して，高感度化できる特徴を活かして，オーステナイト系ステンレス鋼溶接部などの減衰の大きな材料への適用も試みられている

表 1.1 に，現在フェイズドアレイ法が適用されている分野と事例を列挙する。[25] 最近，超音波フェイズドアレイ技術が世界的に注目され，実用的な適用事例が増加しつつある。

表 1.1: フェイズドアレイ法の適用分野と事例

	適用分野	適用事例			
エネルギー分野	発電設備やプラントの保守	タービン付け根の応力腐食割れ（SCC）検出 サイジング/SCC 検出を目的とした配管の併用期間中検査 ノズル部の腐食減肉の検査			
	交通分野	<table border="1"> <tr> <td>鉄道</td> <td>車軸，車輪，およびレールの保守検査</td> </tr> <tr> <td>航空・宇宙</td> <td>材料/部品，機体の腐食検査 レーザ溶接部の検査</td> </tr> </table>	鉄道	車軸，車輪，およびレールの保守検査	航空・宇宙
鉄道	車軸，車輪，およびレールの保守検査				
航空・宇宙	材料/部品，機体の腐食検査 レーザ溶接部の検査				
製造分野	鉄鋼製造ライン	丸棒，鋼管（パイプ）の探傷 角ビレットの探傷			
	一般工業	材料の探傷（複合材料など）/各種部品の探傷			
建築・土木分野	橋梁構造物	T 継手溶接部の検査 ボルトの検査			
	パイプライン	溶接部の検査			

1.1.3 妨害エコーと対策

前節で述べたように，超音波フェイズドアレイ技術には利点も多数あるが，妨害エコーという問題点の一つにグレーティングローブがある。配列型の振動子において合成される波面が，隣り合うエレメントとの間で 1 波長ずれて合成され，目的の方向以

外の向きにビームを形成したものをグレーティングローブまたはグレーティングサイドローブという。[25, 26] 例えばエレメントのピッチを  $d$ 、波長を  $\lambda$  とすると、グレーティングローブの発生方向  $\theta$  は式 (1.1) となる。[25, 27]

$$\sin \theta = \lambda/d. \quad (1.1)$$

前述の通りフェイズドアレイ法にはグレーティングローブに起因する妨害エコーが発生することが知られており、このエコーが探傷画像に現れることで探傷作業に影響を及ぼす場合がある。このエコーを低減させる方法として以下の対策が考えられる。

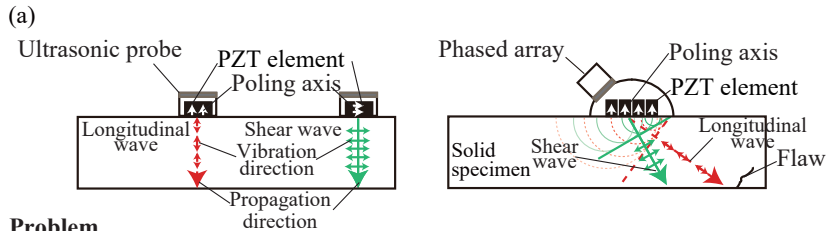
1. 周波数を低くする。
2. エレメントピッチサイズを小さくする。
3. 周波数帯域を広げる。
4. ウェッジを追加してビーム入射範囲を小さくする。
5. エレメントをさらに小さくカットする。

これまでに説明したグレーティングローブに起因する妨害エコーは既知の問題であり、その対策法も前節で述べたように知られている。本論文で扱うのは固体中において発生する副次的に発生する別の伝搬モードのビームである。これは前節で述べたグレーティングローブとは異なっている。縦波送信時における副次的に発生する横波、および横波送信時における副次的に発生する縦波により、メインローブが2つ発生することに起因する問題である。

#### 1.1.4 副次的に発生する別の伝搬モードのビーム

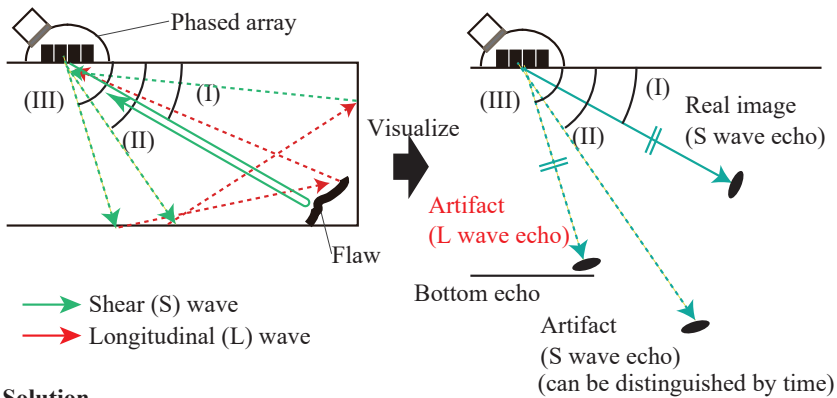
アレイを用いた超音波探傷において、副次的に発生する別の伝搬モードのビームによって発生する問題点とメカニズムを説明する。固体中の非破壊検査において、斜め方向にビームを形成するとき狙った方向とは別の方向にもビームが形成されるという問題点がある。この副次的に発生するビームによって、アーティファクトが発生する可能性がある。なぜなら、図 1.1(a) に示すように、従来の超音波プローブの圧電素子は縦波と横波の両方に感度を有するからである。横波のみを送信するには、アレイを用いて縦波臨界角を超える角度でビームを曲げて送信することや、単一の超音波プローブと縦波臨界角を超えるくさびを用いることが効果的である。しかし、ビームを曲げる角度や音波の伝搬モードが制限される。また、くさびを使用しない方法として、入力電圧の位相を制御することで副次的に発生するビームを抑制する方法が報告されている [28]。アレイを用いた超音波探傷においてはモード変換によって発生する音波の誤検出によってアーティファクトが発生する可能性がある。この副次的に発生する

**Background**



**Problem**

(b) Artifacts may appear because conventional probe misdetects unnecessary waves generated by mode conversion



**Solution**

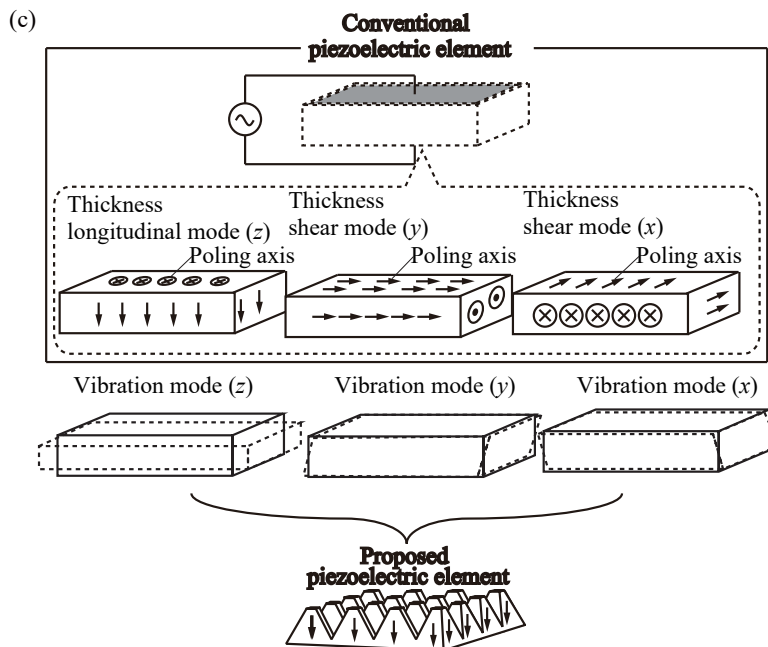


図 1.1: 本研究のアウトライン: (a) 背景; (b) 問題; (c) 解決策.

音波を用いて非破壊検査を行う方法に関する報告例もあるが少ない [29]. 図 1.1(b) にアレイプローブを用いて、横波のビームを送信する方向を変化させたときの音線とアーティファクト発生メカニズムの概要図を示す. 図 1.1(b) 中の (I) に送信ビームの方向と反射ビームの方向が一致している状況を示す. この場合は、可視化像は正しい位置に形成される. 図 1.1(b) 中の (II), (III) に送信ビームとエコーの方向が一致しない場合を示す. 一方で、この場合は、可視化像は正しい位置には形成されない. さらに悪いことに、異なる場所にアーティファクトとして検出される. 特に、図 1.1 中の (II) の場合には、モード変換によって発生した縦波はアレイの縦波の感度方向から受信される. それゆえ、アーティファクトははっきりと形成される. なぜなら反射波の縦波成分は時間的に分離して測定することができず、そして伝搬モード方向と感度の方向が一致しているからである. (III) の場合は、アレイプローブはモード変換によって発生した横波を受信する. (II) の例と同様にアーティファクトは発生するが、(II) の場合よりも弱くアーティファクトは発生する. なぜなら感度の方向と反射の伝搬方向が一致しないからである.

一般的に従来の (1 自由度) プローブは単一方向の感度を持っており、その感度方向の粒子変位を測定する. その理由は従来のプローブは分極軸の向きと電界の向きが固定されているからである. そこで、我々は 3 軸方向に感度を有する超音波プローブ (3 自由度プローブ) を提案する. 図 1.1(c) に 3 自由度プローブの概要図を示す. このプローブは 3 つの振動モードを可変とすることで 3 軸方向の成分を検出する. 既存研究において、縦波と横波を送受信することのできるプローブ [30, 31, 32, 33] があるが、受信波形が縦波か横波なのかを判別することはできない. なぜなら、粒子変位の方向を測定できないからである. 縦波および横波を分離する研究例があるが媒質の分散関係の把握が必要である [34].

### 1.2 研究目的

本研究では、超音波プローブの中で、固体中の非破壊検査の分野で用いられる超音波プローブに着目する。本研究はモノリシックな圧電素子の複数の振動形態を利用して、3軸方向に対して感度を有する超音波プローブを提案しその応用および有効性の検証を目的とする。本研究の意義は今後発展していく可能性のある縦波および横波を併用した各計測手法を進展させることである。特に3自由度を持つ超音波プローブをアレイ化することで、送信の際に副次的に発生する縦波および横波の抑制が可能である。また、受信信号の持つ粒子変位方向および伝搬方向が測定可能であり、到来波が縦波か横波を推定可能であることが新規制である。送信時においては不必要な音波の送信を抑制することで、測定精度やSN比の悪化の防ぎ、受信時においては、モード変換によって発生した音波を副次的に発生するビームの方向から音波を受信することで、アーティファクトの判別が可能である。

### 1.3 論文構成

図1.3に本論文の構成を示す。第1章については本研究の背景と目的について上述した。第2章にて、圧電基本式について述べ、分極軸の向きと入力する電界の向きの関係によって発生する複数の振動モードについて述べる。この関係を利用して、複数の電極および圧電素子本体の形状を工夫することで、分極軸の向きと電界の向きの関係が可変となる。この関係が可変となることで、一つのプローブで複数の振動モードが可変となる原理について述べる。さらに、提案プローブとアレイ信号処理を用いて、縦波と横波が判別可能なことについて述べる。第3章にて、上述の原理を縦波および横波が送信可能な3自由度を持った超音波プローブに適用する。これはプローブの厚み縦振動( $x_3$ 方向)および厚みすべり振動( $x_4, x_5$ 方向)に対して感度を持ったプローブであり、送信時においては、厚み縦振動および厚みすべり振動を任意の比率で組み合わせて送信することができる。また、受信時においては、プローブの底面に対して、垂直応力成分とずり応力成分を別々に測定することができる。有限要素解析により動作原理の確認を行うとともに変位の周波数特性の結果から、所望の特性が得られるのかの確認を行う。第4章にて、送信時における提案プローブとアレイ信号処理の適用例を示す。プローブの振動方向を変化させることで副次的に発生するビームを抑制可能であるかについて述べる。第5章にて、受信時における提案プローブとアレイ信号処理の適用例を示す。非破壊検査において音波の伝搬モードが判別できない状況を想定し、提案プローブとアレイ信号処理を用いることで縦波と横波の判別が可能であることについて述べる。第3章より得られた提案プローブの変位-電圧感度を用いて、受信した音波の粒子変位方向を推定することで、受信した音波の伝搬モードが判別可能であるかについて述べる。第6章にて、本研究で得られた成果をまとめる。

最後に付録として、3自由度プローブの形状を変化させた際のシミュレーションを行い、非破壊検査用のプローブとして適した過渡特性が得られるのかを検証している。



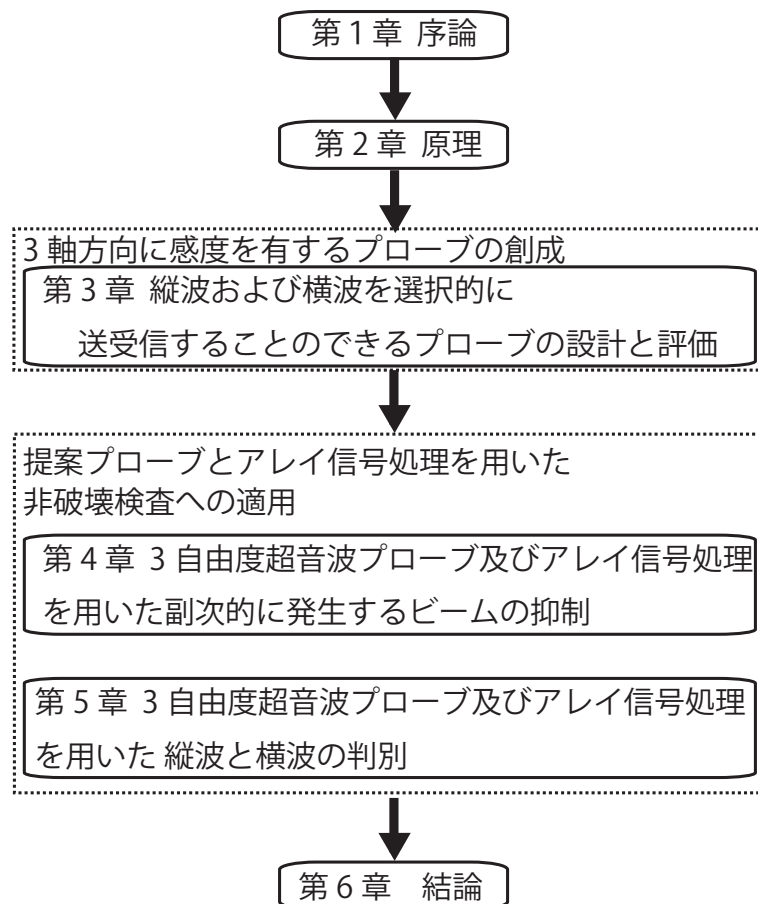


図 1.2: 本論文の構成.

## 第2章 原理

### 2.1 はじめに

本章では、圧電素子の基本的な性質をあらわす圧電基本式とテンソル表示について述べる。また、提案プローブの動作原理と提案プローブとアレイ信号処理を組み合わせた縦波と横波の判別方法について述べる。

### 2.2 圧電基本式とテンソル表示に関して

圧電素子は電界  $E$  を入力すると分極し電気双極子モーメントを発生する絶縁材料である。圧電材料の性質は次の圧電基本式であらわされる。

$$S = sT + dE, \quad (2.1)$$

$$D = dT + \epsilon E. \quad (2.2)$$

ここで  $S$  は歪みを表し、 $s$  は弾性率、 $T$  は応力、 $d$  は圧電定数を表す。式 (2.1) より、圧電材料とは、応力を加えると形が歪むというフックの法則の性質に加えて、電界  $E$  を加えると形が歪むという性質をもっている。これは圧電正効果と呼ばれる。歪みが電界に対して比例するので、電界を入力する方向によって形が歪む方向が変化する。そこで、交流電圧を圧電材料に入力すると、圧電材料に振動を励起させることができる。図 2.1 に応力  $T$ 、歪み  $S$ 、電束密度  $D$  および電界  $E$  の成分を示す。また、 $D$  および  $E$  はベクトル量、 $S$  および  $T$  は対称テンソル量である。これらの物理量が微小物体に入力されると、応力  $T$ 、歪み  $S$  は図に示すような方向の 6 成分をもっている。一方で、電束密度  $D$ 、電界  $E$  は 3 成分を持っている。弾性、圧電および誘電定数は行列として表記したものを図 2.2(a) に示す。非常に多くの定数をもっており、煩雑に見えるが、今回取り扱うジルコンチタン酸鉛は図 2.2(b) に示すような対象なテンソル量であらわされる。したがって、電界を入力する方向によって、歪む方向や入力する応力の向きによって、圧電材料に生じる電界の向きや歪みの方向が変化する。また、圧電性は可逆性であり、その性質は式 (2.2) で表され圧電逆効果と呼ばれる。ここで  $D$  は電気変位、 $\epsilon$  は比誘電率を表す。これらの式 (2.1), (2.2) を合わせて圧電素子の性質を表している。これは歪みが電界の二乗に比例する電歪効果にはない、圧電材料の特徴的な性質である。

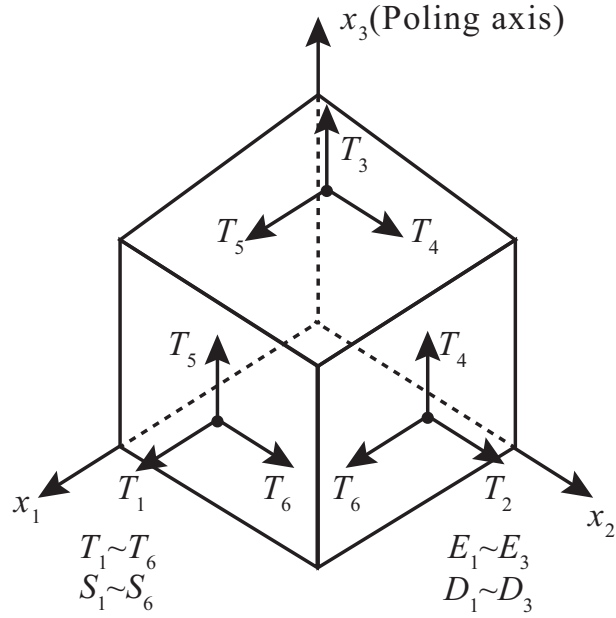
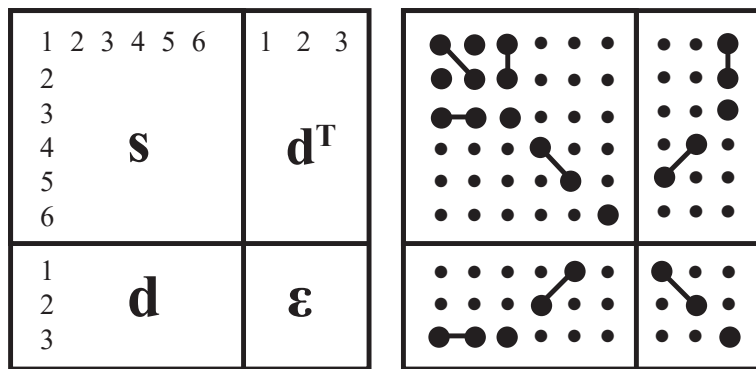


図 2.1: 応力, 歪み, 電界および電束密度の成分.



(a)

(b)

図 2.2: 弾性, 圧電および誘電定数を表す行列 (a) 各部分行列を表す指数 (b)  $x_3$  軸方向分極されたジルコンチタン酸鉛.

### 2.3 3自由度プローブの動作原理

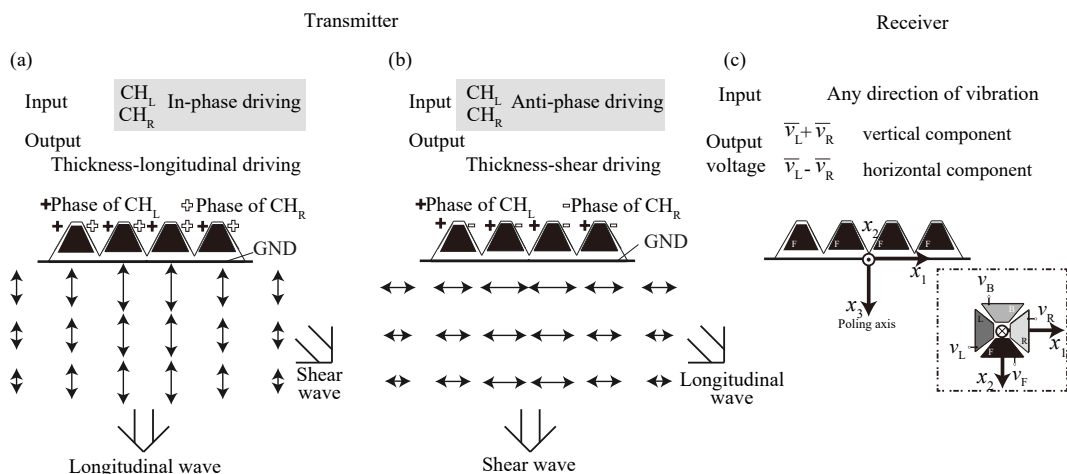


図 2.3: 提案プローブの動作原理: (a) 縦駆動; (b) 横駆動; (c) 受信機.

図 2.4 に縦波および横波の送受信する際の動作原理を示す. 分極軸の向きと電界の向きの関係によって, 従来型の振動子では, 厚み縦振動や厚みすべり振動を発生させていた. 我々は行列型のモノリシックな圧電材料と複数の電極を用いて, 複数の振動を送受信する. 縦波および横波を選択的に送受信するために, 提案プローブは複数のチャンネルを持ったプローブである. 初期分極軸の向きは厚み方向を向いていると想定する. 図 2.3(a) に示すように **GND** を除くすべての電極に対して, 同相の電圧を入力すると, 提案プローブの内部には電界は荒く分極軸と平行な方向に生じる. 電界の向きと分極軸の向きの関係が平行となるので, 圧電逆効果により, 厚み縦振動が生じる. また, 図 2.3(b) に示すように, 逆相の電圧を電極  $CH_L$  および  $CH_R$ , もしくは電極  $CH_F$  および  $CH_B$  に入力すると,  $x_4$  もしくは  $x_5$  方向に厚みすべり振動を生じる. これは電界の向きと分極軸の向きの関係が荒く垂直となるからである. 一方で図 2.3(c) に示すように, 提案プローブの底面に対して垂直応力成分が入力されると, 圧電正効果により, 全ての電極で同相の電圧が生じる. 同様に, ずり応力が入力されると向かい合った電極のペアで逆相の電圧が生じる. 以上より, 複数の電極に入力される電圧と位相を調整することで, プローブの底面に対して, 法線成分と接線成分の振動の送受信が可能である.

## 2.4 3自由度プローブおよびアレイ信号処理による縦波と横波の判別方法

図 2.4 に 2 次元モデルでの縦波および横波の判別方法を示す。縦波および横波の判別には、3 自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いる。まず、図 2.4(a) に本稿で取り扱うアレイ信号処理であるビームフォーミングについて示す。プローブ間のピッチ  $d$  で  $N_a$  個の振動子が並んでいる。このアレイに、 $\theta$  方向から平面波が入射したとすると、隣り合う振動子間の音波の到来時間差  $\tau$  は音速  $c$  を用いて次の式で表される。

$$\tau_{l\theta} = \frac{d \sin \theta}{c_l}, \quad (2.3)$$

$$\tau_{s\theta} = \frac{d \sin \theta}{c_s}. \quad (2.4)$$

式 (2.3) および (2.4) を用いて、 $N_a$  番目に計測されたプローブからの信号を同相化するためには、1 から  $N_a$  番目の信号  $s_1(t)$  から  $s_{N_a}(t)$  には  $\tau$  から  $(N_a - 1)\tau$  の遅れを付加することで  $\theta$  方向から到来する音波は時間差が補正されて同相化される。この同相化された信号の和を取ることで  $\theta$  方向からの音波は強調される。この強調された信号を  $S(t)$  とすると次式であらわされる。

$$S(t) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} s_n(t + (n-1)\tau), \quad (2.5)$$

$$\tau = \begin{cases} \tau_{l\theta} \text{ (Longitudinal wave),} \\ \tau_{s\theta} \text{ (Shear wave).} \end{cases} \quad (2.6)$$

図 2.4(b) に提案プローブをアレイ化した際のプローブの設置状況を示す。図 2.4(b) に示すように  $N$  個の山を持つ提案プローブが試験片の表面にピッチ  $d$  で一直線上に  $N_a$  個並んだ 2 次元平面を仮定し、ここに音波が角度  $\theta$  方向からアレイに入射している状態を想定する。一つの 3 自由度プローブは  $2N$  個の電極が張り付けられており、左側の電極同士は電氣的に接続されている。1 から  $N_a$  番目のプローブの出力電圧は  $v_{L1}$  から  $v_{LN_a}$  とする。同様に右側の電極同士も電氣的に接続されており、各プローブの出力電圧は  $v_{R1}$  から  $v_{RN_a}$  とする。この状態から、受信した音波の到来方向および粒子変位方向を推定することで、縦波および横波の判別を行う。到来角度に対しては、アレイ信号処理によって、一つの方向に指向性に向けて強調された角度を到来角度とする。この時の遅延時間は式 (2.3) および (2.4) で表される。式 (2.3) もしくは (2.4) を用いることで縦波か横波を選択的に強調することができる。図 2.5 に縦波と横波を判別するための手順を示す。

まずは、各プローブの左側電極からの出力電圧  $v_{L1}, v_{L2}, \dots, v_{LN_a}$  と右側電極からの出力電圧  $v_{R1}, v_{R2}, \dots, v_{RN_a}$  を計測する。これらの出力信号から遅延時間  $\tau$  を用いて、アレ

イ信号処理を行う。この処理の結果、 $\theta$  方向の縦波もしくは横波が強調される。遅延和を取った後の時間波形は次式で表される。

$$V_{L\theta}(t) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} v_{Ln}(t + (n-1)\tau), \quad (2.7)$$

$$V_{R\theta}(t) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} v_{Rn}(t + (n-1)\tau). \quad (2.8)$$

これらの遅延和波形  $V_{L\theta}(t)$  および  $V_{R\theta}(t)$  の和と差をとることで、プローブの粒子変位方向が測定できる。また、この際にプローブのずり変位および垂直変位成分が入力された際の感度補正  $S(f, \theta)$  および回転補正  $R(\theta)$  を行うことで、到来方向  $\theta$  の音波の持つ伝搬方向に対して平行な変位成分  $D_{\parallel}$  と垂直な変位成分  $D_{\perp}$  が、次式より測定できる。その成分の大小から縦波と横波の推定が可能である。

$$\begin{pmatrix} D_{\parallel} \\ D_{\perp} \end{pmatrix} = R(\theta)S(f, \theta) \begin{pmatrix} V_{L\theta}(t) + V_{R\theta}(t) \\ V_{L\theta}(t) - V_{R\theta}(t) \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

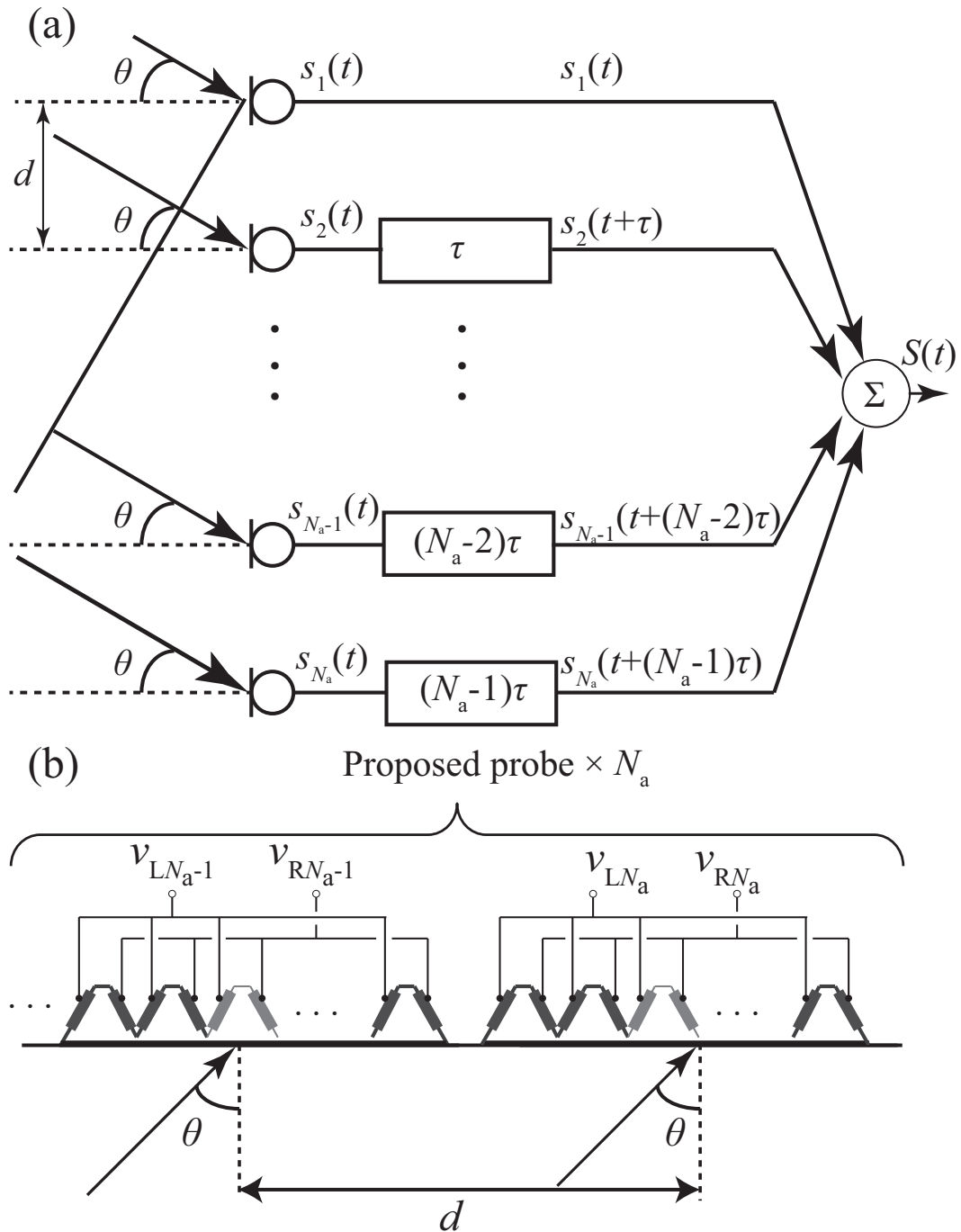


図 2.4: 縦波および横波の判別方法: (a) ビームフォーミングの概要図; (b) 提案プローブアレイの設置状況

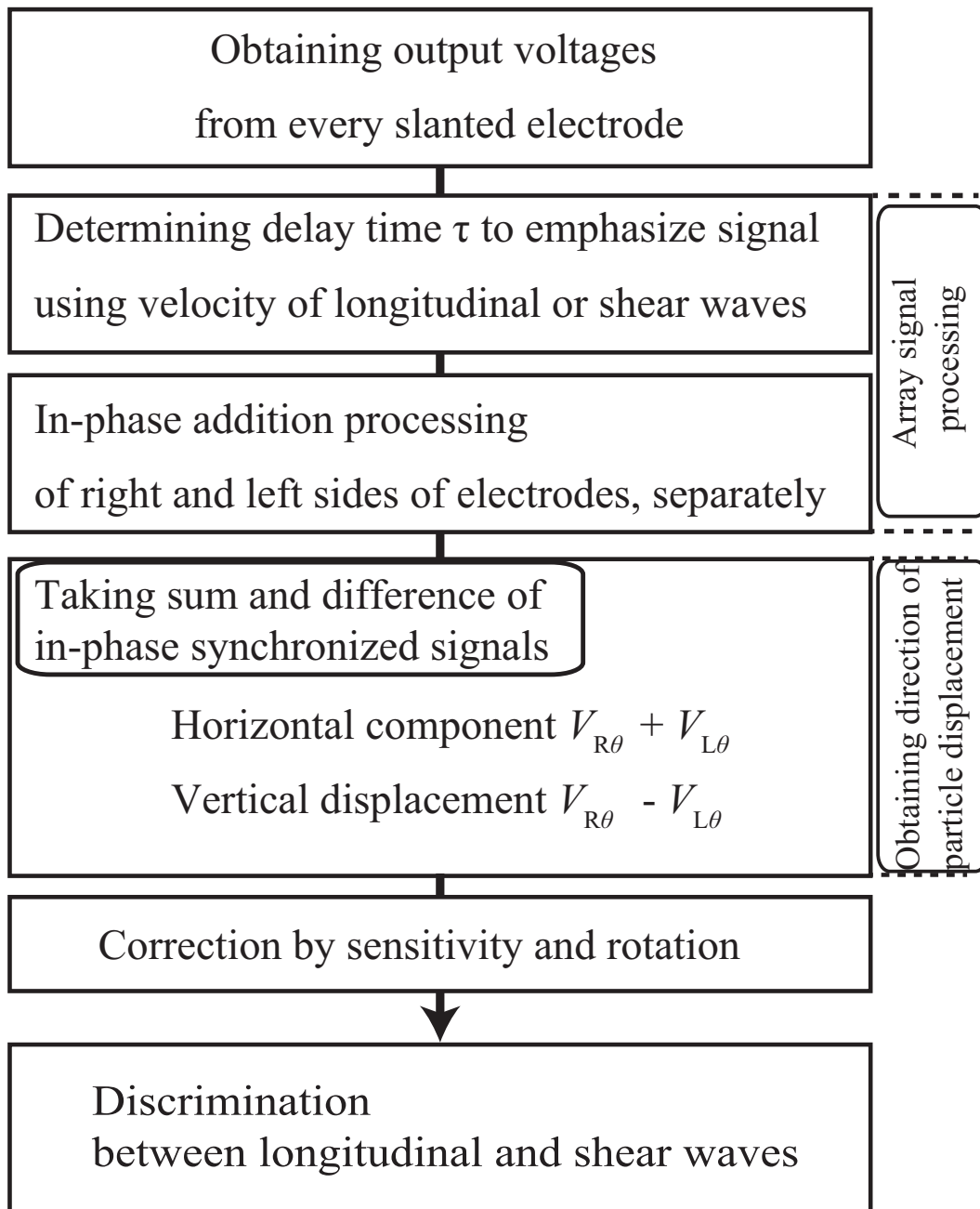


図 2.5: 縦波および横波の判別過程



## 2.5 有限要素解析のモデル

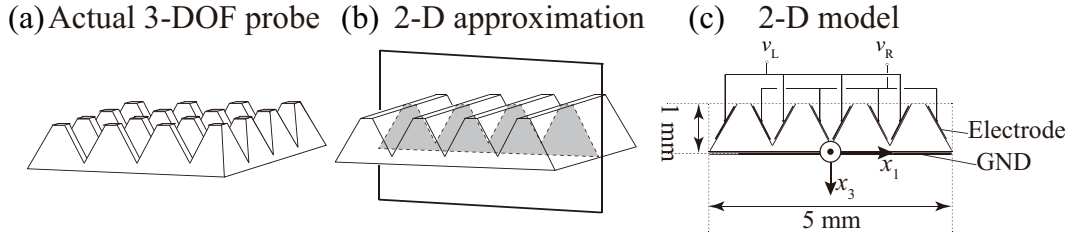


図 2.6: 3 自由度プローブの形状: (a) 実際のプローブ; (b) 平面歪み近似モデル; (c) 2 次元モデル.

3 自由度プローブの特性および 3 自由度プローブアレイの放射パターンの評価のために、プローブの周波数特性とその音場は調和解析によって解析された。調和解析の運動の離散化方程式は力ベクトル  $\mathbf{f}$  と変位ベクトル  $\mathbf{u}$ 、電気ポテンシャルベクトル  $\phi$  と電荷ベクトル  $\mathbf{q}$  を用いて次のように表される。

$$\begin{bmatrix} (1 + j\frac{1}{Q})\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M} & \mathbf{\Gamma} \\ \mathbf{\Gamma}^T & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

ここで、 $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{\Gamma}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $Q$ , および  $\omega$  はそれぞれ剛性行列, 質量行列, 電気機械結合行列, 容量行列, 機械的品質係数, および 角周波数である。

到来パルス波が縦波か横波かの判別ができるかを検証するために、出力波形は過渡解析によって計算された。過渡解析の運動の離散化方程式は力ベクトル  $\mathbf{f}$  と変位ベクトル  $\mathbf{u}$ 、電気ポテンシャルベクトル  $\phi$  と電荷ベクトル  $\mathbf{q}$  を用いて次のように表される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{\Gamma} \\ \mathbf{\Gamma}^T & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \phi \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega Q} \begin{bmatrix} \mathbf{K} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

ここで  $(\dot{\quad})$  は時間微分を示す。時間ステップは時間陰解放のひとつである generalized-alpha 法を用いて計算された [35, 36]。

図 2.6 に本論文で用いる圧電セラミックの外形を示す。図 2.6(a), 2.6(b) および 2.6(c) に、それぞれ実際の 3 自由度プローブ、平面歪み近似モデルおよび二次元モデルを示す。3.3.2 節の振動状態の評価においては、図 2.6(a) の 3 次元モデルでシミュレーションを行う。他のシミュレーションにおいては、図 2.6(c) の 2 次元モデルで解析を採用した。2 次元モデルで解析をした理由を以下に示す。各シミュレーションに使用した材料の物性値を表 2.1 および 2.2 に示す。

- 3 次元の計算コストが莫大であるため。
- 実際の 3 次元プローブの放射角や放射パターンは 2 次元モデルの放射角や放射パターンと類似しており、放射パターンの評価においては 2 次元モデルで近似できるため。

表 2.1: PZT-4 の物性値.

Elastic stiffness (GPa)	
$c_{11}^E$	138.9
$c_{12}^E$	77.8
$c_{13}^E$	74.3
$c_{33}^E$	115.4
$c_{44}^E$	25.6
$c_{66}^E$	30.6
Piezoelectric stress constant (C/m <sup>2</sup> )	
$e_{31}$	-5.2
$e_{33}$	15.1
$e_{15}$	12.7
Relative permittivity	
$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	762.5
$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	663.2

表 2.2: 材料の物性値.

	Density(kg/m <sup>3</sup> )	Young modulus(Pa)	Poisson ratio
Aluminum	2,700	$70 \times 10^9$	0.33
Acrylic plastic	1,190	$3.2 \times 10^6$	0.35

- 音の拡散による減衰が重要でないときに、3次元モデルの特性は、2次元モデルで一般的に解かれている。実際に、2次元モデルによって解かれた結果は、実験結果とよく一致しているため。

## 2.6 まとめ

この章では、圧電素子の持つ性質とテンソル表示に関して述べ、圧電素子の分極軸の向きと電界の向きの関係によって、発生する振動モードが変化することを述べた。また、提案プローブの概形およびその動作原理について示した。送信時においては、電極の選択と位相の調整で厚み縦振動および厚みすべり振動を発生させる。また受信時においては、向かい合う電極の和をとることで、プローブに入力される垂直応力成分を測定できること。一方で差をとることでずり応力成分を測定できることを説明した。提案プローブとアレイ信号処理を用いると、到来角度および粒子変位方向の推定結果から受信した音波が縦波なのか横波なのかを判別する方法について示した。

# 第3章 縦波および横波を選択的に送受信することのできるプローブの設計と評価

## 3.1 はじめに

本節では2.3節で述べた提案プローブの動作原理を用いて、縦波と横波を独立して送受信できるプローブの設計と評価を行う。

従来型の超音波プローブは厚み縦振動子および厚みすべり振動子が搭載されている。これらの従来他型の振動子は電極面の法線方向と分極軸方向がそれぞれ平行、垂直となるように設計されているため、交流電界を入力した際に、厚み縦振動または厚みすべり振動がそれぞれ発生する。これらの振動モードは電界の向きと分極軸の向きが固定されているために、単一の振動が発生する。そのため、音波の受信の際も、プローブと試料との接触面に対して、垂直な変位もしくは水平方向の感度が優勢となる。

## 3.2 提案プローブの目標仕様

3.1節で説明した従来型の超音波プローブは圧電素子内に発生する電界と分極軸の向きが固定されており、プローブの持つ感度の向きも固定されていることを述べた。そこで、一つの圧電素子が複数の感度を持つために、2.3節で説明したように、複数の電極および入力電圧を調整することで、電界の向きと分極軸の向きを可変とする。そのための仕様として、選択的に縦波と横波を送信出来るようにするために、縦振動とずり振動を選択的に駆動できること。また、パルスエコー法などの非破壊検査に使用するための超音波プローブを想定しているため、周波数特性がフラットであることが求められる。

### 3.3 有限要素法を用いた際の3自由度プローブの動作検証および感度評価

#### 3.3.1 シミュレーション条件

図 3.1 にシミュレーションに使用した提案プローブの外観図を示す。また、提案プローブは先端を切り落としたピラミッドを  $4 \times 4$  の行列状に配置した形状とした。電極は底面と全てのピラミッドの斜面に張り付けた。提案プローブは合計 65 個の電極を張り付けた 4 チャンネルのモノリシックな圧電デバイスである。プローブの材料は初期分極軸の向きを  $x_3$  軸方向に向けた圧電セラミックス (PZT-4) を想定した。

厚み縦振動および厚みすべり振動が発生可能か検証するために、3 プローブ単体での振動特性のシミュレーションを行った。プローブの振動特性は接触する材料の物性によって、影響をうけるため、プローブの周りの境界条件を自由端とした。バッキング材として、アクリルおよびタングステン板を使用した。それぞれの機械的品質係数  $Q$  は、レイリー減衰を用いて、それぞれ 500, 1 および 1000 とした。アクリルは余分な振動を抑制し、広帯域な周波数特性を得るため使用した。また、プローブの上部を固定するために重い板としてタングステン板を用いた。プローブを縦方向に駆動させる際には、全ての電圧  $v_L, v_R, v_F$  および  $v_B$  は 1 V とした。また横方向に駆動させる際には  $v_L, v_R$  にそれぞれ 1 V と -1 V とした。

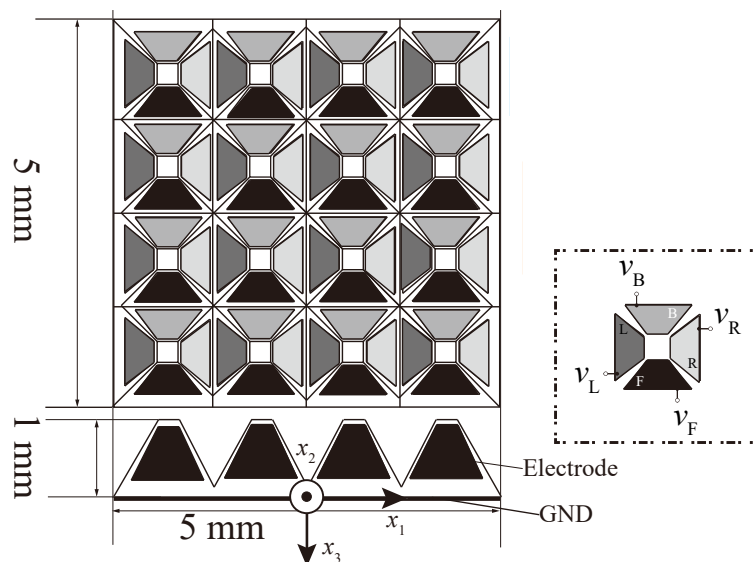


図 3.1: 提案プローブの外観図.

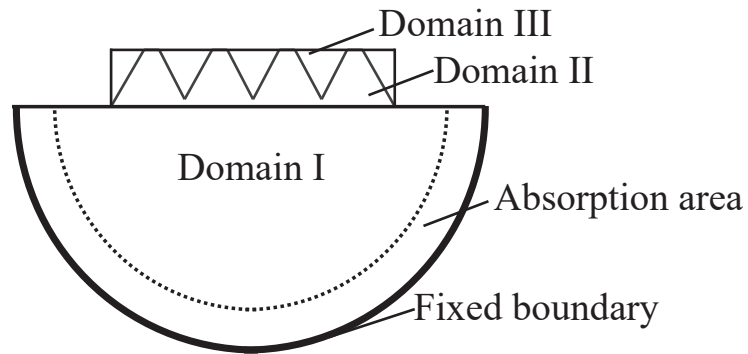


図 3.2: 3 自由度プローブの周波数特性および感度評価のための計算領域の概要図.

表 3.1: 3 自由度プローブの周波数特性および感度評価におけるシミュレーション条件および領域分割.

	Number of elements		Element size(m)	Mechanical quality factor $Q$
Domain I	187,158		$\sim 1 \times 10^{-4}$	100(Absorption area 50-5)
	10,030	5,416		
Domain II (Conventional)		(3-DOF)	$\sim 1 \times 10^{-5}$	50
Domain III	7,521		$\sim 1 \times 10^{-5}$	10

## 3.3.2 縦波および横波を送信する際の提案プローブの振動状態

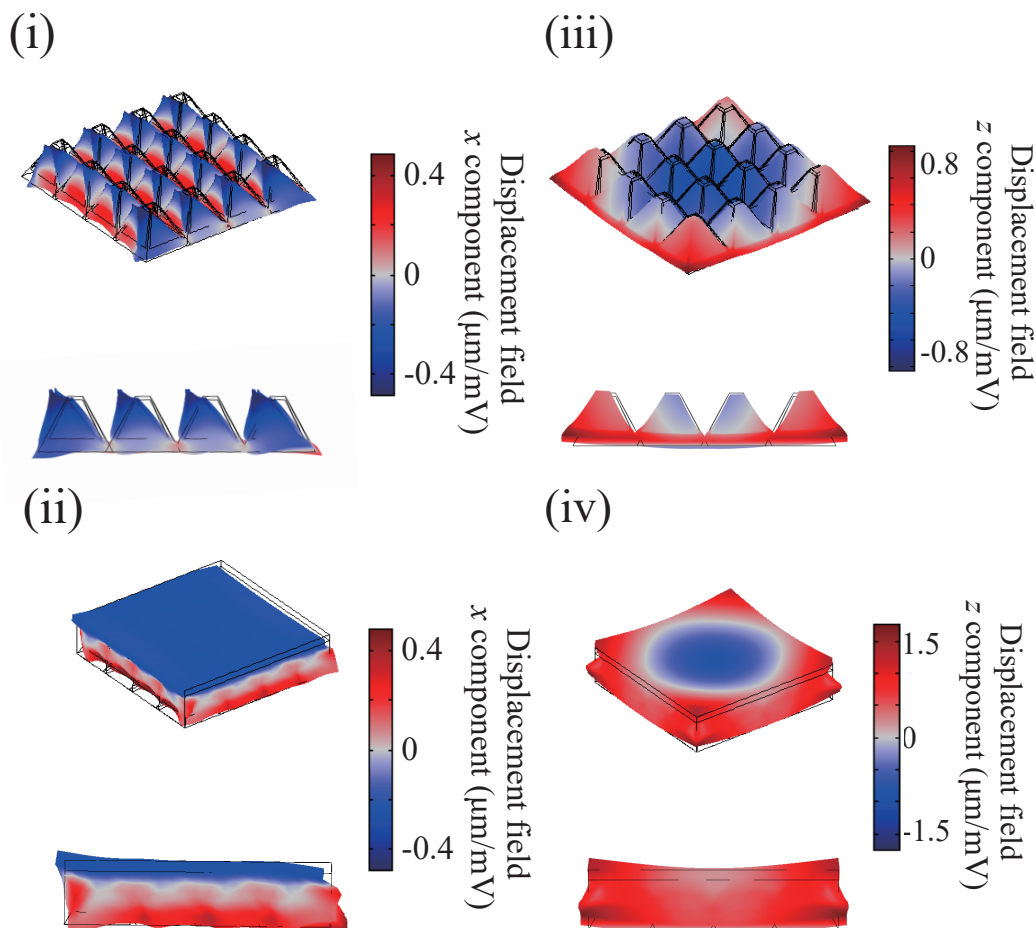


図 3.3: プローブの振動状態: (i) 横駆動; (ii) バックキングを付加した際の横駆動; (iii) 縦駆動; (iv) バックキングを付加した際の縦駆動.

図 3.3 に周波数 50 kHz で提案プローブを振動させた際のシミュレーションの結果を示す。図 3.3 は微小電圧入力時の単位電圧あたりの変位をプロットしている。図 3.3(i) のによると、提案プローブ単体を横駆動させた際には、提案プローブの上面側がプローブの底面側よりも大きく振動していることがわかった。図 3.3(ii) の結果によると、バックキング材を用いることで厚みすべり振動が発生するという結果が得られた。また、バックキングなしの時と比較して提案プローブの上面側よりも、底面側の方が良く振動するという結果が示された図 3.3(iii) および 3.3(iv) の結果から厚みたわみ振動が発生していることがわかった。

### 3.3.3 3自由度プローブの周波数特性及び感度評価

図 3.2 に本シミュレーションの概要図を示す。半無限媒質を想定した等方性材料の表面にプローブ設置して 100 kHz から 20 kHz 間隔で 10 MHz の範囲の周波数特性を計算した。図 3.4 に縦駆動および横駆動させた際の提案プローブの底面に発生する変位の周波数特性の結果を示す。図 3.4 はプローブの底面に発生する変位の平均値から算出された。図 3.4(i-a), 3.4(i-b) によると、縦駆動時には、縦変位のみが発生した。また、図 3.4(ii-a), 3.4(ii-b) によると、横駆動時には、ずり変位のみが発生していることが分かった。さらに、図 3.4(i) および 3.4(ii) の結果によると、プローブ単体のときと比較して、シリコンをおよびタングステン板をバック材として使用したことで、不要な共振が抑制され、高い振幅が得られた。図 3.4(ii) と 3.4(iv) の結果からも同様の結果が得られた。

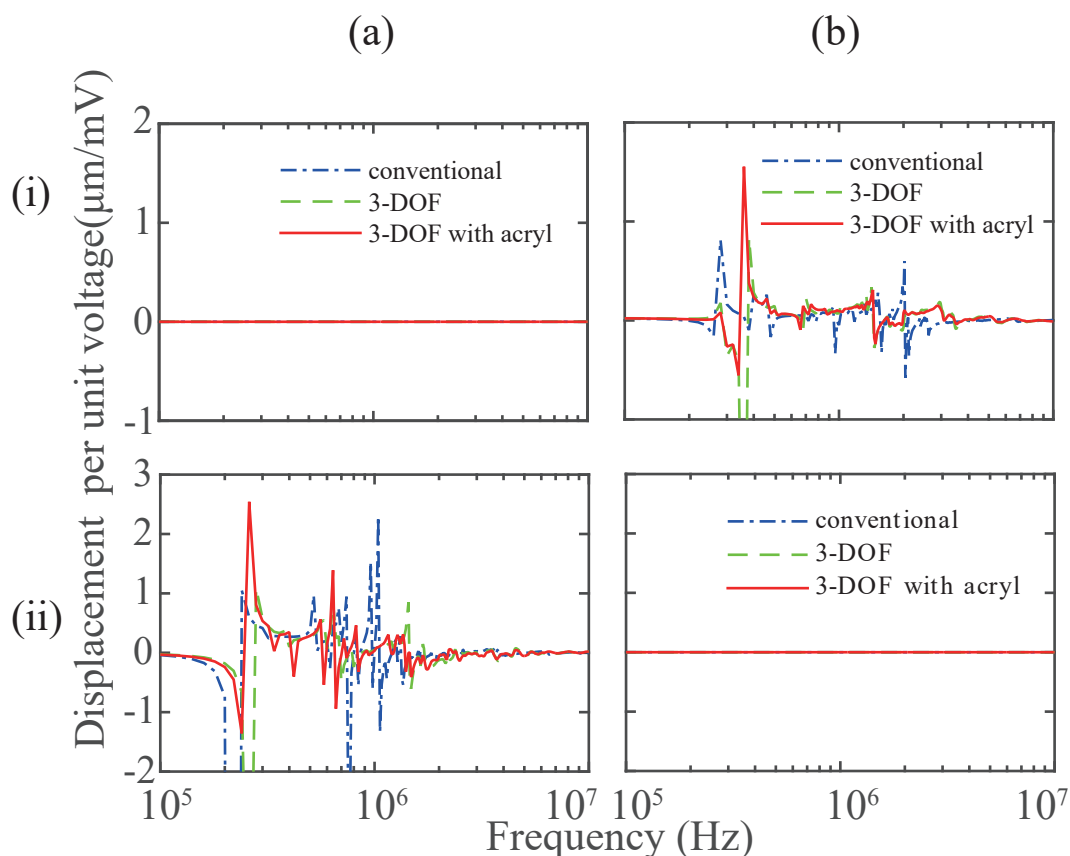


図 3.4: 微小電圧入力時の単位電圧あたりの縦および横駆動時における提案プローブの底面の法線方向変位および接線方向変位の周波数特性:(i) 縦駆動, (ii) 横駆動, (a) 接線方向変位, (b) 法線方向変位

次に、図 3.5 に提案プローブに 0 度から 90 度方向までの強制変位を入力した際の変位-出力電圧感度特性を示す。図 3.5 によると、接触境界に対して法線方向である 0 度方向の強制変位がプローブに入力されたときに、出力電圧の和のみが値を持った。



また，接触境界に対して接線方向である 90 度方向の強制変位をプローブに入力したときに，出力電圧の差のみが値を持つという結果が得られた．これら結果より，受信時に，法線方向変位 (0 度) と接線方向変位 (90 度) を別々に測定可能であるということが分かった．また，これら以外の角度においては，感度が縦方向と横方向で大きさが異なるので，感度の補正が必要であるということが分かった．

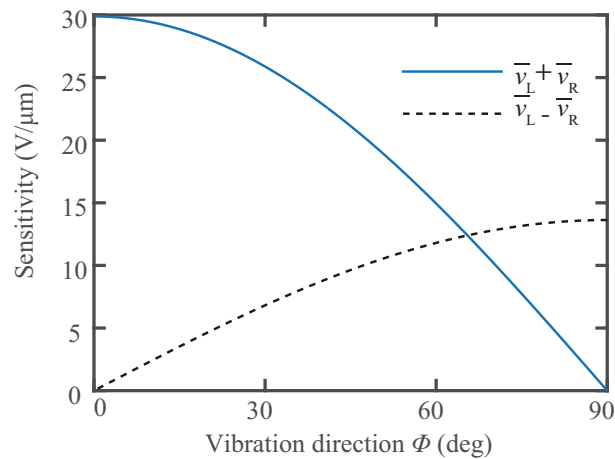


図 3.5: プローブに入力された強制変位の向きに対する変位-出力電圧感度特性.

### 3.4 まとめ

本章では任意の縦波成分と横波成分を選択的に送受信することのできるプローブを設計した．その結果として，2.3 節で述べた動作原理通りの振動が発生することを確認した．送信時において，バッキング材としてアクリルおよびタンゲステン板を使用することで振幅が増加することを確認した．受信時においては，垂直応力入力時とずり応力入力時に電極の和と差をとることで，法線振動成分と接線振動成分を独立して計測が可能であることが分かった．以上から，送信時においては，提案プローブが任意の方向の振動を発生可能であることを確かめた．また，受信時においては，任意方向の粒子変位を測定可能であることが示された．



# 第4章 3自由度プローブおよびアレイ 信号処理を用いた副次的に発生 するビームの抑制

## 4.1 はじめに

本章では，ビームステアリングを用いた固体中の非破壊検査の際に問題となる副次的に発生するビームの抑制法について述べる。

## 4.2 有限要素法を用いた2次元音場の解析

### 4.2.1 シミュレーション条件

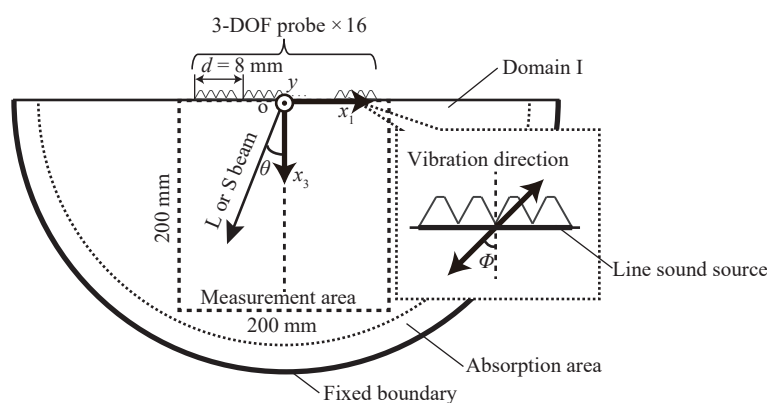


図 4.1: シミュレーションの概要図.

強制変位の向きを変化させた際に，調和解析を行うことで放射パターンを計算し，放射パターンに2次元フーリエ変換を適用することでビームの向きおよび強度を評価

表 4.1: 3 自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いた副次的に発生するビームの抑制のシミュレーション条件および領域分割.

	Number of elements	Element size(m)	Mechanical quality factor $Q$
Domain I	69,761	$\sim 1 \times 10^{-3}$	100(Absorption area 50-5)

## 第4章 3自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いた副次的に発生するビームの抑制

した。計算領域を図4.1に示す。媒質の表面に、16個のプローブを8mmの等間隔で配置し、250kHzで強制変位の向き $\phi$ を変化させ、アレイの真下方向を $0^\circ$ として $\theta = 0, 10, 20, 30$ 度の方向に向けた際に媒質中に放射される縦波および横波ビームの放射パターンを計算した。

### 4.2.2 3自由度プローブアレイおよび1自由度プローブアレイによる放射パターン

図4.2にアレイの真下方向にビームを向けた際の、強制変位の向きを媒質表面に対して法線方向と接線方向にしたときの縦波と横波の音場の様子を示す。図4.2(i-a)によると、法線方向振動のときに、アレイの真下方向ビームが形成された。一方で、図4.2(i-b)によると、接線方向振動のときには、縦波がほとんど生じなかった。図4.2(ii-a), 4.2(ii-b)によると、図4.2(i-a), (i-b)と対照的に、接線方向振動のときには、横波ビームが真下方向に形成されたが、接線方向振動の際には各プローブ相当の境界のエッジから生じた縦波による干渉縞が得られた。

次に、図4.4に強制変位の向きが接触境界に対して法線方向のとき音場と、ビームを形成した方向に対して平行方向に振動しているときの音場の計算結果を示す。ビームの方向 $\theta = 10, 20$ および $30^\circ$ のときに、従来の1自由度プローブを想定して、強制変位の振動方向 $\phi$ はどれも $\phi = 0^\circ$ とした。一方で、3自由度プローブを想定したときの強制変位の振動方向 $\phi$ は、それぞれ $\phi = 10, 20$ , および $30^\circ$ とした。10度方向を狙ったときの図4.4(i-a)および4.4(i-b)の比較によると、縦波のビームは同じ方向に同様に形成されることが分かった。しかし、横波の音場の様子は異なった。また、図4.4(a)および4.4(b)によると、ビームの方向 $\theta = 20$ および $30^\circ$ のときにも同様の結果が得られた。

次に、図4.6に強制変位の向きが接触境界に対して接線方向のときと、ビームを形成した方向に対して垂直方向に振動しているときの音場の計算結果を示す。ビームの方向 $\theta = 10, 20$ および $30^\circ$ のときに、従来の1自由度プローブを想定して、強制変位の振動方向 $\phi$ はどれも $\phi = 90^\circ$ とした。一方で、3自由度プローブを想定したときの強制変位の振動方向 $\phi$ は、それぞれ $\phi = 100, 110$ , および $120^\circ$ とした。10度方向を狙ったときの図4.6(a)および4.6(b)の比較によると、両方の図の横波ビームの図は $\theta = 10^\circ$ の同じ方向に同様に形成された。しかし、図4.4と対照的に、縦波ビームの音場は異なった。狙った方向 $\theta = 10$ および $20^\circ$ のときにも同様の結果が得られた。

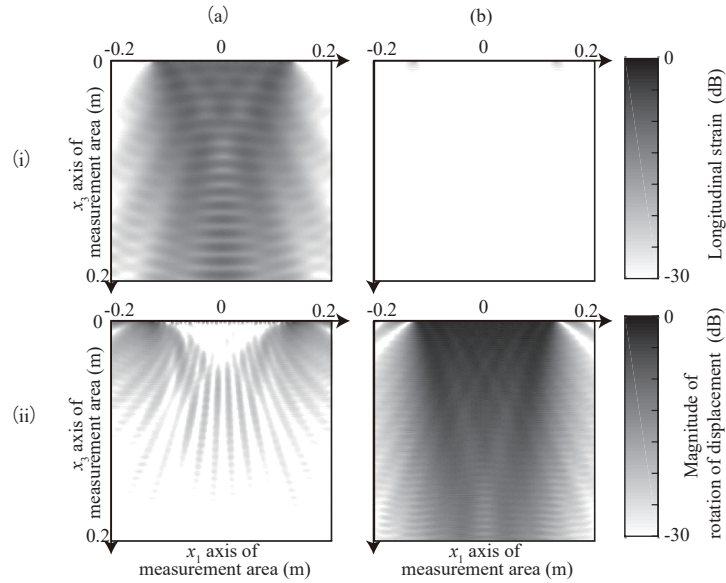


図 4.2: アレイの真下方向を狙った際の音場: (i) 縦波音場; (ii) 横波音場; (a) 法線方向振動; (b) 接線方向振動.

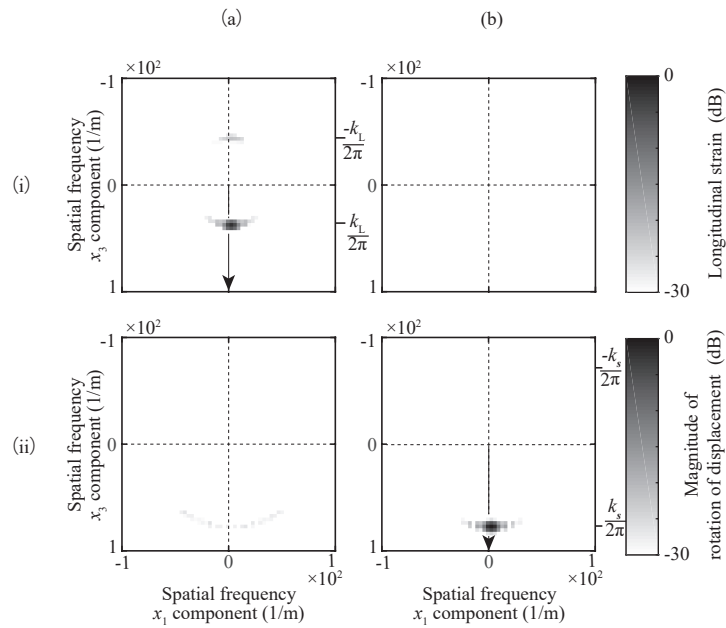


図 4.3: 図 4.2 の空間周波数スペクトル: (i) 縦波音場; (ii) 横波音場; (a) 法線方向振動; (b) 接線方向振動.

第4章 3自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いた副次的に発生するビームの抑制

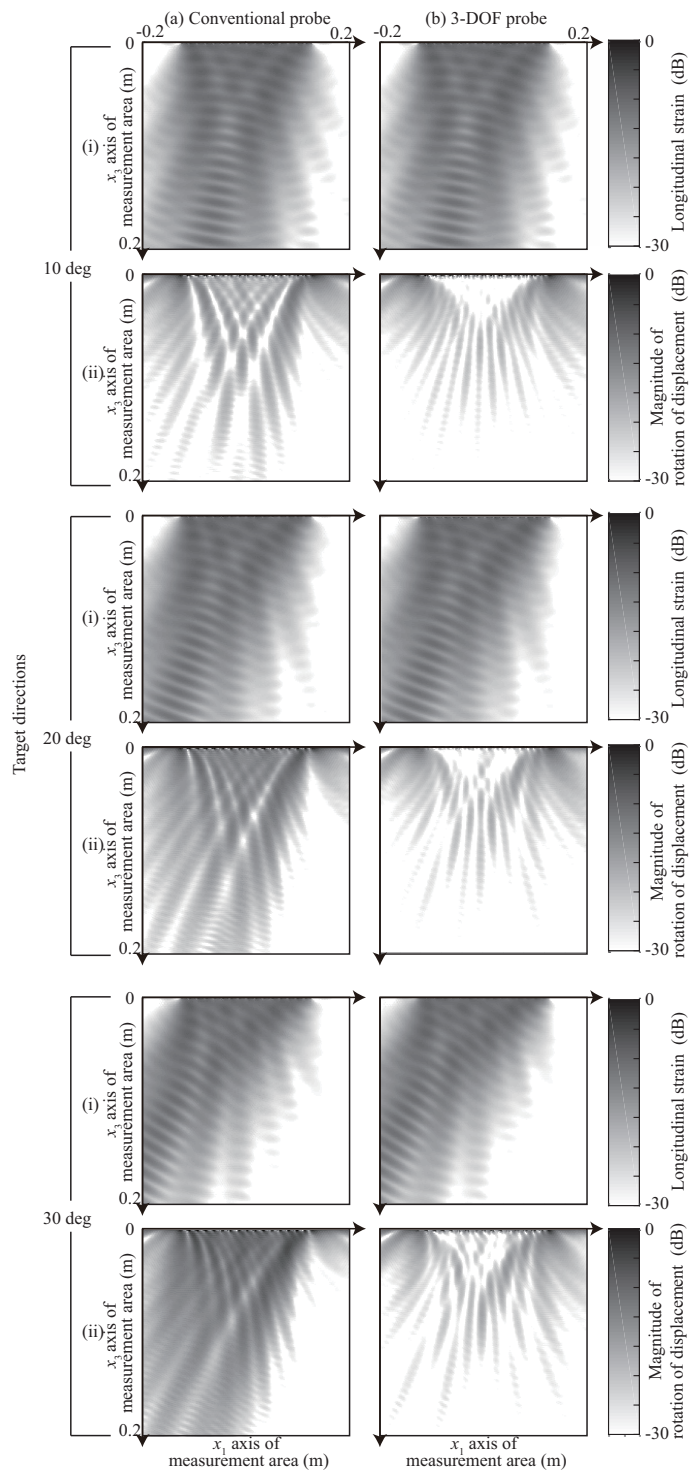


図 4.4: 強制変位の向きが (a)(従来プローブ) 接触境界に対して法線方向のときと, (b)(3自由度プローブ) 狙った方向に対して平行に振動しているときの (i) 縦波ビームと (ii) 副次的に発生する横波ビームの音場の計算結果の比較.

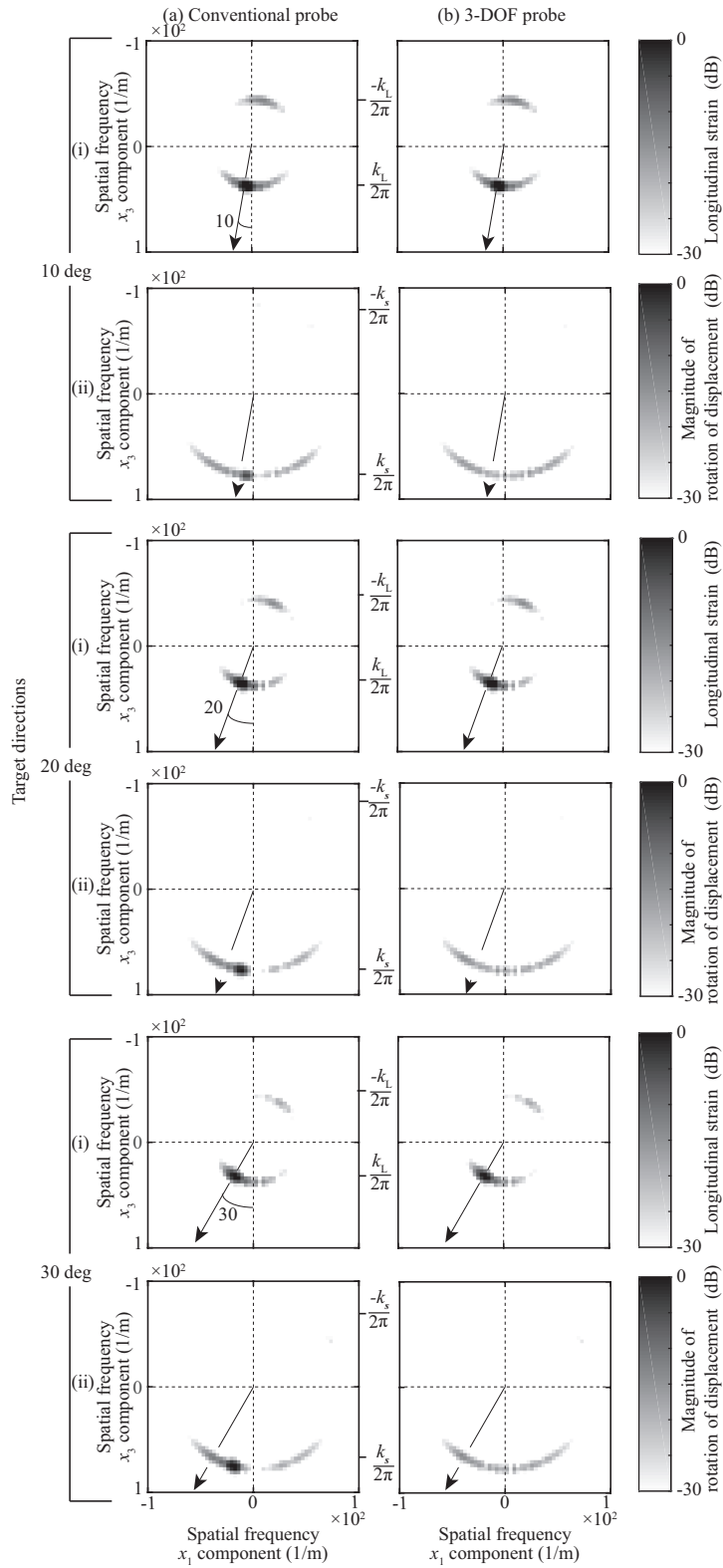


図 4.5: 強制変位の向きが(a)(従来プローブ)接触境界に対して法線方向のとき, (b)(3自由度プローブ)狙った方向に対して平行に振動しているときの(i)縦波音場および(ii)副次的に発生する横波音場の2次元フーリエ変換の結果の比較.

第4章 3自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いた副次的に発生するビームの抑制

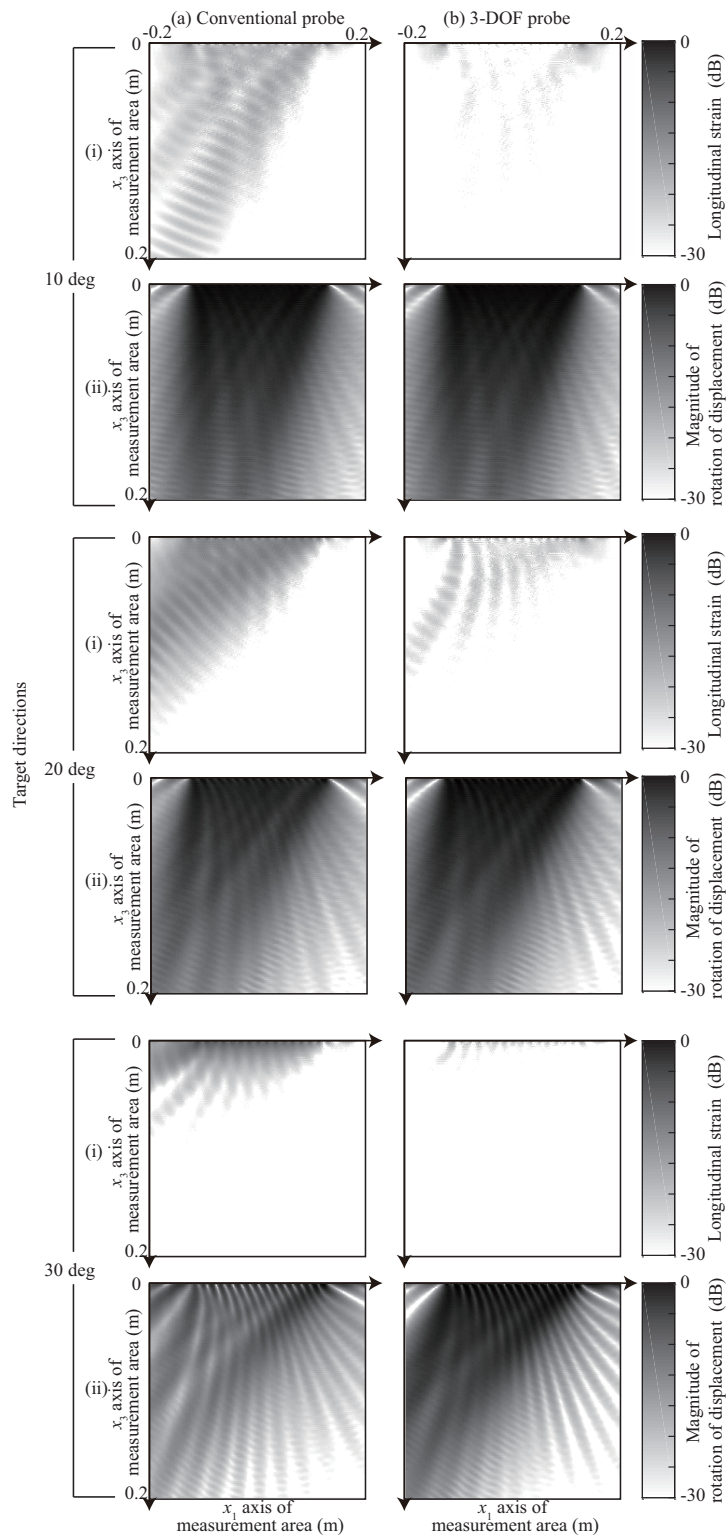


図 4.6: 強制変位の向きが (a)(従来プローブ) 接触境界に対して接線方向のときと, (b)(3自由度プローブ) 狙った方向に対して垂直に振動しているときの (i) 副次的に発生する縦波ビームと (ii) 横波ビームの音場の計算結果の比較.



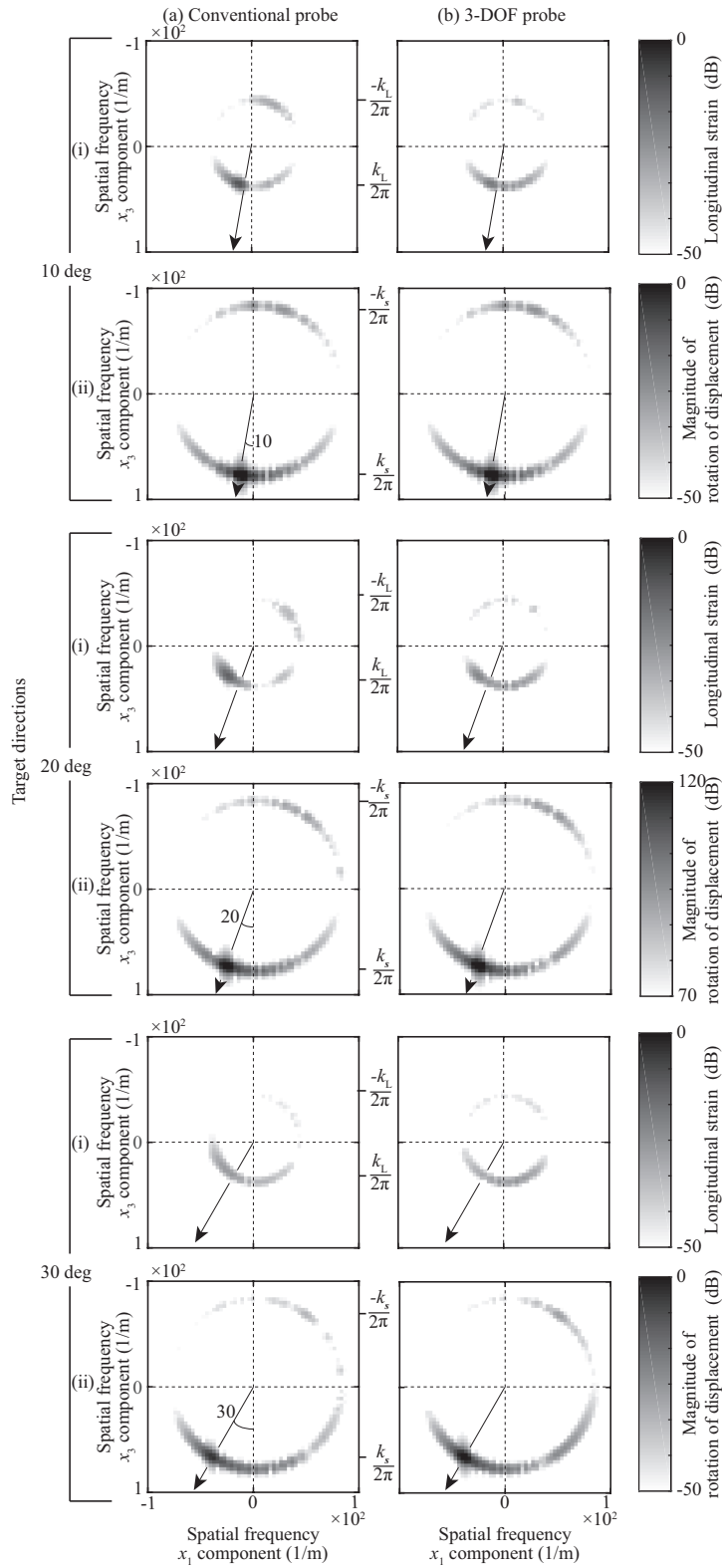


図 4.7: 強制変位の向きが (a)(従来プローブ) 接触境界に対して接線方向のとき, (b)(3 自由度プローブ) 狙った方向に対して垂直に振動しているときの (i) 縦波音場及び (ii) 副次的に発生する横波音場の二次元フーリエ変換の結果の比較.

### 4.2.3 2次元フーリエ変換を用いた音場の空間周波数スペクトル評価

4.2.2節で得られた音場に2次元フーリエ変換を適用することで、放射された音波の向きと強度を評価した。図4.3に、図4.2の空間周波数スペクトルを示す。縦波空間周波数と横波の空間周波数を比較すると、空間周波数が波長に反比例するため、縦波のほうが横波よりも空間周波数の直流成分を中心とした半径が小さくなっており、縦波と横波が分離できていることがわかる。また、プローブの真下方向に強度が一番大きくなっていることから、真下方向にビームが形成されていることが分かる。図4.3(i-a)および(i-b)を比較すると、接線方向振動のときには縦波が生じていないが法線方向振動のときには縦波が真下方向にビームが形成されていることが分かる。一方で、図4.3(ii-a)および(ii-b)を比較すると、図4.3(i-a)および(i-b)とは対照的に、法線方向振動のときには、横波は真下方向にはほとんど発生していないが、接線方向振動のときには横波の音場は真下方向にビームが形成されていることが分かる。

図4.5に、図4.4に2次元フーリエ変換を適用した結果を示す。ビーム方向が $\theta = 10^\circ$ のときの図4.5(i-a)および4.5(i-b)の比較によると、両方の図の縦波のビーム方向 $\theta = 10^\circ$ によく形成されていることが分かる。しかしながら、ビーム方向 $\theta = 10^\circ$ のときの、図4.5(i-b)の副次的に発生する横波ビームは図4.5(i-a)の横波ビームよりも小さくなった。狙った方向 $\theta = 20, 30^\circ$ のときの、図4.5(a)および4.5(b)も同様の結果が得られた。

図4.7に、図4.6に2次元フーリエ変換を適用した結果を示す。狙った方向が $\theta = 10^\circ$ のときの図4.7(ii-a)および4.7(ii-b)の比較によると、両方の図の横波のビーム方向 $\theta = 10^\circ$ によく形成されていることが分かる。縦波に対しては、狙った方向 $\theta = 10^\circ$ のときの、図4.7(i-b)の副次的に発生する縦波ビームは図4.7(i-a)の縦波ビームよりも小さくなった。ビーム方向 $\theta = 20^\circ$ のときの、図4.7(a)および4.7(b)も同様の結果が得られた。しかしながら、ビーム方向 $\theta = 30^\circ$ のときの図4.7(ii-a)および4.7(ii-b)によると、図4.7(ii-b)の横波のビームは図4.7(ii-a)の横波ビームよりも大きい結果となった。同時に、図4.7(i-a)の副次的に発生する縦波ビームはよく発生しなかった。しかし、図4.7(i-b)の副次守備発生する縦波ビームは狙った方向である $30^\circ$ の方向に対しては抑制された。

表4.2に図4.5および4.7の主ビームの強度および副次的に生じるビームの強度を示す。表4.2より、縦波のビームを形成した際にはステアリング角によらず、従来法と提案法で同程度の強度で縦波のビームを形成された。このとき、副次的に生じる横波の強度は約20 dB抑制された。一方で、横波のビームを形成した際には従来法と提案法で同程度の強度の横波のビームが形成された。特に、ステアリング角が $20^\circ$ および $30^\circ$ のときに従来法よりも提案法の方が、横波のビームの強度が大きくなった。また、このとき、副次的に生じる縦波の強度は約10 dB抑制された。

従来の超音波プローブではプローブの真下方向に縦波および横波を送信する垂直縦波用及び横波用プローブは縦波に対する横波比および横波に対する縦波比はそれぞれ-30dBとなるように設計されている[37]。縦波および横波ビーム形成時に従来法の縦波に対する横波比および従来法の横波に対する縦波比は-30dBよりも大きいことか

ら、本シミュレーションによる副次的に発生するビームによる影響は少なくないと考えられる。一方で、提案法の縦波ビーム形成時に縦波に対する横波比は10、および20°においては約-30dBとなっている。また、提案法の横波ビーム形成時の横波に対する縦波比は約-30dBとなっていることから、市販の垂直入射用のプローブと同程度の性能で副次的に生じる伝搬モードの音波を抑制し、その結果、副次的に生じるビームを抑制できたと考えられる。

表 4.2: ビームステアリング時のステリング角とビームの強度.

ステアリング角 (deg)	縦波のビームを形成				横波のビームを形成			
	縦波 (dB)		副次的な横波 (dB)		副次的な縦波 (dB)		横波 (dB)	
	従来法	提案法	従来法	提案法	従来法	提案法	従来法	提案法
10	127.1	127.1	115	101	109.5	100.7	129.1	129.4
20	124.1	124.1	119.6	97.2	106.1	98.4	124.8	125.3
30	120.5	120.5	123	101.9	89.97	82.9	116.2	120.8

表 4.3 に図 4.5 および 4.7 のビームの強度が最大値から半分になったときの角度である指向角を示す。表 4.3 によると、縦波のビームの形成時には、従来法と提案法で同程度の指向角となった。このときに副次的に生じる横波のビームの指向角は縦波の従来法よりも提案法が大きくなった。これより、副次的に生じる横波によるビームが形成されにくくなったことが分かる。一方で、横波のビームを形成した際は、横波の指向角は従来法と提案法で同程度となった。特に 20, 30° の時には、指向角は従来法よりも提案法のほうが小さくなった。このとき、副次的に生じる縦波の指向角は同程度となったが、ステアリング角が 30° を超えるときには、縦波が生じる角度は縦波臨界角を超えているため、指向角が大きく算出された。

表 4.3: ビームステアリング時のステリング角と指向角.

ステアリング角 (deg)	縦波のビームを形成				横波のビームを形成			
	縦波の指向角 (deg)		副次的な横波の指向角 (deg)		副次的な縦波の指向角 (deg)		横波の指向角 (deg)	
	従来法	提案法	従来法	提案法	従来法	提案法	従来法	提案法
10	10	10	7	7	16	8	5	5
20	4	4	8	12	12	12	10	7
30	18	18	5	25	50	60	8	9

## 4.3 まとめ

ビームステアリングを用いた固体中の非破壊検査の際に副次的に発生するビームが抑制できるのか確かめるために、強制変位の向きを変化させたときに、アレイから送信される縦波および横波のビームの放射パターンを2次元有限要素法によって計算した。その結果、縦波のビームを $\theta$ 方向に送信したときに、ビーム方向に対して振動方

#### 第4章3 自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いた副次的に発生するビームの抑制

---

向が平行となるように、振動方向  $\phi$  を  $\phi = \theta$  となるように傾けると副次的に発生する横波ビームは抑制されることが分かった。

また、横波のビーム  $\theta$  方向に送信したときに、ビーム方向に対して振動方向が垂直となるように、振動方向  $\phi$  を振動方向  $\phi = \theta + 90^\circ$  となるように傾けると副次的に発生する縦波ビームは抑制されることが分かった。

# 第5章 3自由度プローブ及びアレイ信号処理を用いた縦波と横波の判別

## 5.1 はじめに

3章で設計した提案プローブは使用する電極の選択によって、法線方向振動成分と接線方向振動の測定ができることから、受信信号の粒子変位方向を測定可能であることを述べた。この章では提案プローブとアレイ信号処理を組み合わせることで、到来パルス波が縦波もしくは横波の判別が可能か検証した。

## 5.2 有限要素法を用いた縦波及び横波の判別シミュレーション

### 5.2.1 シミュレーション条件

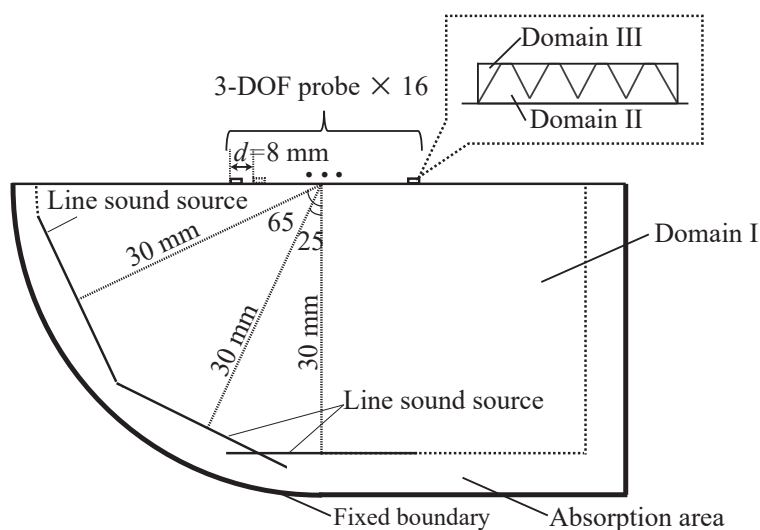


図 5.1: シミュレーションの概要図.

表 5.1: 縦波及び横波の判別のシミュレーション条件及びメッシュ分割.

	Number of elements	Element size(m)	Mechanical quality factor $Q$
Domain I	569,483	$\sim 1 \times 10^{-3}$	100(Absorption area 0.01)
Domain II	11,867	$\sim 1 \times 10^{-3}$	50
Domain III	7,644	$\sim 1 \times 10^{-3}$	10

縦波もしくは横波の到来パルス波の判別が可能であるか検証するために、3 自由度プローブアレイを含んだ信号受信の 2 次元波動伝搬は時間領域において計算された。シミュレーションの物性値は表 2.1 および 2.2 にまとめられた。図 5.1 に計算領域の概要図を示す。試料の表面にはピッチ  $d$  が 8 mm で媒質の表面に 3 自由度プローブを 16 個設置し、これらのプローブをリニアアレイとした。表 5.1 にシミュレーションの条件とメッシュ分割を示す。表 5.1 に示すように、領域 I, II, および III は 2 次の三角形要素で分割された。また、領域 I, II, および III の減衰パラメータは機械的品質係数によって設定された。それぞれの領域の要素サイズは 3.3.1 節と同じように設定された。吸収領域の機械的品質係数  $Q$  は、図 2.2 の線音源から発生した音波が吸収領域中で速やかに減衰されるように設定された。信号受信の波動伝搬は 0 から 17.5  $\mu\text{s}$  まで 0.5  $\mu\text{s}$  間隔で計算された。図 5.1 に示した励振境界から、0, 25 および 65° の方向から縦波および横波の判別を行った。この信号の受信の際には、指向性が 0, 25 および 65° に向くように縦波および横波を強調した。3 自由度プローブの周りの境界条件は自由端に設定し、プローブの上端の境界は自由端および変形が生じやすいと考えられる固定端としたときの比較を行った。0, 25 および 65° の方向の線音源から周波数 100 kHz で励振された正弦半パルス波 (ハーフサインパルス) は、3 自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いて計測された。ビームフォーミングによって指向性を向けた角度に対して、図 3.5 に示す縦駆動と横駆動の際に、それぞれの最大値で規格化したものを出力信号の重みづけとして使用した。

## 5.2.2 縦波と横波の判別結果

各プローブの左側の電極からの出力電圧  $v_{L1}, v_{L2}, \dots, v_{L16}$  および右側からの電極からの出力電圧  $v_{R1}, v_{R2}, \dots, v_{R16}$  は得られた。遅延時間  $\tau$  は  $\theta = 0, 25, \text{ および } 65^\circ$  方向にビームが形成されるように計算された。そして、遅延和信号  $V_{L0}, V_{R0}, V_{L25}, V_{R25}, V_{L65}, \text{ および } V_{R65}$  は式 (2.7) 及び (2.8) を用いて計算された。図 3.5 の  $\overline{v_L} + \overline{v_R}$  と  $\overline{v_L} - \overline{v_R}$  は  $S(90^\circ - \theta)$  と  $S'(\theta)$  として使用された。伝搬方向に対して垂直成分  $D_\perp$  と平行成分  $D_\parallel$  は式 (2.9) を用いて遅延和信号より計算された。そして  $D_\perp$  と  $D_\parallel$  の大きさを比較することで縦波と横波は推定された。

図 5.2 に、 $\theta = 0^\circ$  方向から音波が到来した際  $D_\parallel$  及び  $D_\perp$  をそれぞれ横軸及び縦軸にプロットした時のリサージュ図形を示す。図 5.2(i) によると、縦波が 3 自由度プローブアレイに入力されたときには、入力された縦波パルスの振動方向は伝搬方向に対して平行な成分が支配的となった。一方で、図 5.2(ii) によると、横波が 3 自由度プローブ

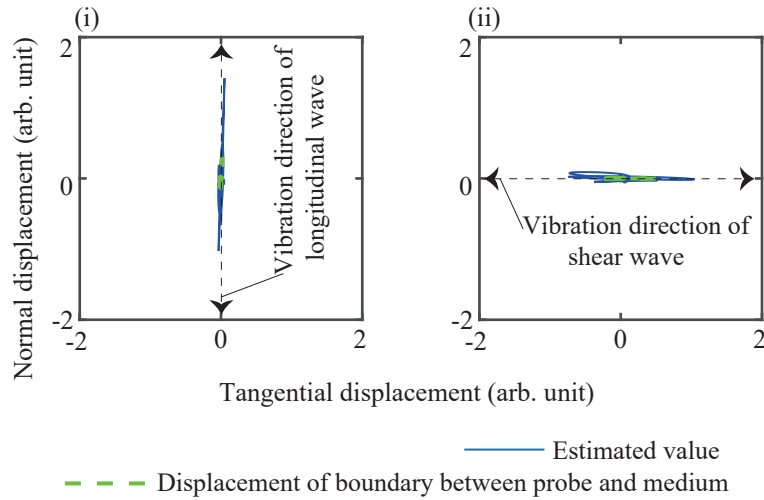


図 5.2: 縦波パルスと横波パルスが  $0^\circ$  方向から 3 自由度プローブアレイに入力されたときの、到来波のリサージュ図形。

ブアレイに入力されたときには、入力された横波パルスの振動方向は伝搬方向に対して垂直な成分が支配的となった。これらの結果より、 $\theta = 0^\circ$  の方向からの到来パルス波は縦波であるか横波であるか推定可能であることが示された。

次に、到来パルス波が斜入射されたときのシミュレーション結果を示す。図 5.3 に  $\theta = 25^\circ$  の方向からの、アレイ信号処理を用いて強調された縦波および横波の時間波形を示す。図 5.3(i-a) および 5.3(i-b) は、縦波が  $\theta = 25^\circ$  の方向の線音源から送信されたとき、遅延時間  $\tau = \tau_{l25}$  もしくは  $\tau_{s25}$  を用いてビームフォーミングにより強調された時間波形を示す。図 5.3(i-a) と 5.3(i-b) を比較すると、 $\tau = \tau_{l25}$  を使用した図 5.3(i-a) の時間波形は、 $\tau = \tau_{s25}$  を使用した図 5.3(i-b) の時間波形よりも大きいという結果が得られた。一方で、図 5.3(ii-a) および 5.3(ii-b) は、横波が  $25^\circ$  の方向の線音源から送信されたとき、それぞれ  $\tau = \tau_{l25}$  もしくは  $\tau_{s25}$  を用いてビームフォーミングにより強調された時間波形を示す。図 5.3(ii-a) および Fig. 5.3(ii-b) を比較すると、 $\tau = \tau_{s25}$  を用いた図 5.3(ii-b) の時間波形は、 $\tau = \tau_{l25}$  を用いた図 5.3(ii-a) の時間波形よりも大きいという結果が得られた。

次に、図 5.4 および 5.4 に、アレイ信号処理を用いて強調された時間波形を示す。図 5.4(i-a) および 5.4(i-b) は、縦波が  $\theta = 65^\circ$  の方向の線音源から送信されたとき、 $\tau = \tau_{l65}$  もしくは  $\tau_{s65}$  を用いてビームフォーミングにより強調された時間波形を示す。図 5.4(i-a) と 5.4(i-b) の比較によると、 $\tau = \tau_{l65}$  を使用した図 5.4(i-a) の時間波形は、 $\tau = \tau_{s65}$  を使用した図 5.4(i-b) の時間波形よりも大きいという結果が得られた。一方で、図 5.4(ii-a) および 5.4(ii-b) は、横波が  $65^\circ$  の方向の線音源から送信されたとき、それぞれ  $\tau = \tau_{l65}$  もしくは  $\tau_{s65}$  を用いてビームフォーミングにより強調された時間波形を示す。図 5.4(ii-a) および 5.4(ii-b) を比較すると、 $\tau = \tau_{s65}$  を用いた図 5.4(ii-b) の時間波形は、 $\tau = \tau_{l65}$  を用いた図 5.4(ii-a) の時間波形よりも大きいという結果が得られた。式 (2.4) and (2.4) を用いて、 $\tau_{l\theta}$  or  $\tau_{s\theta}$  の選択によって縦波もしくは横波が強調されることが確認さ

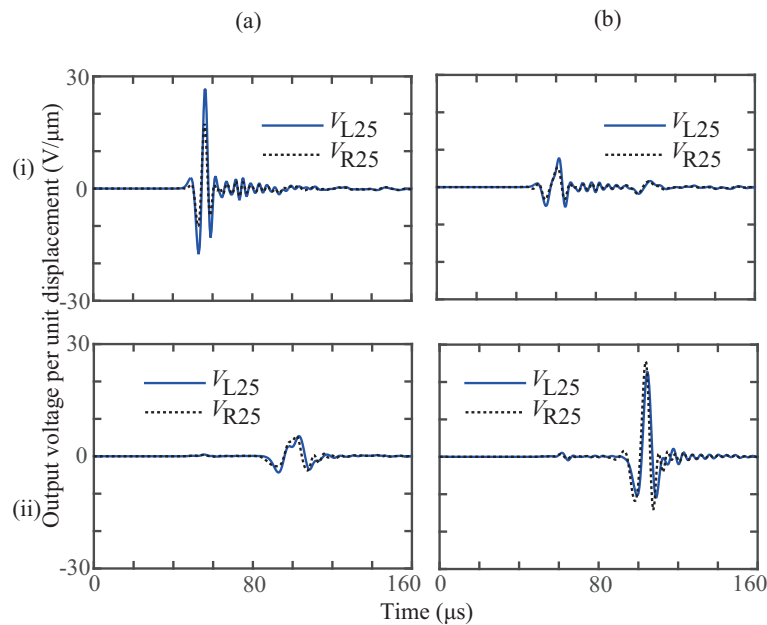


図 5.3: (i) 縦波および (ii) 横波が入力されたときの時間波形  $V_{L25}$  および  $V_{R25}$  のシミュレーション結果:(a)  $\tau = \tau_{125}$ ; (b)  $\tau = \tau_{s25}$ .

れた。これは式 (2.5) および (2.6) によって、縦波もしくは横波が同相化されて強調されたからである。

到来パルス波が縦波か横波かを推定するために、リサーチ図形を描くことで粒子変位の向きは推定された。3 自由度プローブと媒質の間の接触境界の法線成分と接線成分は  $V_{L25}$  および  $V_{R25}$ ,  $V_{L65}$  および  $V_{R65}$  の和と差より計算された。

図 5.5 に 25 度方向から到来した縦波パルス波および横波パルスが 3 自由度プローブに入力されたときのリサーチ図形を示す。さらに、3 自由度プローブアレイと媒質の間の変位は式 (2.5) によって強調された。強調された変位はリファレンスとして図 5.5 に破線で示す。

図 5.5(i-a) および 5.5(i-b) に、3 自由度プローブアレイの上端の境界を自由端としたときのシミュレーション結果を示す。図 5.5(i-a) によると、縦波の振動方向は伝搬方向に対して平行となった。3 自由度プローブを用いて得られたその推定結果と境界の変位から得られた結果はよく一致した。しかしながら、図 5.5(i-b) によると、3 自由度プローブから推定された結果と境界の変位から得られた横波の振動方向は、推定結果が楕円となってしまったため、よく一致しなかった。したがって、法線方向成分と接線方向成分の間に位相差が生じたことが分かった。

図 5.5(ii-a) および 5.5(ii-b) に 3 自由度プローブアレイの上端を固定端とした結果を示す。図 5.5(i-a) と 5.5(ii-a) の比較によると、図 5.5(ii-a) の推定結果は、図 5.5(i-a) の推定結果よりも大きな振幅が得られた。また、図 5.5(i-b) と 5.5(ii-b) の比較によると、図 5.5(ii-b) の推定結果は、図 5.5(i-b) の推定結果よりも、境界の変位から得られた結果とよく一致した。これは、プローブの上端の境界条件が固定され、変形が生じやす



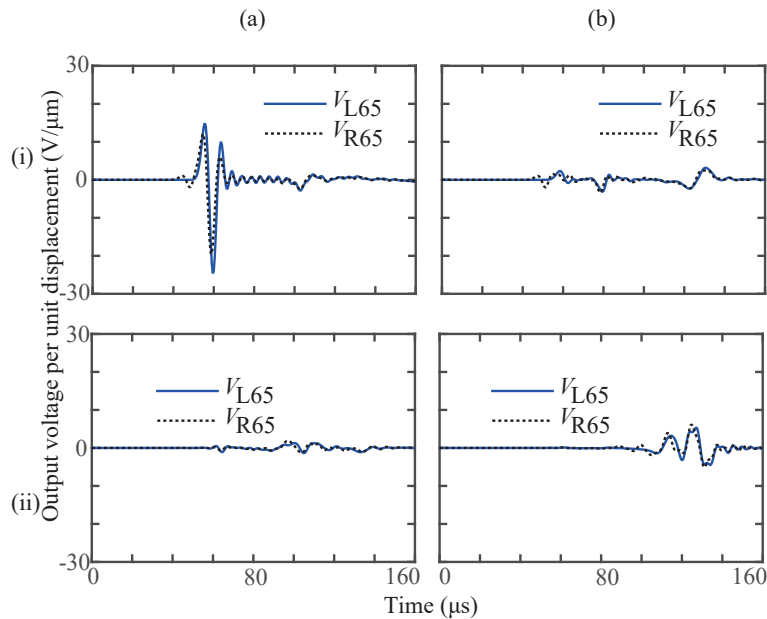


図 5.4: (i) 縦波および (ii) 横波が入力されたときの時間波形  $V_{L65}$  and  $V_{R65}$  のシミュレーション結果: (a)  $\tau = \tau_{L65}$ ; (b)  $\tau = \tau_{s65}$ .

くなったためであると考えられる。

図 5.6 に 3 自由度プローブアレイと媒質の間の接触境界の法線成分と接線成分に対して回転行列をかけることで計算された  $D_{\parallel}$  および  $D_{\perp}$  の時間波形を示す。図 5.6(i-a) および 5.6(i-b) は、3 自由度プローブアレイの上端を自由端としたときの結果を示す。図 5.6(i-a) によると、 $D_{\parallel}$  の大きさが  $D_{\perp}$  の大きさよりも大きいことを示している。それゆえ、到来波が縦波であると推定される。しかしながら、図 5.6(i-b) によると、 $D_{\parallel}$  と  $D_{\perp}$  の大きさが同程度なので、その到来パルス波が縦波か横波であるのか推定することは難しいという結果が得られた。また、図 5.6(ii-a) および 5.6(ii-b) にプローブの上端の境界条件を固定端としたときのシミュレーション結果を示す。図 5.6(ii-a) によると、 $D_{\parallel}$  が支配的となった。したがって、その到来パルス波が縦波であるという推定結果が得られた。対照的に図 5.6(ii-b) によると、 $D_{\perp}$  が支配的となった。したがって、到来パルス波が横波であると推定される。図 5.6(i-a) および 5.6(i-b) と図 5.6(ii-a) および 5.6(ii-b) の比較によると、後者の立ち上がり時間は前者の立ち上がり時間よりも早いということが分かる。これは 3 自由度プローブの上端を固定することで変形が発生しやすくなったためと考えられる。

次に、図 5.7 に  $\theta = 65^\circ$  方向から到来した縦波と横波から計算された触境界の法線成分と接線成分をプロットすることで得られたリサージュ図形を示す。さらに、3 自由度プローブアレイと媒質の間の変位は式 (2.5) によって強調された。強調された変位は、リファレンスとして、図 5.7 に破線で示す。図 5.7(i-a) および 5.7(i-b) はプローブの上端を自由端としたときの結果を示す。これらの結果によると、3 自由度プローブアレイによる推定結果が楕円になってしまうため、推定結果は境界の変位より得ら

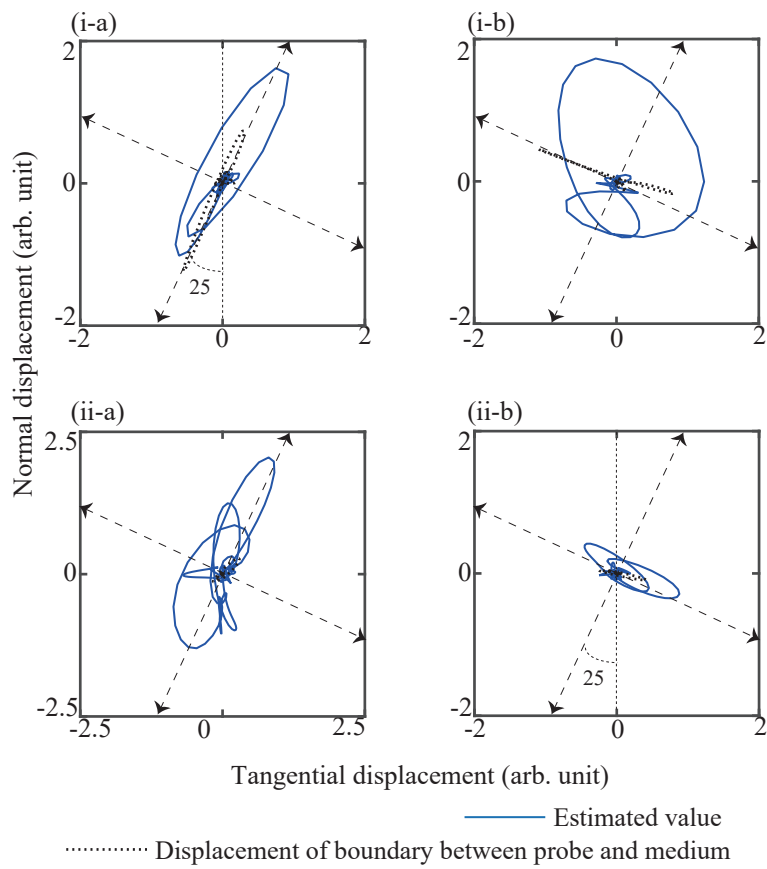


図 5.5:  $\theta = 25^\circ$  方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの図 5.3(i-a) および 5.3(ii-b) のリサージュ図形: プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端.

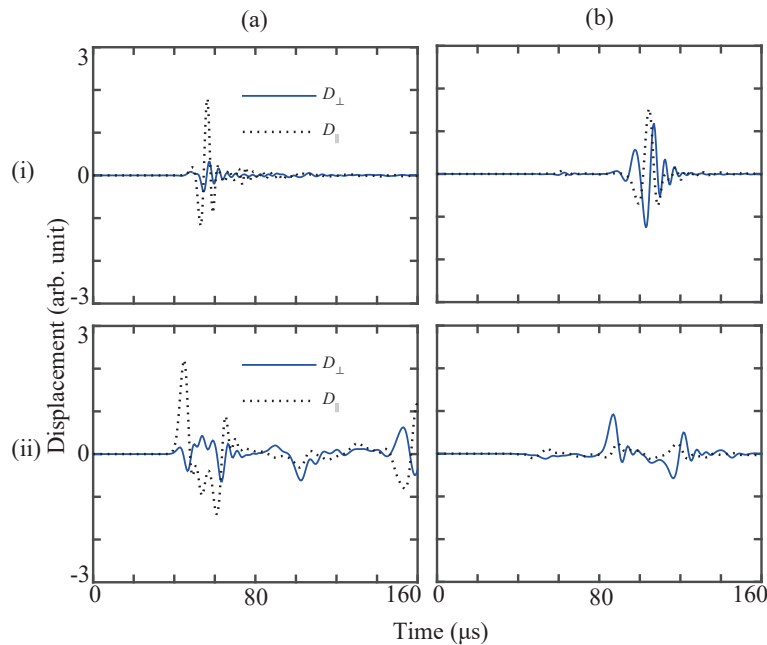


図 5.6:  $\theta = 25^\circ$  方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの  $D_{\parallel}$  および  $D_{\perp}$  の比較: プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端.

れたリファレンスとあまり一致しないという結果が得られた.

図 5.7(ii-a) および 5.7(ii-b) に 3 自由度プローブアレイの上端を固定端とした結果を示す. 図 5.7(ii-a) によると, 到来パルス波の振動方向が伝搬方向に対して平行成分だけでなく垂直成分も持つという結果が得られた. これは, 図 5.5(ii-b) と同様に, プローブの上端が固定されることで変形が生じやすくなったためと考えられる. しかしながら, 5.7(ii-b) においては, リサージュ図形が集中して重なり合った. これは 3 自由度プローブが共振したためと考えられる.

図 5.8 に 3 自由度プローブアレイと媒質の間の接触境界の法線成分と接線成分に対して回転行列を書けることで計算された  $D_{\parallel}$  および  $D_{\perp}$  の時間波形を示す. 図 5.8(i-a), 5.8(i-b), 5.8(ii-a), および 5.8(ii-b) は, それぞれ, 5.7 と対応している. 図 5.8(i-a) によると,  $D_{\parallel}$  の大きさが  $D_{\perp}$  の大きさよりも大きいことを示している. それゆえ, 到来波が縦波である推定される. 一方で, 図 5.8(i-b) によると,  $D_{\parallel}$  と  $D_{\perp}$  の大きさが同程度なので, その到来パルス波が縦波か横波であるのか推定することは難しいという結果が得られた. 図 5.8(ii-a) によると, いくつかのパルスが計測されたことが分かる. パルス列の一番目の信号に注目すると,  $D_{\parallel}$  の大きさは,  $D_{\perp}$  の大きさよりも数倍大きいという結果が得られた. 一方で, 図 5.8(ii-b) によると, 3 自由度プローブが共振しているため, 縦波か横波かの推定は難しいという結果が得られた.

これらのシミュレーション結果から,  $\theta = 0$  もしくは  $25^\circ$  からの到来パルス波は縦波か横波かを推定可能であるということが示された. 3 自由度プローブのずり変形は縦変形よりも生じにくいため, 上端を固定することで推定結果が改善可能であることが分かった. また, プローブの厚み縦振動と厚みすべり振動の共振周波数が異なるの

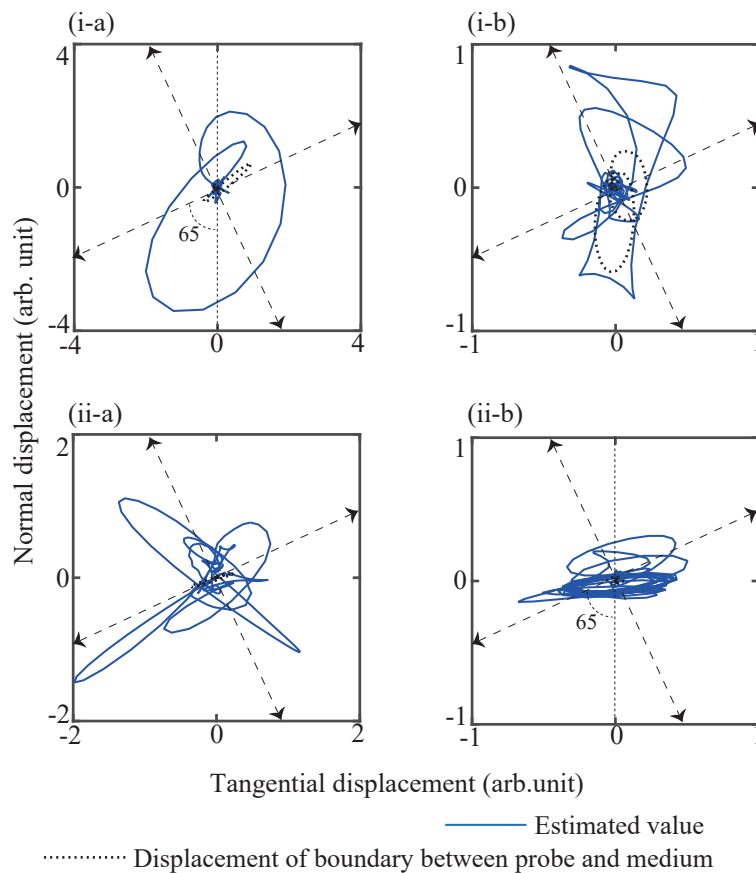


図 5.7:  $\theta = 65^\circ$  方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの図 5.4(i-a) および 5.4(ii-b) のリサージュ図形: プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端.

で、位相の回転量が異なった。したがって、位相特性を補正することで推定結果が改善可能出ることが分かった。また、3 自由度プローブの減衰量を増加することで、3 自由度プローブの共振を抑制することが重要であることが分かった。

### 5.3 まとめ

提案プローブとアレイ信号処理を用いて縦波と横波の判別が可能なのを検証した。アレイプローブを使用する際には、縦波および横波を特定の角度  $\theta$  方向へ入射する。受信時においても同じ到来方向  $\theta$  にビームフォーミングをすることで、音波の到来方向を推定する。また、ビームフォーミング後の提案プローブの出力信号の和と差をとり感度補正および回転補正をとることで、音波の伝搬方向に対して垂直および平行方向の成分を測定し、到来パルス波が縦波か横波かが推定された。以上から、音波の到来方向および粒子変位方向から縦波と横波の判別が可能であることが示唆された。

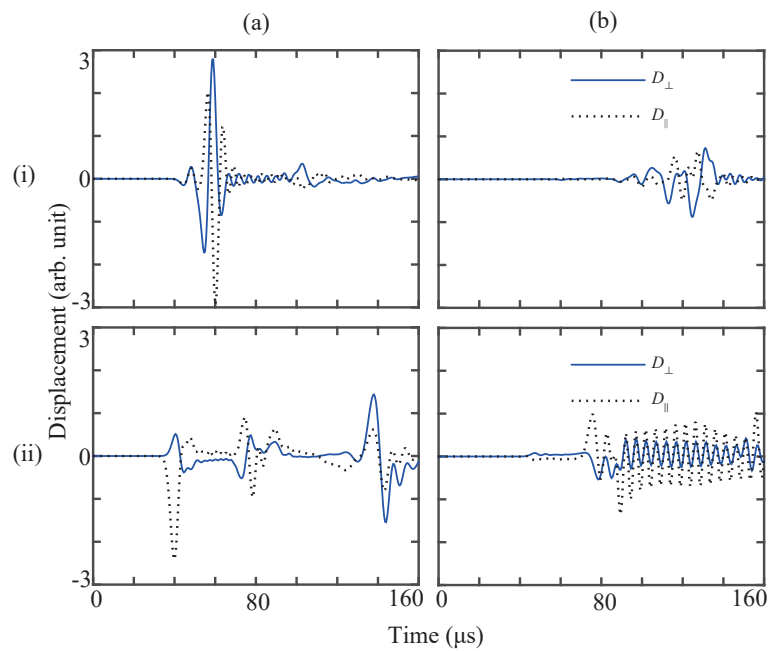


図 5.8:  $\theta = 65^\circ$  方向から (a) 縦波および (b) 横波が 3 自由度プローブに入力されたときの  $D_{\parallel}$  および  $D_{\perp}$  の比較: プローブの上端を (i) 自由端, (ii) 固定端.+.

## 第6章 結論

我々は任意の方向の粒子変位を送受信可能な3自由度を有する超音波プローブを提案した。有限要素解析を用いて、3自由度プローブの感度および特性は解析された。その結果、3自由度プローブは送信時において、向かい合う電極のペアに入力する電圧の位相を調整することで厚み縦振動時および厚みすべり振動を発生することが示された。受信時において、プローブに入力された垂直変位およびずり変位成分が向かい合った電極から発生する電圧の和と差をとることで測定が可能であるということが示された。これらにより、各チャンネルの入出力電圧の位相を調整することで任意方向の粒子変位を測定可能であることが示された。

また、3自由度プローブを複数個用いることで、送受信におけるアレイ探傷の問題点を解決可能なのかを、有限要素法で確かめた。送信時には、3自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いて、ビームの伝搬方向に対して平行もしくは垂直に振動させることで、副次的に発生するビームを抑制可能なことが示された。受信時には、3自由度プローブおよびアレイ信号処理を用いることで、伝搬方向に対して垂直な変位と平行な変位成分が計測できることが示された。さらに、本シミュレーションにおいては $0^\circ$ 方向および $25^\circ$ 方向から受信されたパルス波は、伝搬方向に対して垂直な変位と平行な変位の大きさを比較することで、縦波と横波が判別可能であることが示唆された。

この3自由度プローブおよびアレイ信号処理によって、超音波アレイ探傷における送受信時における問題点が解決可能なことが示された。送信時においては、副次的に発生するビームの影響で超音波アレイ探傷のSN比や測定精度の悪化の懸念があった。この副次的に発生するビームを抑制することで、超音波アレイ探傷のSN比や測定精度の悪化を抑制できると考えられる。また受信時には従来プローブを用いた超音波アレイ探傷においては縦波と横波の判別ができないことから、アーティファクトが生じる可能性があった。この受信時の問題点を3自由度プローブとアレイ信号処理によって、いくつかの到来確度においては縦波と横波の判別の可能なことが示された。これにより、超音波アレイ探傷のアーティファクトを判別可能なことが示された。これらの送受信のシミュレーション結果より、超音波アレイ探傷における3自由度プローブの有効性が確認された。今後、3自由度プローブの過渡特性の改善およびその有効性を実験で確かめていきたい。

## 謝辞

本論文は筑波大学システム情報系知能機能工学域准教授 若槻尚斗先生には公使にわたって多大なご指導を賜りました。研究テーマの設定，評価方法の検討や原稿執筆や基本的な質問に至るまでつきっきりで終始丁寧な助言を下さりました。また，何度失敗しても挑戦の機会を与えてくださったこと，心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

筑波大学システム情報系知能機能工学域教授 水谷孝一先生は，圧電デバイスに関して研究の機会と場を与えてくださっただけでなく，研究発表などの貴重な経験を積む機会をくださいました。また，研究発表においては，研究に関する鋭いご指摘だけでなく，図表の示し方などの様々ご指摘を頂きました。これらのアドバイスは本論文をまとめる上で無くてはならないものでした。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

筑波大学システム情報系知能機能工学域准教授 海老原格先生には，通信という別の視点から本論文の執筆や学会発表に関して，細やかなご指導を頂きました。また，博士学生会として企業とのイベントの運営や，報告書の作成などに関しましても，大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

筑波大学システム情報系知能機能工学域助教 前田祐佳先生には，専門性の異なる視点に立ち，筆者の研究を見直す機会を頂きました。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

筑波大学システム情報系知能機能工学域助教 善甫啓一先生には，後期課程入試のときから研究発表のご指導を頂きました。また，公私にわたり様々なイベントに連れて行って頂きました。他大からきた筆者が，早く研究室の皆様と打ち解けることができたのは先生のおかげです。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

筑波大学システム情報系知能機能システム専攻音響システム研究室の皆様は研究活動だけでなく，日常生活においても日々大変親切に接していただき，充実した学生生活を送ることができました。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

関西大学システム理工学部物理・応用物理学准教授 山本健先生には，公私にわたって現在の筆者の精神を培っていただきました。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

最後に筑波大学大学院に進学する機会を与えて頂き，学ぶにあたり様々な面で支えてくれた両親に心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Y. Roh: Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 07KA01 (2014).
- [2] T. Shiina: Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 07KA02 (2014).
- [3] D. H. Turnbull and F. S. Foster: IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **38**, 320 (1991).
- [4] M. Lang and H. Ermert: Biomed. Eng./Biomed. Tech. **42**, 108 (1997).
- [5] A. Pilarski and J. L. Rose: J. Appl. Phys. **63**, 300 (1988).
- [6] Y. Ohara, S. Yamamoto, T. Mihara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 3908 (2008).
- [7] A. Ouchi, A. Sugawara, Y. Ohara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 07HC05 (2015).
- [8] A. Sugawara, K. Jinno, Y. Ohara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 07HC08 (2015).
- [9] K. Kakuma, K. Mizutani, N. Wakatsuki and T. Ebihara: Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 07HC10 (2015).
- [10] C. Holmes, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox: NDT&E Int. **38**, 701 (2005).
- [11] K. Kakuma, Y. Norose, K. Mizutani and N. Wakatsuki: Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 07HC10 (2013).
- [12] H. Mitsui, K. Mizutani and N. Wakatsuki: Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 07GD05 (2009).
- [13] Y. Norose, K. Mizutani and N. Wakatsuki: Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 07HC09 (2013).
- [14] E. Segal, P. Dickstein, Y. Segal, S. Kenig and H. Dodiuk: J. Nondestr. Eval. **9**, 1 (1989).
- [15] K. Takahashi, K. Jinno, Y. Ohara and K. Yamanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 07KC20 (2014).



- 
- [16] R. Miyamoto, K. Mizutani, T. Ebihara and N. Wakatsuki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 07HC11 (2015).
- [17] O. Barkved, B. Bartman, B. Compani, J. Gaiser, R. Van Dok, T. Johns, P. Kristiansen, T. Probert and M. Thompson: *Oilfield Rev.* **16**, 42 (2004).
- [18] N. Wakatsuki, K. Mizutani and K. Nagai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 3084 (1996).
- [19] K. Mizutani, N. Wakatsuki and K. Nagai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 3160 (1997).
- [20] J. Takarada, N. Wakatsuki and K. Mizutani: *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 07HC03 (2011).
- [21] N. Wakatsuki, T. Tsuchiya, Y. Kagawa and K. Hatta: *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 3040 (1998).
- [22] J. Yamamoto, Y. Mizuno, M. Tabaru and K. Nakamura: *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 07HE16 (2015).
- [23] T. Oguri, K. Tamura, K. Yoshida, J. Mamou, H. Hasegawa, H. Maruyama, H. Hachiya and T. Yamaguchi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 07HF14 (2015).
- [24] H. Mizota, Y. Nagashima and T. Obana: *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 07HC03 (2015).
- [25] 超音波フェイズドアレイ技術 基礎編 2014年版, 日本工業出版, (2014).
- [26] 超音波フェイズドアレイ技術 実技・応用編 2014年版 - 月刊「検査技術」特別企画, 日本工業出版, (2014).
- [27] 音のアレイ信号処理 音響テクノロジーシリーズ), コロナ社, (2011).
- [28] H. Hajime, A. Tetsuya, I. Y. Mikihiro Goto and K. Yamada: *Nihon Onkyo Gakkaishi* **62**, 500 (2006); [in Japanese].
- [29] P. Crombie, P. A. J. Bascom and R. S. C. Cobbold: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **44**, 997 (1997).
- [30] A. Voleišis, R. Kažys, B. Voleišienė and R. Sliteris: *Ultragarsas (Ultrasound)* **66**, 25 (2011).
- [31] J. Rouvaen, A. Menhaj-Rivenq, P. Logette, P. Goutin and F. Haine: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33**, 1287 (2000).
- [32] Y. Ono, Z. Qu and K.-T. Wu: *Ultrasonics* **53**, 637 (2013).
- [33] R. Murayama, M. Kobayashi and C.-K. Jen: *J. Sens. Technol.* **3** 25 (2013).

- [34] O. Yutaka, M. Hitoshi, O. Kyosuke and G. Tada-nori: BUTSURI-TANSA (Geophysical Exploration) **64**, 139 (2011); [in Japanese].
- [35] K. E. Jansen, C. H. Whiting and G. M. Hulbert: Comput. Methods Appl. Mech. Eng. **190** 305 (2000).
- [36] J. Chung and G. Hulbert: J. Appl. Mech. **60**, 371 (1993).
- [37] 超音波探触子カタログ, オリンパス株式会社, (2013).

# 付録A 3自由度プローブの形状による周波数特性の変化

## A.1 目標仕様

厚み縦振動および厚みずり振動を選択的に独立して送受するために、3自由度プローブの目標仕様として、対称な形状を有していること。初期分極軸の方向に対して電界の向きが可変となるように、複数の溝と複数の電極を有していることを述べた。また、パルスエコー法などの非破壊検査に使用するためには、良好な過渡特性が望まれる。一般的な非破壊検査では、周波数が100 kHzのオーダから10 MHzのオーダで使用される。つまり、3自由度プローブにはこの帯域において、フラットな周波数特性が要求される。

この特性を達成するためには、プローブの共振周波数は使用する帯域の最大値もしくは上限付近に選ぶ必要がある。しかしながら、プローブの共振周波数を10 MHzに設定するには、プローブの厚みが100 $\mu\text{m}$ 程度にしなければならず、プローブの加工が難しくなる。

次に従来のプローブの感度向上に必要なパラメータとして次に示すことが考えられる。圧電材料の内部の電界を大きくするために、入力電圧が大きいこと、電極間の距離が短いこと、および電極が大きいことである。

そこで、プローブの厚さを1mmのオーダに設定し、プローブの形状以下のように変化させ、同じ寸法の従来の縦波用の振動子および、従来の横波用の振動子を比較することで、フラットな周波数特性および感度の向上が図れるのか検討する。

1. 溝の数を増やす。
2. (電極の面積を大きくするために) 溝の傾きを変化。
3. (電極の面積を大きくするために) 溝の傾きを維持し溝の深さを変化。

## A.2 シミュレーション方法

図A.1に本シミュレーションの概要図を示す。厚みが一定という条件のもと、電極の広さを変化させた際の影響、溝の数を変化させた際の影響および溝の深さを変化さ

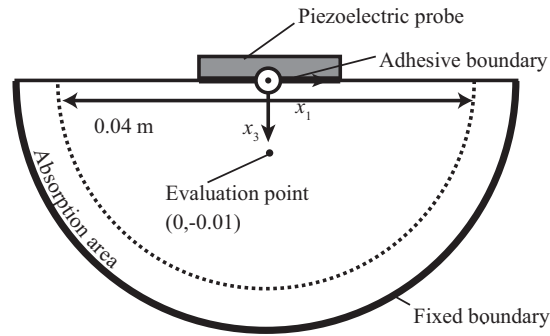


図 A.1: シミュレーションの概要図.

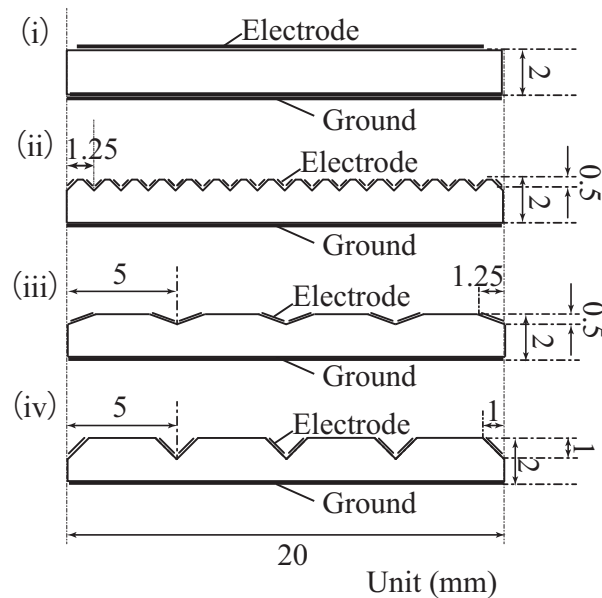


図 A.2: 3 自由度プローブの形状

せた際とき，100 kHz から 20 kHz 間隔で 10 MHz の範囲の評価点における縦波成分と横波成分の周波数特性は計算された．表 2.1 および 2.2 に本シミュレーションに用いた物性値を示す．また本シミュレーションに用いたパラメータを示す．図 A.2 にシミュレーションに用いたプローブの形状を示す．図 A.2(i) は 3 自由度プローブの縦駆動時および横駆動時のリファレンスとして用いた従来の厚み縦振動子および厚みすべり振動子である．厚み縦振動子および厚みすべり振動子分極軸は，それぞれ厚み方向および長手方向とした．また，図 A.2(ii), A.2(iii), および A.2(iv) に電溝の数，極の広さ，溝の深さを変化させた 3 自由度プローブの形状を示す．縦駆動時には 1 V の電圧が  $v_L$  および  $v_R$  に入力された．一方で，横駆動時には，-1 V, 1V の電圧が  $v_L$  もしくは  $v_R$  にそれぞれ入力された．

表 A.1: Parameters in simulation.

Frequency range	from 100 kHz to 10MHz at 20 kHz intervals	
	Longitudinal driving	Shear driving
Input voltage (V)	$v_L = 1$	$v_R = 1$
	$v_R = 1$	$v_R = -1$
	Mechanical quality factor	
PZT-4	50	
Aluminum(Medium)	100(Damping area 50~1)	

### A.3 シミュレーション結果

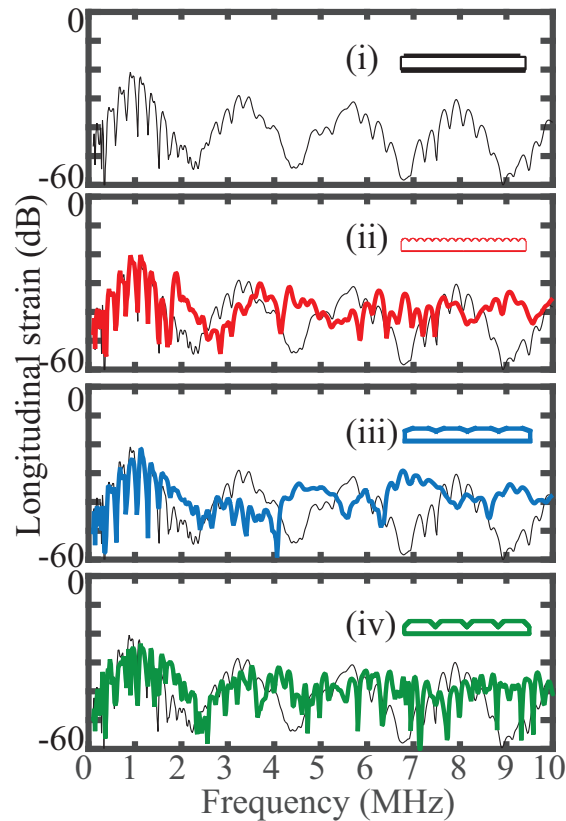


図 A.3: 評価点における縦駆動時の縦波成分の周波数応答のシミュレーション結果.

図 A.3 に縦駆動時の周波数応答を示す. 図 A.3(i) によると, 半波長共振の成分が表れている. しかしながら, 図 A.3(ii), A.3(iii) および A.3(iv) によると, 図 A.3(i) の厚み縦振動子と比較すると, 周波数応答のディップは減少した. 図 A.4 に A.3 逆フーリエ変換を適用することで得られた縦駆動時の時間波形を示す. 図 A.4 によると, 厚み縦振動子と比較すると, 顕著な変化は得られなかった. また約  $6\mu\text{s}$  に吸収境界で吸収されきらなかった反射波が生じている. これらの反射波の影響のため, 周波数特性の周

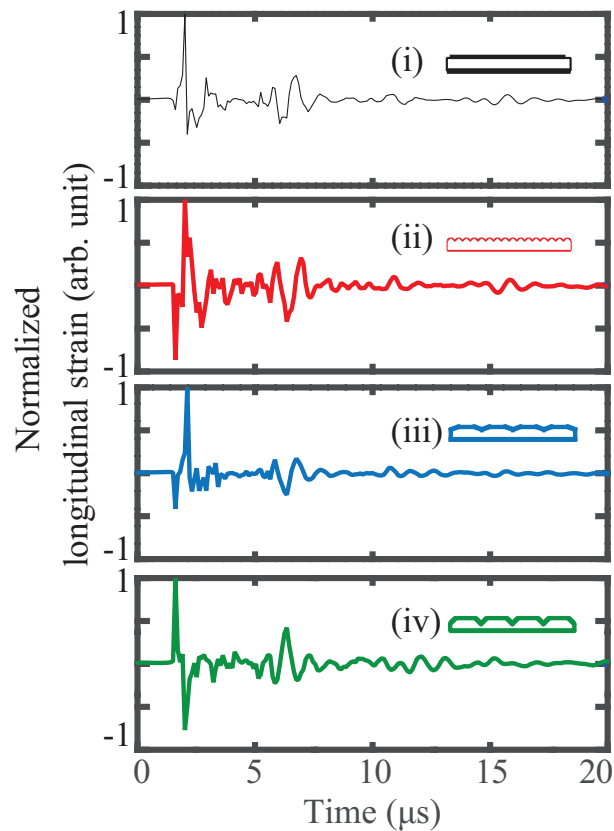


図 A.4: 縦駆動時の時間波形のシミュレーション結果.

期的なディップが生じている．この結果から，従来の厚み縦振動子から発生される縦波と同程度の縦波が図 A.2(ii), A.2(iii) および A.2(iv) 発生されることが分かった．

次に，図 A.5 横駆動時の周波数応答を示す．一方で，横駆動においては，従来の厚みすべり振動子と比較すると過渡特性の改善が見られた．図 A.5(i) によると，縦駆動と同様に，半波超長共振の成分が生じた．一方で，図 A.5(ii), A.5(iii) および A.5(iv) によると，調和成分以外の周波数成分が生じた．特に，図 A.5(ii) に注目すると，基本共振周波数成分を除いて，図 A.5(i) の従来の厚み滑り振動子よりも大きな周波数成分が得られた．溝の数を増やすことによって，電極間の距離が小さくなることで感度が増加したためと考えられる．また，文献 [26] によると，この複数の溝を有する構成においては，入力された電界が段階的に変化し，偶数次の共振モードもこの構成で励起される結果が得られている．

図 A.6 横駆動時の横波の成分の時間波形を示す．図 A.6(i) のパルス幅よりも，図 A.6(ii), Fig. A.6(iii) and Fig. A.6(iv) のパルス幅のほうが短いというシミュレーション結果が得られた．特に，立ち上がり時間に注目すると，図 A.6(i) の立ち上がり時間と図 A.6(ii), A.6(iii) および A.6(iv) の立ち上がり時間は異なった．この到来時間は約  $1 \mu\text{s}$  である．この時間は横波がプローブの厚みを伝搬する時間に対応している．それゆえ，図 A.2(ii), A.6(ii) および A.6(iv) は横駆動時には上端のみが振動していると考えられ

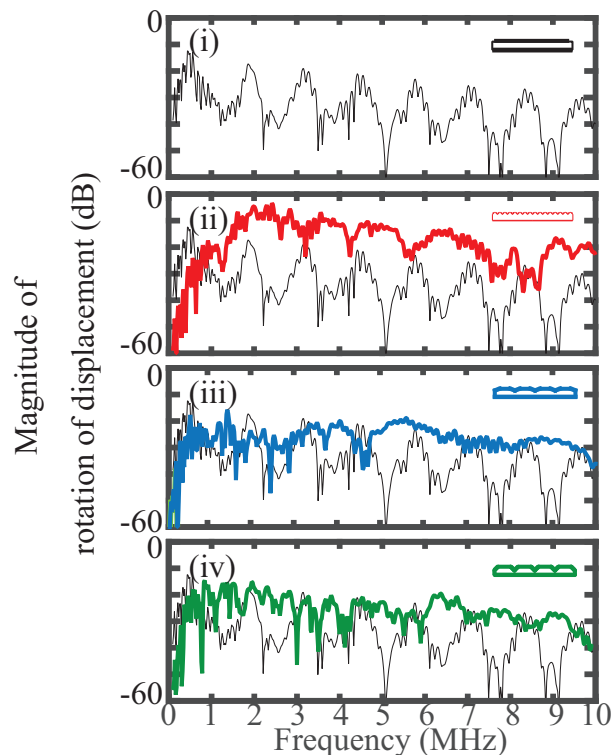


図 A.5: 横駆動時の周波数応答のシミュレーション結果.

る。つまり、図 A.6(ii), A.6(iii) および A.6(iv) のプローブは従来プローブよりも過渡特性が良好な過渡特性を持った。縦駆動の時と同様に、約  $11 \mu\text{s}$  とき吸収境界で吸収しきれなかった反射波が生じていることがわかる。これらの反射波の影響のため、周期的なディップが周波数応答に表れた。

結果として、縦駆動には、周波数応答のディップが従来プローブよりも減少することが分かった。横駆動においては、溝の数を増やすことで、従来の厚み滑り振動子よりも、広帯域な周波数特性が得られた。また、感度および過渡特性が従来プローブよりも改善された。

プローブの形状を変化させた際に、縦駆動と横駆動の効果をまとめる。縦駆動時には、プローブの形状の変化に対して、同じ寸法の従来縦波用の振動子を比較して、1,2,3 のプローブの形状の変化に対して、周波数特性のディップが抑制された。一方で、過渡特性は従来プローブと同程度だった。

横駆動のときは、1 の溝の数の増やすことで、基本共振周波数成分以外の感度は上昇した。基本周波数成分以外においては、広帯域な周波数特性が得られたプローブの上端と下端が振動することによるダブルパルスが抑制され、プローブの上面のみが振動するシングルパルスとなったことで、過渡特性が向上した。2 および 3 のプローブ形状の変化によって基本共振周波数成分は同程度だったが、従来プローブのディップが抑制されて広帯域な周波数特性が得られたプローブの上端と下端が振動することによるダブルパルスが抑制され、プローブの上面のみが振動するシングルパルスとなっ

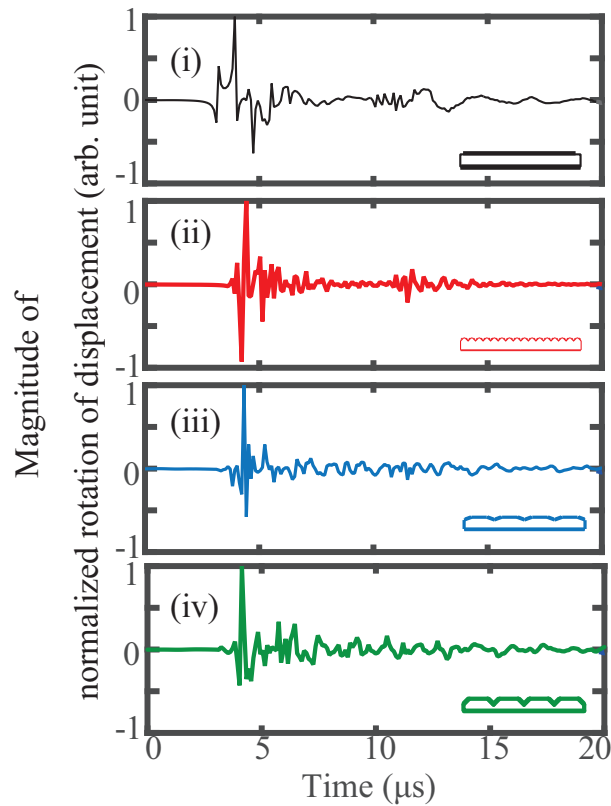


図 A.6: 横駆動時の周波数応答のシミュレーション結果.

たことで、過渡特性が向上した。

## A.4 まとめ

3 自由度プローブの形状を変化させたときの周波数特性の評価を行った。縦駆動および横駆動のプローブの性能は、縦駆動および横駆動時の評価点における縦波成分と横波成分を 2 次元有限要素解析によって計算した。プローブの厚さを 1 mm のオーダーに設定し、プローブの形状を変化によって、プローブの性能は従来の振動子よりも向上した。その結果、縦駆動では、従来のプローブとほぼ同じ性能であることが分かった。横駆動では、従来のプローブよりも、溝の数を増やすことで、3 自由度プローブの周波数応答および過渡特性の改善が確認された。



# 著者論文リスト

## (参考論文)

### 査読付雑誌論文 (学位請求申請に関連のある論文)

(J-1) M. Aoyanagi, N. Wakatsuki, K. Mizutani, and T. Ebihara, Jpn. J. Appl. Phys. (2014).(in press)

### 査読付国際会議論文 (学位請求申請に関連のある論文)

(C-1) M. Aoyanagi, N. Wakatsuki, K. Mizutani, and T. Ebihara, Proc. 22th Int. Cong. Sound and Vibration, 2015, T01.RS01-0804(R).

## (その他の論文)

### 査読付国際論文 (学位請求申請に関連のない論文)

(1) K. Yamamoto, K. Izuno, and M. Aoyanagi, AIP Conference Proceedings (ICU 2011) 1433, pp114-117.

### 査読付発表論文

(1) M. Aoyanagi, N. Wakatsuki, K. Mizutani, and J. Takarada, Proc. the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2013, pp. 135-136.

(2) M. Aoyanagi, N. Wakatsuki, K. Mizutani, and T. Ebihara, Proc. the 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2014, pp. 103-104.

(3) M. Aoyanagi, N. Wakatsuki, K. Mizutani, and T. Ebihara, Proc. the 37th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2016, 2P3-3.

### 査読なし発表論文

- (1) 青柳 将史, 和田 隆宏, 鈴木 直, 伊藤 博介, 大野 正弘, 山本 健: “音波伝搬モードと位相共役波発生効率,” 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波, 110(10), pp.11-12 (22, Apr, 2010).
- (2) 泉野 香奈, 青柳 将史, 花田 雅紀, 山本 健 ” ストロボ鋭敏色可視化法による超音波応力の符号化 ” 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1303-1304, September 2010
- (3) 青柳 将史, 板野 智明, 藤井 和成, 関 眞佐子, 大野 正弘, 山本 健: “非線形圧電性を用いた横波位相共役波の発生,” 日本音響学会, 2011 年春季研究発表会講演論文集 1-P-27 (9, Mar, 2011).
- (4) 青柳 将史, 大野 正弘, 山本 健: “PZT セラミックスの非線形圧電性を用いた横波位相共役波の発生,” 第 34 回日本バイオレオロジー学会年会プログラム・抄録集, p. 68 (3, June, 2011).
- (5) 青柳 将史, 泉野 香奈, 浅川 誠, 大野 正弘, 山本 健: “非線形圧電性を用いた横波位相共役波の位相整合条件の検討,” 日本音響学会, 2011 年秋季研究発表会講演論文集, 3-2-18, pp.1289-1290 (22, Sep, 2011).
- (6) 泉野 香奈, 青柳 将史, 浅川 誠, 崔 博坤, 山本 健: “ソノケミルミネッセンス発生時の気泡挙動及び音場の光学的可視化,” 日本音響学会, 2011 年秋季研究発表会講演論文集, 3-2-18, pp.1303-1304 (21, Sep, 2011)
- (7) 泉野 香奈, 青柳 将史, 浅川 誠, 崔 博坤, 山本 健: “定在波におけるソノケミルミネッセンス発生時の気泡挙動及び音場の光学的可視化,” 日本音響学会, 2012 年春季研究発表会講演論文集, pp.1395-1396 (14, Mar, 2012)