

空中超音波フェーズドアレイを用いた
金属板内欠陥の非接触計測に関する研究

令和 6年 1月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程

電気工学専攻

清 水 鏡 介

目 次

第1章 緒言.....	3
1.1 研究の背景.....	3
1.2 非接触による超音波探傷.....	5
1.3 本研究の目的.....	7
1.4 本論文の構成.....	9
第2章 空中超音波を利用した非破壊検査手法の概要.....	13
2.1 空中超音波照射による固体内超音波振動の励起.....	13
2.2 固体中に発生する超音波振動.....	15
2.3 波源走査法による減肉欠陥の検出.....	18
2.4 本章のまとめ.....	22
第3章 超音波振動励起のための空中超音波フェーズドアレイの構築.....	25
3.1 強力空中超音波の発生方法.....	25
3.2 空中超音波フェーズドアレイによる音波の集束原理.....	27
3.3 空中超音波フェーズドアレイの設計と駆動システム.....	28
3.4 空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性.....	31
3.5 本章のまとめ.....	38
第4章 超音波照射により試料に発生した超音波振動の振幅ピーク分布による非破壊検査.....	41
4.1 実験概要.....	41
4.2 実験結果.....	46
4.3 本章のまとめ.....	53
第5章 グレーティングローブを抑制する空中超音波フェーズドアレイの構築と新たな走査方法.....	57
5.1 グレーティングローブ発生を抑制した空中超音波フェーズドアレイと駆動装置の構築.....	58
5.2 改良型の空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性.....	63
5.3 本章のまとめ.....	73
第6章 超音波振動の波動伝搬特性を利用した非破壊検査.....	77
6.1 波動伝搬特性を利用した減肉欠陥の検出原理.....	77
6.2 実験概要.....	78
6.3 実験結果.....	82
6.4 本章のまとめ.....	94
第7章 結言.....	97
7.1 本研究で得られた成果.....	97
7.2 今後の課題.....	100
謝辞.....	102
参考文献.....	103

第 1 章 緒言

第1章 緒言

1.1 研究の背景

発電所や工場、橋梁、トンネルなどのインフラ大型構造物は、社会活動の重要な基盤であり、災害や経年劣化により破壊が起きると、人々の生活や経済活動に甚大な被害をもたらす。特に、我が国では高度経済成長期に急速に建設されたインフラの老朽化問題が指摘されており、その健全性の確保は極めて重要な課題である。そのため、定期的な点検による対象の状態把握が義務付けられており、それに基づいた適切な対応が行われている。また、これら構造物（対象）を検査する際には、対象を破壊することなく非破壊で行う必要がある。これまでに、X線試験や浸透深傷試験、磁粉深傷試験、渦流深傷試験、超音波探傷試験等の種々の検査手法・技術が開発され、発展してきた^[1, 2]。表1に各種試験方法の特徴を示す。

表1 非破壊検査方法の特徴

試験方法	利点	欠点
X線試験	材質を問わずに検査可能 奥行きのある欠陥検出が容易	被曝の危険性 検査コストの高さ
渦流深傷試験	前処理や後処理が必要ない	導電性物体のみ検査可能
磁粉深傷試験	高速かつ高精度な検査が可能	強磁性材料のみ適用可能
浸透深傷試験	ほとんどの検査対象に 適用可能	工数が多い 内部欠陥の検査は不可
超音波探傷試験	安全性が高い 容易に検査可能	複雑な構造のものへの検査には 適さない

検査対象は主に各種プラント構造物の金属やコンクリート内に発生した亀裂や劣化等の部位である。実際の非破壊検査では、それぞれの検査法の特徴を活かして検査対象ごとに異なる手法が適用される。中でも、超音波探傷試験は安全性や利便性に優れ、定量的な検査を実現する方法として広く用いられてきた。この探傷法にはいくつかの種類があるが、最も一般的に用いられるのはパルスエコー法である。^[3]具体的には、対象の内部に超音波パルスを入射させ、内部の欠陥部で反射する超音波を受信し、欠陥位置を推定する方法である。

一般に、超音波探傷法で検査する場合には、超音波探触子を検査対象の表面にカップリング材（水・グリセリンなど）を介して接触させて行う。このカップリング材は、検査前に検査対象となる範囲に塗布し、検査終了後にふき取る作業が必要となる。^[1]この作業が検査の効率化を妨げており、検査作業の長時間化の一因となっている。また、カップリング材の塗布によって対象物が汚染されてしまう恐れがある場合には、超音波探傷による検査が実施できない。例えば、バッテリー等の製品はカップリング材の塗布による故障を誘発させてしまう恐れがある。さらに、対象物表面の凹凸が著しい場合は、カップリング材を用いても超音波を対象内に良好に入射させることができなくなる。

以上のような背景により、超音波探傷の分野では非接触検査方法の確立が望まれており、これまで勢力的に研究されてきた。

1.2 非接触による超音波探傷

現在までに研究開発されてきた非接触での超音波探傷は、主にレーザ超音波^[4, 5]、電磁超音波(EMAT: ElectroMagnetic Acoustic Transducer)^[6, 7]、空中超音波^[8, 9]を利用した方法である。

表 2 に、各非接触超音波探傷法の特徴を示す。

表 2 非接触超音波法の特徴

手法の種類	利点	欠点
レーザ超音波法	長距離照射が可能 パルス長が短い	アブレーションの可能性 取り扱いの難しさ
電磁超音波法(EMAT)	多様な超音波パターンを 送受信可能(縦波、横波、表面波)	対象物との距離を大きく 離せない(最大 10 mm 程度)
空中超音波法 (空気結合超音波法)	空気媒質の縦波を利用するため 安全性が高い	対象に音波を励起可能な 強力な音波の発生が難しい

まず、レーザ超音波による超音波探傷は、長距離照射・分解能の点で最も実用的である。しかし、レーザ光を用いる方法であるため、レーザ照射による検査対象表面のアブレーションの発生、及びそれを原因とする検査対象へのダメージが懸念される。そのため、照射するレーザ光の強度や検査する対象に制限がかかる。また、レーザ光による失明の危険があるためアイセーフグラスの着用が必要となり、レーザ装置を取り扱うための講習の必要性も普及の妨げとなっている。さらに、検査装置が大掛かりで高価であることも運用上の問題となっている。

次に、EMAT を用いた超音波探傷ではレーザ超音波のようなアブレーション等の問題がなく、分解能も実用レベルにある。一方、電磁誘導を利用して超音波を発生させるため、検査対象と装置との距離を近接させる必要があり、普及の妨げとなっている。

これに対し、空中超音波を用いた超音波探傷では、超音波振動の発生に空気媒質の圧縮膨張による縦波を利用しているため、検査対象にダメージが生じることはなく、安全な非破壊検査を行える。装置から検査対象までの距離に関しては数 cm 程度であり、レーザ超音波に及ばないものの実用的には十分である。また、分解能に関しては使用する超音波の周波数に依存し、実用的にはほぼ問題ない。

一方、運用面で考えると検査に要する時間すなわち計測の高速化が重要となる。これについては、現在までにレーザ超音波においてレーザ弾性波源走査法(Scanning Laser Source technique : SLS)^[4, 5]が開発され、金属板構造物の欠陥を高速で映像化する技術が実用化されている。レーザ光を高速走査しながら対象物に照射させ、各照射点(波源)から発生した超音波を利用して、走査範囲内での高速探傷を行う技術(波源走査法)である。この方法は、接触式超音波探傷法と遜色のない計測時間に迫っており、非接触の超音波探傷法としては最も実用的である。しかし、前述の課題は依然として残る。

空中超音波でも、計測の高速化に向けた研究が行われている。これまで、大隅らによって空中超音波を用いた波源走査法^[10~13]が研究開発されているが、空中集束超音波発生用音源を機械的に走査することで実現しているため、SLS のような短時間で的高速計測は困難であった。

以上のように、空中超音波を用いた高速非破壊検査手法はこれまで確立されていない。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、強力空中超音波と上記に述べた波源走査法を組み合わせた高速非破壊検査のための新たな検査システムの構築であり、これを実現するために以下の3点を中心に検討を行っている。

(1) 空中超音波フェーズアレイの作製と駆動システムの開発（第3章、第5章）

空中超音波による高速非破壊検査を実現させるには、高速で波源走査を行うための強力空中超音波発生用デバイスの構築、及びそれを利用した非破壊検査システムの開発が必要である。そのための超音波発生デバイスとしては、空中超音波フェーズドアレイが最も有望である。空中超音波フェーズドアレイ^[14, 15]は、ハプティクスやレビテーション等の分野において利用されている。そのデバイスの構造や動作原理は、医療や非破壊検査に用いられる一般的なフェーズドアレイ^[16, 17]と同様であり、強力音波発生のための音波集束を電子制御により行うため、音波の集束位置を高速で走査することが可能となる。

本研究では、非破壊検査のための空中超音波フェーズドアレイの設計、作製及びその音波放射特性について検証し、非破壊検査に利用できる空中超音波フェーズドアレイを実現させる。また、空中超音波フェーズドアレイの音波集束点を高速走査するための駆動システムを構築する。

(2) 非破壊検査用計測システムの構築と振動分布特性を利用した金属板内の減肉欠陥の検出 (第4章)

上記(1)で、作製した空中超音波フェーズドアレイと、波源走査法を適用されるための駆動システムを搭載した非破壊検査計測システムを用いて、プラント設備の部材である金属板内に生じる減肉欠陥を高速で可視化することを試みる。

すなわち、空中超音波照射により金属板に沿って伝搬する波動の振動情報を受信し、振動振幅のピーク分布を取得することにより、欠陥のない健全部と欠陥部の振幅値の差異から減肉欠陥を検出する。

(3) 空中超音波フェーズドアレイの改良と超音波伝搬像を利用した金属板内の減肉欠陥の検出 (第6章)

上記(2)で構築した非破壊検査計測システムでは、空中超音波フェーズドアレイのグレーティングローブの影響を避けるために、検査対象表面近傍に音響窓の設置が必須となっている。そこで、音響窓を必要としない空中超音波フェーズドアレイの改良を行い、非破壊検査計測システムに搭載させる。これにより、金属板内での超音波波動伝搬を可視化させ、減肉欠陥部での超音波の回折や反射等の挙動を基に、欠陥を検出する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章は本論文の緒言であり、研究の背景及び研究の目的等について述べる。

第2章では、空中超音波励起による金属板での超音波振動の発生とそれを利用した非破壊検査、及び提案する空中超音波波源走査法の概要について述べる。

第3章では、本論文で提案する非破壊検査手法の実現に必要な空中超音波フェーズドアレイの原理、具体的な構築、及びその音波放射特性について述べる。

第4章では、空中超音波フェーズドアレイの音波照射により検査対象に発生させた超音波振動の振幅特性を利用した検査手法の原理、検査のための計測システムの構築、及びこれを用いた金属板内の減肉欠陥の検出について述べる。

第5章では、空中超音波フェーズドアレイのグレーティングローブ抑制のための音源の改良、及びその音波放射特性について述べる。

第6章では、改良した空中超音波フェーズドアレイにより検査対象内に発生した超音波振動の波動伝搬特性を利用した、金属板内の減肉欠陥の検出について述べる。

第7章 は本論文の結言であり、本研究で得た主たる成果について述べる。

第 2 章 空中超音波を利用した 非破壊検査手法の概要

第2章 空中超音波を利用した非破壊検査手法の概要

本章では、空中超音波を利用した非破壊検査手法の概要について述べる。具体的には、空中超音波の照射により検査対象内に発生する超音波振動の挙動、それを利用した非破壊検査、及び本論文で提案する新たな空中超音波検査手法の概要について述べる。

2.1 空中超音波照射による固体内超音波振動の励起

異なる媒質の境界面に音波が入射する場合、境界面では音波の一部は透過し、残りは反射する。したがって、空中超音波の照射により固体媒質内に超音波振動を励起させるためには、固体内への音波の透過特性を議論する必要がある。

図 2.1 は異なる媒質が平面状に接している様子であり、媒質の音響インピーダンスはそれぞれ $Z_1 = \rho_1 c_1$ 、 $Z_2 = \rho_2 c_2$ である。ここで ρ は媒質の密度、 c は媒質の縦波の伝搬速度である。この媒質境界面に音波が入射したときの音響インテンシティの反射率 R_1 及び透過率 T_1 は下式の関係となる。^[18]

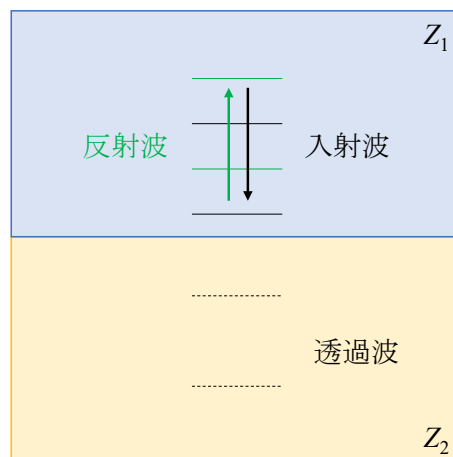


図2.1 異なる2媒質間における音波の入射と反射

$$R_1 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right) \quad (2-1)$$

$$T_1 = 1 - R_1 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2-2)$$

いま、アルミ合金板の表面に空中超音波を照射した場合を考える。

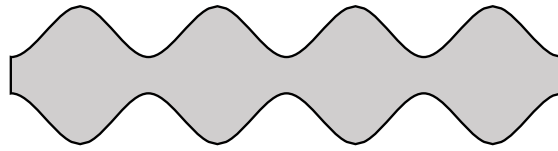
ここで、媒質 1 は空気、媒質 2 はアルミ合金である。両媒質の密度と伝搬速度は、それぞれ $c_1 = 343.7 \text{ m/s}$ (20 °C)、 $\rho_1 = 1.293 \text{ kg/m}^3$ (基準状態)^[19]、 $c_2 = 6360 \text{ m/s}$ 、 $\rho_2 = 2798 \text{ kg/m}^3$ ^[20]であり、音響インピーダンスは $Z_1 = 444.4 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^3$ 、 $Z_2 = 17.80 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^3$ となる。したがって、両媒質の境界における音響インテンシティの反射率と透過率は、式 (2-1)、(2-2) より $R_1 = 0.999$ 、 $T_1 = 0.001$ となる。

以上のことより、アルミ合金をはじめとする金属類を検査対象とした場合、照射音波のほとんどは対象表面で反射されるが、ごくわずかの音波が対象内に侵入し、照射音波と同じ周波数の超音波振動が発生する。したがって対象内に発生した超音波振動を利用して非破壊検査を行うには、実用上極めて強力な超音波の照射が必要となる。

2.2 固体中に発生する超音波振動

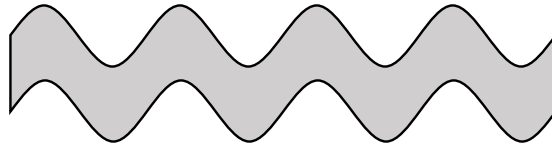
空中超音波を固体表面に照射すると、固体媒質内には縦波及び横波の超音波が発生する。さらに、これらの音波は伝搬に伴って新たに固体表面近くの領域を伝搬する合成波^[21]となる。これが表面波であり、固体材料内を伝搬する音波の波長に比べて材料が厚い場合には Rayleigh 波^[22]が伝搬し、薄い場合には Lamb 波^[23]が伝搬する。Rayleigh 波及び Lamb 波の音速については Rayleigh-Lamb 方程式によって定まる。

本論文での検査対象は、プラント設備の主たる構造部材である金属板である。そこで、超音波励起により金属板内に発生する Lamb 波についてその詳細を示す。図 2.2 は金属板に発生する Lamb 波の振動姿態であり、2 種類の伝搬モードがある。S0 モード Lamb 波は板厚に対して対称に振動する超音波である。これに対し、A0 モード Lamb 波は板厚に対して非対称に振動する超音波であり、S0 モードに比べて振動振幅は極めて大きい。したがって、観測される超音波振動の大部分が A0 モードの Lamb 波であり、この波動の挙動に着目して検討を進めればよい。



板厚に対して対称なモード

(a) S0 モードの Lamb 波の振動姿態



板厚に対して非対称なモード

(b) A0 モードの Lamb 波の振動姿態

図2.2 金属板に発生する Lamb 波の振動姿態

ところで、これら A0 モード、S0 モードの位相速度は式(2-3)～式(2-7)の Rayleigh-Lamb 方程式^[23]により決定される。

$$\frac{\tan\left(\frac{\alpha d}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta d}{2}\right)} = -\frac{4k^2\alpha\beta}{(k^2 - \beta^2)^2} \quad (2-3)$$

$$\frac{\tan\left(\frac{\alpha d}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\beta d}{2}\right)} = -\frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4k^2\alpha\beta} \quad (2-4)$$

$$\alpha := \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k^2} \quad (2-5)$$

$$\beta := \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2} \quad (2-6)$$

$$c_p := \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{\frac{2\pi}{\lambda}} = f\lambda \quad (2-7)$$

ここで、 c_p は Lamb 波の位相速度、 k は位相速度の波数、 ω は角周波数であり、 f は周波数、 λ は波長である。また、 c_L 、 c_T は固体材料中の縦波及び横波の伝搬速度、 d は材料の厚みである。

上式において、式(2-3)は A0 モード、式(2-4)は S0 モードの関係式であり、その位相速度は縦波及び横波の伝搬速度および材料の厚みによって決定されることがわかる。なお、両式中の α と β は式(2-5)(2-6)で定義される関数であり、波数 k は、前述した位相速度 c_p の波数である。

ここで、式(2-7)に示す Lamb 波の位相速度 c_p を上記の式を用いて計算する場合、式(2-4)、(2-5)は陰関数であるため、Lamb 波の波数 k を直接計算し、そこから位相速度 c_p を求めることはできない。そのため、以下のような手順で位相速度 c_p を数値解として求める。

具体的な計算方法を以下に示す。まず、式(2-5)、(2-6)に任意の角周波数 ω 、材料定数によって決定される縦波及び横波の伝搬速度 c_L 、 c_T 、材料の厚み d を代入し、波数 k を変数とした α と β を求め、式(2-3)及び式(2-4)に代入する。つづいて、波数 k を順次変化させて、左辺と右辺が等しくなる波数 k を、二分法を用いて求める。求めた波数 k から式(2-7)を用いて A0 モード及び S0 モードの位相速度 c_p を数値解として求める。

図 2.3 に、一例として上記の手順で求めた板厚 3 mm のアルミ合金(ジュラルミン)における A0 モード及び S0 モードの位相速度の分散曲線を示す。なお、縦波及び横波の伝搬音速は、 $c_L = 6360$ m/s、 $c_T = 3100$ m/s としている。

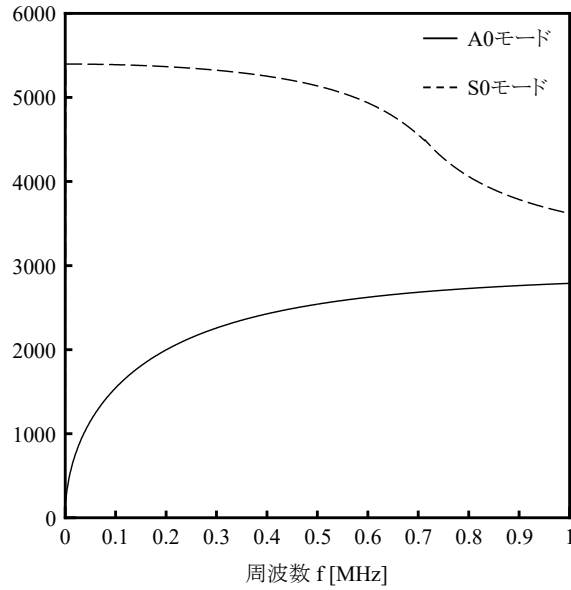


図2.3 板厚 3 mm のアルミ合金(ジュラルミン)における
A0 モード及び S0 モードの位相速度の分散曲線

2.3 波源走査法による減肉欠陥の検出

Lamb 波を用いた非破壊検査では、計測領域における Lamb 波伝搬特性を用いて減肉欠陥の診断を行う。減肉欠陥とは、プラント内の金属製構造物を流体が高速で流れる、あるいは化学反応等により金属壁が部分的に摩耗して生じる欠陥である。この欠陥を検出するためには、超音波加振によって金属板に発生させた Lamb 波の振動を、対象となる全領域の各地点で計測する必要がある。図 2.4 は、計測方法を説明するための概要図である。

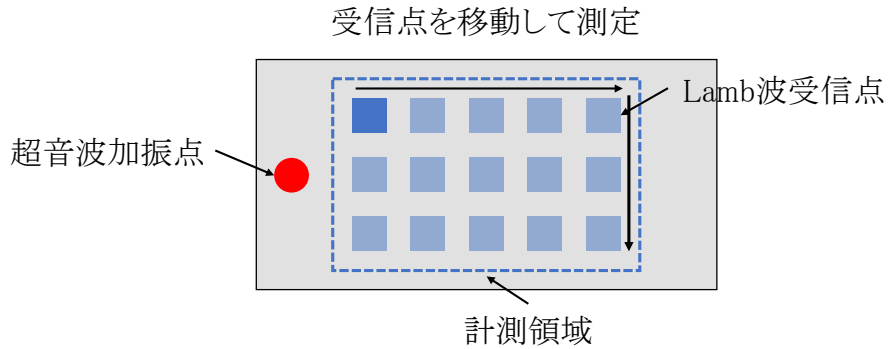


図2.4 送信器を固定して受信器を走査させた場合

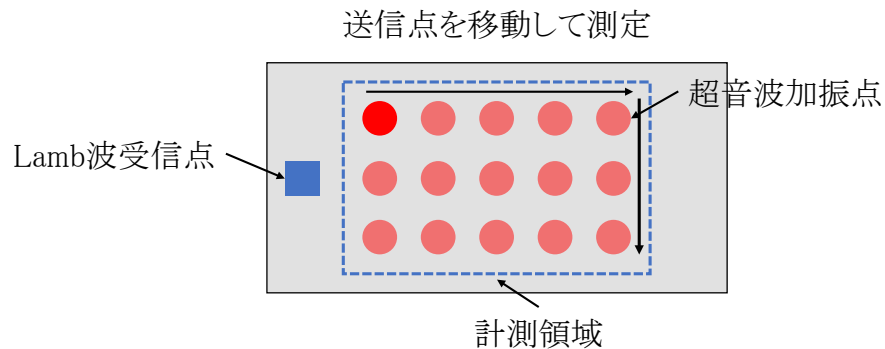


図2.5 受信器を固定して送信器を走査させた場合

この方法では、図 2.4 のように **Lamb** 波発生のための超音波加振点（波源）を固定させ、これにより発生した **Lamb** 波を計測領域内で受信点を二次元的に走査しながら受信する。この方法は単純かつ簡易的であるが、検査対象の表面性状や外乱の影響により安定した計測を行えない場合がある。また、受信点間の走査は手動あるいは自動で行うため、その走査速度が検査時間に依存してしまう。そのため、検査に多くの時間を要し問題であった。

これを解決する方法の一つとして、これまでに「波源走査法」^[24-30]が提案されている。図 2.5 は、波源走査法を説明するための概要図である。図 2.4 の加振点と受信点を入れ替えて行うもので、加振点を二次元走査して **Lamb** 波を発生させ、この伝搬波を一点に固定し

た受信点で受信する方法である。波源走査法を用いる場合、加振点として非接触で超音波振動を励起できるデバイスを用いることで、検査対象表面の性状の影響を受けることなく Lamb 波を安定して発生させることができる。また、受信点を固定することで表面性状や外乱の変化による影響を受けることなく受信波の取得が可能になる。

このように、波源走査法は波動場の相反定理^[31]を利用した方法であり、図 2.6 に示すようにある送信器から送信した音波をある受信器で受信した場合、送信器と受信器を入れ替えても、波動の伝搬経路が同じ経路であれば得られる受信波形は同じであるという原理に基づいている。なお、相反定理は厳密には点送信、点受信においてのみ成立する。

上記の波源走査法を用いた検査手法として、すでにレーザ光のスポット照射を加振源(波源)としてミラーを併用した波源の高速走査手法が開発されている。本研究では、この手法を強力空中集束音波照射によって実現させようとしている。これを行うには、①空中超音波の照射により、金属板に検査を可能とする Lamb 波を発生できること、②相反定理が適用できる空中超音波の点集束が行えること、③音波の集束位置を高速で二次元走査できる、等の条件を達成させる必要がある。

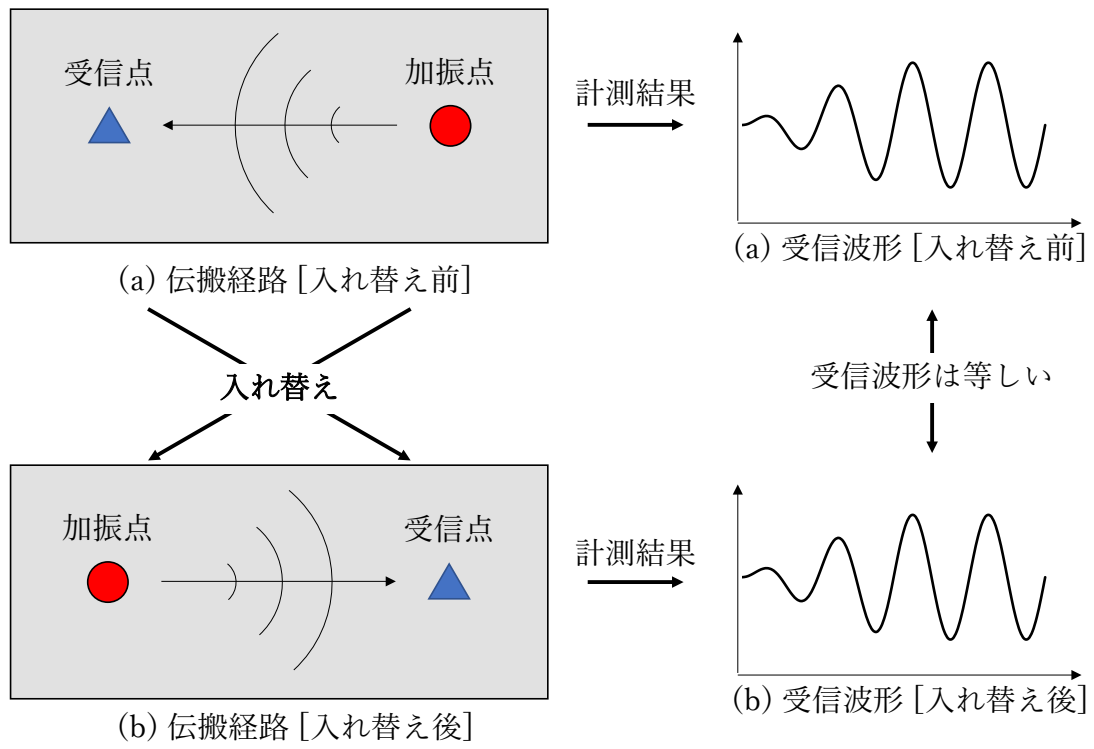


図2.6 相反定理の概要

2.4 本章のまとめ

本章では、空中超音波を利用した新たな非破壊検査手法のための概要として、以下について示した。

- (1) 金属等の固体媒質に空中超音波を照射した際の固体表面での音波の反射と透過について述べ、僅かではあるが音波が金属内に侵入できることを示した。

- (2) 金属等の固体媒質内に侵入した超音波により発生する Rayleigh 波と Lamb 波の諸特性について示し、本研究で対象とする金属板では超音波励振により主に A0 モードの Lamb 波が発生することを述べた。

- (3) 検査のための計測時間の長時間化を改善する一手法である波源走査法及びその基となる相反定理の概要を述べた。

第 3 章 超音波振動励起のための 空中超音波フェーズドアレイの構築

第3章 超音波振動励起のための空中超音波フェーズドアレイの構築

本章では、金属板に超音波振動を非接触励起させるための強力空中超音波の発生、及びその照射位置を電子的に高速走査できる、空中超音波フェーズドアレイの構築について述べる。

[32~35]

3.1 強力空中超音波の発生方法

強力空中超音波を発生するためには、気体媒質の特性を理解した種々の工夫が必要となる。媒質中への音波エネルギーの放出は、媒質の音響インピーダンスが大きな固体や液体では比較的容易に行えるが、空気をはじめとする気体媒質への音波放射は、音響インピーダンスが極めて小さいため困難である。

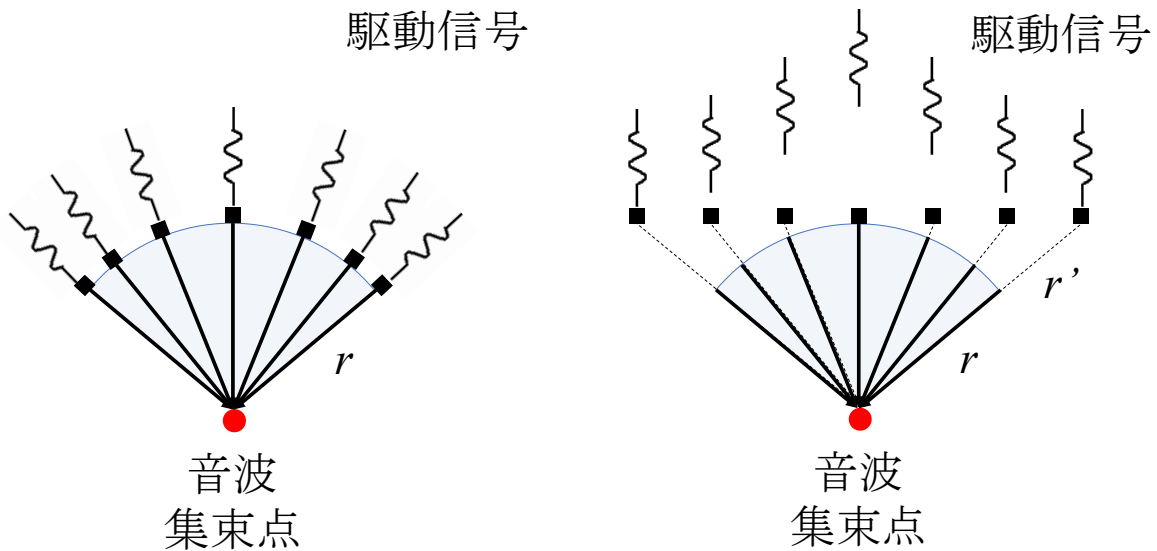
そのため、空气中で強力な超音波を得るには、以下のような手段をとる必要がある。

- (1) 超音波音源の振動面を大きくする、または小型音源を複数個使用することで、大容量の音波エネルギーを空中に放射する。
- (2) 放射された音波エネルギーを何らかの方法で特定の位置に集束させる。

これを満たし、比較的容易に強力な空中超音波を得る方法として、複数の小型超音波音源(超音波エミッタ)から放射された音波を一点に集め、集束させる方法がある。

音波集束方法の概要を図 3.1 に示す。図(a)は音源の配置構造によって位相を調整して音波

を集束させる方式であり、図(b)は音源の電子制御により位相調整して音波を集束させる方式である。



(a) 配置構造的に音波を集束

(b) 電子制御により音波を集束

図3.1 音波集束方法の概要

図(a)の方式では、複数の超音波エミッタを音波集束点に対して等しい距離に配置し、超音波エミッタを音波集束点の方向に向けて同相駆動で音波を放射し、集束させている。この方式は、音源デバイスの構造が単純で作製も容易であり、すべての超音波エミッタを同相駆動するため電氣的にも単純である。しかし、音波の集束位置を走査させるためにはデバイス自体を移動させて走査する必要があり、集束音波の高速走査には不向きである。

これに対し、図(b)の方式では平面上に配置した超音波エミッタのそれぞれに独立した駆動信号を入力し、各エミッタから放射された音波が、目的位置に同位相で到達するように制御することで音波を集束させている。医療診断や非破壊検査で利用されるフェーズアレイと

同様の方式であり、これを空中超音波で行う(空中超音波フェーズアレイ)。この方式は、デバイス本体の作製こそ容易であるものの、各超音波エミッタの電氣的駆動は複雑であり容易に実現できない。一方、集束位置の走査は電子的に行えるため、高速走査が可能となる。前章で述べた波源走査法を利用するためには、集束音波の高速走査が可能な空中超音波フェーズアレイを用いる必要がある。

3.2 空中超音波フェーズアレイによる音波の集束原理

図 3.2 に、空中超音波フェーズアレイ(Airborne Ultrasound Phased Array : AUPA)の構造と音波集束の原理図を示す。AUPA は小型の超音波エミッタを正形状に配置した構造であり、全てのエミッタはそれぞれ独立した信号を入力して動作させる。各入力信号には、それぞれ適切な位相制御時間を設けており、アレイ構成面に対応する平面上の任意の点に、各エミッタからの放射音波が同位相で到達するようにして、音波を集束させている。

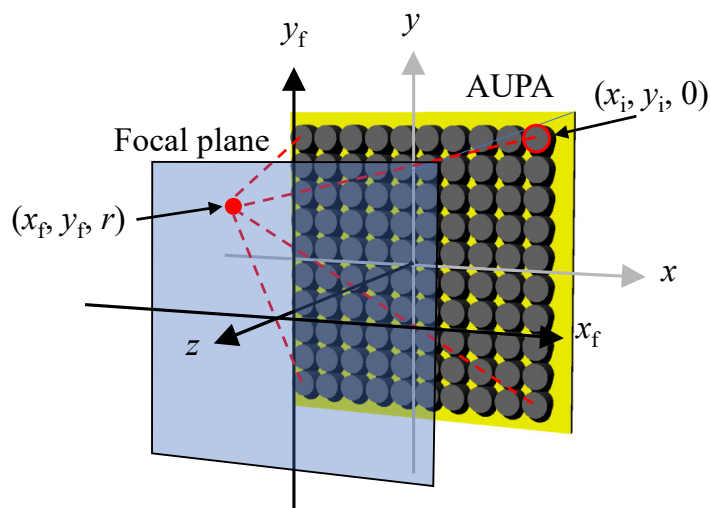


図3.2 AUPA による音波の集束原理

各超音波エミッタに入力する信号の位相制御時間については次のように決定する。いま、アレイ構成面からこれと対応する音波集束点を含む面までの垂直距離を r 、音波の集束点の座標を x_f, y_f 、アレイ構成面の超音波エミッタ i の座標を x_i, y_i とすると、エミッタ i から集束点までの距離 r_i は以下の式で表される。

$$r_i = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + r^2} \quad (3-1)$$

$$\cong r + \frac{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}{2r} \quad (3-2)$$

したがって、エミッタ i への入力信号の位相制御時間 t_i は、空気中の音速を 340 m/s とすると、

$$t_i = \frac{r_i - r}{340} \quad (3-3)$$

の関係で得られる。

3.3 空中超音波フェーズドアレイの設計と駆動システム

図 3-3 に、作製した AUPA の外観ならびに駆動システムの概要を示す。

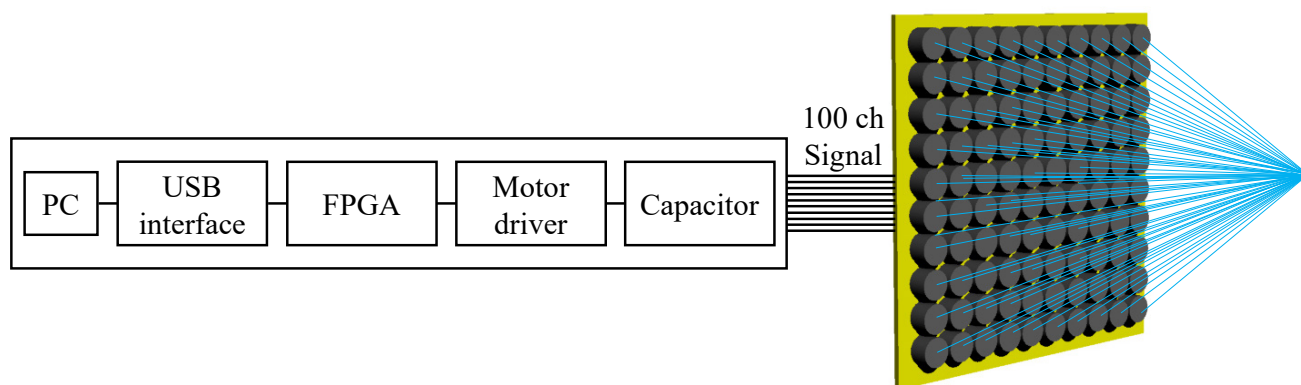


図3.3 作製した AUPA の外観と駆動システムの概要

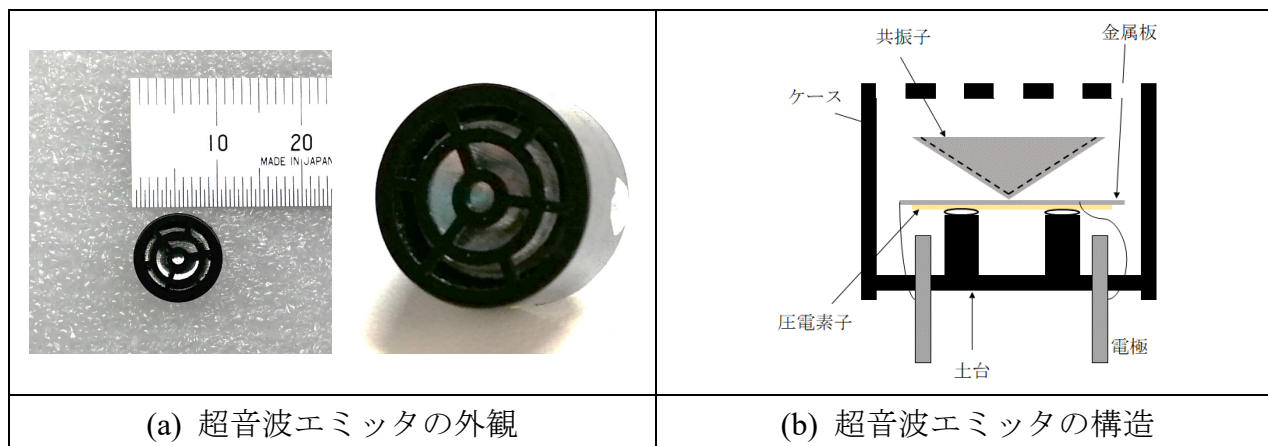


図3.4 超音波エミッタとその構造

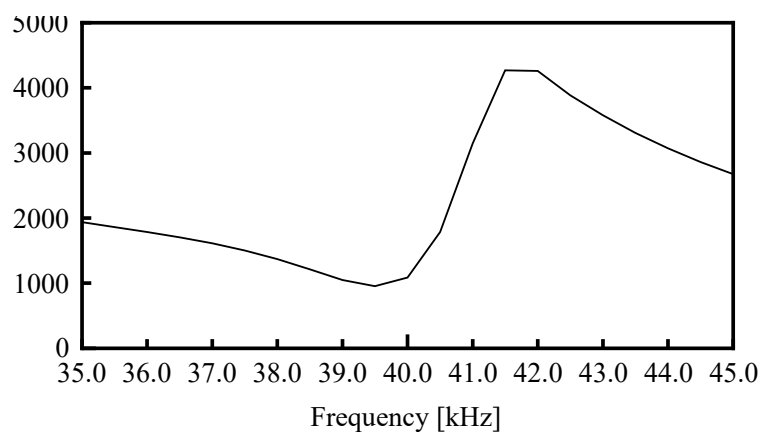


図3.5 超音波エミッタの周波数特性の一例

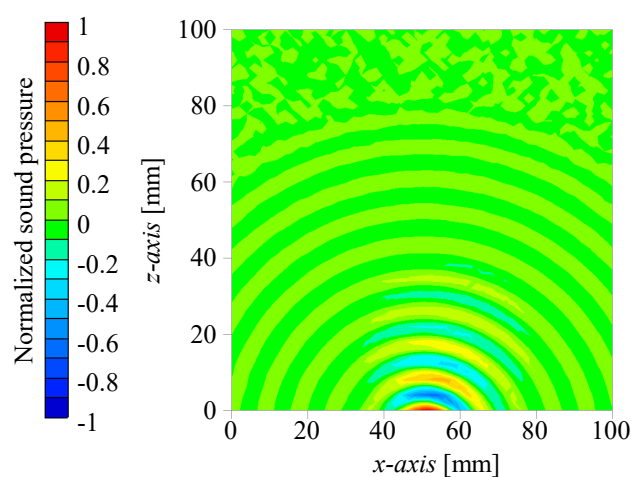


図3.6 超音波エミッタの指向特性の一例

本装置は、超音波エミッタアレイ、駆動回路、制御用 PC で構成されている。図 3.4 は使

用する超音波エミッタの構造であり、超音波振動を発生させる PZT 振動子と振動板で構成される。また、図 3.5 は超音波エミッタの周波数特性、図 3.6 は放射音波の指向特性である。図のように、超音波エミッタの共振周波数は約 40 kHz であり、効率の良い音波放射を行うために、AUPA を 40 kHz で駆動させる。また、超音波エミッタ単体から放射される音波は、図 3.6 の指向特性に基づいている。AUPA は、図 3.3 のように 100 個の超音波エミッタ (SPL 製超音波エミッタ 1007-Z325R) をガラスエポキシユニバーサル基板 (Picotec International 製) 上に正方形配列 (10 個×10 個) した構造となっている。また、各超音波エミッタは独立した駆動回路によってそれぞれ個別に制御駆動される。

駆動回路は、FPGA ボード (HuMANDATA 製 XCM-208-200T)、通信モジュール (秋月電子通商製 FT245RL)、モータードライバ (テキサスインスツルメンツ製 SN754410NE)、積層セラミックコンデンサ 0.1 μ F (村田製作所製 RPEF11H104Z2P1A01B) から成る。アレイ配置した超音波エミッタを個別に制御するため、25 個のモータードライバと、100 個の積層セラミックコンデンサを使用している。

AUPA は以下の流れで制御駆動される。まず、制御用 PC から通信モジュールを介して FPGA ボードに情報が送信され、保持される。送信情報は、各超音波エミッタをバースト駆動するための駆動開始時間と停止時間である。その後、音波集束位置の座標情報が制御用 PC から FPGA ボードに送信される。FPGA 内では入力された座標情報に基づいて、各超音波エミッタの適切な位相制御時間を算出し、バースト駆動信号を生成する。これにより駆動した各超音波エミッタからの放射音波は、所望の座標点に集束することになる。さらに、集束位

置の座標情報を連続して送信することによって、音波の集束位置が高速で走査される。

なお、超音波エミッタは直径 10 mm の寸法であるため、その中心の位置を各超音波エミッタの座標としている。また、図 3.7 に示す点線で囲った 90×90 mm の範囲と対応する焦点面(図 3.2)を音波集束可能域とした。

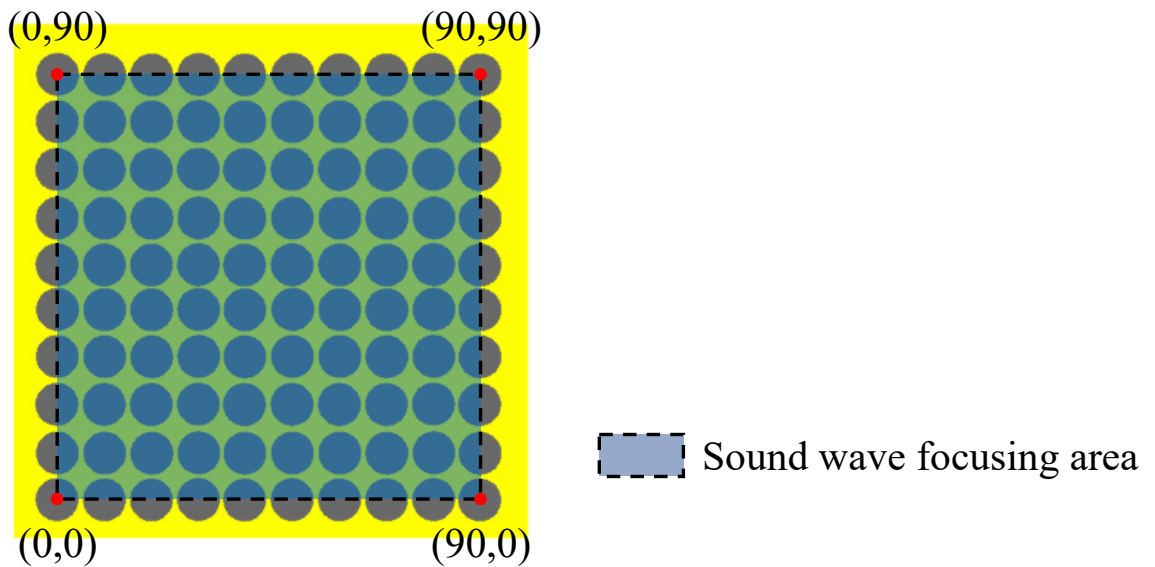


図3.7 超音波エミッタの座標系と集束可能域

3.4 空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性

3.4.1 実験装置と実験方法

図 3.8 に、作製した AUPA デバイスの音波放射特性を検討するための計測装置の概要を示す。装置は、作製した AUPA(駆動周波数 40 kHz、音波長 $\lambda = 8.5$ mm)、及びその駆動装置、音場計測用として二次元的に走査可能な精密ステージに取り付けた 1/8 インチコンデンサマイク(G.R.A.S 社製 Type 40DP)、その他の周辺機器とそれらを制御する PC で構成されている。計測は超音波エミッタアレイ面に対応する距離 $r = 200$ mm の平面内で行った。図 3.9 に

示すように、アレイ面の中心法線を中心に $110 \times 110 \text{ mm}$ を計測域とし、マイクロフォンを 2 mm ステップで二次元走査して行った。AUPA の駆動については、超音波エミッタの印加電圧を 24 V とし、駆動時間 $250 \mu\text{s}$ 、停止時間 50 ms のバースト駆動とした。

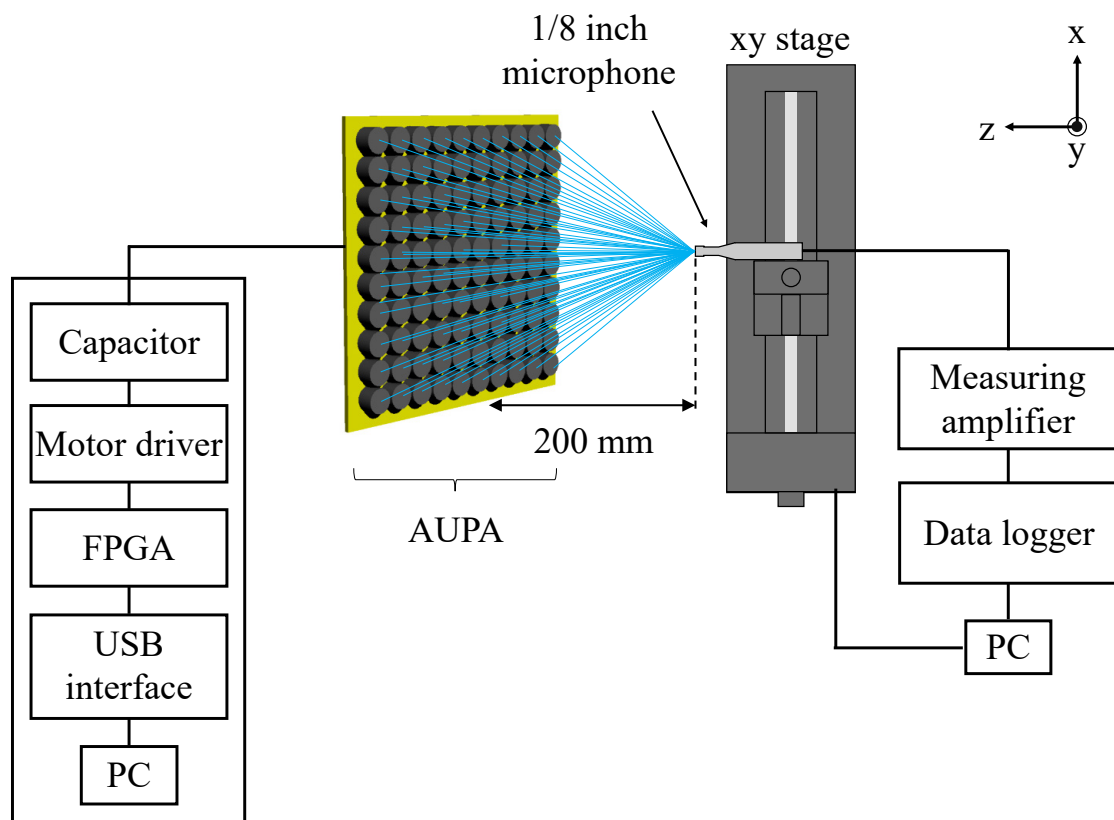


図3.8 計測装置図

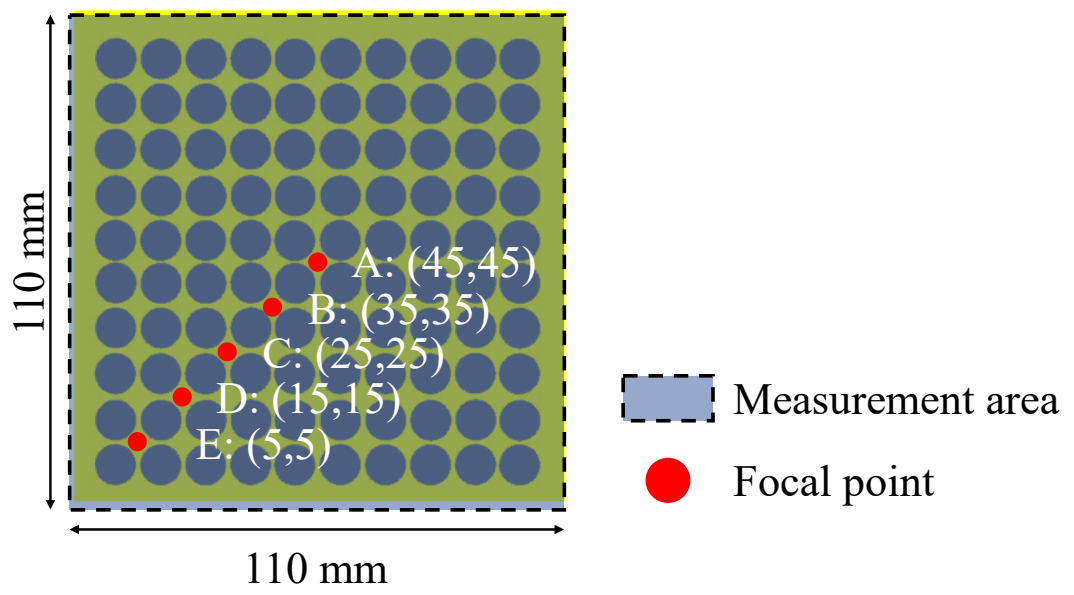


図3.9 音波の集束位置と計測範囲

3.4.2 実験結果

図 3.10 は、AUPA からの放射音波を計測域のほぼ中央の位置に集束させたときの音波の時間波形である。結果より、正圧ピーク約 4000 Pa、負圧ピーク約 3000 Pa の極めて強力な音波が得られている。また、音波波形は大きく歪んでおり、強い非線形性が生じていることも確認できる。

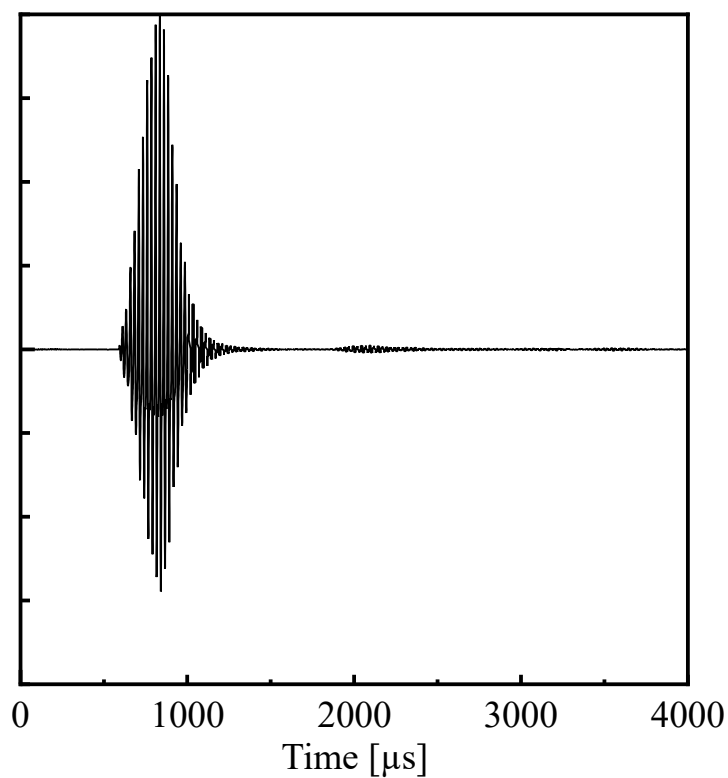
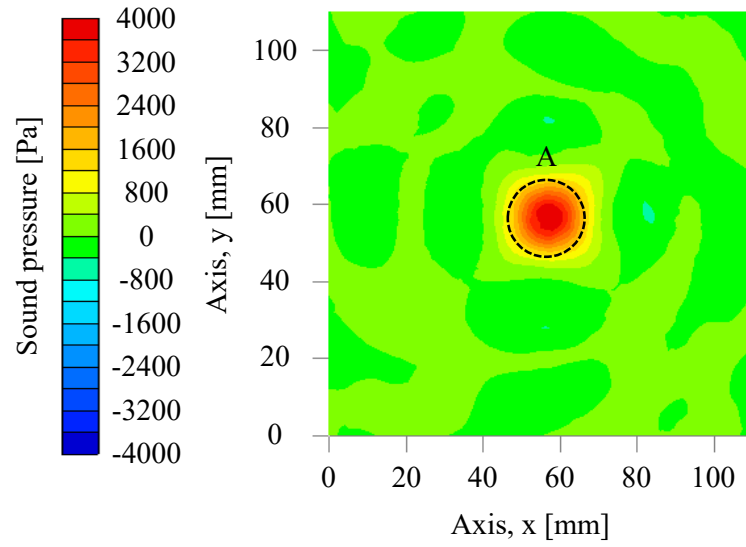
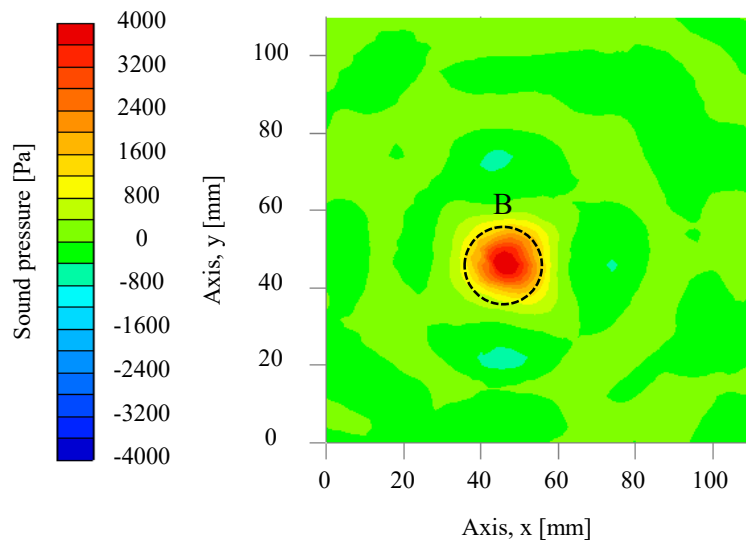


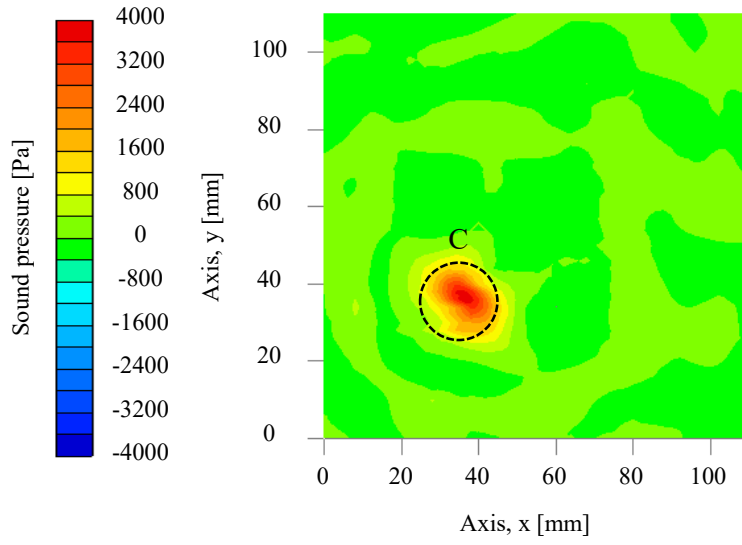
図3.10 点 A における音波の時間波形



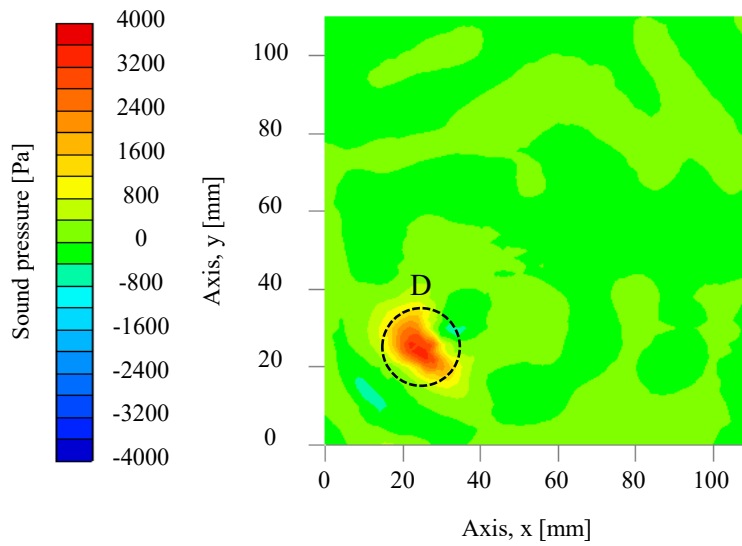
(a) 点 A に集束させた場合



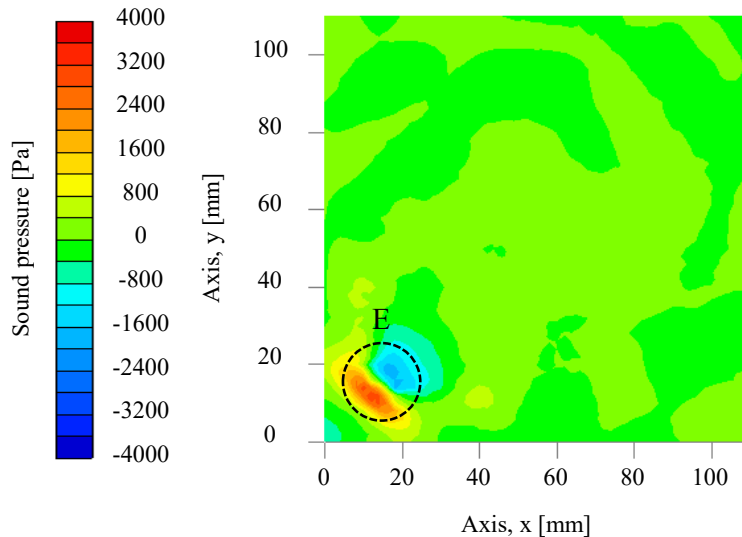
(b) 点 B に集束させた場合



(b) 点 C に集束させた場合



(d) 点 D に集束させた場合



(e) 点 E に集束させた場合

図3.11 点 A~点 E に音波を集束させたときの音圧分布

次に、図 3.11 に AUPA からの放射音波を点 A~点 E にそれぞれ集束させたときの音圧分布特性を示す。結果は、正圧がピークとなる時刻の瞬時音圧値で示している。結果より、点 A、点 B においては放射音波はほぼ円形状に集束している。これに対し点 C では集束域の形状が楕円形状に変形しているのが確認できる。さらに、音波を点 D、点 E に集束させた場合には、さらに細長い楕円形の集束域が形成されている。

これは、AUPA を構成する超音波エミッタ単体からの放射音波が指向性を有していること(図 3.6)、及び AUPA の各エミッタから音波集束点までの距離が対称な関係でないことに起因している。

3.5 本章のまとめ

本章をまとめると以下ようになる。

- (1) 強力な空中超音波を発生させる方法として、小型の空中超音波エミッタを多数配置し、これから放射される音波の位相を任意の点において同位相の関係にすることで得られることを示した。またそのための方法として、本研究では各エミッタの駆動タイミングを電子的に制御して音波を集束させる方式が有望であることを述べた。
- (2) 本研究で用いる空中超音波フェーズドアレイの音波の集束原理を示した。さらに、これに基づき空中超音波フェーズドアレイデバイスの設計、作製及び駆動システムの構築について述べた。
- (3) 作製した空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性について検証し、音波集束点において最大約 4000 Pa の所望の強力点集束超音波の発生が可能であることを実験的に示した。またアレイ面に対応する音波集束面内では、音波の集束位置によって集束域の形状に違いが生じ、音圧値も多少異なることを明らかにした。

第 4 章 超音波照射により試料に発生した
超音波振動の振幅ピーク分布による
非破壊検査

第4章 超音波照射により試料に発生した超音波振動の振幅ピーク分布による非破壊検査

前章までに、高速非破壊検査を行うための空中超音波フェーズドアレイ (Airborne Ultrasound Phased Array : AUPA)の構築とその音波放射特性について検証した。これまで得られた知見を基に、本章では AUPA デバイスを用いて金属板試料内に設けた減肉欠陥の検出を試みる。まず、AUPA デバイスを用いた波源走査法を実現させるための装置の構成、使用する金属板試料の詳細及び実験方法について述べる。次いで、構築した検査システムを減肉欠陥を有する金属板試料に適用し、音波照射により試料に発生した Lamb 波の振幅分布特性を利用した欠陥の検出手法について検討を行っている。[32, 36-41]

4.1 実験概要

4.1.1 実験装置の構成

図 4-1 に実験装置の概要を示す。装置は、大きく送信部と受信部に分かれている。送信部は、前章で述べた AUPA の駆動装置と同様で、AUPA とその制御装置から成り、モータードライバ(SN754410NE Texas Instruments)、FPGA(XCM-208-200T HuMANDATA)、USB インタフェース (FT245RL Akizuki Denshi Tsusho) 及び PC で構成されている。

また、受信部は Lamb 波を計測するための 4 つ AE センサ(TYPE7820A ACO)と、AE センサの信号を増幅する計測アンプ(TYPE5006 ACO)、AE センサの信号を A/D 変換するデータロガー(PXIe-5172 National Instruments)、及び計測制御用の PC で構成されている。AE センサ

を複数利用する理由については、4.2.2 章の欠陥部の検出手法の節において説明する。

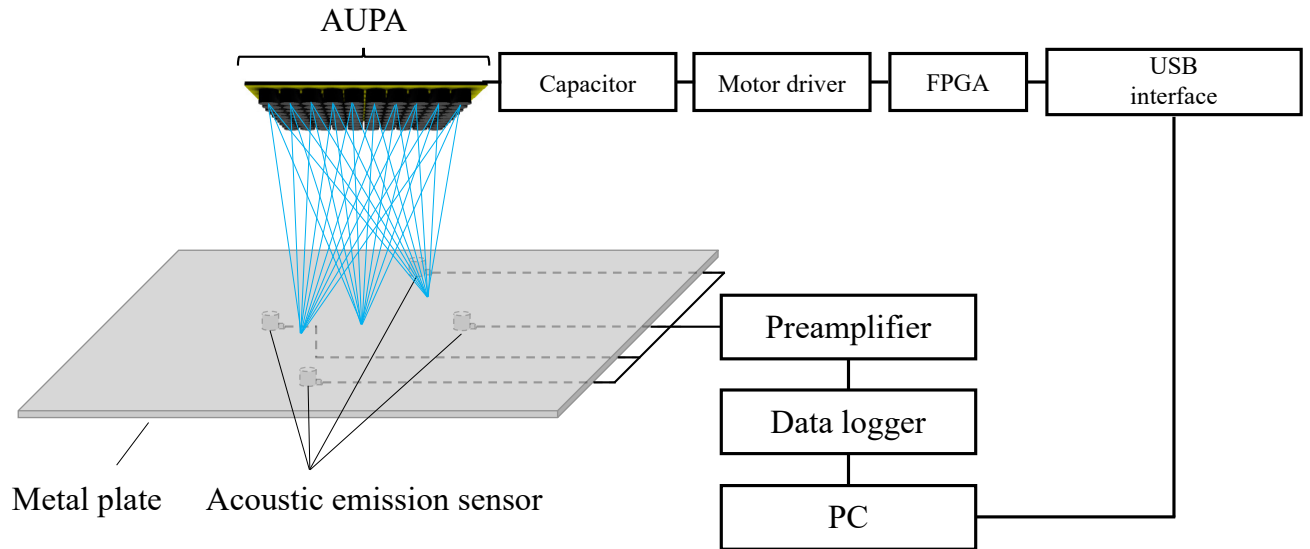


図4.1 実験装置の概要

4.1.2 実験に用いる金属板試料

実験に用いる金属板試料として、長形状のアルミニウム合金(A2017)平板を用いた。

図 4.2 は試料の概略であり、寸法は 500 mm×340 mm×3 mm である。

次に、金属板試料に設けた減肉欠陥について述べる。図 4.3 に減肉欠陥を有する金属試料の断面図を示す。図に示すように試料の中央付近に、20 mm×20 mm×0.5 mm の疑似減肉領域を設けている。なお、実験では減肉欠陥試料に加えて同じ寸法の減肉欠陥のない試料(健全試料)を用意した。

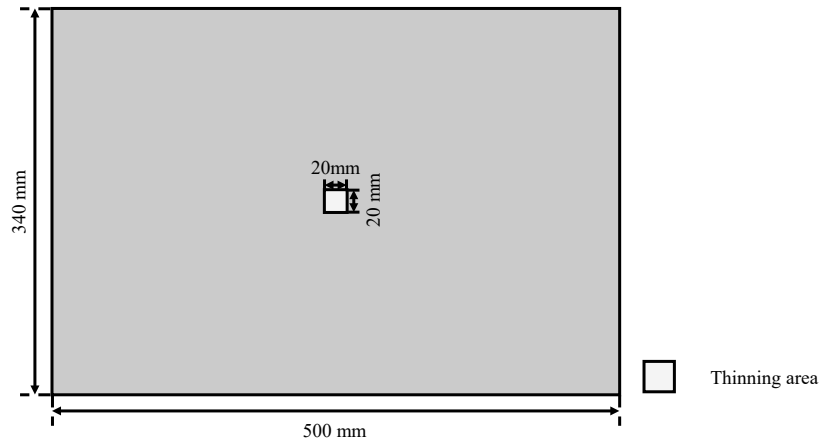


図4.2 金属板試料の概略図

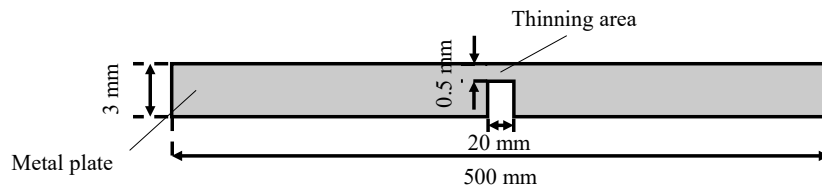


図4.3 減肉欠陥を有する金属板試料の断面図

4.1.3 実験方法

実験は以下の手順で行う。

図 4.4 に計測プロセスの概要図を示す。まず、検査対象である金属板試料に対して、図に示すように波源走査法の原理に基づいて、計測領域内の一点に AUPA により発生させた集束超音波を照射して非接触加振し、試料に Lamb 波を発生させる。この超音波振動情報を試料の裏面に設置した AE センサで受信し、音波照射点の座標情報とともに PC 上のメモリに格納する。この一連の操作を全計測領域で音波の集束位置(加振位置)を走査して行う。これにより、走査全領域に対する Lamb 波の振動振幅分布情報を得ることができる。

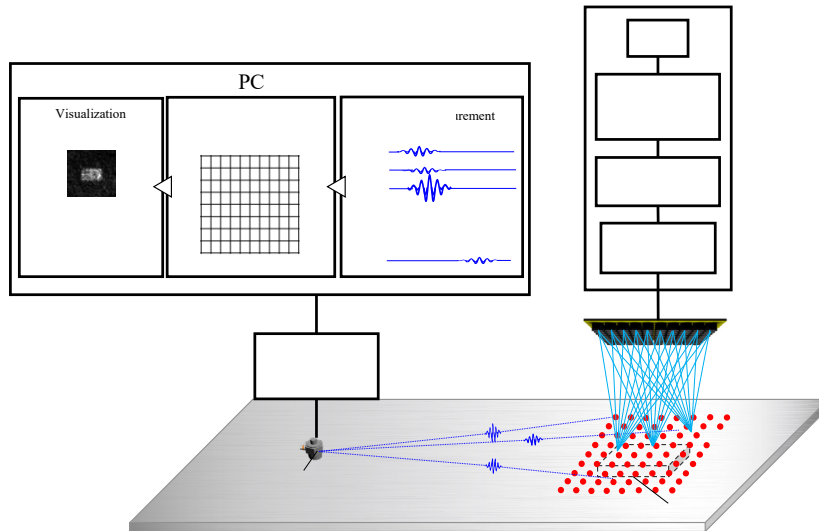
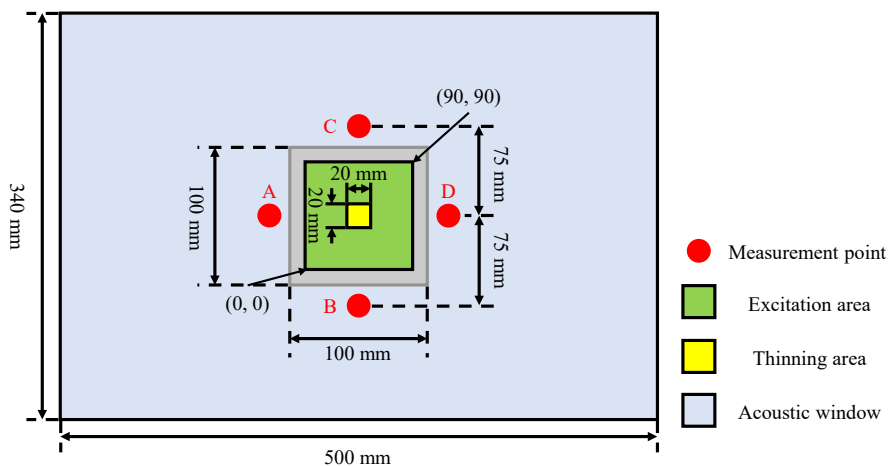


図4.4 計測の概要図

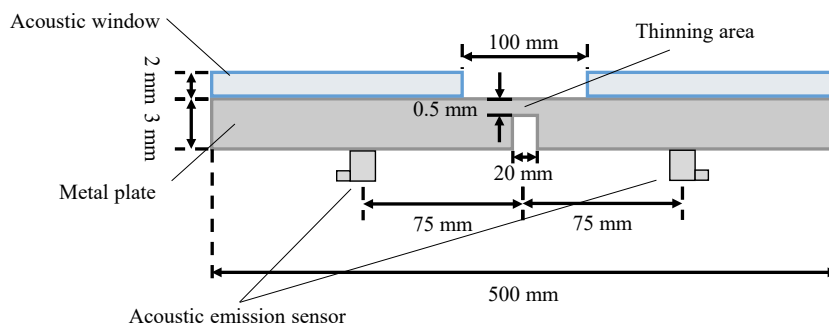
本実験の詳細を以下に示す。AUPA は周波数 40 kHz、印加電圧 24 V で駆動し、照射サイクル 10 波のバースト照射を行う。これにより発生した Lamb 波の AE センサによる計測は音波照射開始と同時に行為れ、計測時間は一点につき 100 ms 以下である。なお、データ取得のサンプリング周波数は 2 MHz、集録時間は 4 ms とした。

次に、図 4.5 に計測範囲と AE センサの設置位置について示す。波源走査法を適用する計測領域は図の 90 mm×90 mm の範囲であり、音波照射点(加振点)を 2 mm ステップで走査した。また、計測データをメモリに格納する際の座標は、図中にある座標(0, 0)から(90, 90)までと定義した。AE センサの設置位置(Lamb 波の受信位置)は、図に示すように計測領域の中央からそれぞれ 75 mm に位置する点 A、B、C、D の 4 点である。

なお、試料板近傍には計測領域を囲むように音響窓(開口 100 mm×100 mm)を設置し、AUPA による音波放射の際に発生するグレーティングローブの影響を防いでいる。



(a) 正面図



(b) 平面図

図4.5 計測範囲と AE センサの設置位置の概要

4.1.4 欠陥の検出手法

AE センサが取得した全領域での振動分布データは、時刻帯ごとに含まれている情報が異なる。具体的には、健全部や減肉欠陥部からの Lamb 波以外にも試料の端部からの反射波や単純散乱等が時刻帯毎に観測される。そのため、欠陥を検出するのに最適な時刻帯の振動振幅値を利用して欠陥部の検出を行う。

また、第 2 章で概説した欠陥検出の原理より、減肉部の振動振幅値は健全部のそれよりも大きくなる。一方、Lamb 波の伝搬による減衰の影響も考えると、AE センサに近い位置ほど

振動振幅は大きく観測されることになる。

したがって、観測位置によってはその振動振幅が減肉部での振幅値よりも大きくなる場合も考えられる。これについては、あらかじめ減肉欠陥のない健全試料を用いて Lamb 波の減衰特性を取得し、これを基に欠陥を検出することは十分可能である。ただし、この方法では検査対象と同一材質で同じ厚さの試料が必要になる。そこで、新たな方法として同一の計測領域を設置位置の異なる複数の AE センサによって振動分布情報を取得し、これらに対して加算平均処理を行うことで、欠陥部の振動振幅値を強調させる。さらには、欠陥の無い部分で取得した振動情報との差分を取ることで、欠陥部をさらに強調処理する方法が考えられる。

4.2 実験結果

4.2.1 金属板を伝搬する Lamb 波の時間波形

図 4.6 は、AE センサによって受信された金属板試料を伝搬する Lamb 波の時間波形の一例である。具体的には、図 4.5 (a)の点 B に設置した AE センサが、集束音波を座標(46,0)の位置に照射したときに観測した時間波形である。

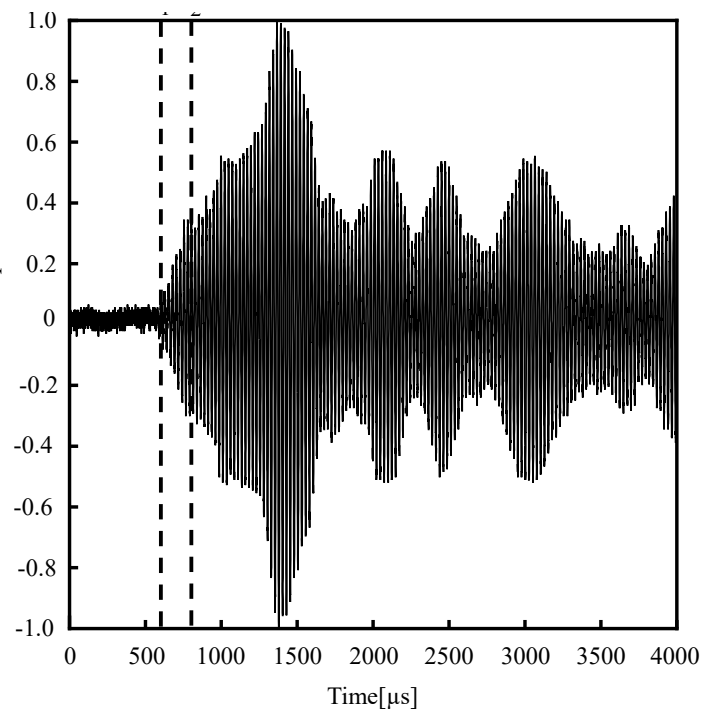


図4.6 AE センサが受信した Lamb 波の時間波形

図は、縦軸に Lamb 波の振動振幅に対応した検出電圧で、振幅の最大値で規格化してある。

横軸は AUPA への駆動に同期した経過時間を示している。

結果より、時間波形全体を見ると、振幅は 600 μs 時から立ち上がり、1400 μs 時までの時間帯で振幅値が徐々に上昇している。1400 μs 時以降は、振幅が周期的に増減しながら徐々に減衰していく様子が確認される。

600 μs 時から 800 μs 時までの振幅値の上昇は、前章の図 3.7 で示した AUPA の駆動開始時の立ち上がり音波放射特性が大きく依存している。また、800 μs 時から 1400 μs 時の時間帯では金属板の各辺の端部からの反射波が AE センサに到来し始めることにより、振幅が緩やかに上昇する。さらに、1400 μs 時以降の振動振幅の周期的増減については、金属板の端部か

らの反射波が繰り返し AE センサに到来する多重散乱により受信信号の振幅値が周期的に変動しているものと推測される。

さらに、各時刻帯における時間波形の特性について詳細に考察する。

まず、時刻 0 ~ 600 μs は、AUPA から放射された音波が試料板の座標(46, 0)の位置に集束するまでの時間であり、以下のように求められる。

本実験装置では、AUPA の開口面から試料までの距離は 200 mm である。空気中での音速を 340 m/s とすると、音波が試験片に到達するまでの時間 t_1 は次の式より約 600 μs となる。

$$t_1 = \frac{200 \times 10^{-3}}{340} \quad (4-1)$$
$$\cong 600 \mu\text{s}$$

次に、600 μs ~ 800 μs 時刻帯での振幅増加特性については以下のように考察できる。音波照射点 (46,0)から試料板端部までの距離は 125 mm、試料端部から AE センサの設置位置点 B までの距離は 95 mm である。これは、音波照射により励起された Lamb 波が試料端部で反射して、受信点に到達するまでの最短経路である。厚さ 3 mm のジュラルミン板(A2017)を伝搬する A0 モードの lamb 波の音速は約 1080 m/s であるから、Lamb 波が最短経路を伝搬する時間は以下の式より約 200 μs となる。

$$\frac{(125 + 95) \times 10^{-3}}{1080} \cong 200 \mu\text{s} \quad (4-2)$$

以上のことより 600~800 μs までの時刻帯は、反射波の影響を全く受けることなく加振点

から直接 AE センサに到達する Lamb 波のみを観測していることになる。これに対し、800 μs 以降の時刻帯では、試料端部からの反射波の影響が含まれた時間波形が取得される。特に、1400 μs 以降の時刻帯では、時間波形は試料の各端部からの反射波の影響を強く受ける。これら反射波の影響は、欠陥検出の際に受信信号の S N 比の低下や不要なアーチファクトを招く可能性がある。そこで、時刻 t_1 から 200 μs 経過した時刻を t_2 として $t_1 \sim t_2$ の時刻帯での AE センサ受信波形の振幅のピーク値に注目して検討を進める。

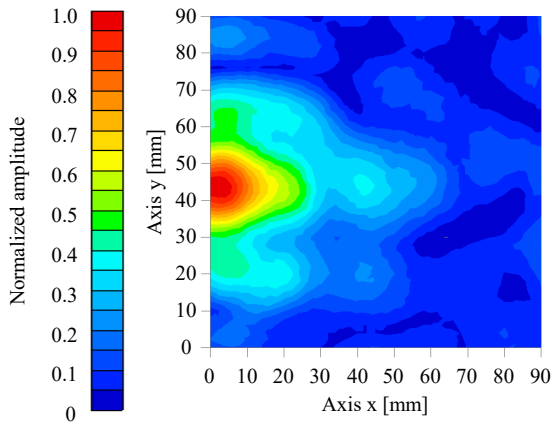
4.2.2 Lamb 波の振幅ピーク値分布を利用した減肉欠陥の検出

上記での検証を基に、4 個の AE センサで取得した Lamb 波の時間波形から取得した振動振幅のピーク値特性を基に減肉欠陥の検出を行う。すなわち、前節で述べた $t_1 \sim t_2$ の時刻帯における振動振幅のピーク値を用いて、計測領域における振幅ピーク値分布を取得し、それを基に欠陥の検出を試みた。

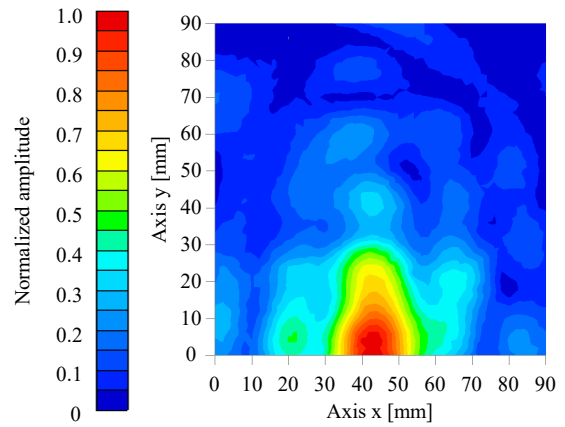
手順は以下の通りである。AUPA を用いて試料の計測領域に対して波源走査法を適用し、試料に発生した Lamb 波の振幅時間波形を AE センサにより順次取得する。受信した各時間波形のうち $t_1 \sim t_2$ の時刻帯での振幅のピーク値を抽出し、計測領域の座標に対応させて振動振幅ピーク値分布を作成する。

図 4.7 は計測により得られた欠陥のない健全試料での振動振幅ピーク値分布である。

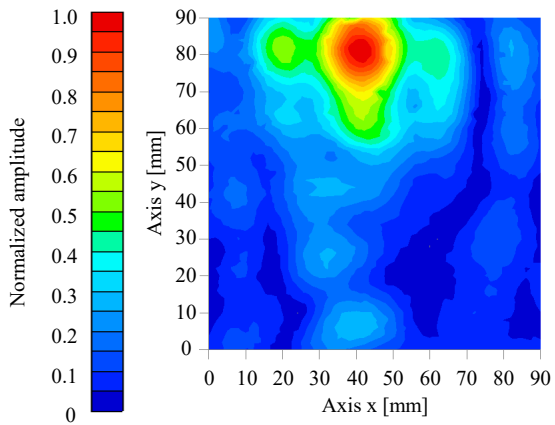
図(a)~(d)は、点 A~D に設置した AE センサ受信による結果である。



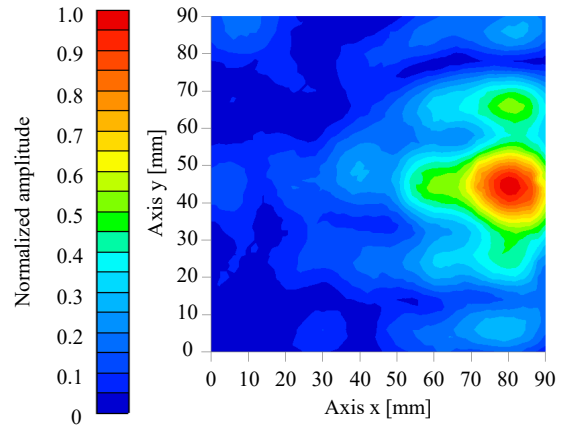
(a)



(b)



(c)



(d)

図4.7 健全試料における振幅のピーク値分布

それぞれ振幅ピークの最大値で規格化して、カラーマップで表示している。

いずれの結果においても AE センサに近い位置で振幅値が大きく現れ、離れるにつれて急激に低下しているのが確認できる。

次いで、減肉欠陥がある試料について同様の方法で計測を行った。

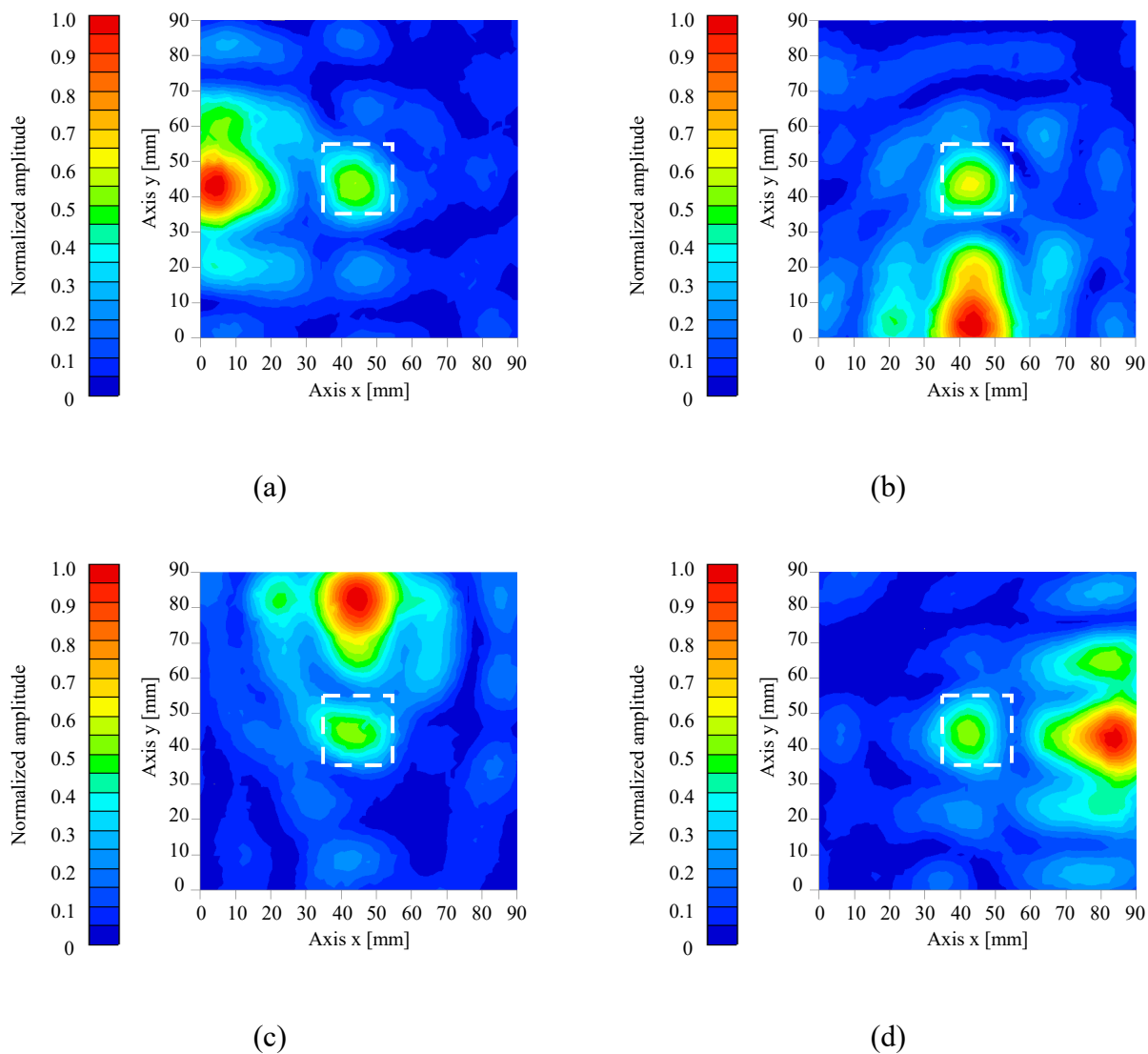


図4.8 欠陥試料における振幅のピーク値分布

図 4.8 はその結果であり、図 4.7 と同様の形式で表示している。

結果より、図 4.7 とほぼ同様の結果となっているが、計測領域の中央に設けた減肉欠陥部付近で振幅値が極大を示しているのが確認できる。

この振幅値は、センサ近傍の振幅値よりも小さいものの、比較的高い SN 比で観測されている。そこで、これらの計測結果に対して以下の方法で信号処理を行った。まず、図(a)~(d)

の結果について加算平均処理を行った。

図 4.9 にその結果を示す。なお、カラーマップ値については加算後の結果の最大値で規格化してある。

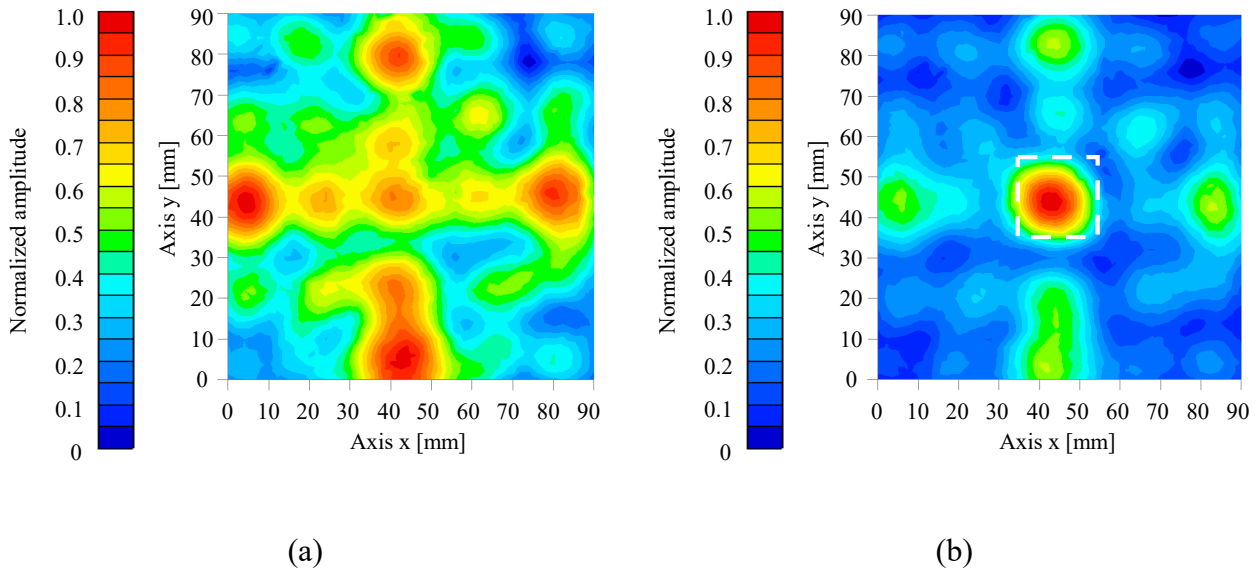


図4.9 加算平均結果

図(a)は欠陥なしの試料、(b)は欠陥有りの試料の結果である。図(a)見ると、各 AE センサに近い位置で振幅値が大きく試料中央に向かって、比較的大きな振幅が続いている。

これに対し、図(b)の結果では欠陥部付近において振幅値が大きく表れており、欠陥が明確に検出されている。しかし、AE センサ近くでは多少ではあるがアーチファクトが現れているのが確認できる。また、欠陥の形状についてもある程度可視化できている。

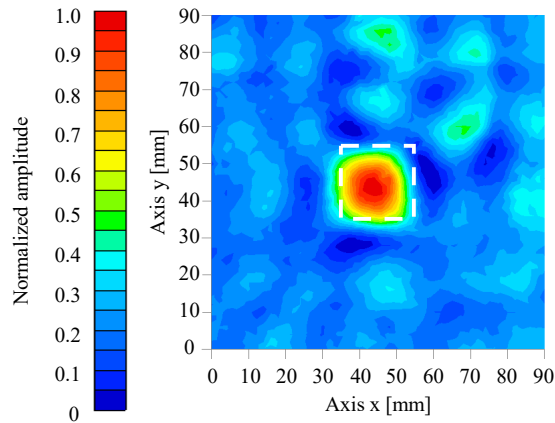


図4.10 差分処理を行った結果

図 4.10 に、差分処理を行った結果を示す。結果より、減肉部の振幅ピークが強調され
たまま、センサ近傍の振幅値は大幅に低下しアーチファクトが消えているのが確認で
きる。

4.3 本章のまとめ

本章をまとめると以下のようなになる。

- (1) 空中超音波フェーズドアレイによる波源走査法を実現させるための装置を構築し、併せて欠陥検出の検証のための疑似減肉欠陥を有する金属板試料と欠陥のない健全な金属板試料を作製した。また、本計測手法による欠陥検出のための手順について詳細に示した。
- (2) 構築した計測システムにより、金属板に発生させた超音波振動の基本特性について検討し、本システムにおいて波源走査法が適用可能であることを明らかにした。また、

減肉欠陥のある金属板に対して欠陥の検出を試み、計測領域での Lamb 波の振動振幅のピーク値分布を得ることで、欠陥の検出が可能であることを明らかにした。

なお、これらの計測結果に対して加算平均処理及び欠陥がない健全試料の振動特性を利用した背景差分処理が欠陥検出に極めて有効であることを示した。

第5章 グレーティングローブを抑制する 空中超音波フェーズドアレイの構築と 新たな走査方法

第5章 グレーティングローブを抑制する空中超音波フェーズド アレイの構築と新たな走査方法

前章では、空中超音波フェーズドアレイ(Airborne Ultrasound Phased Array : AUPA)を用いた計測システムの構築と、音波照射により金属板に発生させた Lamb 波の振幅ピーク分布特性を利用した減肉欠陥の検出手法について述べた。一方で、この計測手法には以下に示す課題がある。

(1) 超音波エミッタのアレイ間隔に起因したグレーティングローブ(Grating Lobe : GL)が発生してしまう。

(2) GL の影響を防ぐための音響窓設置により検査対象が制限される。

(3) Lamb 波の振幅ピーク分布を用いる計測では、AE センサに近い位置で振幅値が大きく受信される特性となり、正確な欠陥検出を行うためには複数のセンサの利用や背景差分処理等が必要となる。

(4) 音波の集束形状が AUPA 開口の中心法線から離れるほど変形してしまう。

ここで、(1)、(2)及び(4)については、AUPA の音波の集束原理上の問題である。

そこで、本章では超音波エミッタアレイの音波放射時に発生する GL の抑制を目的とした AUPA の改良、及びこれに伴い新たなスキャン方式を導入した波源走査法を提案している。

次いで、作製した改良型 AUPA の音波放射特性について検証を行う。^[42, 43]

5.1 グレーティングローブ発生を抑制した空中超音波フェーズドアレイと

駆動装置の構築

5.1.1 グレーティングローブ発生とその抑制方法

AUPA のように多数の超音波エミッタを等間隔で配列させたとき、その間隔がエミッタの放射音波の半波長以上である場合には新たな音波の位相面が等間隔に現れ、音波集束点以外の位置にも強い音波が発生してしまう。これが GL である。

ところで、GL の発生は超音波エミッタの間隔を適切な条件にすることで抑制できることが知られている。GL 発生を抑制させるための超音波エミッタの間隔 d_{cr} は、次の式で示される。[44]

$$d_{cr} = \frac{\lambda}{1 + \sin \theta} \quad (5-1)$$

ここで、 λ は音波の波長、 θ は AUPA による集束音波の走査角度である。音波の集束位置を AUPA の中心法線に対して最大走査角度である 90 度とした場合、GL が発生しないエミッタの間隔は、40 kHz 音波においては 4.25 mm となる。現在実在する最小の超音波エミッタの直径が 8 mm であることを考えると、GL の抑制はかなり難しい。

仮に、上記の条件を満たす超音波エミッタが出現したとしても、上記(4)で述べた音波集束位置によって集束形状が変化してしまうことは避けられない。そこで、これらを解決する方法として AUPA へのリニアスキャンの導入を提案する。図 5.1 はこれを説明するための概要図である。

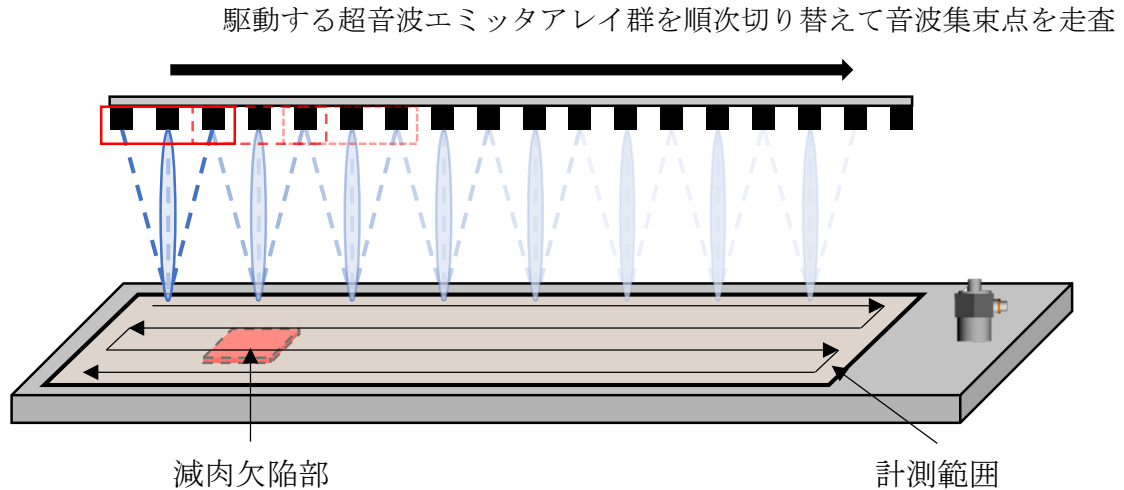


図5.1 リニアスキャンの原理図

図のように、平面上に配置した超音波エミッタ群の一部で構成する赤線で囲まれた AUPA から放射される音波を、構成 AUPA 面の中心法線上に集束させる。このような AUPA を図の右側に順次移動しながら構成して集束音波を走査する。これがリニアスキャンであり、構成された AUPA から放射された音波の集束形状は常に円形となる。これは、波源走査法の基本となる相反定理を適用させるための重要な要件である。

以上、リニアスキャン方式の適用を前提として、AUPA からの放射音波をアレイ開口面の中心法線上に集束させて非破壊検査を行うことにする。そこで、集束音波の走査角度を $\theta = 0$ としたとき、GL が発生しないための超音波エミッタの設置間隔を試算する。

音波の伝搬速度を 340 m/s とすると周波数 40 kHz の空中超音波の波長 λ は、

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{40 \times 10^3} = 8.5 \text{ mm} \quad (5-2)$$

となる。

したがって、GL を抑制可能な超音波エミッタの設置間隔 d_{cr} は式(5-1)より、

$$d_{cr} = \frac{8.5}{1 + \sin 0} = 8.5 \text{ mm} \quad (5 - 3)$$

これより、超音波エミッタの設置間隔を 8.5 mm 以下とすれば GL 発生の抑制が可能となる。

5.1.2 グレーティングローブを抑制させる改良型空中超音波フェーズドアレイの作製と駆動システム

前項の検討を基に、直径 8 mm の超音波エミッタを用いて GL を抑制させた空中超音波フェーズドアレイ(AUPA8)を作製した。図 5.2 に AUPA8 の外観ならびに駆動システムの概要図を示す。本装置は、超音波エミッタアレイ、駆動回路、制御用 PC で構成されている。超音波エミッタは、図 3.4 と同様の構造であり、図 5.3 は超音波エミッタの周波数特性、図 5.4 は音波放射特性である。図のように、超音波エミッタの共振周波数は約 40 kHz であり、効率の良い音波放射を行うために AUPA を 40 kHz で駆動させる。図 5.4 の指向特性に基づいている。エミッタアレイは、64 個の超音波エミッタ(T4008A1 日本セラミック)をガラスエポキシユニバーサル基板(矢島製作所 製)上に正方形配列(8 個×8 個)で配置した構造となっている。また、各超音波エミッタは独立した駆動回路によってそれぞれ個別に制御される。

駆動回路は、ファンクションジェネレータ(NI 製 PXIe-6739)、増幅用アンプ(自作 NJM5532

にて構成)から成る。エミッタアレイに配置した超音波エミッタを個別に制御するため、64個の増幅用アンプを使用している。

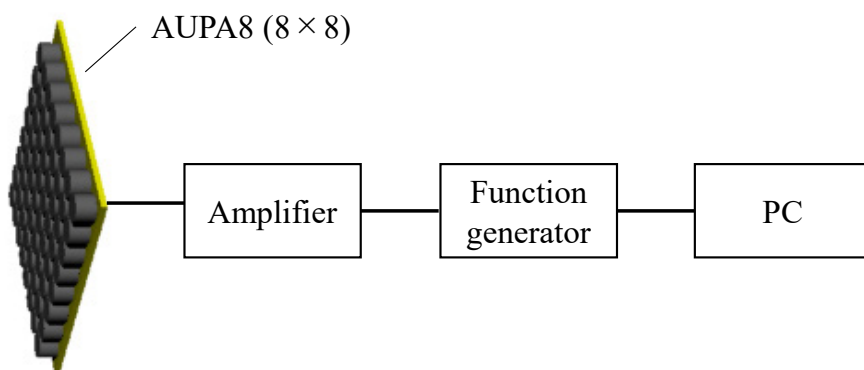


図5.2 作製した空中超音波エミッタアレイと駆動システム

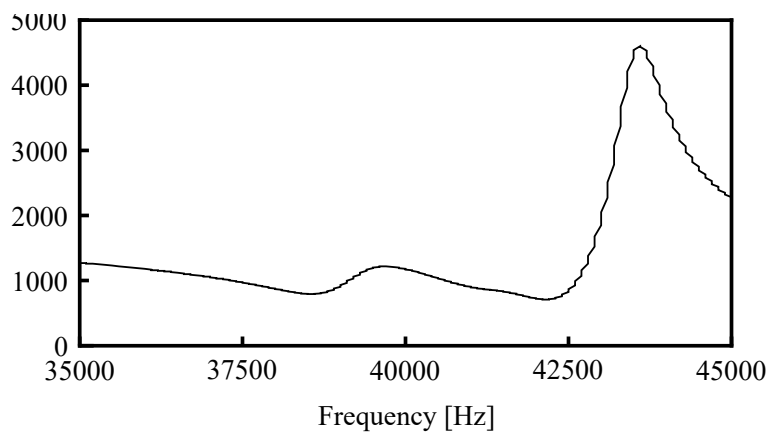


図5.3 直径 8 mm の超音波エミッタの周波数特性

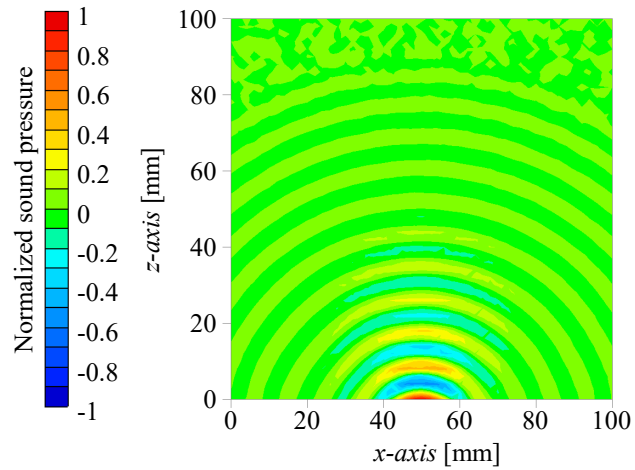


図5.4 直径 8 mm 超音波エミッタによる音波放射特性

駆動回路は以下の流れで制御駆動する。まず、制御用 PC からファンクションジェネレータを通じてエミッタアレイを構成する各超音波エミッタに入力する信号が生成される。これらの信号は独立した位相制御がなされている。生成された信号は増幅用アンプによって増幅され、各超音波エミッタに入力される。

5.2 改良型の空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性

前項で作製した改良型 AUPA8 の音波放射特性を検討した。なお、ここではアレイ面から音波集束面までの距離を $r = 100 \text{ mm}$ としている。

5.2.1 測定装置の概要

図 5.3 に集束音波の計測装置の概要を示す。装置は、作製した AUPA8(駆動周波数 40 kHz : $\lambda \approx 8.5 \text{ mm}$)、及びその駆動装置、集束音場を計測するため二次元走査できる精密ステージに取り付けた 1/8 インチコンデンサマイク(G.R.A.S 社製 Type 40DP)、その他の周辺機器とそれらを制御する PC で構成されている。

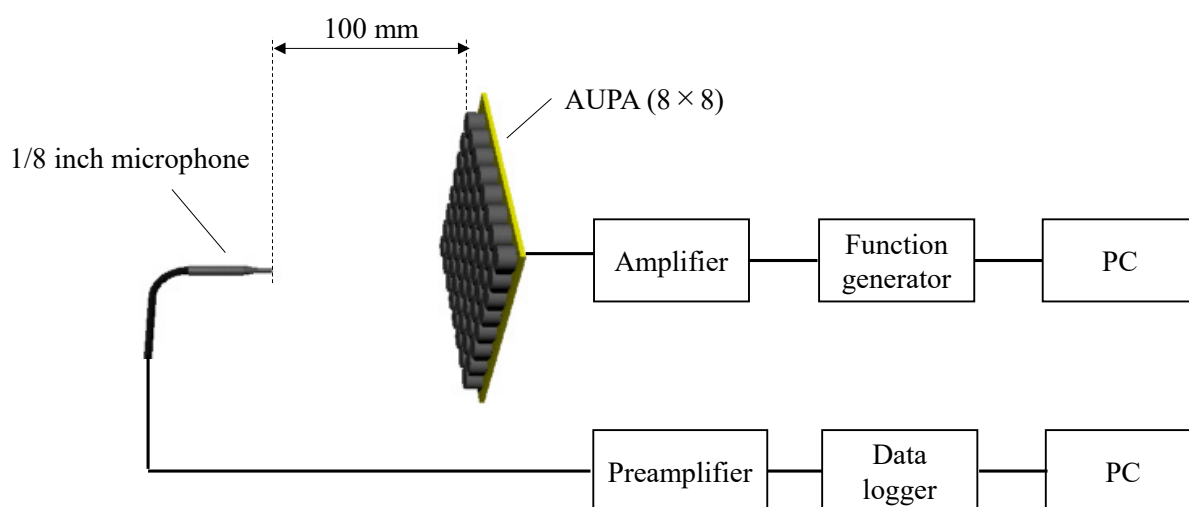
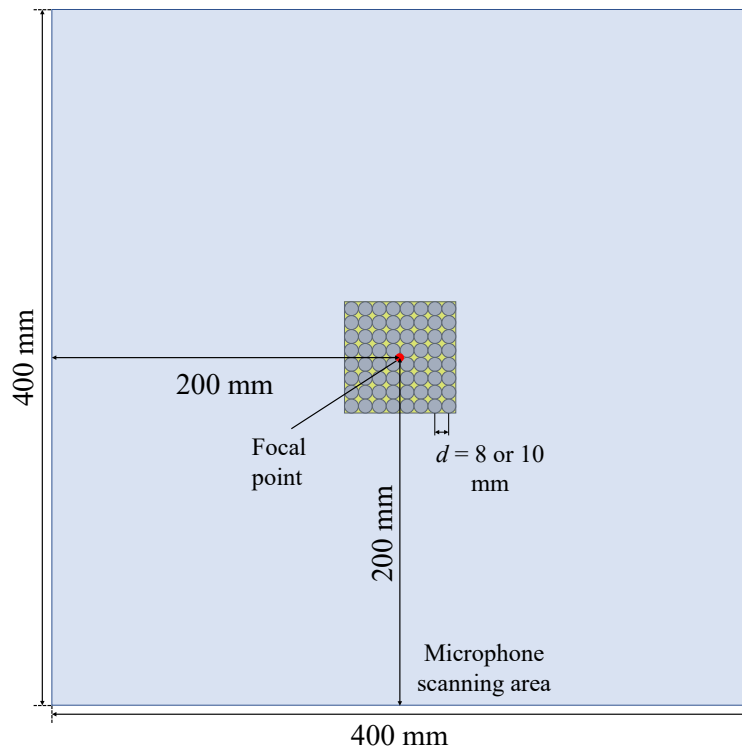


図5.5 計測装置の概要図

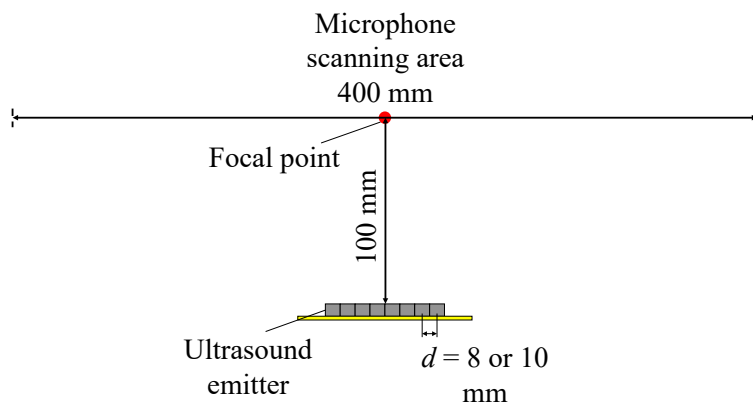
計測はアレイ面に対応する $r = 100 \text{ mm}$ の面内で行った。図 5.6 に音波の計測範囲($400 \times 400 \text{ mm}$)を示す。AUPA は周波数 40 kHz 、印加電圧 24 V で駆動し、照射サイクル 10 波のバ

ースト照射とした。また、音波集束点は AUPA の中心法線上 100 mm の位置に設定した。なお、GL 抑制について比較検討のため、直径 10 mm の超音波エミッタ 64 個で構成した AUPA10 を作製した。まず、AUPA が形成する集束音波の強度及び集束形状について検討する。

次に GL の抑制効果を評価する。



(a) 正面図



(b) 平面図

図5.6 計測範囲図

5.2.2 実験結果

図 5.7 は、改良型 AUPA8 による $r = 100 \text{ mm}$ の面内の音圧分布の測定結果である。結果より、放射音波が所定の位置でほぼ円形状に点集束しているのを確認できる。また、図 5.8 は集束音波の時間波形であり、正圧ピーク音圧約 5000 Pa 、負圧ピーク音圧約 3300 Pa の極めて強力な音波が発生できている。また、音波波形は大きく歪んでおり、強い非線形性^[45-50]を生じている。なお、第 3 章で構成した AUPA の集束音波と比較しても十分な音波強度が得られていることがわかる。

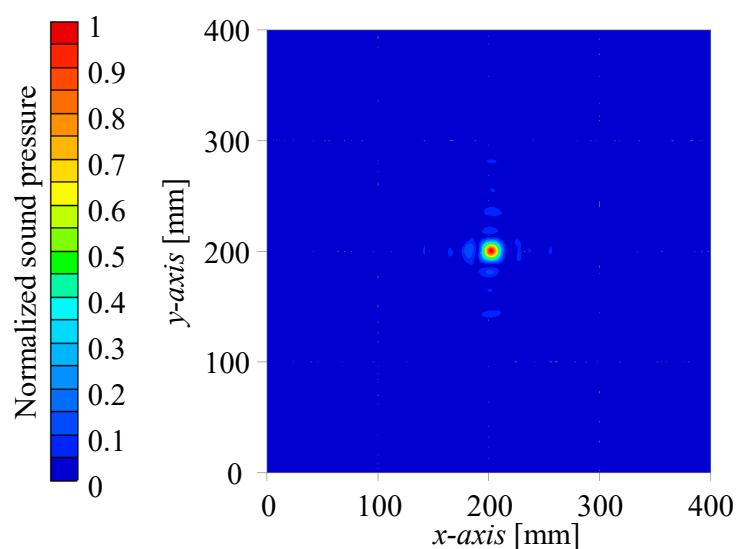


図5.7 AUPA8 による集束音場の音圧分布

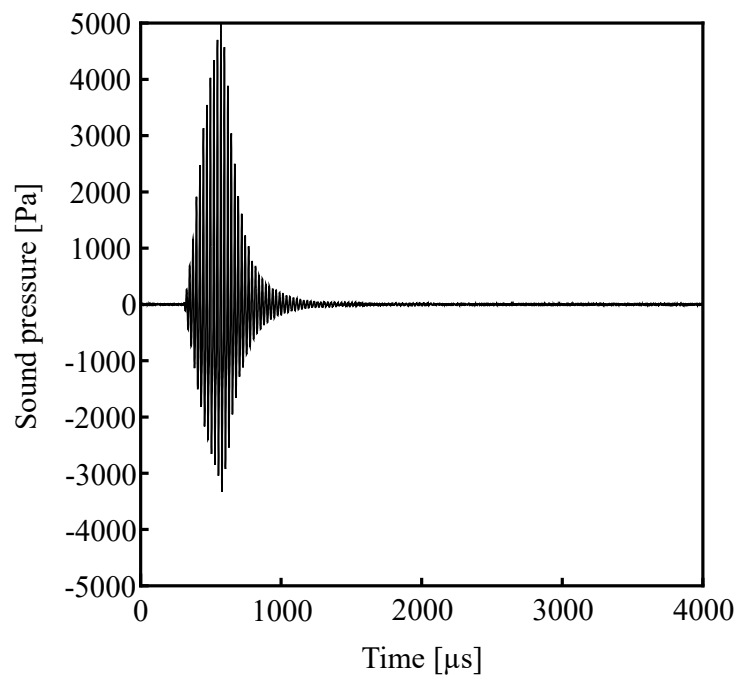
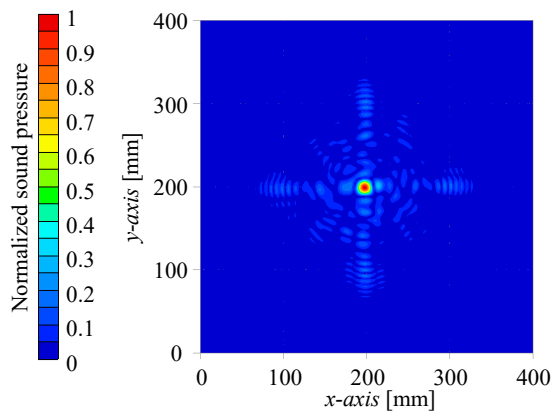
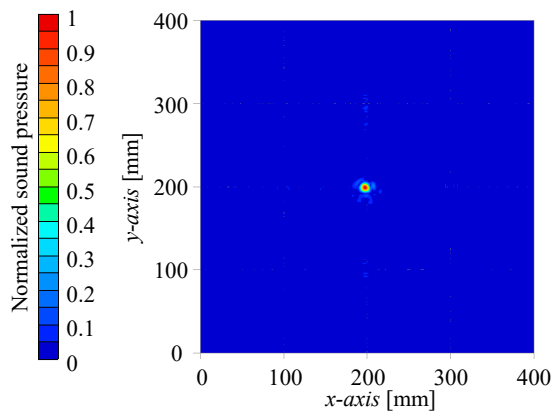


図5.8 音波集束点における音波の時間波形

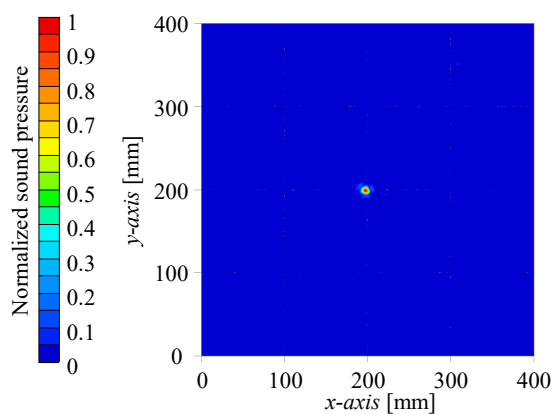
ここで、GLの抑制効果について検討を行うために、従来型のAUPA10と改良型のAUPA8の音波集束特性について詳細に比較検討を行う。図5.9及び図5.10は、音波集束点を含む面内の音圧分布であり、基本波及び第2次、第3次高調波について示してある。結果は、各計測点における正圧ピーク値を示しており、それぞれ最大値で規格化し、カラーマップで表示している。



(a) 1st



(b) 2nd



(c) 3rd

図5.9 従来型の AUPA10 による集束音場特性

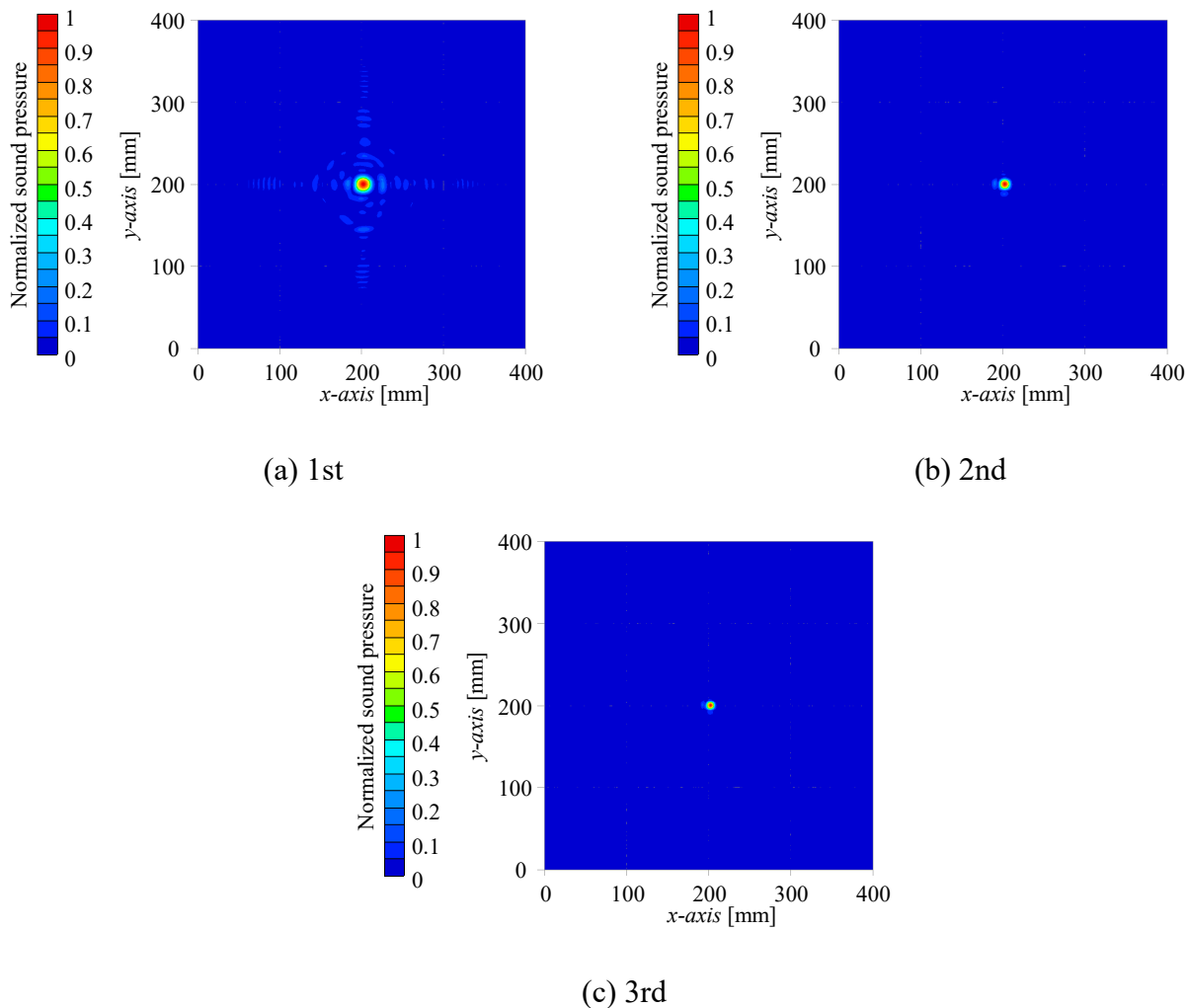


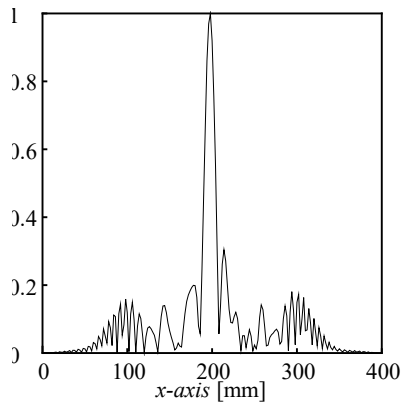
図5.10 改良型の AUPA8 による集束音場特性

いずれの結果も音波集束位置において音圧が極大になっている。また、基本波音波(40 kHz)に比べて第2次(80 kHz)、第3次(120 kHz)の高調波音波では、集束径がより小さくなっていることがわかる。ここで、両音源の結果を比較すると、AUPA10では音波集束点の上下左右方向において音圧が上昇しており、グレーティングローブ(Grating Lobe : GL)が発生していることが確認できる。

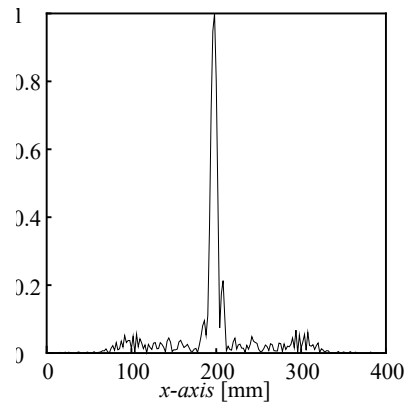
一方、AUPA8の結果ではGLの発生はほとんど見られない。これについてさらに詳細に

比較検討するため、両図中の破線($y=200\text{ mm}$)に沿って音圧のライン分布を抽出した。図 5.11

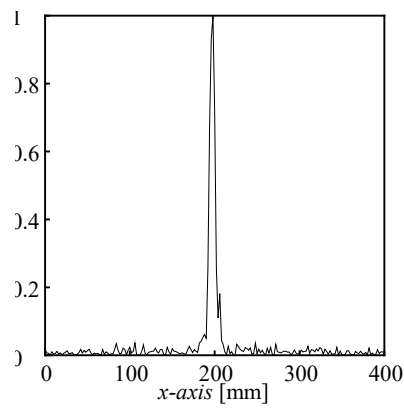
及び図 5.12 はその結果である。



(a) 1st

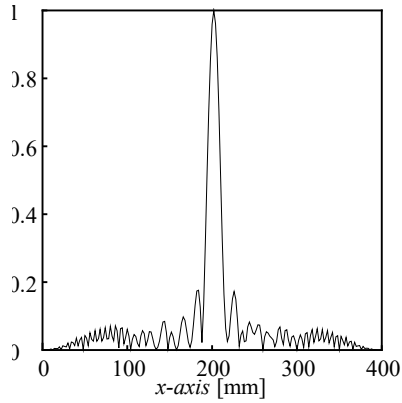


(b) 2nd

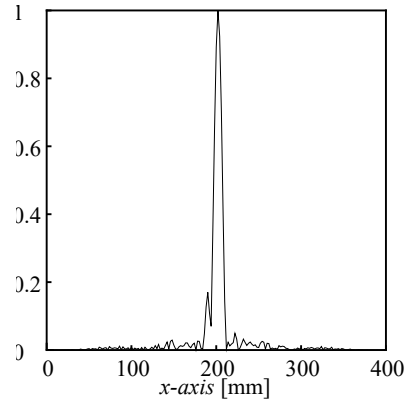


(c) 3rd

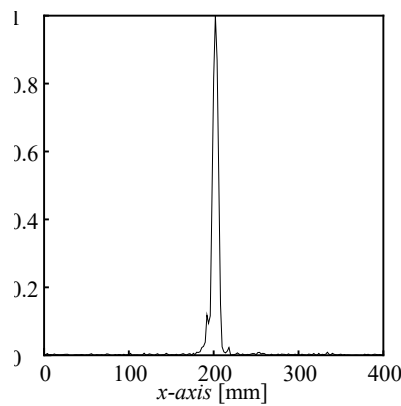
図5.11 図 5.9 の $y = 200 \text{ mm}$ におけるライン分布 (AUPA10)



(a) 1st



(b) 2nd



(c) 3rd

図5.12 図 5.10 の $y = 200 \text{ mm}$ におけるライン分布 (AUPA8)

両結果を比較すると、基本波成分(1st)の分布では、全体として大きな違いは見られないものの、AUPA10ではサイドローブ成分がかなり大きく、GLの影響が明確に現れている。また、高調波成分(第2次、第3次)においては、両者の違いがより顕著になっている。AUPA10(図5.11)ではGL成分が現れているのに対し、AUPA8(図5.12)ではそれがほとんどなく、GLの発生が抑制できている。

5.3 本章のまとめ

本章をまとめると以下のようなになる。

- (1) 空中超音波フェーズドアレイ(Airborne Ultrasound Phased Array : AUPA)の放射音波を点集束させる際に発生するグレーティングローブ(Grating Lobe : GL)の抑制条件を明らかにし、これに基づき直径 8 mm の超音波エミッタで構成する GL を抑制した改良型 AUPA の設計ならび作製を行った。

- (2) 改良型 AUPA の音波放射特性について検証を行い、音波集束点において最大約 5000 Pa の所望の強力点集束超音波が発生可能であることを実験的に明らかにした。また、従来の直径 10 mm 超音波エミッタで構成する AUPA との比較検討より、従来に比べて GL の発生が大幅に抑制されていることを確認した。

第6章 超音波振動の波動伝搬特性 を利用した非破壊検査

第6章 超音波振動の波動伝搬特性を利用した非破壊検査

前章では、グレーティングローブ(Grating Lobe : GL)の発生を抑制した改良型の空中超音波フェーズドアレイ(Airborne Ultrasound Phased Array : AUPA)を作製し、その音波放射特性について検証した。本章では、この改良型 AUPA と波源走査法による、Lamb 波伝搬特性を利用した金属板内の減肉欠陥の検出方法について検討する。[42, 51, 52]

6.1 波動伝搬特性を利用した減肉欠陥の検出原理

図 6.1 は、音波照射位置を加振源として発生する Lamb 波が、金属板を球面波状に伝搬する様子を示す。

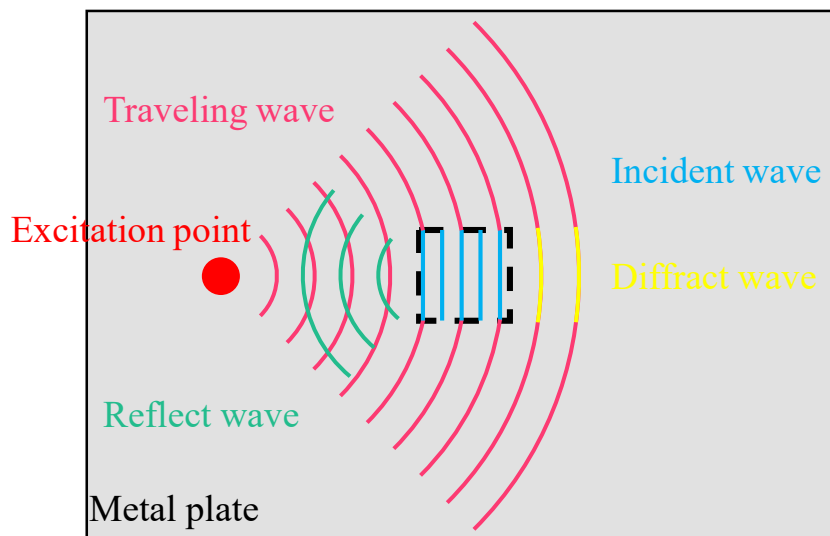


図6.1 波動伝搬像による減肉欠陥の検出の概要

いま、図のように金属板内に減肉欠陥がある場合、欠陥のない健全部と欠陥部の境界においては、Lamb 波の透過に加えて反射や回折等の散乱現象が出現する。この現象を観測することにより、欠陥検出やその形状の可視化が可能となる。また、減肉部では健全部に比べて薄

くなるため、Lamb 波の分散性によって伝搬速度に変化が生じ、これに伴い波動の波長も変化する。しかも、欠陥部の境界で生じる反射波と、進行波との干渉により定在波が形成されるため、視覚的にも減肉部の可視化が容易になる。なお、伝搬する Lamb 波の波長が短いほど散乱は顕著になるため、高調波音波による欠陥検出精度の向上が期待できる。

これらのことにより、第 4 章で述べた複数 AE センサの使用や背景差分等の処理を行わずに、減肉部の検出が可能になる。

6.2 実験概要

6.2.1 装置の構成

上記の原理に基づき減肉欠陥を検出するための計測システムを図 6.2 に示す。装置は送信部と受信部に分かれており、送信部は前章で述べた GL 抑制型 AUPA を駆動する装置と同様の構成である。具体的には、AUPA とその制御装置から成り、ファンクションジェネレータ (PXIe-6739 NI 製)、増幅用アンプ(自作、NJM5532D にて構成)、及び PC で構成される。次いで、受信部は Lamb 波計測用の AE センサ(PICO PAC 製)、AE センサの信号を増幅する計測アンプ(2/4/6 C MISTRAS 製)、AE センサの信号を A/D 変換するデータロガー(USB-6356)、計測を制御する PC で構成されている。

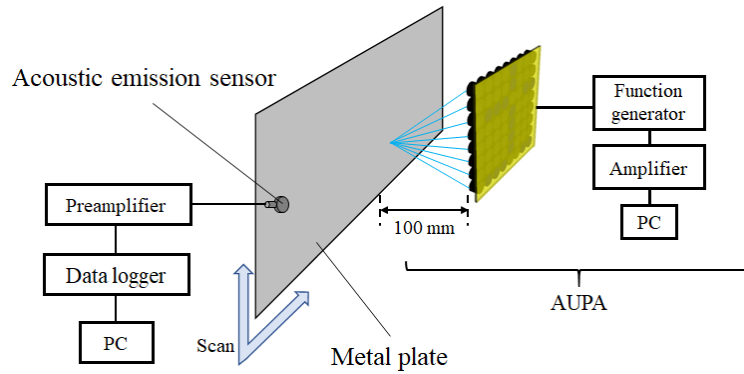


図6.2 実験装置の概要

なお、実験に使用する金属板試料は、第4章で用いたものと同様である。

6.2.2 実験方法

実験は以下の手順で行う。

図6.3に示すように、AUPAが放射する点集束音波を用いて波源走査法に基づいた計測を行う。図のように、AUPAからの集束音波照射により金属板に発生したLamb波を計測領域の外に設置したAEセンサで計測する。これにより取得した波形情報を音波照射の位置情報と共にPC上に格納する。なお、AEセンサは実験の都合上、試料裏面に設置してある。これらを全計測領域に対して音波集束点を走査して行う。なお、本計測はリニアスキャン方式で行うことを想定しているが、ここでは便宜上試料板を同一面内で移動させてリニアスキャンを実現させている。この一連の操作を行うことにより、走査領域と同じ範囲のLamb波の波動伝搬像を取得することができる。ところで、第5章においてAUPAによる集束音波は極めて強力であるため強い非線形性が現れ、基本波(40 kHz)に加えて整数次高調波音波が発

生することを示した。そこで、この特性を積極的に利用し、これら高調波音波により金属板試料に励起する第2次高調波(80 kHz)及び第3次高調波(120 kHz)の Lamb 波伝搬像を取得し、検証を行う。なお、Lamb 波の各高調波成分の抽出はタップ数 129 の Finite Impulse Response(FIR)フィルタにより行い、それぞれの高調波について波動伝搬像を作成した。

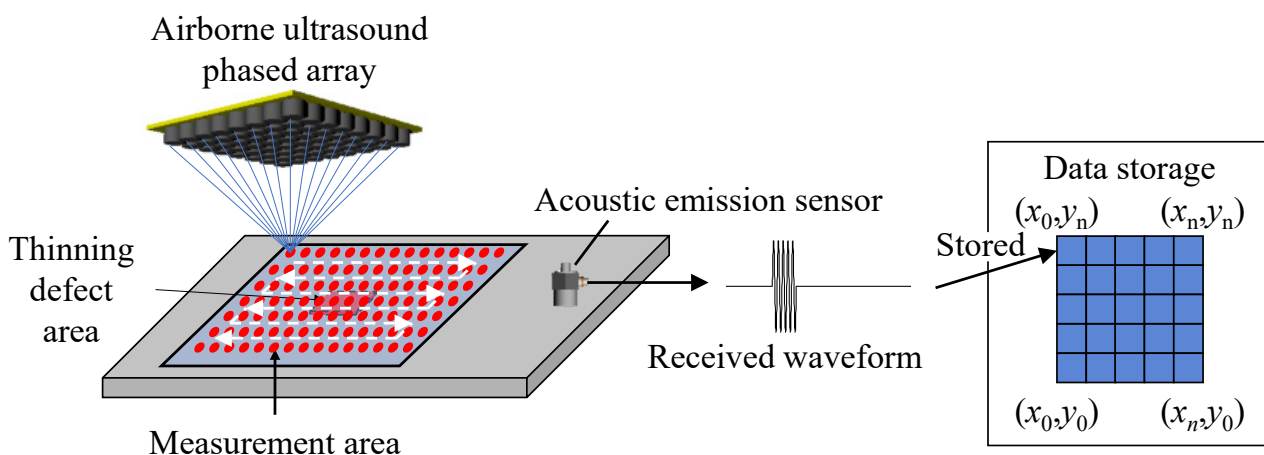


図6.3 実験の概要図

AUPA の駆動条件は前章と同様であり、駆動周波数 40 kHz、印加電圧 24 V、照射サイクル 10 波のバースト照射である。データ取得のサンプリング周波数は 2 MHz とした。

実験試料は図 6.4 に示すアルミ合金板(500 mm×340 mm×3 mm)である。第 4 章で用いた試料と同様に減肉欠陥有り、及び欠陥なしの 2 種類を用いた。また、計測範囲及び AE センサの設置位置は図 6.4 に示す通りである。計測領域は 100 mm×200 mm の範囲で、音波照射点(加振点)を 2 mm ステップで走査した。なお、計測領域には図のように取得データを格納するとき利用する座標も示している。

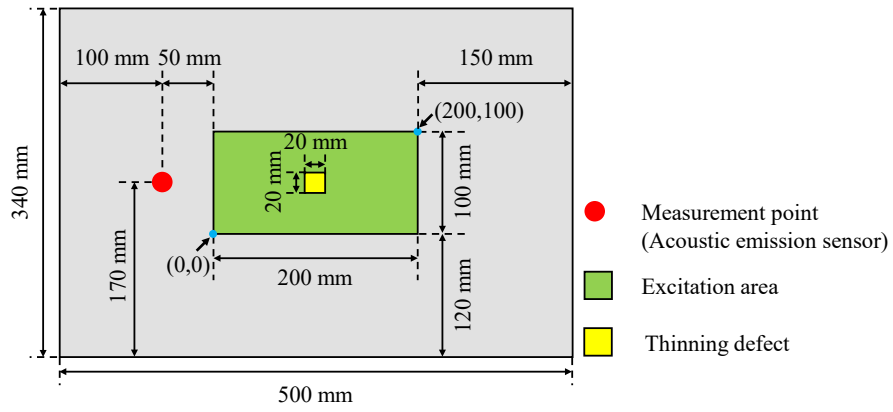


図6.4 計測範囲及び AE センサの設置位置

6.3 実験結果

6.3.1 金属板を伝搬する Lamb 波の観測

図 6.5～図 6.7 は、欠陥のない金属板試料の計測範囲中央部(100, 50)への音波照射により発生した Lamb 波の振動波形を AE センサで計測した結果であり、それぞれ、基本波(40 kHz)、第 2 次高調波(80 kHz)、第 3 次高調波(120 kHz)について示してある。また、結果には特徴的な時刻 A~C を示しており、A は Lamb 波が到達し始める時刻、B は Lamb 波の振幅値が一定の割合で増加している時刻、C は Lamb 波の振幅値が急激に増加し始める時刻である。

すなわち、バースト音波(10 波)の照射により励起した Lamb 波が時刻 A において AE センサに到達し始めている。B の時刻付近では AUPA の立ち上がり特性に対応した振幅の Lamb 波の発生が確認できる。C の時刻において振幅値が急激に増加している。これは試料板の端から反射波が AE センサに順次到来し始めていることを示している。そこで、基本波及び第 2 次、第 3 次高調波成分の振動情報を抽出し、時刻 A~C における波動伝搬像を得た。

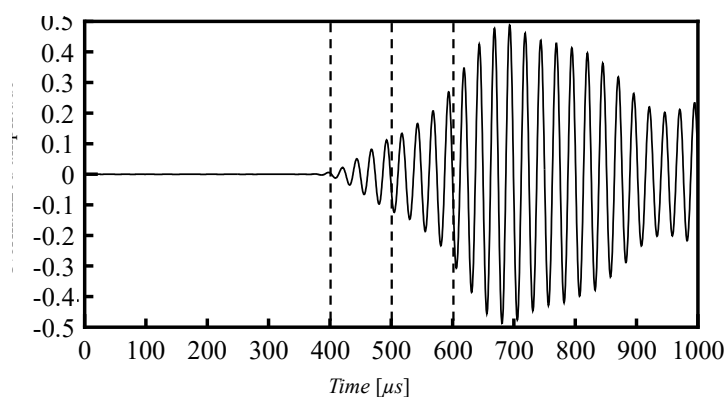


図6.5 改良型 AUPA で計測した金属板試料における Lamb 波受信波形 (基本波 : 40 kHz)

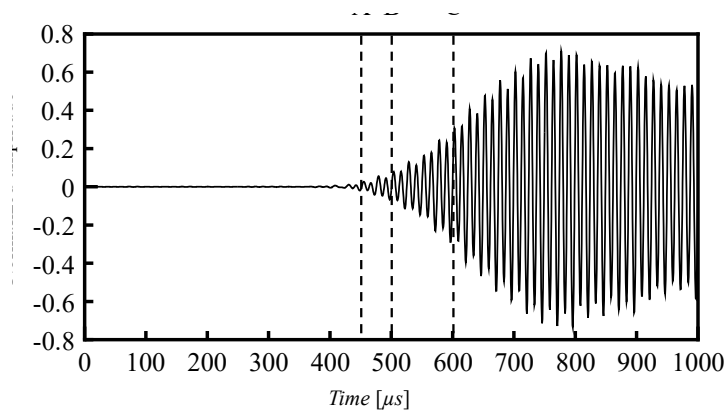


図6.6 改良型 AUPA で計測した金属板試料における Lamb 波受信波形

(第 2 次高調波 : 80 kHz)

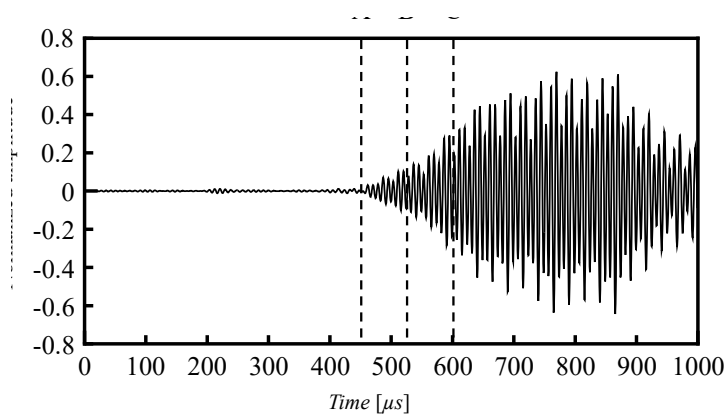
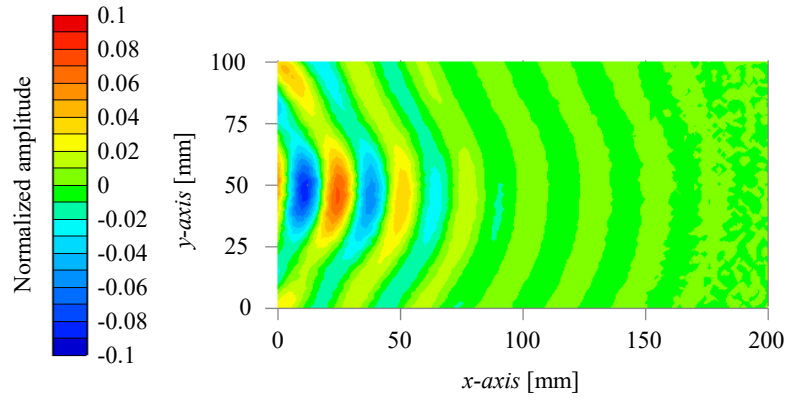


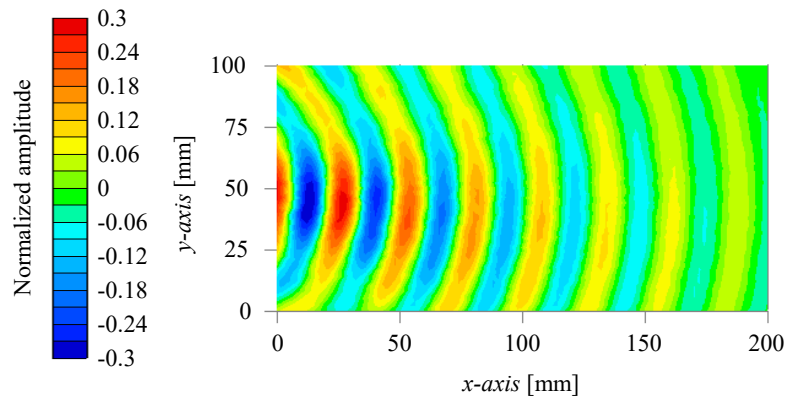
図6.7 改良型 AUPA で計測した金属板試料における Lamb 波受信波形

(第 3 次高調波 : 120 kHz)

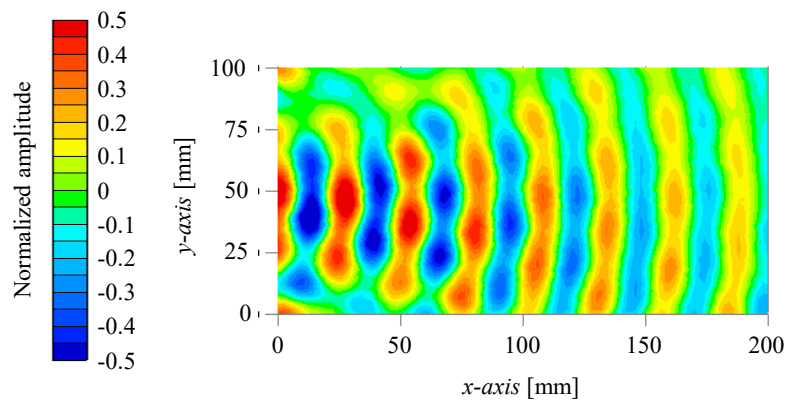
図 6.8 から図 6.10 は欠陥のない金属板試料の波動伝搬についての計測結果であり、基本波 (40 kHz)、第 2 次高調波(80 kHz)、第 3 次高調波(120 kHz)の伝搬像を示してある。いずれもそれぞれの結果の最大値で規格化してあり、伝搬する波動の振幅情報をカラーマップで表示している。



(a) 時刻 A : $t = 400 \mu\text{s}$

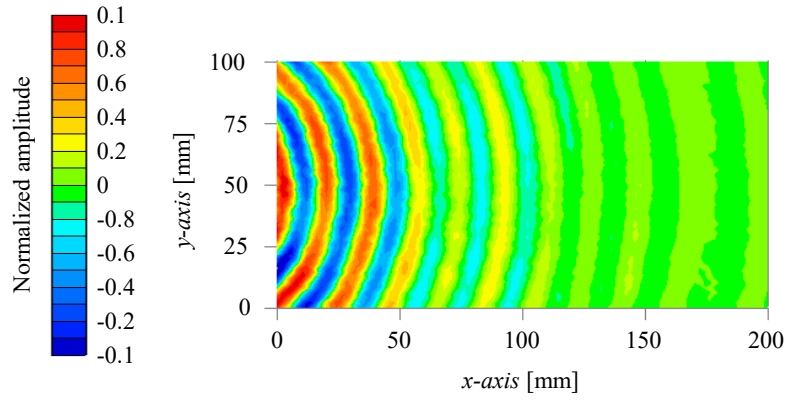


(b) 時刻 B : $t = 500 \mu\text{s}$

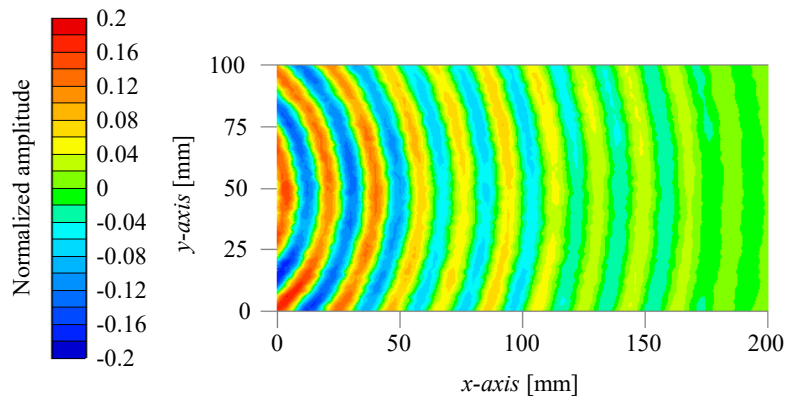


(c) 時刻 C : $t = 600 \mu\text{s}$

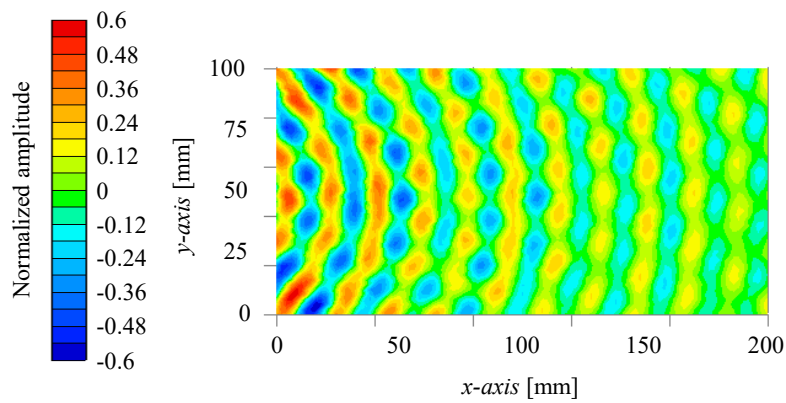
図6.8 欠陥のない金属板試料の Lamb 波伝搬像(基本波 : 40 kHz)



(a) 時刻 A : $t = 450 \mu\text{s}$

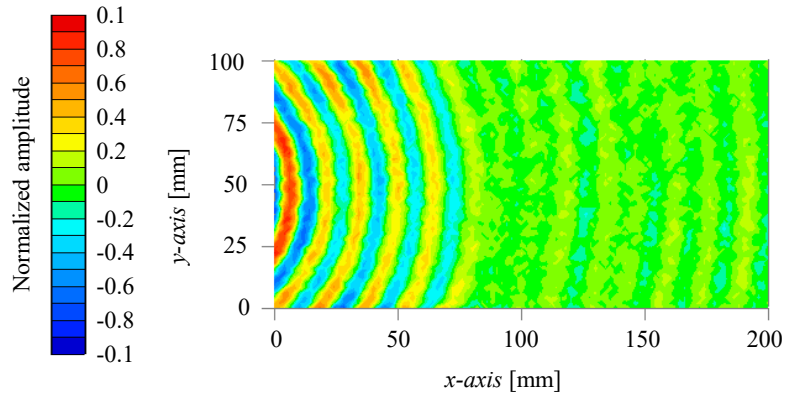


(b) 時刻 B : $t = 500 \mu\text{s}$

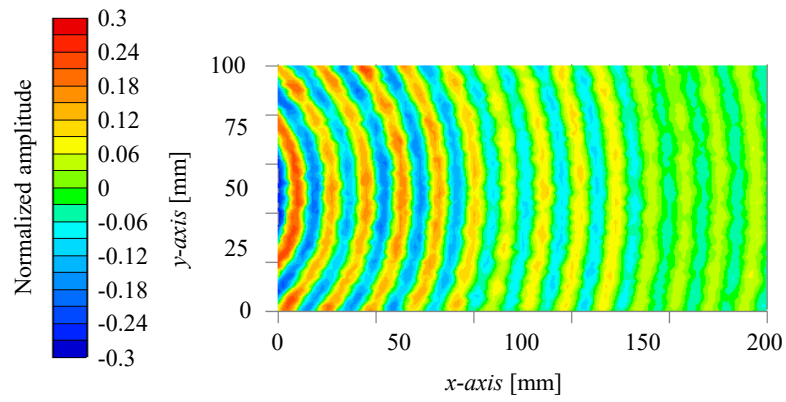


(c) 時刻 C : $t = 600 \mu\text{s}$

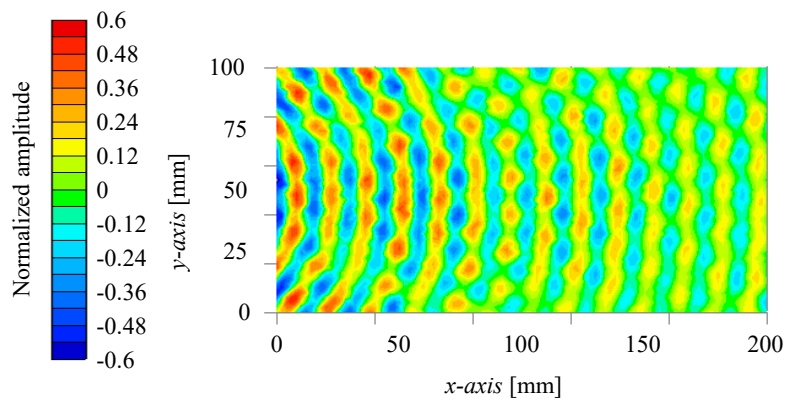
図6.9 欠陥のない金属板試料の Lamb 波伝搬像(第 2 次高調波 : 80 kHz)



(a) 時刻 A : $t = 450 \mu\text{s}$



(b) 時刻 B : $t = 525 \mu\text{s}$



(c) 時刻 C : $t = 600 \mu\text{s}$

図6.10 欠陥のない金属板試料の Lamb 波伝搬像(第3次高調波 : 120 kHz)

これらの結果より、点集束音波の照射により発生した Lamb 波が金属板試料中を球面状に伝搬している様子が明確に観測できている。ここで、図 6.8 において図(a)は Lamb 波が到来し始めた時刻帯、図(b)は AUPA の立ち上がり特性に対応した振幅の音波で励起した Lamb 波が伝搬する時間帯であり、球面波状の波面が明確に可視化できている。さらに図(c)は試料端部において生じた反射波が計測領域に到来する時刻帯であり、波面に乱れが生じている。この傾向は図 6.9、図 6.10 においても同様である。すなわち、欠陥の判別を行うには図 6.5～図 6.7 に示す A～B の時刻帯における Lamb 波伝搬特性について吟味すればよい。

また、図 6.8(b)の計測結果を基に、試料を伝搬する球面波の波源を推定した。図 6.11 はその結果であり、波源が Lamb 波振動計測用の AE センサの設置位置とほぼ一致している。このことは、本装置の AUPA により放射される点集束音波が、波源走査法に十分使用可能であることを示している。

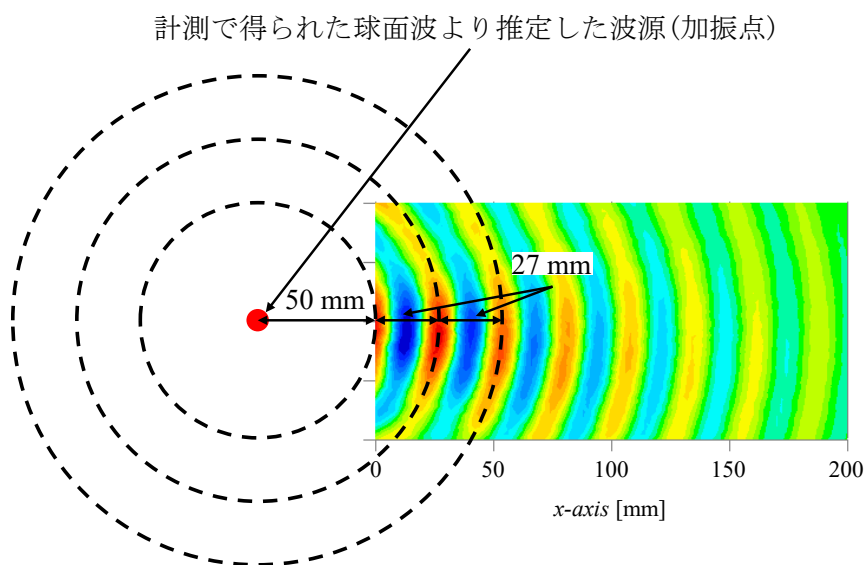
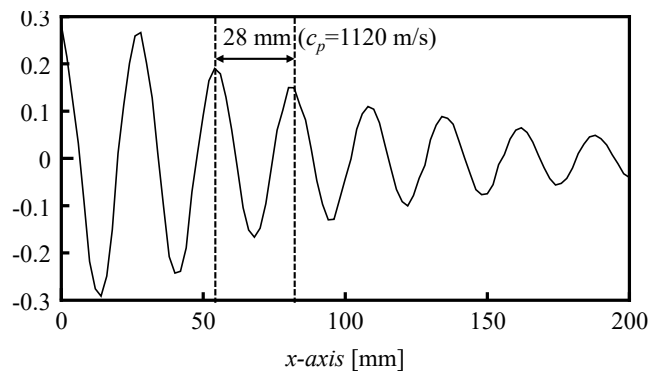


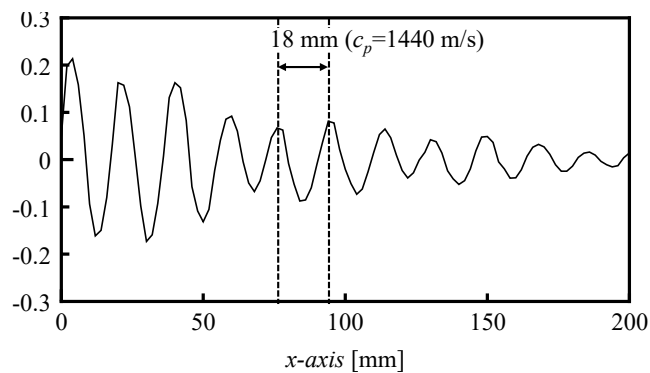
図6.11 図 6.8(b)の計測結果を基に推定した球面波の波源

また、図 6.12 は図 6.8(b)~6.10 (b)における $y = 50 \text{ mm}$ でのライン分布特性である。

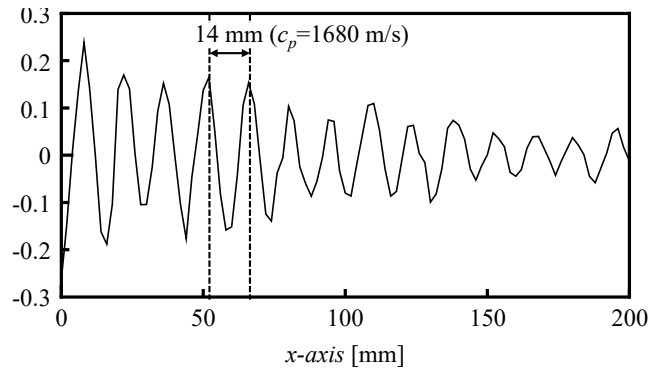
これらの計測結果より、求めた Lamb 波の波長と位相速度は、基本波では 28 mm 、 1120 m/s であり、式(2-3)より算出した数値解の値とほぼ一致している。また、各高調波での波長と位相速度は、第 2 次高調波では 18 mm 、 1440 m/s 、第 3 次高調波では 14 mm 、 1680 m/s となっており、いずれも数値解の値とほぼ一致している。



(a) 図 6.8 (b)の $y = 50 \text{ mm}$ におけるライン分布



(b) 図 6.9 (b)の $y = 50 \text{ mm}$ におけるライン分布

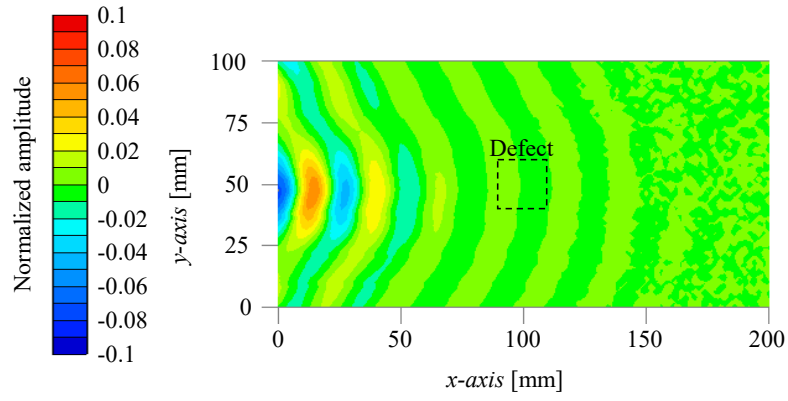


(c) 図 6.10 (b)の $y = 50 \text{ mm}$ におけるライン分布

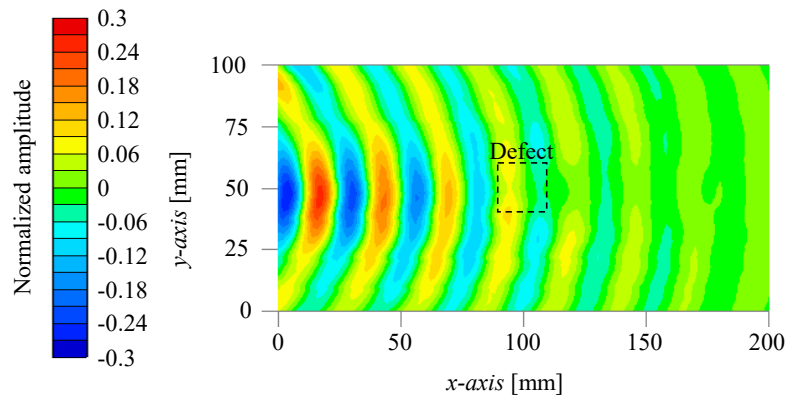
図6.12 金属板試料に発生する Lamb 波伝搬の振幅特性分布

6.3.2 金属板試料内の減肉欠陥の検出

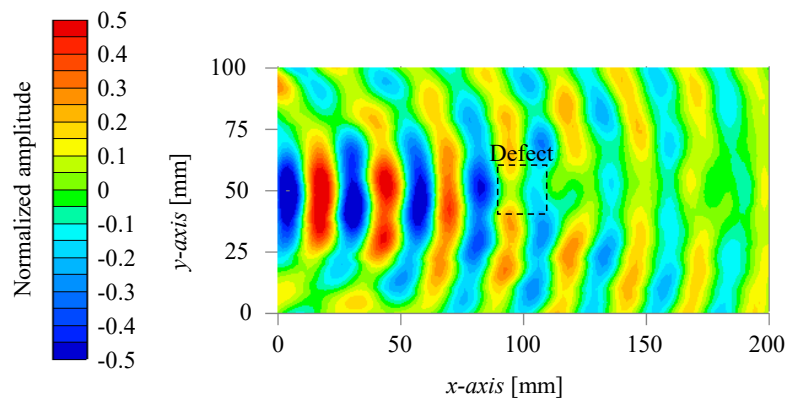
図 6.3 の装置を用いて、図 6.4 に示す減肉欠陥を設けた金属板試料に Lamb 波を発生させたときの波動伝搬を計測した。図 6.13~6.15 はその結果である。各図の(a)~(c)は前出の欠陥のない試料の結果と同時刻の結果を示している。いずれの結果も、上記と同様の方法により規格化したカラーマップで表示している。



(a) 時刻 A : $t = 400 \mu\text{s}$

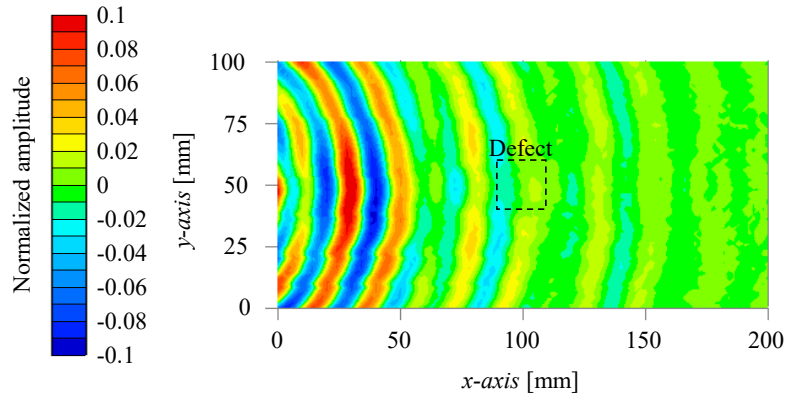


(b) 時刻 B : $t = 500 \mu\text{s}$

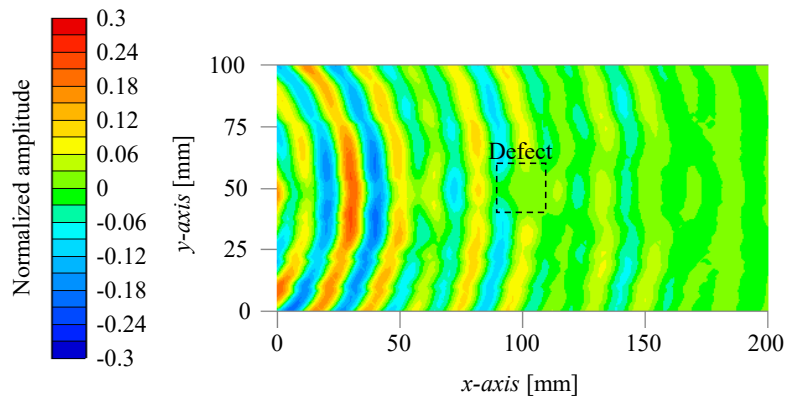


(c) 時刻 C : $t = 600 \mu\text{s}$

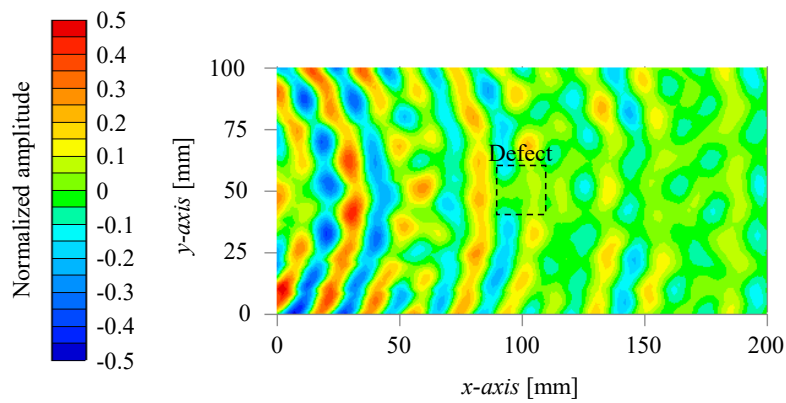
図6.13 減肉欠陥のある金属板試料の Lamb 波の伝搬像(基本波 : 40 kHz)



(a) 時刻 A : $t = 450 \mu\text{s}$

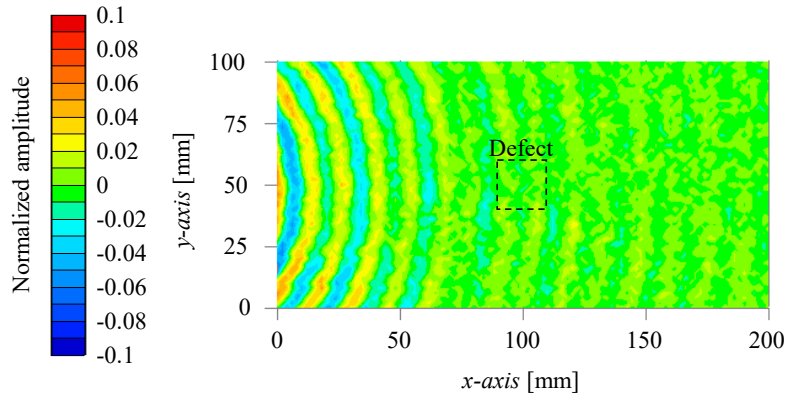


(b) 時刻 B : $t = 500 \mu\text{s}$

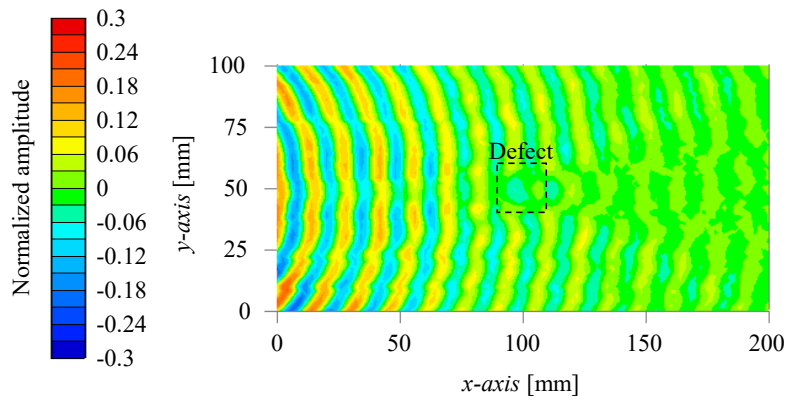


(c) 時刻 C : $t = 600 \mu\text{s}$

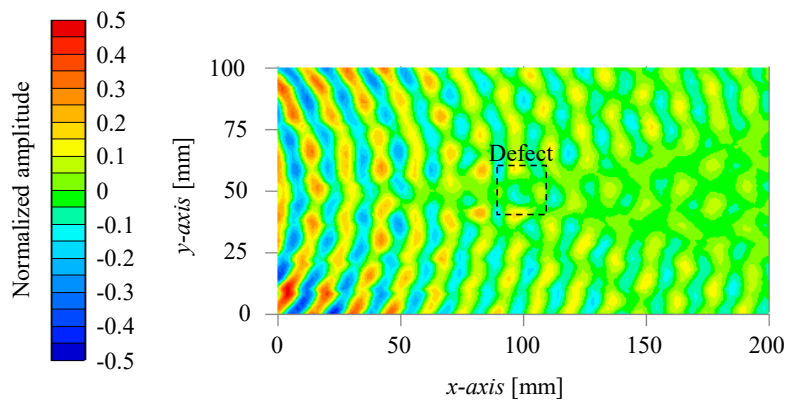
図6.14 減肉欠陥のある金属板試料の Lamb 波の伝搬像(第 2 次高調波 : 80 kHz)



(a) 時刻 A : $t = 450 \mu\text{s}$



(b) 時刻 B : $t = 525 \mu\text{s}$



(c) 時刻 C : $t = 600 \mu\text{s}$

図6.15 減肉欠陥のある金属板試料の Lamb 波の伝搬像(第3次高調波 : 120 kHz)

まず、図 6.13 に示す基本波成分(40 kHz)の結果を見ると、欠陥部の後方において Lamb 波の波面にやや乱れを生じているのが確認できる。これは欠陥部付近での回折の影響と考えられる。なお、欠陥部手前の領域での変化はあまり見られない。また、欠陥領域内では周りの健全部と比べて違いはほとんど見られない。これは Lamb 波の波長と欠陥部の寸法が同程度であることによる。

次に、第 2 次高調波成分の波動伝搬結果を見ると、基本波成分の結果よりも欠陥部後方の散乱が広い範囲で起きているのが分かる。また、欠陥部の手前の領域においても波面に乱れが生じており、欠陥部の位置がより容易に検出できている。しかし、図(c)では試料端部からの反射波の影響により、波面の連続性に乱れが生じ、多少見にくくなっている。

さらに、第 3 高調波成分の波動伝搬結果を見ると、基本波及び第 2 次高調波の結果よりもさらに欠陥部後方領域での散乱場を明確に特定できている。また、欠陥部手前においても波面の乱れが確認できる。しかも、欠陥部の端面付近で波面の振幅値がやや大きくなっているのも確認できる。これは Lamb 波が欠陥部に侵入するときその一部が反射することが原因と考えている。これらの現象を総合することで、欠陥部の検出及び欠陥のおおよその形状を推定できる可能性を示している。

また、検出可能な欠陥の寸法を波長程度とすると、基本波では 28 mm、第 2 次高調波では 178mm、第 3 次高調波では 14 mm 程度の寸法の欠陥を検出が見込めることになる。

6.4 本章のまとめ

本章をまとめると以下となる。

- (1) グレーティングローブの発生を抑制した空中超音波フェーズドアレイと波源走査法により、金属板に発生する Lamb 波 A0 モードの波動伝搬像を得るための計測システムを構築した。
- (2) 上記の計測システムにより金属板に発生させた球面波状の Lamb 波 A0 モードの波動伝搬特性より、本システムで用いた点集束超音波が波源走査法の基本原理である相反定理に適用できることを確認した。
- (3) 金属板に発生させた Lamb 波 A0 モードの波動伝搬情報を基に、減肉欠陥の検出が可能であることを明らかにした。
- (4) AUPA が発生する強力超音波の非線形性により生ずる高調波振動を利用することで、金属板中の欠陥をより鮮明に検出できることを明らかにした。

第 7 章 結言

第7章 結言

7.1 本研究で得られた成果

本論文で述べた主な研究成果は以下の通りである。

第2章では、空中超音波を利用した新たな非破壊検査手法ための概要として、金属等の固体媒質に空中超音波を照射した際の固体表面での音波の反射と透過について述べ、僅かではあるが音波が金属内に侵入できることを示した。

次に金属等の固体媒質内に侵入した超音波により発生する Rayleigh 波と Lamb 波の諸特性について示し、本研究で対象とする金属板では超音波励振により主に A0 モードの Lamb 波が発生することを述べた。

また、検査のための計測時間の長時間化を改善する一手法である波源走査法及びその基となる相反定理の概要を述べ、これを空中超音波で実現させるための要件を示した。

第3章では、強力な空中超音波を発生させる方法として、多数の小型空中超音波エミッタから放射される音波の位相を、任意の点において同位相の関係にすることで得られることを示した。またそのための方法として、本研究では各エミッタの駆動タイミングを調節する電子的制御により音波集束させる方式が有望であることを述べた。

また、本研究で用いる空中超音波フェーズドアレイによる音波の集束原理を示し、これに基づいた空中超音波フェーズドアレイデバイスの設計、作製及び駆動システムの構築につい

て述べた。

さらに、この空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性について検証し、音波集束点において最大約 4000 Pa の所望の強力点集束超音波の発生が可能であることを実験的に明らかにした。またアレイ面に対応する音波集束面では、音波の集束位置によって集束域の形状に違いが生じ、音圧値も多少異なることを確認した。

第 4 章では、空中超音波フェーズドアレイによる波源走査法を実現させるための装置を構築し、併せて検証のための疑似減肉欠陥を有する金属板試料を作製した。また、本計測手法による欠陥検出のための実験手順について詳細に述べた。

次いで、構築した計測システムにより金属板に発生させた超音波振動の基本特性について検討し、本システムへの波源走査法の適用が可能であることを明らかにした。また、欠陥ありの試料に対して欠陥検出を試み、計測領域での Lamb 波の振幅ピーク値分布を得ることで、欠陥の検出が可能であることを明らかにした。

なお、この計測では欠陥がない健全試料の振動情報を利用した背景差分処理が欠陥検出に極めて有効であることを示した。

第 5 章では、空中超音波フェーズドアレイによる音波集束時のグレーティングローブ (Grating Lobe : GL) の発生原理を基に、超音波エミッタの直径が音波長程度であれば GL を抑制できることを示した。また、この検討に基づき GL 抑制型の空中超音波フェーズドアレ

イの設計・作製を行った。

さらに、この空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性について検証を行い、音波集束点において最大約 5000 Pa の所望の強力点集束超音波が放射可能であることを明らかにした。また、従来型の空中超音波フェーズドアレイの音波放射特性と比べて、GL が十分抑制されていることを確認した。

第 6 章では、GL 抑制型の空中超音波フェーズドアレイと波源走査法により、金属板に発生する Lamb 波 A0 モードの波動伝搬像を得るための計測システムの構成、及び計測方法について述べた。

また、計測システムを用いて金属板に発生させた球面波状の Lamb 波 A0 モードの波動伝搬特性より、本システムで用いる点集束音波が波源走査法に適用可能であることを確認した。

さらに、上記方法により Lamb 波 A0 モードの波動伝搬情報を基に、減肉欠陥の検出が可能であることを明らかにした。また、強力集束超音波の非線形性により生ずる高調波振動を利用することで欠陥をより鮮明に検出できることを示した。

以上、本研究は金属板に生ずる減肉欠陥を検出するための新たな非破壊検査手法の提案であり、それを実現するための 3 つの研究目的に対する成果をまとめると、以下のようになる。

目的(1)の空中超音波フェーズアレイの作製と駆動システムの開発については、非破壊検査のための空中超音波フェーズドアレイの設計、作製及びその音波放射特性について検証し、非破壊検査に利用できる空中超音波フェーズドアレイを実現させた。また、空中超音波フェーズドアレイの音波集束点を高速走査するための駆動システムを構築した。

次に、目的(2)である非破壊検査用計測システムの構築と振動分布特性を利用した金属板内の減肉欠陥の検出については、作製した空中超音波フェーズドアレイと、波源走査法を行うための駆動システムを搭載した非破壊検査計測システムを用いて、金属板内の減肉欠陥を高速で可視化することを試みた。音波照射により金属板に発生する振動の振幅ピーク値分布を利用することで、欠陥を検出できることを明らかにした。

さらに目的(3)の空中超音波フェーズドアレイの改良と超音波伝搬像を利用した金属板内の減肉欠陥の検出については、グレーティングローブが出現しにくいフェーズドアレイの改良とリニアスキャン方式の波源走査法を用いた検査手法を提案した。これにより、金属板内での超音波波動伝搬を可視化させ、減肉欠陥付近での超音波の回折や反射等の挙動を基に欠陥を検出できることを明らかにした。

7.2 今後の課題

以下に、本研究における今後の課題を述べる。

(1) リニアスキャン方式により波源走査が可能な空中超音波フェーズドアレイを構築し、Lamb 波 A0 モードの伝搬特性を利用した高速計測が可能な非破壊検査の実現を目指す。

(2) 本研究で提案する計測手法は、減肉欠陥の検出に加えて物体内部の深さ方向についてもその同定が可能になると考えている。

今後、種々の事象に対して本計測システムによるセンシングを試みるとともに、他のセンシング技術と併用した新たな非破壊検査手法の開発を目指したい。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切ご指導を賜りました日本大学大学院理工学研究科電気工学専攻篠田之孝教授に深甚なる謝意を示します。

本論文をまとめるにあたり、ご指導いただいた日本大学 伊藤洋一名誉教授、日本大学大学院理工学研究科電気工学専攻大隅歩准教授、日本大学大学院理工学研究科機械工学専攻河府賢治教授に謹んで謝意を表します。

また、日頃から御指導御鞭撻頂いている電気工学科の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたり惜しめない協力を頂いた音環境・超音波エレクトロニクス研究室の卒業生ならびに研究生の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 星川 洋, 非破壊検査技術の紹介, 電気学会誌, 124(2), 2004 年, pp. 106-109.
- [2] 横野 泰和, 非破壊検査の種類と特徴, 溶接学会誌, 59(6), 1990 年, pp. 410-413.
- [3] 中山 淑, 超音波断層法, 応用物理, 49(7), 1980, pp. 721-728.
- [4] 林 高弘, レーザ弾性波源走査法による損傷画像化技術, 日本音響学会, 77(6), 2021 年, pp. 374-381.
- [5] 高坪 純治, 励起用パルスレーザー走査法による三次元物体 表面を伝わる超音波の可視化, 非破壊検査 57 (4), 2008 年, pp. 162-168.
- [6] 荻 博次, 平尾 雅彦, 福岡 秀和, 電磁超音波共鳴法による金属薄板の音弾性応力測定, 日本機械学会論文集 A 編, 60(569), 1994 年, pp. 250-257.
- [7] 小島 史男, 電磁超音波を用いた探傷の基礎と最新動向, 計測と制御, 56(11), 2017 年, pp. 839-844.
- [8] 川嶋 紘一郎, 空気伝搬超音波による非破壊材料評価と検査, 非破壊検査, 58(7), 2009 年, pp. 250-255.
- [9] D. E. Chimenti, Review of air-coupled ultrasonic materials characterization, Ultrasonics, 54(7), 2014, pp. 1804-1816.
- [10] Ayumu Osumi, Kenta Yamada, Yusuke Asada and Youichi Ito, Harmonic imaging of a defect in a flat plate using a guided wave generated by a high-intensity aerial ultrasonic wave, Jpn. J. Appl. Phys., 58 SGGB14, 2019.

- [11]山田 健太, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 強力空中超音波スキャン照射による金属薄板中の高調波ガイド波伝搬, 信学技報, 119(45), 2019, pp. 7-11.
- [12]浅田 裕介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 強力空中超音波波源走査法による欠陥の可視化精度に関する検討, 信学技報, 118(409), 2019, pp. 25-29.
- [13]大隅 歩, 浅田 裕介, 伊藤 洋一, 強力空中超音波を用いた波源走査法による固体材料の欠陥検出, 信学技報, 118(353), 2018, pp. 1-4.
- [14]Takayuki Hoshi , Yoichi Ochiai and Jun Rekimoto , Three-Dimensional Noncontact Manipulation by Opposite Ultrasonic Phased Arrays, Jpn. J. Appl. Phys. , 53 07KE07, 2014.
- [15]Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, IEEE Transactions on Haptics, 3(3), 2010, pp. 155-165.
- [16]三原 毅, 超音波フェーズドアレイ技術と工業応用, 材料, 69(8), 2020, pp. 569-574.
- [17]山本 克之, 工藤 信樹, 医用超音波計測, 精密工学会誌, 62(11), 1996, pp. 1541-1544.
- [18]川村 雅恭, 電気音響工学概論, 昭晃堂, 1971, p. 17.
- [19]実吉 純一, 菊池 喜充, 能本 乙彦, 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 1966, p. 1166.
- [20]義岡 秀晃, 堀川 悠介, 白川 博樹, 飯田 祐也, 八賀 正司, 音響ホーン素材の音速測定, 富山商船高等専門学校研究集録第 41 号, 2008, pp. 37-41.
- [21]中畑 和之, ガイド波理論のいろは 一分散関係と伝搬モード一, 音響学会誌, 76(12),

2020, pp. 712-719.

[22] Lord Rayleigh, D. C. L., F. R. S, On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid, Proceedings of the London Mathematical Society, s1-17(1), 1885, pp. 4-11.

[23] Lamb H., On Waves in an Elastic Plate, Proc. Roy. Soc. London, A 93, 1917, pp. 114-128.

[24] 福山 美咲, 林 高弘, レーザ弾性波源走査法によるリモート損傷画像化システムの開発, 鉄と鋼, 101(7), 2015, pp. 351-357.

[25] 林 高弘, 薄板構造中のガイド波とその拡散場を利用した損傷画像化技術, 材料, 69(8), 2020, pp. 593-598.

[26] 王 波, 高坪 純治, 劉 小軍, 鈴木 修一, 世界初非破壊検査装置開発へのチャレンジ — レーザー超音波と冷陰極 X 線源による検査装置の開発 —, Synthesiology, 108(2), 2017, pp. 75-86.

[27] 齊藤 典生, 高坪 純治, 王 波, 劉 小軍, 鈴木 修一, レーザー励起超音波の可視化による欠陥の映像化方法=レーザー超音波可視化検査装置 LUVI=, 超音波 TECHNO 2018年5-6月号 Vol. 30 No. 3.

[28] 高坪 純治, レーザー超音波可視化探傷技術の開発 動画映像による分かり易い探傷法の開発を目指して, 検査技術 2010年01月号.

[29] 齊藤 典生, 高坪 純治, 王 波, 劉 小軍, 鈴木 修一, レーザー超音波可視化検査装置の開発=超音波を可視化して検査=, 超音波 TECHNO 2017年7-8月号 Vol. 29 No. 4.

- [30]林 高弘, 高繰り返しファイバレーザを用いたバースト波励起の数値実験, 超音波 TECHNO 2015 年 1-2 月号.
- [31]鈴木 英男, 音響学における相反定理とその応用, 58(4), 2002, pp. 239-243.
- [32]Kyosuke Shimizu, Ayumu Osumi and Youichi Ito, High-speed imaging of defects in thin plate by scanning elastic wave source technique using an airborne ultrasound phased array, Jpn. J. Appl. Phys., 59, SKKD15-1-SKKD15-12, 2022.
- [33]Kyosuke Shimizu, Ayumu Osumi, and Youichi Ito, Generation of High-Intensity Pulsed Ultrasound by Airborne Ultrasound Phased Array, Proc.. 40th Symp. UltraSonic Electronics. 1P4-9, 2019.
- [34]大隅 歩, 清水 鏡介, 伊藤 洋一, 非接触非破壊検査のための強力空中超音波フェイズドアレイの音波放射特性, 信学技報, 119(332), 2019, pp. 11-14.
- [35]大隅 歩, 清水 鏡介, 山田 健太, 伊藤 洋一, 強力空中超音波フェイズドアレイの音波照射特性, 日本音響学会 2020 年春季研究発表会講演論文集, 2-6-4, 2020.
- [36]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 空中超音波フェイズドアレイによる固体材料内欠陥のイメージング, 信学技報, 119(374), 2019, pp. 99-102.
- [37]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 空中超音波フェーズドアレイを利用した弾性波源走査法の基礎検討, 第 27 回 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 3-1, 2020.
- [38]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 非接触フェーズドアレイによる材料の評価, 日本音

響学会 2020 年春季研究発表会講演論文集, 2-7-8, 2020.

[39]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 空中超音波フェーズドアレイと複数受信器を利用した金属薄板中の欠陥イメージング, 日本音響学会 2020 年秋季研究発表会講演論文集, 3-7-14,, 2020.

[40]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 空中超音波フェーズドアレイと複数受信器による固体内欠陥の検出, 非破壊検査協会 2020 年度 秋季講演大会講演論文集, 2020, pp. 11-12.

[41]大隅 歩, 清水 鏡介, 伊藤 洋一, 非破壊検査のための空中超音波フェーズドアレイによる波源走査法, 超音波 TECHNO 2022 年 1-2 月号.

[42]Kyosuke Shimizu, Ayumu Osumi and Youichi Ito, Non-destructive testing of metal plates by guided wave propagation image using scanning sound source technique and airborne ultrasound phased array with suppressed grating lobe generation, *Acoust. Sci. & Tech.* 44(6), 2023, pp. 431-441.

[43]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 空中超音波フェーズドアレイにおける超音波エミッタ径とグレーティングローブの抑制の検討, 信学技報, 120(377), 2020, pp.10-13, 2021.

[44]Shi-Chang Wooh, Yijun Shi, Optimum beam steering of linear phased arrays, *Wave Motion*, 29(3), 1999, pp. 245-265.

[45]斎藤 繁実, 集束超音波の非線形第 2 高調波, *BME*, 13(4), 1999, pp. 3-7.

[46]斎藤 繁実, 集束音場の作り方とその性質, 日本音響学会誌, 57 (8), 2001, pp. 523-528.

- [47]鎌倉 友男, 空中超音波の波動としての側面, 日本音響学会誌, 76(5), 2022, pp. 279-284.
- [48]鎌倉 友男, 超音波における非線形現象, 日本流体力学会誌「ながれ」, 16 , (3), 1997, pp. 226-231.
- [49]伊藤 洋一, 強力空中超音波の発生方法とその応用技術, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, 9(3), 2016, pp. 205-213.
- [50]Youichi Ito, High-intensity aerial ultrasonic source with a stripe-mode vibrating plate for improving convergence capability, Acoustical Science and Technology, 36(3), 2015, pp. 216-224.
- [51]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 空中超音波フェーズドアレイ弾性波源走査法を用いたガイド波伝搬による金属薄板内欠陥の可視化, 日本音響学会 2021 年秋季研究発表会講演論文集, 1-7-8, 2021.
- [52]清水 鏡介, 大隅 歩, 伊藤 洋一, 空中超音波フェーズドアレイによる弾性波源走査法を用いたガイド波伝搬による金属薄板内減肉の検出, 非破壊検査協会 2021 年度秋季講演大会講演論文集, 2021, pp. 101-102.