

平成 15 年度建設技術研究開発費補助金研究報告書
(研究技術開発の内容と成果)

鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発

東京工業大学情報理工学研究科
教授 廣瀬壮一

平成 16 年 7 月 16 日

研究課題

鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発

研究期間

平成 15 年度

研究組織

研究代表者： 廣瀬 壮一 (東京工業大学大学院情報理工学研究科・教授)
分担研究者： 三木 千壽 (東京工業大学大学院理工学研究科・教授)
岸本 喜久雄 (東京工業大学大学院理工学研究科・教授)
井上 裕嗣 (東京工業大学大学院理工学研究科・助教授)
佐々木 栄一 (東京工業大学大学院理工学研究科・助手)
木本 和志 (東京工業大学大学院情報理工学研究科・助手)
和高 修三 (三菱電機(株)情報技術総合研究所・統轄)

交付金額

27750 千円

目次

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 第1章 | はじめに | 3 |
| 1.1 | 研究の背景と目的 | 3 |
| 1.2 | 本報告書の構成と研究内容 | 6 |
| 第2章 | 超音波要素技術の高精度化に関する研究 | 9 |
| 2.1 | ビームステアリングおよびビームフォーカシングの原理 | 9 |
| 2.2 | 開口合成法の原理 | 13 |
| 2.3 | ビームフォーカシングと開口合成法の関係 | 14 |
| 2.4 | アレイ探触子の設計変数が入射波動場に与える影響 | 15 |
| 2.4.1 | リニアアレイ探触子によるビームステアリングの数値シミュレーション | 15 |
| 2.4.2 | 設計パラメータの最適化 | 18 |
| 2.4.3 | 最適設計パラメータの決定方法 | 24 |
| 2.4.4 | 入射角度の制御方法について | 27 |
| 2.5 | シミュレーション波形を用いた開口合成法による欠陥形状再構成 | 28 |
| 2.5.1 | 問題設定と基礎式 | 28 |
| 2.5.2 | シミュレーション波形を用いた開口合成 | 31 |
| 2.6 | 逆散乱解析 | 45 |
| 第3章 | 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発 | 51 |
| 3.1 | はじめに | 51 |
| 3.2 | アレイ探傷システムの構成 | 51 |
| 3.2.1 | アレイ探傷器 | 51 |
| 3.2.2 | アレイ探触子 | 53 |
| 3.2.3 | XY軸スキャナ | 53 |
| 3.3 | 人工きず試験体を用いた基礎実験 | 53 |
| 3.3.1 | 人工きず試験体 | 53 |
| 3.3.2 | 計測条件 | 53 |
| 3.3.3 | 実験結果 | 59 |
| 3.3.4 | リニアアレイとマトリクスアレイの比較 | 72 |
| 3.4 | 垂直探傷と斜角探傷 | 76 |
| 3.5 | アレイ探傷データの高速度処理 | 78 |
| 3.5.1 | 開口角の考え方を利用した開口合成法の高速度化 | 80 |
| 3.5.2 | 高速データ処理法による開口合成結果 | 80 |
| 第4章 | 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発 | 90 |
| 4.1 | 超音波探傷回送試験結果 | 90 |
| 4.1.1 | 回送試験の概要 | 90 |

| | | |
|------------|------------------------------------|------------|
| 4.1.2 | 試験体および探傷面 | 90 |
| 4.1.3 | 実験結果 (開口合成結果) | 95 |
| 4.2 | 鋼製橋脚隅角部モデル試験体を用いたアレイ探傷試験 | 101 |
| 4.2.1 | 実験概要 | 101 |
| 4.2.2 | 実験結果 | 101 |
| 第5章 | まとめと今後の課題 | 108 |
| 5.1 | まとめ | 108 |
| 5.2 | 今後の課題 | 109 |

第1章 はじめに

1.1 研究の背景と目的

鋼構造物の溶接継手部には各種の欠陥が発生する可能性がある。溶接欠陥は、応力集中源となり、その大きさによっては疲労き裂の起点となり、溶接継手部の疲労強度低下をもたらす恐れがある。従って、溶接継手部の品質管理の面では、どのような形状の、また、どの程度の大きさの溶接欠陥が含まれているかを非破壊的に検知することが重要となる。

非破壊検査は、鋼構造物の維持管理上極めて重要となっている。特に、近年、都市内高架橋に多く用いられている鋼製橋脚の隅角部において、多数の疲労き裂が発見され、火急の対策が求められている。その後の原因調査から、その支配的な発生要因として、複雑な板組みによる固有の溶接欠陥の存在が指摘され、板組みの違いによって、溶接欠陥や未溶着部の存在位置・方向・大きさなどが異なり、それに起因して疲労き裂の発生位置や方向などの特徴に影響を与えていると考えられている。このような疲労き裂は放置しておく、脆性破壊に移行し、高架橋システムの崩壊など壊滅的な被害につながる恐れがあるため、迅速で効果的な補修・補強対策を講じる必要がある。その際に、疲労き裂の原因となっている溶接欠陥の位置、大きさなど部材内部の情報を非破壊的に取得することが最重要課題となる。また、維持管理上溶接欠陥から疲労き裂が発生しているかどうかを判別することも重要な課題である。

従来から、鋼溶接部の内部欠陥を検出して評価する主要な非破壊検査試験法として、放射線透過試験や超音波探傷試験が用いられてきた。しかしながら、放射線透過試験は試験実施者に対する安全性や検査結果の表示に時間がかかるなどの問題点がある。一方、超音波探傷試験は、試験実施者の健康上、安全であるほか、即時に結果表示をすることが可能で、欠陥が検知された際に即座に対処できる可能性があるなど、効率がよいという利点がある。そのため、溶接欠陥や疲労き裂の検知を対象とした各種の非破壊検査法には、超音波探傷試験が多く用いられるようになってきた。

しかしながら、現状では、超音波探傷試験の精度は十分とはいえない。例えば、通常用いられている一探触子法や二探触子法では、三次元形状を有する欠陥や角度をもって存在する面状欠陥から発生する散乱波を捉えることができず、そのような特徴をもつ欠陥の検知、もしくは、位置や形状などを表現する画像化を行うことは困難である。また、実構造物においては、検査スペースが狭隘であったり、部材の配置の影響で欠陥の存在が想定される位置に対して的確に超音波を發し散乱エコーを取得することが困難であったりと、必ずしも理想的な環境で検査が行えない可能性が高い。そのため、確実に散乱エコーを取得できるような探触子、探傷システムを構築するとともに、適用性の検証を行った上で、その探傷結果を効率よく画像化することが不可欠である。

本研究では、内部欠陥や任意の角度で存在する面状欠陥の位置やサイズ等の欠陥情報を精度良く検知することを目的とした新しい探触子、およびそれを利用した探傷システムを開発することを大きな目的としている。特に、取得したエコーから三次元的な欠陥の情報を精度良く検知するための探傷結果表示方法として、高精度な開口合成法に基づく欠陥像

の再構成を可能にする、アレイ探傷システムを開発するための検討を重点的に実施する。

本研究は、医療分野で盛んに用いられ、これまでに大きな成果が得られているアレイ探傷技術を鋼橋の超音波診断に適用するものである。医療分野でのアレイ超音波診断技術の歴史は古く、1970年代から現在に至るまで活発な研究が続けられ多くの成果が得られている。一方、土木構造物への適用についてはその歴史は浅く、適用事例もあまり多くない。これは、アレイ探傷に必要な装置一式がかなり高価なものであることも理由の一つであるが、検査対象が土木構造物であることに起因して発生する問題点が種々あることも理解する必要がある。

土木構造物と医療におけるアレイ超音波診断には、次の三点において状況が異なる。一つには、医療分野での検査対象が超音波伝播の点からは液体（水）とみなせる場合が多いのに対し、土木構造物は固体として扱う必要がある。そのため、媒質中を伝播する超音波とは前者のが音響波であり、後者は弾性波となる。弾性波はP波やS波など複数のモードが混在して伝播し、音響波に比べて特に媒質界面や境界面での挙動が複雑である。従って、土木構造物における超音波探傷では、弾性波と音響波の伝播挙動の差異を念頭において、音響波に対して得られている知見を利用する必要がある。二点目は、検査対象物のサイズである。人体の超音波診断が数十 cm 程度の領域を対象とするのに対し、土木構造物では数メートル以上の範囲が検査対象となることも珍しくない。そのため、センサーや装置の移動や設置を含めた検査効率が実用上重要な問題となってくる。三点目は、検査対象へのアクセスの問題である。土木構造物では、検査領域に対してセンサーの設置できる範囲は非常に限られている。たとえば板組み部材からなる橋脚一つを取り上げても、超音波計測が可能なのは各板部材の特定の面からのみとなることは想像に難くない。また、溶接部のように複雑に変化する曲率をもつ表面形状をしている部位では、センサーを検査領域の直上に設置することができず、斜め方向からの探傷のみが可能である。これらの点でも、必要であれば検査対象を移動させ、任意方向からの計測が可能な医療における超音波診断とは異なっており、土木構造物における超音波探傷を巡る環境は非常に厳しいと言える。

以上の点を考えれば、土木構造物へのアレイ探傷技術の適用にあたっては、医療診断との類似点は多々あるものの、医療用診断システムを単に流用すればよいというものではなく、上記の相違点を踏まえた探傷システムを構築する必要があることは明らかである。ここでいう“探傷システム”とは、アレイ超音波計測とその結果処理を行い検査対象の損傷同定を行うための一連のハードおよびソフトウェア構成のことをさすが、さらに議論を進めるにあたってその内容をはっきりとさせておく必要がある。図 1.1 には、超音波アレイ探傷システムの一例を示した図である。この図に示すように、アレイ探傷システムは、複数の素子をもつアレイ探触子と呼ばれる超音波センサー、超音波の多チャンネル同時送受信並びにデータの記録を行うアレイ探傷器、計測したデータの処理ならびに画像化を行うワークステーションあるいはパーソナルコンピュータ、アレイ探触子の位置決めと移動を行うメカニカルスキャナからなる。これらのアレイ探傷システムの各要素の詳細は以下のようなものである。

アレイ探触子 アレイ探触子には、各素子を一列に並べたリニアアレイ探触子や、同一平面内に二次元マトリクス状に素子を配置したマトリクスアレイ探触子、さらに径の異なるリング型の素子を同心円状に並べた annular アレイ探触子などがある。リニアアレイ探触子を用いた場合には、探触子中心軸を含む被検査材の断面画像が、マトリクスアレイでは探触子直下を含む三次元的な領域の像構成が可能となる。一方、annular アレイ探触子では、入射超音波ビームを探触子中心軸上の点に深さを変えて効率よくフォーカスさせること

ができるなどの特徴がある。

アレイ探傷器 アレイ探傷器には、ここ数年製品として市販されるものも増えているが、その仕様は様々である。ただし、それらに共通する機能は、数十から数百の多チャンネルで電子的な制御によって行う超音波送受信機能である。送受信素子の切り替えやデータの記録を電子的な操作で行うために瞬時に大量のデータが得られる点がアレイ探傷器の大きな特徴の一つで、これにより計測精度、検査効率ともに飛躍的に向上させることができる。さらに、アレイ探傷器の中には、送信回路に設けた遅延回路によって、時間差をつけて各素子を駆動することで試験体中に様々な入射ビームを合成することができるものもある。このような探傷器はフェーズドアレイ探傷器と呼ばれる。フェーズドアレイ探傷器を用いれば、ある方向へ強い指向性を持つ入射ビームを合成することや、着目点に各素子からの入射波が同時に到達するように遅延時間を調整することで、入射ビームをフォーカスさせることもできる。さらに、フェーズドアレイ探傷器では、複数の素子で得られた受信信号も同様に種々の遅延時間を設けて一つの波形に合成することができる。これらの機能を用いれば、単一の素子で観測される欠陥エコーが微弱なものである場合にも、複数の信号を合成することで観測波形の S/N 比を高め、欠陥の検出性能を向上させることができる。

データ処理および画像化装置 アレイ探傷器によって取得したデータ量は膨大なものであるため、検査者が一つ一つの波形を確認し詳細に解析していくことは実質不可能である。従って、計測結果はなんらかの形で画像化処理してわかり易く表示する必要がある。超音波波形を画像化する方法には種々あるが、アレイ探傷装置において一般的に用いられる方法は開口合成法である。後述するように開口合成法は観測波形の重ね合わせにより像構成を行うシンプルな手法である。そのため、一般的な市販アレイ探傷装置では、超音波の送受信を行うパルサー/レシーバ部に加えてデータ処理装置、画像表示装置が一体となった、ほぼリアルタイムな画像表示が可能な構成となっている場合が多い。ところで、多くの超音波探傷試験では、一次データである A スコープ波形でなくそれを画像化した結果のみが残されていれば十分である。そこで、アレイ探傷器の中には A スコープ波形を記録しないことで高速化が図られているものもある。しかしながら、例えば試験終了後により詳細な解析を行いたい場合、標準的な開口合成法を改良したい場合、超音波トモグラフィーなど開口合成法以外の手法による画像化が必要な場合などには A スコープデータが保存されている必要がある。これら大量の A スコープ波形は、計測時には探傷器上に記録されるとしても、その保存や管理、さらにはより柔軟なデータ処理や結果の表示を行うためには、必要に応じてデータを外部の PC あるいはワークステーションに転送できなければならない。アレイ探傷器の多くは、そのようなデータ転送機能を備えており、計測後の処理を外部の PC あるいはワークステーションによっても行うことができる構成になっている。

スキャナ 医療診断用アレイ探傷装置では、一度の計測で必要な全データを取得できるようになっている。一方、土木構造物の超音波探傷試験においては、対象が大きく一回の計測で全検査領域をカバーすることは不可能である。従って計測は、探触子位置を機械的に移動させ複数回行わなければならない。アレイ探傷試験の場合もその例外ではない。アレイセンサーを用いた場合には、各測定点で得られたアレイデータから一つの画像を構成することができる。探触子位置を変えて測定を行えば、各測定点位置で同様に像構成することができる。それらを統合して、検査対象領域全体を網羅した画像を構成するためには、探触子の正確なポジショニングが重要となる。そのためには、探触子の移動を手動あるいは

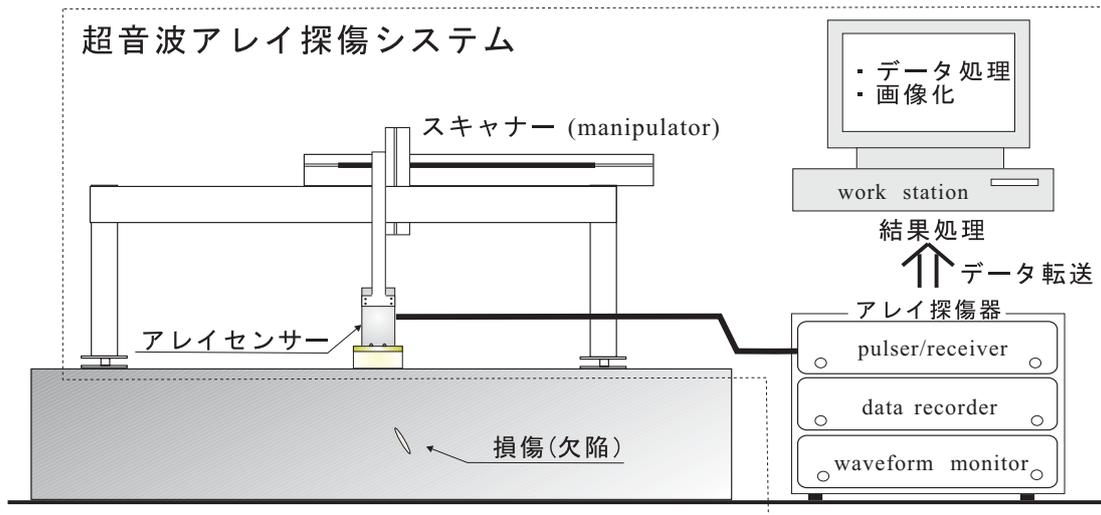


図 1.1: 超音波アレイ探傷システムの一例

は自動スキャナによって精度よく行う必要がある。土木構造物への適用を念頭に置いた場合、特に実用化を考える際にはメカニカルスキャナもアレイ探傷システムの一部として考慮される必要がある。

以上のような4つの要素からなるアレイ探傷システムを構築するには、使用するセンサーのタイプ、データの収集および保存の方法、計測結果の画像化処理と結果の表示手法、探触子によるスキャンニング方法を目的に応じて決定する必要がある。特に、アレイセンサーと探傷器は取得しうるデータの質を決定するため、その選定には事前に十分な検討が必要である。一般に、アレイ探傷システムでは、システムを変更することなく探傷条件や画像化方法等の設定変更のみによって非常に多様な超音波検査を実現することができる。その反面、特定の目的にアレイ探傷システムを最適な条件で適用するには、多くのパラメータについて検討する必要がある。これは、対象構造物における探傷試験を実施するに先立ち、キャリブレーション実験等の基礎実験を行い、探傷条件の最適化を図る必要があることを意味している。これらの点を踏まえ、探傷システムの構成を決定するために必要な知見を得るべく、はじめに数値シミュレーションおよび理論解析を用いた検討を行う。特に、アレイ探触子による入射波動場の制御と、アレイ計測データを使った画像化の観点からシステムが備えるべき条件について検討を行う。そこで得られた知見をもとにシステム構成を決定し、次にその基本性能や適用性を基礎実験を行うことで確認する。最後に、より現実的なモデル試験体に対して同システムによる探傷を行い、実橋への適用性に関する検討を行う。

1.2 本報告書の構成と研究内容

ここでは本報告書の構成について述べる。本研究の内容は当初の計画に従って、次の三つの大きなカテゴリーに分けられる。

1. 超音波要素技術の高精度化に関する研究
2. 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発

表 1.1: 研究内容一覧

| | |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) 超音波要素技術の高精度化に関する研究 | <ul style="list-style-type: none"> ・超音波ビームステアリングの数値シミュレーション ・SH波のアレイ探傷試験の数値シミュレーションと開口合成による欠陥形状の再構成 ・数値シミュレーション結果より得られた知見に基づいたアレイ探触子の選定方針の提案 |
| (2) 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・人口傷試験体を用いたアレイ超音波探傷基礎実験 ・実験データを用いた開口合成によるアレイデータの可視化 ・開口角の考え方を援用したデータ高速処理方法の検討 |
| (3) 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・鋼製橋脚隅角部モデル試験体を用いたアレイ探傷法による溶接部分の検出と画像化 |

3. 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発

各カテゴリー内の細項目は表 1.1 に示すとおりである。本節では、各カテゴリーの研究内容を概観し、次章以降の研究成果報告への導入とする。

(1) 超音波要素技術の高精度化に関する研究 ここでは、アレイ探傷システムの構成を決定するにあたって必要な事前検討を理論および数値解析的に行ったものである。特に使用するアレイ探触子と入射波動場の関係や、欠陥像のイメージング手法として用いる開口合成法の形状再構成能と各種探傷条件の関係について明らかにしている。その結果、欠陥像のイメージングの観点から、どのように探触子を選ぶべきかについて合理的な方針を与えることができる。

(2) 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発 ここでは、寸法、形状が既知の人工きずを設けたサンプルを用いてアレイ探傷実験を行い、開口合成法によって欠陥形状の再構成を行う。また、その結果を検討することで実験条件や結果処理方法と欠陥形状再構成能との関係を明らかにする。また、アレイ探傷によって得られる膨大なデータをそのまま利用するイメージング手法は、データ処理におけるコンピュータ負荷が大きく、長い計算時間を必要とする。検査効率は、土木構造物の非破壊検査においては重要なファクターであるため、結果処理のスピードアップも必要である。これに対して本研究では全計測波形のうち一部だけを使って開口合成を行うことによりデータ処理の高速化を図る。ここでは、用いるべき波形データを選定するための合理的な方法を提示する。

(3) 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発 ここでは、(1)、(2)を通じて構築したアレイ探傷システムを角柱 WW タイプの鋼製橋脚隅角部モデルである回送試験小型試験体と疲労試験体における探傷試験に適用している。アレイ探傷試験には、リニアアレイおよびマトリクスアレイを用い、試験体内部に残された溶接部未溶着部分の検出と

評価を行う。角柱 WW タイプは実橋において最も損傷事例の多い板組みであり、その損傷同定のための超音波探傷システムを確立することは緊急を要する課題である。今回、用いたモデル試験体は実際に溶接を行い作成したものであり、内在する欠陥は実橋における損傷に近い状態になっていると考えられる。従って、ここで得られた結果は実橋へのアレイ探傷システムの適用性について現実的な検討を行うために有用なものと考えられる。

以下では、これらの三項目の具体的な研究内容と成果について順に述べ、最後に一連の研究を通して得られた結論をまとめ、今後の課題とともに示す。

第2章 超音波要素技術の高精度化に関する研究

フェーズドアレイ超音波探傷装置を用いれば、入射ビームを様々な方向へ制御するビームステアリングや、狙った点へ集束させるビームフォーカシングを探触子の電子制御によって行うことができる。また、得られたアレイ探傷データに開口合成法などの画像化手法を適用することで、欠陥形状の再構成を行うことも可能である。ただし、これらの技術がどの程度機能するかは、使用するアレイ探触子の性能に大きく左右される。従って、どのような探触子を用いるかの決定は非常に重要であり、合理的な選定基準を確立することが求められるところである。しかしながら、アレイ探傷法の使用目的が多様であることもあってか、これに対するはっきりとした答えは今のところ得られていない。そこで、本研究ではアレイ探傷システムの構築に先立ち、どのような観点から使用するアレイセンサーを決定すべきかについての検討を行う。

はじめに、アレイ探傷法における重要な技術であるビームステアリング、ビームフォーカシング並びに開口合成法の原理について説明する。次に、ビームフォーカシングと開口合成法が本質的に等価であることを示す。これにより、開口合成法とビームフォーカシングは別のものであると考える必要はないことが分かり、アレイ探触子の合理的な選定とは、これら二つあるいはいずれか一つの技術を効果的に実現できるように探触子の諸元を決定するという問題に帰着される。そこで次に、探触子の素子間隔などいくつかの設計パラメータがビームステアリング能力や開口合成による形状再構成能の精度にどのように関わってくるのか、数値シミュレーションを利用して明らかにする。その結果、ビームステアリングに対しては、単位長さあたりに配置される素子数が重要であり、開口合成像の精度の面からはアレイ探触子の長さ（素子が全体として占める領域の大きさ）が重要であるということが示される。最後に、以上の結論が探触子の選定においてどのような意味をもつかについて述べる。

2.1 ビームステアリングおよびビームフォーカシングの原理

図 2.1 および図 2.2 はリニアアレイ探触子による入射波動場の形成メカニズムを模式的に示したものである。図 2.1 には鉛直入射を、図 2.2 には入射角度 θ_s で斜角入射を行った場合を例として示してある。簡単のため、探触子は一定の間隔 d で並んだ $N=7$ 個の振動子（アレイ要素）からなるものとする。各アレイ要素を無指向性の線波源とみなせば、入射波動場はホイヘンスの原理に従い、各アレイ要素から発生する円筒波の重ね合わせとして得ることができる。これらの図から明らかのように、全てのアレイ要素を同時刻に駆動すれば鉛直入射を、隣接するアレイ要素間に一定の遅延時間 $\Delta\tau$ を設けて駆動すれば、傾斜した波面が得られて斜角入射を行うことができる。今、媒質中の波動伝播速

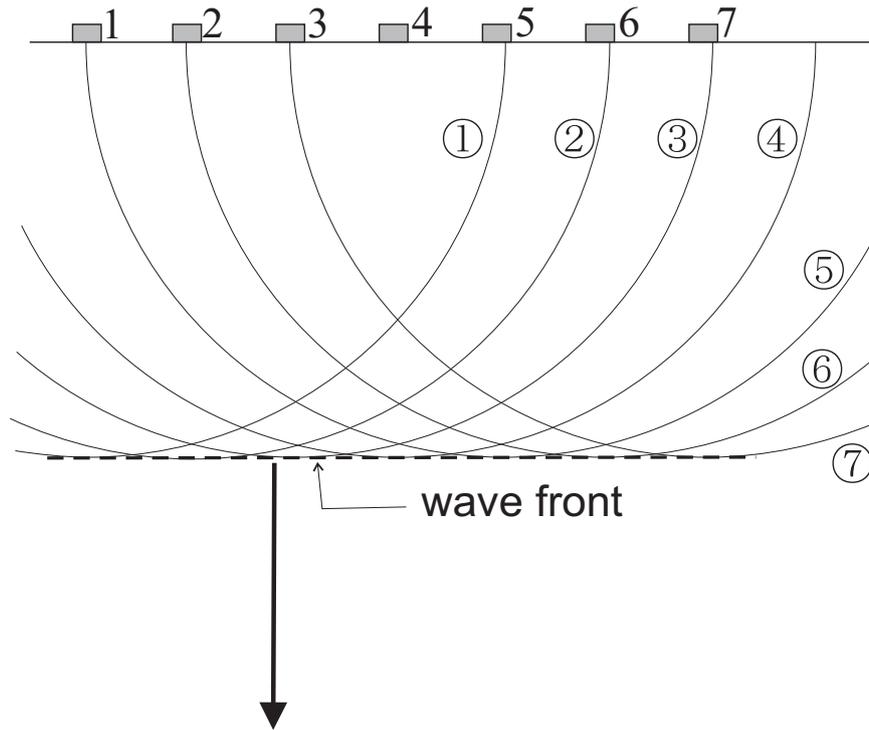


図 2.1: ビームステアリングの原理 (鉛直入射)

度を c とすれば, 遅延時間と入射角度の関係は

$$\Delta\tau = \frac{d \sin \theta_s}{c} \quad (2.1)$$

によって与えられる. すなわち, 遅延時間を変化させることにより, 入射角度 θ_s の制御 (ビームステアリング) を行うことができる.

これに対して図 2.3 はビームフォーカシングの原理を示したものである. ビームフォーカシングの場合には, 各素子からの入射波が, あるフォーカスポイント x_f に同時に到達するように遅延時間を設定する. i 番目の素子に対する遅延時間を Δ_i とすれば, 例えばこれを次のように与えることで点 x_f に入射ビームを集束させることができる.

$$\Delta_i = -\frac{|x_f - x_i|}{c}, \quad i = 1 \dots N \quad (2.2)$$

ここに, x_i は i 番目の素子の位置を表す. 通常, ビームフォーカシングと言った場合, 入射時だけでなく受信時にも同様な遅延時間を設けて複数の観測波形を単一のものに合成することが一般的である. そうすることにより集束点 x_f 付近に散乱源がある場合には, 単一の素子で観測した波形よりもはるかに S/N 比のよい信号を得ることができる. 今, i 番目の素子だけを駆動して超音波を入射したものと, それに対して発生する散乱波を点 x_j にあるレシーバで観測したときに得られる観測波形を $u_{ij}(t)$ とする. このとき, ビームフォーカシングの結果得られる合成波形 $u(t)$ は次のように表すことができる.

$$u(t, x_f) = \sum_{i,j=1}^N u_{ij} \left(t + \frac{|x_f - x_i|}{c} + \frac{|x_f - x_j|}{c} \right) \quad (2.3)$$

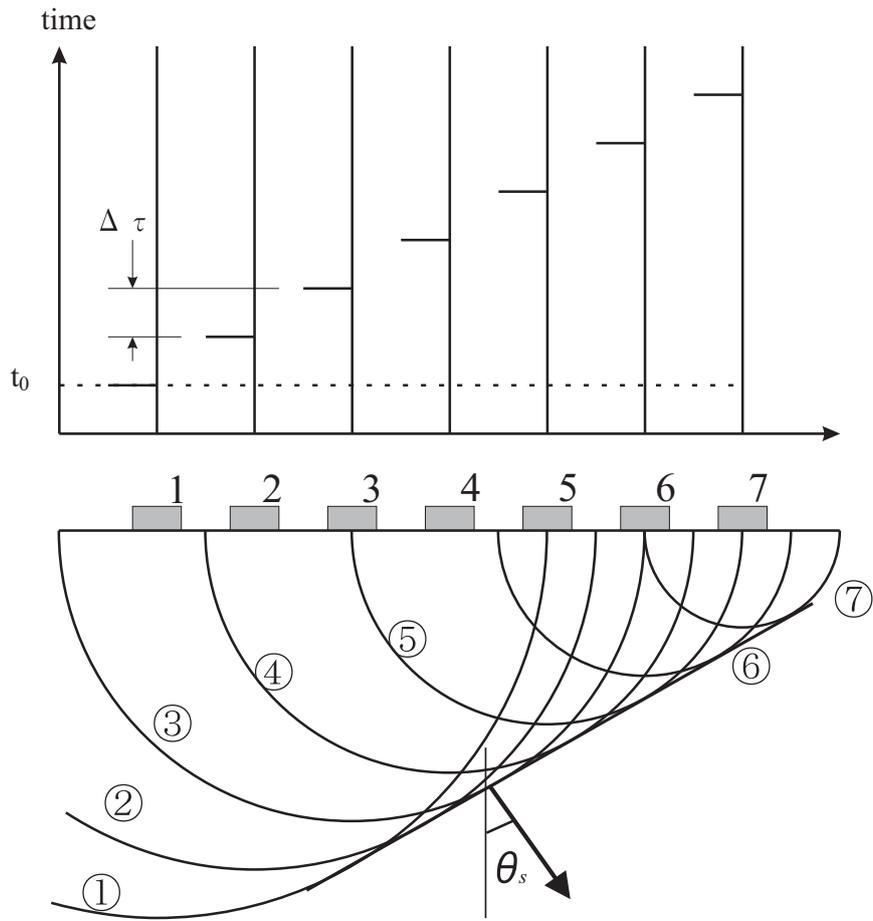


図 2.2: ビームステアリングの原理 (斜角入射)

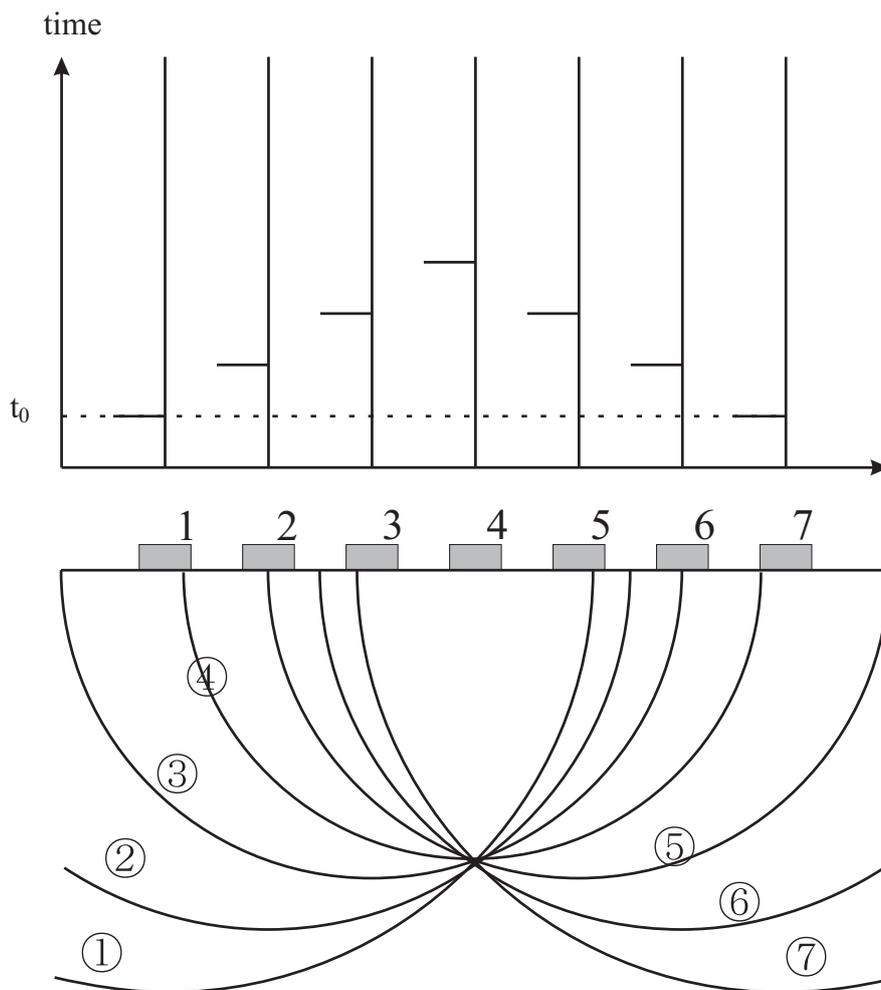


図 2.3: ビームフォーカシングの原理

合成された波形 $u(t, x_f)$ はフォーカスポイント x_f の関数なので, 例えば検査対象領域を小さな立方体領域に分割し, その格子点上を x_f を移動させながら $u(t, x_f)$ を計測すれば, その領域全体に渡っての情報を得ることができる.

2.2 開口合成法の原理

本研究で用いる開口合成法について説明する. 開口合成法による欠陥像の再構成では, 欠陥を無指向性の点散乱体の集まりで表現する. ただし, 点散乱体の強度は位置によって異なるものとし, 例えば, 領域 D を周辺と材料定数が異なる介在物が占めるとすれば, D 内のみゼロでない強度をもつ点散乱体があるものとする. 一方, 空洞の場合にはその境界 ∂D が散乱源であるから, ∂D にのみ点散乱体があると見なす. 開口合成法では, これら点散乱体の相対的な強度分布 $S(x)$ を推定することで欠陥像を構成する.

今, x_i から送信した超音波に対して発生し, x_j において観測した未知欠陥からの散乱波

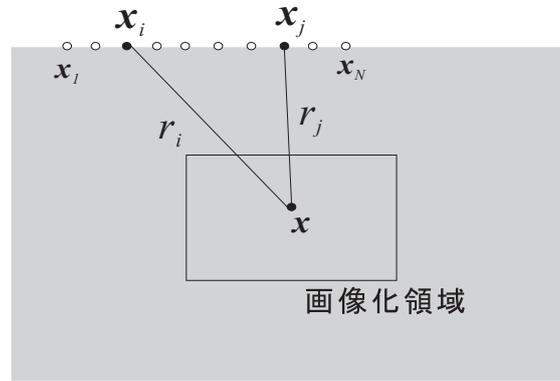


図 2.4: 送受信点位置と画像化領域内の点 x .

を $u_{ij}(t)$ で表す. ただし t は時間を表し, $u_{ij}(t)$ は実際には超音波の波形記録装置によって得られる A スコープ波形である. 以下では $S(x)$ を $u_{ij}(t)$ から推定することを考える. まず, 一組の送受信点において A スコープ波形が得られている場合を考える. このとき, 送信点 x_i から着目点 x , 受信点 x_j から着目点までの距離をそれぞれ

$$r_i = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}|, \quad r_j = |\mathbf{x}_j - \mathbf{x}| \quad (2.4)$$

で表せば, x_i から x を経由して x_j に到る散乱波は時刻

$$t = \frac{r_i + r_j}{c} \quad (2.5)$$

において観測されるはずである. そこで, 一つの A スコープ波形から $S(x)$ を推定するために次のような式を用いることが考えられる.

$$S(\mathbf{x}) \simeq u_{ij} \left(\frac{r_i + r_j}{c} \right) \quad (2.6)$$

複数の送受信点を取り, その位置を適当に選べばより正確な推定が可能になる. そこで次に, N 個の点 x_1, x_2, \dots, x_N において送受信を行い, 全ての送受信点の組み (x_i, x_j) で散乱波 $u_{ij}(t)$ を観測する場合を考える. どのような送受信点の配置に対しても式 (2.6) は同じ

推定能力があるとすれば、複数の A スコープ波形を次のように用いればより精度のよい推定式となっているはずである。

$$S(\boldsymbol{x}) \simeq \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N u_{ij} \left(\frac{r_i + r_j}{c} \right) \quad (2.7)$$

さらに、超音波は伝播するに従って減衰するので、その影響を補正することも考えられる。2次元問題では、点波源からの波動場は距離 r に対して $r^{-1/2}$ のオーダーで減衰するので、時間波形 $u_{ij}(t = r/c)$ に $r^{1/2}$ をかけることで距離の影響を相殺することができる。従って、

$$S(\boldsymbol{x}) \simeq \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N (r_i r_j)^{1/2} u_{ij} \left(\frac{r_i + r_j}{c} \right) \quad (2.8)$$

が、距離補正を行った $S(\boldsymbol{x})$ の推定式である。

多重反射波を利用した開口合成 欠陥が板内部にある場合、入射波の一部は板上下面で何度か反射された後に着目点 \boldsymbol{x} に到達する。同様に \boldsymbol{x} において発生した散乱波も、その一部は板表面を經由して観測点 \boldsymbol{x}_j に到る。このように、欠陥だけでなく板表面を經由して観測点に到る散乱波も波形 $u_{ij}(t)$ に含まれる場合には、その影響を取り入れた推定を行った方がよいと考えられる。その場合、 $S(\boldsymbol{x})$ の一つの推定式は、送信点 \boldsymbol{x}_i から l 回の反射を経て着目点に到る伝播経路の長さを $r_i^{(l)}$ 、着目点 \boldsymbol{x} から m 回の反射の後に観測点に到達する経路長を $r_j^{(m)}$ とし、

$$S(\boldsymbol{x}) \simeq \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \sum_{l,m=0}^M (r_i^{(l)} r_j^{(m)})^{1/2} u_{ij} \left(\frac{r_i^{(l)} + r_j^{(m)}}{c_T} \right) \quad (2.9)$$

によって与えられる。ただし、 M は開口合成を行う際、往路 ($\boldsymbol{x}_i \rightarrow \boldsymbol{x}$) および復路 ($\boldsymbol{x} \rightarrow \boldsymbol{x}_j$) それぞれにおいて考慮する最大の反射回数である。

2.3 ビームフォーカシングと開口合成法の関係

式 (2.3) と式 (2.8) を比べれば明らかな通り、ビームフォーカシングによって得られる観測波形 $u(t, \boldsymbol{x}_f)$ において $t = 0$, $\boldsymbol{x}_f = \boldsymbol{x}$ とすれば、これら二つの式は距離補正の項 $\sqrt{r_i r_j}$ と係数 N^{-2} 以外は同じであることがわかる。従って、 \boldsymbol{x}_f を様々な位置にとってビームフォーカシングを行うことで得られるデータの時刻ゼロの振幅を \boldsymbol{x}_f にプロットしていけば、開口合成法による欠陥形状推定式 $S(\boldsymbol{x})$ とほぼ同じ結果が得られることがわかる。特に、散乱体が超音波の送受信点から遠方にある場合には、距離減衰の補正項はほとんど結果に影響しないため、両者の結果は定数倍の違いと見なしても差し支えない。また、ビームフォーカシングの結果得られた波形の時刻ゼロにおける振幅を利用することは、点 \boldsymbol{x}_f に点散乱体がある場合には、時刻ゼロに全ての観測点 \boldsymbol{x}_j , ($j = 1 \dots N$) で散乱波が観測されるように遅延時間を設定しているため、何ら不自然なことではない。

このように考えれば、ビームフォーカシングの結果 $u(0, \boldsymbol{x})$ を \boldsymbol{x} の関数としてプロットすることで欠陥像を構成することと、開口合成法は本質的に同じであることが分かる。そこで、以下ではビームステアリングと開口合成についてとりあげ、アレイ探触子の諸元すなわち設計変数との関係を論じる。

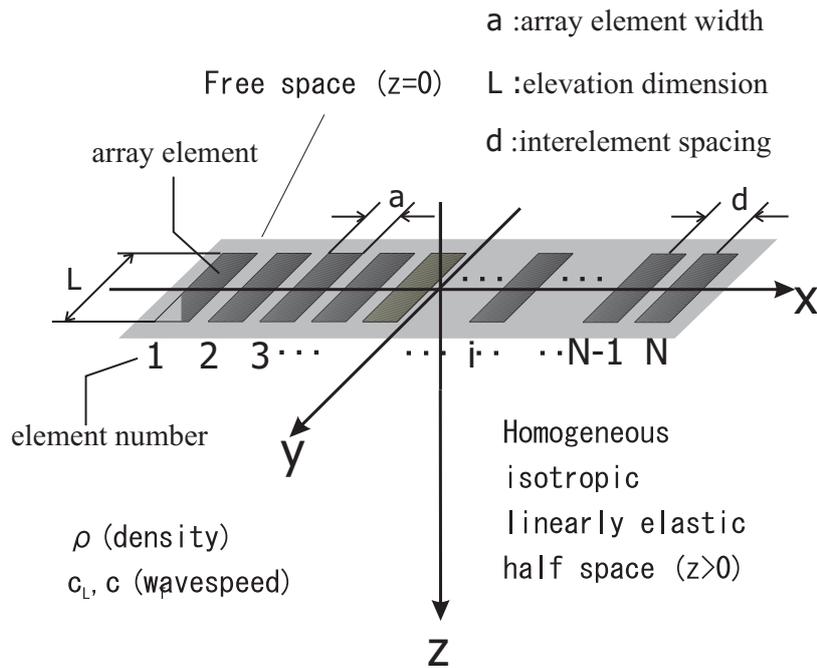


図 2.5: アレイ探触子の解析モデル

2.4 アレイ探触子の設計変数が入射波動場に与える影響

ビームステアリングを行うことの利点は、探触子位置を物理的に移動させることなく様々な方向を瞬時に探傷できることである。その際、欠陥からのエコーレベルを上げ、同時に探傷試験の空間的な分解能を高めるためには、入射エネルギーを特定の方向に集中させた幅の狭い入射ビームを形成する必要がある。そこで、アレイ超音波探触子には鋭い指向性を持つ入射ビームを様々な方向に形成できる能力が求められる。ここでは、どのような条件を満足すれば、どの程度そのような要求を満たすことができるのかについて数値シミュレーションによって調べる。また、得られた結果を利用してアレイ探触子の設計パラメータを決定する一手法を提案する。ただしここではリニアアレイ探触子について考え、その素子サイズと素子間隔は全ての素子および素子間で同一であるものとしておく。

2.4.1 リニアアレイ探触子によるビームステアリングの数値シミュレーション

解析モデル

図 2.5 に本研究で用いるリニアアレイ探触子の解析モデルを示す。媒質は等方、均質な線形弾性体が占める半無限領域 $D(z > 0)$ であるものとする。実際の接触型探触子では、振動子の振動が接触圧を介して固体中に伝えられるものと考えられるが、簡単のためここでは未知の接触圧をアレイ要素と弾性領域 D の接触面に分布する一様な鉛直力で置き換えることで探触子をモデル化する。また、図 2.5 に示す通り N 個のアレイ要素は全て幅 a 、長さ L の矩形であり、それらは x 軸に沿って一定の間隔 d で配置されているものとする。また、媒質の材料定数は縦波の波速 c_L 、横波の波速 c_T および密度 ρ によって与えられるものとしておく。

定式化

以上のようなモデルを考えたとき, 入射変位場 $u(\mathbf{x}, t)$ の支配方程式は次の運動方程式で与えられる.

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \quad (2.10)$$

ただし, λ, μ はラメ定数である. i 番目のアレイ要素が占める $z = 0$ 面内の領域を S_i で表せば, 境界条件は

$$\sigma_{zz}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} -f(t - (i-1)\Delta\tau), & (\mathbf{x} \in S_i, i = 1, \dots, N) \\ 0 & (z = 0, \mathbf{x} \notin S_i) \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{xz}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (z = 0) \quad (2.12)$$

$$\sigma_{yz}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (z = 0) \quad (2.13)$$

となる. $f(t)$ は鉛直力の時間変化を表し, $t > 0$ において有限な値をもつものとする. このとき, 時刻 $t = 0$ において変位および速度はゼロであると考えることができ, 初期条件は以下のように表される.

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, 0) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u}(\mathbf{x}, 0) = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

式 (2.10) ~ 式 (2.14) によって表される初期値境界値問題を解くことによりアレイ探触子からの波動場を解析することができる.

解析手法

上述のような初期値境界値問題は, 境界要素法や有限要素法などの数値解析手法によって解くことができる. しかしながらいずれの手法も, 特に周波数が高い場合には計算規模が大きくなってしまい, 効率的でない. そこで, ここではよく知られた半無限体の鉛直点荷重に対する応答, すなわち Lamb の解を用いて解析する. Lamb の問題とは, 半無限弾性体表面の鉛直点荷重に対する応答変位 $U(\mathbf{x}, t)$ を求める問題を指し, アレイ探触子の解析同様, 式 (2.10) ~ 式 (2.14) によって定式化される. ただし, 鉛直集中力が半無限体表面に載荷されている状態を考えるため, 境界条件は式 (2.11) に替わり

$$\sigma_{zz}(\mathbf{x}, t) = -\delta(r) \frac{f(t)}{2\pi r}, \quad (z = 0) \quad (2.15)$$

と表される. ただし, $\delta(r)$ はディラックのデルタ関数を表し, r は載荷点を原点にとった円筒座標 (r, θ, z) の径方向の座標を意味する (図 (2.6) を参照). Lamb の問題に対する解はよく知られており, その厳密解は標準的なテキストに見つけることができる.

集中荷重の載荷点を \mathbf{y} としたとき, Lamb の問題の解を $U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ で表すと, アレイ探触子からの入射変位場は次のように Lamb の解を重ねあわせることで得ることができる.

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{j=1}^N \exp(i\omega(j-1)\Delta\tau) \int_{S_j} \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) dS_y \quad (2.16)$$

式 (2.16) 中の $\exp(i\omega(j-1)\Delta\tau)$ は, 式 (2.1) によって steering angle θ_s から決定される隣り合ったアレイ要素駆動の時間差 $\Delta\tau$ に基づいて j 番目のアレイ要素につけるべき遅延時間を表す項である.

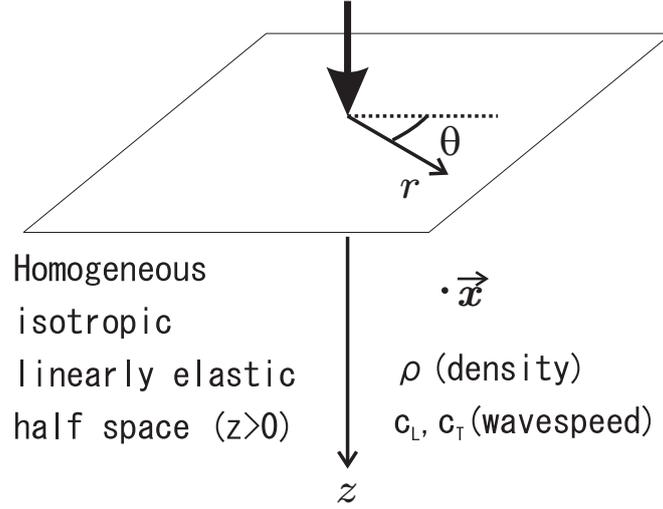


図 2.6: Lamb の問題

式 (2.16) を評価する際, $U(x, y, \omega)$ の厳密な表現が無限区間の積分形でしか得られないために, その数値計算には種々の技巧が必要とされる上, 計算時間の面でも非常に効率が悪い. そこで, ここでは $U(x, y, \omega)$ そのものでなく, 高周波域での漸近近似解 $U^{far}(x, y, \omega)$ を用いる. $U^{far}(x, y, \omega)$ は, $k_L|x - y| \gg 1$ が成り立つものとして, 停留位相の方法を利用することで次のような形で得ることができる.

$$\bar{U}(x, \omega) \simeq \bar{U}^{far}(x, \omega) = \frac{\bar{f}(\omega)}{2\pi\mu} \sum_{l=L,T} K_l(\theta) \frac{e^{ik_l R}}{R} \hat{d}^l \quad (2.17)$$

$$K_L(\theta) = \frac{(2 \sin^2 \theta - \kappa^2) \cos \theta}{(2 \sin^2 \theta - \kappa^2)^2 + 4 \sin^2 \theta \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \sqrt{\kappa^2 - \sin^2 \theta}} \quad (2.18)$$

$$K_T(\theta) = \frac{\sin 2\theta \sqrt{\kappa^{-2} - \sin^2 \theta}}{(2 \sin^2 \theta - 1)^2 + 4 \sin^2 \theta \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \sqrt{\kappa^{-2} - \sin^2 \theta}} \quad (2.19)$$

ただし, $R = |x - y|$ であり $k_L = \omega/c_L$, $k_T = \omega/c_T$ はそれぞれ縦波, 横波の波数を表す. \hat{d}^L, \hat{d}^T は変位ベクトルと呼ばれ, r および z 方向の単位ベクトル \hat{e}_r, \hat{e}_z により

$$\hat{d}^L = (\sin \theta) \hat{e}_r + (\cos \theta) \hat{e}_z \quad (2.20)$$

$$\hat{d}^T = (\cos \theta) \hat{e}_r - (\sin \theta) \hat{e}_z \quad (2.21)$$

$$\kappa = \frac{k_T}{k_L} \quad (2.22)$$

と表される. $K_L(\theta), K_T(\theta)$ はそれぞれ縦波, 横波の directivity function と呼ばれ, 半無限体上の鉛直集中荷重からの縦波および横波がもつ変位振幅の方向 θ による変化を表す項である. 半無限体上の鉛直集中荷重からの音響波の解にはこのような項は現れず, 無指向性な場となることが知られている. そのため, 音響波では各アレイ要素をポイントソースとみなせる場合には, 単純なホイヘンスの原理や入射場の近似表現を導くことで様々な現象を説明することができる. しかしながら, 固体中の変位場を考える際には directivity function の影響が各アレイ要素からの波動場にも反映されるため, 音響波に対して得られている知見が同様に当てはまるかは, 実際に数値計算を行い検討をしてみる必要があり注意を要する.

シミュレーション結果

式 (2.16) を用いておこなった数値解析例を示す. ここでは, a_0 を基準長さ, アレイ要素の幅, 奥行き, 間隔をそれぞれ $a = 0.5a_0$, $L = 5a_0$, $d = 0.75a_0$ として, 要素数 $N = 20$ 個の探触子について入射波動場の解析を行った. 周波数は無次元化波数で $ka_0 = 0.35$ とし, steering angle θ_s は 0 度から 80 度まで 20 度刻みで 5 つのケースを考えた. 解析には遠方場近似された Lamb の解を用いたため, 実体波である P 波と S 波だけが考慮されている. 実際のアレイ探傷では伝播速度の速い P 波を利用することが多いため, ここでも P 波の変位成分だけを取り出して結果として示すことにする. これは以後の解析においても同様である.

図 2.7 は $y = 0$ 面内の変位分布を絶対値 $|u(x)|$ で示したものである. ステアリング角度 θ_s を $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ とした五種類の解析結果が示してある. 大きな変位が集中するビーム方向がステアリング角度に応じて変化している. ただし, 入射ビームは空間的に広がりをもっており, その程度は θ_s によって異なることがわかる.

図 2.8 に示すように, $y = 0$ の面内で原点からの距離 $R = 100a_0$ の同心円上に観測点を取り, それらの点を含む半球面を通過する P 波についてエネルギーフラックス $E(x(R = 100a_0, \theta))$ を計算した. 図 2.9 は, 様々なステアリング角度 θ_s に対して得られた結果を示したものである. グラフの横軸は z 軸からとった観測点の角度 θ を示し, 縦軸は無次元化された透過エネルギー $E(x)/\mu c_L$ をとってある. このような図は放射パターンと呼ばれる. 図 (2.9) より, θ_s の変化に伴いピークの現れる角度 θ_{max} が変化している様子がわかる.

2.4.2 設計パラメータの最適化

最適化問題の概要

フェーズドアレイ探触子についてはいくつかの最適化問題を考えることができるが, ここではアレイ要素のサイズやその配置などの設計パラメータを入射ビーム幅の面から最適化する問題を考える. 最適化すべき設計パラメータとしては, 矩形のアレイ要素が等間隔に配置されているものとして, アレイ要素サイズ (幅 a , 奥行き L), 要素間隔 d , 要素数 N , アレイ探触子の開口幅 A を取り上げる.

アレイ探触子の性能評価方法

設計パラメータの決定を最適化問題として考えるためには, アレイ探触子の性能を定量的に記述できることが前提となる. しかしながら, どのような指標をもって探触子の性能を評価するための明確な指標や基準は今のところ存在しない. 本研究では, アレイ探触子のつくる入射波動場の放射パターンおよびビームステアリングを行った際のその変化を見ることで, 探触子の性能評価を行うことを考える. 以下ではまず, 典型的な放射パターンをいくつか示し, それらの特徴を記述する. つづいて, 探傷試験に用いる上で理想的と考えられる放射パターンについて説明する. さらに, 理想的な放射パターンか否かを明らかにできるような数値指標を導入し, アレイ探触子の性能評価の指標とする.

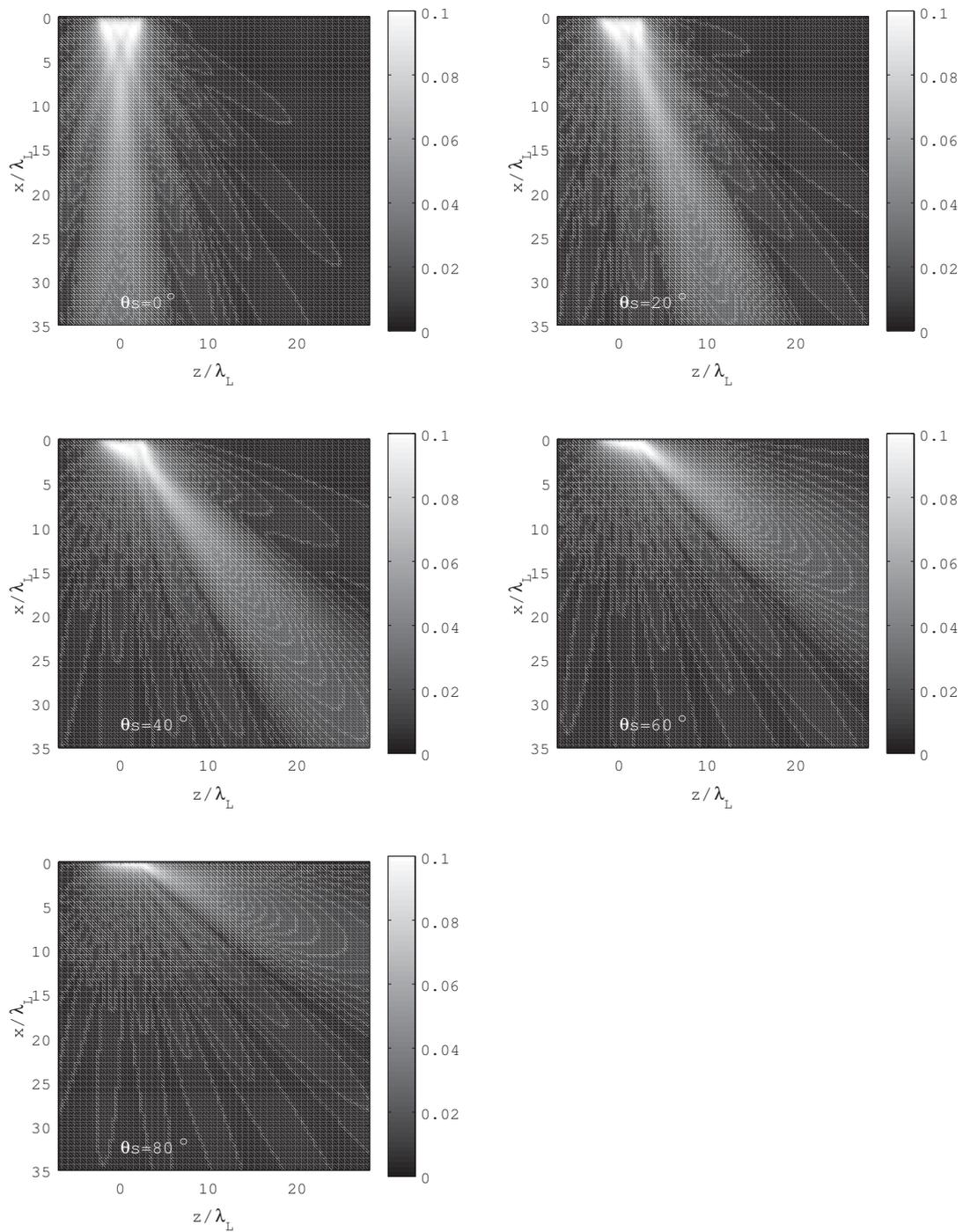


図 2.7: $y = 0$ 面内の変位 $|u(x)|$

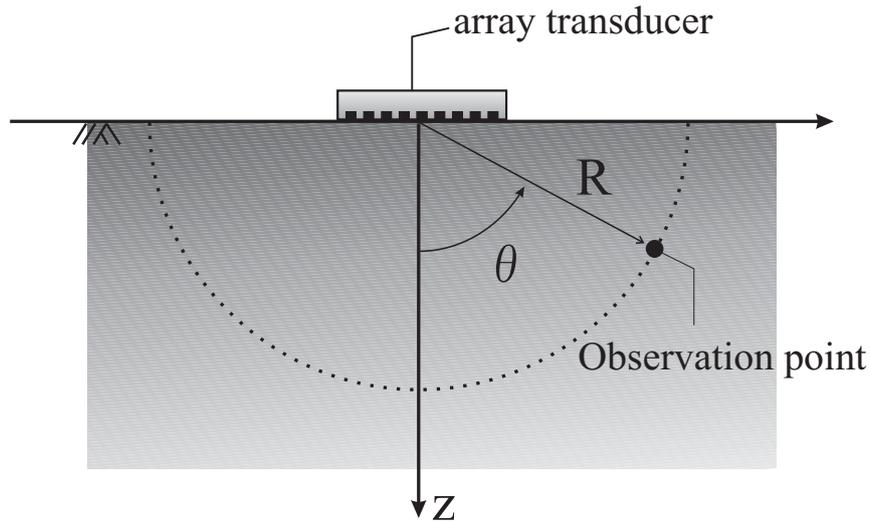


図 2.8: radiation plot を求めるときの観測位置

入射波の放射パターン

図 2.10 は典型的な二つの放射パターンを模式的に表したものである。図 2.10(a) では意図した方向, すなわちステアリング角度 θ_s 方向にのみ強い超音波が放射されている様子を示している。一方, 図 2.10(b) では θ_s 以外の方向にも比較的大きなピークが現れた場合の様子を示している。超音波探傷試験にアレイ探触子を用いる場合には, 前者のような分布が理想的である。放射パターンにおいて, θ_s 付近に現れるピークはメインローブと呼ばれ, この幅が細く高さが高いほど強いビームを意図した方向へ入射できることを意味する。一方, メインローブのすぐとなりには現れるピークはサイドローブと呼ばれる。メインローブ近傍に位置するため, その高さがメインローブの高さに比較しうる程度に高い場合には入射角度を誤って判定する可能性があり, 望ましくない。また, $\theta = 0^\circ$ に関してメインローブのほぼ反対側に現れるピークはグレイティングローブと呼ばれ, 音響波の場合にはアレイ要素間隔が半波長を越える場合に現れ, メインローブと同等の高さをもつことが知られているこのようなピークの存在も, 入射エネルギーに大きなロスを生じることから望ましくない。

放射パターンの評価指標

以上をまとめると メインローブが細く, サイドローブの高さが低く, グレイティングローブが現れないような放射パターンが, 探傷試験に用いる上で理想的であるといえる。ここでは, 放射パターンが理想的であるか否かを数値的に表すために次のような指標を用いることとする。

$$M_{\theta_{max}} = \sqrt{\frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} (\theta - \theta_{max})^2 E(\theta) d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} E(\theta) d\theta}} \quad (2.23)$$

式 (2.23) はピーク位置 θ_{max} を中心とした $E(\theta)$ の二次モーメントであり, $E(\theta)$ の局所的な変動の影響を受けにくく, θ_{max} さえ特定できれば計算することができる。また, グレイティングローブや大きなサイドローブが存在する場合には理想的な放射パターンが得ら

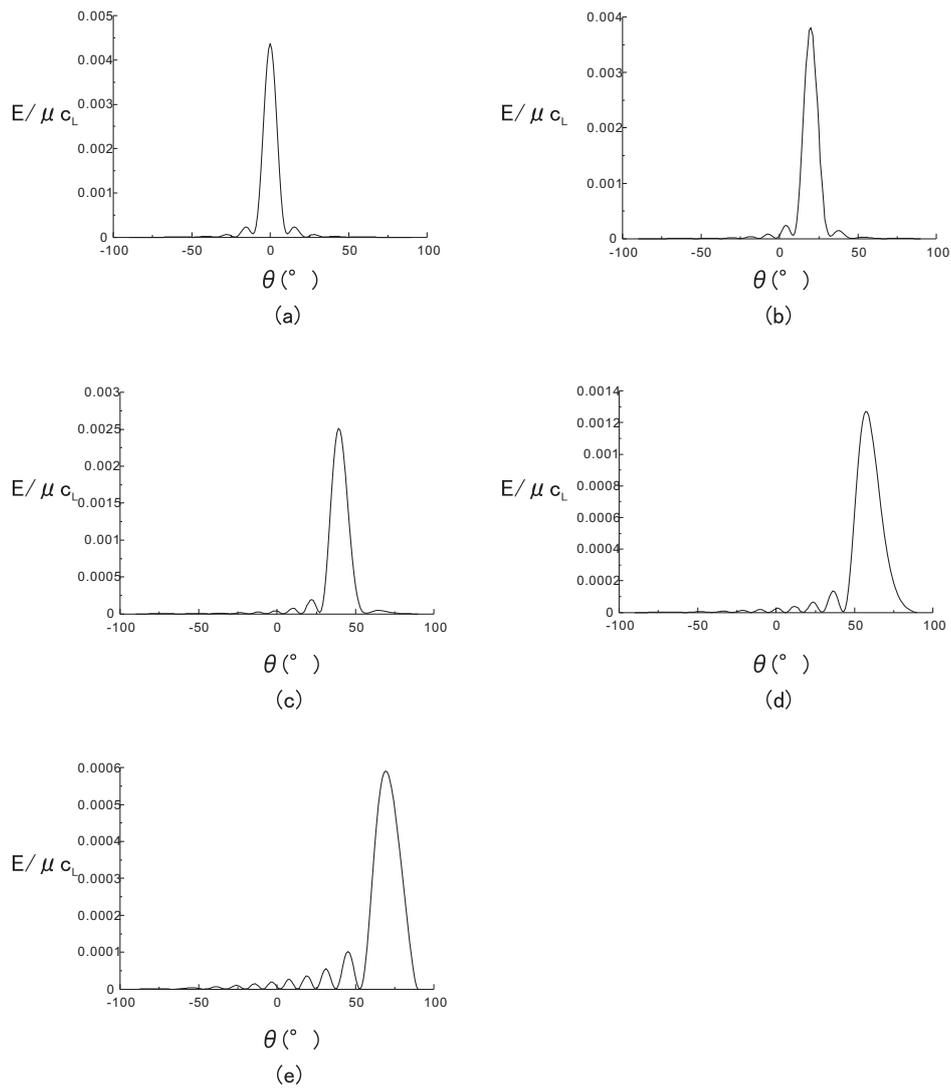


図 2.9: steering angle を変えたときの radiation plot (a) $\theta_s = 0^\circ$ (b) $\theta_s = 20^\circ$ (c) $\theta_s = 40^\circ$
 (d) $\theta_s = 60^\circ$ (e) $\theta_s = 80^\circ$

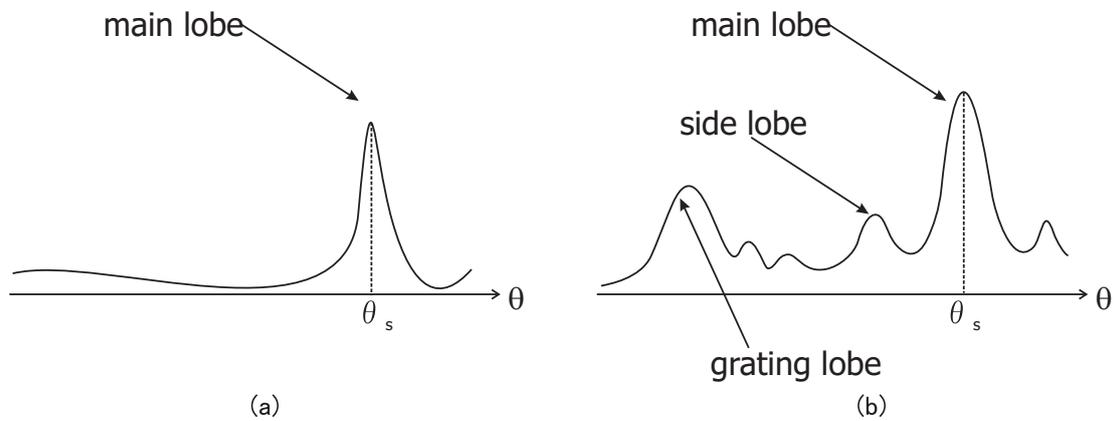


図 2.10: 典型的な放射パターン (a) 理想的なもの (b) 理想的でないもの

れている場合に比べて大きな数値を取るため、放射パターンが理想的でないことを知ることができる。

レイリー距離

放射パターンのみを見ることで入射波動場の評価を行うことが妥当であるのは、観測点距離 R_1 において得られるパターンが、それ以外の位置 $R_2 (> R_1)$ で得られるパターンと大差がないことが分かっている場合に限られる。しかしながら、観測点位置を探触子面近傍にとったときに得られる放射パターンに関してはこの限りでないことが知られている。図 2.11 および図 2.12 はこのことを例示するために、 a_0 を基準長さ、アレイ要素の幅、奥行き、間隔をそれぞれ $a = 0.5a_0$, $L = 5a_0$, $d = 0.75a_0$ として $N = 20$ 個の探触子について解析を行った結果である。図 2.11 は $y = 0$ 面内で得られる変位の分布を示したものである。探触子面に近づくにつれて複雑な干渉模様が現れビーム幅も開口幅 $A = 15.5a_0$ に近づいていく様子が分かる。図 2.12 は、図 2.11 のいくつかの R において得られる断面図を示したものである。これらの図をみると、 $R = 25a_0$ 程度までは放射パターンの様子が位置によってかなり変化することが明らかである。従って、ここでは放射パターンの形状を議論する意味があるのは、 $R = 25a_0$ 以上の領域における入射波動場が興味の対象となっている場合に限られる。また、この距離以下では入射ビームのパワーは得られるもののビーム幅が広がっており、欠陥の位置特定には不向きで、ビームステアリングという考え方自体が有効でなくなる。そのため、放射パターンを用いた議論が有効となる探触子からの距離を明らかにすることは、アレイ探触子からどの程度の距離までなら探傷が可能かを明らかにすることに等しく、重要なことである。

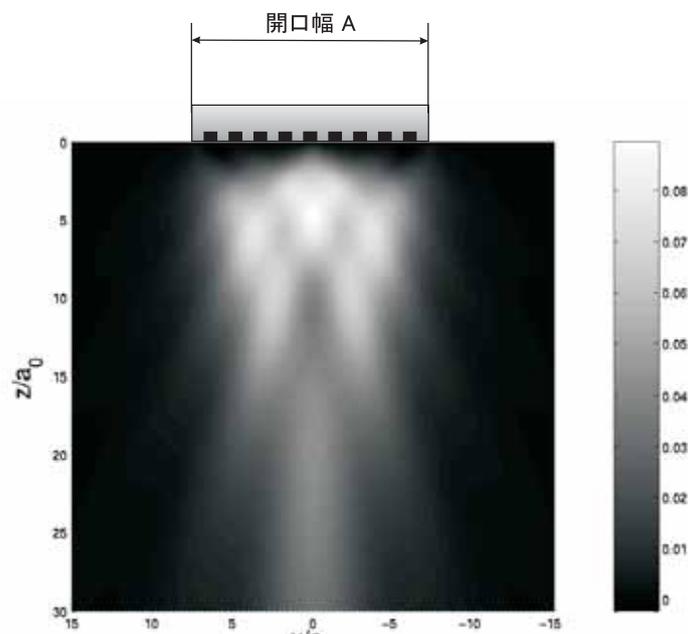


図 2.11: 探触子近傍での変位分布

そのような距離は、円形や矩形の振動板からの放射音響波については near field distance

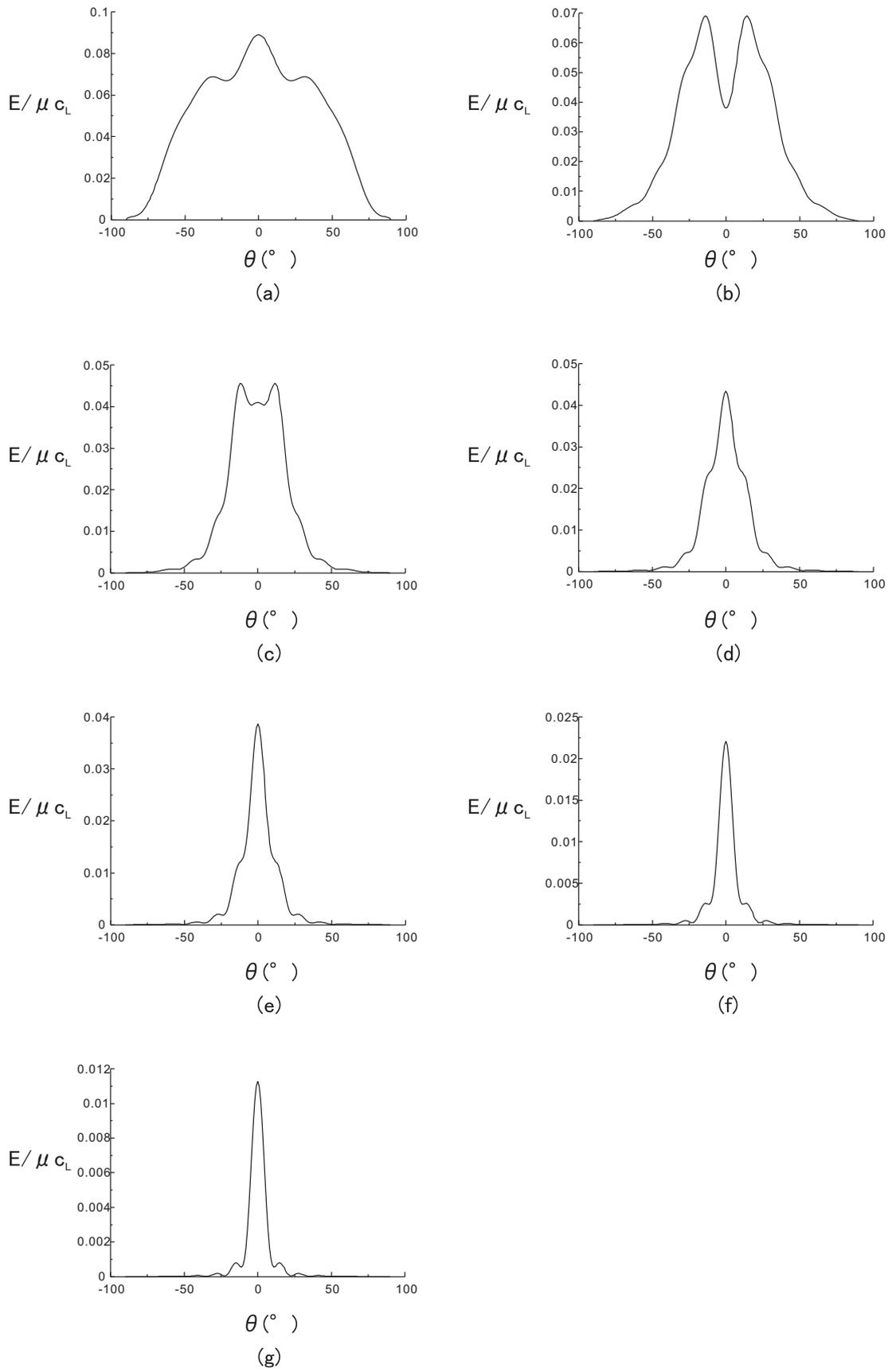


図 2.12: 探触子近傍での放射パターン (a) $R = 5a_0$ (b) $R = 10a_0$ (c) $R = 15a_0$ (d) $R = 20a_0$ (e) $R = 25a_0$ (f) $R = 40a_0$ (g) $R = 60a_0$

として既に詳しく調べられている。例えば、円形振動板からの放射音場を表すレイリーの式

$$p(\boldsymbol{x}, \omega) = \frac{i\omega\rho v_0}{2\pi} \int_S \frac{\exp(ikR)}{R} dS_y, \quad R = |\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}| \quad (2.24)$$

は観測点が探触子中心軸上にある場合には解析的に積分を行うことができ、

$$p(\boldsymbol{x}, \omega) = \rho c v_0 [\exp(ikz) - \exp(ik\sqrt{z^2 + B^2/4})] \quad (2.25)$$

となる。ただし、 v_0 は振動板の速度振幅を、 c は波速、 k は波数、 B は振動板の直径である。式 (2.25) を無次元化し、 z に対してプロットすると図 2.13 が得られる。この図で、最後のピークが現れる位置は λ_p を波長として

$$R_N = \frac{B^2}{4\lambda_p} \quad (2.26)$$

で与えられる。この R_N が near field distance に相当し、これを越えた領域では圧力振幅が単調に減少し放射パターンにもほとんど変化が見られなくなる。光学の分野ではこのような距離はレイリー距離として知られている。スリットを通ったレーザー光はスクリーン上の干渉縞として観察することができるが、このときスクリーンとスリットの距離によって、フレネル回折とフラウンホーファー回折と言われる 2 種類の回折が起きる。前者はスリット近傍で、後者は遠方にスクリーンを置いた場合に見られる。それら二つの回折がおこる境界となる距離がレイリー距離として定義されている。レイリー距離はスリット幅を B としたときにやはり式 (2.26) の右辺で与えられ、これはレイリー距離が波動の干渉、すなわち位相の関係だけから決定されることを示唆している。実際、固体中の弾性波に対しても式 (2.16) を数値的に評価し、 z 軸上で最後に現れる変位振幅の極大点が現れる距離 R_N を求めると、

$$R_N = \frac{A^2}{4\lambda} \quad (2.27)$$

の関係がよく成り立つことが分かる。そこで、以下ではアレイ探触子のレイリー距離 R_N を求める際にもこの関係を用いることとする。

2.4.3 最適設計パラメータの決定方法

最適化すべき設計パラメータとして、アレイ要素の数 N 、アレイ要素のサイズ (a, L) 、アレイ要素の間隔 d 、アレイ探触子の開口幅 A の 5 つを挙げた。ただ、最適化は $y = 0$ の平面内での放射パターンを用いて行っており、入射波動場は $y = 0$ の平面に関して完全に対称になるため、 L については最適化の対象から除外する。ただし、十分な S/N 比が達成できるだけの総入射エネルギーを確保するためのパラメータとして L を用いることは可能である。以下では、残る設計パラメータ a, d, N, A の決定方法について考えることにするが、これらの間には配置の様子を考えれば

$$A = (N - 1)d + a \quad (2.28)$$

のような関係があることは明らかであり、実際に独立なのは 3 つである。

まず、開口幅 A について考える。式 (2.27) により、探触子のレイリー距離の許容限度 R_N^{\max} を与えれば

$$A \leq 2\sqrt{\lambda R_N^{\max}} \quad (2.29)$$

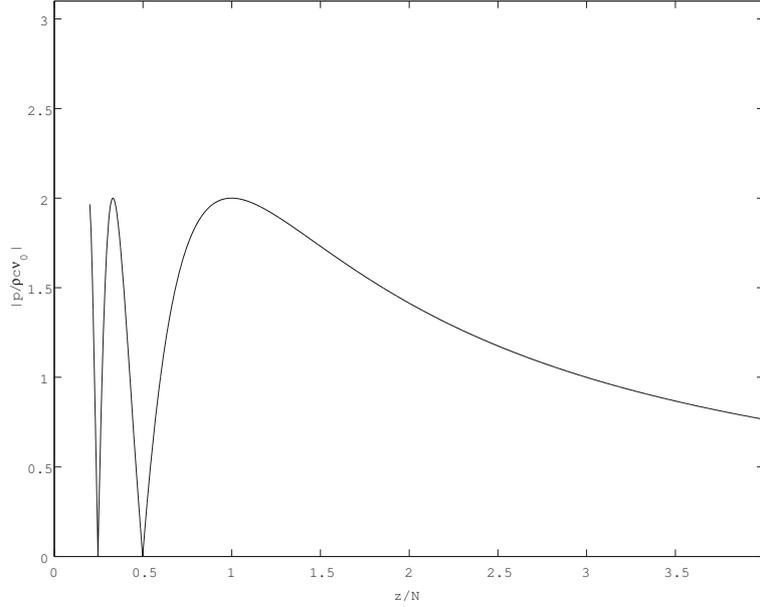


図 2.13: 探触子直下での音響波による圧力分布

となる。ところで、アレイ探触子を用いて欠陥検出を行おうとする場合、用いるアレイ探触子のレイリー距離 R_N 以上に欠陥が探触子から離れていなければ、精度のよい結果を得ることはできない。したがって、予想される欠陥位置や被検査材の寸法から、用いるアレイ探触子に対して許容可能なレイリー距離 R_N^{\max} が計算され、式 (2.29) の関係より開口幅 A の上限が決められる。ここで入射エネルギーを大きくすることができるように R_N が R_N^{\max} を上回らない限りで最大の A を採用することにすれば A は

$$A = 2\sqrt{\lambda R_N^{\max}} \quad (2.30)$$

と求まり、独立なパラメータは、 a, d, N のうち任意の 2 つとなる。

つづいて、

$$q \equiv \frac{a}{d} \quad (2.31)$$

と定義し、 q と N の条件を調べる。今、レイリー距離の許容限界 R_N^{\max} が与えられたとして $M_{\theta_{\max}}$ を $q-N$ 平面にプロットしてみる。ここではいくつか行った計算のうち $R_N^{\max}/\lambda_L = 8.77$, $R/\lambda_L = 17.54$ としたときの結果を図 2.14 に示す。これを見ると、 N が小さい領域で $M_{\theta_{\max}}$ が大きな値をとり、 $N = 11$ 付近でピークを迎え、それより大きくなると急速に一定値に近づくことが分かる。また、 q は $M_{\theta_{\max}}$ にほとんど影響しないことも明らかである。これは N がある程度大きくなればビーム幅はほとんど改善されなくなることを意味し、この例では $N = 11$ 付近のピークが終わる $N = 14$ 程度にしておくといえる。

このピークの原因について考察するため、ピークをはさむ $q-N$ 平面上の三点 $(q-N) = (0, 5, 5), (0, 5, 11), (0, 5, 20)$ に対して放射パターンを描いたところ、図 2.15 のようになった。これを見ると、 $N = 5, 11$ の場合にはグレーティングローブが現れているために $M_{\theta_{\max}}$ が大きな値となっていたと考えられる。グレーティングローブの存在条件が

$$\frac{d}{\lambda} \geq \frac{1}{2} \quad (2.32)$$

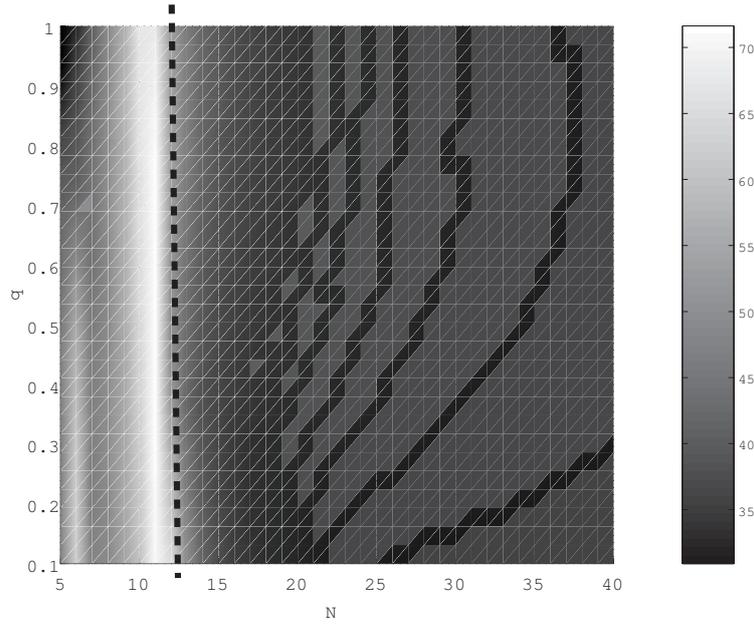


図 2.14: N と q に対する $M_{\theta_{\max}}$ の分布. 点線は式 (2.36) の等号成立位置を示す.

であることは音響波や光学の分野ではよく知られており, この基準がアレイ探触子の場合にも当てはまるとすれば, 式 (2.32) の関係を用いることでその直線の位置が説明できるはずである. そこで式 (2.28) の両辺を d で割り

$$\frac{A}{d} = N - 1 + q \quad (2.33)$$

として, ここから d を式 (2.30) を用いて書くと

$$d = \frac{A}{N - 1 + q} = \frac{2\sqrt{\lambda R_N^{\max}}}{N - 1 + q} \quad (2.34)$$

となる. これに式 (2.32) の関係を適用することで

$$\frac{2}{N - 1 + q} \sqrt{\frac{R_N^{\max}}{\lambda}} \leq \frac{1}{2} \quad (2.35)$$

の関係が得られ, q と N の関係としては

$$q + N \geq 1 + 4\sqrt{\frac{R_N^{\max}}{\lambda}} \quad (2.36)$$

のように表現できる. この式の右辺を計算し, 等号が成立する $q - N$ の組をプロットしたのが図 2.14 の点線である. この点線はおおむね $M_{\theta_{\max}}$ のピークが終わる位置に対応しており, これは R_N^{\max} を変えて行った計算でも同様であった. 探触子製作の技術を考えて, アレイ要素の幅は総入射エネルギー量が多くなるよう, できるだけ大きくとることが望ましい. 仮に, $q = 1$ とできるものとするれば式 (2.36) は

$$N \geq 4\sqrt{\frac{R_N^{\max}}{\lambda}} \quad (2.37)$$

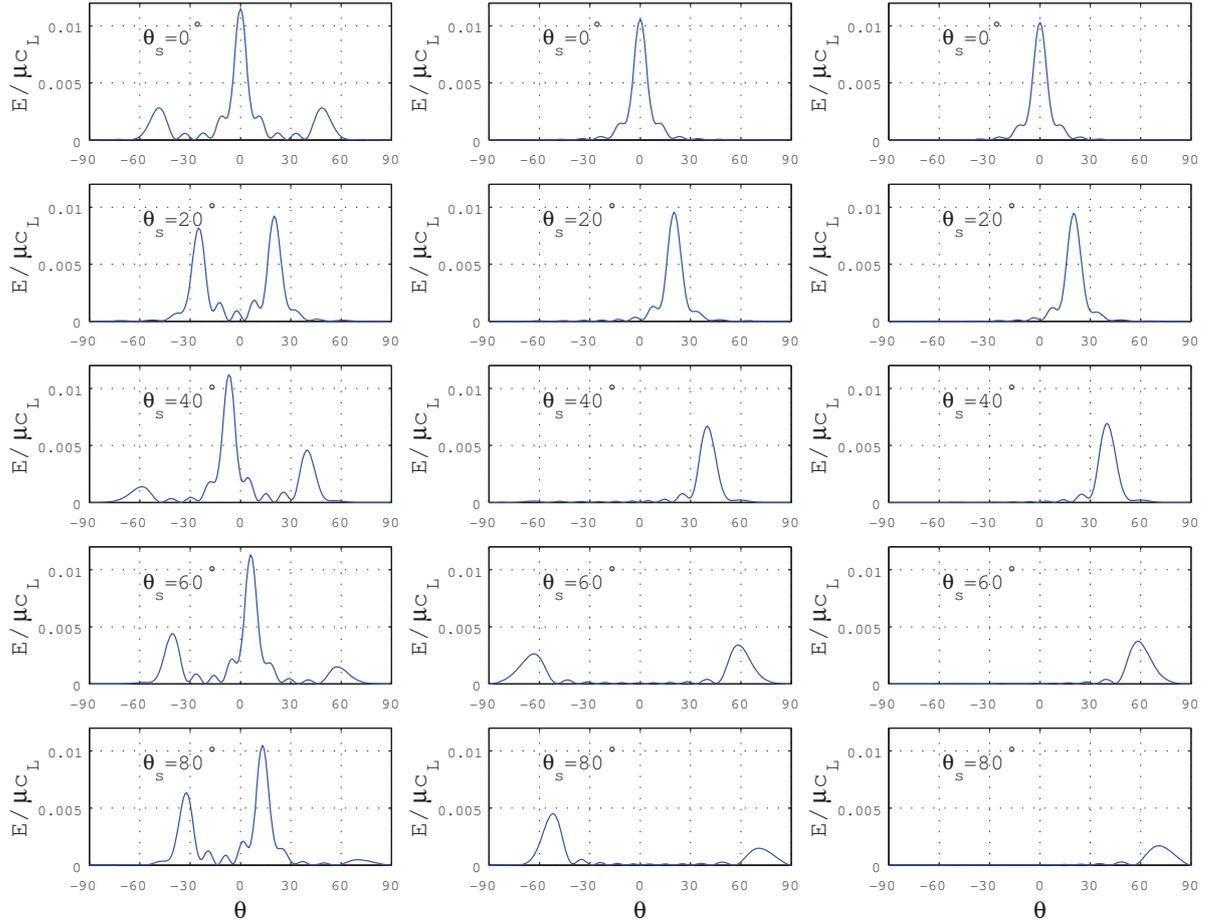


図 2.15: $N - q$ 平面上の三点における放射パターン ($q = 0.5$, 左: $N = 5$, 中: $N = 11$, 右: $N = 20$).

となる. $F_s \geq 1$ なる F_s を係数として

$$N = 4F_s \sqrt{\frac{R_N^{\max}}{\lambda}} \quad (2.38)$$

と N をとることができる. この式の両辺を式 (2.30) で割ると,

$$\bar{N} = \frac{N}{A} = \frac{2F_s}{\lambda} \quad (2.39)$$

のように単位長さあたりのアレイ要素の数が決まる.

この結果は式 (2.39) にしたがって適当な開口幅のアレイ探触子を設計すれば, 必要に応じて駆動する要素数を変化させることで R_N^{\max} を調整できることを示している.

2.4.4 入射角度の制御方法について

フェーズアレイ探触子の性能を表す重要な指標には, 放射パターンの形状に加えて, メインローブのピーク位置すなわち入射角度 θ_{max} をいかに正確に θ_s と一致させるように制御できるかという点がある. 図 2.16 は θ_s を 50° 以上に設定した場合に, $a = 0.5a_0$,

$L = 5a_0, d = 0.75a_0, N = 20$ として放射パターンを示したものである。この結果を見ると、およそ 60° 付近までは θ_{max} がうまくコントロールされているものの、それ以上の角度ではメインローブは 60° 付近に残ったままで、その高さは低く、幅は大きくなっていく傾向が見られる。図 2.17 は θ_{max} を θ_s に対してプロットしたものである。グラフ中に示した $\theta_{max} = \theta_s$ の関係が全ての角度で成り立っていることが理想的だが、実際には θ_{max} は 60° 付近から θ_s との一致がくずれ、 θ_{max} は 70° 付近で頭打ちになっていることがわかる。これは、縦波の directivity function $K(\theta)$ が $\theta \rightarrow 90^\circ$ で 0 となることに起因していると考えられる。従って、固体の探傷にアレイ探触子を用いる場合には、 θ_s と θ_{max} が一致する範囲で使用するか、あらかじめ図 2.17 のような関係を調べておき、その関係を用いて入射角度を制御するようにしなければならない。また、想定する steering angle θ_s の範囲に上限を設定する場合には、放射パターンの評価指標として用いる $M_{\theta_{max}}(\theta_s)$ の最大値もその範囲内でのものとして定義することが妥当であろう。

2.5 シミュレーション波形を用いた開口合成法による欠陥形状再構成

2.5.1 問題設定と基礎式

問題設定

本研究では、図 2.18 に示すような空洞を有する無限弾性板をモデルとしてアレイ探触子を用いた探傷試験の 2 次元の数値シミュレーションを行う。またその結果を用いて開口合成法を行うことで様々な探傷条件が開口合成像に与える影響について明らかにする。以下ではモデルの諸元について述べた後、BEM による波動解析法とその結果を用いた A-scope 波形の計算方法について説明する。空洞形状としては円及び傾きの異なるスリットを考える。円の半径を 1mm スリット寸法は幅 \times 高さが $0.5\text{mm} \times 65\text{mm}$ で与えられるものとし、円、スリットいづれも中心は $(0, 25)\text{mm}$ にあるものとする。アレイ探触子の素子数 N 、探触子長 L と素子間隔は各々の解析例で異なるため、その都度記すこととする。板の材料定数は、波速 $c = 3000\text{m/sec}$ 、密度 $\rho = 7900\text{kg/m}^3$ によって与え、板厚は $h = 50\text{mm}$ とする。

定式化

基礎式 ここでは、アレイ探触子の各素子を板表面の面外方向集中荷重としてモデル化する。欠陥形状として円筒空洞 D を考えているので、 D からの散乱場を求める問題は二次元問題となり、面外方向変位を u として支配方程式は次のようなヘルムホルツ方程式で与えられる。

$$\nabla^2 u(\mathbf{x}, \omega) + k_T^2 u(\mathbf{x}, \omega) = -\frac{1}{\mu} \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s^i), (\mathbf{x} \in V_1) \quad (2.40)$$

ここでは \mathbf{x}_s^i は i 番目の素子の位置を、 k_T と μ はそれぞれ横波の波数およびせん断剛性を意味し、横波波速を c_T 、角周波数を ω 、密度を ρ で表せば、それらの間には次の関係がある： $k_T = \omega/c_T$ 、 $\mu = \rho c_T^2$ 。空洞境界 ∂D と板上面は自由表面であるものとするとき境界条件は表面力 $t(\mathbf{x}) \equiv \mu_i \frac{\partial u}{\partial n}$ を用いて次のように与えられる。

$$t(\mathbf{x}) = 0, (\mathbf{x} \in \partial D \cup B^+ \cup B^-) \quad (2.41)$$

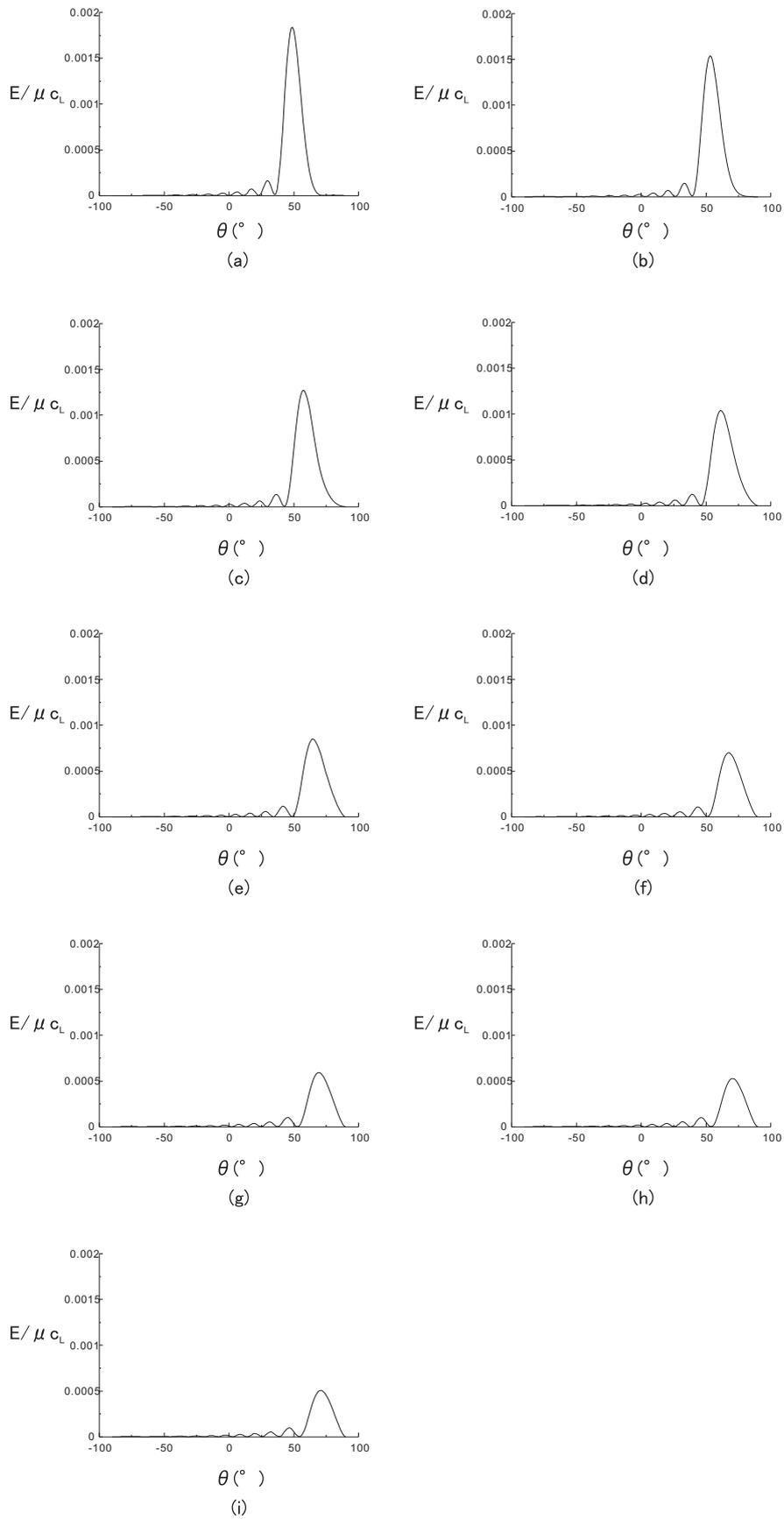


図 2.16: steering angle が大きい場合の放射パターン. (a) $\theta_s = 50^\circ$, (b) $\theta_s = 55^\circ$, (c) $\theta_s = 60^\circ$, (d) $\theta_s = 65^\circ$, (e) $\theta_s = 70^\circ$, (f) $\theta_s = 75^\circ$, (g) $\theta_s = 80^\circ$, (h) $\theta_s = 85^\circ$, (i) $\theta_s = 90^\circ$.

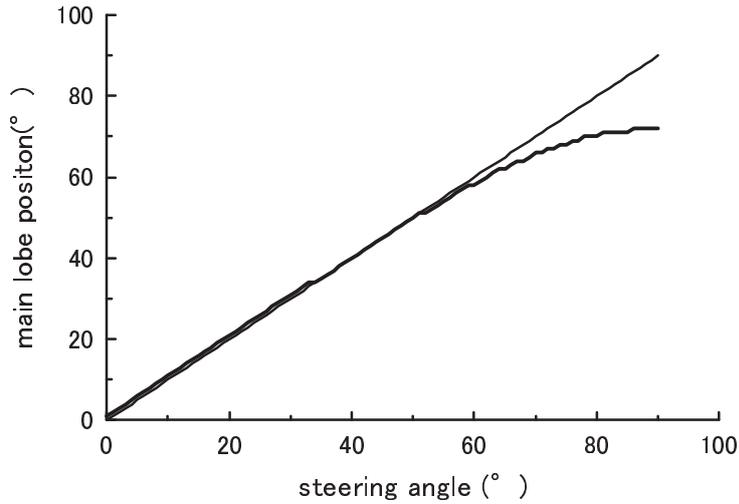


図 2.17: 与えた steering angle θ_s (細線) と得られた最大振幅を示す入射角度 θ_{max} (太線).

ここでは, 式 (2.40)-(2.41) で与えられる境界値問題をグリーン関数を用いた境界積分方程式を用いて解く. ただし, ここでいうグリーン関数 $G(x, y)$ とは非斉次なヘルムホルツ方程式

$$\nabla^2 G(x, y) + k_T^2 G(x, y) = -\mu^{-1} \delta(x - y), \quad (2.42)$$

に加えて, 界面 B^+, B^- で $G(x, y)$ の表面力成分 $H(x, y) = \mu \frac{\partial G}{\partial n_x}$ が条件

$$H(x, y) = 0 (x \in B^+ \cup B^-) \quad (2.43)$$

を満たす特異解である. 式 (2.41) の下に, $G(x, y), H(x, y)$ を用いれば, 次のような境界積分方程式を導くことができる.

$$\frac{1}{2} u(\mathbf{y}) + \int_{\partial D} H(x, \mathbf{y}) u(x) dS_x = G(x_s^i, \mathbf{y}), (\mathbf{y} \in \partial D) \quad (2.44)$$

式 (2.44) は全無限の基本解を用いた場合と異なり, 積分範囲が散乱体表面の ∂D のみとなっている. そのため, 境界要素法による解析において, 無限境界 B^+ および B^- 上に境界要素を配置する必要がなく, 計算に必要な記憶容量を大幅に節約することができる.

解析手法

境界要素法 グリーン関数は, 全無限の基本解 $U(x, y)$ と, 多重反射成分 $\sum_1^4 U^{(l)}(x, y)$ の和として表される. そこで, $U(x, y)$ と $\sum_1^4 U^{(l)}(x, y)$ を別々に計算するようにしておけば, 通常境界要素法のルーチンに加えて新たに必要なのは $\sum_1^4 U^{(l)}(x, y)$ を要素上で積分する部分である. $\sum_1^4 U^{(l)}(x, y)$ は正則であるから積分はすべて数値的に行うことができ, プログラム開発上特に困難な点はない. したがって, 既に述べた方法で Green 関数を数値的に評価すれば, 以下では式 (2.44) に基づく境界要素法を用いることができる.

逆フーリエ変換 2.5.1 で述べられた方法によって求めた周波数域での解析結果を適当な波源の時間変化を仮定して逆フーリエ変換をすることで, 変位の時間波形を合成すること

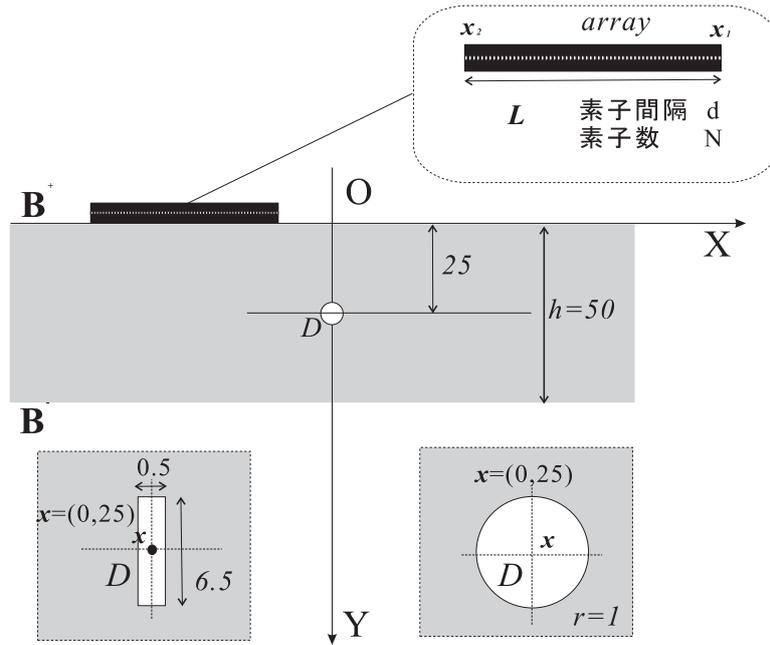


図 2.18: 問題設定

ができる. その結果を計測で得られる A-scope 波形とみなして開口合成を行う. 時間域へのフーリエ逆変換式は次の通りである.

$$\hat{u}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u(\omega) f(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (2.45)$$

ここに, $u(\omega)$ は周波数応答を, $f(\omega)$ は x_s^i における集中荷重の時間変化 $\hat{f}(t)$ をフーリエ変換したものである. $t = 1$ で最大振幅を持つ図 2.19 のようなリッカー波を $\hat{f}(t)$ として用いる. 図 2.20 はそのスペクトル $|f(\omega)|$ であり, 中心周波数が 2MHz となっていることが分かる.

2.5.2 シミュレーション波形を用いた開口合成

ここでは, シミュレーション波形を用いて行った開口合成の結果を示す. これまでも述べた通り, 板材における探傷では送受信点を板表面にしか取ることができないために開口が制限され, その結果開口合成による欠陥形状の再構成能は著しく低下する. 以下では, 開口の制限が再構成像に与える影響についてみるために, はじめに無限体中の空洞に対して全周方向から観測を行った場合の開口合成結果を示す. 次に, 板内部の空洞形状の再構成を行い, その結果を示す. その際, 送受信点の数や配置の影響が明らかになるように, それらの条件をいくつか変えて行った結果を示す. また, 多重反射波を利用することでどの程度開口の制限による影響を緩和できるか示すために, 多重反射波を利用した場合とそうでない場合の結果の比較も行う. 以下では, 空洞の形状として円孔とスリットを扱うが, 板材の場合については傾きの異なる三種類のスリットを扱い, 結果を示す.

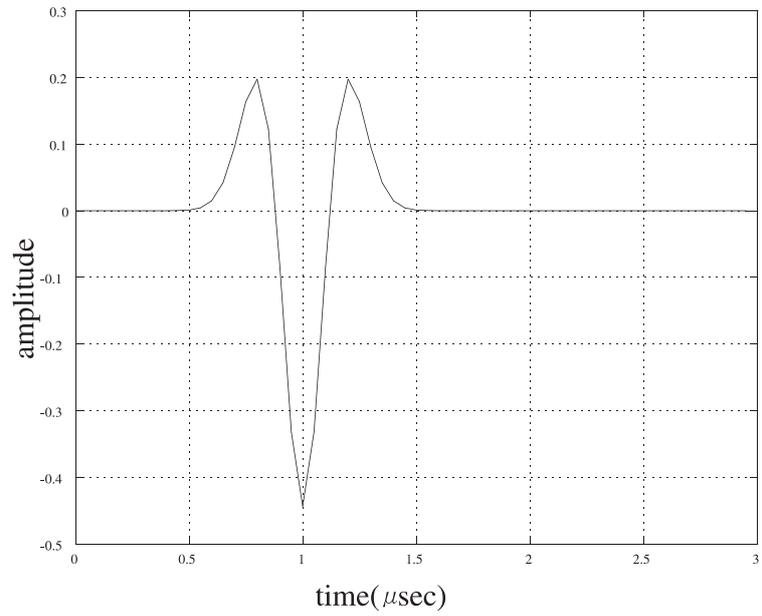


図 2.19: 集中荷重の時間変化項 $f(t)$

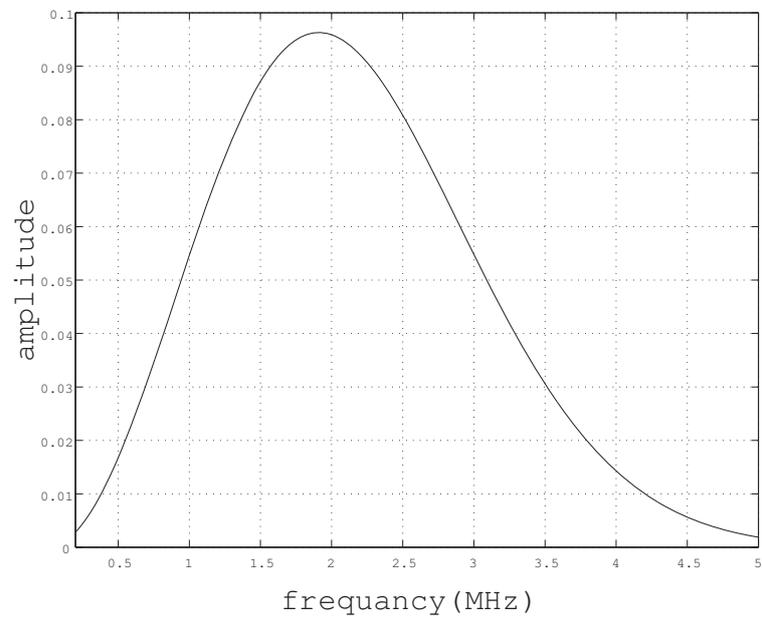


図 2.20: 集中荷重の時間変化項 $f(t)$ のフーリエスペクトル

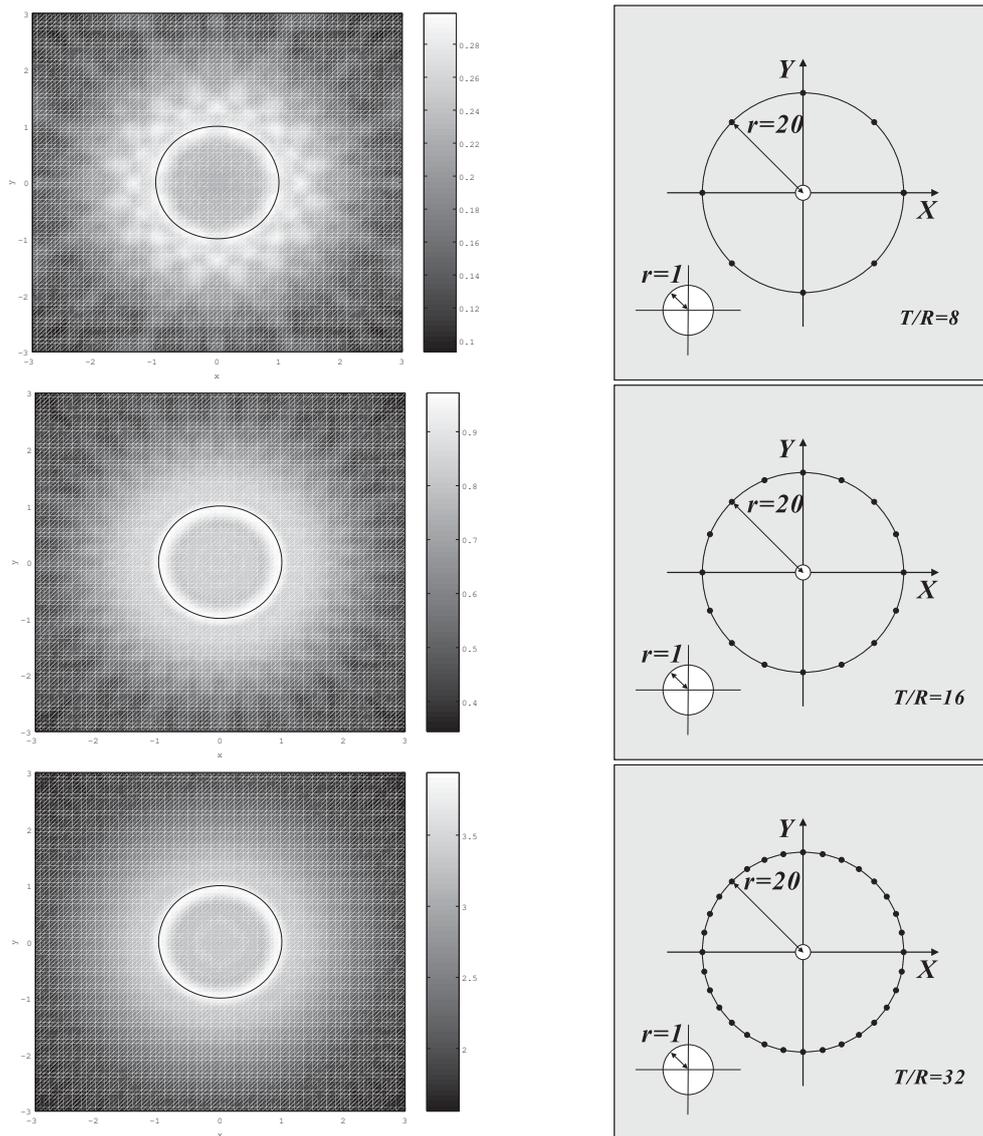


図 2.21: 無限体中存在する円形空洞の開口合成像 (送受信点数は上段より 8, 16, 32 点)

無限体中の空洞形状再構成

円孔の場合 図 2.21 に開口合成の結果を示す. 左図は, 式 (2.8) によって計算した $S(x)$ をグレースケールで示したものであり, 右図は送受信点位置の配置と画像化領域を示したものである. 上から順に送受信点数 N を $N = 8, 16, 32$ としたときの結果である. 開口合成像 $S(x)$ の絶対値にはあまり意味がないため, そのスケールは示していないが, 明るく見える部分では大きな値が得られている. いずれの場合も, 少ない送受信点数にも関わらず, 円孔の境界部分がうまく再現されていることがわかる. また, 送受信点数が多くなるにつれて, 境界が滑らかに変化する様子を再構成できるようになっており, これは送受信点数 N は画像の解像度と関係していることを意味している. 波長との兼ね合いはあるものの, 当然ある程度までは N が大きいほど解像度の面で有利になることが予想される.

スリットの場合 図 2.22 に無限体中スリットの開口合成像を示す. スリットの寸法は同図右側に示した通りであり, 送受信点の配置は円孔の場合と同様にしてある. スリットの

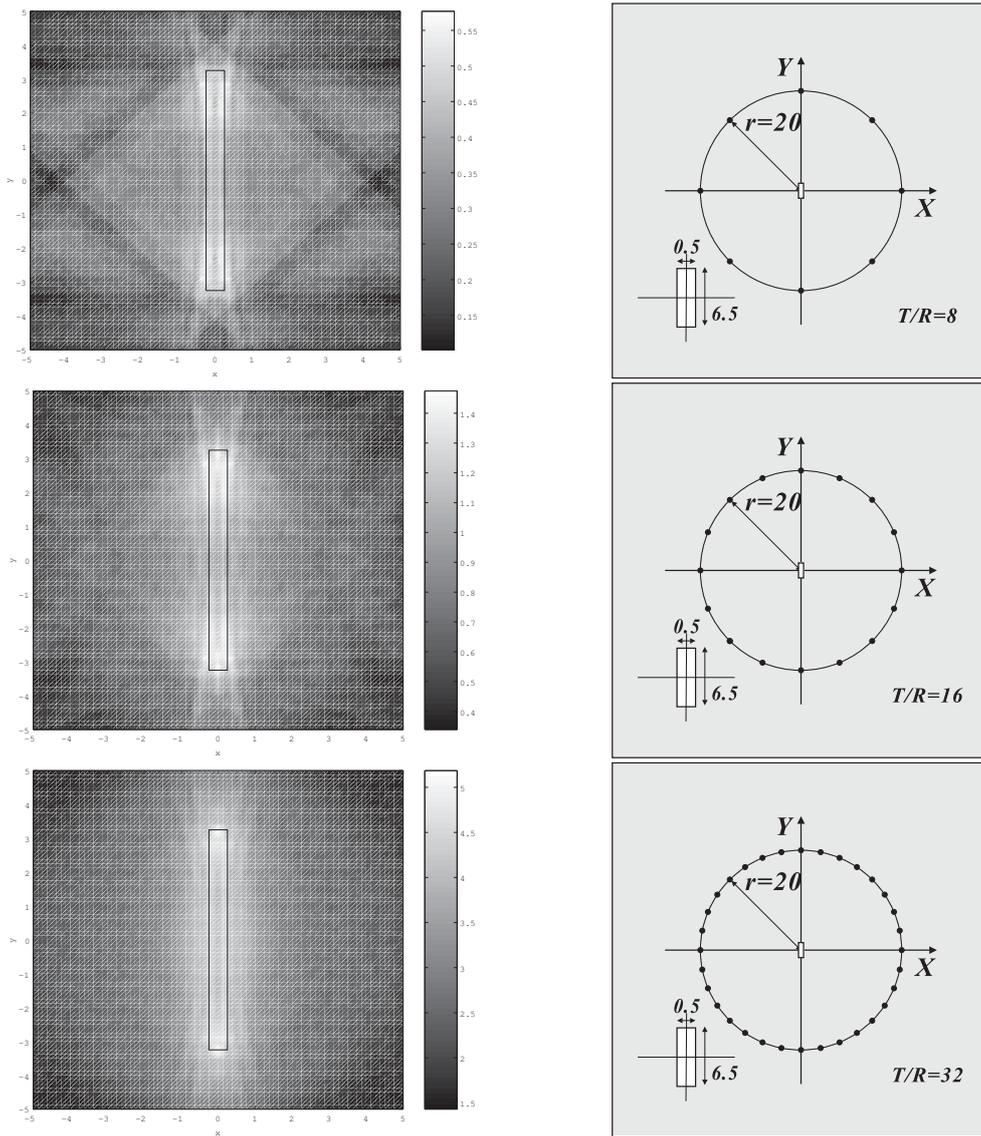


図 2.22: 無限体に存在する矩形スリットの開口合成像 (送受信点数は上段より 8, 16, 32 点)

場合, その上, 下端部が明るく示されている一方で, それ以外の側面の境界はあまりはっきりと現れていないことがわかる. これは, 上下の端部エコーはどのような送受信点の配置においても同程度の振幅をもって観測されるが, 側面で鏡面反射した散乱波は振幅は大きいものの強い指向性を持つために特定の送受信点の組み合わせでしか受信されず, 結果として全ての波形を重ね合わせたときにはスリット端部で $S(x)$ が大きな値をもってくるためであると考えられる.

板内部の空洞形状再構成

多重反射波の利用 図 2.23 ~ 図 2.24 に式 (2.9) を用いて行った円孔およびスリットの再構成結果を示す. スリットの寸法や送受信点数や位置はこれらの図の右側に示した通りである. ここでは, 多重反射波を利用することの効果について調べるために, 式 (2.9) の最大反射回数 M を 0, 1, 2 とし, それ以外の条件は全て同一にして行った開口合成の結果が示してある. 円孔の場合について見ると, $M = 0$ すなわち直達波のみを用いた場合には入

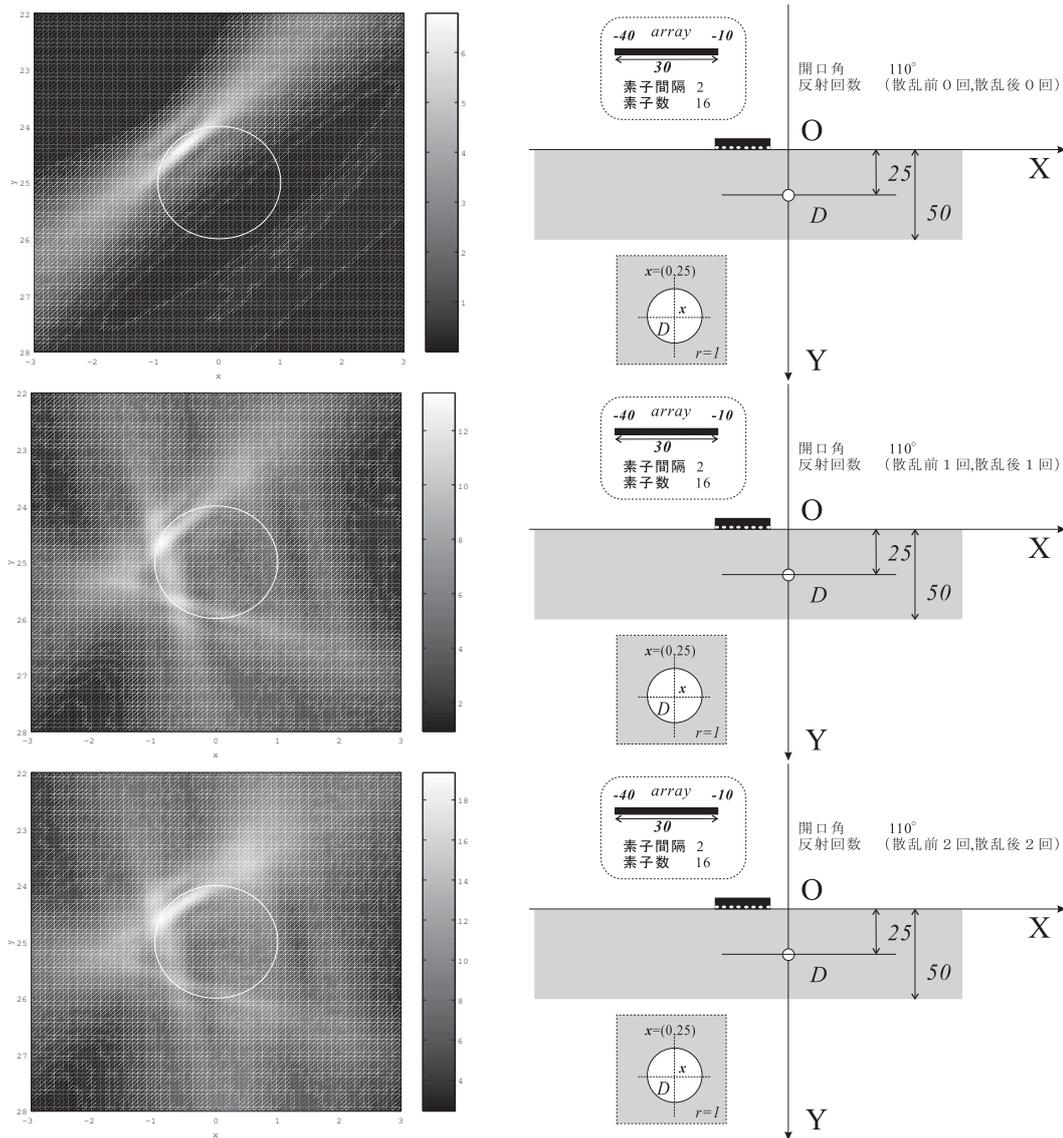


図 2.23: 板材中の円形空洞に対する開口合成像 (考慮した多重反射波の回数は上段より 0, 1, 2 回)

射波によって直接照らされる部分だけが再現されているが、 $M = 1, 2$ として多重反射波を利用すると、円孔の右側および、左下方の一部に像が結ばれていることがわかる。ただし、いずれの結果においても明るく見えている部分は、あたかも円孔境界上の点を通る接線のようになっており、ここでの再構成結果のみからは円孔境界の曲率についての推定は難しい。

スリットの場合について $M = 0$ のケースを見ると、上下端部付近が再構成されている。しかし、この結果からは正確なスリット端部位置の特定は難しく、開口合成像からスリットの長さを読み取るためには側面も再構成されていなければならないといえる。一方、 $M = 1$ あるいは 2 とした場合には、スリットの左側面が現れており、これは明らかに側面で鏡面反射した散乱波が反射波に含まれていたことを意味している。これらのケースでは、スリットのおよそ下半分ではスリット左側面と開口合成像により対応がみられるが、上半分ではやや左像が結ばれている。これは、左下方からスリットに入射する波に対しても端部エコーが発生し、その影響が開口合成像にも現れているためである。

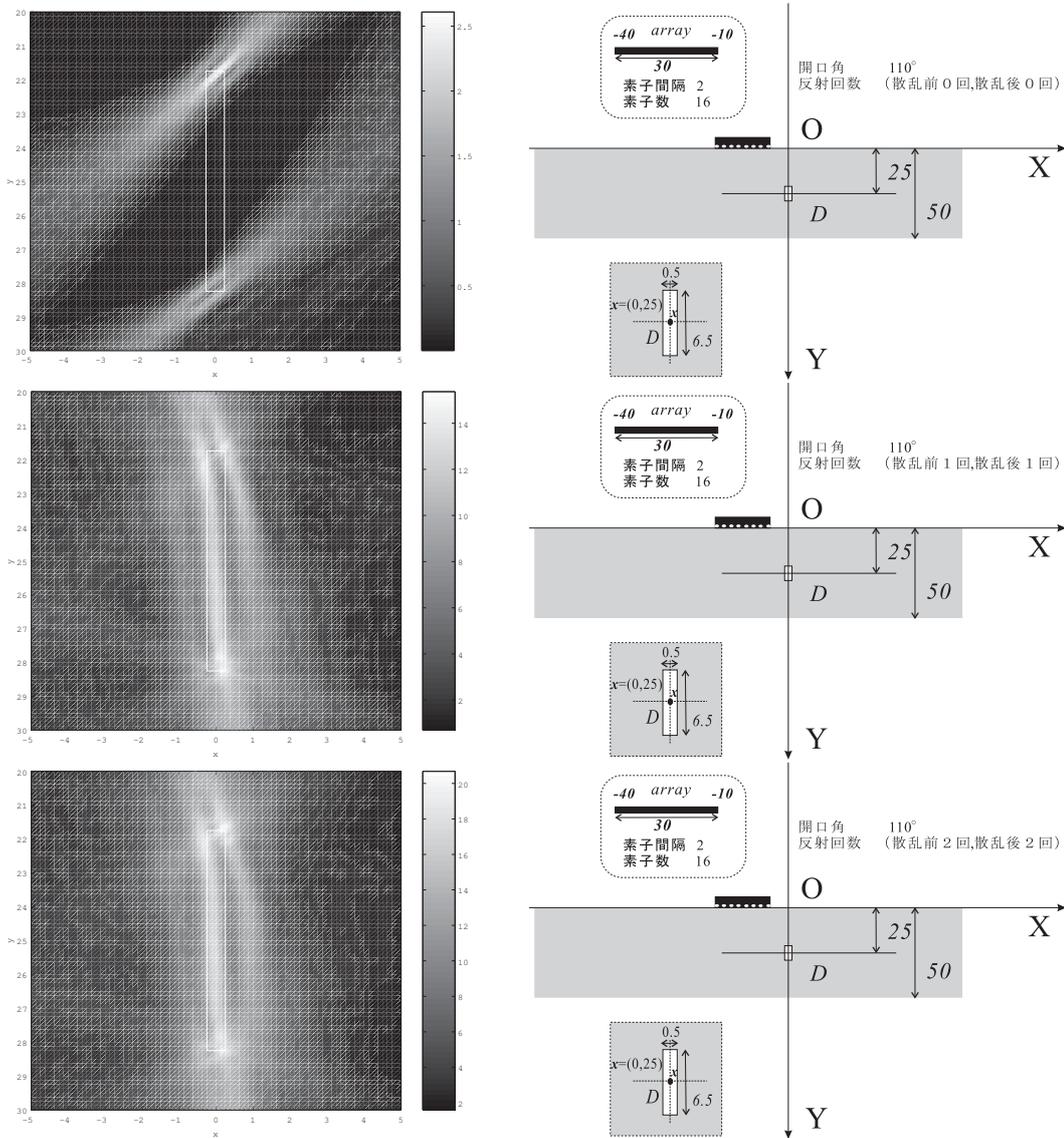


図 2.24: 板材中の矩形スリットに対する開口合成像 (考慮した多重反射波の回数は上段より 0, 1, 2 回)

開口角の定義 以下で開口角と開口合成像の関係について検討するためにここで開口角の定義について述べておく。

図 2.25 に示すように、板表面の N 個の点を x_1, x_2, \dots, x_N とし、送信点 x_i および受信点 x_j はそのいずれかであるとする。ここで、画像化領域の中心点を o として、 $x_i - o$ と $x_j - o$ が、 x 軸の正方向となす角をそれぞれ θ_i, θ_j で表す。ただし、これらの角度は紙面を上からみて反時計回りに測るものとする。今仮に、点 o を通る反射面があったとすれば、 (x_i, x_j) の送受信点の組によってもっとも強い反射波が観測されたとすれば、そのとき反射面の法線は $(\theta_i + \theta_j)/2$ の方向を向いているはずである。そこで、 (x_i, x_j) の送受信点で計測されるデータにはこの方向を向く面の情報が主に含まれており、それが開口合成像にも反映されるものとする。このような考え方に基づき、計測は全ての (x_i, x_j) の組によって行われるとすれば、その結果情報を得ることができる面の向き範囲は次の式で与えられる。

$$\Delta\theta = \max_{1 \leq i, j \leq N} \left\{ \frac{\theta_i + \theta_j}{2} \right\} - \min_{1 \leq i, j \leq N} \left\{ \frac{\theta_i + \theta_j}{2} \right\} \quad (2.46)$$

式 (2.46) で与えられる $\Delta\theta$ は開口合成法による欠陥像の再構成能に関係があると考えられ、ここではこれを開口角として定義する。

板表面での反射波を開口合成に利用する場合には、図 2.26 を参考にして、 x_i と o を結ぶ入射波の伝播経路から θ_i を、 x_j と o を結ぶ散乱波の伝播経路から θ_j を定義する。多重反射波を用いる場合、 $\Delta\theta$ の値は自明ではないが、直達波に関しては明らかに、

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_N \quad (2.47)$$

である。

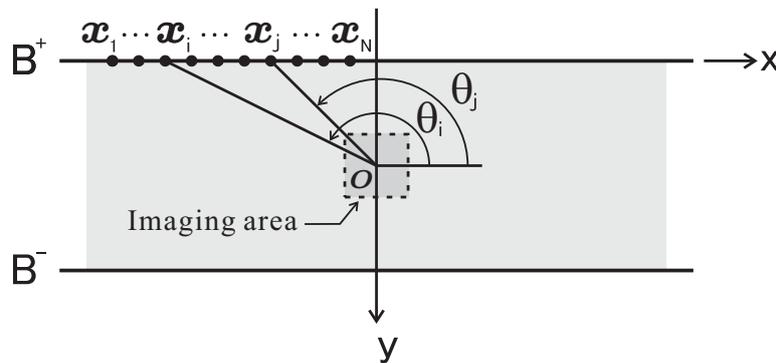


図 2.25: 開口角の定義 (直達波のみ)

開口角と開口合成像の関係について 図 2.23, 図 2.24 に示した開口合成像について、ここでは開口角との関係から検討する。そこで、これらの図中に示された送受信点の配置に対して計算れる、開口角の大きさとその方向が分かるように

$$\theta_{max} = \max_{1 \leq i, j \leq N} \left\{ \frac{\theta_i + \theta_j}{2} \right\} \quad (2.48)$$

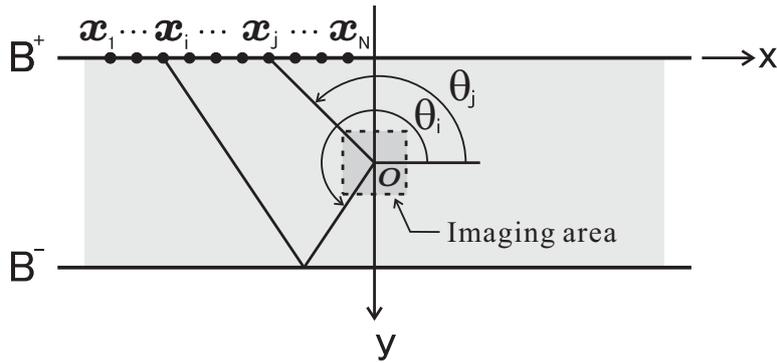


図 2.26: 開口角の定義 (反射波を考慮する場合)

$$\theta_{min} = \min_{1 \leq i, j \leq N} \left\{ \frac{\theta_i + \theta_j}{2} \right\} \quad (2.49)$$

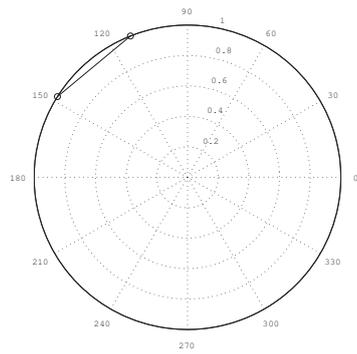
によって定義する, $\theta_{max}, \theta_{min}$ を図 2.27 のように極形式のグラフ上にプロットする. ただし, $\theta_{max}, \theta_{min}$ は, $x_i \rightarrow o \rightarrow x_j$ を結ぶ伝播経路ごとに求め, 直達波だけからなる経路に対してはグラフ上半径 1 の場所に, 往路 ($x_i \rightarrow o$) あるいは復路 ($o \rightarrow x_j$) のいずれかで一回の反射を伴う経路は半径 0.8 の位置に, 2 回の反射を伴う経路は半径 0.6 の位置にプロットしてある. 図 2.27 はこのようなグラフを, 最大反射回数 $M = 0$ 回, 1 回, 2 回の場合について別々に示したものである.

図 2.23 に示した円孔に対する開口合成像を, これら図 2.27 のグラフに照らして見直せば, 開口が得られている方向で円孔の境界が再現されていることがはっきりする. 特に, $M = 1, 2$ の場合では, 複数の伝播経路を考慮することで全体としての開口を大きくすることができ, その結果広い範囲で円孔の境界が再現されている. しかし, 経路ごとに見た開口は互いに重なっていたり, 隙間が開いていたいたりするために,重なっている方向では像が一層強調される一方, 開口の隙間にあたる方向では滑らかに変化する境界の様子を再現することができず, 境界の曲率について誤った解釈を与えかねない像となっている.

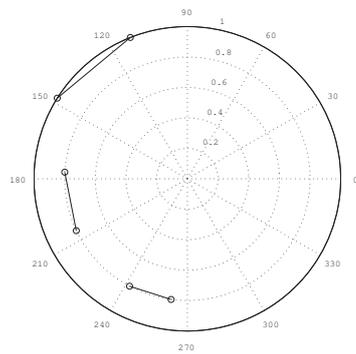
同様な視点からスリットに対する結果 (図 2.24) をみると, 一見, 開口角と開口合成像にはほとんど相関がないように見える. これは, スリット側面を再構成するためには, スリット面の向きである負の x 軸方向, すなわち図 2.27 で言う 180 度方向に開口が得られていることが重要であり, 全体としての開口の大きさはあまり画像化に際してあまり影響がないためである. 実際, 図 2.24 をみれば $M = 1, 2$ のケースではともに 180 度方向に開口が得られているために, ほとんど同じような像が現れている. この点については, 後に示す送受信点位置を変化させた場合の開口合成像を示す際にも再度言及する.

素子間隔の影響 これまでの結果から, 開口合成像と開口角の間には密接な関係があることが示された. 次に, 開口に関する条件を同じにした場合素子間隔の違いが開口合成像にどのような影響を与えるかについて調べる. ここでは, 素子間隔 d を 1mm, 2mm, 4mm とし, それぞれの場合について開口角がほぼ同一となるように表 2.1 に示すような条件で開口合成を行う.

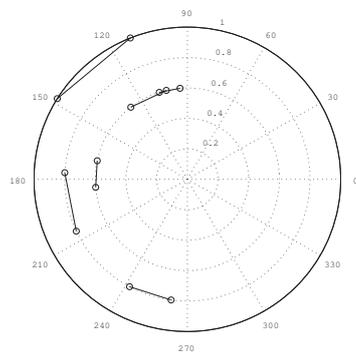
ここでも欠陥形状は円孔およびスリットをとり, 両者に対して行った開口合成の結果を図 2.28 および図 2.29 に示す. これらの結果を見ると円孔, スリットの場合とも, 開口合成像には素子間隔の違いによってほとんど変化が現れないことがわかる. ところで, 最大



散乱回数 0 回



散乱回数 1 回まで



散乱回数 2 回まで

図 2.27: 散乱回数による開口角の違い

表 2.1:

| $x_1(\text{mm}) \sim x_2(\text{mm})$ | 素子数 | 素子間隔 (mm) | 探触子長 (mm) |
|--------------------------------------|-----|-----------|-----------|
| $(-63,0) \sim (0,0)$ | 64 | 1 | 63 |
| $(-62,0) \sim (0,0)$ | 32 | 2 | 62 |
| $(-60,0) \sim (0,0)$ | 16 | 4 | 60 |

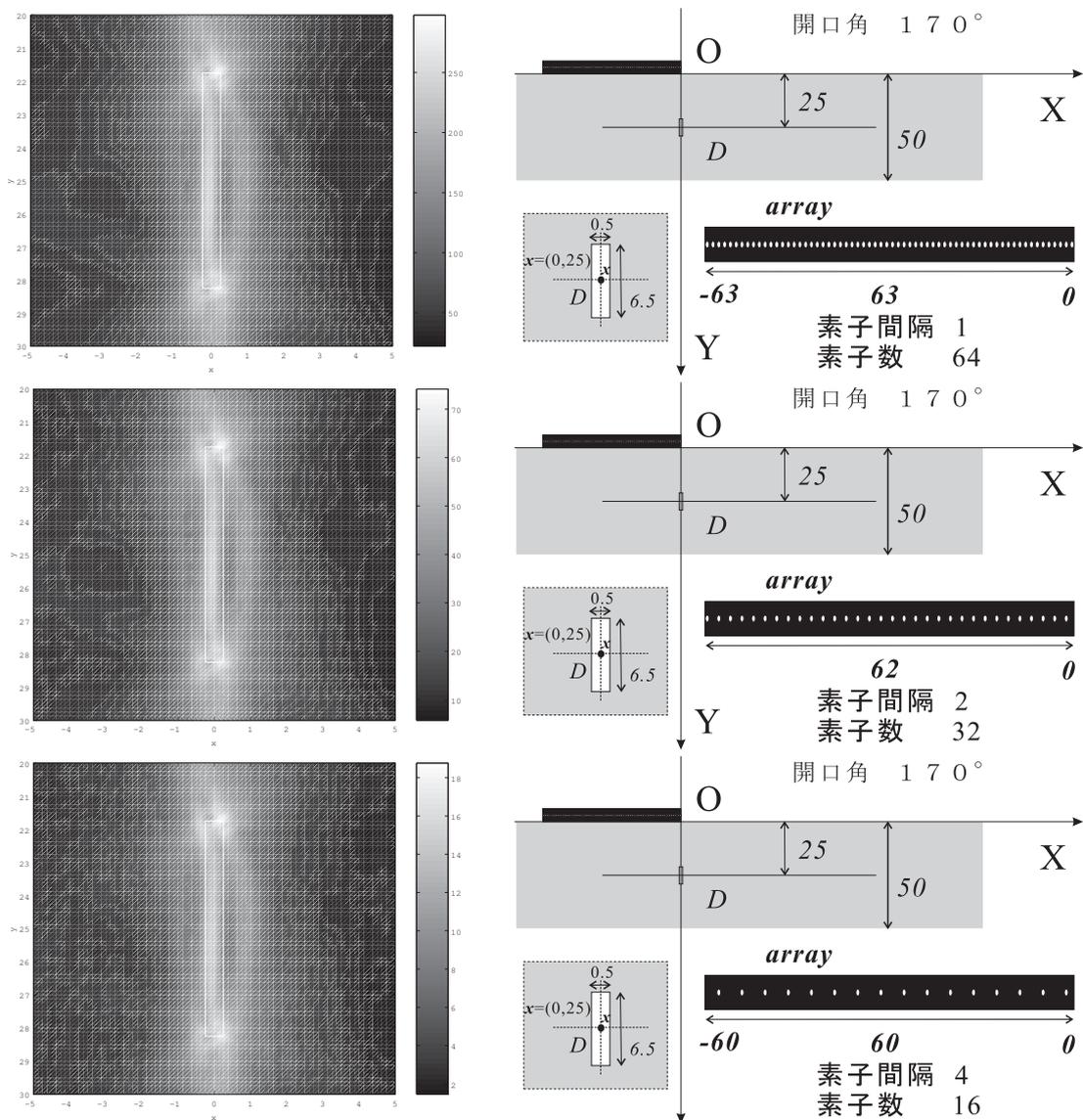


図 2.29: 素子間隔が異なる場合に得られる矩形スリットの開口合成像 (素子間隔は上段より 1, 2, 4mm)

表 2.2:

| $x_1(\text{mm}) \sim x_2(\text{mm})$ | 素子数 | 素子間隔 (mm) | 探触子長 (mm) |
|---------------------------------------------------|---------------|-----------|---------------|
| $(-40,0) \sim (-10,0)$ | 16 | 2 | 30 |
| $(-60,0) \sim (-30,0)$ | 16 | 2 | 30 |
| $(-80,0) \sim (-50,0)$ | 16 | 2 | 30 |
| $(-100,0) \sim (-70,0)$ | 16 | 2 | 30 |
| $(-40,0) \sim (-10,0) \cup (-100,0) \sim (-70,0)$ | 16×2 | 2 | 30×2 |

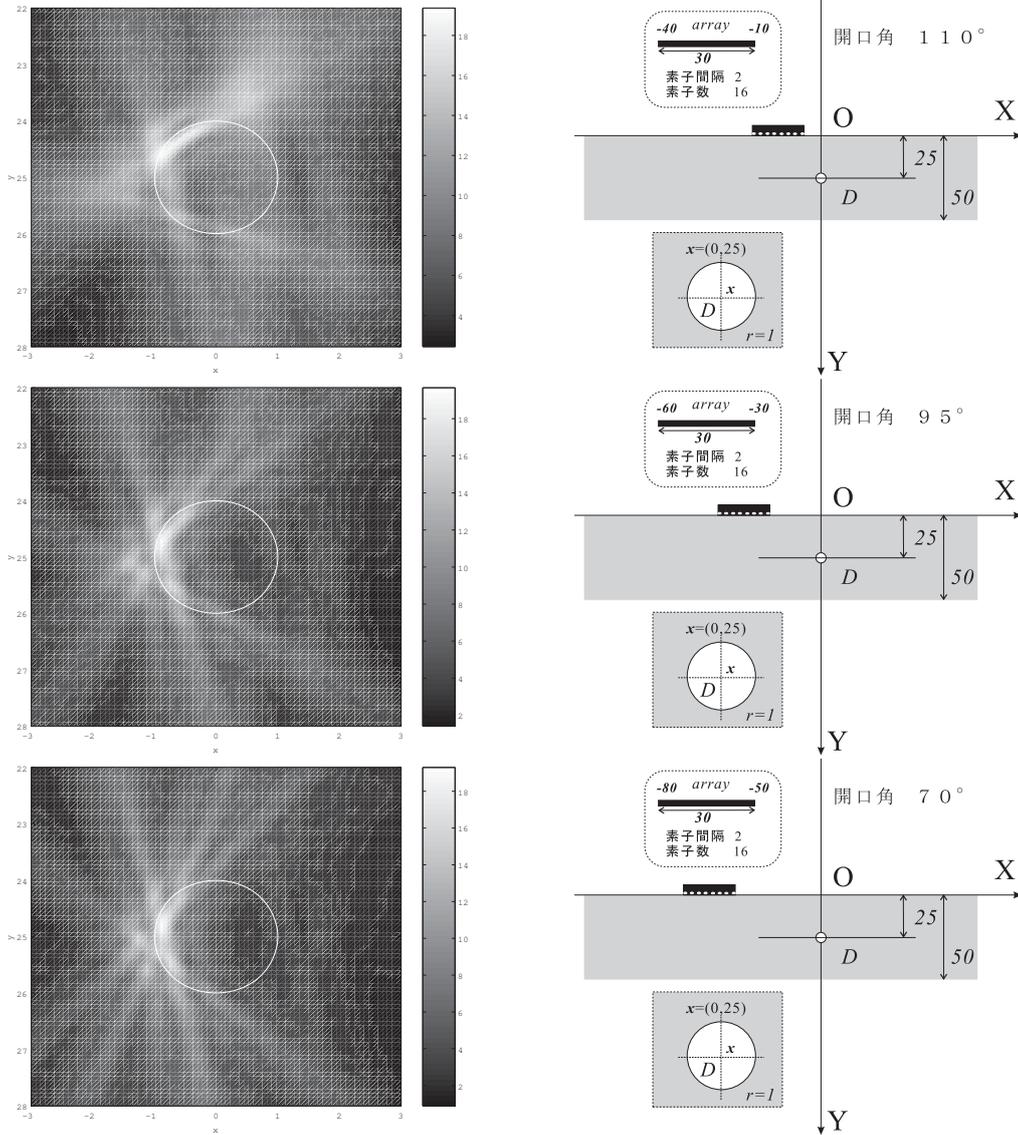


図 2.30: 探触子位置が異なる場合に得られる円形空洞の開口合成像

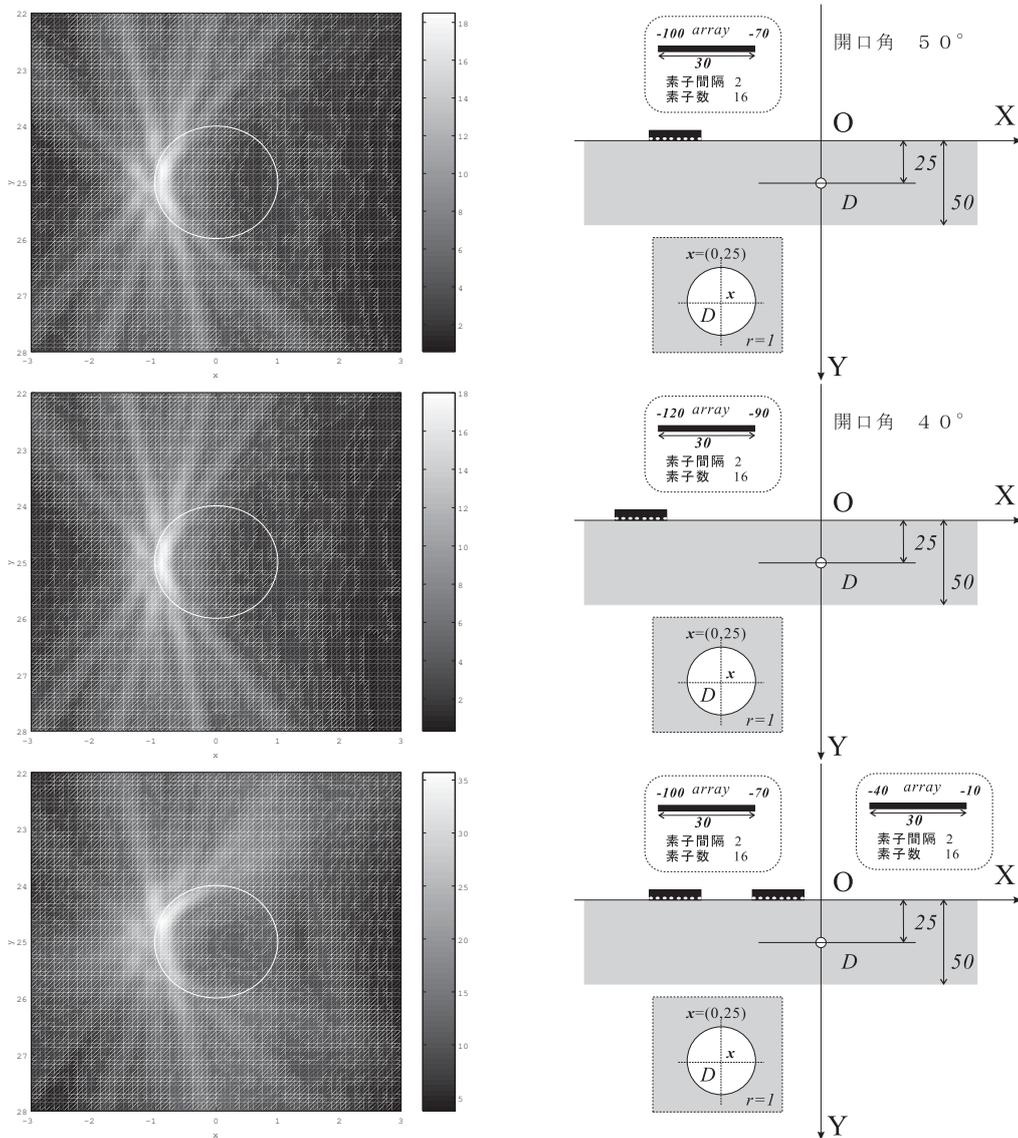


図 2.31: 探触子位置が異なる場合に得られる円形空洞の開口合成像

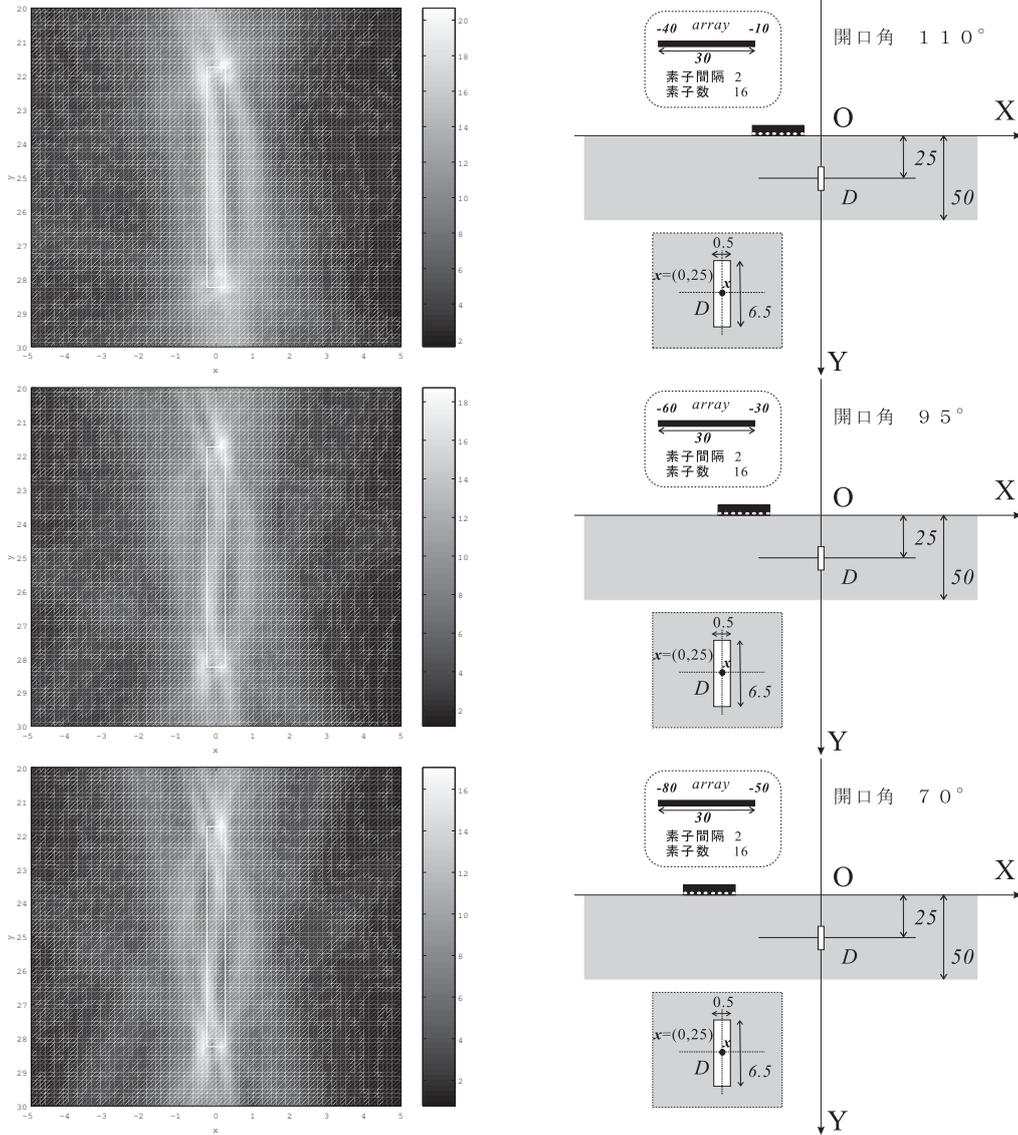


図 2.32: 探触子位置が異なる場合に得られる矩形スリットの開口合成像

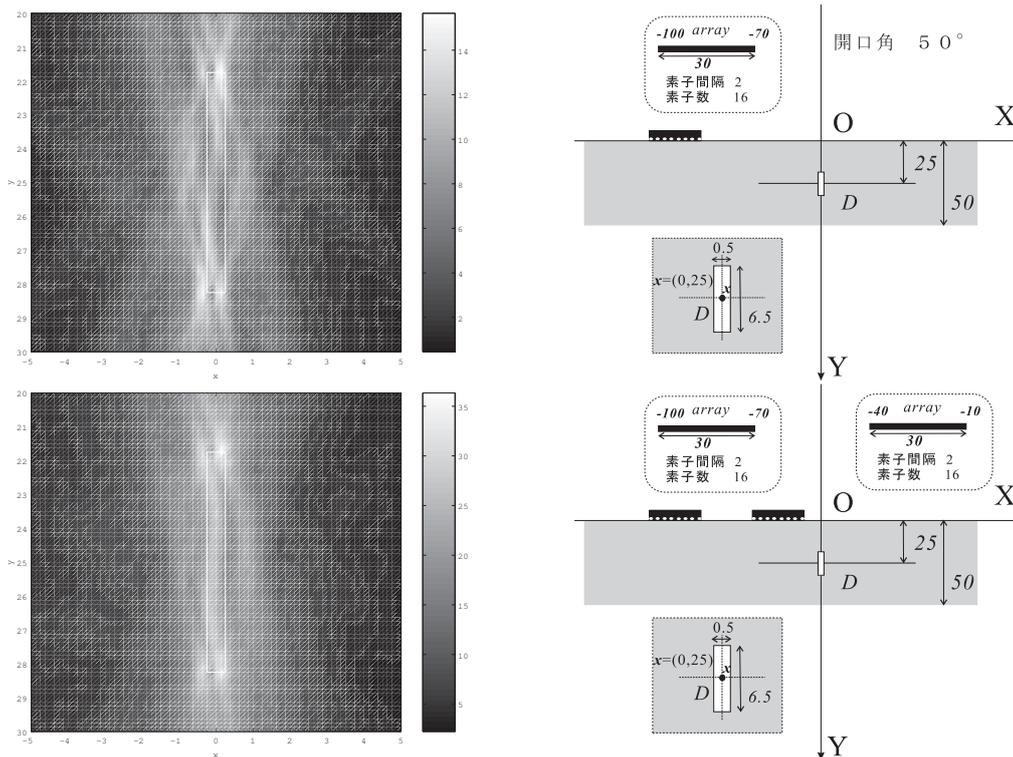


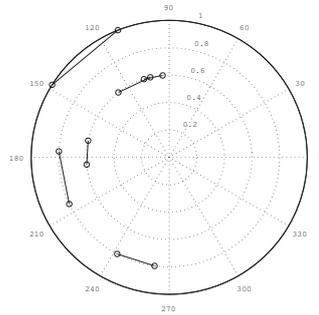
図 2.33: 探触子位置が異なる場合に得られる矩形スリットの開口合成像

に、ここでも先に開口の分布について調べておくことにする。図 2.34 は図 2.27 と同様にして経路ごとに θ_{max} , θ_{min} をプロットしたグラフである。このグラフをみると、探触子位置が欠陥に近いほど全体として大きな開口が得られているが、経路ごとの開口の間に生じる隙間もやはり大きいことが分かる。逆に、探触子が欠陥から離れると、全体の開口サイズは減少するものの、経路別の開口同士は互いに接近して 180 度方向に集まってくる。これらの点を踏まえて、円孔に対する結果をみると、探触子が欠陥に近い場合は主に左上部分の境界が再現されているが、探触子位置が欠陥から離れるにつれて、円孔左側の境界がきれいに再構成されるようになってゆく様子が現れているのが分かる。

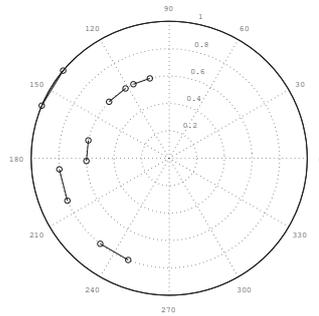
スリットの場合についても開口の変化と開口合成像の間に相関が認められ、180 度方向に開口が得られている探触子が欠陥に最も近い二つのケースではスリットの左側面がよく再構成されているが、それ以外の場合には開口合成画像欠陥形状は次第に湾曲して、欠陥位置との対応が取れるのは上、下端部程度になっている。

2.6 逆散乱解析

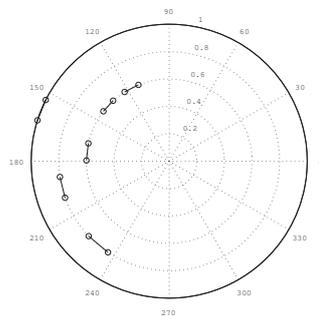
前節では、開口合成法をシミュレーション波形に適用して欠陥形状の再構成を試みた。開口合成法は式 (2.7) や (2.8) からわかるように基本的には計測された波形を足し合わせるという非常に簡単なアルゴリズムから成っている。そのために適用性は広く、レーダー、医療、地震探査など多くの分野で用いられている方法である。しかし理論的な立場に立てば、開口合成法では超音波の到達時刻と振幅の関係しか用いておらず、欠陥からの反射あるいは散乱に含まれている情報を十分に活用しているとはいえない。例えば、探触子から発せられる超音波の波形がバースト波のような連続した正弦波である場合、受信される反射波の波形もバースト波のようになるであろうことは容易に想像される。その



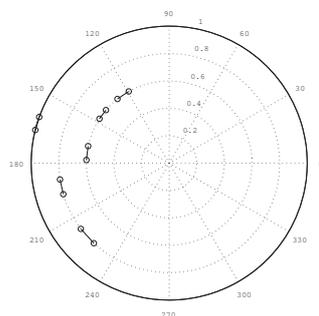
探触子位置 $(-40,0) \sim (-10,0)$



探触子位置 $(-60,0) \sim (-30,0)$



探触子位置 $(-80,0) \sim (-50,0)$



探触子位置 $(-90,0) \sim (-70,0)$

図 2.34: 位置による開口角の違い

ような場合には開口合成法によって得られる欠陥画像は大きく波打ったような性状を示して、欠陥の境界位置を正確に再現することはできないであろう。このように開口合成法は単純な波の重ね合わせによるものであるから、その精度は入射超音波の波形や弾性波動の指向性などに大きく影響される。

欠陥による反射波あるいは散乱波は欠陥に関する情報を多く含んでいる。反射波あるいは散乱波は波動理論を用いれば正確に表すことができ、そのような波動理論に基づいた逆解析手法を用いれば高精度な欠陥形状の再構成ができると考えられる。ここではそのような逆解析手法の一つである線形化逆散乱解析を用いて欠陥の形状再構成を試みる。

線形化逆散乱解析の定式化

簡単のために 2.5.1 節と同様、2 次元 SH 波動の散乱を考える。2 次元面内波動あるいは 3 次元波動に対しても全く同じように定式化を行えることはいうまでもない。

2 次元無限弾性体中に境界 ∂D を持つ空洞があるとき、空洞による散乱波の周波数域での変位は次式で表される。

$$\begin{aligned} u^{sc}(\mathbf{y}, \omega) &= - \int_{\partial D} \mu \frac{\partial U}{\partial n_x}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u(\mathbf{x}) dV_x \\ &= - \int_{R^2} \gamma(\mathbf{x}) \mu \frac{\partial U}{\partial n_x}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u(\mathbf{x}) dV_x \end{aligned} \quad (2.50)$$

ここに、 μ , U , u , R^2 はそれぞれせん断剛性、基本解、変位、および、2 次元領域全体を表し、 γ は空洞の境界上のみで値を持つ特異関数とよばれる関数である。今、入射波 u^{in} が点 z にある単位集中面外力によって発せられるとすると、 $u^{in}(\mathbf{x}) = U(\mathbf{x}, z)$ と書ける。また、入射波源 z と観測点 \mathbf{y} が空洞から十分に離れた遠方場にあり、周波数は十分に高周波であるとすると、境界 ∂D 上の変位は入射波と平面境界上での反射の和として近似 (Kirchhoff 近似) することができ、式 (2.50) は次式のようになる。

$$\begin{aligned} u^{sc}(\mathbf{y}, \omega) &\approx -F(k_T) \frac{k_T}{8\mu} \sqrt{\frac{1 + \hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{z}}}{2|\mathbf{y}||\mathbf{z}|}} e^{ik_T(|\mathbf{y}||\mathbf{z}|)} \\ &\quad \times \int_{R^2} \gamma(\mathbf{x}) e^{-ik_T \mathbf{x} \cdot (\hat{\mathbf{y}} + \hat{\mathbf{z}})} dV_x \end{aligned} \quad (2.51)$$

ここに $F(k_T)$ は入射波の周波数スペクトル、 $k_T = \omega/c_T$ は波数、 $\hat{\mathbf{x}}$ は $\mathbf{x}/|\mathbf{x}|$ なる単位ベクトルである。上式の積分は空洞の境界を表す関数 $\gamma(\mathbf{x})$ のフーリエ変換そのものであるから、次式のように逆フーリエ変換を施せば、散乱波 u^{sc} から関数 $\gamma(\mathbf{x})$ 、すなわち、空洞の境界を再構成することができる。

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{2\mu}{\pi} \int_{K^2} \sqrt{\frac{2|\mathbf{y}||\mathbf{z}|}{1 + \hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{z}}}} \frac{u^{sc}(\mathbf{y}, \omega)}{F(k_T)} e^{ik_T(\mathbf{x} \cdot (\hat{\mathbf{y}} + \hat{\mathbf{z}}) - (|\mathbf{y}||\mathbf{z}|))} \frac{d\mathbf{k}}{k_T} \quad (2.52)$$

ここに、 $\mathbf{k} = k_T(\hat{\mathbf{y}} + \hat{\mathbf{z}})$ である。ここに、式 (2.52) は周波数域における定式化となっており、計測された散乱波の時間波形 $\tilde{u}^{sc}(\mathbf{x}, t)$ を周波数域に変換したフーリエ振幅 $u^{sc}(\mathbf{x}, \omega)$ を用いている。

一方、式 (2.52) において波数 k_T に関する積分を実行することによって次のように時間域における表現式を得ることができる。式 (2.52) における波数ベクトル \mathbf{k} を $\mathbf{k} = k_T|\hat{\mathbf{y}} + \hat{\mathbf{z}}|(\cos \theta, \sin \theta)$ とおいて、

$$a(t, \theta) = Re \int_0^\infty \frac{u^{sc}(\mathbf{y}, \omega)}{F(k_T)} e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.53)$$

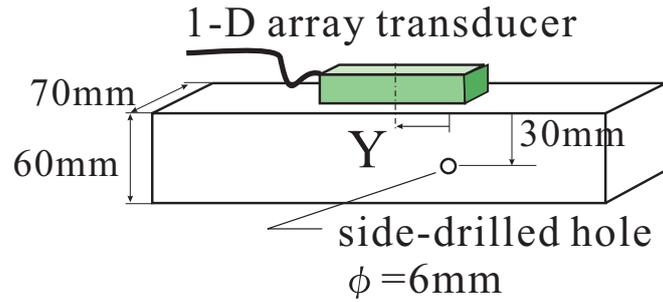


図 2.35: 横穴に対するリニアアレイ探傷実験 .

で定義される $a(t, \theta)$ を用いると, 式 (2.52) は次式のように書ける .

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{4\mu}{\pi c_T} \int_0^{2\pi} \sqrt{|\mathbf{y}||\mathbf{z}|} a(t, \theta) d\theta \quad (2.54)$$

ここに, $c_T t = |\mathbf{y}| + |\mathbf{z}| - \mathbf{x} \cdot (\hat{\mathbf{y}} + \hat{\mathbf{z}})$ である . 式 (2.53) で定義される $a(t, \theta)$ は θ 方向における補正された散乱振幅と考えることができるから, 式 (2.54) は様々な方向の散乱波を送受信点から空洞までの距離の影響を補正して重ね合わせることによって空洞境界を表す関数 γ を再構成していることになる . したがって, 形式的には式 (2.54) は開口合成法と類似のアプローチを表しているが, 単に波形を重ね合わせるのではなく, 波動理論に基づいて波形処理を行っている点が開口合成法と大きく異なる . このような逆散乱解析手法を用いることで精度良く空洞形状を画像表示することができる . 以下に適用例を示す .

線形化逆散乱解析の適用例 — 開口合成法との比較

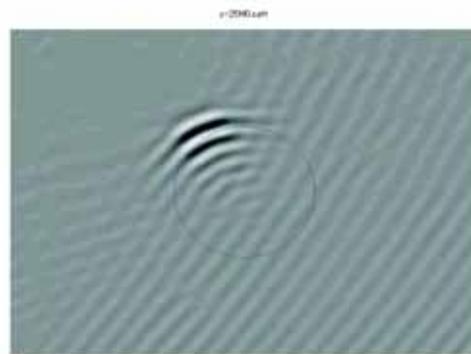
実験方法の詳細については次章において述べるが, 図 2.35 に示すような $\phi = 6\text{mm}$ の横穴を空けた鋼材試験体に対して SH 波のリニアアレイ探触子 (周波数 2MHz, 素子寸法: 幅 $a=0.7\text{mm}$, 素子間隔 $d = 2\text{mm}$, 長さ $L = 12\text{mm}$, 素子数 $N = 32$) を用いたアレイ探傷実験を実施した . 超音波の送受信はすべての素子の組み合わせで行われ, 32×32 個の波形を計測し, その波形を線形化逆散乱解析と開口合成法の両方で解析して結果を比較した .

図 2.36 は開口合成法によって得られた横穴の境界の画像である . 図 (a) はリニアアレイ探触子の中心を横穴の真上に置いたとき ($Y = 0\text{mm}$) の計測データを用いて得られた画像であり, 図 (b), (c) は探触子を横穴からそれぞれ $Y = 25\text{mm}$, 50mm だけ左方にずらして計測したデータを用いて得た画像である . いずれも探触子からの入射波に直接照射される横穴の境界部分がある程度再現されているものの, 境界以外の部分においてもさざ波のような模様が見られる .

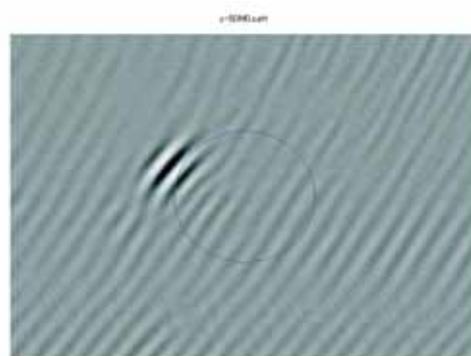
一方, 図 2.37 は Kirchhoff 近似を用いた線形化逆散乱解析法によって得られた横穴の境界の画像である . 用いた計測データは図 2.36 と同じものであるが, 図 2.36 に比べて, さざ波上の模様はほとんどなく, 画面全体に分布するノイズレベルも低く, 入射波によって照射される境界部分の形状が明瞭に再現されていることが分かる . このように, 線形逆散乱解析による波形処理を行うことで, 欠陥形状の再構成の精度が向上することが確認できた .



(a)

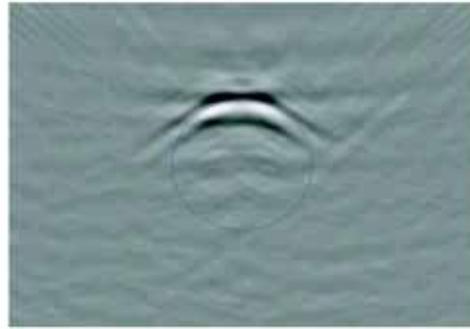


(b)

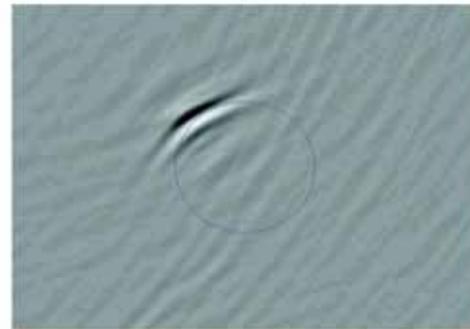


(c)

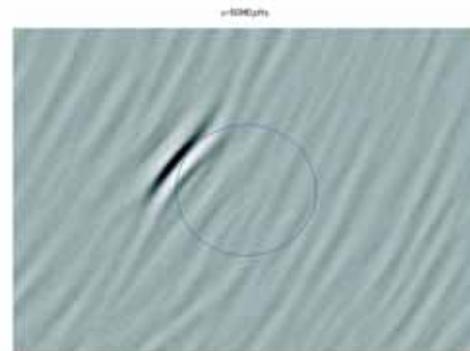
図 2.36: 開口合成法によって得られた横穴の画像 . アレイ探触子の位置を (a) $Y = 0\text{mm}$, (b) $Y = 25\text{mm}$, (c) $Y = 50\text{mm}$ としている .



(a)



(b)



(c)

図 2.37: 線形化逆散乱解析法によって得られた横穴の画像 . アレイ探触子の位置を (a) $Y = 0\text{mm}$, (b) $Y = 25\text{mm}$, (c) $Y = 50\text{mm}$ としている .

第3章 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発

3.1 はじめに

ここでは、本研究で実験に用いたアレイ探傷システムの構成を示すとともに、システムのキャリブレーションならびに探傷条件設定最適化のために行った基礎実験の結果を示す。また、一連の実験結果から計測波形の処理に際して、とりわけ三次元画像化においては処理速度の高速化が必要であることを述べる。この点について本研究では、開口角を定義した際の考え方をを用いてデータ高速処理する方法について検討を行ったため、その成果についても述べる。

3.2 アレイ探傷システムの構成

図 3.1 に本研究に用いたアレイ探傷システムの構成を示す。アレイ探傷器には東芝製超音波検査装置 UT03C1A を用い、アレイセンサとしては 5MHz の 2 次元マトリクスアレイ探触子、及び、2MHz と 5MHz のリニアアレイ探触子を用意した。マトリクスアレイ探触子は、外形寸法が大きく通常の探触子よりもかなり重量があるため、手動でのスキャンニングの必要があるが、リニアアレイ探触子に対してはクラウトクレーマ社製の手動 XY 軸スキャナを用いることができるようになっている。探傷結果の画像化は、マトリクスアレイ探触子を用いる場合には付属の画像化機能により外部のコンピュータに転送することなく開口合成像を表示することができる。ただし、16 素子以上のリニアアレイ探触子を用いた場合には付属の画像化機能は使用できず、詳細な波形解析が必要な場合には外部コンピュータやソフトウェアを用いる必要がある。そこで、本システムでは計測結果をワークステーションに転送し、様々な数値解析および画像化ソフトウェアによって処理が可能なように通常市販されている装置と若干仕様が異なっている。以下、これらアレイ探傷システムの構成要素について、その特徴を中心に説明を加えておく。

3.2.1 アレイ探傷器

東芝製超音波検査装置 UT031CA は、パルサー/レシーバ部、画像化装置、制御および計測結果表示用 PC からなっている。本装置では、最大 256 素子を用いた超音波のアレイ送受信が可能である。ただし、遅延時間を設けたビームの合成等を行う機能は装備しておらず、一次計測データとしては送信素子数 × 受信素子数分の A スコープ波形を得ることができる。付属の探触子を用いた場合、計測結果は画像化装置によって計測からシームレスに画像化され、PC 上に三次元開口合成像として表示される。計測条件の設定およびデータの保存は全て制御 PC の GUI から行うことができるようになっており、数種類の設定ファイルをユーザが作成し、それを送信するという形で計測が行われる。

実験に用いたアレイ探傷システム



図 3.1: 実験に用いたアレイ探傷システム

3.2.2 アレイ探触子

本研究に用いたアレイ探触子の諸元および外観を図 3.2 に示す。マトリクスアレイ探触子は、 16×16 のマトリクス状に正方形の圧電素子が配置されたもので、ポリスチレンシューとともに使用する。ポリスチレンシューは、検査対象との音響整合をとることに加えて、伝播時間(距離)を稼ぐことにより時間軸上原点付近の測定不能範囲から計測エコーを回避させる目的がある。2 種類のリニアアレイ探触子は、いずれも等間隔に 64 個の圧電素子を配置したものであり、グレーティングロープの発生を抑えるために素子中心点間のピッチは半波長を越えないように設計されている。これら二つのセンサは、コネクタ形式がマトリクスアレイ探触子のそれとは異なり、LEMO コネクタを持っている。ここでは特注のコネクタ変換機を用意し、LEMO コネクタをもつ 64 素子までのセンサーであれば探触子のタイプに関係なく使用することができるようにしている。例えば、32 個の素子を持つ二つのアレイセンサーを用いて TOFD 法のような計測を行うことも可能である。

3.2.3 XY 軸スキャナ

クラウドクレーマ社製手動 XY 軸スキャナは、アレイ探触子を探触子ホルダにネジ止めし、ホルダをスキャナアーム部先端に装着する。探触子ホルダは、種々のものが作成されておりユーザは所有の探触子サイズに応じたものを指定することができる。スキャナに装着されたプローブは鉛直方向のばねによって検査面に一定の力で押し当てられる。この状態で、探触子をスキャナの X 軸および y 軸方向に手動により移動させることができる。また探触子の向きは探触子ホルダ丈夫のネジによって調整することも可能となっている。探触子の移動は手動で行わなければならないが、スキャナをエンコーダに取り付ければ、相対位置をデジタルデータとして取得することが可能となる。ただし、今のところエンコーダへの接続は行っていないため現状では探触子の位置決めのみ用いることができる。

3.3 人工きず試験体を用いた基礎実験

人工きずを設けた試験体を用いて行った基礎実験について述べる。以下には実験の概要を、試験体、計測条件の順に示した後計測データを用いた開口合成の結果を実験結果として示す。

3.3.1 人工きず試験体

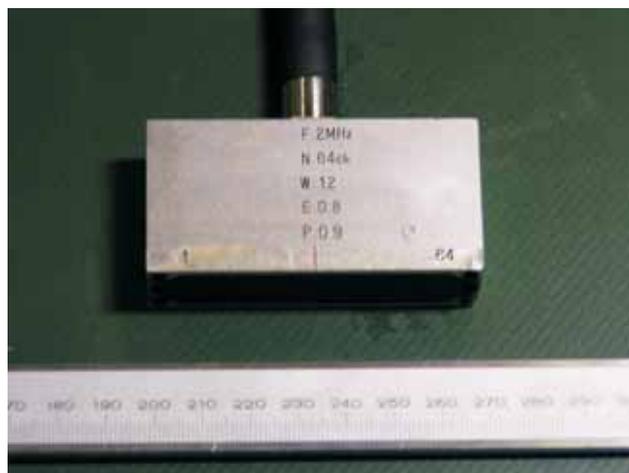
図 3.3～図 3.6 に、本研究で基礎試験に用いた人工きず試験体を示す。これらの試験体はいずれも鋼材に機械加工によってきずを作成したものである。図より明らかなように、人工きずのタイプは 4 種類あり、それぞれを 横穴試験体、 矩形ノッチ試験体、 V 字ノッチ試験体、 平底穴試験体を称することにする。

3.3.2 計測条件

各試験体を用いて行った計測において、計測点位置や画像化範囲は使用するセンサと試験体の組み合わせごとに異なる。それらの条件は実験結果を示す際にその都度記すものとして、ここでは全ての計測に共通の条件について述べる。

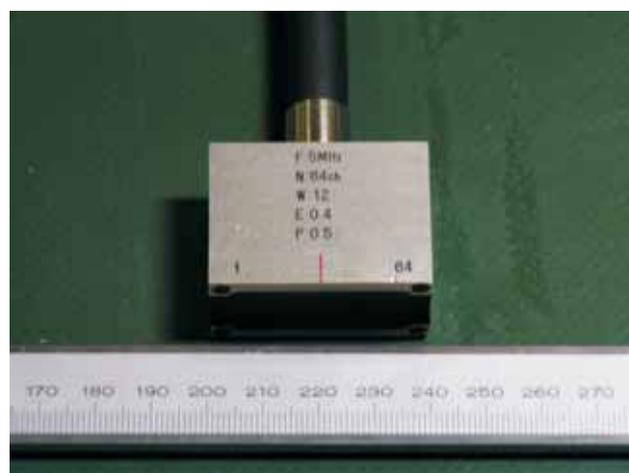
リニアアレイ探触子

周波数 : 2MHz
チャンネル数 : 64
素子サイズ : 0.8mm×12mm
ピッチ : 0.9mm



リニアアレイ探触子

周波数 : 5MHz
チャンネル数 : 64
素子サイズ : 0.4mm×12mm
ピッチ : 0.5mm



マトリクスアレイ探触子

周波数 : 5MHz
チャンネル数 : 16×16
素子サイズ : 2.5mm×2.5mm
ピッチ : 3mm

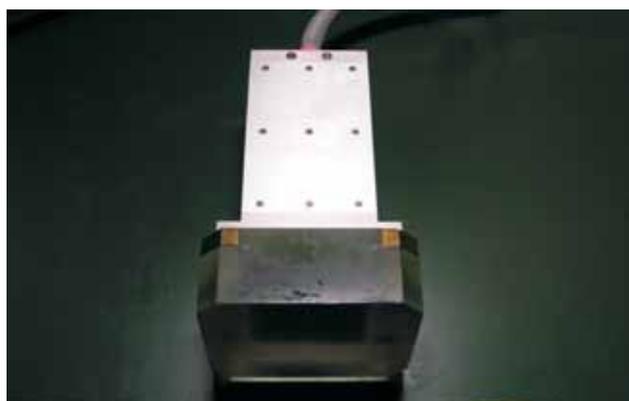
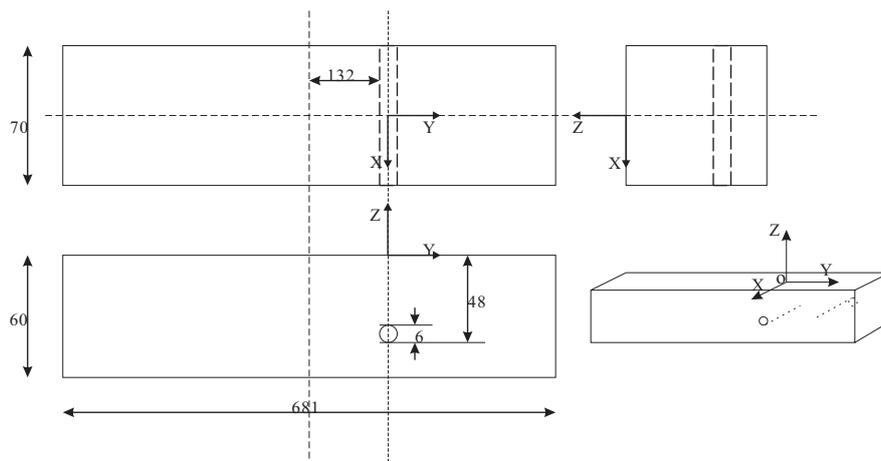


図 3.2: アレイ探触子の外観と諸元

横穴試験体



横穴部の拡大写真

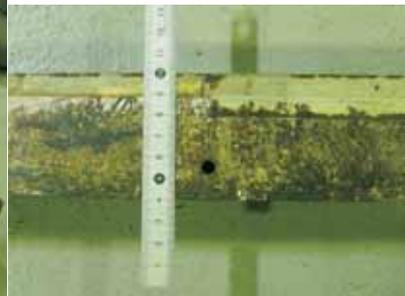
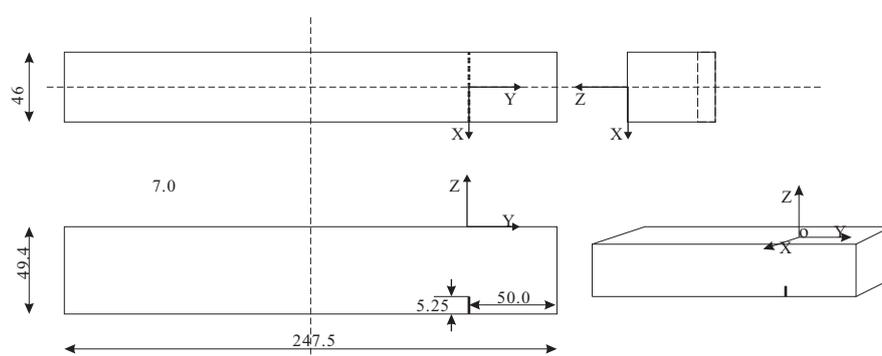


図 3.3: 横穴試験体

矩形ノッチ試験体



スリット部の拡大写真



図 3.4: 矩形ノッチ試験体

V字ノッチ試験体

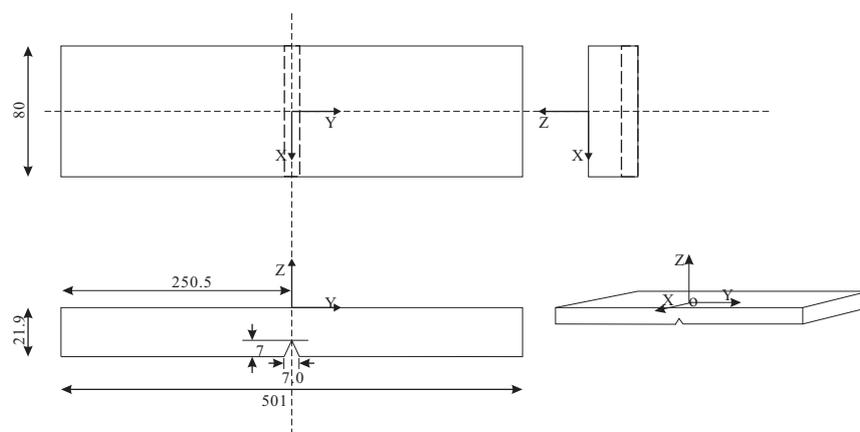


図 3.5: V 字ノッチ試験体

平底穴試驗體

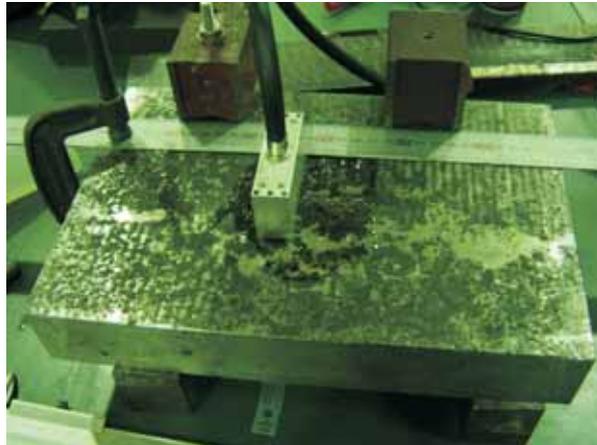
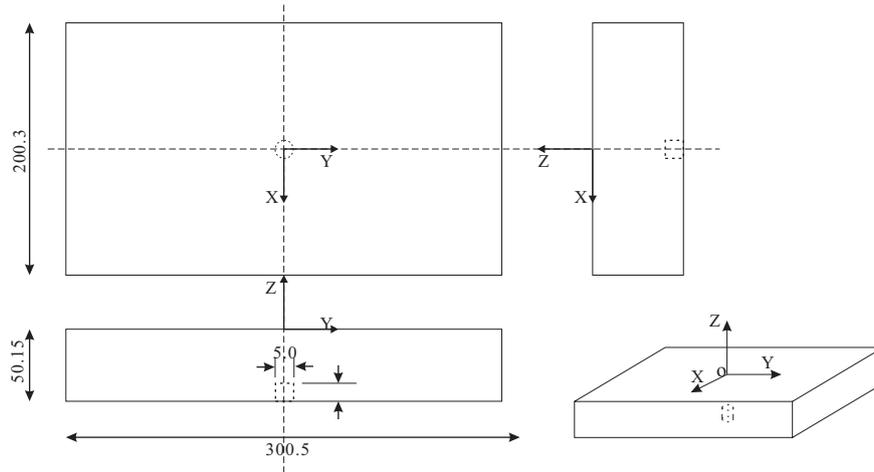


图 3.6: 平底穴試驗體

計測はいずれの探触子を用いる場合にも接触法によって行っており、接触媒質にはソニコートを用いている。ただし、マトリクスアレイ探触子の使用に際しては厚さ 39.6mm の探傷器付属のポリスチレンシューを用いており、ポリスチレンシューと探触子の間にもやはりソニコートを塗布している。シューと探触子の接触状態については、シュー底面からの反射エコーを計測することで自動的に確認できるようになっており、感度の自動調整もその際に行われる。

超音波波形を取得する時間範囲は、目的とする欠陥からのエコーがその中に含まれるように設定する以外に概ね次のようなルールに従って決定した。まず、波形サンプリングレートは使用探触子の公称周波数の 5 倍程度とし、計測開始時刻は、欠陥から最短距離にある素子について、欠陥エコーが現れると予想される時刻の 5 ~ 10 マイクロ秒前に設定する。ただし、マトリクスアレイ探触子の場合にはシュー底面からのエコーが入らないように、リニアアレイ探触子の場合には時間軸原点付近の入力パルスの影響が波形に入り込む時間範囲を可能な限り避けるよう設定した。計測時間の長さは、最大 2048 データまでであるためその上限が決まっているが、それ以下でよい場合には試験体底面エコーが観測できる範囲までを記録することとした。これにより、欠陥だけでなく、試験体底面を含めて画像化を行うことができ、それらの位置関係についても調べることができる。

今回用いたアレイ探傷器では、実際に送受信を行う素子の組み合わせは任意に設定することができるが、一度の計測で取得可能な波形データの総数は 128×256 個である。従って、256 素子をもつマトリクスアレイ探触子の全素子を使用し 256×256 波形を取得するには二度に分けて計測を行う必要があり手間がかかる。そこで、マトリクスアレイ探触子を用いる際には、送信には図 3.7 に示した千鳥状に並んだ 128 素子のみを用い、受信には全素子を用いるようにした。これにより、一回の計測では 128×256 の波形が得られる。一方、リニアアレイ探触子の場合、素子数が 64 個であるから、全素子を使って送受信を行い 64×64 波形の取得を行った。

計測時のゲイン設定については、試験体の底面エコーが制御 PC の波形モニタ上でサチュレートしない範囲でできるだけ大きくとるようにしているが、その値は全素子に共通したものが与えられている。また、ノイズが大きく計測波形が安定しない場合には、8 から 128 回程度のアベレージングを行う。ただし、アベレージング回数は波形取得にかかる時間に直接関係し、今回のように大量の波形を取得する場合には全体としての計測時間に大きく影響する。そこで、アベレージング回数は、安定した A-スコープ波形が得られる範囲でできるだけ少ない回数に設定することにした。

3.3.3 実験結果

計測波形を用いて計算した開口合成像を実験結果として示す。以下には、リニアアレイ探触子、マトリクスアレイ探触子を用いた場合の結果を、 ~ の各試験体について順に示して行く。

開口合成の結果表示にあたっては図 3.8 のような探触子中心を原点とした座標系によって示している。ただし、これは試験体の形状を示した図 3.3 ~ 図 3.6 における座標系とは一致していないため注意が必要である。以下では、試験体座標系については (X, Y, Z) の大文字を、探触子座標系には (x, y, z) を用いるものとして、開口合成像の表示には探触子座標を用いるものとする。すなわち、開口合成結果では欠陥位置等が探触子中心からの相対位置によって示されているものと解釈する。以下、リニアアレイ探触子の場合、探触子座標で $x = 0$ 面での開口合成像、マトリクスアレイの場合は直交する 3 断面 $x = x_1, y = y_1, z = z_1$

マトリクスアレイ探触子

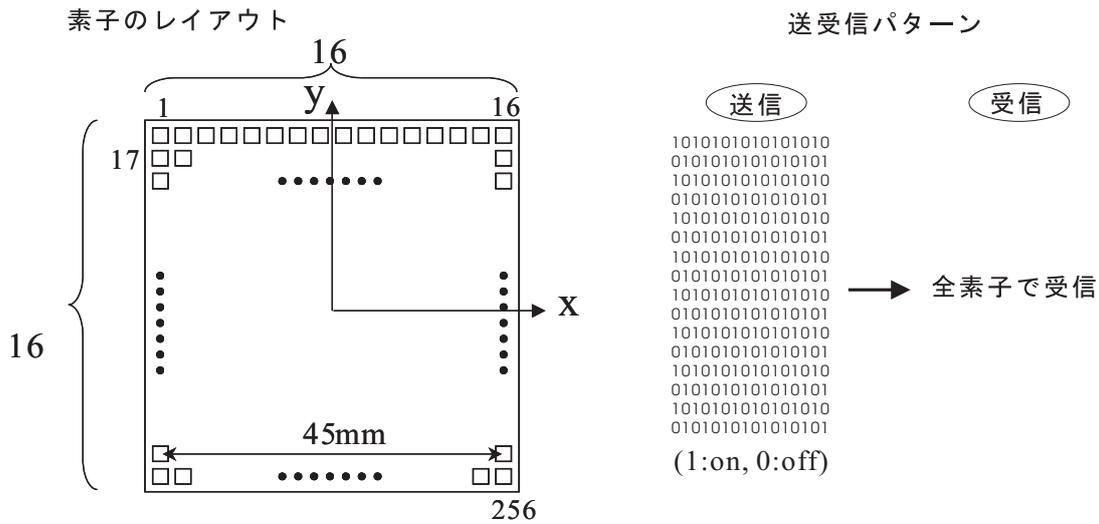


図 3.7: マトリクスアレイの素子レイアウトと送受信パターン

における開口合成像を示す。ただし、 x_1, y_1, z_1 は開口合成像の解釈が最も容易な断面となるように設定したので、実験結果ごとに異なる値である。

リニアアレイ探触子による結果

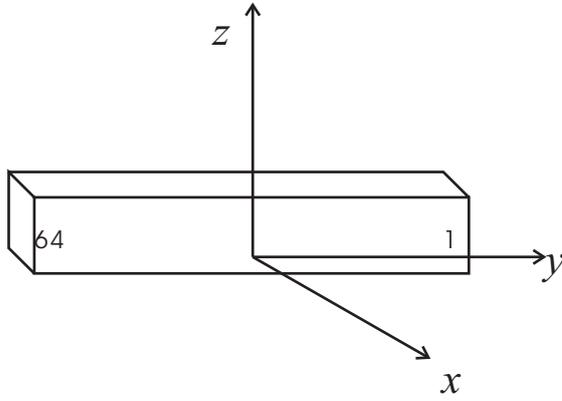
図 3.9~3.18 に 2MHz のリニアアレイ探触子によって取得したデータを用いた場合の結果を示す。

図 3.9 は横穴試験体の開口合成像である。アレイ探触子は横穴中心のほぼ直上に探触子の中心点ができるように設置し、探触子の向きは図 3.3 に示すように、探触子長手方向 (y 軸) が試験体座標の Y 軸方向に一致するようにしてある。従って、この結果は横穴に垂直な断面の像を与えていることになる。この結果を見ると、探触子からの入射波によって照射される横穴上側の $z = -42\text{mm}$ 付近がはっきりと画像化されていることがわかる。一方、それ以外の部分にはほとんど指示が現れておらず、数値シミュレーションなどの結果ではしばしばはっきりと現れる円孔表面を周回しながら媒質中に漏洩されるクリーピング波のような二次散乱波は観測されていないということが考えられる。再構成されている上側の境界部分に関しては、横穴の曲率に対応したカーブが見られ良好な結果を与えていると言える。

図 3.10 は、矩形ノッチ試験体に対する結果である。探触子中心位置はここでもノッチ直上部付近とし、向きは探触子長手方向が y 軸に一致するように設置されている。ここでの結果には、画像化範囲を比較的大きくとしているために試験体裏面が含まれている。底面からの反射エコーはノッチ部からのそれよりもかなり大きいため、試験体底面は明瞭に再構成されている。しかし、矩形ノッチが設けてある部分は、ノッチ上端からのエコーが発生するため、ノッチ部では底面が画像化されておらず、かわりにノッチ上端部に指示が現れている。ただし、開口合成像に現れたノッチ先端の指示はノッチ幅 0.5mm に比べて大きく、この画像から欠陥形状やノッチ幅の推定を行うことは困難である。

図 3.11 は矩形ノッチに対する結果を示したものである。ただし、探触子中心がノッチ直

リニアアレイ



マトリクスアレイ

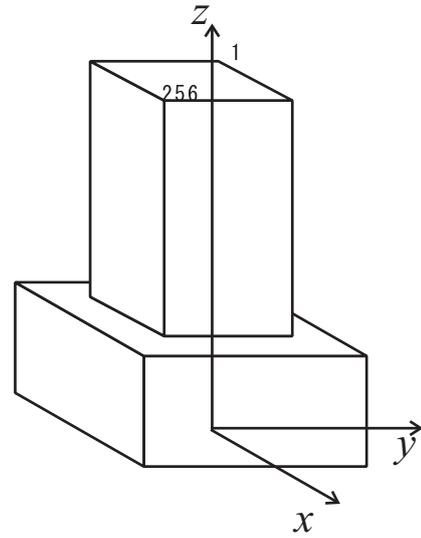


図 3.8: 探触子座標系 (x, y, z)

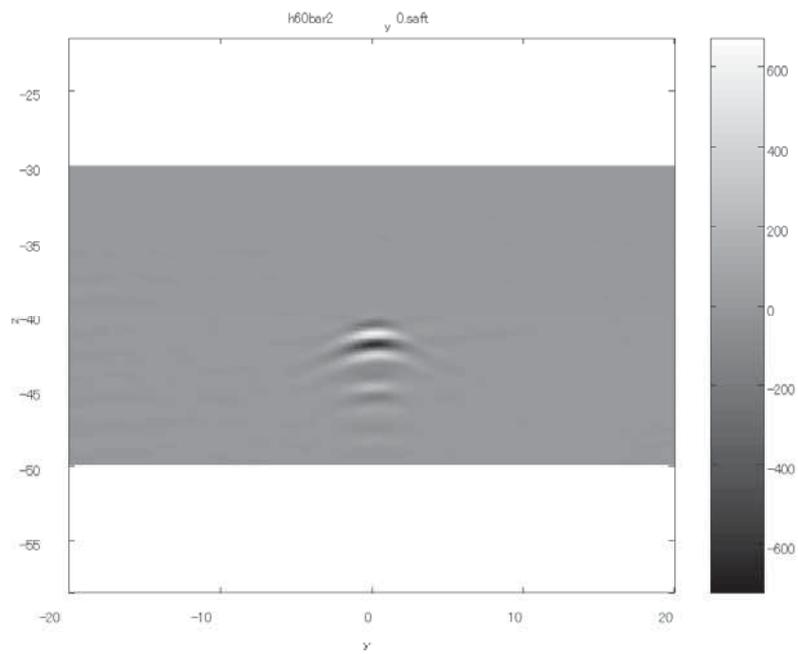


図 3.9: 開口合成像 (横穴試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用)

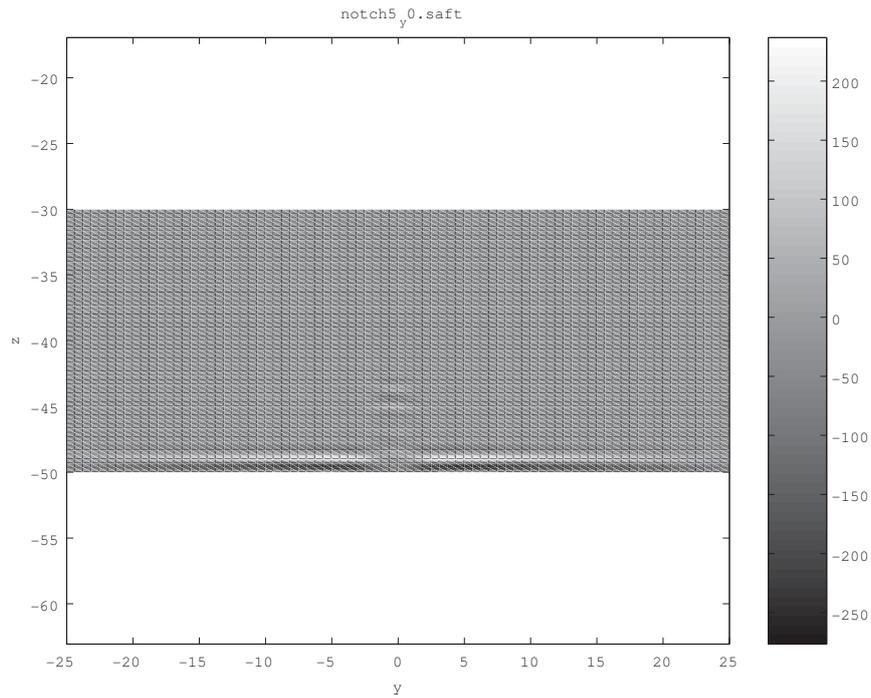


図 3.10: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 0\text{mm}$)

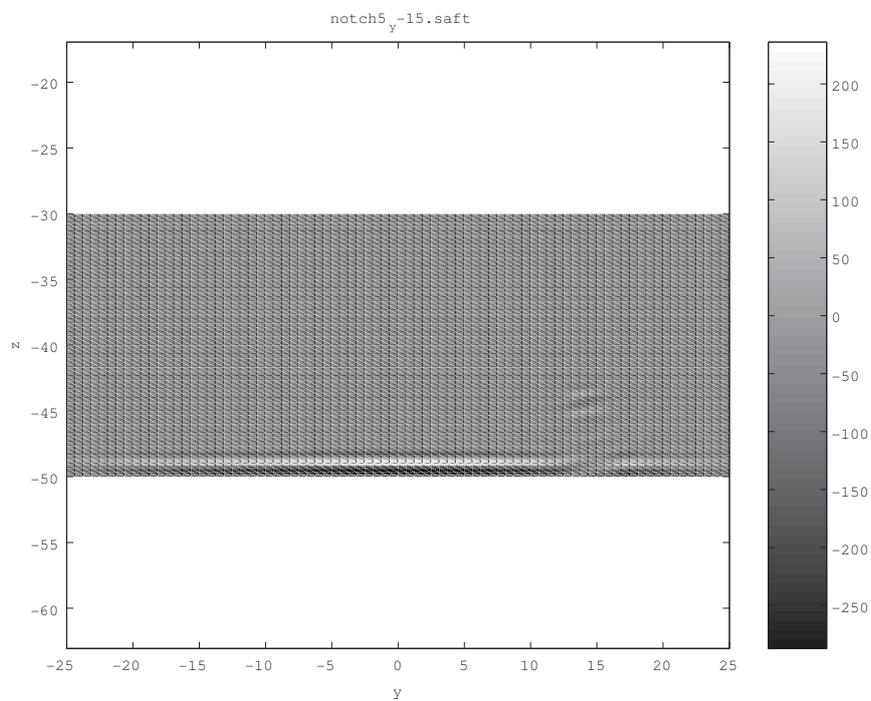


図 3.11: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = -15\text{mm}$)

上から Y 軸負の方向に 15mm ずれた位置に探触子をおいて測定した結果を用いている。ノッチ上端部と試験体底面のノッチ部を除いた部分が再構成されていることは先程と同様だが、ここではノッチ上端部が実際よりも左側に傾いたような形状として現れている点で先の結果と異なっている。

図 3.12 ~ 図 3.14 はいずれも V 字ノッチに対する結果である。これらは互いに計測位置のみが異なっており、順に $(X, Y) = (0, 0)\text{mm}$, $(0, 15)\text{mm}$, $(0, 25)\text{mm}$ とした場合である。最初の $(X, Y) = (0, 0)\text{mm}$ のケースでは、V 字ノッチの頂部がかすかに現れているが、側面部分はほとんど再構成されていないことがわかる。一方、探触子位置をずらした図 3.13 および図 3.14 では、ノッチの左側斜面がはっきりと現れている。これは、明らかに探触子位置をずらしたことにより、ノッチ側面で鏡面反射したエコーがいずれかの素子で観測できるようになったためであり、前章で述べた開口角の考え方からすれば当然予想される結果である。

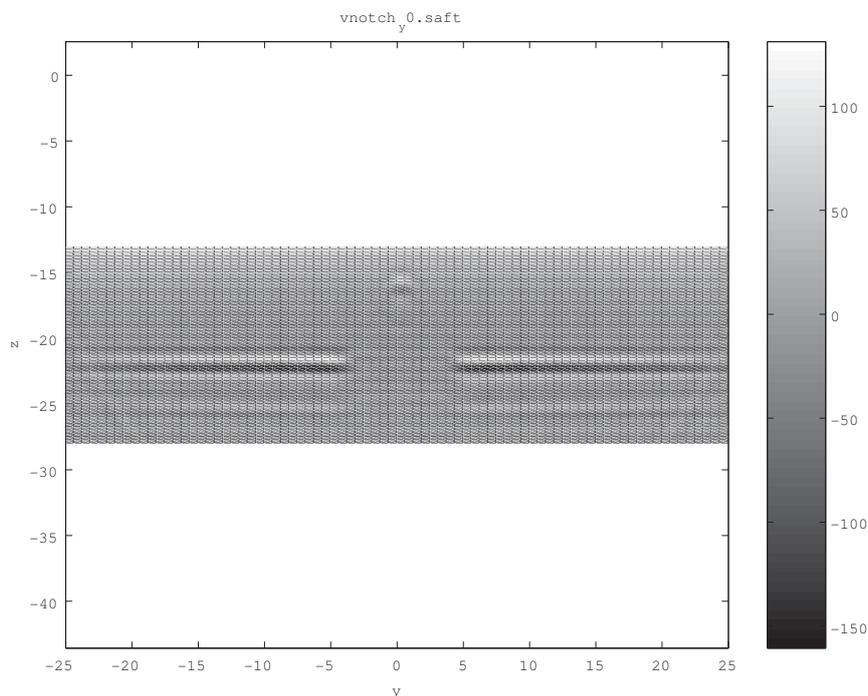


図 3.12: 開口合成像 (V 字ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 0\text{mm}$)

図 3.15 および図 3.16 に平底穴試験体に対する結果を示す。これらはそれぞれ、探触子中心位置を $(X, Y) = (0, -1)\text{mm}$, $(0, 4)\text{mm}$ とした場合の結果である。ただし、探触子の向きは図 3.6 にあるように、 X 軸と平行になるようにしてある。図 3.15 の結果を見ると、平底穴の径に対応して $z = -45\text{mm}$ の位置に y 軸方向におよそ 5mm の範囲に渡って、穴の底面が再構成されている。しかし、そこから Y 軸方向に 5mm ずらした図 3.16 のケースでも、あまり明瞭ではないが同じような位置と幅に平底穴底面と思われる指示が現れている。

最後に、平底穴試験体において、先程と同じ向きに置いた探触子を少しずつ Y 軸方向にずらしていった場合の開口合成像の変化を調べてみる。具体的には、探触子中心の Y 座標を $Y = -15\text{mm}$ より 1mm ピッチで $Y = 15\text{mm}$ までスキャンし、それぞれの位置での開口合成像を作成する。そうして作成した開口合成像を並べることで三次元データにする。そ

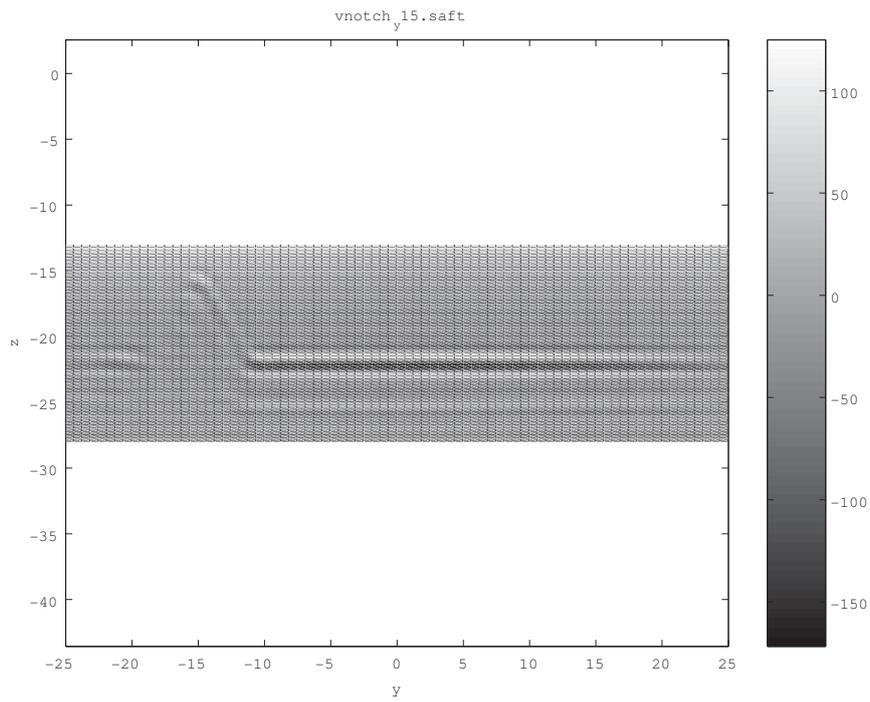


図 3.13: 開口合成像 (V 字ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 15\text{mm}$)

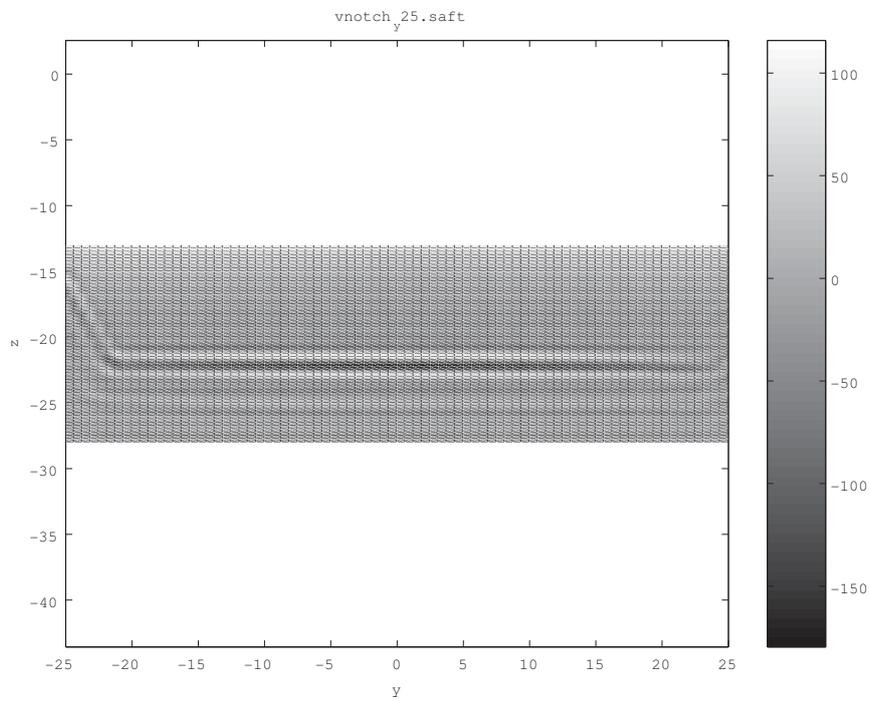


図 3.14: 開口合成像 (V 字ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 25\text{mm}$)

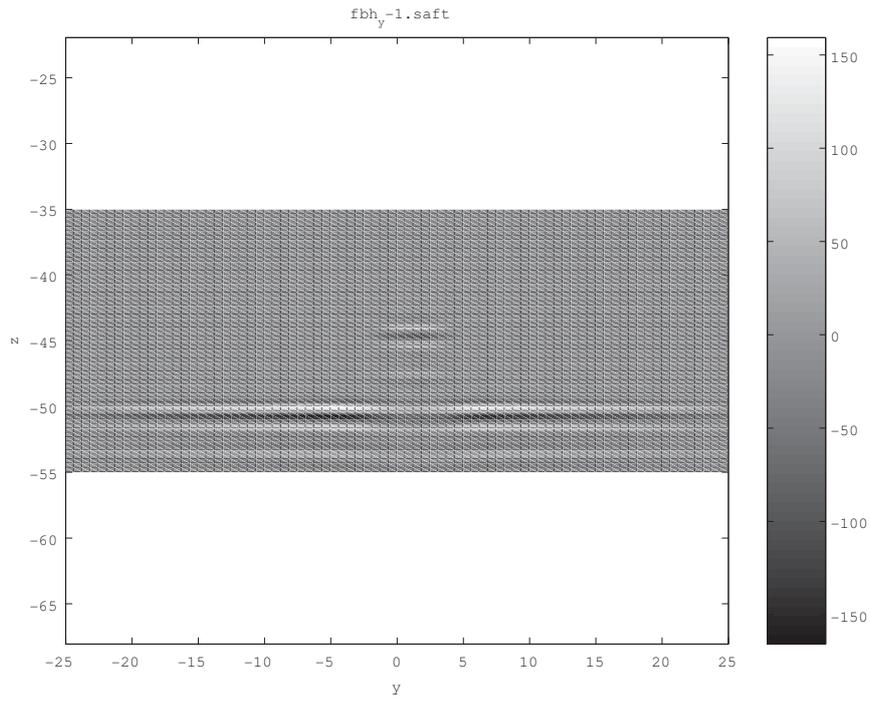


図 3.15: 開口合成像 (平底穴試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = -1\text{mm}$)

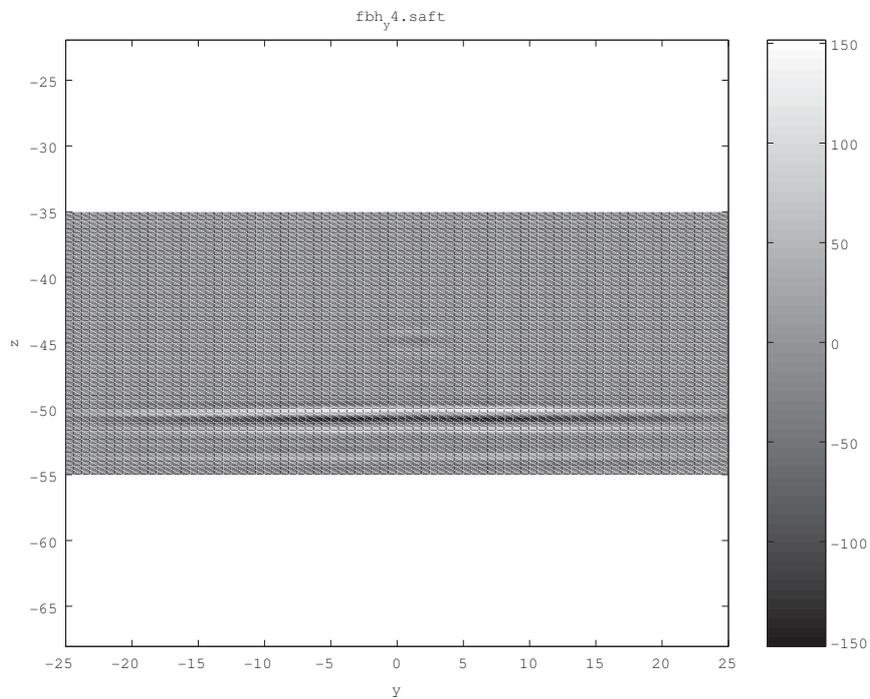


図 3.16: 開口合成像 (平底穴試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 4\text{mm}$)

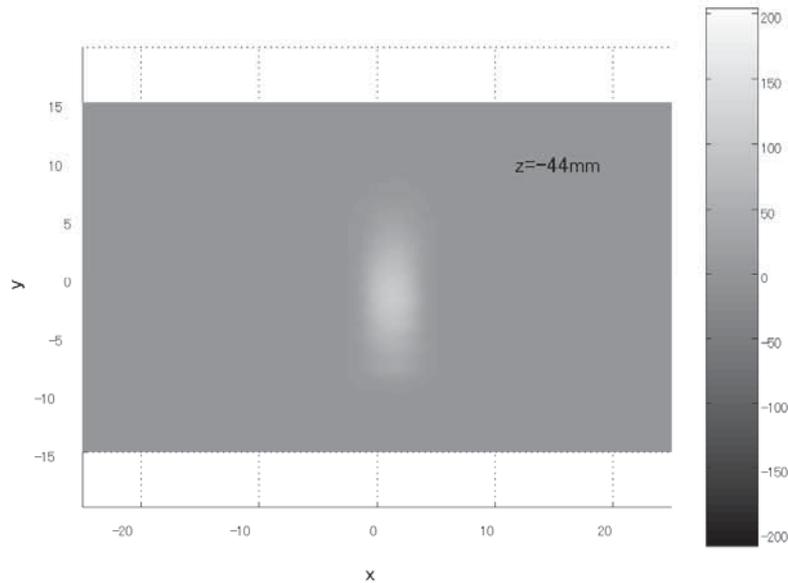


図 3.17: 合成した開口合成像の $z = -44\text{mm}$ における断面像 (平底穴試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用)

の三次元データを適当な z 面でスライスした画像から平底穴の形状が判別可能かを調べる。図 3.17, および, 3.18 はその結果を示したもので, それぞれ $z = 44\text{mm}$ と $z = -50\text{mm}$ におけるスライス画像である。これらの結果から, 平底穴は円形断面をもっているが, 開口合成像ではスキャン方向にのびた楕円のような形をしていることがわかる。 $z = -50\text{mm}$ での断面像は $z = -44\text{mm}$ のそれよりやや円形に近いように見えるが, いずれの場合も開口合成像だけでは断面形状の推定に限界があるといえる。図 3.18 において平底穴の形状がはっきりと見えるのは, 底面とのコントラストによってである。ところが, 欠陥が板裏面側まで抜けていない場合には, このような画像は得られない。そのため, 試験体内部に埋め込まれた欠陥の形状推定はさらに難しいと予想される。

マトリクスアレイ探触子による結果

図 3.19 ~ 3.23 にマトリクスアレイを用いて行った欠陥像の画像化結果を示す。

図 3.19 は横穴試験体に対する画像化の結果である。探触子は, 横穴の真上に探触子座標と試験体座標の方向が一致するように設置してある。図 3.19 の左上, 右上, 左下の図はそれぞれ z , x , y 断面を示したものであり, 断面位置は図中に記入してある通りである。開口合成像は, 明らかに x 軸方向に貫通した欠陥があることを示している。しかしながら, y 断面に現れた横穴断面の形状はリニアアレイ探触子を使った場合ほどははっきりしておらず, 開口合成像のみから穴の径や曲率は推定することは難しい。

矩形ノッチ試験体に対する結果を図 3.20 に示す。リニアアレイ探触子を用いた場合に得られた結果同様, 矩形スリットの上端部が画像化されているが, その幅は実際よりも広がって現れている。探触子の中心位置を Y 軸の負方向に 15mm ずらして計測を行った結果を示したのが図 3.21 である。3 断面全てを総合して解釈すれば, x 軸方向に貫通した欠

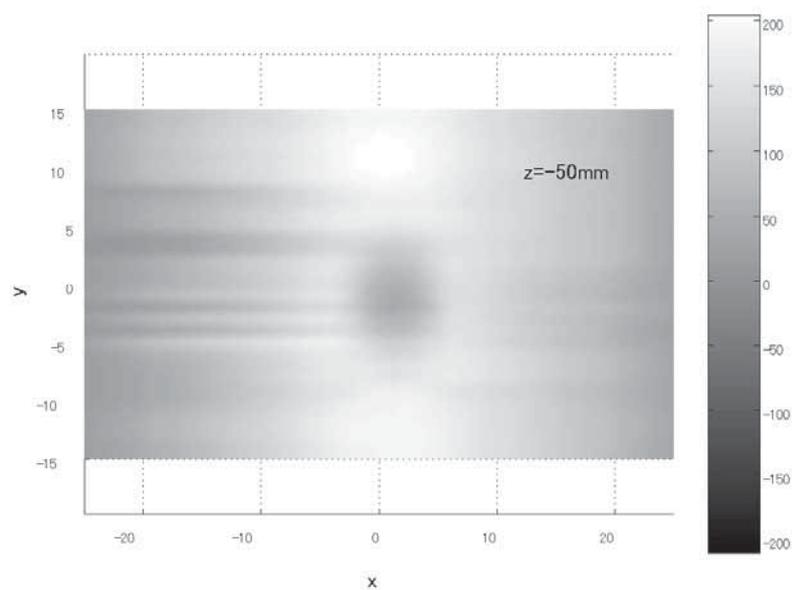


図 3.18: 合成した開口合成像の $z = -50\text{mm}$ における断面像 (平底穴試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用)

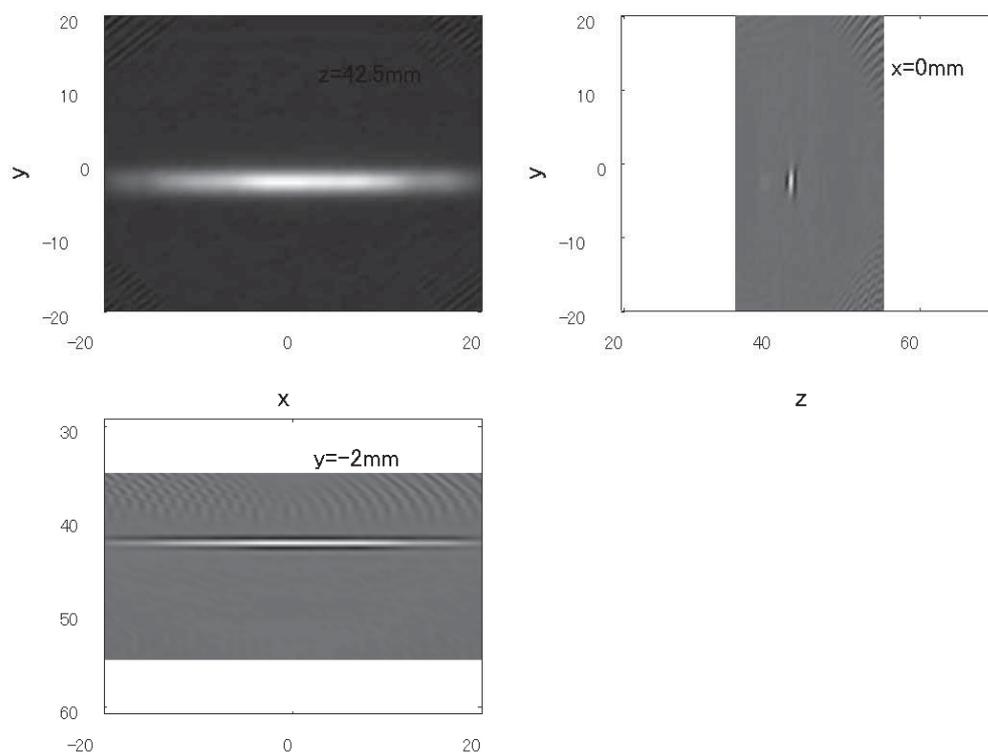


図 3.19: 開口合成像 (横穴試験体, 5MHz マトリクスアレイ探触子を使用)

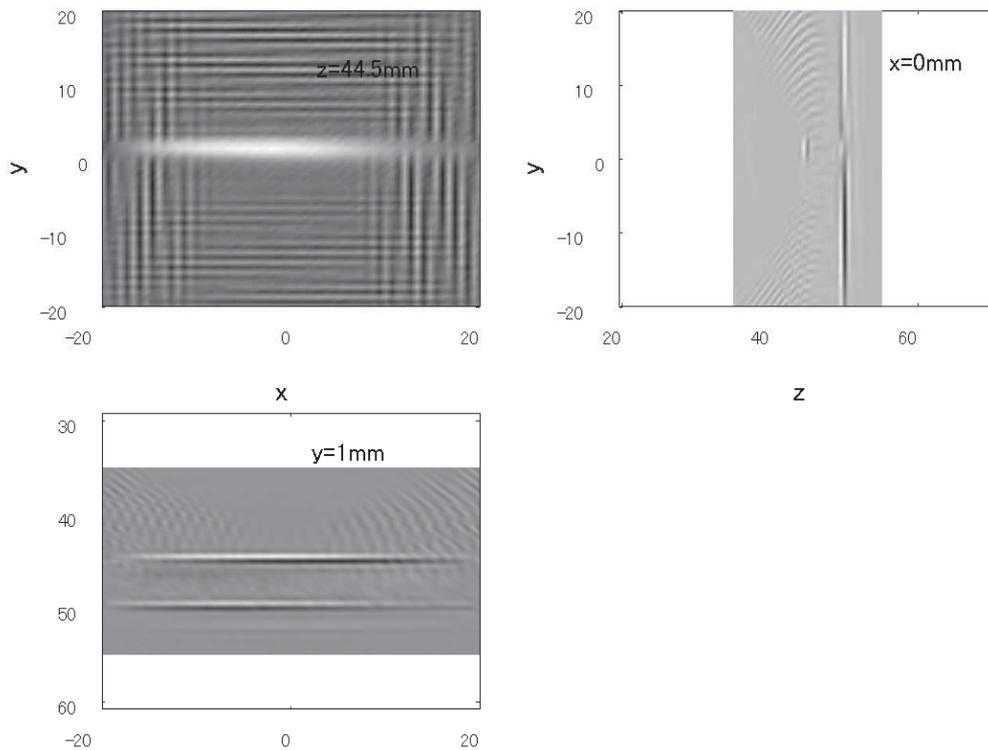


図 3.20: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体, 5MHz マトリクスアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 0\text{mm}$)

陥があることが分かるが, z 断面および x 断面の結果ではリニアアレイの場合ほどスリット上端部の指示ははっきりと現れていない。これは, 素子寸法が大きいため各素子からの入射場が強い指向性を持ち, スリットからのエコーを受信できる素子がスリット直上のごく限られたものとなっているためであると考えられる。

V 字ノッチ試験体に対する結果の図 3.22 にも, やはり同様な傾向がみられる。すなわち, x 断面, z 断面を見る限り, ノッチ先端からのエコーを受信できる範囲が限られているため開口合成像からノッチ先端を特定するのは難しい。ただし, y 断面を見れば, x 軸方向に伸びる指示が現れており, これによりノッチ先端の位置をはっきりと把握することができる。

最後に, 平底穴試験体の結果を図 3.23 に示す。この図では, x 断面, y 断面はリニアアレイとほとんど変わらない結果が得られているが, z 断面の結果は, リニアアレイのデータから合成した結果 (図 3.17 と 3.18) と明らかに異なり, 平底穴断面の形状がはっきりと現れている。また, その寸法も実際の径と非常によく一致している。

以上より, 2次元形状をしたノッチや横穴断面の推定には, 素子サイズの小さなリニアアレイ探触子を用いることができるが, 平底穴のような三次元的な形状を有する欠陥の画像化には, マトリクスアレイを用いる必要があることがわかる。また, マトリクスアレイでは, 各素子が大きく入射ビームに強い指向性があることに起因して, 例えばノッチ先端位置の画像化精度は特定の断面で見た場合には, 低下する恐れがある。しかしながら, 3断面

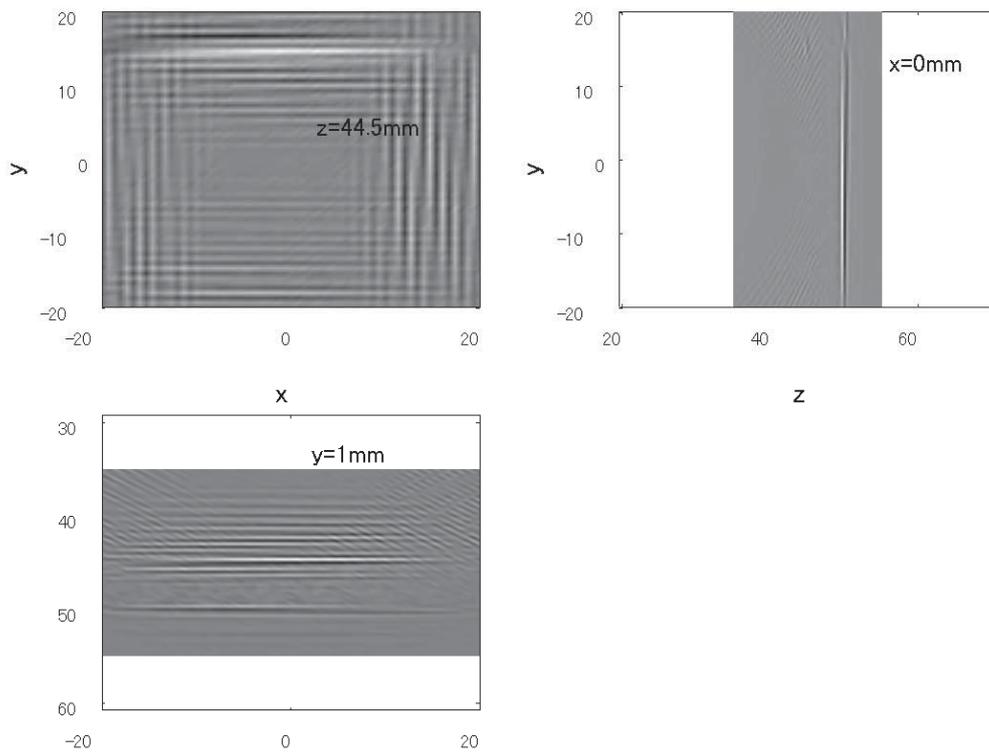


図 3.21: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体, 5MHz マトリクスアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = -15\text{mm}$)

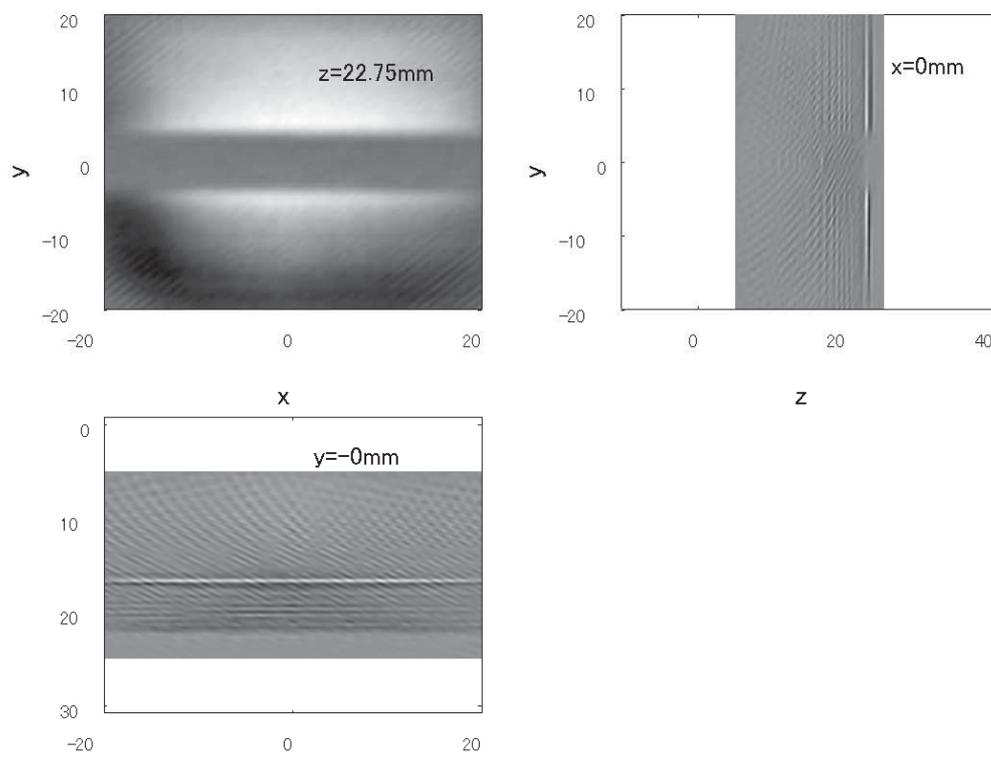


図 3.22: 開口合成像 (V字ノッチ試験体, 5MHz マトリクスアレイ探触子を使用)

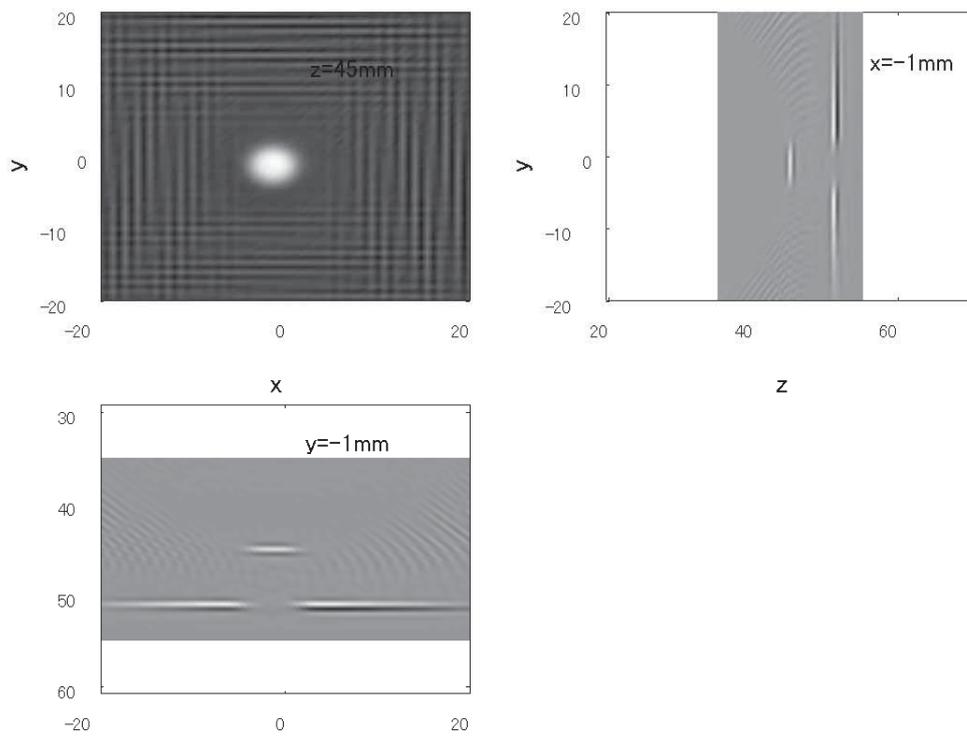


図 3.23: 開口合成像 (平底穴試験体, 5MHz マトリクスアレイ探触子を使用)

の情報を全て統合して解釈していけば、その低下分を補い、リニアアレイと同程度あるいはそれ以上の正確さで欠陥形状に関する情報を得ることができると言える。

3.3.4 リニアアレイとマトリクスアレイの比較

これまでに見てきたように、2次元的な形状をもつ貫通横穴や、V字および矩形ノッチであればリニアアレイによって断面形状をマトリクスアレイ探触子よりも精度良く画像化できる。これは、リニアアレイ探触子の場合、幅の小さな素子をかなり密に並べてアレイ探触子を構成することができるためである。一方、マトリクスアレイ探触子では、3次元的な画像化が可能であるという点は大変大きな利点があるが、素子寸法やその配置の自由度は余り高くない。これは次のような理由による。第一に、一素子の寸法は感度の面からあまり小さくすることはできない。また、2次元的に素子を配置するため、小さな素子を密に配置すると結果として膨大な数の素子を必要とすることになり、探触子や探傷器の開発コスト、結果の処理に必要な時間の面で非常に負荷が大きくなる。このような理由から、マトリクスアレイ探触子の諸元は、リニアアレイ探触子の場合ほど自由に選ぶことができないため、2次元的な形状をした例えばルートギャップなどの評価では、リニアアレイ探触子を用いた方が、結果の精度、装置等に必要コストの面で有利になる場合もあることが予想される。

ただし、ここで注意が必要なことは、これまでの結果はいずれもリニアアレイ探触子とその長手方向が横穴やスリットに対して正確に垂直になるように設置して探傷を行っていることである。現実には、部材内部の欠陥形状を事前に知ることは出来ないため、人工せず試験体を用いた場合のようにアレイ探触子の向きをきずに対して正確に直角方向に向けることはできない。従って、リニアアレイ探触子を使用する場合は、2次元的な(長い)欠陥の評価を行う場合も、探触子は必ずしも欠陥に対して垂直ではないという前提で結果の解釈を行わなければならない。

ここではそのような状況を想定して、リニアアレイ探触子を横穴に対して垂直にした場合と、45度傾けた場合のそれぞれで探傷を行い、その結果得られる開口合成像を比較してみる。マトリクスアレイの場合は、3次元的な画像化が可能であるため、原理的には探触子向きによらない結果が得られるはずである。ただし現実にはアレイ探触子の素子は正方マトリクス状に配置されているため、探触子と欠陥の向きによって若干の結果の相違が現れることも考えられる。そこで、リニアアレイ探触子だけでなく、以下ではマトリクスアレイ探触子についても、探触子向きを欠陥方向から45度回転させて計測を行い、その結果得られる開口合成像を、回転させない場合の結果およびリニアアレイ探触子を使った場合の結果と比較する。

図3.24に貫通横穴を有する試験体とリニアアレイ探触子の設置状況を示す。ここで用いる貫通横穴試験体は、外形寸法は前出の図3.3にあるものと同じだが、横穴の位置が異なっている。図3.24の右側は、鉛直上方から探触子の設置面を見た様子を示しており、上は横穴に対して垂直に、下は45度方向に向けてリニアアレイ探触子を設置している様子をあらわしている。このようにして行った計測の結果を用いて開口合成を行った結果を図3.25に示す。図中、真の横穴の境界を白の実線で示してある。これらの図は、いずれの場合も探触子座標で $x = 0$ mmの面内における横穴断面の開口合成像である。探触子方向を横穴に対して垂直にした場合には、前出の横穴試験体の場合と同様に欠陥境界のカーブに沿った指示が現れている。一方、45度傾けた場合、 $x = 0$ における横穴断面は水平方向に長軸をもつ楕円となるが、開口合成像に現れた指示はその大きさよりもかなり大き

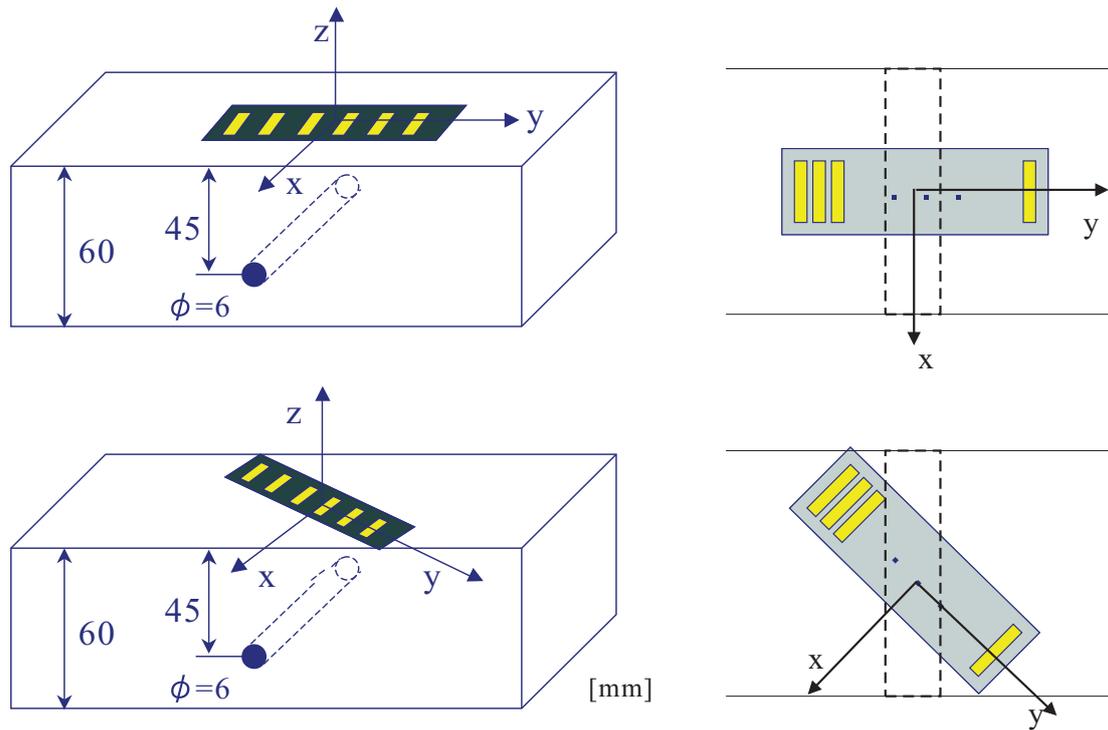


図 3.24: 貫通横穴試験体とリニアアレイ探触子の設置状況

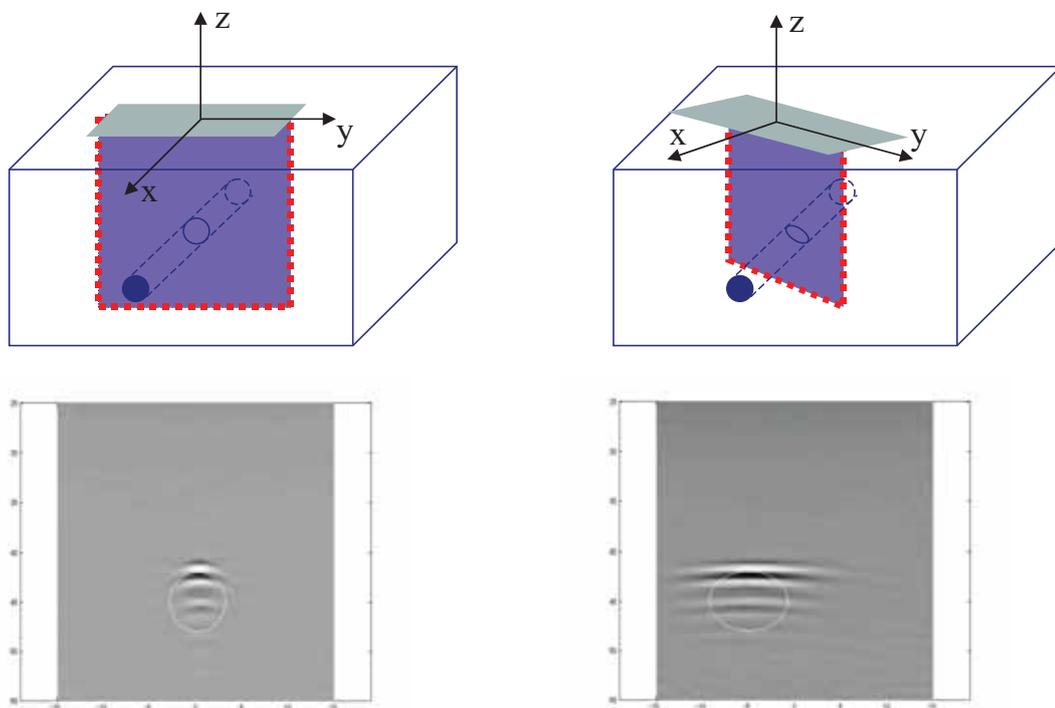


図 3.25: 開口合成結果

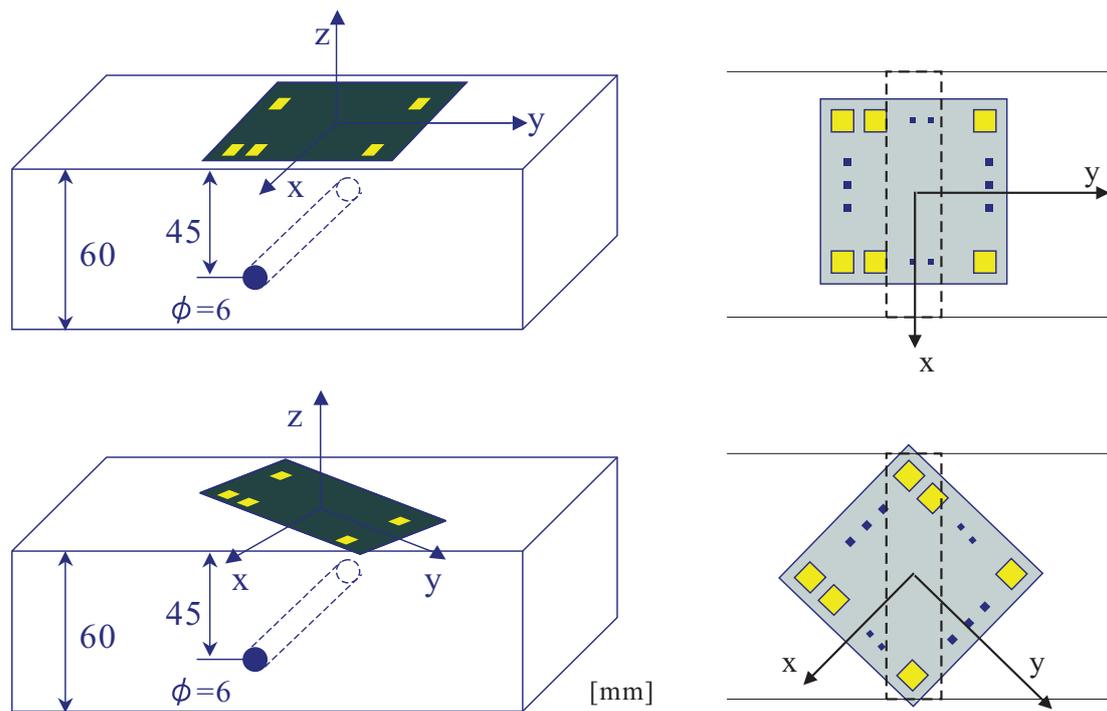


図 3.26: 貫通横穴試験体とマトリクス探触子の設置状況

く、横穴断面の曲率に対応した結果にはなっていないことが分かる。

図 3.26 にマトリクスアレイ探触子の設置状況を示す。マトリクスアレイ探触子の場合もリニアアレイ同様に、深さ 45mm の位置にある径 6ϕ の横穴試験体を用い、探触子向きを横穴に対して垂直および 45 度にして計測を行った。このとき、各々の計測結果に対して得られる開口合成像を示したのが図 3.27-3.29 である。図 3.27 では、リニアアレイ探触子の場合と同様、探触子座標で $x = 0$ 面内での横穴断面を画像化したものである。マトリクスアレイ探触子を用いた場合、リニアアレイ探触子に比べて横穴上部の境界形状がはっきりと画像化されないものの、探触子向きを変えた場合にも、横穴の指示範囲があまり大きくなっていないことがわかる。このことは、図 3.28 にも明らかに示されている。この図は、三次元開口合成結果の試験体表面から 42mm 位置における水平方向断面像を示したものである。この結果を見れば、図の中央部すなわち探触子直下付近では横穴の指示範囲に探触子向きによる大きな差はないことがわかる。最後に示した図 3.29 は、試験体座標における $X = 0$ 断面、つまり横穴の垂直断面の画像化結果である。この結果では探触子向きが傾いていても、そうでない場合とほとんど同じ結果が得られており、探触子向きによらずマトリクスアレイ探触子では一貫した画像化結果が得られていることを示している。

以上の結果から、リニアアレイ探触子を用いる場合、欠陥と探触子の相対的な方向が不明な場合はその結果得られる開口合成像は図 3.25 のように、実際の欠陥サイズより大きくなることを念頭において結果の解釈を行う必要がある。一方、マトリクスアレイ探触子では探触子中央付近の結果は、探触子向きによらず一貫した結果が得られるためそのような配慮は特に必要はない。これらを踏まえれば、マトリクスアレイ、リニアアレイ探触子の併用が可能な場合には、始めにマトリクスアレイを用いて画像化を行い、その結果 2 次元的な形状を持つ欠陥が検出された場合にはリニアアレイ探触子を正確に設置してよ

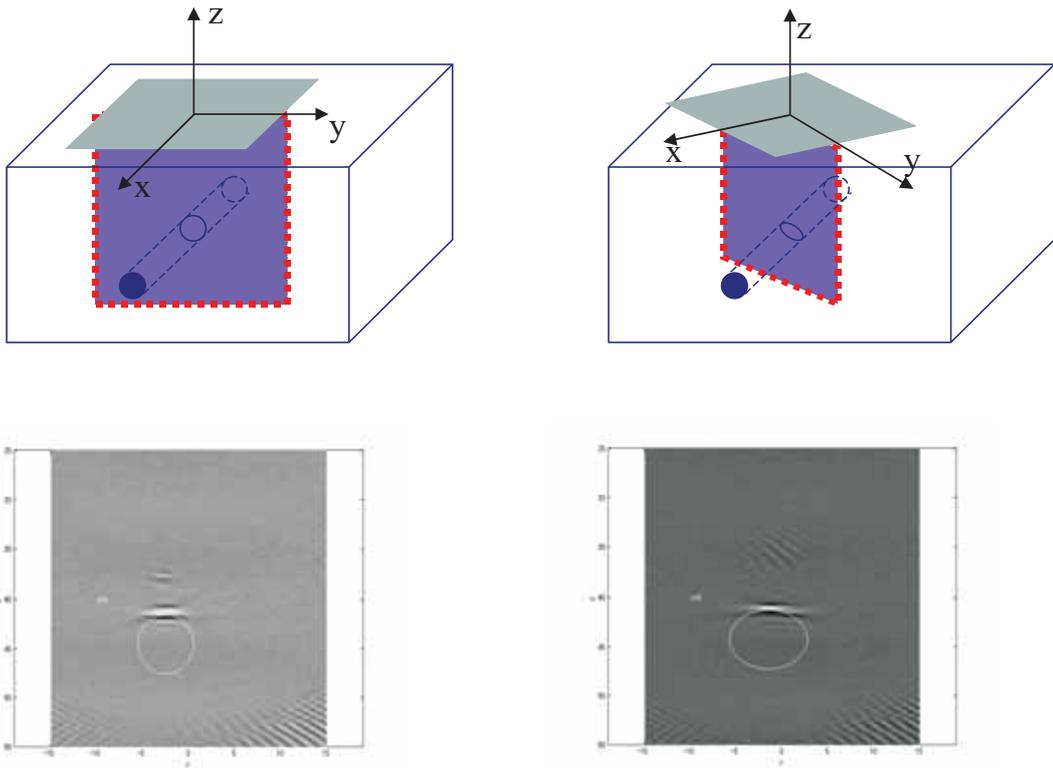


圖 3.27: 開口合成結果

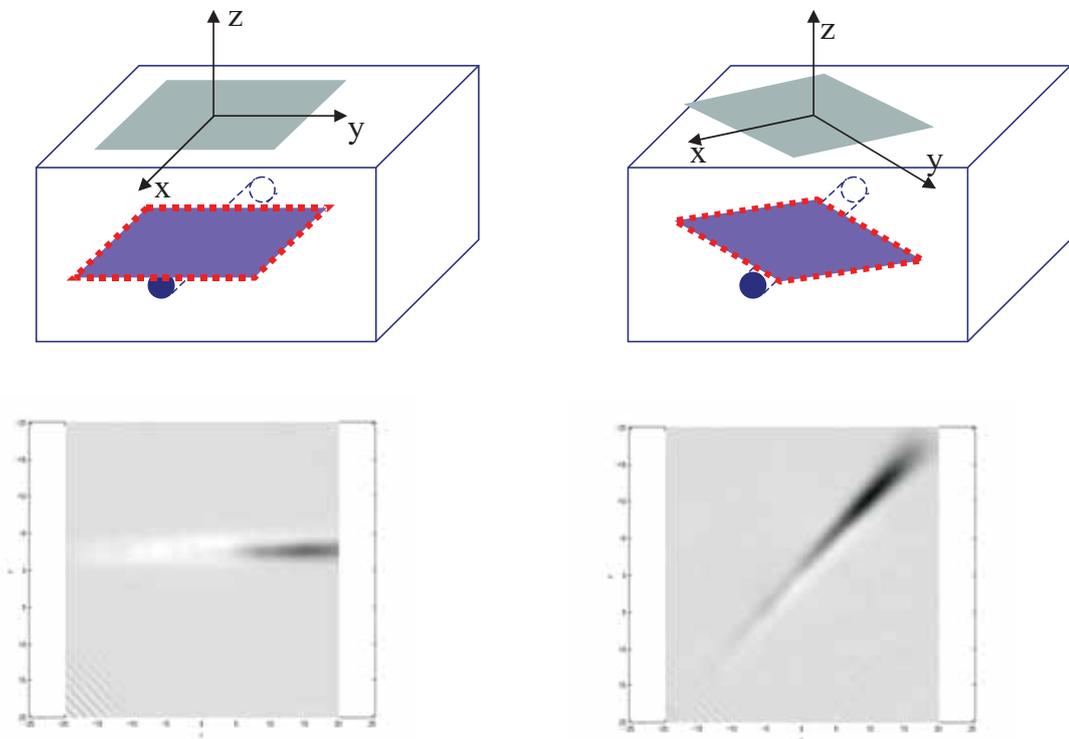


圖 3.28: 開口合成結果

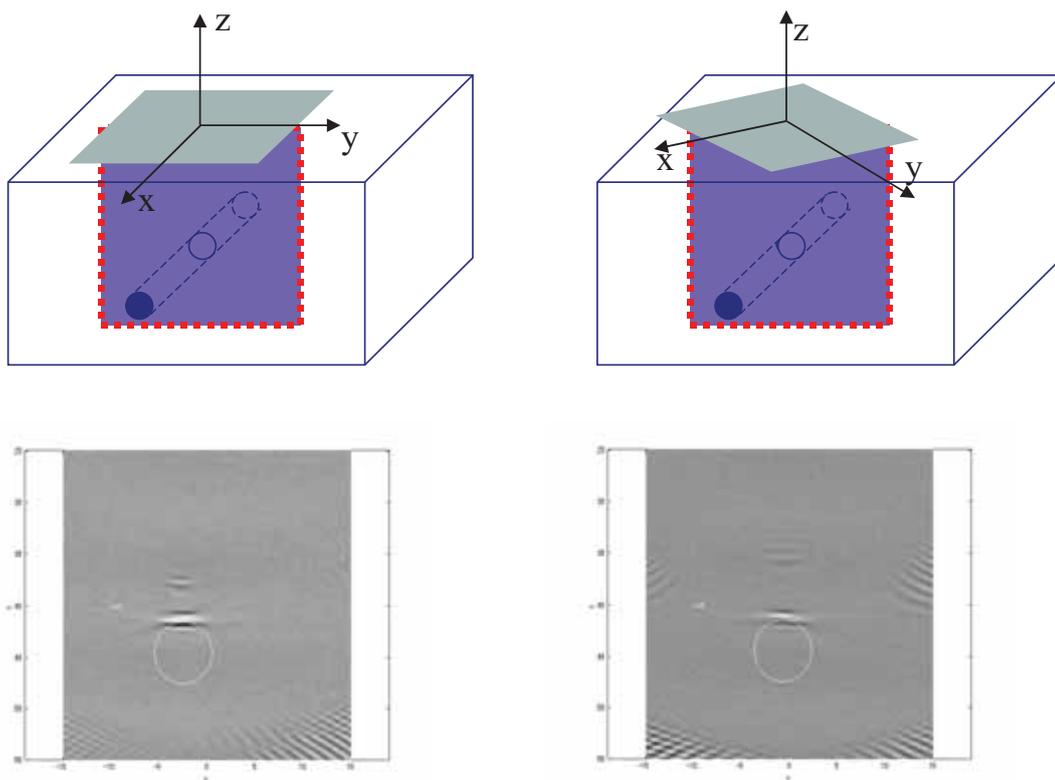


図 3.29: 開口合成結果

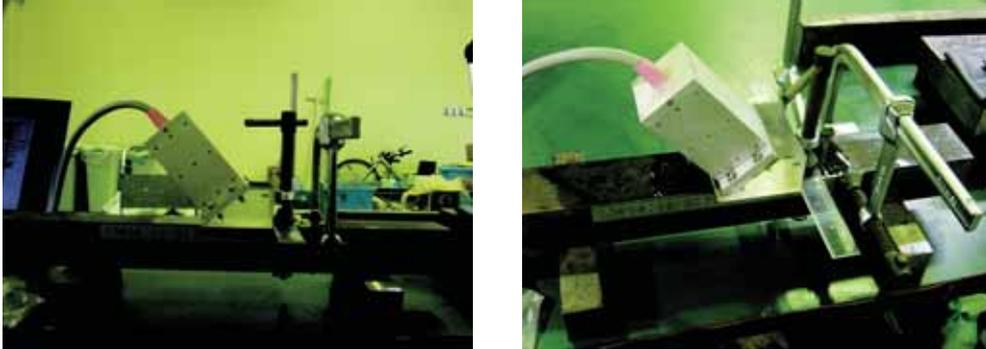
り精密な画像化を行うといった使い分けが有効になるものと考えられる。

3.4 垂直探傷と斜角探傷

これまでの一連の人工きずを用いた実験結果からわかるように，開口合成法によって形状を再現できるのは超音波が直接入射して反射する境界である．超音波が入射しない影の境界部分の形状を再現することはできない．したがって，アレイ探触子を試験体表面に垂直に置いた垂直探傷では，欠陥の上面近傍の境界しか再現することはできず，欠陥全体の3次元形状を再現することはできない．しかし，鋼構造物の多くが板部材でできていることを考慮すれば2.5.2節において述べたように，板表面からの斜角探傷ならびに板の上下面における反射波を利用した斜角探傷を利用すると開口角を大きくとることができ，精度が向上すると考えられる．そこでここでは，図3.30のようにマトリクスアレイ探触子を斜めウェッジにのせて斜角アレイ探傷を行い，板裏面での反射波も用いることによって垂直アレイ探傷では得ることのできなかつた影の領域での境界形状の再構成を試みる．

用いた供試体は $\phi=6\text{mm}$ の横穴を持つ鋼材で，図3.31に示すように，縦波を用いた垂直探傷に加えて，直達の横波が 65° で横穴に入射する斜角探傷と，板裏面における反射横波が下方から 65° で入射する斜角探傷の3種類のアレイ探傷を実施した．

図3.32～図3.34はそれぞれ，縦波を用いた垂直探傷，直達横波を用いた斜角探傷，ならびに，板裏面での反射横波を用いた斜角探傷によって得られた横穴の境界形状の画像である．垂直探傷では横穴の上部だけしか再現できていなかったが，斜角探傷を行うこ



試験体：板厚60mm、 $\phi 6$ mm貫通横穴
 探触子：16×16マトリクスアレイ探触子
 シュー材：ポリスチレン、横波斜角65度

図 3.30: 斜角アレイ探傷の計測状況 .

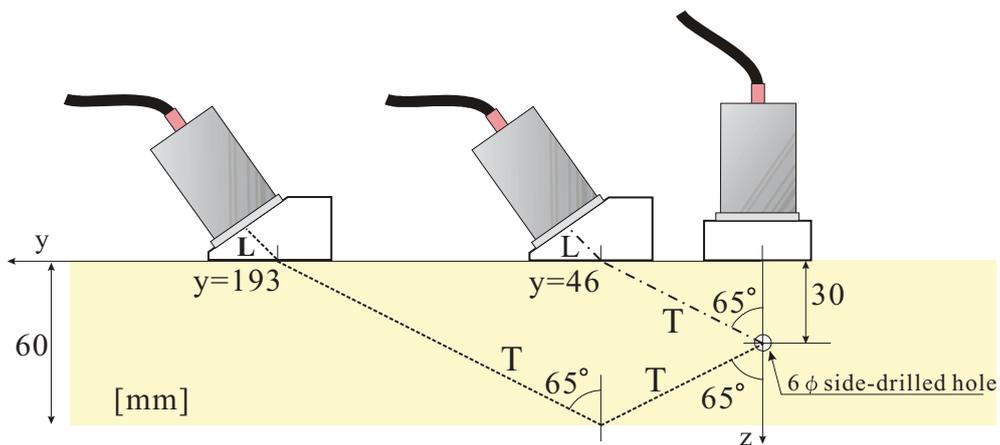


図 3.31: 垂直アレイ探傷と斜角アレイ探傷 .

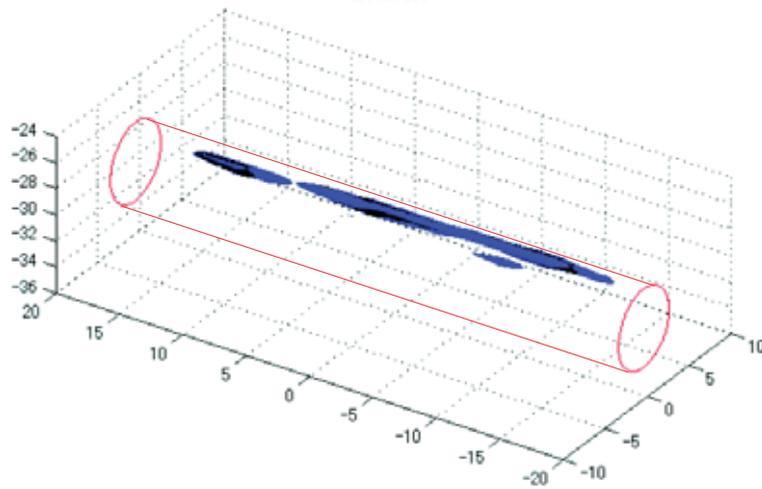


図 3.32: 垂直アレイ探傷によって再現された横穴境界 .

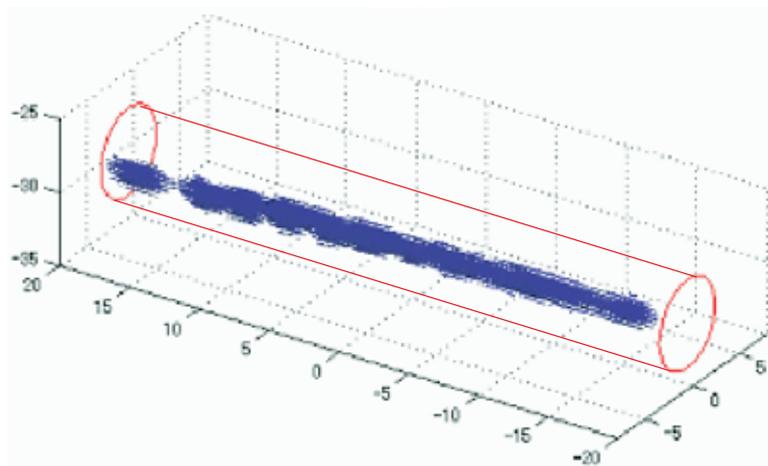


図 3.33: 直達横波を用いた斜角アレイ探傷によって再現された横穴境界 .

とによって横穴の側面が超音波の反射面となって、その部分の境界形状がよく再現されていることがわかる .

図 3.35 は図 3.32 ~ 図 3.34 の結果をまとめて一つの図として表したものである . このように、垂直アレイ探傷ならびに斜角アレイ探傷の複数の探傷結果を合成することによって、欠陥の 3 次元形状を詳しく把握できることがわかる .

3.5 アレイ探傷データの高速処理

三次元の開口合成を行うことを考え、画像化領域の x 方向分割数を $M_x - 1$ 、 y 方向および z 方向の分割数をそれぞれ $M_y - 1$ 、 $M_z - 1$ とし、アレイ探触子の素子数が N であるとする . このとき開口合成を行うために必要演算の回数 Q は C をある定数として

$$Q = CN^2M_xM_yM_z \quad (3.1)$$

によって表される . これは、画像化領域が大きい場合やアレイ探触子の素子数が大きい場合には、膨大な回数の演算が必要となることを意味している . そのため、探傷領域が広い場

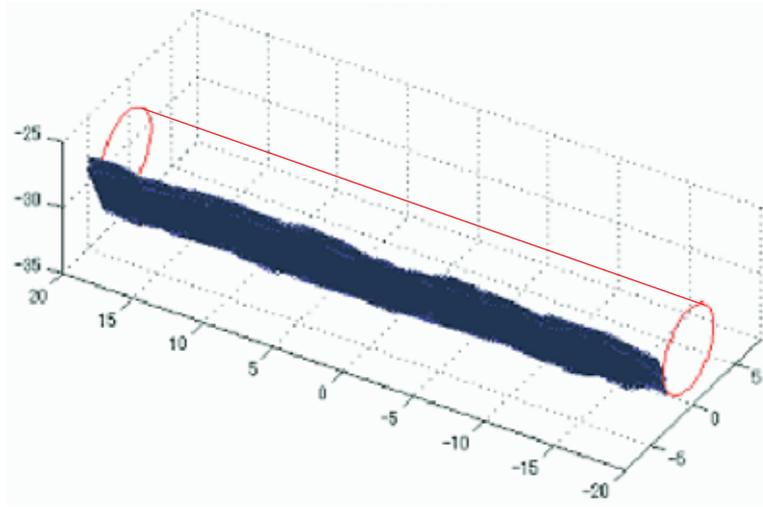


図 3.34: 板裏面での反射横波を用いた斜角アレイ探傷によって再現された横穴境界 .

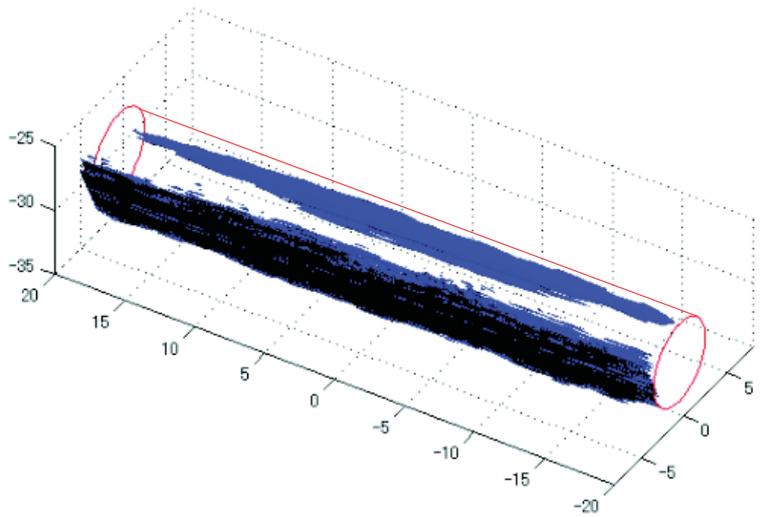


図 3.35: 図 3.32 ~ 図 3.34 における結果の合成画像 .

合にも対応していくためには、何らかの方法で開口合成法によるデータ処理を高速化する必要がある。土木構造物では検査対象が一般に大きいのが、検出すべき欠陥の寸法はあるそれに応じて大きくなるというものではない。従って、 M_x, M_y, M_z が大きくなってしまふことはやむを得ない。一方、 N^2 の項は一度のアレイ探傷によって取得できる波形の数を意味しており、計測した全波形を使う必要がないならば、この項を小さくすることでデータ処理を高速化することができる。ここでは、そのための方法として開口角の考え方を利用する方法を以下に示す。

3.5.1 開口角の考え方を利用した開口合成法の高速化

前章において開口角を定義した際に、送信点 x_i 、受信点 x_j の組み合わせで観測を行ったときに強いエコーが得られたならば、それは着目点 x に

$$\hat{x}_{ij} = \frac{(x_i - x) + (x_j - x)}{|(x_i - x) + (x_j - x)|} \quad (3.2)$$

の向きを持つ面があるためであると考えられることを述べた。逆に言えば、この送受信点の組み合わせでは、 x において \hat{x}_{ij} 方向を向く面の情報が得られると考えることができる。今、アレイ探傷試験では様々な送受信点の組み合わせによって計測を行うが、その際

$$\hat{x}_{ij} = \hat{x}_{i'j'}, \quad (i \neq i', j \neq j') \quad (3.3)$$

となる可能性がある。もし式 (3.3) が成り立つ i, i', j, j' が存在するならば、 x について開口合成を行うにあたり、アレイデータには冗長性があるということになる。そこで

$$\hat{x} = \hat{x}_{ij} \quad (3.4)$$

となる (i, j) のうちいずれか一つだけを開口合成に利用するようにすれば、入力データの冗長性を取り除き、開口合成によるデータ処理の高速化を図ることができる。

数値計算上はこれを以下のようにして実現する。はじめに、画像化領域内に代表点 o をとり、その点に対して全ての \hat{x}_{ij} を計算する。計算した \hat{x}_{ij} は三次元問題の場合には球座標の角度成分 (ϕ, θ) で、二次元問題の場合には極座標の偏角 θ で表し、2次元平面あるいは θ 軸上にプロットする。この平面(数直線)を適当な大きさのグリッド領域に分割しておき、同じグリッド内に入るものは数値解析上同じ \hat{x}_{ij} をもつと見なす。後は、数値解析上同一の \hat{x}_{ij} をもつ観測点のうちどの組み合わせで得られた波形を開口合成に用いるかの基準を決めればよい。例えば、 $(x_i - o) \cdot (x_j - o)$ が最小となる (i, j) を選ぶというのも一つの方法であり、我々はこの基準を採用している。ところで、画像化領域が大きい場合、基準点 o の取り方によって、開口角はかなり変化してしまう。そのような場合には、画像化領域を小さなサブドメインに分割し、サブドメインごとに上記の手順を繰り返して適用すればよい。

3.5.2 高速データ処理法による開口合成結果

以上の方法によって、アレイ探傷データの一部を用いて行った開口合成の結果を示す。開口合成に用いた入力データは全て、先に示した人工きず試験体を用いた基礎実験によって取得したものである。

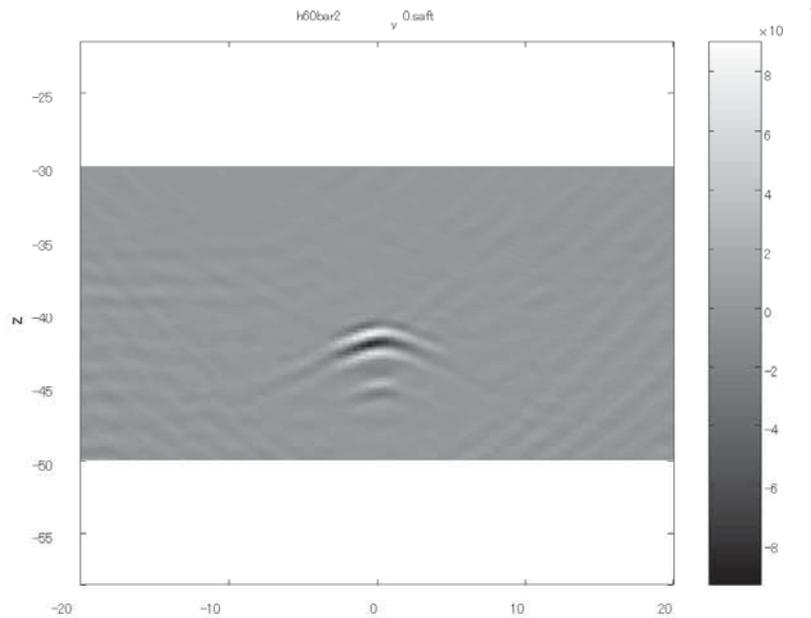


図 3.36: 開口合成像 (横穴試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 使用波形データ数=140)

リニアアレイ探触子

\hat{x}_{ij} の偏角を θ とし, 使用する波形データの選択の際, θ 軸上の $(-\pi, \pi]$ の範囲を $\Delta\theta$ の区間に分割し, この同一区間中の \hat{x}_{ij} は同じ方向を向くものとする。以下の結果は全て $\Delta\theta = 0.5^\circ$ とした場合の結果である。また, θ を求める際の基準点 o は画像化領域の中心にとることとした。いずれの結果においても, 全データを使用した場合に比べて開口合成像のノイズレベルがあがっているが, 欠陥箇所での識別は可能な程度の結果が得られている。これらの結果を得るために実際に使用したデータ数は, 基準点 o の取りかたによってことなるが, およそ 100 ~ 200 個程度の波形データを用いて計算を行っている。従って, 計算時間は全 4096 データを用いた場合の 20 分の 1 程度でよい。そのため, その点を考慮すれば良好な結果が得られているといえる。

マトリクスアレイ探触子

同様な方法を用いて, マトリクスアレイの場合についても開口合成を行った。この場合方向ベクトル \hat{x}_{ij} は (ϕ, θ) の 2 次元平面上の点として表される。ここでは, $\phi - \theta$ 平面の領域 $(-\pi, \pi] \times [0, \pi]$ を大きさ $\Delta\phi \times \Delta\theta$ の矩形領域に分割し, 同一の領域に入る \hat{x}_{ij} は互いに等しいと見なす。以下には, $\Delta\phi = \Delta\theta = 1^\circ$ として行った開口合成の結果を示す。

図 3.43 ~ 図 3.47 に開口合成の結果を示す。横穴試験体の場合は, 全データを使用した場合と比較してもほとんど遜色がないのに比べ, それ以外のケースでは明らかにノイズの増加がみられる。また, 矩形, V 字ノッチともに, ノッチ先端の部分がはっきりと現れなくなり, 測定位置をノッチ中心からずらした図 3.45 のケースではほとんど判別不能となっている。これらの結果は, リニアアレイに対する結果と比べても, データ数の減少にともなう

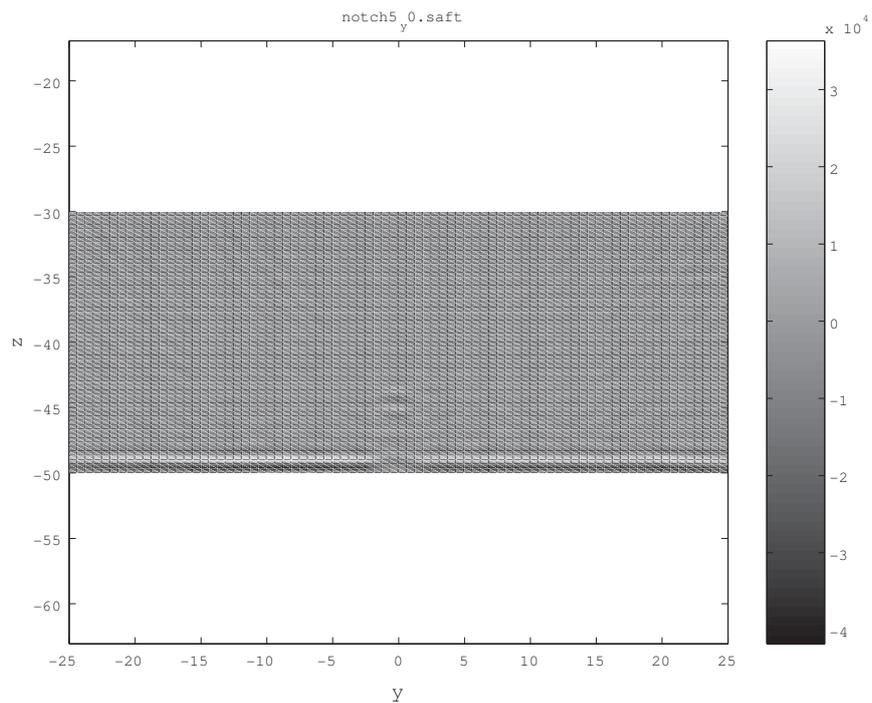


図 3.37: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体,2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 0\text{mm}$, 使用波形データ数=140)

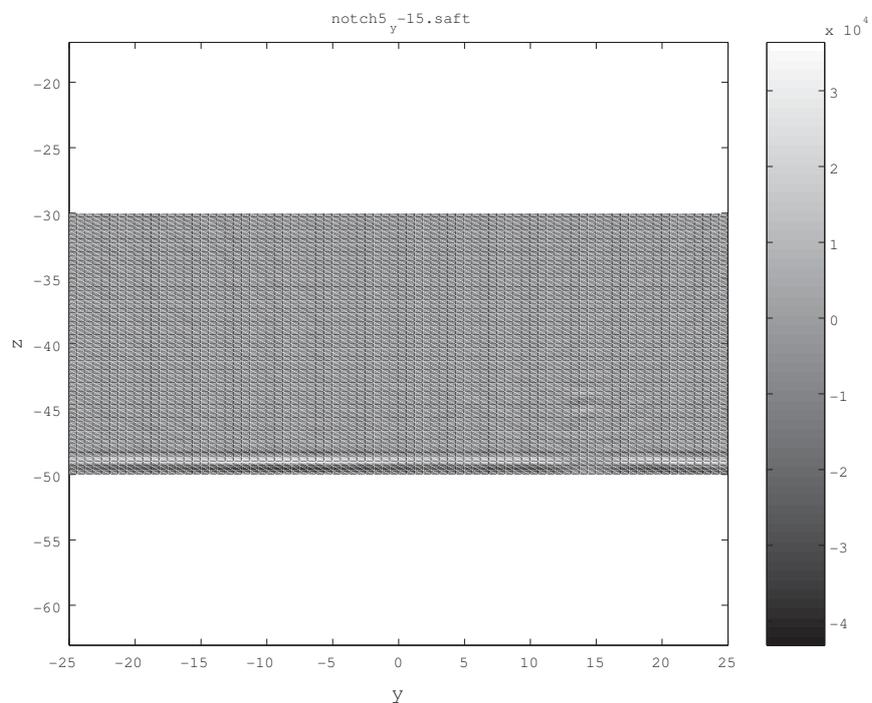


図 3.38: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体,2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = -15\text{mm}$, 使用波形データ数=140)

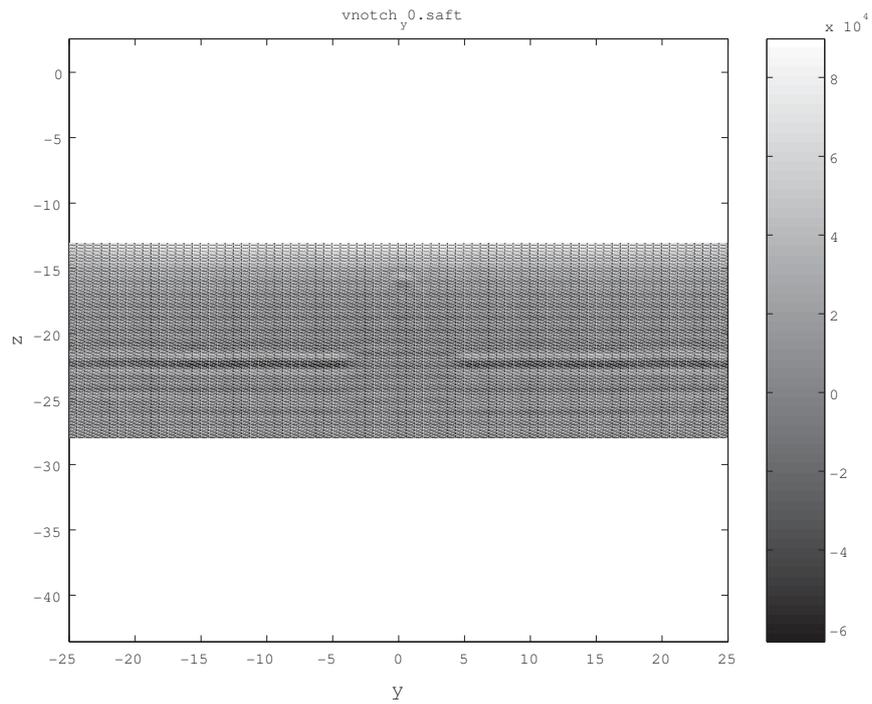


図 3.39: 開口合成像 (V 字ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 0\text{mm}$, 使用波形データ数=216)

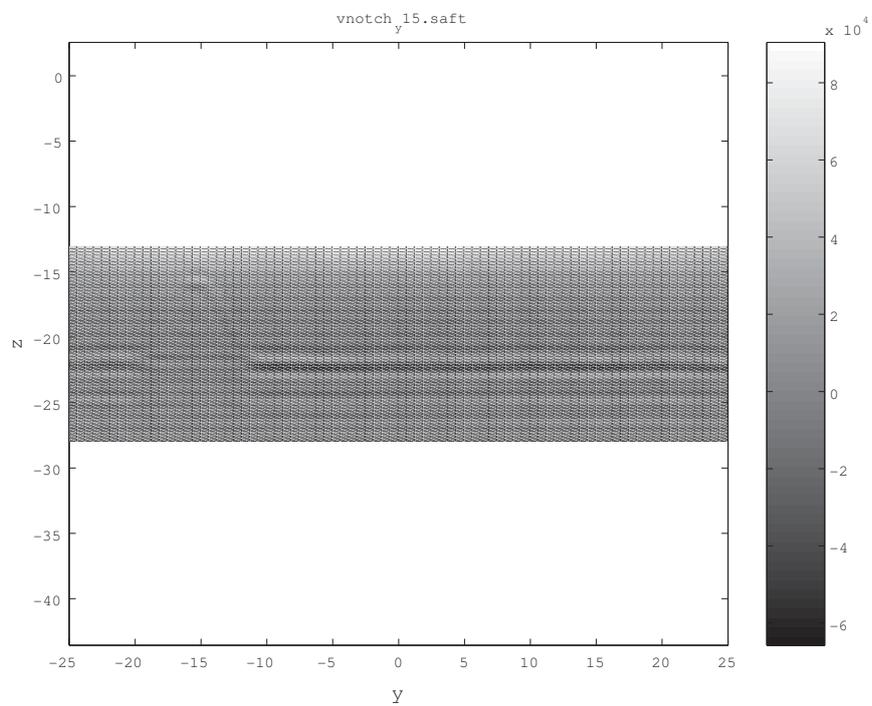


図 3.40: 開口合成像 (V 字ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 15\text{mm}$, 使用波形データ数=216)

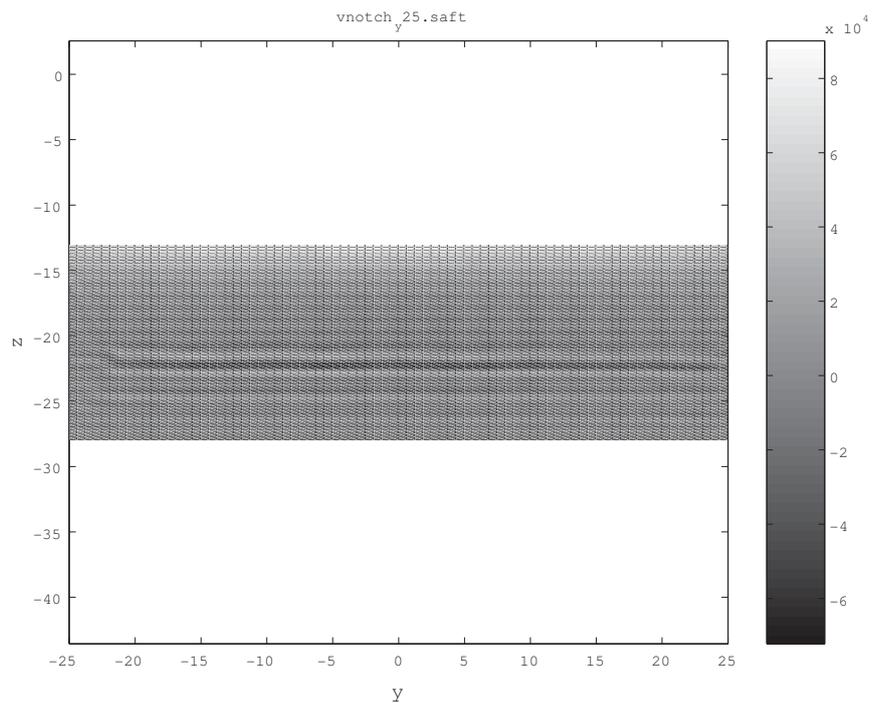


図 3.41: 開口合成像 (V字ノッチ試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 25\text{mm}$, 使用波形データ数=216)

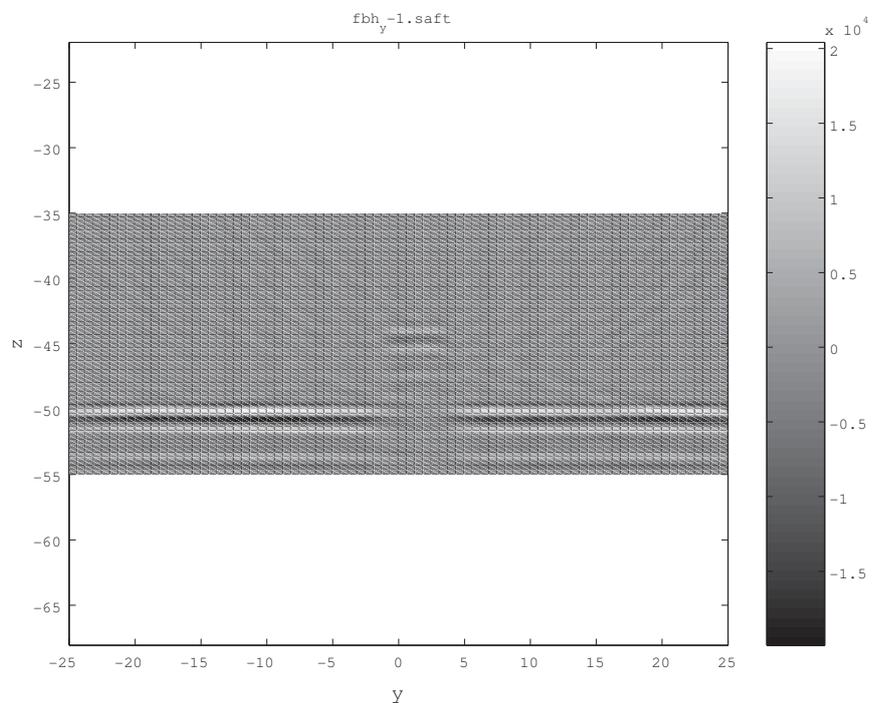


図 3.42: 開口合成像 (平底穴試験体, 2MHz リニアアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = -1\text{mm}$, 使用波形データ数=128)

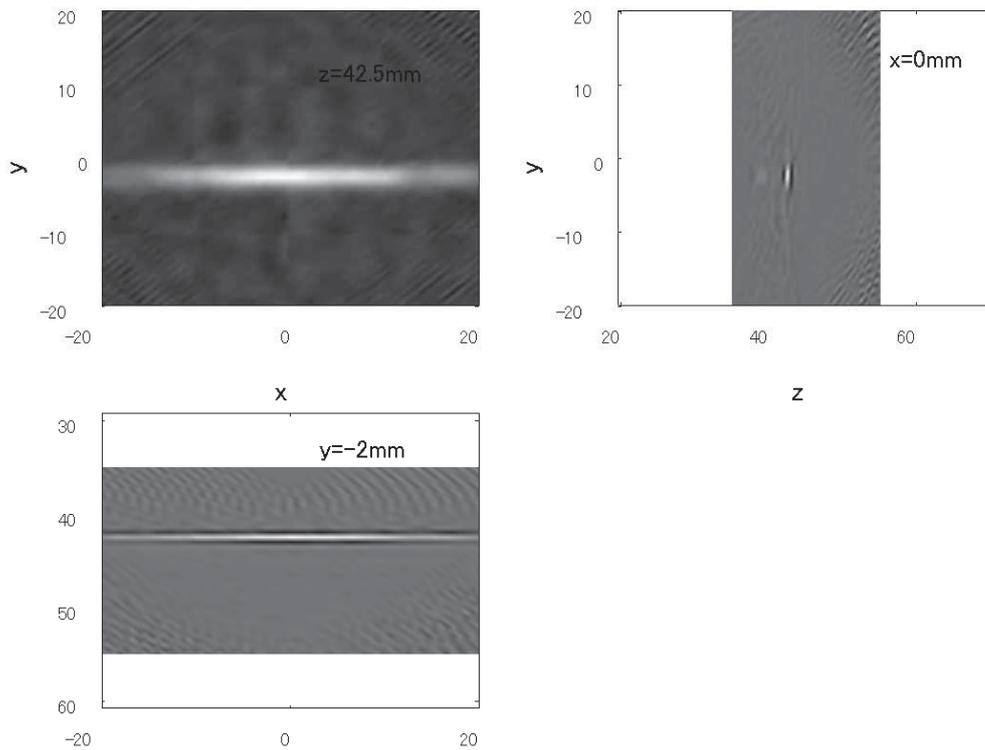


図 3.43: 開口合成像 (横穴試験体, 5MHz マトリクスアレイ探触子を使用, 使用波形データ数=4036)

像構成能力の低下がマトリクスアレイでより顕著となっていることを示している。この点についてはより詳細な検討を待たねば成らないが、これはマトリクスアレイの各素子をもつ指向性が強いことに起因しているのではないかと考えられる。一方、使用データ数の面で見ると、V字ノッチの場合には1万個以上の波形を使用しており、これは全波形データ数 32768 の 1/3 程度でしかなく、あまり計算効率の改善につながっていない。これは、画像化領域が探触子面に近いことに起因しているが、 $\Delta\phi$, $\Delta\theta$ の取りかたを基準点 o に応じて変化させることである程度緩和できるものと考えられる。

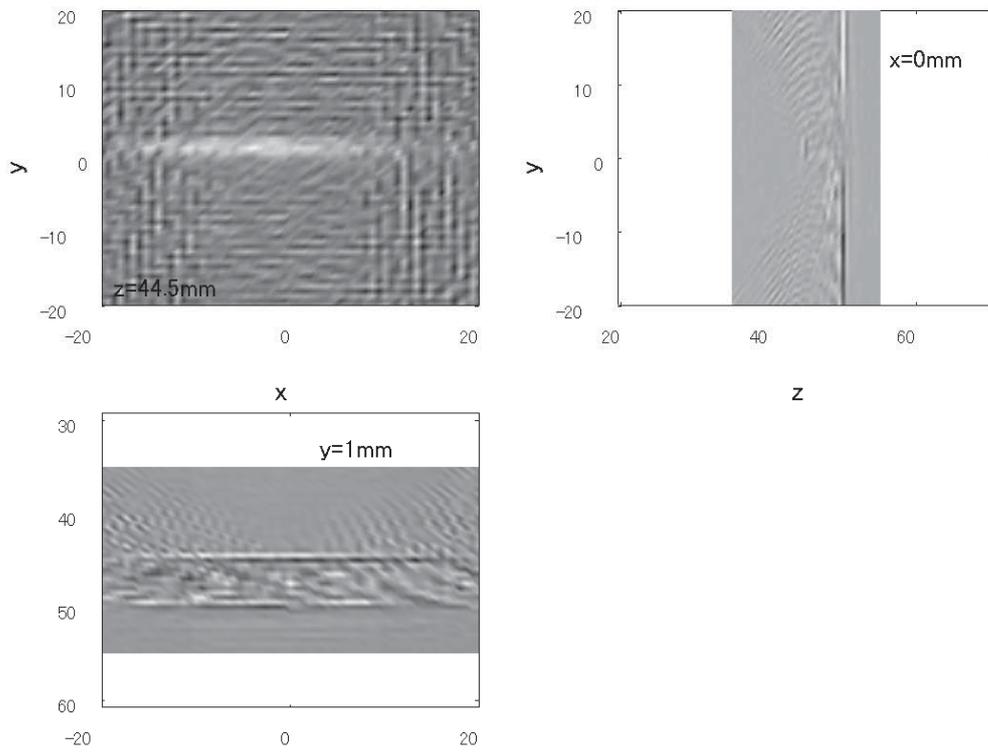


図 3.44: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体, 5MHz マトリクスアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 0\text{mm}$, 使用波形データ数=4162)

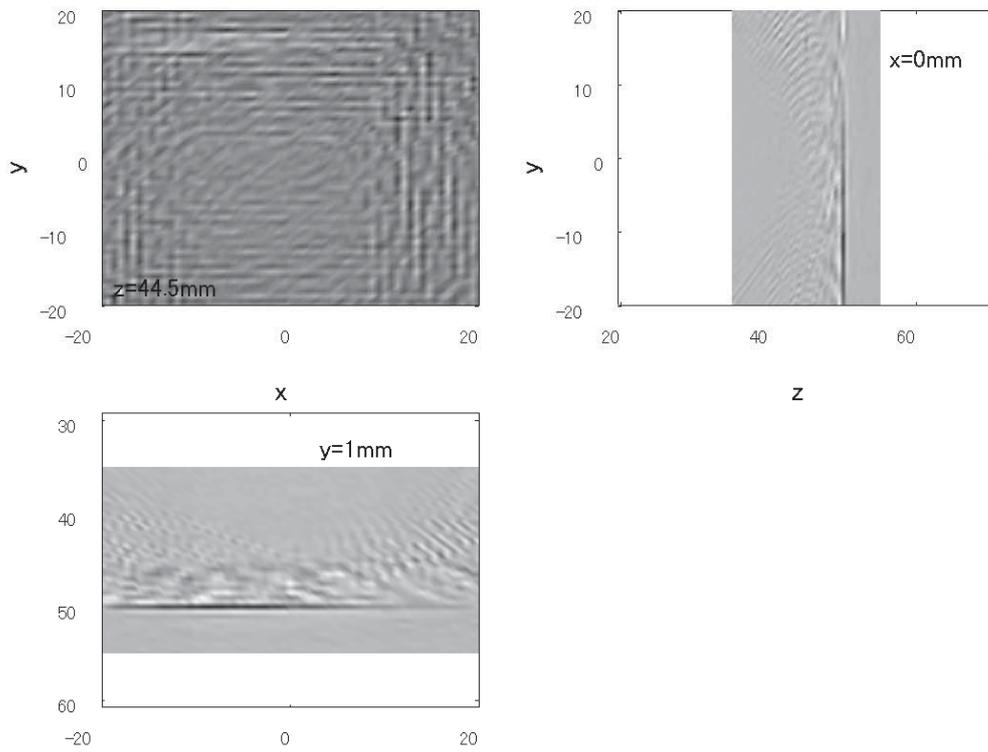


図 3.45: 開口合成像 (矩形ノッチ試験体,5MHz マトリクスアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = -15\text{mm}$, 使用波形データ数=4162)

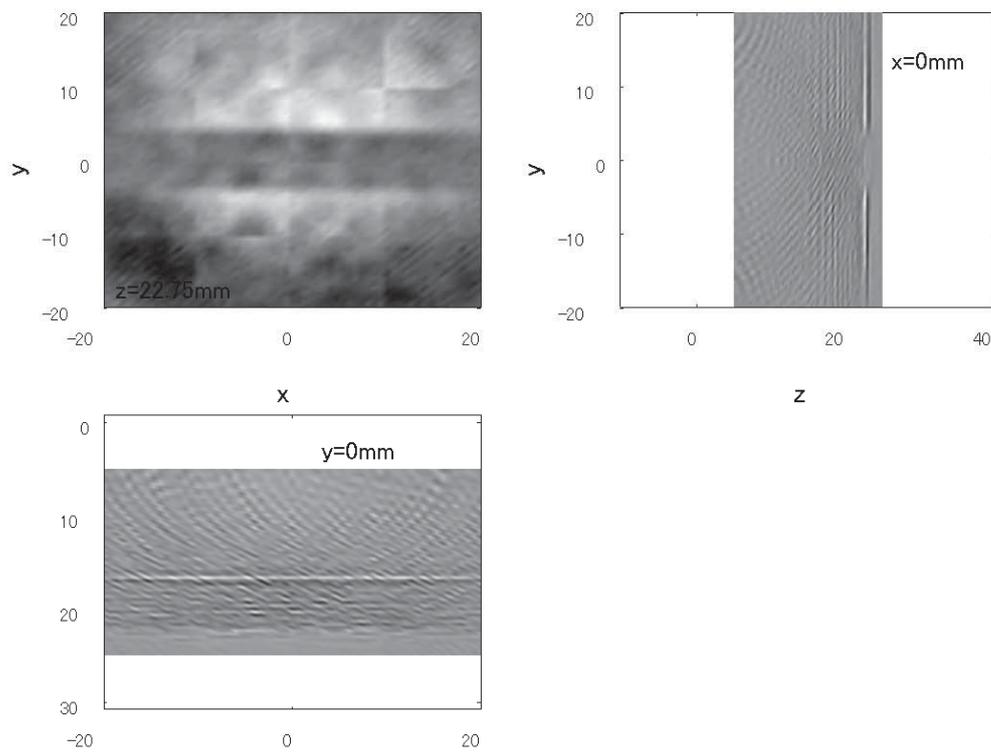


図 3.46: 開口合成像 (V字ノッチ試験体,5MHz マトリクスアレイ探触子を使用, 計測点位置 $Y = 0\text{mm}$, 使用波形データ数=11471)

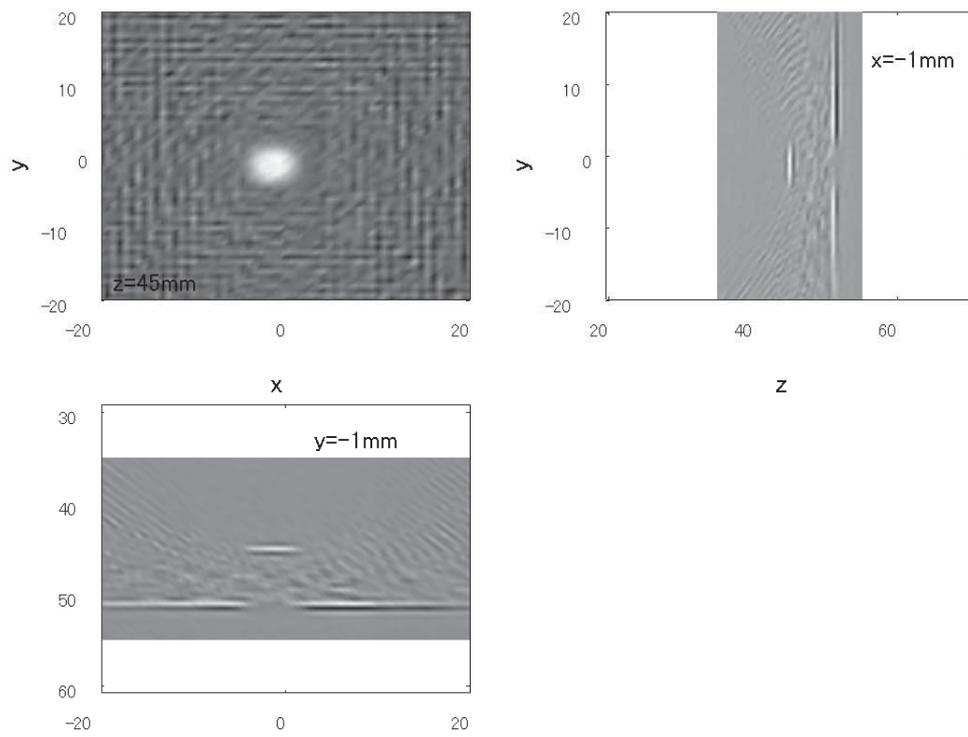


図 3.47: 開口合成像 (平底穴試験体,5MHz マトリクスアレイ探触子を使用, 使用波形データ数=4096)

第4章 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発

4.1 超音波探傷回送試験結果

4.1.1 回送試験の概要

本節では、2004年春に行われた土木研究所主催の第一回超音波探傷回送試験に参加した際に得られた探傷結果を開口合成法によって画像化した結果を以下に示す。この回送試験では、鋼製橋脚隅角部を模擬した小型試験体を作成し、各探傷チームが独自の探傷システムを持参して探傷が行われた。試験体は計9体用意され、そのうち7体には溶接による試験体組み立て後、ドリル穴やスリットなどの人工きずが加工され、残る2体には溶接時に意図的に各種の溶接欠陥が導入されている。前者7体は人工きず試験体、後者2体は実きず試験体の名称で呼ばれ、後者を実きず試験体と呼ぶのは以下に述べる方法で溶接欠陥を導入しているため、機械加工では作成できない実際に発生する溶接欠陥に類似した”人工的な”欠陥となっていることによる。ここで導入された溶接欠陥は、融合不良、割れ、および開先部に残された未溶着部の三種類でありその作成方法は以下のようなものである。融合不良の作成にあたっては、CO₂溶接を行う際、意図的に溶接線を変化させて空間を作り、それをTIG溶接によって蓋をすることで後の溶接で空間が埋まらないようにしてある。一方、割れを作成するためには、カーボンの粉を撒きそのまま溶接を行い溶接金属内に不純物を析出させ割れを起こさせる。未溶着部に関しては、開先部のルート面を大きくし、裏はつりを行わないことで作成されている。探傷チームはこれら人工きず、実きずのいずれがどの位置に入っているのかは知らされずに探傷を行い、探傷結果から位置、大きさ、欠陥種別の判定を行うことを求められる。ただし、探傷は必要であればどの面から行うことも許されている。ここでは、全探傷結果を示すには膨大な紙数を要するため、実きず試験体の探傷結果の一部を紹介することとする。

4.1.2 試験体および探傷面

図4.1に実きず試験体の形状を示す。2体の実きず試験体は図4.2に示すように同じ形状および寸法となっておりそれぞれC1-40、C2-40の名称で区別されている。ただし、これら2体に含まれる溶接欠陥は位置、数、タイプ等同じではなくそれら欠陥の位置等は探傷時には不明である。また、探触位置や検出、画像化した欠陥の位置を示すためC1-40、C2-40試験体のいずれにも、図4.3に示すような座標系がとられ、各面にはAからIまでのアルファベットによって呼称が割り振られている。今回、我々のグループではA面のみからマトリクスアレイを用いて垂直探傷を行い、その結果を用いて三次元開口合成を行った。探傷は溶接線方向に沿って図4.4に示す範囲で行っており、その際の探触子の設置状況は図4.5に示す通りである。

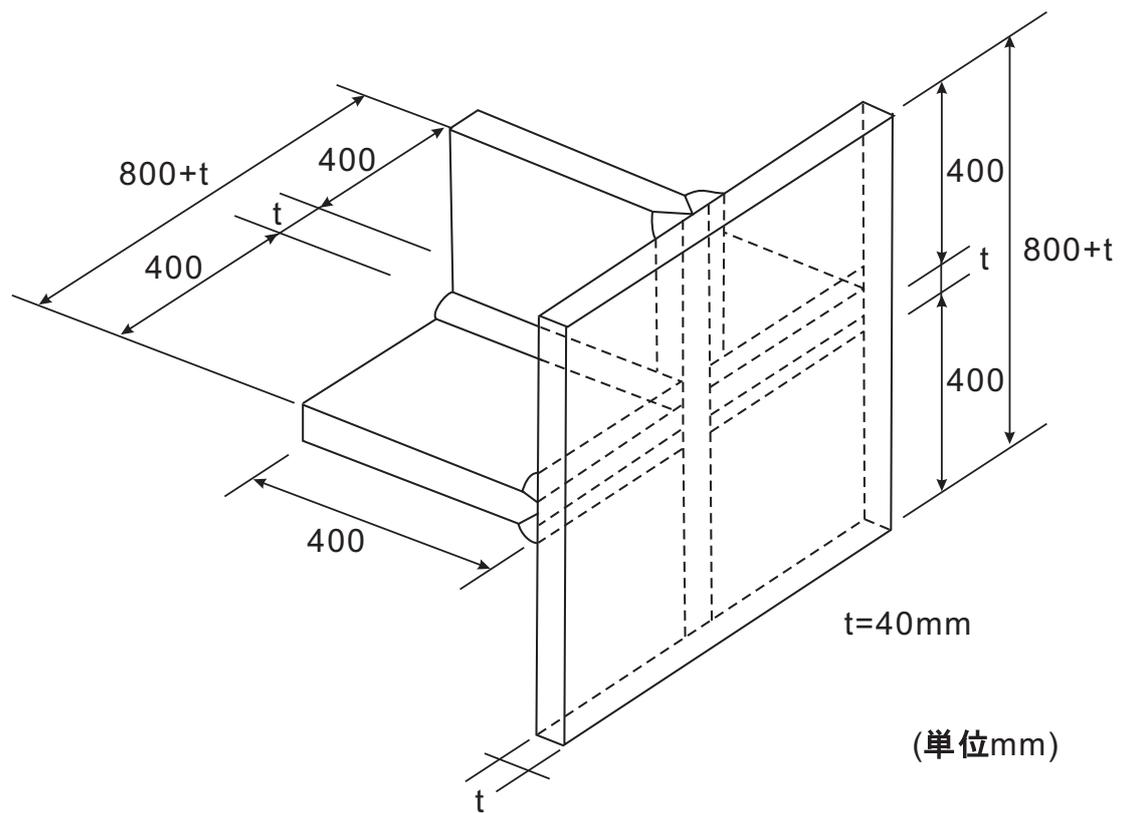
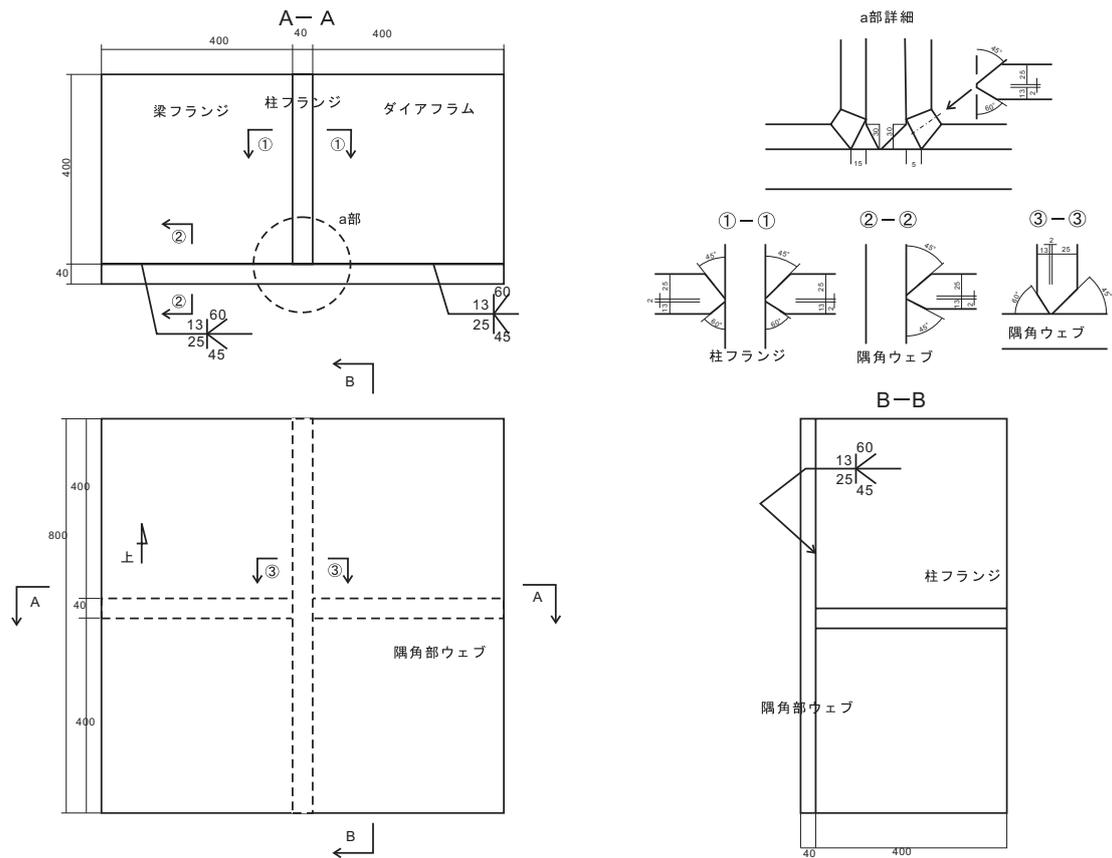


図 4.1: 実きず試験体



実きず試験体形状
(40mm試験体:2体)

図 4.2: 実きず試験体の詳細

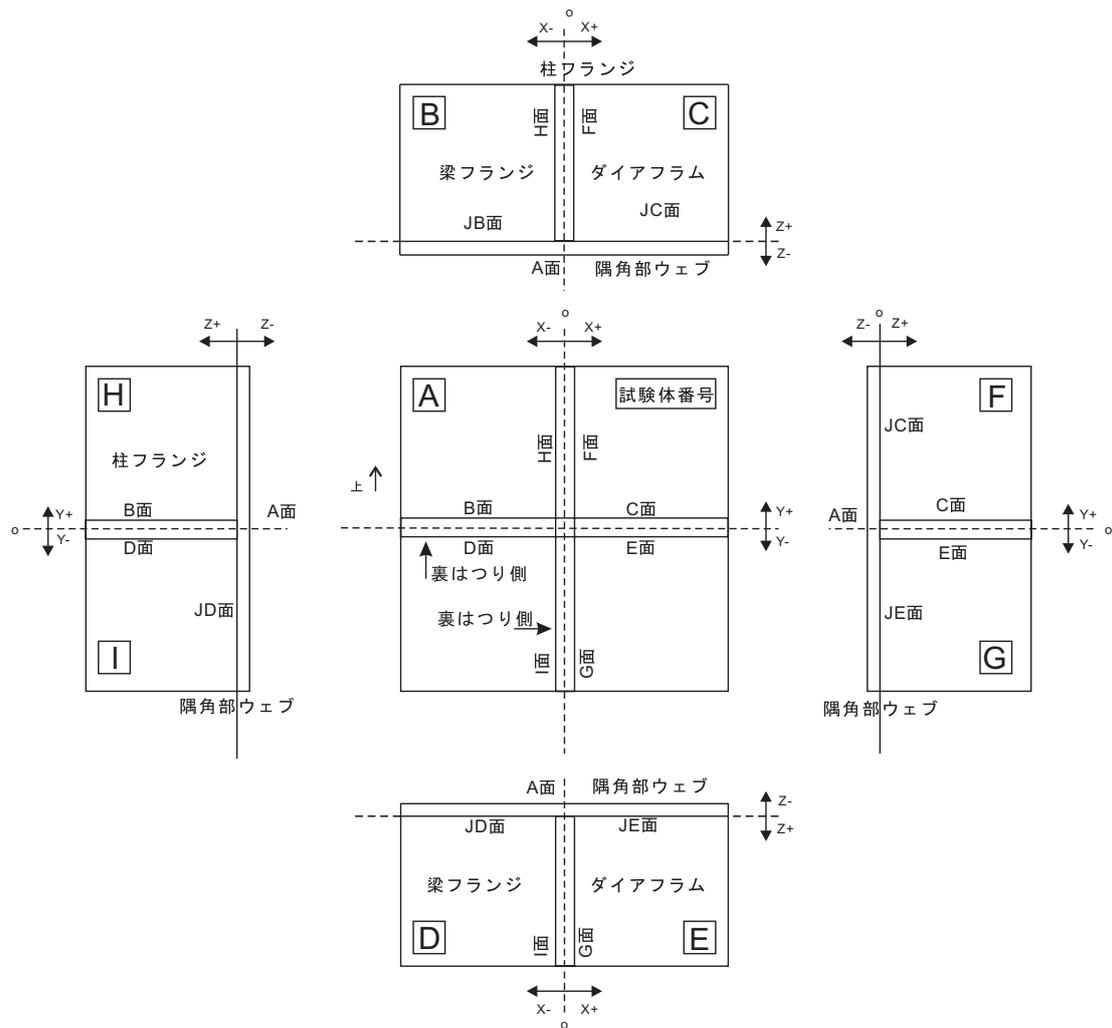
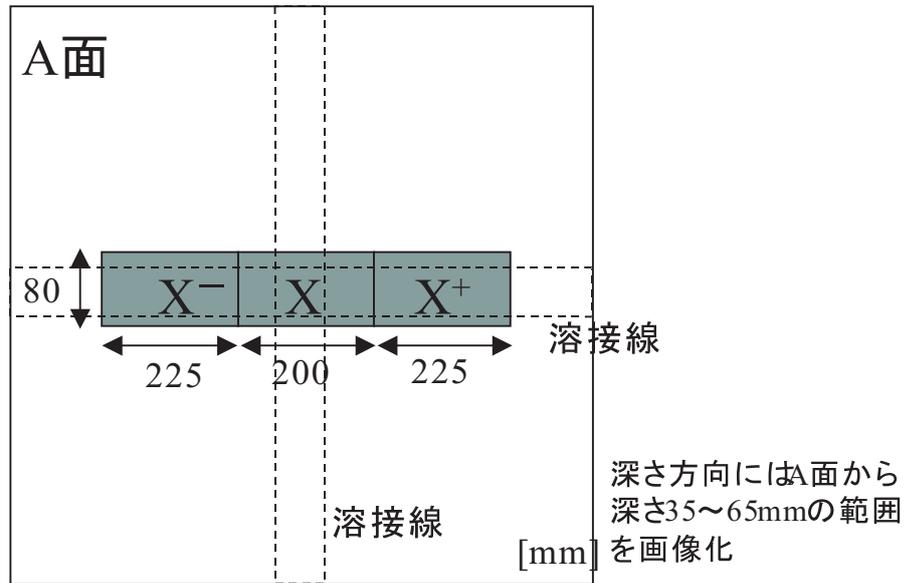
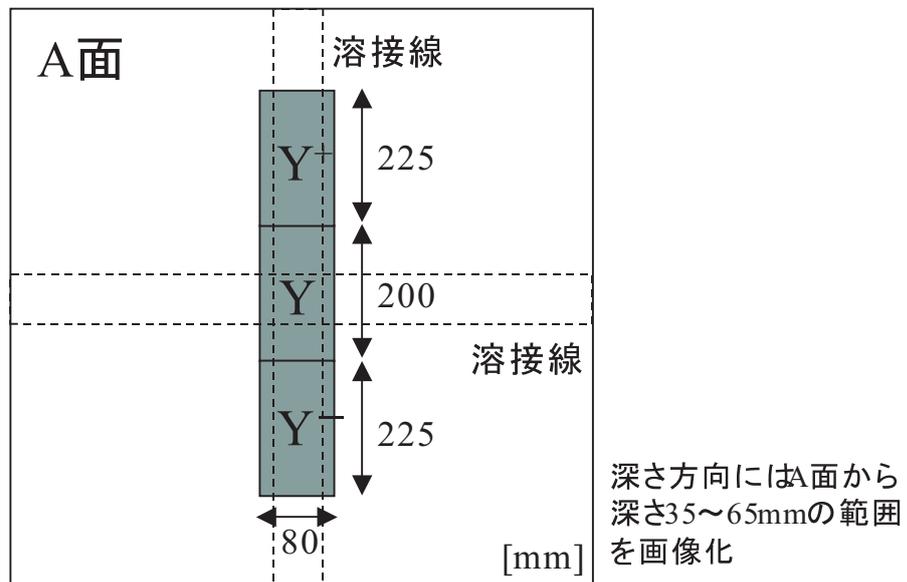


図 4.3: 探傷位置を示すための座標系および各面の名称



x方向走査X-,X,X+の三つ領域に分割して画像化



y方向走査Y-,Y,Y+の三つ領域に分割して画像化

図 4.4: 実きず試験体 C1-40 および C2-40 における探傷範囲および画像化領域

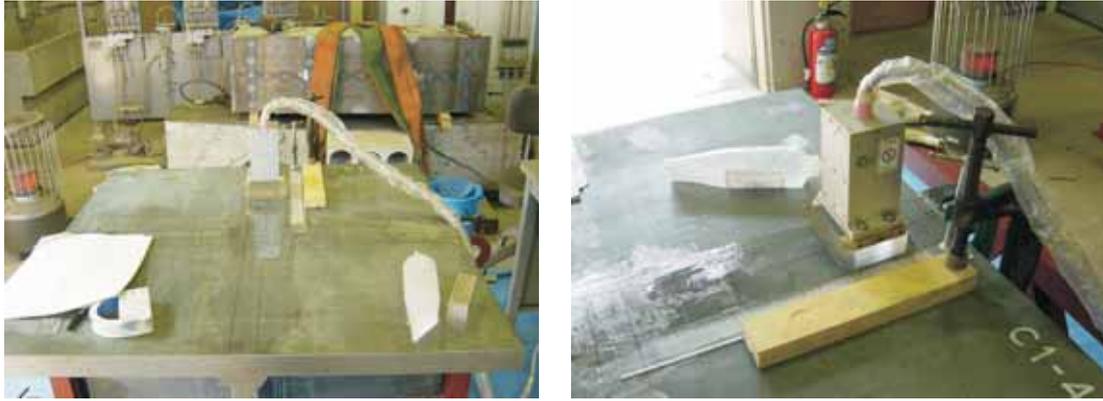


図 4.5: 探触子の設置状況

4.1.3 実験結果 (開口合成結果)

計測波形を用いて開口合成を行った結果を以下に示す. 図 4.6 から図 4.9 は C1-40 試験体の, 図 4.10 から図 4.12 は C2-40 試験体に対する三次元開口合成の結果から, z 面 (水平面) のスライス画像を取り出してグレイスケールで表示したものである. スライス面の位置は図中に示される通りであり, z 座標は探傷面 (A 面) からの深さを表している. これらのスライス画像に現れている白あるいは黒で示された指示が反射源の存在を表していることはこれまでと同様だが, Y 方向に長く伸びている指示はその位置から判断して溶接部の余盛であることに注意を要する. 余盛からのエコーは比較的大きいため, ここで示した結果ではいずれの場合も最もはっきりと現れている. それ以外のいくつかの指示は余盛表面ではあり得ない位置に現れており, 確実に溶接欠陥であると判断できる. ここで, 得られた結果から明らかかなように, 実きず (溶接欠陥) は複雑な形状をしているため, 開口合成像も横穴やスリットの入った試験体に対する場合のように分かりやすい結果にはなっていないが, 超音波が入射される側に欠陥面が向いている場合は, ある程度検出が可能であることがわかる.

図 4.6 から図 4.12 に示したスライス画像は, どの位置に欠陥指示が現れているのか正確に把握する上で有用であるが, 空間的な配置がどのようになっているのか, あるいは欠陥どうしの相対的な位置関係はどのようになっているのかを把握する際にはとても分かりやすいとは言いがたい. そこで, 式 (2.9) で表される三次元開口合成の結果 $S(x)$ から適当な値で $S(x)$ の等値面を計算し, それを三次元的に表示した. 試験体 C1-40 の画像化領域 Y と Y^+ に対する結果をそれぞれ図 4.13, および, 図 4.14 に示し, C2-40 の画像化領域 Y と Y^+ に対する結果を図 4.15, および, 図 4.16 に示す. これらの結果を見ると, やはり Y 軸方向に長く伸びた余盛形状がはっきりと画像化されており, その間にいくつかの溶接欠陥が現れているのが分かる. これらの図は, 画像化に使用しているソフトウェア上では任意に回転させて表示させることができるため, スライス画像を調べるよりも三次元的な位置関係の把握が容易である. ただし, どのような値で等値面を描画するかを具体的に決定する方法については今後検討を要する課題である. また, 今回は A 面からのみの探傷データを利用しているが, 斜角探傷等を使用して A 面以外の面からの探傷データを用いて開口合成を行い, 複数の画像を組み合わせると 3 次元画像を構成すれば, より高精度で, かつ直感的に理解しやすい欠陥像のイメージングが可能になるものと思われる. この点も今後の課題である.

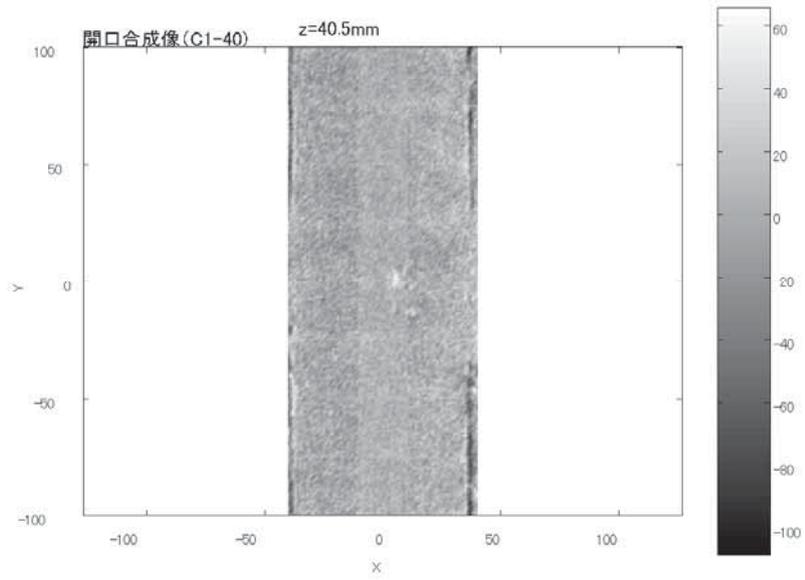


図 4.6: C1-40 試験体, 画像化領域 Y に対する開口合成結果 ($z=40.5\text{mm}$ におけるスライス画像)

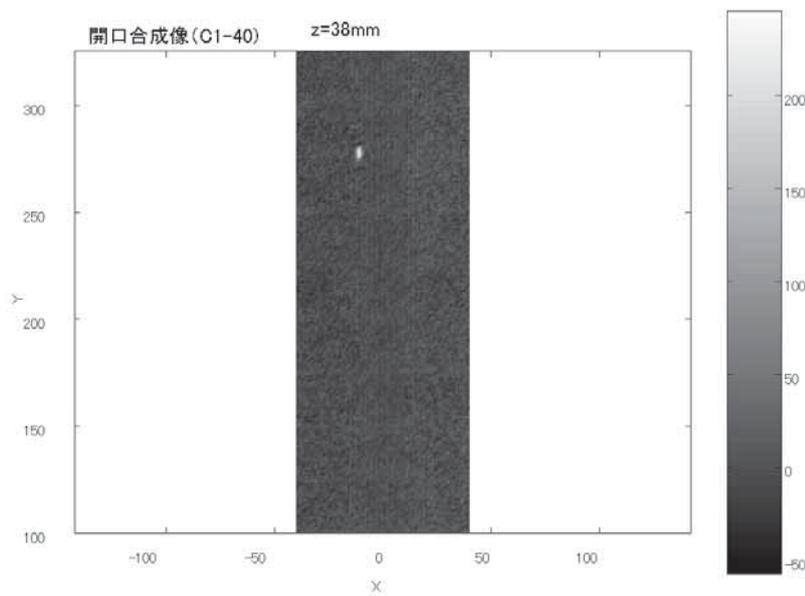


図 4.7: C1-40 試験体, 画像化領域 Y^+ に対する開口合成結果 ($z=38.0\text{mm}$ におけるスライス画像)

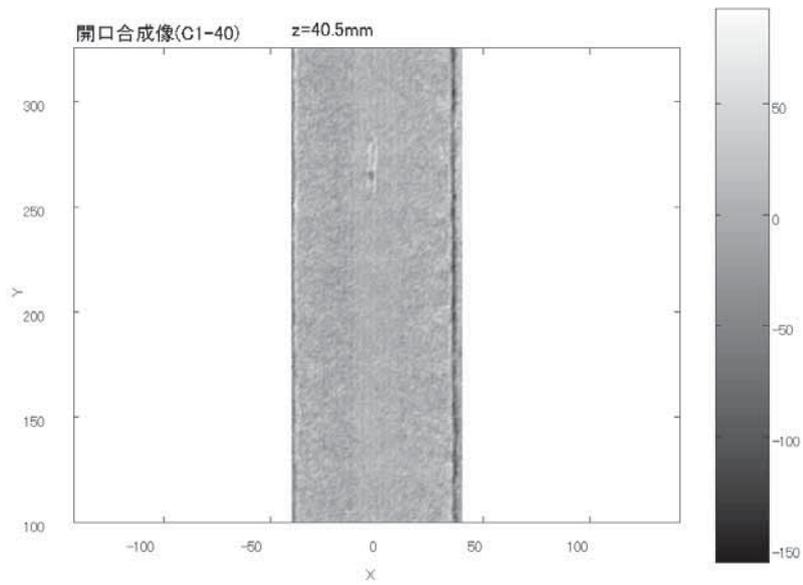


図 4.8: C1-40 試験体, 画像化領域 Y^+ に対する開口合成結果 ($z=40.5\text{mm}$ におけるスライス画像)

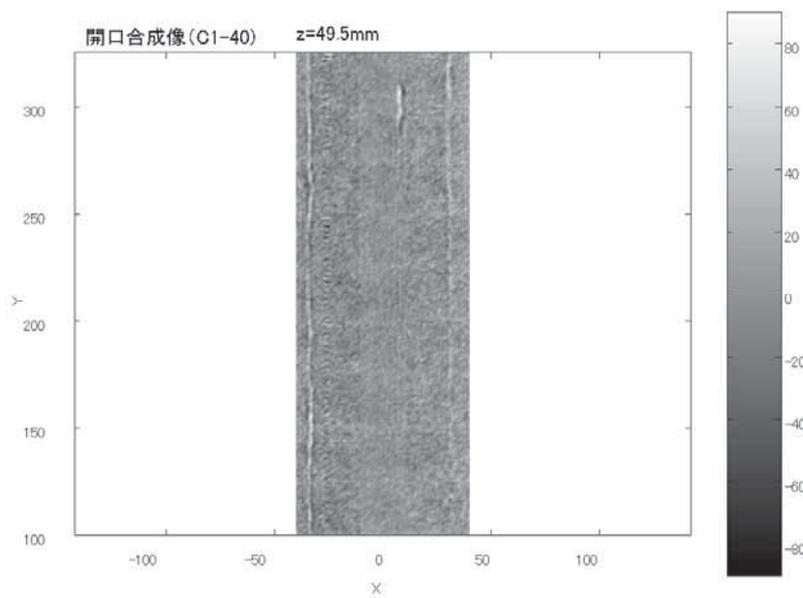


図 4.9: C1-40 試験体, 画像化領域 Y^+ に対する開口合成結果 ($z=49.5\text{mm}$ におけるスライス画像)

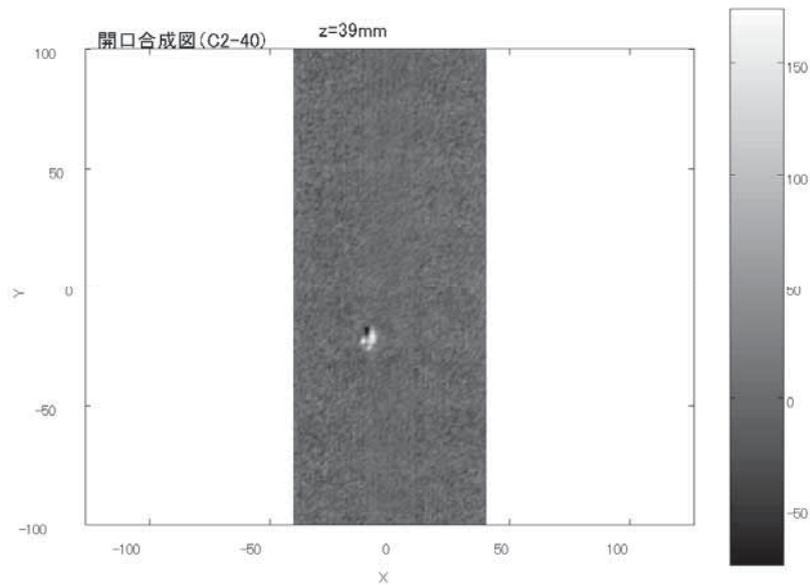


図 4.10: C2-40 試験体，画像化領域 Y に対する開口合成結果 ($z=39.0\text{mm}$ におけるスライス画像)

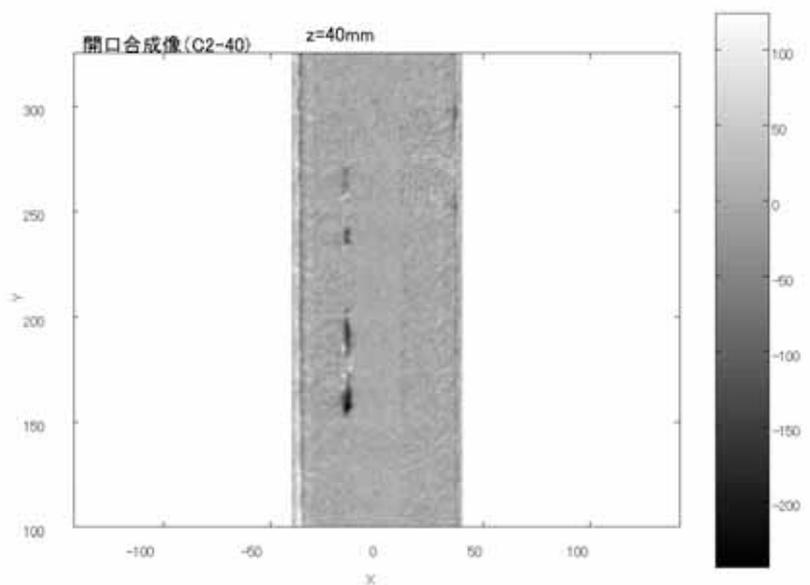


図 4.11: C2-40 試験体，画像化領域 Y^+ に対する開口合成結果 ($z=40.0\text{mm}$ におけるスライス画像)

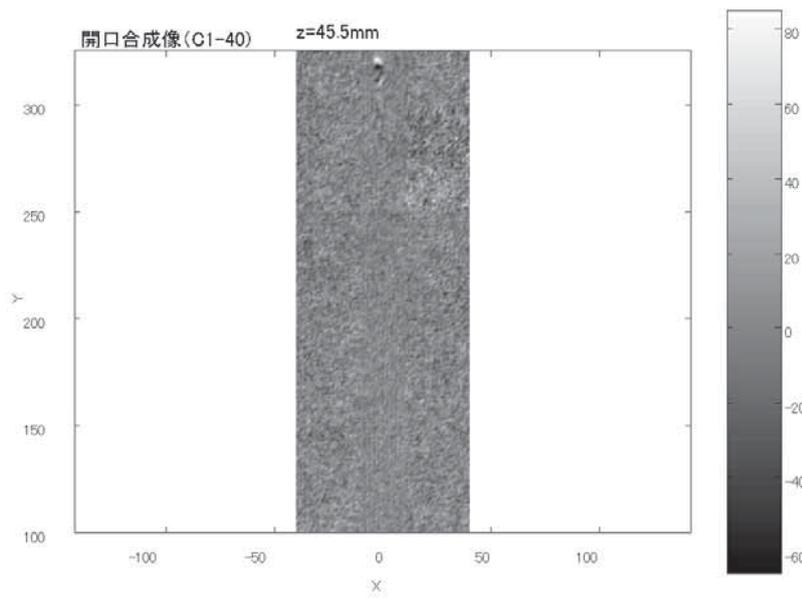


図 4.12: C2-40 試験体，画像化領域 Y^+ に対する開口合成結果 ($z=45.5\text{mm}$ におけるスライス画像)

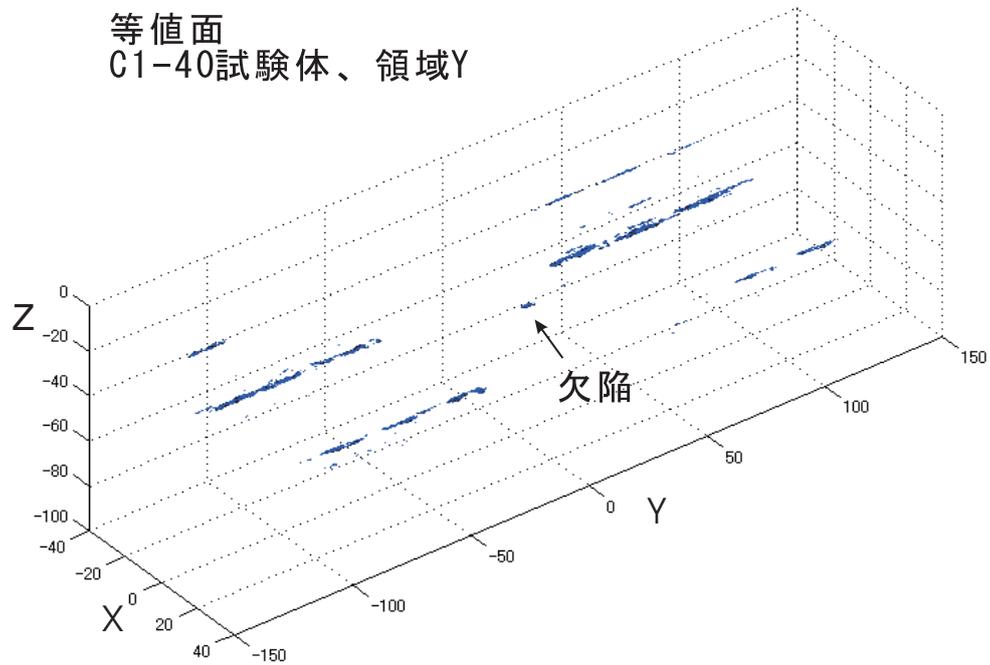


図 4.13: C1-40 試験体，画像化領域 Y に対する開口合成結果 (等値面)

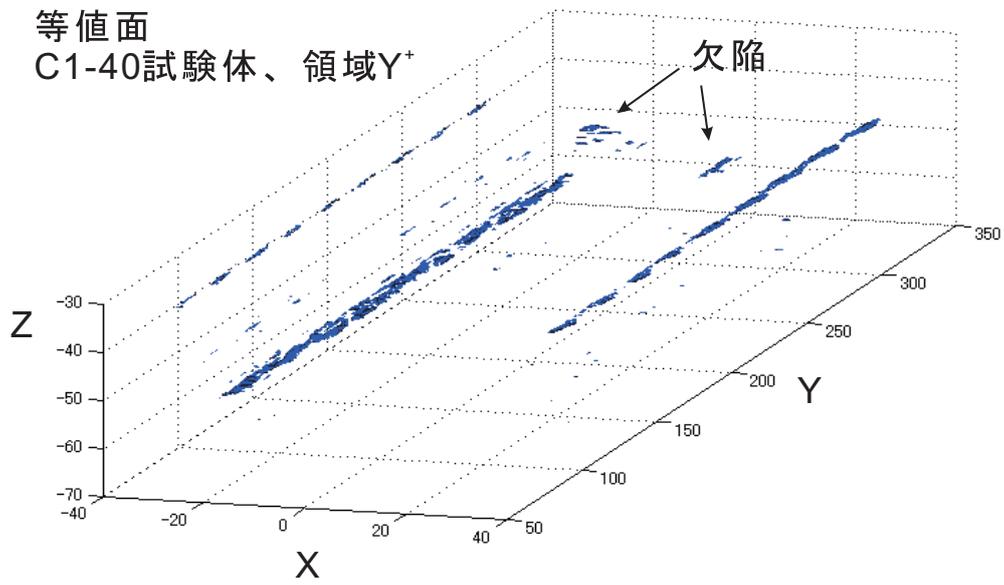


図 4.14: C1-40 試験体，画像化領域 Y^+ に対する開口合成結果 (等値面)

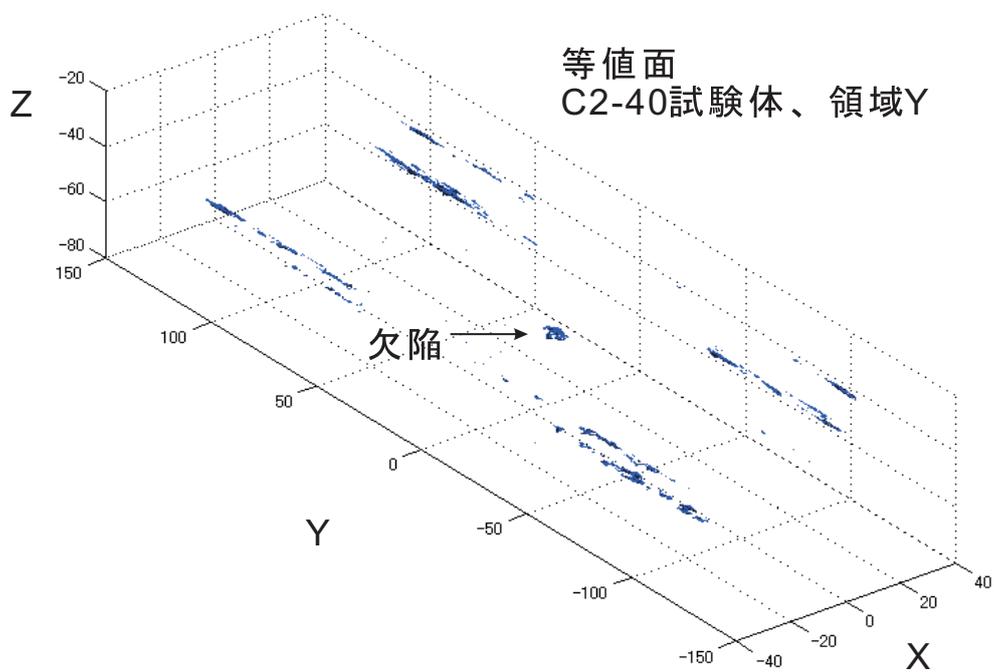


図 4.15: C2-40 試験体，画像化領域 Y に対する開口合成結果 (等値面)

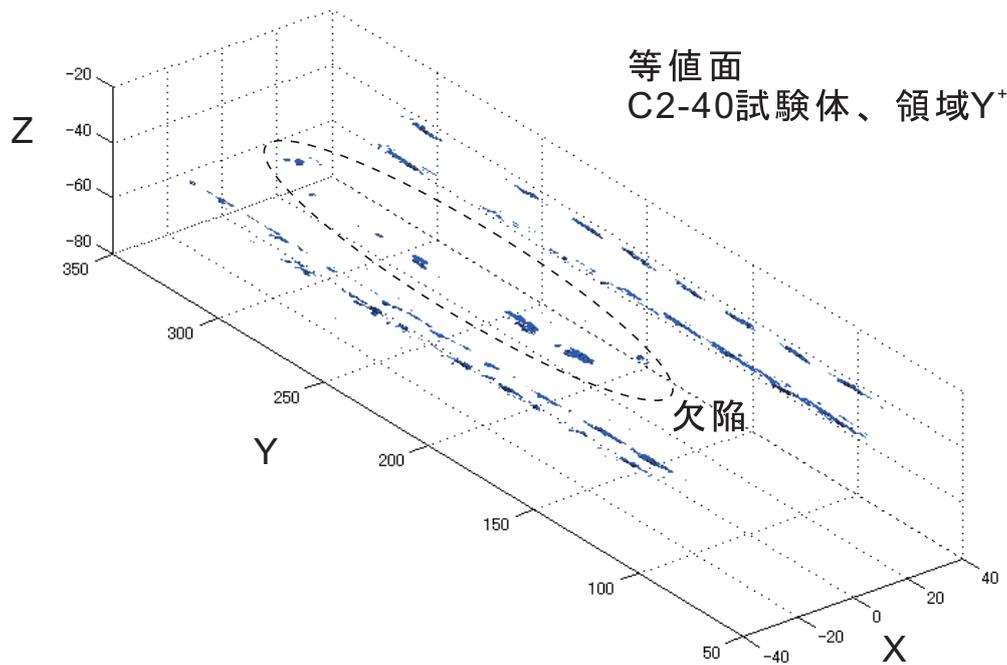


図 4.16: C2-40 試験体, 画像化領域 Y^+ に対する開口合成結果 (等値面)

4.2 鋼製橋脚隅角部モデル試験体を用いたアレイ探傷試験

鋼製橋脚隅角部を模擬した試験体を用いて行ったアレイ探傷試験の結果を示す。初めに試験体や測定面, 測定位置等の実験概要を述べた後, マトリクスアレイとリニアアレイによって計測された波形データを用いて得られた開口合成像を示して比較検討をする。

4.2.1 実験概要

図 4.17 は試験体の全体像, センサーの設置状況, 測定時の様子を示した写真である。今回用いた試験体は, 鋼製橋脚隅角部の疲労試験用に作成されたもので, 板厚はウェブ, フランジともに 32mm でありそれ以外の詳細は図 4.18, 図 4.19 に示す通りである。本試験体の作成にあたって板部材どうしは溶接によって接合されているが, 溶接部には意図的に未溶着部分が残るように溶接が行われている。ただし, 未溶着部分の正確な位置や大きさは探傷時には不明である。今回, ウェブ側からマトリクスアレイおよび 5MHz のリニアアレイを用いて垂直探傷を行うことにより, 未溶着部の検出ならびに評価を試みた。

4.2.2 実験結果

マトリクスアレイ探触子によって探傷を行った範囲を図 4.20 に示す。図に示すように, x 軸方向, y 軸方向にマトリクスアレイ探触子を 25mm ピッチで走査して十字領域においてデータ取得を行った。探触子のサイズが 50mm × 50mm であるから, これにより 25mm ずつ検査面をオーバーラップして計測が行われることになる。探触子は, 図 4.17 に示した



図 4.17: 試験体および計測状況

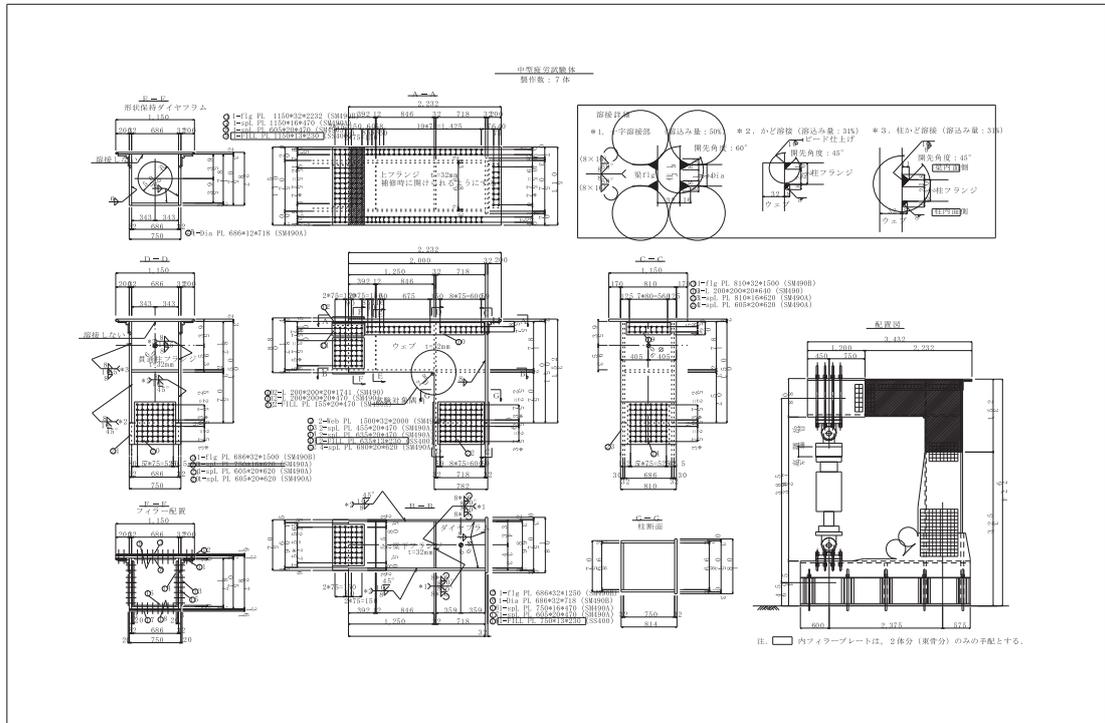


図 4.18: 隅角部モデル試験体の詳細 (1)

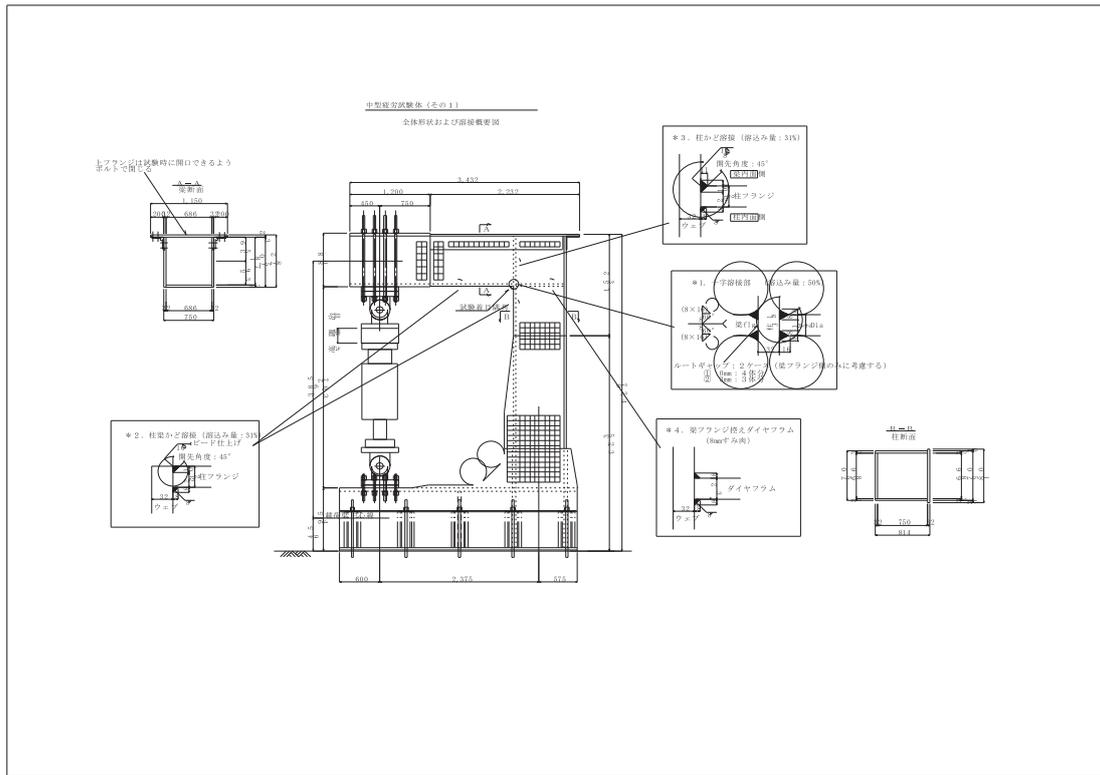


図 4.19: 隅角部モデル試験体の詳細 (2)

ように、予め試験体に定規を固定しその目盛りに併せて位置を決定し、定規の向きに沿うように探触子を設置することでその方向も同時に決定する。計測点は x 軸方向、y 軸方向のスキャンでそれぞれ 7 箇所合計 14 箇所であり、各々の点で取得したデータを使えば前章で示したような 3 次元の開口合成像を作ることができる。しかし、ここでは探傷範囲におけるの未溶着箇所の全体的な分布を把握するために、各計測点において試験体表面から深さ 32mm、大きさ 50mm × 50mm の範囲で開口合成像を作成しそれらを統合した画像を作成した。画像を統合する際、各開口合成像の間で重なり合う箇所が存在するが、そのような箇所では二つの結果の平均をとることとした。このようにして統合した開口合成像を示したのが図 4.21 である。明るく見える部分が連続して現れており、各測定点において作成した開口合成像の間に整合が得られていることが伺える。ここで示した結果は、明るく見える部分が未溶着部対応しており、縦方向に黒く筋が入ったように見える部分は溶接金属の余盛部であると予想される。ただし、どの程度の正確さで未溶着部の推定ができていくかについての検討は、試験体マクロスライスの結果を待って判断せねばならない。

5MHz のリニアアレイ探触子による探傷範囲を図 4.22 に示す。図に示した x 軸方向に 60mm の範囲をここでは 2mm ピッチでスキャンしている。マトリクスアレイを使った探傷の場合同様、リニアアレイについても各計測点のデータから作った 2 次元の開口合成像を統合して三次元のデータとし、最終的には探傷面から深さ 32mm における水平方向断面における開口合成像を合成した。その結果を図 4.23 に示す。リニアアレイのデータから合成した画像とマトリクスアレイによって得られた図 4.21 の結果を比較すると、明るく見える部分が概ね一致していることがわかる。ただし、リニアアレイを用いた場合、マトリクスアレイの場合には見られない y 軸に沿った黒い線が所々に現れている。これはス

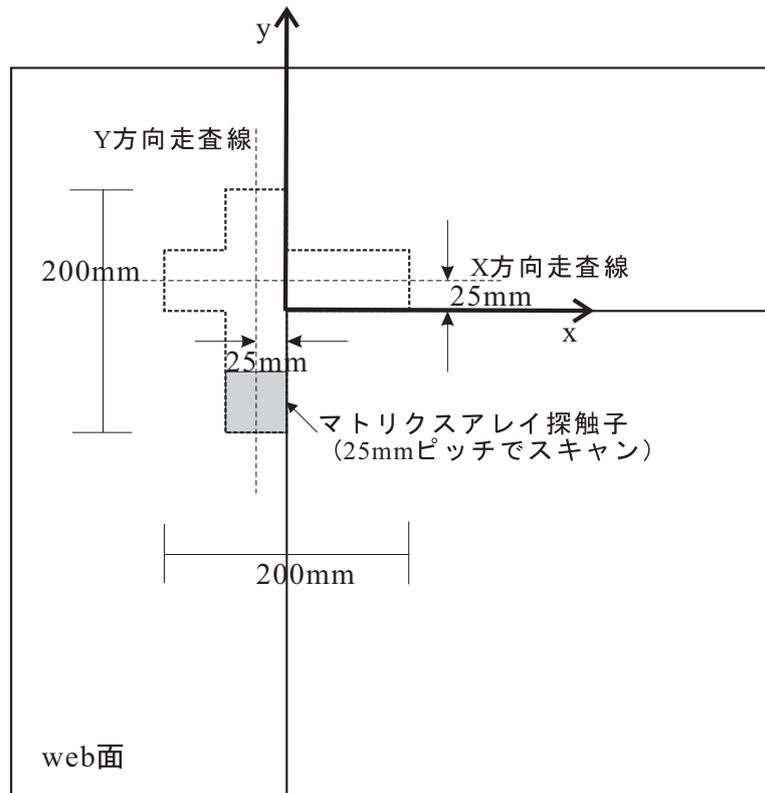


図 4.20: マトリクスアレイ探触子による探傷範囲

キャンピッチが十分に細くないために統合した画像にむらが見れたものと考えられる。一方、両者の結果に共通する $x=0\text{mm}$ 付近の黒く見える領域については、溶接が完全に行われているために開口合成像にも指示が現れないものと思われる。

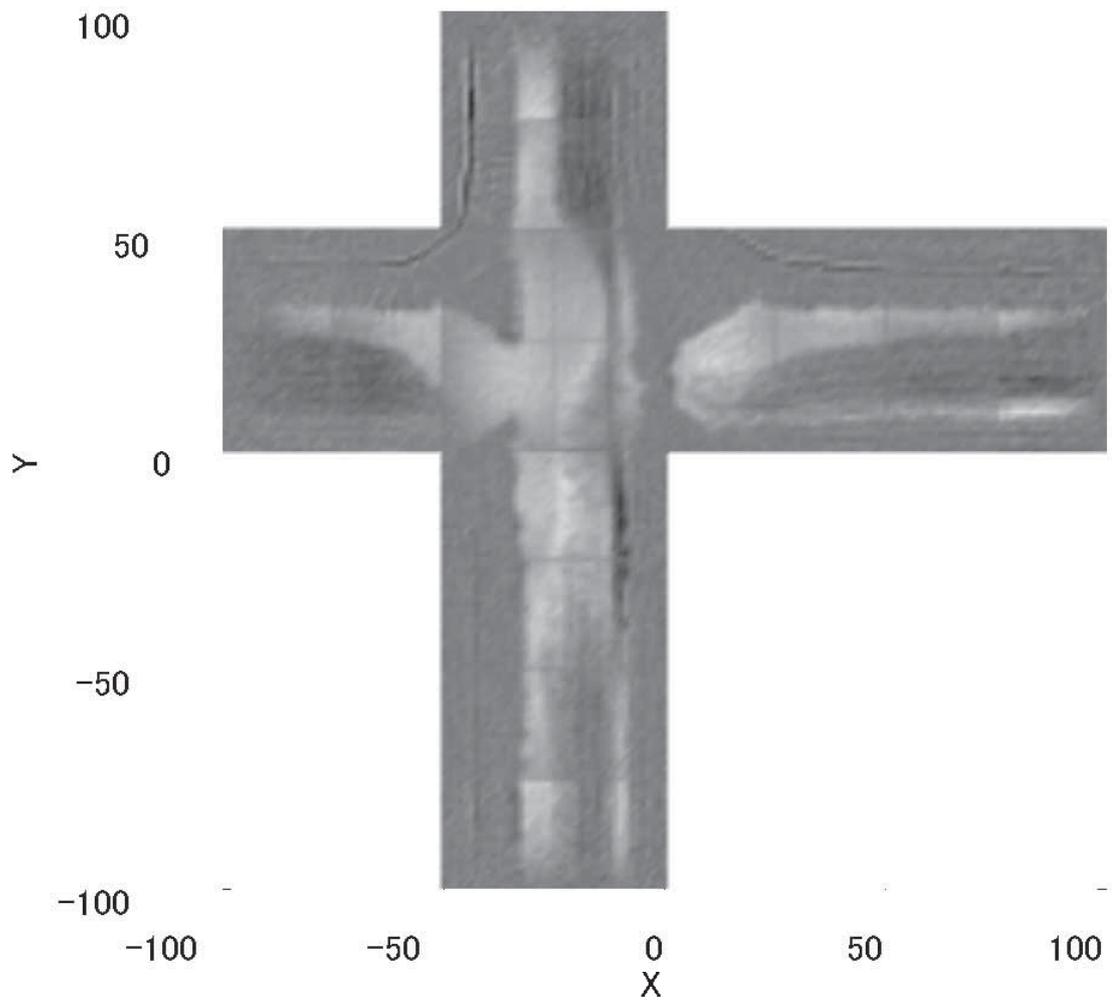


図 4.21: 開口合成結果 (深さ 32mm 位置の断面図)

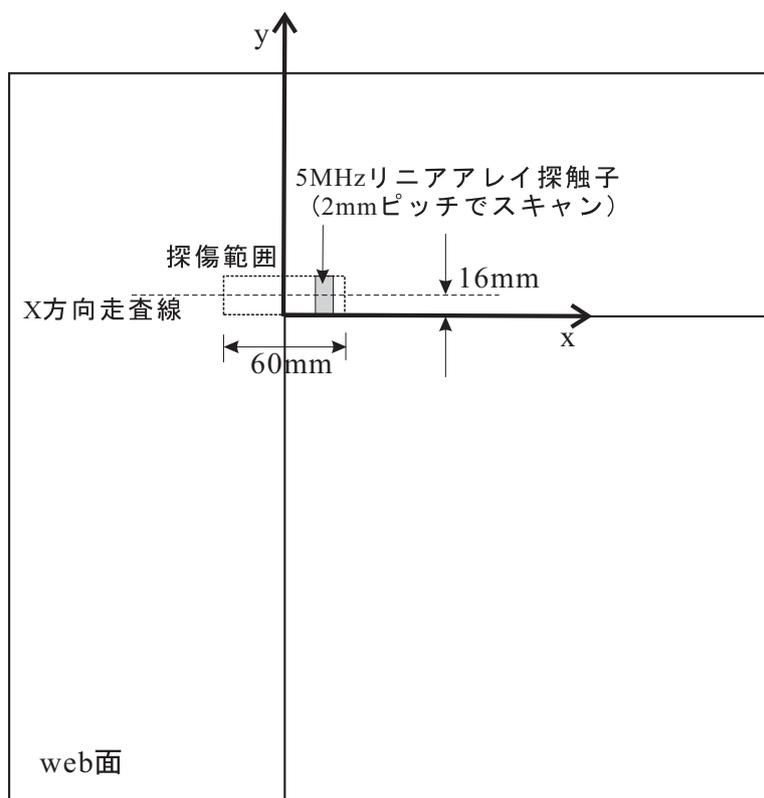


図 4.22: リニアアレイ探触子による探傷範囲

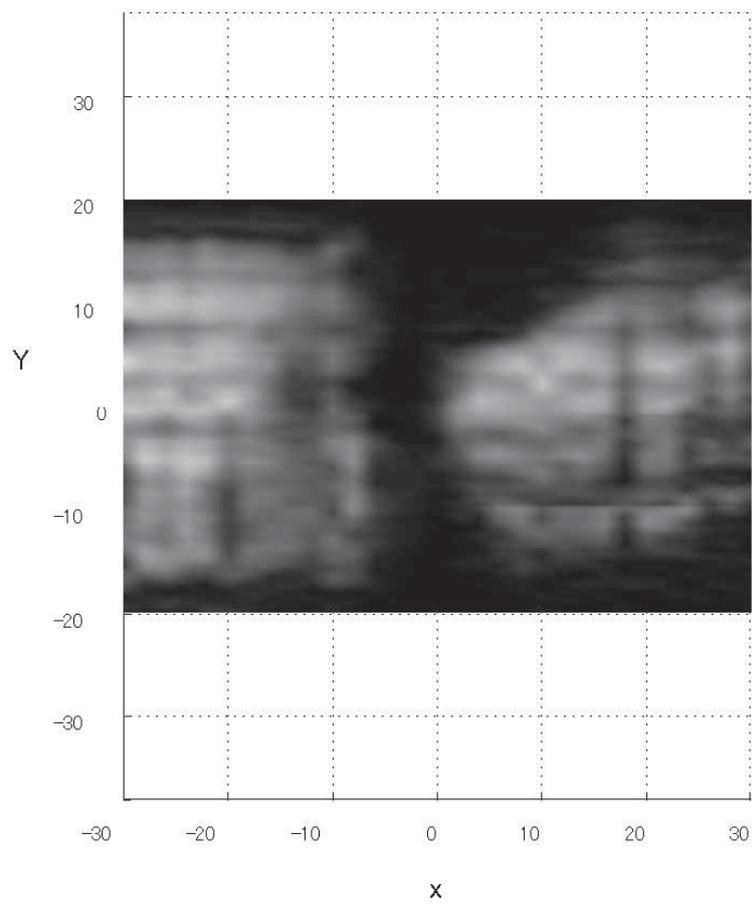


図 4.23: 開口合成結果 (深さ 32mm 位置の断面図. リニアアレイによる測定結果から合成)

第5章 まとめと今後の課題

5.1 まとめ

本研究では、当初の実施計画に即して(1)超音波要素技術の高精度化に関する研究、(2)高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発、(3)高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発の3項目について研究を進めた。

(1) 超音波要素技術の高精度化に関する研究 まず、位相差をつけた波源群としてアレイ探触子をモデル化し、数値シミュレーションによって最適な振動子配列を検討した。その結果、単位長さあたりの最適な振動子数や、最適な配置の振動子を用いても 60° を越える方向に入射波は偏向しないことなど、超音波アレイ探触子の基本特性を明らかにした。

次に、SH波を用いたアレイ超音波探傷試験の数値シミュレーションを行い、その結果を入力として開口合成による欠陥の画像化を行った。ここではシミュレーションデータを開口合成法の入力として用いているため、想定する欠陥の形状やアレイ探触子の諸元などは任意に設定することができる。この点を生かして、パラメトリックな解析を行い、種々の条件が開口合成像に与える影響を調べた。その結果、精度のよい開口合成像を得るためには、開口角の分布が広く得られるようにすることが最も重要であるということが明らかとなった。

また、波動理論に基づく線形化逆散乱解析法によって波形処理を行うことにより、高精度な欠陥画像が得られることが分かった。

(2) 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発 人工的な欠陥を有する供試体を用いて、1次元ならびに2次元アレイ探触子による欠陥形状の可視化とデータの高速度処理を試みた。1次元アレイは64個の振動子を一列に並べたもので、2次元アレイは 16×16 の合計256個の振動子を平面的にマトリックス状に並べたものである。可視化においては開口合成法を用いた。その結果、入射波が垂直に入射する面は1次元、2次元アレイとも十分な精度で欠陥形状を再現できることが分かった。ただし、三次元的な形状をもつ物体の再現のためには、1次元アレイ探触子を物理的に移動させて取得したデータよりも、2次元アレイで計測した結果を用いた方がより高精度な結果が得られることが明らかとなった。データの高速度処理については、開口合成法が並列計算に適しているため、並列処理を行うことでその分高速化を図ることができる。また、もう一つの方法としては、アレイ探傷システムで取得した膨大なデータ全てを毎回用いるのではなく、欠陥像の再構成に必要なだけのデータを選び出して使用するという方法が考えられる。今回の研究では、開口角の定義を行った際の考え方を元に、開口合成に使用する波形データを合理的に選定する方法を提案した。これにより、欠陥の形状再構成精度は若干低下するものの、多くの場合、全データを用いたときよりも計算時間を $1/10 \sim 1/20$ 程度に短縮できることを示した。

(3) 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発 鋼橋にはいくつかの種類があるが、本研究では実橋において最も損傷事例の多い板組である角柱 WW タイプ (溶接線が柱ウェブには現れないタイプ) の溶接欠陥をプロトタイプとしてアレイ超音波探傷の適用性を検討することとした。WW タイプでは柱ウェブから溶接部の垂直探傷が可能である。(独) 土木研究所の回送試験での小型試験体や疲労試験体など、実際に溶接を用いて作成した模擬試験体に対して、1次元や2次元アレイ探触子をウェブ面に垂直にあて内部欠陥の形状推定を行った。その結果、1次元アレイ、2次元アレイの各々で得られた結果には整合性があり、溶接部未溶着部分の形状推定が可能であることが示された。

5.2 今後の課題

以上の研究成果を踏まえ、今後の研究においてはアレイ超音波探傷法をさらに改良するとともに、1次元と2次元アレイを始めとするさまざまな探傷法を組み合わせたシステムを構築して、超音波探傷器の精度向上を行っていく予定である。また、角柱 WW タイプ以外の鋼橋にも対応した探傷法を検討し、アレイ超音波の適用性を広げて実用化に結びつく探傷法を提案することも視野にいれている。ただし、それらの実現のためには以下の点が今後の課題となると考えられる。

1. 超音波要素技術の高精度化に関する研究
アレイ探傷法の適用範囲を広げるには、アレイ探触子のさらなる改良、特に、2次元アレイについては垂直探傷のみならず、斜角探傷の操作性の更なる改良が必要である。
2. 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発
様々な1次元ならびに2次元アレイを組み合わせて、複雑な板組における溶接欠陥に対してもその形状を高精度で三次元表示できるようなシステムを構築する。
3. 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発
WW タイプ以外の角柱や円柱鋼製橋脚ならびにその他の溶接部に対応する探傷法を開発し、実鋼橋への適用性を検討する。また、溶接欠陥と疲労亀裂を非破壊的に識別する技術の開発を行う。