

縦波伝搬時間を用いる超音波CT法による
高減衰角鋼片内部の欠陥検出に関する研究

野呂瀬 葉子

システム情報工学研究科

筑波大学

2015年 3月

概 要

現在、角鋼片内部の欠陥検出にはパルスエコー法が用いられている。パルスエコー法は超音波探傷法の一つであり、角鋼片内部に超音波パルスを入射し、欠陥からのエコーを検知することで欠陥を検出する手法である。検査には一定のエコー強度が必要であるため、エコーが微弱となる高減衰角鋼片にはパルスエコー法を適用できない。しかし、厳格な品質保証や製造工程の改善のためには欠陥検出が必要である。そこで本研究では、縦波伝搬時間（Time-of-flight: TOF）を用いる超音波計算機トモグラフィ（Computerized tomography: CT）法に注目した。本手法では、TOF 計測に超音波透過法を用いる。角鋼片内を伝搬する超音波の欠陥近傍での回折・散乱による TOF の変化を計測し、超音波 CT 法により疑似音速分布を再構成し、欠陥の可視化を行う。本手法は角鋼片の内部探傷技術として提案され、減衰の小さい試験片による探傷実験により欠陥検出が可能であることが示されている。本手法は、透過波を受信するため安定した計測が可能なことや、一送信点に対して多数の受信点を設けることで豊富なデータを利用可能という、高減衰素材の内部探傷に有利な特徴があり、高減衰角鋼片の欠陥検出として期待が持てる。しかし、本手法は高減衰角鋼片の欠陥検出法として研究されておらず、高減衰材への適用可否が明らかにされていない。また、既往の研究により、本手法では超音波 CT 法を用いるために必要なデータ数が多くなるため、長い計測時間を要するという問題点が指摘されており、現状ではオンライン計測ができない。そこで本研究の目的を、TOF を用いる超音波 CT 法を高減衰角鋼片の欠陥検出法として実用化に近づけることとした。そのために、TOF を用いる超音波 CT 法の特徴を把握して、高減衰角鋼片の欠陥検出への適用可能性を検証し（第 3,4 章）、また、実用化に向け計測時間の短縮を図った（第 5,6 章）。

まず、第 2 章において、TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥検出原理について述べた。角鋼片のように計測面が矩形の場合、送受信器が向かい合わない計測パスが多い。そのため、送受信器の指向性の影響を受けた受信信号を受信する。そこで、角鋼片の検査が長手方向に一断面ずつ行われることを利用し、一つ前の計測面での受信信号をリファレンスとして用いる TOF 計測方法について述べた。計測パス上に欠陥が存在する場合、超音波信号は欠陥周囲で回折するため伝搬距離が長くなり、TOF が増加する。このため、疑似的に音速が低下するという現象が起こることを述べ、本欠陥検出手法ではこの現象を利用することを述べた。次に、欠陥による TOF の変化量を投影データとして超音波 CT 法により逆投影すると、疑似音速分布を取得できることを示した。疑似音速分布内では、欠陥位置において音速低下が観察されるため、欠陥の存在を検出できる。

次に、第 3 章において、TOF を用いる超音波 CT 法における送信周波数と欠陥検出能力の関係について検討した。超音波探傷において周波数は欠陥検出能力を左右する重要な要素であ

る。検査対象の内部減衰が大きい場合、高い送信周波数では十分な受信強度を得ることは容易でない。しかし、本手法においては、欠陥の有無が分かればよく、解像度の高さは求められない。そこで、送信周波数と可視化された欠陥像の関係について数値シミュレーションにより解析した。その結果、低い送信周波数は、CT 像内の欠陥を膨張して見せるため、欠陥検出において有効であることを明らかにした。一般的に超音波イメージングでは解像度を得るため、高い周波数が好まれるが、本手法では減衰しにくい低周波数の信号を使用することが可能であり、高減衰角鋼片の欠陥検出に有利に働くことを示唆した。

第 4 章では、内部減衰と欠陥検出能力の関係を数値シミュレーションおよび実験により検討し、TOF を用いる超音波 CT 法の高減衰角鋼片への適用可能性を検討した。従来法であるパルスエコー法との比較により検討を行い、パルスエコー法では欠陥可視化が困難な条件においても、TOF を用いる超音波 CT 法により欠陥が可視化できることを示した。特に、表面付近の欠陥はパルスエコー法で十分検出可能と考えられるが、角鋼片の中心付近の欠陥に対しては TOF を用いる超音波 CT 法が有効であった。

第 5 章、第 6 章では、本手法を高減衰角鋼片内部の欠陥検出法として実用化に近づけるため、TOF 同時計測法を用いて計測の高速化を行った。第 5 章では、同時送信を行うことで、計測時間の短縮を試みた。同時に複数箇所から複数の Gold 系列によって位相変調した正弦バースト信号を送信し、受信信号からそれぞれの伝搬経路における TOF を独立して抽出する手法を提案した。数値シミュレーションにより、送信信号の選定を行い、実験により同時計測による欠陥可視化を行った。その結果、本手法により TOF の同時計測が可能であり、計測時間が短縮できることを示した。

しかしながら、第 5 章の方法では、形状ひずみを含む角鋼片においては、計測面の 1 つ前の面での 1 送信ずつの受信信号を必要とするため、計測高速化につながらない。そこで、第 6 章では、形状ひずみを含む角鋼片においても同時計測による高速化が行えるよう、基準面を用いる TOF 計測手法を提案した。この方法では、予め基準面を設定し、その面で得た 1 送信ずつの受信信号をリファレンスとすることで計測系の特性を補正し、さらに計測面とその 1 つ前の面のデータの差分を取ることで形状ひずみの影響を相殺する。この手法を用いて形状ひずみを含む試験片により実験を行ったところ、形状ひずみを含む角鋼片においても、同時送信による計測時間の短縮が可能であることを示した。しかしながら、同時計測は受信信号の信号対雑音比を悪化させるため、高減衰角鋼片に適用する場合は、高出力化やノイズの影響を抑制する信号処理技術等が必要となる。

以上の結果を第 7 章にまとめた。本研究では、TOF を用いる超音波 CT 法は、現在においても確立していない高減衰角鋼片の内部探傷に対して有用であることを示した。また、符号変調信号を用いる TOF 同時計測による計測高速化手法を提案して、実験によりその妥当性を検

証し，実用化に近づけた．これにより，本研究の目的を達成した．

本研究は，超音波透過法の新たな応用例を示すことで，非破壊検査分野に対して知見を与えるものである．また，鉄鋼業界において品質保証手段を進歩させるものであり，また，生産効率向上に寄与するものである．これにより，最終製品の供用中の事故を防ぎ，エンドユーザーひいては社会全体の安全・安心につながるものである．

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	鉄鋼製品の製造プロセス	1
1.1.2	欠陥の発生と検出	2
1.1.3	非破壊検査の種類	5
1.1.4	角鋼片内部の欠陥検出法	6
1.2	研究の目的・論文構成	9
第2章	TOFを用いる超音波CT法による欠陥検出原理	13
2.1	はじめに	13
2.2	送受信器の走査	14
2.2.1	送受信器間の伝達特性	14
2.2.2	伝達特性の算出方法	14
2.2.3	解析条件	16
2.2.4	解析結果	16
2.3	TOF計測	20
2.3.1	欠陥によるTOF増加(疑似音速低下)	20
2.3.2	伝達特性の影響相殺	21
2.4	超音波CT法による欠陥可視化	24
2.5	伝達特性の影響相殺による可視化像の改善	28
2.6	むすび	29
第3章	送信信号の欠陥可視化像への影響	31
3.1	はじめに	31
3.2	送信信号の周波数による可視化像の違い	32

3.2.1	波動伝搬シミュレーション: Transmission-line matrix 法	32
3.2.2	解析条件	33
3.2.3	解析結果	34
3.3	欠陥可視化像の膨張現象	36
3.4	むすび	40
第 4 章	内部減衰の欠陥可視化への影響	41
4.1	はじめに	41
4.2	角鋼片における内部減衰	41
4.3	内部減衰を考慮した数値シミュレーション	43
4.3.1	解析条件	43
4.3.2	内部減衰の受信信号への影響	43
4.3.3	内部減衰の TOF 計測精度への影響	44
4.3.4	内部減衰の可視化像への影響	44
4.4	高減衰角鋼片の探傷実験	46
4.4.1	実験条件	47
4.4.2	実験結果	48
4.5	むすび	50
第 5 章	同時送信による計測高速化	51
5.1	はじめに	51
5.2	スペクトラム拡散による信号の同時送信	52
5.3	同時送信による TOF 計測法	52
5.3.1	同時送信に用いる送信信号	53
5.3.2	変調符号	54
5.3.3	被変調信号	55
5.4	同時送信による探傷実験	59
5.4.1	実験条件	59
5.4.2	実験結果	60
5.5	むすび	62
第 6 章	形状ひずみのある角鋼片における同時送信	65
6.1	はじめに	65
6.2	形状ひずみの発生	65

6.3	形状ひずみのある角鋼片における同時送信による TOF 計測法	66
6.4	数値シミュレーション	67
6.4.1	解析条件	67
6.4.2	解析結果	69
6.5	探傷実験	69
6.5.1	実験条件	70
6.5.2	実験結果	71
6.6	むすび	75
第7章	結 論	77
	謝 辞	79
	参考文献	81
付録 A	円形トランスデューサからの放射音場	93

目 次

1.1	鉄鋼製品の製造プロセス	2
1.2	製鉄所における自動超音波探傷装置（出所：神戸製鋼技術資料 ¹²⁾ ）	7
1.3	パルスエコー法の流れ	8
1.4	TOF を用いる超音波 CT 法の流れ	8
1.5	本論文の構成	10
2.1	送受信器の位置関係	14
2.2	数値シミュレーションにおける送受信器の関係	15
2.3	解析面の概略図	16
2.4	開口径 5 mm の場合の放射音場の計算結果	17
2.5	異なる周波数による送受信器間の伝達特性の計算結果	18
2.6	異なる位置による送受信器間の伝達特性の計算結果	19
2.7	欠陥による TOF の増加	22
2.8	相互相関法の概要	22
2.9	計測系の概略図および計測信号・参照信号	23
2.10	超音波 CT 法の原理	25
2.11	角鋼片断面における投影データとサイノグラムの関係	27
2.12	参照面を用いる TOF 計測における参照面と計測面の位置関係	29
2.13	参照面による TOF 計測法のノイズ抑制効果	29
3.1	TLM 要素とパルス信号の入射，拡散，伝搬の様子	32
3.2	数値シミュレーションにおける欠陥配置	34
3.3	異なる周波数による再構成像	35
3.4	異なる周波数による欠陥付近の疑似音速変化	36

3.5	異なる周波数による波動伝搬シミュレーションに基づく TOF および伝搬距離に基づく TOF の差 $\Delta\tau$ の相対度数分布	37
3.6	直達波と散乱波による見かけ上の音速増加発生イメージ	38
3.7	異なるスキャンピッチによる再構成像	40
4.1	結晶粒界における超音波散乱	42
4.2	数値シミュレーションにおける欠陥配置	43
4.3	異なる減衰率による受信信号	45
4.4	異なる減衰率による TOF の変化量 τ_{mr}	46
4.5	異なる減衰率による可視化像	47
4.6	実験条件	48
4.7	減衰率の異なる試験片による実験結果	49
5.1	同時送受信における計測系	53
5.2	M 系列生成のための線形帰還シフトレジスタと M 系列の周期相互相関関数	54
5.3	Gold 系列の生成	54
5.4	解析条件	56
5.5	TOF 変化量 τ_{mr}	57
5.6	無反射境界条件における TOF 変化量 τ_{mr}	58
5.7	送信信号 (Gold 系列位相変調正弦パルス) と相関特性	59
5.8	同時計測における計測系	60
5.9	同時送信数を変化させた時の再構成像および二値化像	61
6.1	形状ひずみを含む角鋼片の TOF 同時計測法	68
6.2	解析条件	69
6.3	形状ひずみのある角鋼片における同時計測による再構成像	70
6.4	形状ひずみを含む角鋼片の同時計測における計測系	71
6.5	形状ひずみのある角鋼片における同時送信時の参照信号, 計測信号および基準信号	72
6.6	形状ひずみのある角鋼片における同時送信時の参照信号と計測信号の相互相関関数, 基準信号と参照信号の相互相関関数および基準信号と計測信号の相互相関関数 (i)–(iii) $N = 2, 5, 8$	72
6.7	形状ひずみのある角鋼片における同時送信時の可視化像および二値化像	73
6.8	同時送信における TOF 計測誤差の相対度数分布	74

A.1	円形トランスデューサによる放射音場の概略図	93
-----	---------------------------------	----

表 目 次

1.1	連続鋳造片に発生する欠陥	3
1.2	非破壊検査の種類	6
3.1	送信信号のパラメータ	35
6.1	TOF 同時計測法の比較	75

第 1 章

序 論

1.1 研究の背景

1.1.1 鉄鋼製品の製造プロセス

現代において、鉄鋼材料が用いられる製品は我々の生活に必要不可欠となっている。その用途は、ビルの鉄骨、橋梁、電波塔、船舶、自動車、テレビ、調理器具、飲料缶、ねじ等、非常に幅広い。これらの製品は、製鉄所において製造される一次製品（形鋼、棒鋼、厚板、線材、鋼管等）から作られる¹⁾。製鉄所における鉄鋼製品の製造プロセスを Fig. 1.1 に示す²⁾。Figure 1.1 は、現在、鉄鋼製造プロセスの主流となっている高炉一貫鉄鋼製造プロセスのフローである³⁾。まず、原料である鉄鉱石、コークス等を高炉に入れ、高温下で鉄鉱石を炭素で還元して銑鉄として取り出す。銑鉄は炭素分が多く含まれており（約 4.5%）、粘りがなくもろい。そこで、転炉において、このもろさの原因となる炭素、リン、硫黄およびケイ素などの不純物をできるだけ取り除き、強靱な「鋼」をつくる。鋼は炭素含有量約 2% 以下のものを差し、それ以上は鑄鉄と呼ぶ。一般的に加工に耐える延びがあり、鉄鋼製品として使用できるものは炭素含有量 1.2% 以下のものとなる¹⁾。成分調整後の溶鋼は連続鑄造設備に送られる。ここで鋼は固められて、スラブ（板製品用）、ブルーム（形鋼製品用）、ビレット（線材製品用）等、様々な大きさの角鋼片に切断される。その後、加熱炉にて 1,000°C 以上に加熱し、圧延機にかけて押し延ばして成形し、形鋼、棒鋼、厚板、線材、鋼管等に加工して出荷される。

連続鑄造法は現在主流の製鋼方法である⁴⁾。連続鑄造法の原理は 1847 年の H. Bessemer（イギリス）の試験連続鑄造機にまでさかのぼるが、鋼への適用は 1947 年の Junghans（旧西ドイツ）試験連続鑄造機が最初である。⁴⁾ 日本では、1955 年に住友金属工業が連続鑄造機を初めて導入した。1950 年代以前は、溶鋼を鑄型に流し込んで冷やし固める圧延分塊法が主流で

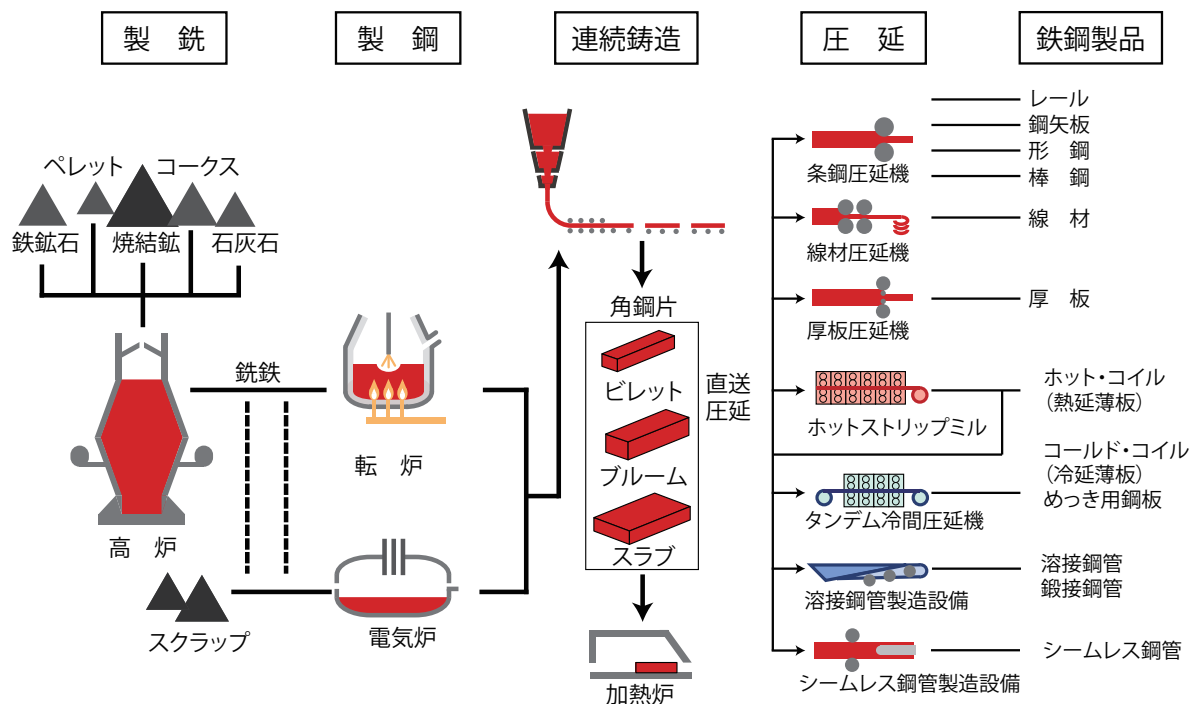


Fig. 1.1 鉄鋼製品の製造プロセス

あったが、1955年以降は、生産性、歩留り向上、省エネルギー化、省力化、品質向上等の面で格段の優位性を有する連続铸造法が急速に普及していった⁵⁾。日本の連続铸造技術は、技術者の熱心な努力により目覚ましい発展を遂げ、現在98%以上の鉄鋼材料を連続铸造法により製造するに至っている^{6,7)}。連続铸造における各要素技術（鑄型への給湯、鑄型潤滑技術、鑄片冷却技術、曲げ・矯正技術、圧下技術とストランド電磁攪拌技術、タンディッシュ技術、計測制御技術等）は世界最高水準にあるものの、ユーザーが鋼材に要求する機能の多様化（軽量化、高加工性、高強度化などの高機能化、表面疵管理強化、無欠陥化）や製造効率化追求に伴い、鉄鋼製品には、さらに高い品質レベルが要求されている⁸⁾。

1.1.2 欠陥の発生と検出

角鋼片に発生する欠陥

鉄鋼製品の品質指標には、欠陥（表層欠陥、内部欠陥）の有無、寸法、形状、材質等がある⁹⁾。このうち、欠陥の有無（表層欠陥、内部欠陥）、寸法、形状の評価は、日本の工業界において「非破壊試験」の範囲に含まれると考えられている¹⁰⁾。ここで、欠陥とは「規格・仕様書などで規定された判定基準を超え、不合格となるきず」であり、きずとは「非破壊試験の結果

Table 1.1 連続鋳造片に発生する欠陥

欠陥の種類	欠陥の状態	
表面疵	コーナー割れ	コーナーに沿って不規則に発生する割れ.
	面縦・横割れ	面状に生じる割れ.
内部欠陥	偏析	表面から内部へ向かう冷却中に成分分布に偏りが生じる.
	非金属介在物	鋼中に析出又は巻き込まれる非金属性の介在物. 硫化物・けい酸塩等.
	割れ	凝固中の角鋼片内の不均一応力によって引き起こされる.
	空洞	表面の急冷と収縮により内部に空洞が発生する. または脱酸不足で発生.
形状欠陥	菱形・楕円変形	連続鋳造における成形時に生じる変形. 不均一冷却に起因.
	バルジング	連続鋳造機のローラ同士の間で膨張してできるひずみ.
	凹み	連続鋳造における成形時に生じる変形.

から判断される不連続部」である¹¹⁾. 連続鋳造片に発生する欠陥は、Table 1.1 のように分類される. 検査時に判定基準を超えないきずは合格と判断される.

表層欠陥および内部欠陥の非破壊検査では、きずを検出するという点で共通しているものの、実用化される段階でかなり異なる一面を有する. 表面疵は角鋼片の表面に生ずる割れ等であるが、見逃しに対しても目視点検でフォロー可能であり、また検出後はグラインダー等で手入れすることできずを取り除くことが可能である¹²⁾.

一方で、内部欠陥は、残留していることが分かっても欠陥のみを取り除くことはできない. そのうえ、内部欠陥が残留していると、重大な事故につながる恐れがある. 特に近年では、センターポロシティと呼ばれる空洞上の欠陥が問題となっている. 連続鋳造により製造される角鋼片には、連鋳機内の凝固収縮に伴い直径 1-10 (mm) 程度の空洞欠陥が発生する¹³⁾. これがセンターポロシティである. 連続鋳造工程では、凝固時に圧力をかけることによりセンターポロシティを抑制している. 連続鋳造技術の進歩とともに製造できる断面サイズも大きくなったが⁵⁾、センターポロシティを圧潰できないほどの大断面素材は連続鋳造ではなく、分塊法で製

造するほかない¹³⁻¹⁵⁾。分塊法では銑鉄を鑄型に流し込んで冷やし固めて取り出すという工程を経るため、連続鑄造に比べ生産リードタイムが長くなる。この手法は連続鑄造法に比べ二酸化炭素排出量も多く、二酸化炭素排出量削減に注力している鉄鋼メーカーにとっては痛手となる。しかし、高温・高圧下や海水中といった過酷な環境で使用する鋼材へのニーズが高まっており、高炭素鋼、高合金鋼、ステンレス鋼といった特殊鋼の板厚 100 mm 超の極厚鋼板の効率的な製造が求められている。そのためには、センターポロシティを圧潰する連続鑄造技術が必要である。

欠陥検出の必要性

製品の作り込みは非常に重要であるが、そのためには角鋼片内部を正確に検査する技術も併に必要である。すなわち、角鋼片の内部欠陥を精緻に検出できることが求められる。欠陥検出が必要な理由として、以下の3つが挙げられる¹⁰⁾。

- 1) 製品の信頼性のため
- 2) 製造技術の改良のため
- 3) 製造コスト低減のため

信頼性とは、「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質」(JIS Z 8115)と定義されている¹⁶⁾。正確な検査ができず鋼材内部に欠陥が存在すると、使用目的に適う性能を発揮できない可能性があるだけでなく、その近傍の応力がそれらから離れた位置の応力より高くなる応力集中が起き、応力集中部を起点として疲労き裂が進行し破壊事故につながる¹⁷⁾。機械や構造物について調査してみると、破壊の発端となった場所のほぼ 100% が空孔、き裂、欠陥、きずなどの形状変形部であり¹⁸⁾、気孔を含む角鋼片は重大な問題を引き起こしかねない。そのため、一般炭素鋼はもとより高炭素鋼、高合金鋼、ステンレス鋼といった過酷な環境下で使用される特殊鋼において特に正確な検査が望まれる¹³⁾。

また、工業製品は必ず経済的な要求を持っており、ある一定の性能を満たすことも強く要求されるが、経費は可能な限り低減することも要求される。製鉄所では製造プロセスの間で出荷する鉄鋼製品の全数検査を行っている。検査時に得られた欠陥に関する情報(欠陥の種類、大きさ、形状、位置)により、製造工程の課題を見つけ出して、各工程の改善を行うことが、欠陥のない製品を製造し、生産効率を上げることができる。また、鑄造、圧延、溶接、切削等、加工を進めるごとに検査を行うことにより、無駄な工程を実施せず、合理的に製品を製造することができる。下流の工程で欠陥が見つかり、その時点でスクラップとなり、再度上流工程に運ぶという追加操作が必要となるため、生産効率を落とす。まして出荷後の加工工程で欠陥が見つかり、鉄鋼メーカーにとっては信用問題になるため、メーカーとしては厳格な検査が必要となる。

また、製造プロセスの改善を行い、CO₂ 排出量を減らすことも重要である。日本において、鉄鋼業界は他の業界に先駆けて 1970 年代から省エネルギーに取り組み始めた¹⁹⁾。鉄鉱石の還元反応は $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Fe} + 3\text{CO}_2$ で示され、CO₂ の排出を伴う。産業部門（エネルギー転換部門および産業部門）別 CO₂ 排出量は、鉄鋼業界（日本鉄鋼連盟）が 44% で 1 位となっており¹⁹⁾、CO₂ 排出量の削減は依然として鉄鋼業界の課題となっている。しかし、原料として還元済みの鉄スクラップを利用する等の対策により、鉄鋼生産単位当たりの CO₂ 排出原単位は世界で最も低くなっている¹⁹⁾。さらなる CO₂ 排出量削減のためには、連続鋳造において鋳造速度の高速化とともに、内部欠陥のない角鋼片を目指して品質の作り込みに貢献することが重要なテーマである¹⁾。これにより、高強度化による軽量化や耐食性向上の長寿命化などによって、より少ない材料で同じ機能を果たす鋼材や、エコ製品開発に貢献する鋼材（ハイテン鋼、高性能電磁鋼板、耐熱鋼板等）の製造を目指している。このことから製造プロセスを改良、刷新していく必要があり、そのためには現状を詳細に把握する必要がある。

以上の理由から、角鋼片内部の高い検査技術が必要である。

1.1.3 非破壊検査の種類

角鋼片の欠陥検出には非破壊検査を用いるのが一般的である。非破壊検査は、「材料の物理的性質が、各種のきずの存在によって変化する事実を利用し、その変化量を測定して、それらの存在と大きさなどを推定する技術」である¹¹⁾。材料の物理的性質として、現在非破壊検査に利用されているものとしては、材料の放射線に対する性質、弾性波に対する性質、電気的性質、磁氣的性質、熱的性質および表面エネルギーの性質などである¹¹⁾。非破壊検査手法は、欠陥の種類に応じて様々である。非破壊検査の種類を Table 1.2 に示す⁹⁾。対象物の内部を検査する放射線透過試験、超音波探傷試験、また対象物の表面を検査する目視試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、電磁誘導試験がある。角鋼片内部の欠陥を対象とする場合、放射線透過試験、超音波探傷試験を用いることができる⁹⁾。放射線透過試験では対象物内部に放射線を透過させたとき、内部に存在する欠陥等の放射線の透過率の違いから内部の情報を得ることができる。放射線は超音波に比べ波長が短く、高い空間分解能が得られるが、透過能力に劣る¹⁰⁾。また、一定量以上の放射線は人体へ悪影響を及ぼすことや、文部科学省の許可を受けた特定の取扱者による安全管理が必要であることなど管理が容易くない。一方、超音波は金属などの物体中を伝搬しやすく、また、波動性を有するため異なる物体との境界（音響インピーダンスが異なる境界）において反射、屈折、回折などの挙動を示すという性質があり、角鋼片の欠陥検出には一般的に超音波探傷が用いられる。

Figure 1.2 に、超音波自動探傷装置（出所：神戸製鋼技術資料¹²⁾）の様子を示す。実際の製

Table 1.2 非破壊検査の種類

欠陥の種類	検出方法	特徴
表面疵	目視	材料，機器，構造物すべてに適用可．早い，安価．
	磁粉探傷	強磁性材料に適用可，表面または表面直下の欠陥検出可．
	浸透探傷	多孔質ではない試験体に適用可，表面開口きずを検出可．
	電磁誘導	形状が複雑でない導電性の試験体に適用可，非接触で高速な探傷可．
内部欠陥	放射線透過	金属・非金属材料に適用可．透過能力が低く，厚い金属材料には不適．
	超音波探傷	金属・非金属材料に適用可，放射線より透過能力が高く，よく用いられる．
形状欠陥	超音波厚さ測定	片面からの計測でよい．内部欠陥からのエコーとの見分けが必要．
	ひずみ測定	構造物表面のひずみを測定する．ひずみゲージを利用．

造ラインにおける角鋼片の探傷は，鋳造後，圧延前に自動探傷ラインで行われており，ショットブラストによる鋼材表面の酸化スケール剥離除去，自動磁粉探傷による表面疵検査，目視磁粉探傷による表面疵検査，超音波探傷による内部欠陥検査等が行われる^{12,21)}。

1.1.4 角鋼片内部の欠陥検出法

現行法：パルスエコー法

先述の通り，角鋼片内部の欠陥検出には超音波探傷が用いられる．超音波探傷法は反射法と透過法の二つに大別される^{22,23)}．現在，生産ラインではパルスエコー法が一般的に用いられており²⁴⁻²⁶⁾，鋼材の超音波探傷と言うとパルスエコー法を意味する場合もある．

Figure 1.3 にパルスエコー法の概略図を示す．パルスエコー法では，送信と受信に同一の探触子を用いる．超音波パルスを入射すると，欠陥や底面で反射したエコーが探触子に返ってくる．これらのエコーの高さにより，欠陥の有無を判定する．計測に先立ち，ゲートと呼ばれる

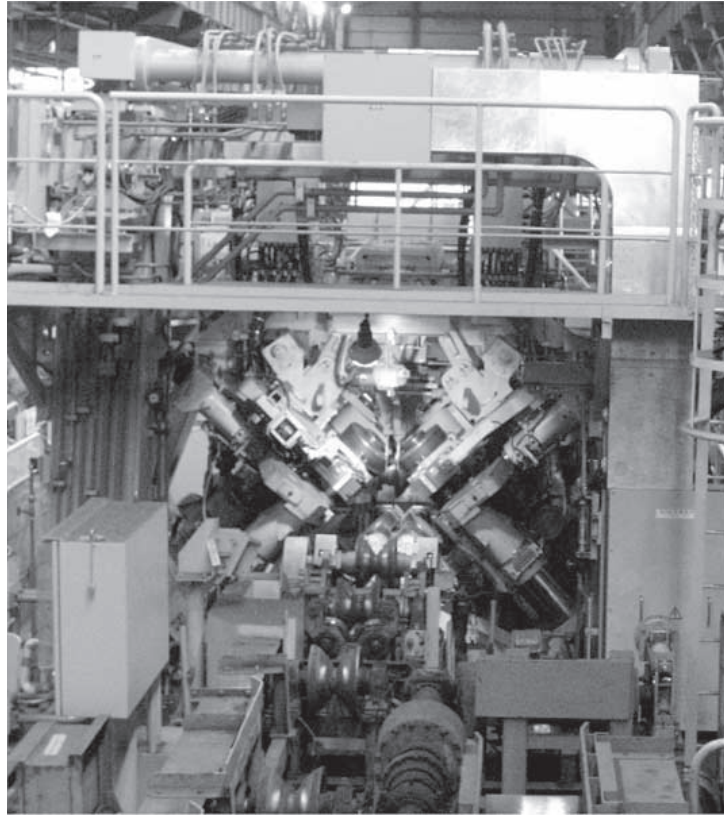


Fig. 1.2 製鉄所における自動超音波探傷装置（出所：神戸製鋼技術資料¹²⁾）

探傷感度の調整を行う。この調整には、底面エコー方式と、試験片方式がある。底面エコー方式では第1回底面エコー高さを基準に探傷感度を決定する。試験片方式では、検査対象と同等の減衰係数が既知の材料で直径2-8 (mm) の平底穴を距離20-150 (mm) の位置に有するものを対比試験片とし、平底穴からのエコーレベルを基準に探傷感度を決定する。また、減衰が大きい素材に対する探傷感度としては、評価対象となるきずエコーがノイズの高さの1/2以下であることが推奨されている。このようにパルスエコー法では、受信信号の振幅のみから情報を取得する。このため、きずエコーを確実に抽出することが重要となるが、きずが微小であったり、信号入射角に対して傾いていたり、底面に近かったり、内部減衰が大きかったり、大断面のため探傷深度が深かったりすると、きずエコーは検出しにくくなる。パルスエコー法は、炭素鋼鍛鋼品の超音波探傷試験方法として JIS G 0587: 2007 に定められているものであり、これに準拠して検査が行われることが一般的である²⁷⁾。この規格の一般的な適用鋼種は、主に炭素鋼鍛鋼品であるが、減衰の著しいステンレス鋼鍛鋼品に対しても適切な減衰補正を行うことで、この規格を準用することは可能としている。しかし、鍛鋼よりさらに減衰の大きい鋳鋼は適用範囲に示されていない。そのため、内部減衰が大きい素材に対しては、欠陥検出が困難

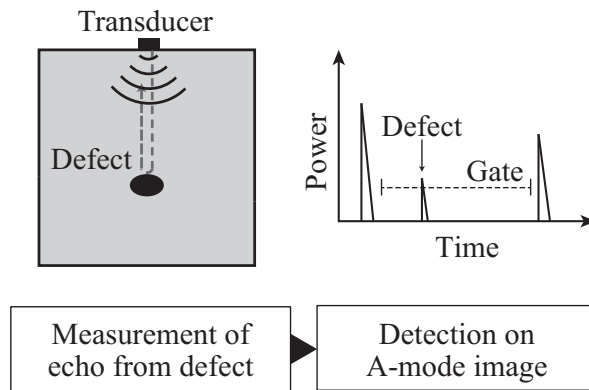


Fig. 1.3 パルスエコー法の流れ

であり，検査がなされていないという状況である²⁵⁾。

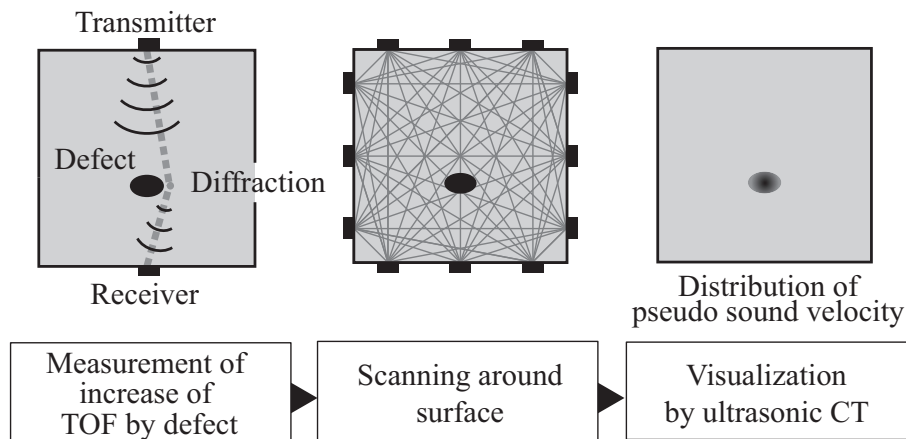


Fig. 1.4 TOF を用いる超音波 CT 法の流れ

問題点：超音波の内部減衰

超音波の減衰の原因はいろいろあるが，多結晶金属の超音波探傷に際して問題となるのは，波面が広がるための拡散減衰，結晶粒界および組織境界による散乱減衰，粘性減衰，転移の運動による減衰，強磁性材料における磁壁の運動による減衰，残留応力に基づく音場の乱れによる見かけ上の減衰である¹⁰⁾。通常の金属材料では，拡散減衰と散乱減衰が支配的で他の減衰はほとんど無視しても差し支えない^{25,28)}。結晶粒が粗大で散乱減衰の大きい鋼材として，鋳鋼，ステンレス鋼，高マンガン鋼が知られている²⁹⁻³¹⁾。例えば，ステンレス鋳鋼の場

合、鋼管などの厚さが 100 mm に満たないようなものの超音波探傷技術についてはさかんに研究がなされてきたものの、探傷深度の深い素材に対しては計測困難という前提で、ほとんど研究がなされてこなかった³²⁾。また、圧延前の角鋼片は結晶粒が粗大で内部減衰が大きく、また断面サイズも大きいいため、パルスエコー法では欠陥検出が困難であり、検査がなされていないものもある。前節で述べたように、製造プロセスの上流での検査により、生産効率の向上、品質の作り込みへの活かすことを考えると、圧延前の検査は重要である。以上より、これまで検査が行われていなかった高減衰角鋼片内部の検査が求められるようになっている。

研究手法：縦波伝搬時間を用いる超音波 CT 法

そこで、縦波伝搬時間 (Time-of-flight: TOF) を用いる超音波 CT 法に注目した³³⁻³⁵⁾。この手法は、2009 年に三井らにより提案された手法である³⁶⁾。TOF を用いる超音波 CT 法は Fig. 1.4 に示した通り、透過法により TOF を計測し、全周計測で得られた TOF データを超音波 CT 法により再構成することで角鋼片内部を可視化する。本手法は高減衰角鋼片の欠陥検出手法としては研究されておらず、既往の研究では、内部減衰の小さいジュラルミン片において内部欠陥の可視化が可能であることを確認したところに留まっている³⁴⁾。TOF を用いる超音波 CT 法は高減衰角鋼片内部の欠陥検出に有利と考えられるいくつかの特長を有しており、高減衰角鋼片内部の欠陥検出手法として期待が持てる。本手法を高減衰角鋼片に適用するためには、有効性の検討が必要である。また、本手法では超音波 CT 法により再構成を行うため、多くの TOF 計測を要し、計測時間が長くなることが問題として挙げられている³⁷⁾。鉄鋼業における計測技術はオンライン計測を強く志向する傾向にあり、実用化のためにはさらなる計測高速化が必要である。既往の研究では計測時間の短縮の必要性を指摘しているものの、最適な計測点数の検討に留まっている。計測点数を減らすことは、欠陥情報を取り逃す可能性を高めるため、欠陥検出能力を低下させる。そのため、計測点数を減らすことなく計測時間を短縮する方法が求められる。

1.2 研究の目的・論文構成

本研究の目的は、TOF を用いる超音波 CT 法を高減衰角鋼片の欠陥検出手法として実用化に近づけることである。そのために、TOF を用いる超音波 CT 法の特性を把握して、高減衰角鋼片の欠陥検出への適用可能性を検討する。また計測高速化のために新たに複数の TOF を同時に計測する手法を提案し、有効性について検討する。本論文の構成を Fig. 1.5 に示す。そして以下に、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥の可視化原理について述べる。本手法

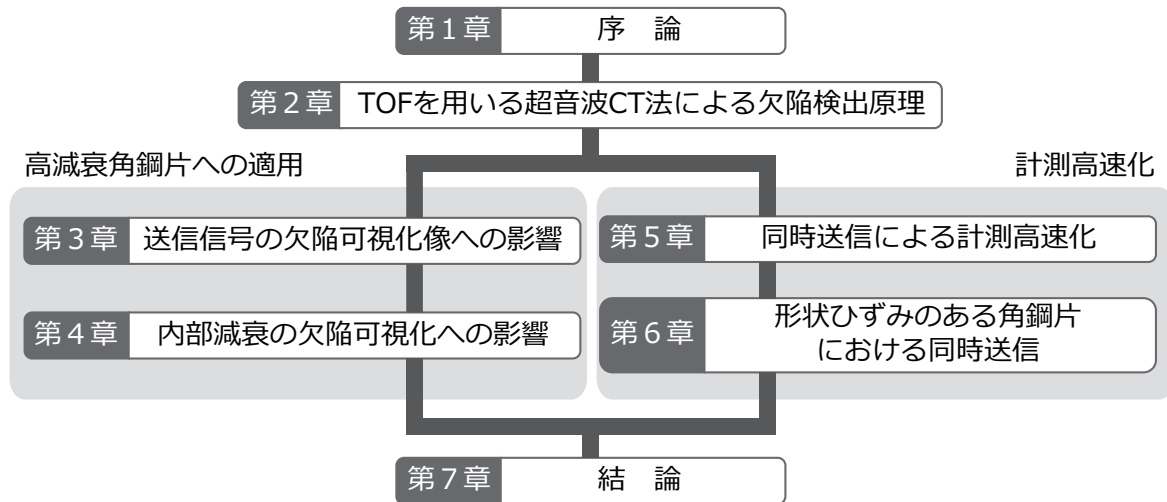


Fig. 1.5 本論文の構成

は、TOF 計測と超音波 CT 法による再構成の大きく二つのプロセスから成っており、それぞれについて説明する。特に、TOF 計測においては、送受信器を矩形断面周上に沿って走査する場合、送受信器間の伝搬特性の影響を受ける。本研究では、送受信器間の伝搬特性の影響を抑制するために、直前に検査した面（参照面）の情報をリファレンスとして TOF を計測しており、この方法について説明する。

第 3 章では、TOF を用いる超音波 CT 法における送信周波数と欠陥検出能力の関係について検討する。検査対象の内部減衰が大きい場合、高い送信周波数では受信強度を得られない。しかし、本手法においては、欠陥の有無が分かればよく、解像度の高さは求められない。そこで、送信周波数と可視化像の関係を明らかにし、本手法で用いる送信周波数について検討を行う。

第 4 章では、TOF を用いる超音波 CT 法における内部減衰と欠陥検出能力の関係について検討する。従来法であるパルスエコー法との比較により、反射法と透過法との受信信号の比較および可視化後の欠陥検出能力の比較を行い、本手法の高減衰角鋼片の欠陥検出法としての有効性について検討する。

第 5 章では、本手法の実用化に向け計測時間を短縮するため、信号の同時送信による計測高速化を試みる。同時に複数箇所から複数の Gold 系列位相変調信号を送信し、受信信号からそれぞれの信号の情報を抽出する。送信信号に Gold 系列位相変調信号を用いることで、互いの相関が低い複数の信号を生成することができる。この同時計測手法を提案し、計測高速化の可能性を検討する。数値シミュレーションにより、送信信号の選定を行い、実験により同時計測

を行い、本手法の有効性を検討する。

第5章の同時計測法では形状ひずみのある角鋼片の場合、高速化ができない。なぜなら、参照面（計測面の直前の面）をリファレンスとして欠陥情報の取得を行っているために、計測面が更新されるごとに1送信ずつの計測を必要とするからである。そこで第6章では、形状ひずみのある角鋼片に対して適用可能な TOF 同時計測法を提案し、その有効性を検証する。本手法では、リファレンスとして固定の面（基準面）での計測データをもって、送受信器間の伝搬特性の影響を相殺し、参照面により形状ひずみの影響を相殺する。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

第 2 章

TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥検出原理

2.1 はじめに

本章では、まず TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥検出原理の概要を述べる^{33,34)}。角鋼片内部の検査は、長手方向に一断面ずつ行う。TOF を用いる超音波 CT 法では、送受信器を計測断面周上で走査させながら、超音波を透過させ、透過波を受信する。超音波計測においては、送受信器が向かい合うように配置するのが一般的であるが、角鋼片のように計測断面が矩形の場合、送受波面が平行にならない箇所が存在する。そこで、計測方法の説明に先立ち、矩形断面周上走査時の送受信器間の伝達特性を数値シミュレーションにより把握する。

次に、TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥可視化原理について述べる。まず、TOF の算出方法について述べる。計測断面内に欠陥が存在すると、欠陥周囲で超音波の回折、散乱が生じ、伝搬時間が変化する。よって、疑似的に音速が変化することになる。逆投影の投影データには、欠陥が存在することにより生じる TOF の変化量を用いる。この TOF の変化量の計測時に、先述の送受信器間の伝達特性の影響による計測誤差を抑えながら TOF を計測する方法について説明する。

次いで、超音波 CT 法による欠陥可視化の原理について述べる。再構成には、CT 像内の高周波ノイズをカットすることができるフィルター補正逆投影 (Filtered back-projection: FBP) 法を用いる。欠陥による TOF の変化量により逆投影すると、単位距離当たりの欠陥による疑似音速変化量の逆数を得る。この逆数を取って、疑似音速の変化量の分布を可視化像として得る。この疑似音速変化量分布と欠陥の関係について述べ、欠陥検出の原理を示す。

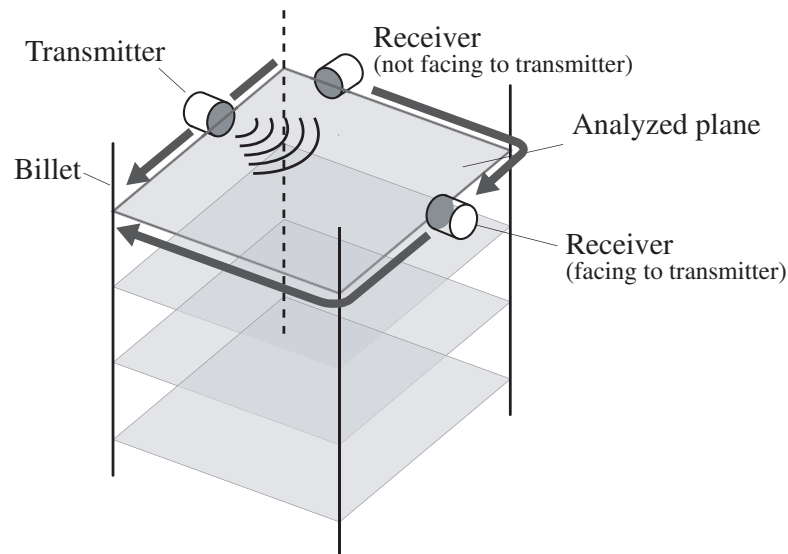


Fig. 2.1 送受信器の位置関係

2.2 送受信器の走査

2.2.1 送受信器間の伝達特性

本手法では、一つの送信点に対して多数の受信点で受信信号を取得する。また、超音波計測において送受信器は正対するように配置されるのが理想的であるが、角鋼片表面のように矩形に走査する場合は正対しない配置が存在する。Figure 2.1 に角鋼片周上を走査する場合における送受信器の位置関係を示す。4 面ある中で送信器がある面以外の全ての面に等間隔に設定した計測点で信号を受信する。送受信器は有限の開口径を有しており、開口径と送信信号の周波数により、送受信器の指向性が変化する。送受信器の開口径に起因する受信信号への影響として、指向性による受信感度の低下および開口面上に生じる位相分布による受信信号のひずみなどが挙げられる。そこで、矩形面に沿って走査する際の送受信器間の位相特性及び振幅特性を数値シミュレーションにより解析する。

2.2.2 伝達特性の算出方法

トランスデューサの位置関係及び開口面による影響のみを評価するために、無限剛体バッフルに囲まれた円形トランスデューサからの放射音圧から、送受信器間の位相特性及び振幅特性を算出する^{38,39)}。Figure 2.2 に示す座標系において、送信側の円形トランスデューサからの

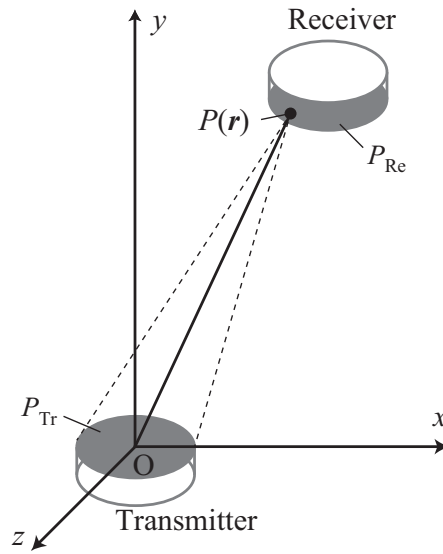


Fig. 2.2 数値シミュレーションにおける送受信器の関係

ある周波数 ω の調和振動が受信側トランスデューサの開口面上の任意の点 \mathbf{r} に生成する複素音圧を $P(\mathbf{r}, \omega)$ とすると、 $P(\mathbf{r}, \omega)$ は振動速度とインパルス応答のたたみ込みで表すことができ、以下の式で記述される。

$$P(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega\rho V_0 H(\mathbf{r}, \omega). \quad (2.1)$$

ただし、 ρ は伝搬媒質の密度、 V_0 は振動速度、 $H(\mathbf{r}, \omega)$ は空間インパルス応答 $h(\mathbf{r}, t)$ のフーリエ変換とする。なお、円形トランスデューサからの放射音圧の算出方法は付録 A に詳細に述べている。ここで、角鋼片の表面を走査する送受信器を想定した場合、送受信器双方の指向性を考慮し、複素音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ を受信器の開口面において面積分した値を $P_{Re}(\omega)$ とする。送受間の振幅特性を挿入損失 IL として表すと、 IL は以下の式により求められる。

$$IL = -20 \log_{10} \frac{|P_{Re}(\omega)|}{|P_{Tr}(\omega)|}. \quad (2.2)$$

また、位相特性は受信面で面積分した受信信号 $P_{Re}(\omega)$ の位相と、伝搬距離から求めた \mathbf{r} における位相との位相差とすると、位相差 ϕ は以下の式により求められる。

$$\phi = \arg\left(\frac{P_{Re}(\omega)}{P_{Tr}(\omega)} \exp\left(\frac{j2\pi|\mathbf{r}|}{\lambda}\right)\right). \quad (2.3)$$

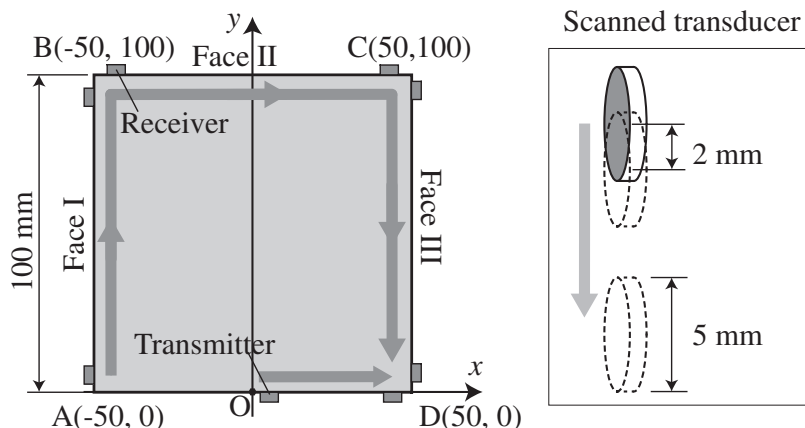


Fig. 2.3 解析面の概略図

2.2.3 解析条件

Figure 2.3 に解析面を示す．角鋼片は 100×100 (mm^2) の正方形断面を有するものとし，各頂点を点 A, B, C, D とする．底辺 AD の中心を原点として $x - y$ 座標を取る．送信側トランスデューサは $(x, y) = (1, 0)$ (mm) から 2 mm 間隔で $(47, 0)$ (mm) まで走査させ，受信側トランスデューサは $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ の順に Face I, II, III を 2 mm 間隔で走査させる．送受信トランスデューサは開口径 5 mm とする．先行研究における TOF の計測に用いられている送信周波数が 1–3 (MHz) であることから，1, 2, 3 (MHz) の正弦連続波を送信信号とする．実験用試験片の素材がジュラルミンであるため，計算に用いる音速はジュラルミンの縦波音速とし，6,320 m/s とすると⁴⁰⁾，周波数 1, 2, 3 (MHz) のときの波長はそれぞれ 6.3, 3.2, 2.1 (mm) となり，開口比は 1.36, 0.64, 0.42 となる．このときの Face I–III 上の各受信点における挿入損失 IL 及び位相差 ϕ を求める．

2.2.4 解析結果

これまでに述べた原理及び条件により，送信側トランスデューサによる放射音場を計算し，送受信器間の伝達特性を算出した．Figure 2.4 に計算により得られた放射音場を示す．Figures 2.4(a)–(c) は放射音場の振幅，(d)–(f) は位相を表している．これより，周波数が低いほど指向性が広角化しており，周波数が高くなるとディップの数が増えていることが確認できる．Figure 2.5 に送信側トランスデューサの位置を $(1, 0)$ とし，送信周波数を 1, 2, 3 (MHz) と変化させたときの計算結果を示す．Figure 2.5(a)–(c) および (d)–(f) にそれぞれ位相差 ϕ

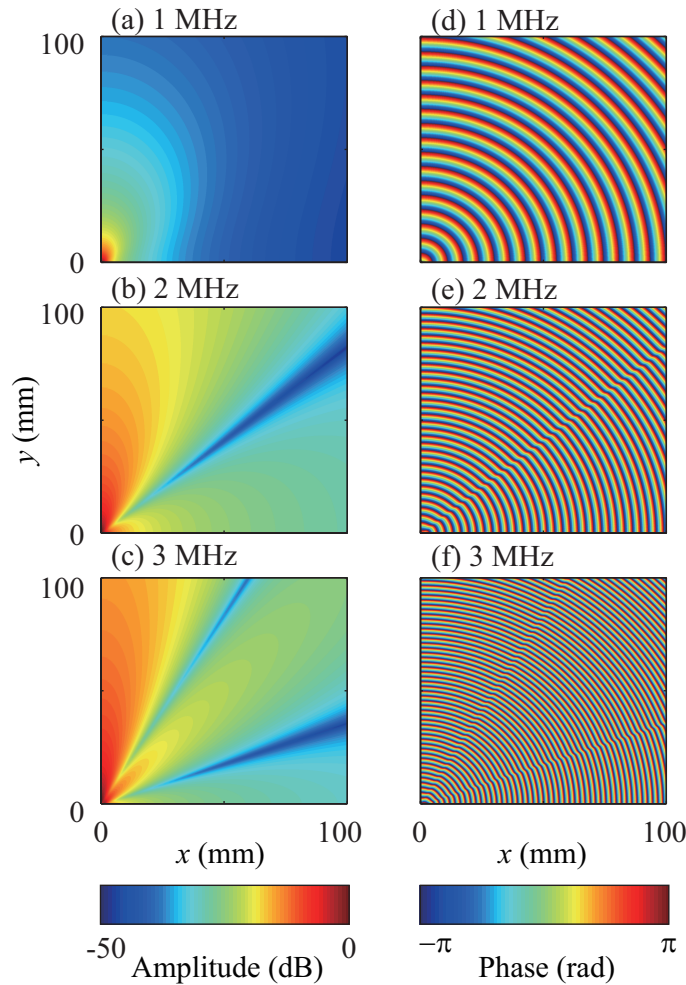


Fig. 2.4 開口径 5 mm の場合の放射音場の計算結果

および挿入損失 IL を示している。Figure 2.5(a)–(c) より、位相差 ϕ は開口比が 1 より小さい ($a < \lambda$) 送信周波数 1 MHz のとき概ね 0 で変動しない。送信周波数 2, 3 (MHz) においても Face II では概ね 0 で変動しないが、Face I, III においては $\pm\pi$ の範囲で著しく変動する箇所がある。これらは位相指向性に起因すると考えられ、開口比が大きくなるほど位相特性が変動する箇所が増えている。また、Fig. 2.5(d)–(f) より、挿入損失 IL は開口比が 1 より小さい送信周波数 1 MHz のとき、2, 3 (MHz) のときに比べ、値が小さく変動が少ない。開口比が 1 より小さいとき、直達波は各受波面において概ね均一であることが分かる。一方、送信周波数 2, 3 (MHz) と開口比が大きくなるにつれ、 IL が著しく増加する箇所が発生する。送信周波数 1, 2, 3 (MHz) における IL の最大値はそれぞれ 39, 78, 80 (dB) である。送信周波数 2, 3 (MHz) における最大値付近では直達波の振幅が著しく低下し、信号対雑音比 (Signal to noise

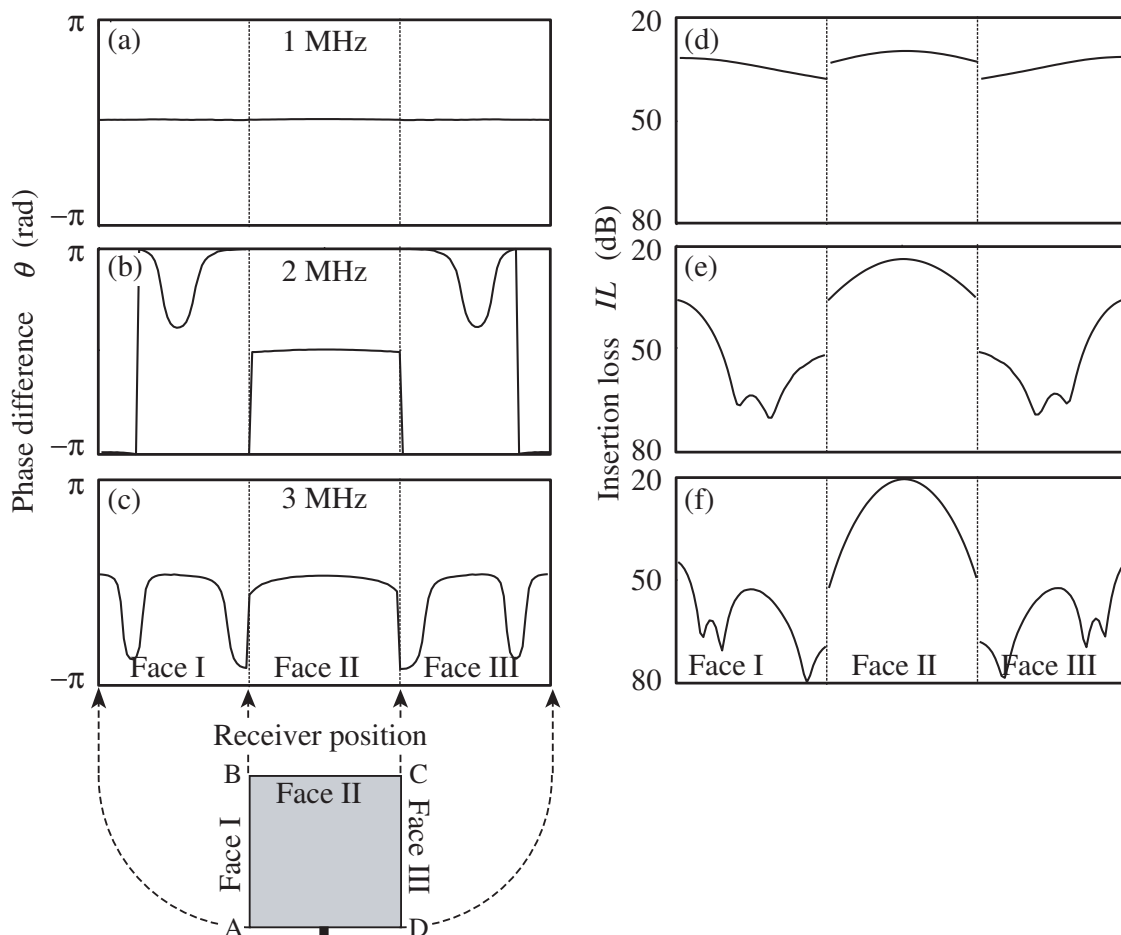


Fig. 2.5 異なる周波数による送受信器間の伝達特性の計算結果

ratio: SNR) が悪化すると考えられる。ただし、ここでの「信号」とは送受信器間の最短経路を伝搬してきた信号、「雑音」とは受信信号に含まれる「信号」以外の成分とする。これにより反射波等の影響を大きく受けて、TOF の計測誤差を生じさせる。位相特性が著しく変動する箇所と、振幅特性のディップとなる箇所は概ね一致していることから、これらの箇所では SNR の悪化と位相のずれにより TOF の計測誤差は増大すると考えられる。また、送信周波数に関わらず点 B, C において IL は不連続になる。いずれの不連続点 B, C においても Face I, III 側極限より Face II 側極限のほうが IL が小さい。このことから、伝搬距離が同じとき送受信器が向かい合う面にあるほうが振幅の大きい信号を受信できることが分かる。また、Face II では Face I, III に比べ伝搬距離が大きくなるが IL は小さい。一方点 D 付近は最も伝搬距離が小さくなるが、Face II の中心より IL は小さくならない。これらは送受信器の向きに起因する。Face II ではトランスデューサ同士が向かい合うため直達波の波面と受信面がより平

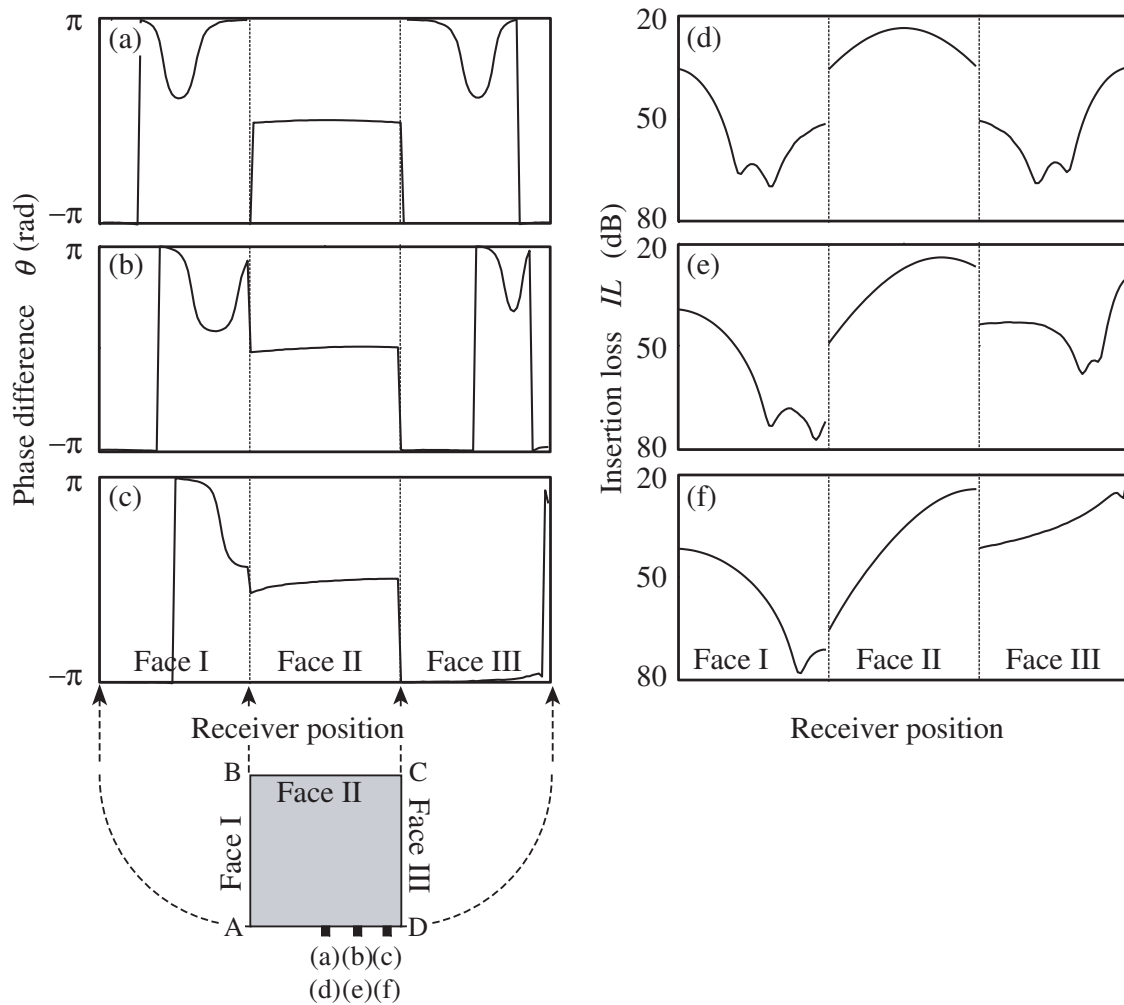


Fig. 2.6 異なる位置による送受信器間の伝達特性の計算結果

行に近くなり、受信面に入射する直達波の位相が Face I, III より揃う。受信信号は受信面上で面積分されるため、位相が揃いにくい Face I, III においては受信信号の振幅が小さくなり、TOF の計測誤差が生じ易い。以上の考察から、開口比が 1 より大きくなる時、及び送受信器が向かい合わない面にあるとき振幅および位相特性の影響を受けて TOF の計測誤差の増大しうる箇所があることが分かった。

次に、Fig. 2.6 に送信周波数を 2 MHz とし送信側トランスデューサの位置を $(1, 0)$, $(25, 0)$, $(49, 0)$ と変化させたときの計算結果を示す。Figure 2.6(a)–(c) 及び (d)–(f) にそれぞれ位相差 ϕ 及び挿入損失 IL を示している。Figure 2.6(a)–(c) より、位相差 ϕ は送信側トランスデューサの位置に関わらず Face II において概ね 0 で変動しない。しかし、Face I, III にお

いては $0 < \phi \leq \pi$ の範囲で変動する箇所が存在する。また送信側トランスデューサの位置が $(1, 0)$, $(25, 0)$, $(49, 0)$ と変化するに従い、位相の変動する箇所も Face I, III の範囲内で右へ移動している。このことから、送受信器が向かい合わない面では、TOF の計測誤差を生じやすい受信点が送信点ごとに存在し、TOF の計測誤差を生じやすくなっている。また、Fig. 2.6(d)–(f) より、挿入損失 IL は Face II においてそれぞれ送受信器が正対するとき最小となっている。また Face II では送受信器の向き及び伝搬距離が単調に変化するため、 IL も単調に変化している。しかし、Face I, III では著しく IL が増加するディップが存在する。このディップは Fig. 2.5 と同様に位相が著しく変化する箇所と一致しており、これらの箇所では SNR が悪く、受信信号に位相のずれを含むこととなるため TOF の計測誤差は増大すると考えられる。また、Fig. 2.5 と同様、Fig. 2.6 も、点 B, C で IL は不連続となっており、Face B 側極限のほうが IL が低くなっている。Figure 2.6(f) では、点 B で不連続となるものの Face I 側極限と Face II 側極限が近い値である。これは、点 B 近傍において Face I および Face II に対する直達波の入射角が概ね等しくなるためである。

以上のシミュレーション結果より、矩形面における TOF 計測では、送受信器が向かい合う面にあるときは位相特性による計測への影響は小さく、送受信器が直交する面にあるときは位相及び振幅特性の影響を大きく受け TOF の計測誤差が増大することが考えられる。矩形面周上を走査しながら透過法により計測を行う場合、開口比を 1 以下に抑えることで、開口径に起因する計測誤差を抑制できるものと考えられる。超音波イメージングにおいては、イメージングの目的によって周波数を決定するため、開口比を 1 以下にするには、より小さい開口径のトランスデューサを使用する必要がある。しかし、開口径が小さいと入射できる送信信号のパワーが制限される。そのため、開口比を 1 以上にせざるを得ない場合が多い。そこで次節で説明する TOF 計測においては送受信器間の伝達特性の影響を相殺しながら TOF 計測を行うことのできる方法を用いる。

2.3 TOF 計測

2.3.1 欠陥による TOF 増加（疑似音速低下）

TOF は透過法により計測する。計測面上の異なる 2 つの辺上に送受信器を配置して、送信器から超音波信号を送信し、角鋼片内部を伝搬してきた超音波信号を受信器で受信する。Figure 2.7(a) に示すように、超音波の伝搬経路上に欠陥が存在しない場合は、直達波を最初に受信する。一方、Fig. 2.7(b) のように、伝搬経路上に欠陥が存在する場合は欠陥部分において超音波が散乱及び回折するため直達波は受信されず、欠陥からの回折波が最初に受信器で

受信されることになる⁴¹⁾。Figure 2.7(b) の場合、欠陥による回折のため伝搬距離が増加し、TOF が増加する⁴²⁾。よって擬似的な音速低下が観察される。この欠陥が存在することによる TOF の変化量 τ_{mr} を再構成のための投影データとして取得する。欠陥による TOF の変化量から欠陥情報を得ることが本検出手法の特徴である。TOF の変化量 τ_{mr} の取得に、一般的に用いられる手法は、伝搬距離と素材の音速から算出した TOF の理論値と計測により得られた TOF の差分により算出する手法である⁴²⁾。また、受信信号にはノイズが含まれ、パルス信号の立ち上がりで伝搬時間を計測することは難しいため、TOF の計測には相互相関法がよく用いられる^{43,44)}。相互相関法による TOF の算出方法の概要を Fig. 2.8 に示す。Figures 2.8(a), (b) はそれぞれ送信信号と受信信号の例を表しており、Fig. 2.8(c) は Fig. 2.8(a) および (b) の相互相関関数を表している。相互相関法は二つの信号の類似度から伝搬時間を求める方法であり、以下の式により TOF の変化量 τ_{mr} を得る。

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \int_{-t_m}^{t_m} s_m(t) s_i(t - \tau) dt \\ \tau_{mt} &= \operatorname{argmax}[R(\tau)] \\ \tau_{mr} &= \tau_{mt} - \frac{L}{c} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ただし $R(\tau)$ は送信信号 $s_i(t)$ および計測信号 $s_m(t)$ の相互相関関数、 t_m は計測時間、 L は送受信間距離、 c は縦波音速とする。関数 argmax は関数値が最大となるような定義域の元の集合を表し、本研究では相関関数がピークとなる時間を表している。送信信号 $s_i(t)$ には Fig. 2.8(a) に示した、以下の式で表されるリニアアップチャープ信号 $s_i(t)$ を用いる^{45,46)}。

$$s_i(t) = \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{2t_i} t \right) t \right], \quad (0 \leq t \leq t_i), \quad (2.5)$$

ただし、 f_0 は初期周波数、 Δf は周波数掃引幅、 t_i を信号長とする。チャープ信号は相互相関法を用いる際に一般的に用いられ、単一周波数のバースト波に比べ帯域幅が広く、自己相関関数におけるピークが鋭いため、直達波若しくは回折波と角鋼片表面からの反射波が干渉する場合においても近接したピークの分解能に優れるという特徴がある⁴⁷⁾。

2.3.2 伝達特性の影響相殺

前節 2.2 で述べた通り、角鋼片は矩形断面であり、この断面周上に沿って送受信器を走査させながら透過法により受信信号を計測すると、送受信器の位置関係による指向性の影響を受ける。そこで、この影響を相殺しながら TOF を計測する。Figure 2.9 に計測系の概略図を示す。Figure 2.9(a) に示すように、角鋼片内部の検査は長手方向 (z 方向) に一断面ずつ逐次行

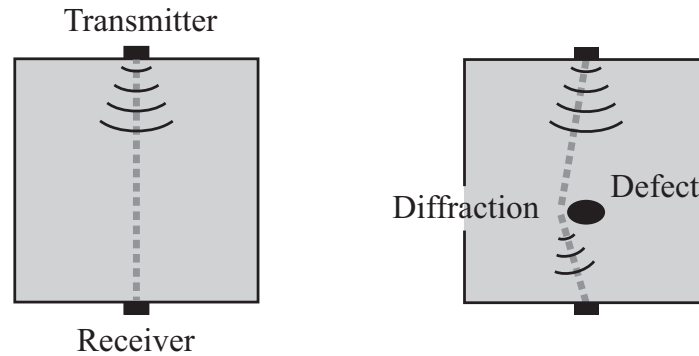


Fig. 2.7 欠陥による TOF の増加

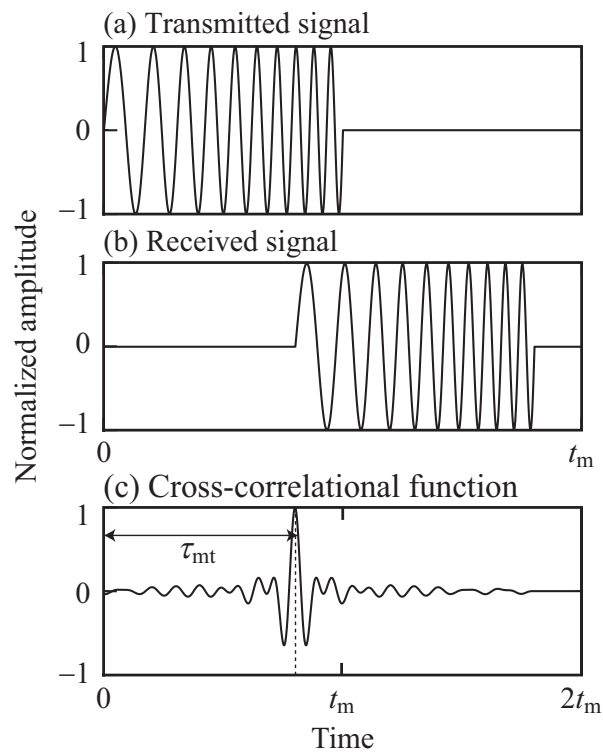


Fig. 2.8 相互相関法の概要

い、本研究では、検査を行う面を計測面、その直前の面を参照面と呼ぶこととする。本研究における解析では、Fig. 2.9(b) に示すように、計測面には欠陥が含まれ、参照面には欠陥が含まれていない状況を想定する。参照面において取得した受信信号（以下、参照信号）を $s_r(t)$ とし、計測面において取得した受信信号（以下、計測信号）を $s_m(t)$ とする。それぞれの信号

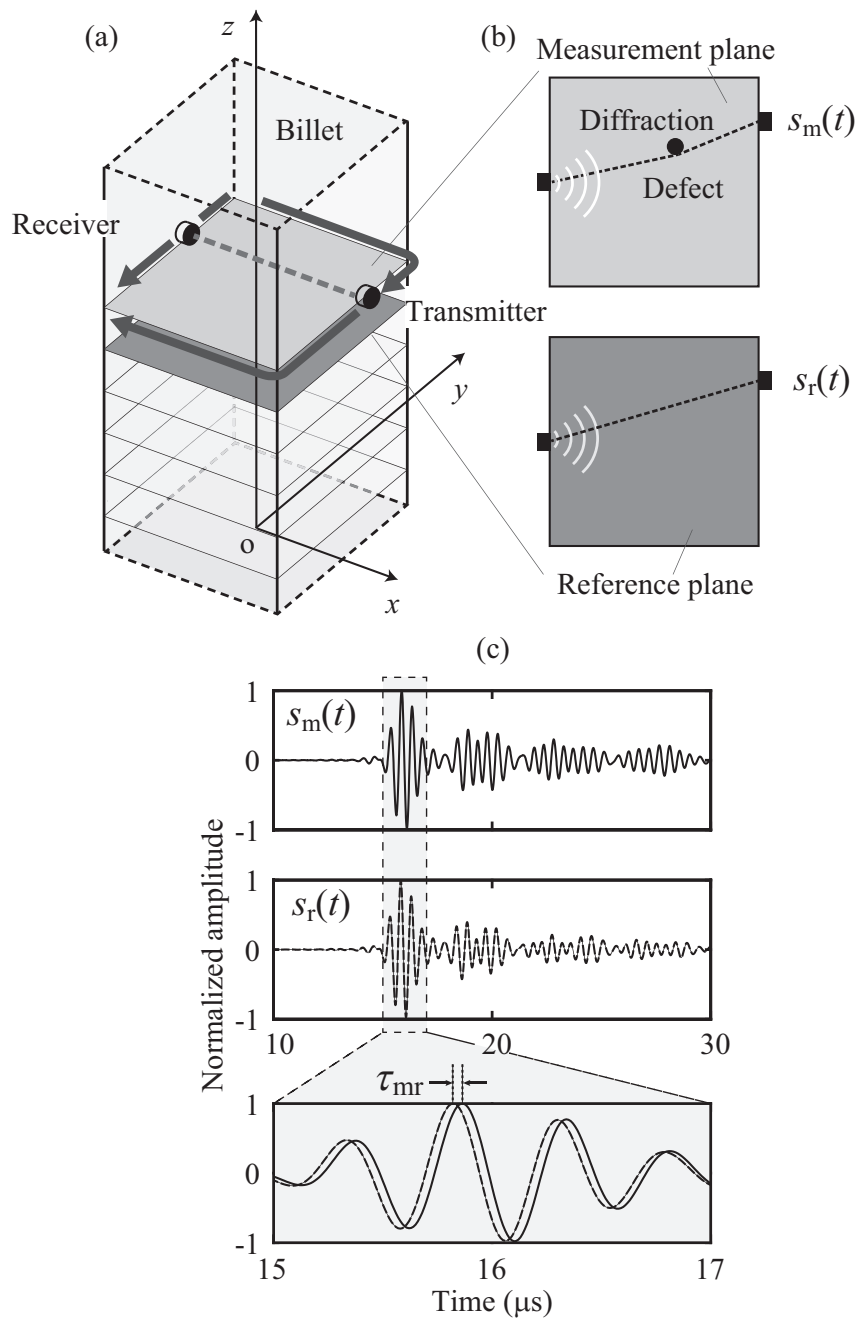


Fig. 2.9 計測系の概略図および計測信号・参照信号

の一例を Fig. 2.9(c) に示す. 計測信号 $s_m(t)$ は参照信号 $s_r(t)$ に比べ, 欠陥による回折の影響を受け縦波の到着が遅れている. 欠陥による TOF 変化量を算出する際, 先述の相互相関法では送信信号 $s_i(t)$ および計測信号 $s_m(t)$ の相互相関を取ったが, 参照面を用いる TOF 計測法

では送信信号ではなく参照信号 $s_r(t)$ との相互相関を取る。送信信号と異なり，参照信号 $s_r(t)$ には，送受信器間の伝達特性がたたみ込まれている。そのため，計測信号 $s_m(t)$ と参照信号 $s_r(t)$ の相互相関をとることで，送受信器の開口径に起因する計測誤差を軽減しながら，計測信号と参照信号の差分を抽出することができる。すなわち，欠陥による TOF 変化量 τ_{mr} を算出することができる³⁴⁾。TOF 変化量 τ_{mr} は以下の式により算出する。

$$R(\tau) = \int_{-t_m}^{t_m} s_m(t)s_r(t-\tau)dt$$

$$\tau_{mr} = \operatorname{argmax}[R(\tau)] \quad (2.6)$$

ただし $R(\tau)$ は $s_r(t)$ および $s_m(t)$ の相互相関関数とする。送受信器を計測面に沿って等間隔で直線走査させながら，全ての伝搬経路において計測を行い τ_{mr} を得る。

なお，角鋼片の長手方向への形状や内部分布の連続性を考慮すると，参照面を用いる TOF 計測方法では，参照面と計測面の差分のみを抽出する手法であるため，形状ひずみや温度や異方性などの内部分布の影響も相殺し，気孔等の欠陥のみを検出することが可能である。

2.4 超音波 CT 法による欠陥可視化

次に，超音波 CT 法を用いて疑似音速分布の再構成を行い，角鋼片内部を可視化する⁴⁸⁻⁵⁰⁾。超音波 CT 法は逆ラドン変換に基づき，投影データから二次元断面像を再構成する手法である⁵¹⁾。Figure 2.10 に CT 法を説明するための概略図を示す。 (X, Y) は (x, y) を θ 回転した座標系で，

$$\begin{cases} X &= x \cos \theta + y \sin \theta \\ Y &= -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (2.7)$$

とする。Figure 2.10 左上図に示す経路と投影データ $\tau_{mr}(X, \theta)$ と二次元断面像 $q(x, y)$ の関係は

$$\begin{aligned} \tau_{mr}(X, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) dY, \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} q(X \cos \theta - Y \sin \theta, X \sin \theta + Y \cos \theta) dY, \end{aligned} \quad (2.8)$$

で表される。投影データ $\tau_{mr}(X, \theta)$ は二次元断面像 $q(x, y)$ を Y 軸方向に積分した値として得られ，これをラドン変換と言う。送受信器を X 軸方向に直線走査して，角度 θ における一次元投影データを得る。 θ 方向に回転走査しながら全方向からの投影データを取得する。

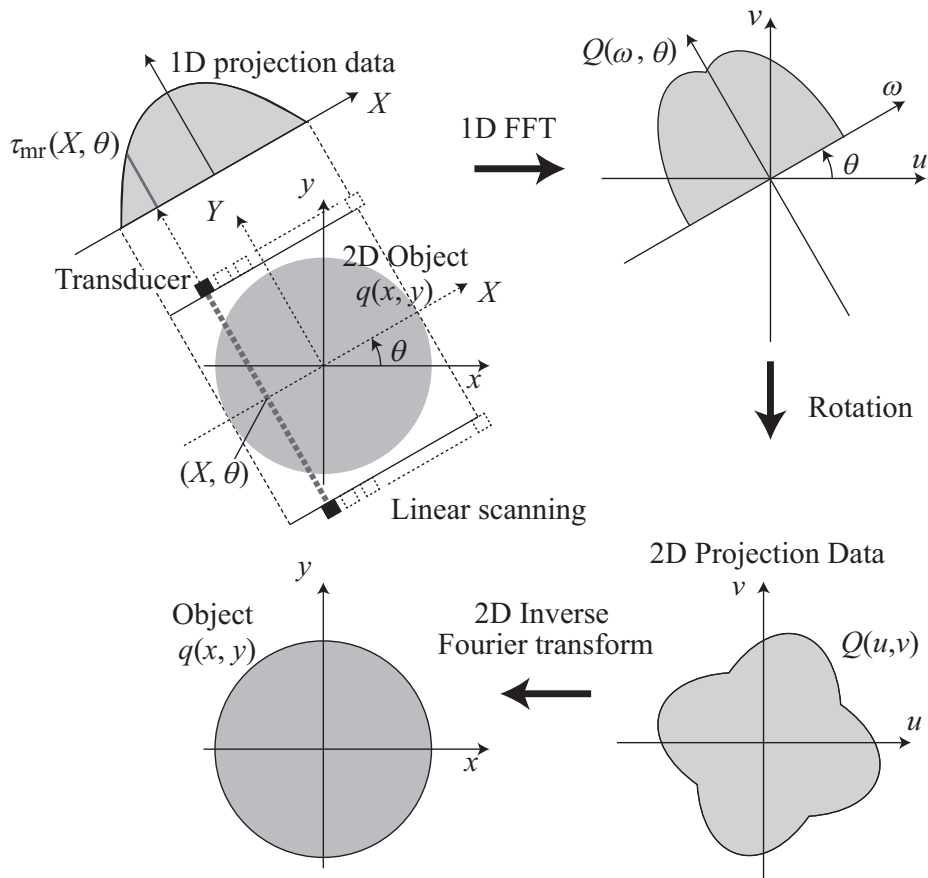


Fig. 2.10 超音波 CT 法の原理

次に、取得した全方向からの一次元投影データから二次元断面像を算出する解析的アルゴリズムについて説明する⁵²⁾。 (x, y) 領域の二次元断面像 $q(x, y)$ から周波数領域 (u, v) への二次元フーリエ変換 $Q(u, v)$ は

$$Q(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) \exp[-j(ux + vy)] dx dy, \quad (2.9)$$

で表され、これを極座標変換すると、

$$\begin{aligned}
 Q(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) \exp[-j\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)] dx dy, \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(X \cos \theta - Y \sin \theta, X \sin \theta + Y \cos \theta) dY \exp(-j\omega X) dX, \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \tau_{\text{mr}}(X, \theta) \exp(-j\omega X) dX, \tag{2.10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} u = \omega \cos \theta \\ v = \omega \sin \theta \end{cases}, \tag{2.11}$$

となる。ここで、 (ω, θ) は (u, v) の極座標表示、 $Q(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta)$ は $Q(u, v)$ の極座標変換を表す。Equation (2.10) を投影切断面定理といい、投影データ $\tau_{\text{mr}}(X, \theta)$ の X に関する一次元フーリエ変換は断面像 $q(x, y)$ の二次元フーリエ変換 $Q(u, v)$ における θ 方向の成分に等しいことを表している。この関係を直接解くことにより二次元断面像を得る手法を二次元フーリエ変換法と呼ぶ。

実際には、画像再構成の研究が盛んな医療分野などにおいては、フィルタ補正逆投影 (Filtered back-projection:FBP) 法が一般的に用いられている^{53,54}。フィルタ補正逆投影法は二次元フーリエ変換法と数学的に等価な解析的再構成手法である。先ほどの $Q(u, v)$ の二次元フーリエ逆変換は

$$\begin{aligned}
 q(x, y) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(u, v) \exp[j(ux + vy)] du dv, \\
 &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) \exp(j\omega X) |\omega| d\omega d\theta, \tag{2.12}
 \end{aligned}$$

で表される。従って、Eqs. (2.10) 及び (2.12) から投影データ $\tau_{\text{mr}}(X, \theta)$ と二次元断面像 $q(x, y)$ の関係を導くことができる。また、定義式では ω は $-\infty \rightarrow \infty$ だが実際には有限値で打ち切る関係からフィルタ関数を作用させる。角鋼片の内部探傷においては、投影データの計測時に含まれる雑音による影響が顕著になり CT 像内にノイズが発生するため、本論文では Shepp-Logan フィルタを用いる⁵⁵。Shepp-Logan フィルタは、高周波成分を減衰させることで虚像を減少させる働きがある。

さて、超音波 CT 法を角鋼片断面に適用する場合、これまで述べてきた一般的な CT 法と異なる部分がある。Figure 2.10 のような平行走査で投影データを取得した場合、サイノグラム上では等間隔に投影データが並ぶ。ここで、サイノグラムとは、投影データ $\tau_{\text{mr}}(X, \theta)$ を横軸に X 、縦軸に θ をとって直交座標系で表したものである⁵⁶。一方、角鋼片断面周上に等間隔に計測点を設定し、送受信器を走査して投影データを取得した場合、サイノグラム上では等間

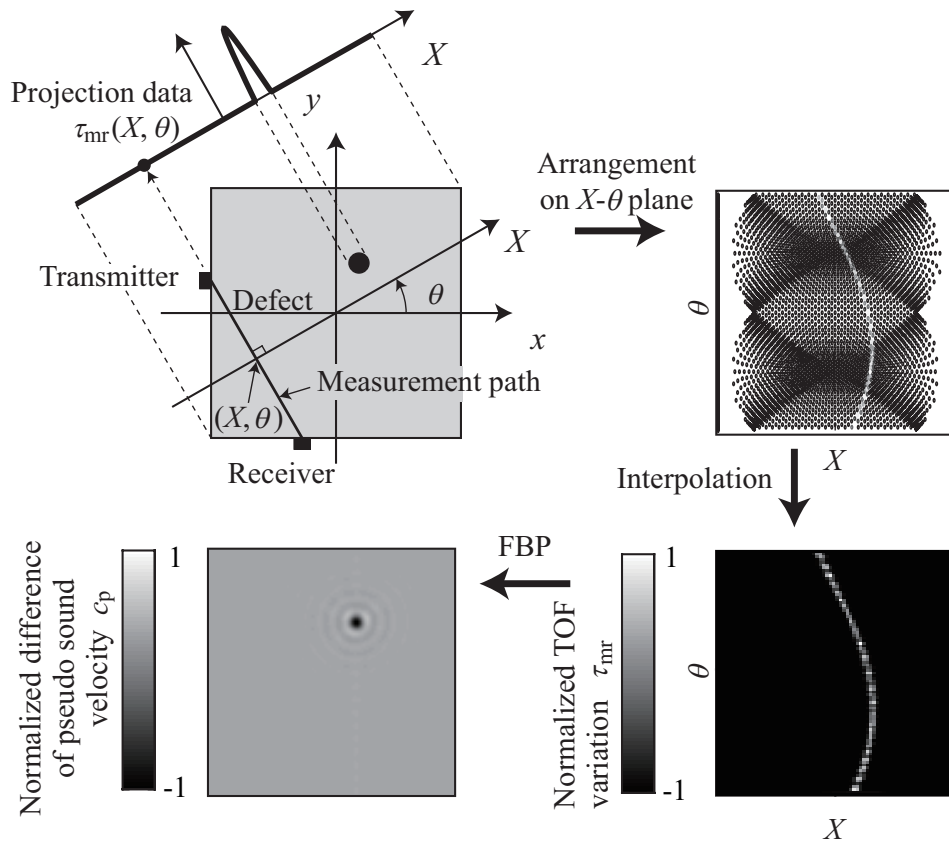


Fig. 2.11 角鋼片断面における投影データとサイノグラムの関係

隔に投影データが並ばない。Figure 2.11 に角鋼片断面における計測点と投影データ，サイノグラムの関係を示す。Figure 2.11(a) は角鋼片断面における計測点と投影データの関係を示しており，Fig. 2.11(b) はサイノグラム上に並べた計測データを示している。Figure 2.11(b) の輝度は τ_{mr} を表している。これらの図の通り，角鋼片断面周上を走査して獲得した投影データは， X 方向および θ 方向に不等間隔になる。そこで，計測で得られた投影データを Fig. 2.11(c) に示すように，補間する。本論文では，キュービックスプライン補間を行っている⁵⁷⁾。これにより，投影データは X 方向および θ 方向に等間隔に並び，先述の FBP 法により二次元断面像を算出することができる。得られる二次元断面像の一例を Fig. 2.11(d) に示す。

本論文では投影データを欠陥により発生した TOF の変化量 τ_{mr} とするため，CT 法により得られる二次元断面像は，単位距離あたりの TOF 変化量となる。疑似音速分布の変化分

$c_p(x, y)$ は二次元断面像 $q(x, y)$ から算出でき,

$$c_p(x, y) = \frac{1}{q(x, y)}, \quad (2.13)$$

で表される. 欠陥が存在する部分では再構成像において疑似音速の低下が見られるため, 欠陥の存在及び位置を観測することができる.

なお, TOF 計測に参照面を使用しているため, CT 像には参照面と測定面の違いが可視化される. 本研究では, 計測面は欠陥を含み, 参照面は欠陥がないものとしていたため, CT 像には計測面に含まれる欠陥が可視化される. しかし実際は, 参照面は逐次更新されていくため, この設定の通りであることは少ない. Figure 2.12 に示した計測の流れにおいて, 角鋼片内に z_2 面および z_3 面にまたがる欠陥が含まれている場合には, 計測面が z_2 面のとき参照面は z_1 面であり, CT 像内には欠陥が音速低下として可視化され, 計測面が z_3 面のとき参照面は z_2 面であり, 欠陥位置および形状に差異がないので, 可視化像内に欠陥による音速変化は見られないこととなる. 計測面が z_4 面のとき, 参照面は z_3 面であり, 参照面に欠陥が存在し, 計測面には欠陥が存在しないため, 参照面に対する計測面の差分として可視化像内の欠陥位置には音速増加が確認される. 計測面が z_5 面のとき参照面は z_4 面であり, 参照面, 計測面ともに欠陥は存在しないため, CT 像内の音速分布は均一となる. このように, 可視化像は参照面と計測面の差分となり, ひとたび欠陥が可視化されたとしてもその後に欠陥の影響を引きずることはない.

2.5 伝達特性の影響相殺による可視化像の改善

ここで参照面による効果を確認するために, 参照面の利用の有無による可視化像の違いを数値シミュレーションにより確認した. シミュレーション条件は後述の第 3.2 節と同様であり, ここでは割愛する. 結果を Fig. 2.13 に示す. Figure 2.13(a) は欠陥の配置を示している. Figure 2.13(b) は送信信号と計測信号との相互相関により得られた τ_{mr} から再構成した CT 像であり, Fig. 2.13(c) は参照信号と計測信号との相互相関により得られた τ_{mr} から再構成した CT 像である. Figure 2.13(b) では, CT 像内に斜めに筋状のノイズが発生しており, その影響により欠陥と区別が難しい音速低下が発生している. 一方で, Fig. 2.13(c) より, 参照面の利用によって CT 像におけるノイズが軽減され, 欠陥位置での音速低下が鮮明になっている. 以上より, 参照面を用いて送受信器間の伝達特性の影響を相殺することにより, TOF の計測誤差が減少し CT 像における虚像が軽減できることが確認された.

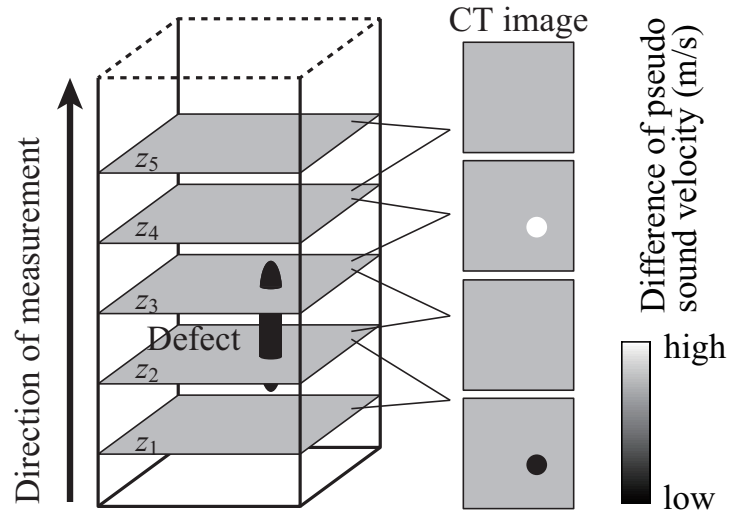


Fig. 2.12 参照面を用いる TOF 計測における参照面と計測面の位置関係

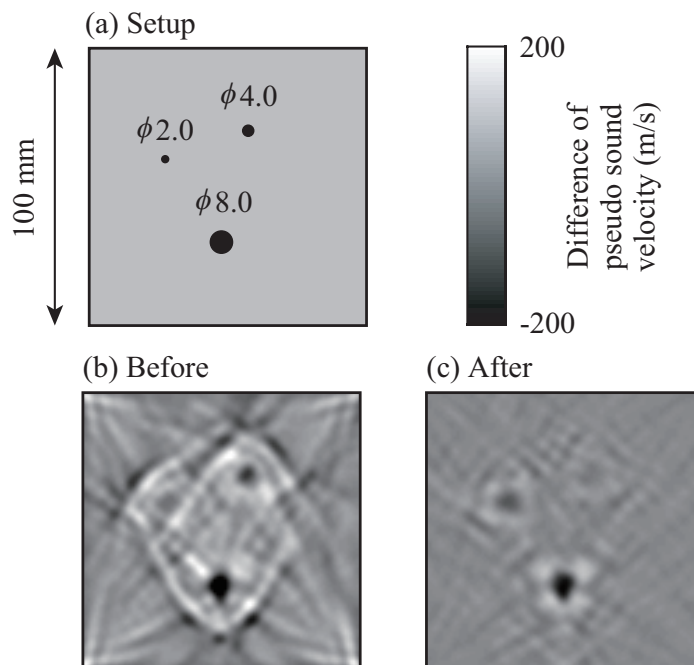


Fig. 2.13 参照面による TOF 計測法のノイズ抑制効果

2.6 むすび

本章では，角鋼片内部の欠陥を可視化する方法として，参照面を用いる TOF 計測法により得られた欠陥による TOF の変化量を用いて超音波 CT 法により再構成する方法について説明した．角鋼片のように計測面が矩形の場合，送受信器が向かい合わない計測パスが多い．そのため，送受信器の指向性の影響を受けた受信信号を受信する．そこで，角鋼片の検査は長手方向に逐次的に一断面ずつ行われることを利用し，一つ前の計測面での受信信号をリファレンスとして用いる TOF 計測方法について述べた．計測パス上に欠陥が存在する場合，超音波信号は欠陥周囲で回折するため伝搬距離が長くなり，TOF が増加する．このため，疑似的に音速が低下するという現象が起こることを述べ，本欠陥検出手法ではこの現象を利用することを述べた．次に，欠陥による TOF の変化量を投影データとして超音波 CT 法により逆投影すると，疑似音速分布を取得できることを示した．疑似音速分布内では，欠陥位置において音速低下が観察されるため，欠陥の存在を検出できる．最後に，参照面を用いる TOF 計測法によるノイズ抑制効果を確認した．

第 3 章

送信信号の欠陥可視化像への影響

3.1 はじめに

既往の研究では、TOF を用いる超音波 CT 法はある条件において欠陥検出が可能であることを確認したところに留まっている^{34,58)}。本手法を欠陥検出に用いる際に、測定条件と欠陥検出能力の関係は把握しておかなければ、検査結果に信頼性を持たせることができないが、測定条件と欠陥検出能力の関係は十分に明らかにされていない。ここで、欠陥検出能力とはある条件の下、欠陥が存在している箇所において欠陥検出できることとする。超音波探傷において欠陥検出能力を左右する主要要素の一つに送信周波数が挙げられる。超音波イメージングにおいては送信周波数が高いほうがより高解像度であることが一般的である。しかし、角鋼片内の欠陥検出において、欠陥有無の判別のみが意味を持つ場合、欠陥形状を正確に再構成することは重要ではない。したがって、再構成像の分解能を高くするために送信周波数を高く設定することが有効とは限らない。本章では、送信周波数により得られるイメージング結果の違いについて検証し、送信周波数と欠陥検出能力の関係について数値シミュレーションにより検証する。数値シミュレーションは、波動伝搬シミュレーションにより行う。本研究では波動伝搬シミュレーションに伝達線路行列 (Transmission-line matrix: TLM) 法を用いる。本節ではまず、TLM 法について説明し、次いで、解析条件について述べ、波動伝搬シミュレーションから得られた波形により TOF を算出して再構成を行い、欠陥検出能力を検証する。

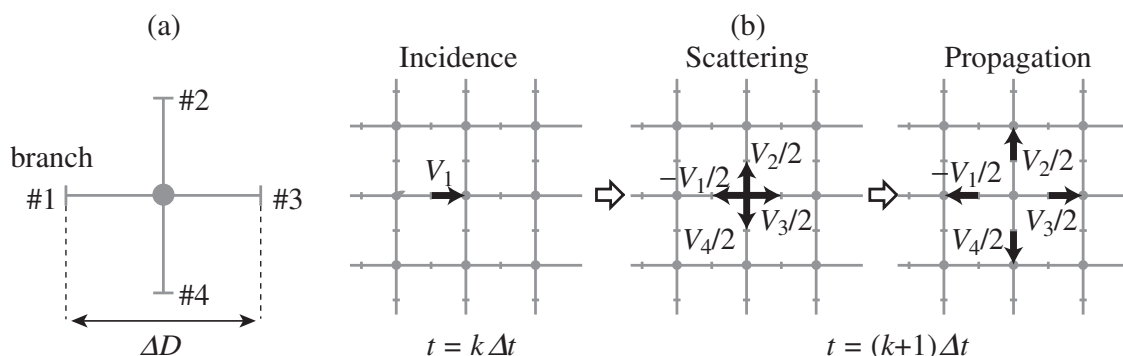


Fig. 3.1 TLM 要素とパルス信号の入射，拡散，伝搬の様子

3.2 送信信号の周波数による可視化像の違い

3.2.1 波動伝搬シミュレーション: Transmission-line matrix 法

TLM 法は，ホイヘンスの原理のメカニズムをコンピュータ上で計算することによって波動伝搬を表現するものである⁵⁹⁾。ホイヘンスの原理は，光の伝搬を二次波の再放射として説明するものであり，波動は面上の各点がそれぞれ一つの波源となり，その 2 次波の波面の包絡面が新たな波面となるように伝搬する。これにより波の伝搬，反射，屈折，回折の各現象が説明される。TLM 法はこの波動伝搬のメカニズムをインパルスの散乱の繰り返しとして取り扱うもので，本質的には波動方程式を解く必要がない。Figure 3.1 は，インパルス伝搬路を示す線分要素 (TLM 要素) である。Figure 3.1(a) のように，線分の 1 つに大きさ V_1 の音圧インパルスが入射したとすると，インパルスは節点で Fig. 3.1 のように四方に散乱される。インパルス入射から Δt 秒後に，線路 1 には $-1/2 V_1$ ，線路 2-4 には $1/2 V_{2-4}$ のパルスが散乱する。各線路からの入射をまとめると，

$${}_{s+1} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix}^r = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} {}_s \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix}^i, \quad (3.1)$$

となる。ここで， $k = \Delta t/t$ であり， Δt は時間離散幅とする。散乱したパルスは隣接する TLM 要素への入射パルスとなり，この連鎖的な繰り返しとして波動伝搬が行われる。よって，

時間 $t + 1 (= (k + 1)\Delta t)$ における $x - y$ 座標での入射パルスは、以下のように表される。

$$\begin{aligned} V_1^i(x, y) &= V_3^r(x, y - \Delta D) \\ V_2^i(x, y) &= V_4^r(x + \Delta D, y) \\ V_3^i(x, y) &= V_1^r(x, y + \Delta D) \\ V_4^i(x, y) &= V_2^r(x - \Delta D, y) \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 ΔD は空間離散幅であり、 Δt と以下の関係が成り立つように設定する。

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta D}{c}, \quad (3.3)$$

ただし、 c は音速とする。TLM 法では、空間の離散化とともに時間に関しても離散化が行われるため、時間（周波数）領域の誤差（分散誤差）が問題となる。低周波域 ($\Delta D/\lambda \ll 1/4$) では、分散誤差は問題にならないが、高周波域では伝搬速度は周波数とともに遅くなり、 $\Delta D/\lambda = 1/4$ でカットオフとなる。従って、実用的に利用できるのは、

$$\frac{\Delta D}{\lambda} \leq \frac{1}{10}. \quad (3.4)$$

の範囲である⁵⁹⁾。

3.2.2 解析条件

Figure 3.2 に解析面および内部欠陥の計算条件を示す。試験片はジュラルミン片とし、縦波音速を 6,320 m/s とする。断面の大きさは 100×100 (mm²) とし、計測面には $(x, y) = (-20, 30), (10, -30), (-30, -10), (30, 20)$ (mm) の位置にそれぞれ直径 $\phi = 2.0, 1.5, 1.0, 0.5$ (mm) の欠陥を配置し、参照面には欠陥を配置しない。本論文では角鋼片内に発生する欠陥の中でも空洞を対象としており、空洞の場合、欠陥形状は球形形状または梨型形状が多い⁶⁰⁾。ここでは、2次元モデルによる解析のため欠陥形状を円形としている。なお、欠陥は気泡（水素や二酸化炭素）または空洞によるものであり、角鋼片との音響インピーダンスの比は $10^5 - 10^6$ になることから、欠陥の音響インピーダンスは試験片内部に比して十分に小さいとし、欠陥と試験片の境界は完全反射境界とする。入力信号は、以下の式で表されるリニアアップチャープ信号 $s(t)$ とする。

$$s(t) = \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{2t_i} \right) t \right] \quad (0 \leq t \leq t_i) \quad (3.5)$$

また周波数 f の時間変化は

$$f = f_0 + \Delta f \frac{t}{t_i} \quad (3.6)$$

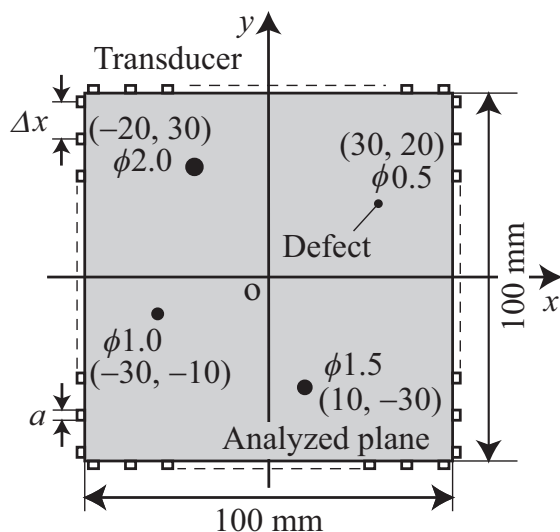


Fig. 3.2 数値シミュレーションにおける欠陥配置

で表される線形変化とする．各パラメータを Table 3.1 の通りに与える．送信周波数に関しては，周波数が高いとき角鋼片内での減衰が大きく受信感度の悪化を招き，周波数が低いとき TOF 算出の際の相互相関ピークが鈍くなり TOF 計測誤差を生じることを考慮して，0.5–10 MHz の範囲に設定している．また，各送信信号において自己相関関数のメインローブとサイドローブの比を等しくするため，中心周波数 f_c と周波数掃引幅 Δf の比が等しくなるように設定する．また，指向性の影響を考慮するため点音源とせず有限な開口径としている．送受信器の開口径 a は，中心周波数 $f_c = 1, 2, 4, 6$ (MHz) (波長 $\lambda_c = 6.3, 3.2, 1.6, 1.1$ (mm)) の信号に対しそれぞれ $a = 4, 2, 0.8, 0.6$ (mm) とする．ここでは，放射特性が無指向性に近くなるよう開口比を 1 程度としている．また，送受信器の周波数特性を考慮し， $f_0 - f_0 + \Delta f$ に対し，バンドパスフィルタにより帯域制限を与える．スキャンピッチ Δx は 1 mm とする．また，計測時間 t_m は送信時間および最大伝搬時間の和を含むよう $f_c = 1$ MHz のとき $t_m = 35 \mu\text{s}$ ， $f_c = 2, 4, 6$ (MHz) のとき $t_m = 30 \mu\text{s}$ とした．TLM 法による波動伝搬シミュレーションにおいて空間離散幅を 0.1 mm，時間離散幅を 0.011 μs と設定する．

3.2.3 解析結果

上記の解析条件において波動伝搬シミュレーションを行い，見かけ上の音速分布 c_p を再構成したところ Fig. 3.3 が得られた．Figure 3.3(a)–(d) はそれぞれ $f_c = 1, 2, 4, 6$ (MHz) における再構成像である．各周波数における $|c_p|$ の最大値 c_{pm} に合わせてスケールしている．また，Fig. 3.4 には，各欠陥の中心を通過する直線上の見かけ上の音速 c_p を示した．

Table 3.1 送信信号のパラメータ

No.	f_c	f_0	Δf	λ_c	t_i	t_m
1	1	0.5	1	6.3	10	35
2	2	1	2	3.2	5	30
3	4	2	4	1.6	2.5	30
4	6	3	6	1.1	1.67	30

$f_c, f_0, \Delta f$: MHz, λ_c : mm, t_i, t_m : μs

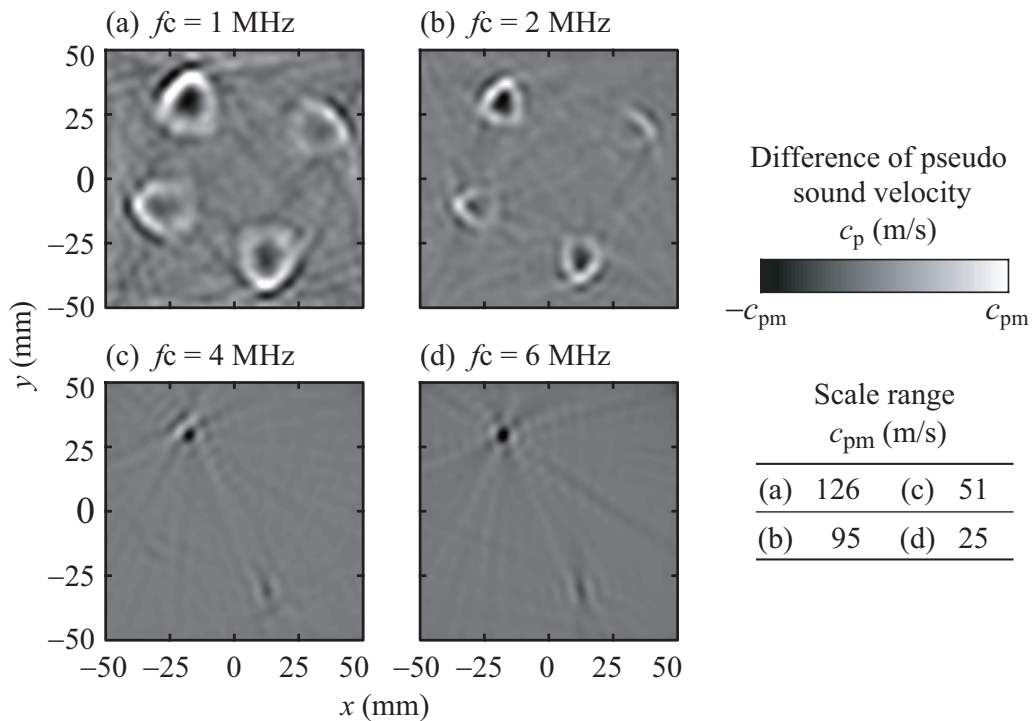


Fig. 3.3 異なる周波数による再構成像

Figure 3.3 より、送信周波数が高くなるにつれ再構成像内の欠陥の大きさが小さくなり、空間分解能が向上していることが分かる。しかし、送信周波数が低い $f_c = 1, 2$ (MHz) のときのほうが、欠陥の存在ははっきり確認できる。送信周波数が最も低い Fig. 3.3(a) のとき $\phi = 0.5$ mm の欠陥もはっきり確認でき、中心周波数である 1 MHz のときの $1/10$ 波長程度に相当する欠陥検出が可能であることが分かる。

一方、Fig. 3.3(c), (d) では $\phi = 1.0, 0.5$ (mm) の欠陥位置における音速低下が確認できな

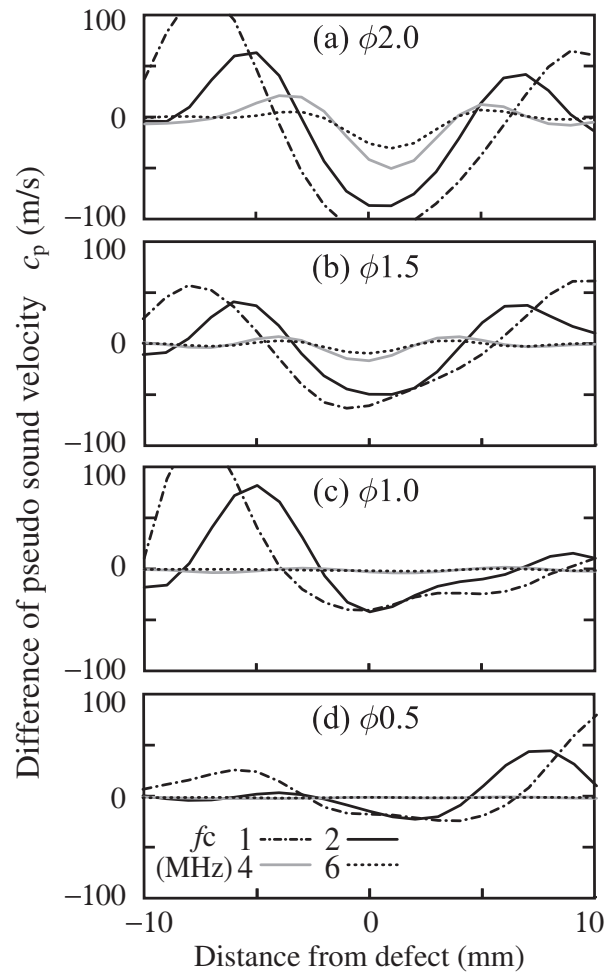


Fig. 3.4 異なる周波数による欠陥付近の疑似音速変化

い. Figure 3.4 を見ると、いずれの欠陥においても送信周波数が小さくなるにつれ欠陥位置の音速低下および欠陥周囲の音速増加が大きくなっているが、送信周波数が高くなると音速変化が少なくなる. Figure 3.4(c), (d) では $f = 4, 6$ (MHz) においてほとんど増減が確認できない. 以上より、送信周波数が欠陥検出の可否に関係することが考えられる.

3.3 欠陥可視化像の膨張現象

これまで述べた、スキャンピッチおよび送信周波数を変化させたときの解析結果より、送信周波数により欠陥に起因する TOF データの増減が変化し、スキャンピッチにより欠陥検出の

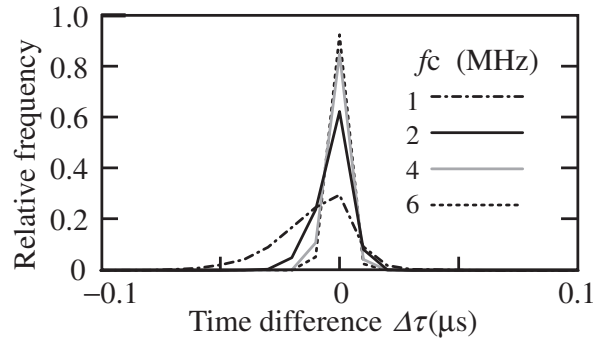


Fig. 3.5 異なる周波数による波動伝搬シミュレーションに基づく TOF および伝搬距離に基づく TOF の差 $\Delta\tau$ の相対度数分布

可否が決まること分かった．再構成像において欠陥が膨張する現象が見られ，この現象が欠陥検出を助けている．欠陥の像の膨張は超音波の波動性に起因するものであると考えられる．伝搬経路付近に欠陥が存在する場合，直達波は欠陥からの散乱波と干渉する．このため観測される受信信号 $s_m(t)$ には直達波と散乱波の干渉の影響を含む．ここで，波動性による TOF の増減を検証するために，各周波数における波動伝搬シミュレーションに基づく TOF，および伝搬距離に基づく TOF の差 $\Delta\tau$ の相対度数分布を算出した．結果を Fig. 3.5 に示す．横軸の時間は，波動伝搬シミュレーションにより算出した τ_{mr} と伝搬距離から算出した欠陥による伝搬時間増加 τ_{ray} の差 $\Delta\tau = \tau_{mr} - \tau_{ray}$ であり，波動性を考慮することにより生じる縦波伝搬時間の増減を示している．すなわち，計測誤差は回折による伝搬距離増加以外に起因する TOF の増減を示す．縦軸は，($\Delta\tau$ となる経路数)/(全経路数 60,000) を示す相対度数 (Relative frequency) である．Figure 3.5 より，送信周波数が低いほど $\Delta\tau$ が広範囲に及び，送信周波数が高くなるにつれ $\Delta\tau$ が減少している．またいずれの周波数のときも， $\Delta\tau$ は位相 $0 - 2\pi$ の範囲内すなわち信号の 1 周期 ($1/f$) の範囲内に収まる程度のもとなっている．Figure 3.3, Fig. 3.4 においては送信周波数が低いほど欠陥付近の見かけ上の音速変化が大きいことから，波動性を考慮することにより生じる縦波伝搬時間の増減は欠陥周囲で生じると言える．ここで，再構成像において欠陥周囲で見かけ上の音速が増加する原因について考察する．欠陥付近を通る伝搬経路では，直達波と欠陥からの散乱波が干渉する．この際，欠陥は空洞であるため試験片に比べ音響インピーダンスが非常に低く，欠陥周上で送信信号は自由端反射し，逆位相となる．Figure 3.6 に見かけ上の音速増加の発生の概略図を示す．Figure 3.6(a-i) は直達波と送信信号の相互相関関数，Fig. 3.6(a-ii) は散乱波と送信信号の相互相関関数，Fig. 3.6(b) は Fig. 3.6(a-i) と (a-ii) を合成した信号のイメージを示している．散乱波は直達波より遅れて受信され，散乱波

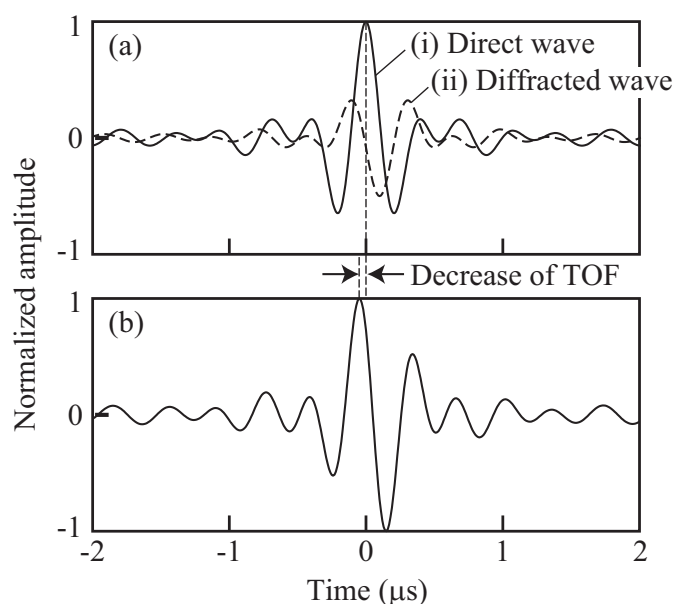


Fig. 3.6 直達波と散乱波による見かけ上の音速増加発生イメージ

が逆位相であることにより，合成した信号のピークは負の方向にシフトしていることが確認できる．これにより，縦波伝搬時間が減少したように算出され，見かけ上の音速が増加する．CT 像における見かけ上の音速増加の範囲は，Fig. 3.6(b) における相互相関ピーク幅に依存する．送信周波数が低いとき相互相関ピーク幅は広がり，CT 像において欠陥周囲の音速増加範囲が強調される．

ところで，本研究における解析ではサンプリング周波数 $f_s = 100$ MHz，時間分解能 $0.01 \mu\text{s}$ と一定としていた．Figure 3.3 において $f_c = 4, 6$ (MHz) と周波数が高いとき確認できない欠陥があるが，時間分解能を $0.001 \mu\text{s}$ などと小さくすることで，欠陥情報を含む TOF データを得られる可能性はあると考えられる．しかしながら，高周波数では実際にはノイズの影響を受けやすいことや計算コストの増加から，現実的でない．よって送信周波数が高いことは，欠陥検出においては好まれない．以上より，本欠陥検出手法においては，送信周波数を高くすることが欠陥検出の目的からは必ずしも有効ではないと言える．

また，送信周波数が高いときは，散乱波の影響による $\Delta\tau$ の増減が少ないことに加えて，微小欠陥では回折による $\Delta\tau$ の増加も僅かであるため， $\Delta\tau$ は時間分解能より小さくなり，さらに CT 法におけるデータ補間等で見かけ上の音速変化が小さくなる．さらに実際の計測では微小な音速変化は計測誤差などに埋もれて確認できなくなると考えられる．一方，送信周波数が

低いときは散乱波による縦波伝搬時間の計測誤差が欠陥の存在を強調するため、欠陥検出が容易となる。低い周波数での計測は角鋼片内部の欠陥検出において利点となる。現在、角鋼片の内部欠陥に対する超音波探傷には 5 MHz 前後の周波数帯がよく用いられている。送信周波数が高いと角鋼片に探触子から入射できる信号パワーも小さく、減衰も大きくなるため、信号対雑音比が悪化する。1 MHz 程度の低い周波数を用いることは信号の透過性を上げ、計測精度の向上につながる。

しかし、波長をただ大きくすることが良いとは一概に言えない。送信信号周波数を低くすると、送信信号の自己相関ピークが鈍くなり TOF 計測精度が低下する。自己相関ピークを鋭くするためには周波数掃引幅を広く取る必要が生じ、それに伴い計測信号長を長くすると縦波以外の成分が受信器に到達し、誤差の原因となる。また、信号長の増加は計測時間、計算コストの増加を招き、膨大な計測点数を必要とする角鋼片の欠陥検出には不利となる。角鋼片の大きさが 100 mm 程度で有限であることから、再構成像に欠陥の存在が確認されるためには、送信信号波長のオーダーは角鋼片の寸法のオーダーより小さい必要がある。以上を鑑みて、本計測系においては $f_c = 1$ MHz 程度が f_c の下限であると考えられる。本研究では、スキャンピッチおよび周波数が欠陥検出能力に及ぼす影響を検証するために、理想的な送受波器を仮定した上で、複数の周波数による検討を行った。それらの中には小口径で、広帯域のような市販品では実現の難しい条件も含んでいるが、結論として本手法による欠陥検出に適する送信周波数 1 MHz における測定条件については現存のデバイスで実現可能なものである。

超音波 CT 法により角鋼片内部を可視化する場合、スキャンピッチ（計測点間隔）も欠陥可視化の可否に関係する。そこで $f_c = 1$ MHz における必要なスキャンピッチについても考察しておく。 $f_c = 1$ MHz においてスキャンピッチ $\Delta x = 5, 7$ (mm) としたときの再構成像を Fig. 3.7 に示す。Fig. 3.7 より、 $\Delta x = 5$ mm においては全ての欠陥が確認できるが、 $\Delta x = 7$ mm においては $\phi = 1.0, 0.5$ (mm) の欠陥を確認することが困難である。 $f_c = 1$ MHz のとき $\lambda_c = 6.3$ mm 程度であることから、スキャンピッチが送信信号の中心周波数の波長 λ_c より小さいことが欠陥検出に必要な条件であると示唆される。以上より、角鋼片の欠陥検出においては以下の条件のとき欠陥検出可能と言える。すなわち、欠陥径が角鋼片寸法の 0.5–2% 程度、送信周波数の波長が角鋼片寸法の 1/20 程度、開口比が 1 程度、時間分解能が送信周波数の 1/50 倍以下であり、スキャンピッチが送信信号の中心周波数の波長以下のとき欠陥検出可能である。

なお、本解析系においてスキャンピッチを従来の設定である 2 mm から 5 mm にした場合、一辺あたりの計測点は 50 点から 20 点となり、全周における計測点の組み合わせ (${}_{4n}C_2 - 4_nC_2$) は 15,000 から 2,400 となるので、計測時間は約 84% 減少すると考えられる。以上の考察から、TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥検出においては、送信周波数が小さ

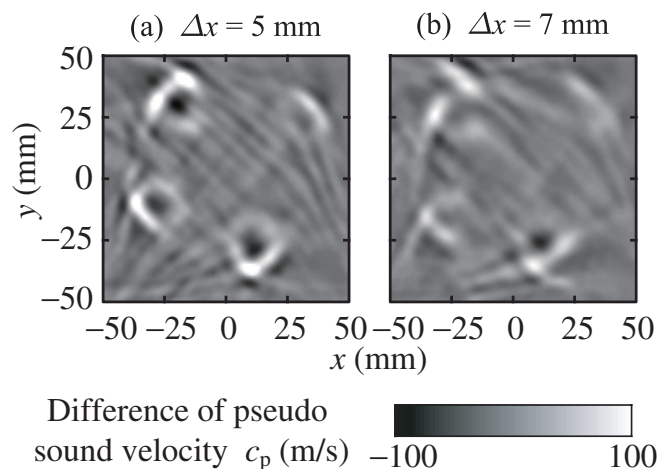


Fig. 3.7 異なるスキャンピッチによる再構成像

いほど欠陥検出が容易になり，スキャンピッチも大きくすることが可能である．現行法のパルスエコー法では，欠陥検出のためにはより高い周波数を用いる必要があるが，本手法では低い周波数で微小欠陥を検出できることから，高減衰角鋼片の欠陥検出手法として期待が持てる．

3.4 むすび

TOF を用いる超音波 CT 法において，送信周波数と欠陥検出能力の関係を明らかにすることを目的とし，スキャンピッチおよび送信周波数の違いによる欠陥検出能力について波動伝搬シミュレーションを用いて検証した．その結果，本手法による欠陥検出においては，送信周波数が小さいほど欠陥の存在が可視化されやすくなることが分かった．これは，計測した TOF に欠陥からの散乱波の影響を含むためである．欠陥から少し離れたところを通る計測パスでは，欠陥からの散乱波を含んだ受信信号が受信される．可視化に用いる欠陥による TOF の変化量のデータは，受信信号の相互相関により算出する．そのため，欠陥周辺の計測パスの TOF データにも欠陥情報が含まれる．よって，欠陥情報を含む範囲は相互相関ピーク幅に依存するため，送信信号波長が長いほうが，可視化像内の欠陥は膨張し，欠陥検出が容易になることが分かった．結果として，スキャンピッチを送信信号の中心周波数における波長以下に設定することで，欠陥検出可能であることが示唆された．現行法のパルスエコー法では，欠陥検出のためにはより高い周波数を用いる必要があるが，本手法では低い周波数で微小欠陥を検出できることから，高減衰角鋼片の欠陥検出手法として期待が持てる．

第 4 章

内部減衰の欠陥可視化への影響

4.1 はじめに

TOF を用いる超音波 CT 法を高減衰材の欠陥検出に適用する際に関係する特徴はさらに二つある。一つ目は透過波を受信するため、到達時間が既知の受信強度が安定した信号を取得できること。二つ目は、1つの送信点に対して多くの受信点を設定できるため多くのデータを取得できることである。本章では、この2つの点に着目して従来法であるパルスエコー法との比較を行いながら、高減衰材の非破壊検査に対する提案手法の有効性について検討を行う。

まず、減衰率と欠陥位置の変化による受信強度の変化を、反射法および透過法で比較し、反射法では計測できない領域を検討する。パルスエコー法では、振幅情報により欠陥の有無を判別するが、TOF を用いる方法では受信信号から取得した時間情報により欠陥の有無を判別するため、振幅のみの比較で欠陥検出能力の比較を行うことはできない。そこで次に、TOF の計算を行い、時間情報の計測精度を検討し、さらに、TOF 計測誤差が CT 像の欠陥可視化に与える影響を検討して、提案手法の有効性を考察する。

4.2 角鋼片における内部減衰

超音波が媒質中を伝搬する際に、伝搬距離が長くなるに従って音圧が小さくなっていくことを減衰と言い⁶¹⁾、次のような原因が挙げられる。

- (1) 波面が広がるための拡散減衰
- (2) 結晶粒界および組織境界による散乱減衰
- (3) 粘性減衰
- (4) 転移の運動による減衰

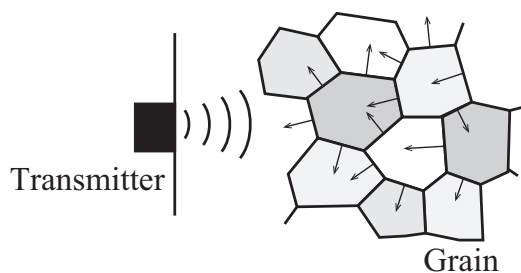


Fig. 4.1 結晶粒界における超音波散乱

(5) 強磁性材料における磁壁の運動による減衰

(6) 残留応力に基づく音場の乱れによる見かけ上の減衰

角鋼片中では、(3)–(6) はほとんど無視できるほど小さい。(1) 拡散減衰は、超音波の波頭面が広がることで進行方向以外にエネルギーが散逸していくことによる減衰である。角鋼片の探傷では有限の開口径を有するトランスデューサを用いて信号を送信しており、送信器から十分に遠いところ（遠方場）では、指向角と呼ばれる一定の角度で広がって伝搬する。ビームの中心軸上の音圧は距離に反比例して変化していく。拡散減衰は金属内部の減衰の大きな要因である。(2) 散乱減衰は、超音波が金属内を伝搬するとき、Fig. 4.1 に示すように、結晶粒界や微小な空隙で散乱反射して、音圧は伝搬距離の増加に従って小さくなる減衰である。金属内部では、(1) とともに散乱減衰が超音波の減衰の主原因になる場合が多い。伝搬距離 x に対し、超音波の音圧 P_x は以下のように指数関数的に低下する。

$$P_x = P_0 \exp(-\alpha x), \quad (4.1)$$

超音波の波長 λ と結晶粒の大きさ d の関係でこれらを整理すると、減衰係数 α は、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \alpha &= Ad^3 f^4 & (\lambda \gg d) & \text{Reyleigh 散乱} \\ \alpha &= Bd/f^2 & (\lambda = d) & \text{Stochastic 散乱} \\ \alpha &= C/d & (\lambda < d) & \text{拡散散乱} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ただし、 f は周波数、 A, B, C は定数である。通常金属材料の場合 $\lambda > d$ を満足するので、周波数が高くなるほど、また結晶粒の大きさが大きくなるほど減衰係数は大きくなる傾向がある。角鋼片内部の超音波減衰の要因としては(1) 拡散減衰と(2) 散乱減衰が支配的であり、本研究においては拡散減衰と散乱減衰を内部減衰として扱う。

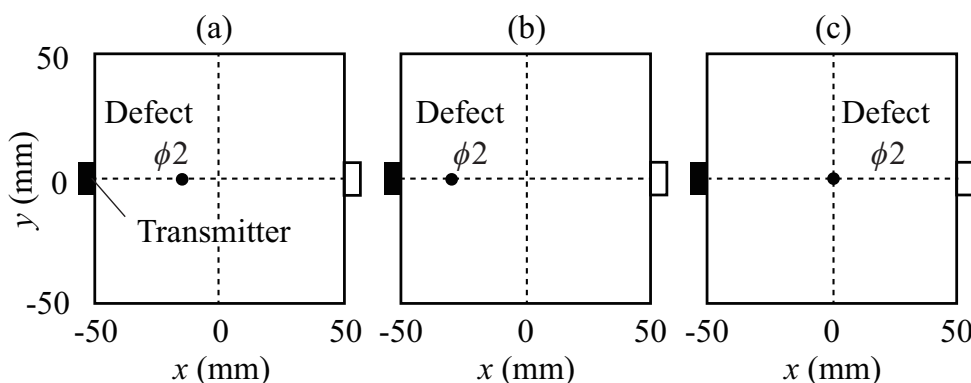


Fig. 4.2 数値シミュレーションにおける欠陥配置

4.3 内部減衰を考慮した数値シミュレーション

4.3.1 解析条件

Figure 4.2 に解析条件を示す．試験片は鉄鋼とし，縦波音速を 5,950 m/s とする．断面の大きさは 100×100 (mm²) とし，計測面には $(x, y) = (-15, 0)$, $(-30, 0)$, $(0, 0)$ (mm) の位置にそれぞれ直径 $\phi = 2.0$ mm の欠陥を配置する．Figure 4.2(a) は 4.3.2 項で用い，Fig. 4.2(b), (c) は 4.3.3 項で用いる．トランスデューサの開口径は 5 mm とし，送信信号は 1 – 3 (MHz) のアップチャープ信号とする．金属内の減衰の主な要因はビームの拡散と結晶粒界等における散乱である．波動伝搬シミュレーションを用いることで拡散減衰は考慮することができるが，散乱減衰の影響は考慮されない．そこで，Eq. 4.1 にならい，受信信号 P を以下の式から求める．

$$P = P_0(t)\exp(-\alpha_s ct), \quad (4.3)$$

ただし， P_0 は波動伝搬シミュレーションで得た受信信号， α_s は散乱減衰による減衰率， c は縦波音速， t は時間とする．散乱減衰係数 α_s は 0, 3, 6 (dB/cm) とする．また，シミュレーションで得られた受信信号に対して，実験環境を模したノイズ ($\alpha_s = 0$ dB/cm のとき送受信器が正対するパスでの SN が 35 dB となるホワイトガウスノイズ) を付加する．

4.3.2 内部減衰の受信信号への影響

数値シミュレーションにより得られた反射波と透過波を Fig. 4.3 に示す．Figure 4.3(A) は，欠陥位置が $(x, y) = (-15, 0)$ mm の位置のときの波形である．このとき，Fig. 4.3(a-A-iii) よ

り、欠陥エコーがノイズに埋もれて検出困難となっている。すなわち、この条件において、欠陥が $(x, y) = (-15, 0)$ mm より内部に存在する場合はパルスエコー法では欠陥検出困難といえる。(実際に生産現場で行われる欠陥検出では、ノイズレベルの 2 倍以上にゲート (閾値) を設定しており、この条件よりも検出は厳しくなる。) ただ、TOF を用いる CT 法においては、振幅の大きさではなく TOF の計測精度が欠陥検出に左右するため、振幅のみで有効性を判断することはできない。Figure 4.3(b-A-iii) を見ると、11 μ s 付近に透過波が確認できる。また、Fig. 4.3(a-B-iii) および Fig. 4.3(b-B-iii) より、送信器と欠陥までの距離が小さい場合、欠陥エコーは透過波よりも大きいことが確認できる。すなわち、表面に近い欠陥に対してはパルスエコー法による計測が可能と言える。

4.3.3 内部減衰の TOF 計測精度への影響

次に、パルスエコー法では計測困難な領域内 $(x, y) = (0, 0)$ mm に欠陥が存在するときに、TOF を用いる CT 法による欠陥検出の可否を検討する。まず、TOF の計算を行い、時間情報の計測精度を検討する。計算条件は先述の条件と同様とする。送信信号は、1–3 (MHz) に掃引したチャープ信号 10 波とする。また、TOF は一つの送信点に対し複数の受信点での計測が可能である。ここでは送信器のある面以外の 3 面において 2 mm 間隔で受信するものとする。このような条件で、散乱減衰係数 $\alpha_s = 0, 3, 6$ (dB/cm) としたときの TOF を算出した。結果を Fig. 4.4 に示す。Figure 4.4 の縦軸は欠陥による TOF の変化量であり、欠陥の無い参照面と欠陥のある計測面での受信信号同士の相互相関を取ることにより、欠陥による TOF の変化量を求めている。Figure 4.4 の横軸は、受信器の位置を示している。Figure 4.4 より、散乱減衰係数 α_s が大きくなるにつれて、TOF の計測誤差が増えていることが確認できる。特に、Fig. 4.4(iii) では、TOF 計測誤差の大きさが大きく、欠陥情報との区別が難しい。このことから、高減衰角鋼片においては、欠陥による TOF 変化は計測できているものの、TOF 計測誤差の大きさが大きく欠陥情報が埋もれる場合があると言える。

4.3.4 内部減衰の可視化像への影響

次に、TOF 計測誤差が CT 像の欠陥可視化に与える影響について検討する。計算条件は前項と同様とする。全周に 2 mm 間隔で計測点を設定し、全てのパスの TOF を求めて、CT 法により再構成を行う。

結果を Fig. 4.5(上段) に示す。CT 像は見かけ上の音速の変化量の分布である。また、Fig. 4.5(下段) は見かけ上の音速変化 $c_p(x, y)$ の最小値を y 方向に投影したもの $c_m(x) =$

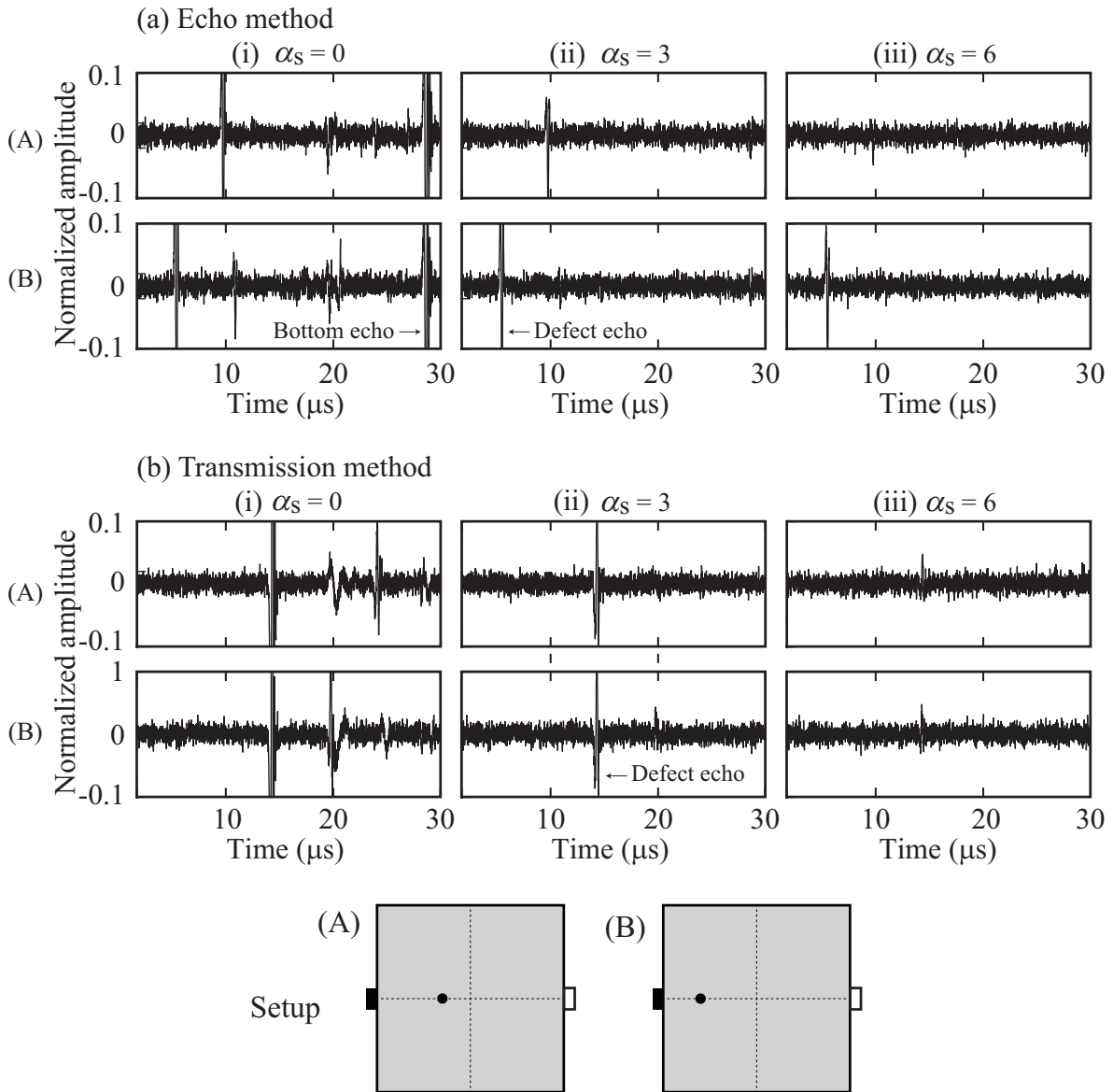


Fig. 4.3 異なる減衰率による受信信号

$\min(c_p(x,y))$ である。Figure. 4.5(i)-7(iii) は散乱減衰係数 $\alpha_s = 0, 3, 6(\text{dB}/\text{cm})$ のときの結果であるが、 α_s が大きくなるにつれて欠陥以外のアーチファクトが多くなることが確認できる。このアーチファクトはノイズの影響による TOF 計測誤差によるものと考えられる。先述の Fig. 4.4 では欠陥情報と誤差との区別が困難であった $\alpha_s = 6 \text{ dB}/\text{cm}$ においても、CT 像において強いアーチファクトが発生しているものの欠陥位置に音速低下を確認することができる。Figure. 4.5(iii) 下段より、欠陥位置での音速低下を下回るアーチファクトは発生して

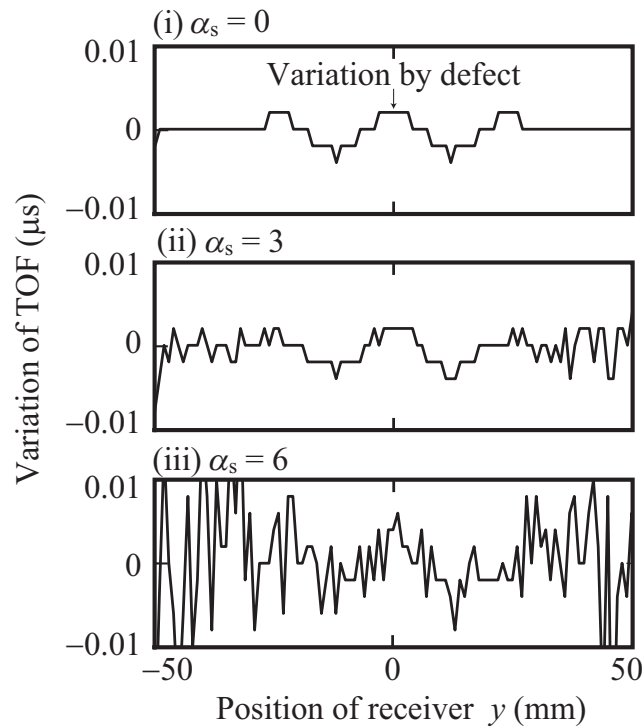


Fig. 4.4 異なる減衰率による TOF の変化量 τ_{mr}

おらず、欠陥検出の可能性を示唆している。これは、全周計測により多くの TOF（ここでは 15,000 パス）を用いて CT 法により再構成することで、計測誤差の影響を軽減できたためと考えられる。これらのシミュレーション結果より、パルスエコー法では散乱減衰が大きいため計測が困難となる場合においても、TOF を用いる CT 法では高い受信強度と多くの計測データを用いることによるアベレージング効果が有効に働き、欠陥検出が可能となること示唆した。

4.4 高減衰角鋼片の探傷実験

次に、内部減衰の異なる 3 つの試験片（ジュラルミン、炭素鋼鋳鋼およびオーステナイト系ステンレス鋳鋼）を用いて探傷実験を行う。パルスエコー法で得られる B モード像と TOF を用いる超音波 CT 法による CT 像との比較を行うことで、TOF を用いる超音波 CT 法の有効性を検証する。

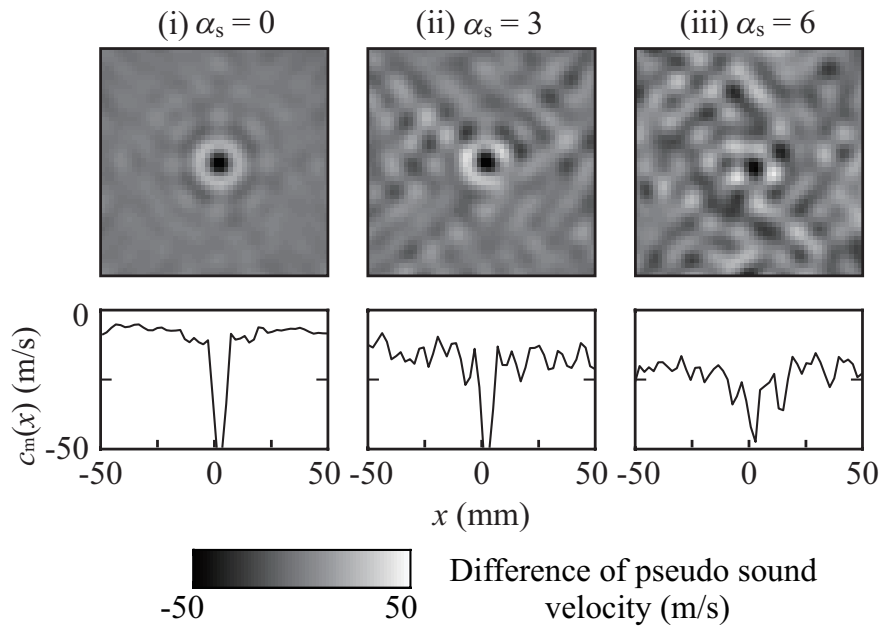


Fig. 4.5 異なる減衰率による可視化像

4.4.1 実験条件

Figure 4.6 に実験系を示す。試験片は、ジュラルミン、炭素鋼鋳鋼およびオーステナイト系ステンレス鋳鋼であり、それぞれ 100×100 (mm²) の正方形断面を持つ。ジュラルミンおよび、炭素鋼鋳鋼は $(x, y) = (0, 0)$ (mm) の位置に直径 $\phi = 2.0$ mm の欠陥、ステンレス鋳鋼は $(x, y) = (-10, 30)$ (mm) の位置に直径 $\phi = 8.0$ mm の欠陥を含んでいる。開口径 5 mm の送受信トランスデューサ (Japan Probe, IW B2C5I 2 MHz) を 2 mm 間隔で走査させて TOF 計測を行う。送信信号は、1 – 3 (MHz) に掃引したチャープ信号 10 波とする。FG(33120A, Agilent) から出力された信号は高周波アンプ (NF Corp., HSA4101) で増幅され、送波器から送信される。透過法では受信側トランスデューサに到着した信号を受信信号とする。エコー法では、送信器で得られる信号をダイプレクサ (RITEC, RDX-6) を通過した信号を受信信号とする。これらの受信信号は、ディジタイザ (National Instruments, USB-5133) によりサンプリング周波数 100 MHz で取得され PC へ送られる。

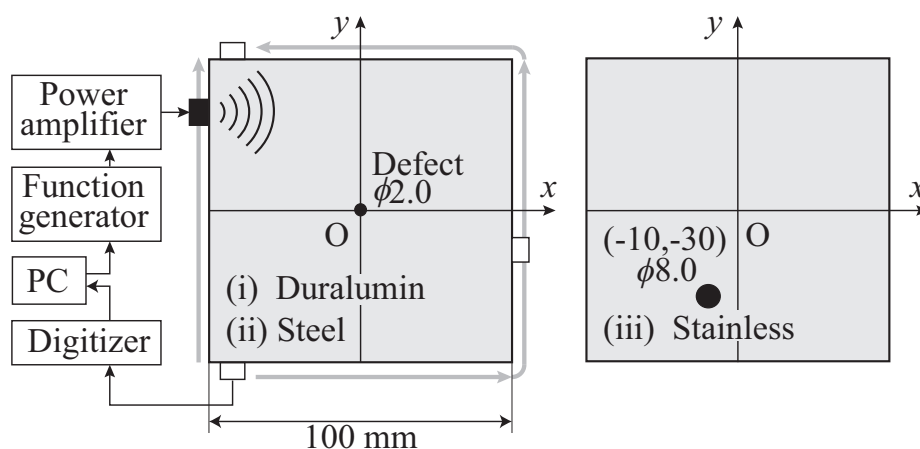


Fig. 4.6 実験条件

4.4.2 実験結果

Figure 4.7 に実験結果を示す． Figure 4.7(i)–(iii) は，ジュラルミン，炭素鋼，ステンレス鋼の結果を表している． Figure 4.7(a), (b) はパルスエコー法による受信信号および B モード像を示しており， Fig. 4.7(c) は TOF を用いる超音波 CT 法による CT 像を表している． Figure 4.7(a-i) より，ジュラルミン片内では底面エコーおよび欠陥エコーがはっきりと確認でき，内部減衰が小さいことが分かる．一方， Fig. 4.7(a-iii) では，林状エコーが多く含まれ，底面エコーおよび欠陥エコーが確認できない．このことから，ステンレス鋼は結晶粒径が大きく，内部減衰が大きいことが分かる． Figure 4.7(b) より，ジュラルミンおよび炭素鋼では，B モード像内に欠陥エコーが含まれ，欠陥の存在を確認できる．一方，ステンレス鋼では底面エコーおよび欠陥エコーともに確認できない．しかしながら， Fig. 4.7(c) より，TOF を用いる超音波 CT 法では，いずれの試験片においても欠陥位置における音速低下が確認できる．ただ，炭素鋼やステンレス鋼においては，CT 像内にアーチファクトが見られ，誤検出（欠陥がないのに「ある」となる）の恐れがある．誤検出は生産効率を落とすため，改善の余地があり，今後，信号処理の改善等により CT 像内のアーチファクトを軽減していく必要がある．

パルスエコー法と提案手法の定量的な比較については，パルスエコー法と提案手法では，好ましいパラメータが異なり（例えば，パルスエコー法ではビームが絞られる探触子と送信周波数の組み合わせが望ましいが，TOF を用いる CT 法では指向性が広いほうが望ましいなど），

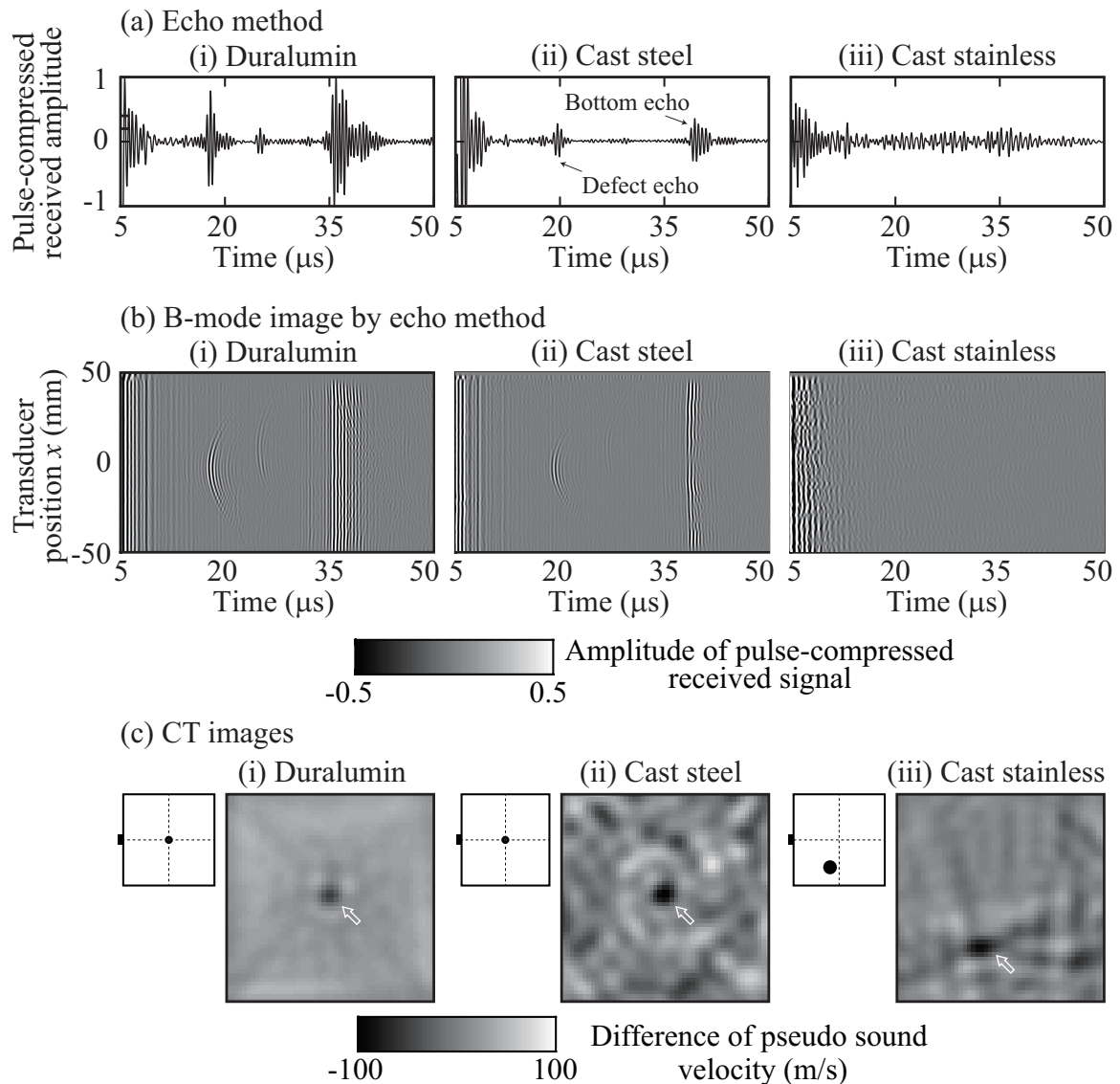


Fig. 4.7 減衰率の異なる試験片による実験結果

両手法にとって公平な定量的比較が困難である。そのため、シミュレーションでは、設定した条件において、パルスエコー法では計測困難な減衰率のときに TOF を用いる CT 法で欠陥可視化が可能かどうかを比較の方法とし、実験では、パルスエコー法では計測困難な高減衰試験片の中心付近の欠陥に対して、TOF を用いる CT 法で欠陥可視化が可能かどうかを検討し、本手法の有効性を示した。なお、この結果はパルスエコー法を全否定するものではなく、パルスエコー法の得意とする部分と TOF を用いる CT 法の得意とする部分が異なっているので、相互に補完することができる可能性があると考えられる。

4.5 むすび

本章では、高減衰材の欠陥検出における TOF を用いる超音波 CT 法の有効性について数値解析および実験により検討した。従来法であるパルスエコー法ではステンレス鋳鋼内の欠陥検出は困難であったが、TOF を用いる CT 法により欠陥の可視化を行うことができた。この結果から、これまで困難とされてきた高減衰角鋼片への超音波探傷が、透過法による TOF を用いる CT 法を適用することで可能であることを示した。

第 5 章

同時送信による計測高速化

5.1 はじめに

前章までの TOF を用いる超音波 CT 法では 1 断面の検査に 15,000 回の TOF 計測および送受信器の走査を行っており、1 断面の計測に 10 時間を要している。角鋼片は全数検査の必要があり、現在、製鉄所内でのオンライン計測では約 40 m/分の探傷速度の自動超音波探傷装置が使われている¹²⁾。すなわち、TOF を用いる超音波 CT 法で同程度の探傷速度にするには、1 断面あたり数 ms のオーダーで検査をしなければならない。また、連続鋳造の高速化技術が進歩していく中で、検査速度の高速化も求められていく。TOF を用いる超音波 CT 法を実用化するには、計測時間の短縮が必須である。

TOF 計測の高速化には、複数の探触子を角鋼片周上に配列するアレイ化が有効である。アレイ化技術は角鋼片の非破壊検査において一般的な技術であり、従来法のパルスエコー法にも用いられている。Figure 1.2 に示した製鉄所における自動超音波探傷装置にも、アレイ化技術は使われている。探触子アレイを用いることにより送受信器の走査に要する時間を短縮できるため、TOF 計測を高速化することができる。しかしながら、アレイ化だけでは要求される数 ms のオーダーまで計測時間を短縮することができない。そこで、本章では通信分野では用いられている多元接続技術を応用し、符号変調信号による同時送受信を行い TOF 計測の高速化を図る。まず、通信分野における多元接続技術について述べた後、本研究に応用し、複数信号同時送信による縦波伝搬時間の計測方法を提案する。提案手法の複数信号同時送信において最も重要な送信信号について検討し、角鋼片内部の TOF 計測に適した信号を選定する。そして実際に、選定した信号を用いて探傷実験を行い、同時送受信による計測時間の短縮の可能性を検証し、欠陥検出能力について検討する。

5.2 スペクトラム拡散による信号の同時送信

現代社会に広く普及している携帯電話端末では、複数の人が同時に通話している状態にあっても、特定の通話相手以外の音声と混信することなく、通話相手のみの音声を聞くことができる。これは、共通のチャンネルを多数のユーザで共有する符号分割多元接続 (Code division multiple access: CDMA) 等、多元接続のための技術を採用しているためである⁶²⁾。CDMA 方式の一つに、ユーザ毎に割り当てられた固有のコード (拡散符号) と送信データを乗算することで、信号の周波数を広帯域に拡散する直接スペクトラム拡散方式がある。直接スペクトラム拡散方式の主な特徴として、以下の 6 つが挙げられる⁶²⁾。

- 1) 秘話性：送信データのスペクトルを拡散符号を用いて拡散するので、第三者が受信しても拡散符号が分からなければ解読が困難。
- 2) 耐妨害性：狭帯域の雑音の影響を受けづらい。
- 3) 条件の悪い伝送路に強い。
- 4) 拡散符号の数だけ多元接続が可能。
- 5) 接続するユーザ数が設計値を超えても、通信品質が若干下がるだけで急激な過負荷を生じない。
- 6) 遅延時間測定における時間分解能が良く、測距に適している。

これらの特長は本研究における TOF の同時計測にも活かすことができる。複数の送信器から固有の拡散符号を乗じた信号を送信し、受信器は拡散符号を用いて各送信器から送信された信号の伝搬時間 (複数経路の TOF) を同時に計測できると考えられる。通信技術における CDMA では離散化されたシンボルの判別を目的としている。一方で、TOF 計測はシンボルではなく時間情報を抽出する必要があるため、計測環境が計測精度に与える影響について検討する必要がある。

5.3 同時送信による TOF 計測法

前節の特徴を踏まえて本節では、通信技術における CDMA を応用した、角鋼片内部の TOF 同時計測手法を提案する⁶³⁾。Figure 5.1(a), (b) に同時送受信時における参照面と計測面をそれぞれ示す。参照面は逐次更新しないある固定の一断面とする。参照面において送信信号 $s_l(t)$ を単一で送信したときの受信信号を $r_k(t)$ とし、予め検査の前に計測しておく。一方、計測面において N 個の送信信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)$ を同時送信したとき得られる受信信号は $m_k(t) = s_1(t) + s_2(t) + \dots + s_N(t)$ である。 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)$ がそれぞれ無相関であ

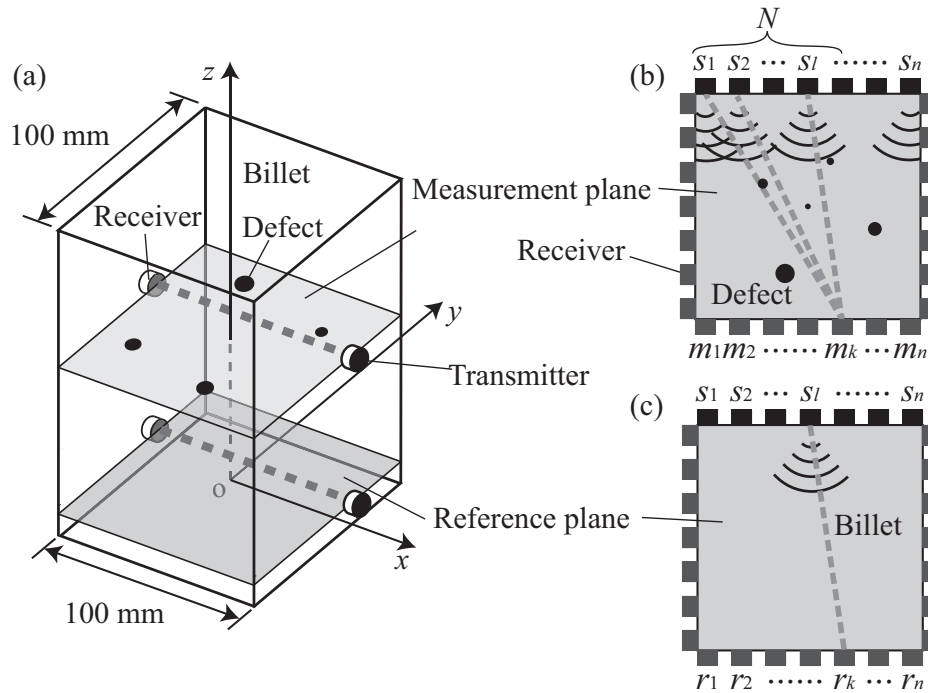


Fig. 5.1 同時送受信における計測系

るとき、 $m_k(t)$ と $r_l(t)$ の相互相関を取ることにより各伝搬経路における欠陥による TOF 増加分 τ_{kl} が求まる．これまで送信信号にチャープ波を用いていたが，同時送受信においては Gold 系列により位相変調した信号を用いることで，信号ごとに独立してパルス圧縮することが可能となる．

5.3.1 同時送信に用いる送信信号

同時送受信において送信信号の選定は最も重要である．同時送受信を行うためには，符号変調などを用いる複数の独立した信号が必要となる．符号変調された信号を送信し受信器で符号系列を相関処理することで時間方向へ信号をパルス圧縮するためである．角鋼片の非破壊検査の同時送受信に符号変調信号を用いる場合，送信点が多く，多数の異なる符号を必要とするため符号長が長くなり，それに伴い送信信号長が長くなる．よって，角鋼片側面からの反射波をも受信することとなる．反射波を含んだ受信信号を用いて相互相関法により TOF を算出すると，TOF の計測誤差が生じやすくなる．これらを考慮して送信信号の選定を行う．

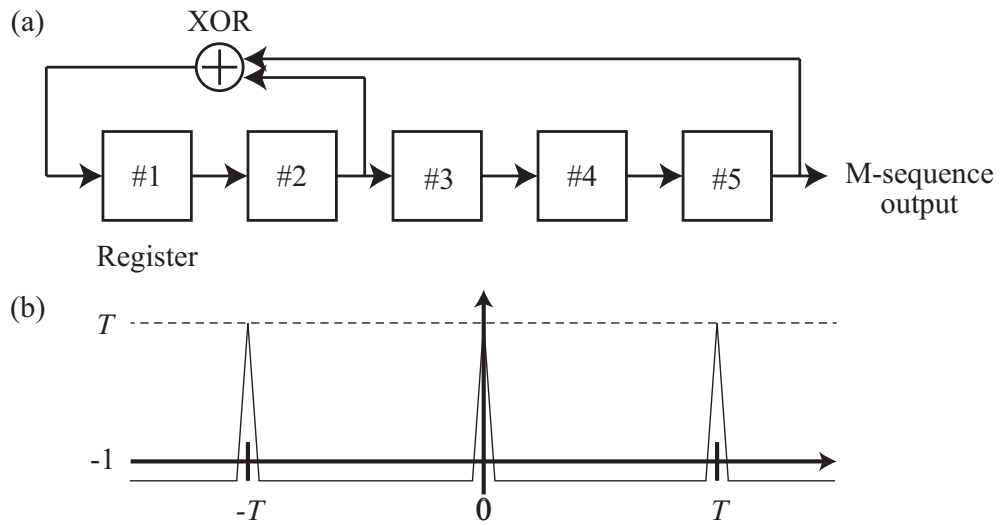


Fig. 5.2 M 系列生成のための線形帰還シフトレジスタと M 系列の周期相互相関関数

5.3.2 変調符号

符号変調に用いる変調系列について検討する．複数の独立した信号を生成するには，疑似雑音 (PN) 符号を用いる．PN 符号とは，自己相関関数が 2 レベルの値だけを取り，かつ，1 周期中の 0 と 1 の個数が高々一つだけしか異ならない周期系列である⁶²⁾．

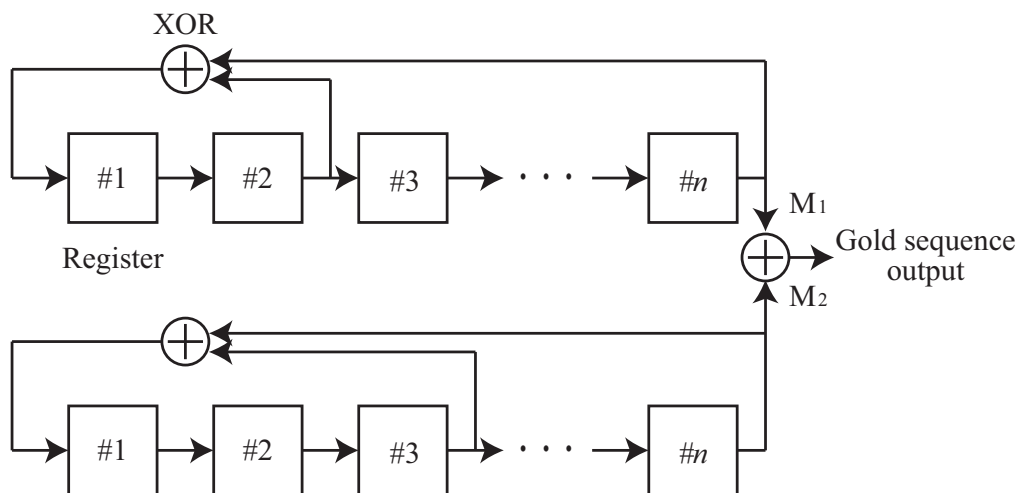


Fig. 5.3 Gold 系列の生成

最も代表的な PN 符号として、最大周期シフトレジスタ (Maximum length shift register) 系列が知られ、M 系列と呼ばれている。M 系列は Fig. 5.2(a) に示す排他的論理和による帰還タップを持つ線形帰還シフトレジスタに全ゼロ以外の初期値を与えることにより生成される周期系列である。特定の少数の組合せの帰還タップを使った場合にのみ取り出されるデータ系列は周期 $T = 2^n - 1$ になり、M 系列となる。Figure 5.2(a) は 5 段のシフトレジスタを用い帰還タップを (5, 2) の位置に持つ M 系列発生器であり、初期値を (11111) としたときに生成される周期 31 ビットの M 系列は、(1111100110100100001010111011000) となる。このようにして生成した M 系列にはランダム性、優れた自己相関等の特徴がある。

さて、PN 符号を同時計測の送信信号に用いるとき、その相互相関による誤検出を最小限に抑えるために、低い相互相関値を取る PN 符号の組合せを選ぶ必要がある。このような組合せをプリファードペアと呼ぶ。しかし、M 系列にはプリファードペアとなる系列の種類が少ない。そこで、Gold 系列を用いる。Gold 系列は、一組の M 系列のプリファードペアから得られる低い相互相関値の PN 符号である^{64,65)}。二つの同じ長さの M 系列 M_1, M_2 に対して、ビットごとに加算して得た系列で、その長さはもともになる系列の長さと同じ長さである。Figure 5.3 に Gold 系列発生器を示す。Gold 系列発生器の一方の M 系列 (例えば M_1) を固定し、他方の M 系列 (例えば M_2) の初期状態を $2^n - 1$ 通りに変化させ排他的論理和を取ることによって、Gold 系列を生成する。従って、二つの M 系列発生器間の系列位相差によって、 $2^n - 1$ 通りの系列を生成できる。M 系列に比べ数多くの PN 系列を作れることが Gold 系列の特徴であり、角鋼片の非破壊検査における同時送信にも適している。

また、Gold 系列は自己相関が高く、異なる符号間での相互相関が小さいという特徴があり、相互相関法により TOF を算出する本欠陥検出手法に対し有効な系列である。本研究では Gold 系列を生成し得る最小次の 5 次 Gold 系列 (1 周期あたり 31 ビット) を用いる。

5.3.3 被変調信号

超音波イメージングにおいては周波数を高くすることで高分解能を得ようとするが、TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥検出においては周波数を高くする必要はない。むしろ周波数が低いとき欠陥による散乱波と欠陥付近を通る直達波の干渉作用により、CT 像においては欠陥の存在が誇張されることとなり欠陥検出は容易となる。本論文で用いている実験系においては送信周波数 1–2 MHz 程度で欠陥検出が可能であることを第 3 章にて示している。また、同時送受信における位相変調信号では符号 1 ビットあたりに数波の正弦波を割り当てることが多い。しかしながら、角鋼片における同時送受信の場合、角鋼片側面からの反射波が生じ TOF 計測に悪影響を及ぼすため、符号 1 ビットあたりの波数を多くすぎても欠陥検出に支障を

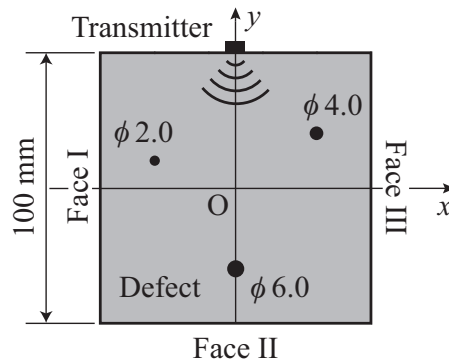


Fig. 5.4 解析条件

来す.

そこで、基底周波数を 1, 2 (MHz) としたときの 1 ビットあたりに割り当てる波数 η について数値シミュレーションにより検討する. 解析面を Fig. 5.4 に示す. 試験片は 100×100 (mm^2) の正方形断面を持つジュラルミン (縦波音速 $c = 6,320$ (m/s)) とし、直径 2.0, 4.0, 6.0 (mm) の欠陥をそれぞれ $(x, y) = (-30, 10), (30, 20), (0, -30)$ (mm) の位置に配置している. 送信器を上辺中央に配置し、Face I, II, III 上に 1 mm 間隔で配置した受信器で受信する. 送信信号は Gold 系列により位相変調した信号とし、被変調信号を $\eta = 0.5, 1, 2, 3$ の正弦波と変化させる. ただし、 η は符号 1 ビットあたりに割り当てる正弦波の波数である. $\eta = 0.5$ のときは正弦パルスである. 角鋼片内の波動伝搬シミュレーションには TLM 法を用い、計算に用いるパラメータは第 3.2 節と同様とする. このとき各受信点で得られた受信波形と送信波形から参照面を用いる相互相関法により TOF 変化量 τ_{mr} を算出する.

Figure 5.5 に得られた結果を示す. 横軸は受信器の位置を、縦軸は TOF 変化量 τ_{mr} を表しており、Figs. 5.5(a)–(d), (e)–(h) はそれぞれ $f_c = 1, 2$ MHz のときの、Figs. 5.5(a)(e), (b)(f), (c)(g), (d)(h) はそれぞれ被変調信号が $\eta = 0.5, 1, 2, 3$ の正弦波のときの結果を表している. また、灰色の範囲は欠陥により TOF が影響を受ける範囲を表している. Figure 5.5 より、 $f_c = 1, 2$ MHz とともに、 η が大きくなるにつれ τ_{mr} 計測誤差が大きくなり、欠陥情報が埋もれている. これは信号長が長くなることにより、受信信号に反射波を多く含み相互相関ピークがずれ、 τ_{mr} に誤差が生じているものと考えられる.

ここで反射波の影響について検討するために、先述の数値シミュレーション条件において角鋼片の境界を無反射境界として同様に τ_{mr} を算出した. Figure 5.6 に $f_c = 2$ MHz, $\eta = 5$ のときの結果を示す. Figure 5.6(a) は反射境界のとき Fig. 5.6(b) は無反射境界における結果である. Figure 5.6 より、無反射境界のとき TOF の計測誤差はほとんどなく、欠陥情報がはっ

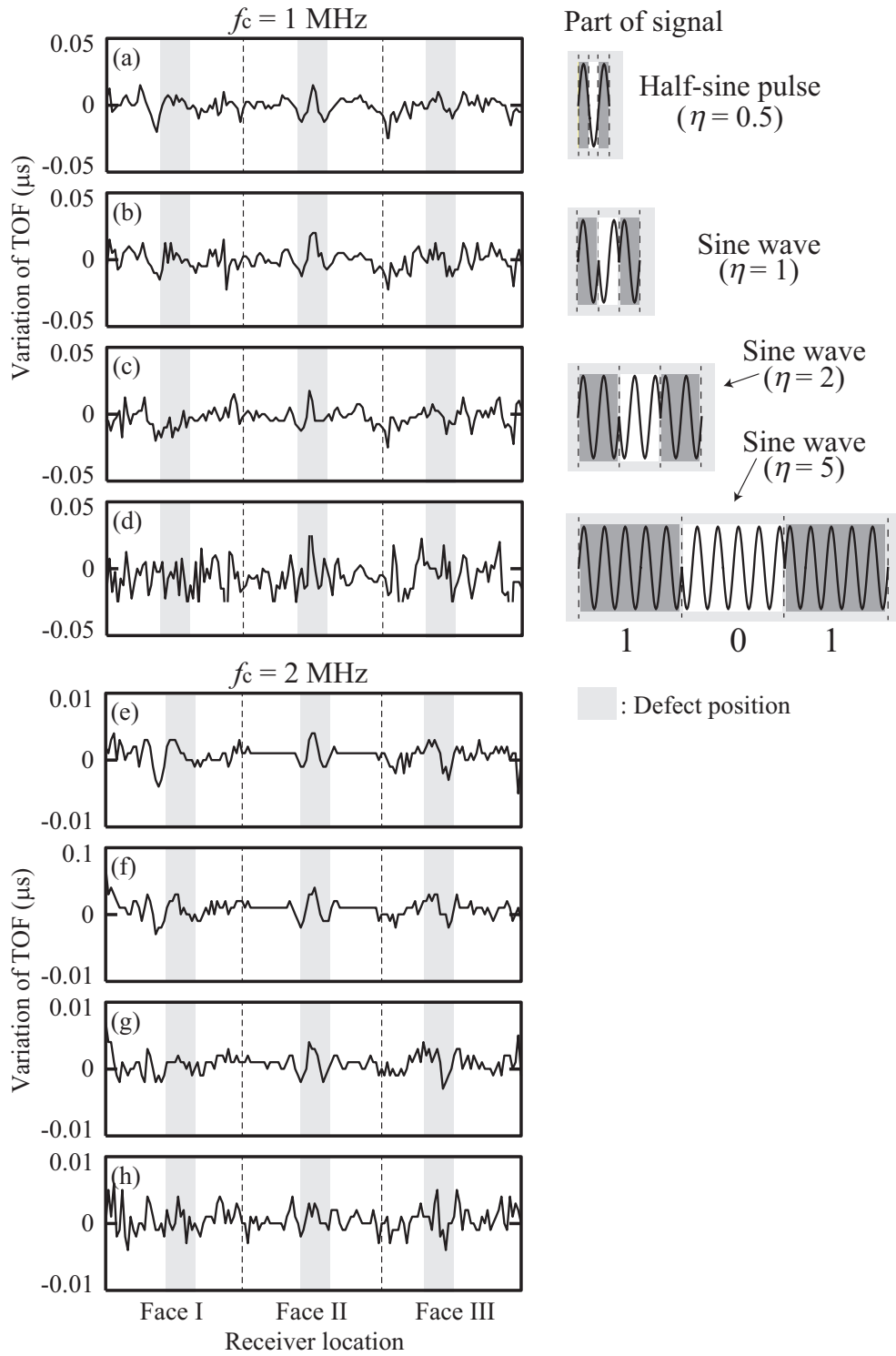


Fig. 5.5 TOF 変化量 τ_{mr}

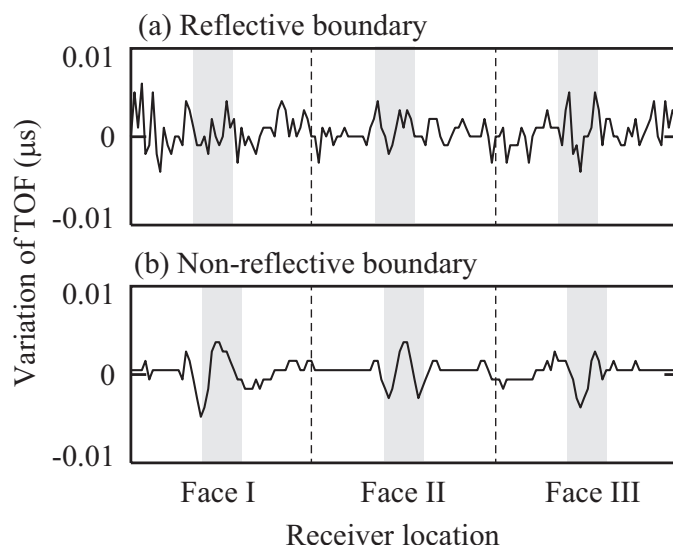


Fig. 5.6 無反射境界条件における TOF 変化量 τ_{mr}

きり確認できる．このことから反射波は TOF 計測誤差発生の主因であることが分かる．また Fig. 5.5 より， $f_c = 1$ MHz と 2 MHz では 1 MHz のときのほうが計測誤差が大きくなっていることが分かる．さらに，Figs. 5.5(a) と (b) や Figs. 5.5(e) と (f) では信号長が同じであるが，どちらも 1 MHz のときのほうが TOF の計測誤差がわずかに大きい．このことから，信号長が同じであっても送信周波数が異なる場合，TOF 計測精度が異なることが分かる．これは，周波数が低いとき，TOF 算出時の相関ピークが鈍るためであると考えられる．

以上より，角鋼片の欠陥検出時の同時計測に用いる送信信号は，信号長を短かくする必要があり，また，周波数は低すぎないことが必要である．第 3 章において，TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥検出には 1–2 (MHz) 程度の送信周波数が適していることを示したが，同時計測においては，本章の実験系においては 2 MHz の正弦パルスを Gold 系列で位相変調した信号が適していること示唆された．

そこで，次節の実験では Fig. 5.7(a) に示す 2 MHz の正弦パルスを Gold 系列で位相変調した信号を用いる．なお，Figs. 5.7(b)–(c) は送信信号の自己相関および異なる 2 つの送信信号の相互相関関数を表しており，自己相関ピークは高く，他の符号で変調した信号との相互相関は低いことが分かる．

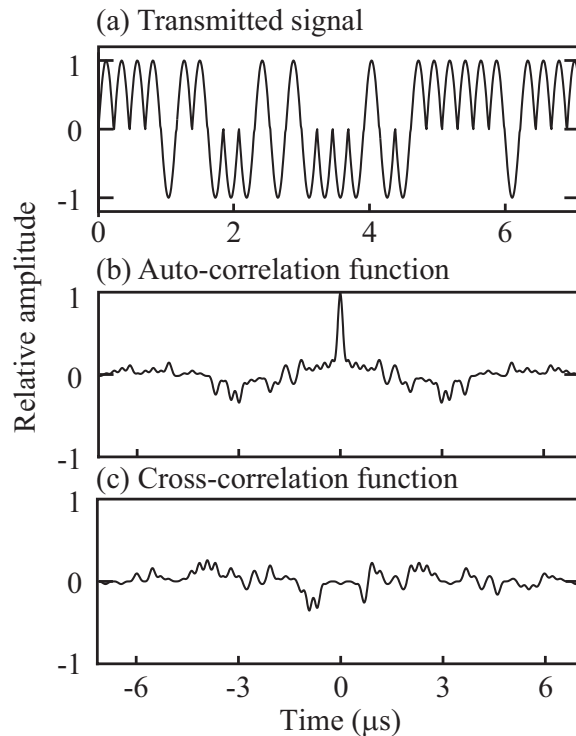


Fig. 5.7 送信信号（Gold 系列位相変調正弦パルス）と相関特性

5.4 同時送信による探傷実験

5.4.1 実験条件

Gold 系列位相変調信号を用いて同時送受信による探傷実験を行い、提案手法の計測時間短縮への有効性を確認し、同時送信可能な送信数を検証する。Figure 5.8 に実験系の概略図を示す。試験片はジュラルミン片であり、計測面における $(x, y) = (0, 0), (10, 20), (-20, 10), (30, -10)$, および $(-10, -30)$ (mm) にそれぞれ 2.0, 2.8, 4.0, 5.6, および 8.0 (mm) の欠陥を配置する。また、参照面には欠陥を配置しない。本実験では同時計測手法の有効性を検証するため、減衰の少ないジュラルミン片を用いる。それぞれの送信器に異なる符号で変調した信号を割り当てる。なお本論文では、装置の制約上、一对の送受信器により計測した信号を足し合わせたものを同時送受信による受信信号とみなす。計測に用いる装置は第 4.4 節と同様とする。このとき、 $f_c = 1$ MHz, $\eta = 0.5$ および $f_c = 2$ Hz, $\eta = 0.5, 1$, 同時送信数 $N = 1, 2, 5, 6, 10$ として TOF を計測し、超音波 CT 法により見

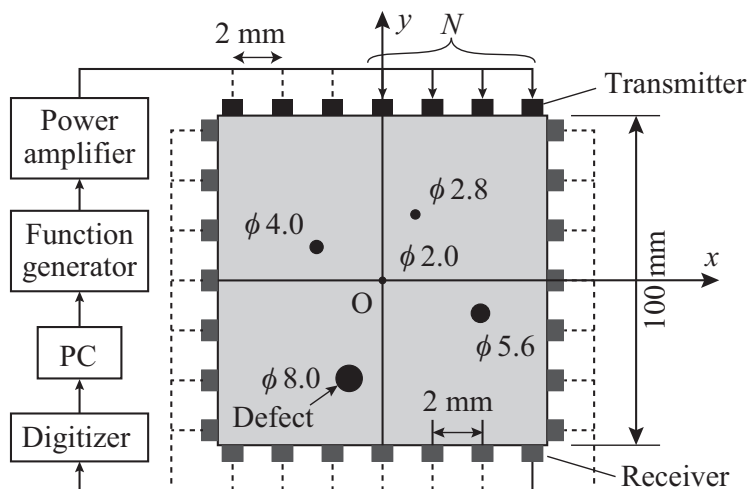


Fig. 5.8 同時計測における計測系

かけ上の音速分布を再構成した。

5.4.2 実験結果

Figure 5.9 に得られた結果を示す。Figure 5.9(a) は欠陥の配置を示しており、Figs. 5.9(b)–(j) は実験結果を示している。実験結果の上段は見かけ上の音速分布、中段は二値化像、下段は見かけ上の音速分布の最小値 $c_m(x)$ と二値化像のしきい値を示している。ただし、 $c_m(x) = \min(c_p(x, y))$ である。しきい値は、5 つの欠陥位置における C_m の最大値としている。Figures. 5.9(b)–(d), (e), (f)–(j) はそれぞれ $f_c = 1$ MHz, $\eta = 0.5$, $f_c = 2$ MHz, $\eta = 1$, $f_c = 2$ MHz, $\eta = 0.5$ のときの結果を表している。

Figs. 5.9(b) および (e) を比較すると、 $f_c = 2$ MHz, $\eta = 1$ のときは $N = 1$ においてもすべての欠陥を確認することが出来ていない。一方、同じ信号長である $f_c = 1$ MHz, $\eta = 0.5$ のときは、すべての欠陥位置において音速低下が確認できる。前節の数値シミュレーションでは、 $f_c = 2$ MHz, $\eta = 1$ のときのほうが TOF の計測誤差が少なかった。周波数が高いほうが波長が短く、欠陥周囲での散乱波の影響が小さくなり、欠陥による TOF の変化が小さいため、ノイズに埋もれやすい。実験ではノイズの影響を受けるため、 $f_c = 2$ MHz のほうが欠陥検出困難となったと考えられる。次に、Figs. 5.9(b)–(d) および (f)–(j) を見ると、いずれの周波数においても、 N が大きくなるにつれ CT 像上の欠陥が不鮮明になっていることが確認できる。Figure 5.9(b)–(d) では、 $N = 5$ のとき、欠陥による音速低下が小さく、CT 像内のノイズに埋もれて欠陥の有無を判別できなくなっている。Figure 5.9(f)–(j) より、 $f_c = 2$ MHz,

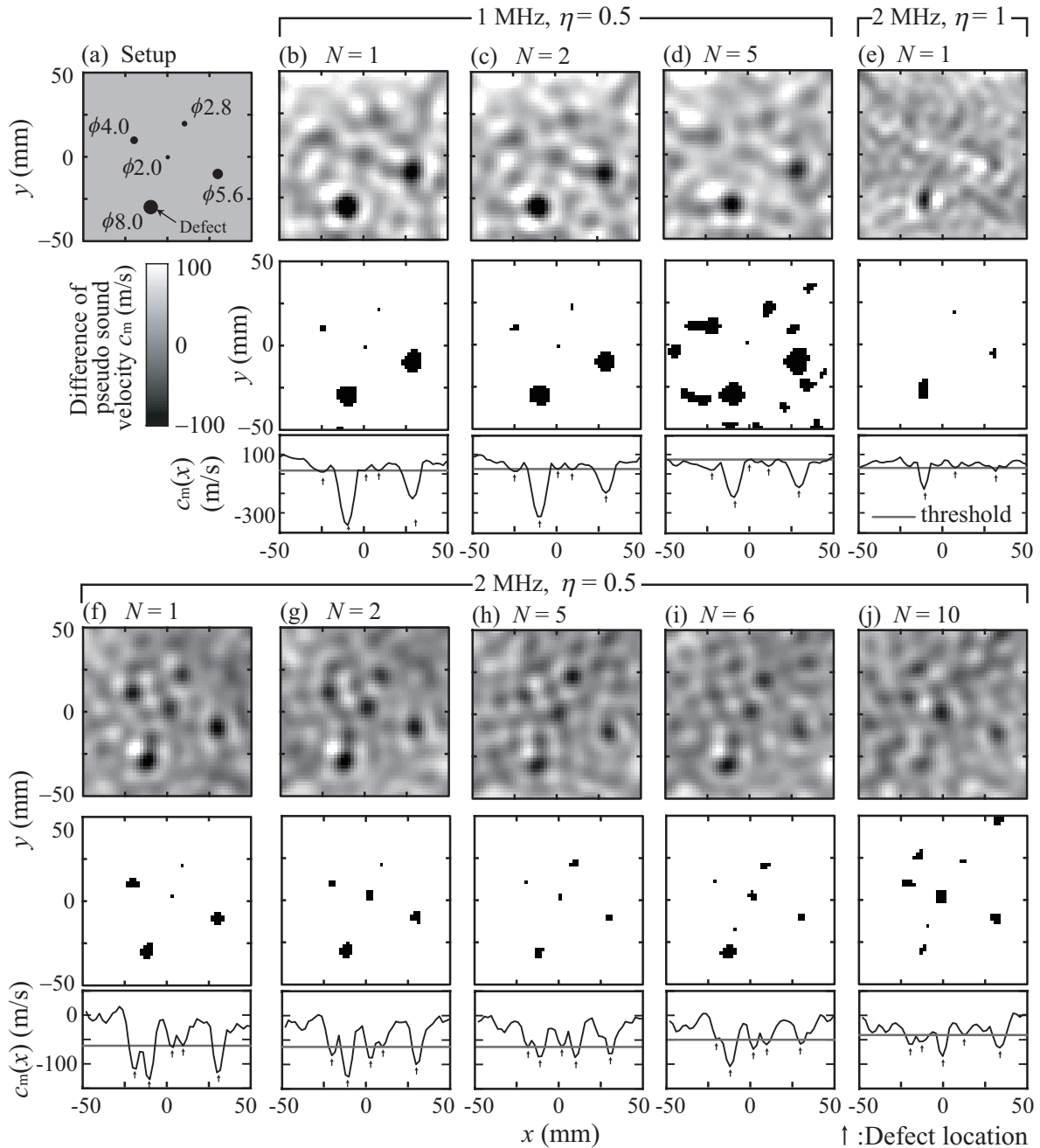


Fig. 5.9 同時送信数を変化させた時の再構成像および二値化像

$\eta = 0.5$ のとき、 $N = 5$ までは CT 像内のノイズによる妨害がなく欠陥位置の低下が見られるが、 $N = 6, 10$ のときはノイズによる音速低下が欠陥位置の音速低下を下回るため欠陥との区別がつきにくくなっている。しかしながら、 $N = 10$ においても欠陥位置での音速低下が見ら

れているため、今後の信号処理、画像処理により CT 像内のノイズを抑制することで欠陥検出できる可能性がある。

なお、同時送受信計測により得られた CT 像において見受けられる斑状のノイズは、超音波 CT 法を用いる際に作用させる周波数フィルタに起因する。本欠陥検出手法においては、第 2.4 節で述べたように、見かけ上の音速分布を再構成する際に空間周波数の高周波成分を減衰させるためにフィルタ関数を用いている。特に同時送受信の場合は受信信号の信号対干渉雑音比が悪化するため、TOF データに誤差を多く含む。この誤差の影響を抑制するためには従来よりカットオフ周波数を低く設定するほうがよい。これにより再構成像内に一様に分布するノイズの低周波成分が残り、CT 像内で斑状のノイズとなって現れる。

以上の結果から、実験により、提案手法である Gold 系列位相変調信号を用いる TOF 同時計測法が、計測時間の短縮に対して有効であることを示した。また、本実験系においては、5 個同時送信による TOF 計測により、欠陥判別が可能であることを確認した。

ここで、5 個同時送信を行った場合に短縮される計測時間について考察する。TOF 計測時間は信号送信時間、伝搬時間、減衰時間からなる。本章ではアレイ化を前提としているため、送受波器の走査に要する時間は無いものとする。まず信号送信時間は提案信号では $7.75 \mu\text{s}$ であり、従来の計測では送信時間は $5\text{--}10 \mu\text{s}$ である。よって同程度であると言える。また、伝搬時間および減衰時間は信号には依存しないので、同時送受信計測および従来計測において同一である。なお、実験に用いたジュラルミン片において最大伝搬時間は約 $25 \mu\text{s}$ 程度であり、減衰時間は約 $20 \mu\text{s}$ 程度であった。以上より、TOF 計測時間は計測回数に概ね比例する。本研究では 5 個同時送信が可能であり、一断面の計測回数は 150 回 ($50 \text{ 回} \times 3 \text{ 面}$) から 30 回 ($10 \text{ 回} \times 3 \text{ 面}$) に抑えることができる。TOF 計測時間は $1/5$ に抑えることができ、一断面あたり約 1.5 ms に短縮することが可能である。これにより、一断面あたり 1 ms 以内の計測が可能になる。

5.5 むすび

本章では、TOF を用いる超音波 CT 法における問題点であった TOF 計測時間のかかりすぎへの対処として、通信技術を応用した符号変調信号を用いる複数同時計測手法を提案した。通信技術の CDMA を応用し、符号変調信号により複数の伝搬経路の TOF を独立して計測する手法を提案し、送信信号の基底周波数および信号長に関する検討を数値シミュレーションおよび実験により行った。その結果、角鋼片内部の TOF 計測においては、信号長が長いとき反射波の影響を受けやすく、TOF 計測誤差が発生しやすいことが分かった。そこで、正弦パルスまたは正弦波 1 波を 1 ビットに割り当てた Gold 系列位相変調信号を送信信号として選定

した。この信号を用いて、提案手法による TOF 同時計測の有効性を確認するために、探傷実験を行ったところ、正弦パルスで 1 ビットに割り当てた Gold 系列位相変調信号を用いることで、5 個同時送信が可能であった。実験結果より、提案手法である符号変調信号を用いる TOF 同時計測法は、角鋼片内部の TOF 計測の高速化に有効であることが示された。また、5 個同時送信を行うことで一断面あたり 1 ms 以内での TOF 計測が可能になり、現材製鉄所で用いられているパルスエコー法と同等の計測速度を実現できる可能性を示した。

第 6 章

形状ひずみのある角鋼片における同時送信

6.1 はじめに

前章で提案した同時送受信計測法では、符号変調信号を用いる同時送受信計測法の基礎的な有効性の検討を行っており、形状ひずみや内部の不均一がない角鋼片を想定し、参照面を欠陥のない面として逐次更新しないものとしていた。しかしながら、角鋼片は一次製品であるため、形状ひずみを含んでいることが多い。参照面を計測面の一つ前の面として逐次更新させる場合、角鋼片の形状の連続性より形状ひずみの影響を相殺する TOF 計測が可能である。しかし、前章の同時送信計測法をそのまま形状ひずみのある角鋼片に適用しようとする、各面の検査ごとに毎回参照面における単独送信時の受信信号を必要とするため高速化につながらない。そこで本章では、形状ひずみのある角鋼片に対して適用可能な TOF 同時計測法を提案し、その有効性を数値シミュレーションおよび実験により検証する。

6.2 形状ひずみの発生

連続鋳造では、溶鋼が鋳型から引き抜かれた後、複数のローラの間を通過しながら、冷やし固められて鋳片となり、角鋼片へと成形されていく。この際に、ローラ同士の間で鋳片が膨張してできるひずみをバルジングと呼ぶ⁶⁶⁾。特に、連続鋳造における生産性を向上するには、高速鋳造を行うのが一般的であるが、鋳造速度が速くなると連続鋳造内で形成される凝固シェルの厚みが薄くなるので、バルジングが起きやすくなり、鋳片の厚みや幅が変動し、寸法精度が悪くなる⁶⁷⁾。製造する鋳片の寸法精度が悪くなると、圧延工程での付加や最終的に出荷す

る鉄鋼製品の品質不良につながる。出荷時の鋼片の形状、寸法およびその許容差は日本工業規格による規定があり⁶⁸⁾、呼称寸法（商取引上用いられる寸法⁶⁹⁾の $-1.5\%+3.5\%$ （ただし、最大値 35 mm，最小値 10 mm）と定められている。実際には、この規格よりも厳しいメーカー独自の基準や受渡当事者間の協定等により許容差は定められている。日本の鉄鋼メーカーでは、鑄造直後成形前のバルジング量は鑄片の幅に対して 1.5% 以内に収まっており、寸法精度よく角鋼片が製造されている⁶⁷⁾。

6.3 形状ひずみのある角鋼片における同時送信による TOF 計測法

Figure 6.1 に形状ひずみの影響を軽減する TOF 同時計測法を示す。欠陥検出は角鋼片の長手方向に一断面ずつ逐次行う。また、本章では計測面の直前の面を参照面とする。角鋼片の長手方向の形状の連続性から計測面および参照面の形状はほぼ一致しているものとする。

既往の研究では、複数同時送信ではなく単一送信時の場合の形状ひずみ影響を軽減する TOF 計測法が提案されていた⁵⁸⁾。Figure 6.1(a) に示した Method I を単一送信を行うものであり、計測面および参照面で得られた受信信号と送信信号の相互相関をそれぞれ取ることによって、計測面における TOF、参照面における TOF を算出し、その差分をとることで形状ひずみの影響を相殺して、TOF 変化量 τ_{mr} を求める手法である。これを、同時送受信に応用する。すなわち、参照面および計測面において同時送信により得られた受信信号 $m_{z-\Delta z}(t)$ および $m_z(t)$ と送信信号 $s_i(t)$ の相互相関関数を求めることで、各パスの TOF $\Delta\tau_{z-\Delta z}$ および $\Delta\tau_z$ を算出する。参照面および計測面で得られた TOF の差分 $\Delta\tau_{z-\Delta z} - \Delta\tau_z$ を求めることで、形状ひずみによる影響が相殺され欠陥情報のみを含む TOF 変化量 τ_{mr} を求めることができる。

また、既往の研究では形状ひずみの影響を軽減するための手法としては提案されていないが、第 2.3 節で説明し、これまで用いてきた参照面を用いる TOF 計測法によっても形状ひずみの影響は相殺される³⁴⁾。参照面で得た受信信号と計測面で得た受信信号の相互相関を取ることによって、送受信器間の伝搬特性の影響が相殺されるとともに、形状ひずみによる伝搬経路長の差も相殺される。この TOF 計測手法を同時送受信に置き換えたのが、Fig. 6.1(b) に示す Method II である。参照面において 1 送信ずつ計測した受信信号 $r_{z-\Delta z}(t)$ を取得しておき、計測面において同時送信により取得した受信信号 $m_z(t)$ との相互相関関数を求めることで、各パスの TOF 変化量 τ_{mr} を算出する。同時送信を行わない単一送信での計測の場合、Method I より Method II のほうが、送受信器間の伝達特性を補正できる分、TOF の計測精度は向上すると考えられる。しかしながら、Method II では、参照面において 1 送信ずつ計測した受信

信号を必要とし、参照面は計測面とともに逐次更新されていくことを考慮すると、Method II は計測高速化にはつながらない。

そこで、形状ひずみのある角鋼片に対して同時送受信計測により高速化を図ることのできる TOF 計測法として、Fig. 6.1(c) に示す Method III を提案する⁷⁰⁾。Method III では、予め基準面 (例えばひずみがなく欠陥のない面) で一送信ずつ計測した受信信号 $s_t(t)$ を取得しておく。基準面は逐次更新される面ではなく、ある固定の面とする。ひずみのある計測面において同時送信により得た受信信号 $m_z(t)$ と $s_t(t)$ 、および参照面における受信信号 $m_{z-\Delta z}(t)$ と $s_t(t)$ との相関関数のピーク位置から算出した τ_z および $\tau_{z-\Delta z}$ との差より欠陥に起因する TOF 増加分 τ_{mr} を得る。本手法では、受信信号同士の相互相関を取ることで送受信器間の伝搬特性の影響を相殺し、その後、計測面と受信面の TOF 変化量の差分を取ることで形状ひずみの影響を相殺している。本手法では、Method II のように、単一送信での計測を計測面が更新されるたびに悲痛用同時送受信計測による高速化が可能であり、また、送受波器間の伝達特性および形状ひずみによる TOF 誤差は相殺される。

6.4 数値シミュレーション

6.4.1 解析条件

Method I-III を用いて数値シミュレーションにより欠陥可視化を行い、提案手法の有効性を検証する。Figure 6.2 に解析条件を示す。試験片の素材は鉄鋼とし、音速は 5,950 m/s とする。計測面は $100 \times 100 \text{ mm}^2$ に 5% 以内の形状ひずみを以下の正弦曲線により与えたものとする。

$$\begin{cases} y_u(x) = \frac{dD_0}{2} \sin\left(\frac{\pi x}{D_0}\right) \\ y_d(x) = -\frac{dD_0}{2} \sin\left(\frac{\pi x}{D_0}\right) \\ x_r(y) = dD_0 \left[\cos\left(\frac{\pi y}{D_0}\right) - \frac{1}{2} \right] \\ x_l(y) = -dD_0 \left[\cos\left(\frac{\pi y}{D_0}\right) - \frac{1}{2} \right] \end{cases}, \quad (6.1)$$

ここで、 $y_u(x)$ 、 $y_d(x)$ 、 $x_r(y)$ 、及び $x_l(y)$ はそれぞれ、計測面の上面、下面、右面、及び左面に与えた誤差を表し、 D_0 は角鋼片の寸法 100 mm とし、 d は角鋼片の寸法誤差率 5% とする。寸法誤差率は既往の研究と合わせるために 5% としている⁵⁸⁾。また直径 2 mm の欠陥を $(x, y) = (10, 20)$ mm の位置に一つ配置する。送受波器は 2 mm 間隔で全周に配置する。送信

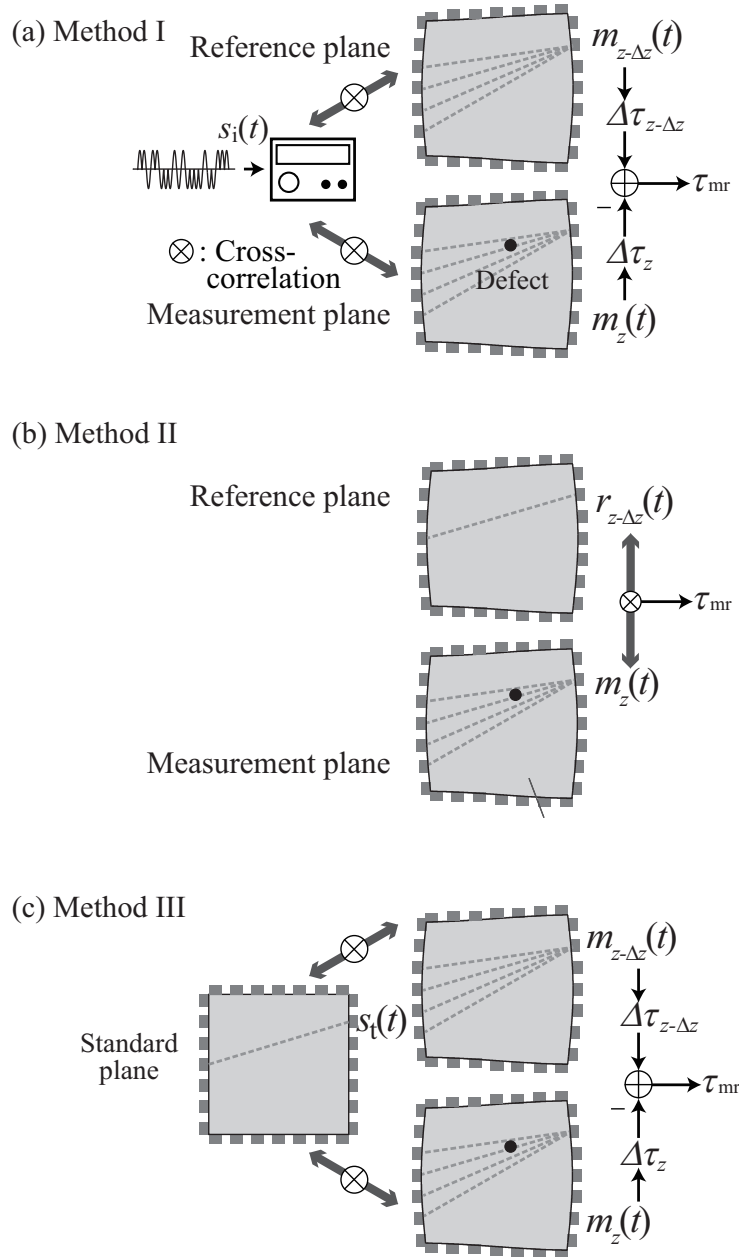


Fig. 6.1 形状ひずみを含む角鋼片の TOF 同時計測法

信号は 2MHz の正弦パルスを変調信号とする 5 次 (31 ビット) の Gold 系列位相変調信号とする。同時送信数 N は 5 または 10 とする。この条件において波動伝搬シミュレーションにより受信信号を取得し、Method I–III を用いて TOF を算出し、CT 法により欠陥の可視化を行った。

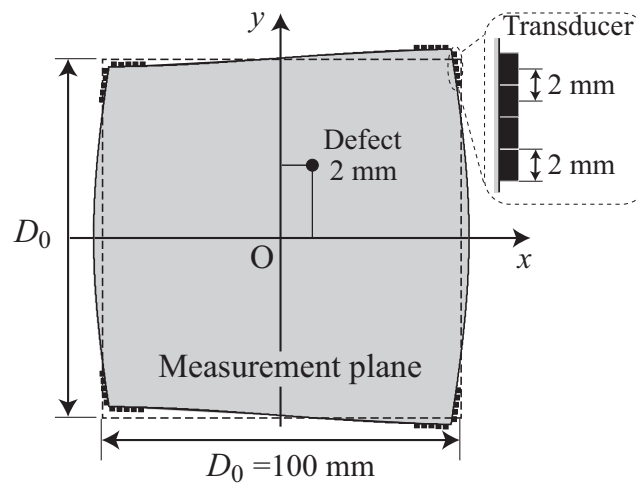


Fig. 6.2 解析条件

6.4.2 解析結果

得られた CT 像を Fig. 6.3 に示す. Figure 6.3 より, $N = 5$ のときは Method I–III いずれの場合においても欠陥の判別が可能である. $N = 10$ のとき, Method I では欠陥位置での音速低下が確認できず, 欠陥判別が不可能となっている. Method II では欠陥位置での音速低下は確認できるものの, それを下回る強い虚像が発生しており, 欠陥との区別が困難である. Method III においては, 欠陥位置において音速低下が確認でき, また像内に発生している虚像も欠陥位置での音速低下を下回るものがなく, 欠陥判別が可能である. これは, Method III では受信信号をパルス圧縮して得た TOF 同士の差分を取ることで, SNR が向上し TOF 計測誤差が減少したためと考えられる. このことから, Method III が最も欠陥可視化精度の高い TOF 計測法であることが考えられる.

6.5 探傷実験

Method I は同時計測により計測時間を短縮できるものの欠陥可視化精度が低く, Method II は欠陥可視化精度は Method I より優れるものの参照面における一送信ずつの受信信号を必要とするため同時計測の意味がない. Method III は伝搬特性の影響を相殺でき, 同時計測により計測時間の短縮が可能な方法である. そこで, 探傷実験により, Method II と Method III の可視化精度について比較を行い, 提案手法である Method III の有効性を検証する.

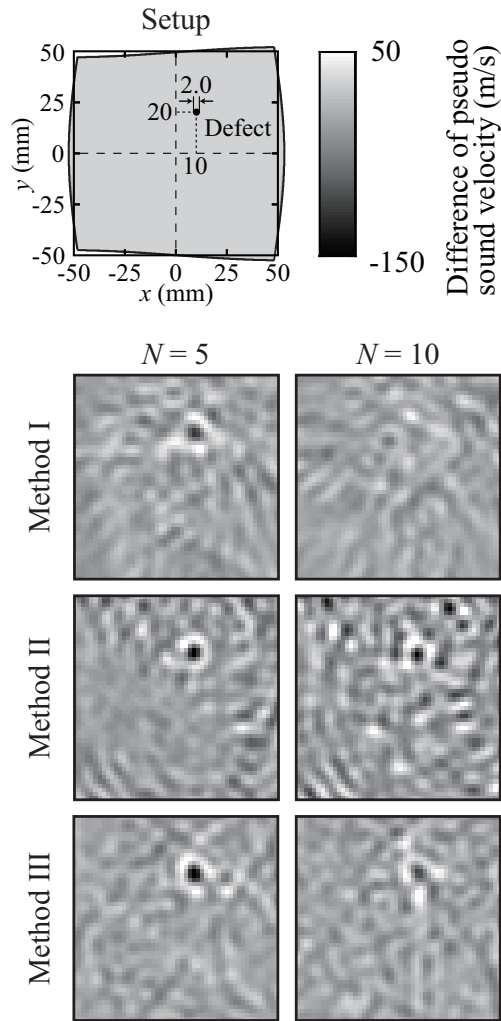


Fig. 6.3 形状ひずみのある角鋼片における同時計測による再構成像

6.5.1 実験条件

Figure 6.4 に実験系を示す．試験片はジュラルミン片であり，計測面は $100 \times 100 \text{ mm}^2$ に 5 % 以内の形状ひずみを Eq. 6.1 の正弦曲線により与えたものとする．計測面内の $(x, y) = (0, 0), (10, 20), (-20, 10), (30, -10)$ ，および $(-10, -30)$ (mm) にそれぞれ 2.0, 2.8, 4.0, 5.6, および 8.0 (mm) の欠陥を配置する．また，参照面には欠陥を配置しない．また，実験に用いた機材は第 4 章および第 5 章と同様のものとする．送信信号は 2MHz の正弦パルスを変調信号とする 5 次 (31 ビット) の Gold 系列位相変調信号である．

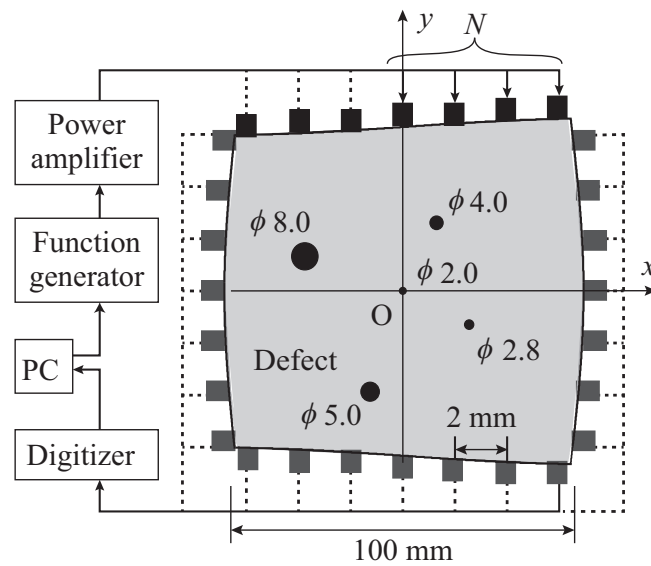


Fig. 6.4 形状ひずみを含む角鋼片の同時計測における計測系

6.5.2 実験結果

実験で得られた受信波形および相互相関関数を Fig. 6.5 および Fig. 6.6 に示す。Figure 6.5 および Fig. 6.6 は送受信器が $(x, y) = (0, -25), (0, 25)$ の位置のとき、同時送信数 $N = 2, 5, 8$ における参照信号 (a)、計測信号 (b)、基準信号 (c) を示している。また、これらの信号を用いて、Method II における参照信号と計測信号の相互相関波形、Method III における参照信号と基準信号、参照信号と計測信号の相互相関波形を示した。相互相関波形からは、同時送信数 N が增大するにつれ相関ピークが相対的に小さくなり、 $N = 8$ では、相関ピークはサイドローブと区別しにくくなっていることが確認できる。

次に、実験により得られた CT 像を Fig. 6.7 に示す。Figures 6.7(a),(b) は、それぞれ CT 像および二値化像を示している。二値化像は 5 つの欠陥位置における音速の最大値をしきい値としている。Figures 6.7(i)–(iii) は、それぞれ $N = 2, 5, 8$ のときの結果を示している。Figure 6.7(a-i),(a-ii) より、Method II, III とともに、虚像が発生しているものの欠陥位置での音速低下が確認できる。Figure 6.7(a-iii) では、Method II のとき、 $\phi 2.8$ の欠陥位置での音速低下が確認できないが、Method III ではいずれの欠陥位置においても音速低下が確認できる。また、いずれの N のときも Method II より Method III のほうが虚像が少ないことが確認できる。Method II では N の増加に伴って確認できない欠陥が発生したり、虚像が強くなった

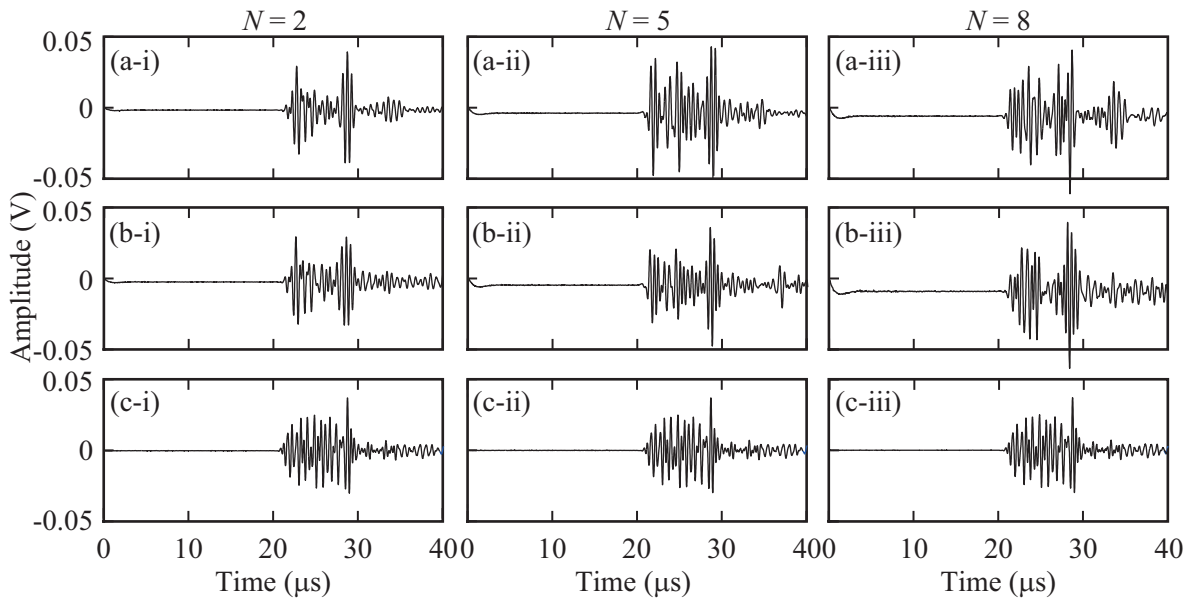


Fig. 6.5 形状ひずみのある角鋼片における同時送信時の参照信号，計測信号および基準信号

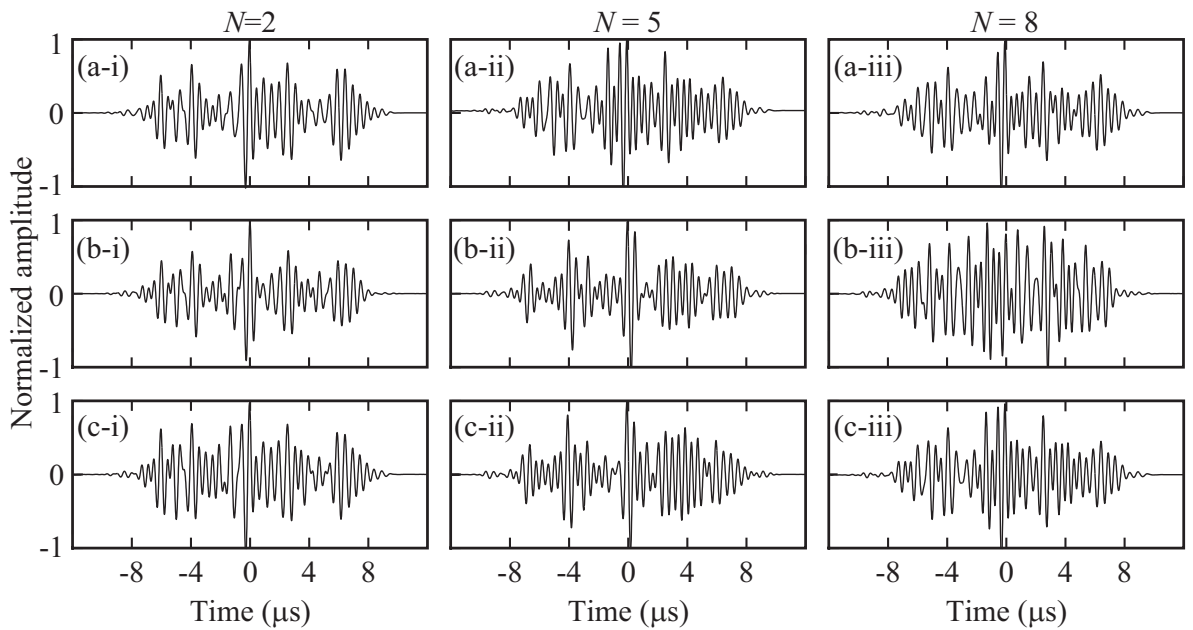


Fig. 6.6 形状ひずみのある角鋼片における同時送信時の参照信号と計測信号の相互相関関数，基準信号と参照信号の相互相関関数および基準信号と計測信号の相互相関関数 (i)–(iii) $N = 2, 5, 8$

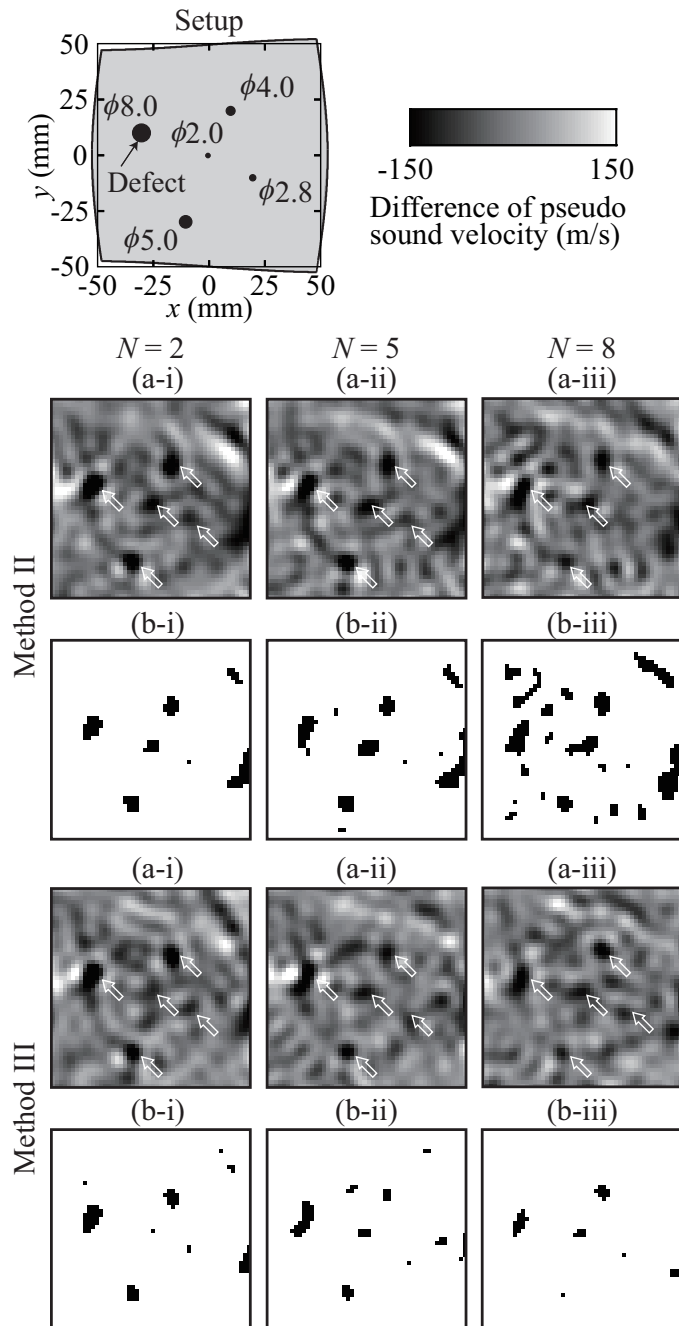


Fig. 6.7 形状ひずみのある角鋼片における同時送信時の可視化像および二値化像

りするが、Method III では N の増加によらず欠陥位置での音速低下が確認でき、また虚像の強さにあまり変化がない。この結果から、Method III は形状ひずみのある角鋼片に対する同時送受信計測に有効であると言える。

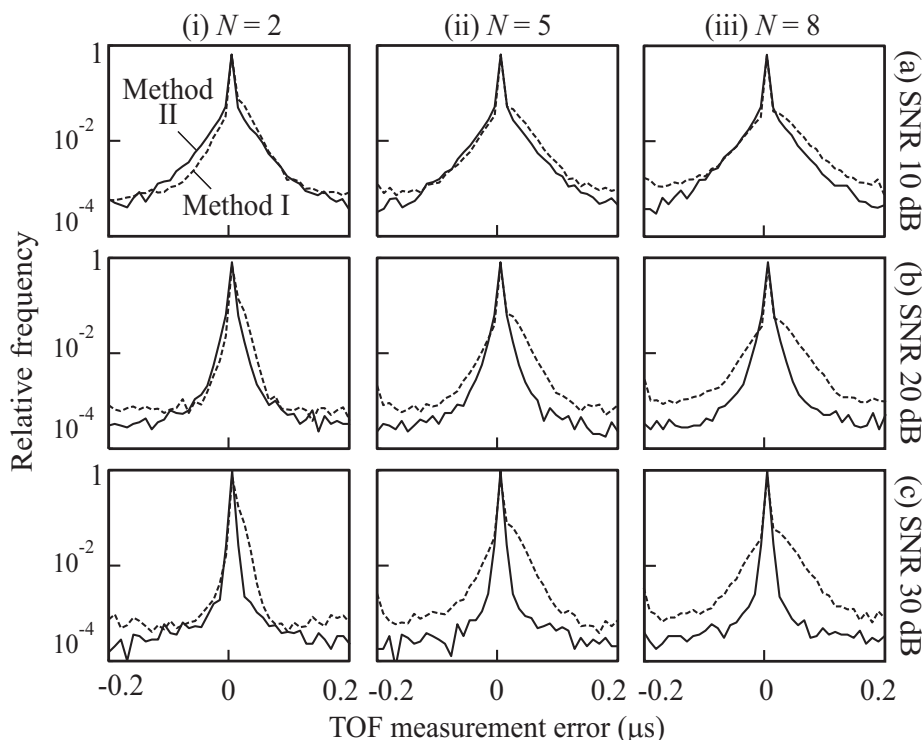


Fig. 6.8 同時送信における TOF 計測誤差の相対度数分布

これまで述べた結果より Method III は同時送受信計測を用いて欠陥可視化を行ったとき、CT 像内での虚像が少なく欠陥判別が容易であることが明らかになったが、これは、Method III では受信信号をパルス圧縮して得た TOF 同士の差分を取ることで、SNR が向上し TOF 計測誤差が減少したためと考えられる。ここで、ノイズと TOF 計測誤差の関係について数値解析にて検証する。解析条件は第 6.3 節と同様とする。ただし、ここでは TOF 計測精度を検討するため、計測面には欠陥を配置しない。ホワイトガウシアンノイズを送受信器が正対するパスでの SNR が 35 dB となるように受信信号に付加する。この条件において、波動伝搬シミュレーションを行い、各伝搬経路における TOF 変化量 τ_{mr} を求め、相対度数分布に表して評価を行う。

得られた τ_{mr} の相対度数分布を Fig. 6.8 に示す。Figure 6.8(a)–(c) は、SNR を 10, 20, 30 (dB) としたときの結果を、Fig. 6.8(i)–(iii) は、 $N = 2, 5, 8$ のときの結果を表している。縦軸は相対度数を表しており、対数を取っている。欠陥を配置していないことから、欠陥による TOF の変化はないため、TOF 変化量 τ_{mr} は 0 になることが理想的である。Figure 6.8 より、Method III では同時送信数の増加によらずエラー率が変わらないが、Method II では同時送信数が増えるほど TOF 計測誤差が増える。全体的に Method III のほうが計測誤差が少なく

Table 6.1 TOF 同時計測法の比較

Method	A	S
I	×	○
II	△	×
III	○	○

A: Accuracy of visualization

S: Simultaneous measurement

なっている。このことから、Method III はノイズに強いと言える。そのため、CT 法による再構成時の虚像が少なくなり、欠陥判別が容易となる。よって、Method III は形状ひずみのある角鋼片に対する同時送信に有効であり、従来法に比して計測誤差が少ない計測が可能であると言える。

ここで、Table 6.1 に Method I–III の性質をまとめた。Method I は同時計測が適用できるものの欠陥可視化精度が低く、Method II は欠陥可視化精度は Method I より優れるものの同時計測が適用できない。Method III は欠陥可視化精度にも優れ、同時計測が適用可能である。このことから Method III は形状ひずみを持つ角鋼片を高速・高精度に可視化可能であることが示唆された。

6.6 むすび

本章では、形状ひずみを有する角鋼片に対しても同時計測により計測時間の短縮が可能な方法を提案した。提案手法では、参照面および計測面に加えて新たに基準面を設け、基準面で得たデータをリファレンスとした。参照面、計測面は逐次更新される面であるが、基準面は更新しない面であり、予め一送信ずつの受信信号（基準信号）を取得しておくことができる。基準信号を用いることで計測系の特性を補正し、さらに参照面と計測面のデータの差分を取ることで形状ひずみの影響を相殺する。提案手法の有効性を実験により確認したところ、同時送受信計測時にも形状ひずみのある角鋼片の内部欠陥の可視化が可能であることが示された。ただし、本実験は減衰の少ないジュラルミンを用いて行い、手法の可否を検証したまでである。本手法を高減衰材に適用するには、入力信号の高出力化などにより SNR を向上させる必要があると考えられる。

第 7 章

結 論

本研究は、これまで確立されていなかった高減衰角鋼片内部の欠陥検出法に関する研究である。角鋼片内部の欠陥検出法はこれまでパルスエコー法が一般的に用いられていた。しかし、減衰の大きい素材や大断面素材では欠陥からのエコーが微弱となるため欠陥検出が困難であり、検査が行われていない。そこで、本研究では、縦波伝搬時間 (Time-of-flight: TOF) を用いる超音波計算機トモグラフィ (Computerized tomography: CT) 法に注目した。本手法は、透過波を受信するため安定した計測ができることや、一送信点に対して多数の受信点を設けることができ豊富なデータを欠陥検出に利用できることといった、高減衰材や大断面素材の内部探傷に有利な特徴があり、高減衰角鋼片の欠陥検出として期待が持てる。しかし、本手法は高減衰角鋼片の欠陥検出手法として研究されておらず、高減衰材への適用可否が明らかにされていない。そこで、本研究の目的を、TOF を用いる超音波 CT 法を高減衰角鋼片の欠陥検出法として実用化に近づけることとした。

まず、第 2 章において、TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥検出原理について述べた。本手法では、送受信器を角鋼片周上で走査しながら超音波透過法により TOF を計測する。この際、伝搬経路上に欠陥が存在すると、回折により TOF が増加し、擬似的に音速が低下する。この TOF の変化量を投影データとして、超音波 CT 法により再構成し疑似音速分布を得る。疑似音速分布では、欠陥位置において音速低下が見られ、これにより欠陥の存在を知ることができる。

第 3 章、第 4 章では、TOF を用いる超音波 CT 法の特徴を把握し、高減衰角鋼片への適用可能性を検証した。第 3 章では、送信周波数と欠陥検出能力の関係を数値シミュレーションにより検討し、低い送信周波数は、CT 像内の欠陥を膨張して見せるため、欠陥検出において有効であることを明らかにした。一般的に超音波イメージングでは解像度を得るため、高い周波数が好まれるが、本手法では減衰しにくい低周波数の信号を使用することが可能であり、高減

衰角鋼片の欠陥検出に有利に働くことを示唆した。第 4 章では、内部減衰と欠陥検出能力の関係を数値シミュレーションおよび実験により検討し、従来法であるパルスエコー法では欠陥可視化が困難な条件においても、TOF を用いる超音波 CT 法により欠陥が可視化できることを示した。表面付近の欠陥はパルスエコー法で十分検出可能と考えられるが、角鋼片の中心付近の欠陥に対しては TOF を用いる超音波 CT 法が有効であった。この結果は、これまで困難とされてきた高減衰角鋼片への超音波探傷が可能であることを示している。

第 5 章、第 6 章では、本手法の実用化に向け、同時計測法を用いて計測高速化を行った。第 5 章では、同時送信を行うことで、計測時間の短縮を試みた。同時に複数箇所から複数の Gold 系列位相変調信号を送信し、受信信号からそれぞれの伝搬経路の情報を独立して抽出する手法を提案した。数値シミュレーションにより、送信信号の選定を行い、実験により同時計測による欠陥可視化を行い、本手法により TOF の同時計測が可能であり、計測時間が短縮できることを示した。

第 6 章では、形状ひずみを含む角鋼片においても同時計測による高速化が行えるよう、基準面を用いる TOF 計測手法を提案した。この方法では、基準面で得たデータをリファレンスとすることで計測系の特性を補正し、さらに参照面と計測面のデータの差分を取ることで形状ひずみの影響を相殺するため、これまでの手法に比べて計測誤差の少ない計測が可能であり、かつ高速化が可能であることを示した。しかしながら、同時計測は受信信号の SNR を悪化させるため、高減衰角鋼片に適用する場合は、高出力化などが必要となる。

以上から、TOF を用いる超音波 CT 法は、現在においても確立していない高減衰角鋼片の内部探傷に対して有用であることを示した。また、高速化手法を提案し、実用化に近づけた。

本研究は、鉄鋼業界において品質保証手段を進歩させるものであり、また、歩止まりの向上に寄与するものである。また最終製品の供用中の事故を防ぎ、エンドユーザーひいては社会全体の安全・安心につながるものである。学術的には、透過法の新たな応用例を示すことで、非破壊検査分野に対して知見を与えるものである。

謝 辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻の博士課程在学中に音響システム研究室にて行った研究成果をまとめたものです。

指導教員である筑波大学システム情報系知能機能工学域 教授 水谷孝一先生には、研究に携わる機会を与えて頂いただけでなく、5年間という期間にわたり、研究者として成長するために惜しみないご支援を頂きました。具体的には、研究の手法や研究に対する姿勢をご教授頂いただけでなく、研究の成果を社会に走らせる機会を数多く頂きました。研究を通じて多くの人と意見を交わすことで、物事を多角的に捉え、説明する能力を涵養することができました。さらに、昨年度はデュアルディグリープログラムでの他専攻への進学を勧めていただき、広い視野を持った研究者になるようご指導をいただきました。水谷先生の下で大学院生活を送ることで、実りの多い5年間となったと確信しています。深く感謝致しますとともに、心より御礼申し上げます。

副指導教員である筑波大学システム情報系知能機能工学域 准教授 若槻尚斗先生には、本研究を進めるうえで、理論展開や問題解決に至る過程等、本研究に関して多くの御指導を頂きました。研究で打つ手がなくなり打ちひしがれている時に、親身になって議論にお付き合い頂き、問題解決の道が開けたとき、研究の面白さを心から感じました。また、本論文を仕上げるにあたって、細部にわたるご指導を頂きました。心より感謝致します。

副指導教員である筑波大学システム情報系知能機能工学域 助教 海老原格先生には、本研究におきまして、多数の御指導を頂きました。特に、学会原稿、投稿論文や発表資料に対するご指導、英語論文執筆時の英文添削等では大変お世話になりました。たびたび学生居室へ足を運んでくださり、明るい言葉をかけていただき、とても励まされました。心より感謝致します。

本論文を執筆するに当たり、筑波大学システム情報系知能機能工学域 教授 堀憲之先生、同 教授 藪野浩司先生、同 助教 前田祐佳先生、同 助教 善甫啓一先生には、本論文内容及び発表内容に関しまして、多くの御助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

新日鐵住金株式会社 技術開発本部 プロセス研究所 計測システム研究開発部 主幹研究員 上

田佳央氏には、実験における御支援および研究内容に関する有益なアドバイスを頂きました。心より感謝致します。

本研究室の卒業生である 西宮康治朗博士，南出歩博士，三井秀人博士，佐藤裕治博士，宝田隼博士，安藤泰雅博士および博士後期課程に在籍する 黒山喬允氏，角間孝一氏，博士前期課程に在籍する宮本隆典氏を始めとする研究室の皆様には，本研究に関する助言を頂き，感謝しております。また，研究室のみなさまには，お互いに切磋琢磨する機会を与えてくださり感謝しています。

大学院での勉強と研究の機会を与えて下さいました，防衛省陸上幕僚監部の関係各位，並びに，全般に亘る御支援を頂いた，陸上自衛隊霞ヶ浦駐屯地業務隊の方々に厚く御礼申し上げます。

最後に，5年間研究ばかりでなかなか顔を見せに帰ることもできなかったにもかかわらず，私のことをいつも気にかけて応援してくれていた両親，姉妹，祖母に感謝します。家族の存在が私の原動力でした。ありがとう。

参考文献

- 1) 新日本製鉄（株）（編）：“鉄と鉄鋼が分かる本,” 日本実業出版社, 東京, 2013.
- 2) JFE21 世紀財団：“鉄鋼プロセス工学入門,”
<http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/index2.html> (2015 年 1 月 6 日閲覧)
- 3) 岡本正三：“鉄鋼材料,” コロナ社, 東京, 1978.
- 4) 奥村裕彦：“連続鋳造技術の動向と今後の展望,” 新日鉄技報, No. 351, pp. 10–14, May 1994.
- 5) 郡司好喜：“鋼の連続鋳造法—今日, 明日—,” 鉄と鋼, Vol. 71, No. 8, pp. 934–938, June 1985.
- 6) 川本正幸, 柳楽知也：“我が国における鋼の連続鋳造プロセスの開花と未来へのシーズ,” 鉄と鋼, Vol. 100, No. 4, pp. 472–484, March 2014.
- 7) 山口純, 中島隆雄, 澤井隆：“連続鋳造技術の進展と今後の展望,” 新日鉄技報, No. 394, pp. 12–19, September 2012.
- 8) 岩崎正樹, 松尾充高：“製鋼技術開発の歩みと今後の展望,” 新日鉄技報, No. 391, pp. 88–93, November 2011.
- 9) 松實敏幸：“鉄鋼の非破壊検査技術,” 鉄と鋼, Vol. 79, No. 7, pp. 823–830, July 1993.
- 10) 日本非破壊検査協会：“非破壊検査便覧,” 日刊工業新聞社, 東京, 1978.
- 11) 石井勇五郎：“新版 非破壊検査工学,” 産報出版, 東京, 1993.
- 12) 前田悟, 高岡克也, 前川祥二, 和佐泰弘宏：“鋼片加工工場リフレッシュ工事の概要,” 神戸製鋼技報, 神戸製鋼所, Vol. 61, No. 1, pp. 20–23, April 2011.
- 13) 橘高節生, 三浦康彰, 松岡幸弘：“鋳片圧下装置の開発—連鋳鋳片の内部品質向上 (センターポロシティ低減) 技術の確立—,” 新日鉄エンジニアリング技報, Vol. 3, pp. 2–6, January 2012.
- 14) 植山信二郎, 新妻峰郎, 米澤公敏：“君津製鐵所における厚板高級鋼製造技術の確立,” 新日鉄技報, No. 394, pp. 103–110, September 2012.

- 15) 日本金属学会 (編) : “金属便覧,” 丸善, 東京, 1990.
- 16) 日本工業規格, Z8115, 2000.
- 17) 村上敬宣: “金属疲労微小欠陥と介在物の影響,” 養賢堂, 東京, 1993.
- 18) 西田新一: “機械機器破損の原因と対策,” 日刊工業新聞社, 東京, 1986.
- 19) 小島彰: “鉄鋼業の温暖化対策とセクトラル・アプローチ,” 科学技術動向, Vol. 98, pp. 8–18, May 2009.
- 20) 山野正樹, 鈴間俊之, 上田佳央, 中尾喜之: “鋼管商品の差別化に寄与する非破壊検査技術,” 新日鉄住金技報, No. 397, pp. 125–130, November 2013.
- 21) 万城目正樹, 小野平, 吉村康嗣, 三上博季: “鋼片精整改善対策,” 新日鉄住金技報, No. 386, pp. 11–19, March 2007.
- 22) I. Szilard, J: “Ultrasonic Testing,” John Wiley & Sons, New York, 1982.
- 23) 日本学術振興会 (編) : “超音波探傷法 (改定新版),” 日刊工業新聞社, 東京, 1980.
- 24) M. Abe, T. Fujioka, and Y. Nagata: “Location of a defect in a concrete block by a non-destructive technique,” *Acoustical Science and Technology*, Vol.23, pp.308, 2002.
- 25) J. Krautkramer, and H. Krautkramer: “Ultrasonic Testing of Materials,” Springer, Berlin, 1977.
- 26) 山野正樹: “超音波欠陥像の再構成手法の開発,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 5, pp. 360–367, May 1998.
- 27) 日本工業規格, G0587, 2007.
- 28) Y. Yokono: “Measurement of Ultrasonic Attenuation in Materials,” *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 62, No. 7, pp. 522–527, October 1993.
- 29) 水谷義弘: “図解入門よくわかる最新非破壊検査の基本と仕組み,” 秀和システム, 東京, 2010.
- 30) 黒住保夫: “鑄造ステンレス鋼の超音波探傷において結晶組織が超音波の入射角と欠陥検出感度に与える影響,” *INSS JOURNAL*, Vol. 10, pp. 198–209, 2003.
- 31) R. Hirokawa, Y. Mizutani, and Y. Kurokawa: “Optimization of Ultrasonic Testing System Applicable to High Manganese Steel Rails,” *Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing*, CD-ROM, No. 263, October 2008.
- 32) 独立行政法人原子力安全基盤機構: 平成 21 年度ステンレス鑄鋼の高精度非破壊検査技術検証に関する事業報告書, 2011.
- 33) H. Mitsui, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: “Defect Detection in Square Billet Using Time-of-Flight of Longitudinal Waves,” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 49, pp. 07HC13-1–6, July 2010.

- 34) H. Mitsui, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and Y. Norose: Artifact Reduction in Tomographic Images for Nondestructive Testing of Square Billets Using Ultrasonic Computerized Tomography, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.50, No.11, pp.116601-1–9, October 2011.
- 35) Y. Norose, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: Application of ultrasonic computerized tomography using time-of-flight measured by transmission method to nondestructive inspection for high-attenuation billet, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, No.7, pp.07KC19 1–6, June 2014.
- 36) H. Mitsui, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: “Acoustical Defect Reconstruction in Square Billet,” *Proceedings of the 30th Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol. 30, pp. 77–78, November 2009.
- 37) H. Mitsui, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and Y. Norose: “Measurement Point Reduction for Acoustic Imaging in Square Billet,” *Proceedings of the 31th Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol. 31, 3P–21, pp. 497–499, December 2010.
- 38) Y. Norose, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and H. Mitsui: “Transfer Characteristics between Transmitter And Receiver in Scanning along Rectangular Surface,” *Proceedings of the 31th Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol. 31, pp. 495–496, December 2010.
- 39) 野呂瀬葉子, 三井秀人, 水谷孝一, 若槻尚斗: 超音波 CT 法を用いる角鋼片内部の再構成像におけるトランスデューサ開口面に起因する送受信器間伝達特性の影響, *電子情報通信学会 A*, vol.J94-A, no.11, pp. 809–816, 2011.
- 40) 国立天文台: “理科年表 平成 16 年,” 丸善, 東京, 2003.
- 41) M. K. Kuo, T. R. Lin, P. L. Liu, and T. T. Wu: “Locating The Crack Tip of A Surface-Breaking Crack Part I. Line Crack,” *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 803–811, January 1998.
- 42) H. Mitsui, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: “Detection of Internal Cracks in Square Billets Using Times of Flight of Longitudinal Waves,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 07GD05-1–5, July 2009.
- 43) E. Ha, Y. Kawamura, K. Mizutani, A. Kamohara, and H. Okawa: “Underground Imaging Method Using Magnified Cross-Correlation Analysis,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, pp. 3946–3951, May 2008.
- 44) I. Saito, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and S. Kawabe: “Measurement of Vertical Temperature Distribution Using A Single Pair of Loudspeaker and Microphone with

- Acoustic Reflection,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 07GB05-1-4, July 2009.
- 45) J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington, and W. J. Albersheim: “The Theory And Design of Chirp Radars,” *Bell System Tech. J.* Vol. 39, pp. 745-808, July 1960.
- 46) M. Pollakowski and H. Ermert: “Chirp Signal Matching And Signal Power Optimization in Pulse-Echo Mode Ultrasonic Nondestructive Testing,” *IEEE Trans. Ultrasonics*, Vol. 41, pp. 655-659, September 1994.
- 47) N. Wakatsuki, S. Kinjo, J. Takarada, and K. Mizutani: “Precise Wireless Triggering System for Anemometers with Long-Baseline Acoustic Probes,” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 49, pp. 07HC14-1-4, July 2010.
- 48) A. Minamide, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: Temperature Distribution Measurement with Acoustic Computerized Tomography Using Rectangular Arrangement of Transducers, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.48, pp.07GC02, 2009.
- 49) 高橋政則, 三木千尋, 劉銘崇, 岩立次郎: 超音波回折トモグラフィの鋼部材の超音波探傷試験への適用の試み, 土木学会論文集, no.495/I-28, pp.93-99, 1994.
- 50) 福島重広: 多変数関数の投影データからの再構成問題におけるフィルタとその核関数, 電子情報通信学会論文集 A, Vol.J69-A, no.9, pp.1110-1116, 1986.
- 51) K. Mizutani, K. Nishizaki, K. Nagai, and K. Harakawa: “Measurement of Temperature Distribution in Space Using Ultrasound Computerized Tomography,” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 36, pp. 3176-3177, May 1997.
- 52) 橋本雄幸, 篠原広行: “C 言語による画像再構成の基礎,” 医療科学社, 東京, 2006.
- 53) N. Zhu, Y. Jiang, and S. Kato: Ultrasonic computerized tomography (CT) for temperature measurements with limited projection data based on extrapolated filtered back projection (FBP) method, *Energy*, vol.30, pp.509, 2005.
- 54) 橋本雄幸, 横井孝司, 篠原広行: “SPECT 画像再構成の基礎,” 医療科学社, 東京, 2006.
- 55) L. A. Shepp and B. F. Logan: The Fourier reconstruction of a head section, *IEEE Trans. Nuclear Science*, Vol.21, pp.21-43, June 1974
- 56) 大沼巧, 橋本雄幸, 井上多門: “サイノグラム上の図形的特徴と再構成のための事前情報,” 信学技報, Vol. 100, No. 464, pp. 21-26, November 2000.
- 57) Z. Zhu, E. Janunts, T. Eppig, T. Sauer, and A. Langenbucher: “Iteratively Re-Weighted Bi-Cubic Spline Representation of Corneal Topography And Its Comparison to The Standard Methods,” *Z. Med. Phys.* Vol. 20, pp. 287-298, September 2010.
- 58) H. Mitsui, T. Ebihara, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: “Simulation of Internal Crack Detection in Shape Distorted Cast Billets Using Time-of-Flight Measurement

- of Longitudinal Ultrasonic Waves,” *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 2, pp. 337–341, February, 2012.
- 59) 加川幸雄, 吉田則信, 土屋隆生, 佐藤雅弘: “等価回路網法入門,” 森北出版, 東京, 2006.
- 60) Davis, J. R. (ed): “Cast Irons,” ASM International, Ohio, 1996.
- 61) Y. Yokono: “Measurement of Ultrasonic Attenuation in Materials,” *Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 62, No. 7, pp. 522–527, October 1993.
- 62) 丸林元, 中川正雄, 河野隆二: “スペクトル拡散通信とその応用,” コロナ社, 東京, 1998.
- 63) Y. Norose, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: ”Nondestructive inspection for steel billet using phase-modulated signal by Gold sequence for improving measurement speed,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.51, No.7, Issue 2, pp. 07GB17, July 2012.
- 64) G.Hoffman De Visme: “Binary Sequences” , English Universities Press, London, 1971.
- 65) 柏木潤: “M 系列とその応用” 昭晃堂, 東京, 1996.
- 66) 村上晃: “連続鋳造機湯面レベルの H^∞ 制御,” 神戸製鋼技報, 神戸製鋼所, Vol. 48, No. 2, pp. 54–57, September 1998.
- 67) 住友金属工業株式会社: 連続鋳造法, 特開 2007-330998 号, December 2007.
- 68) 日本工業規格, G3251, 2010.
- 69) 日本工業規格, G0203, 2009.
- 70) Y. Norose, K. Mizutani, and N. Wakatsuki: ”Speeding up of nondestructive inspection for shape-distorted billet by simultaneous measurement of time-of-flight,” *Japanese Journal of Applied Physics.*, Vol. 52, No. 7, pp. 07HC09, July 2013.
- 71) 大槻茂雄: “RING 関数による近距離音場の計算法,” *日本音響学会誌*, Vol.30, No.2, pp.76–81, February 1974.
- 72) T.Ohbuchi, T.Ebihara, K.Mizutani, N.Wakatsuki, H.Masuyama: “Estimation of Sound Velocity Distribution Using Sectional Near-Field Acoustical Holography and Global Search,” *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.49, pp. 07HC06, July 2010.
- 73) Philip M. Morse, and K. Uno Ingrad: “Theoretical acoustics,” MacGraw-Hill, New York, 1968.
- 74) P. R. Stepanishen: “Transient Radiation from Pistons in an Infinite Planar Baffle,” *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.49, pp. 1629–1638, 1971.

—

(参考論文)

査読付雑誌論文（学位請求申請に関連のある論文）

- 野呂瀬葉子, 三井秀人, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”超音波 CT 法を用いる角鋼片内部の再構成像におけるトランスデューサ開口面に起因する送受信器間伝達特性の影響,” 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J94-A, No. 11, pp. 809-816, November 2011.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: ”Nondestructive inspection for steel billet using phase-modulated signal by Gold sequence for improving measurement speed,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.51, No.7, Issue 2, pp. 07GB17 (6 pages) July 2012.
- 野呂瀬葉子, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”縦波伝搬時間を用いる超音波 CT 法による角鋼片内部の欠陥検出能力,” 土木学会論文集 A2 (応用力学) , Vol. 68, No. 2, (応用力学論文集 Vol. 15), pp. I81-I88, August 2012.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: ”Speeding up of non-destructive inspection for shape-distorted billet by simultaneous measurement of time-of-flight,” Japanese Journal of Applied Physics., Vol. 52, No. 7, 07HC09 (8 pages) July 2013.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: ”Application of ultrasonic computerized tomography using time-of flight measured by transmission method to nondestructive inspection for high-attenuation billet” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53, No. 7, 07KC19 (6 pages) July 2014.

査読付国際会議論文（学位請求申請に関連のある論文）

- Tadashi Ebihara, **Yoko Norose**, Hideto Mitsui, and Koichi Mizutani, "Defect detection in square billet using phase-information of longitudinal waves," *Acoustical Imaging*, Vol.31, pp. 413–421, February 2012.
- Yoko Norose, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: "Simulation-based study on the effect of scan pitch for ultrasonic non-destructive inspection in cast billet with computerized tomography," *Proceedings of the Asia Simulation Conference 2011 (AsiaSim2011)*, (8pages), November 2011.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: "Investigation of simultaneous signal transmission in non-destructive inspection of steel billet," *Proceedings of the Acoustics 2012 Hong Kong*, CD-ROM, 4pEAa11, S226, (6 pages) May 2012.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: "High-performance non-destructive inspection method for high-attenuation billet: Ultrasonic computerized tomography using time-of-flight," *2014 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, pp. 1424–1427, September 2014.

(その他の論文)

査読付雑誌論文（学位請求申請に関連のない論文）

- Hideto Mitsui, Koichi Mizutan, Naoto Wakatsuki, and **Yoko Norose**: "Artifact reduction of tomographic images for non-destructive testing of square billets using ultrasonic computerized tomography", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, No.11, pp. 116601 (9 pages) November 2011.
- Koichi Kakuma, **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: "Interval of observation plane in visualization of region near defect in billets using ultrasonic computerized tomography method," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52, No. 7, 07HC10 (6 pages) July 2013.

査読付発表論文

- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and **Hideto Mitsui**: “Transfer Characteristics between Transmitter and Receiver in Scanning along Rectangular Surface,” Proceedings of the 31th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 31, 3P-20, pp. 495–496, December 2010.
- Hideto Mitsui, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and **Yoko Norose**: “Measurement Point Reduction for Acoustic Imaging in Square Billet,” Proceedings of the 31th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 31, 3P-21, pp. 497–499, December 2010.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Non-destructive inspection of steel billet using phase-modulated and multiplexed Gold sequences,” Proceedings of the 32th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 32, 1J2-5, pp. 33–34, November 2011.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Application of nondestructive inspection method to shape-distorted billet using simultaneous measurement of multiple time-of-flight,” Proceedings of the 33th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 33, 1P2-8, pp. 51–52, November 2012.
- Koichi Kakuma, **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Visualization for near-defect region in billet using ultrasonic CT method,” Proceedings of the 33th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 33, 3Pa2–8, pp. 333–334, November 2012.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Comparative study of pulse echo method and transmission method for defect detection inside billet,” Proceedings of the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, 2P2–5, pp. 217–218, November 2013.
- Ryusuke Miyamoto, **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Numerical study of defect detection in square billet by transmission method with linear scanning,” Proceedings of the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, 1P2-31, pp. 97–98, November 2013.
- **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Noise

reduction in ultrasonic computerized tomography by two-dimensional filtered projection data,” Proceedings of the 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 35, 1J2-4, pp. 15–16, November 2014.

査読なし発表論文

- 野呂瀬葉子, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”民族楽器 Vuvuzela の人工吹鳴,” 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol.29, No.3, MA2010-23, pp. 5–8, August 2010.
- 野呂瀬葉子, 三井秀人, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”超音波イメージング用探触子の指向性の広角化,” 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会講演論文集, 1-P-6, pp. 1227–1228, September 2010.
- 三井秀人, 野呂瀬葉子, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”インパルス応答の影響を軽減する角鋼片中の超音波伝搬時間計測法,” 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会講演論文集, 1-P-22, pp. 1261–1262, September 2010.
- Yoko Norose, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: ”Analysis of Vuvuzela Sound Using Artificial Blowing System,” The 7th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 58, p. 42, November 2010.
- 野呂瀬葉子, 三井秀人, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”超音波 CT 法による形状ひずみを持つ角鋼片内部の欠陥検出,” 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 25p-KN-18, p.18–29, March 2011.
- 野呂瀬葉子, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”M 系列位相変調信号を用いる角鋼片非破壊検査のための音波伝搬時間計測,” 日本音響学会, 2011 年秋季研究発表会講演論文集, 2-P-9, pp. 1313–1314, September 2011.
- Yoko Norose, Koichi Mizutani: ”Defect detection in Square Billet Using Ultrasonic CT Method,” The 8th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 65, p. 50, November 2011.
- 野呂瀬葉子, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”形状ひずみを持つ角鋼片の欠陥可視化における縦波伝搬時間同時計測,” 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 18a-C3-7, p. 1–27, March 2012.
- 野呂瀬葉子, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”超音波 CT 法を用いる角鋼片内部可視化像からの欠陥判別,” 日本音響学会, 2012 年秋季研究発表会講演論文集, CD-ROM, 2-P-a26, pp. 1429–1430, September 2012.

- 水谷孝一, **野呂瀬葉子**: ”超音波 CT 法を用いる固体内部における微小欠陥検出技術,” イノベーション・ジャパン 2012-大学見本市, 独立行政法人科学技術振興機構、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構主催, M-07, 装置・デバイス, September 2012.
- **野呂瀬葉子**, 水谷孝一: ”超音波 CT 法による仮想伝搬速度分布を用いる固体内部の欠陥検出,” SAT テクノロジー・ショーケース 2013, プログラムアブストラクト集, P-68, p. 70, January 2013.
- **Yoko Norose** and Koichi Mizutani: ”High-speed ultrasonic testing for billet by signal multiplexing technology,” Proceedings of the 10th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 8, p. 19, December 2013.
- Ryusuke Miyamoto, **Yoko Norose**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: ”Simple defect detection method for billet by ultrasonic transmission method,” Proceedings of the 10th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 61, p. 48, December 2013.
- **野呂瀬葉子**, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: ”高減衰角鋼片の内部探傷における超音波 CT 法の適用可能性の検討,” 電子情報通信学会 2014 年総合大会講演論文集, A-11-3, p. 158, March 2014.
- **野呂瀬葉子**, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”重み付き逆投影法による CT 像のアーチファクト抑制,” 2014 年第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 19a-PA3-1, p. 1-14, September 2014.

付録 A

円形トランスデューサからの放射音場

無限剛体バッフルに囲まれた円形トランスデューサからの放射音圧から，送-受トランスデューサ間の位相特性及び振幅特性を算出する．

Figure A.1 に示すような $z = 0$ 平面で，無限剛体バッフルに囲まれた半径 $a/2$ の円形ト

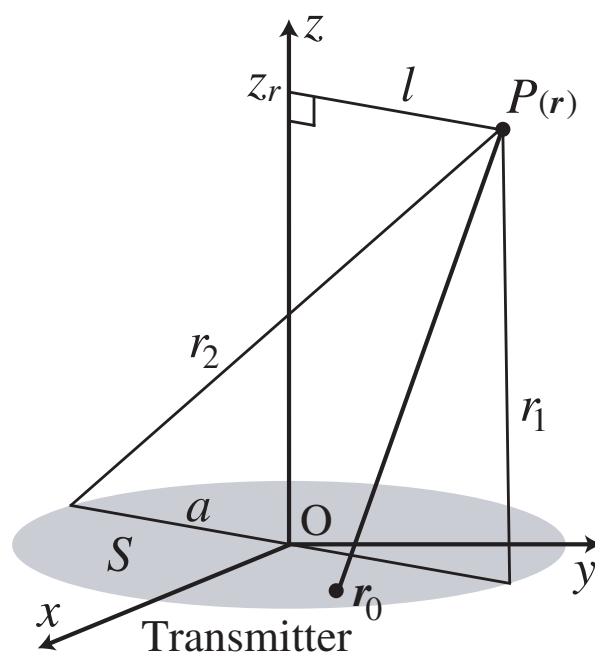


Fig. A.1 円形トランスデューサによる放射音場の概略図

ランスデューサが一様な速度 $v(t)$ でピストン振動している場合について考える．ランスデューサ開口面 S 上の任意の点を $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, 0)$ ，観測位置 \mathbf{r} と z 軸のなす角を θ ， \mathbf{r} における速度ポテンシャルを $\phi(\mathbf{r}, t)$ ， S からの空間インパルス応答を $h(\mathbf{r}, t)$ ，音速を c ，駆動角周波数を ω とする．円形ランスデューサからの放射音圧の解析には，しばしば第一種ベッセル関数 J_1 を含む以下の速度ポテンシャルの表現式が用いられる．

$$\Phi(\mathbf{r}, \omega) = \frac{V(\omega)}{2\pi|\mathbf{r}|} \pi(a/2)^2 \frac{2J_1((\omega/c)(a/2)\sin\theta)}{(\omega/c)(a/2)\sin\theta}. \quad (\text{A.1})$$

ただし， $V(\omega)$ は $v(t)$ のフーリエ変換を表す．この式は，遠距離場を仮定しているため遠方近似を含む式となっている．しかしながら，本研究では矩形面に配置した送受信器による計測を想定しており，送受信器間の距離がランスデューサ径に対して十分に大きいとは言えない箇所が存在する．よって近距離場においてランスデューサ開口面に起因する伝達特性を解析する必要がある．そこで微小音源による速度ポテンシャルをもとに，遠方近似を用いず円形ランスデューサからの放射音圧を厳密に算出する^{71,72,74}． \mathbf{r} における速度ポテンシャル $\phi(\mathbf{r}, t)$ は，以下のように駆動信号と空間インパルス応答のたたみ込みで表すことができる．

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{r}, t) &= \int_S \frac{1}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} v\left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c}\right) dx_0 dy_0, \\ &= \int_S \frac{1}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \int_0^t v(\tau) \delta\left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c} - \tau\right) d\tau dx_0 dy_0, \\ &= \int_0^t v(\tau) \int_S \frac{1}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \delta\left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c} - \tau\right) dx_0 dy_0 d\tau, \\ &= \int_0^t v(\tau) h(\mathbf{r}, t - \tau) d\tau, \\ &= v(t) * h(\mathbf{r}, t), \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

ただし，

$$h(\mathbf{r}, t) = \int_S \frac{1}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} v\left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c}\right) dx_0 dy_0. \quad (\text{A.3})$$

とする．また， δ はディラックのデルタ関数とする．ここで，伝搬媒質の密度を ρ とすると \mathbf{r} における音圧 $p(\mathbf{r}, t)$ は $\phi(\mathbf{r}, t)$ を用いて⁷³，

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, t) &= \rho \frac{\partial}{\partial t} \phi(\mathbf{r}, t), \\ &= \rho \frac{\partial}{\partial t} v(t) * h(\mathbf{r}, t). \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

ここで、 $v(t) = V_0 \exp(-j\omega t)$ の調和振動とすると、

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, t) &= -j\omega \rho v(t) * h(\mathbf{r}, t), \\ &= -j\omega \rho V_0 \exp(-j\omega t) \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} h(\mathbf{r}, \tau) \exp(j\omega \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

時間依存項を省略し、 τ を t に書き直すと

$$P(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega \rho V_0 H(\mathbf{r}, \omega). \quad (\text{A.6})$$

となり、複素音圧 $P(\mathbf{r}, \omega)$ が求まる。ただし、 $H(\mathbf{r}, \omega)$ は $h(\mathbf{r}, t)$ のフーリエ変換とする。

ここで、空間インパルス応答 $h(\mathbf{r}, t)$ は、観測位置 \mathbf{r} と時間 t における伝搬距離 ct によって Eqs. A.7–A.9 に示すように区分的に与えられる。これを用いることで、Eq. A.6 から遠方近似に依らない放射音圧が計算される。観測位置 \mathbf{r} と z 軸との距離は $l = \sqrt{x^2 + y^2}$ であり、観測位置 \mathbf{r} からトランスデューサの外周部までの最短距離を $r_1 = \sqrt{z_r^2 - (l + a/2)^2}$ 、最長距離を $r_2 = \sqrt{z_r^2 + (l + a/2)^2}$ とすると、空間インパルス応答 $h(\mathbf{r}, t)$ は以下のようなになる⁷⁴⁾。

(i) $l = 0$ のとき

$$h(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} 0 & (ct < z_r) \\ c & (z_r \leq ct < r_1), \\ 0 & (r_1 < ct) \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

(ii) $0 < l \leq a/2$ のとき

$$h(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} 0 & (ct < z_r) \\ c & (z_r \leq ct \leq r_1) \\ \frac{c}{\pi} \cos^{-1} \frac{(ct)^2 - z_r^2 + l^2 - (a/2)^2}{2l\sqrt{(ct)^2 - z_r^2}} & (r_1 \leq ct \leq r_2) \\ 0 & (r_2 < ct) \end{cases}, \quad (\text{A.8})$$

(iii) $a/2 < l$ のとき

$$h(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} 0 & (ct < r_1) \\ \frac{c}{\pi} \cos^{-1} \frac{(ct)^2 - z_r^2 + l^2 - (a/2)^2}{2l\sqrt{(ct)^2 - z_r^2}} & (r_1 \leq ct \leq r_2) \\ 0 & (r_2 < ct) \end{cases}, \quad (\text{A.9})$$