

超音波による角鋼片内部の欠陥可視化における  
計測コストの低減に関する研究

2016年 9月

角間 孝一

超音波による角鋼片内部の欠陥可視化における  
計測コストの低減に関する研究

角間 孝一

システム情報工学研究科

筑波大学

2016年 9月

## 概 要

世界第二位の粗鋼生産量を誇る日本において生産される粗鋼は、98 %以上が連続鋳造によるものである。その連続鋳造から生まれる角鋼片は、内部にパイプ、気泡等の欠陥を含むことがあり、その後作られる鉄鋼製品の品質保証や、製造工程へのフィードバックの観点から、内部欠陥の非破壊検査は重要である。現行の角鋼片の非破壊検査手法である、超音波パルスエコー法は、欠陥検出能力に難点があり、代替手法が求められている背景があった。本研究では、中でも縦波伝搬時間（TOF: time-of-flight）を用いる超音波計算機トモグラフィー（CT: computerized tomography）法に着目した。この TOF を用いる超音波 CT 法は、超音波トランスデューサのアレイで角鋼片の一断面を囲み、各トランスデューサ間にて超音波の計測を行い、CT によって断面における内部の可視化像を再構成する手法である。TOF を用いる超音波 CT 法は、同時送信による高速化、形状ひずみの影響の軽減、高減衰角鋼片への適用などが図られている背景があり、現行の手法の代替手法として用いられることが期待される。しかし、現段階においては、超音波の送受信回数が多いことや、トランスデューサアレイの走査間隔の最適化がなされていないこと等、計測コスト上の問題点があった。そこで本研究では、この計測コストに着目し、その低減を目的として、実験とシミュレーションによる検討を行った。

第 2 章では、TOF を用いる超音波 CT 法の原理を説明した後、次章への基礎検討として、送信信号や欠陥の可視化像に関するパラメータについてシミュレーションを行った。シミュレーション結果から、各パラメータ間の具体的な関係式が導出された。第 3 章では、TOF を用いる超音波 CT 法を用い、トランスデューサアレイの走査間隔の最適化に関する検討を行った。試験片に空けられた穴の先端近傍における可視化実験や、球状欠陥を含む角鋼片を想定した 3 次元シミュレーションにより、最適な走査間隔を決定した。第 4 章では、送受信回数の問題を取り上げ、時間反転波の導入により、送受信回数の軽減を図った。まず、時間反転波を利用する可視化手法の原理について説明し、比較的減衰の少ない試験片と、比較的減衰のある試験片を用いて実験を行い、可視化結果の比較を行った。結果として、少ない送受信回数で欠陥を可視化することに成功した。第 5 章では、以上の検討から、計測コストの低減が図られたことを述べた。



# 目 次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	角鋼片と内部欠陥	1
1.1.2	非破壊検査の方法	2
1.2	研究の目的と本論文の構成	4
第 2 章	TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥可視化	7
2.1	まえがき	7
2.2	超音波の計測方法	7
2.3	TOF を用いる超音波 CT 法の原理	8
2.3.1	TOF の変動量	9
2.3.2	CT 法による欠陥可視化	11
2.4	送信信号に対する可視化像の変化	13
2.4.1	波動伝搬の計算手法	13
2.4.2	シミュレーション条件	14
2.4.3	結果および考察	17
2.4.4	関係性に関する考察	19
2.5	むすび	22
第 3 章	計測面の走査間隔の最適化	23
3.1	まえがき	23
3.2	計測面の走査間隔	23
3.3	欠陥近傍における可視化像	24
3.3.1	シミュレーションと実験の条件	24
3.3.2	結果と考察	26

3.4	球状欠陥の3次元可視化と計測面の走査間隔 . . . . .	28
3.4.1	シミュレーションの条件 . . . . .	28
3.4.2	結果と考察 . . . . .	29
3.5	むすび . . . . .	31
第4章	時間反転波による欠陥可視化および送受信回数の低減	33
4.1	まえがき . . . . .	33
4.2	時間反転波による欠陥可視化の原理 . . . . .	33
4.2.1	超音波の送受信回数 . . . . .	33
4.2.2	欠陥からの散乱波 . . . . .	34
4.2.3	欠陥からの散乱波の抽出方法 . . . . .	37
4.2.4	時間反転波の逆伝搬による欠陥可視化 . . . . .	39
4.3	欠陥可視化実験 . . . . .	41
4.3.1	実験条件 . . . . .	41
4.3.2	ベーシックな手法との比較結果と考察 . . . . .	43
4.3.3	送受信回数による比較結果と考察 . . . . .	46
4.4	減衰材を用いる欠陥可視化実験と送受信回数に関する考察 . . . . .	47
4.4.1	実験条件 . . . . .	47
4.4.2	結果と考察 . . . . .	48
4.5	むすび . . . . .	50
第5章	結論	51
謝辞		53
参考文献		55

# 目 次

1.1	ビレットの検査方法の概観図. . . . .	4
2.1	計測方法の概観図. . . . .	8
2.2	TOF と相互相関関数の関係. . . . .	9
2.3	TOF の変動量の計算過程 : (a) トランスデューサ間の送受信, (b) 相互相関関数の計算, (c) TOF の変動量の算出. . . . .	10
2.4	超音波計測から CT 法による欠陥可視化までの過程 : (a) 各経路における計測, (b) 投影データの作成, (c) CT 法の適用, (d) 可視化像の取得. . . . .	11
2.5	実際の欠陥に対する欠陥像の例. . . . .	13
2.6	WE-FDTD 法における断面離散化の概念図. . . . .	15
2.7	シミュレーションの概要図 : (a) トランスデューサや欠陥の位置, (b) 送受信を行うトランスデューサ間を結ぶ経路. . . . .	16
2.8	パラメータの定義. . . . .	16
2.9	シミュレーション結果 : (a) 疑似音速分布, (b) $y = 0$ mm における疑似音速の変化. . . . .	17
2.10	関係性に関するシミュレーション結果 : (a) 欠陥径と疑似音速の低下量の関係, (b) 中心周波数と欠陥像の幅の関係, (c) 波長と欠陥像の幅の関係. . . . .	18
2.11	欠陥部分における回折によるの伝搬経路の違い : (i) 参照信号における直達波の経路, (ii) 計測信号における回折波の経路. . . . .	20
2.12	欠陥からの反射による伝搬経路の違い : (i) 参照信号における直達波の経路, (ii) 計測信号における直達波の経路, (iii) 計測信号における反射波の経路. . . . .	20
2.13	関係性のグラフとシミュレーション結果の比較 : (A) $d$ に対する $V/c_1$ , (B) $\lambda$ に対する $D$ . . . . .	21

3.1	先行研究におけるシミュレーションと実験の概観図：(a) 2次元断面上の円形欠陥の可視化シミュレーション，(b) 試験片に空けられた深穴欠陥の可視化実験．	24
3.2	想定しているビレットと欠陥の概観図：(a) ビレット，(b) 球状欠陥，(c) 深穴欠陥．	25
3.3	シミュレーションと実験の概要図：(a) 計測面と縦断面 A-A'，(b) 計測面に垂直な方向から見た欠陥，(c) 縦断面 A-A' に垂直な方向から見た欠陥．(i)，(iii) 実験とシミュレーションで用いる深穴欠陥．(ii)，(iv) シミュレーションで用いる球状欠陥．(i)，(ii) 欠陥が計測面と交差する場合，(iii)，(iv) 欠陥が計測面と交差しない場合．	26
3.4	実験とシミュレーションの結果（疑似音速分布と $y=0$ における疑似音速の変動）：(A) 欠陥と計測面が交差する場合，(B) 欠陥と計測面が交差しない場合．(a) 深穴欠陥の可視化実験，(b) 深穴欠陥の可視化シミュレーション，(c)，(c)' 球状欠陥の可視化シミュレーション．	27
3.5	隣り合う計測面における可視化像の例．	28
3.6	球状欠陥の3次元可視化シミュレーションの概要図．	29
3.7	シミュレーションの結果（疑似音速分布）：(A) 欠陥径 5 mm の場合，(B) 欠陥径 2 mm の場合．(a) $\Delta z = 0$ mm，(b) $\Delta z = 5$ mm，(c) $\Delta z = 10$ mm，(d) $\Delta z = 15$ mm，(e) $\Delta z = 20$ mm，(f) $y = 0$ mm．	30
3.8	欠陥の3次元可視化結果：(A) 欠陥径 5 mm，(B) 欠陥径 2 mm．	30
4.1	時間反転波を利用する手法で想定される超音波の計測方法．	34
4.2	参照信号と計測信号の比較（例）．	35
4.3	受信信号における振幅差，位相差の問題：(a) 参照面と計測面における送受波器の位置，(b) 対応する送信信号，参照信号，計測信号．	36
4.4	受信信号に対するパルス圧縮の適用．	38
4.5	包絡線検波から窓適用までの信号処理の過程：(a) 参照信号，(b) 包絡線の検出，(c) 閾値の設定，(d) 包絡線の逆数，(e) 生成された窓，(f) 窓適用後の計測信号．	39
4.6	ある送波位置に対する全ての参照信号，計測信号，窓，窓適用後の計測信号．	40
4.7	時間反転波の逆伝搬による欠陥可視化：(A) 時間反転波の逆伝搬および逐次エネルギー和の計算，(B) 送波器別エネルギー分布および欠陥の可視化像．	41
4.8	ジュラルミンの試験片を用いる欠陥可視化実験の概要図．	42



4.9	(A), (B), (C) における可視化結果 : (A) $E(\tilde{M}_i)$ による可視化, (B) $ E(M_i) - E(R_i) $ による可視化, (C) $E(M_i - R_i)$ による可視化. (i) 可視化像の比較, (ii) $y = 20$ mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iii) $x = 10$ mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iv) 欠陥のない領域におけるエネルギーのヒストグラム, (v) 欠陥のある領域におけるエネルギーのヒストグラム. . . . .	44
4.10	(A), (B), (C) の可視化像の評価結果 : (A) $E(\tilde{M}_i)$ による可視化, (B) $ E(M_i) - E(R_i) $ による可視化, (C) $E(M_i - R_i)$ による可視化. (I) 閾値に対する適合率と再現率のグラフ, (II) 閾値に対する F 値のグラフ, (III) F 値最大時の閾値における 2 値化像. . . . .	45
4.11	(a), (b), (c), (d) における可視化結果 : (a) $I = 10, 3J = 60$ , (b) $I = 20, 3J = 60$ , (c) $I = 10, 3J = 150$ , (d) $I = 20, 3J = 150$ . (i) 可視化像の比較, (ii) $y = 20$ mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iii) $x = 10$ mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iv) 欠陥のない領域におけるエネルギーのヒストグラム, (v) 欠陥のある領域におけるエネルギーのヒストグラム. . . . .	47
4.12	(a), (b), (c), (d) の可視化像の評価結果 : (a) $I = 10, 3J = 60$ , (b) $I = 20, 3J = 60$ , (c) $I = 10, 3J = 150$ , (d) $I = 20, 3J = 150$ . (I) 閾値に対する適合率と再現率のグラフ, (II) 閾値に対する F 値のグラフ, (III) F 値最大時の閾値における 2 値化像. . . . .	48
4.13	可視化像および最大 F 値となる閾値における 2 値化像 : (A) $I = 6$ , (B) $I = 8$ , (C) $I = 20$ . . . . .	49
4.14	先行研究において, TOF を用いる超音波 CT 法により得られた可視化像. 出典 : Y. Norose, et al. (2014): “Application of ultrasonic computerized tomography using time-of flight measured by transmission method to nondestructive inspection for high-attenuation billets.” . . . . .	49



# 表 目 次

1.1	欠陥の検出及び評価に対する音波・超音波を用いる非破壊試験手法の分類. 出典：横野泰和（2010）『溶接構造物の非破壊試験技術』 p.11（部分） . . . . .	3
4.1	必要なトランスデューサ数，送受信回数，送信回数の比較. . . . .	35
4.2	実験の条件. . . . .	42



---

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 角鋼片と内部欠陥

日本では現在，年間約 110Mt と，世界で 2 番目に多い粗鋼が生産されている．粗鋼の生産を司っている鉄鋼業は日本を支える大きな産業であり，国内においては，産業機械産業，自動車製造業，情報通信機器産業の基盤としての役割を果たしている<sup>1)</sup>．経済産業省の 2013 年の生産動態統計によれば，年間の粗鋼生産量が 110.594 Mt であるのに対して，連続鋳造によるものは 108.931 Mt と，実に全体の 98.49% が占められており<sup>2)</sup>，鉄鋼業における連続鋳造の重要性が伺える．

鉄鋼製品の原料である鉄鉱石やコークスは，高炉や転炉を経て溶鋼へと変わり，連続鋳造は，この溶鋼を一定の形状に冷え固める工程において用いられている<sup>3,4)</sup>．連続鋳造された半製品は角鋼片と呼ばれ，その後の圧延や加工等の工程を経て，線材・薄板・棒鋼・鋼管などに代表される様々な鉄鋼製品へと変わる．角鋼片は，形状や用途などにより，スラブ（厚さ 50 mm 以上，幅 300 mm 以上の板状鋼片），ブルーム（長さ 1～6 m，断面一辺 150～300 mm の角形の鋼片），ビレット（長さ 1～2.5 m，断面一辺 50～200 mm の角形または円形の鋼片），シートバー（長さ 1 m 以下，厚さ 50 mm 以下，幅 250 mm 程度の短冊状の鋼片）などと呼ばれている<sup>5,6)</sup>．角鋼片から作られる鉄鋼製品は，我々の生活には欠かせない自動車・ビル・船舶・橋梁などに使用される．

連続鋳造された角鋼片の表面や内部には，きずができることがある．きずは不全部や不連続部を指し示す用語で，ある判定基準に満たないきずは，欠陥と呼ばれる<sup>7)</sup>．角鋼片に発生する欠陥には，線状きず（表面上に生じる欠陥）やパイプ（内部に生じる欠陥）などがある．

内部欠陥に焦点をあてれば、パイプ、気泡、割れきず、中心偏析、非金属介在物など様々な種類の欠陥があり<sup>8,9)</sup>、最も発生率の高いのはパイプで全体の 1 割程度である<sup>10)</sup>。本研究では、発生率の高いパイプや気泡など円形の断面を持つもの、すなわち球状あるいは楕円球状のものを、欠陥として取り扱うものとする。これら欠陥は、空洞の大きさにより、ピンホールやブローホールという呼ばれ方がなされ、大きさの正確な定義は定められていないが、ピンホールは 1~5 mm 程度、ブローホールはそれ以上の欠陥とされる<sup>11,12)</sup>。

欠陥は、その後の圧延工程で圧着されて消える場合が大半であるが、一部は鉄鋼製品に残る恐れがある。鉄鋼製品に対して行われる検査において欠陥が発見された場合、製品を溶かして一から製造し直す必要があり、コスト面や環境面から、鉄鋼製品に欠陥が残ることは望ましくない。また、最終製品に欠陥が万が一残った場合、例えば直径 1 mm の欠陥であっても故障や破損に繋がる恐れがあり<sup>13)</sup>、最悪の場合は事故へと繋がることになる<sup>14)</sup>。従って、角鋼片の内部欠陥を非破壊検査し、角鋼片の段階でこれらを喰い止めることが得策と言える。近年は、鉄鋼製品に対する顧客からの要求が厳格化しており<sup>15)</sup>、品質レベルを高めるため、製造工程の改良による介在物低減など、様々な取り組みが成されている<sup>16-18)</sup>。角鋼片の非破壊検査は、品質保証、そして製造工程へのフィードバックという観点から、必要不可欠である。

### 1.1.2 非破壊検査の方法

角鋼片の内部欠陥に対して行われる非破壊検査には、放射線透過試験と超音波探傷試験がある<sup>19,20)</sup>。放射線は超音波に比べ波長が短く、微小な欠陥を区別する上では放射線の利用が望まれるが、減衰が大きく透過性に劣り、厚みのある金属には適用が困難とされる<sup>21)</sup>。また、放射線は人体に有害であるから、超音波探傷試験を用いることが一般的となっている。Table 1.1 に、音波・超音波を用いる非破壊試験手法の分類を示す<sup>22)</sup>。表に示すように、一口に超音波探傷試験と言っても、その原理、用途は様々である<sup>23-29)</sup>。超音波探傷試験には、主として反射法と透過法があるが<sup>30)</sup>、角鋼片の非破壊検査において現在用いられている手法は、反射法である超音波パルスエコー法である<sup>31-33)</sup>。パルスエコー法は、パルスを角鋼片に照射し、内部欠陥からの反射波（エコー）を捉え、反射波の振幅・タイミングから欠陥を検出・評価する手法である。超音波の内部散乱が激しい場合や、欠陥が微小でエコーが小さい場合、受信信号に含まれるエコーがノイズに埋もれてしまい、現行のパルスエコー法では欠陥検出困難な状況となることがある<sup>13)</sup>。従って、より欠陥検出能力（欠陥の有無を判別する能力）の高い手法が必要とされている。また、角鋼片から製造される鉄鋼製品の品質保証の観点から、欠陥検出能力に加え、欠陥の可視化（欠陥の位置・大きさ・形状などの情報を与える）を行う必要がある。

Table 1.1 欠陥の検出及び評価に対する音波・超音波を用いる非破壊試験手法の分類.

出典：横野泰和（2010）『溶接構造物の非破壊試験技術』p.11（部分）

原理	欠陥の検出及び評価
音波・超音波	超音波パルス反射法（UT） 垂直（縦波）探傷法，斜角（横波）探傷法 表面波探傷，板波探傷，クリーピング波探傷，ガイド波探傷，漏洩弾性表面波探傷（LSAW），表面 SH 波探傷 特殊探触子（集束形，二振動子形，縦波斜角） 水浸法，局部水浸法，端部エコー法 信号処理，画像化及び自動化（フェーズドアレイ（電子走査形），TOFD 法，ホログラフィ，開口合成法，CT） 減衰法，周波数分析（スペクトロスコピー），非線形超音波 非接触 UT（電磁超音波（EMAT）レーザ UT，空中 UT） 超音波顕微鏡（SAM，SLAM） アコースティックエミッション（AE）

このような背景から，先行研究において，縦波伝搬時間（TOF: time-of-flight）を用いる超音波計算機トモグラフィー（CT: computerized tomography）法（以下，TOF を用いる超音波 CT 法）が提案されている<sup>34,35</sup>．TOF を用いる超音波 CT 法は透過法であり，一方の超音波トランスデューサからパルスを角鋼片内部に照射し，もう一方の超音波トランスデューサでその信号を受信する．内部欠陥により生じる TOF の変動量を計測し，これを投影データとして CT を適用することで，内部欠陥を可視化することができる．原理の詳細については，第 2 章にて説明する．TOF を用いる超音波 CT 法の特徴は，同時送信による計測の高速化が図られていること<sup>36</sup>，形状ひずみの影響を軽減するための対応がなされていること<sup>37</sup>，高減衰角鋼片内部の欠陥検出が可能であること<sup>38</sup>，等が挙げられる．Figure 1.1 に，TOF を用いる超音波 CT 法による角鋼片の検査の概要図を示す．図中の角鋼片は，正方形断面を持つビレットである．Figure 1.1 に示すように，角鋼片の一断面を取り囲むように超音波トランスデューサアレイは配置され，アレイに組み込まれた各トランスデューサ間で超音波計測を行い，最終的にその断面の可視化像を取得する．本研究においては，図中の角鋼片および検査方法を前提とする．

TOF を用いる超音波 CT 法には，欠陥の可視化像を取得する際に必要とする計測コストに

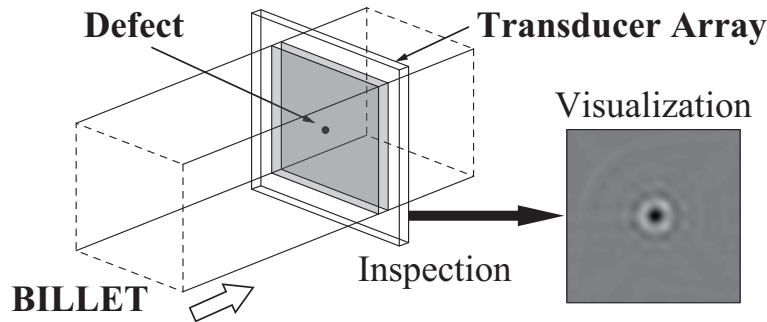


Fig. 1.1 ビレットの検査方法の概観図.

関して課題が残されている．ここで計測コストとは，欠陥の可視化に必要な超音波トランスデューサの数，トランスデューサ間における超音波の送受信回数や送信回数，トランスデューサアレイの走査間隔などを総称する言葉である．例えば，超音波の送受信回数が多いこと，トランスデューサアレイの走査間隔が狭いことは，長い検査時間を要することから，計測コストが大きいと言える．本研究では，この計測コストの低減がテーマとなる．

## 1.2 研究の目的と本論文の構成

本研究の目的は，TOF を用いる超音波 CT 法による角鋼片（ビレット）内部に含まれる欠陥（ピンホールやブローホール）の可視化手法をベースとして，同様の検査方法を取る手法において，計測コストの低減を図ることである．本論文の構成は，以下の通りである．

第 2 章では，超音波の計測方法，TOF を用いる超音波 CT 法の原理について述べる．さらに，第 3 章の基礎検討として，送信信号や欠陥の可視化像に関するパラメータについてシミュレーションを行い，パラメータ間の具体的な関係性を明らかにする．パラメータとは，中心周波数，欠陥径，可視化像に写る欠陥像の幅，可視化像の欠陥部分における値の変化量などを指している．

第 3 章では，TOF を用いる超音波 CT 法を用い，トランスデューサアレイの走査間隔の最適化に関する検討を行う．具体的には，試験片を用いる実験による深穴の先端部分における可視化像の比較，あるいは，3次元シミュレーションによる球状欠陥近傍および深穴欠陥先端近傍における可視化像の比較を行う．得られた結果から，トランスデューサアレイの走査間隔に関して議論する．

第 4 章では，送受信回数の問題を取り上げ，時間反転波の導入により送受信回数の低減を図る．初めに，時間反転波を利用する可視化手法の原理について説明する．試験片を用いる実験を行い，実際に欠陥を可視化する．この実験では，ベーシックな手法との比較，送受信回数に



よる比較を行う。さらに、減衰のある試験片を用いて、欠陥の可視化を試み、可視化像を比較する。最終的に、送受信回数を低減した上で欠陥を可視化できることを示す。

第5章では、本研究の内容に関して結論を述べる。



---

## 第 2 章

# TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥可視化

### 2.1 まえがき

本章では、本研究においてベースとなる手法である、TOF を用いる超音波 CT 法による欠陥可視化の原理について説明する。原理は、TOF の変動量の計測、CT による画像再構成の大きく 2 つのステップに大別される。原理を説明した後、第 3 章の基礎検討にあたる、欠陥像に関わるパラメータの関係性について検討を行う。各パラメータを変えた際に得られる可視化像をシミュレーションにより取得し、関連のあるパラメータ間の関係式を導出する。

### 2.2 超音波の計測方法

TOF を用いる超音波 CT 法は、2 つの超音波トランスデューサの間でパルスを送受信する透過法である。角鋼片内部を伝搬する超音波に対して欠陥が与える影響を捉えることで、欠陥の検査を可能とする。Figure 2.1 に、超音波の計測方法の概観図を示す。現在計測中の断面を計測面、いくつか前に計測された断面を参照面と呼ぶ。実際は、Fig. 1.1 のように、トランスデューサアレイが固定され、角鋼片が移動していくことになるが、ここでは便宜上角鋼片が固定されて計測面が長手方向に走査されていると考える。計測面の周囲には、送受波兼用の超音波トランスデューサが並んでおり、対となるトランスデューサ間において、超音波の送受信が行われる。計測面における受信信号は計測信号、参照面における受信信号は参照信号と呼ばれる。

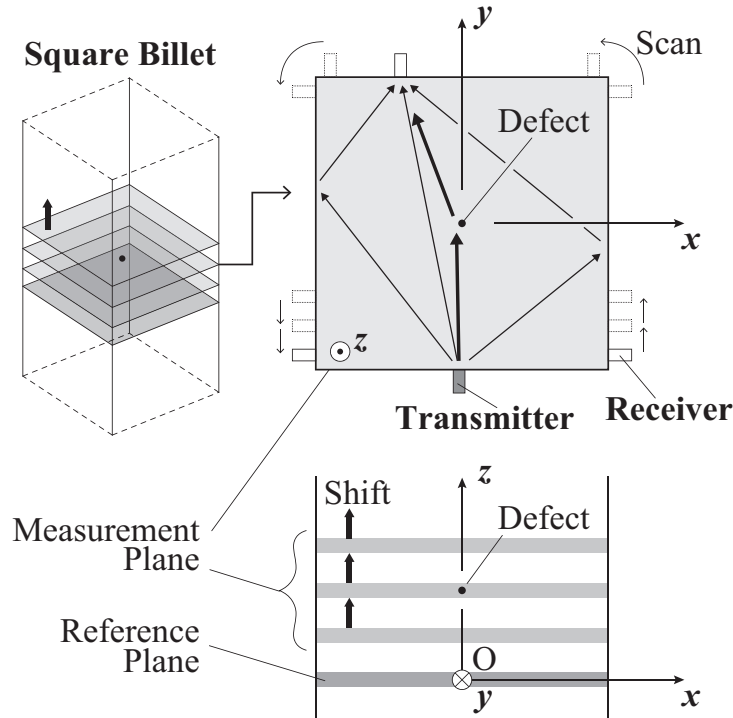


Fig. 2.1 計測方法の概観図.

送信信号には、リニアアップチャープ信号が用いられる.

$$s(t) = \sin \left[ 2\pi \left( f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2T_s} t \right) t \right], 0 \leq t \leq T_s. \quad (2.1)$$

ここで、 $t$  は時間、 $f_0$  は初期周波数、 $f_1$  は終端周波数、 $T_s$  は信号長である. ただし、計測時間を  $T$  とすれば、 $T_s \leq T$  である. チャープ信号は信号対雑音比が良く、実験において雑音の影響を抑制できる信号である<sup>39)</sup>. 従って本研究では、送信信号にこのチャープ信号を利用する. Figure 2.2 に、TOF と相互相関関数の関係を示す. 図の通り TOF は、送信開始から信号到達までの時間であり、送信信号と受信信号の相互相関関数のピークまでの時間に相当する. チャープ信号には、相互相関関数のピークを際立たせる役割がある.

## 2.3 TOF を用いる超音波 CT 法の原理

TOF の変動量とは、参照面における受信信号を基準として、計測面の受信信号の位相がどれだけ変動したかを表す値である. ある一対のトランスデューサ間について考えれば、計測信号と参照信号の相互相関関数を計算し、ピークが最大となる時間を計算することで、TOF の変動量は求められる. CT 法は、不均一な音速分布を持つ媒質などを再構成する際に用いられ

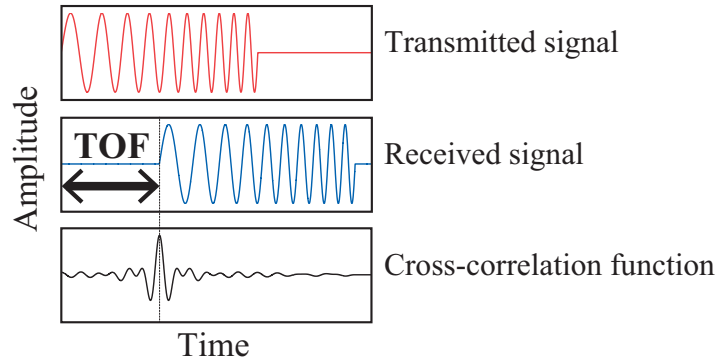


Fig. 2.2 TOF と相互相関関数の関係.

ることが一般的であることから、本手法においても、音速分布を可視化像として用いている。音速分布における音速変動位置、音速変動量などを評価することで、欠陥を検査することが可能となる。ただし、欠陥による音速変動は見かけ上の変動であるから、この可視化像は疑似音速分布と呼ばれている。

### 2.3.1 TOF の変動量

TOF の変動量の計測について、説明を行う<sup>40,41)</sup>。Figure 2.3 に、TOF の変動量の計算過程を示す。ある送受波器間における超音波の送受信を考える。ただし、計測面と参照面においては、同等の経路にて計測が行われるものとする。このとき、その送受波器間を結ぶ直線経路と、計測面上にある欠陥との位置関係から、次の3つの場合が考えられる。

- Case 1 : 直線経路と欠陥の距離が一定以上に離れている場合、または、欠陥がない場合。
- Case 2 : 直線経路上に欠陥が存在する場合。
- Case 3 : 直線経路の近傍に欠陥が存在する場合。

ここで、上記3つの場合において、送信開始から縦波伝搬時間が経過した直後の受信信号について考える。ただし、角鋼片の表面からの反射波や、他の欠陥からの散乱波などは、ここでは除いて考える。Case 1 の場合、一方から送信された超音波の直達波が受波される。参照面においても直達波が受波されるため、初期段階における計測信号と参照信号は、理論上は一致する。Case 2 の場合、欠陥を回り込んで到達する回折波が受波される。Case 3 の場合、直達波と欠陥からの散乱波とが重なった干渉波が受波される。

TOF の変動量の計算には、相互相関関数が用いられる<sup>42)</sup>。 $t, \tau$  を時間、 $T$  を計測時間、参照信号を  $r(t)$ 、計測信号を  $m(t)$  とすると、相互相関関数  $R(\tau)$ 、および、TOF の変動量  $\Delta T$

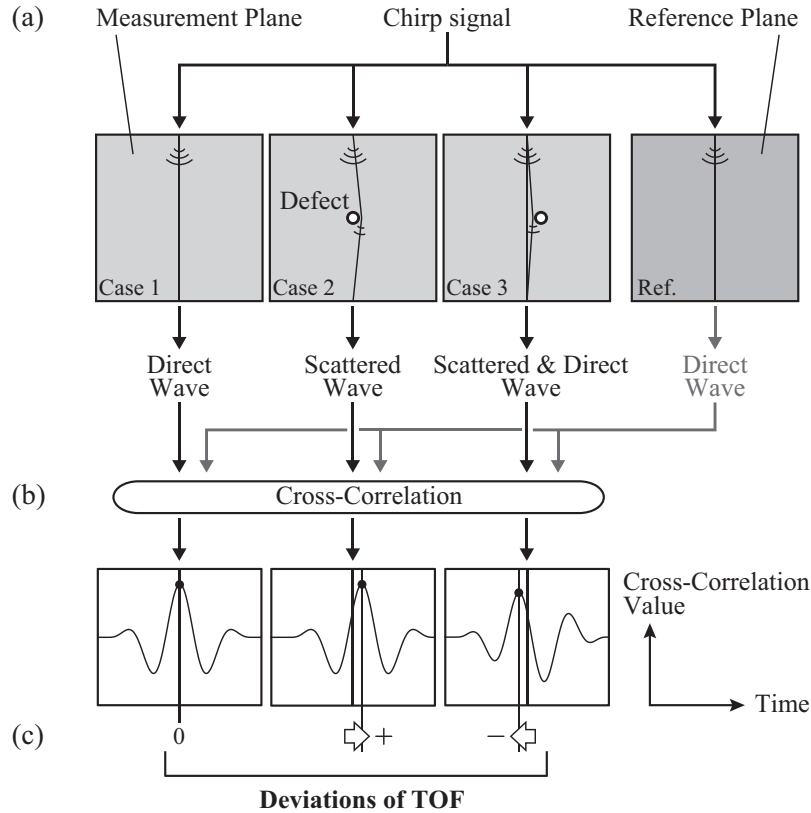


Fig. 2.3 TOF の変動量の計算過程 : (a) トランスデューサ間の送受信, (b) 相互相関関数の計算, (c) TOF の変動量の算出.

は、以下の式で表される。

$$R(\tau) = \int_0^T r(t)m(t+\tau)dt, \quad -T \leq \tau \leq T. \quad (2.2)$$

$$\Delta\tau = \operatorname{argmax}_{-T \leq \tau \leq T} [R(\tau)]. \quad (2.3)$$

相互相関関数  $R(\tau)$  は、 $\tau$  を変化させた際の、 $m(t)$  の  $r(t)$  に対する類似度を表している。 $\operatorname{argmax}$  は、入力された関数が最大となる定義域上の集合を求める関数である。上式においては、相互相関関数がピークとなる、すなわち、類似度が最大となる  $\tau$  を求めるために、 $\operatorname{argmax}$  が用いられている。Figure 2.3 に話を戻すと、Case 1 においては、計測信号と参照信号が等しいため、 $\Delta\tau = 0$  である。Case 2 においては、伝搬時間の増加した回折波を受波しているため、 $\Delta\tau > 0$  である。Case 3 においては、直達波と散乱波の干渉の影響により相互相関ピークがマイナス側に立つため、見かけ上は  $\Delta\tau < 0$  となる。物理的には伝搬時間が減少することは起こり得ないが、本研究では欠陥情報の一部として負の  $\Delta\tau$  も利用する。

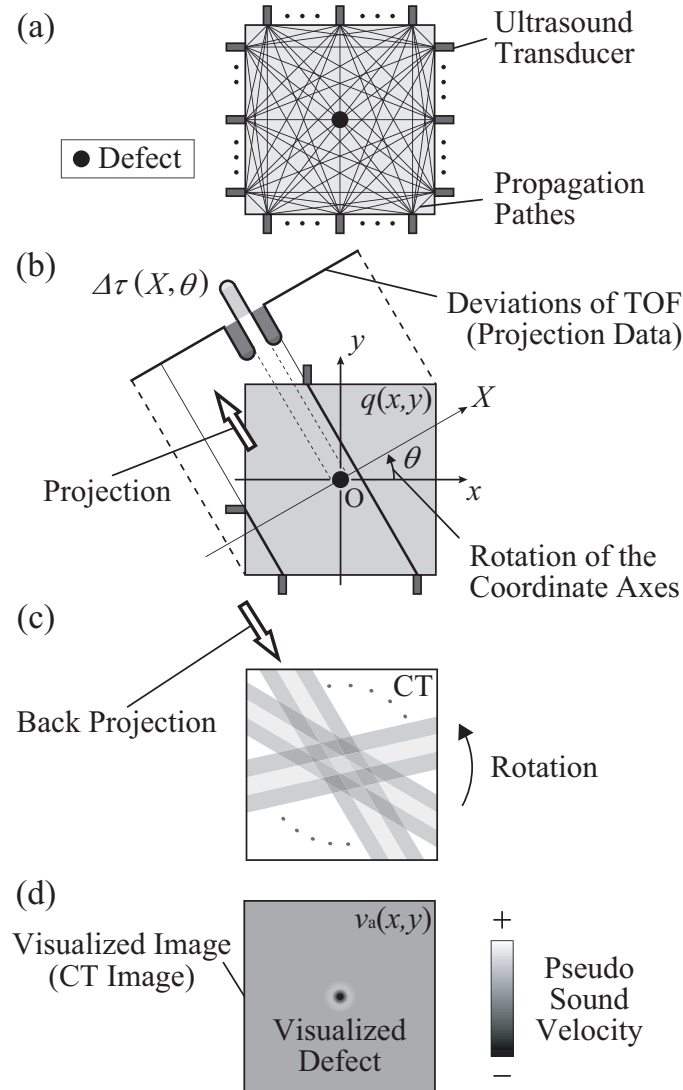


Fig. 2.4 超音波計測から CT 法による欠陥可視化までの過程 : (a) 各経路における計測, (b) 投影データの作成, (c) CT 法の適用, (d) 可視化像の取得.

### 2.3.2 CT 法による欠陥可視化

TOF の変動量に対して CT 法を適用することで行われる欠陥の可視化について、説明を行う<sup>41,43</sup>). Figure 2.4 に、CT 法による欠陥可視化までの過程を示す。計測面と参照面の周囲には超音波トランスデューサが配置され、各トランスデューサ間において超音波の送受信が行われる。得られる受信信号から TOF の変動量が計算され、投影データとして整頓される。座標  $(x, y)$  を  $\theta$  回転させた座標を  $(X, Y)$  とすると、投影データは  $\Delta\tau(X, \theta)$  と表現できる。横

軸  $X$ ，縦軸  $\theta$  として投影データ  $\Delta\tau(X, \theta)$  をまとめた行列はサイノグラムと呼ばれ，上記の計測方法の場合，サイノグラム上には不等間隔にデータが並ぶことになる．画像再構成には，等間隔なサイノグラムが必要であるため，キュービックスプライン補間を用いてデータを補間し，等間隔なサイノグラムを得る．

CT 法は，逆ラドン変換に基づき，投影データ  $\Delta\tau(X, \theta)$  から対象データ  $q(x, y)$  を再構成する手法である<sup>44)</sup>． $q(x, y)$  は，断面内における単位距離あたりの TOF の変動量を表しており，欠陥とその周囲において値が変化する分布である．投影データ  $\Delta\tau(X, \theta)$  と対象データ  $q(x, y)$  の関係を，以下に示す．

$$\begin{aligned}\Delta\tau(X, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) dY, \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} q(X \cos\theta - Y \sin\theta, X \sin\theta + Y \cos\theta) dY.\end{aligned}\quad (2.4)$$

画像再構成には，フィルタ補正逆投影（FBP: Filtered back-projection）法を用いる．対象データ  $q(x, y)$  の 2 次元フーリエ変換  $Q(u, v)$  は，極座標表示  $(\omega, \theta)$  により  $Q(\omega \cos\theta, \omega \sin\theta)$  と表すことができ，以下に示すように  $\Delta\tau(X, \theta)$  の  $X$  に関する 1 次元フーリエ変換に帰着させることができる．

$$\begin{aligned}Q(\omega \cos\theta, \omega \sin\theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(X \cos\theta - Y \sin\theta, X \sin\theta + Y \cos\theta) dY \exp(-j\omega X) dX, \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \Delta\tau(X, \theta) \exp(-j\omega X) dX.\end{aligned}\quad (2.5)$$

最終的に， $Q(\omega \cos\theta, \omega \sin\theta)$  の 2 次元フーリエ逆変換を求めることで，対象データ

$$q(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} Q(\omega \cos\theta, \omega \sin\theta) \exp(j\omega X) |\omega| d\omega d\theta.\quad (2.6)$$

が得られる．ただし，受信信号に含まれる雑音の影響で再構成画像に現れるアーチファクトを抑制するため，実際には  $|\omega|$  に対し Shepp-Logan フィルタを作用させ，高周波成分を減衰させる．

本節の冒頭で述べた通り，CT 法は音速分布の再構成に用いるのが一般的であるため，本研究もこれに従い，対象データ  $q(x, y)$  を疑似音速分布  $v_a(x, y)$  に変換する．角鋼片の縦波音速を  $c_1$  とすると，疑似音速分布は

$$v_a(x, y) = \frac{1}{q(x, y) + c_1^{-1}}.\quad (2.7)$$

と表すことができる．欠陥位置において疑似音速は低下し， $v_a(x, y) < c_1$  となる．欠陥周囲においては，TOF の変動量の計算における Case 3 の影響により疑似音速が増加し， $v_a(x, y) > c_1$



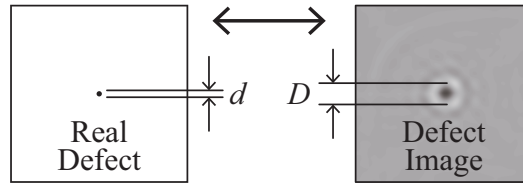


Fig. 2.5 実際の欠陥に対する欠陥像の例.

となる．欠陥の無いところでは  $v_a(x, y) = c_1$  となる．従って，疑似音速分布により欠陥の可視化が可能となる．

## 2.4 送信信号に対する可視化像の変化

可視化像における欠陥は，TOF の負の変動量の影響で，実際の欠陥とはサイズが異なって写り込む．Figure 2.5 に，実際の欠陥と欠陥像の例を示す．先行研究において，送信信号の中心周波数が欠陥の大きさに影響していることは明らかにされているが<sup>40)</sup>，これまで具体的な関係式は導出されてこなかった．関係式の導出は，TOF を用いる超音波 CT 法の基本を理解する上で，また実用上において，重要だと言える．そこで，いくつかの条件において欠陥可視化シミュレーションを行い，欠陥像の幅，実際の欠陥径，中心周波数（あるいは波長），疑似音速の低下量の各パラメータの関係性を調べ，関係するパラメータ間の関係式を導出する<sup>41)</sup>．

### 2.4.1 波動伝搬の計算手法

角鋼片内部における超音波の波動伝搬の計算には，波動方程式に基づく時間領域有限差分 (WE-FDTD: Wave equation finite difference time domain) 法を用いる<sup>45,46)</sup>．WE-FDTD 法は，差分化された時空間内における音圧のみを計算する手法であり，粒子速度と音圧を交互に計算する時間領域有限差分 (FDTD: Finite difference time domain) 法<sup>47-49)</sup> に比べ，粒子速度の計算が不要な分，計算量を少なく済ませることができる．TOF を用いる超音波 CT 法では，受信信号に含まれる縦波成分を利用して，TOF の変動量の算出および欠陥の可視化を行うため，縦波のみの波動伝搬を計算する WE-FDTD 法の利用が適している．

縦波音速を  $c_1$ ，音圧を  $p$  とするとき，2, 3 次元の波動方程式は，それぞれ

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_1^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right), \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_1^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right), \quad (2.9)$$

と表される．これらを，2 次精度の中央差分で差分化して得られる更新式は，

$$\begin{aligned}
 p^{n+1}(i, j) = c_1^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta l^2} \\
 \{p^n(i+1, j) + p^n(i-1, j) + p^n(i, j+1) + p^n(i, j-1) - 4p^n(i, j)\} \\
 + 2p^n(i, j) - p^{n-1}(i, j), \tag{2.10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p^{n+1}(i, j, k) = c_1^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta l^2} \\
 \{p^n(i+1, j, k) + p^n(i-1, j, k) + p^n(i, j+1, k) + p^n(i, j-1, k) \\
 + p^n(i, j, k+1) + p^n(i, j, k-1) - 6p^n(i, j, k)\} \\
 + 2p^n(i, j, k) - p^{n-1}(i, j, k), \tag{2.11}
 \end{aligned}$$

である．ここで， $\Delta t$  は時間離散幅， $\Delta l$  は空間離散幅， $n$  はステップ数， $i, j, k$  は  $x, y, z$  軸方向のインデックスである． $p^n(i, j)$  および  $p^n(i, j, k)$  は，2 次元平面あるいは 3 次元空間の格子点における音圧を表している．計算中に解を発散させないために，2, 3 次元それぞれにおいて以下の CFL (Courant-Friedrich-Levy) 安定条件を満たす必要がある．

$$c_1 \frac{\Delta t}{\Delta l} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}. \tag{2.12}$$

$$c_1 \frac{\Delta t}{\Delta l} \leq \frac{1}{\sqrt{3}}. \tag{2.13}$$

Figure 2.6 に，WE-FDTD 法における 2 次元断面の離散化の概念図を示す．角鋼片内部は外部に比べ音響インピーダンスが高いため，内部を伝搬している超音波は角鋼片表面にて固定端反射するものと，簡素化して捉えることができる．また，内部欠陥を空洞と考えれば，欠陥部分を角鋼片表面と同様に捉えられる．従って，角鋼片の表面および欠陥は，音圧 0 として計算する．

## 2.4.2 シミュレーション条件

Figure 2.7 にシミュレーションの概要図を示す．角鋼片の材質は鉄（縦波音速  $c_1 = 5,950$  m/s<sup>50)</sup> とし，断面形状は  $100 \times 100\text{mm}^2$  の正方形とする．断面の中心を原点とする  $x, y$  の 2 軸の直交座標系を考えれば，領域は mm 単位で  $[-50, 50] \times [-50, 50]$  となる．欠陥は直径  $d = 1, 2, 3, 4, 5$  mm の円形欠陥を想定し，計測面の中心，すなわち座標  $(0, 0)$  に位置するものとする．送信信号には，中心周波数  $f_c = 1, 2, 3, 4, 5$  MHz，周波数掃引幅 1 MHz，信号長  $5 \mu\text{s}$  のリニアアップチャープ信号を用いる．この送信信号には，ハニング窓を掛け合わせ

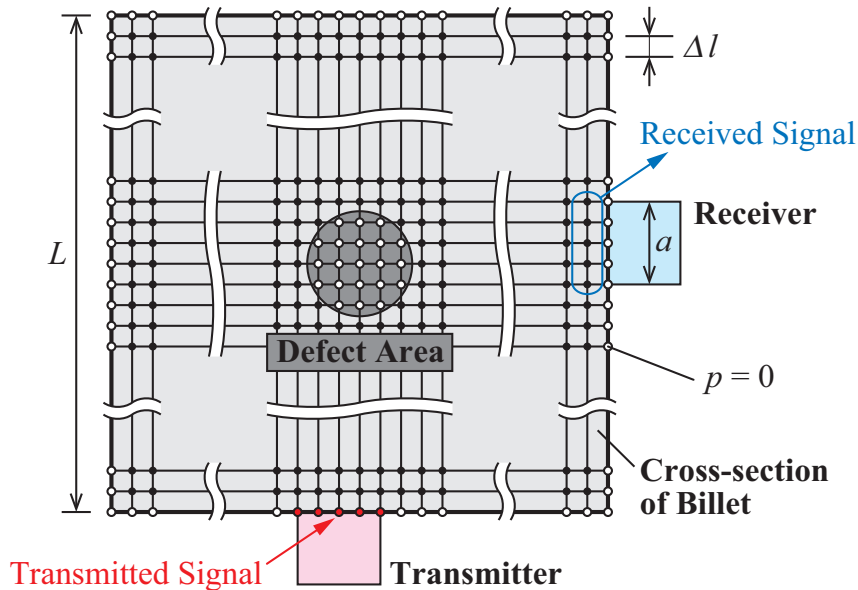


Fig. 2.6 WE-FDTD 法における断面離散化の概念図.

ている。断面の周囲の一辺あたり 50 個の超音波トランスデューサが均等配置されている状況を仮定し、対となるトランスデューサの組み合わせで、各々送受信を行う。組み合わせの数は  $50 \times 50 \times 6 = 15,000$  対であり、受波器側がアレイ状で同時受信できるものとすれば、送信回数は  $50 \times 3 = 150$  回となる。

超音波の波動伝搬の計算には、2次元の WE-FDTD 法を用いる。空間離散幅  $\Delta l = 0.05$  mm として、計測面あるいは参照面を  $2001 \times 2001$  の格子点に分割する。 $c_1 \Delta t / \Delta l = 1/\sqrt{2}$  とすれば、 $\Delta t \simeq 0.00594 \mu\text{s}$  となる。計測時間は、断面内の端から端まで超音波が十分に到達する  $30 \mu\text{s}$  とし、ステップ数に換算すると 5049 回となる。領域内に印加される送信信号の最高周波数は  $5 + 0.5 = 5.5$  MHz であり、角鋼片内部における縦波の波長に換算すると約 1.08 mm となる。これは  $\Delta l$  の 20 倍以上であるから、空間離散幅による計算誤差は小さいと見なせる。送信信号は、点音源とする。

Figure 2.8 に各パラメータの定義の概念図を示す。比較対象のパラメータは、欠陥像の幅  $D$ 、実際の欠陥径  $d$ 、中心周波数  $f_c$  および空間内における縦波の波長  $\lambda$ 、疑似音速の低下量  $V$  である。欠陥像の幅の定義方法はいくつか考えられるが、ここでは、疑似音速分布を  $y = 0$  mm でグラフ化し、欠陥の中心がある  $x = 0$  mm に最寄りの正のピーク 2 つを特定し、それらピーク間の距離を欠陥像の幅と定義する。サイノグラムは、キュービックスプライン補間により補間する。その後の画像再構成においては、空間の離散幅を 1 mm、角度の離散幅を 1 deg とし、周波数領域におけるフィルタリングには Shepp-Logan フィルタ (係数 1) を用いる。

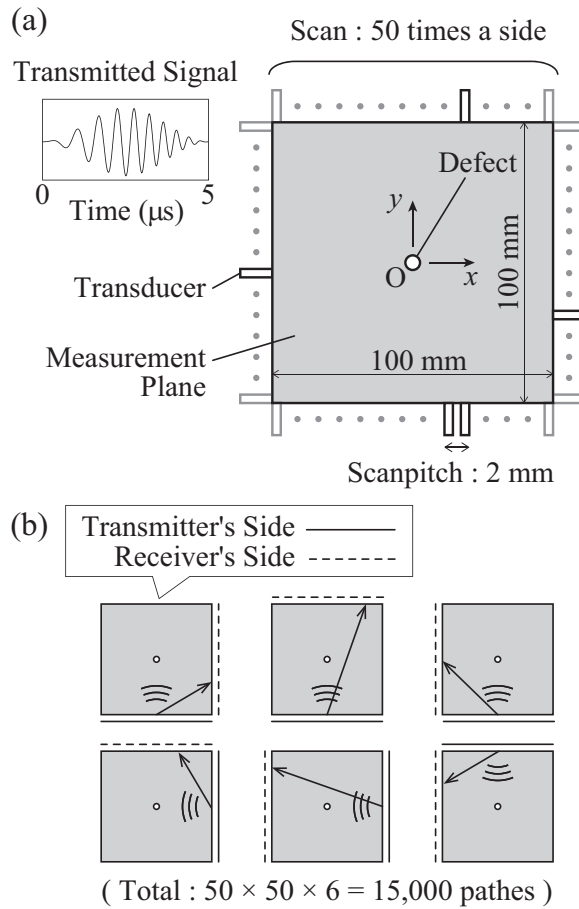


Fig. 2.7 シミュレーションの概要図：(a) トランスデューサや欠陥の位置，(b) 送受信を行うトランスデューサ間を結ぶ経路。

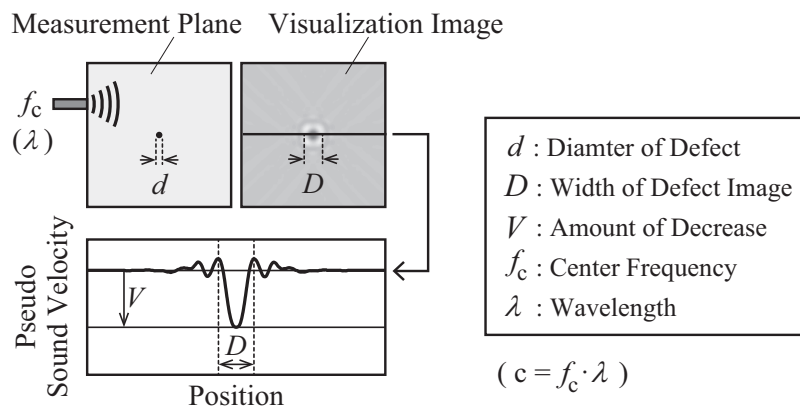


Fig. 2.8 パラメータの定義。

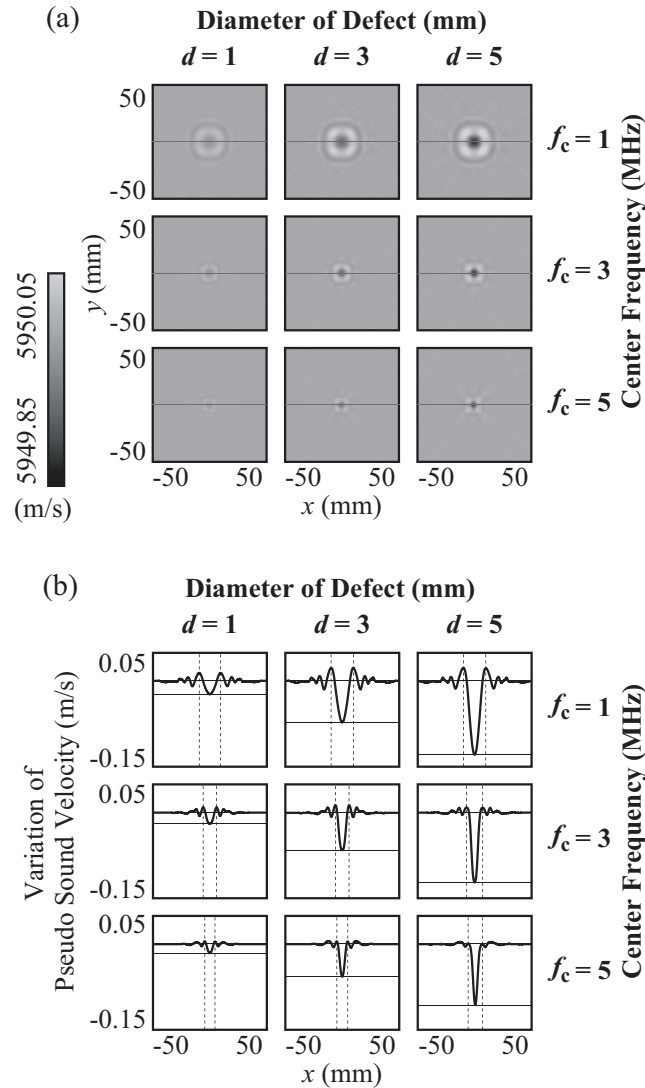


Fig. 2.9 シミュレーション結果：(a) 疑似音速分布，(b)  $y = 0$  mm における疑似音速の変化。

### 2.4.3 結果および考察

Figure 2.9 に、シミュレーションの結果を示す。Figure 2.9(a) には、一部の条件における可視化像の比較を、Fig. 2.9(b) には、可視化像を  $y = 0$  mm についてグラフ化したものを示している。実際の欠陥径  $d$  の大きさに対応して、可視化像の欠陥部分における疑似音速の低下量  $V$  が大きくなっていくことが分かる。また、中心周波数  $f_c$  の増加に対応して、欠陥像の幅  $D$  は狭くなっていくことが分かる。一方で、欠陥径の変化に対する欠陥像の幅の変化、および、中心周波数の変化に対する疑似音速の低下量の変化は、いずれも顕著でないことが分かる。

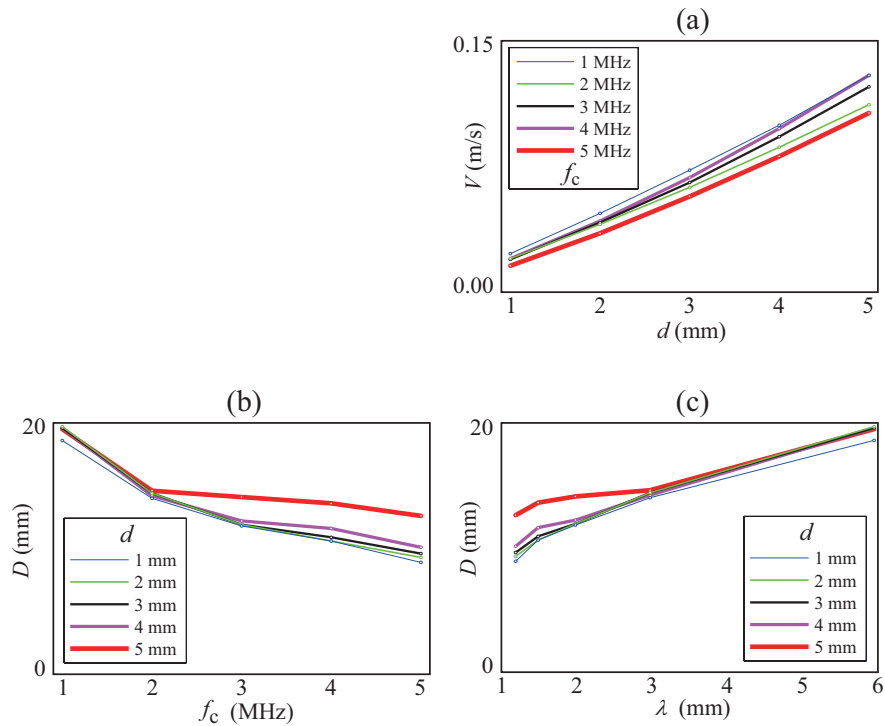


Fig. 2.10 関係性に関するシミュレーション結果：(a) 欠陥径と疑似音速の低下量の関係，  
 (b) 中心周波数と欠陥像の幅の関係，(c) 波長と欠陥像の幅の関係。

Figure 2.10 に、関係するパラメータ間のグラフを示す。Figure 2.10(a) は、欠陥径に対する疑似音速の低下量の関係を表すグラフである。疑似音速の低下量は、欠陥径に対しておよそ線形に変化していることが分かる。この場合、疑似音速の低下量 (m/s) に対する、欠陥径 (mm) の関係式は、 $d = 40V + 0.20$  というように表すことができる。ここで疑似音速は、空間中の物理量のみに対応するものではなく、TOF の変動量  $\Delta\tau$  の算出方法や、その他の信号処理の方法等によっても変化する。従って、この関係式が一般式ではないことに注意されたい。仮に、ある計算過程に対して関係式が定められれば、欠陥径と疑似音速の低下量は線形関係にあることから、疑似音速の低下が見られる位置における、疑似音速の変動量によって、その位置の欠陥径を表すことが可能となる。

Figure 2.10(b) は、中心周波数に対する欠陥像の幅の関係を表すグラフである。欠陥像の幅は、中心周波数が増加するに連れて狭まっており、反比例のグラフにオフセットが乗ったような関係にあることが分かる。ここで、角鋼片内部を伝搬する超音波の縦波の波長  $\lambda$  は、中心周波数  $f_c$  と反比例関係 ( $c_1 = f_c \lambda$ ) にあることから、中心周波数に代わるパラメータとして波長を導入する。Figure 2.10(c) に、波長に対する欠陥像の幅の関係を表すグラフを示す。グラフ

から、欠陥像の幅は、波長に対しておよそ線形に変化していることが分かる。この場合、波長 (mm) に対する、欠陥像の幅 (mm) の関係式は、 $D = 0.95\lambda + 14$  というように表すことができる。この関係には、検査対象となる材料の物性と検査に用いる送信信号により、任意に欠陥像の幅を決定するという利用方法が考えられる。

#### 2.4.4 関係性に関する考察

シミュレーション結果から、「欠陥径  $d$ 」と「疑似音速の低下量  $V$ 」, 「縦波の波長  $\lambda$ 」と「欠陥像の幅  $D$ 」に、およそ線形の関係があることが分かった。本節では、なぜこのような関係にあるのかを、簡易なモデルを交えて考察する。

初めに、 $d$  と  $V$  の関係について考える。Figure 2.11 に、欠陥を通る伝搬経路における、参照信号と計測信号の違いを示す。Figures 2.11(i), 2.11(ii) は、参照信号と計測信号における伝搬経路を示している。図中の記号を用いれば、(i) の経路長は  $L_1 + L_2$ , (ii) の経路長は、

$$\left(L_1 - \frac{d}{2}\right) + \frac{\pi d}{4} + \frac{d}{2} \sin^{-1} \frac{d}{2L_2} + \sqrt{L_2^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (2.14)$$

である。(i) と (ii) の経路差を  $\delta_1$  とすれば、

$$\delta_1 = -\frac{d}{2} - L_2 + \frac{\pi d}{4} + \frac{d}{2} \sin^{-1} \frac{d}{2L_2} + \sqrt{L_2^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (2.15)$$

となる。ここで、Eq. (2.7) より、

$$\begin{aligned} V &= c_1 - \frac{1}{\delta_1/c_1 + c_1^{-1}}, \\ \frac{V}{c_1} &= \frac{1}{1 + \delta_1^{-1}}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

という関係があると考えられる。

次に、 $\lambda$  と  $D$  の関係について考える。Figure 2.12 に、欠陥近傍を通る伝搬経路における、参照信号と計測信号の違いを示す。Figures 2.12(i)–2.12(iii) は、参照信号における伝搬経路、計測信号における 2 つの伝搬経路を示している。図中の記号を用いれば、(i), (ii) の経路長は  $L_1 + L_2$ , (iii) の経路長は、

$$\sqrt{L_1^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + \sqrt{L_2^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad (2.17)$$

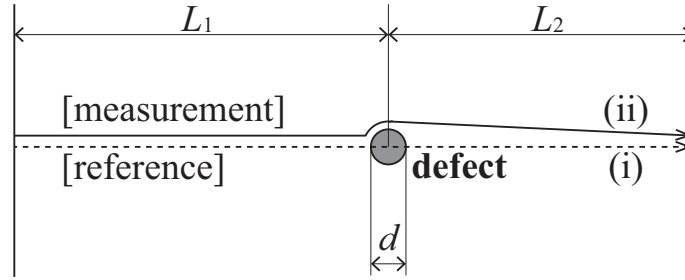


Fig. 2.11 欠陥部分における回折によるの伝搬経路の違い：(i) 参照信号における直達波の経路，(ii) 計測信号における回折波の経路.

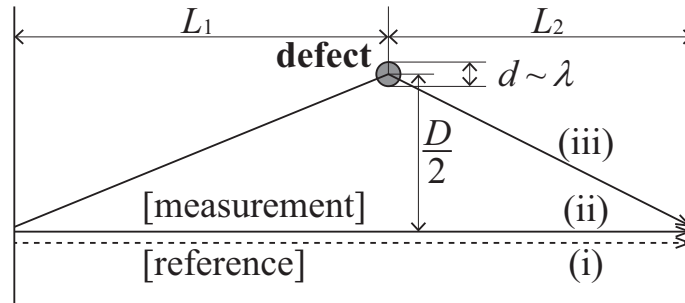


Fig. 2.12 欠陥からの反射による伝搬経路の違い：(i) 参照信号における直達波の経路，(ii) 計測信号における直達波の経路，(iii) 計測信号における反射波の経路.

である．(ii) と (iii) の経路差を  $\delta_2$  とすれば，

$$\delta_2 = \sqrt{L_1^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + \sqrt{L_2^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - L_1 - L_2, \quad (2.18)$$

となる．ここで，参照信号（直達波）と計測信号（直達波と欠陥からの反射波）の相互相関関数における波長は，およそ中心周波数の逆数に依存（やや周波数掃引幅に依存）する．欠陥からの反射波は，欠陥部分で位相が反転し，さらに直達波との経路差分，位相差が生じる．また，直達波に対する反射波の振幅は，直達波の経路と欠陥の位置関係により変化する．これを考慮して，実際に相互相関関数を計算して求めると，経路差がないときにピークは 0 の位置に立ち，経路差がおよそ  $1/f_c/4$  のときにピーク位置は最もマイナス側に振れ，およそ  $1/f_c/2$  のときに再びピークが 0 の位置に立つことを確認できる．従って， $1/f_c = \lambda/c_1$  より，

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \frac{\lambda}{c_1} &= \frac{\delta_2}{c_1}, \\ \lambda &= 4\delta_2, \end{aligned} \quad (2.19)$$



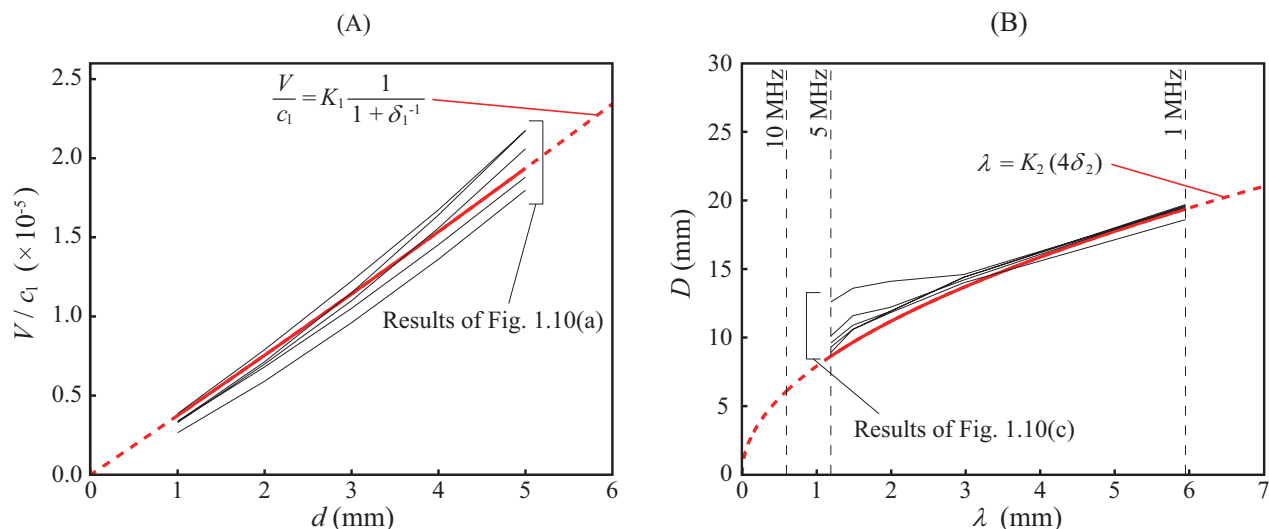


Fig. 2.13 関係性のグラフとシミュレーション結果の比較：(A)  $d$  に対する  $V/c_1$ , (B)  $\lambda$  に対する  $D$ .

の関係が成立すると考えられる。

以上の関係 Eqs. (1.16), (1.19) を元に描いたグラフと前節の結果の比較を, Fig. 2.13 に示す。図から, 描いたグラフとシミュレーション結果の傾向が一致していることを確認できる。図中の式における係数は  $K_1 = 0.013$ ,  $K_2 = 0.80$  とし,  $\delta_1, \delta_2$  は  $L_1 = 50$  mm,  $L_2 = 50$  mm として計算されている。ここで係数を与えているのは, 最終的な可視化像が複数経路で得られたデータの総合評価であり, 一経路のデータで  $V$  や  $D$  を計算し得ないためである。また, 計算過程によっても  $V$  や  $D$  は変化する。

Figure 2.13(A) には,  $d$  に対する  $V/c_1$  のグラフを示している。Eq. (1.16) と  $K_1$  から求めたグラフにおいて,  $d$  に対する  $V/c_1$  は比例関係にあることが分かる。やや下に凸なグラフになっているが, 対象とする欠陥径の範囲においては, 線形になることが分かる。Figure 2.13(B) には,  $\lambda$  に対する  $D$  のグラフを示している。Eq. (1.19) と  $K_2$  から求めたグラフは, 全体としては上に凸なグラフである。波長が短くなるにつれて,  $\lambda$  の変化に対する  $D$  の変化が激しくなっていることが分かる。図中には, 周波数 1, 5, 10 MHz に対応する縦波波長 (ただし  $c_1 = 5,950$  m/s として計算) の位置を示している。1 – 5 MHz の範囲に着目すると,  $\lambda$  の変化に対する  $D$  の変化は緩やかであり, 前節で述べた通り線形関係と見なすことができる。

## 2.5 むすび

本章では、TOF を用いる超音波 CT 法における計測方法と原理について説明した。また、欠陥像に関わるパラメータの関係性について、シミュレーションにより検討を行った。その結果、「欠陥径」と「疑似音速の低下量」、および、「中心周波数に対応する角鋼片内部の縦波の波長」と「欠陥像の幅」に、本研究の条件下において、線形の関係性が見られ、関係式が導出された。またここから、疑似音速の低下量を用いて欠陥の規模を表せること、および、検査に用いる送信信号から欠陥像の幅を任意に定められることを明らかにした。

---

## 第 3 章

# 計測面の走査間隔の最適化

### 3.1 まえがき

本章では，計測面の走査間隔の最適化を図るべく，実験とシミュレーションにより，欠陥近傍の複数の断面において可視化像を取得し，その比較を行う．まず，穴の空いた試験片による実験と，深穴欠陥および球状欠陥を角鋼片の内部に想定した 3 次元シミュレーションを行い，欠陥近傍でどのような可視化像が得られるのかを確認する．次に，球状欠陥を角鋼片の内部に想定した 3 次元シミュレーションを行い，欠陥の長手方向への影響を確かめるとともに，欠陥の 3 次元可視化を行う．また結果から，最適な計測面の走査間隔の決定方法について述べる．

### 3.2 計測面の走査間隔

計測面の走査間隔（以下，計測面間隔）について説明する．Figure 3.1 に先行研究においてこれまで実施されてきた，シミュレーションと実験の概観図を示す．Figure 3.1(a) はシミュレーションにおいて用いられてきた 2 次元断面，Fig. 3.1(b) は実験において用いられた試験片を表している．シミュレーションにおいては 2 次元断面に円形の空洞（円形欠陥）を空けることで，実験においては試験片にドリル穴（深穴欠陥）を空けることで，欠陥の代わりとしてきた．しかし，実際に含まれる欠陥は，深穴欠陥（あるいは円形欠陥）のように必ずしも長手方向へ長く連続した欠陥ばかりではなく，気泡のような球状欠陥が含まれる可能性もある．

球状欠陥は，計測面と必ずしも交差するとは限らない．計測面間隔を狭く取れば，球状欠陥と計測面は交差する可能性が高まるが，その分だけ計測コストが増す（計測すべき断面数の増加，あるいは，角鋼片の送り速度の低下につながる）<sup>51)</sup> こととなる．一方で，計測面間隔を広く取り過ぎれば，ある計測面と 1 回走査後の計測面との間において，球状欠陥を取りこぼす恐

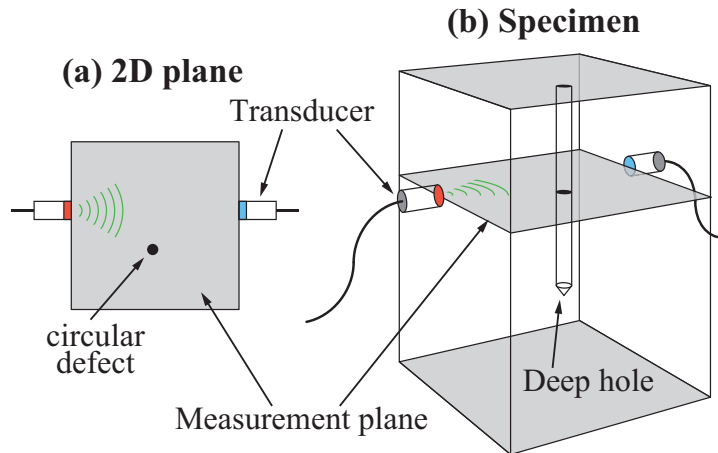


Fig. 3.1 先行研究におけるシミュレーションと実験の概観図：(a) 2次元断面上の円形欠陥の可視化シミュレーション，(b) 試験片に空けられた深穴欠陥の可視化実験。

れがある。従って，球状欠陥が計測面と次の計測面の間にある場合を考慮し，TOF を用いる超音波 CT 法における最適な計測面間隔を決定する必要がある。以降の節では，実験やシミュレーションにより，計測面間隔を決定するための検討を行っている。

### 3.3 欠陥近傍における可視化像

本節では，欠陥の近傍における可視化像に何が写るのかを確認する。そのために，3次元の球状欠陥と3次元の深穴欠陥を想定したシミュレーション，および，穴の空いた試験片を用いる実験<sup>52)</sup>を行い，それぞれの結果を比較する。

#### 3.3.1 シミュレーションと実験の条件

Figure 3.2 に対象とする角鋼片および欠陥を示す。Figure 3.2(a) に断面  $100 \times 100\text{mm}^2$  の角鋼片，Fig. 3.2(b) に球状欠陥，Fig. 3.2(c) に深穴欠陥を示す。材質は，ジュラルミン（縦波音速： $6,320 \text{ m/s}$ <sup>50)</sup>）とする。角鋼片の中心を原点とし，計測面の周囲にはトランスデューサを配置する。送信信号には，周波数 1-3 MHz，波数 10 波，信号長  $5 \mu\text{s}$  のアップチャープ信号を用いる。送信信号には，ハニング窓を適用する。

Figure 3.3 にシミュレーションと実験の概要図を示す。Figure 3.3(a) には計測面と縦断面 A-A'，Fig. 3.3(b) に z 軸方向から見た欠陥，Fig. 3.3(c) に x 軸方向から見た欠陥を示している。欠陥の直径は 2 mm で， $(x, y) = (0, 0)$  に存在するものとする。実験で扱うのは，Figs.

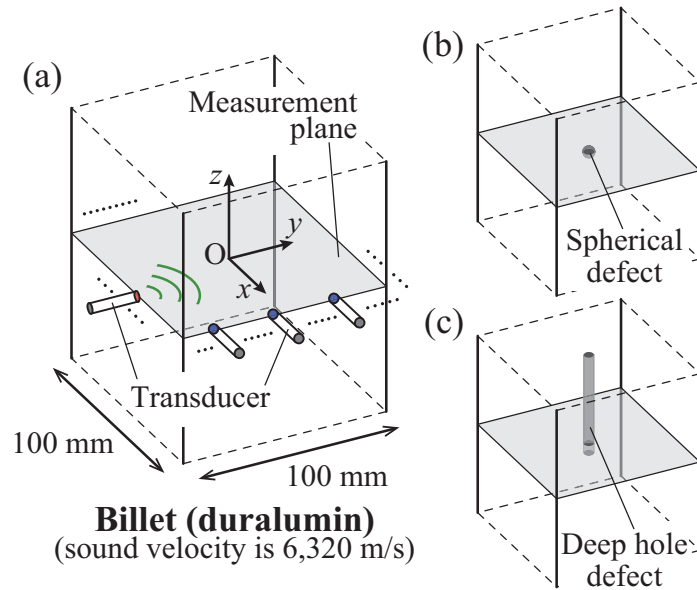


Fig. 3.2 想定しているビレットと欠陥の概観図：(a) ビレット，(b) 球状欠陥，(c) 深穴欠陥。

3.3(c-i), 3.3(c-iii) の深穴欠陥，シミュレーションで扱うのは，Figs. 3.3(c-i)–3.3(c-iv) の深穴欠陥および球状欠陥である．これにより，欠陥が計測面上にある場合と，欠陥が計測面の近傍にある場合における可視化像の比較が可能となる．トランスデューサは，スキャンピッチ 2 mm とする．

ここで，シミュレーション内容について説明する．シミュレーションには，3次元の WE-FDTD 法を用いる．空間の離散幅は 0.25 mm とし， $401 \times 401 \times 381$  のメッシュ空間にて波動伝搬を計算する．離散時間幅は約  $0.023 \mu\text{s}$  であり，ステップ数は 1301 (約  $29.690 \mu\text{s}$  相当) である．トランスデューサは点音源とし，計測面周囲の境界上の各点で得られる信号を受信信号とする．CT において，空間の離散幅を 1.6 mm，角度の離散角を 1 deg とし，サイノグラムの補間にはキュービックスプライン補間を，フィルタには Shepp-Logan フィルタ (係数 0.3) を用いる．

次に，実験内容について説明する．試験片には，断面の中心に直径 2 mm の穴が空けられたものを用いる．試験片を水中に沈め，トランスデューサと角鋼片の間に空気が入り込まない状態で実験を行う．トランスデューサには開口径 5 mm のものを使用し，対応するトランスデューサの位置にて送受信を行う．

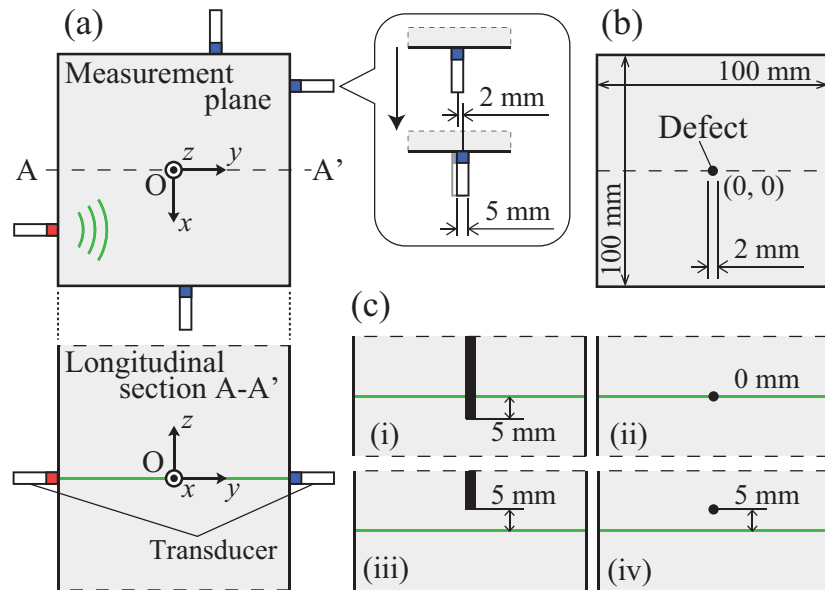


Fig. 3.3 シミュレーションと実験の概要図：(a) 計測面と縦断面 A-A'，(b) 計測面に垂直な方向から見た欠陥，(c) 縦断面 A-A' に垂直な方向から見た欠陥．(i)，(iii) 実験とシミュレーションで用いる深穴欠陥．(ii)，(iv) シミュレーションで用いる球状欠陥．(i)，(ii) 欠陥が計測面と交差する場合，(iii)，(iv) 欠陥が計測面と交差しない場合．

### 3.3.2 結果と考察

Figure 3.4 に，シミュレーションと実験の結果を示す．Figure 3.4(A) は欠陥が計測面上にある場合，Fig. 3.4(B) は欠陥が計測面近傍にある場合，Fig. 3.4(a) は深穴欠陥による実験結果，Fig. 3.4(b) は深穴欠陥によるシミュレーション結果，Figs. 3.4(c), 3.4(c)' は球状欠陥によるシミュレーション結果を示している．ただし Figures 3.4(c), 3.4(c)' は同一の結果で，スケールのみが異なる．擬似音速はジュラルミンの音速 6,120 m/s を基準に変動しており，擬似音速分布の低下部分は黒，上昇部分は白で示されている．また，擬似音速分布に引かれたライン ( $y = 0$  mm) 上における変動を，下にグラフとして示している．Figures 3.4(a)–3.4(c) における擬似音速の変動量  $\Delta c$  の範囲は  $\pm 200$  m/s，Fig. 3.4(c)' においては  $\pm 50$  m/s となっている．

Figures 3.4(a), 3.4(b) を比較すると，実験結果にはシミュレーション結果と異なりノイズによる誤差の影響が見られる．ただし，欠陥部分における疑似音速の変動量に大差はなく，加えて，欠陥周囲の疑似音速の変動の傾向は，似通っていることが分かる．従って，実験結果に含まれるノイズを除けば，シミュレーションは実験状況を良く表現できていると言える．

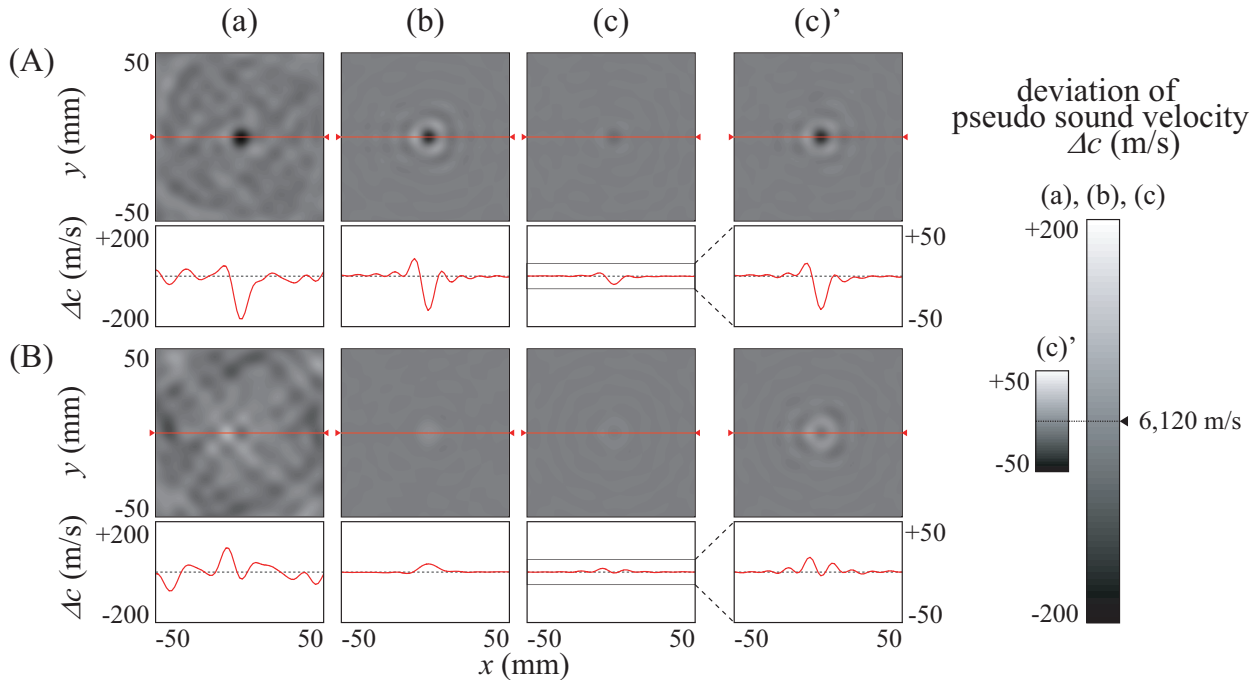


Fig. 3.4 実験とシミュレーションの結果（疑似音速分布と  $y=0$  における疑似音速の変動）：(A) 欠陥と計測面が交差する場合，(B) 欠陥と計測面が交差しない場合．(a) 深穴欠陥の可視化実験，(b) 深穴欠陥の可視化シミュレーション，(c)，(c)' 球状欠陥の可視化シミュレーション．

Figures 3.4(b), 3.4(c) を比較すると，球状欠陥による疑似音速の変動が深穴欠陥による疑似音速の変動と比べ小さいことが分かる．これは，計測面において同じ直径の欠陥であっても，欠陥の種類（深穴欠陥または球状欠陥）によって疑似音速の変動量が異なる可能性があることを示している．本シミュレーションの条件下においては，球状欠陥による音速変動は深穴欠陥による音速変動の4分の1程度となった．よって，第2章にて述べたように，疑似音速の低下量で欠陥の規模を表す場合には，欠陥の種類にも配慮する必要があることが分かった．

Figures 3.4(A), 3.4(B) を比較すると，計測面が欠陥を通る Fig. 3.4(A) の場合には欠陥部分で疑似音速の低下が見られるのに対し，計測面が欠陥近傍を通る Fig. 3.4(B) の場合には疑似音速の上昇が見られる．すなわち，欠陥の周囲では，Fig. 3.5 のように，欠陥を通らない計測面で可視化像が得られることが分かった．

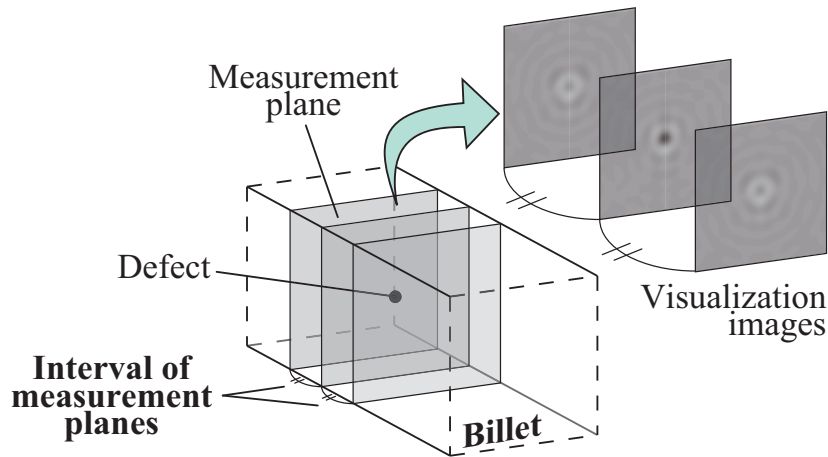


Fig. 3.5 隣り合う計測面における可視化像の例.

### 3.4 球状欠陥の 3 次元可視化と計測面の走査間隔

本節では、球状欠陥の複数の計測面において、可視化シミュレーションを行う<sup>53)</sup>。また、球状欠陥の 3 次元可視化を試みる。前節では、試験片の材質がジュラルミンであったため、シミュレーションを実験に合わせて検討を行った。しかし、ここではシミュレーションのみの検討となるため、材質を第 2 章と同様の鉄に戻すこととする。

#### 3.4.1 シミュレーションの条件

Figure 3.6 にシミュレーションの条件を示す。直径 2 mm または 5 mm の球状欠陥を含む、断面  $100 \times 100 \text{mm}^2$  の角鋼片を想定する。材質は鉄（縦波音速：5,950 m/s）とする。角鋼片の中心を原点とし、計測面の周囲にはトランスデューサを配置する。送信信号には、周波数 1-3 MHz、波数 10 波、信号長  $5 \mu\text{s}$  のアップチャープ信号を用いる。送信信号には、ハニング窓を適用する。トランスデューサは点音源とし、スキャンピッチ 2 mm で計測面の 1 辺あたり 50 回走査させる。計測面と球状欠陥の中心との距離を  $\Delta z$  とし、 $\Delta z = 0, 5, 10, 15, 20 \text{ mm}$  の 5 通りについて検討する。

シミュレーションには 3 次元 WE-FDTD 法を用いる。空間の離散幅は 0.25 mm とし、 $401 \times 401 \times 601$  のメッシュ空間にて波動伝搬を計算する。離散時間は約  $0.024 \mu\text{s}$  であり、ステップ数は 1201 である。画像再構成においては、空間の離散幅を 1 mm、角度の離散角を 1 deg とし、キュービックスプライン補間と Shepp-Logan フィルタ（係数 1）を用いる。



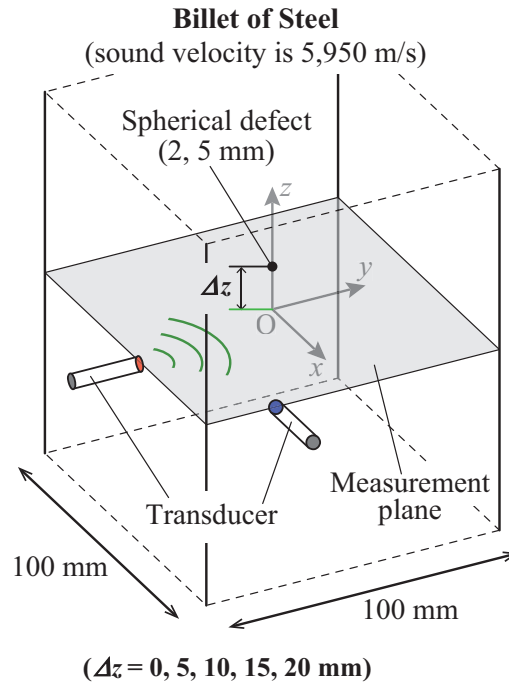


Fig. 3.6 球状欠陥の3次元可視化シミュレーションの概要図.

### 3.4.2 結果と考察

Figure 3.7 にシミュレーション結果を示す．Figure 3.7(A) は直径 5 mm の球状欠陥の場合，Fig. 3.7(B) は直径 2 mm の球状欠陥の場合である．また，Figs. 3.7(a)–3.7(e) はそれぞれ  $\Delta z = 0, 5, 10, 15, 20$  mm の場合に相当し，Fig. 3.7(f) は  $y = 0$  mm の縦断面において Figs. 3.7(a)–3.7(e) の擬似音速を合成した画像である．

Figure 3.7 の擬似音速分布を  $z$  軸方向に合成し，閾値を与えることで欠陥の3次元可視化を試みる．Figure 3.8 に擬似音速の3次元2値化像を示す．Figure 3.8(A) は直径 5 mm の球状欠陥の場合，Fig. 3.8(B) は直径 2 mm の球状欠陥の場合である．擬似音速の閾値は，Fig. 3.8(A) の方を  $-180$  m/s，Fig. 3.8(B) の方を  $-40$  m/s と設定した．図のように，適切な閾値を与えることで，欠陥を3次元可視化できることが分かる．ただし，実際に閾値を利用して可視化を行う場合には，空間上の各点における閾値を定めた閾値マップを作成する必要がある<sup>54)</sup>．

Figures 3.7(A), 3.7(B) を比較すると，欠陥径の小さい方が可視化における擬似音速の変動量が小さくなることが確認できる．また，音速変動の広がり方は欠陥径による影響を大きく受けないことも確認できる．Figures 3.7(a)–3.7(e) を比較すると， $\Delta z$  が増加するにつれて音速

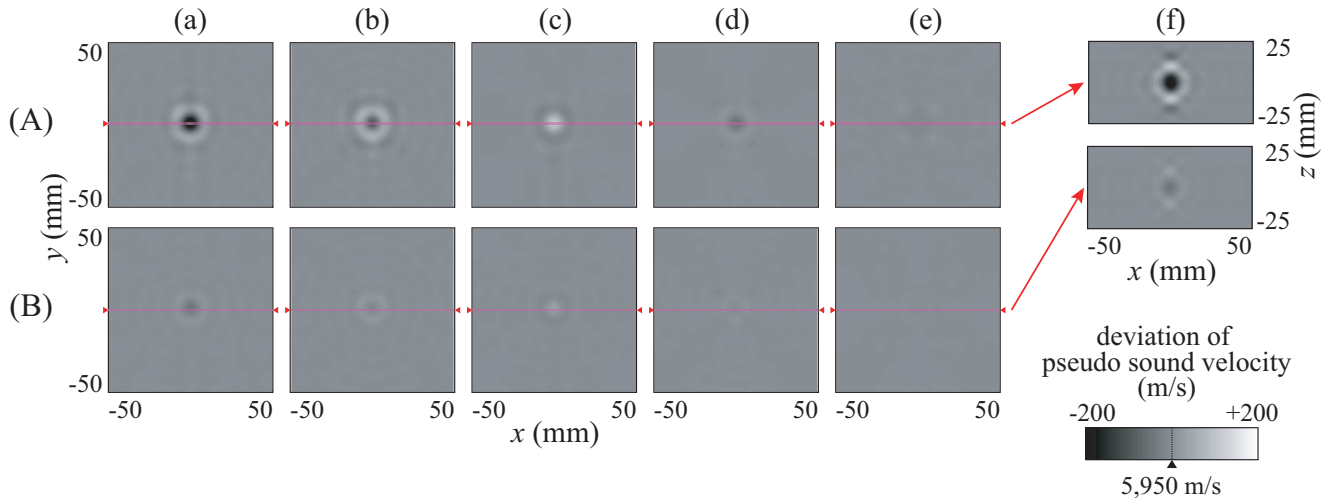


Fig. 3.7 シミュレーションの結果（疑似音速分布）：(A) 欠陥径 5 mm の場合，(B) 欠陥径 2 mm の場合．(a)  $\Delta z = 0$  mm，(b)  $\Delta z = 5$  mm，(c)  $\Delta z = 10$  mm，(d)  $\Delta z = 15$  mm，(e)  $\Delta z = 20$  mm，(f)  $y = 0$  mm.

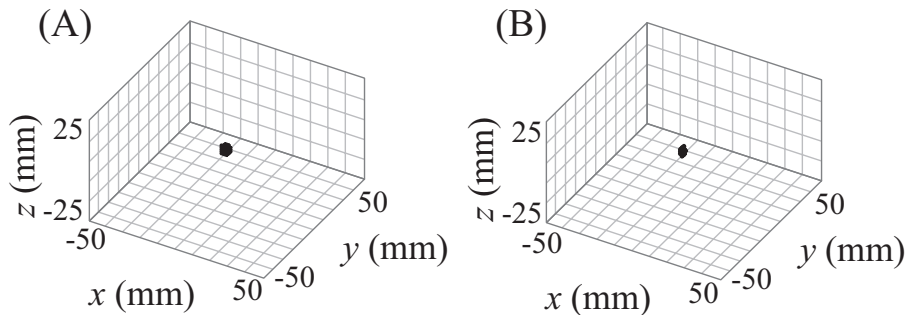


Fig. 3.8 欠陥の 3 次元可視化結果：(A) 欠陥径 5 mm，(B) 欠陥径 2 mm.

変動量が小さくなっていく様子が見られる．Figure 3.7(f) で確認すると，欠陥を通る縦断面における欠陥像は，計測面上における欠陥像と似通った像として写ることが分かる．また，縦断面における欠陥像においても，欠陥径による影響を大きく受けないことが確認できる．従って，欠陥像の幅という観点から考えれば，球状欠陥を計測面上に可視化する場合と，球状欠陥を縦断面上に可視化する場合とで，欠陥像の幅はおよそ等しくなると言える．

ここで，計測面間隔について考える．最適な計測面間隔は，欠陥の影響を捉えられる範囲における，計測面と計測面の最大間隔であるから，これはすなわち欠陥像の幅ということになる．第 2 章より，欠陥像の幅は，送信信号の中心周波数と角鋼片内部の縦波音速によって算

出される波長で決定できるものであるから、最適な計測面間隔はこの波長によって決定できると言える。本シミュレーションにおいては、波長が 2.975 mm に対して、欠陥像の幅が約 20 mm 程度に定まり、最適な計測面間隔も約 20 mm 程度となる。

### 3.5 むすび

本章では、深穴欠陥の先端部分の可視化実験とシミュレーション、球状欠陥近傍の可視化シミュレーションを行い、可視化像の比較を行った。その結果、同じ直径の欠陥が計測面にある場合においても、欠陥の種類（深穴欠陥と球状欠陥）により可視化のされ方が異なること、および、欠陥が計測面から離れた際に、欠陥部分で疑似音速の上昇が見られることが分かった。また、球状欠陥近傍の複数の計測面で可視化シミュレーションを行い、各計測面における可視化像を比較するとともに、球状欠陥の 3 次元可視化を試みた。欠陥の 3 次元可視化は、適切な閾値を設けることで達成された。得られた可視化像の比較より、欠陥近傍の計測面における音速変動の広がり方は、計測面内における音速変動の広がり方と類似するという結果になった。ここから、最適な計測面間隔は、欠陥像の幅におよそ等しく、欠陥像の幅と線形関係にある縦波波長から決定できることが分かった。



---

## 第 4 章

# 時間反転波による欠陥可視化および送受信回数の低減

### 4.1 まえがき

前章までの TOF を用いる超音波 CT 法は、欠陥可視化のために多数のパスでの計測が必要であり、計測に時間を要するという問題があった。そこで、同様の計測方法で実現可能な欠陥可視化の手段として、時間反転波の逆伝搬を用いる方法に着目し、送受信回数の低減を図ることとした。本章では、時間反転波を取り入れた可視化方法の原理を示し、穴の空いた試験片断面の可視化実験を行い、可視化結果を比較・評価する。1 つ目の実験では、比較的減衰の小さい試験片を用いて、時間反転波の逆伝搬を用いるベーシックな可視化手法との比較、および、送受信回数による可視化結果の比較を行う。2 つ目の実験では、比較的減衰の大きい試験片を用いて、送受信回数による可視化結果を比較する。

### 4.2 時間反転波による欠陥可視化の原理

#### 4.2.1 超音波の送受信回数

超音波の送受信回数の多さは、計測面から得られる情報量が増えるメリットを持つが、その反面、検査に要する時間が増加する等のデメリットを持っている。ある基準の欠陥を可視化するために必要な情報を得られるのであれば、送受信回数は少ないことが望ましい。

TOF を用いる超音波 CT 法においては、正方形断面の一辺に対して 50 個のトランスデューサを配置し、トランスデューサの組み合わせの数 ( $50 \times 50 \times 6 = 15,000$  回) だけ送受信を行う

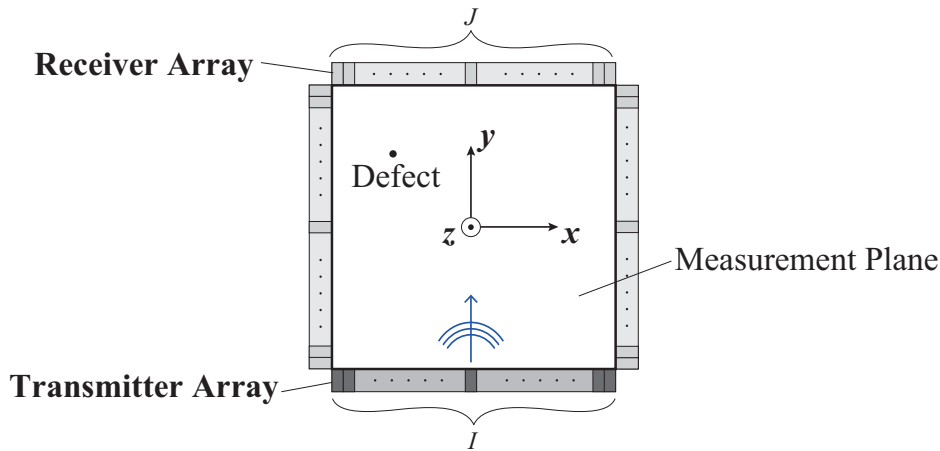


Fig. 4.1 時間反転波を利用する手法で想定される超音波の計測方法.

必要がある．この回数が，送受信回数に相当する．2つの超音波トランスデューサの走査による超音波の計測実験においては，15,000回の計測が必要である．ただし，実用化されたことを考えれば，トランスデューサはアレイ化され，1つの送信に対して複数のトランスデューサでの同時受信が可能である．同時送信を行わないとすれば，重要となるのは送信回数であり，TOFを用いる超音波CT法の場合は150回である．先行研究の試験片を用いた実験においては，トランスデューサ5つの同時送信で欠陥の判別を可能としていることから<sup>36)</sup>，必要な送信回数は30回と言える．

Figure 4.1に，以降で説明する時間反転（TR: Time-Reversal）波の逆伝搬を用いる可視化手法において想定している，超音波の計測方法を示す．一辺に送波器用のアレイ，他の三辺に受波器用のアレイがあり，送波器用のアレイにおける送波器数を  $I$ ，受波器用のアレイにおける受波器数を  $J$  としている．Table 4.1に，必要なトランスデューサ数，送受信回数，送信回数の比較を示す．仮に， $I = 50$ ， $J = 50$ で欠陥を可視化できる場合，TOFを用いる超音波CT法と比べて，同じトランスデューサ数，半分の送受信回数，3分の1の送信回数（同時送信なし）で済むことになる．

#### 4.2.2 欠陥からの散乱波

超音波を角鋼片に照射すると，欠陥部からは超音波の前方・側方・後方の散乱波に加え，回折波や反射波が発生する．これらは欠陥の存在を示す情報であり，本研究では，これらをまとめて欠陥からの散乱波と呼ぶこととする．受信信号（参照信号と計測信号）に着目した場合，参照信号には送波器からの直達波や表面からの反射波などの成分が含まれ，計測信号にはこれ

Table 4.1 必要なトランスデューサ数, 送受信回数, 送信回数の比較.

	The CT method	A TR method ( $I = 50, J = 50$ )	
Number of transducers	$50 \times 4 = 200$	$I + 3J$	200
Number of paths	$50 \times 50 \times 6 = 15,000$	$I \times 3J$	7,500
Number of transmissions	$50 \times 3 = 150$ ( $10 \times 3 = 30$ )	$I$	50

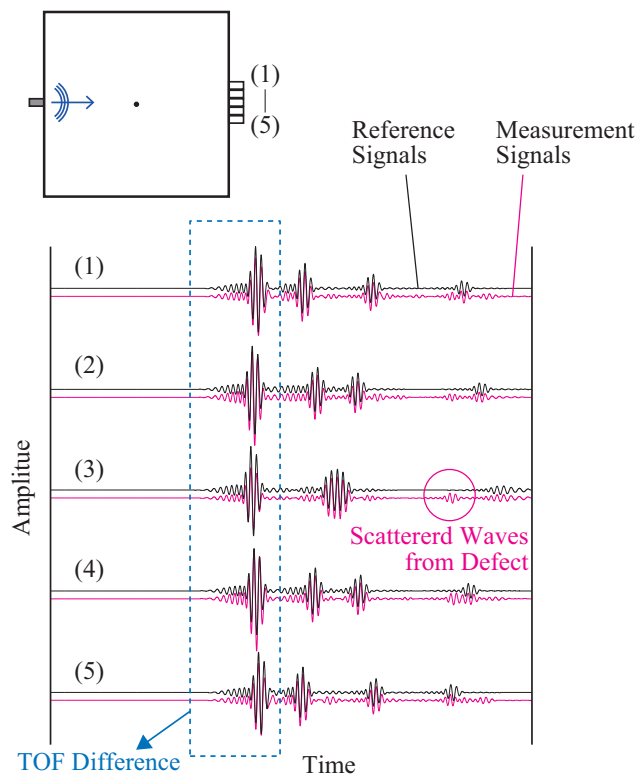


Fig. 4.2 参照信号と計測信号の比較 (例).

に加えて欠陥からの散乱波成分が含まれる. Figure 4.2 に, 参照信号と受信信号の例を示す. TOF を用いる超音波 CT 法では, 参照信号と受信信号において初期に到達する縦波成分を比較することで, TOF を変動量を算出し, CT により欠陥の可視化を行った. しかし, TOF の変動量の算出の段階で, 以降に含まれる欠陥からの散乱波成分は除外され, 欠陥の存在を示す情報を少なからず失っている. 一方, 時間反転波の逆伝搬を用いる可視化手法では, 欠陥からの散乱波成分を有効に活用することができるため, 送受信回数の低減が期待できる.

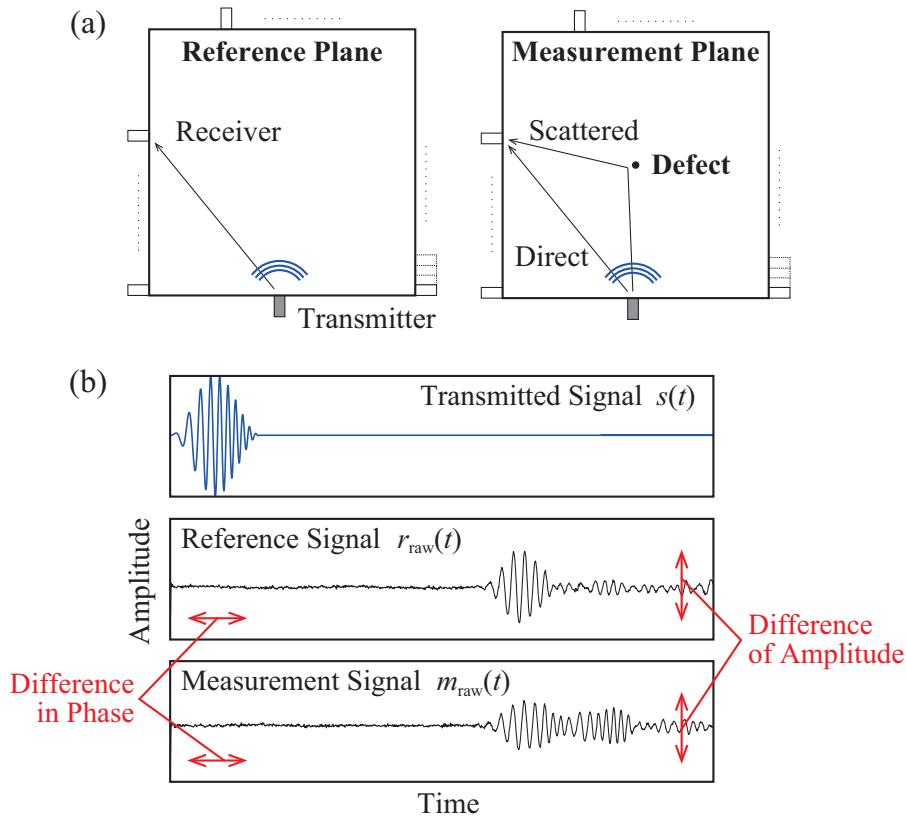


Fig. 4.3 受信信号における振幅差，位相差の問題：(a) 参照面と計測面における送受波器の位置，(b) 対応する送信信号，参照信号，計測信号。

ここで，時間反転波について説明する．時間反転波とは，時間を逆再生させたような振る舞いをする波であり，ある空間を取り囲むように受波器を配置し，それら受信信号の時間軸を反転して受波器位置から逆伝搬させると，元の音源位置に音波が収束する性質を持つ<sup>55-57</sup>．この性質から時間反転波は，イメージング技術として水中音響や光学，非破壊検査などの分野で用いられている<sup>58-63</sup>．角鋼片の検査に焦点を充てれば，時間反転波は欠陥からの散乱波に対して適用することができる．すなわち，受信信号から欠陥からの散乱波成分を抽出し，その時間反転波を逆伝搬することで，欠陥位置に音波が収束し，欠陥の可視化へと繋がる．

Figure 4.3 に，計測された参照信号と計測信号の例を示す．送信信号には，リニアアップチャープ信号

$$s(t) = \begin{cases} \sin \left[ 2\pi \left( f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2T_s} t \right) t \right] & , 0 \leq t \leq T_s, \\ 0 & , T_s < t \leq T. \end{cases} \quad (4.1)$$

を用いている．理想的な受信信号が得られていれば，欠陥からの散乱波は，計測信号から参照信号を引き算 ( $m_{\text{raw}}(t) - r_{\text{raw}}(t)$ ) することで抽出できる．しかし実際の超音波計測を考えた



場合、参照信号と計測信号において、送波器からの直達波や角鋼片表面からの反射波を完全に一致させることは困難であり、振幅や位相にわずかなずれが生じることになる。そのため、実際に引き算を行うと、欠陥からの散乱波の成分のみを抽出することができない。そのため、引き算した信号を逆伝搬させた際には、送波器位置に音波が戻り、欠陥可視化の妨げとなる。本研究では、受信信号の振幅（包絡線）に着目することで、欠陥からの散乱波抽出の問題を解決する。

### 4.2.3 欠陥からの散乱波の抽出方法

参照信号と計測信号をもとに、計測信号に含まれる欠陥からの散乱波を抽出する方法について説明する。まず、受信信号に対して、チャープ信号（送信信号）によるパルス圧縮を行う<sup>64,65</sup>。パルス圧縮は、受信信号に含まれるチャープパルスを際立たせ、信号対雑音比を向上させる技術である。Figure 4.4 に、パルス圧縮適用後の受信信号の例を示す。図に示すようにパルス圧縮は、受信信号に含まれるパルスを強調し、ノイズを抑制するフィルタリングの役割も果たしていることが分かる。パルス圧縮された参照信号および計測信号は、

$$r(\tau) = \int_0^{T_s} s(t)r_{\text{raw}}(t+\tau)dt, \quad 0 \leq \tau \leq T. \quad (4.2)$$

$$m(\tau) = \int_0^{T_s} s(t)m_{\text{raw}}(t+\tau)dt, \quad 0 \leq \tau \leq T. \quad (4.3)$$

と表される。上式の通り、 $s(t)$  と  $r_{\text{raw}}(t)$  あるいは  $m_{\text{raw}}(t)$  との相互相関を取ることで、パルス圧縮を計算することができる。

Figure 4.5 に、計測信号から、欠陥からの散乱波を抽出するまでの信号処理の過程を示す。Figures 4.5(a)–4.5(f) はそれぞれ、参照信号  $r(t)$ 、参照信号の包絡線  $\bar{r}(t)$ 、設定されるノイズレベル  $\nu$ 、包絡線の逆数  $\bar{r}(t)^{-1}$ 、正規化された窓  $w(t)$ 、窓適用後の計測信号  $\tilde{m}(t)$  を示している。ただし、参照信号と計測信号はパルス圧縮済みである。Figure 4.5(b) の包絡線検波には、Hilbert 変換を利用する。ノイズレベルの設定においては、ノイズのみを含む受信信号の一部から標準偏差  $\sigma$  を計算し、その 3 倍をノイズレベル  $\nu$  として設定する。Figure 4.5(c) のように、ノイズの振幅値のヒストグラムは正規分布となる。ノイズレベルは、包絡線の逆数  $\bar{r}(t)^{-1}$  の上限を決める閾値 ( $\nu^{-1}$ ) として機能する。閾値で正規化されたものが Fig. 4.5(e) の窓  $w(t)$  であり、これを計測信号  $m(t)$  に掛け合わせることで、 $\tilde{m}(t)$  が生成される。窓  $w(t)$  は、参照信号  $r(t)$  の振幅の大きさに応じて、振幅を抑える効果がある。すなわち、 $w(t)$  を  $m(t)$  に適用することで、送波器からの直達波や角鋼片表面からの反射波が抑えられ、欠陥からの散乱波のみが強調されることとなる。

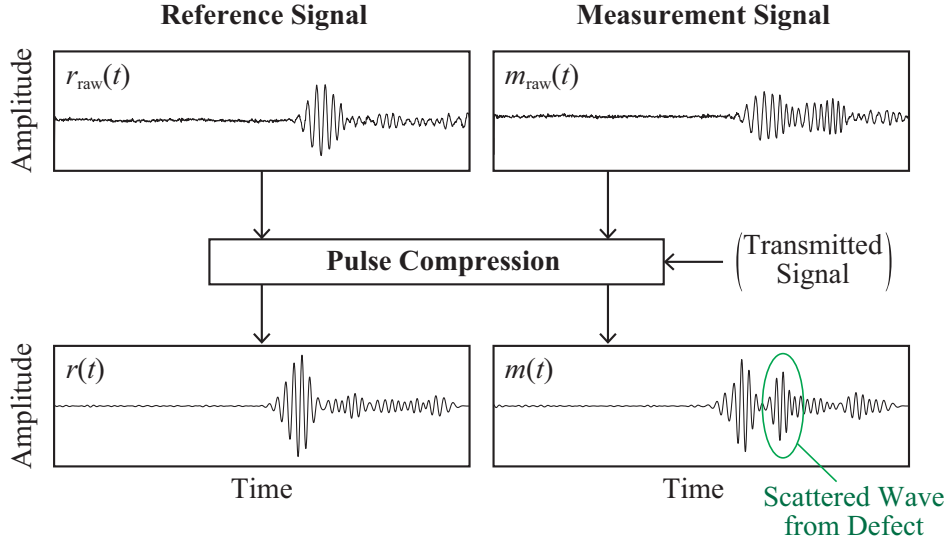


Fig. 4.4 受信信号に対するパルス圧縮の適用.

ここで、送波器番号を  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ 、受波器番号を  $j \in \{1, 2, \dots, 3J\}$  と定めると、受信信号は  $i$  と  $j$  により変化するものであるから、参照信号、計測信号、参照信号の包絡線、窓はそれぞれ、 $m_{i,j}(t)$ 、 $r_{i,j}(t)$ 、 $\bar{r}_{i,j}(t)$ 、 $w_{i,j}(t)$  と表現できる。Figure 4.5 より、窓および窓適用後の計測信号は次のように表される。

$$w_{i,j}(t) = \begin{cases} \nu \bar{r}_{i,j}(t)^{-1} & , \text{ if } \bar{r}_{i,j}(t) \geq \nu, \\ 1 & , \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\tilde{m}_{i,j}(t) = m_{i,j}(t) \cdot w_{i,j}(t). \quad (4.5)$$

記号  $\cdot$  は内積を表す。ある送波器からの受信信号は一括りに扱うことから、 $i = 1, 2, \dots, I$  について、以下のような  $T \times 3J$  の行列を定義する。

$$R_i = [r_{i,1}(t), r_{i,2}(t), \dots, r_{i,3J}(t)], \quad (4.6)$$

$$M_i = [m_{i,1}(t), m_{i,2}(t), \dots, m_{i,3J}(t)], \quad (4.7)$$

$$W_i = [w_{i,1}(t), w_{i,2}(t), \dots, w_{i,3J}(t)], \quad (4.8)$$

$$\tilde{M}_i = [\tilde{m}_{i,1}(t), \tilde{m}_{i,2}(t), \dots, \tilde{m}_{i,3J}(t)]. \quad (4.9)$$

ただし  $m_{i,j}(t)$ 、 $r_{i,j}(t)$ 、 $\bar{r}_{i,j}(t)$ 、 $w_{i,j}(t)$  は、長さ  $T$  の縦ベクトルとしている。Figure 4.6 に、ある送波器番号  $i$  に対応する  $R_i$ 、 $M_i$ 、 $W_i$ 、 $\tilde{M}_i$  の一例を示す。図中では、縦軸を受波器番号  $1 \sim 3J$ 、横軸を時間  $0 \sim T$  として示しており、ある受波器番号  $j$  に対応する信号も同時に示されている。 $R_i$ 、 $M_i$  を比較すると、 $M_i$  にのみ含まれる欠陥からの散乱波を確認できる。また、 $\tilde{M}_i$  において欠陥からの散乱波が抽出されていることが分かる。

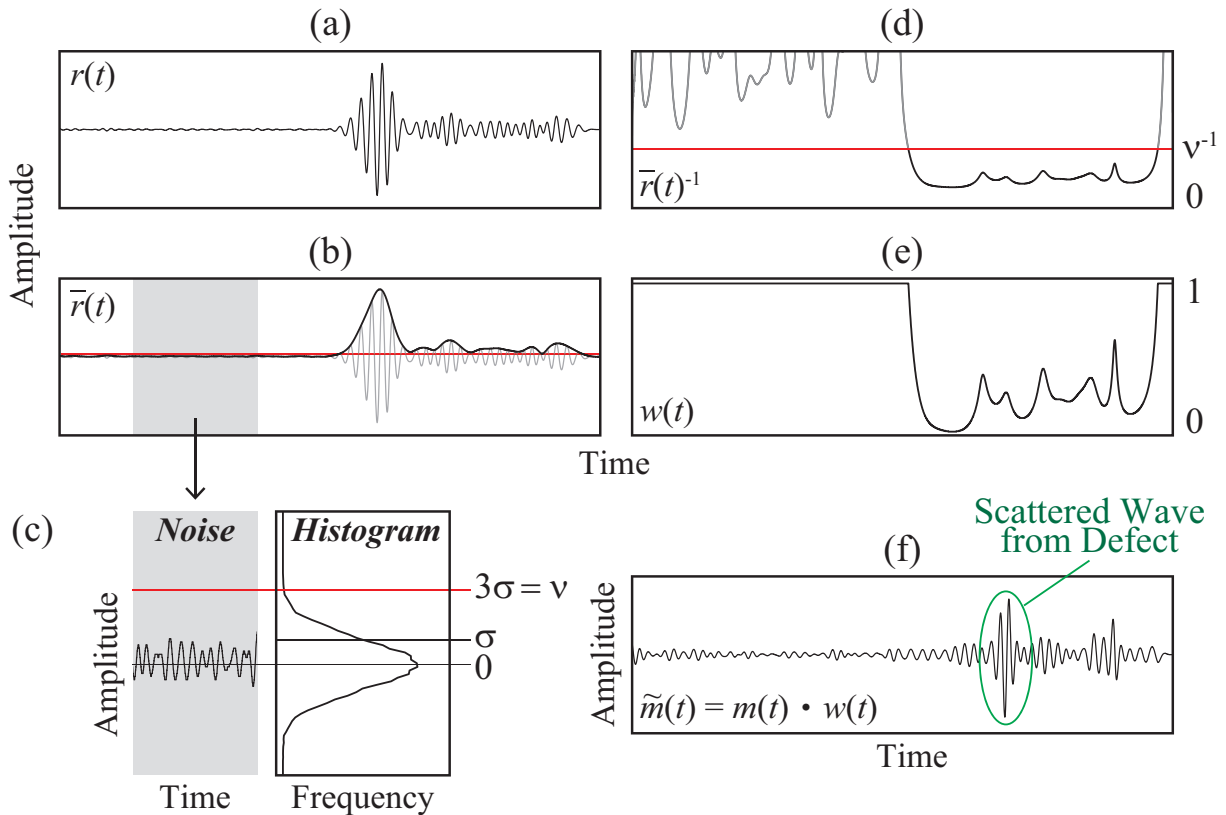


Fig. 4.5 包絡線検波から窓適用までの信号処理の過程：(a) 参照信号，(b) 包絡線の検出，(c) 閾値の設定，(d) 包絡線の逆数，(e) 生成された窓，(f) 窓適用後の計測信号。

#### 4.2.4 時間反転波の逆伝搬による欠陥可視化

計測信号から、欠陥からの散乱波を強調した信号  $\tilde{M}_i$  を用い、欠陥の可視化を行う。  $\tilde{M}_i$  を用いて得られる可視化像を、

$$g_i(x, y) = E(\tilde{M}_i), i = 1, 2, \dots, I. \quad (4.10)$$

と定義する。ただし  $E(\bullet)$  は、以下の過程をまとめた関数である。

- (1)  $\tilde{M}_i$  の時間軸を反転する。
- (2) 計測面上の計測面において、対応する受波器位置から  $\tilde{M}_i$  の時間反転波を照射する。
- (3) 計測面内における波動伝搬（逆伝搬）を計算する。
- (4) 計測面の各点における振幅の二乗（エネルギー）を、ステップごとに足し合わせる。
- (5) 逆伝搬を終えた段階における計測面内のエネルギー分布を、  $g_i(x, y)$  とする。

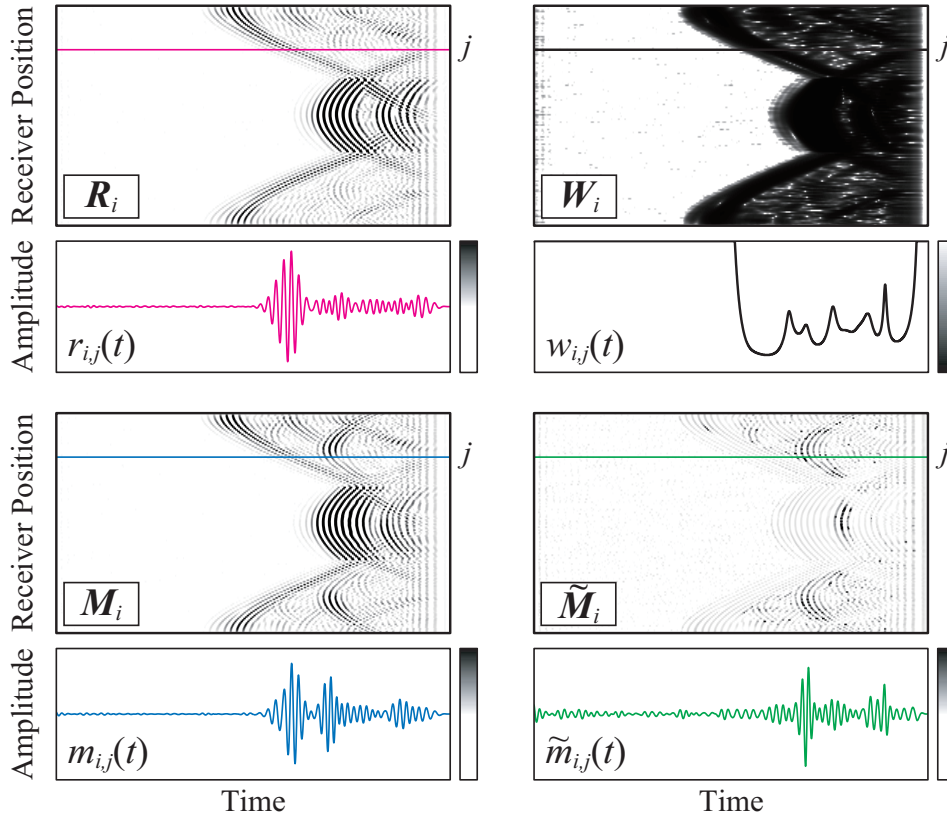


Fig. 4.6 ある送波位置に対する全ての参照信号，計測信号，窓，窓適用後の計測信号．

上記の通り，逆伝搬は計算機上で行われる．波動伝搬の計算には，計算時間が比較的短い，2次元の WE-FDTD 法を用いる．逆伝搬させた音波は欠陥位置に集約するため，空間の各位置においてエネルギー和を計算すると，欠陥位置に集約したエネルギーを確認することができる．これにより，欠陥を可視化することができる．

Figure 4.7 に，計算機上における逆伝搬の様子と，得られる可視化像の例を示す．Figure 4.7(A) のように， $\tilde{M}_i$  の時間反転波を逆伝搬させ，同時に振幅二乗和の分布が計算される．逆伝搬の計算は対応する送波器ごとに行われ，Fig. 4.7(B) のようにエネルギー分布  $g_i(x, y)$  を足し合わせることで，最終的な欠陥の可視化像

$$v(x, y) = \sum_{i=1}^I g_i(x, y). \quad (4.11)$$

が得られる．以上が，時間反転波の逆伝搬を用いる可視化手法の原理である．

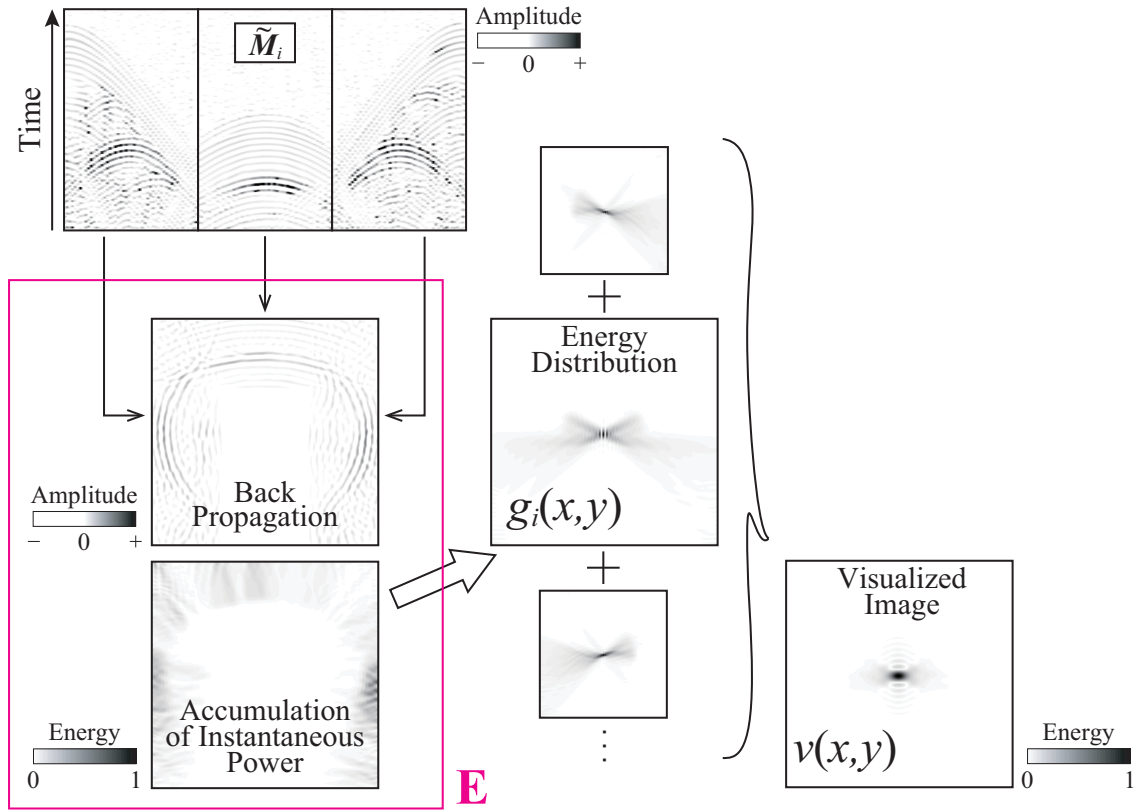


Fig. 4.7 時間反転波の逆伝搬による欠陥可視化：(A) 時間反転波の逆伝搬および逐次エネルギー和の計算，(B) 送波器別エネルギー分布および欠陥の可視化像。

## 4.3 欠陥可視化実験

### 4.3.1 実験条件

複数の穴（欠陥）を空けた試験片を用い，前節で述べた手法による欠陥の可視化実験を行う<sup>66)</sup>．初めに，時間反転波の逆伝搬によるベーシックな可視化手法との可視化結果の比較を行う．次に，前節で述べた手法について，送受信回数を変化させた際の可視化結果の比較を行う．Figure 4.8 に，実験の概要図を示す．本実験では，超音波トランスデューサ2つを試験片の断面周囲で走査させ，1パスずつ計測する．この計測は，トランスデューサと試験片を水中に沈めた状態で行われる．実際にはトランスデューサアレイを用いることが想定されているため，一辺の送波点数を  $I$ ，一辺の受波点数を  $J$  として考える．

Table 4.2 に，実験条件を示す．試験片には，縦波音速 6,320 m/s のジュラルミンを用い

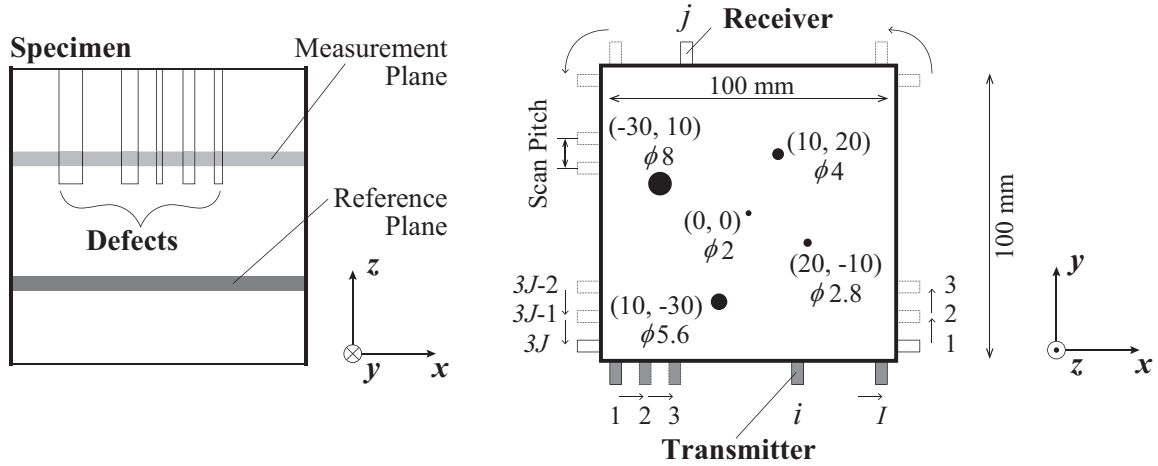


Fig. 4.8 ジュラルミンの試験片を用いる欠陥可視化実験の概要図.

Table 4.2 実験の条件.

Category	Parameters	Values
<b>Specimen</b>	Material of specimen	duralumin
	Size of cross section	100 × 100 mm <sup>2</sup>
	Sound velocity of longitudinal wave	6,320 m/s
<b>Transducer</b>	Element size	5 mm
	Scan pitch of transmitter	5, 10 mm
	Number of transmitter's positions	20, 10
	Scan pitch of receiver	2, 5 mm
	Number of receiver's positions	150, 60
<b>Transmitted signal (Up-chirp signal)</b>	Frequency	1 – 3 MHz
	Wavenumber	10 waves
	Signal length	5 μs
<b>Measurement</b>	Measurement time	40 μs
	Sampling frequency	100 MHz
<b>Back-propagation</b>	Method	2D WE-FDTD
	Propagation time	35 μs
	Space-discrete length	0.25 mm

る。断面サイズは  $100 \times 100$  mm であり，欠陥の代わりとして 5 つの穴が空けられている。位置は， $(x, y) = (0, 0), (20, -10), (10, 20), (10, -30), (-30, 10)$ ，それぞれの直径は 2, 2.8, 4, 5.6, 8 mm である。送波器のスキャンピッチは 5, 10 mm，送波点数  $I$  は 20, 10 である。受波器のスキャンピッチは 2, 10 mm，受波点数  $3J$  は  $3 \times 50 = 150$  または  $3 \times 20 = 60$  である。計測時間は，超音波が断面の対角線を伝わるのに要する  $22.37 \mu\text{s}$  より十分に長い， $40 \mu\text{s}$  とする。サンプリング周波数は 100 MHz で，送信信号は，周波数帯域が 1 – 3 MHz（中心周波数 2 MHz），波数が 10 波，信号長が  $5 \mu\text{s}$  のアップチャープ信号である。時間反転波の逆伝搬は，断面を  $401 \times 401$  で離散化（空間離散幅 0.25 mm）し，2次元 WE-FDTD 法を用いて計算を行う。計算は， $35 \mu\text{s}$  に達した時点で終了する。

### 4.3.2 ベーシックな手法との比較結果と考察

原理に示した手法と，時間反転波の逆伝搬のベーシックな可視化手法との比較を行う。ここでは， $I = 20$ ， $3J = 150$  で固定する。比較対象となる可視化手法は，以下の通りである。

- (A)  $\sum_{i=1}^I E(\tilde{M}_i)$
- (B)  $\sum_{i=1}^I |E(M_i) - E(R_i)|$
- (C)  $\sum_{i=1}^I E(M_i - R_i)$

手法 (A) は，参照信号の包絡線から生成した窓を用いて抽出した，欠陥からの散乱波を用いる方法である。手法 (B) は，計測信号を逆伝搬させて得られる画像と，参照信号を逆伝搬させて得られる画像の，差の絶対値を用いる方法である。手法 (C) は，計測信号から参照信号を引き算した信号を逆伝搬させる方法である。

Figure 4.9 に，(A), (B), (C) の可視化結果を示す。Figure 4.9(i) は可視化像を示している。いずれも，欠陥位置においてエネルギーの変化が見られる。エネルギー分布の  $y = 20$  mm,  $x = 10$  mm における変化のグラフを，Figs. 4.9(ii), 4.9(iii) に示している。(A) の場合，エネルギーが水平方向に広がっていることが見て取れる。これは，送波器位置に受波器が無く，左右の側面にある受波器から出た時間反転波の影響が強くなったためだと考えられる。一方，(B) と (C) の場合，エネルギーは垂直方向に広がっていることが分かる。これは，送波器正面の受波器で得られた受信信号の振幅が大きいためだと考えられる。

Figures 4.9(iv), 4.9(v) は，実際に欠陥がある領域のエネルギーのヒストグラムと，それ以外の領域のエネルギーのヒストグラムを示している。ヒストグラムは，それぞれ積分値が 1 となるように正規化されている。エネルギーの平均値の差が大きい程，また，分散値の和が小さい程，欠陥が鮮明に可視化されていることを示している。平均値の差を分散値の和で割った値

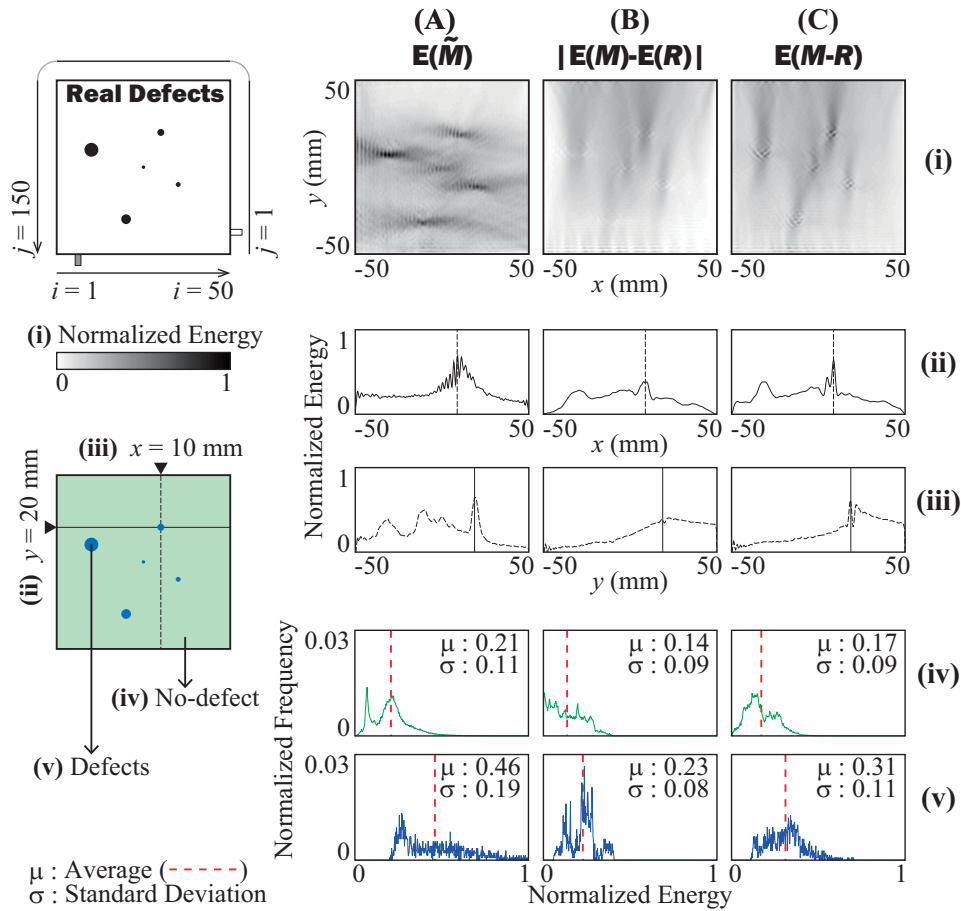


Fig. 4.9 (A), (B), (C) における可視化結果 : (A)  $E(\tilde{M}_i)$  による可視化, (B)  $|E(M_i) - E(R_i)|$  による可視化, (C)  $E(M_i - R_i)$  による可視化. (i) 可視化像の比較, (ii)  $y = 20$  mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iii)  $x = 10$  mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iv) 欠陥のない領域におけるエネルギーのヒストグラム, (v) 欠陥のある領域におけるエネルギーのヒストグラム.

を比較すると, (A)  $0.25 / 0.30 \simeq 0.83$ , (B)  $0.09 / 0.17 \simeq 0.53$ , (C)  $0.15 / 0.20 \simeq 0.75$  となり, (A),(C),(B) の順に優れていることが分かる.

Figure 4.10 に, (A), (B), (C) の評価結果を示す. 2 値化像は, 可視化像であるエネルギー閾値を超えた領域を示すこととする. 可視化像において, 3 つの領域を考える. ある閾値以上で 2 値化された領域  $X$ , 実際の欠陥がある領域  $Y$ ,  $X$  と  $Y$  の重なる領域  $Z$  である. ここで,  $Z / X$  を適合率,  $Z / Y$  を再現率と呼ぶ. 適合率と再現率が高い程, 実際の欠陥位置を示した画像と, 2 値化像に近いことを示す. Figure 4.10(I) は, エネルギーの閾値の変化による, 適合率と再現率の変化のグラフを示している. 全てのグラフで, 閾値が高くなるに連れて, 再現率は下がっていく様子が見られる. 適合率においては, (A) の場合は上がっていき, (B) と



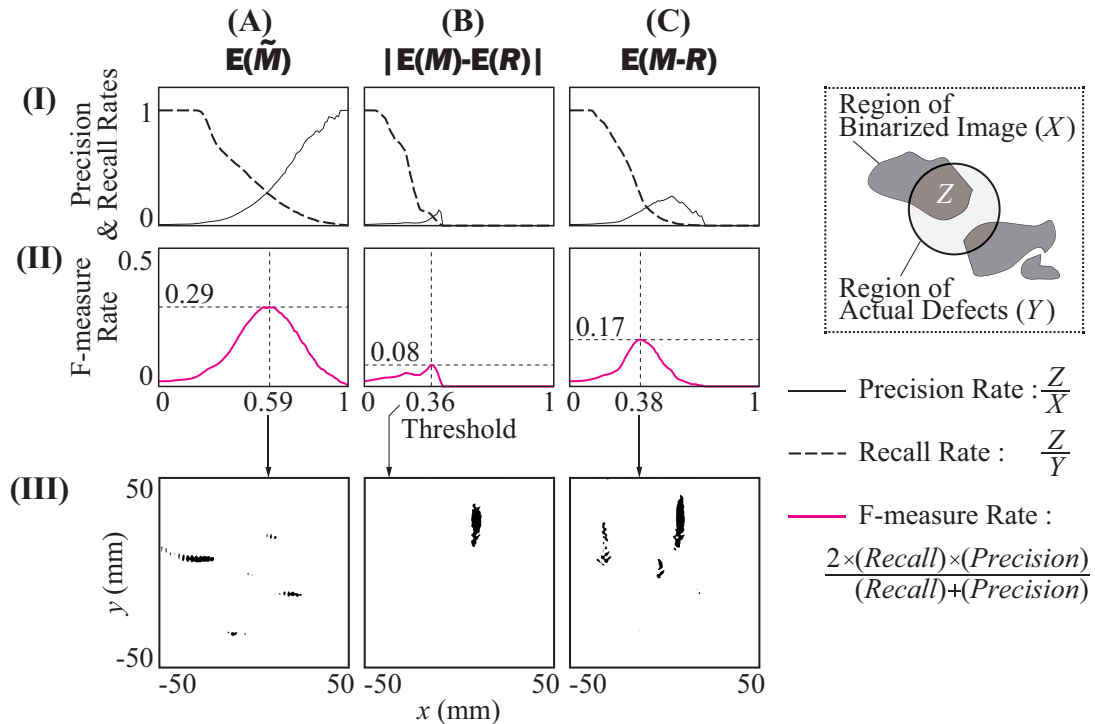


Fig. 4.10 (A), (B), (C) の可視化像の評価結果：(A)  $E(\tilde{M}_i)$  による可視化，(B)  $|E(M_i) - E(R_i)|$  による可視化，(C)  $E(M_i - R_i)$  による可視化．(I) 閾値に対する適合率と再現率のグラフ，(II) 閾値に対する F 値のグラフ，(III) F 値最大時の閾値における 2 値化像．

(C) の場合は上がって下がっている様子が見られる．適合率と再現率を総合的に評価するために，これらの重み付け調和平均である F 値を用いる<sup>67)</sup>．F 値が最大となる閾値を用いることで，他の閾値より精度良く欠陥を表現した 2 値化像が得られる．Figure 4.10(II) は，エネルギーの閾値の変化による，F 値の変化のグラフを示している．F 値の最大値を比較すると，(A) 0.29，(B) 0.08，(C) 0.17 であり，F 値のグラフの積分値を比較すると，(A) 0.121，(B) 0.016，(C) 0.045 であることから，可視化像は (A)，(C)，(B) の順に優れていることが分かる．Figure 4.10(III) に示している 2 値化像からも，その差は明白である．よって構築したアルゴリズムは，シンプルな逆伝搬による検査手法に比べて，欠陥を可視化する能力に優れていると言える．

### 4.3.3 送受信回数による比較結果と考察

原理に示した手法に関して、送受信回数を変化させた場合を比較する。比較対象は、以下の通りである。

- (a)  $I = 10, 3J = 60.$
- (b)  $I = 20, 3J = 60.$
- (c)  $I = 10, 3J = 150.$
- (d)  $I = 20, 3J = 150.$

条件 (d) は、前項に示した手法 (A) の結果と同一である。

Figure 4.9 に、(a), (b), (c), (d) の可視化結果を示す。Figure 4.9(i) は可視化像を示している。(a) と (b) は (c) と (d) に比べてノイズが多いが、いずれも欠陥を可視化できていることが分かる。Figs. 4.9(ii), 4.9(iii) を比較すると、エネルギー分布の  $y = 20$  mm,  $x = 10$  mm における変化のグラフからは、4 つの条件に特別な差は見られない。Figures 4.9(iv), 4.9(v) は、実際に欠陥がある領域のエネルギーのヒストグラムと、それ以外の領域のエネルギーのヒストグラムを示している。エネルギーの平均値の差をエネルギーの分散値の和で割った値を比較すると、(a)  $0.18 / 0.26 \simeq 0.69$ , (b)  $0.18 / 0.24 \simeq 0.75$ , (c)  $0.25 / 0.32 \simeq 0.78$ , (d)  $0.25 / 0.30 \simeq 0.83$  となり、(d),(c),(b),(a) の順、すなわち送受信回数が多い順に優れていることが分かる。

Figure 4.10 に、(A), (B), (C) の評価結果を示す。Figure 4.10(I) は、エネルギーの閾値の変化による、適合率と再現率の変化のグラフを示している。全てのグラフにおいて、閾値が高くなるに連れて適合率は上がり、再現率は下がっていることが分かる。Figure 4.10(II) は、エネルギーの閾値の変化による、F 値の変化のグラフを示している。F 値の最大値を比較すると、(a) 0.23, (b) 0.24, (c) 0.28, (d) 0.29 であり、F 値のグラフの積分値を比較すると、(a) 0.084, (b) 0.084, (c) 0.115, (d) 0.121 であることから、この評価においても可視化像は (d), (c), (b), (a) の順に優れていることが分かる。Figure 4.10(III) に示している 2 値化像において、(a) と (b) における中心 2 mm の欠陥が消えてしまっている点を考慮すると、(a) と (b), (c) と (d) で同程度の能力を有しており、(c) と (d) の方が (a) と (b) に比べて優れていると言える。する能力に大差はないことが分かる。

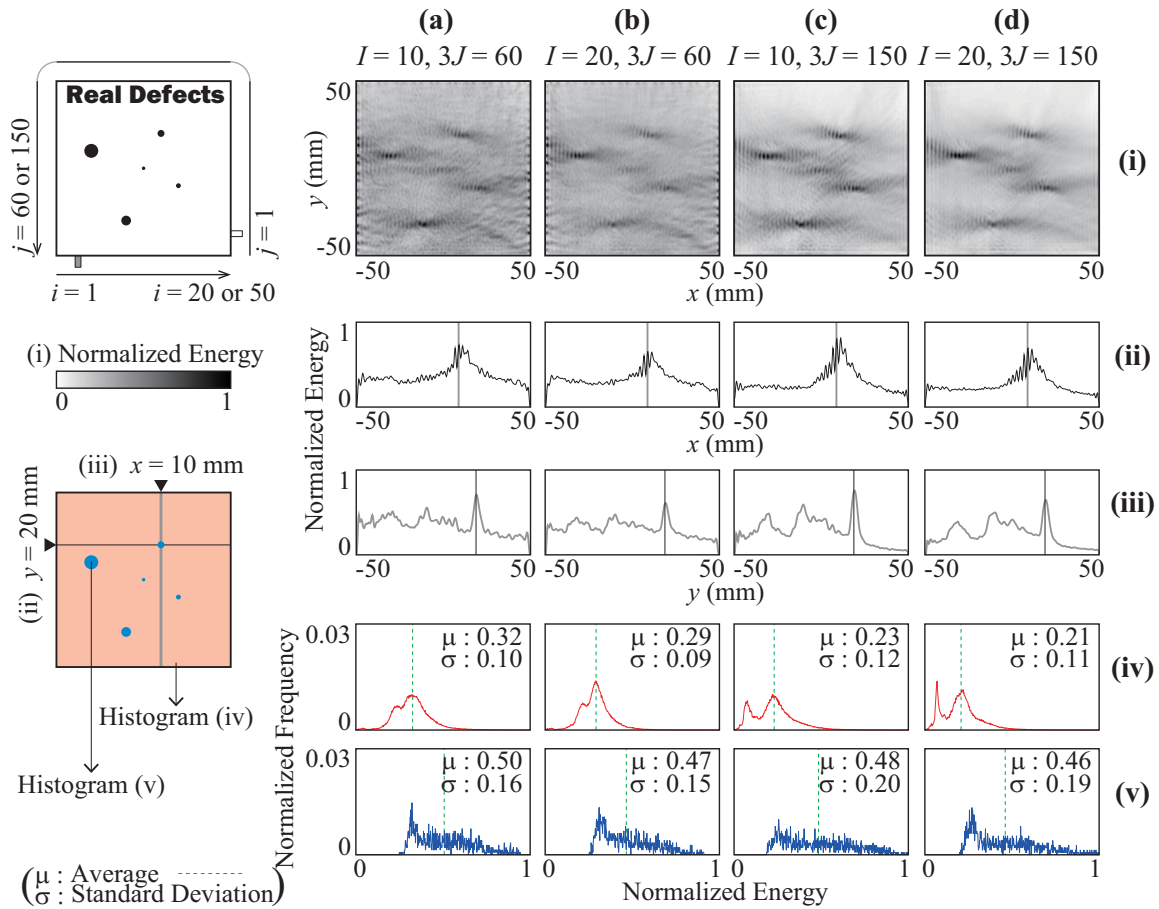


Fig. 4.11 (a), (b), (c), (d) における可視化結果 : (a)  $I = 10, 3J = 60$ , (b)  $I = 20, 3J = 60$ , (c)  $I = 10, 3J = 150$ , (d)  $I = 20, 3J = 150$ . (i) 可視化像の比較, (ii)  $y = 20$  mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iii)  $x = 10$  mm におけるエネルギーの変化グラフ, (iv) 欠陥のない領域におけるエネルギーのヒストグラム, (v) 欠陥のある領域におけるエネルギーのヒストグラム.

## 4.4 減衰材を用いる欠陥可視化実験と送受信回数に関する考察

### 4.4.1 実験条件

TOF を用いる超音波 CT 法においては, 先行研究において高減衰角鋼片内部の欠陥可視化が可能であることを, ジュラルミンに比べて比較的減衰の大きいステンレスの試験片を用いた実験により確かめている. そこで, 時間反転波の逆伝搬を用いる手法においても, 減衰のある試験片を用いて, 内部欠陥の可視化を試みる<sup>68-71</sup>. 試験片の計測面には,  $(-10, -30)$  の位置に

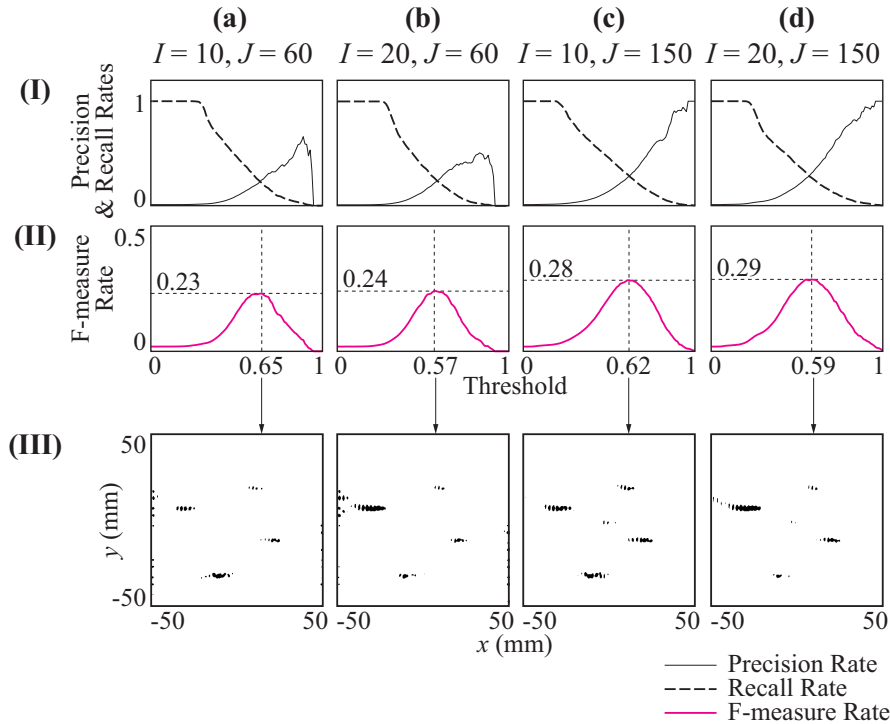


Fig. 4.12 (a), (b), (c), (d) の可視化像の評価結果 : (a)  $I = 10, 3J = 60$ , (b)  $I = 20, 3J = 60$ , (c)  $I = 10, 3J = 150$ , (d)  $I = 20, 3J = 150$ . (I) 閾値に対する適合率と再現率のグラフ, (II) 閾値に対する F 値のグラフ, (III) F 値最大時の閾値における 2 値化像.

直径 8 mm の欠陥が存在する. 送波点数を 6, 8, 20 の 3 通り, 受波点数を 150 に固定して実験を行う. その他の実験条件にかかるパラメータは, 前節で用いたパラメータと同様である.

#### 4.4.2 結果と考察

Figure 4.13 に, 欠陥の可視化結果を示す. Figure 4.13(A) が送波器数 6, Fig. 4.13(B) が送波器数 8, Fig. 4.13(C) が送波器数 20 の場合の結果を示している. 2 値化像の生成には, F 値が最大となる閾値を用いた. 結果を比較すると, 送波器数が増えるほど可視化像において欠陥部分のエネルギーが高まるものの, 2 値化像では送波器数による大差がないことが分かる. 2 値化像において, 実際の欠陥位置付近に斑点上に欠陥が写っているが, これは受信信号における信号対雑音比が下がったことで, 欠陥からの散乱波と雑音の見分けがつかない部分があるためであると考えられる.

Figure 4.14 に, 先行研究において本実験と同条件で行われた可視化実験の結果を示す<sup>38)</sup>. 時間反転波による可視化像 Fig. 4.13 と, TOF を用いる超音波 CT 法による可視化像 Fig.

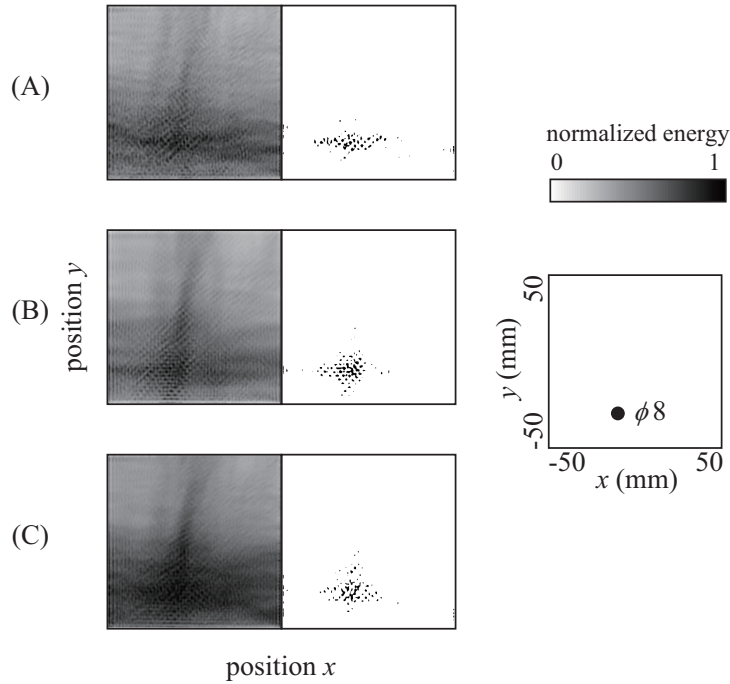


Fig. 4.13 可視化像および最大 F 値となる閾値における 2 値化像 : (A)  $I = 6$ , (B)  $I = 8$ , (C)  $I = 20$ .

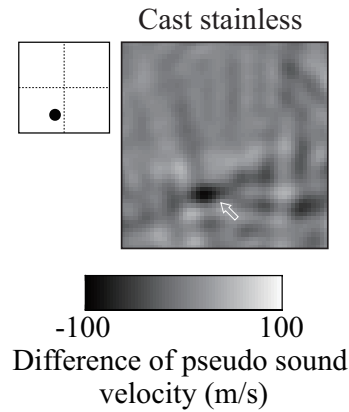


Fig. 4.14 先行研究において、TOF を用いる超音波 CT 法により得られた可視化像。  
 出典 : Y. Norose, et al. (2014): “Application of ultrasonic computerized tomography using time-of flight measured by transmission method to nondestructive inspection for high-attenuation billets.”

4.14 とを比較すると、前者は欠陥に向かってアーチファクトが伸びていることが分かる。しかし、2 値化像を見る限りは、欠陥検出能力に劣る訳ではなく、欠陥位置への収束性が悪いこ

とが原因であるから，画像処理によって改善できるものと考えられる．

ここで，送受信回数の違いについて考える．時間反転波の逆伝搬を利用する手法では，実験結果から，送波器点数を指向性が許す限り少なくできると考えられる．本研究で比較した範囲では， $I=10$ ， $J=50$  で欠陥の可視化を可能としており，このときの送受信回数は 1,500 回，送信回数は 10 回である．これは，TOF を用いる超音波 CT 法における送受信回数 15,000 回，送信回数 150 回（同時送信で 30 回）を大きく下回る値であり，送受信回数の低減を達成できたと言える．同時送信では可視化像のアーチファクトが増加するため，同時送信なしの条件で比較を行うと，時間反転波を利用する手法では，送受信回数が  $1/10$ ，送信回数が  $1/15$  になっている．仮に，一回の送信あたり  $100 \mu\text{s}$  の計測時間（本章の実験では  $40 \mu\text{s}$  の計測時間）がかかるのであれば，一断面あたりの計測時間は 15 ms から 1 ms に短縮されたと言える．

### 4.5 むすび

本章では，時間反転波を取り入れた可視化方法の原理を示し，複数の穴の空いた試験片を用いた可視化実験を行い，可視化像の比較・評価を行った．その結果，時間反転波の逆伝搬を用いるベーシックな可視化手法と比べ優れた検査能力を持つことが分かった．また，減衰のある試験片を用いた実験を行い，先行研究との結果を比較したところ，ややアーチファクトが含まれ可視化能力に劣るものの，欠陥検出能力としては十分であることが分かった．送受信回数の比較を行ったところ，TOF を用いる超音波 CT 法に比べ，大幅な送受信回数の低減を達成できたことが分かった．

---

## 第 5 章

# 結論

本研究では、TOF を用いる超音波 CT 法による、角鋼片内部に含まれる欠陥の可視化をベースにして、計測コストの低減を図ることを目的とした。計測コストの低減として、具体的には、トランスデューサアレイの走査間隔の最適化、トランスデューサ間の送受信回数の少数化を取り上げた。100 mm 角のビレットに含まれる、直径数 mm 程度のピンホールやブローホール等の欠陥を対象とし、計算機による可視化シミュレーション、および、試験片による可視化実験を行った。各章における内容は、以下の通りである。

第 2 章では、本研究のベースとなる TOF を用いる超音波 CT 法の原理について概念図を交えて説明を行い、シミュレーションに利用する WE-FDTD 法の紹介を行った。また、実際の欠陥径と、可視化像における欠陥像の幅が異なる点を取り上げ、第 3 章の基礎となるパラメータ間の関係性についてシミュレーションを行った。欠陥像の幅、実際の欠陥径、中心周波数（波長）、疑似音速の低下量の各パラメータを変えた際の可視化像から、パラメータ間の関係性を確認し、具体的な関係式の導出を行った。その結果、本研究で想定した条件において、「欠陥径」と「疑似音速の低下量」、および、「中心周波数に対する角鋼片内部の縦波波長」と「欠陥像の幅」に、およそ線形関係があることを明らかにした。

第 3 章では、計測面の走査間隔の決定方法が定まっていない問題点に着目し、最適な計測面の走査間隔を決定するための、実験およびシミュレーションを行った。はじめに、深穴欠陥先端の可視化を実験とシミュレーションにより試み、欠陥と交差しない計測面において、欠陥の影響が及んでいることを確認した。次に、深穴欠陥と球状欠陥の可視化像が、疑似音速の変動量を除いておよそ一致することをシミュレーションにより確認した。加えて、欠陥径の異なる球状欠陥の近傍における可視化シミュレーションを行い、欠陥の 3 次元可視化を試みた。結果の比較から、欠陥近傍の計測面に対する音速変動の広がり方が、計測面内における音速変動の広がり方と類似していることが分かった。ここから、最適な計測面間隔は欠陥像の幅により、

すなわち、欠陥像の幅と線形関係にあった縦波波長により、決定できることが明らかになった。

第 4 章では、TOF を用いる超音波 CT 法の送受信回数が多いことを問題とし、時間反転波の導入により送受信回数の少数化を図った。まず、時間反転波の利用により送受信回数軽減の見込みがあることを説明し、実際の実験データを用いて時間反転波の逆伝搬を利用する可視化手法の原理を説明した。次に、複数の穴が空いた試験片を用いて実験を行い、時間反転波の逆伝搬を用いるベーシックな手法との比較を行った。その結果、原理で示した手法が優れているとともに、更なる少数化を図れる可能性があることが示された。この実験に加えて、比較的減衰のある試験片を用いた実験を行い、減衰のある場合においても、少数の送受信回数で欠陥の可視化が可能であることを示した。最終的に TOF を用いる超音波 CT 法との比較を行い、送受信回数の低減が図られたことが示された。

以上の検討から、本研究でベースとした超音波の計測方法において、計測面の走査間隔の最適化と、時間反転波の導入による送受信回数の低減がなされた。すなわち、本研究の目的であった計測コストの低減が達成されたと言える。この成果は、現行のパルスエコー法に代わる、角鋼片の新しい非破壊検査手法の実用化への前進に貢献するものである。



# 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 在学中に、音響システム研究室にて実施した研究成果をまとめたものです。

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、主指導教員として研究・学会発表・論文執筆などを含む、様々な場面においてご指導，ご鞭撻を頂きました。音響システム研究室の一員となって以来，何かとご心配をおかけ致しましたが，おかげさまで，大学3年次の早期卒業，ティーチング・アシスタント，デュアルディグリー・プログラム，イベントでの説明員など，かけがえのない経験を積むことができました。また，何事にも全力で立ち向かう前向きな姿勢をご教授頂きました。心より感謝致しますとともに，厚く御礼申し上げます。

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，副指導教員として研究活動を進める上で不可欠な理論的知識，論文執筆やプログラミングの方法など，多くのご指導を頂きました。また，お忙しい中でも，私の相談に丁寧に対応して頂き，問題の解決へと導いて頂きました。おかげさまで，研究内容などに対する理解を深めることへと繋がりました。心より感謝と御礼を申し上げます。

筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 准教授 海老原格先生には，副指導教員として学会発表や論文執筆の際に，研究内容に関する的確なコメントやアドバイスを頂きました。研究内容に関して，いつも基本となる事柄から問いかけてくれたことで，自身で考える力を身に付けるきっかけとなりました。また，国際会議において口頭発表を行う際には，発表にかかる様々なサポートをして頂きました。心より感謝と御礼を申し上げます。

筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 教授 藪野浩司先生，筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域 教授 京藤敏達先生，筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 助教 善甫啓一先生には，本論文を執筆するにあたり，専門的な見地から大変有益なご指摘を頂きました。本論文及び発表内容に関しまして，丁寧にご指導頂きましたことを深く感謝申し上げます。

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 上田佳央氏には，実験におけるご支援，並びに，研究内容に関わる貴重なアドバイスを頂きました。心より

感謝申し上げます。

独立行政法人 日本学術振興会には，特別研究員奨励費（28・1113）により，本研究の一部を助成して頂きました。ここに感謝申し上げます。

筑波大学 システム情報系 社会工学域 教授 吉瀬章子先生には，デュアル・ディグリー・プログラムを通して，また，筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 助教 前田祐佳先生には，研究室のゼミを通して，研究活動を進める上での大切な事を学ばせて頂きました。心より感謝申し上げます。

音響システム研究室，通信システム研究室，生体計測システム研究室，知覚拡張システム研究室の皆様には，研究室における生活の様々な場面でお世話になりました。本研究室の卒業生である佐藤裕治博士，野呂瀬葉子博士，黒山喬允博士，並びに，博士後期課程に在籍する青柳将史氏，青木拓也氏，宮本隆典氏をはじめとする皆様方には，本研究に関する相談に乗って頂くとともに，多くの助言を頂きました。また，相談に乗って頂いた皆様に加えまして，本研究室の博士後期課程に在籍する藤田佑樹氏，安立隆陽氏，小林彰人氏，千葉裕介氏，中林大樹氏，並びに，博士前期課程に在籍する佐野祐士氏，糸井川椋氏，飛田和邦氏をはじめとする研究室の皆様とは，日頃より食事やイベント等で楽しい時間を過ごさせて頂きました。心からの感謝と御礼を申し上げます。

最後に，同じ目標に向かって長い時間を共有させてくれたサークルやアルバイトの皆様，そして何より，私を気遣い支えとなってくれた家族に対し，心から感謝致します。

## 参考文献

- 1) 日本の「稼ぐ力」創出研究会（経済産業省）：“鉄鋼業の現状と課題（高炉を中心に）,” [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sansei/kaseguchikara/010\\_haifu.html](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sansei/kaseguchikara/010_haifu.html), 2013. (2016年6月29日閲覧)
- 2) 経済産業省大臣官房調査統計グループ（編）：“平成25年度 経済産業省生産動態統計年報 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編,” (株)丸井工文社, 東京, 2014.
- 3) JFE スチール株式会社, JFE 条鋼株式会社：“形鋼,” [http://www.gecoss.co.jp/products\\_service/catalog/katakou/index.html](http://www.gecoss.co.jp/products_service/catalog/katakou/index.html). (2016年6月29日閲覧)
- 4) 全国厚板シャリング工業組合 生産性委員会：“鉄鋼の初歩知識とシャリング業のあらまし,” 全国厚板シャリング工業組合, 2008.
- 5) 日本工業規格, G0203, 2009.
- 6) 岡本正三：“鉄鋼材料,” コロナ社, 東京, 1978.
- 7) 日本工業規格, Z2300, 2009.
- 8) 田中貢, 藤井清一：“鉄鋼の知識とその取扱い方 (その11),” 電気製鋼, Vol. 29, No. 2, pp. 107–113, 1958.
- 9) 森久：“連続鑄造鑄片の欠陥発生とその防止法,” 鉄と鋼, Vol. 58, No. 10, pp. 1511–1534, 1972.
- 10) 日本金属学会（編）：“鉄鋼材料便覧,” 丸善, 東京, 1967.
- 11) 黒川豊, 尾添伸明, 太田英明：“鑄鉄鑄物のピンホール欠陥の分類,” 鑄造工学, Vol. 73, No. 4, pp. 258–263, 2001.
- 12) Santosh Kumar, Vinod Kumar, R. K. Nandi, T. S. Suresh, and Ramen Datta: “Investigation into Surface Defects Arising in Hot-Rolled SUP 11A Grade Spring Billets,” J Fail. Anal. and Preven. Vol. 8, pp. 492–497, 2008.
- 13) 日本鋼構造協会：“鋼構造技術者のための非破壊検査,” 日本鋼構造協会, 1980.
- 14) 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,” 株式会社秀和システ

- ム, 東京, 2010.
- 15) 岩崎正樹, 松尾充高: “製鋼技術開発の歩みと今後の展望,” 新日鉄技報第 391 号, pp. 88–93, 2011.
  - 16) 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, 2012.
  - 17) 中島潤二, 藤健彦: “連続鋳造鋳片品質向上のための非金属介在物低減技術の開発,” 新日鉄技報, No. 394, pp. 42–47, 2012.
  - 18) M. B. Karamis and F. Nair: “Effects of Reinforcement Particle Size in MMCs on Extrusion Die Wear,” *Wear*, Vol. 265, pp. 1741–1750, November 2008.
  - 19) 松實敏幸: “鉄鋼の非破壊検査技術,” 鉄と鋼, Vol. 79, No. 7, pp. 85–94, 1993.
  - 20) 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.
  - 21) 三木千壽, 西川和廣, 白旗弘実, 高橋実: “鋼橋溶接部の非破壊検査のための TOFD 超音波探傷システムの性能試験,” 土木学会論文集 A, Vol. 62, No. 4, pp. 925–935, 2006.
  - 22) 横野泰和: “溶接構造物の非破壊試験技術,” 溶接学会誌, Vol. 79, No. 8, pp. 717–732, 2010.
  - 23) 荒川敬弘: “非破壊試験の高精度化に関する動向,” IIC REVIEW, No.43, 2010.
  - 24) Eugene Chan, L.R. Francis Rose, Chun H. Wang: “An extended diffraction tomography method for quantifying structural damage using numerical Green’s functions,” *Ultrasonics*, Vol. 59, pp. 1–13, 2015.
  - 25) 中畑和之, 上甲智史, 廣瀬壮一: “全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式を用いた逆散乱イメージング法による欠陥の超音波画像化,” 応用力学論文集, Vol. 13, pp.89–97, 2010.
  - 26) 佐藤海広, 高須一郎, 雲丹亀泰和: “15MHz 高周波超音波探傷による鋼中介在物評価法の開発,” 山陽特殊製鋼技報, Vol. 13, No. 1, pp. 25–33, 2006.
  - 27) 笠井宣文, 大久保寛之, 西隆之: “精密超音波探傷試験法による連鋳スラブ内欠陥弁別手法の開発,” 鉄と鋼, Vol. 91, No. 6, pp. 537–545, 2005.
  - 28) 廣瀬壮一: “鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発,” 建設技術研究開発平成 15 年度成果発表会資料, 国土交通省, pp. 1–5, 2004.
  - 29) 高田一, 山崎拓也, 戸村寧男, 運崎秀明, 佐々木聡洋, 荒谷誠: “超音波プローブアレイを用いた薄鋼板のオンライン内部探傷技術,” 鉄と鋼, Vol. 90, No. 11, pp. 883–889, 2004.
  - 30) 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.
  - 31) 三上修一, 大島俊之, 菅原登, 山崎智之: “エコー波形の詳細解析による超音波探傷法の欠陥検出の定量的評価,” 土木学会論文集, No. 501, pp. 103–112, 1994.

- 32) 中畑和之, 廣瀬壯一: “超音波リニアアレイ探触子のための逆散乱イメージング法の開発,” 応用力学論文集, Vol. 9, pp.107–114, 2006.
- 33) 片岡克仁: “高減衰鋼片の超音波探傷技術,” 電気製鋼, Vol. 79, No. 4, 2008.
- 34) H. Mitsui et al., “Detection of internal cracks in square billets using time of flight of longitudinal waves,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 7, pp. 07GD05\_1–5, 2009.
- 35) 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, 2012.
- 36) 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\_1–6, 2012.
- 37) Yoko Norose, Koichi Mizutani, and Naoto 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, p. 07HC09, 2013.
- 38) 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 billets,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53, No. 7, p. 07KC19, 2014.
- 39) Naoto Wakatsuki, Shin Kinjo, Jun Takarada, and Koichi Mizutani: “Precise wireless triggering system for anemometers with long-baseline acoustic probes,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, No.7, pp.07HC14\_1–4, 2010.
- 40) 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. I.81–I.88, 2012.
- 41) 角間孝一, 水谷孝一, 若槻尚斗: “超音波 CT 法を用いる角鋼片の内部欠陥検査における欠陥径の関係性,” 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.70(2014), No. 2, 特集号 (論文), pp. I.214–I.221, 2015.
- 42) Ikumi Saito, Naoto Wakatsuki, Koichi Mizutani, Masahisa Ishii, Limi Okushima, and Sadanori Sase: “Measurements of wind velocity and direction using acoustic reflection against wall,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 5B, pp. 4329–4332, 2008.

- 43) Hideto Mitsui, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Defect detection in square billet using time-of-flight of longitudinal waves,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, No.7, pp.07HC13\_1–6, 2010.
- 44) Ayumu Minamide, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Temperature distribution measurement with acoustic computerized tomography using rectangular arrangement of transducers,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 7, pp. 07GC02\_1–8, 2009.
- 45) 土屋隆生, 石井琢人, 大久保寛: “波動方程式に基づく FDTD 法 (WE-FDTD 法) による音響レンダリング,” 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波, Vol. 111, No. 88, pp. 25–30, 2011.
- 46) 中井盛繕, 石井琢人, 土屋隆生: “GPU を用いた WE-FDTD 法による海洋音波伝搬解析 (水中音響), ” 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波, Vol. 111, No. 191, pp. 21–26, 2011.
- 47) 朝倉巧: “サブグリッド法を適用した FDTD 法による音響解析,” 清水建設研究報告, Vol. 89, pp. 125–133, 2012.
- 48) 豊田政弘, 高橋大弐, 河井康人: “時間領域有限差分法を用いた振動音響連成解析,” 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響, Vol. 111, No. 136, pp. 1–6, 2011.
- 49) 村上桂一, 青山剛史: “FDTD 法による音響透過損失の数値解析,” 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008 論文集, pp. 73–78, 2009.
- 50) 国立天文台: “理科年表 平成 24 年,” 丸善, 東京, 2012.
- 51) 児玉英世, 新山英輔, 堀口穰, 木村智明, 遠藤宗宏: “鋼ビレット用同期回転式連続鋳造機の鋳型内における鋳片の凝固,” 鉄と鋼, Vol. 67, No. 8, pp. 1394–1400, 1981.
- 52) 角間孝一, 水谷孝一, 若槻尚斗: “超音波 CT 法を用いる角鋼片内部に含まれる欠陥の 3 次元可視化における計側面間隔,” 日本音響学会, 2013 年春季研究発表会講演論文集, CD-ROM, 2-P-6, pp. 1365–1366, 2013.
- 53) 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, p. 07HC10, 2013.
- 54) 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, 2012.
- 55) Y. Kagawa, T. Tsuchiya, K. Fujioka, and M. Takeuchi: “Discrete Huygens’ model

- approach to sound wave propagation – reverberation in a room, sound source identification and tomography in time reversal,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 225, Issue 1, pp. 61–78 (1999).
- 56) 中畑和之, 斎藤隆泰, 木本和志: “時間反転法を利用した超音波による内部欠陥の再構成,” *理論応用力学講演会 講演論文集*, Vol. 63, p. 72, 2014.
- 57) Bonilla, Luis L and Carpio, A and Dorn, O and Moscoso, M and Natterer, F and Papanicolaou, GC and Rapún, ML and Teta, A: “Inverse Problems and Imaging,” Springer, 2008.
- 58) 志村拓也, 越智寛, 渡邊佳孝: “北極海プロファイルにおける時間反転波の収束,” *超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集*, Vol. 25, pp. 453–454, 2004.
- 59) Ying Min Wang, Benjamin Judkewitz, Charles A. DiMarzio, and Changhui Yang: “Deep-tissue focal fluorescence imaging with digitally time-reversed ultrasound-encoded light,” *Nature communications*, Vol. 3, p. 928, 2012.
- 60) Johannes Douma, Ernst Niederleithinger, and Roel Snieder: “Event locating using deconvolution: Experimental application and analysis,” *Center for Wave Phenomena (CWP) Research Reports*, p. 799, 2014.
- 61) Brian E. Anderson, Michele Griffa, Paul A. Johnson, Carene Larmat, and Timothy J. Ulrich: “Time Reversal,” *Acoustical Society of America*, Vol. 4, pp. 5–15, 2008.
- 62) 安達和彦: “波動逆伝播解析に基づく衝撃検出法の精度向上に関する研究,” *評価・診断に関するシンポジウム講演論文集*, Vol. 2007, No. 6, pp. 65–69, 2007.
- 63) Zenghua Liu, Qinglong Xu, Yu Gong, Cunfu He, and Bin Wu: “A new multichannel time reversal focusing method for circumferential Lamb waves and its applications for defect detection in thick-walled pipe with large-diameter,” *Ultrasonics*, Vol. 54, No. 7, pp. 1967–1976, 2014.
- 64) 川崎拓, 滝沢真実, 芝田三郎: “パルス圧縮法を用いた開口合成 TOFD 法の適用研究,” *IIC REVIEW*, No.49, 2013.
- 65) J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington, and W. J. Albersheim, “The Theory and Design of Chirp Radars,” *Bell System Technical J.*, Vol.39, Issue 4, (July 1960), p. 745.
- 66) Koichi Kakuma, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Defect visualization in billets by time reversal of scattered waves from defects,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 7, p. 07HC10, 2015.

- 67) C. W. Cleverdon, J. Mills, and E. M. Keen, “Aslib Cranfield research project – Factors determining the performance of indexing systems,” CERES, Cranfield Library 2, Test results, 1966.
- 68) Koichi Kakuma, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Visualization of Defects in High-attenuation Billet Using Back Propagation of Scattered Waves,” Program Book of the 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), P2B1-2, p. 86, 2015.
- 69) Koichi Kakuma, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Defect Visualization in Billet Using Time Reversal Waves Generated by Utilizing of Signal Envelopes,” Proceedings of 12th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC), pp. 26–29, 2015.
- 70) 特殊鋼倶楽部： “特殊鋼（2015年5月号）， ” （一社）特殊鋼倶楽部， 64巻， 3号， 2015.
- 71) 横野泰和： “材料中の超音波の減衰の測定， ” 溶接学会誌， Vol. 62, No. 7, pp. 522–527, 1993.



# 著者文献

## (参考論文)

### 査読付雑誌論文（学位請求申請に関連のある論文）

- (J-1) **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) (22 July, 2013).
- (J-2) 角間孝一, 水谷孝一, 若槻尚斗: “超音波 CT 法を用いる角鋼片の内部欠陥検査における欠陥径の関係性,” 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.70(2014), No. 2, 特集号 (論文), pp. I.214-I.221 (8 April, 2015).
- (J-3) **Koichi Kakuma**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Defect visualization in billets by time reversal of scattered waves from defects,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 54, No. 7, 07HC10, (7 pages) (23 June, 2015).

## 査読付国際会議論文（学位請求申請に関連のある論文）

- (P-1) **Koichi Kakuma**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Visualization of Defects in High-attenuation Billet Using Back Propagation of Scattered Waves,” Program Book of the 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), P2B1-2, p. 86 (23 October, 2015).
- (P-2) **Koichi Kakuma**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Defect Visualization in Billet Using Time Reversal Waves Generated by Utilizing of Signal Envelopes,” Proceedings of 12th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC), pp. 26-29 (9 December, 2015).

## 査読付発表論文

- (1) **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 (15 November, 2012).
- (2) **Koichi Kakuma**, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki: “Relationship between probing signal and visualization image for the defect detection of billet using ultrasonic CT method,” Proceedings of the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, 2P2-13, pp. 233-234 (21 November, 2013).
- (3) **Koichi Kakuma**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: “Inspection of defects in billet using time-of-flight difference and time-reversal wave,” Proceedings of the 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 35, 2P2-19, pp. 265-266 (4 December, 2014).

## (その他の論文)

### 査読なし発表論文

- (1) 角間孝一, 水谷孝一, 若槻尚斗: “超音波 CT 法を用いる角鋼片内部の球状欠陥可視化 -3次元波動伝搬解析を用いるシミュレーション-,” 日本音響学会, 2012 年秋季研究発表会講演論文集, CD-ROM, 2-P-a27, pp. 1431-1432 (20 September, 2012).
- (2) 角間孝一, 水谷孝一, 若槻尚斗: “超音波 CT 法を用いる角鋼片内部に含まれる欠陥の 3次元可視化における計側面間隔,” 日本音響学会, 2013 年春季研究発表会講演論文集, CD-ROM, 2-P-6, pp. 1365-1366 (14 March, 2013).
- (3) 角間孝一, 水谷孝一, 若槻尚斗: “超音波 CT 法を用いる角鋼片の内部欠陥検査における欠陥径の関係性,” 土木学会, 2014 年度土木情報学シンポジウム講演集, Vol. 39, (19), pp.67-70 (24 September, 2014).
- (4) 角間孝一, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “時間反転波を用いる角鋼片内部の欠陥可視化における横波の影響,” 日本音響学会, 2016 年秋季研究発表会講演論文集, CD-ROM, 1-Q-1 (2 pages) (14 September, 2016).