

平行走査型超音波透過法による高減衰角鋼片の
欠陥位置・径の高速計測に関する研究

2019年 3月

宮本 隆典

平行走査型超音波透過法による高減衰角鋼片の
欠陥位置・径の高速計測に関する研究

宮本 隆典

システム情報工学研究科

筑波大学

2019年 3月

概 要

角鋼片と呼ばれる鉄鋼製品の半製品は、連続鋳造法により製造される際に、内部に欠陥を含む場合がある。角鋼片内部の欠陥は最終製品の品質低下につながるため、非破壊に検出する必要がある。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が、表面近傍の欠陥検出が難しく、減衰が大きい材質への適用が困難である。この問題を解決する手法として、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) 法が研究されている。この手法は、超音波伝搬経路上に欠陥がある場合に超音波が回折し、欠陥がない場合と比べ伝搬距離および TOF が増加することを利用して、様々な経路において超音波を透過させて様々な経路における TOF 変化量を計測し、CT 法により欠陥画像の再構成を行う。透過波を用いることにより欠陥の位置によらず十分な強度の受信信号を得ることができ、表面近傍の欠陥検出および高減衰角鋼片への適用を可能にしている。一方、多くの計測点を必要とするために計測時間が長くなるという課題がある。符号変調を用いた超音波信号の同時送信による計測の高速化も図られているが、同時送受信が可能な信号は最大 5 個であり、製造現場におけるオンライン計測の実用化のためには更なる高速化が必要である。加えて近年では生産工程へのフィードバックのため、欠陥の有無の判別だけでなく欠陥径や形状などの推定が可能な定量的評価手法が求められている。欠陥の定量的評価により製造工程の課題を見つけ、各工程の改善を行うことが可能となる。本研究では、実用化可能な時間で計測可能な、高減衰角鋼片にも適用可能な内部欠陥検出手法の確立を目的として、平行走査型超音波透過法の提案および有効性の検討を行い、計測経路の削減に伴う欠陥情報の減少への対応、更なる計測の高速化および大型かつ高減衰な角鋼片への対応について検討した。

まず、第 2 章では、高減衰に適用可能で高速に検査が行える手法として、平行走査型超音波透過法による欠陥検出および欠陥径推定を提案し、その原理を示した。

次に、第 3 章では、数値シミュレーションおよび実験により有効性を検証した。数値シミュレーションにおいては従来用いられていた縦波のみを考慮した WE-FDTD 法によるものと試験片を用いた実験結果を比較し、欠陥検出および位置・径推定における提案手法の有効性を示した。また、縦波のみを考慮したシミュレーションと試験片を用いた実験結果において、TOF 変動量に差が表れることを確認した。

第 4 章では、第 3 章で示された縦波のみを考慮したシミュレーションにおける TOF 変動量と実験における TOF 変動量の間が生じた誤差の低減を行った。そのために、縦波のみを考慮したシミュレーションと弾性波を考慮した波動伝搬シミュレーションによる結果を比較し、TOF 計測において横波およびモード変換が影響を与えること、また弾性波の考慮により実験における TOF 変動量との誤差が低減することを示した。

第 5 章では欠陥の深さ位置の推定精度向上のため、対面反射波の TOF 変動計測の利用を検

討した。透過超音波の TOF 計測との併用により欠陥の深さ情報が得られ、また、対面反射波の TOF 変動計測を単独で用いることで単一のトランスデューサで角鋼片内部の欠陥検出が行えることを示した。

第 6 章では、更なる大型および高減衰な角鋼片の検査を実現するため、フェイズドアレイ技術による収束超音波ビームを用いた透過超音波の計測を検討した。トランスデューサアレイから送信した収束超音波の透過波の TOF および振幅変化に着目することで、減衰の影響の更なる低減につながることを示した。

第 7 章では、更なる計測時間の短縮のため、平面波送信による透過超音波の TOF 計測を検討した。1 回の平面波送信とすることで、大幅に計測時間を短縮した透過超音波による欠陥検出が可能であることを示した。しかしながら、第 6 章で示した収束超音波の利用は想定していないため、超音波の一回送信による高速計測の大型高減衰角鋼片への適用には工夫が必要である。

以上の結果を第 8 章にまとめた。以上の検討から、平行走査型超音波透過法において、欠陥の定量的評価、計測の高速化、高減衰角鋼片への適用が可能であることを示し、検査の実用化に近づけた。本研究は鉄鋼業界における品質保証手段を進歩させるものであり、鋼材半製品のオンラインにおける全数検査の実現に大きく寄与するものである。最終製品である鉄鋼製品の供用中の事故を防ぎ、社会全体の安全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	鉄鋼材料と内部欠陥検出	1
1.1.2	超音波による角鋼片内部の非破壊検査	3
1.2	研究の目的・論文構成	4
第 2 章	平行走査型超音波透過法による欠陥位置・径の計測原理	7
2.1	はじめに	7
2.2	透過超音波の TOF 変動量の計測	7
2.3	TOF プロファイルに基づく欠陥の定量的評価	9
2.4	むすび	9
第 3 章	平行走査型超音波透過法による欠陥位置・径計測の有効性の検証	11
3.1	はじめに	11
3.2	WE-FDTD 法による欠陥検出シミュレーション	11
3.2.1	波動伝搬シミュレーション：Wave equation finite difference time domain(WE-FDTD) 法	11
3.2.2	シミュレーション条件	12
3.2.3	解析結果	13
3.3	欠陥検出実験	20
3.3.1	実験条件	20
3.3.2	実験結果と考察	20
3.4	むすび	22
第 4 章	弾性波の考慮による数値シミュレーション精度の向上	23
4.1	はじめに	23

4.2	横波およびモード変換を考慮した欠陥検出シミュレーション	23
4.2.1	シミュレーション条件	23
4.2.2	縦波のみの場と弾性場におけるシミュレーション結果の比較	25
4.2.3	楕円形状欠陥および複数欠陥の検出	31
4.2.4	弾性場におけるシミュレーションと実験における結果の比較	34
4.3	むすび	36
第 5 章	対面反射波の TOF 変動に着目した欠陥検出	37
5.1	はじめに	37
5.2	対面反射波の TOF 変動に着目した欠陥検出の原理	37
5.3	欠陥検出シミュレーション	38
5.3.1	解析条件	38
5.3.2	解析結果	39
5.4	欠陥検出実験	43
5.5	透過波と対面反射波の TOF 変動量に基づく欠陥位置・径の計測	43
5.6	むすび	46
第 6 章	フェイズドアレイ技術の利用	47
6.1	はじめに	47
6.2	収束超音波の透過波に着目した欠陥検出の原理	47
6.3	欠陥検出シミュレーション	48
6.4	むすび	49
第 7 章	平面波送信による計測高速化	51
7.1	はじめに	51
7.2	平面波による欠陥検出の原理	51
7.3	欠陥検出シミュレーション	52
7.4	むすび	52
第 8 章	結 論	55
	謝 辞	57
	参考文献	59

目 次

1.1	Scheme of pulse echo method.	2
1.2	Measurement paths: (a) Transmission method with ultrasonic CT and (b) transmission method with linear scanning.	2
2.1	Outline of defect detection by transmission method with linear scanning: (a) measurements on cross sections, measurement and reference plane, (b) difference in received waveforms between measurement and reference signals, and (c) linear scanning and TOF profile.	8
3.1	Simulation condition.	13
3.2	TOF profiles at the defect position (50,50) and the aperture size of transducers is 6 mm: (a) $f = 0.5-1.5$, (b) $f = 1.0-3.0$, and (c) $f = 2.5-7.5$ MHz.	14
3.3	Simulation condition and results: (a) simulation condition, (b) relationship between diameter of transducers a and deviation of TOF $\Delta\tau$ at $D = 2$ and 5 mm.	15
3.4	Received signals at reference plane when $f = 0.5-1.5$ MHz: (a) the aperture sizes of transducers a are 3, (b) 6, and (c) 9 mm.	15
3.5	Simulation condition and results: (a) simulation condition and (b) relationship between the defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$	16
3.6	Simulation condition and results: (a) simulation condition and (b) relationship between the defect position x and deviation of TOF $\Delta\tau$	17
3.7	TOF profiles when the defect sizes D are 5 and 2 mm, and the defect position y is 50, x is varied: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.	18

3.8	Simulation condition and results: (a) simulation condition and (b) relationship between the defect position y and deviation of TOF $\Delta\tau$	19
3.9	TOF profiles when the defect sizes D are 5 and 2 mm, and the defect position x is 50, y is varied: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.	19
3.10	Side view of tested billet used in the experiments.	21
3.11	Experimental conditions and TOF profiles when there was a defect at the center of a cross section with the defect size was 2 mm in simulation, duralumin, and cast steel at $f = 0.5 -1.5$ MHz.	21
4.1	Profiles of TOF at the defect position $(x, y) = (50,50)$, transducers diameter a of 6 mm, and defect size D of 2, 5, and 8 mm in each wave field: (a) $f = 0.5-1.5$ MHz and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.	24
4.2	Received signals at transducer position X of 50, transducer diameter a of 6 mm, and $f = 0.5-1.5$ MHz in each wave field: (a) in reference plane with no defects, (b) in measurement plane with a defect at $(50, 50)$ of size D of 5 mm and (c) enlarged view of (b).	25
4.3	Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between the defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$ with transducer diameter a of 6 mm and $f = 0.5-1.5$ MHz and (c) $f = 1.0-3.0$ MHz.	26
4.4	Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between transducer diameter a and deviation of TOF $\Delta\tau$ at $D = 2$ and 5 mm and $f = 0.5-1.5$ MHz and (c) $f = 1.0-3.0$ MHz.	27
4.5	Received signals in reference plane in each wave field when $f = 0.5 - 1.5$ MHz and transducers position X is 50: aperture sizes of transducers are (a) 3, (b) 6 and (c) 9 mm.	27
4.6	Profiles of TOF in each wave field when the defect size D is 5 mm, defect position y is 50, x is varied, and transducer diameter a is 6 mm: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.	28

4.7	Received signals in each wave field at transducer position X of 80, transducers diameter a of 6 mm, and $f = 0.5 - 1.5$ MHz: (a) in reference plane with no defects and (b) in measurement plane with a defect at (80, 50) of size D of 5 mm.	29
4.8	Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between the defect position x and deviation of TOF $\Delta\tau$ at transducers diameter a of 6 mm and $f = 0.5-1.5$ MHz and (c) $f = 1.0-3.0$ MHz.	29
4.9	Profiles of TOF in each wave field when the defect size D is 5 mm, defect position x is 50, y is varied, and transducer diameter a is 6 mm: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.	30
4.10	Received signals in each wave field at transducer position X of 50, transducers diameter a of 6 mm, and $f = 0.5 - 1.5$ MHz: (a) in reference plane with no defects and (b) in measurement plane with a defect at (50, 80) of size D of 5 mm.	31
4.11	Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between the defect position y and deviation of TOF $\Delta\tau$ at transducers diameter a of 6 mm and $f = 0.5-1.5$ MHz and (c) $f = 1.0-3.0$ MHz.	31
4.12	Simulation condition and TOF profiles when an ellipse-shaped defect with major and minor axes of 5 and 2 mm was at $(x, y) = (0, 0)$ and the angle of a defect θ was varied: (a) simulation condition, (b) TOF profiles at $f = 0.5 -1.5$ MHz and (c) $f = 1.0 -3.0$ MHz.	32
4.13	Simulation condition and TOF profiles when there were two defects with y positions were 0, and the distance between defects l , and the defects size D_1 and D_2 were changed at $f = 0.5-1.5$ and $f = 1.0-3.0$ MHz.	33
4.14	Simulation condition and TOF profiles when there were two defects with x positions were 0, and the distance between defects l , and the defects size D_1 and D_2 were changed at $f = 0.5-1.5$ and $f = 1.0-3.0$ MHz.	34
4.15	Experimental conditions and TOF profiles when there was a defect at the center of a cross section with the defect size was 2 mm and when there were five defects in simulation, duralumin, and cast steel at $f = 0.5 -1.5$ MHz.	35

5.1	Outline of defect detection by TOF deviation of bottom echo: (a) measurements on cross sections, measurement and reference plane, (b) difference in received waveforms between measurement and reference signals, and (c) TOF profile of bottom echo.	38
5.2	Simulation condition	39
5.3	Simulation condition and TOF profiles using bottom echo : (a) when the defect position (x, y) of $(0,0)$ and defect size D were varied, and (b) when D is 5 mm, x is 0, and y is varied.	40
5.4	Simulation condition and the effect of defect size D and the position y on deviation of TOF $\Delta\tau$ measured using bottom echo : (a) relationship between D and $\Delta\tau$, and (b) Relationship between y and $\Delta\tau$	41
5.5	TOF profiles when the defect size D is 5 mm, defect position x is 0, and y is between -45 and 45, using bottom echo : (a) $f = 0.5-1.5$ MHz, and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.	41
5.6	Received signals of bottom echo when the defect size D is 5 mm, defect position x is 0: (a) at $y = 45$, and (b) $y = -45$	42
5.7	Pulse compression signal at $f = 0.5-1.5$ MHz : (a) with reference signal, and (b) with measurement signal at $(x, y) = (0, -45)$ and $D = 5$	42
5.8	Top view of tested billet used in the experiments.	43
5.9	TOF profiles when there was a defect at the center of a cross section with the defect size was 2 mm and when there were five defects in simulation, duralumin, and cast steel at $f = 0.5 -1.5$ MHz.	44
5.10	Estimation of defects sizes and positions from TOF profiles of transmitted wave and bottom echo when $f = 0.5 - 1.5$ MHz, $a = 6$ mm with same positions y of the defects: (a) simulation condition of measurement plane, (b) TOF profile of transmitted wave at (a), (c) TOF profile of bottom echo at (a), (d) relationship between defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$ using transmitted wave, (e) relationship between defect position y and $\Delta\tau$ using bottom echo at $D = 5.0$, and (f) at $D = 2.0$	45

5.11	Estimation of defect sizes and positions from TOF profiles of transmitted wave and bottom echo when $f = 0.5 - 1.5$ MHz and $a = 6$ mm with different positions y of the defects: (a) simulation conditions of measurement planes, (b) TOF profile of transmitted wave at (a), (c) TOF profiles of bottom echo at #1 and #2, (d) relationship between defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$ using transmitted wave, (e) relationship between defect position y and $\Delta\tau$ using bottom echo at $D = 6.0$, and (f) at $D = 2.5$.	46
6.1	Outline of defect detection inside billet by transmission method using phased array technique.	48
6.2	Simulation condition and power of particle velocity at each methods. . .	49
6.3	Results of simulations of each transmitter arrays and transmitting wave shape : (a) peak amplitudes, and (b) deviation of cross correlation function peak position $\Delta\tau$	50
7.1	Outline of defect detection inside billet by transmission method using plane-wave.	52
7.2	TOF profiles at the defect position (x,y) using plane-wave : (a) $y = 50$, (b) $x = 50$	53

第 1 章

序 論

1.1 研究の背景

1.1.1 鉄鋼材料と内部欠陥検出

現代社会において、鉄鋼材料は必要不可欠となっており、その用途は自動車や電車、船舶、橋梁、ビルの鉄骨、家電製品、飲料缶、ねじおよびそれらを製造する工場や産業機械等、極めて多岐にわたる。これらの製品は、厚板、薄板、線材、鋼管等の一次製品から製造され、厚板からは船舶やタンク、高層ビル、薄板からは自動車や家電、家の屋根、線材からはワイヤロープや釘、針金、鋼管からは水道管やガス管、石油のパイプ等に用いられる部材が作られる。この一次製品は、角鋼片と呼ばれる長さ方向に角形の断面形状を持つ半製品に圧延等の加工を施すことにより製造される¹⁾。角鋼片は断面の寸法によりスラブ、ブルーム、ビレット、シートバーなどに分類され、スラブは厚さが 50 mm 以上で幅の厚さに対する比率が 2 以上の板状、ブルームは断面の長辺が短辺の 2 倍以下の長方形または正方形であり一辺の寸法が 200 mm を超えるもの、ビレットは断面の長辺が短辺の 2 倍以下の長方形または正方形であり一辺の寸法が 50 mm 以上 200 mm 以下のもの、シートバーは断面が長方形で厚さが 50 mm 以下で幅が 250 mm 程度の短冊状、とされている²⁾。角鋼片は連続鋳造法により溶けた鋼を流し固めることにより製造されるが、この過程において二酸化炭素や水素などの気泡の残留または鋼の凝固収縮にともない球形または梨型の空洞欠陥が生じることがある³⁻⁶⁾。このような欠陥は圧延時に圧着されることが多いが最終製品に一部残留することがあり、さらに板厚 100 mm 超の極厚化も進んでいることから、圧延による圧着も困難となっている⁷⁾。1 mm 程度の欠陥であっても製品の強度低下につながることから、破壊事故を防ぐためにも欠陥を検出する必要がある⁸⁾。最終製品における欠陥検出は、磁粉探傷検査、浸透探傷検査、渦電流探傷検査、超

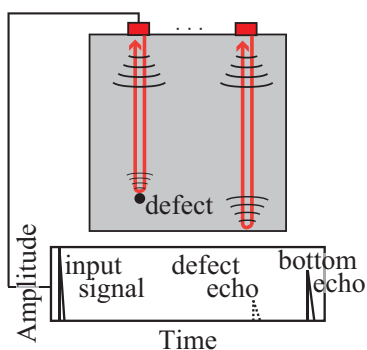


Fig. 1.1 Scheme of pulse echo method.

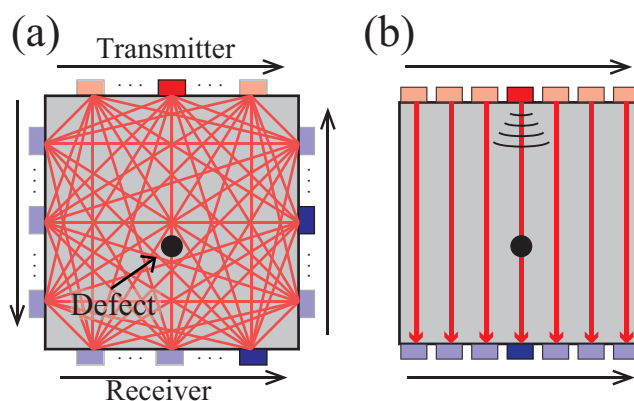


Fig. 1.2 Measurement paths: (a) Transmission method with ultrasonic CT and (b) transmission method with linear scanning.

音波探傷検査，放射線検査等により行われ⁹⁻¹⁴，欠陥を含む製品が市場に出回る前に取り除かれる．しかしながら，最終製品の段階で欠陥が検出された場合，それまでの加工の手間が無駄になってしまい，また，製品の形状により検査が困難であることから，加工前の半製品である角鋼片の段階での欠陥検出が望まれている．角鋼片は一般的に最終製品よりも厚みがあるため，内部欠陥検出手法として，鉄鋼に対する透過率の低い放射線よりも金属内部を伝搬しやすい超音波を用いた手法が効果的である⁸）．

1.1.2 超音波による角鋼片内部の非破壊検査

現在、角鋼片の生産現場において一般的に、Fig. 1.1 に示すような超音波を入射した時の欠陥からの反射波をもとに欠陥を検出するパルスエコー法が用いられている¹⁵⁾。このような反射波を用いる手法は計測が容易であるが、表面近傍に欠陥が存在する場合には、欠陥からのエコーと、入射信号または対面からの反射波がほぼ同時に受信され分離が困難となり、JIS G 0802(2016)において6 - 200 mmのステンレスなどの鋼板では不感帯が15 mm以下の位置とされている¹⁶⁾。また、欠陥が小さい場合や超音波トランスデューサから離れた位置にある場合に反射波の強度が弱くなる¹⁷⁾。超音波の減衰が強くなるような結晶粒が粗大な高減衰角鋼片に適用する場合には受信信号がノイズに埋もれ、欠陥の検出が困難になる¹⁸⁾。近年、フェーズドアレー技術とパルスエコー法を組み合わせた欠陥検出手法が研究されている¹⁹⁻²²⁾。フェーズドアレー技術は複数のトランスデューサを用いて超音波の入射角、収束位置の制御を行うものであり、この技術により欠陥からのエコーが高強度になり、減衰の大きい素材の欠陥検出も現場にて行われ始めている。しかしながら、この手法においても反射波を用いるため、表面近傍の欠陥検出及び粗大な結晶粒からの影響は同様に受け、表面近傍および高減衰角鋼片の欠陥検出にはいまだ困難が存在する²³⁾。これら反射法に対して、透過波に着目した透過法が存在する。従来、角鋼片に対する検査においては振幅減衰のみが利用されており、欠陥の深さ方向位置を特定することができず、反射法に比べ振幅減衰の計測が難しいことから、角鋼片に対する探傷法として透過法が用いられることは少ない。しかしながら、透過波の縦波伝搬時間 (Time-of-flight: TOF) に着目することにより生体組織性状や気温等の計測を実現した研究がなされており、様々な超音波伝搬経路における計測および超音波計算機トモグラフィ (Computerized tomography: CT) 法の利用により空間的な音速分布に基づく特徴抽出がなされている²⁴⁻²⁷⁾。これらの研究においては音波の伝搬経路が直線と仮定されているが、回折や散乱を考慮することにより再構成画像の画質を向上させる回折トモグラフィ法も研究されている^{28, 29)}。このような透過波の TOF 計測と超音波 CT 法を角鋼片の検査に応用した、TOF を用いる超音波 CT 法が近年研究されている³⁰⁻³⁴⁾。この手法は、超音波伝搬経路上に欠陥がある場合に超音波が回折し、欠陥がない場合と比べ伝搬距離および TOF が増加することを利用している。Figure 1.2(a) のように超音波を透過させて様々な経路における TOF 変化量を計測し、CT 法により欠陥画像の再構成を行う。実際の音速ではなく、回折波や散乱波との干渉によって生じる見かけ上の音速変化を用いて欠陥の可視化を行っている。透過波を用いることにより欠陥の位置によらず十分な強度の受信信号を得ることができ、表面近傍の欠陥検出および高減衰角鋼片への適用を可能にしている^{18, 27)}。一方、多くの計測点を必要とす

るために計測時間が長くなるという課題がある。符号変調を用いた超音波信号の同時送信による計測の高速化も図られているが、同時送受信が可能な信号は最大5個であり、製造現場におけるオンライン計測の実用化のためには更なる高速化が必要である^{33,35)}。また、時間反転波の導入による超音波送受信回数の少数化も図られているが、角鋼片の角型断面の全周にわたるトランスデューサの走査を必要とするため、いまだ高速化および簡略化の余地がある³⁶⁾。加えて近年では生産工程へのフィードバックのため、欠陥の有無の判別だけでなく欠陥位置や径などの推定が可能な定量的評価手法が求められている^{23,37)}。欠陥の定量的評価により製造工程の課題を見つけ、各工程の改善を行うことが可能となる。

1.2 研究の目的・論文構成

本研究の目的は、実用化可能な時間で計測可能な、高減衰角鋼片にも適用可能な内部欠陥検出手法を確立することである。そのために、Fig. 1.2(b)に示すような従来の超音波CT法の計測経路を大幅に削減した、平行走査型超音波透過法の提案および有効性の検討を行い、計測経路の削減に伴う欠陥情報の減少への対応、更なる計測の高速化および大型かつ高減衰な角鋼片への対応について検討する。

第2章では、提案手法である平行走査型超音波透過法による欠陥検出および欠陥径推定原理を示す。欠陥検出及び径推定はTOF変化量の計測と、TOF変化量計測データに基づく欠陥検出及び径推定に分けられるため、それぞれについて説明する。

第3章では、数値シミュレーションおよび実験により有効性を検証する。数値シミュレーションにおいては従来用いられていた縦波のみを考慮したWE-FDTD法によるものと試験片を用いた実験結果を比較した。

第4章では、第3章で示された縦波のみを考慮したシミュレーションにおけるTOF変動量と実験におけるTOF変動量の間が生じた誤差の低減を行う。そのために、縦波のみを考慮したシミュレーションと弾性波を考慮した波動伝搬シミュレーションによる結果を比較し、TOF計測における横波およびモード変換の影響について検討する。

第5章では、提案手法による欠陥の深さ位置の推定精度向上のため、対面反射波のTOF変動計測の利用を検討する。平行走査により得られる透過超音波のTOFは欠陥の深さ方向の位置による影響が小さく、このTOFからの欠陥深さ位置推定は容易ではない。そこで、欠陥深さ位置により超音波伝搬経路が異なる対面反射波のTOFに着目した欠陥深さ位置推定を試みる。

第6章では、更なる大型および高減衰な角鋼片の検査を実現するため、フェイズドアレイ技術による収束超音波ビームを用いた透過超音波の計測を検討する。トランスデューサアレイか

ら送信した収束超音波の透過波の TOF および振幅変化に着目することで、減衰の影響の更なる低減を試みる。

第 7 章では、更なる計測時間の短縮のため、平面波送信による透過超音波の TOF 計測を検討する。これまでの計測では超音波の送信を複数回に分けて行っていたが、これを 1 回の平面波送信とすることで、大幅な計測時間の短縮が実現できる。しかしながら、これまで個別に計測していた超音波伝播経路を平面波送信により同時に計測することで欠陥の検出に影響が生じると考えられる。そこで平面波送信による欠陥検出の有効性の検討を行う。

第 8 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

平行走査型超音波透過法による欠陥位置・径の計測原理

2.1 はじめに

本章では，平行走査型超音波透過法による角鋼片内部の欠陥位置・径の計測原理について述べる³⁸⁾．本手法による計測は，透過超音波の TOF 変動量計測と TOF プロファイルに基づく欠陥位置及び径の推定に分けられる．まず TOF 変動量の計測について述べ，次に TOF プロファイルに基づく欠陥位置および径の推定について述べる．

2.2 透過超音波の TOF 変動量の計測

Figure 2.1 に計測の概略図を示す．Fig. 2.1(a) に示すように，一断面の計測を 1 対のトランスデューサの平行走査により行う．平行走査により計測を行う断面を角鋼片の長手方向に移動させることにより角鋼片全体の検査を行う．送信用トランスデューサから超音波信号を角鋼片に入射し，対向する受信用トランスデューサにより受信する．欠陥が超音波伝搬経路上に存在する場合と存在しない場合で TOF に変化が現れることを利用して欠陥の検出を行う．欠陥が超音波伝搬経路上に存在する場合，欠陥近傍で超音波が回折することにより，欠陥が存在しない場合と比べて TOF が増加する³⁰⁾．この TOF の変化分 ($\Delta\tau$) は，Fig. 2.1(b) に示すような欠陥が存在しない参照面における受信信号 $r(t)$ と欠陥の検出を行う計測面における受信信号 $m(t)$ の時間方向のずれとして現れる．このずれ分，すなわち $\Delta\tau$ を $r(t)$ と $m(t)$ の相互相関関数 $R(\tau)$ の値が最大となる τ を計算することにより求める^{32,40)}． $R(\tau)$ および $\Delta\tau$ は

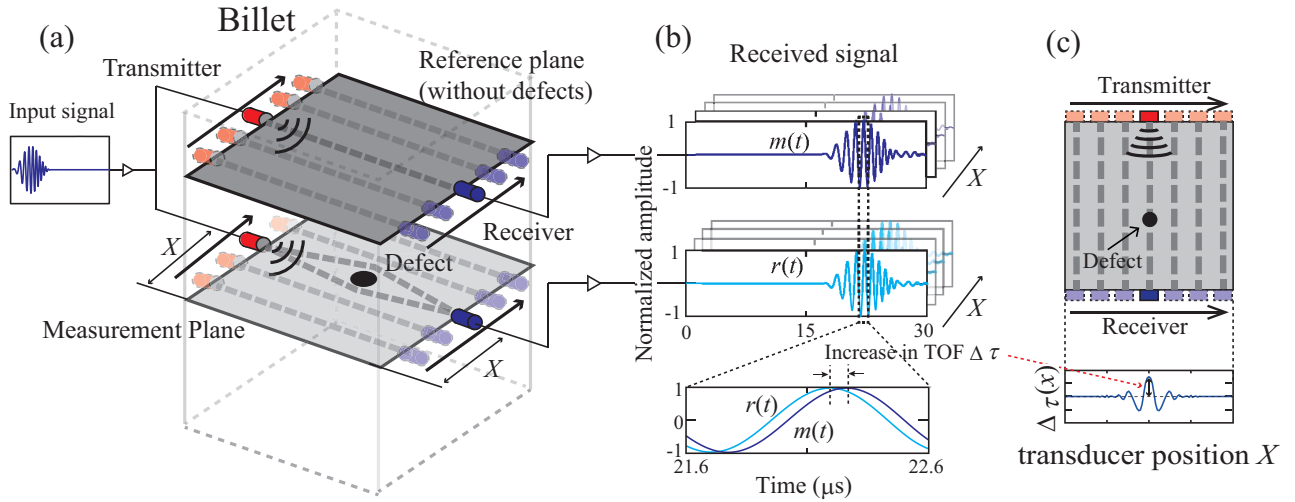


Fig. 2.1 Outline of defect detection by transmission method with linear scanning: (a) measurements on cross sections, measurement and reference plane, (b) difference in received waveforms between measurement and reference signals, and (c) linear scanning and TOF profile.

以下の式,

$$R(\tau) = \int_{-T}^T m(t)r(t - \tau)dt, \quad (2.1)$$

$$\Delta\tau = \arg \max_{\tau} [R(\tau)], \quad (2.2)$$

として表される．ここで， T は信号の計測時間を表す．相互相関関数 $R(\tau)$ の値が大きいほど $r(t - \tau)$ と $m(t)$ の一致度が高い．よって， $R(\tau)$ がピークを示す時の τ が 2 つの信号の伝搬時間差，すなわち TOF 変化量 $\Delta\tau$ となる．入力信号にはチャープ信号を用いる.³⁹⁾ 初期周波数を f_0 ，周波数掃引幅を Δf ，信号長を t_i とすると，入力信号 $s(t)$ は

$$s(t) = \sin \left[2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{2t_i} t \right) t \right], (0 \leq t \leq t_i), \quad (2.3)$$

で表される．チャープ信号は単一周波数のバースト波に比べ帯域幅が広いことから，自己相関関数におけるピークが鋭い．これは直達波と回折波，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ことから，相互相関法を用いる際に一般的に用いられる⁴⁰⁾．以上で示した方法により TOF 変化量を計測する．

2.3 TOF プロファイルに基づく欠陥の定量的評価

Figure 2.1(c) に示すような平行走査により、図の下側に示すような計測を行ったトランスデューサの位置 X とその位置における TOF 変化量 $\Delta\tau$ を示した TOF 変化のプロファイルを得る。この TOF プロファイルから欠陥の情報を得る。TOF プロファイルを得るために、Fig. 2.1(a) に示すような欠陥を含まない参照面と、欠陥の検出を行う計測面において平行走査による計測を行う。実際の角鋼片での欠陥検出においては、長手方向に連続して検査する際に 1 つ前の計測面を参照面にすることで、参照面と計測面の差分から欠陥検出を可能とする。各計測位置における $\Delta\tau$ は、2.1 節において述べた方法で求める。欠陥が計測面に存在しない場合、参照面における受信信号と同じ信号が得られるために TOF の変化は現れず、 $\Delta\tau$ は 0 となる。Figure 2.1(c) の欠陥が存在する計測経路に着目すると、欠陥が存在しない場合と比較して TOF が増加することにより $\Delta\tau$ が正の値をとっており、TOF プロファイルにおいて正のピークが生じる。欠陥から少し離れた計測経路においては $\Delta\tau$ は負の値をとり、TOF プロファイルにおいては谷が生じる。これは実際に TOF が短くなったわけではなく、送信信号の直達波と欠陥からの反射波の干渉により受信信号において早く到達したように見えることによる。欠陥からの反射波が直達波より少し遅れて位相が反転した状態で到達することにより、受信信号波形にこのような変化が現れると考えられる。TOF プロファイルにおいて欠陥がある経路上では正のピークが生じ、その左右の経路では負のピークが生じることから、このような特徴的な TOF プロファイルにより欠陥が存在するとの判断が可能となる。欠陥が計測面に存在しない場合は TOF プロファイルにおいて $\Delta\tau$ は常に 0 となり、欠陥がある場合の TOF プロファイルと異なるものになる。TOF プロファイルにおける山の大きさは欠陥径によって変化すると考えられる。この山の大きさ、すなわち欠陥が存在する計測経路上の $\Delta\tau$ の値と欠陥径の関係を明らかにすることにより、この関係をもとに計測した $\Delta\tau$ から欠陥径の推定が可能になる。

2.4 むすび

本章では、平行走査型超音波透過法による角鋼片内部の欠陥位置・径の計測原理について説明した。欠陥の存在により TOF が変化することを述べ、透過法による TOF 変化量計測および平行走査により得る TOF プロファイルからの欠陥検出および径推定について説明した。

第 3 章

平行走査型超音波透過法による欠陥位置・径計測の有効性の検証

3.1 はじめに

本章では，平行走査型超音波透過法による欠陥検出および位置・径の計測の有効性を検証するため，波動伝搬シミュレーションおよび試験片を用いた実験を行う．波動伝搬シミュレーションには，本章においては波動方程式における時間領域有限差分 (Wave-Equation Finite-Difference Time-Domain:WE-FDTD) 法を用いる⁴¹⁾．まず，WE-FDTD 法について説明し，次に解析条件について述べる．その後に波動伝搬シミュレーションにより得られた波形をもとに作成した TOF プロファイルを示し³⁸⁾，それに基づく欠陥検出および位置・径計測の有効性を検討する．最後に試験片を用いた実験の条件および結果を示し⁴²⁾，WE-FDTD 法によるシミュレーションの妥当性および提案手法の有効性を検討する．

3.2 WE-FDTD 法による欠陥検出シミュレーション

3.2.1 波動伝搬シミュレーション：Wave equation finite difference time domain(WE-FDTD) 法

波動方程式における時間領域有限差分 (Wave-Equation Finite-Difference Time-Domain: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る⁴¹⁾．縦波は弾性波の中で最も早く伝搬することから，先行研究においても縦波のみを考慮した WE-FDTD 法³⁴⁾ または Transmission-line matrix(TLM) 法^{18,31-33,35,43)} が用いられて

いる。本研究における欠陥検出では、角鋼片内部を伝搬した縦波を利用して TOF の変動量を算出することから、本章においては縦波のみの波動伝搬を計算する WE-FDTD 法を用いる。波動方程式は 2 次元において、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_l^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right), \quad (3.1)$$

と表される。\$c_l\$ は縦波音速、\$p\$ は音圧を示す。この式を 2 次精度の中央差分で差分化して得られる更新式、

$$p^{n+1}(i, j) = c_l \frac{\Delta t^2}{\Delta l^2} \{ p^n(i+1, j) + p^n(i-1, j) + p^n(i, j+1) + p^n(i, j-1) - 4p^n(i, j) \} + 2p^n(i, j) - p^{n-1}(i, j), \quad (3.2)$$

を用いる。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\$ は \$x, y\$ 軸方向のインデックスである。\$p^n(i, j)\$ は、2 次元平面の格子点における音圧を表している。計算において解を発散させないために、以下の CFL (Courant-Friedrich-Levy) 安定条件

$$c_l \frac{\Delta t}{\Delta l} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (3.3)$$

を満たす必要がある。

3.2.2 シミュレーション条件

Figure 3.1 にシミュレーション条件を示す。角鋼片は角柱状であるが、シミュレーションにおいては計算量の軽減のために計測面を 2 次元場として波動伝搬のシミュレーションを行う。また、角鋼片は弾性体であるが本節では縦波のみを考慮するため、シミュレーションにおいて波動はスカラー波として扱う。計測対象は \$100 \times 100 \text{ mm}^2\$ の断面を持つ、音速 \$5,950 \text{ m/s}\$ の鉄鋼を想定した。解析領域を \$0.1 \text{ mm}\$ 幅で離散化し、要素数が \$1,000 \times 1,000\$ のメッシュ空間とする。角鋼片の表面の境界は自由境界とし、音圧を 0 とした。シミュレーションの計算時間離散幅は \$1.12 \text{ ns}\$ とした。欠陥は 2 次元波動伝搬シミュレーションにおいて円形のを想定し、Fig. 3.1 に示すように直径を \$D \text{ mm}\$ としたものを位置 \$(x, y)\$ に配置した。開口径が \$a\$ であるトランスデューサを \$(X, 0)\$ と \$(X, 100)\$ に配置し \$(0 < X < 100)\$、超音波の送受信を行う。平行走査におけるトランスデューサの走査間隔は \$0.5 \text{ mm}\$ とした。送信信号は \$0.5f_c\$ から \$1.5f_c\$ まで (\$f_c\$ は中心周波数) のリニアアップチャープ信号に Hann 窓を適用したもの 10 波分とする。Hann 窓を用いるのは、実験におけるトランスデューサの共振特性を模擬するた

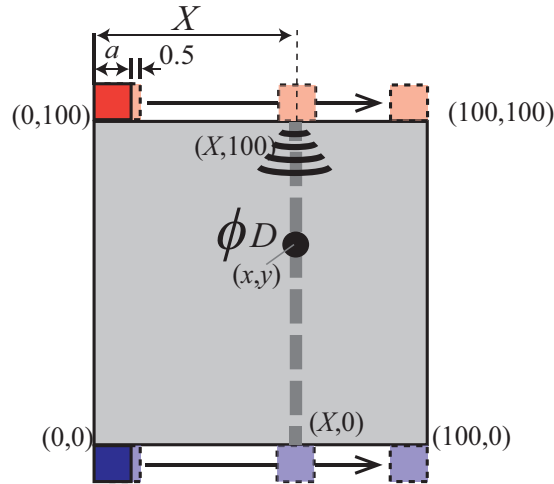


Fig. 3.1 Simulation condition.

めである。本来は位相特性も存在するが，相互相関で相殺されるため，考慮する必要はない。2.1 節の原理に基づいて TOF 変化量 $\Delta\tau$ を計測し，TOF プロファイルを得る。

3.2.3 解析結果

欠陥の検出

まず，提案手法による欠陥検出の有効性と送信周波数 f およびトランスデューサ開口径 a の欠陥検出への影響の検討を行う。計測断面の中心 (50, 50) に直径 D の欠陥を配置した。Figure 3.2(a)-(c) に送信信号の中心周波数 f_c をそれぞれ 1, 2, 5 (MHz) とし，トランスデューサ開口径 a を 6 mm に固定したときの TOF プロファイルを示す。このとき，波長はそれぞれおよそ 3.97-11.9, 1.98-5.95, 0.79-2.38 (mm) である。

これらの図から TOF プロファイルに欠陥の影響が表れていることが確認でき，これは提案手法により欠陥が検出可能であることを示している。また，欠陥が計測経路上に存在する $X = 50$ における TOF 変化量 $\Delta\tau$ は，送信周波数が低いほど大きくなっている。これは，信号の波長によって回折の生じやすさが異なることによるものだと考えられる。波長が長い場合は欠陥周りでの回折が生じやすく回折波が多く受信されるが，波長が短い場合には超音波信号が欠陥で反射し，受信される回折波が少なくなる。このことにより波長が長いほど，すなわち周波数が低いほど $\Delta\tau$ が大きくなっていると考えられる。また Fig. 3.2 より，波長が欠陥径よりも小さい場合においても欠陥検出が可能であることが確認できる。従来の一般的な超音波試

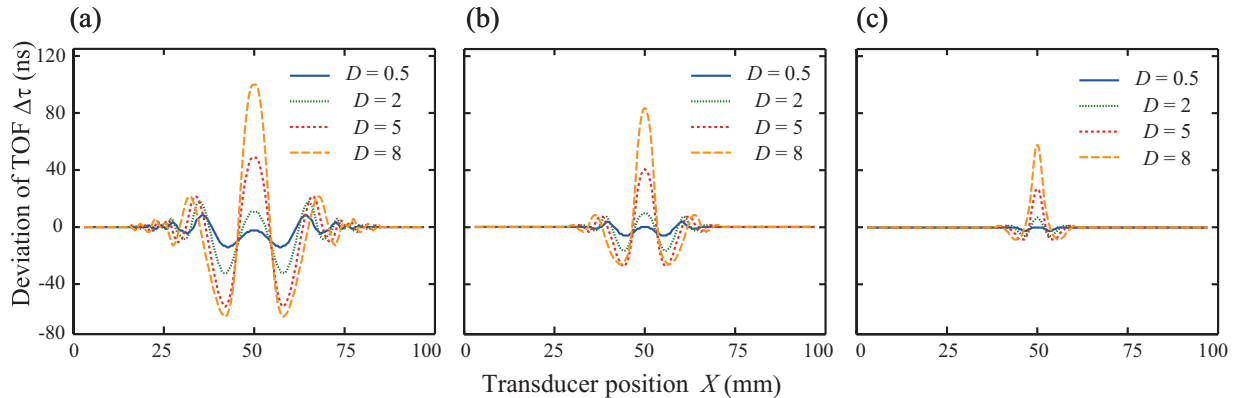


Fig. 3.2 TOF profiles at the defect position (50,50) and the aperture size of transducers is 6 mm: (a) $f = 0.5-1.5$, (b) $f = 1.0-3.0$, and (c) $f = 2.5-7.5$ MHz.

験においては高周波数信号が用いられる。周波数が低いほど角鋼片内部での超音波の結晶粒による拡散減衰の影響が少なくなるため、従来手法に比べて低周波数信号が使用可能な提案手法は高減衰角鋼片に対して有効であると考えられる。

開口径の影響

次に、トランスデューサの開口径 a の影響について検討するため、計測断面の中心 (50,50) に直径 $D = 2, 5$ mm の欠陥を、欠陥が存在する計測経路上 (50,0),(50,100) にトランスデューサを配置し、開口径 a を変化させたシミュレーションを行った。

Figure 3.3(a) にシミュレーション条件を、Fig. 3.3(b) に結果を示す。TOF 変化量 $\Delta\tau$ が最大となる開口径 a が周波数毎に異なり、2 mm と 5 mm のどちらの欠陥径においても同様な傾向がみられる。今回シミュレーションを行った 100×100 mm² の断面という条件においては、開口径 a と送信信号の中心周波数における波長 λ_c の比 λ_c/a がおよそ 1 になるときに $\Delta\tau$ が最大となっている。三種類の送信信号の中心周波数 $f_c = 1, 2, 5$ (MHz) における波長 λ_c はそれぞれ 5.95, 2.98, 1.19 mm である。超音波 CT 法では超音波の指向角を大きくするために a/λ_c を 1 としているが、提案手法においてはトランスデューサが対向する経路のみを計測するため広がりを持たせる必要はない。 a が a/λ_c が 1 になる値より大きくなるにつれ $\Delta\tau$ が小さくなるのは、欠陥の影響を受けた回折波よりも欠陥の近傍を通る直達波の成分が大きく受信されることによるものだと考えられる。この理由からは a が小さい時に $\Delta\tau$ が小さくなることは説明できない。

Figure 3.4 に送信信号周波数 f を 0.5-1.5 MHz とし、 a を 3, 6, 9 mm とした時の欠陥が

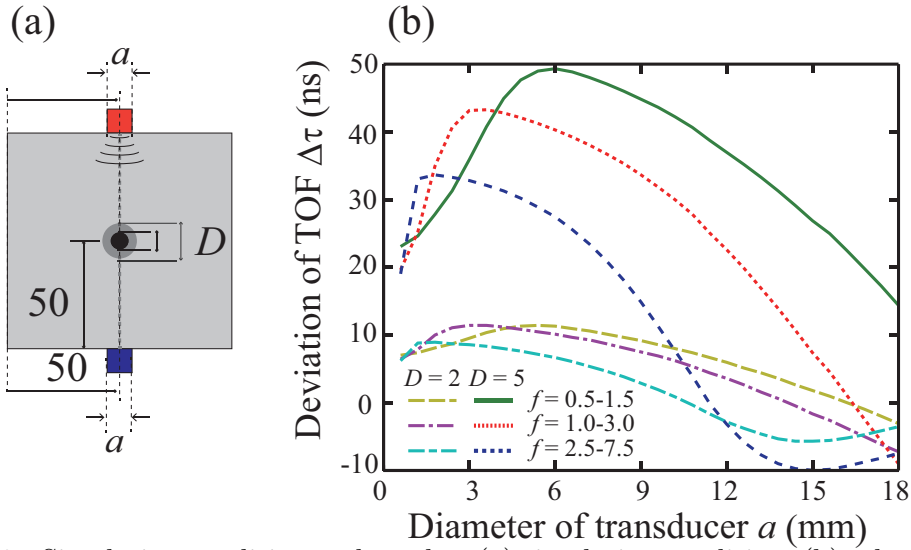


Fig. 3.3 Simulation condition and results: (a) simulation condition, (b) relationship between diameter of transducers a and deviation of TOF $\Delta\tau$ at $D = 2$ and 5 mm.

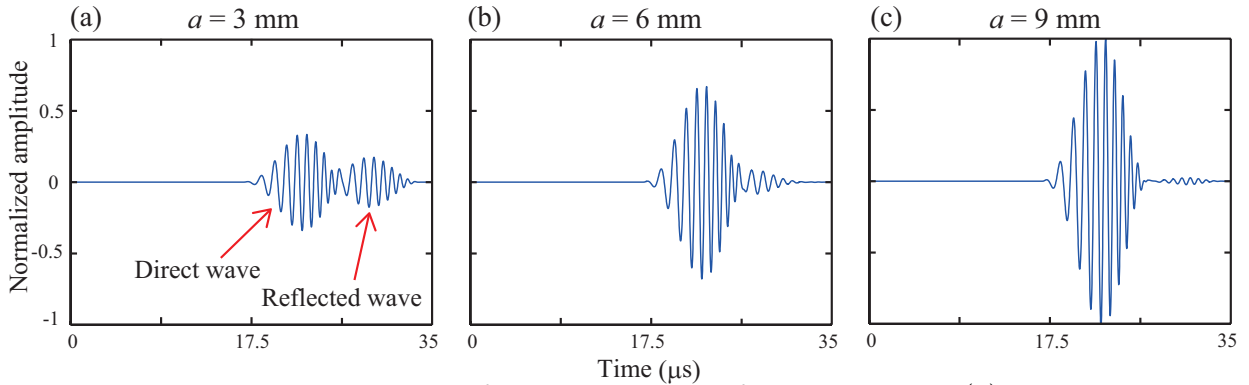


Fig. 3.4 Received signals at reference plane when $f = 0.5-1.5$ MHz: (a) the aperture sizes of transducers a are 3, (b) 6, and (c) 9 mm.

ない参照面における受信波形を示す。 a が小さくなるにつれ、壁面 ($X=0,100$) からの反射波が大きくなっていることが分かる。この反射波の影響により、 a が小さいときに $\Delta\tau$ が小さくなったと考えられる。今回シミュレーションを行った $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の断面を持つという条件においては a/λ_c が 1 になる a において $\Delta\tau$ が最大となったが、角鋼片の断面の大きさが異なる場合には直達波と壁面での反射波の到達時間に差が現れることから $\Delta\tau$ が最大となる a も変化すると考えられる。これらのことから、開口径 a には $\Delta\tau$ が大きくなるような適切な値が存在し、 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の断面を持つにおいては a/λ_c が 1 になる a が適していると言える。また、 Fig. 3.4 から a が大きくなるにつれ受信信号の振幅が大きくなっていることが確認

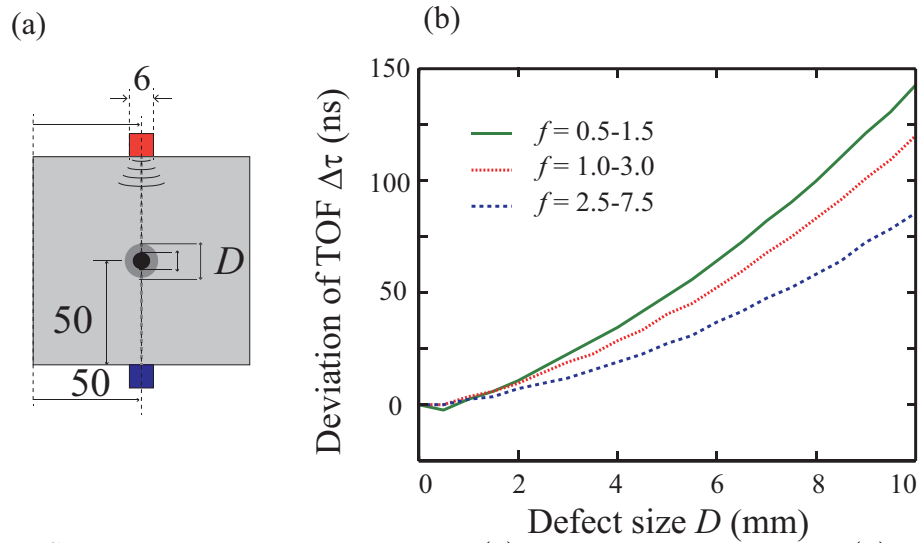


Fig. 3.5 Simulation condition and results: (a) simulation condition and (b) relationship between the defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$.

できる。これは a が大きくなるにつれ指向性が現れ、拡散減衰の影響が小さくなることによる。Fig. 3.2 における欠陥による $\Delta\tau$ 変化量に比べて a の変化による $\Delta\tau$ への影響が小さいことから、受信信号の振幅を十分なものとするために、 $\Delta\tau$ の変化が確認できる範囲で a を大きくすることも有効であると考えられる。

欠陥の径推定

本節において、TOF プロファイルからの欠陥径推定について検討した。3.2 節におけるシミュレーションに結果から、欠陥径 D と TOF の変化量 $\Delta\tau$ に関係があることが確認できる。 D と $\Delta\tau$ の関係を明らかにするため、Fig. 3.5(a) に示すように計測断面の中心 (50, 50) に配置した欠陥の径 D を 0.5 mm から 10 mm まで 0.5 mm 刻みで変化させ、トランスデューサを (50, 0), (50, 100) に固定して計測経路上に欠陥が存在する状態で $\Delta\tau$ の計測を行った。Figure 3.5(b) にシミュレーション結果を示す。横軸が欠陥径 D 、縦軸が TOF の変化量 $\Delta\tau$ である。これらのグラフより、欠陥が断面中心にある場合において、欠陥が 1 mm より大きい場合には $\Delta\tau$ から D が推定可能である。

次に、欠陥が断面中心でない場合における径推定の可能性を検討するため、Fig. 3.6(a) に示すように欠陥の位置を $(x, 50)$ として x を変化させたときの、欠陥が存在する経路における $\Delta\tau$ の計測を行った。その結果が Fig. 3.6(b) であり、横軸が欠陥位置 x 、縦軸が欠陥が存在する経路における $\Delta\tau$ である。

欠陥と壁面 ($X=100$) が近づくにつれ $\Delta\tau$ の変動が大きくなっていることが確認できる。周

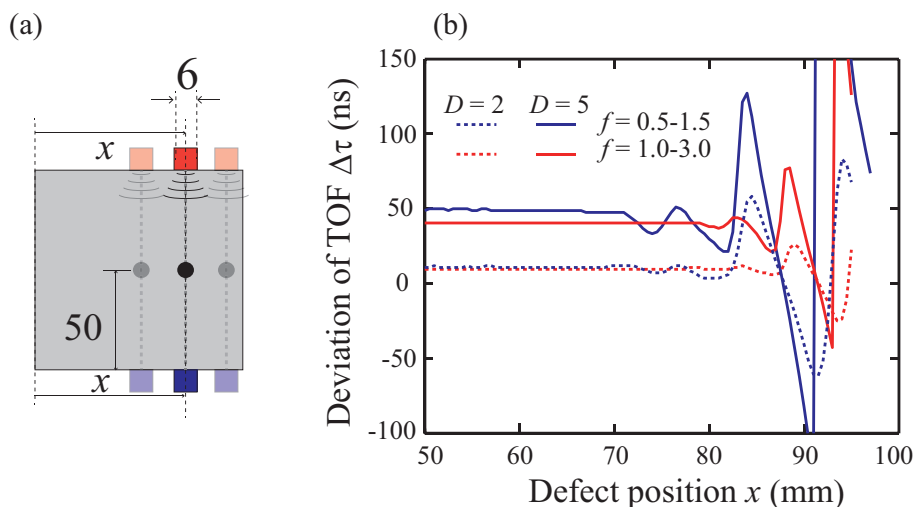


Fig. 3.6 Simulation condition and results: (a) simulation condition and (b) relationship between the defect position x and deviation of TOF $\Delta\tau$.

波数が低いほどこの傾向は顕著であり、 D が 2, 5 mm のどちらの場合においても同様の傾向がみられる。この $\Delta\tau$ の変動は、送信信号の直達波および回折波が到達しきる前に壁面からの反射波が到達し、相互相関関数に影響を与えることにより生じたと考えられる。この結果から、欠陥が壁面近傍に存在する場合には $\Delta\tau$ の変動が大きくなり、欠陥位置 x が少し変化するだけで得られる $\Delta\tau$ が大きく変わることから、欠陥径の推定は困難になると考えられる。加えて今回のシミュレーションにおいては縦波のみを考慮しているが、壁面近傍における実際の計測においては横波や、縦波が横波に変わるモード変換の影響も生じ、 $\Delta\tau$ の変動もより複雑になると考えられる。

Figure 3.7 に欠陥位置 x を変化させた時の TOF プロファイルを示す。横軸が計測を行うトランスデューサの位置 X 、縦軸が $\Delta\tau$ である。欠陥位置 x に関わらず、欠陥の影響が TOF プロファイルに現れていることが確認できる。 $f = 0.5 - 1.5$ MHz の場合には、Figure 3.7(a) から、 x が 75 以上のときの TOF プロファイルに現れる形が $x = 50$ のときのものとは大きく異なることがわかる。このことから、対称性を考えて x が 25 以上 75 以下であるときに欠陥径が推定可能となる。 $f = 0.5 - 1.5$ MHz の場合にも Fig. 3.7(b) から同様に考えて、 x が 15 以上 85 以下であれば欠陥径が推定可能となる。 x がこの範囲内にあるとき、 $\Delta\tau$ は x が 50 のときのものとはほぼ同じ値であり、Fig. 3.5(b) の関係から欠陥径 D が推定可能である。TOF プロファイルから欠陥位置 x が推定可能であることから、欠陥が推定可能な位置に存在するかどうかの判断も可能である。

次に、Fig. 3.8(a) に示すように欠陥の位置を $(50, y)$ として y を変化させた時の、欠陥が存

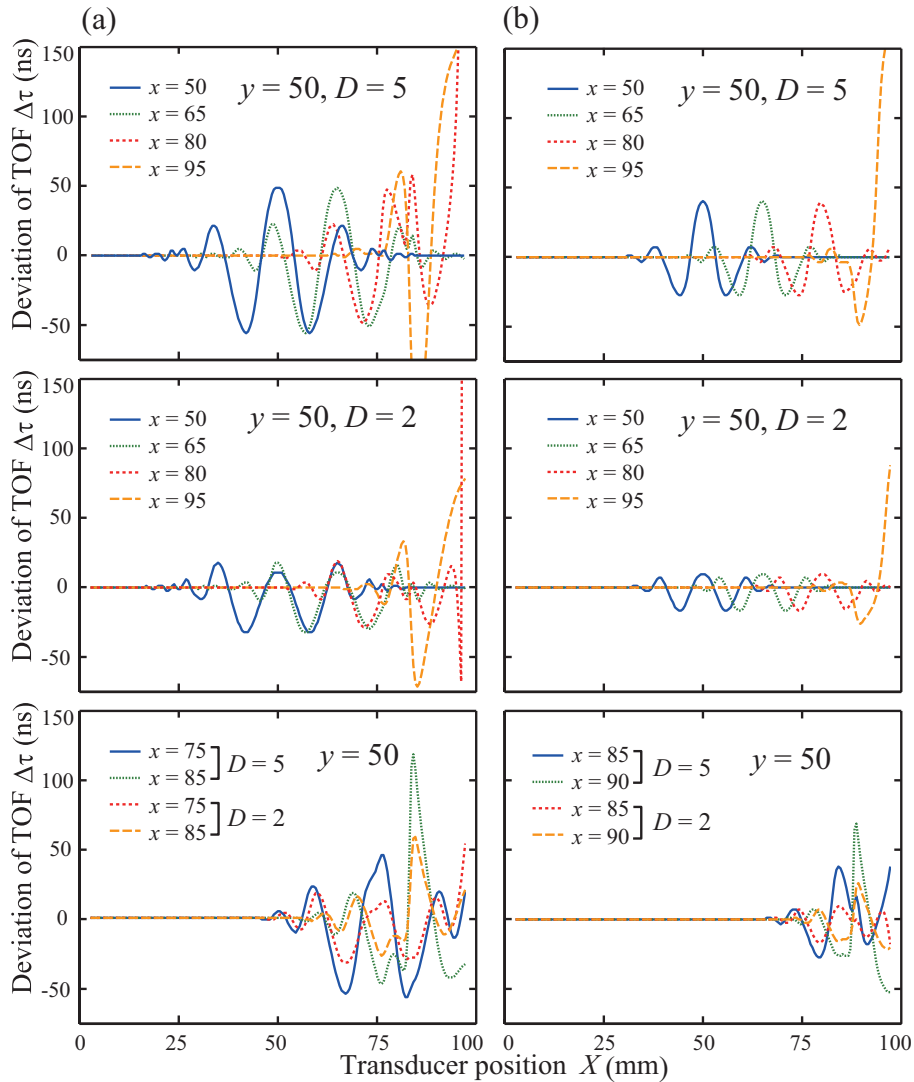


Fig. 3.7 TOF profiles when the defect sizes D are 5 and 2 mm, and the defect position y is 50, x is varied: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.

在する経路における $\Delta\tau$ の計測を行った。Figure 3.8(b) の結果から、欠陥がトランスデューサに近いときに $\Delta\tau$ の変動が大きくなることが確認できる。欠陥位置 x を変化させた場合と同様、周波数が低いほどこの傾向が顕著になっている。Figure 3.9 に欠陥位置 y を変化させたときの TOF プロファイルを示す。Figure 3.8(b) と Fig. 3.9 から、欠陥位置 y が 85 以上のとき、トランスデューサ位置 X が 50 の場合の $\Delta\tau$ の変動が大きいたことが確認できる。このことから、 y が 15 以上 85 以下であれば欠陥径が推定可能であると考えられる。 y がこの範囲内であるとき、Fig. 3.8(b) から、 D が 2 mm であれば $\Delta\tau$ は $y = 50$ における $\Delta\tau$ とほぼ同じ値となる。 D が 5 mm、 f が 0.5-1.5 MHz のとき $\Delta\tau$ は 50 から 65 ns の間の値を取り、

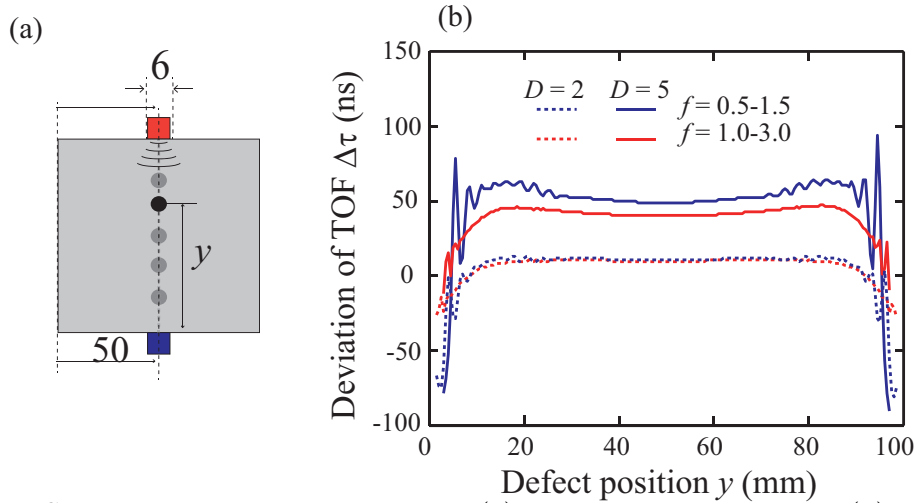


Fig. 3.8 Simulation condition and results: (a) simulation condition and (b) relationship between the defect position y and deviation of TOF $\Delta\tau$.

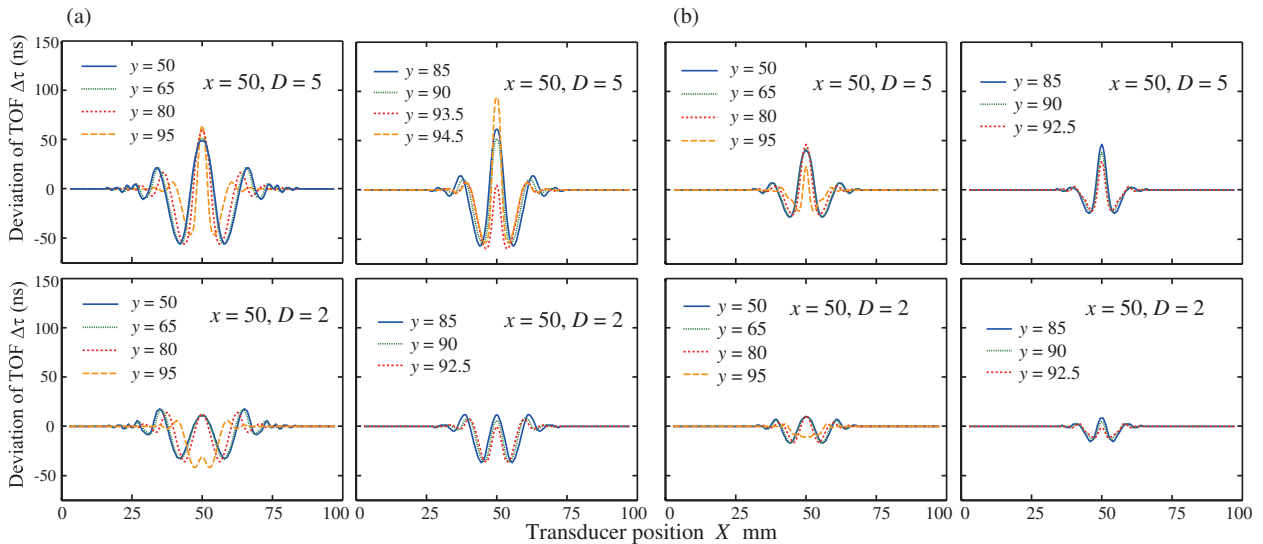


Fig. 3.9 TOF profiles when the defect sizes D are 5 and 2 mm, and the defect position x is 50, y is varied: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.

このとき Fig. 3.5(b) から欠陥径は 5.0 から 6.0 mm の間の値に推定される. D が 5 mm, f が 1.0-3.0 MHz のとき $\Delta\tau$ は 40 から 48 ns の間の値を取り, 欠陥径は 5.0 から 5.7 mm の間の値に推定される. 欠陥位置 y が 0 または 100 に近い場合, すなわち欠陥がトランスデューサ近傍に存在する場合には欠陥径の推定は困難である. しかし, このとき Fig. 3.9 に示すように TOF プロファイルの欠陥位置におけるピーク幅が狭くなるような特徴的な形が現れることから, 欠陥が径推定可能な位置 y に存在しているかどうかの判断は可能である. また, Fig.

3.8(b)において $f = 0.5\text{--}1.5$ MHz, $D = 2$ mm, $(x, y) = (50, 92.5)$ のとき $\Delta\tau$ はほぼ 0 であるが, Fig. 3.9(b) から, この場合においても欠陥近傍において TOF プロファイル上に変化があることから欠陥の検出は可能である.

以上のことから, 欠陥は位置 (x, y) によらず検出が可能であり, 中心近傍の一定範囲内に存在すれば径の推定が可能である.

3.3 欠陥検出実験

3.3.1 実験条件

平行走査型超音波透過法による角鋼片内部欠陥検出の有効性を検証するため, 試験片を用いた実証実験を行った. 試験片としてジュラルミンと炭素鋼鋳鋼を用い, 上面から開けた縦穴を側面から計測することで, 計測断面に欠陥が存在することを模擬している. 側面は Figure 3.10 のようになり, 計測する高さによって断面内の欠陥の数が異なっている. #1 の断面中心に直径 2 mm の欠陥が 1 つ存在する場合において計測を行った. Figure 3.11 左側に, Fig. 3.10 の#1 の位置における断面図を示す. 開口径 13 mm のトランスデューサ (Olympus A303S-SU 1 MHz) を 0.5 mm 間隔で走査し, 掃引幅 0.5–1.5 (MHz) のリニアアップチャープ波を 10 波分印加した. FG (Agilent 33120) から出力された信号は高周波アンプ (NF,HSA4101) で増幅され, トランスデューサから送信される. トランスデューサに到達し, 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.

3.3.2 実験結果と考察

Figure 3.11 右側に計測結果を示す. 黒線がシミュレーション, 青線がジュラルミン, 赤線が炭素鋼鋳鋼において計測した TOF プロファイルである. 実験結果においてもシミュレーションにおける結果と同様に, 欠陥が存在する近傍において $\Delta\tau$ に変動が現れることが確認できる. このことにより, 平行走査型超音波透過法により得られた TOF プロファイルに欠陥による影響が現れ, 欠陥の検出が可能であると考えられる. 実験結果において, $\Delta\tau$ の細かな変動が確認できるが, これはトランスデューサの機械的走査に伴う振動により生じたものと考えられる. 機械的な振動を抑える, またはアレイトランスデューサを用いて電氣的に走査を行うことにより, TOF プロファイルにおける細かな変動が抑えられ, 欠陥による影響が抽出しやすくなると考えられる. また, シミュレーションにおける TOF プロファイルと比べて, 実

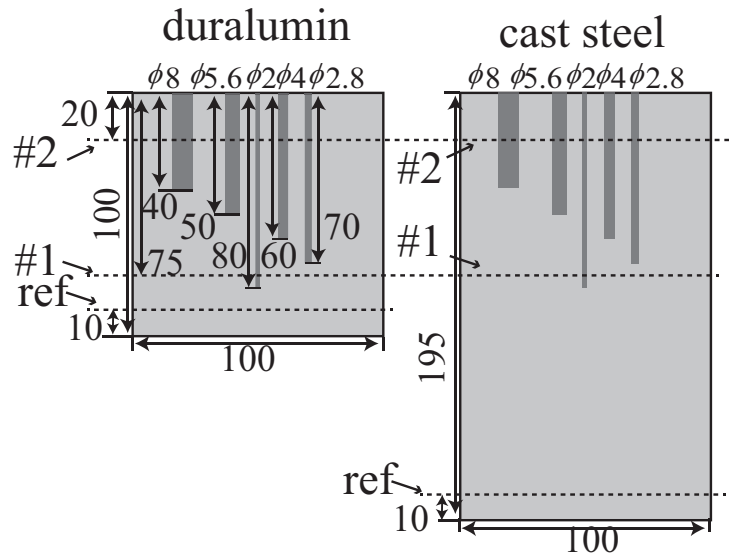
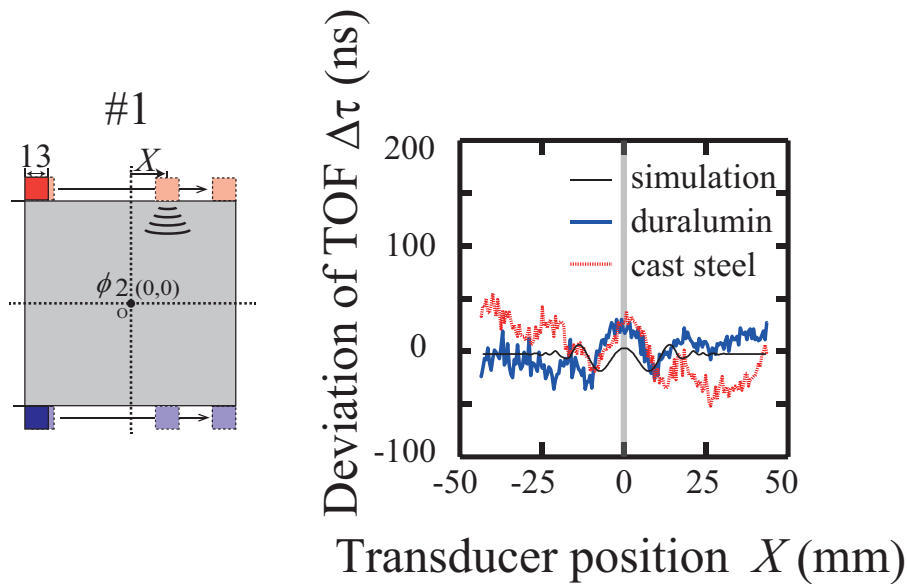


Fig. 3.10 Side view of tested billet used in the experiments.

Fig. 3.11 Experimental conditions and TOF profiles when there was a defect at the center of a cross section with the defect size was 2 mm in simulation, duralumin, and cast steel at $f = 0.5 - 1.5$ MHz.

験において得られた TOF プロファイルのほうが、欠陥が存在する位置において $\Delta\tau$ の変動量が大きいことが確認できる。Figure 3.5 に示すような $\Delta\tau$ と欠陥径 D との対応関係に基づく D の推定法について述べたが、今回行った WE-FDTD 法によるシミュレーションから得られた $\Delta\tau$ と D の関係をもとに実験データにおける D を推定すると、実際の径よりも大きく推定

されてしまう。実際に試験片を用いて $\Delta\tau$ と D の関係のグラフを得るには大量の試験片を作成する必要があり手間がかかるため、シミュレーションの精度を向上させ、実験により得られる $\Delta\tau$ との誤差を小さくすることが望まれる。TOF を用いる超音波 CT 法における縦波のみを考慮したシミュレーション結果と、実験結果においても、疑似音速低下マップの再構成画像の概形は同様であるが、欠陥上における疑似音速低下量には差が生じていた³¹⁾。欠陥径の推定向上のためには、シミュレーション精度の向上が課題となると考えられる。

3.4 むすび

本章では、平行走査型超音波透過法による欠陥検出および位置・径の計測の有効性を検証するため、WE-FDTD 法による波動伝搬シミュレーションおよび試験片を用いた実験を行った。シミュレーションの結果、TOF プロファイルに基づく欠陥検出および位置・径推定の可能性が示された。実験の結果、欠陥検出の有効性が示された。しかしながら、シミュレーションと実験における TOF プロファイルの形状は同様なものであったが、TOF のピーク値に違いが表れた。次章において、シミュレーションの精度向上について検討する。

第 4 章

弾性波の考慮による数値シミュレーション精度の向上

4.1 はじめに

第 3 章において、波動伝搬シミュレーションにおける TOF と、実験において計測された TOF の値との間に誤差が生じることが示された、WE-FDTD 法では縦波のみが考慮されていたが、実際の計測においては角鋼片表面や欠陥で生じるモード変換による影響が生じると考えられる。そこで、本章において、横波およびモード変換を考慮した波動伝搬シミュレーションを行い、実験における TOF 計測値との誤差低減を図る⁴⁴⁾。まず弾性波を考慮した場におけるシミュレーションについて説明し、次に縦波のみを考慮した場と弾性波を考慮した場におけるシミュレーション結果の比較を行う。その次に、2次元断面における円形以外の欠陥および複数欠陥の検出の有効性の検討のため、楕円形状が存在する場合と複数欠陥が存在する場合における波動伝搬シミュレーションを行う。最後に弾性波を考慮した場と実験における結果の比較を行う。

4.2 横波およびモード変換を考慮した欠陥検出シミュレーション

4.2.1 シミュレーション条件

横波およびモード変換が平行走査型超音波透過法による欠陥の定量的評価に与える影響を明らかにするために、縦波のみを考慮した場と弾性場を考慮した場における波動シミュレーショ

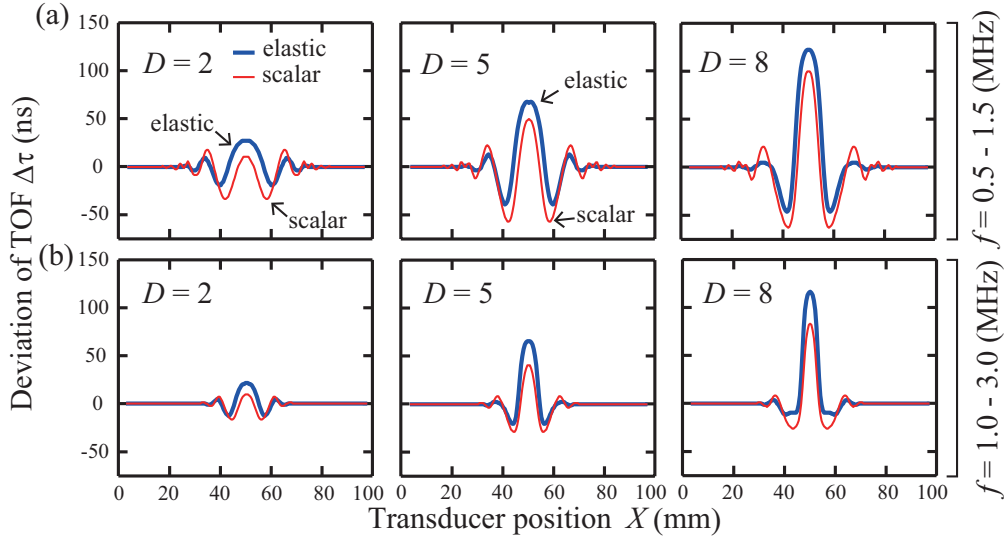


Fig. 4.1 Profiles of TOF at the defect position $(x, y) = (50, 50)$, transducers diameter a of 6 mm, and defect size D of 2, 5, and 8 mm in each wave field: (a) $f = 0.5$ -1.5 MHz and (b) $f = 1.0$ -3.0 MHz.

ンの $\Delta\tau$ 計測結果を比較した。以下の偏微分方程式,

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{zz} \\ T_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{12} & c_{11} & 0 \\ 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} \\ \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

に基づくシミュレーションを行った。 T_{xx}, T_{zz} は垂直応力, T_{xz} はせん断応力, c_{11}, c_{12}, c_{66} は弾性係数テンソル, v_x, v_y は粒子速度, ρ は密度を示す。等方性の弾性材料であることを想定して, $c_{11} = \rho V_l^2, c_{12} = \rho(V_s^2 - V_l^2), c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2$ とした。 V_l, V_s はそれぞれ縦波と横波の位相速度を示す。FDTD法を用いて(4),(5)式を中心差分により近似した⁴⁵⁾。試験片として鉄鋼を想定し, ρ を 7,700 kg, V_l を 5,950m/s, V_s を 3,240m/s とした。縦波のみの場のシミュレーションにおいては V_s を 0 m/s とした。角鋼片と欠陥の表面の境界は自由境界とし, 応力を 0 とした。この条件により縦波と横波成分の結合が生じ, 境界において弾性波のモード変換が生じる。その他条件については 3.2.2 と同様である。

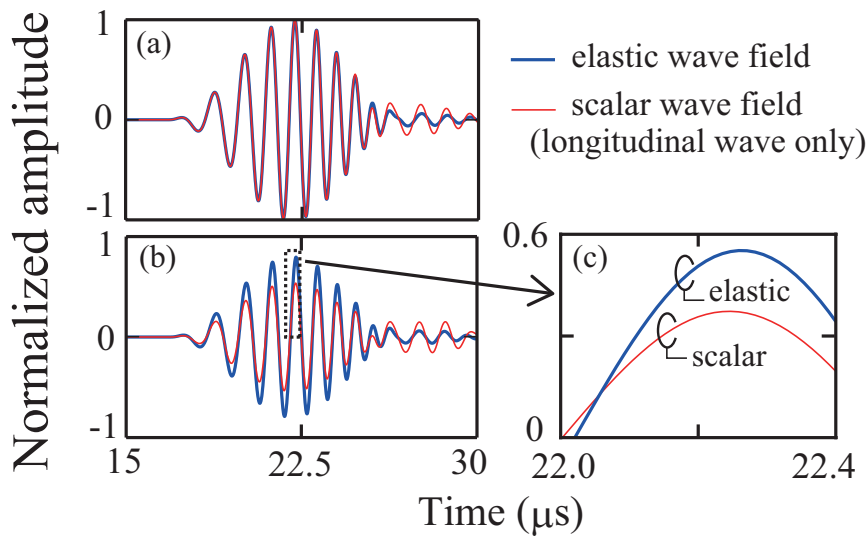


Fig. 4.2 Received signals at transducer position X of 50, transducer diameter a of 6 mm, and $f = 0.5\text{-}1.5$ MHz in each wave field: (a) in reference plane with no defects, (b) in measurement plane with a defect at (50, 50) of size D of 5 mm and (c) enlarged view of (b).

4.2.2 縦波のみの場と弾性場におけるシミュレーション結果の比較

欠陥が断面中心に存在する場合

計測断面の中心 (50,50) に欠陥を配置し、欠陥径 D を 2, 5, 8 mm としたときの TOF プロファイルを図 4.1 に示す。青線は弾性波を考慮した場合、赤線は縦波のみを考慮した場合の TOF プロファイルを示す。いずれの欠陥径および送信信号周波数においても弾性波を考慮したときの $\Delta\tau$ が縦波のみを考慮したときよりも大きくなっていることが確認できる。第 3 章および先行研究における縦波のみを考慮したシミュレーションでは、 $\Delta\tau$ の値が実験での計測値よりも小さくなっている³¹⁾。このことから、シミュレーションにおける弾性波の考慮により、実験との $\Delta\tau$ の差が補正されると考えられる。

Figure 4.2(a) にトランスデューサ位置 X を 50 とした時の欠陥を含まない参照面における受信信号、Figure 4.2(b) に $X = 50, D = 5, (x, y) = (50, 50)$ とした計測面における受信信号を示す。Figure 4.2(a) からは、欠陥が存在しない参照面においてどちらの場の条件においても受信波形は同様であることが確認できる。しかしながら、Figure 4.2(b) からは、断面中心に欠陥が存在する場合において受信信号の振幅が異なっていることがわかる。Figure 4.2(b) の一部を拡大した Figure 4.2(c) を見ると、時間方向にも差があることがわかる。このシミュレーショ

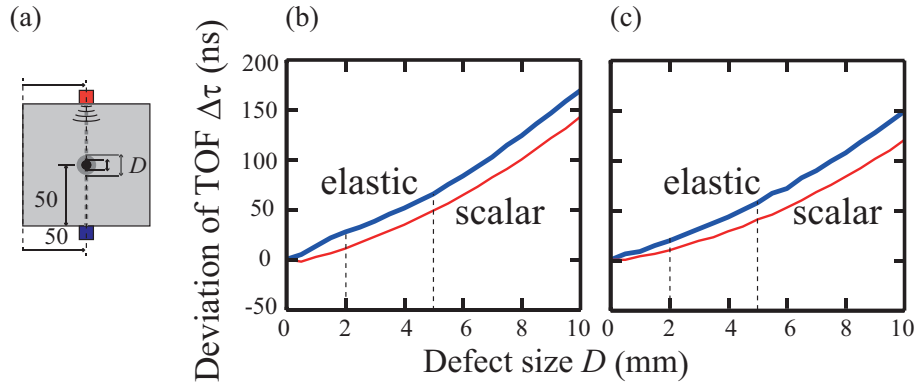


Fig. 4.3 Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between the defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$ with transducer diameter a of 6 mm and $f = 0.5-1.5$ MHz and (c) $f = 1.0-3.0$ MHz.

ンでは、考慮する波動場以外の条件はすべて同じであり、縦波を入射して縦波のみを受信していることから、これらの結果はモード変換による影響を示すものだと考えられる。このことから、縦波が弾性波の中で速度が一番早く、横波と時間的に分離可能な条件においても、 $\Delta\tau$ の計測結果にモード変換が影響を与えると考えられる。このことから、モード変換の影響は大きく、縦波以外の成分は無視できないと考えられる。

Figure 4.3 にトランスデューサを $(50,100)$, $(50,0)$ に配置したときの D と $\Delta\tau$ の関係を示す。欠陥径によらず、弾性波を考慮した場合の $\Delta\tau$ が縦波のみを考慮したときと比べて大きいことがわかる。また、 $\Delta\tau$ が単調増加していることから、少なくとも欠陥が断面中心に存在する場合には Fig. 4.3 の関係から欠陥径 D の推定が可能である。

開口径の影響

次に、トランスデューサの開口径 a を変化させた。Fig. 4.4 にトランスデューサ開口径 a と $\Delta\tau$ の関係を示す。 $\Delta\tau$ が最大となる a の値はどの条件においても概ね一致しているが、 a の増加に伴う $\Delta\tau$ の減少の割合が、縦波のみの場合と比べて弾性波を考慮した場合に小さくなる傾向が見られる。

Figure 4.5 にトランスデューサ開口径 a を 3, 6, 9 mm としたときの参照面における $X = 50$, $f = 0.5 - 1.5$ MHz の受信信号波形を示す。開口径 a が小さくなるにつれ送信超音波のビームの指向性が低くなり、壁面 ($X = 0, 100$) からの反射波が大きく受信されるが、縦波のみの場と比べて、弾性波を考慮した場において反射波の振幅が小さくなっていることが確認できる。この理由として、縦波が壁面で反射する際に、モード変換により一部が横波となり、相対的に壁面から反射して受信される縦波成分の振幅が小さくなったことが考えられる。

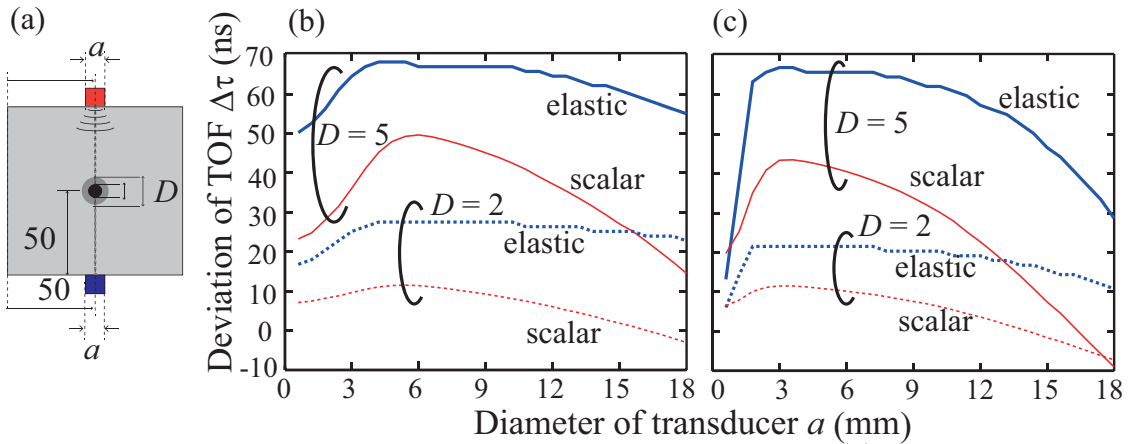


Fig. 4.4 Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between transducer diameter a and deviation of TOF $\Delta\tau$ at $D = 2$ and 5 mm and $f = 0.5$ - 1.5 MHz and (c) $f = 1.0$ - 3.0 MHz.

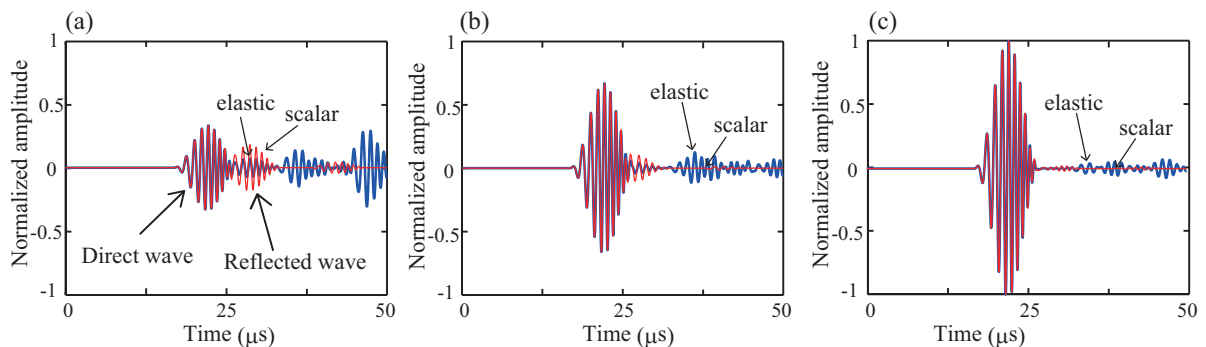


Fig. 4.5 Received signals in reference plane in each wave field when $f = 0.5 - 1.5$ MHz and transducers position X is 50 : aperture sizes of transducers are (a) 3 , (b) 6 and (c) 9 mm.

欠陥位置の影響

欠陥位置を変化させたときの $\Delta\tau$ における影響を検討した。Figure 4.6 に、 5 mm の欠陥の位置を x 方向に変化させた $(x, 50)$ に配置したときの TOF プロファイルを示す。

縦波のみを考慮した場において、壁面に近づくとつれ TOF プロファイルの形状が崩れていく傾向が確認できるが、弾性波を考慮した場においては形状の変動が小さくなっている。これは、縦波のみを考慮した場においては直達波及び欠陥を回折した波と壁面からの反射波が干渉することにより受信信号の振幅及び位相が大きく変動して TOF プロファイルが崩れるのに比べ、弾性波を考慮した場においては壁面からの反射波の影響が少なくなることにより、TOF プロファイルの形状が大きく崩れることがなくなったものと考えられる。

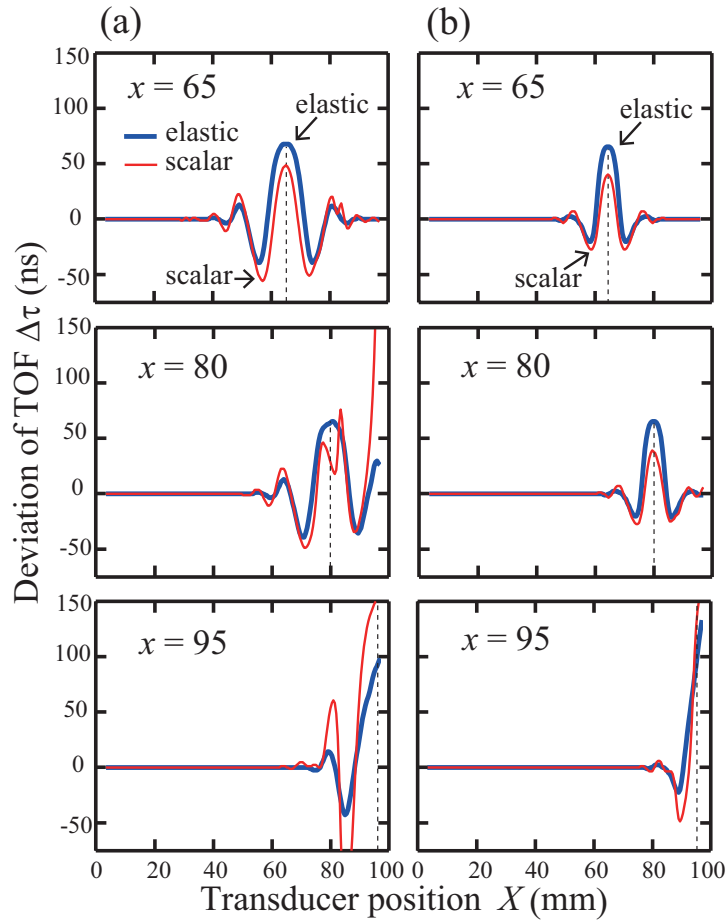


Fig. 4.6 Profiles of TOF in each wave field when the defect size D is 5 mm, defect position y is 50, x is varied, and transducer diameter a is 6 mm: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.

Figure 4.7 に、欠陥が (80, 50) に存在するときにトランスデューサ位置 X を 80 としたときの計測面における受信信号および欠陥が存在しないときの参照面における受信信号を示す。縦波のみを考慮した場合には参照面と計測面における振幅の変動が大きく、弾性波を考慮した場においては振幅の変動が少ないことが確認できる。これらの結果より、弾性波を考慮した場においては、縦波のみを考慮した場と比べ、壁面からの反射波の影響が少なくなるものと考えられる。

Figure 4.8 に、欠陥が $(x, 50)$ に存在するときにトランスデューサ位置 X を x としたときの、欠陥が存在する経路における TOF 変動量 $\Delta\tau$ を示す。縦波のみを考慮した場に比べ、弾性波を考慮した場において、壁面近傍での $\Delta\tau$ の変動量が小さくなっており、トランスデューサ位置 X と欠陥位置 x による $\Delta\tau$ の変動が急峻でないことが確認できる。このことにより、

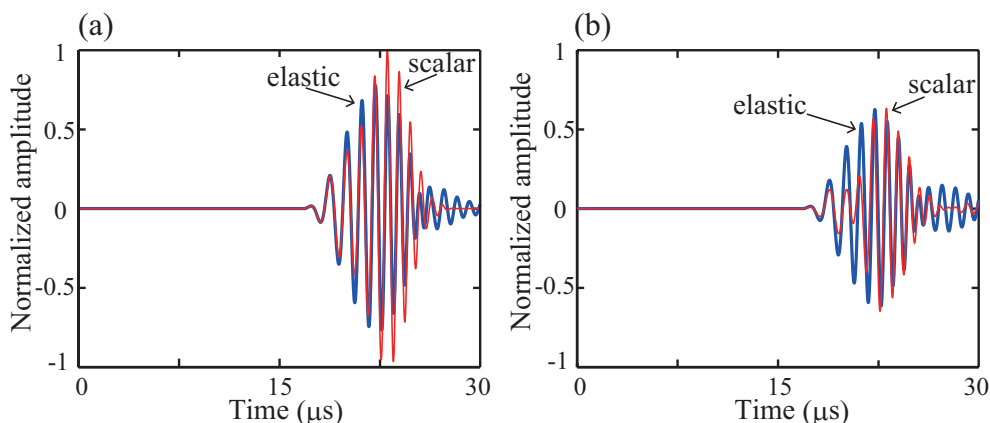


Fig. 4.7 Received signals in each wave field at transducer position X of 80, transducers diameter a of 6 mm, and $f = 0.5 - 1.5$ MHz: (a) in reference plane with no defects and (b) in measurement plane with a defect at $(80, 50)$ of size D of 5 mm.

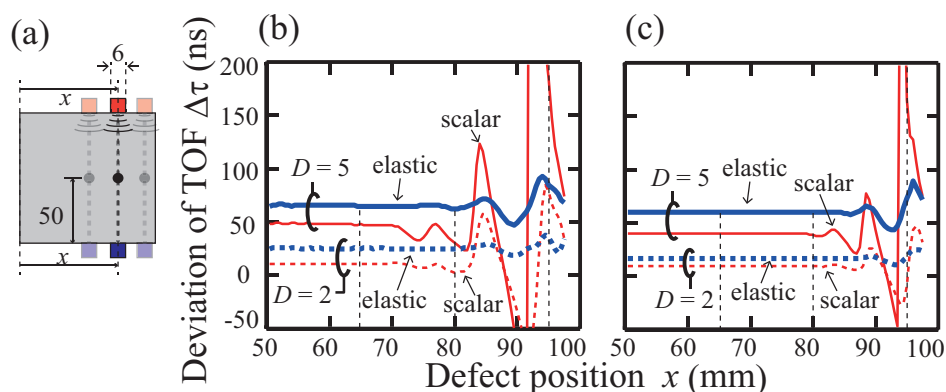


Fig. 4.8 Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between the defect position x and deviation of TOF $\Delta\tau$ at transducers diameter a of 6 mm and $f = 0.5-1.5$ MHz and (c) $f = 1.0-3.0$ MHz.

壁面近傍の欠陥に対しての TOF 変動量 $\Delta\tau$ と欠陥径 D の Fig. 4.3 のような関係に基づく径推定において、弾性波を考慮した場における関係を利用することにより、縦波のみを考慮した場合ほどは大きな径の推定誤差は生じないものと考えられる。

次に、欠陥位置 y を変化させたときの影響を検討する。Figure 4.9 に、欠陥の位置を y 方向に変化させた $(y, 50)$ に配置したときの TOF プロファイルを示す。弾性波を考慮した場において、欠陥が壁面近傍に近づくにつれ、TOF プロファイルのピーク値が大きくなることが確認できる。また、欠陥近傍における $\Delta\tau$ の変化も急峻になり、欠陥が表面近傍にあるという判別は可能なものであると考えられる。

Figure 4.10 に、トランスデューサ位置 X を 50 としたときの欠陥が存在しないときの参照

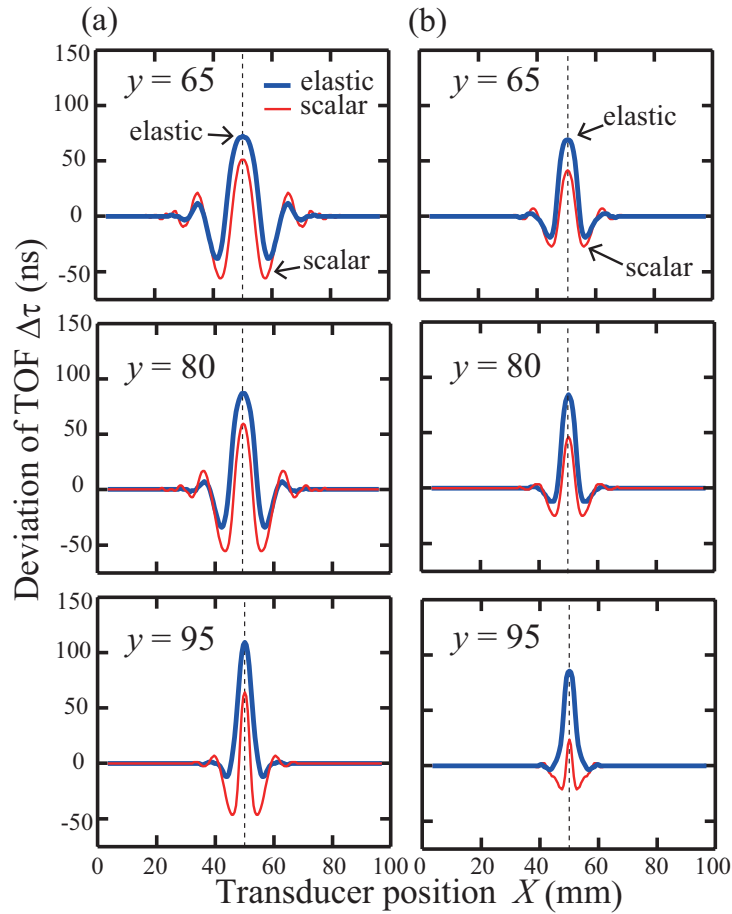


Fig. 4.9 Profiles of TOF in each wave field when the defect size D is 5 mm, defect position x is 50, y is varied, and transducer diameter a is 6 mm: (a) $f = 0.5-1.5$ and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.

面および欠陥が (50, 80) に存在する計測面における受信信号を示す。Fig. 4.2 における、欠陥が断面中心に存在する場合の受信波形とほぼ同様の振幅の変動が見られる。TOF プロファイルへの影響は小さいものと考えられるが、直達波が到達した後の $25\mu\text{s}$ 以降の受信波形において異なる変動が見られる。

Figure 4.11 に、欠陥が (50, y) に存在するときトランスデューサ位置 X を 50 としたときの、欠陥が存在する経路における TOF 変動量 $\Delta\tau$ を示す。Figure 4.8 における傾向と異なり、縦波のみを考慮した場と比べて、弾性波を考慮した場において欠陥が壁面に近づいた時の $\Delta\tau$ の変動量が大きいことが確認できる。欠陥の y 方向位置が 0 または 100 に近いときには、 $y = 50$ の時と比べて $\Delta\tau$ の値に大きな差があることから、Fig. 4.3 のような欠陥が断面中心に存在するときの $\Delta\tau$ と D の関係に基づく径推定は困難となると考えられる。しかし Fig. 4.9 から、欠陥の y 方向位置が 0 または 100 に近いときには TOF プロファイルの形も急峻な

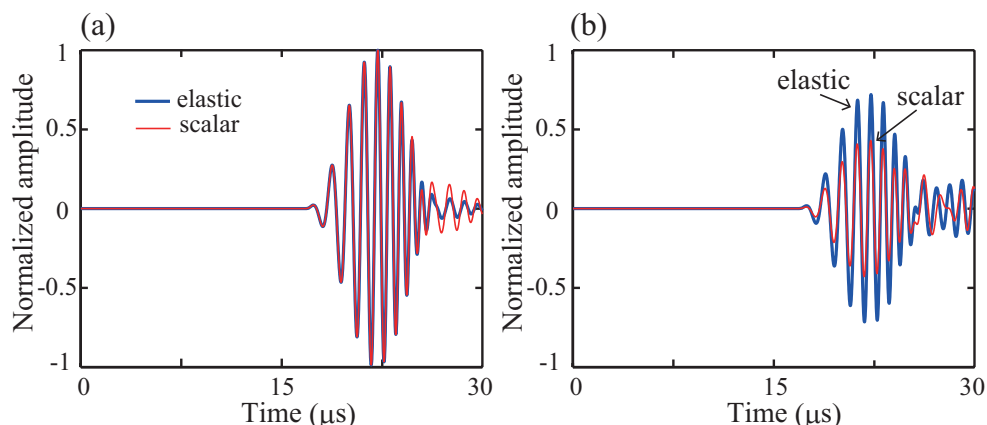


Fig. 4.10 Received signals in each wave field at transducer position X of 50, transducers diameter a of 6 mm, and $f = 0.5 - 1.5$ MHz: (a) in reference plane with no defects and (b) in measurement plane with a defect at $(50, 80)$ of size D of 5 mm.

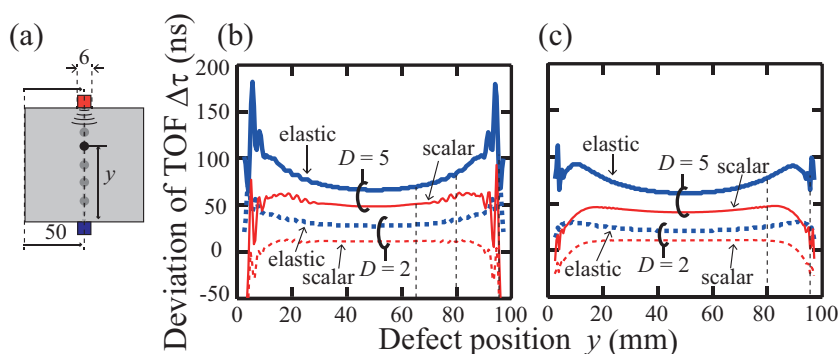


Fig. 4.11 Simulation conditions and results in each wave field: (a) simulation conditions, (b) relationship between the defect position y and deviation of TOF $\Delta\tau$ at transducers diameter a of 6 mm and $f = 0.5-1.5$ MHz and (c) $f = 1.0-3.0$ MHz.

特徴的なものとなることから、欠陥が径の推定が困難な表面近傍に存在するということは判別可能である。

4.2.3 楕円形状欠陥および複数欠陥の検出

これまで2次元の波動伝搬シミュレーションにおいて形状を円形とした単数の欠陥のみを対象に欠陥検出の有効性を検討してきた。そこで、本節において、円形以外の形状として楕円形状の欠陥が存在するときおよび欠陥が複数存在するときの欠陥検出の有効性を検討する。

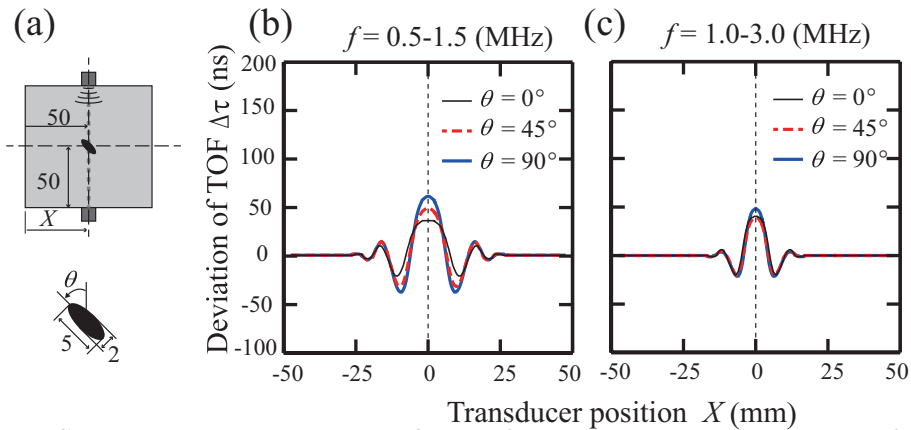


Fig. 4.12 Simulation condition and TOF profiles when an ellipse-shaped defect with major and minor axes of 5 and 2 mm was at $(x, y) = (0, 0)$ and the angle of a defect θ was varied: (a) simulation condition, (b) TOF profiles at $f = 0.5 - 1.5$ MHz and (c) $f = 1.0 - 3.0$ MHz.

楕円形状欠陥の検出

Figure 4.12 に、計測断面の中心に欠陥を配置し、楕円形上の欠陥を角度を変えたときの TOF プロファイルを示す。送信信号周波数 f が 0.5-1.5 MHz のときの $\Delta\tau$ のピーク値に着目すると、 $\theta = 0$ のときはの $D = 2$ 、 $\theta = 90$ のときはの $D = 5$ における円形欠陥が存在するときの Fig. 4.1 に示すプロファイルに近い形状が得られている。 $\theta = 45$ のときは $\theta = 0, 90$ のときのほぼ間の値をとっている。このことから、TOF プロファイルの形状において、欠陥の x 方向の幅が大きな影響を与えると考えられる。しかし、 f が 1.0-3.0 MHz の場合には楕円欠陥の向きによらずほぼ同様の TOF プロファイルとなり、円形欠陥の D が 2, 5 のときのほぼ中間の値となっている。 f が 0.5-1.5, 1.0-3.0 MHz のときの中心周波数における波長はそれぞれおよそ 8 mm と 4 mm であり、楕円が 5, 2 mm の径を持つことから、欠陥に比べて波長が大きいときには楕円欠陥などの欠陥の向きが TOF プロファイルの形状に影響を与える傾向があるものと考えられる。

複数欠陥の検出

Figure 4.13 に、同一の y 方向位置に存在する径 D_1, D_2 の 2 つの欠陥の x 方向の距離 l を変化させたときの TOF プロファイルを示す。

$l = 0$ は、1 つの欠陥が断面中心に存在することを示す。2 つの欠陥の距離が離れているときは 2 つの欠陥の識別が可能であるが、距離が近づくとつれ 1 つの欠陥が存在するときと同様の

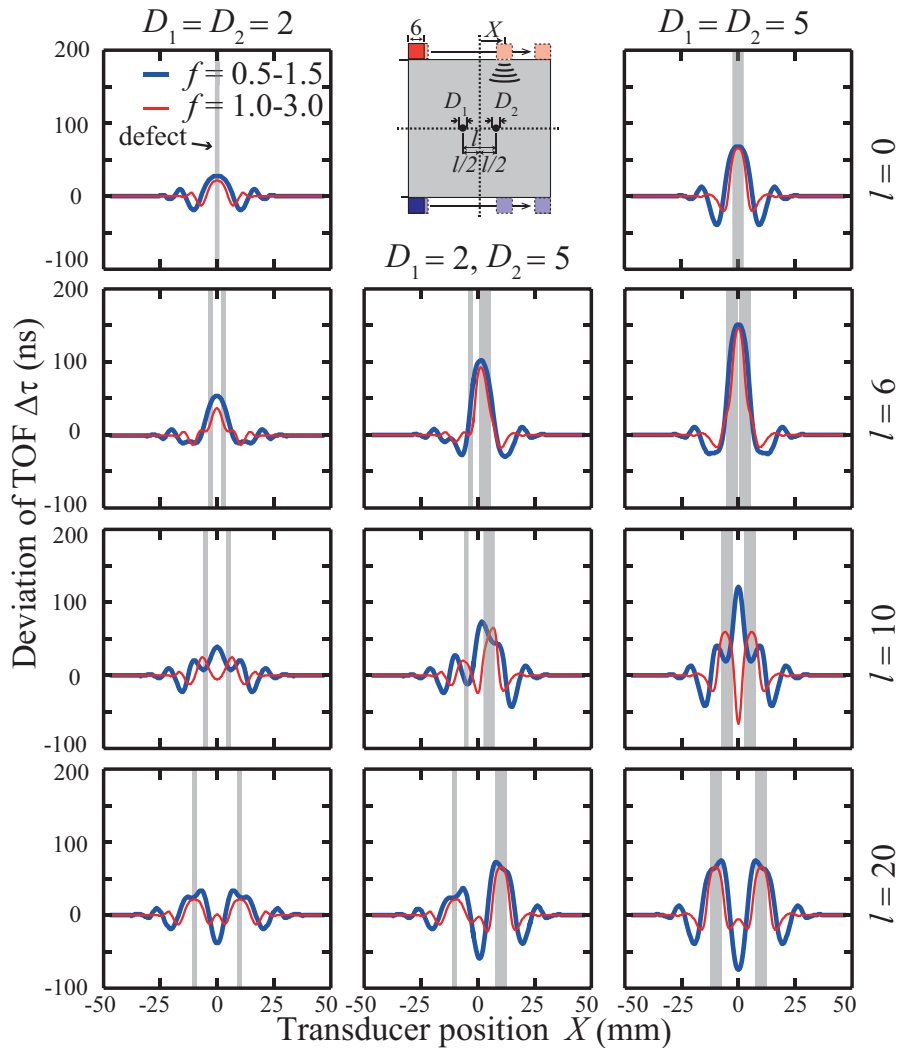


Fig. 4.13 Simulation condition and TOF profiles when there were two defects with y positions were 0, and the distance between defects l , and the defects size D_1 and D_2 were changed at $f = 0.5-1.5$ and $f = 1.0-3.0$ MHz.

プロファイルが得られ、識別が困難となる。周波数が高い場合においては、低いときと比べ、より近い位置においても識別は可能である。2つの欠陥が近接する場合は、1つの欠陥として判別されてしまうが、1つの欠陥が存在する場合より $\Delta\tau$ のピーク値が大きくなることから、欠陥径の過小評価はしないものと考えられる。

Fig. 4.14 に、同一の x 方向位置に存在する径 D_1, D_2 の2つの欠陥の y 方向の距離 l を変化させたときの TOF プロファイルを示す。

2つの欠陥が同一の x 方向位置に存在する場合には、TOF プロファイルに1つの大きいピークが生じ、近接欠陥の識別は困難である。しかし、1つの欠陥が存在する場合より $\Delta\tau$ の

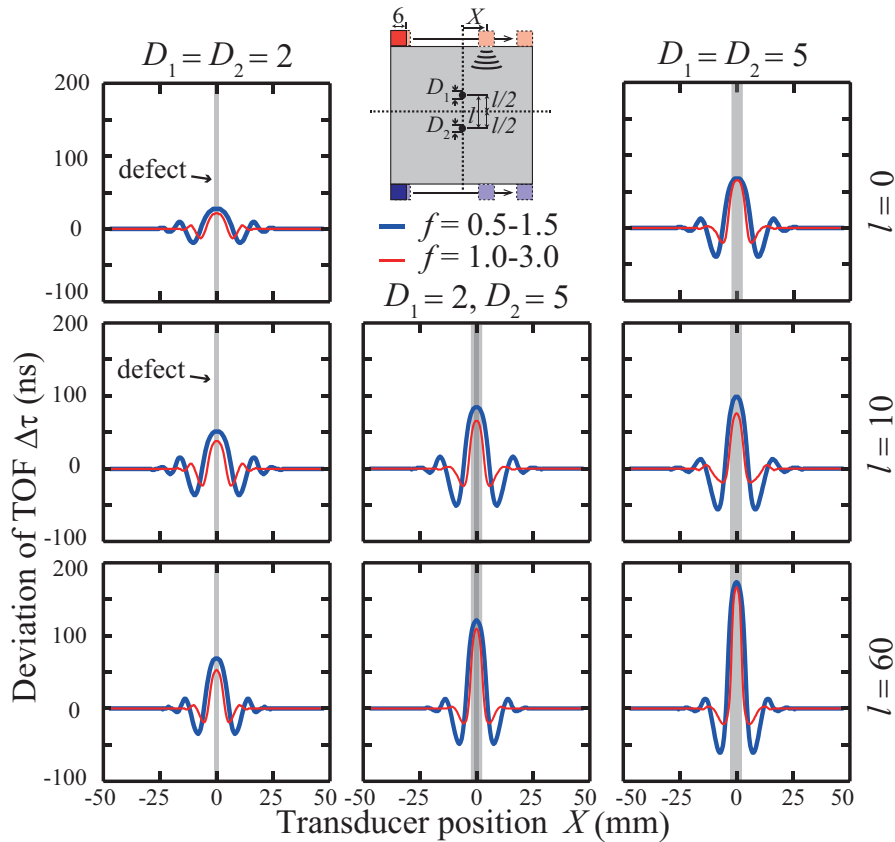


Fig. 4.14 Simulation condition and TOF profiles when there were two defects with x positions were 0, and the distance between defects l , and the defects size D_1 and D_2 were changed at $f = 0.5-1.5$ and $f = 1.0-3.0$ MHz.

ピーク値が大きくなることから、欠陥径の過小評価はしないものと考えられる。また、2つの欠陥の y 方向の距離が大きくなるにつれ、 $\Delta\tau$ の値が大きくなることを確認できる。 x 方向の距離を変化させた Fig. 4.14 と比べて、 y 方向の距離を変化させた場合には周波数による TOF プロファイルの影響は小さいことが確認できる。この2つの欠陥の y 方向距離の変化に伴う $\Delta\tau$ の変化は、欠陥を回折して伝搬する経路が、2つの欠陥の y 方向の距離が大きくなるにつれ長くなることによるものだと考えられる。

4.2.4 弾性場におけるシミュレーションと実験における結果の比較

Figure 5.9 の上側にシミュレーション及び実験における計測断面の模式図を、下側に TOF プロファイルを示す。

実験において #1, #2 の断面は、 Fig. 3.10 に示す位置における断面である。 Figure 4.15 の

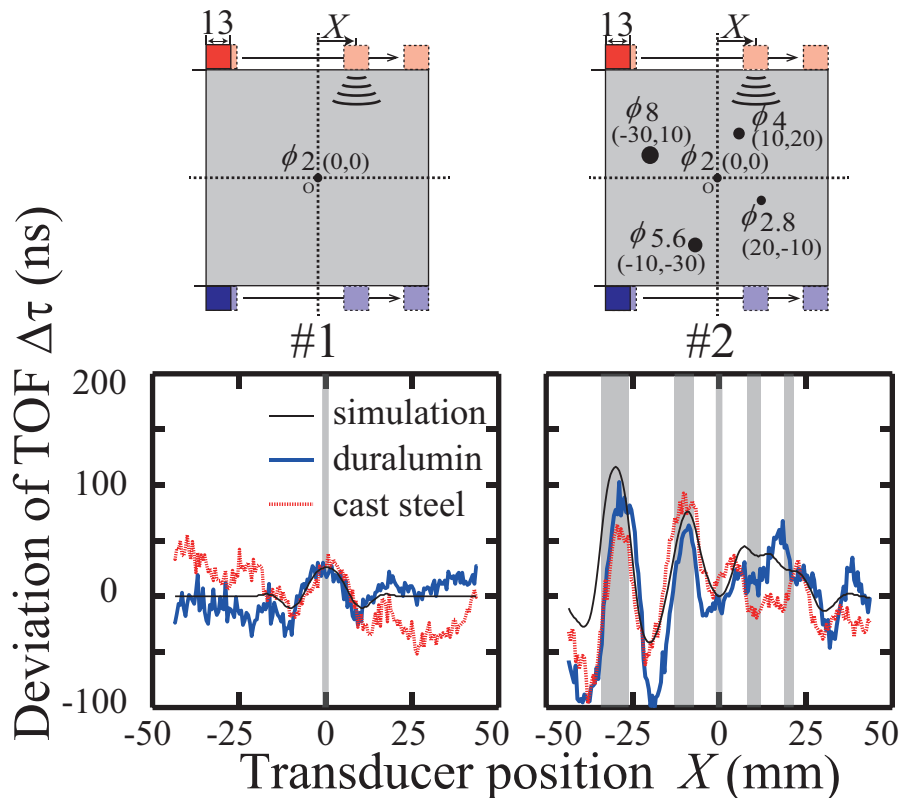


Fig. 4.15 Experimental conditions and TOF profiles when there was a defect at the center of a cross section with the defect size was 2 mm and when there were five defects in simulation, duralumin, and cast steel at $f = 0.5 - 1.5$ MHz.

左下図を見ると、WE-FDTD 法によるシミュレーション結果である Fig. 5.9 と比べて、弾性波を考慮した場のほうが実験結果と近い $\Delta\tau$ の値となっていることが確認できる。Figure 4.15 右上の径の異なる欠陥が 5 個存在するときの #2 の面における TOF プロファイルが右下図である。灰色で網掛けされている部分は欠陥位置を示している。シミュレーションと実験における結果がおおむね一致していることが確認できる。比較的径の大きい欠陥は TOF への影響が確認しやすい。径が 8 mm および 5.6 mm の欠陥が存在する位置の $\Delta\tau$ の値に着目すると、径が大きいほど $\Delta\tau$ の値も大きくなり、この 2 つの欠陥においては Fig. 4.3(b) の対応関係とおおむね一致していることが確認できる。このことから、着目したい欠陥の近傍にその欠陥と同等以上の大きさの欠陥が存在しない場合には、 $\Delta\tau$ の値からの欠陥径推定が可能であると考えられる。しかしながら、径の小さい欠陥が近い範囲に複数存在する場合には、トランスデューサ位置 X が $0 < X < 25$ のときのように灰色の網掛け部分で示される欠陥の位置と TOF プロファイルにおけるピーク位置が一致していないことが確認できる。複数の欠陥が近接している場合には 1 つ 1 つの欠陥の識別は困難であるが、変動があることは確認できること

から、欠陥が存在することは判断できる。複数近接欠陥の識別は今後の課題となるだろう。

4.3 むすび

本章では横波およびモード変換を考慮した波動伝搬シミュレーションを行い、実験における TOF 計測値との誤差低減を図った。弾性波の考慮により、シミュレーションと実験における TOF の誤差が、縦波のみを考慮した場合より低減され、シミュレーションにより得られた TOF 変動量 $\Delta\tau$ と欠陥径 D の関係をもとにした欠陥径推定の精度が向上することが確認された。

第 5 章

対面反射波の TOF 変動に着目した欠陥検出

5.1 はじめに

第 3 章, 第 4 章で欠陥の検出および径の推定が可能であることを示したが, 欠陥の深さ方向の情報を得ることは困難である. そこで, 対面で反射した超音波の TOF 変動から欠陥の深さ位置情報の取得を検討する. 対面反射波は, パルスエコー法において対面の位置の基準や欠陥エコーと振幅を比較する対象として用いられることは多いが, それ自体に欠陥の情報を含むものとして扱われる例は見られない. しかし, 欠陥が存在するときに透過波の TOF が変化することから, 対面からの反射波も欠陥の影響を受け, TOF が変化すると考えられる. また, 欠陥の深さ方向の位置により超音波の伝搬経路が異なり, TOF に欠陥の深さ方向位置の影響が現れると期待される. 本章においては, まず対面反射波の TOF 変動に着目した欠陥検出の原理について説明し⁴⁶⁾, 次にシミュレーション結果を示し⁴⁷⁾, 実験結果を示す⁴⁸⁾. 最後に, 本章で示す対面反射波における TOF 変動量 $\Delta\tau$ と欠陥深さ位置 y の関係および第 4 章にて説明した透過波における $\Delta\tau$ と D の関係を用いた, 欠陥の位置および径の推定を行い, その有効性を検証する.

5.2 対面反射波の TOF 変動に着目した欠陥検出の原理

Figure 5.1 に計測の概略図を示す. トランスデューサから超音波信号を入射し, 同じトランスデューサで受信した対面反射波の TOF 変化量に着目して欠陥の情報を得る. 透過波の TOF と同様に, 欠陥が超音波伝播経路近傍に存在するときに, 対面反射波の TOF が変動す

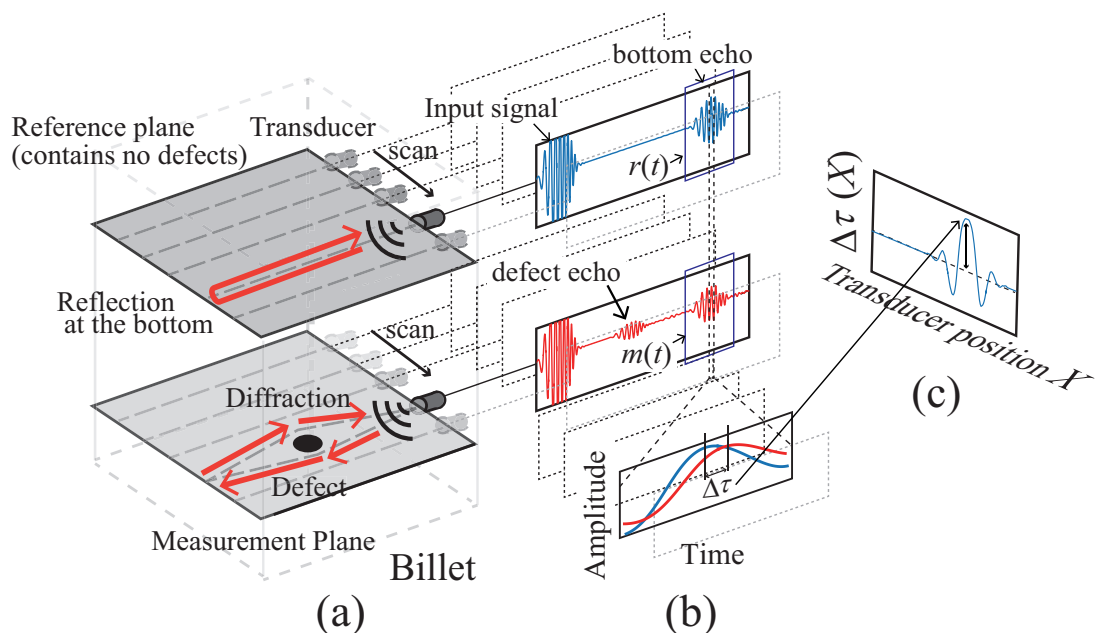


Fig. 5.1 Outline of defect detection by TOF deviation of bottom echo: (a) measurements on cross sections, measurement and reference plane, (b) difference in received waveforms between measurement and reference signals, and (c) TOF profile of bottom echo.

ることを利用する。送信信号や欠陥からの反射波の影響を取り除くため、鋼片のサイズから事前に対面反射波の到達時間を計算することにより、受信信号における対面反射波のみに着目して、第 2 章から第 4 章で述べた方法と同様に $\Delta\tau$ および TOF プロファイルを取得する。

5.3 欠陥検出シミュレーション

5.3.1 解析条件

Figure. 5.2 にシミュレーション条件を示す。シミュレーション法は、第 4 章で示した弾性場を用いた FDTD 法を用いた。試験片は $100 \times 100(\text{mm}^2)$ の断面を持ち、密度、縦波音速、横波音速等の解析領域における条件は第 4 章と同様である。開口径が 6 mm であるトランスデューサを 0.5 mm 間隔で走査し、横軸を計測位置 X 、縦軸を $\Delta\tau$ とした TOF プロファイルを得た。対面反射波の $\Delta\tau$ に着目するため、試験片の大きさおよび縦波音速を考慮して $33 \mu\text{s}$ から $45 \mu\text{s}$ における受信信号を $\Delta\tau$ の算出のために用いた。

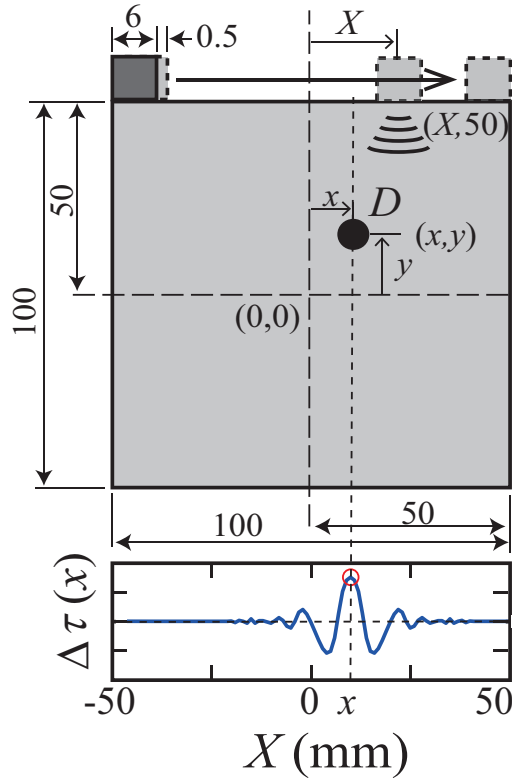


Fig. 5.2 Simulation condition

5.3.2 解析結果

Figure 5.3(a) に、計測断面の中心 $(0, 0)$ に直径 D の欠陥を配置したときの TOF プロファイル, Fig. 5.3(b) に直径 5 mm の欠陥の位置を $(0, y)$ として y を変化させて配置したときの TOF プロファイルを示す. 透過超音波の TOF と同様に, 対面反射波の TOF も欠陥により変動することが確認できる. このことにより, 対面反射波の TOF に着目することにより, 単一のトランスデューサだけでも欠陥の検出が可能であると考えられる. 欠陥径が大きくなるにつれ TOF 変動量が大きくなる傾向は透過波の TOF における結果と同様である. しかし, y 方向位置の変化に対する TOF プロファイルの形状の変化の傾向が透過波における結果と異なっており, 透過波を用いた場合は断面中心からの y 方向のずれが同じものであれば伝搬時間変動量 $\Delta\tau$ の値は同じものとなるが, 対面反射波を用いた場合には断面中心からトランスデューサ側に近づいた場合と遠ざかった場合で超音波の伝搬経路および伝搬時間が異なり, 違った $\Delta\tau$ の値が得られる.

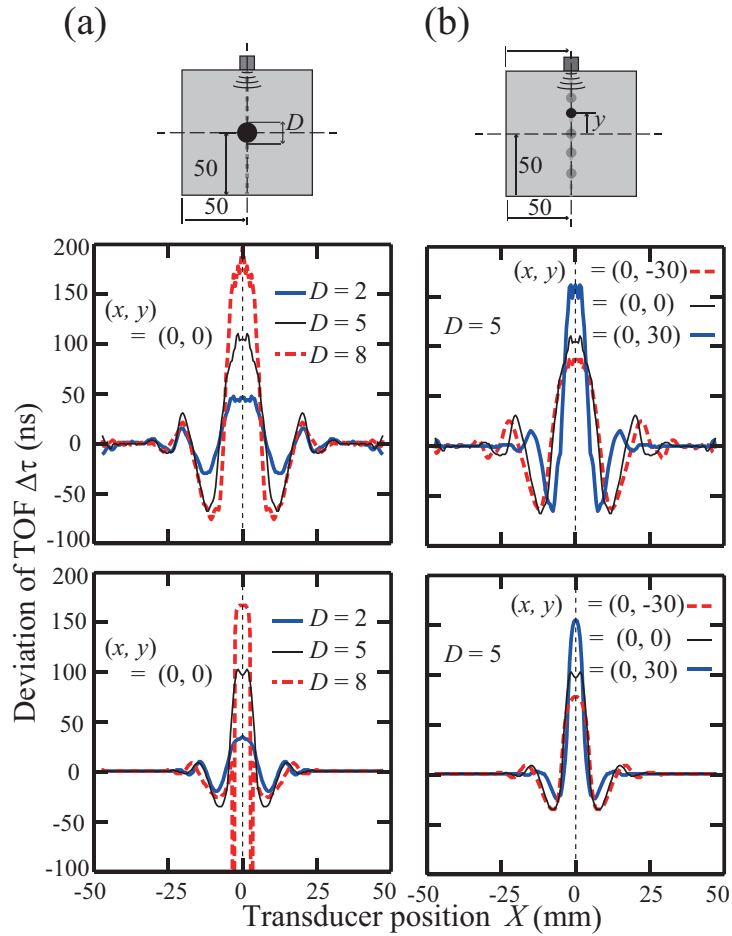


Fig. 5.3 Simulation condition and TOF profiles using bottom echo : (a) when the defect position (x, y) of $(0,0)$ and defect size D were varied, and (b) when D is 5 mm, x is 0, and y is varied.

Figure 5.4(a) に欠陥径 D と対面反射波の変動量 $\Delta\tau$ の関係, Fig. 5.4(b) に欠陥 y 方向位置と $\Delta\tau$ の関係を示す. 透過波を用いた時の結果と比べて, D に対してだけでなく, y の増加に対しても $\Delta\tau$ の増加量が大きくなっていることが確認できる. 対面反射波の情報だけでは $\Delta\tau$ は D と y の両方の影響を大きく受けており, 欠陥の径と深さ位置の推定は困難であるが, 深さ方向位置の影響を受けづらい透過波の情報と照らし合わせることで, 深さ方向の推定が可能になると考えられる.

また, 欠陥が表面近傍の位置 $(0, 45)$ または $(0, -45)$ に存在するときの対面反射波の TOF プロファイルを Fig. 5.5, その時の受信信号を Fig. 5.6, 欠陥が $(0,-45)$ にあるときの受信信号 Fig. 5.6(b) にパルス圧縮を施したものを Fig. 5.7 に示す. 欠陥が角鋼片の表面近傍にある場合でも対面反射波の TOF プロファイルに欠陥の影響が確認できる. 欠陥が $(0, -45)$ に存在

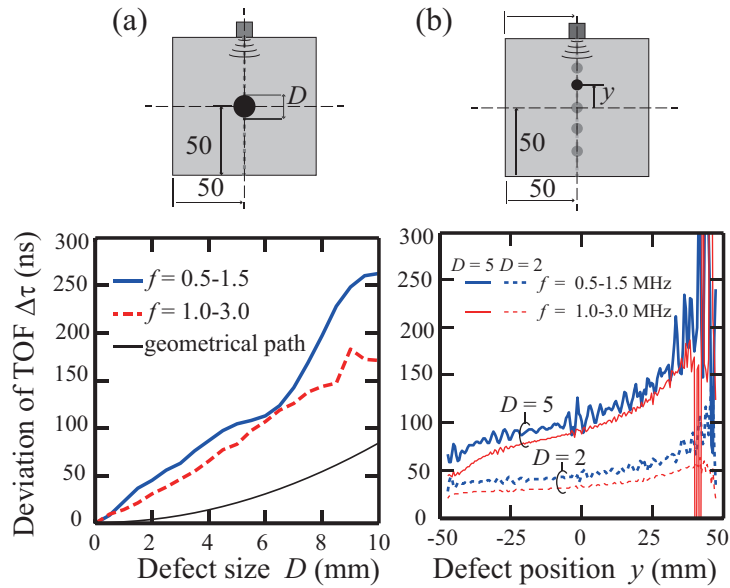


Fig. 5.4 Simulation condition and the effect of defect size D and the position y on deviation of TOF $\Delta\tau$ measured using bottom echo : (a) relationship between D and $\Delta\tau$, and (b) Relationship between y and $\Delta\tau$.

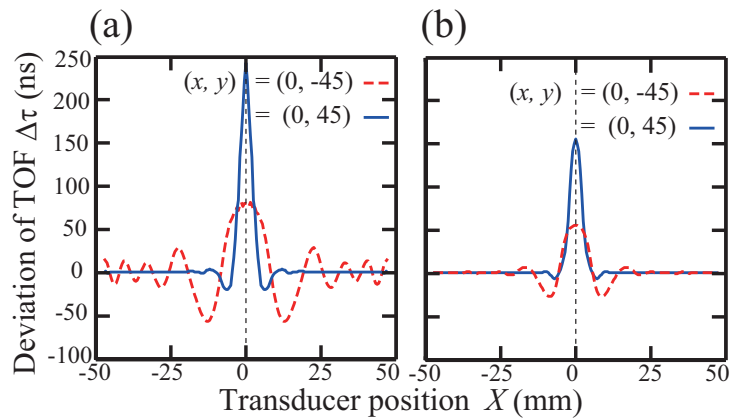


Fig. 5.5 TOF profiles when the defect size D is 5 mm, defect position x is 0, and y is between -45 and 45, using bottom echo : (a) $f = 0.5-1.5$ MHz, and (b) $f = 1.0-3.0$ MHz.

するとき、すなわち欠陥がトランスデューサから見て対面側の壁面に近いとき、Fig. 5.6(b)に示すように参照信号と計測信号の差が小さく、Fig. 5.7のようにその時のパルス圧縮波形からも欠陥からのエコーの検出は困難である。このことより、パルスエコーほうで検出が困難な場合であっても、対面反射波の TOF に着目することで検出が可能となる状況があるということが示された。

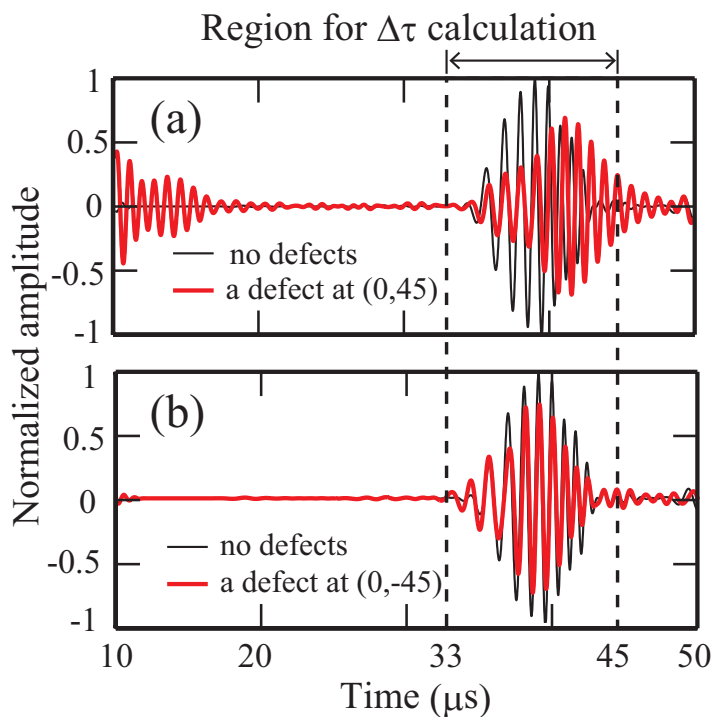


Fig. 5.6 Received signals of bottom echo when the defect size D is 5 mm, defect position x is 0: (a) at $y = 45$, and (b) $y = -45$.

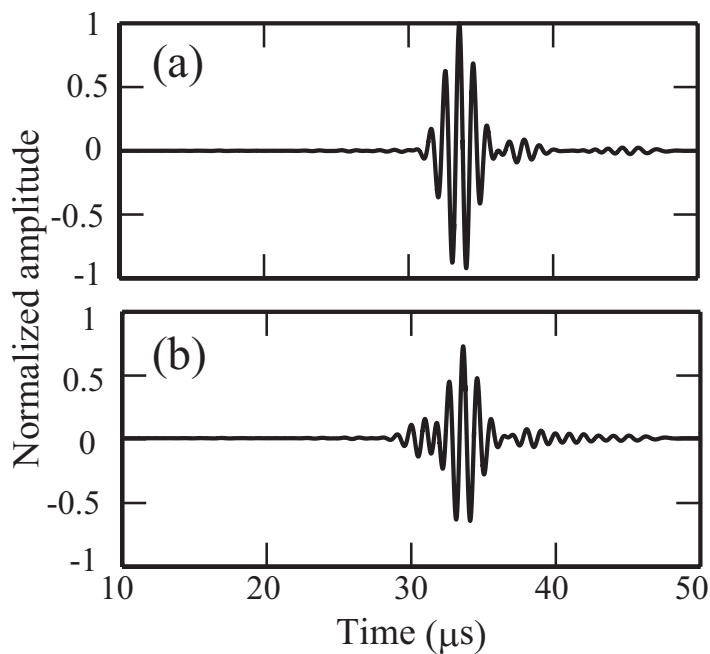


Fig. 5.7 Pulse compression signal at $f = 0.5\text{-}1.5$ MHz : (a) with reference signal, and (b) with measurement signal at $(x, y) = (0, -45)$ and $D = 5$.

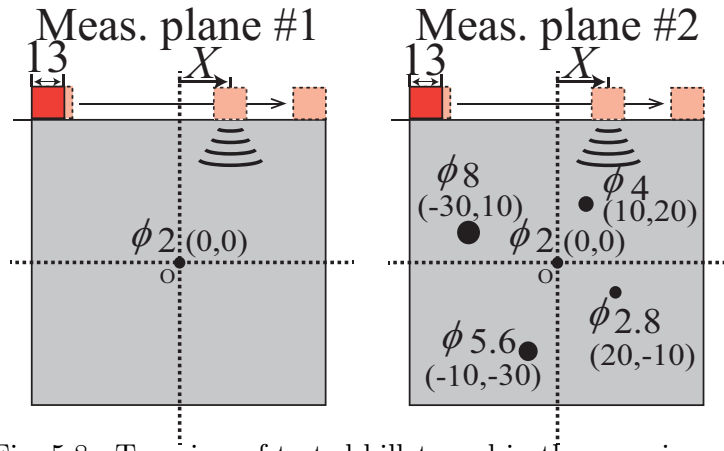


Fig. 5.8 Top view of tested billet used in the experiments.

5.4 欠陥検出実験

Figure 5.8 のように単一のトランスデューサで超音波の送受を行い，対面反射波の TOF をもとに欠陥検出を行う．試験片並びにほかの条件は 3.3.2 と同様の構成で実験を行った．結果を Fig. 5.9 に示す．概ねシミュレーションと一致した結果が得られた．欠陥による影響が TOF プロファイルから確認できることから，対面超音波の TOF に着目することで単一のトランスデューサにより角鋼片内部欠陥が検出可能であると考えられる．また，シミュレーションと実験結果における $\Delta\tau$ のピーク値が単一欠陥が存在する場合にはほぼ等しいことから，これまでにおけるシミュレーションによる検討は妥当なものであると考えられる．欠陥による影響に重畳している $\Delta\tau$ の変動は，トランスデューサの機械的振動によるものと考えられる．今回得られた複数欠陥が存在する断面における実験結果にはは深さ方向の位置推定が困難なほどに機械的振動の影響が現れているが，アレイトランスデューサを用いた電氣的走査による測定を行なうなど振動への対策を行うことで，シミュレーションと同様な TOF プロファイルが得られ，深さ方向推定も可能となると考えられる．

5.5 透過波と対面反射波の TOF 変動量に基づく欠陥位置・径の計測

本節では，本章にて得た Fig. 5.4 に示すような対面反射波における TOF 変動量 $\Delta\tau$ と欠陥深さ位置 y の関係および第 4 章にて説明した Fig. 4.3 に示すような透過波における $\Delta\tau$ と D の関係を用いた，欠陥の位置および径の推定を行う．

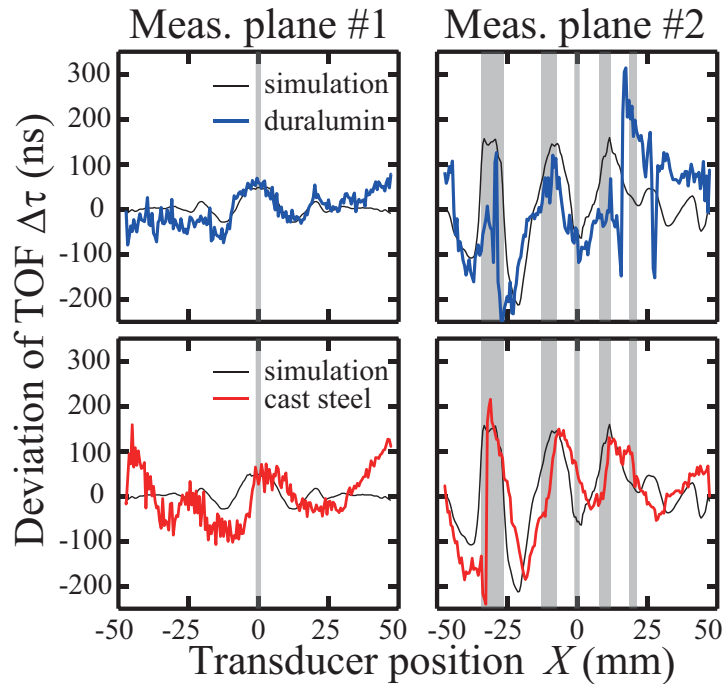


Fig. 5.9 TOF profiles when there was a defect at the center of a cross section with the defect size was 2 mm and when there were five defects in simulation, duralumin, and cast steel at $f = 0.5 - 1.5$ MHz.

Figure 5.10 および Fig. 5.11 に欠陥位置・径推定を行った例を示す. Figure 5.10(a) のような 2 つの欠陥を含む計測断面において得た透過波における TOF プロファイル, 対面反射波における TOF プロファイル, 透過波における欠陥径 D と TOF 変動量 $\Delta\tau$ の関係, D が 5.0 および 2.0 mm のときの対面反射波における欠陥位置 y と $\Delta\tau$ の関係をそれぞれ Fig. 5.10(b)-(f) に示す. y と $\Delta\tau$ の関係は, y について 0.5 mm 毎に求めた $\Delta\tau$ が青線にて示されているが, y の変化に伴う細かな変動の影響を低減するため, 10 点, すなわち 5 mm の移動平均をとった赤線に示す関係を用いた. Figure 5.10(b) の透過波における TOF プロファイルに特徴的な 2 つのピークが見られることから, $x = -20, 20$ の位置に欠陥が存在すると推定される. $x = -20, 20$ における $\Delta\tau$ はそれぞれ 69, 27 ns であり, (d) の D と $\Delta\tau$ の関係から D はそれぞれ 5.1, 2.0 mm であると推定される. また, Fig. 5.10(c) の $x = -20, 20$ における $\Delta\tau$ はそれぞれ 95, 44 ns であり, 径の推定値に近い値である $D = 5.0, 2.0$ における y と $\Delta\tau$ の関係を示す (e), (f) から, y はそれぞれ 9 および 0 と推定される. $(-20, -9)$ に $D = 5.1$, $(20, 0)$ に $D = 2.0$ の欠陥が存在すると推定され, 概ね Fig. 5.10(a) に示す計測面として設定した値と一致している. 欠陥の径および位置とはわずかに異なる値となっている部分もあるが, これ

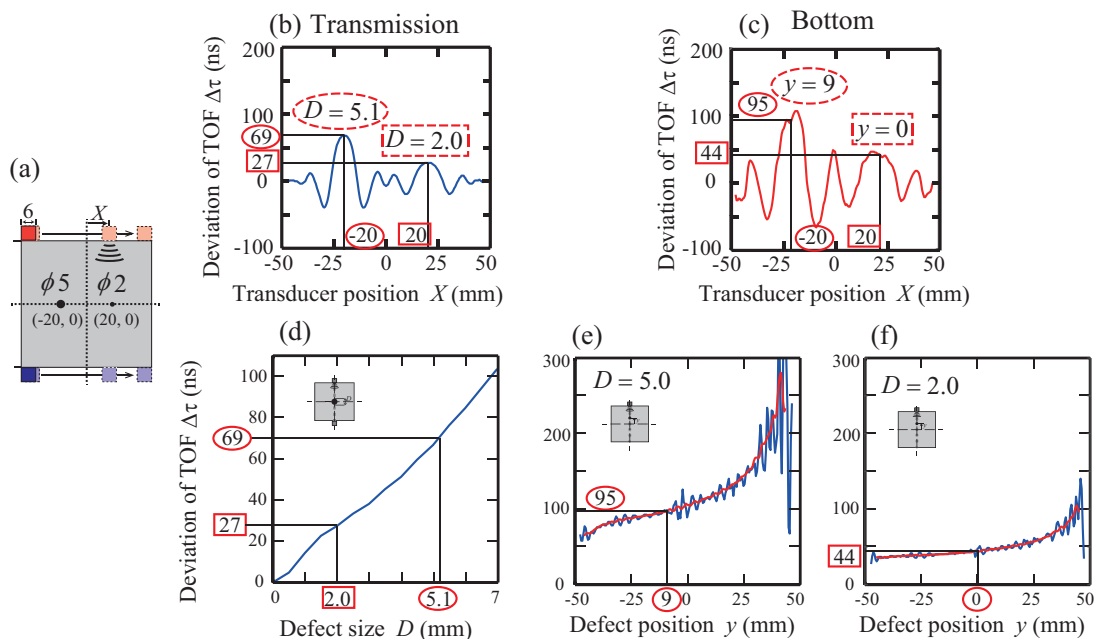


Fig. 5.10 Estimation of defects sizes and positions from TOF profiles of transmitted wave and bottom echo when $f = 0.5 - 1.5$ MHz, $a = 6$ mm with same positions y of the defects: (a) simulation condition of measurement plane, (b) TOF profile of transmitted wave at (a), (c) TOF profile of bottom echo at (a), (d) relationship between defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$ using transmitted wave, (e) relationship between defect position y and $\Delta\tau$ using bottom echo at $D = 5.0$, and (f) at $D = 2.0$.

は壁面からの反射波の影響により透過波および対面反射波における $\Delta\tau$ の値が変動したことによるものだと考えられる。Figure 5.10(a) の#1,#2 に示す、欠陥の深さ位置を変えた計測面に対しても同様の欠陥位置・径推定を行った結果、欠陥径は実際より大きく推定され、その値をもとに深さ位置 y を推定することから、 y の推定結果の実際の値との誤差が Fig. 5.10 における結果と比べて大きくなった。また、#1 断面における 2 mm の欠陥の y が Fig. 5.10(f) の関係から推定不可能となった。欠陥径が大きく推定され、実際より大きい欠陥における y と D の関係に基づいた推定を行ったために対応する y の値がなく、推定不可能となった。しかしこの結果から y が 0 に近い値であることは判断可能である。今回行った推定において、欠陥が断面中心に存在するときの D と $\Delta\tau$ の関係を D の推定に用いているが、一度 y を推定したのちに、その y の位置における D と $\Delta\tau$ の関係を用いて再び径の推定を行うなど、補正を行うことにより、径および深さ位置の計測精度が向上すると考えられる。また、ピーク値以外の特徴に着目することにより、計測精度が向上すると考えられる。

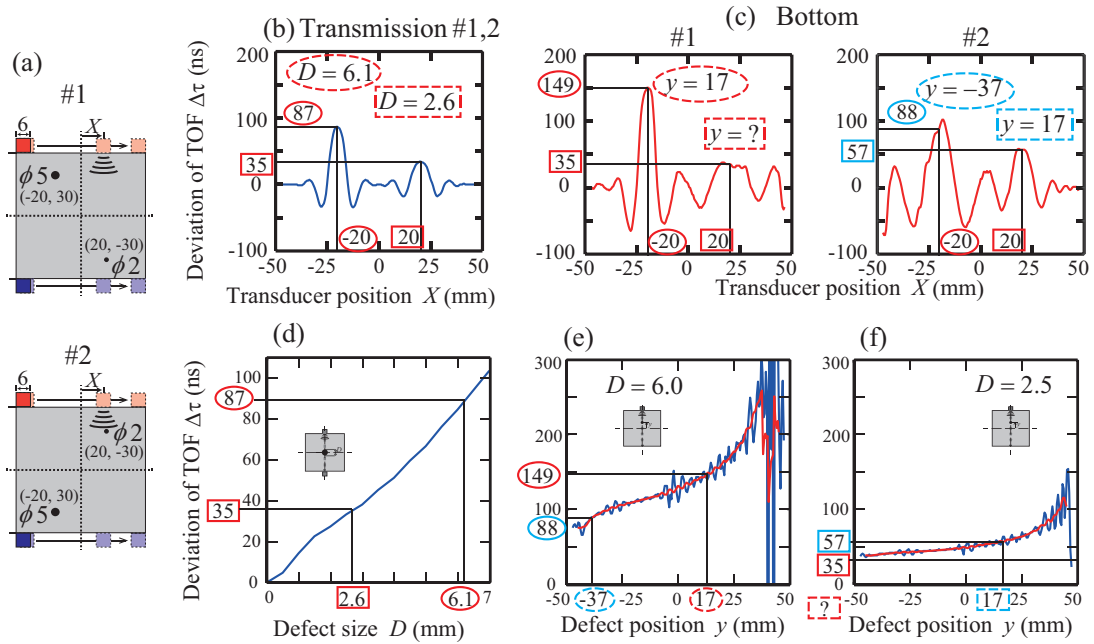


Fig. 5.11 Estimation of defect sizes and positions from TOF profiles of transmitted wave and bottom echo when $f = 0.5 - 1.5$ MHz and $a = 6$ mm with different positions y of the defects: (a) simulation conditions of measurement planes, (b) TOF profile of transmitted wave at (a), (c) TOF profiles of bottom echo at #1 and #2, (d) relationship between defect size D and deviation of TOF $\Delta\tau$ using transmitted wave, (e) relationship between defect position y and $\Delta\tau$ using bottom echo at $D = 6.0$, and (f) at $D = 2.5$.

従来欠陥の径および深さ位置方向の情報が得られてこなかった透過波および対面反射波を用いて径および深さ方向位置の推定が可能であることを示した。

5.6 むすび

底面での反射波の TOF 変動に着目した欠陥検出法を検討した。シミュレーションと実験により、欠陥の深さ方向位置の変化の影響が TOF プロファイルに表れ、透過波の TOF プロファイルと併用することにより深さ方向位置が推定可能であることが確認された。従来の深さ計測の際に必要なとされる欠陥からのエコーを利用しない、透過波および対面反射波による欠陥の深さおよび径推定が可能であることを示した。また、単一のトランスデューサにおいても対面反射波の TOF に着目することにより、パルスエコー法による検出が困難である表面近傍の欠陥が検出可能であることが示された。減衰の影響については今後検討する必要がある。

第 6 章

フェイズドアレイ技術の利用

6.1 はじめに

これまでの章および TOF を用いる先行研究において，単一のトランスデューサから送信された超音波信号を単一のトランスデューサにより受信し，その信号を処理することにより欠陥検出が行われている．近年反射法に 응용されているフェイズドアレイ技術を透過法に 응용することにより，さらなる高減衰材にも適用可能になると期待される．そこで本章では，フェイズドアレイ技術を用いた収束超音波の透過波に着目した欠陥検出法をシミュレーションにより検討する．

6.2 収束超音波の透過波に着目した欠陥検出の原理

更なる大型および高減衰な角鋼片の検査を実現するため，フェイズドアレイ技術による収束超音波ビームを用いた透過超音波の計測を検討する．フェイズドアレイ技術はパルスエコー法への適用は数多く行われ，超音波ビーム収束などを用いて高精度な欠陥検出を実現しているが，透過波へのフェイズドアレイ技術の適用事例は見られない．そこで，収束超音波の透過波に着目した欠陥検出を検討し，更なる大型・高減衰な角鋼片への適用が可能な計測の実現を目指す．Figure 6.1 に計測の概略図を示す．トランスデューサアレイから送信した収束超音波の透過波の TOF および振幅変化に着目する．送信側のトランスデューサアレイの各トランスデューサの送信のタイミングを制御することにより超音波を収束させ，受信側のトランスデューサアレイの各トランスデューサにおける受信信号の平均をとった．送信側および受信側のトランスデューサアレイを電氣的に走査させることにより 1 断面の検査を行う．第 2 章及び第 3,4 章で述べた方法と同様に $\Delta\tau$ および TOF プロファイルを取得し，加えて受信信号にお

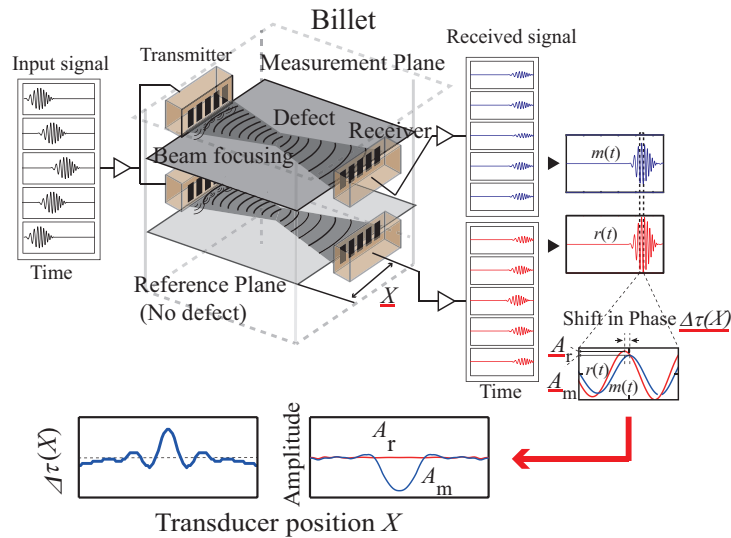


Fig. 6.1 Outline of defect detection inside billet by transmission method using phased array technique.

ける振幅の最大値を取得する。

6.3 欠陥検出シミュレーション

シミュレーション条件は 2.3 節と同様であり，Fig. 6.2 の左側のように断面中心に直径 2 mm の欠陥を配置し，トランスデューサ開口径 a を 6 mm とした第 2-4 章で示した平行走査型超音波法， a を 50 mm とした平行走査型超音波透過法， a を 50 mm としたフェイズドアレイによる収束超音波を用いた方法の 3 種類の方法により計測した透過波の振幅および参照信号と計測信号の相互相関関数の最大値の位置の変動量 $\Delta\tau$ を比較する．右側に各送信方法により生じた音場のパワーを示す．フェイズドアレイを用いて超音波が収束されていることが確認できる。

Figure 6.3(a) に参照面と計測面における振幅の最大値，Fig. 6.3(b) に TOF プロファイルを示す．振幅の最大値は各計測方法におけるトランスデューサ位置 X が 0 のときの参照面における最大値振幅を基準に正規化を行った．収束させない場合と比べて，超音波を収束させた場合に欠陥の有無による振幅の差が大きく表れていることが確認できる．また，振幅の差が生じる範囲も超音波収束により狭まっており，欠陥検出における分解能の向上に繋がると考えられる． $\Delta\tau$ に着目すると，超音波収束により変動量は小さくなっているが，変動が生じる範囲は狭まっていることが確認できる．今回のシミュレーションにおいてはノイズの影響はしていないが，欠陥の有無による相対的な振幅の差だけでなく，振幅の絶対値も超音波収束により高

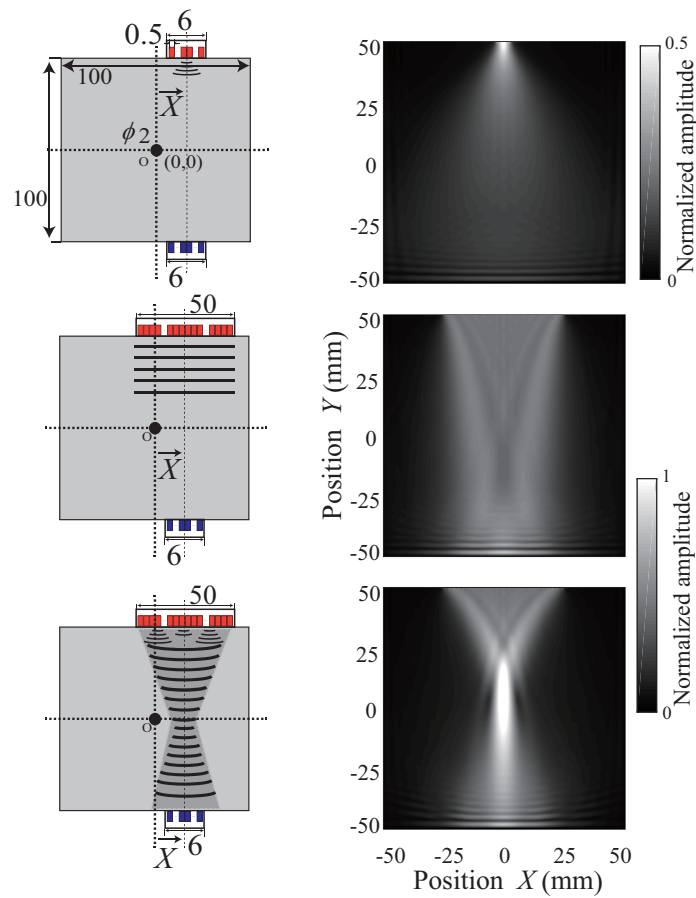


Fig. 6.2 Simulation condition and power of particle velocity at each methods.

まっております，このことにより減衰やノイズの影響を受けづらくなっているものと考えられる。

6.4 むすび

本章では，フェイズドアレイ技術を用いた収束超音波の透過波に着目した欠陥検出法をシミュレーションにより検討した．その結果，欠陥による受信信号振幅および相互相関関数ピーク位置の変動が，単一のトランスデューサを用いたときよりも大きくなり，更なる高減衰角鋼片への対応が期待できる手法であることが確認された．

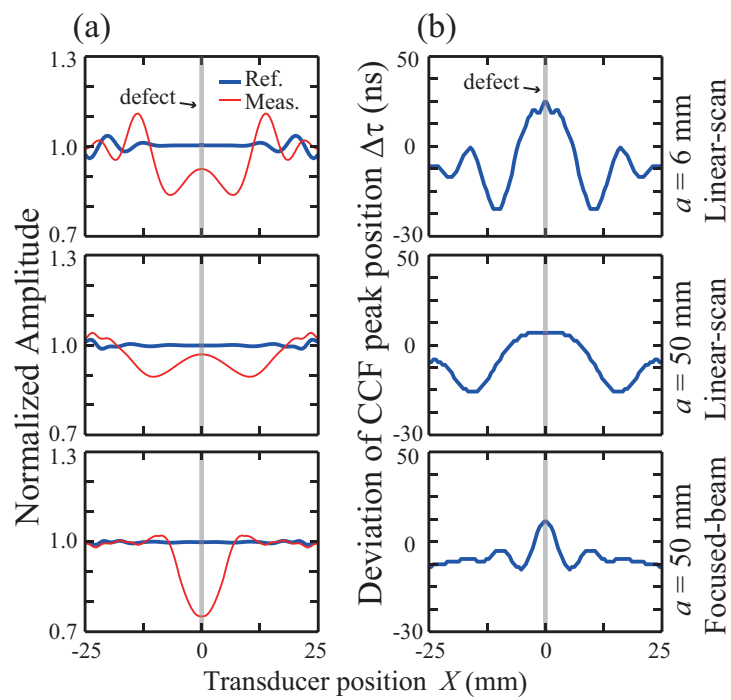


Fig. 6.3 Results of simulations of each transmitter arrays and transmitting wave shape : (a) peak amplitudes, and (b) deviation of cross correlation function peak position $\Delta\tau$.

第 7 章

平面波送信による計測高速化

7.1 はじめに

平行走査型超音波透過法により、TOF を用いる超音波 CT 法より 1/100 程度まで計測時間が削減されたが、送信回数は 200 回ほど必要であり、まだまだ計測時間の削減の余地がある。そこで、これまで経路ごとに超音波送信を行っていたものを、すべて同時に送信することによる平面波送信による計測の高速化を検討する。これにより、超音波送信回数を 1 回と大幅に削減し、高速な欠陥検出の実現が期待される。

7.2 平面波による欠陥検出の原理

平行走査により、CT 法と比べて 1/100 ほどの計測経路および計測時間となったが、これらの計測では 1 断面の計測において複数回の超音波送信を必要とする。符号変調信号を用いた複数経路同時計測も行われているが³⁵⁾、同時送信が可能な信号は最大 5 個であり、計測時間の短縮は 1/5 までにとどまっている。そこで、本章においては平面波の 1 回送信による欠陥検出を検討する。これまで複数回の超音波送信が必要だったものを、1 回のみの送信で計測を行うため、大幅な計測時間短縮につながる。Figure 7.1 に計測の概略図を示す⁵⁰⁾。透過させた平面波の TOF 変動に基づき欠陥情報を取得し、1 回の平面波送信で 1 断面の計測を行う。各受信トランスデューサアレイで受信した波形をもとに、第 2 章及び第 3,4 章で述べた方法と同様に $\Delta\tau$ および TOF プロファイルを取得する。

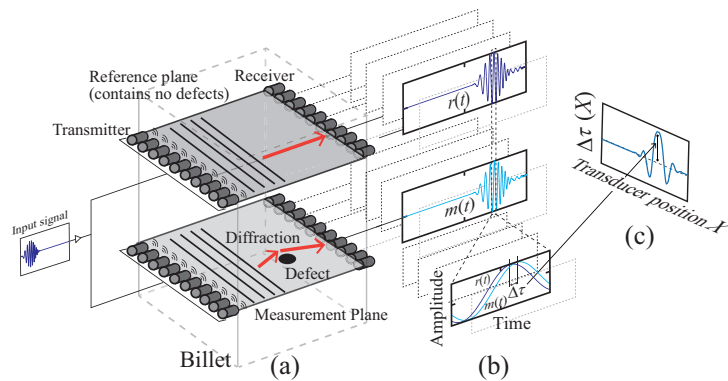


Fig. 7.1 Outline of defect detection inside billet by transmission method using plane-wave.

7.3 欠陥検出シミュレーション

シミュレーション条件は 2.3 節と同様であり，Fig. 7.2 の上側のように直径 5 mm の欠陥を $(50, y)$ または $(x, 50)$ に配置し，トランスデューサ開口径を断面の辺の長さと同じ 100 mm とし，平面波を送信した時の透過波の TOF 変動量 $\Delta\tau$ を計測した．Figure 7.2 の下側がそのときの TOF プロファイルであり，左側が x を，右側が y を変化させたものである．欠陥の位置によらず TOF プロファイルに変動が現れていることから，平面波を透過させたときの TOF 変動に着目することにより，超音波信号送信回数を 1 回と大幅に減らした欠陥検出が可能であることが示された． $\Delta\tau$ に変動が現れる受信トランスデューサ位置 X の範囲は，第 3 章で示した平行走査により計測した場合と比べて広がっていることから，欠陥検出における複数欠陥の分解能に関しては低下すると考えられる．欠陥が x 方向に壁面に近づいたときには，TOF プロファイルの形の崩れが生じやすくなっていることが確認できる．これは平面波を辺の全体から送信することにより壁面からの反射波の影響が生じやすくなったものと考えられる．欠陥の位置が y 方向に変動した時，第 5 章で示した対面反射波の TOF プロファイルと同様に，欠陥の深さ方向の位置によりプロファイルの形状が大きく異なっていることが確認できる．

7.4 むすび

本章では，平面波の 1 回送信による TOF 計測および欠陥検出にかかる時間を高速化を検討した．その結果，従来の経路ごとに超音波を送信して TOF を計測する場合と比べ，欠陥が TOF 変動に与える影響は小さくなったが，計測時間を大幅に削減した欠陥検出が可能であることが示された．

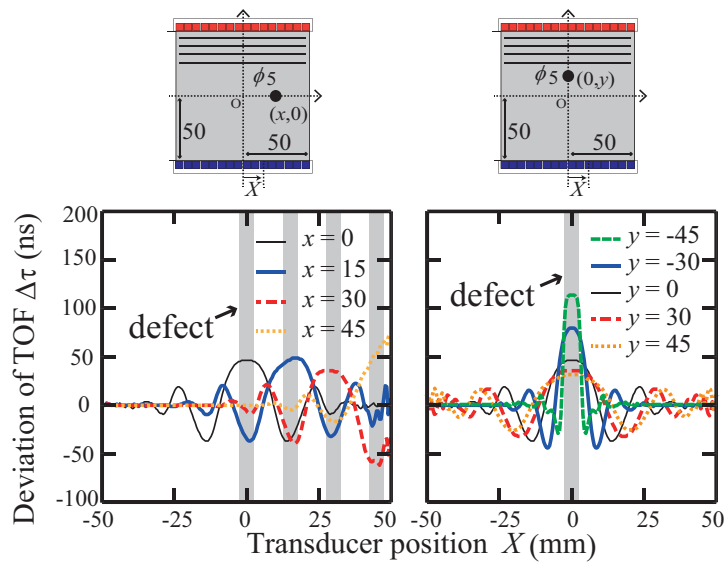


Fig. 7.2 TOF profiles at the defect position (x,y) using plane-wave : (a) $y = 50$, (b) $x = 50$.

第 8 章

結 論

本研究では，実用化可能な時間で計測可能な，高減衰角鋼片にも適用可能な内部欠陥検出手法の確立を目的として，平行走査型超音波透過法の提案および有効性の検討を行い，計測経路の削減に伴う欠陥情報の減少への対応，更なる計測の高速化および大型かつ高減衰な角鋼片への対応について検討した。

第 2 章では，高減衰に適用可能で高速に検査が行える手法として，平行走査型超音波透過法による欠陥検出および欠陥径推定を提案し，その原理を示した。

第 3 章では，数値シミュレーションおよび実験により有効性を検証した。数値シミュレーションにおいては従来用いられていた縦波のみを考慮した WE-FDTD 法によるものと試験片を用いた実験結果を比較し，欠陥検出および位置・径推定における提案手法の有効性を示した。また，縦波のみを考慮したシミュレーションと試験片を用いた実験結果において，TOF 変動量に差が表れることを確認した。

第 4 章では，第 3 章で示された縦波のみを考慮したシミュレーションにおける TOF 変動量と実験における TOF 変動量の間が生じた誤差の低減を行った。そのために，縦波のみを考慮したシミュレーションと弾性波を考慮した波動伝搬シミュレーションによる結果を比較し，TOF 計測において横波およびモード変換が影響をあたえること，また弾性波の考慮により実験における TOF 変動量との誤差が低減することが示された。

第 5 章では欠陥の深さ位置の推定精度向上のため，対面反射波の TOF 変動計測の利用を検討した。透過超音波の TOF 計測との併用により欠陥の深さ情報が得られ，また，対面反射波の TOF 変動計測を単独で用いることで単一のトランスデューサで角鋼片内部の欠陥検出が行えることを示した。

第 6 章では，更なる大型および高減衰な角鋼片の検査を実現するため，フェイズドアレイ技術による収束超音波ビームを用いた透過超音波の計測を検討した。トランスデューサアレイか

ら送信した収束超音波の透過波の TOF および振幅変化に着目することで、減衰の影響の更なる低減につながることを示した。

第 7 章では、更なる計測時間の短縮のため、平面波送信による透過超音波の TOF 計測を検討した。1 回の平面波送信とすることで、大幅に計測時間を短縮した透過超音波による欠陥検出が可能であることを示した。しかしながら、第 6 章で示した収束超音波の利用は想定していないため、超音波の一回送信による高速計測の大型高減衰角鋼片への適用には工夫が必要である。

以上の検討から、平行走査型超音波透過法において、欠陥の定量的評価、計測の高速化、高減衰角鋼片への適用が可能であることを示し、検査の実用化に近づけた。本研究は鉄鋼業界における品質保証手段を進歩させるものであり、鋼材半製品のオンラインにおける全数検査の実現に大きく寄与するものである。最終製品である鉄鋼製品の供用中の事故を防ぎ、社会全体の安全につながるものである。また、透過超音波および対面反射波の新たな応用例を示すものであり、学術的にも非破壊検査分野の発展に寄与するものである。

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。

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6年間という期間にわたり、研究、学会発表、論文執筆などを含む様々な面におきましてご指導、ご鞭撻を頂きました。研究や物事に向き合う姿勢をご教授頂き、また、研究の成果を社会に発信する機会を数多く頂きました。ティーチングアシスタント、イベントでの説明員、研究室の学生長、デュアル・ディグリープログラムなど、かけがえのない経験を数多く積ませて頂きました。まだまだ至らぬ点もありますが、水谷先生のおかげで、研究室に配属される前には想像できないほどに成長できたと感じております。深く感謝致しますとともに、心より御礼申し上げます。

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、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。お忙しい中でも、夜分遅くまで親身になって議論にお付き合い頂き、問題解決へと導いて頂きました。問題に直面した時の向き合い方を学ばせて頂きました。心より感謝致します。

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、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。学振特別研究員に申請する際、何度も書類および発表に対しご指導をいただきました。より良いものに仕上げようと粘り強く取り組む姿勢を教えて頂きました。心より感謝致します。

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、本論文や発表資料に対するご指導を頂きました。また、大学3年次に受講していた授業にて当時ティーチングアシスタントだった善甫先生から音に興味はないかと聞かれたことがきっかけとなり、音響システム研究室に所属することになりました。心より感謝致します。

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、本研究の発表に際しまして御助言を頂きました。また、度々学生居室に足を運んでくださり、明るく声をかけて頂きました。心より感謝致します。

筑波大学数理物質系物理工学域 教授 伊藤雅英先生，産業総合技術研究所計量標準総合センター 主任研究員 吉岡正裕氏には、本論文を執筆するに当たり、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。

独立行政法人 日本学術振興会には、特別研究員奨励費（18J10757）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。

筑波大学生命環境系 教授 戒能洋一先生には、デュアル・ディグリープログラム（副専攻）を通して、農学における研究及びそれ以外の研究においても共通する考え方を学ばせて頂きました。心より感謝致します。

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 安藤泰雅博士，小林透博士，茂木貴弘博士，野呂瀬葉子博士，黒山喬允博士，角間孝一博士，川岸卓司博士，青柳将史博士，千葉裕介博士，並びに、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，青木拓也氏，小木曾里樹氏，中林大樹氏，佐野祐士氏，糸井川椋氏，岩谷洋和氏，味藤未冴来氏，今井義人氏，博士前期課程に在籍する 西島也寸彦氏，水上悠生氏をはじめとする研究室の皆様には、本研究に関する助言を頂き，また日頃より楽しい時間を過ごさせて頂きました。感謝しております。

応用動物昆虫学研究室の皆様には、デュアルディグリープログラムを通して、様々な場面でお世話になりました。感謝しております。

最後に、9年間の大学生活および6年間の研究生活の機会を与えてくれ、学生生活を支えてくれた家族に感謝いたします。

参考文献

- 1) 岡本正三, “鉄鋼材料”, コロナ社, 東京, 1978.
- 2) 日本工業規格, G0203, 2009.
- 3) 日本金属学会 (編), “金属便覧”, 丸善, 東京, 1990.
- 4) M. Shimura, “Penny-Shaped Central Bursting Defect in Cold Drawing of High Chromium Ferritic Stainless Steel”, Trans. Jpn. Inst. Met. Vol.19, pp.589-597, 1978.
- 5) M. B. Karamis and F. Nair, “Effects of Reinforcement Particle Size in MMCs on Extrusion Die Wear”, Wear, Vol.265, pp.1741-1750, 2008.
- 6) ASM International, “Cast irons”, ed. Davis, J. R, ASM International., Ohio p. 294, 1996.
- 7) 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”, 新日鉄技法, No. 394, pp.103-110, 2012.
- 8) 日本非破壊検査協会, “非破壊検査便覧”, 日本工業新聞社, 東京, 1978.
- 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, 1993.
- 10) Y. Ohara, S. Yamamoto, T. Mihara and K. Yamanaka, “Ultrasonic Evaluation of Closed Cracks Using Subharmonic Phased Array”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.47, 3908, 2008.
- 11) M. N. Salim, T. Hayashi, M. Murase and S. Kamiya, “Visualization and Modal Analysis of Guided Waves from a Defect in a Pipe”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.48, 07GD06, 2009.
- 12) H. Sato and H. Ogiso, “Guided waves propagating in a water-filled stainless steel pipe”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.53, 07KC13, 2014.
- 13) T. Hayashi and S. Biwa, “Subharmonic Wave Generation at Interfaces of a Thin Layer between Metal Blocks”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.52, 07HC02, 2013.
- 14) Nurmalia, N. Nakamura, H. Ogi and Masahiko Hirao, “Mode Conversion and To-

- tal Reflection of Torsional Waves for Pipe Inspection ”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.52, 07HC14, 2013.
- 15) T. Jayakumar, P. Palanichamy and B. Raj, “Detection of hard intermetallics in b-quenched and thermally aged Zircaloy-2 using ultrasonic measurements”, J. Nucl. Master, Vol.255, pp.243 1998.
 - 16) 日本工業規格, G0802, 2016.
 - 17) M. Sato, “Diagonally Staggered Grid for the Analysis of Elastic Wave Fields in Isotropic and Anisotropic Solids Using the Finite-Difference Time-Domain Method”, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3931, 2008.
 - 18) 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”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.53, 07KC19, 2014.
 - 19) S. Yagi, R. Yokoyama, K. Tamura and M. Sato, “Noncontact Monitoring of Surface Temperature Distribution by Laser Ultrasound Scanning”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.50, 07HF06, 2011.
 - 20) K. Takahashi, K. Jinno, Y. Ohara and K. Yamanaka, “Evaluation of crack closure stress by analyses of ultrasonic phased array images during global preheating and local cooling”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 07KC20, 2014.
 - 21) Y. Tanaka, K. Ohira, Y. Ogura, K. Tanaka, H. Shiomi, Y. Kurumi and T. Tani, “Ultrasonic imaging of medical puncture using array probe”, Jpn. J. Appl. Phys., 53, 07KF26, 2014.
 - 22) S. Katayose, Y. Hashizume, A. Mori and M. Itoh, “Low loss 1×8 silica-based phased array switch with low power consumption”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.53, 08MB01, 2014.
 - 23) 小林英男, 大岡紀一, 牧原善次, “超音波による欠陥寸法測定—非破壊検査の新しい展開—”, 共立出版, 東京, 2009.
 - 24) J. F. Greenleaf, S. A. Johnson, W. F. Samayoa and F. A. Duck, ”Algebraic reconstruction of spatial distribution acoustic velocities in tissue from their time of flight profiles”, Acoust. Hologr., Vol. 6, pp.71-90, 1975.
 - 25) G. Höfelmann, H. O. Luck and P. Becker, ”Reconstruction of temperature and velocity flow fields o aerosols”, J. Aerosol Sci., Vol. 23, pp.851-854, 1992.
 - 26) K. Nogami and A. Yamada, ”Evaluation experiment of ultrasound computed tomography for the abdominal sound speed imaging”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, pp.4820-

4826, 2007.

- 27) A. Minamide, K. Mizutani and N. Wakatsuki, "Optimal Transducer Arrangement for Temperature Distribution Measurement in Arbitrary Convex-Shaped Space by Acoustic Computerized Tomography", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.49 07HC07, 2010.
- 28) K. Nagai, T. Yokoyama and W. Cau, "Diffraction tomography from data collected with transducer and received scanned simultaneously", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.31, pp.175-177, 1992.
- 29) H. Hasegawa and H. Kanai, "Comparison of spatial resolutions of parallel beamforming and diffraction tomography in high frame rate echocardiography", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53 07KF02, 2014.
- 30) 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, 07GD05, 2009.
- 31) 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, 07HC13, 2010.
- 32) 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, 116601, 2011.
- 33) Y. Norose, K. Mizutani and N. Wakatsuki, "Nondestructive Inspection for Steel Billet Using Phase-Modulated Signal by Gold Sequence for Improving Measurement Speed", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.51, 07GB17, 2012.
- 34) K. Kakuma, Y. Norose, K. Mizutani and N. Wakatsuki, "Interval of observation plane in visualization of region near defect in billets using ultrasonic computerized tomography method", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, 07HC10, 2013.
- 35) Y. Norose, K. Mizutani and N. Wakatsuki, "Speeding Up of Nondestructive Inspection for Shape-Distorted Billet by Simultaneous Measurement of Time of Flight", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, 07HC09, 2013.
- 36) K. Kakuma, K. Mizutani, N. Wakatsuki and T. Ebihara, "Defect visualization in billets by time reversal of scattered waves from defects", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC10, 2015.
- 37) J.D Achenbach, "Quantitative nondestructive evaluation", *Int. J. Solids and Structure*. Vol.37, pp.13-27, 2000.
- 38) R. Miyamoto, K. Mizutani, T. Ebihara and N. Wakatsuki, "Defect detection and size

- estimation in billet from profile of time-of-flight using ultrasonic transmission method with linear scanning” , Jpn. J. Appl, Phys. Vol.54, 07HC11, 2015.
- 39) 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, 1960.
- 40) 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, 07HC14, 2010.
- 41) Y. Miyazaki and T. Tsuchiya, “Perfectly Matched Layer for the Wave Equation Finite Difference Time Domain Method”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.51, 07GB02, 2012.
- 42) Ryusuke Miyamoto, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara, “Size Estimation of Multiple Defects in Billet from Time-of-flight Profile by Transmission Method” , *Proceedings of the 38th Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol. 38, 1P2-14, 2017.
- 43) 加山幸雄, 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.
- 44) R. Miyamoto, K. Mizutani, T. Ebihara and N. Wakatsuki, “Effect of mode conversion on defect detection and size estimation in billet from time-of-flight profile by ultrasonic transmission method” , Jpn. J. Appl, Phys. Vol.55, 07KC06, 2016.
- 45) M. Sato, “ Finite-Difference Time-Domain Numerical Analysis of Elastic Wave Fields Using both Elastic and Velocity Potential Variables”, Jpn. J. Appl, Phys. Vol.45, 4453, 2006.
- 46) Ryusuke Miyamoto, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Tadashi Ebihara, “Ultrasonic defect detection in billet using time-of-flight of bottom echo” , *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration*, T01.RS01-526, 2016.
- 47) R. Miyamoto, K. Mizutani, T. Ebihara and N. Wakatsuki, “Ultrasonic inspection method for billet using time-of-flight deviation of bottom echo and its performance evaluation in numerical simulations” , Jpn. J. Appl, Phys. Vol.56, 07JC09, 2017.
- 48) 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格, “超音波対面反射波の伝搬時間変動に着目した角鋼片内部欠陥検出の実験的検証”, 土木学会, 第 21 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.307-308, 2018.
- 49) R. Miyamoto, K. Mizutani, T. Ebihara and N. Wakatsuki, “Defect detection inside billet by ultrasonic transmission method using phased array technique” , *Proceedings of the 39th Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol.39, 1P2-11, 2018.
- 50) Ryusuke Miyamoto, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki and Tadashi Ebihara, “Defect

detection in billet using plane-wave and time-of-flight deviation with transmission method” , *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, P2-A8-3, 2018.

(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）

- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki:
“Defect detection and size estimation in billet from profile of time-of-flight using ultrasonic transmission method with linear scanning” , Japanese Journal of Applied Physics, Vol.54, 07HC11, (6 pages) (25 June, 2015).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki:
“Effect of mode conversion on defect detection and size estimation in billet from time-of-flight profile by ultrasonic transmission method” , Japanese Journal of Applied Physics, Vol.55, 07KC06, (6 pages) (13 June, 2016).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki:
“Ultrasonic inspection method for billet using time-of-flight deviation of bottom echo and its performance evaluation in numerical simulations” , Japanese Journal of Applied Physics, Vol.56, 07JC09, (8 pages) (26 Jun, 2017).

査読付国際会議論文（学位請求申請に関連のある論文）

- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki: “Ultrasonic defect detection in billet using time-of-flight of bottom echo” , Proceedings of the 23rd International Congress on Sound & Vibration, T01.RS01-526, (5-pages) (Athens, 17 July, 2016).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki: “Defect detection in billet using plane-wave and time-of-flight deviation with transmission method” , Proceedings of 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium, P2-A8-3, (4-pages) (Kobe, 23 October, 2018).

(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）

- **Ryusuke Miyamoto**, Yasuhiko Nishijima, Hiroki Nakabayashi, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, Naoto Wakatsuki, Hiroyuki Uga, and Kenji Kubota: “Simultaneous video and sound acquisition system for detection and monitoring greenhouse whiteflies” , Proceedings of 2017 EFITA WCCA CONGRESS, (6-pages) (Montpellier, 4 July, 2017).

査読付発表論文

- **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," Proceeding of the 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.34, 1P2-31, pp.97-98 (Kyoto, 20 November, 2013).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki: "Defect size estimation in billet from profile of time of flight using ultrasonic transmission method with linear scanning" , Proceedings of the 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 35, 1P2-14, pp. 65-66 (Tokyo, 3 December, 2014).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki: "Defect size estimation in billet from profile of time of flight using ultrasonic transmission method with linear scanning" , Proceedings of the 36th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 36, 1P2-13, (Ibaraki, 5 November, 2015).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: "Estimation of defect position and size in billet using time-of-flight deviation of ultrasonic bottom echo" , Proceedings of the 37th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 37, 2P2-10 (Busan, 17 November, 2016).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: "Size Estimation of Multiple Defects in Billet from Time-of-flight Profile by Transmission Method" , Proceedings of the 38th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 38, 1P2-14 (Miyagi, 25 October, 2017).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: "Defect detection inside billet by ultrasonic transmission method using phased array technique" , Proceedings of the 39th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 39, 1P2-11 (Kyoto, 29 October, 2018).
- Yasuhiko Nishijima, **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, Naoto Wakatsuki, Kenji Kuota, Hiroyuki Uga and Masahisa Ishii: "Monitoring system of Mating Behavior and Acoustic Communication of Bemisia Tabaci" , 2018 ESA, ESC, and ESBC Joint Annual Meeting (Entomology 2018), D3080 (Vancouver, 12 November, 2018).

査読なし発表論文

- 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗: ”超音波投影像を用いる角鋼片内部欠陥の高速検出”, 日本音響学会, 2013 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1301-1302 (愛知, 26 September, 2013).
- **Ryusuke Miyamoto**, Yoko Norose, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Tadashi Ebihara: ”Simple defect detection method for billet by ultrasonic transmission method”, The 10th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 61, p.48 (Tokyo, 7 December, 2013).
- 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “超音波透過法と平行走査による角鋼片内部欠陥の簡易検出法に関する研究”, 日本機械学会, 関東学生会第 53 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 202 (東京, 14 March, 2014).
- 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “平行走査超音波透過法による金属角片内部の欠陥推定”, 日本音響学会, 2014 年秋季研究発表会講演論文集, pp.1381-1382 (北海道, 5 September, 2014).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki: ”Defect size estimation in billet using ultrasonic transmission method”, The 12th IEEE Transdisciplinary Oriented Workshop for Emerging Researchers, 30, p.30 (Tokyo, 28 November, 2015).
- 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: ”超音波透過法による角鋼片内部の欠陥検出ー音で鉄の中を見るー”, SAT テクノロジー・ショーケース 2016, プログラム & アブストラクト集, 土木・建築, P-86 (茨城, 4 February, 2016).
- **Ryusuke Miyamoto**, Koichi Mizutani, Tadashi Ebihara, and Naoto Wakatsuki: “Defect position and size estimation in billet by ultasonic transmission method using a small number of transducers”, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, 5aEA6 (Hawaii, 17 Decenber, 2016).
- 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “平行走査超音波透過法による角鋼片内部の複数近接欠陥可視化”, 日本音響学会, 2017 年春季研究発表会講演論文集, pp.1381-1382 (神奈川, 5 September, 2017).
- 宮本隆典, 西島也守彦, 中林大樹, 水谷孝一, 海老原格, 若槻尚斗, 宇賀博之, 久保田健嗣: “交信音と行動を同時に収録するコナジラミモニタリングシステムの構築”, 農業施設学

- 会, 2018 年農業施設学会・若手研究発表会講演要旨集, P-25, p.12 (茨城, 24 February, 2018).
- 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “超音波対面反射波の伝搬時間変動に着目した角鋼片内部の複数近接欠陥”, 日本音響学会, 2018 年春季研究発表会講演論文集, pp.1083-1084 (埼玉, 15 March, 2018).
 - 宮本隆典, 田端純, 戒能洋一: “チャノコカクモンハマキの風洞内定位飛翔における床パターンの影響”, 日本応用動物昆虫学会, 第 62 回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨集, PS007 (鹿児島, 27 March, 2018).
 - 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “超音波対面反射波の伝搬時間変動に着目した角鋼片内部欠陥検出の実験的検証”, 土木学会, 第 21 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.307-308 (愛知, 20 May, 2018).
 - 西島也守彦, 宮本隆典, 水谷孝一, 海老原格, 若槻尚斗, 宇賀博之, 久保田健嗣, 石井雅久: “コナジラミ類の音響交信の妨害による交尾阻害の検討”, 農業環境工学関連学会, 農業環境工学関連学会 2018 年合同大会公園要旨集, PB-28 (愛媛, 13 September, 2018).
 - 宮本隆典, 水谷孝一, 若槻尚斗, 海老原格: “超音波対面反射波の伝搬時間変動に基づく角鋼片内部欠陥検出における鋼片サイズの影響”, 日本音響学会, 2018 年秋季研究発表会講演論文集, pp.65-66 (大分, 13 September, 2018).
 - 水谷孝一, 宮本隆典: “透過超音波の伝搬時間変動に着目した鋼材半製品の非破壊検査”, INTERMEASURE 2018, 一般社団法人日本計量機器工業連合会主催, アカデミープラザ, M-34-13 (東京, 26 September, 2018).
 - 西島也守彦, 宮本隆典, 水谷孝一, 海老原格, 若槻尚斗, 宇賀博之, 久保田健嗣, 石井雅久: “交信抑制によるコナジラミ類の交尾阻害の検証”, The 15th IEEE Transdisciplinary Oriented Workshop for Emerging Researchers, A19, p.29 (神奈川, 3 November, 2018).