

電気通信大学

2022 年度 修士学位論文

内部構造の可視化に着目した
パラメトリック差音による音速画像の取得

大学院情報理工学研究科

情報・ネットワーク工学専攻

電子情報学プログラム

2131023 井ノ口 楓

指導教員 野村 英之 教授

安藤 芳晃 准教授

2023 年 1 月 29 日提出

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院情報理工学研究科情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏 名	井ノ口 楓	学籍番号	2131023
論 文 題 目	内部構造の可視化に着目したパラメトリック差音による 音速画像の取得		
要 旨	<p>痛みなどの自覚症状の少ない骨粗鬆症などの予防のための診断において主に X 線が使用され、放射線被曝の影響が懸念される。</p> <p>そこで放射線被曝の影響がない超音波 CT(Ultrasound Computed Tomography)を用いて骨の内部の画像化を行うことで、健康面への被害なく検査を促進することが可能であると考える。低周波超音波の場合、吸収減衰が小さいため骨の内部の画像化に適するが、高画質な画像の取得が困難である。更に直進性を仮定したCTアルゴリズムにおいて、音波の広がりによる誤差は画質の劣化を引き起こす。</p> <p>以上の問題に対し、低周波数超音波であるにもかかわらず直進性のあるパラメトリック差音を用いることで画質の劣化を改善し、骨の内部の画像化に適すると考えた。</p> <p>そこで本研究の目的はパラメトリック差音を用いて内部構造を持つ対象物の画像化を行うことである。アルミニウム丸棒とアルミニウムパイプを対象物とし高周波超音波とパラメトリック差音を用いて音速画像の取得を行い、結果の比較を行なった。更に内部に吸収媒質を挿入することでより骨に近い環境下での実験を行い、結果の比較を行なった。</p> <p>結果は内部が均一なアルミニウム丸棒において、パラメトリック差音を用いた場合でも空間分解能の高い高周波超音波と同精度で音速画像の取得と音速推定ができた。</p> <p>続いて内部が空洞のアルミニウムパイプでは、パラメトリック差音を用いた場合には画像化に用いる波の伝搬時間 (Time-of-flight : TOF) の結果において高周波超音波と比べてばらつきが少なく、中心付近での変化が確認されたことから内部の状態を捉えられていると考える。</p> <p>更に内部に吸収媒質を挿入した場合、高周波超音波では直達波の大きな減衰により複数回の実験で再現性が取れないデータになったのに対し、差音では直達波が大きく減衰することなく吸収媒質がない場合と同様に中心付近で伝搬時間が変化する結果が取得できた。画像化についてパラメトリック差音を用いることによる有意な差は見られなかったものの、方位分解能を上げることで内部に吸収媒質を持つ対象物に対して画質の劣化を改善した画像化を行うことができると考える。</p> <p>今後の課題としては、実際の骨を用いての実験により実用化に向けての評価を行うことである。</p>		

概要

高齢化に伴い、近年骨粗鬆症を患う患者の数は増加傾向にある。痛みなどの自覚症状の少ない骨粗鬆症などの予防のための診断において主に X 線が使用され、放射線被曝の影響が懸念される [1].

そこで放射線被曝の影響がない超音波 CT(Ultrasound Computed Tomography)を用いて骨の内部の画像化を行うことで、健康面への被害なく検査を促進することが可能であると考えられる。

一般的な超音波画像診断に用いられる数 MHz の高周波超音波の場合、高画質な画像が取得できるものの吸収減衰が大きい骨の内部の画像化が困難である。一方で低周波超音波の場合、吸収減衰が小さい骨の内部の画像化に適するが、高画質な画像の取得が困難である。更に直進性を仮定した CT アルゴリズムにおいて、音波の広がりによる誤差は画質の劣化を引き起こす。

以上の問題に対し、低周波数超音波であるにもかかわらず直進性のあるパラメトリック差音を用いることで画質の劣化を改善し、骨の内部の画像化に適すると考えた。

そこで本研究の目的はパラメトリック差音を用いて内部構造を持つ対象物の画像化を行うことである。アルミニウム丸棒とアルミニウムパイプを対象物とし、高周波超音波とパラメトリック差音を用いて音速画像の取得を行い、結果の比較を行なった。パラメトリック差音はパルス波とパルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音の 2 種類を用いた。更に内部に吸収媒質を挿入することでより骨に近い環境下での実験を行い、結果の比較を行なった。

結果は内部が均一なアルミニウム丸棒において、パラメトリック差音を用いた場合でも空間分解能の高い高周波超音波と同精度で音速画像の取得と音速推定ができた。

続いて内部が空洞のアルミニウムパイプでは、パラメトリック差音を用いた場合には画像化に用いる波の伝搬時間 (Time-of-flight : TOF) の結果において高周波超音波と比べてばらつきが少なく、中心付近での変化が確認されたことから内部の状態を捉えられていると考えられる。一方で高周波超音波の場合、アルミ棒と比べて境界での減衰により直達波の十分な SNR (Signal-to-noise-ratio : 信号対雑音比) の確保ができなかったことや複数のモードや散乱波が重なって現れたことで、直達波の正確なピークが取得できず、正確な TOF が求められなかったと考える。音速画像の取得と音速推定に関しては対象物の参照値に近い値で推定ができたと考え、両者に大きな差異は見られなかった。

更にアルミニウムパイプの内部に吸収媒質を挿入した場合、高周波超音波では直達波の大きな減衰により複数回の実験で再現性が取れないデータとなったのに対し、パラメトリック差音では吸収媒質がない場合と同様に直達波が大きく減衰することなく中心付近で伝搬時間が変化する結果が取得できた。画像化についてパラメトリック差音を用いることによる有意な差は見られなかったものの、方位分解能を上げ、取得した正確な投影データを用いることで内部に吸収媒質を持つ対象物に対して画質の劣化を改善した画像化を行うことができると考える。

今後の課題としては、方位分解能を上げての実験や実際の骨を用いての実験により実用化に向けての評価を行うことである。

目次

概要

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3
第 2 章 原理	4
2.1 超音波イメージング	4
2.1.1 超音波イメージング	4
2.1.2 超音波の減衰	4
2.1.3 空間分解能	4
2.2 画像再構成	7
2.2.1 超音波 CT	7
2.2.2 フィルタ補正逆投影法	9
2.3 パラメトリック差音	10
2.4 パルス圧縮	10
2.4.1 パルス圧縮	10
2.4.2 自己相関関数	11
2.4.3 相互相関関数	11
2.4.4 チャープ信号	12
2.4.5 チャープ信号のパルス圧縮	12
2.4.6 チャープ変調パラメトリック差音	13
第 3 章 音源の音場測定	14
3.1 実験機器	14
3.2 実験方法	16
3.2.1 実験準備	16
3.2.2 実験条件	17
3.2.3 音圧レベルへの変換	17
3.3 実験結果及び考察	18
第 4 章 アルミニウム丸棒を用いた音速画像の取得	24
4.1 実験方法	24

4.1.1	実験準備	24
4.1.2	実験条件	25
4.2	実験結果及び考察	27
4.2.1	高周波超音波	27
4.2.2	パラメトリック差音	33
4.2.3	パラメトリック差音によるパルス圧縮	39
第5章	アルミニウムパイプを用いた音速画像の取得	44
5.1	実験方法	44
5.1.1	実験準備	44
5.1.2	実験条件	44
5.2	実験結果及び考察	44
5.2.1	高周波超音波	44
5.2.2	パラメトリック差音	49
5.2.3	パラメトリック差音によるパルス圧縮	54
第6章	内部に吸収媒質を持つ場合のアルミニウムパイプを用いた音速画像の取得	58
6.1	実験方法	58
6.1.1	実験準備	58
6.1.2	実験条件	59
6.2	実験結果及び考察	59
6.2.1	高周波超音波	59
6.2.2	パラメトリック差音	64
6.2.3	パラメトリック差音によるパルス圧縮	67
第7章	結論	72
	謝辞	74
	参考文献	75
付録A	パラメトリック差音による指向性の確認	77
A.1	実験方法	77
A.2	実験結果及び考察	77

第 1 章 序論

1.1 研究背景と目的

高齢化に伴い、近年骨粗鬆症を患う患者の数は増加傾向にある。骨粗鬆症は痛みなどの自覚症状が少なく、連鎖的な骨折の予防や病気の早期発見のためにも定期的に骨の内部状態を知ることが重要とされている[1]。しかし、現在の検査には主に X 線が使用されており、X 線 CT (Computed Tomography) は、脳、骨、胸部、腹部など病気を持つ複数の臓器の 2 次元断層画像を作成することができるため、臨床診断に広く用いられている。X 線 CT の原理は対象物に対して多数の方向から X 線を照射し、X 線源と対向する側に設けられた検出器によって対象物の X 線の透過量を測定する[2]。しかし、X 線を使用した検査の場合、定期的な診断における放射線被曝の影響が懸念される。そこで放射線被曝の影響がない超音波を用いて骨の内部の画像化を行うことで、健康面への被害なく検査を促進することが可能であると考えられる。

X 線などの電磁波と比べて、振幅や位相の複数の情報が得られる超音波を用いたイメージングにはパルスエコー法や超音波 CT (Ultrasound Computed Tomography) などがある。インピーダンス境界からの反射波の強度と時間遅れを観測して画像化するパルスエコー法[3]の場合、骨の表面で強く散乱してしまい、内部の画像化には適さない。また、画像の物理量が定量的でないため軟部組織のわずかな硬さなどの違いを判別できないという問題点も挙げられる。それに対し、超音波 CT (Ultrasound Computed Tomography) は、対象物の透過波を観測し、超音波が直進することを仮定できれば、対象物の減衰率や音速分布による画像化が可能である。またわずかな硬さの違いなどを識別し、定量的な評価を行うことが可能である[4]。さらに X 線 CT やパルスエコー法とは異なった診断情報が得られるといった特徴がある。また、透過波を利用するため、骨の内部の画像化に適していると考えられる。

骨は軟部組織のような周囲の媒質に比べ音響インピーダンスが高く、散乱や反射により音波のごく一部しか透過しない[5]。また骨端部内部にある海綿骨中では二種類の縦波が分離伝搬するため、複雑な構造を持つ[6]。通常、超音波による生体内の画像化に用いられる数 MHz の高周波超音波の場合、高画質の画像が取得できるものの[7]吸収減衰が大きいため骨の内部の画像化が困難である。さらに周波数が高くなるほど媒質による音波の吸収や伝搬距離に伴う減衰により、透過波の観測が困難となる。また、骨やガスなど音響特性の大きく異なる部分で散乱されやすく、ビームが透過しない。

一方で低周波超音波の場合、吸収減衰が小さいため骨の内部の画像化に適するが、高画質の画像の取得が困難である。更に空間分解能の低下や幾何学的な拡散による音波の広がりにより、直進性を仮定した超音波 CT のアルゴリズムにおいて誤差が大きくなり、結果的に画質の劣化を引き起こす[8]。

以上の問題に対し、同一開口径の音源から直接放射される低周波数超音波に比べ直進性のあるパラメトリック差音を用いることで画質の劣化を改善し、骨の内部の画像化に適すると考えた。

そこで本研究の目的はパラメトリック差音[9]を用いて内部構造を持つ対象物の画像化を行う

ことである。アルミニウム丸棒とアルミニウムパイプを対象物として高周波超音波とパラメトリック差音を用いて音速画像の取得を行い、結果の比較を行なった。パラメトリック差音はパルス波とパルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音の 2 種類を用いた。更にアルミパイプの内部に吸収媒質を挿入することでより骨に近い 2 層構造の環境下[10]での実験を行い、結果の比較を行なった。

1.2 本論文の構成

第一章では本研究の背景，目的と本論文の構成を述べる．

第二章では超音波イメージング，超音波 CT，パラメトリック差音，パルス圧縮についての原理と本研究でを使用したチャープ変調信号について述べる．

第三章では本研究で使用する音源の 200 kHz から 500 kHz までの差音と一次波の音場測定について述べる．

第四章ではアルミニウム丸棒を用いた音速画像について述べる．

第五章ではアルミニウムパイプを用いた音速画像について述べる．

第六章では内部に吸収媒質を挿入した場合の音速画像について述べる．

第七章では本論文の総括として結論を述べる．

第2章 原理

2.1 超音波イメージング

2.1.1 超音波イメージング

医療分野において対象物を画像化する際の手法の1つとして、放射線を用いない超音波が挙げられる。超音波診断画像はX線による医用画像と比較すると画像分解能が悪いという短所はあるものの反射波でも透過波でも利用可能なことや装置の簡便さ、非侵襲性によるリアルタイムでの観測が可能という点で広く用いられている。その手法の1つであるパルスエコー法では、対象物に対して超音波を放射し対象物から反射してきた音波を受信し、強度や時間的關係により対象物の画像化を行う。エコーの強度や形状は反射対称の大きさや形などによって異なり、時間差からは対象物との距離が判断できる。超音波イメージングの表示方式には振幅によるA(Amplitude)モードや明るさによるB(Brightness)モードや動きによるM(Motion)モードなどがある。Aモードは取得した超音波の振幅を、時間軸上に表示する手法である。Bモードは時間軸上に反射波の振幅を輝度に変換し、明るさの強弱によって表示する手法である。この方法では超音波ビームを走査させ、輝点をそれに対応させながら走査することで二次元の画像化が可能になる。Mモードは超音波ビームを固定し反射対象と深触子との距離の時間的経過を表示するものである[11]。

2.1.2 超音波の減衰

超音波の医療利用を行う際、音波の減衰は大きな問題である。この減衰には主に3つの要因が考えられる。

- ① 音波が幾何学的に広がることによる拡散減衰
- ② 音波のパワーが媒質に吸収され熱に変換されることによる吸収減衰
- ③ 生体組織の不均質による散乱減衰

また、音波が x 方向に伝搬する平面波であれば、吸収と散乱による減衰が観測され、平面波の振幅 u と距離 x の関係は

$$u = u_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.1)$$

で表される。 u_0 は $x = 0$ のときの振幅、 α は媒質の減衰係数である。超音波の伝搬に伴う生体組織の減衰係数 α は、診断装置で用いられるMHz帯の周波数範囲では、周波数のおよそ1乗に比例していると近似できることが多い[11]。したがって、周波数が低い超音波は周波数が高い超音波に比べ伝搬による減衰が小さいため、遠方まで伝搬し、より遠方での画像化が可能である。

2.1.3 空間分解能

近接した対象物の画像化を行う際に、対象物を分離する能力の最小距離のことを分解能という。

分解能には音波の伝搬方向に関する距離分解能と伝搬方向に対し垂直方向に関する方位分解能が挙げられる。

距離分解能は、図 2.1 に示す音波の伝搬方向に存在する近接した対象物 A と B を分離する最小距離である。図 2.1(a) のような対象物に対し送信信号のパルス幅が狭い場合 2 つのエコー信号から対象物を分離することが可能である。しかし、図 2.1(b) のように対象物に対し送信信号のパルス幅が広い場合はそれぞれの対象物から反射したエコー信号が重なってしまい、対象物を分離することができない。距離分解能は送信信号のパルス幅によって決定するため、同じサイクル数の送信信号ならば周波数が高い信号ほど距離分解能が高くなる。

方位分解能とは図 2.2 に示す音波の伝搬方向に対し垂直方向に存在する対象物 A と B を分離する最小距離である。図 2.2(a) のような対象物に対して送信信号のビーム幅が狭い場合、対象物を分離できるのに対し、図 2.2(b) のようにビーム幅が広いと対象物を分離することができない。一般に周波数が高いほど指向性が鋭いため、方位分解能が高くなる。したがって、周波数が高いほど空間分解能が高いといえる。

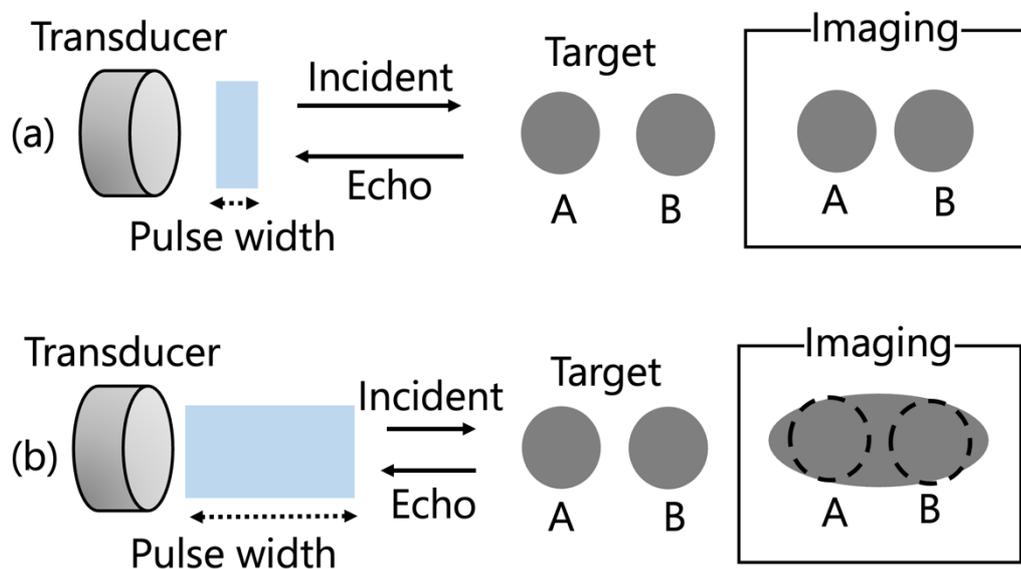


図 2.1 距離分解能

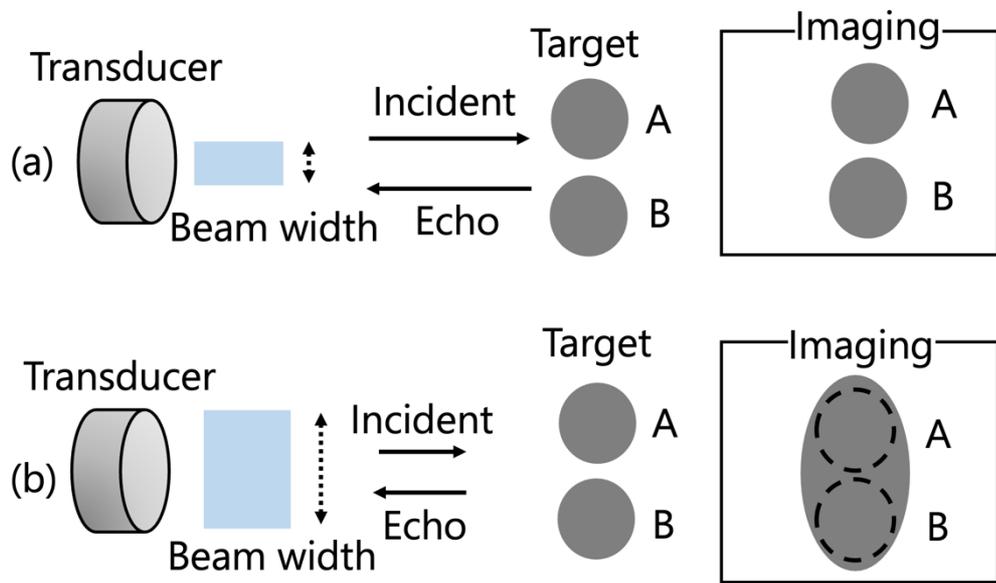


图 2.2 方位分解能

2.2 画像再構成

2.2.1 超音波 CT[4][8][12]

超音波 CT は超音波ビームを用いて CT の手法により、生体の映像化を行うものあり、

- (1) X線 CT や超音波エコー法とは異なった診断情報が得られる
- (2) 映像化するパラメータが超音波の減衰定数分布や音速分布であり、定量的な評価ができるなどの特徴が期待でき、放射線被曝の影響がなく映像化を行うことができる。

超音波ビームの送波器と受波器を対向させ、対象物体を挟んで水中に設置し、対象物体を透過した超音波を観測する。超音波の送受波器をビーム進行方向に対して垂直方向に走査し、1回の走査が終わったら走査装置をわずかに回転させて同じことを繰り返す。このように走査しながら超音波の透過の様子を観測し、これを 1/2 回転繰り返すことにより、全ての方向についての対象物体の超音波透過データが得られる。

このようにして測定したデータを計算機に導き、投影データから画像再生アルゴリズムを用いて計算を行い、各点の超音波に対する特性値を求めて画像として表示するのが超音波 CT である。

超音波 CT で表示される物理量としては、

- (1) 対象物体内の音速表示 (time of flight tomography)
 - (2) 対象物体内各点の超音波に対する減衰率分布 (attenuation tomography)
- の 2 種が提案されている。

図 2.3 は水中に対象物を設置した様子を示す。Tx と Rx はそれぞれ送波器と受波器を示している。音速表示形超音波 CT では点 (x, y) の音速を $v(x, y)$ とすると、ビームの方角および位置が (θ, s) で表される超音波ビームの経路 B_i 上の超音波の伝搬時間 (Time of flight : TOF)

$$T(\theta, s) = T_{B_i} = \int_{B_i} \frac{1}{v(x, y)} dl - \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{v(l \cdot \cos \theta - s \cdot \sin \theta, l \cdot \sin \theta + s \cdot \cos \theta)} \times dl \quad (2.6)$$

で表される。ここで L は送受波器の間隔である。

水中の音速を v_w とすると、送受波器間が水の場合の伝搬時間は

$$T_w = L/v_w \quad (2.7)$$

となる。この水中の伝搬時間で正規化を行うと、ビーム路 B_i の伝搬時間は

$$T_0(\theta, s) = T(\theta, s) - T_w = \int_{B_i} \left(\frac{1}{v(x, y)} - \frac{1}{v_w} \right) dl \quad (2.8)$$

で表される。今、音速に関連する物理量として

$$u(x, y) = \left(\frac{1}{v(x, y)} - \frac{1}{v_w} \right) \quad (2.9)$$

を定義すると、(2.9)式より正規化した伝搬時間 $T_0(\theta, s)$ は $v(x, y)$ の投影データとなっている。

したがって、各方向角について各点で超音波ビームの伝搬時間を測定すれば、通常の CT アルゴリズムによって音速分布の再構成を行うことができる。

減衰率分布表示形超音波 CT では超音波ビームを送波器より発射し、対向する受波器で透過したビームの強度を測定すると、X 線 CT と同様にビーム経路中の吸収・散乱による減衰の大きさを再構成することができる。

ビームの経路 B_i とし、受波器に到達した超音波ビームの強度を $A(\theta, s)$ 、各点の減衰定数を $\alpha(x, y)$ とすると、

$$\begin{aligned} A(\theta, s) &= A_0 \exp \left[- \int_{B_i} \alpha(x, y) dl \right] \\ &= A_0 \exp \left[- \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(l \cdot \cos \theta - s \cdot \sin \theta, l \cdot \sin \theta + s \cdot \cos \theta) dl \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

で表される。ここで A_0 は送波出力とビームの拡散による音場強度の減少はビームの拡散によるものだけと考えられるから、測定される音場強度 A_w は A_0 に一致する。

したがって、透過した超音波ビームの強度 $A(\theta, s)$ を求めて、

$$P(\theta, s) = -\log \left[\frac{A(\theta, s)}{A_w} \right] = \int_{B_i} \alpha(x, y) dl \quad (2.11)$$

を計算すれば、この値から CT アルゴリズムに従って各点の減衰率分布が求められる。

ここで超音波 CT の問題点としては

(1) 超音波ビームの屈折

音速の異なる媒質の境界面に超音波ビームが斜めに入射すると、ビームは直進せず屈折する。また、音速が徐々に変化する媒質中ではビームは曲線を描いて曲がる。したがって、測定された投影データは幾何学的な送受波器間の直線上ではなく、曲がったビーム上の線積分値になり、画質の劣化を引き起こす。

(2) 超音波ビームの反射と媒質の方向性

超音波ビームが生体表面や組織の境界で反射する場合、超音波ビームはそこで減衰したように観察される。しかし、組織の境界での反射率はビームの向きに依存するため、これを方向性のない散乱と見なすと誤差が生じる。

(3) 超音波振動子の指向性とビームの広がり

超音波ビームに指向性をもたせることは、送受波器をむすぶ直線以外の経路からまわり込むビームを排除し、受波の SN 比を向上させるために必要である。しかし、このためにトランスデューサには一定の面積をもたせる必要があり、超音波ビームも一定のビーム幅を有することとなる。この結果、投影データにボケが生じる。

(4) 骨・ガスによる投影データの方向

超音波ビームの経路中に骨やガスが存在すると、ビームがそこを透過しないため、投影データ

に欠落が生じる。通常の CT アルゴリズムではこのような場合は断層像を再構成することができない。

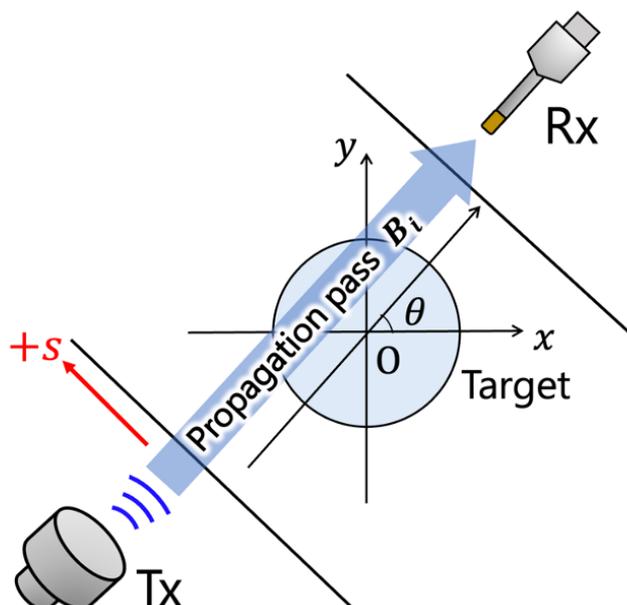


図 2.3 投影データの測定方法。Tx と Rx はそれぞれ送波器と受波器を示している。

2.2.2 フィルタ補正逆投影法[13]

フィルタ補正逆投影法は現在の CT(Computed tomography)で最も一般的に用いられている再構成法である。あらかじめ画像にボケが生じることがわかっているため投影データを補正して逆投影する際にフィルタをかける方法がフィルタ補正逆投影法 (Filtered back projection : FBP) である。被写体の線減弱係数の分布 $f(x, y)$ を動径方向 ω , 角度方向 θ の極座標系で表すと, 積分は $d\xi d\eta = \omega d\omega d\theta$ となるため,

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) e^{i\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} \omega d\omega d\theta \quad (2.2)$$

となる。 ω の積を $|\omega|$ とすることにより, ω の範囲をマイナス領域に拡張することができる。すると式は,

$$f(x, y) = \frac{1}{2(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) e^{i\omega X} |\omega| d\omega \right] d\theta \quad (2.3)$$

と書き表すことができる。ここで $X = x \cos \theta + y \sin \theta$ を利用している。式の [] 内の積分を $q(X, \theta)$

として,

$$q(X, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) e^{i\omega X} |\omega| d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} g(X, \theta) dX \right] |\omega| e^{i\omega X} d\omega \quad (2.4)$$

と考えると, この式は角度 θ 方向の投影データ $g(X, \theta)$ の X に対する1次元フーリエ変換 $F(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta)$ に対して, 周波数 ω の領域で $|\omega|$ によって表されるフィルタを掛け算し, フーリエ逆変換することを意味している. この $q(X, \theta)$ を用いて $f(x, y)$ を表すと

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} q(X, \theta) d\theta = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} q(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta \quad (2.5)$$

となる. つまり, 角度 θ 方向の投影データ $g(X, \theta)$ に対して式で示したフィルタリングで修正した新しい投影データ $q(X, \theta)$ を作った後, これを逆投影して $f(x, y)$ を求める方法である.

2.3 パラメトリック差音[9]

非線形特有の波形歪みが生じる音波を有限振幅音波という[14]. 2つの異なる近接した周波数 $f_1, f_2 (f_1 > f_2)$ の有限振幅音波を1次波として同軸上へ放射すると, 線形な場であれば f_1, f_2 の成分のみが生じる. しかし, 伝搬媒質が非線形性を有すると波形歪みが生じ, 放射したそれぞれの波の周波数成分以外に, 高調波 $2f_1, 2f_2, 3f_1, 3f_2, \dots$ 和周波数 $f_1 + f_2$, 差周波数 $f_1 - f_2$ の音波が1次波のビーム内に新たに発生する. この時最も低い周波数成分は差周波数である $f_1 - f_2$ であり, これをパラメトリック差音と呼ぶ.

パラメトリック差音は1次波の伝搬にしたがって蓄積的に振幅が大きくなる傾向があり, 1次波のビーム上で生成されることから, 低周波数でありながら鋭い指向性を持つ. さらに低周波数成分であるため, 高周波数超音波に比べ伝搬に伴うエネルギー損失が少なく, 遠方まで伝播させることが可能である.

パラメトリック差音は1次波である2周波数加算信号の波形歪みの崩落の差として生じる. そのため, 差音の周波数が高いほど波形歪みが大きくなり, 発生する差音の振幅も周波数が高いほど大きくなる. 超音波が平面波の場合, 差音の音圧はその周波数に比例するため, 周波数が2倍になると音圧も2倍になる.

2.4 パルス圧縮

2.4.1 パルス圧縮

パラメトリック差音を用いることで, 指向性の改善された低周波音源を実現できるが, 低い周波数を利用するために距離分解能が悪くなる. またパラメトリック差音は駆動信号から二次的に生成されるため音圧レベルが低く, SNRが悪い. そのため, パルス圧縮技術を適用して距離分解能とSNRを改善する.

パルス圧縮とは送信パルスとしてパルス内に特殊な変調を施したパルス幅の広い送信信号を用い、受信後の処理においてその復調を実施し、狭いパルス幅に変換する技術である[15].

距離分解能はパルス長で決まり、パルス長を狭くすることで距離分解能を向上させることができる。パルス圧縮は送信信号に対する受信信号と参照信号の相互相関処理で実現でき、SNRと距離分解能を向上させることが可能である。一般的に、帯域幅を N 倍にすると相関関数の時間幅が $1/N$ 倍となり、距離分解能も $1/N$ 倍となる。

パルス圧縮を行うためには、送信する信号に対し変調を行い、取得された信号に相関処理を施す必要がある。そのため、本研究ではパラメトリック差音にパルス圧縮を適用するため、生成されるパラメトリック差音がチャープ変調信号[16]となるものを使用した。そのほかにもパルス圧縮の符号変調方式としては M 系列などが存在する[17].

2.4.2 自己相関関数

時間 T の間にサンプリングされた有限な個数の時系列データ $v(i)$ として任意の離散信号を与える。離散的な時系列データの i 番目と $i+j$ 番目のデータの積 $v(i) \cdot v(i+j)$ の N 個のデータの測定時間 $T = N\Delta t$ における時間平均を自己相関関数という。つまり自己相関関数 $R_v(j)$ は

$$R_v(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v(i) \cdot v(i+j) \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2.12)$$

で定義される。自己相関は1つの信号波形に対して処理を行い、信号波形中に繰り返しの周期性が存在するかを確認することができる。また、信号が連続的な時間の関数 $v(t)$ とその時点より時間 τ だけ進んだ時点での関数 $v(t+\tau)$ を考える場合、自己相関関数 $R_v(\tau)$ は

$$R_v(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot v(t+\tau) \quad (2.13)$$

で定義される。

2.4.3 相互相関関数

2つの任意の離散時間信号として $v(i)$, $w(i)$ を与える。離散的な時系列データ v の i 番目と w の $i+j$ 番目のデータの積 $v(i) \cdot w(i+j)$ の N 個のデータの測定時間 $T = N\Delta t$ の間における時間平均を相互相関関数という。つまり相互相関関数 $R_{vw}(j)$ は

$$R_{vw}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v(i) \cdot w(i+j) \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2.14)$$

で定義される。相互相関関数は2つの信号 $v(i)$, $w(i)$ の間に存在する類似度を示している。また、信号が連続的な時間の関数 $v(t)$ とその時点より時間 τ だけ進んだ時点における w の関数 $w(t + \tau)$ を考える場合、相互相関関数 $R_{vw}(\tau)$ は

$$R_{vw}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot w(t + \tau) \quad (2.15)$$

で定義される[18].

2.4.4 チャープ信号

チャープ信号とは時間とともに周波数が増加、または減少する信号のことである。初期周波数 f_{start} 、時間 t 、時間ごとの周波数変化率 γ とすると、周波数が線形的に変化する信号 $f_1(t)$ は

$$f_1(t) = f_{\text{start}} + \gamma t \quad (2.16)$$

で表される。この周波数が線形的に変化する信号をリニアチャープという。このとき γ が負の値であれば時間に応じて周波数が小さくなるダウンチャープ、正の値であれば周波数が増加するアップチャープとなる。

2.4.5 チャープ信号のパルス圧縮

本研究で用いたパルス圧縮適用のための受信信号に対する参照信号であるリニアチャープ信号 $P(t)$ を

$$P(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi f_{\text{start}}t + \frac{1}{2}\mu t^2\right) & (0 \leq t \leq T_s) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.17)$$

とする。ここで、 f_{start} は掃引周波数の下限、 $\mu = 2\pi\Delta f/T_s$ は角周波数掃引率、 T_s は掃引時間である。この送信パルスに対して、インパルス応答が $h_m(t) \propto P^*(-t)$ ($P^*(t)$ は $P(t)$ の複素共役)となる整合フィルタを受信回路として用いるとパルス状に圧縮される。ここで、 $P(t) * h_m(t)$ に式(2.17)を入力すると出力は整合フィルタのインパルス応答のコンボリューションで表されるため、

$$\begin{aligned} g(t) &= P(t) * h_m(t) \\ &= \sqrt{T_s \Delta f} \frac{\sin\left(\frac{\mu T_s}{2}|t| - \frac{1}{2}\mu t^2\right)}{\frac{\mu T_s}{2}|t|} \cos(\omega_0 t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

と表せる。式(2.5)より、 $\frac{\sin\left(\frac{\mu T_s}{2}|t| - \frac{1}{2}\mu t^2\right)}{\frac{\mu T_s}{2}|t|}$ は出力波形の包絡線を表し、sinc関数となる。この包絡線

はリニアチャープ信号 $P(t)$ の自己相関関数と等価である．ここで， $\omega_0 = 2\pi \cdot \frac{f_{\text{start}} + f_{\text{stop}}}{2}$ である．

f_{stop} は掃引周波数の上限である．また，振幅は $\sqrt{T_s \Delta f}$ 倍に増大し，掃引時間と掃引周波数帯域幅に依存する．パルス幅は $1/\Delta f$ であり，掃引周波数帯域幅にのみ依存する．

2.4.6 チャープ変調パラメトリック差音

本研究で用いたチャープ変調駆動信号は，生成される差音がアップチャープ信号となるように，アップチャープ信号 $s_{c1}(t)$ ，ダウンチャープ信号 $s_{c2}(t)$

$$\begin{aligned} s_{c1}(t) &= \begin{cases} \sin\left(2\pi\left\{f_0 + \frac{f_{\text{start}}}{2}\right\}t + \frac{1}{4}\mu t^2\right) & (0 \leq t \leq T_s) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \\ s_{c2}(t) &= \begin{cases} \sin\left(2\pi\left\{f_0 - \frac{f_{\text{start}}}{2}\right\}t - \frac{1}{4}\mu t^2\right) & (0 \leq t \leq T_s) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.19)$$

の加算信号を用いた．ここで， f_0 は中心周波数， $\mu = 2\pi\Delta f/T_s$ は角周波数掃引率， $\Delta f = f_{\text{start}} - f_{\text{stop}}$ は掃引周波数帯域幅， f_{start} ， f_{stop} はそれぞれ掃引周波数の下限と上限， T_s は掃引時間である．加算信号 $s_{c1}(t) + s_{c2}(t)$ を駆動信号として媒質中に放射することによってアップチャープのパラメトリック差音が生成される．この信号と生成が予想される参照信号であるリニアチャープ信号 $P(t)$ を相互相関処理することによって，パルス圧縮が実現できる．

第3章 音源の音場測定

この実験では、画像化取得の際に使用する音源の音場を測定した。

パラメトリック差音の音場測定とパラメトリック差音生成のために利用する音源の共振周波数での音場測定を行い、特性の違いを確認する。また本研究で使用するチャープ変調パラメトリック差音は周波数ごとに生成効率が異なるため振幅が変化した信号が観測される。そこで本実験においてパラメトリック差音における周波数特性を調べる。

3.1 実験機器

本実験で使用した機器を表 3.1 に示す。図 3.1 は円形平面型トランスデューサで、直径 2.54 cm、共振周波数 2.2 MHz である。次に実験で使用した hidroホンを図 3.2 に示す。1 次波とパラメトリック差音は周波数帯域が異なるため、差音生成用の 1 次波を高周波数用 hidroホンで測定し、差音を低周波数用 hidroホンで測定した。また今回使用したトランスデューサの周波数特性を表したグラフを図 3.3 に示す。周波数特性は音源から 30 cm 地点で測定を行い、1.3 MHz から 3.3 MHz まで 100 kHz ずつ周波数を変化させ、オシロスコープで測定した。縦軸は音圧レベル (Sound Pressure Level : SPL) で表示している。

表 3.1 実験に使用した機器

機器名	メーカー	型番
ファンクションジェネレータ	NF	WAVE FACTORY WF1966
パワーアンプ	Electronics&Innovation	A075
トランスデューサ	KGK	2Z25.4I
1 次波 (高周波) 用 hidroホン	ONDA	HNP-1000
差音 (低周波) 用 hidroホン	RESON	TC4038
フィルタ	NF	3628 DUAL CHANNEL PROGAMMABLE FILTER
デジタルオシロスコープ	TELEDYNE LECROY	WS4024HD
プリアンプ	ONDA	AH-1100
コントローラ	シグマ光機株式会社	MARK-12

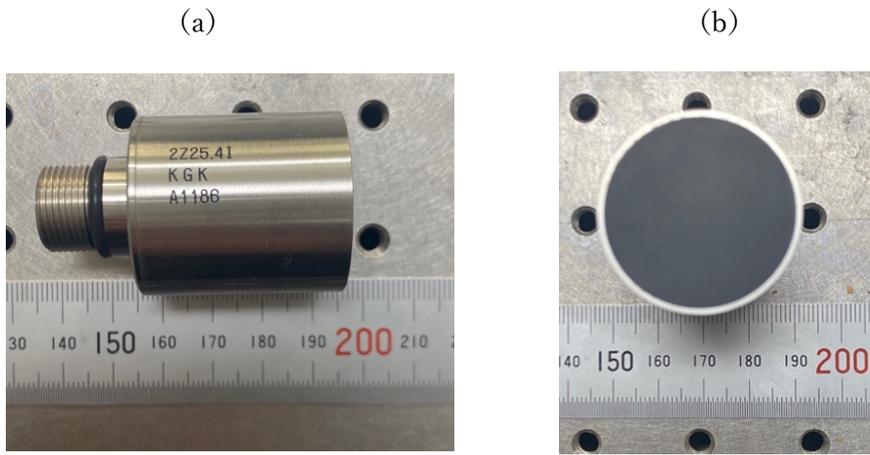


図 3.1 実験に使用したトランスデューサ (a) 側面図 (b) 正面図

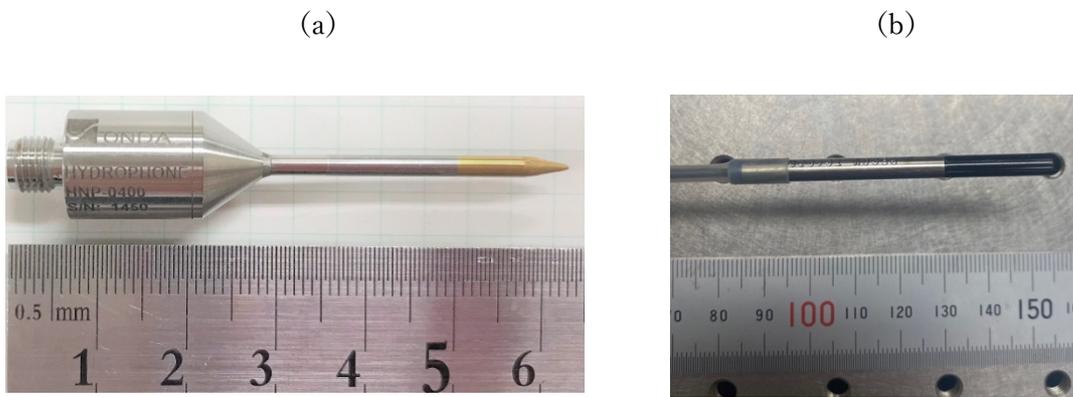


図 3.2 実験に使用したハイドロホン (a) 高周波数用 (b) 低周波数用

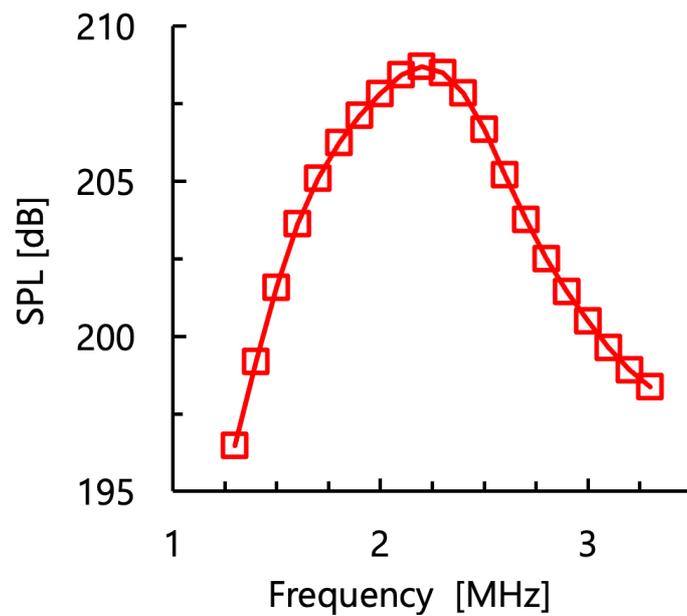


図 3.3 実験で使用したトランスデューサの周波数特性

3.2 実験方法

3.2.1 実験準備

実験環境を図 3.4 に示す。本実験では伝搬媒質として水を使用している。また水槽は伝搬方向 70 cm, 水平方向 20 cm, 高さ 18 cm のものを使用した。

1 次波の場合は、ファンクションジェネレータから振幅 0.15 V で周波数 2.2 MHz の正弦バースト波を出力し、パワーアンプで 50 dB 増幅させたものをトランスデューサに送り、水中に超音波を発生させる。トランスデューサから放射された超音波をハイドロホンで受波し、プリアンプで 20 dB 増幅した後、測定波形をオシロスコープで観測した。

パラメトリック差音の場合は、ファンクションジェネレータから振幅 0.3 V で差音成分が 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHz の正弦バースト波になるように駆動信号を設定し、パワーアンプで 50 dB 増幅させてトランスデューサへ送り、水中へと超音波を送信した。トランスデューサから放射された超音波をハイドロホンで受波し、測定波形をオシロスコープで観測した。

実験では StageController と PC を利用して水中のハイドロホンを走査し、音場測定を行う。パラメトリック差音の場合は、ハイドロホンで取得後にバンドパスフィルタを挿入することで生成のために利用した 1 次波成分を除去している。

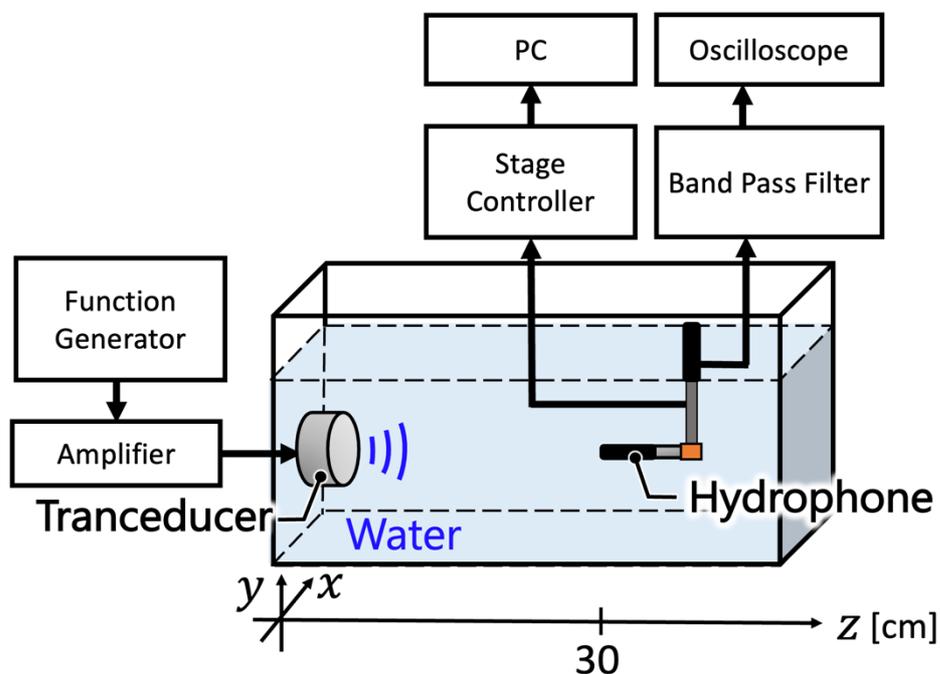


図 3.4 実験環境

3.2.2 実験条件

1次波である搬送波の音場測定はトランスデューサの共振周波数である2.2 MHzで駆動して行った。パラメトリック差音に関しては、実験で主に使用する周波数帯域の100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHzの周波数を対象として、それぞれの周波数の差音が生成されるような駆動信号を用いて音場測定を行った。パラメトリック差音生成における駆動信号に関する2信号の周波数設定は、使用するトランスデューサの共振周波数である2.2 MHzを中心とし対称となるようにした。それらの詳細な設定を表3.2に示す。2信号の周波数をそれぞれ f_1, f_2 とし、差音の周波数を f_d とした。

また1次波である搬送波の音場測定ではフィルタは使用しなかった。一方で、パラメトリック差音の音場測定では1次波との区別のためにフィルタを用い、測定周波数付近以外の周波数成分をカットし、オシロスコープで測定した。それぞれの差音周波数に適用したフィルタの設定を表3.3に示す。差音の音場測定では、オシロスコープで測定した信号の振幅が小さく確認が困難であったため、フィルタで受信信号を25倍増幅して確認した。

表 3.2 駆動信号作成における搬送波の周波数の詳細設定

f_d [kHz]	f_1 [kHz]	f_2 [kHz]
100	2.15	2.25
200	2.10	2.30
300	2.05	2.35
400	2.00	2.40
500	1.95	2.45

表 3.3 使用フィルタの周波数設定

f_d [kHz]	HPF の遮断周波数[kHz]	LPF の遮断周波数[kHz]
100	70	140
200	141	283
300	212	424
400	283	566
500	354	707

3.2.3 音圧レベルへの変換

差音を測定した場合の、オシロスコープでの測定値 y [dBm] から音圧レベル (SPL) への変換を以下に示す。

$$y = 20 \log_{10} \frac{V_{\text{measure}}}{V_{\text{ref}}} \quad (3.1)$$

$$V_{\text{ref}} = \sqrt{1 \times 10^{-3} \times R} \quad (3.2)$$

$$V_{\text{measure}} = V_{\text{ref}} \times 10^{\frac{y}{20}} \quad (3.3)$$

$$V_{\text{measure_rms}} = \frac{V_{\text{measure}}}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

$$P = \frac{V_{\text{measure_rms}}}{X} \times \frac{C_p + C_f}{C_p} \quad (3.5)$$

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad (3.6)$$

オシロスコープで測定した信号の FFT 処理したレベルは電圧値の dBm を示しているため、音圧レベルに変換する必要がある。dBm は抵抗値 $R = 50 \Omega$ の負荷に 1 mW の電力が発生するときの電圧を基準とし、そのときの値を 0 dBm と定義されている。したがって、式(3.3)で電圧 V_{measure} に変換した。また、 V_{ref} は測定値の基準電圧である。電圧 V_{measure} から音圧 P への変換式は式(3.5)を使用した。 $V_{\text{measure_rms}}$ は電圧 V_{measure} の実効値であり、本実験で用いたフィルタのキャパシタンス C_f は 70 pF である。また、本実験で用いた hidrohon の受信感度 X 、キャパシタンス C_p を表 3.4 に示す。また、求めた音圧 P から、音圧レベル SPL への変換式は式(3.6)を使用した。基準音圧 P_{ref} は水中において $1 \mu\text{Pa}$ である。差音の場合は、フィルタを用いて電圧値を 25 倍しているため、SPL 値から増幅分である 27.96 dB を引いたものを利用した。

また、1 次波の測定においてはフィルタを用いていないため、フィルタのキャパシタンスを考慮する必要がない。したがって、上記の式 3.5 を

$$P = \frac{V_{\text{measure_rms}}}{X} \times \frac{C_p + C_L}{C_p} \quad (3.7)$$

と置き換えて計算を行った。この時オシロスコープのキャパシタンス C_L は 20 pF とした。

表 3.4 ハイドロホンの受信感度とキャパシタンス

周波数	1 次波用	差音用				
	2.2 MHz	100 kHz	200 kHz	300 kHz	400 kHz	500 kHz
受信感度 [10^{-6} V/Pa]	0.255	3.76	3.67	3.47	3.63	3.31
キャパシタンス [nF]	0.113	0.534	0.534	0.537	0.542	0.553

3.3 実験結果及び考察

1 次波の周波数である 2.2 MHz と 200 kHz から 500 kHz のパラメトリック差音の音軸方向の音場測定の結果を図 3.5, 3.6 に示す。また、音源から 30 cm 地点での 1 次波の 2.2 MHz と各周波数のパラメトリック差音の水平方向と垂直方向の音圧分布の測定結果を図 3.7-3.10、パラメト

リック差音の周波数特性を図 3.11 に示す。

図 3.5 より、音源近傍ではピークとディップを繰り返す複雑な音場となっているが、音源からの距離 22 cm でラストピークを迎えた後は距離に反比例して音圧が減少していることがわかる。音源近傍での複雑な音場はトランスデューサのエッジ部分での回折波と中心からの波との打ち消し合いによる干渉が影響していると考えられる[19]。

図 3.6 より、パラメトリック差音は音源から距離が離れるにつれて蓄積的に音圧レベルが増幅していくことがわかる。また 1 次波とは異なり、遠方での音圧レベルの低下が見られず、遠方まで十分に伝搬するといったパラメトリック差音の特性が確認できた。また、周波数によって生成効率が異なるため音圧レベルに差が見られ、図 3.11 より周波数が高くなるほど音圧レベルが高くなることがわかった。

図 3.7, 3.8 より、1 次波は中心である音軸上で最大値をとり、中心から離れるにつれ音圧レベルが低くなっている。ビーム幅は水平方向では 9 mm、垂直方向では 8 mm と水平方向、垂直方向ともに指向性の良さが確認できたが、サイドローブを有するといった特徴も見られた。また水平及び垂直方向に大きな差異は見られず、ほぼ軸対称な音場になっていることが確認できた。

図 3.9, 3.10 より、パラメトリック差音は音軸上で最大値をとり、中心から離れるにつれ徐々に音圧レベルが低くなっている。また 1 次波と比べて、サイドローブを抑えるといった特徴が確認できた。更に周波数ごとの違いを見てみると、周波数が高いほど指向性が鋭いことがわかった。

以上より音源からの距離ごとにパラメトリック差音の周波数の音圧レベルに差があることが確認できた。パラメトリック差音は周波数が高いほど、音圧レベルが高くなることがわかる。また、音軸方向の音場より音源から 20 cm を超えると音圧レベルが一定になっていることがわかる。このことから評価実験を行う際には差音の音圧レベルが一定になってから、すなわち送受波器間の距離は 20 cm 以上離して行うのが良いと考えられる。更に対象物の設置位置も近距離場ではなく、一次波においては音場が複雑でないかつ十分差音が生成されている 15 cm 以降に設置するのが良いと考えられる。

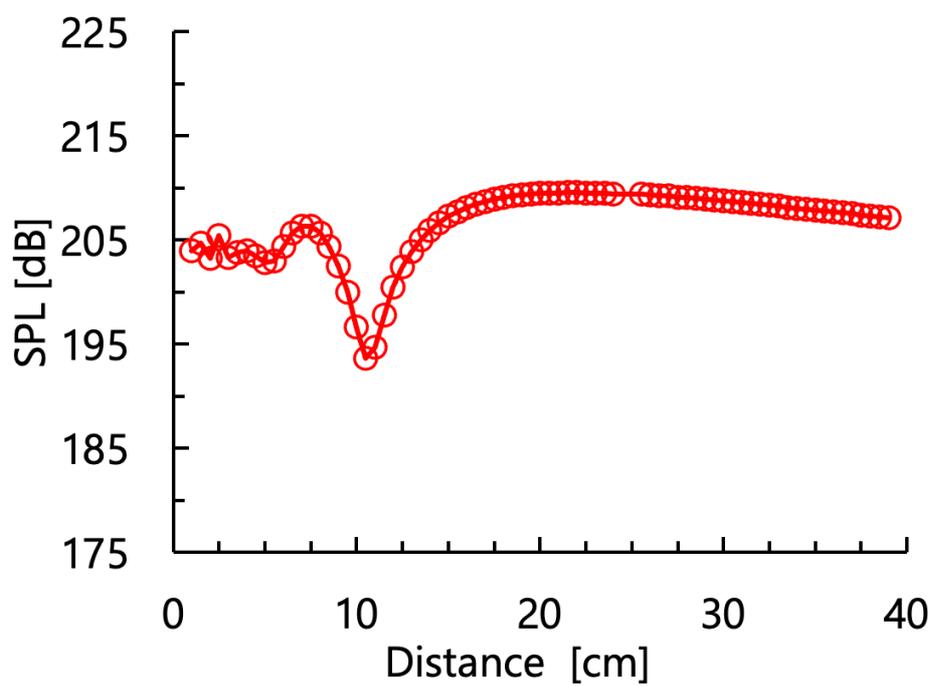


図 3.5 1次波の音軸上音圧分布

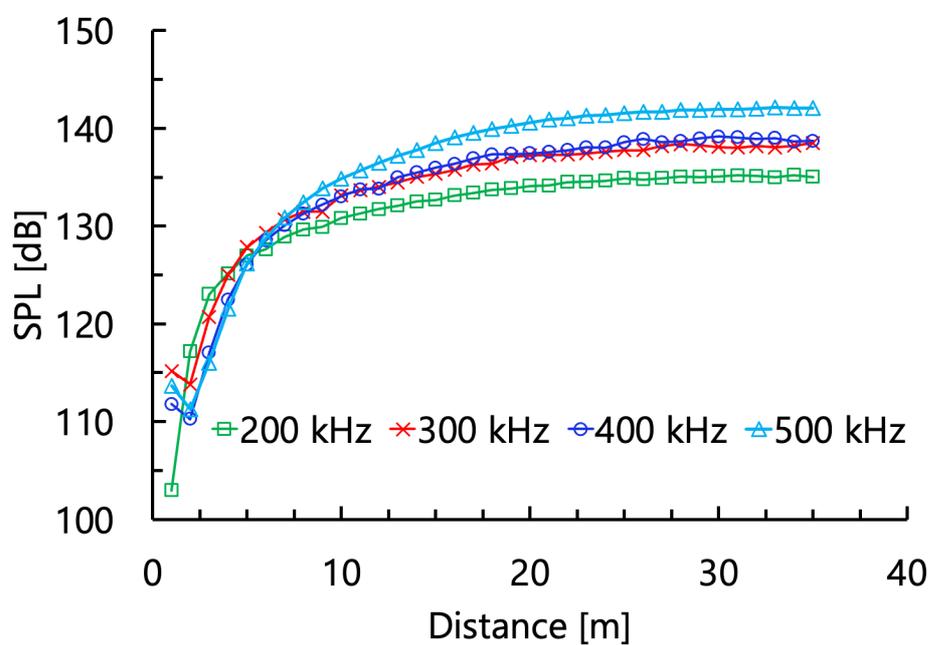


図 3.6 パラメトリック差音の音軸上音圧分布

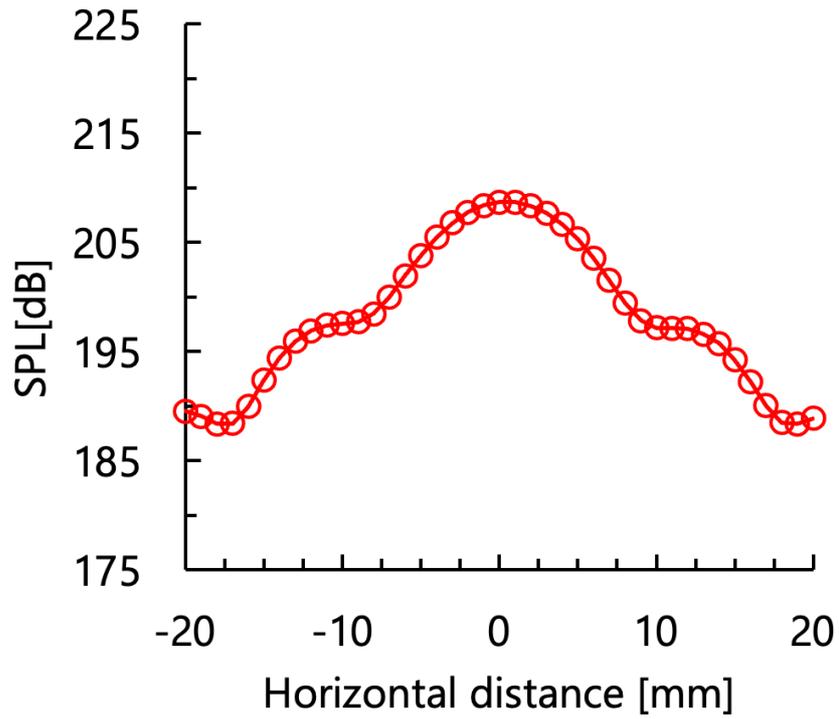


図 3.7 1次波の水平方向音圧分布(30 cm 地点)

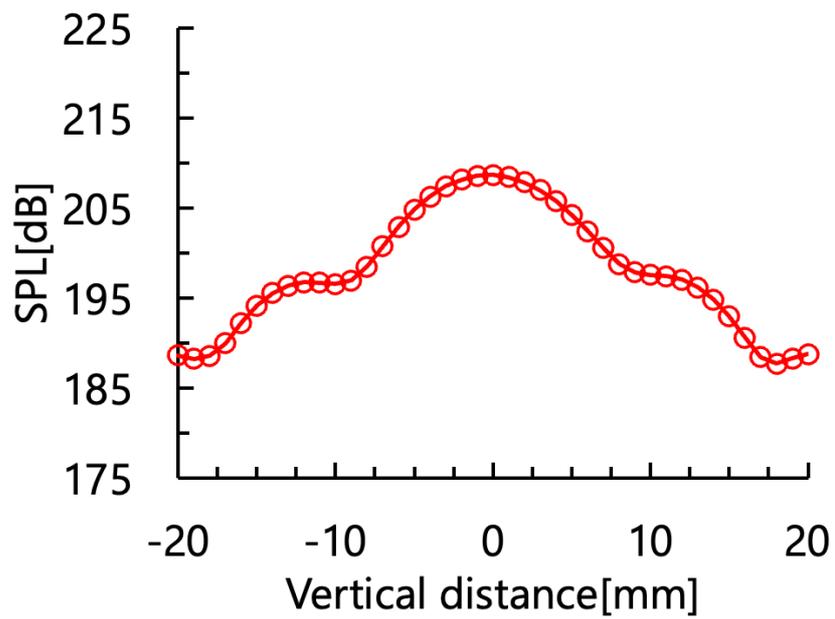


図 3.8 1次波の垂直方向音圧分布(30 cm 地点)

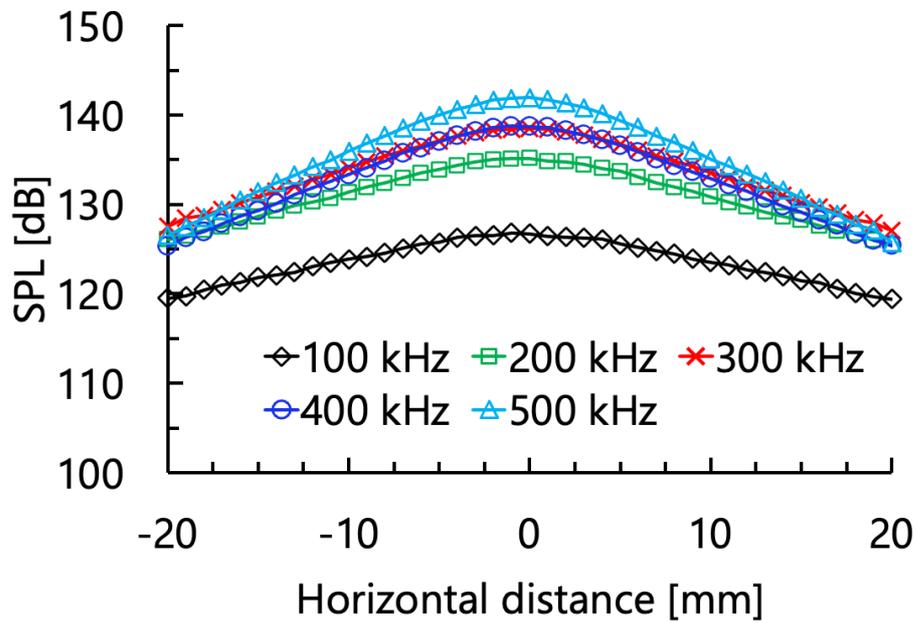


図 3.9 パラメトリック差音の水平方向音圧分布(30 cm 地点)

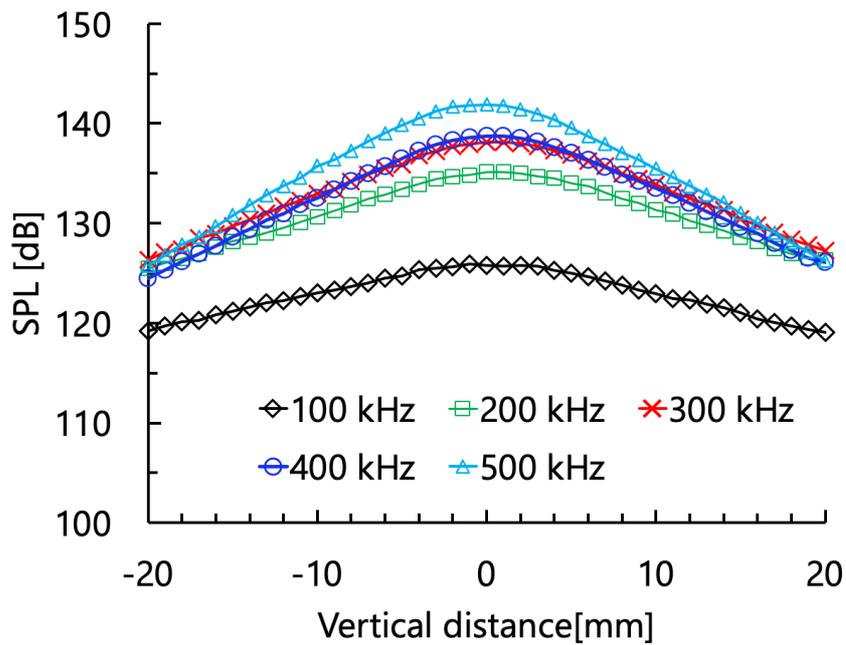


図 3.10 パラメトリック差音の垂直方向音圧分布(30 cm 地点)

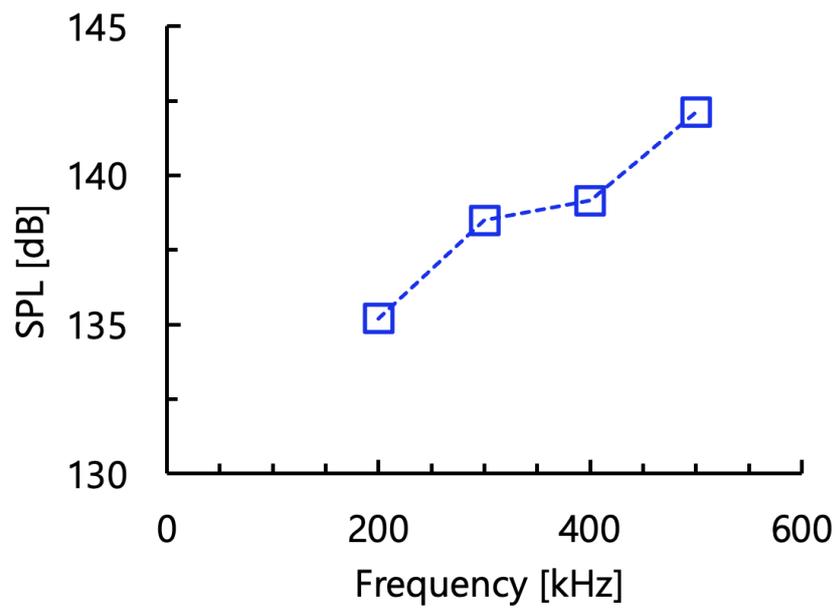


図 3.11 パラメトリック差音の周波数特性

第4章 アルミニウム丸棒を用いた音速画像の取得

超音波 CT による画像化を行うための性能評価として、まず内部が均一なアルミニウム丸棒を対象物として実験を行う。高周波超音波とパラメトリック差音を用いて実験を行い、画像化に用いる伝搬時間 TOF や音速画像の比較を行う。

4.1 実験方法

4.1.1 実験準備

実験環境を図 4.1, 4.2 に示す。使用機器は第 3 章の音源の音場測定と同様である。本実験は水中で行い、音源の音場測定と同様にトランスデューサから放射され、対象物を通過した透過波をハイドロホンで受波した。高周波超音波、パラメトリック差音のパルス波とパルス圧技術を適用したパラメトリック差音の 3 種類の信号を用いて行った。ハイドロホンには受波感度特性があり、周波数ごとに感度が異なる。周波数に合わせて感度良く透過波を受波できるように高周波超音波の測定時にはトランスデューサの音軸と水平になるように固定し、パラメトリック差音の測定時にはトランスデューサの音軸と垂直になるように固定した。また差音の実験時には 1 次波の成分を取り除くためのフィルタを 10 kHz から 1.59 MHz と広めに設定し、波形の立ち上がり立ち下がりが鈍化するのを防いでいる。

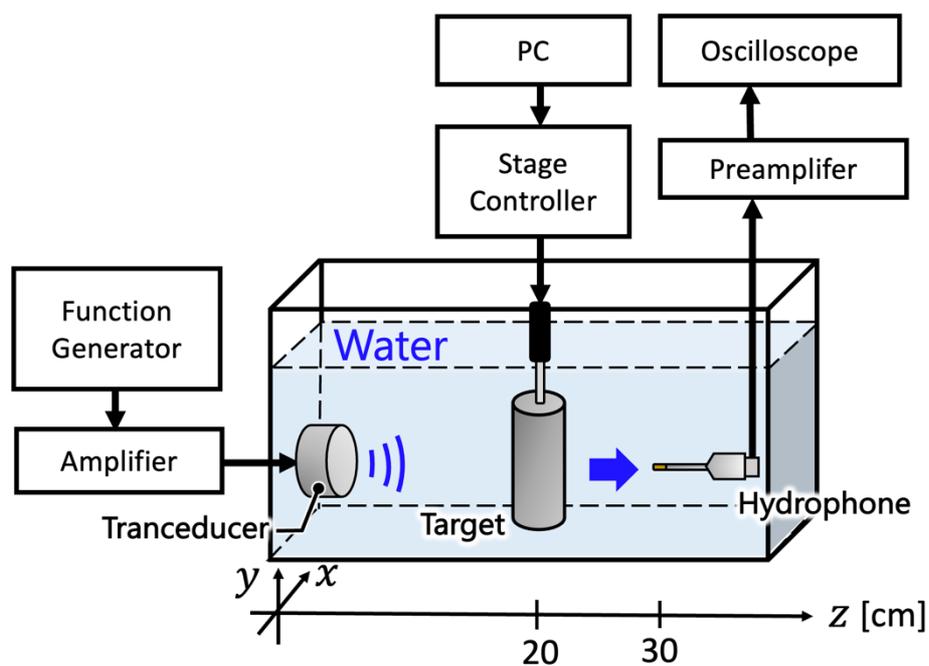


図 4.1 実験環境 (高周波超音波)

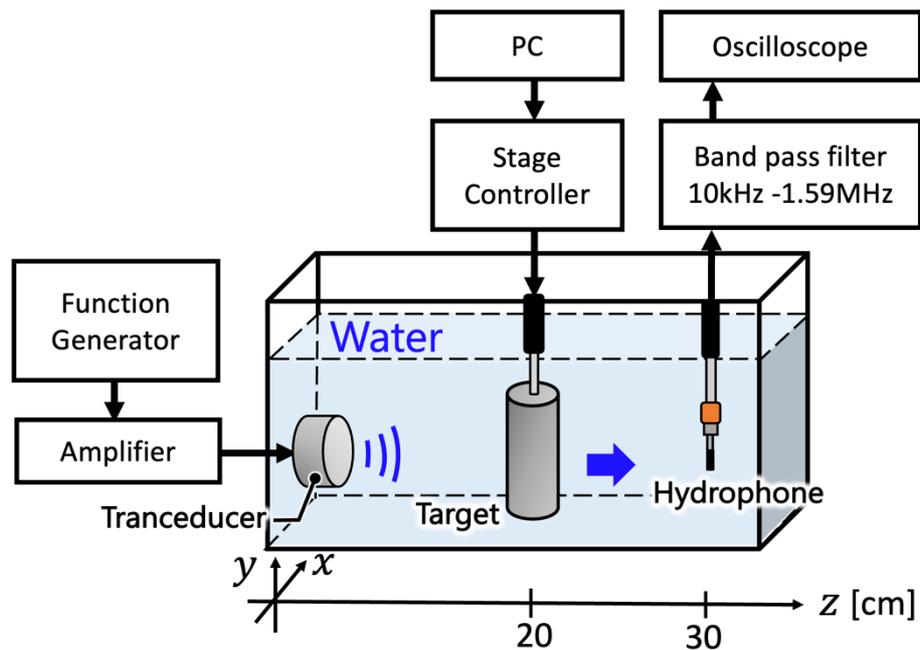


図 4.2 実験環境 (パラメトリック差音)

4.1.2 実験条件

トランスデューサから放射され、対象物を通過した透過波を 30 cm 位置に設置したハイドロホンで受波し、各地点での波形をオシロスコープで観測した。

パルス波の信号として高周波超音波は中心周波数である 2.2 MHz, サイクル数 3, パラメトリック差音は周波数 400 kHz, サイクル数 1 のショートサイクルとした。

チャープ信号については、差音周波数が 200 kHz から 700 kHz まで時間とともに一定に増加する周波数増加するようなアップチャープ信号となるように 1 次波を設定する。まず f_1 は 2.3 MHz から 2.55 MHz まで増加するアップチャープ信号を用いる。 f_2 は 2.1 MHz から 1.85 MHz まで減少するダウンチャープ信号を用い、掃引時間 $T_S = 40 \mu\text{s}$, 周波数帯域幅 $\beta = 500 \text{ kHz}$ となるように設定した。また、伝搬時間を取得する際の相互相関処理で取得したい直達波のメインローブが他の波のサイドローブに埋もれないように時間サイドローブの低減策としてチャープ信号には窓長 T_S の窓関数処理を施した。窓関数として採用したハニング窓は時間サイドローブの低減効果はあるものの、パルス圧縮時のパルス幅が広がってしまうという特徴があるため[20], 時間分解能向上を目的とし、本実験で用いるチャープ信号は帯域幅を 500 kHz と広めに設定している。

また伝搬媒質の水 (音速 1480 m/s[21]) と対象物の音速の差が大きいほど、TOF の変化量が捉えやすい。本実験は性能評価を行うための基礎検討であるため対象物は、水と音速の差が大きく変化量の捉えやすい図 4.3 に示す直径 2.5 cm のアルミニウム丸棒(音速 6380 m/s[21])を用いた。この対象物を音源面から約 20 cm の位置に音軸と直交するように設置した。また、本来超音波 CT では x 軸方向に走査した後回転をしながら各点での投影データを取得するが[22], 本実験で用いた対象物は回転対称であるため回転は行わず、 x 軸方向の一次元走査のみでデータを取得した。なお、トランスデューサ-ハイドロホンを走査するのではなく、対象物を x 軸に沿って -24 mm から 24 mm まで 2 mm 間隔で移動させ、各点での透過波を観測した。

(a)



(b)

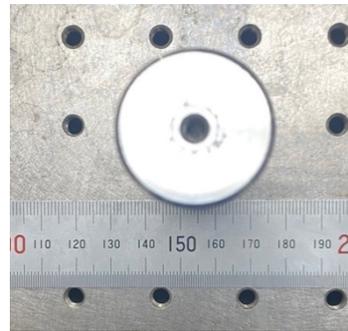


図 4.3 実験に使用したアルミニウム棒 (a) 側面図 (b) 正面図

4.2 実験結果及び考察

取得した各点での波形を元に正規化 TOF である $T_0(\theta, s)$ を計算し、それを投影データとして音速分布を再構成した。正規化 TOF は対象物がない状態における受信信号を基準として各点での受信波形の相互相関関数のピーク位置から推定した[23]。

4.2.1 高周波超音波

2.2 MHz の高周波超音波を用いて実験を行い、取得した波形の一例を図 4.4 に示す。対象物を通過することで音波が大きく減衰するため、拡大し全て同じスケールで示している。図 4.4(a) は対象物がない状態の受信信号で、本実験での参照信号である。図 4.4(b) は対象物の端の位置での受信信号で、図 4.4(c) は対象物の中心位置を走査した時の受信信号である。

図 4.4(a) は対象物を通過していないため直達波のみが観測されているが、対象物が音軸上に近づくにつれて、3 つの成分が観測されていることがわかる。さらに対象物の中心位置である図 4.4(c) を見るとはっきりと 3 つの成分が確認できる。これらの成分について対象物の持つ音速の参照値と対象物のサイズ、水の伝搬距離と音速からどのような成分であるかを推定する。

まず実験時に測定した水の音速 1480 m/s より一番最短の距離で伝搬すると考えられる直達波の伝搬時間 t_1 は

$$t_1 = \frac{0.275 \text{ [m]}}{1480 \text{ [m/s]}} + \frac{0.025 \text{ [m]}}{6380 \text{ [m/s]}} = 189.7 \text{ [\mu s]} \quad (3.1)$$

と推定される。相互相関のピークから求めた図 4.4(c) の 1 つ目の成分の伝搬時間 189.8 μs とほぼ一致することから直達波であると考えられる。推定値と実験で測定された伝搬時間がほぼ一致しており、高精度で伝搬時間の取得ができていると考えられる。

図 4.4(c) の 2 つ目の成分は 194.2 μs で観測され、伝搬時間から推定すると水からアルミニウム丸棒へ斜入射する際に起こった縦波から横波へのモード変換によるものだと考えられる。

水の入射角が増すのに対し、アルミニウム丸棒の縦波の屈折角が増す。縦波の屈折角が 90° に近づくにつれて、超音波エネルギーの大部分が伝搬していた縦波から音速の遅い横波に変換され、アルミニウム丸棒内を横波成分が伝搬した成分であると考えられる。アルミニウムの横波の音速は縦波の約半分の音速の 3130 m/s[21] より、伝搬時間 t_2 は

$$t_2 = \frac{0.275 \text{ [m]}}{1480 \text{ [m/s]}} + \frac{0.025 \text{ [m]}}{3130 \text{ [m/s]}} = 193.8 \text{ [\mu s]} \quad (3.1)$$

と推定され、実験値である 194.2 μs とほぼ一致することからアルミニウム丸棒内を横波の成分が伝搬した波だと考えられる。

図 4.5 に参照信号と 3 つ目の成分の各点での遅れ時間差を示す。図 4.5 より 3 つ目の成分は対象物の中心位置に行くほど遅れ時間差が大きくなっていることがわかる。このことから音源のエ

ッジ部分から放射された波が対象物に回り込むことによって生じた回折波だと考える。また観測された3つの成分のうち、一番振幅の大きい成分が回折波であることがわかる。

図 4.5 より最大で回折波における時間差が $0.5 \mu\text{s}$ 生じていることがわかる。対象物の設置位置を音源から 20 cm, 送受波器間の距離を 30 cm, 対象物のサイズ直径 2.5 cm より回折波によって送受波器間の距離の変化 d は

$$d = \sqrt{1.25^2 + 10^2} - 10 = 0.0778 \text{ [cm]} \quad (3.1)$$

から 0.00778 cm だと推定される。したがって、回折波によって生じる時間差 t_3 は

$$t_3 = \frac{0.00078 \text{ [m]}}{1480 \text{ [m/s]}} = 0.53 \text{ [\mu s]} \quad (3.1)$$

だと推定でき、実験で取得された最大時間差 $0.50 \mu\text{s}$ とほぼ一致することから 3 つ目の波の成分は回折波だと考えられる。

この3つの成分のうち、音波の直進性を仮定している CT アルゴリズムに基づき、本実験では一番早く到達する直達波の伝搬時間を画像化に用いる投影データとして取得した。図 4.6, 4.7 に取得した投影データと投影データを拡大した対象物設置位置付近でのグラフを示す。図 4.6 より、実験値と黒点線で示す推定値を比較すると最も伝搬時間が早くなる地点においてはほぼ同精度で投影データの取得ができているとわかる。また図 4.7 を見ると中心にいくほど伝搬時間がわずかに早くなっていることがわかり、対象物のエッジと中心位置での時間差は最大で $0.47 \mu\text{s}$ である。走査する位置によって対象物を通過する距離が変わるため、このように時間差が生じたと考えられる。

さらに高周波超音波は空間分解能が高いことから左右対称のグラフの取得ができたと考える。しかし、中心位置から離れるにつれて推定値と実験値の差が大きくなっており、本来は対象物の中心位置とエッジ部分では実験値で得られた時間差より大きな時間差が生じるはずである。この原因は用いた対象物と振動子のビーム幅の関係にあると考える。今回用いた対象物が直径 2.5 cm, 平面型トランスデューサのビーム幅は 13 cm(半値全幅)である。したがって、ビーム幅が広いことで対象物の端を走査している時でも実際音波は対象物の中心位置を通過してしまい、音速の早いほうに引っ張られてしまったことで方位分解能が悪くなり、結果的にエッジ部分の伝搬時間が推定値よりも早くなってしまったと考える。改善するためには集束型のトランスデューサを用いてビーム幅を走査間隔と同程度に狭めるもしくはビーム幅よりも大きな対象物を用いることで相対的な空間分解能を上げる必要があると考える。

次に図 4.6 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 4.8, 4.9 に示す。画像再構成時には FBP 法を用いて画像の鮮鋭化処理を行っている。音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを示しており、青色の実線で実験値、黒色の点線で推定値をプロットしている。

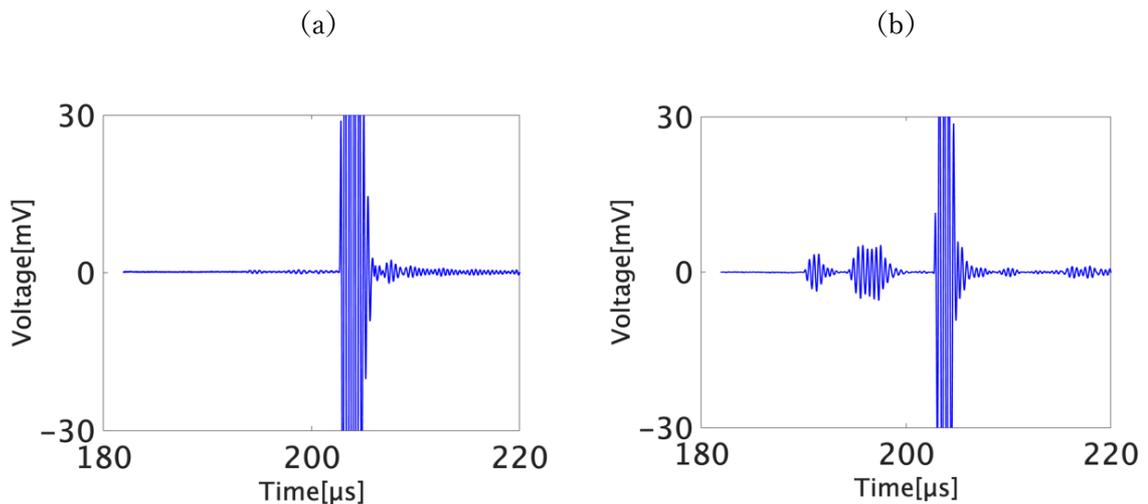
図 4.8 より対象物のサイズと同程度のサイズで音速画像の取得ができたと考える。次に図 4.9 の音速推定のグラフを見ると、中心位置では 3000 m/s と実際の対象物の音速と差異が生じてい

る。また水と対象物との境界位置で飛び跳ねた値が生じていることもわかる。このように実験値と実際の対象物の音速に差が生じた理由は2つあると考えられる。

1 つ目は投影データの取得時にも述べたように本実験で用いたトランスデューサのビーム幅が広いため、本来ならば滑らかに変化するはずだが取得した TOF が不連続になってしまったことが挙げられる。画像再構成時に取得した投影データをフーリエ変換しているため、不連続な関数をフーリエ変換することで不連続点の近くで元の関数に収束せず角が飛び出たようになるギブス現象が生じたと考える。

2 つ目は用いた CT 法のアルゴリズムにあると考える。今回用いたアルゴリズムは X 線を超音波に応用しているため、波動性が考慮されていない。使用したアルゴリズムは音波の直進性を仮定しているため、回折や散乱によって実際の伝搬経路は直線では無いことでアルゴリズムに誤差が生じ、結果的に音速の推定精度に影響を及ぼしたと考えられる。

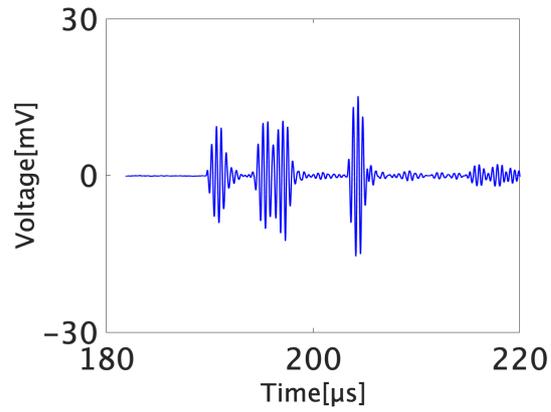
改善策として画像再構成法を FBP 法ではなく、逐次近似法を用いることが挙げられる。逐次近似法は画像再構成時にフーリエ変換を用いず、最初にある答えを仮定し、実際の問題の解答に近くなるように繰り返し修正を行う方法である。繰り返し計算を行うため、計算量が多くなるが、画像ノイズ低減効果やアーチファクト低減効果が期待されているため、より高画質の画像と高精度の音速推定が行うことができると考える[23]。



(a) 対象物のない状態

(b) 対象物の端

(c)



(c) 対象物の中心位置

図 4.4 高周波超音波での受信波形

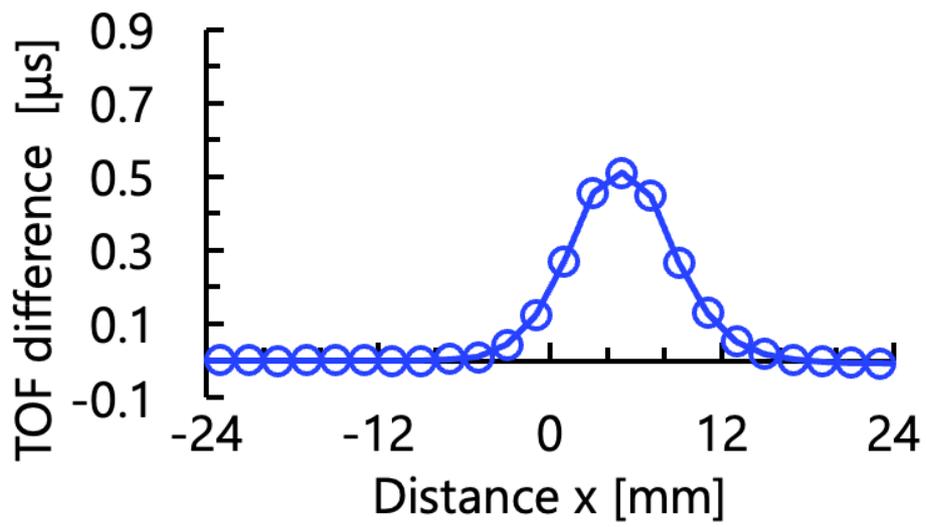


図 4.5 参照信号と回折波の遅れ時間差

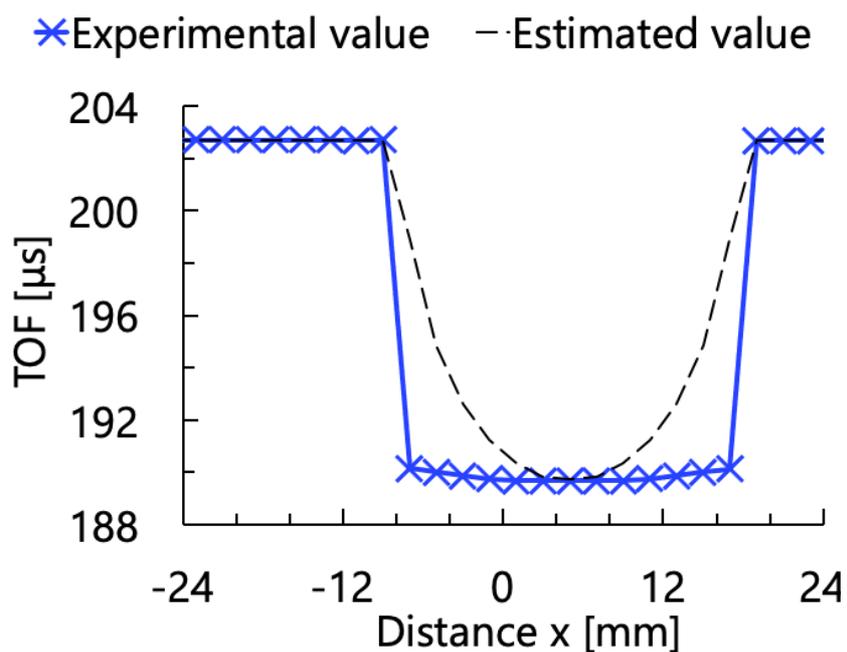


図 4.6 取得した投影データと推定値

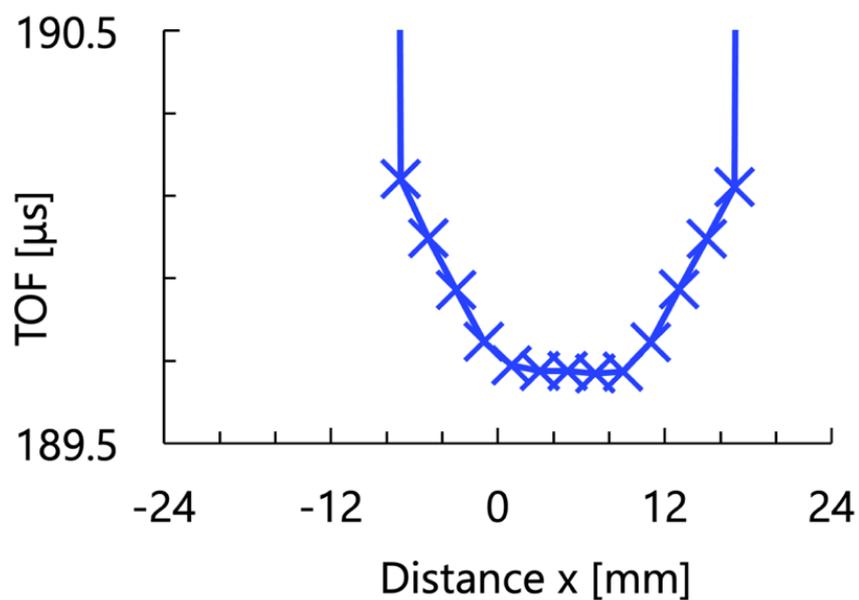


図 4.7 取得した投影データ (対象物付近)

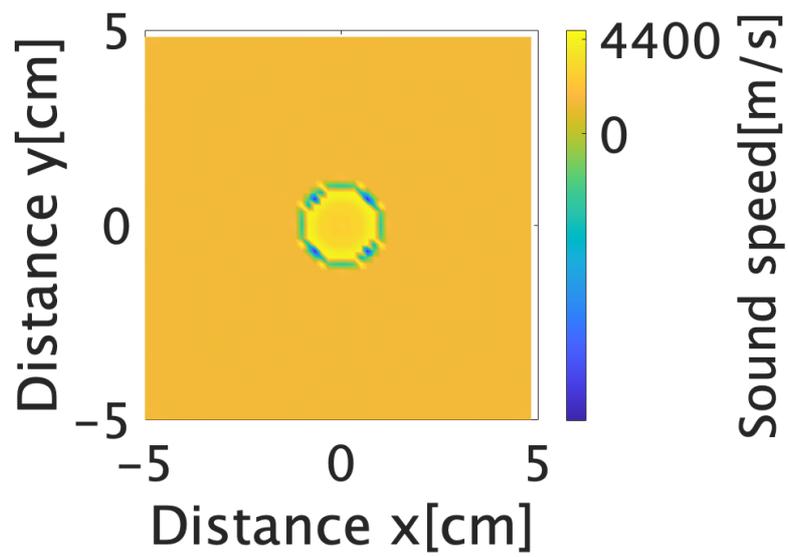


図 4.8 取得した音速画像

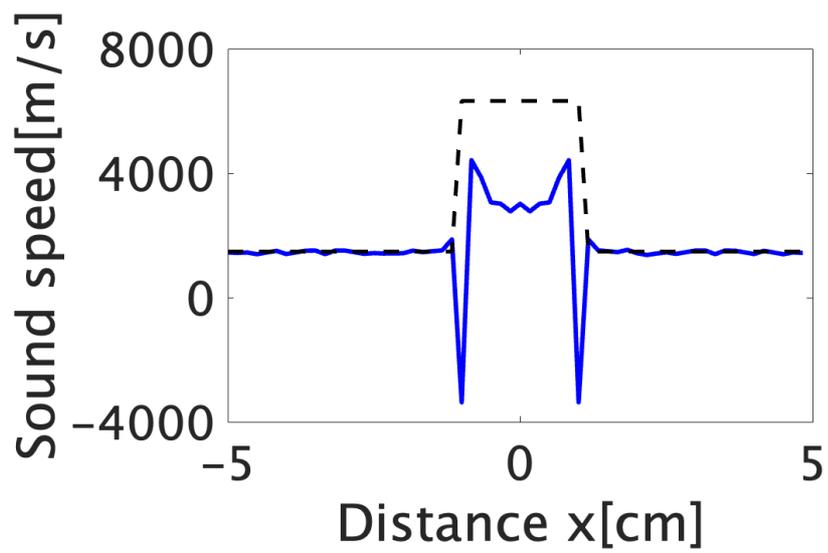


図 4.9 取得した音速推定値

4.2.1 パラメトリック差音

400 kHz, 1 サイクルのパラメトリック差音を用いて実験を行い, 取得した波形の一例を図 4.10 に示す. 図 4.10(a)は対象物のない状態の受信信号で, 本実験での参照信号である. 図 4.10(b)は対象物の端の位置での受信信号で, 図 4.10(c)は対象物の中心位置での受信信号である. 取得波形には 1 次波の高周波成分が強く残っているため, 信号処理で 600 kHz の低域通過フィルタをかけている.

図 4.10(a)は直達波のみが観測されているが, 対象物が音軸上に近づくとつれて, 3つの成分が観測された. 対象物の中心位置である図 4.10(c)を見ると高周波超音波と比べると SNR が悪いものの同様に 3つの成分が確認できることがわかる.

これらの成分について対象物の持つ音速の参照値と対象物のサイズ, 水の伝搬距離と音速からどのような成分かを推定する. 実験時に測定した水の音速 1499 m/s より直達波の伝搬時間 t_1 は

$$t_1 = \frac{0.275 \text{ [m]}}{1499 \text{ [m/s]}} + \frac{0.025 \text{ [m]}}{6380 \text{ [m/s]}} = 187.3 \text{ [\mu s]} \quad (4.1)$$

と推定される. 相互相関により求めた図 4.10(c)の 1 つ目の成分の伝搬時間 187.8 μs とほぼ一致することから直達波であると考えられる. また, 高周波超音波と同様に比較的推定値に近い値で推定できていることがわかる.

図 4.10(c)の 2 つ目の成分は 195.0 μs で観測され, 伝搬時間から推定すると水からアルミニウム丸棒へ斜入射する際に起こった縦波から横波へのモード変換によるものだと考えられる. 高周波超音波の実験でも 2 つ目の成分が同程度の時間で観測されている.

アルミニウムの横波の音速 3130 m/s より, 伝搬時間 t_2 は

$$t_2 = \frac{0.275 \text{ [m]}}{1499 \text{ [m/s]}} + \frac{0.025 \text{ [m]}}{3130 \text{ [m/s]}} = 191.4 \text{ [\mu s]} \quad (4.2)$$

と推定され, 高周波超音波と比べると実験値である 195.0 μs との差が大きくなった. 理由はパラメトリック差音の SNR が悪く, 正しく伝搬時間を取得できなかったと考える. また, 今回推定値に用いている水の音速は実験開始時に測定したものである. 水の音速は温度によって変化するため, 実験中に音速が変化した可能性が高いと考えられる. したがって複数回測定することで音速の精度を高める必要があると考える.

図 4.11 に参照信号と 3 つ目の成分の各点での遅れ時間差を示す. 図 4.11 より 3 つ目の成分は高周波超音波の結果と比べるとばらつきが大きいものの, 対象物の中心位置に行くほど伝搬時間が遅くなっているといった高周波超音波と同様の傾向が確認できていることがわかる. これは音源のエッジ部分から放射された波が対象物に回り込むことによって生じた回折波だと考える.

図 4.11 より最大で回折波における時間差が 0.46 μs 生じていることがわかる. 対象物の設置位置を音源から 20 cm, 送受波器間の距離を 30 cm, 対象物のサイズ直径 2.5 cm より回折波によって送受波器間の距離の変化 d は

$$d = \sqrt{1.25^2 + 10^2} - 10 = 0.0778 \text{ [cm]} \quad (4.3)$$

より 0.00778 cm だと推定される。したがって、回折波によって生じる時間差 t_3 は

$$t_3 = \frac{0.00078 \text{ [m]}}{1499 \text{ [m/s]}} = 0.52 \text{ [\mu s]} \quad (4.4)$$

だとわかり、実験で取得された最大時間差 0.46 μs とほぼ一致することから 3 つ目の波の成分は回折波だと考えられる。

以上より、ショートサイクルの差音を用いた場合、対象物を設置することで高周波超音波と同様に 3 つの波が観測され、求めた理論値と伝搬時間の比較することで 3 つの波の成分について明らかにした。

この 3 つの成分のうち、音波の直進性を仮定しているアルゴリズムに基づき、本実験では一番早く到達する直達波の伝搬時間を画像化に用いる投影データとして取得した。図 4.12, 4.13 に取得した投影データと投影データを拡大したグラフを示す。図 4.12 より、実験値と黒点線で示す推定値と最も伝搬時間が早くなる地点ではほぼ同精度で投影データの取得ができているとわかる。また図 4.13 を見ると中心にいくほど伝搬時間がわずかに早くなっていることがわかり、時間差は最大で 0.43 μs である。走査する位置によって対象物を通過する距離が変わるため、このように時間差が生じたと考えられる。さらに高周波超音波と比べてパラメトリック差音は SNR が悪いいため、正確な TOF の取得ができず、ばらつきが生じたと考えられる。図 4.14 に高周波超音波とパラメトリック差音の投影データの比較のグラフを示す。図 4.14 より両者とも対象物を設置していない時と設置した場合で不連続になる同様の傾向が得られ、中心位置から離れるにつれて推定値と実験値の差が大きくなっている。これは 4.2.1 と同様の理由で生じたと考えられる。

次に図 4.12 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 4.15, 4.16 に示す。音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを示しており、赤色の実線で実験値、黒色の点線で推定値をプロットしている。

図 4.15 より対象物のサイズと同程度のサイズで音速画像の取得ができたと考える。また図 4.16 の音速推定のグラフを見ると、実際の対象物の音速と差異が生じているものの空間分解能が良い高周波超音波と同精度での音速画像の取得と音速推定ができたと考える。

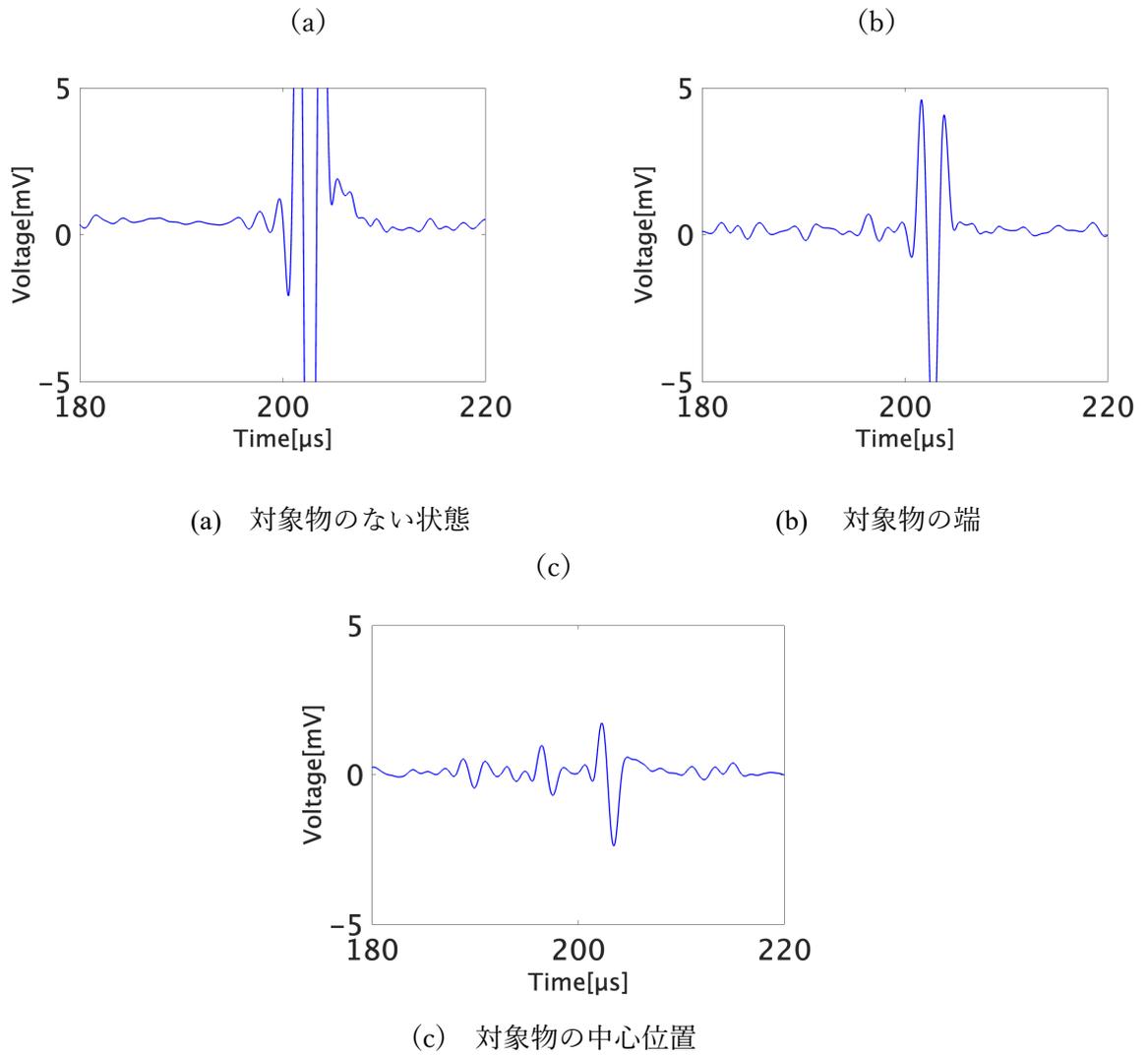


図 4.10 パラメトリック差音での受信波形

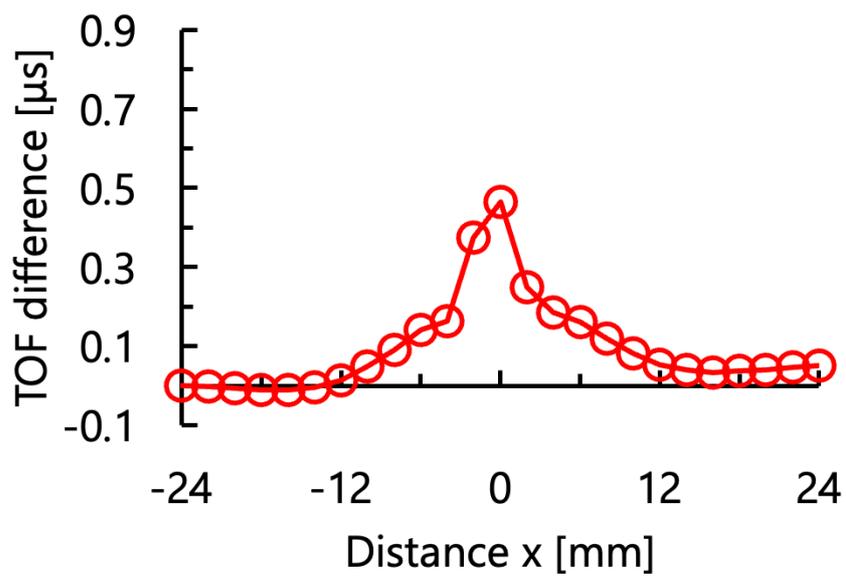


図 4.11 参照信号と回折波の遅れ時間差

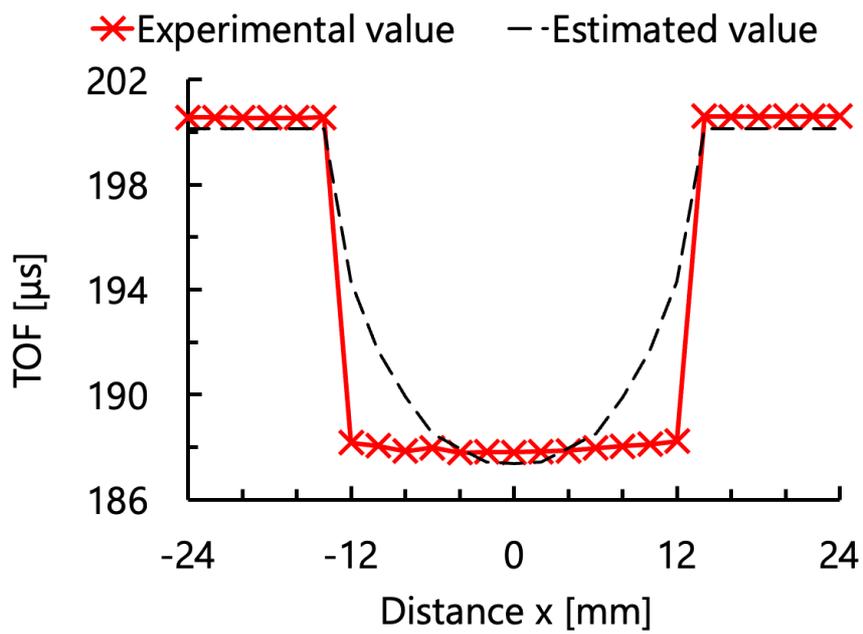


図 4.12 取得した投影データと推定値

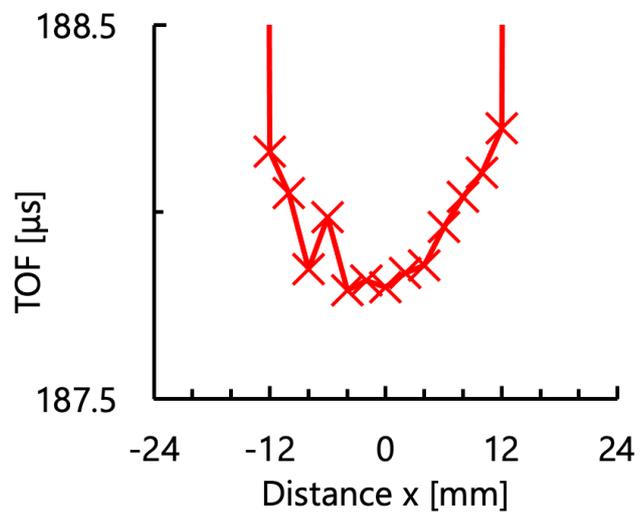


図 4.13 取得した投影データ (対象物付近)

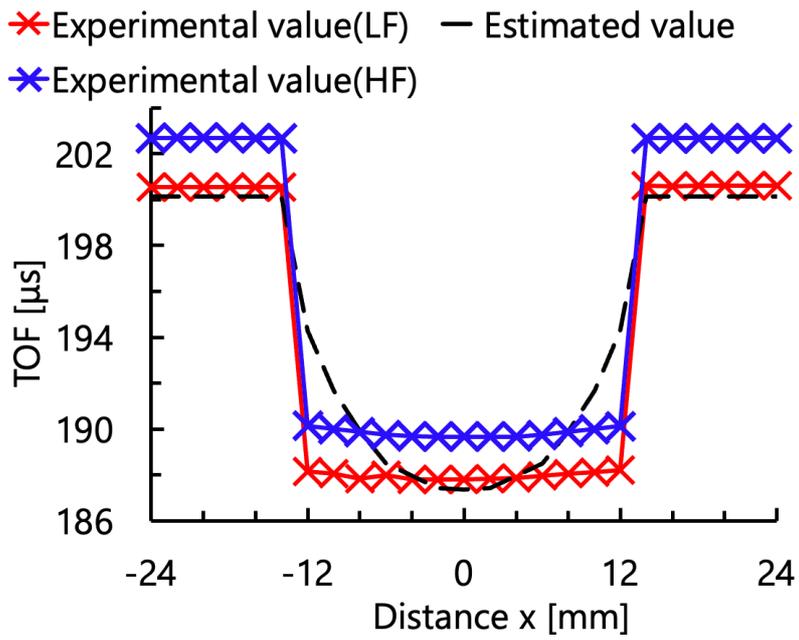


図 4.14 取得した投影データ（高周波超音波との比較）

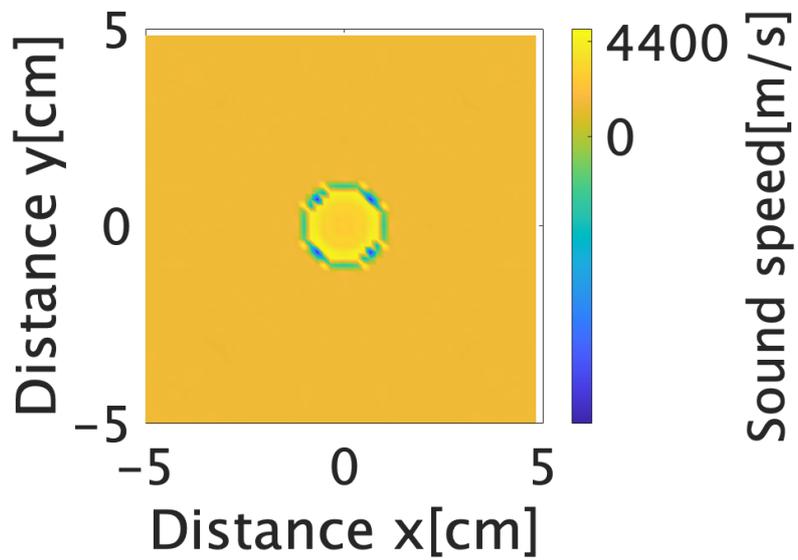


図 4.15 取得した音速画像

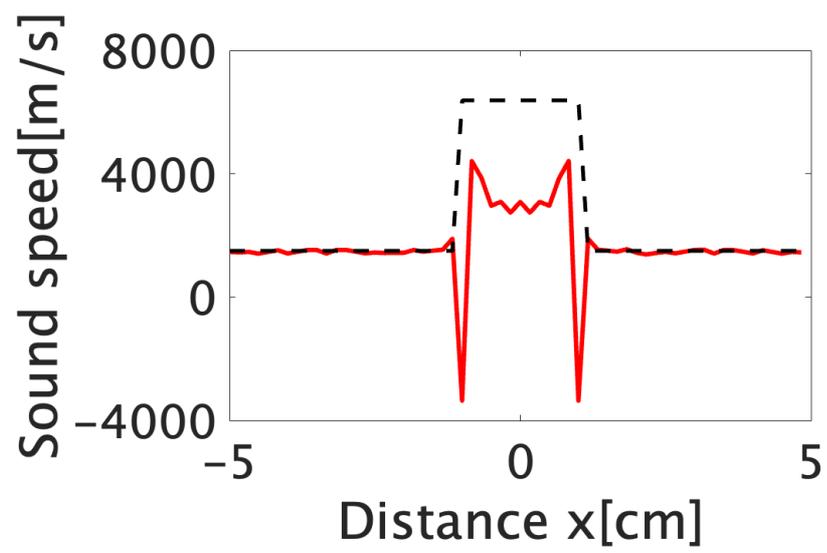


図 4.16 取得した音速推定値

4.2.3 パラメトリック差音によるパルス圧縮

チャープパラメトリック差音を用いて実験を行い、取得した波形の一例を図 4.17 に示す。図 4.17(a)は対象物のない状態の受信信号で、本実験での参照信号である。図 4.17(b)は対象物の端の位置での受信信号で、図 4.17(c)は対象物の中心位置での受信信号である。取得波形には 1 次波の高周波成分が強く残っているため、信号処理で 800 kHz の低域通過フィルタをかけている。

図 4.17(a)は直達波のみが観測されているが、対象物が音軸上に近づくにつれて、波形の振幅が大きく変化していることがわかる。また図 4.18 は対象物の中心位置での受信波形をパルス圧縮した後の包絡波形で青線はパルス圧縮信号、赤線はパルス圧縮信号の包絡を示している。また図 4.18 より大きく 3 つのピークが存在することがわかる。

これらの成分について対象物の持つ音速の参照値と対象物のサイズ、水の伝搬距離と音速から推定する。一番早く受波した 1 つ目の成分の伝搬時間 t_1 は式(4.1)の $187.3 \mu\text{s}$ と近い値であることがわかることから 1 つ目の成分は直達波であると考えられる。推定値との誤差は 4.2.2 でも述べたような実験環境で生じる水の音速のズレなどが考えられる。

図 4.18 の 2 つ目の成分は $195.2 \mu\text{s}$ で観測され、伝搬時間から推定すると水からアルミニウム丸棒へ斜入射する際に起こった縦波から横波へのモード変換によるものだと考えられる。

アルミニウムの横波の音速 3130 m/s より、伝搬時間 t_2 は式(4.2)の $191.4 \mu\text{s}$ と推定され、実際に測定された結果との時間差が生じた。これは 4.2.2 で述べたショートサイクルの差音の時と同じ理由であると考え。更にパルス圧縮は受信信号の周波数特性によってもパルス圧縮後の包絡のピーク位置が変化してしまうため、推定値との誤差が大きくなったと考える。

図 4.19 に 3 つ目の成分の参照信号との遅れ時間を示す。図 4.19 より 3 つ目の成分は高周波超音波の結果と同様に、対象物の中心位置に行くほど伝搬時間が遅くなっていることがわかる。これは音源のエッジ部分から放射された波が対象物に回り込むことによって生じた回折波だと考える。

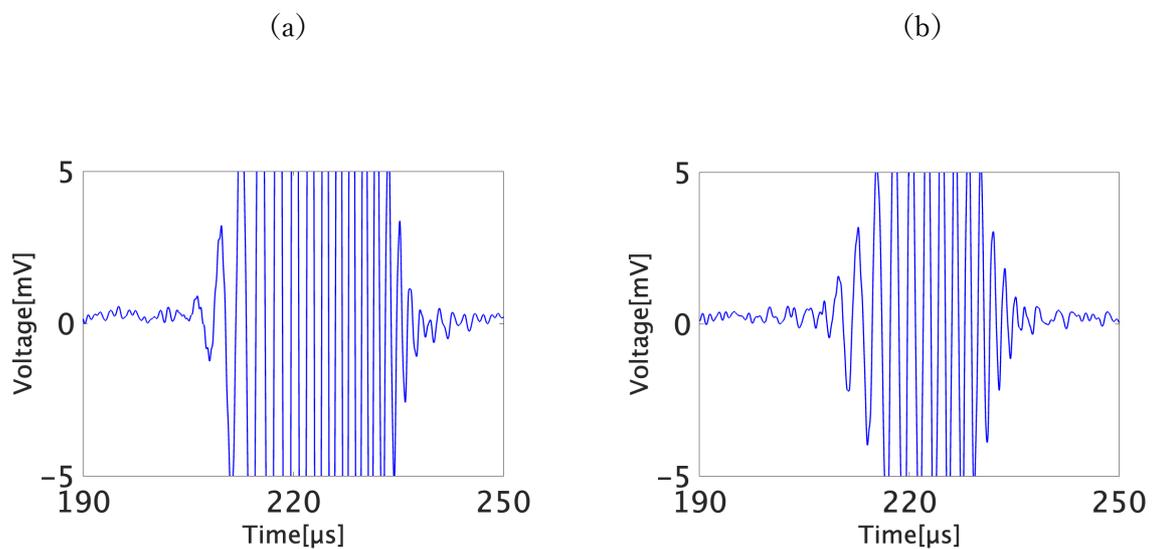
図 4.19 より最大で回折波における時間差が $0.82 \mu\text{s}$ 生じていることがわかる。推定される回折波によって生じる時間差 t_3 は式(4.3)より $0.53 \mu\text{s}$ だと求めることができ、高周波超音波と比較して実験値との時間差が大きいことがわかる。音波は一般的に周波数が低いものほど回折が生じるため、その影響が強く出たと考える。またパルス圧縮を行うことで SNR が向上し、回折波の時間差のグラフが高周波超音波の時と同様に対象物の設置位置で緩やかに変化するグラフになったと考える。

この 3 つの成分のうち、一番早く到達する直達波の伝搬時間を画像化に用いる投影データとして取得した。図 4.20 に取得した投影データを示す。図 4.20 より、他の結果と比べて推定値との差が生じていることがわかる。今回は受信波形をパルス圧縮した際の包絡のピーク位置から TOF を取得したが、パルス圧縮時のピーク位置は受信信号と参照信号の周波数特性が変化することによって変化するため、このように推定値との時間差が生じたと考えられる。またパルス圧縮時の TOF は中心に行くほど僅かに遅くなっているといった傾向も見られた。

次に図 4.20 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 4.21,4.22 に示す。音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを示しており、水色の実線

で実験値，黒色の点線で推定値をプロットしている。

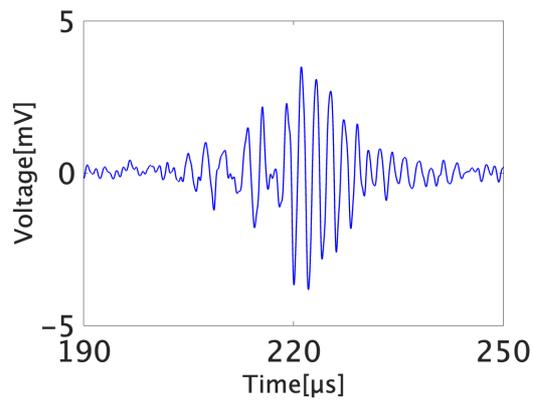
図 4.21 より対象物のサイズと同程度のサイズで音速画像の取得ができたと考える。ショートサイクルの差音を用いた場合，非常に SNR が悪く，電圧を上げないと直達波の観測が困難であった。しかし，人体などで使うことを想定しているため，高電圧をかけることはできない。そこで，距離分解能と SNR の向上を目的とし，パルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音により音速画像の取得を行なった。結果的に図 4.22 の音速推定のグラフを見ると，実際の対象物の音速と差異が生じているものの，空間分解能が良い高周波超音波と同精度での音速画像の取得と音速推定ができたと考える。



(a) 対象物のない状態

(b) 対象物の端

(c)



(c) 対象物の中心位置

図 4.17 チャープパラメトリック差音での受信波形

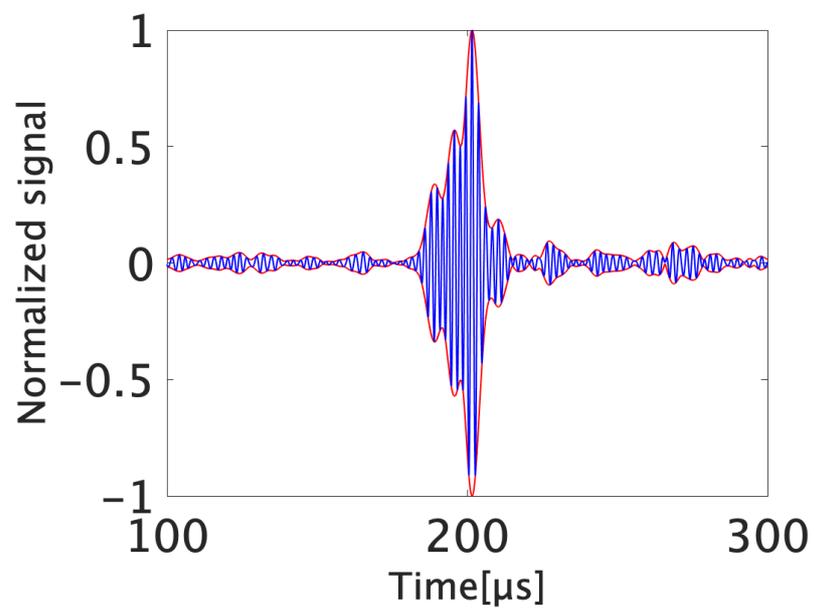


図 4.18 対象物の中心位置での包絡波形

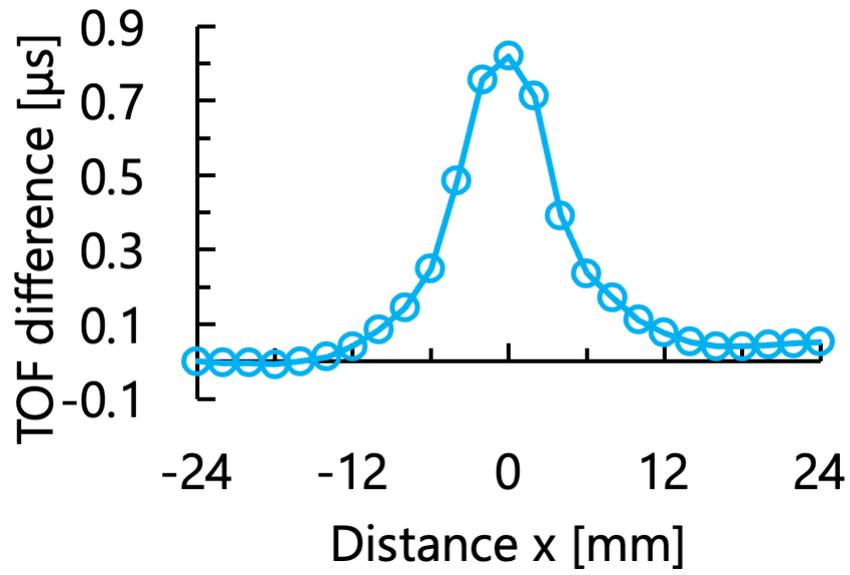


図 4.19 参照信号と回折波の遅れ時間差

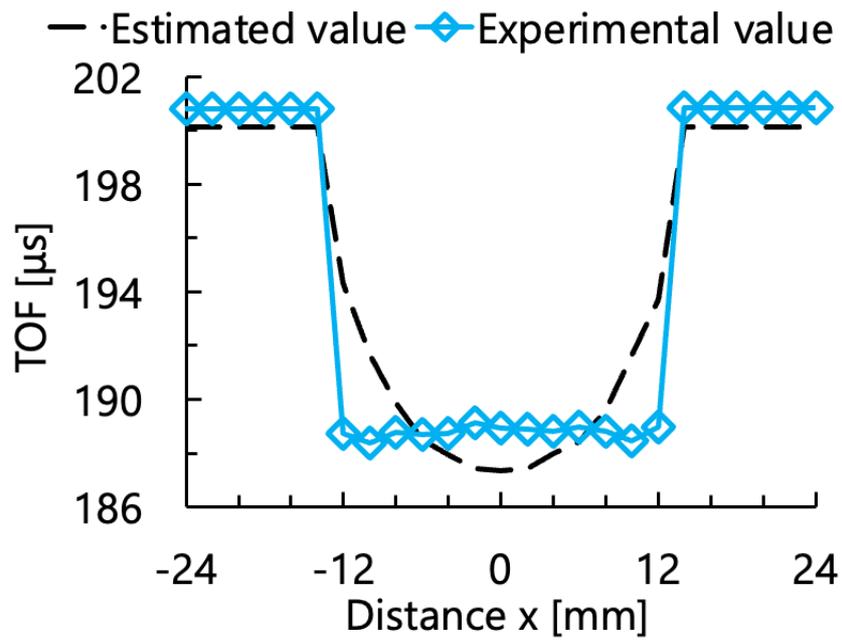


図 4.20 取得した投影データ

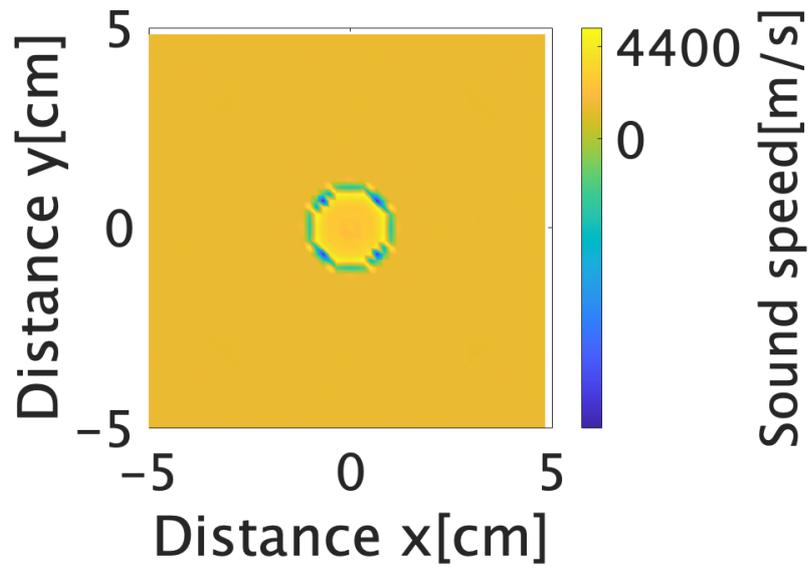


図 4.21 取得した音速画像

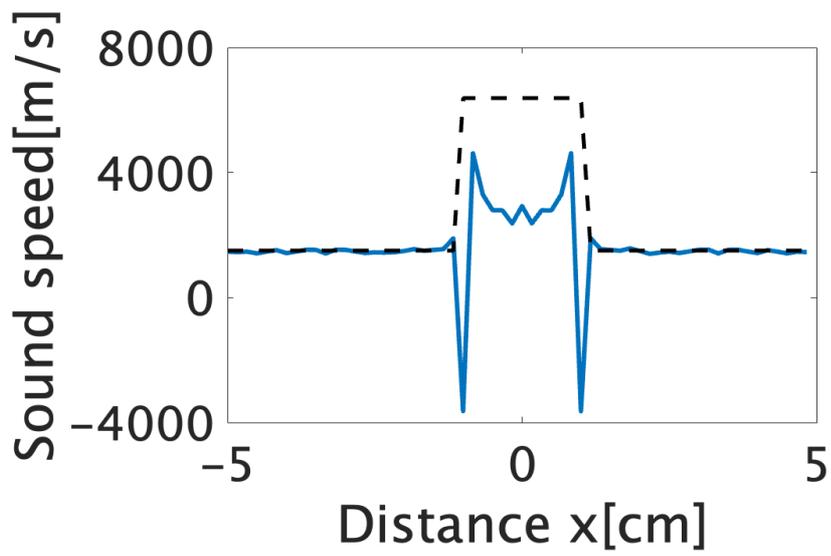


図 4.22 取得した音速推定値

第5章 アルミニウムパイプを用いた音速画像の取得

次に空洞などの内部構造を持つ物体を対象とした検討を行うために、アルミニウムパイプを用いて実験を行う。第4章と同様に高周波超音波とパラメトリック差音を用いて実験を行い、画像化に用いる伝搬時間の TOF や音速画像の比較を行う。

5.1 実験方法

5.1.1 実験準備

使用機器、実験系は表 3.1, 図 4.1, 4.2 のとおりとする。

5.1.2 実験条件

図 5.1 に実験で使用したアルミニウムパイプを示す。実験条件は 4.1.2 に示す通りである。対象物は直径 2.5 cm, 厚さ 2.15 mm, 内径 2.07 cm のアルミニウムパイプ (音速 6380 m/s[21]) を用いた。

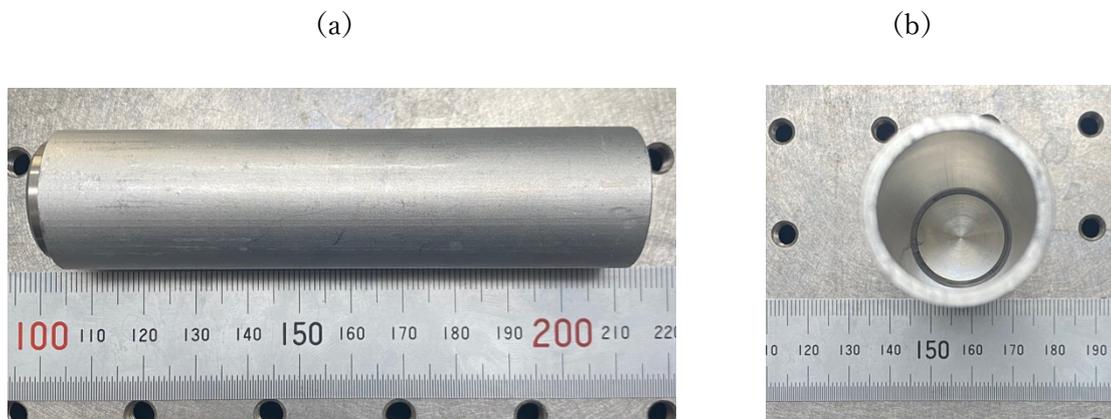


図 5.1 実験に使用したアルミニウムパイプ (a) 側面図 (b) 正面図

5.2 実験結果及び考察

5.2.1 高周波超音波

2.2 MHz の高周波超音波を用いて実験を行い、取得した波形の一例を図 5.2 に示す。図 5.2(a) は対象物のない状態の受信信号で、本実験での参照信号である。図 5.2(b) は対象物の端の位置での受信信号で、図 5.2(c) は対象物の中心位置での受信信号である。

図 5.2(a) より対象物を設置していないときは直達波のみ観測されているが、対象物を設置する

ことで4つの成分が観測されていることがわかる。パイプの場合内部が均一なアルミ棒と比べて、パイプ中を伝わる周回波であるガイド波が存在すると考えられる。

図 5.2(c)より 1 つ目の成分は $189.7 \mu\text{s}$ で観測され、音速のパイプの円周方向に伝搬する円周 (Circumferential:C-) Lamb 波[25]であると考えられる。2 つ目の成分は $193.9 \mu\text{s}$ で観測され、直達波は理論上送受波器間を最短経路で伝搬すると考えられるため周回波の次に観測された成分が直達波だと考えられる。3 つ目の成分は $196.5 \mu\text{s}$ で観測され、これはアルミニウム丸棒の時にも観測された水からアルミニウムパイプへ斜入射する際に起こった縦波から横波へのモード変換によるものだと考えられる。横波は固体中のみ伝搬する波である。アルミ棒の時と比べて、3 つ目の成分の振幅が低下しているのは、内部が空洞になり、固体部分が減少したためであると考えられる。4 つ目の成分もアルミ棒の時と同様に中心付近で TOF が $0.35 \mu\text{s}$ 遅くなる傾向が確認されたため、対象物を回り込むことによって伝搬距離差が生じた回折波だと考えられる。アルミパイプにおいても中心位置で確認された4つの成分のうち最も振幅が大きい信号は回折波だった。さらにパイプの場合音波が通過する時の境界が4つ存在するため、アルミ棒と比べて境界での散乱や反射により振幅が減衰し、受信信号の振幅が全体的に低下していることがわかる。中心位置での直達波の最大振幅と参照信号の最大振幅の比率は 0.021 と求めた。また回折波以降に見られるのは反射波ではなく、信号の立ち下がり成分であると考えられる。

この4つの成分のうち、伝搬経路を直線上に到達する直達波の伝搬時間を画像化に用いる投影データとして取得した。図 5.3, 5.4 に取得した投影データと複数回の実験により取得した投影データを示す。

図 5.3 より内部が均一なアルミ棒を用いた場合はほぼ一定の TOF となっていたのに対し、内部が空洞のアルミパイプの場合、中心付近で TOF が変化していることから内部の空洞の状態を捉えられていることがわかる。しかし、アルミ棒と比べて境界での減衰により直達波における十分な SNR の確保ができなかった。また高周波超音波を用いた場合 C-Lamb 波において S (Symmetric mode) モードや A (Anti-symmetric mode) といった複数のモードが励起され、それぞれのモードが同時に伝搬したことや散乱波が連なって現れたことで、直達波の正確なピークが取得できず、ばらつきや正確な TOF の取得には適していないと考えられる。

また図 5.4 より左側の TOF が右側と比べて早くなっており、左右非対称のグラフになっていることがわかる。図 5.4 は別日に同実験を行った結果をプロットしており、1 回目と比べて2回目の結果は左側の TOF が早くなっていることが読み取れる。したがって、左右非対称となったのは対象物が垂直に設置されていなかったことが原因だと考える。

次に図 5.3 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 5.5, 5.6 に示す。音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを青線で示し、推定値を黒点線でプロットしている。図 5.5 より対象物のサイズに近い大ききで音速画像の取得ができていることがわかる。またパイプの厚さを識別し、切り出した中心位置においては推定値である 6380 m/s に近い値で音速推定ができていることがわかる。

以上より、高周波超音波を使って内部構造を持つ対象物に対して変化を捉えることができ、音速画像の取得が可能であることがわかる。ただし、取得波形においてアルミ棒と比べると大きく減衰し、C-Lamb 波の複数のモードや散乱波が連なって現れたことでばらつきが大きく、正確な TOF の取得には適していないと考える。また、投影データを元に画像化を行っているため、正

確な TOF の取得が画像化において重要であると考える.

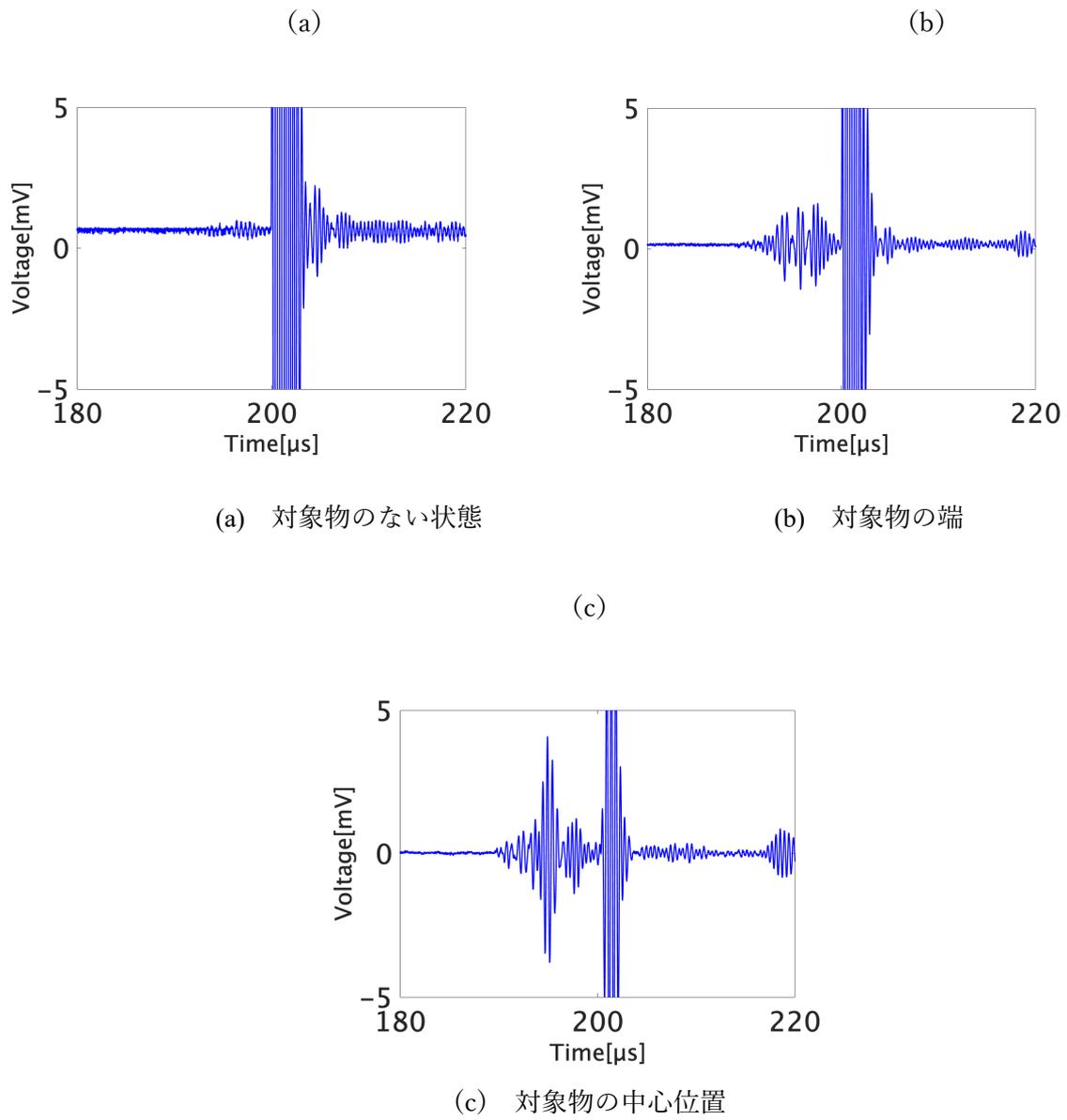


図 5.2 高周波超音波での受信波形

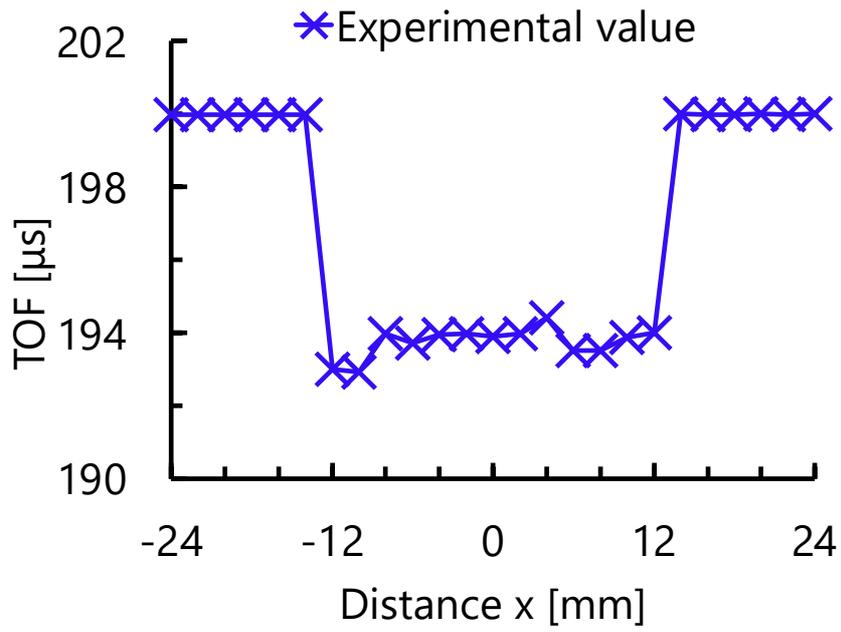


図 5.3 取得した投影データ

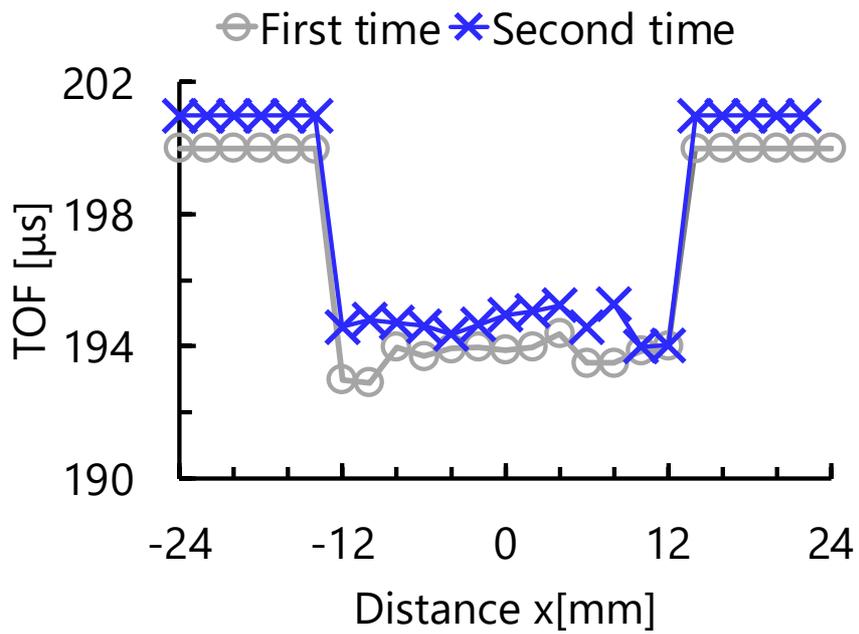


図 5.4 複数回の実験により取得した投影データ

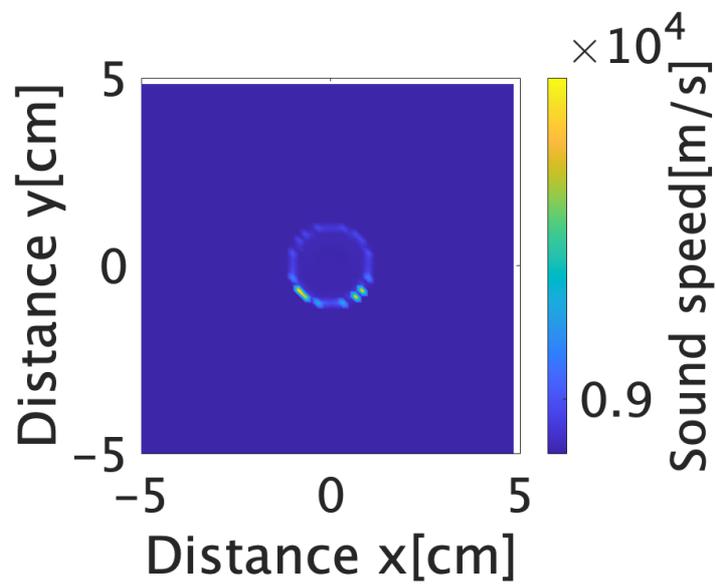


図 5.5 取得した音速画像

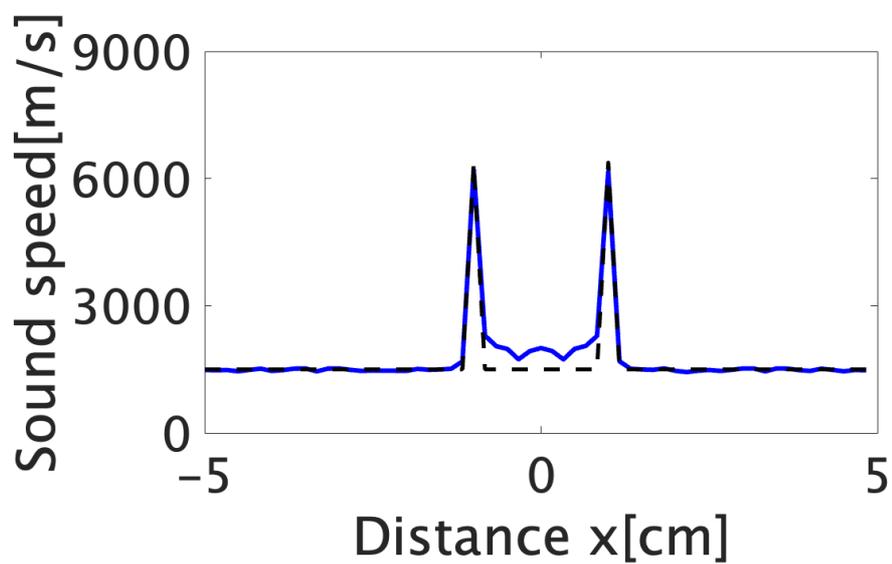


図 5.6 取得した音速推定値

5.2.2 パラメトリック差音

400 kHz, 1 サイクルのパラメトリック差音を用いて実験を行い, 取得した波形の一例を図 5.7 に示す. 図 5.7(a)は対象物のない状態の受信信号で, 本実験での参照信号である. 図 5.7(b)は対象物の端の位置での受信信号で, 図 5.7(c)は対象物の中心位置での受信信号である.

図 5.7(a)より対象物を設置していないときは直達波のみ観測されているのに対し, 対象物に近づくにつれて直達波の振幅が低下し, 複数の波形が観測されていることがわかる. 特に中心位置の図 5.7(c)を見ると, 大きく 2 つの成分が現れていることがわかる.

1 つ目の成分は $194.2 \mu\text{s}$ で観測され, 高周波超音波の 2 つ目の成分とほぼ同時刻で観測されたことから直達波であると考えられる. 2 つ目の成分は中心位置で参照信号との時間差が最も大きく $0.55 \mu\text{s}$ の遅れが生じていることから対象物に回り込んだ回折波だと考えられる. 高周波超音波の場合, これらの成分に加えて Lamb 波やパイプ中を横波に伝搬する成分が見られたが, 差音では 2 つの成分しか確認できなかった.

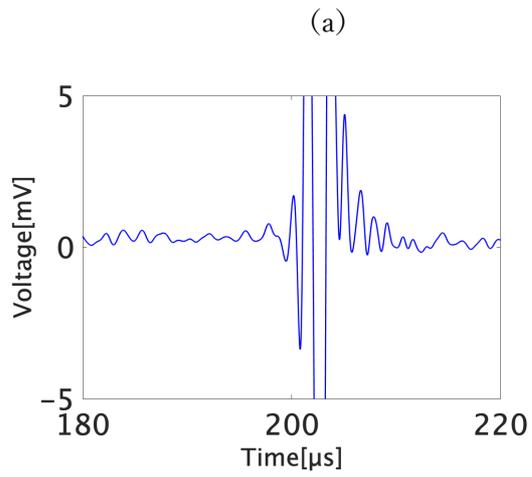
理由として 2 つ考えられる. 1 つ目は信号の SNR の問題である. 本実験で用いた差音は相互相関時の時間分解能を向上させるために 1 サイクルとしている. そのため, 差音の生成の際の 1 次波が立ち上がる前の信号を見ており, 数 10 サイクルの差音と比べると振幅が低下していると考えられる. またパイプの場合音波が通過する時の境界が 4 つ存在するため, さらに SNR が悪くなったと考える. 2 つ目は Lamb 波の伝搬特性である. Lamb 波はガイド波の一種であるが, 伝搬する材質や厚さ, 超音波の周波数に依存して伝搬特性が大きく変化するという特徴を持っている. また Lamb 波は角度によって励起される効率が変化し, 位相整合条件を満たした角度の臨界角で斜入射した際に最も効率よく発生させることができる. 本実験で用いたアルミニウムにおいてはパイプの厚さ 2.15 mm と周波数 400 kHz を考慮すると, 音波の入射角が臨界角ではなかったことで Lamb 波が励起されにくくなったと考えられる[26][27]. その結果, アルミ棒の時には観測されていた成分の観測が困難になったと考える. しかし中心位置での直達波の最大振幅と参照信号の最大振幅の比率 0.131 と求まり, 高周波超音波と比較すると直達波成分の減衰が小さいことがわかる. これは差音の音波吸収に強く, 透過性が良いことから直達波成分においては十分な SNR が確保できたと考える.

次に伝搬経路を直線上に伝搬すると考えられる 1 つ目の成分の直達波の伝搬時間から投影データの取得を行なった. 図 5.8 に取得した投影データを示す. 図 5.8 より, 音速の遅い水を多く伝搬すると考えられる対象物の中心位置に行くほど TOF が遅くなっていることがわかる. また, 5.2.1 で取得した高周波超音波の結果と比較すると変化量は小さいもののばらつきが小さく, 左右対称の TOF が取得できていることがわかる. 理由は差音の場合 Lamb 波や散乱波などの直達波以外の成分が観測されなかったため, 直達波の波形の始点を追うことができ, 内部構造の変化を捉え, 正確な TOF の取得ができたと考える. 高周波超音波と比較して TOF の変化量が小さかったのは空間分解能の差が原因だと考える. したがって, 差音を使うことで内部構造の変化を捉え, ばらつきが少なく TOF の取得ができると考える. また, 図 5.9 に複数回行った投影データの結果を示している. 図 5.9 より複数回行って中心付近での TOF が遅くなる傾向が確認できたことから再現性があると考えられる.

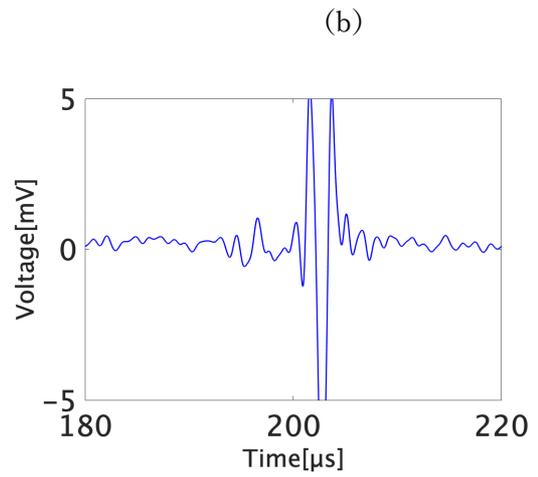
次に図 5.8 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 5.10, 5.11 に示す.

音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを赤線で示し，推定値を黒点線でプロットしている．図 5.10 より対象物のサイズに近い大きさに音速画像の取得ができているとわかる．またパイプの厚さを識別し，高周波超音波と同様に切り出した中心位置においては推定値である 6380 m/s に近い値で音速推定ができていることがわかる．高周波超音波よりも高い音速値が出ているのは TOF の変化量の差が原因だと考える．

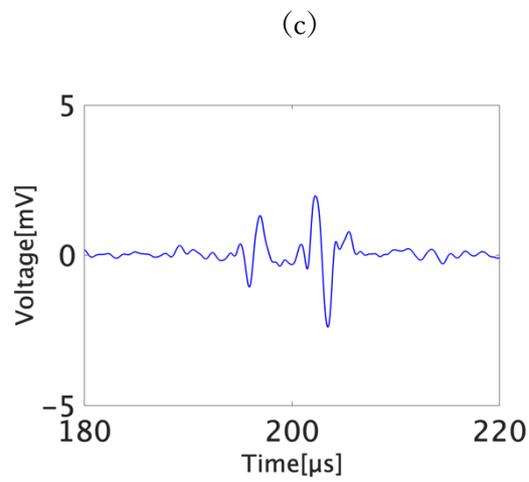
以上より，パラメトリック差音を使うことで内部構造の変化を捉え，高周波超音波と比較して再現性のある直達波成分の正確な TOF の取得ができたと考ええる．また，画像化においてはパイプの厚さを捉え，対象物の持つ音速に近い値での推定ができたと考ええる．



(a) 対象物のない状態



(b) 対象物の端



(c) 対象物の中心位置

図 5.7 パラメトリック差音での受信波形

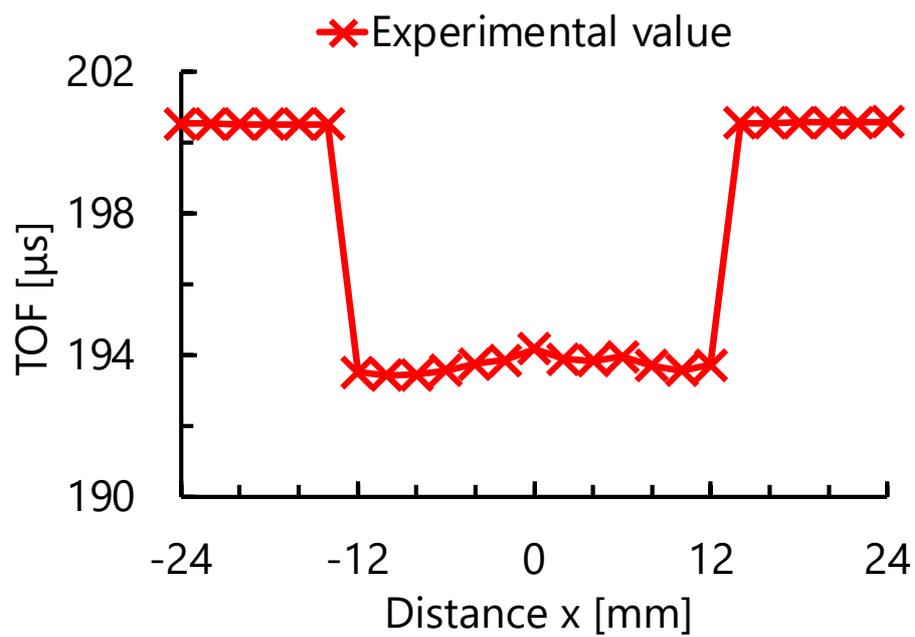


図 5.8 取得した投影データ

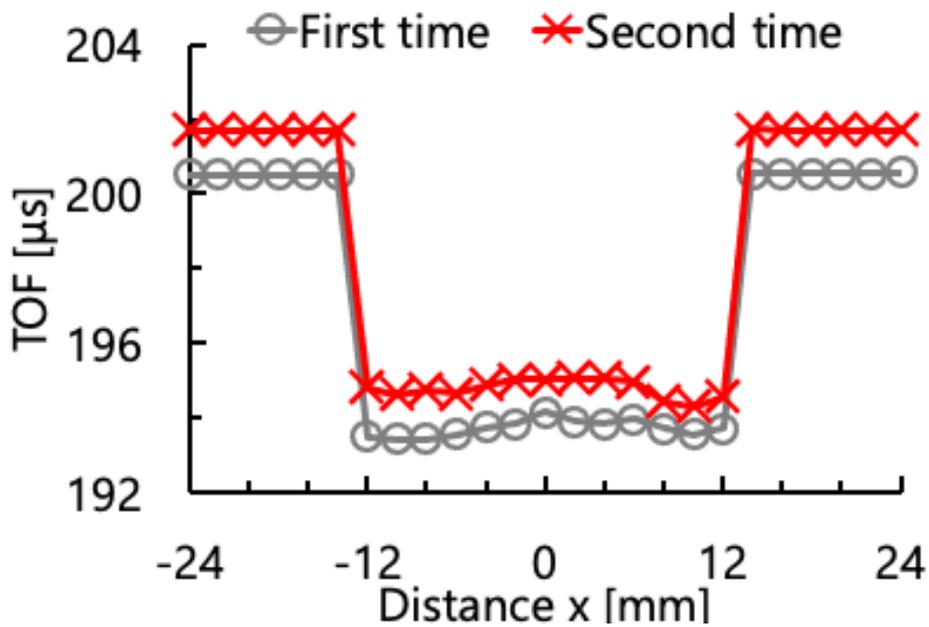


図 5.9 複数回の実験により取得した投影データ

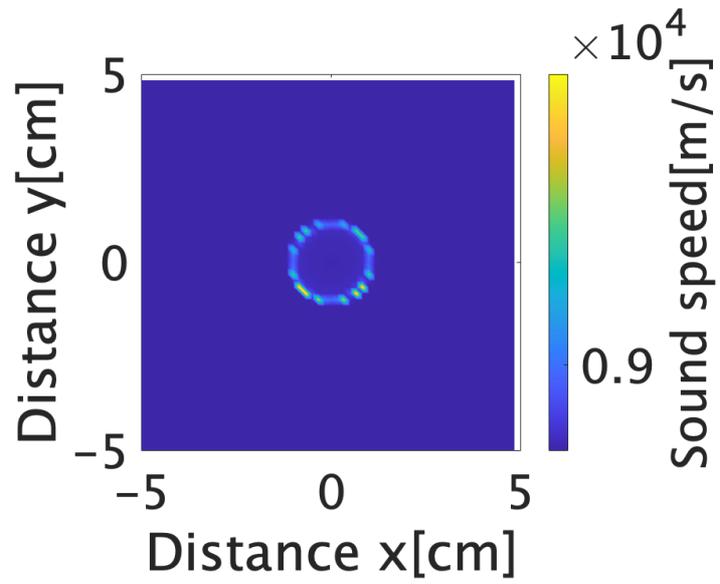


図 5.10 取得した音速画像

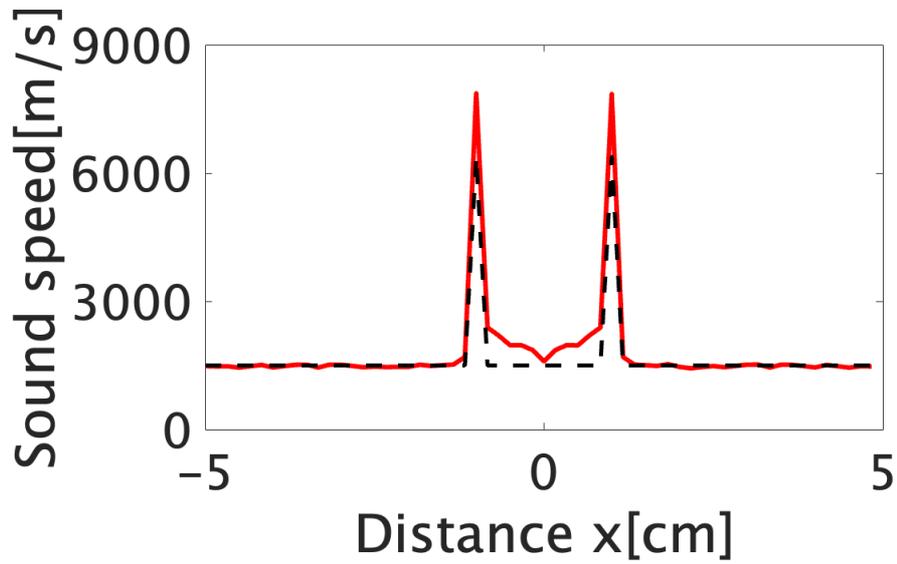


図 5.11 取得した音速推定値

5.2.3 パラメトリック差音によるパルス圧縮

チャープパラメトリック差音を用いて実験を行い、取得した波形の一例を図 5.12 に示す。図 5.12(a)は対象物のない状態の受信信号で、本実験での参照信号である。図 5.12(b)は対象物の端の位置での受信信号で、図 5.12(c)は対象物の中心位置での受信信号である。

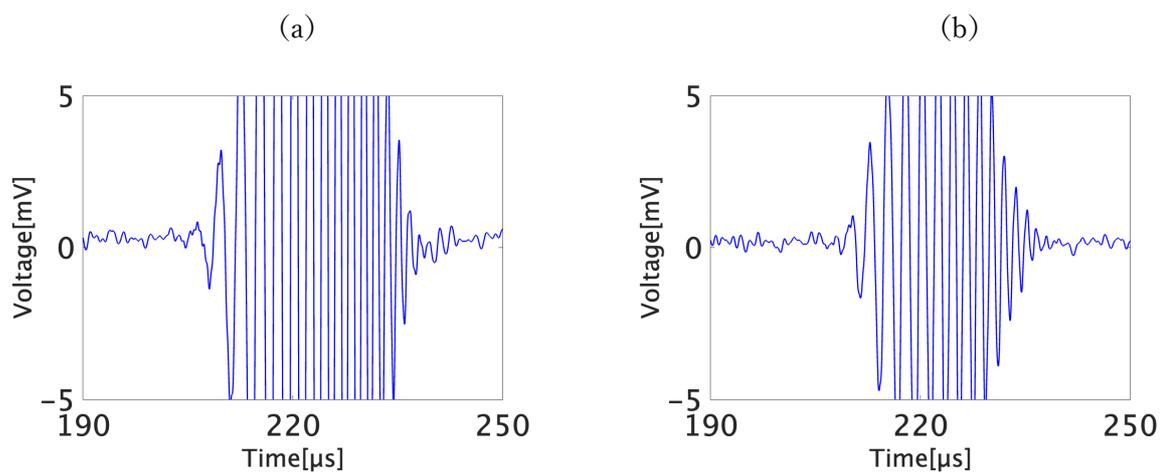
図 5.12(a)より対象物を設置していないときは直達波のみ観測されているのに対し、対象物に近づくにつれて振幅が大きく変化していることがわかる。また図 5.13 に対象物の中心位置でのパルス圧縮後の包絡波形を示しており、青線はパルス圧縮信号、赤線はパルス圧縮信号の包絡である。図 5.13 よりピークが 2 つ存在しているように見える。これは駆動信号にハニング窓をかけ、サイドローブを低減していることから 1 番大きなピークに対するサイドローブではなく、メインローブが 2 つ存在していると考えられる。

1 つ目は $194.7 \mu\text{s}$ で観測され、高周波超音波と差音の両者においてもほぼ同時刻に観測されていることから送受波器間を直線上に伝搬する直達波だと考えられる。2 つ目の成分は参照信号と最大 $0.80 \mu\text{s}$ の時間遅れが生じていることから対象物に回り込んだ回折波だと考えられる。アルミ棒の時にもパルス圧縮時には回折波による遅れ時間差が大きくなる傾向が確認された。アルミ棒の時と同様に回折は波長が長い低周波超音波の方が生じやすいため、その影響が強く出たと考える。またショートサイクルの差音と同様に高周波超音波では見られたパイプ中を横波に伝搬する成分やガイド波はパラメトリック差音と同様に SNR が悪かったことや Lamb 波の伝搬特性が原因で観測ができなかったと考える。

次に伝搬経路を直線上に伝搬すると考えられる直達波の伝搬時間から投影データの取得を行なった。図 5.14 に取得した投影データを示す。図 5.14 より対象物の中心位置に行くほど TOF が遅くなっていることから内部構造の変化を示していることがわかる。またショートサイクルの差音や高周波超音波と比較しても、ばらつきが少なく滑らかに中心位置での変化を識別できていることがわかる。これはパルス圧縮により、直達波の SNR と距離分解能が向上したため、正確な直達波の TOF の取得ができたと考えられる。また、相互相関時における 1 サイクル 400kHz の差音の理論上のパルス幅が $2.5 \mu\text{s}$ であるのに対し、パルス圧縮を行うことによりパルス幅が $2.0 \mu\text{s}$ と狭まり、時間分解能の向上にもつながったと考える。

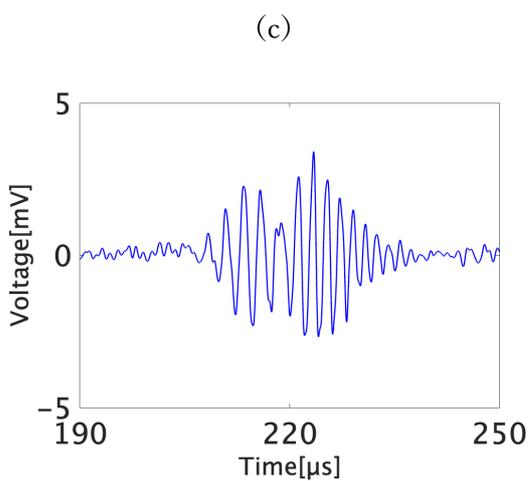
次に図 5.14 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 5.15, 5.16 に示す。音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを水色で示し、推定値を黒点線でプロットしている。図 5.15 より対象物のサイズに近い大きさに音速画像の取得ができているとわかる。またパイプの厚さを識別し、高周波超音波と同様に切り出した中心位置においては推定値である 6380 m/s に近い値で音速推定ができていることがわかる。

以上より、パルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音により内部構造の変化を捉え、高周波超音波と比較してばらつきが少なく SNR の向上により直達波成分の正確な TOF の取得ができたと考える。ただし、画像化においてパラメトリック差音を高周波に比べて有意な差は見られず、ほぼ同精度の結果となった。これは集束型トランスデューサを用いるなど方位分解能を向上し、投影データとして正確な TOF を用いることで画質の劣化を改善した画像化取得ができると考える。



(a) 対象物のない状態

(b) 対象物の端



(c) 対象物の中心位置

図 5.12 チャープパラメトリック差音での受信波形

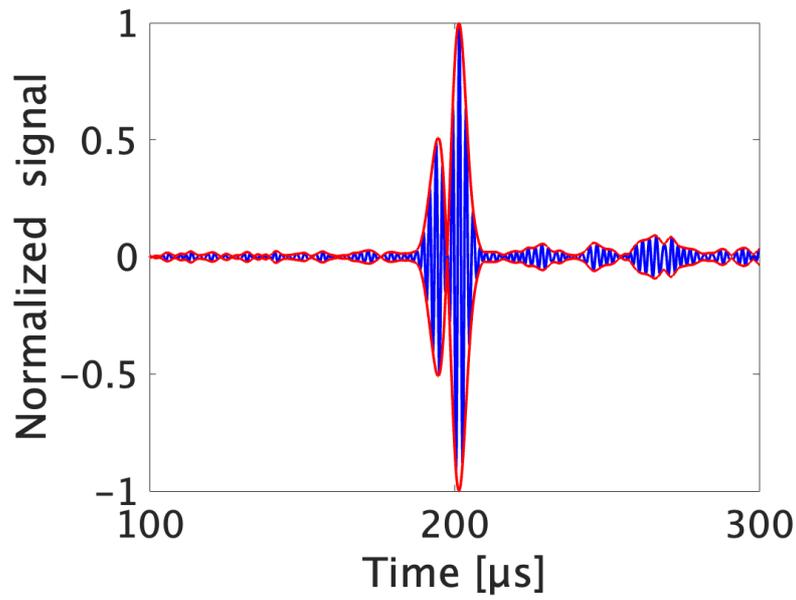


図 5.13 対象物の中心位置での包絡波形

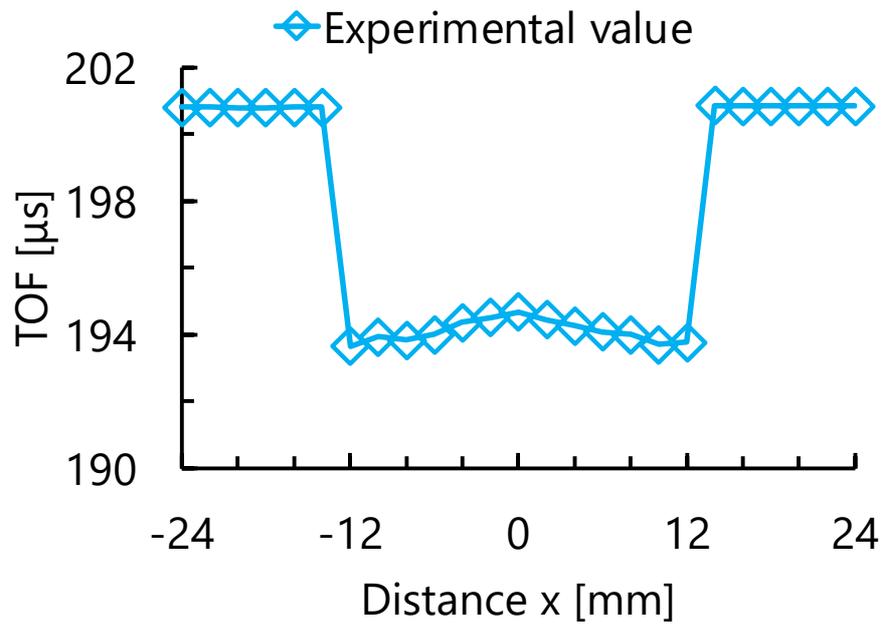


図 5.14 取得した投影データ

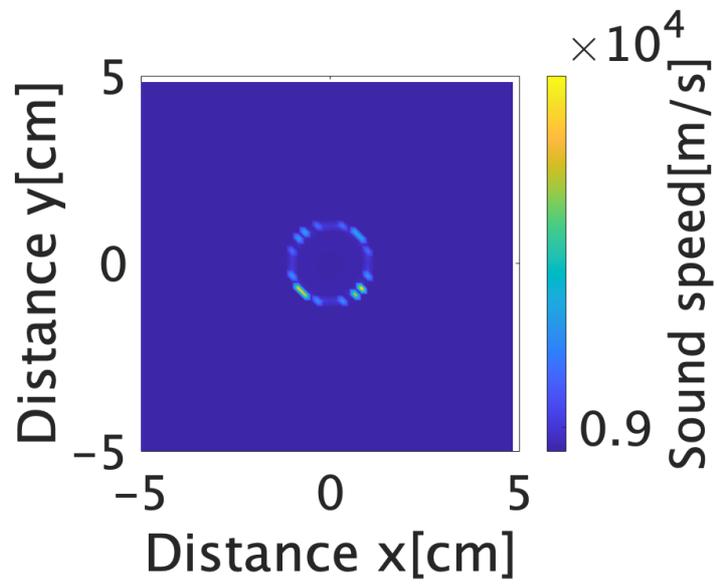


図 5.15 取得した音速画像

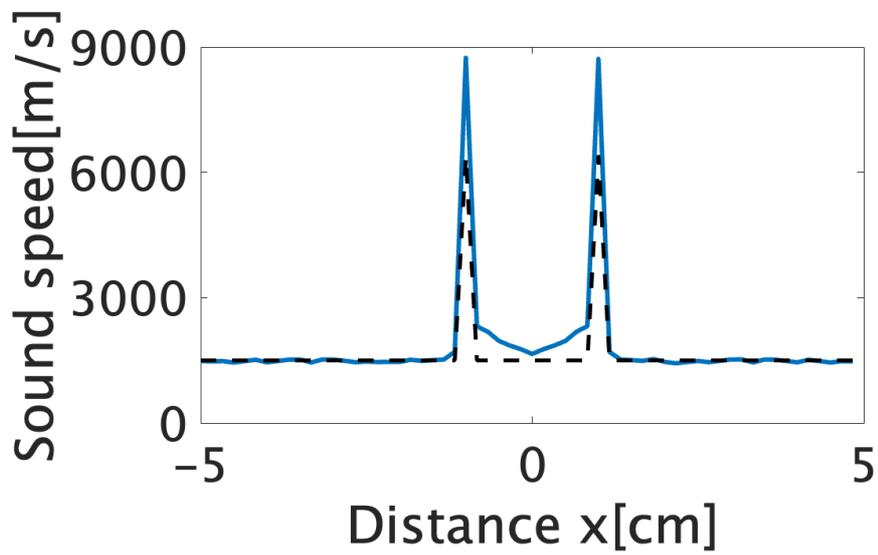


図 5.16 取得した音速推定値

第 6 章 内部に吸収媒質を持つ場合の

アルミニウムパイプを用いた音速画像の取得

次にパラメトリック差音が骨の内部の画像化に適するかを調べるために、アルミニウムパイプの内部に吸収媒質を挿入し、より骨に近い環境下での実験を行う。これまでと同様に高周波超音波とパラメトリック差音を用いて実験を行い、画像化に用いる伝搬時間の TOF や音速画像の比較を行う。

6.1 実験方法

6.1.1 実験準備

使用機器は表 3.1 のとおりとする。実験系を図 6.1 に示す。

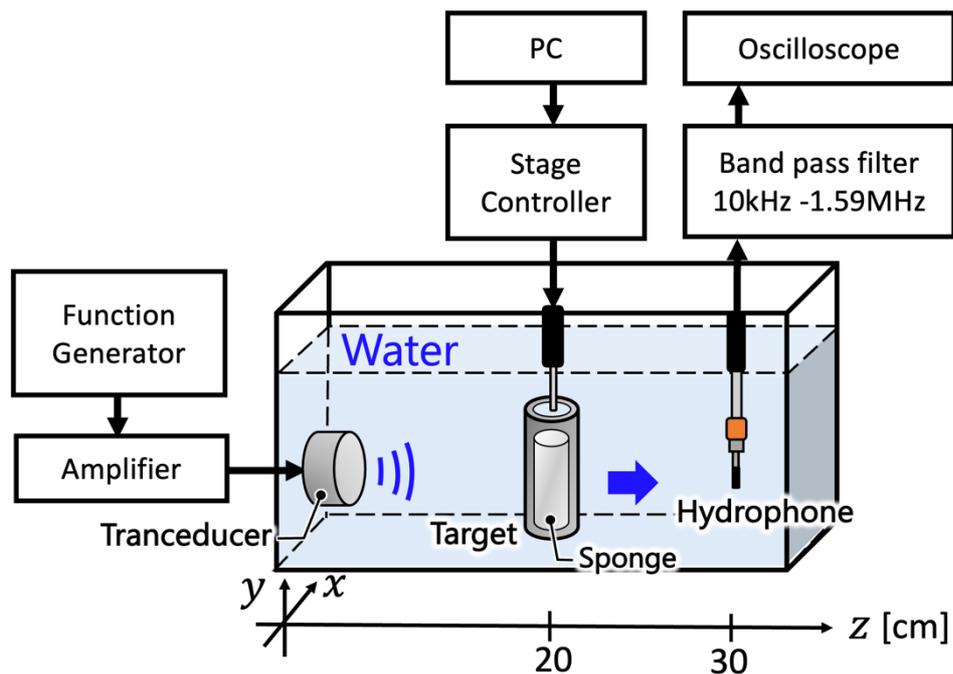


図 6.1 実験環境 (パラメトリック差音)

6.1.2 実験条件

第5章で用いたアルミニウムパイプにメラミンスポンジを挿入した。本実験は回転対称を仮定しており、 x 軸方向のみ走査としているため、スポンジもできるだけ同心円状になるように作成している。図6.2に使用したメラミンスポンジを示す。



図 6.2 使用したメラミンスポンジ (a) 側面図 (b) 正面図

6.2 実験結果及び考察

6.2.1 高周波超音波

2.2 MHz の高周波超音波を用いて実験を行い、取得した波形の一例を図 6.3 に示す。図 6.3(a) は対象物のない状態の受信信号で、本実験での参照信号である。図 6.3(b) は対象物の端の位置での受信信号で、図 6.3(c) は対象物の中心位置での受信信号である。図 6.3(a) より対象物を設置していないときは直達波のみ観測されているが、対象物を設置することで複数の成分が観測されていることがわかる。パイプの時と比べ $200 \mu\text{s}$ 以前では複数のモードが重なって現れていることがわかる。またスポンジを挿入したことで音波が吸収され、どの成分が直達波か判断できないほど直達波が減衰していることがわかる。

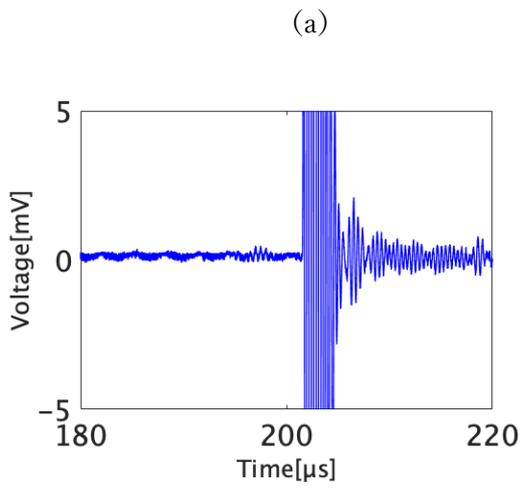
これらの複数の成分のうち、伝搬経路を直線上に到達する直達波の伝搬時間を画像化に用いる投影データとして取得した。図 6.4 に取得した投影データとスポンジの有無による投影データの比較を示す。図 6.4 より、パイプの場合には対象物の中心位置で TOF が変化していたのに対し、スポンジを入れることで TOF の変化がほとんど見られないことがわかる。これは使用したメラミンスポンジは空洞が少なく、固体材料として見ているのではないかと考えられる。また、図 6.5 に同実験を複数回行った結果を示す。

図 6.5 より複数回で両者の結果に差異が生じていることがわかる。これは吸収媒質の入れ方の違いによって生じたものだと考えられる。図 6.5 より 2 回目の結果はスポンジを入れなかった時と比べて中心位置での TOF の変化が確認できるものの、ばらつきの多い結果となった。更に図 6.6 に示す中心位置での相互相関の結果を見るとわかるように高周波超音波の場合 Lamb 波など

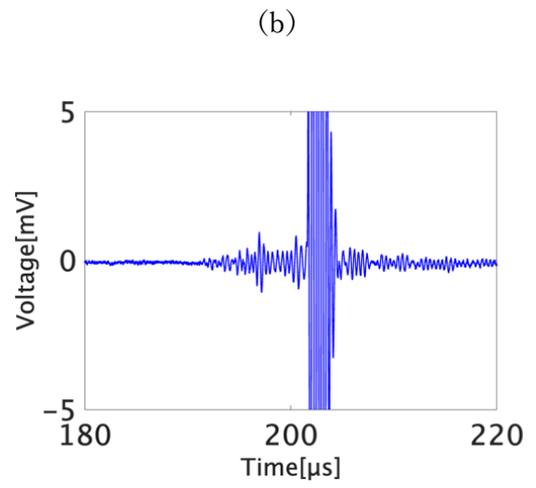
の複数のモードが現れるかつ内部に吸収媒質を入れたことで吸収の影響で直達波成分の振幅が大きく低下し、正しい直達波成分のピークを拾うことができなくなり、正確な TOF の取得ができなかったと考えられる。

次に図 6.4 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 6.7, 6.8 に示す。音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを青色で示し、推定値を黒点線でプロットしている。図 6.7 より対象物のサイズに近い大きさを音速画像の取得ができているとわかる。またパイプの厚さを識別し、切り出した中心位置においては推定値である 6380 m/s に近い値で音速推定ができていることがわかる。ただし、図 6.6 のように相互相関の結果において複数のピークがほぼ同じ大きさで存在しており、どのピークを選択するか取得する投影データも変化する。したがって、本実験で得られた画像は対象物を表した正確な画像であると言い切ることが困難であると考えられる。

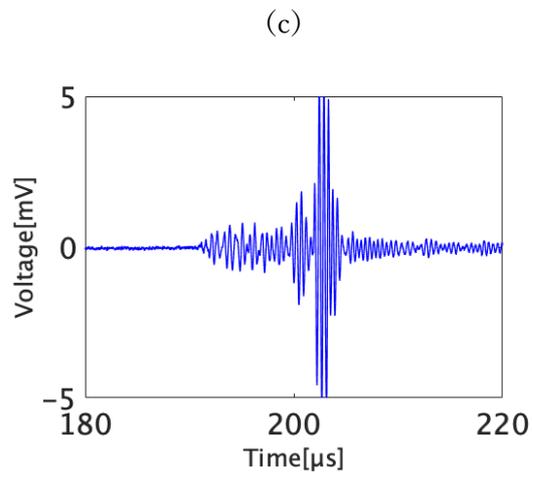
以上より、取得波形において吸収媒質の挿入により直達波の SNR が低下したことで他の成分との分離ができないことや相互相関時のピークにノイズ成分が載ってしまい正確な直達波の TOF を取得するのが困難となった。したがって、高周波超音波を使って内部に吸収媒質を入れた際にも内部構造を持つ対象物に対して、正確な音速画像の取得が困難であることがわかる。



(a) 対象物のない状態



(b) 対象物の端



(c) 対象物の中心位置

図 6.3 高周波超音波での受信波形

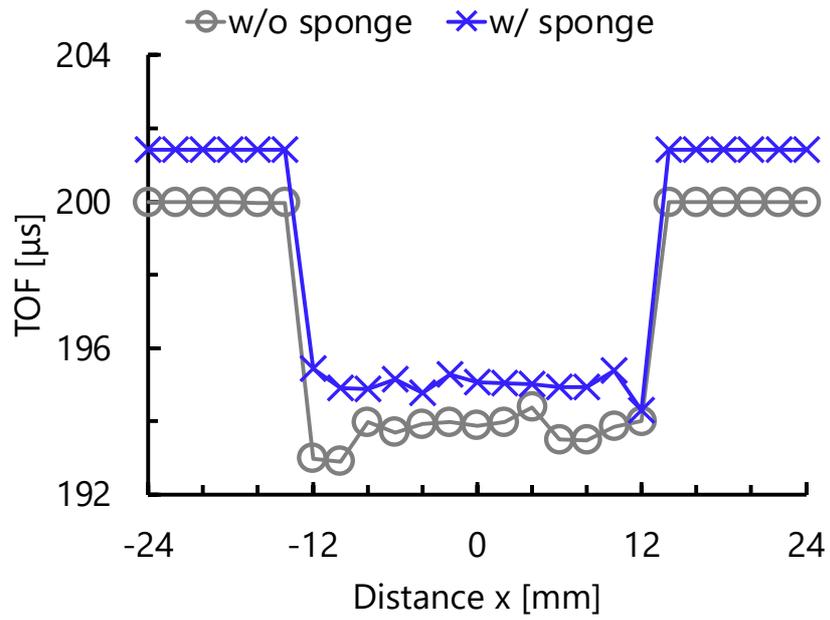


図 6.4 取得した投影データ

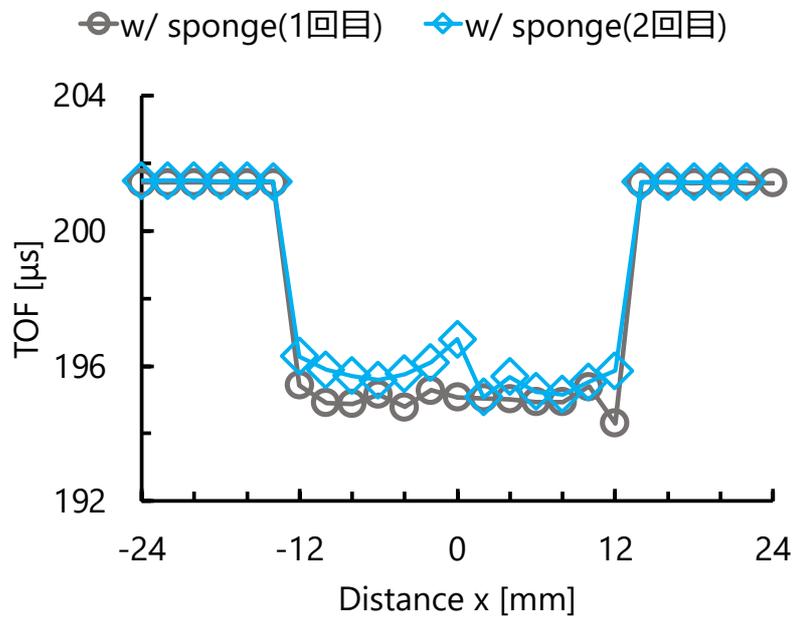


図 6.5 複数回の実験により取得した投影データ

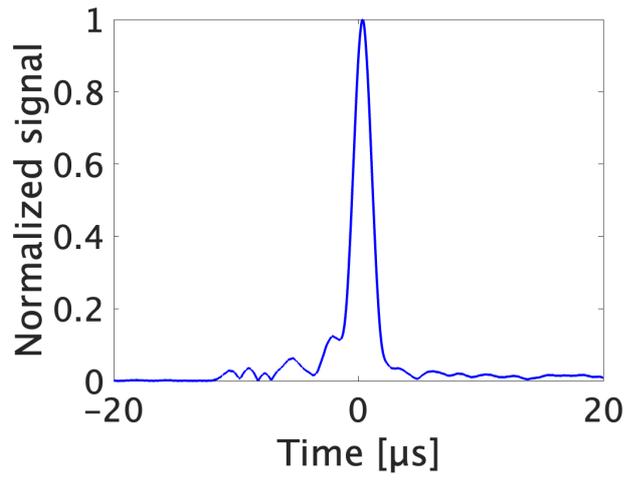


図 6.6 対象物の中心位置での相互相関

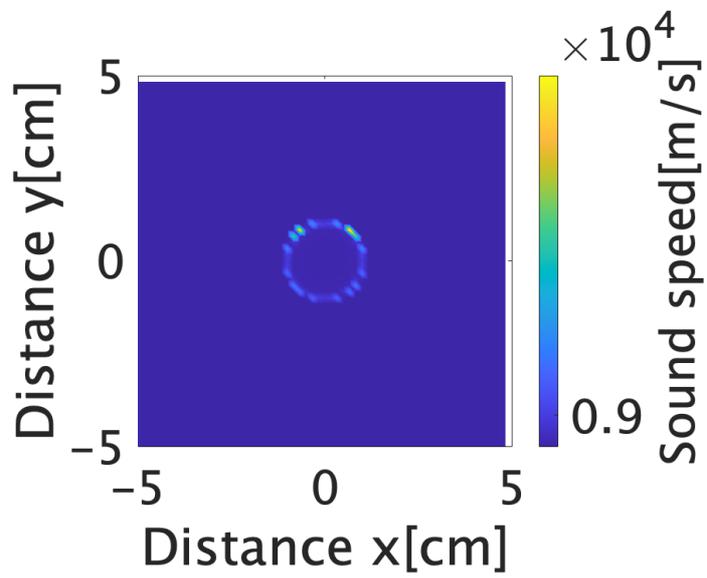


図 6.7 取得した音速画像

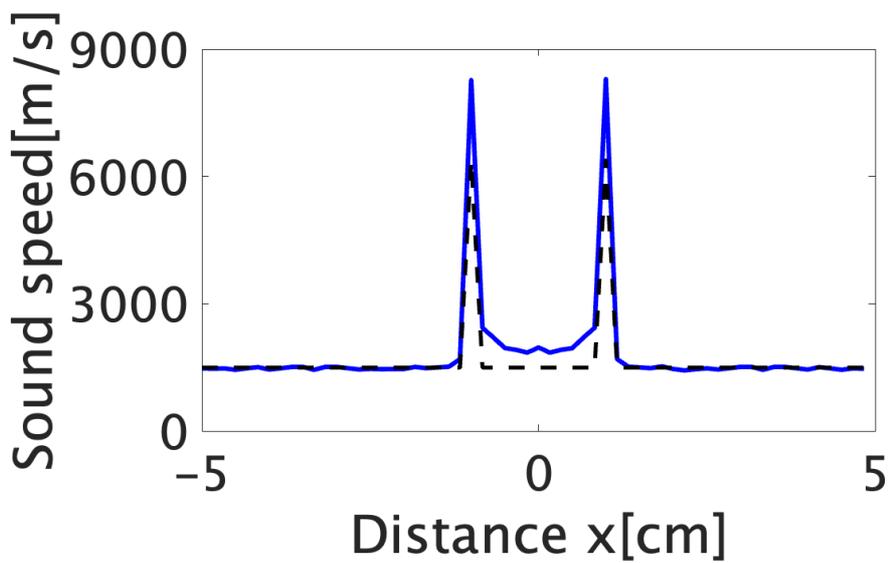


図 6.8 取得した音速推定値

6.2.2 パラメトリック差音

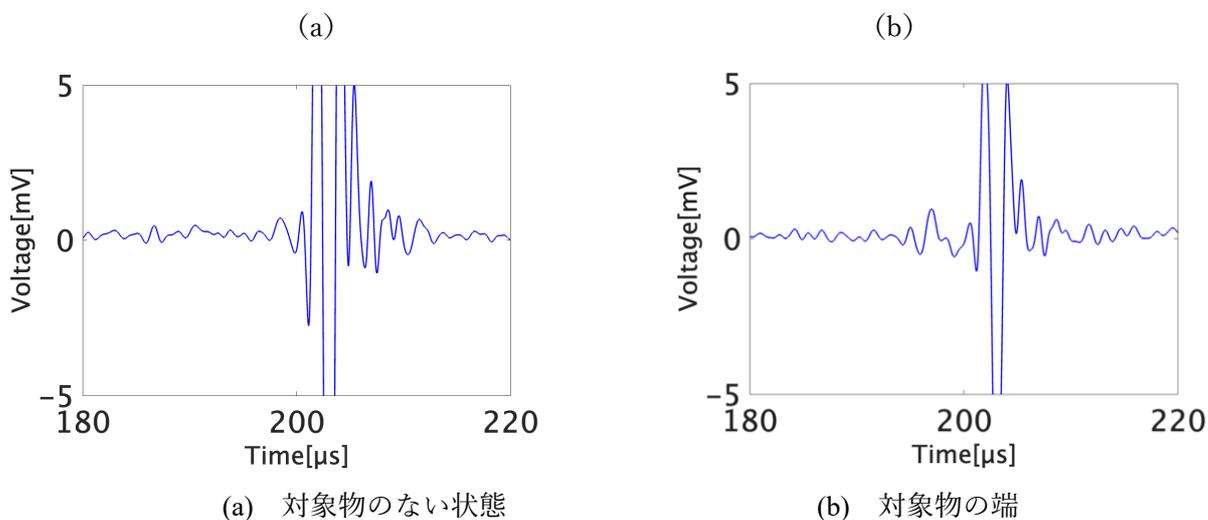
400 kHz, 1 サイクルのパラメトリック差音を用いて実験を行い, 取得した波形の一例を図 6.9 に示す. 図 6.9(a)は対象物のない状態の受信信号で, 本実験での参照信号である. 図 6.9(b)は対象物の端の位置での受信信号で, 図 6.9(c)は対象物の中心位置での受信信号である.

図 6.9(a)より対象物を設置していないときは直達波のみ観測されているが, 対象物を設置することで大きく 2 つの成分が観測されていることがわかる. これはスポンジを入れなかった時と同様の結果で 1 つ目の成分が直達波, 2 つ目の成分が回折波であると考え. スポンジを挿入しなかった時の結果と比較すると, 直達波成分の振幅がわずかに低下しているものの, 受信波形に関して大きな変化は見られなかった. これはパラメトリック差音が高周波超音波と比べて吸収に強いいためパイプの中に吸収媒質を入れても大きく波形が減衰せず観測できたと考える.

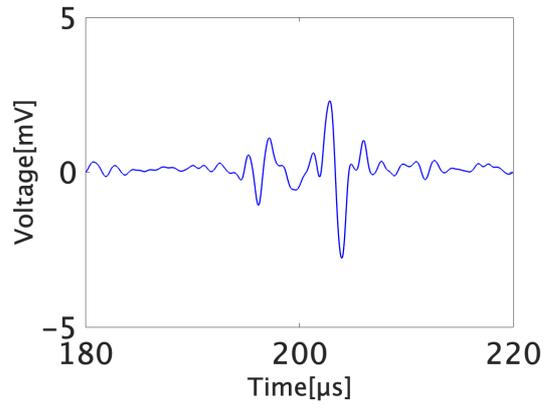
これらの成分のうち, 伝搬経路を直線上に到達する直達波の伝搬時間を画像化に用いる投影データとして取得した. 図 6.10 にスポンジの有無による投影データの比較を示し, 本実験の結果を赤色でプロットしている. また図 6.10 にはスポンジを入れた際の高周波超音波の結果を示している. 図 6.10 よりスポンジを入れても, スポンジを挿入しなかった時と同様に中心付近で TOF が変化していることが確認できた. これは取得波形からもわかるように低周波超音波は吸収に強いいため, スポンジを入れても直達波の SNR が大きく低下することなく, 直達波の観測ができ TOF の取得を行うことができたと考え.

次に図 6.10 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 6.11, 6.12 に示す. 音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを赤線で示し, 推定値を黒点線でプロットしている. 図 6.11 より対象物のサイズに近い大ききで音速画像の取得ができているとわかる. またパイプの厚さを識別し, スポンジを挿入しなかった時と同様に切り出した中心位置においては推定値である 6380 m/s に近い値で音速推定ができていることがわかる.

以上より, パラメトリック差音を使うことで内部に吸収媒質を持つ対象物に対して内部構造の変化を捉え, 直達波成分の正確な TOF の取得ができたと考える. また, 画像化においてはパイプの厚さを捉え, 対象物の持つ音速に近い値での推定ができたと考える.



(c)



(c) 対象物の中心位置

図 6.9 パラメトリック差音での受信波形

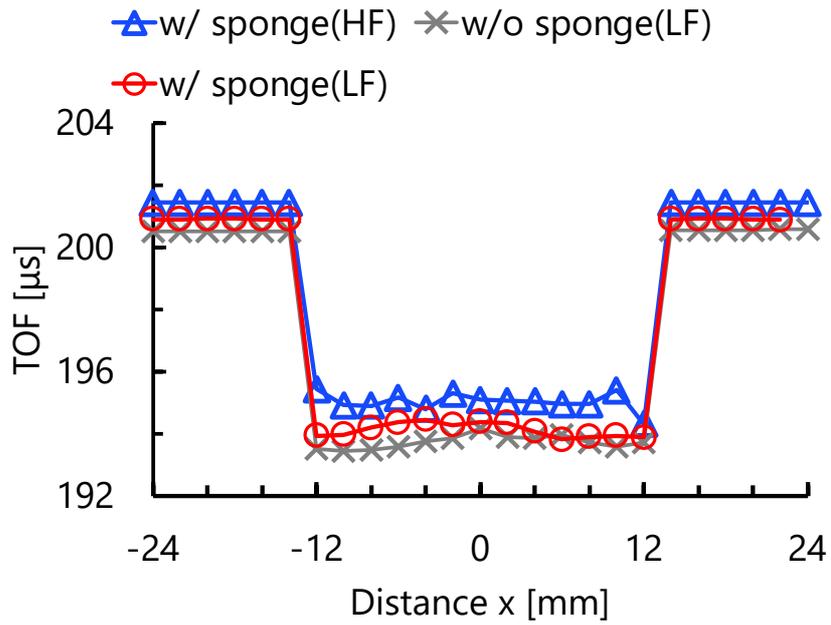


図 6.10 取得した投影データと高周波超音波との比較

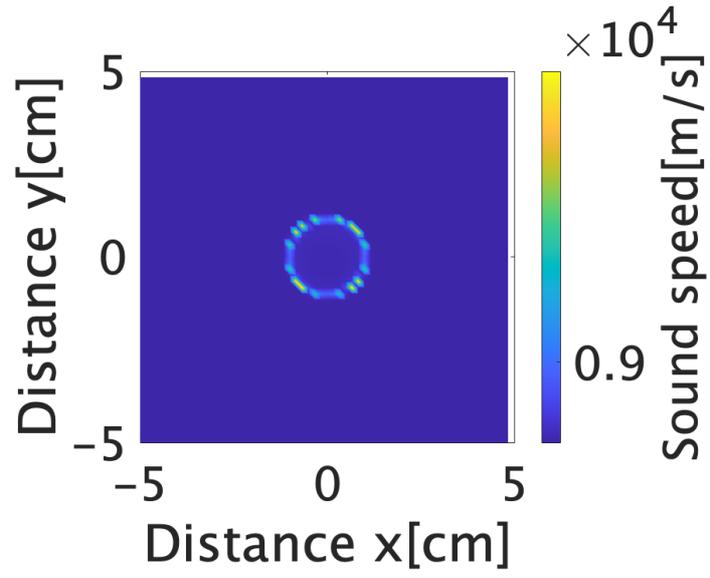


図 6.11 取得した音速画像

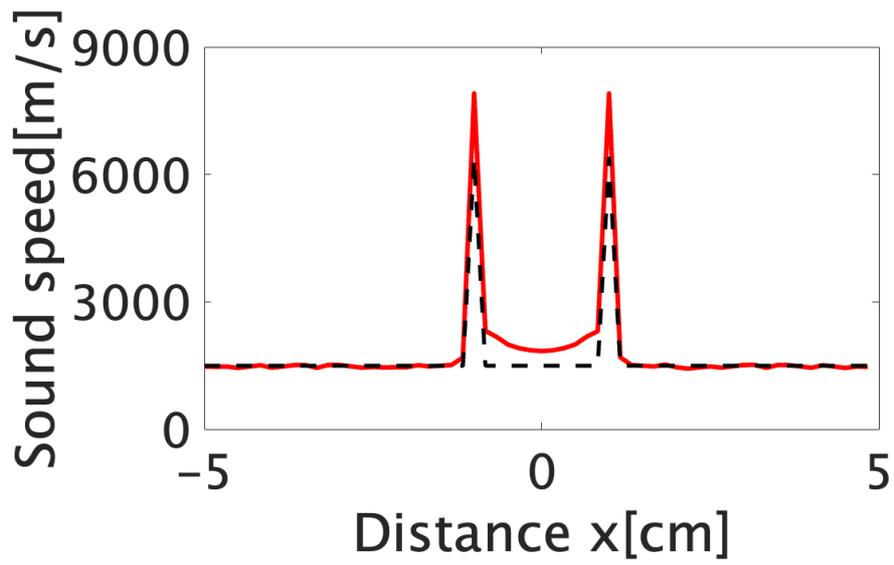


図 6.12 取得した音速推定値

6.2.3 パラメトリック差音によるパルス圧縮

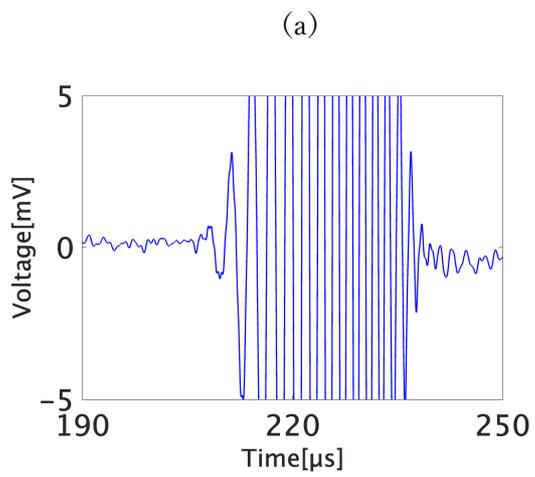
チャープパラメトリック差音を用いて実験を行い、取得した波形の一例を図 6.13 に示す。図 6.13(a)は対象物のない状態の受信信号で、本実験での参照信号である。図 6.13(b)は対象物の端の位置での受信信号で、図 6.13(c)は対象物の中心位置での受信信号である。

図 6.13(a)より対象物を設置していないときは直達波のみ観測されているのに対し、対象物に近づくにつれて振幅が大きく変化していることがわかる。また図 6.14 に対象物の中心位置でのパルス圧縮後の包絡波形を示しており、青線はパルス圧縮信号、赤線はパルス圧縮信号の包絡である。図 6.14 より図 5.13 と比較すると 1 つ目のピークの大きさが小さくなっているものの同様にピークが 2 つ存在していることがわかる。これらの成分はスポンジを挿入しなかった時と同様に 1 つ目は送受波器間を直線上に伝搬する直達波で 2 つ目の成分は対象物に回り込んだ回折波だと考えられる。スポンジを挿入したことによって特に信号の高周波成分において吸収の影響を受けたものの、高周波超音波と比べると全体的に減衰が小さいことがわかる。これはパラメトリック差音が吸収に強いいため特に低周波成分において吸収媒質の影響を抑えることができたと考える。また図 6.14 の回折波の 70 μ s 後の 270 μ s 付近で観測されたピークは別の日に行った実験でも同時刻に観測されていることから実験環境から生じたものであると考えられる。対象物の表面に衝突した際に生じた散乱波や水槽壁からの反射によるものであると考えられる。

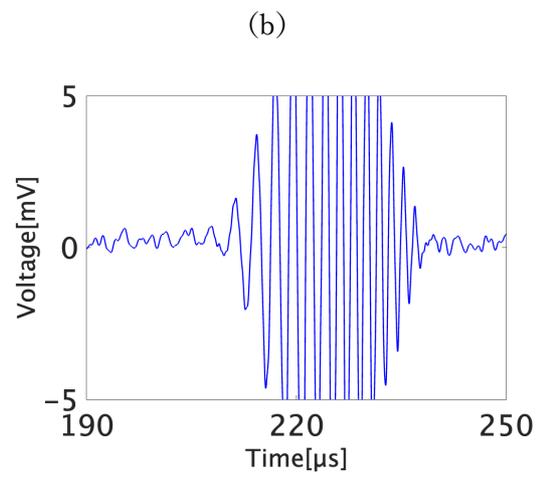
図 6.15 に吸収媒質を入れた場合の実験を複数回行った投影データの結果、図 6.16 には吸収媒質の有無による投影データの比較の結果を示す。図 6.15 より、複数回行っても変化量に差はあるものの同様に中心付近での TOF の変化が見られたことから再現性の確認ができたと考える。また図 6.16 より、吸収媒質を入れたことで取得した投影データに大きな差異が生じていないことがわかる。これは取得波形が吸収媒質を挿入した際にも十分な SNR で観測できていたことから投影データの取得に大きな影響を与えなかったと考えられる。本研究で用いている手法では、透過波の受信信号が極端に小さくなると、パルス圧縮後の SNR も低下してしまうため、透過波の受信信号がある程度十分な強度で受信できる対象物であれば投影データの取得が可能であると言える。

次に図 6.15 の投影データを用いて取得した音速画像と音速推定値の結果を図 6.17, 6.18 に示す。音速推定値は音速画像の中心位置の値を切り出してプロットしたものを水色で示し、推定値を黒点線でプロットしている。図 6.17 より対象物のサイズに近い大きさに音速画像の取得ができていとわかる。またパイプの厚さを識別し、スポンジを挿入しなかった時と同様に切り出した中心位置においては推定値である 6380 m/s に近い値で音速推定ができていたことがわかる。

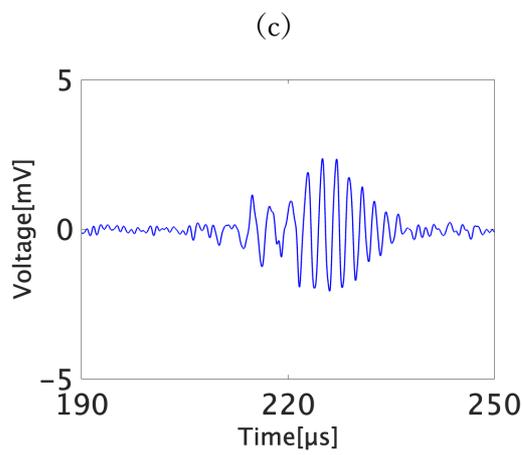
以上より、パルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音により内部に吸収媒質を持つ対象物に対して吸収の影響を軽減し、直達波の十分な SNR の確保ができたことから正確かつ内部構造の変化を捉えた TOF の取得ができたと考える。また、画像化においてはパイプの厚さを捉え、対象物の持つ音速に近い値での推定ができたと考える。ただし、吸収媒質を挿入しなかった場合と同様に画像化においてパラメトリック差音を高周波に比べて有意な差は見られず、ほぼ同精度の結果となった。これは集束型トランスデューサを用いるなど方位分解能を向上し、投影データとして正確な TOF を用いることで画質の劣化を改善した画像化取得ができると考える。



(a) 対象物のない状態



(b) 対象物の端



(c) 対象物の中心位置

図 6.13 チャープパラメトリック差音での受信波形

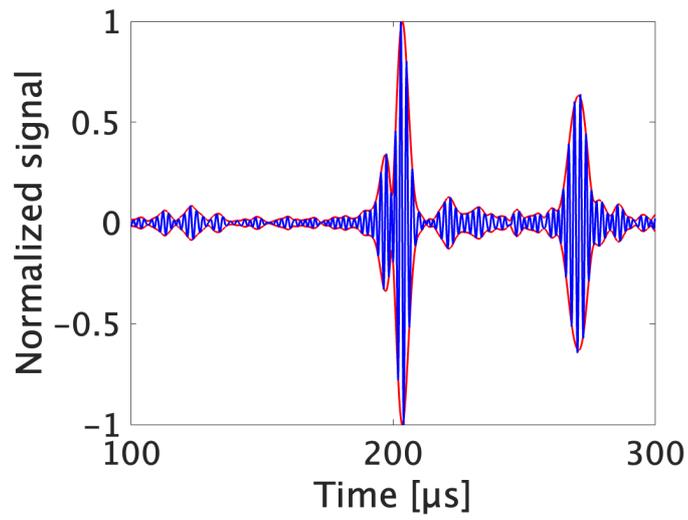


図 6.14 対象物の中心位置での包絡波形

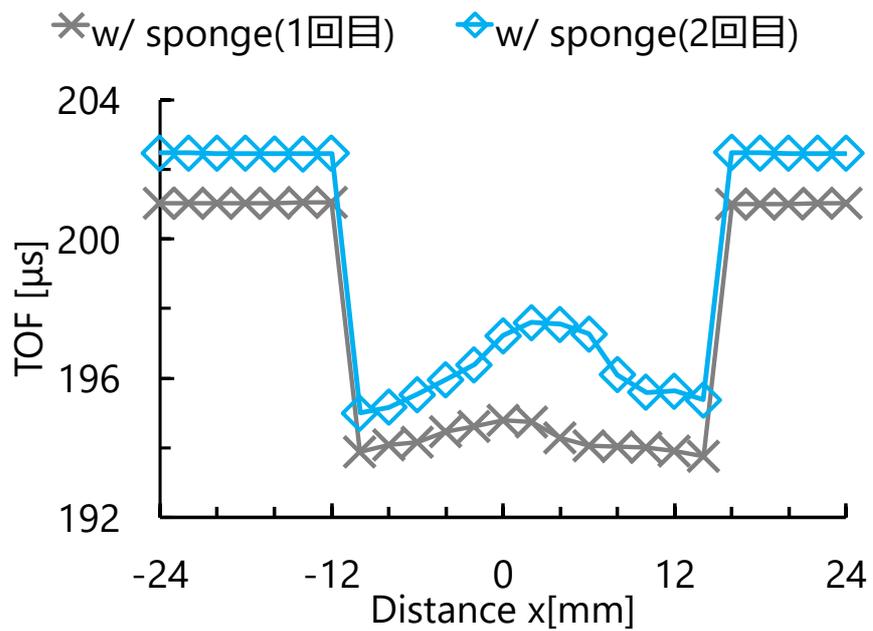


図 6.15 複数回の実験により取得した投影データ

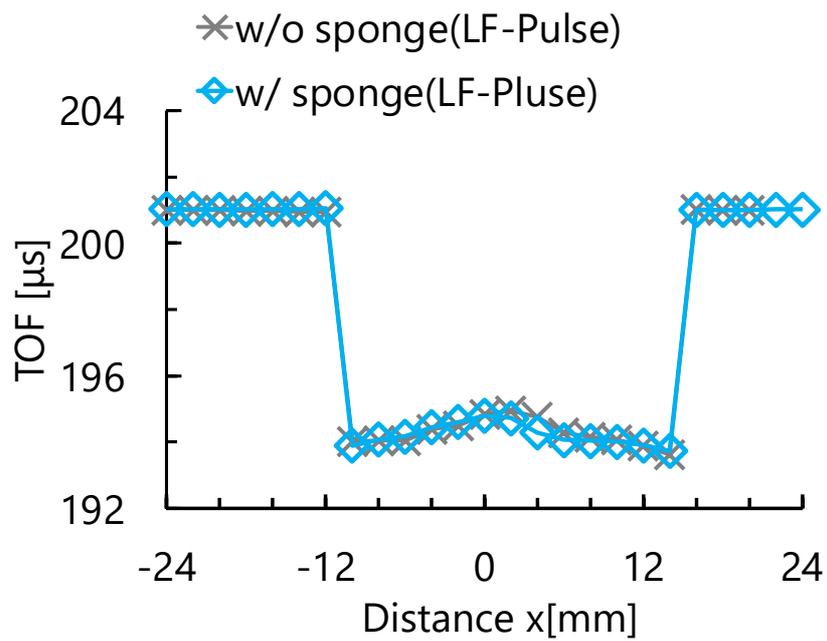


図 6.16 吸収媒質の有無による比較

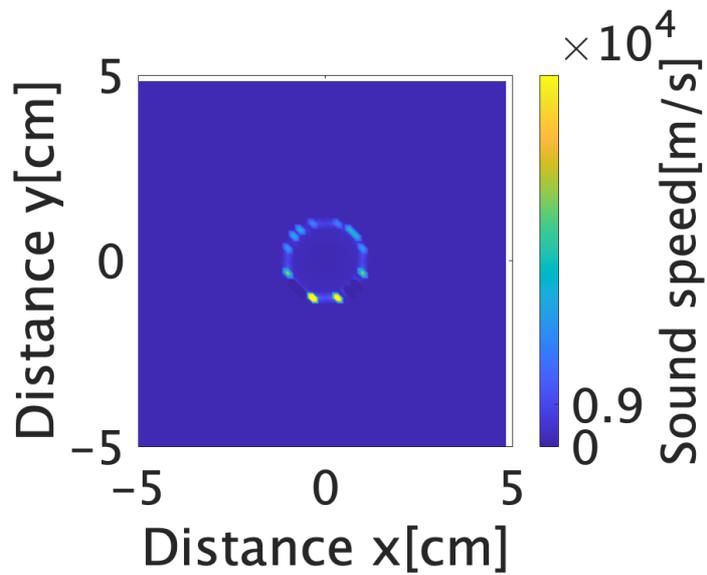


図 6.17 取得した音速画像

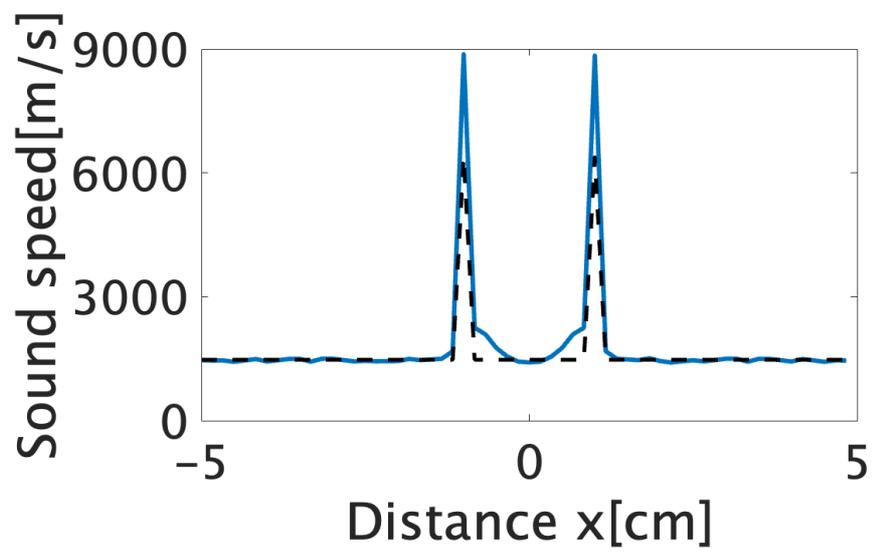


図 6.18 取得した音速推定値

第7章 結論

本研究の目的は、パラメトリック差音を用いて内部構造を持つ対象物の画像化を行うことであった。

まず、画像化を行うための性能評価として内部が均一なアルミニウム丸棒を用いて実験を行った。取得波形においては高周波超音波、パラメトリック差音、パルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音の全てにおいて対象物を設置することで3つの成分が現れることがわかった。それらの成分のうち、直達波の伝搬時間 TOF を画像化に用いる投影データとして取得した結果、高周波と差音では伝搬時間に大きな差は生じなかった。また画像化についても全ての周波数において同様の結果となり、パラメトリック差音を用いた場合でも空間分解能の良い高周波超音波と同精度で音速画像の取得ができることがわかった。ただし、本実験ではビーム幅が数 10 mm ある平面トランスデューサを用いたため、取得した投影データが不連続となり、音速推定の精度が下がってしまったと考えられる。そのため走査間隔と同程度のビーム幅を持つ集束型トランスデューサを用いることで音速推定の精度を上げることができると考える。

内部構造を持つ対象物の画像化では、高周波超音波の場合、取得波形において複数のモードや散乱波が重なって現れたため、投影データにおいて直達波の正確な TOF の取得ができず、ばらつきや再現性の取れないデータとなった。しかし、パラメトリック差音やパルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音の場合、SNR の低下や臨界角の影響で C-Lamb 波が励起されにくくなったことにより取得波形において直達波と回折波の大きく2つの成分しか現れなかった。その結果、直達波の正確な TOF の取得ができ、ばらつきが少なく中心付近での TOF の変化を捉えることができた。音速画像の取得と音速推定の結果に関してはパイプの厚さを識別し、対象物の持つ音速に近い値で推定できたと考える。

内部に吸収媒質を挿入した場合の対象物の画像化では、高周波超音波の場合直達波の振幅が大きく減衰して十分な SNR の確保や他の成分との分離ができず、正確な TOF の取得が困難となった。それに対し、パラメトリック差音やパルス圧縮技術を適用したパラメトリック差音の場合、特に信号の高周波成分において吸収の影響は受けたものの、高周波超音波と比べると全体的に減衰が小さいことがわかる。これはパラメトリック差音が吸収に強いいため特に低周波成分において吸収媒質の影響を抑えることができたと考えられる。さらに取得した投影データにおいても中心付近で TOF の変化が確認できたことから吸収媒質のある状況においても十分な SNR で直達波を観測でき、正確な TOF の取得が可能であると考えられる。ただし、吸収媒質を挿入しなかった場合と同様に画像化においてパラメトリック差音を高周波に比べて有意な差は見られず、ほぼ同精度の結果となった。これは集束型トランスデューサを用いるなど方位分解能を向上し、投影データとして正確な TOF を用いることで画質の劣化を改善した画像化取得ができると考える。

以上のことからパラメトリック差音を用いることで内部に吸収媒質を持つ対象物に対しても内部構造の変化を捉えることができ、内部構造の可視化に適すると考える。更に複雑な環境下での画像を取得するためには SNR が重要であると考えられる。そこでできるだけチャープパラメトリック差音を用いる際は周波数帯域幅と掃引時間を変更することで SNR と距離分解能を向上し、人

体などの異なる環境下でも画像化の取得を行うことが可能になると考える。

今後としては、集束型トランスデューサを用いて方位分解能を上げ、高精度の音速画像と音速推定を行うべきだと考えられる。更に形状の複雑な対象物で実験を行う必要がある。本実験では問題を簡潔化するために回転対称かつ音速値など既知の値が多い対象物を用いたが、実際の人体においては未知の情報を扱うことになる。

したがって、未知の情報の多い対象物に対しての画像化が可能かを実験により評価するべきであると考え。将来的には実際の骨を用いての実験により実用化に向けての評価を行いたいと考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり，丁寧なご指導をして下さった，本研究室の野村英之教授に深く感謝いたします。また多くの助言や研究に関して相談をさせていただいた研究室の皆様にも感謝申し上げます。

参考文献

- [1] いいほね運営事務局, ”骨粗しょう症とは,”<https://www.iihone.jp/fear.html>(参照2022-09-05).
- [2] 塚越, ”第2回: CT画像の基本と画像表示,”*Medical Imaging Technol.*, **27**, No.4, pp.258–262 (2009).
- [3] A.Koch, F.Stiller, R.Lerch and H.Ermert, “3D-pulse-echo-tomography for breast cancer and rheumatoid arthritis diagnosis — add-on-system and latest in-vivo-results, ” 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) , pp. 1–4 (2016).
- [4] K.Kakuma, Y.Norose, K.Mizutani, “Interval of Observation Plane in Visualization of Region near Defects in Billets Using Ultrasonic Computerized Tomography Method,” *Japanese Journal of Applied Physics*, **52**, 07HC10 (2013).
- [5] P.Lasaygues, J.P.Lefebvre, “Cancellous and Cortical Bone Imaging by Reflected Tomography,” *Ultrasonic imaging*, **23**, 55–70 (2001).
- [6] T.Hachiken, S.Nakanishi, M.Matsukawa, “Effect of medullary cavity in cancellous bone on two-wave phenomenon,” *Japanese Journal of Applied Physics*, **55**, 07KF16 (2016).
- [7] W.Chen, C. Shin, C.Huang, “High Frequency Ultrasound Computed Tomography for Small Animal Imaging Applications,” 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium , pp1415–1418 (2011).
- [8] 油田, 中島, “3-2 超音波CT, ” *映情学誌*, **35**, 31–35 (1981).
- [9] P.J. Westervelt, “Parametric acoustic array, ”*J.Acoust. Soc. Am.*, **35**, 535–537 (1963).
- [10] I.Mano, K.Horii, F.Fujita, Y.Nagatani, M.Matsukawa, “Influence of the circumferential wave on the fast and slow wave propagation in small distal radius bone,” *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, 07KF17 (2014).
- [11] 日本超音波医学会 (編), *新超音波医学 第1巻 医用超音波の基礎*, (医学書院, 東京, 2000), pp.30-31.
- [12] 秋山 (編), 日本音響学会 (編), 蜂屋, 坂本, *アコースティックイメージング*, (コロナ社, 東京, 2010), pp.49–51.
- [13] 橋本, 篠原, *C言語による画像再構成の基礎*, (医療科学社, 東京, 2006), pp.251–253.
- [14] 鎌倉, *非線形音響学の基礎*, (愛智出版, 東京, 2010), pp. 65, 167–172.
- [15] 吉田, *電子情報通信学会 (編), 改訂 レーダ技術*, (電子情報通信学会, 東京, 1999), pp. 275–280.
- [16] 川崎, 滝沢, 芝田, “パルス圧縮法を用いた開口合成 TOFD 法の適用研究, ”*IIC REVIEW*, **49**, pp. 33–38 (2013).
- [17] S.Hirata, L.Haritaipan, K.Hoshiba, H.Hachiya, N.Niimi, “Non-contact measurement of propagation speed in tissue-mimicking phantom using pass-through airborne ultrasound,” *Japanese Journal of Applied Physics*, **53**, 07KC17 (2014).
- [18] 佐藤, “非接触超音波探傷検査による複合材構造のはく離評価, ”*IHI 技報*, Vol.48, No.3, pp.165–169 (2008).

- [19] 田中, 小倉, “超音波探触子の送信と受信それぞれの指向性,” 信学技報, pp.123–128 (2019).
- [20] H.Nomura, H.Adachi, T.Kamakura, G.T.Clement, “Feasibility of low-frequency directive sound source with high range resolution using pulse compression technique,” Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 07KC03 (2014).
- [21] オリパス株式会社, “9-1 材料音速一覧表,” <https://www.olympus-ims.com/ja/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/>(参照 2022-07-11).
- [22] W.Chen, C.Shin, C.Huang, “Three Dimension High Frequency Ultrasound Computed Tomography for Detecting the Testicular Tumor *in vitro*,” 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, (2014).
- [23] 角間, 水谷, 若槻, “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, **70**, No.2, pp.I_214–I_221 (2014).
- [24] 桂, 大友, “逐次近似再構成法を用いた被曝低減,” Medical Imaging Techonology, **32**, No.4, pp.267–271.
- [25] 川野, 西野, “円周 Lamb 波による自己干渉性を利用した配管肉厚測定法における周波数特性の校正による高精度化,” 日本機械学会 2013 年度年次大会, No.13, J041045
- [26] 高村, 今野, “平板中のガイド波の伝搬解析,” 計測自動制御学会東北支部第 251 回研究集会, No.10, pp.1–7 (2009).
- [27] 遠藤, 今野, “ノッチ型欠陥を有する金属板中を伝搬する Lamb 波の観測,” 計測自動制御学会東北支部第 266 回研究集会, No.4, pp.1–8 (2011).

付録 A パラメトリック差音による指向性の確認

対象物の位置を通常の実験位置よりも後方に設置し、対象物を設置することによるパラメトリック差音の指向性の変化を確認した。

A.1 実験方法

実験環境を図 4.2、使用機器は第 3 章の音源の音場測定と同様である。対象物は第 5 章で用いたアルミニウムパイプを用いた。対象物を通常の実験より 5 cm 後方である音源面から約 25 cm の位置に音軸と直交するように設置した。

A.2 実験結果及び考察

図 A.1 に対象物の設置位置による指向性の変化を示す。縦軸は振幅を最大値で規格化している。図 A.1 より対象物を後ろに設置したことで振幅の変化がわずかに小さくなっていることが確認できる。このことからパラメトリック差音の指向性が悪くなっていると考えられる。指向性の変化は実験時に取得した波形がどこで生成された差音なのかを調べるヒントになると考える。もし対象物に衝突した後に生成された差音を観測していた場合、対象物を低周波成分が通過していないことになり、低周波超音波のメリットを活かすことができていないと考えられる。そのため、対象物にぶつかる前に生成された差音を対象物内を伝搬し、残った成分を観測しているというのが本研究の理想である。対象物に衝突する前に生成された差音を観測していた場合、対象物の後ろでは差音の生成が止まっているため、音波が広がり、指向性が悪くなると考えられる。しかし、対象物に衝突する前に生成された差音でも 1 次波は対象物に衝突しても指向性が保たれることから、ある程度のビーム幅を保って遠方まで伝搬すると考えられるため、指向性の変化のみでどこで生成された差音かどうかを結論づけるのは困難であると考えられる。したがって本実験において対象物を後方に設置することによって指向性が悪くなっていることを確認したが、今後理論計算を行うことにより、さらに差音の生成位置について究明していく必要があると考える。

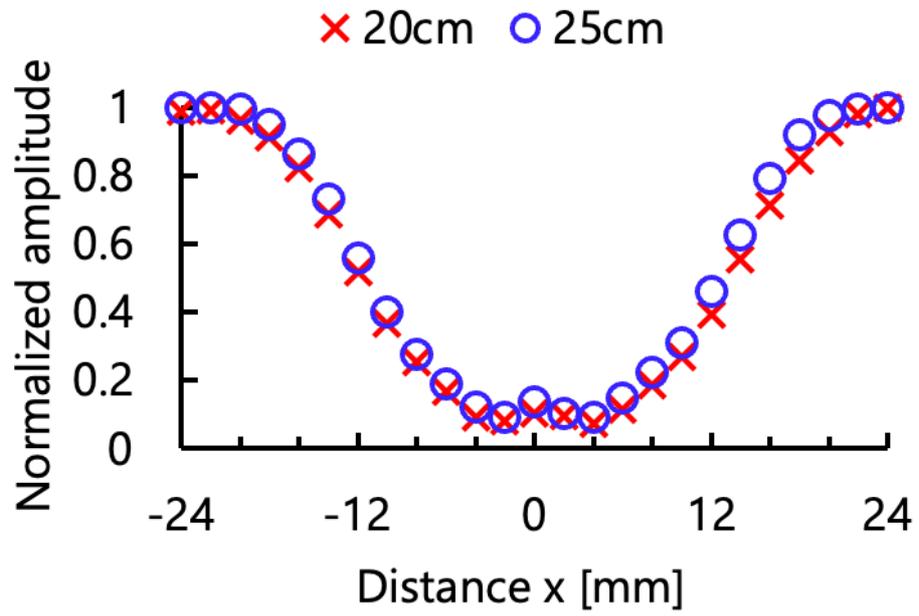


図 A.1 対象物の設置位置による指向性の変化. それぞれ最大値で規格化している.