

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350562

研究課題名(和文) 高空間分解能パラメトリック差音超音波イメージングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of parametric sound imaging system with high range resolution

研究代表者

野村 英之(Nomura, Hideyuki)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：90334763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：低周波超音波イメージングシステム実現の基礎検討を行った。まず、低周波数であるにもかかわらず指向性の鋭いパラメトリック超音波に対し、パルス圧縮技術を適用することで距離分解能の改善を試みた。その結果は、チャープ変調されたパラメトリック超音波の生成が可能であること、またパラメトリック超音波においてもパルス圧縮技術の適用が有効であることが示された。パルス圧縮技術を適用したパラメトリック音源による、超音波イメージングの実験的検討が行われた。その結果は、提案方法が距離分解能の改善された超音波イメージを作ること示した。

研究成果の概要(英文)：A fundamental study of low-frequency ultrasound imaging system has been developed in this study.

Range resolutions of parametric sound at low frequency with the sharp directivity was improved by the application of pulse compression technique. The results indicate the generation of chirp modulated parametric sounds and the realization of pulse compression of the parametric sound. Finally, low frequency ultrasound images were obtained by the application of the compressed parametric sounds. This result indicates that the proposed method generates low frequency ultrasound images with improved range resolutions.

研究分野：音響エレクトロニクス

キーワード：超音波 非線形音響学 波形歪 パラメトリック音源 パルス圧縮

1. 研究開始当初の背景

超音波診断装置は放射線のように被曝の影響がないことから、人間の体内を用意に可視化する重要な装置のひとつである。これは媒質内部の硬さの異なる部分や物体を映像化する、超音波イメージング技術を利用している。

超音波イメージングでより鮮明な画像を得るため、超音波の波長を短く、すなわち周波数を高くすることで高空間分解能が行われている。このような超音波イメージングの問題点として、媒質による超音波エネルギーの吸収がある。特に超音波周波数が高くなるほどエネルギー減衰が大きくなるため、体内の深い位置や肥満体の可視化がこんなである。

このような深い位置の画像化には、通常の超音波診断装置の高周波超音波(1-10 MHz程度)より減衰の少ない低周波超音波(100-500 kHz)の利用が有効である。ただし、低周波超音波は球面拡散しやすいため、方位分解能が悪い。この問題の解決のため、低周波で指向性のあるパラメトリック差音の利用が有効であると考えられる。これは2周波数成分をもつ超音波を同軸方向に放射したときに、媒質の非線形効果により発生する差周波数成分の超音波のことをいう。この超音波は元々放射された高周波超音波と同じように鋭い指向性を持ち、また音波の主軸方向以外への放射が少ないため、虚像の発生が抑えられるメリットがある。

このように深い位置の画像化が可能となるパラメトリック差音超音波イメージングであるが、通常の診断用超音波に比べ低周波数であるため距離分解能が低い、また非線形効果を利用するため、エコー信号レベルが低いといったことが挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では上記問題点を改善し、パラメトリック差音超音波イメージングシステムの実用化のための基礎検討を行う。そのため、これまで開発してきた非線形超音波伝搬シミュレーション技術、非線形超音波ビーム制御技術、非線形効果を利用したパルス圧縮技術及び、超音波精密測定技術を応用し、次の3項目の検討を目的とする。

- (1) パラメトリック差音へパルス圧縮技術を適用し、距離方向分解能改善
- (2) パルスインバージョン法の導入による受信レベル改善
- (3) パラメトリック差音超音波イメージングシステムの構築

3. 研究の方法

目的の実現にあたり、次のように研究を実施した。

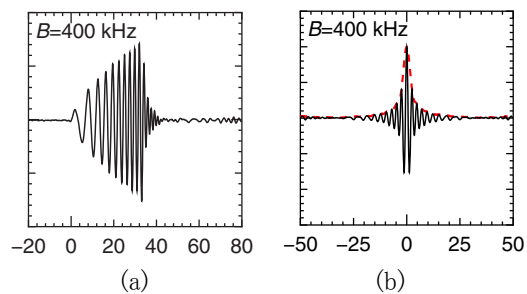


図1 チャープ差音信号(a)と圧縮信号(b). 横軸は時間(ms), 縦軸は相対音圧を示す. (b)の点線は圧縮信号の包絡を示す.

(1) チャープ変調差音の生成とパルス圧縮の評価

パラメトリック差音をパルス圧縮するにあたり、チャープ変調されたパラメトリック差音の生成の検討を行った。実験は人体と音響的特性の近い水中で行った。生成された差音信号をハイドロホンで受波し、その特性の検討を行った。

さらに、受信差音信号のパルス圧縮の評価を行った。パルス圧縮は受信信号と参照信号の相互相関処理で実現した。

(2) パラメトリック差音イメージングの評価

パルス圧縮を適用したパラメトリック差音による超音波イメージング法の検討を行った。実験は水中に設置した真鍮棒をターゲットとした。超音波の送波を機械的に走査し、得られたエコー信号の強度から、ターゲットのBモード超音波画像の取得を行った。また、通常の医療用超音波診断装置でしようされるような高周波超音波パルスによるイメージングを行い、比較を行った。

(3) パルス圧縮の高効率化の検討

相互相関にとるパルス圧縮において、送信信号に用いる変調信号としてどのようなものを用いるかは重要な課題である。

パラメトリック差音の圧縮率の改善方法として、チャープ変調圧縮による参照信号の最適化を行った。これは差音は振幅一定にならなければならないことを考慮するためである。また、符号化信号としてM系列信号を導入した。その効果を圧縮信号のSNR評価で行った。

(4) 深達度の評価

低周波であるため、散逸性媒質、長距離伝搬に強いというパラメトリック差音の特徴を評価するため、粘性流体中での差音生成と評価を行った。特に、粘性流体を伝搬することによる音波の減衰と波形変化について検討を行った。

4. 研究成果

(1) チャープ変調差音の生成とパルス圧縮の評価

まず、パルス圧縮のためにチャープ信号で変調されたパラメトリック差音の生成について検討を行った。駆動信号は音源の共振周波数である2.1 MHzとした。この信号を掃引開始周波数100

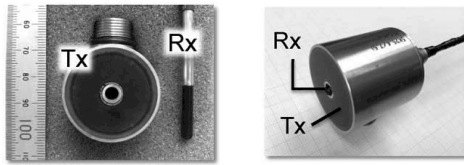


図 2 イメージング用プローブ. Tx: 送波用リング型音源, Rx: 受波用ハイドロホン.

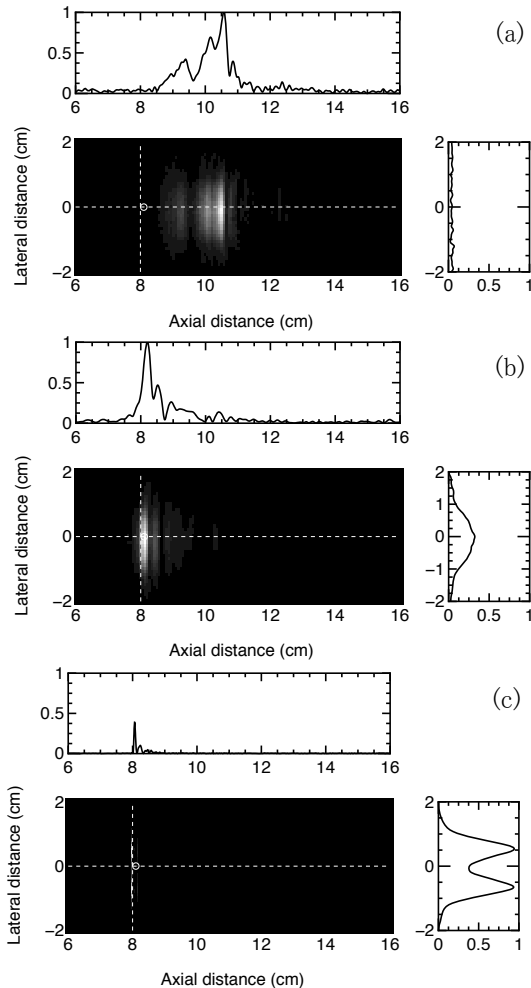


図 3 超音波イメージ. (a) 圧縮前パラメトリック差音イメージ, (b) 圧縮後パラメトリック差音イメージ, (c) 高周波超音波イメージ.

kHz, 掃引周波数帯域が $B=100, 200, 300, 400$ kHz の差音になるような変調信号を作成した. 実験は人体と音響インミードダンスの近い水中で行った.

受信信号の一例として, $B=400$ kHz のチャープ差音を図 1(a) に示す. このように, パラメトリック差音でもチャープ信号を生成することが可能であることがわかった. ただし, その包絡(瞬時振幅)は時間とともに変化する波形となった. これはパラメトリック差音の生成効率はその瞬時差音周波数に依存するためだと考えられる. 信号掃引時間は $33.3 \mu\text{s}$ である. なお, ここでは $B=400$ kHz のみを表示しているが, 全てのチャープ帯域幅で同様な結果が得られた.

得られたチャープ差音信号のパルス圧縮を行った. 通常, パルス圧縮が参照信号との相互相

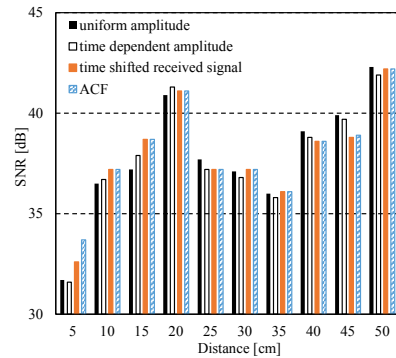


図 4 各参照信号による SNR 評価

関処理を行う. ここではパルス圧縮の最大性能評価を行うということで, 受信信号の自己相関処理を行った. 得られた結果を図 1(b) に示す. パルス幅はおおよそ $3 \mu\text{s}$ であった. この数値は処理前の信号長の約 $1/10$ になっており, パルス圧縮の効果が確認できる. なお, 圧縮後のパルス幅は掃引帯域幅 B の逆数で決まり, 今の場合 $2.5 \mu\text{s}$ となるので, およそ理論通りの結果が得られたことになる.

(2) パラメトリック差音イメージの評価

パルス圧縮を適用したパラメトリック差音による超音波イメージングの評価を行った. 実験は送波用音源として中心に穴の空いたリング状音源(共振周波数 2.8 MHz)と作成し, 利用した. 受波エコーは送波超音波信号の周波数と異なるため, ハイドロホンを用いた. 受波用ハイドロホンはリング上音源の中心孔に挿入する構造で使用した. 図 2 に作成したイメージング用プローブを示す.

プローブ信号として掃引開始周波数 100 kHz , 掃引帯域幅 400 kHz のチャープ差音を用いた. ターゲットは直径 2 mm の真鍮棒を送波音源の音軸に直交するように設置した. なお, 音源からの距離は 8 cm とした.

得られたパラメトリック超音波イメージを図 3(a), (b) に示す. (a) は圧縮前のチャープパラメトリック差音イメージ, (b) は圧縮後のパラメトリック差音イメージである. パルス圧縮を行うことで, 正しいターゲット距離 (8 cm) を示し, 距離方向の画像の広がりが抑えられていることがわかる. このことから, パルス圧縮を適用することで, 低周波音波でも距離分解能の改善された超音波イメージが得られることがわかる.

比較実験として, 通常の医療診断装置で用いられる, 高周波超音波パルスによるイメージングを試みた. 送波音源はパラメトリック差音イメージングと同じものを用いた. エコーは送波音源を用いた. 結果を図 3(c) に示す. パラメトリック差音イメージングに比べると, 距離方向の広がりの少ない画像が得られることがわかる. このことから, やはりパルス圧縮を行っても, 低周波イメージングでは距離分解能は犠牲になるといえる.

パラメトリック差音イメージングはターゲットが 1 個であったから, 得られたイメージも 1 個であった. しかし, 高周波超音波の場合, 2 個のイメージが得られた. これは, 近距離場の高周波音場

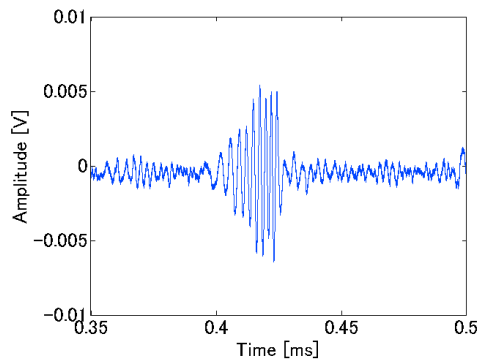


図 5 シリコンオイルを通過したチャープ差音信号

複雑であり、そのことがイメージに虚像を発生させたものといえる。このことから、パラメトリック差音ではそのような虚像を発生させることがないことも大きなメリットとなるといえる。

(3) パルス圧縮の高効率化の検討

(1)の結果のように、発生するチャープパラメトリック差音の振幅は時間に依存している。しかし、(2)の実験は振幅一様のチャープ信号を用いた。その結果、信号の圧縮率が悪化している可能性がある。そのため、圧縮のための参照信号の検討を行った。参照信号として、差音周波数に依存した音圧振幅を予め考慮したチャープ信号と、受信したチャープパラメトリック差音の 2 種類を用いた。

各圧縮信号の SNR を図 4 に示す。結果として、振幅に周波数を持たせても、受信信号、すなわち位相を考慮したものを用いても、一様振幅のチャープ信号を参照波として用いた場合と大きな変化は見られなかった。

続いて、M 系列によって位相変調を行ったパラメトリック差音の評価を行った。ここでは次数 4, 7 次の M 系列信号で符号化された 100, 500 kHz のパラメトリック差音の SNR の評価を行った。その結果、掃引時間が等しい条件であれば、掃引帯域幅 400 kHz のチャープ差音のほうが SNR のよい圧縮となった。

(4) 深達度の評価

水中にシリコンオイル層を設置し、差音伝搬の評価を行った。ここでは掃引開始周波数 100 kHz, 掃引帯域幅 400 kHz のチャープ差音を用いた。

図 5 にその結果を示す。(1)の結果と異なり、チャープ信号終了部分の信号が、他に比べて幾分小さくなっていることが分かる。つまり、高周波数成分が減衰していることになる。

高周波超音波パルスと圧縮パラメトリック差音の SNR について、シリコンオイル層のありなしで比較を行った。その結果、高周波パルスに比べ、パラメトリック差音の方がその減衰量が小さかった。このことから、パラメトリック差音は散逸性媒質中の超音波イメージングにも有効であることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

Hideyuki Nomura, Hideo Adachi, Tomoo Kamakura, “Feasibility of low frequency ultrasound imaging using parametric sound,” Proc. of 20th Int’l Symp. On Nonlinear Acoustics including the 2nd Int’l Sonic Boom Forum, AIP-CP 1685, 4018 (2015) (査読有), doi:10.1063/1.4934413.

Hideyuki Nomura, Hideo Adachi, Tomoo Kamakura, Gregory T. Clement, “Feasibility of low-frequency directive sound source with high range resolution using pulse compression technique,” Jpn. J. Appl. Phys., **73**, 07KC03 (2014) (査読有), doi:10.7567/JJAP.53.07KC03.

Hideyuki Nomura, Hideo Adachi, Tomoo Kamakura, “Distance measurement using pulse compressed parametric sound at difference frequency,” Proc. of Forum Acusticum 2014 (2014) (査読有).

Hideyuki Nomura, Hideo Adachi, Tomoo Kamakura, Gregory T. Clement, “Compressed parametric frequency sound with chirp signal,” Proceedings of Meeting on Acoustics, **19**, 45082 (2013) (査読有), doi:10.1121/1.4799226.

[学会発表] (計 9 件)

鈴木椋介, 野村英之, “パラメトリック差音イメージングの深達度評価,” 電子情報通信学会超音波研究会, 信学技報, **115** (464), US2015-109, 7-10 (2016 年 2 月 29 日, 東京大学生産技術研究所, 東京).

本多孝如, 野村英之, 安達日出男, 鎌倉友男, “パルス圧縮パラメトリック超音波の SNR 改善の検討,” 電子情報通信学会超音波研究会, 信学技報, **115** (299), US2015-69, 23-28 (2015 年 11 月 9 日, 産業技術総合研究所中部センター, 名古屋市).

野村英之, 安達日出男, 鎌倉友男, “パルス圧縮パラメトリック超音波による低周波超音波イメージング,” 第 36 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(2015 年 11 月 5-7 日, つくば国際会議場, つくば市).

野村英之, 安達日出男, 鎌倉友男, “パルス圧縮パラメトリック音源を用いた低周波超音波イメージングの実現,” 電子情報通信学会超音波研究会, 信学技報, **115** (207), US2015-54, 47-54 (2015 年 8 月 3, 4 日, 第一滝本館, 登別市).

内藤絢一, 野村英之, 安達日出夫, 鎌倉友男, “パルス圧縮技術を用いたパラメトリック超音波イメージング,” 電子情報通信学会超音波研究会, 信学技報, **114** (296), US2014-60, 11-15 (2014

年 11 月 13 日, 金沢工業大学, 野々市市).

野村英之, 安達日出男, 鎌倉友男, Gregory T. Clement, “パルス圧縮パラメトリック差音エコーの散乱体サイズ依存性の検討,” 電子情報通信学会超音波研究会, 信学技報, **114** (16), US2014-3, 13-17 (2014 年 4 月 22 日, 電気通信大学, 調布市).

野村英之, 安達日出男, 鎌倉友男, “パルス圧縮技術を適用したパラメトリック音源のエコー強度の検討,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会(2014 年 3 月 12 日, 日本大学, 東京).

野村英之, 安達日出男, 鎌倉友男, “パルス圧縮パラメトリック音源による距離測定,” 電子情報通信学会超音波研究会, 信学技報, **113** (412), US2013-89, 41-46 (2014 年 1 月 27 日, 関西大学, 吹田市).

野村英之, 安達日出男, 鎌倉友男, “パルス圧縮技術を適用したパラメトリック音源による距離測定法の検討,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会(2013 年 9 月 26 日, 豊橋科学技術大学, 豊橋市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

野村 英之(Nomura, Hideyuki)

電気通信大学・

大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 90334763