

令和元年5月29日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06380

研究課題名(和文) 高周波・低周波超音波を用いたデュアルスケール超音波イメージングシステムの開発

研究課題名(英文) Acoustic imaging using high- and low-frequency ultrasound

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高周波・低周波超音波を併用した超音波画像化手法実現のための基礎検討を行った。特に、低周波超音波イメージングのためパルス圧縮処理を適用したパラメトリック超音波を導入した。初めにチャープ変調パラメトリック超音波のパルス圧縮を実現した。次に、提案手法を超音波画像法に応用した。提案方法は従来型の高周波超音波画像とはことなり、強散乱体近傍の物体や、近接物体の可視化を可能とした。また、高次M系列符号の導入で、よりノイズの少ない低周波超音波画像の取得が実現された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パラメトリック超音波であっても、適切に1次波超音波を変調することで、チャープ信号やM系列信号の生成であることが示され、さらに線形信号に対して適用されていたパルス圧縮処理が、非線形信号であるパラメトリック超音波信号においても有効であることが示された。これらの点が、学術的に興味深い。これらの成果は、低周波超音波イメージング実現を後押しするのに大いに役立ち、従来型の高周波法とは異なる特徴の抽出が期待できる点で社会的な意義ある成果である。

研究成果の概要(英文)：We conducted a basic study for ultrasonic imaging method using high - and low-frequency ultrasound. In particular, parametric ultrasound with pulse compression was introduced for low-frequency ultrasound imaging. First, the pulse compression of chirp-modulated parametric ultrasound was realized. Next, the proposed method is applied to ultrasound imaging. The proposed method showed different images different from conventional high-frequency ultrasound images which did not separate neighboring objects and objects near a strong scattering object. In addition, the introduction of high-order M-sequence coding realized low-frequency ultrasound images with high peak to sidelobe ratio.

研究分野：音響エレクトロニクス

キーワード：パラメトリックアレイ パルス圧縮 低周波超音波

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超音波診断装置は媒質内部の音響インピーダンス(硬さに相当)の異なる部分での超音波の反射を用いて画像化を行う。近年では送信超音波の高調波を用いる方法や、超音波治療と同時に用いる方法なども積極的に取入れられている。ただし、得られる超音波診断画像の解釈には医療専門知識が必要である。特に、高分解能を得るために使われる 10 MHz 以上の高周波超音波は必要以上にビーム径が細くなるため観察領域が狭く、どの領域を見ているかが分かりづらい。このような問題に対して、低周波・高周波超音波を併用する画像化が有効だと考える。

### 2. 研究の目的

本研究では、低周波・高周波超音波を併用する超音波画像化手法実現の基礎検討を行う。特に、低周波超音波の問題点である指向性の改善、またその改善に用いるパラメトリック超音波の信号レベルの改善としてパルス圧縮の有効性を調べる。パルス圧縮はチャープ変調や符号化方式を採用し、パルス圧縮後のタイムサイドローブの低減化を一つの目標とする。また、高周波超音波では困難な、強散乱体近傍の物体や、近接した物体の可視化を試みる。最終的には、従来型の数 MHz の高周波超音波法と、ここで提案する数百 kHz のパルス圧縮パラメトリック法の画像の比較を行い、それぞれの特徴を評価する。

### 3. 研究の方法

#### (1) パラメトリック超音波のパルス圧縮: チャープ変調の適用の検討

パラメトリック超音波へのパルス圧縮適用の検討を行った。生成するパラメトリック超音波をチャープ信号とするように変調を行った 1 次超音波を水中に放射した。このとき、ハイドロホンにて水中の超音波信号を観測し、望まれるようなチャープ変調パラメトリック超音波の発生が可能か、またパルス圧縮後のパルス幅の評価を行った。生成するパラメトリック超音波の掃引開始周波数は 100 kHz、掃引帯域幅は 100, 200, 300, 400 kHz とした。1 次波のキャリア周波数は 2.1 MHz とした。パルス圧縮処理は、受波されたパラメトリック超音波信号の自己相関処理で実現した。

#### (2) パラメトリック超音波に超音波画像取得の検討

パルス圧縮を適用したパラメトリック超音波による超音波画像取得を行った。送波変調 1 次超音波のキャリア周波数は 2.8 MHz とした。パラメトリック超音波の変調方式はチャープ信号とする。水中に直径 2 mm の真鍮棒を配置し、A モードおよび B モード超音波画像の取得を行った。比較対象とし、2.8 MHz の高周波超音波ショートパルス、音源から直接放射される 1 サイクルの 400 kHz 低周波超音波パルス、1 サイクルの 400 kHz パラメトリック超音波パルスを用いた。これらの比較対象も含め、全て同一のリング型単一素子超音波振動子を送波器、リング型振動子の中心孔に挿入したハイドロホンを受波器とした。

#### (3) パラメトリック超音波のパルス圧縮: タイムサイドローブの低減化の検討

パルス圧縮で発生するタイムサイドローブの削減のために、パラメトリック超音波に M 系列符号の適用と、パルス圧縮処理を行った。1 次波超音波のキャリア周波数は 2.8 MHz とし、発生させるパラメトリック超音波の周波数は 400 kHz に固定した。ただし、パラメトリック超音波の位相を M 系列符号で変調した。M 系列 1 ビットに対して、400 kHz の 1 サイクルを割り当てた。M 系列の次数は 2-10 次で変化させた。このとき、タイムサイドローブ減少について評価を行った。また、厚みの異なるアクリル板を対象に、超音波画像取得実験をおこなった。

### 4. 研究成果

#### (1) パラメトリック超音波のパルス圧縮: チャープ変調の適用の検討

測定結果を図 1 に示す(雑誌論文(3))。生成が期待されるパラメトリック超音波チャープ信号は、上図に示すような振幅一様信号である。しかしながら、実際に得られた信号は振幅が徐々に上昇する信号となった。これは、パラメトリック超音波の生成効率が周波数に依存することに起因する。

下図はパルス圧縮結果である。いずれも中図の信号に比べ、信号長が短くなっていることがわかる。この効果は、チャープ帯域幅が拡大すると顕著になっている。また、無信号部分に見られるようなノイズ成分が減少していることがわかる。

この結果から、非線形過程を経て生成されるパラメトリックにおいても、パルス圧縮が実現されることがわかる。このことは、パラメトリック超音波のように、信号レベルの低い低周波超音波でも、計測や画像化に有効であることを示唆する。

#### (2) パラメトリック超音波に超音波画像取得の検討

図 2 は取得された超音波画像の一例を示す(雑誌論文(2))。高周波超音波は距離分解能がよいが、最も音源に近いターゲットを除くと、不鮮明である。低周波超音波パルスは全体的にターゲットの分離が困難である。パラメトリック超音波パルスは画像のノイズが多いことがわかる。一方、提案しているパルス圧縮パラメトリック超音波ノイズも少なく、5 本のターゲットを分

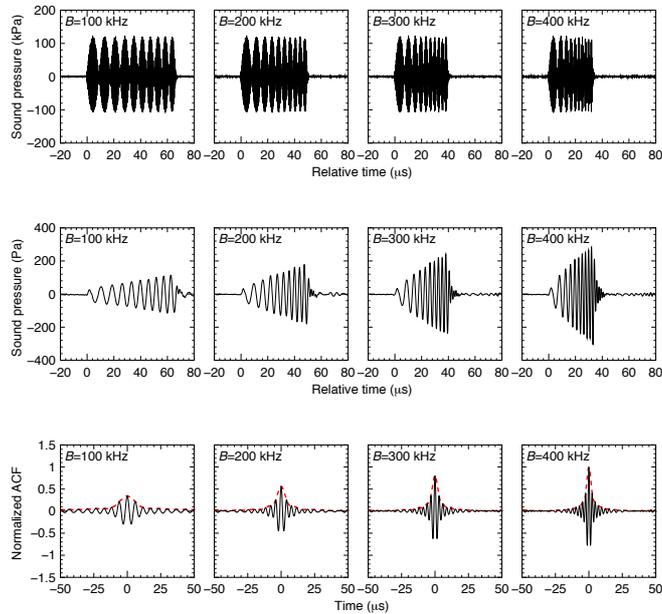


図 1 受波信号. 上から受波変調超音波, 受波超音波から抽出されたパラメトリック超音波信号, パルス圧縮されたパラメトリック超音波信号.

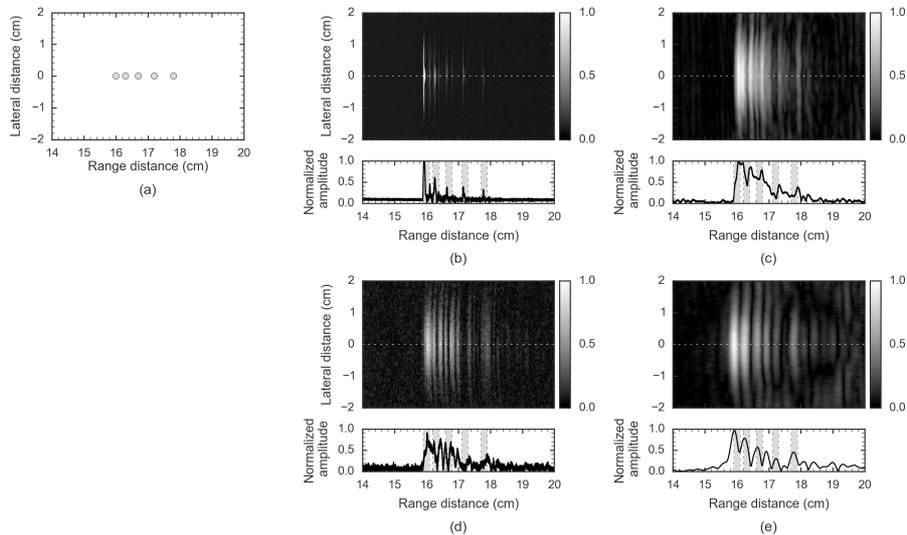


図 2 取得超音波画像の例. (a) ターゲット配置, (b) 高周波超音波画像(2.8 MHz), (c) 直接放射低周波超音波パルス(400 kHz), (d) パラメトリック超音波パルス(400 kHz), (e) パルス圧縮パラメトリック超音波(チャープ帯域 400 kHz).

離している. ただし, 最終ターゲット以遠にアーティファクトが出現している. これはパルス圧縮処理生じる, タイムサイドロープの影響だと考えられる.

これらの結果から, パルス圧縮パラメトリック超音波で全体的な画像を取得し, 高周波超音波パルスで分解能の良い画像を作成することで, これまででない広範囲で分解能よい画像が得られるであろう. ただし, アーティファクトの改善が必要である. なお, 方位方向はいずれの画像も幅 2 cm 程度ある. これは送波振動子のビーム幅とほぼ一致する. 整相加算などの技術で幾分改善が可能である(学会発表(1)).

### (3) パラメトリック超音波のパルス圧縮: タイムサイドロープの低減化の検討

パルス圧縮処理後のタイムサイドロープを削減するために, M 系列符号化されたパラメトリック超音波生成と, そのパルス圧縮を行った. 結果の一例を図 3 に示す(雑誌論文(1)). この結果から, チャープ変調だけでなく, パラメトリック超音波の M 系列符号化も適用が可能であることがわかる. さらに, チャープ変調に比べ, 9 次の M 系列符号化パラメトリック超音波は, パルス圧縮後に発生するタイムサイドロープの大きさが著しく減少していることがわかる. このように, 高次の M 系列符号を適用すること, パルス圧縮後のタイムサイドロープの発生が大きく改善されることになる. M 系列の符号化次数を増加させるとサイドロープの大きさが削減されるが, 実験の結果, 9 次までは増加とともにサイドロープレベルが減少したが, 10 次では

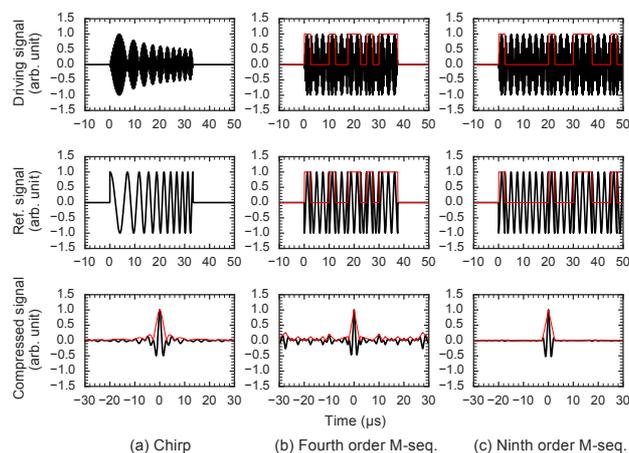


図 3 M 系列符号パラメトリック超音波のパルス圧縮

それ以上の改善が見られなかった。

アクリル板の A モード超音波画像を取得したところ、やはり高次の M 系列はタイムサイドローブの発生が改善され、アーティファクトの発生が少なかった(雑誌論文(1))。ただし、符号の高次化は信号長を長くすることになり、送波超音波エネルギー増大の影響が懸念される。なお、高周波超音波に対しても M 系列符号化を適用したが、パラメトリック超音波の場合と比較し、振幅の減少が大きかった。これは板材内での音波吸収の影響だと推測される。

これらの結果から、チャープ変調だけでなく、M 系列符号化といった信号もパラメトリック超音波のパルス圧縮において有効であるといえる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) [Nomura Hideyuki](#), Nishioka Riku, “Time sidelobe reduction of pulse-compressed parametric ultrasound with maximum-length sequence excitation,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読あり, 57, 2018, 07LC05, doi: 10.7567/JJAP.57.07LC05.
- (2) [Nomura Hideyuki](#), Adachi Hideo, Kamakura Tomoo, “Feasibility of low-frequency ultrasound imaging using pulse compressed parametric ultrasound,” *Ultrasonics*, 査読あり, 89, 2018, 64–73, doi: 10.1016/j.ultras.2018.04.007.
- (3) [Nomura Hideyuki](#), Nishioka Riku, “Low-frequency parametric ultrasound imaging using pulse compression with maximum-length sequence excitation,” *Proc. of Meetings on Acoustics*, 査読あり, 34, 2018, 30001, doi: 10.1121/2.0000840.

[学会発表] (計 9 件)

- (1) [Nomura Hideyuki](#), Nishioka Riku, “Low-frequency parametric ultrasound imaging using pulse compression with maximum-length sequence excitation,” 21th International Symposium on Nonlinear Acoustics, July 8–13, 2018, Santa Fe, NM, USA.
- (2) [Nomura Hideyuki](#), “Application of parametric ultrasound to low-frequency acoustic imaging,” International Congress on Ultrasonics, Dec. 18–20, 2017, Honolulu, HI, USA, 招待講演.
- (3) [野村 英之](#), [西岡 陸](#), “M 系列信号によるパラメトリック超音波のパルス圧縮,” 第 38 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, 2017 年 10 月, 多賀城市文化センター, 宮城県.
- (4) [西岡 陸](#), [野村 英之](#), “M 系列位相変調を用いたパラメトリック差音のパルス圧縮の検討,” 電子情報通信学会/日本音響学会超音波研究会, 2017 年 10 月, 東北大, 宮城県.
- (5) [野村 英之](#), “低周波パラメトリック超音波画像における空間分解能の実験的評価,” 電子情報通信学会/日本音響学会超音波研究会, 2017 年 4 月, 電通大, 東京都.
- (6) [野村 英之](#), [西岡 陸](#), “低周波パラメトリック超音波による厚さ測定法の検討,” 日本音響学会 2018 年春季研究発表会, 2018 年 3 月, 日本工業大学, 埼玉県.
- (7) [野村 英之](#), “パラメトリック超音波を用いた低周波超音波イメージングの方位方向分解能評価,” 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 2017 年 9 月, 愛媛大学, 愛媛県.
- (8) [野村 英之](#), “パルス圧縮パラメトリック音源による低周波超音波イメージングの分解能改善,” 第 37 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, 2016 年 11 月, 釜慶大学, 釜山市, 韓国.
- (9) [野村 英之](#), “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分解能

評価,” 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 2016 年 9 月, 富山大学, 富山県.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。