

二層型圧電振動子を用いた 複数次高調波超音波の同時計測システム

A Simultaneous Measurement System for Multi-Order Harmonic Ultrasonics Using the Double-Layered Piezoelectric Transducer

福田誠*, 西平守正*, 今野和彦*

Makoto FUKUDA*, Morimasa NISHIHIRA* and Kazuhiko IMANO*

*秋田大学 工学資源学部

*Faculty of Engineering and Resource Science,
Akita University

キーワード: 二層型圧電振動子(double-layered piezoelectric transducer),
高調波超音波パルス(harmonic ultrasonic pulse waves),
パルスインバージョン(pulse-inversion), 実時間(real-time), 反射法(pulse-echo)

連絡先: 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1

秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科 今野研究室

福田 誠, Tel: 018-889-2494, Fax: 018-837-0406, E-mail: d9505006@wm.akita-u.ac.jp

1. はじめに

ある音圧以上の超音波を送波したとき, 音響媒質中を伝搬する過程において非線形効果によって高調波が発生することが知られている. 近年では, 高調波の特性に関する検討¹⁻³⁾や非破壊試験への応用⁴⁻⁸⁾などさまざまな研究が行われている. 特に高調波を用いた超音波イメージング法は基本波に比べて, 高い方位分解能が得られる, ノイズの少ない画像が得られるという点で注目されている^{9, 10)}. しかし, 音響媒質を伝搬中に生じた高調波は基本波に比べて非常に小さく, 高調波を高感度で検出する方法が必要になる. その方法としては, 超音波受波後に信号処理する方法と高調波受波用のトランスデューサを用いる方法に大別される. 信号処理法に関しては, 高調波成分だけを取り出すようなバンドパスフィルタを用いる

方法¹⁰⁾とパルスインバージョンを用いる方法¹⁰⁻¹³⁾がある. フィルタ法はリアルタイム処理できる点に特徴があるが, 特定次数の高調波のみを抽出するための最適帯域幅の設計が難しい. 一方, パルスインバージョン法は, 互いに逆位相となる2つの超音波パルスを交互に送波し, それぞれに対応する受波波形を加算することで, 奇数次成分を打ち消し, 偶数次高調波成分を強調できる. この方法は比較的動きの遅い腹部領域などを対象としたイメージングに適用されている^{10, 11)}.

高調波検出のために工夫されたトランスデューサはこれまでにいくつか考案されている. 基本波と2次高調波の両方の共振周波数を兼ね備えたトランスデューサとしては, 熱処理を施すことにより作製した分極反転層を有する LiNbO_3 板がある¹⁴⁾. また, 基本波送波用と高調波受波用にそれ

それぞれの振動子を用いる方法も検討されており、重ねて配置したトランスデューサ¹⁵⁾や同軸上に配置したトランスデューサ¹⁶⁾が考案されている。また、2次高調波といったような特定の次数の高調波に制限されない受波用広帯域トランスデューサを用いて、複数次の高調波を検出する方法も提案されている¹⁵⁾。

これらに対して我々は、2次高調波のための新たな送受波デバイスとして二層型圧電振動子を提案している¹⁷⁾。本報告ではこの二層型圧電振動子を用いた2次高調波抽出システムを改良した、複数次高調波をリアルタイムに検出するシステムについて提案する。

2. 原理

本報告で言う二層型圧電振動子とは、同一特性の圧電振動子を2枚、互いに逆分極となるように貼り合わせたものを指す。二層型圧電振動子の応用例としては、短いパルスの送波もある¹⁸⁾。以下に、二層型圧電振動子の特徴について説明する。

二層型圧電振動子は図1に示すように並列もしくは直列に電氣的に接続できる。貼り合わせる前の圧電振動子単体での共振周波数を f_0 とすると、二層型圧電振動子の共振周波数は並列接続することで半分の $f_0/2$ となり、直列接続では f_0 のまま変わらないという特徴がある¹⁹⁾。貼り合わせる前の単体での共振周波数が2 MHzの圧電振動子を2枚用いて二層型圧電振動子を構成した例を図2に示す。同図では並列または直列接続した場合の二層型圧電振動子の周波数-アドミタンス特性を示しており、二層型圧電振動子の共振周波数は並列接続では1 MHz、直列接続では2 MHzとなることが確認できる。このような二層型圧電振動子の特徴に注目して超音波の送受波を考えると、高調波の発生に十分な大振幅の基本波(ここでは1

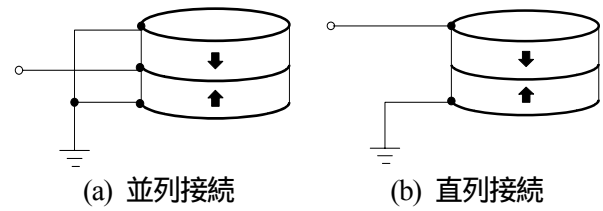
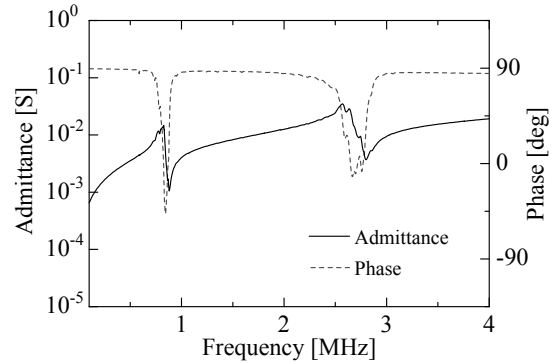
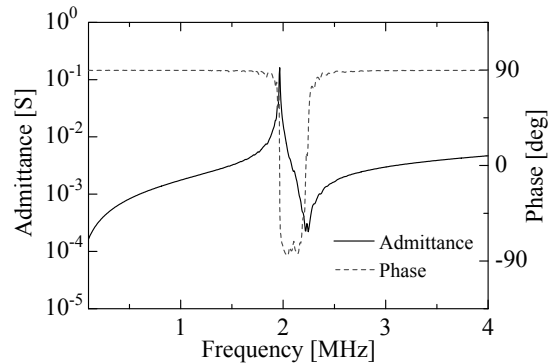


図1 二層型圧電振動子の電氣的接続方法
(矢印は分極方向)



(a) 並列接続



(b) 直列接続

図2 二層型圧電振動子の
周波数-アドミタンス特性

MHz)を並列接続で送波し、音響媒質を伝搬中に発生した偶数次高調波、特に主成分である2次高調波(2 MHz)に対しては、直列接続で感度良く受波できることが期待できる。

これを実現する方法として、送波時および受波時に二層型圧電振動子の電氣的接続を並列または直列接続となるように、図3に示すような接続方法が考えられる。しかし、並列接続と直列接続

を同時に行うと、同図における電極 A の並列接続側がアースとなり、直列接続側において受波信号を取り出すことができないという問題が生じる。この問題を解決する方法として、電極 A の並列接続側にスイッチ(SW)を設ける方法を提案した¹⁷⁾。SW を ON とした場合、電極 A はアースと共通になるため、並列接続(1 MHz 基本波の送受波および奇数次高調波の受波)となる。一方、SW を OFF とした場合、電極 A はアースから切り離され、直列接続(偶数次高調波の受波)となる。このように、基本波を送波するときには SW を ON とし、奇数次高調波を受波するときは SW を ON のままとし、偶数次高調波を受波するときには SW を OFF とするように制御することで、それぞれの周波数に対して感度のよい接続方法で超音波の送受波が可能となる。

このようなスイッチ制御された二層型圧電振動子で受波される受波波形は、2 次高調波を主とする偶数次高調波に対する感度が高いものの、基本波が支配的な波形となる。パルスインバージョン¹⁰⁻¹³⁾は互いに逆位相となる基本波パルスを交互に送波し、それらの受波波形を足し合わせることで基本波を打ち消す方法である。例えば図 4 に示すような送波信号で二層型圧電振動子を駆動し、超音波を送波したとする。その受波信号に対して 0.5 ms を 1 周期としてオシロスコープのアベレージング機能を用いると、互いに逆位相で受波される基本波成分がキャンセルされ、同位相で発生する偶数次高調波成分のみがリアルタイムでオシロスコープに表示することができる。

3. 高調波観測実験

3.1 実験方法

共振周波数 2 MHz の凹面型圧電振動子を互いに逆位相となるように導電性ペーストを用いて貼り合わせて、凹面二層型圧電振動子(焦点距離

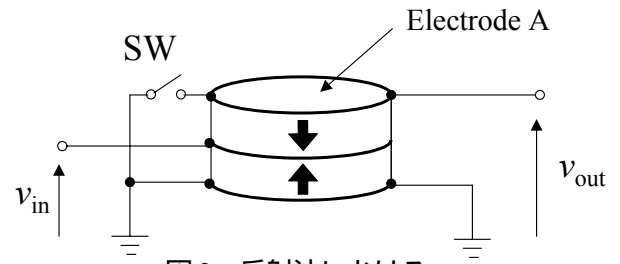


図 3 反射法における二層型圧電振動子の電氣的接続

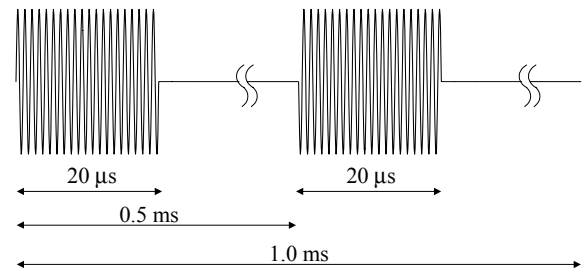


図 4 パルスインバージョンのための駆動波形

40 mm)を作製した。方位分解能向上のために凹面型振動子を用いた。この二層型圧電振動子を用いた高調波抽出システムを図 5 に示す。送波信号を任意波形発振器で発振し、高周波数電力増幅器によって音響媒質中で非線形効果を生じるだけの電力に増幅した後、インピーダンス整合回路を介して二層型圧電振動子へ印加する。このとき 1 MHz の超音波パルスを送波するために、二層型圧電振動子の電氣的接続が並列接続となるようにスイッチ(SW)を ON にする。超音波パルス(1 MHz)が水中を伝搬し、二層型圧電振動子から焦点距離の 40 mm 離れた位置にある標準反射体で反射される。反射波が二層型圧電振動子に到達する前にスイッチを OFF することで、二層型圧電振動子の電氣的接続を直列接続に切り換え、超音波が水中を伝搬する間に非線形効果により発生した偶数次高調波を感度よく受波する。受波された信号からオシロスコープのアベレージング機能を用いて、偶数次高調波を抽出して表示する。また、奇数次高調波は、スイッチを切り換えず ON のままで送受波する。超音波受波波形の数値

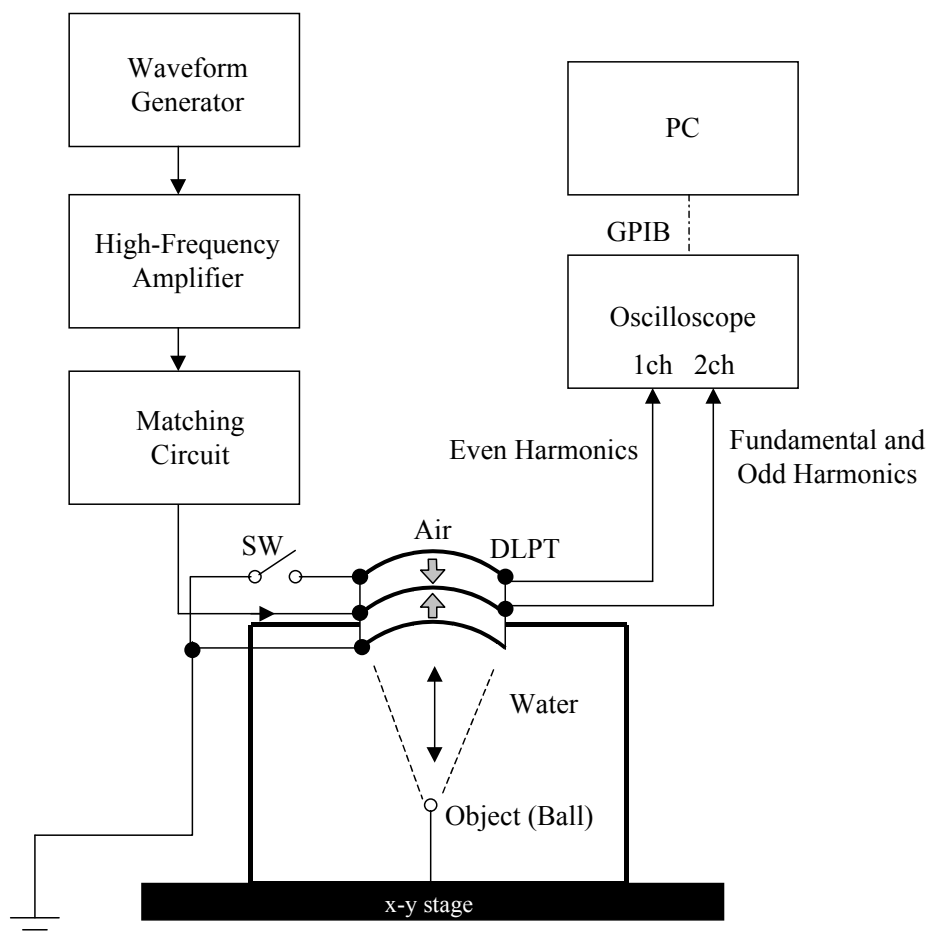


図5 測定システム

データは GPIB を介して PC に取り込まれる。

さらに、本システムの応用例として、標準反射体を 3 mm 直径の鉄球に置き換え、イメージングを行う。

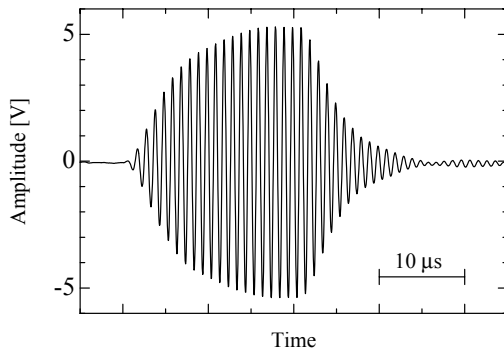
3.2 結果

図5に示した実験システムを用いて超音波を送受波したときの受波波形とそのスペクトルを図6に示す。二層型圧電振動子を送受波とも並列接続した場合、2次高調波(2 MHz)に対する感度が低いために、2次高調波成分は基本波成分に比べて約 50dB 小さいことが受波波形(同図(a))のスペクトル(同図(b))からわかる。よって、基本波および奇

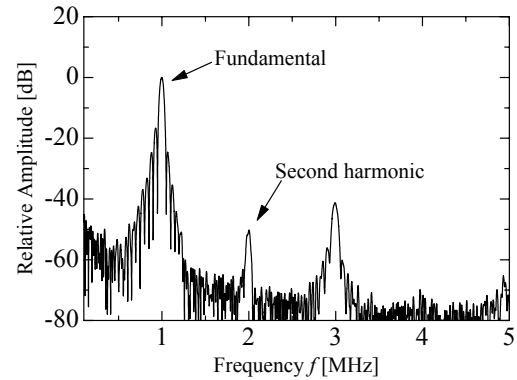
数次高調波に関して感度良く検出が行えると考えられる。

これに対し受波時に直列接続に切り換え、さらにパルスインバージョンのためのアベレーシングを行ったところ、受波波形(同図(c))のスペクトル(同図(d))から、基本波成分を-40 dB 減少できた。よって、偶数次高調波に関して感度良く検出が行えることが確認できる。

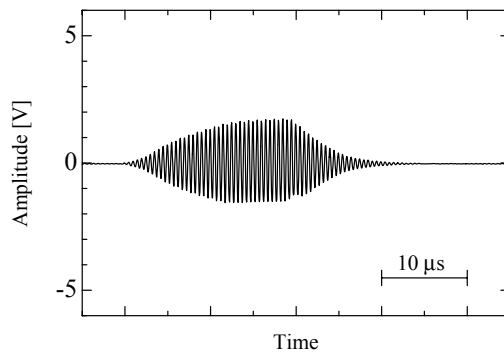
図7には本手法による基本波~4次高調波を用いた鉄球のイメージング結果をそれぞれ示す。これらの結果は同時に検出し描かれたものである。文献[9]等で行われているように、高次高調波になるに従って実際の対象物に近い直径のイメージ



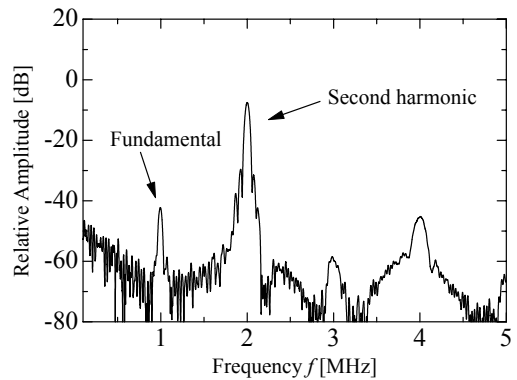
(a) 並列接続で送受波した場合の受波波形



(b) (a)のスペクトル



(c) 並列接続で送波し直列接続で受波した場合の受波波形



(d) (c)のスペクトル

図6 実験結果

ング結果が得られた。同時にイメージングが行えたことから、本システムを文献[16]にみられるような高調波イメージング結果を重ね合わせて、画像を検討するといった応用にも用いることができると考えられる。

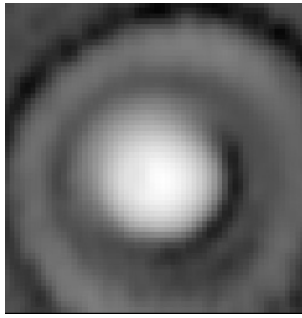
4. おわりに

本報告では、二層型圧電振動子を用いた複数高調波の同時検出システムについて検討した。二層型圧電振動子の電気的接続を送波時、受波時において切り換えることで、感度良く各々の高調波をリアルタイムで検出することができた。最後に、本システムの利用例として鉄球のイメージングを行った。その結果、複数高調波を用いたイメージング結果が同時に描けた。

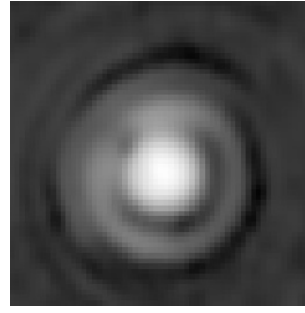
以上の結果、本システムは複数高調波の検出に効果的であることを示すことができた。今後は、本システムによって得られた画像に関して詳細な検討を行う予定である。

参考文献

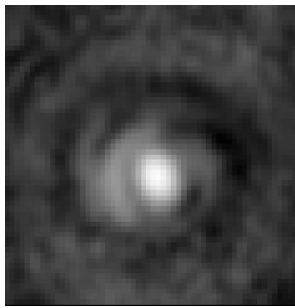
- (1) 鎌倉友男: “非線形音響学の基礎”, 愛智出版 (1996).
- (2) T. Kamakura: *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) 2808.
- (3) S. Saito and T. Kawagishi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, No.5B, pp.3231-3236 (2004).
- (4) J. Okada, T. Ito, K. Kawashima and N. Nishimura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.40, No.5B, pp.3579-3582 (2001).



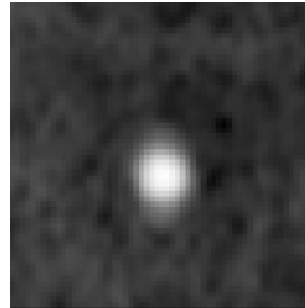
(a) 基本波



(b) 2次高調波



(c) 3次高調波



(d) 4次高調波

図7 本システムを用いたイメージング結果

- (5) K. Yamanaka, T. Mihara and T. Tsuji: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, No.5B, pp.3082-3087 (2004).
- (6) Y. Ohara and K. Kawashima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, No.5B, pp.3119-3120 (2004).
- (7) R. Murayama and K. Yamaguchi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.44, No.6B, pp.4385-4388 (2005).
- (8) R. Sasaki, T. Ogata, Y. Ohara, T. Mihara and K. Yamanaka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.44, No.6B, pp.4389-4393 (2005).
- (9) 伊東正安, 望月剛: “超音波診断装置”, コロナ社, pp.179 (2002).
- (10) 川岸哲也, 神山直久: 日本音響学会誌, 59 巻, 9 号, pp.552-556 (2003).
- (11) P. N. Burns, D. H. Simpson and M. A. Averkiou: *Ultrasound Med. Biol.*, Vol.26, pp.S19-S22 (2000).
- (12) D. H. Simpson, C. T. Chin and P. N. Burns: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol.46, No.2, pp.372-382 (1999).
- (13) F. C. Simm: *J. Med. Ultrason.*, Vol.26, No.4, pp.285 (1999).
- (14) K. Nakamura, K. Fukazawa, K. Yamada and S. Saito: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol.50, No.11, pp.1558-1562 (2003).
- (15) H. Adachi, K. Wakabayashi, M. Nishio, H. Mizuno and T. Kamakura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.42, No.1, pp.305-310 (2003).
- (16) I. Akiyama, A. Ohya and S. Saito: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.44, No.6B, pp.4631-4636 (2005).
- (17) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.45, No.5B, pp.4556-4559 (2006).
- (18) M. Fukuda, M. Nishihira and K. Imano: *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, No.5B, pp.3131-3133 (2004).
- (19) 山田博章, 尾上守夫: 非破壊検査, 第20巻, 第11号, pp.605-608 (1971).