

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560504

研究課題名(和文) 高分子超音波センサの更なる高性能化を目指した符号積層開口技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on encoding stacked aperture technique to realize polymer ultrasonic probe with a higher performance

研究代表者

村田 頼信 (MURATA, Yorinobu)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：50283958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高分子超音波探触子の性能を大幅に改善する全く新しい技術(符号積層開口技術)を提案した。符号積層開口技術とは、高分子圧電膜内の双極子の極性方向をコントロールして積層を行うことにより超音波探触子の高機能化をはかる技術のことである。この技術によって、インパルス駆動のみでM系列変調波が送信可能なパルス圧縮超音波探触子を考案し、本技術の有用性を実証した。更に、膜厚をコントロールして積層することにより、チャープ波送信のみならず、探触子自信による復調(パルス圧縮)も可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel technique (encoding stacked aperture technique) to improve greatly the performance of a polymer ultrasonic probe was proposed. This is a technique which achieves higher performance of an ultrasonic transducer by stacking piezoelectric polymer film after controlling the polarity direction of the dipole. With this technique, an M-sequence pulse compression ultrasonic probe which an M-sequence modulated wave can transmit only by impulse driving was devised, and the usefulness of this technique was demonstrated. Furthermore, by the development of another stacked probe which consists from piezoelectric polymer films of different thickness, not only chirp-wave transmission but the demodulation of pulse compression has become possible only by the probe.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：超音波 超音波探触子 高分子圧電材料 PVDF P(VDF-TrFE) パルス圧縮 M系列 チャープ波

1. 研究開始当初の背景

非破壊検査や医療診断などで一般に使われる超音波探触子(超音波プローブ)は、PZTを代表とするセラミック系の堅い材料からなる振動子で構成されている。セラミック系超音波探触子は、感度がよく、また性能安定性にも優れるという特徴がある。しかしながら、周波数帯域が狭く、短い波数の波いわゆる短パルス超音波を送受信することが困難である。しかも、近年、鉛が人体に影響を及ぼすとのことで世界的にも鉛の使用を制限する動きがあり、PZTなど鉛を含む材料も規制の方向にある。一方、PVDFやP(VDF-TrFE)を代表とする高分子圧電材料が超音波探触子としても応用されている。高分子圧電材料は柔らかいというその特性上から、広帯域な周波数特性を有しており、短パルス超音波の送受信が可能である。しかも、様々な形に加工することも可能であり、音響レンズを用いることなく超音波を集束させたり、超音波を照射する対象の形状に応じて探触子側を自在に変形させたりといった使い方も可能である。しかしながら、エネルギー変換効率(電気機械結合係数)がセラミック系素子に比べ低く、それがネックとなって一般にはあまり広まっていないのが現状である。

高分子圧電材料を用いた超音波探触子に関する国内外の研究動向を調べてみると、近年において活発な研究例は見られず、市販のPVDF探触子を計測に利用するだけの研究に留まっている例がほとんどである。P(VDF-TrFE)は、PVDFに比べ超音波探触子にしたときの変換効率が約1.5倍であるにも関わらず、その応用研究は非常に少ない。P(VDF-TrFE)を製膜から用途に応じた超音波探触子の開発までトータルにコーディネートして応用する研究例は見あたらない。

これまで高分子圧電材料を用いて様々な超音波探触子の開発について研究を行ってきた中で、高分子圧電フィルム上に分極方向分布を描くことで波面の符号化が簡単に実現できることがわかっている。つまり、分極時にフィルム内の双極子の向きをコントロールすることにより、その向きの符号に応じた極性で信号を得ることも、逆に発信することができる。同じ原理を用いて、極性を制御して高分子圧電フィルムを適切な遅延層を挟んで積層することにより、探触子開口自身での様々な高性能・機能化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、高分子超音波探触子の性能を大幅に改善する全く新しい技術(符号積層開口技術)を提案し、この技術の有用性を実証することを目的とした。この技術は、高分子圧電フィルムの双極子の向きや厚みをコントロールして積層することにより、探触子の絶対感度の向上や機能化(例えば、パルス圧縮超音波探触子の実現)がはかれるものである。

この技術によって、高分子の利点はそのままで、高分子超音波探触子の欠点である絶対感度をセラミック系超音波探触子に迫るまで改善させる。さらに、セラミック系圧電材料ではできない機能を有した超音波探触子の開発まで発展させる。

3. 研究の方法

現在、超音波による探傷や医療診断において、より詳細な情報を得るためには、送受信波の周波数が広帯域(つまり、短パルスで計測できる)でかつ高S/N比で計測する必要がある。しかしながら、広帯域特性と高S/N比を両立させることは容易ではない。これらを両立させる手法としてパルス圧縮法がある。パルス圧縮法とは送信信号を変調し、それによって得られる受信信号を相関演算等の処理(復調)を行うことで、パルス幅の圧縮およびノイズの低減を図る手法である。これは本来レーダの探知距離および分解能を両立させる方法として開発されたものであり、送信信号の変調として相補系列、チャープ波、M系列符号信号が用いられている。しかしながら、M系列信号やチャープ波を超音波探触子で発生させるには、任意波形発生装置や増幅器など特殊な装置を用意しなければならない。

そこで、本研究期間内において、主に次に示す課題について順に研究を遂行した。

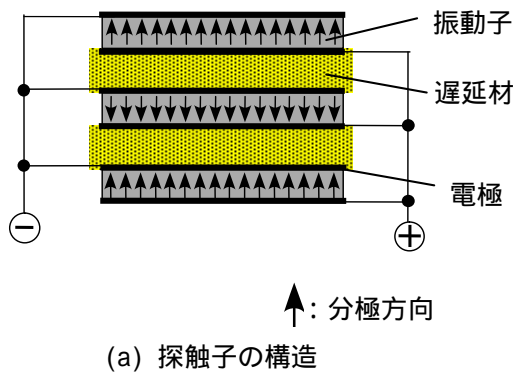
- ・高分子圧電フィルムにおける製膜技術の向上
- ・高分子超音波探触子の設計技術の確立
- ・高分子超音波探触子の製造・評価システムの改善
- ・符号積層開口技術による絶対感度の向上
- ・M系列パルス圧縮超音波探触子の開発
- ・チャープ波パルス圧縮超音波探触子の開発

以下に、M系列パルス圧縮超音波探触子の開発とチャープ波パルス圧縮超音波探触子の開発について詳細を報告する。

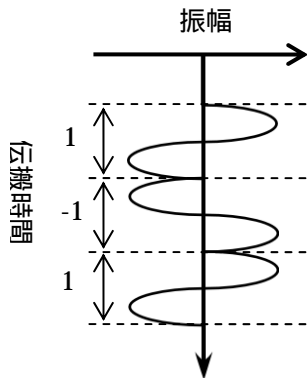
(1) M系列パルス圧縮超音波探触子の開発

高分子圧電膜に符号積層開口技術を応用して、M系パルス圧縮超音波探触子を開発した。そして、一般的なパルサーのみ(つまり、インパルス電圧駆動)でM系列超音波パルス列を発生させることで高分解能かつ高S/N比な超音波計測を行うことを検討した。

分極方向に対して電界の方向が逆になるようにパルサーで電圧を印加したとき、圧電逆効果により振動子は厚みが圧縮するようにひずみが生じ、負の極性のパルスを発生することができる。逆に、分極の方向と電界の方向が同じであれば正極のパルスを発生することができる。このように、振動子の分極方向で波面を符号化する技術を符号化開口技術と呼んでいる。この技術を応用すれば、図1(a)に示すように、振動子の分極方向と電界の向きを考慮しかつ遅延材を挟んで積層



(a) 探触子の構造



(b) 発信波形

図1 M系列符号化送信の原理

した振動子に電圧を印加すれば、各層で発生するパルスの位相がずれ、結果として図1(b)に示すように分極方向に対応した符号の順序(この例では、1, -1, 1)でパルス列、すなわち符号化された超音波パルス列を発生させることが可能である。これを、符号積層開口と呼ぶことにする。分極方向を変えた振動子の積層順序をM系列に従えば、M系列で符号化された超音波パルス列の発生が可能である。

本研究では、振動子に高分子圧電材料であるP(VDF-TrFE)(膜厚:52 μm)を採用し、遅延材には分極を施していない高分子圧電材料P(VDF-TrFE)とポリイミドを組み合わせることで積層膜内の多重反射を防ぎながら送信波の位相をコントロールした。積層用の接着剤にはエポキシ接着剤を使用しており、接着層ができるだけ薄くなるように工夫した。また振動子の電極として圧電膜の両面にはNi/Cuを蒸着しており、アルミ箔製の導線とは導電性の接着材を用いて接着を行った。また、バックング材にはエポキシ樹脂を使用した。これらの技術を応用して、今回、3bit長と7bit長のM系列パルス圧縮超音波探触子を製作し、それぞれ性能評価を行った。

(2)チャープ波パルス圧縮超音波探触子の開発

チャープ波の周波数分散特性を厚みの異

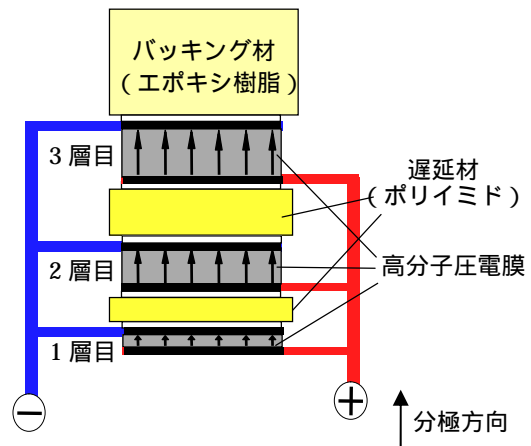


図2 チャープ波パルス圧縮探触子の構成

なる圧電膜を積層することでチャープ波に近づくことを考案した。ここで、探触子の開口表面から順に周波数が低くなるような波形が連なって送信されるように遅延層の厚みをコントロールした。バックング材はエポキシ樹脂、接着層はエポキシ系接着剤、遅延材はポリイミド、電極はアルミ箔を用いた。まず、膜厚と振動子の面積の関係を考慮し、チャープ波を発生させるための適切な周波数を発生する振動子について、等価回路シミュレーションを行いながら設計を行った。3つの振動子でチャープ波の効果を確認することを目的として図2の構成で、探触子を製作した。

また、考案したチャープ波パルス圧縮探触子は、出力される周波数の異なる振動子を積層しているため、一般の探触子と比べて広帯域な周波数を有する超音波を送信することが可能である。通常は、パルス圧縮するための復調(相関処理)をパソコンなどで行っているが、今回、この処理を探触子のみで行うことを考え、チャープ波パルス圧縮探触子の積層順序を逆にしたパルス圧縮専用受信子を新たに製作した。先に作製したチャープ波パルス圧縮探触子を送信子として発生させた超音波をこの専用受信子で受信すると、各層で検知する受信波の位相が等しくなり、結果としてこれらの合成された波は短パルスに近づき、パルス圧縮と同等の効果を実現できると考えた。

4. 研究成果

(1)M系列パルス圧縮超音波探触子の開発

作製した3bit長のM系列パルス圧縮超音波探触子からの送信波を水中において透過法で観測した受信波形の例を図3に示す。このように、パルス列の位相がM系列にしたがっており、本手法でM系列符号化パルス列の送信が可能であることを確認した。また、この送信波形から、遅延材により各層の送信波が遅延され、しかも探触子内での多重反射も比較的良好に抑えられていることも確認された。図4(a)は、図3の送信波を水中に沈めた

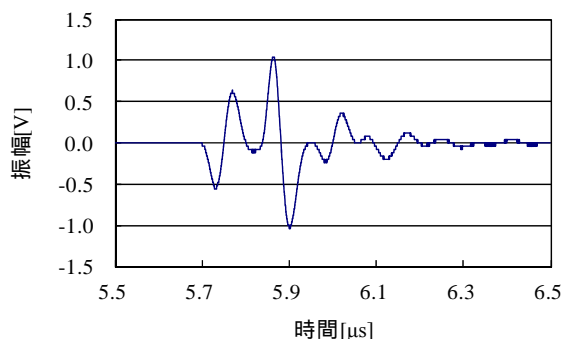
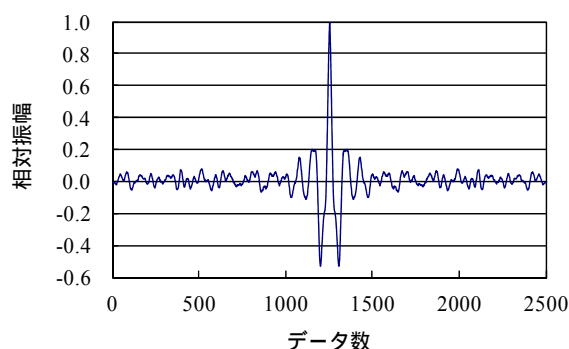
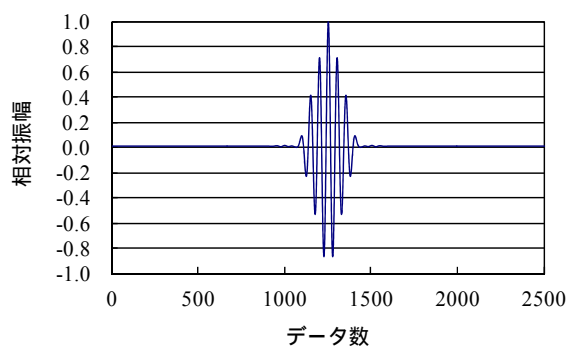


図3 3bit 長M系列パルス圧縮超音波探触子による送信波形



(a) 3bit 長M系列符号化パルス



(b) 3波のバースト波(シミュレーション)

図4 自己相関処理によるパルス圧縮波形

金属片で反射させ、これを自己相関処理によりパルス圧縮を行った波形である。比較のため、図4(b)に3波のバースト波(3周期のサイン波状パルス)を実験ではなく計算機上で自己相関処理した結果を示す。両者を比較すると、3bit 長のM系列符号化パルスでも、パルス圧縮効果が確認された。

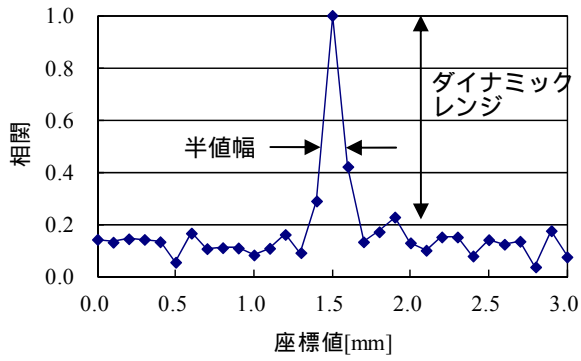
次に、製作した3bit 長および7bit 長のM系列パルス圧縮探触子の性能評価を行った。まず、水中の点対象物(直径0.5mmのピアノ線)を開口面に対し法線方向(Z方向)と開口面と平行方向(X方向)に0.1mm間隔で移動させながら各位置からのエコーを受信した。そしてこれらの波形データを相関処理することにより一次元の点広がり関数を求め、空間分解能やS/N比等の性能を評価した。図

5は3bit 長、また図6は7bit 長のM系列パルス圧縮探触子による結果をそれぞれ示している。また、比較として図7に中心周波数10MHzの市販の平板探触子で同様な実験を行った結果を示す。まずZ軸方向の点広がり関数の半値幅を比較すると、3bit 長よりも7bit 長の探触子の方が狭いことがわかる。分解能は点広がり関数の半値幅で評価できるので、7bit 長のM系列パルス圧縮探触子の方がより高分解能で計測できることがわかった。また、M系列パルス圧縮探触子は、平板探触子と比べダイナミックレンジが高いことも確認された。このダイナミックレンジは、計測時のS/N比依存するため、より高い方が高S/N比での計測が可能となる。一方、X軸方向の点広がり関数をそれぞれ比較すると、Z軸同様、7bit 長の方が、3bit 長に比べ性能が向上していることがわかった。また、平板探触子と比べM系列パルス圧縮探触子の半値幅は、X軸方向では顕著に狭く、この結果として水平方向の分解能つまり指向性が大幅に向上していることがわかった。以上のことから、M系列パルス圧縮探触子を用いると、高SN比かつ高分解能で超音波計測が可能であることが実証された。

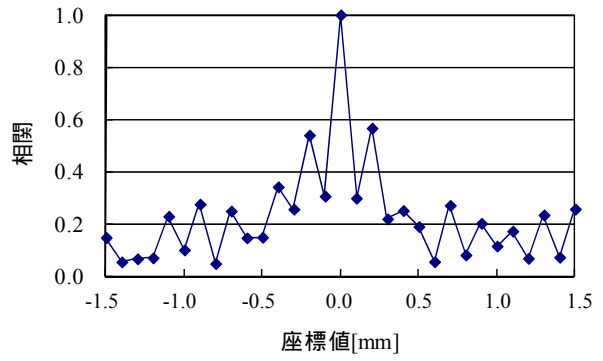
(2) チャープ波パルス圧縮超音波探触子の開発

開口表面から順に24, 15, 10MHzの3層の圧電膜からなるチャープ波パルス圧縮探触子を製作した。製作した探触子を上と同じく水浸法で評価を行った。一般的な超音波探傷に用いられるパルサー・レシーバーからインパルス電圧を振動子に印加し、探触子から超音波を送信した。そして、対象物体であるピアノ線の表面からの反射波を探触子の1層目のみで受信した。得られた受信波形をPCに取り込み、自己相関処理を行うことによってパルス圧縮が可能か否かを確認した。評価結果を図8に示す。図8(a)から、時間と共に周波数が低くなったチャープ波が確認できる。また、図8(b)より、相関処理によりパルス幅が狭くなっていることから、チャープ波パルス圧縮探触子の圧縮特性が確認された。これにより、チャープ波パルス圧縮探触子によって既存の探傷器のみでチャープ波を送信可能であることを確認し、本手法の有効性を実証した。

最後に、チャープ波パルス圧縮探触子の積層順序を逆にした専用受信子を作製し、探触子のみによるパルス圧縮計測システムの構築を試みた。水浸法で、チャープ波パルス圧縮探触子から送信した超音波を、専用受信子に対向の位置に置き直接受信した。このときの受信波形を図9に示す。この結果から、パルス幅が圧縮されており、積層順序を逆にした専用受信子を用いることで、探触子のみでパルス圧縮(復調)を行えることを実証した。

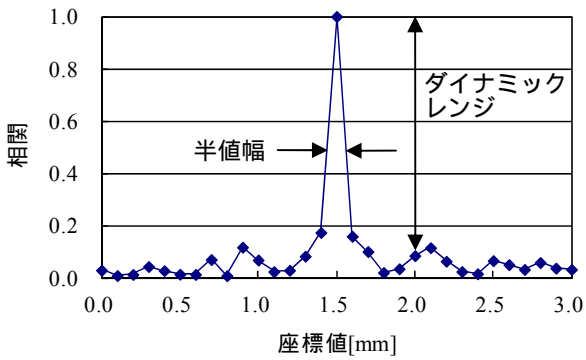


(a) Z軸（深さ）方向

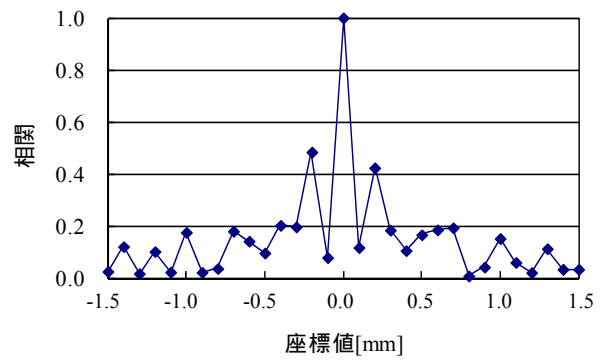


(b) X軸（水平）方向

図5 3bit 長M系列パルス圧縮探触子による一次元点広がり関数

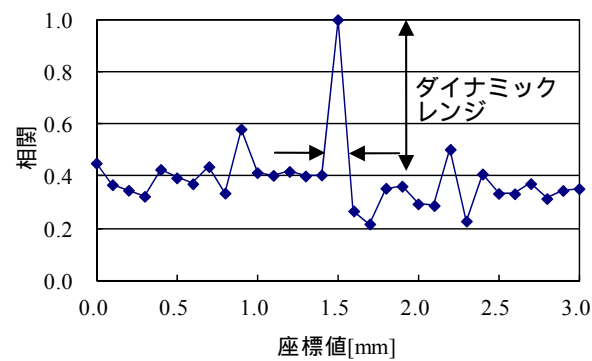


(a) Z軸（深さ）方向

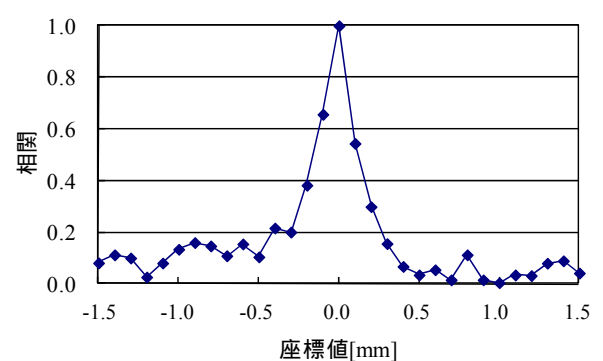


(b) X軸（水平）方向

図6 7bit 長M系列パルス圧縮探触子による一次元点広がり関数

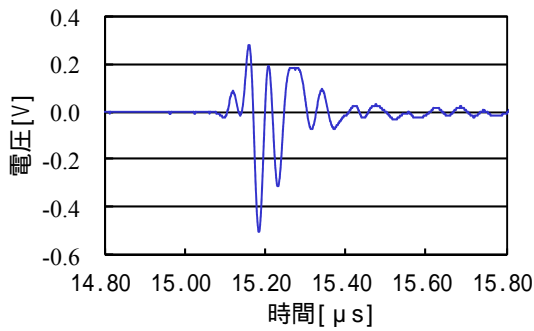


(a) Z軸（深さ）方向

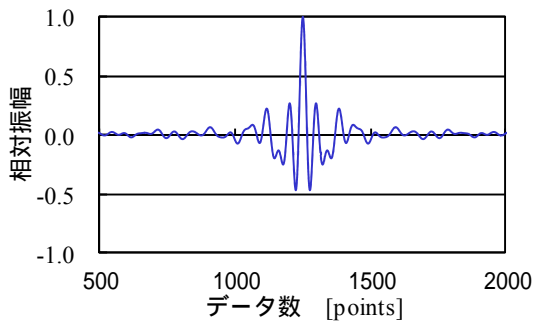


(b) X軸（水平）方向

図7 市販の平板探触子による一次元点広がり関数



(a) チャープ波パルス圧縮探触子による送信波形



(b) 相関処理による圧縮波形

図8 チャープ波パルス圧縮探触子の評価

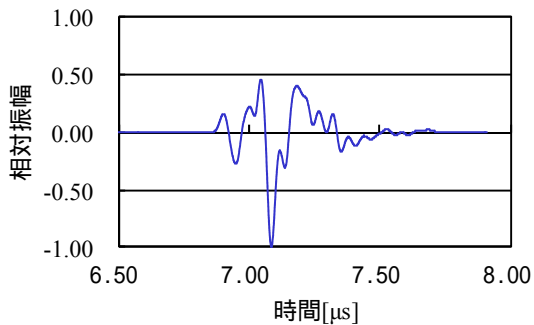


図9 専用受信子によるパルス圧縮

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)

[学会発表](計10件)

Y. Murata, H. Yonenaka and M. Fujigaki: Development of M-sequence Pulse Compression Ultrasonic Transducer Using Piezoelectric Polymer Films, The Fifth Japan-US Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, Hawaii, USA, (2014.6.19)

村田 頼信, 馬場 千晶, 藤垣 元治: 周波数制御した高分子圧電膜の積層によるチャープ波探触子の開発, 第18回メカトロニクスワークショップ, 高松, pp.67-71(2013.8.28)

馬場 千晶, 村田 頼信, 藤垣 元治: 広帯域高分子圧電膜を用いた積層型探触子によるチャープ波パルス圧縮探傷システムの開発, 日本非破壊検査協会関西支部 平成25年度非破壊検査に関する研究発表会, 大阪, pp.29-32(2013.8.19)

馬場 千晶, 村田 頼信, 藤垣 元治: 高分子圧電材料の広帯域特性を利用したチャープ波パルス圧縮探触子の開発, 産学連携事業 和歌山大学・近畿大学大学院生研究成果発表会 和歌山, ポスター, (2013.2.8)

村田 頼信: 高分子広帯域超音波プローブの開発及び応用技術, 第2回和歌山医学研究会, 和歌山, (2012.9.13)

村田 頼信: 高分子超音波トランスデューサの非破壊検査への応用, 第195回有機エレクトロニクス材料研究会, 東京, pp.3-10 (2012.9.5)

村田 頼信, 米中 博志, 藤垣 元治: 符号化開口技術を用いたM系列パルス圧縮超音波探触子の開発, 精密工学会 第17回メカトロニクスワークショップ, 広島, CD-ROM, (2012.8.30)

馬場 千晶, 村田 頼信, 藤垣 元治: 高分子圧電膜を用いたチャープ波パルス圧縮探触子の開発, 日本非破壊検査協会関西支部 平成24年度非破壊検査に関する研究発表会, 大阪, pp.11-14(2012.8.22)

米中 博志, 村田 頼信, 藤垣 元治: 符号化開口技術を用いた高分子超音波探触子の高性能化に関する研究, 日本非破壊検査協会 第19回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, pp.135-136 (2012.1.26)

H. Yonenaka and Y. Murata: Study on Directionality Control by M-sequence Encoding Ultrasonic Transducer, The 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics, Kyoto, JAPAN, pp.479-480 (2011.11.9)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 頼信 (MURATA, Yorinobu)
和歌山大学・システム工学部・准教授
研究者番号: 50283958