


論文内容要旨 (和文)

氏名 高橋 貞幸 論文題目 空中で使用する高周波超音波P(VDF/TrFE)トランスデューサの開発と応用

<研究主題> 本論文では、機能性高分子材料である P(VDF/TrFE)(75/25mol%)圧電材料を用い、①空気(媒質)中に於いて動作する高周波超音波トランスデューサの開発、②この開発した超音波トランスデューサを用いた高周波数(1~10MHz)での空気の吸収値の測定と、低温度領域での空気の音速と吸収値の測定、および③これらのトランスデューサを用いた、空気を媒質とする高周波数の超音波画像装置の開発を行った。また、この圧電体を用いた高周波数で動作する超音波顕微鏡用トランスデューサの開発と画像装置の開発を付記した。

<研究概要> 対象物の外形や内部構造を MHz 帯域の超音波を用いて画像化する技術は、超音波診断、超音波探傷あるいは超音波顕微鏡の分野で既に確立している。これらの技術では、超音波の音響伝播媒質(カプラ)は、多くの場合、水などの液体であり、気体は殆ど用いられていない。

気体が用いられないのは、その音響インピーダンスが、水のそれと比較して極端に小さいので、超音波トランスデューサとの音響インピーダンス整合が極端に悪くなり、従ってトランスデューサの送受信効率が極めて低くなること、これに加えて、MHz 帯域では空気中での超音波減衰係数が水中のそれより、3桁程度大きいので受信信号が微小になるという技術的な理由によっている。

本研究者はこれまでに、フッ素系圧電高分子材料であるフッ化ビニリデンとトリフルオロエチレンのランダム共重合体 P(VDF/TrFE)の厚み振動子を用いて MHz 帯域(3~920MHz)の超音波トランスデューサを開発し、音響媒質に水や液体窒素を用いて超音波診断、超音波探傷、超音波顕微鏡に応用してきた。P(VDF/TrFE)は圧電高分子中では最大の電気機械結合係数($k_t=0.3$)をもち、また密度と弾性率が小さいため、PZT セラミックなどの無機の圧電材料と比較して、ほぼ 1桁小さい音響インピーダンスをもつ。更に、圧電高分子膜は柔軟性に富むので、薄膜の場合は球面状の放射面をもつ収束超音波用のトランスデューサに加工するのが容易である。これらの特徴から P(VDF/TrFE)は空中超音波の送受信に有利なトランスデューサ材料であると考えられる。しかし、P(VDF/TrFE)による MHz 帯域の空中超音波による送受信や画像形成、およびその応用についての研究はこれまで殆ど行われていない。

本研究では、圧電高分子である P(VDF/TrFE)材料による、MHz 帯域の空中超音波トランスデューサとしての有効性を実証する目的で、空気中で動作する、平面型高周波数トランスデューサの開発による送受信(1~10MHz)と、2~6 MHz の凹面型空中超音波トランスデューサを開発し、表面反射法による音響画像形成を行った。この P(VDF/TrFE)トランスデューサの圧電体は、高効率化を図るため、圧電膜の積層方式(6MHz トランスデューサは単層膜)を、電源との整合性をとるため並列積層を行い、直列積層の圧電膜と比較し、Mason の等価回路を基に解析を行った。その結果、圧電膜とバックリングプレートを接着剤により製作したトランスデューサの効率は、計算値と比較して、20dB 程度の低下がみられた。この原因は、接着層による効率の低下である。この接着剤(層)によって起こるトランスデューサ挿入損失(TL)の低下を解決するために、P(VDF/TrFE)圧電材料が、延伸行程を必要とせず、熱処理のみで結晶化(B型結晶構造)することに着目し、ポリマー溶液を直接金属基板上に展開する、キャスト法での圧電膜の製膜を試みた。この結果、接着剤(層)によるロス(効率の低下)が除去され、高感度の P(VDF/TrFE)空中超音波トランスデューサの開発に成功した[6MHz 用 P(VDF/TrFE)トランスデューサの効率は 57dB]。このキャスト法によって開発した効率の良いト

ランスデューサを用いることで、高周波の超音波の送受信が可能となり、1~10MHz 迄の空気吸収数値を求めることができた。この吸収値は、理論値と良く一致する。

P(VDF/TrFE)圧電膜は、これまでの研究から、低温(~10 K)でも動作することが判明している。加えて、これまでに Poly(methyl methacrylate) [略称 PMMA]のブロックの両対面に、直接P(VDF/TrFE)圧電膜を貼り付けて、低温(~10K)での音速変化を測定できることなどを報告してきた。これらの研究経過から、P(VDF/TrFE)トランスデューサは、低温でも、空気(気体)の音速と吸収値を測定できる可能性が、非常に高いことが予想できる。このため、本研究では、GM 型の低温用クライオスタットを用いて、このクライオスタット内部の試料室内に、P(VDF/TrFE)トランスデューサ(2 MHz および 4 MHz の 2 種類で実験)を設置して、室温から 180 K 迄の空気の音速と吸収値を測定した。その結果、測定された空気の音速値は、これまでに報告されている理論値と良く一致した。また、周波数 4.5MHz での低温(室温~180K)に於ける空気の吸収値の測定を行った。その結果、およそ 10 K あたり 2.5 dB/cm のレートで、空気の吸収値が大きくなることが判明した。これらの測定を可能とする空中用 P(VDF/TrFE)トランスデューサは、低温度領域に於ける気体用センサーとして活用できることが分かった。前述のキャスト法によって、比較的厚みのある P(VDF/TrFE)(膜厚 0.25mm 程度)の開発を行った。この方法によって効率の良い平面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサ(動作中心周波数 2.5MHz)を開発し(トランスデューサの挿入損失は 63dB)、厚み 4.1mm の LSI(通称 8255-PPI)の透過画像の形成を試みた。この結果、平面型トランスデューサのため画質に問題は残るが、2.5MHz の超音波を透過させることは十分可能であった。

ポリマー溶液を直接展開する方法での凹面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサは、厚みムラの問題があり、まだ製膜技術は確立していない。このため従来の接着剤を用いる方法により、凹面型の P(VDF/TrFE)空中超音波用トランスデューサ(2~6MHz)の製作を行い、空気中での画像形成を試みた。また、このトランスデューサの開発と同時に、表面反射法による超音波画像システムの開発を行った。本システムによって形成した超音波画像は、最小分解能 20 μ m であった。

本論文の付章 1 では、P(VDF/TrFE)(75/25mol%)を超音波顕微鏡(100MHz 以下の画像装置を含む)用のトランスデューサに応用し、1GHz 近辺までの画像を取得したことを述べた。






また、付章 2 では、操作し易い 100MHz 程度で動作する P(VDF/TrFE)トランスデューサとその駆動装置の開発について詳細に述べた。

学位論文の審査及び学力確認の結果の要旨

平成 24 年 8 月 17 日

理工学研究科長 殿

論文博士論文審査委員会

主査 伊藤 浩志 
副査 米竹 孝一郎 
副査 小山 清人 
副査 田村 安孝 
副査 

学位論文の審査及び学力確認の結果を下記のとおり報告します。

記

1. 論文申請者

氏名 高橋 貞幸

2. 論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記する。)

..... 空中で使用する高周波超音波 P(VDF/TrFE)トランスデューサの開発と応用

3. 審査年月日

論文審査 平成 24 年 7 月 24 日 ~ 平成 24 年 7 月 30 日

論文公聴会 平成 24 年 7 月 30 日

場所 工学部 国際事業化センター 3F 秦ホール

学力確認 平成 24 年 7 月 30 日

4. 学位論文の審査及び学力確認の結果 (「合格」・「不合格」で記入する。)

(1) 学位論文審査 合格

(2) 学力確認 合格

5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200 字程度)

別紙のとおり

6. 学力確認の結果の要旨

別紙のとおり

別紙

氏名 高橋 貞幸

学位論文の審査結果の要旨

本論文では、無機の圧電体材料と比較して、音響インピーダンスが小さい圧電性高分子材料 P(VDF/TrFE)に着目し、空気中で送受信可能な高周波用トランスデューサの開発、低温での動作特性、トランスデューサの性能評価および MHz 帯域での音響画像形成など、広範囲にわたり研究が行われている。全7章から構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、P(VDF/TrFE)を用いた空中用超音波トランスデューサを開発する背景、目的および研究の重要性・意義について記述している。

第2章では、P(VDF/TrFE)圧電膜の作製方法、およびこの圧電膜を用いた平面型の超音波トランスデューサの開発とその評価方法を述べている。圧電膜とバッキングプレートは接着剤によって試作した平面型トランスデューサにより、共振周波数 2MHz での超音波送受信に成功した。しかし、接着層によるロスが大きいことが示唆され、圧電膜とバッキングプレートの接着層の改善が必要であることが分かった。

第3章では、第2章での P(VDF/TrFE)トランスデューサの性能評価に基づき、改良型のトランスデューサを開発した。具体的には、P(VDF/TrFE)の溶媒キャスト法により接着層を有しないトランスデューサを開発した。

第4章では、P(VDF/TrFE)空中超音波トランスデューサの動作を室温から低温領域迄(~180K)拡大し、低温に於ける空気音速と吸収係数を求めた。

第5章では、平面型 P(VDF/TrFE)トランスデューサを用いて、2.5MHz 帯での透過画像形成を行っている。平面型であるため超音波の焦点が無限大になり解像度に限界があるが、集積回路の透過画像形成を実現している。

第6章では、本研究で開発した凹面型 P(VDF/TrFE)高周波トランスデューサを用い、2MHz 帯域での表面反射画像を形成した。凹面型では照射波がスポットとなるため、散乱(吸収)の影響が大きくなり、受信感度が低下することが懸念された。しかし、送受信兼用型トランスデューサを作製し、さらに位相差による画像処理などにより、空間分解能 20 μ m の画像処理システムを実現した。

第7章では、本研究を総括し、得られた成果の主要なものをまとめるとともに、現時点での研究課題と今後の展望についての結論付けがなされている。

本論文は、従来、空気中では困難であるとされてきた MHz 帯域での超音波送受信を、P(VDF/TrFE)に着目し、その有効性を実証した内容であり、空気中で動作する高周波用超音波トランスデューサの製作および送受信システムの基本設計を確立したものである。

本研究の成果は、筆頭者原著論文5報(うち英文4報)、国内講演発表(26件、うち筆頭者17件)、1件の国内招待講演として公表している。さらに、解説4報、技術研究会発表6件、1件の特許が存在する。

以上を総合的に判断し、本論文に関する研究およびその成果は、博士(工学)学位論文としての水準を満足しているため、合格と判定した。

学力確認の結果の要旨

学力確認は、学位論文公聴会における質疑応答と個別面接を通じて、博士論文に関連する内容について約30分間実施した。その結果、博士として必要とされる専門知識、理解力は十分にであると認められた。また、外国語科目(英語)の学力については、英語論文の読解力もあり、英語による学術論文が筆頭著者として4報あることから、英語力は十分に備えていると判断した。以上を踏まえ、審査委員全員の協議の結果、合格と判定した。