超音波振動子の特性適応技術による医療用診断装置の性能向上

Improvement in Performance of Medical Diagnostic Equipment by Characteristic Adaptation Technology of Ultrasound Transducer

上田日本無線株式会社

宮　下　俊　彦
Toshihiko Miyashita

要　旨

細かな病変を精密に診断する医療用超音波診断装置には，高解像度画像の出力を可能とする高い性能が求められる。この要求を満たすため，信号処理用ICの性能向上，回路設計の最適化，ソフトウェア制御による機能改良が進められてきたが，このほかに，装置の性能を決める超音波プローブの性能向上が大きな課題となっていた。当社は，永年培ってきた生産技術を応用し，超音波プローブの振動子を構成する圧電材を複合（コンポジット）化することにより，超音波プローブの性能を大きく向上させた。

Abstract

An ultrasound diagnostic equipment for medical use which diagnoses a fine lesion precisely is required to have the high performance capable of outputting a high resolution image. In order to meet this requirement, improvement in performance of IC for signal processing, optimization of circuit design, and functional improvement by software control had been advanced. In addition to this, the improvement in performance of an ultrasound probe that determines the performance of the equipment has been a major issue. By applying the production technology cultivating over many years, UJRC has made a composite of the piezoelectric material that constitutes the transducer of the ultrasound probe, greatly improving the performance of the ultrasound probe.

1. まえがき

医療用超音波診断装置に使用される振動子は，電圧印加を受けて振動し，超音波を発生させるPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）を主成分とした圧電材．圧電材の背面への不要音を吸収し制動するバッキング，超音波を効率良く人体に伝える整合層，超音波を人体の目標部位に集中させる音響レンズで構成されている。当社は，これら構成要素における圧電材に着眼して改良を行い，装置の診断性能を向上させた。

画質を向上させるためには，振動子の音響周波数帯域を拡げて分解能を向上させる必要がある。当社は，振動子の分解能を向上させるため，従来比で10 ％以上の音響周波数帯域拡大を目標とし，圧電材の複合化に向けた研究を重ねた。

本稿では，当社が研究・開発した圧電材料の複合化技術及び加工技術について報告する。

2. 複合圧電材使用超音波振動子

当社が開発した複合圧電材を使用した医療用超音波振動子について説明する。

2.1　圧電現象

超音波振動子は，圧電現象（圧電効果，圧電逆効果）により超音波を発生させる。図1に圧電現象の原理を示す。

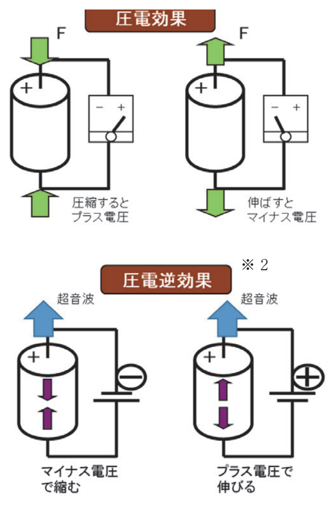


図1　圧電現象

Fig.1　Piezoelectric phenomenon

※1　圧電効果は超音波振動子に緑の矢印のように伸縮（圧力）を加わえて電圧を発生させる。

※2　圧電逆効果は超音波振動子に電圧を加え，伸縮させて超音波を発生させる。

共振周波数付近における圧電素子の特性（等価回路，インピーダンス特性）を図2に示す。

圧電素子を広帯域化（高分解能化）するための条件は，

次式における共振周波数frと反共振周波数faの差が大きいことである。複合圧電材は圧電材に樹脂を混合することで合成された振動となり，その差が大きくなるため，この条件に合致し，広帯域化（高分解能化）の実現性が高いと判断した。

$$\frac{1}{k33^2} = a \times \frac{fr}{(fa-fr)} + b \qquad (1)$$

fr：共振周波数
fa：反共振周波数
a：係数　0.405
b：係数　0.810
k33：電気機械結合係数（縦振動）

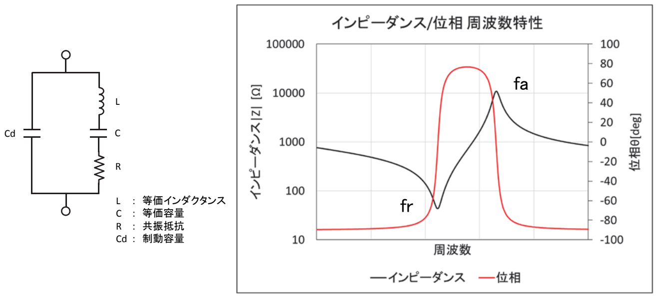
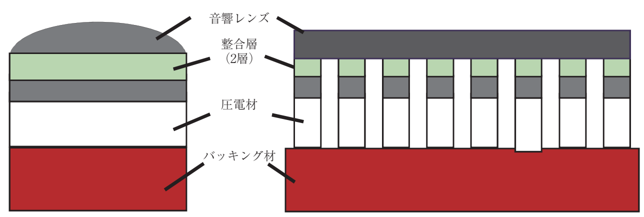


図2　圧電材の等価回路とインピーダンス特性
Fig.2　Equivalent circuit and impedance characteristics of piezoelectric material

2.2　超音波振動子について

超音波振動子は「電気信号を受けることにより超音波を発生させる」「超音波を受けて電気信号を発生させる」の双方向の動作を行う変換器（トランスデューサ）である。

図3に一般的な超音波振動子の構成を示す。



(a)曲率半径方向　（b）配列方向
(a) Curvature radius direction　(b) Array direction
図3　振動子断面図
Fig.3　Transducer sectional view

2.3　複合圧電材について

複合圧電材とは，図4に示すように，圧電材料を樹脂内に埋設したものである。樹脂と連動して広範囲の周波数において振動するため，広帯域化（高分解能化）が図れる。また，音響インピーダンスの調整が可能となるため，振動効率が向上する。

図5に，複合圧電材に含まれるPZTの体積分率と電気機械結合係数の関係を示す。また図6にPZTの体積分率と音響インピーダンスの関係を示す。図5及び図6から，電気機械結合係数が最大（0.6以上）となる体積分率の最適値は50～60％であり，音響インピーダンスは15～20で十分であることがわかる。

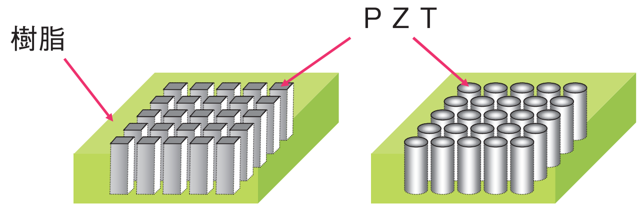


図4　複合圧電材料
Fig.4　Composite piezoelectric material

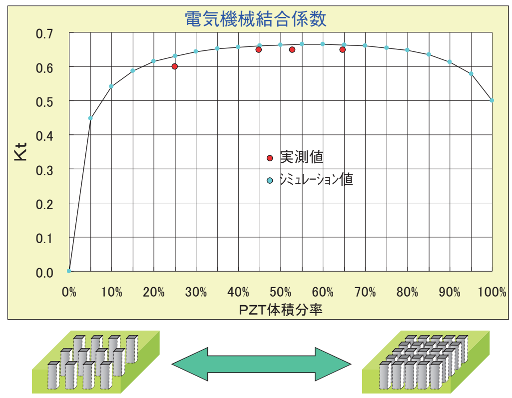


図5　含有PZT体積分率と電気機械結合係数の関係
Fig.5　Relation between contained PZT volume fraction and electromechanical coupling coefficient

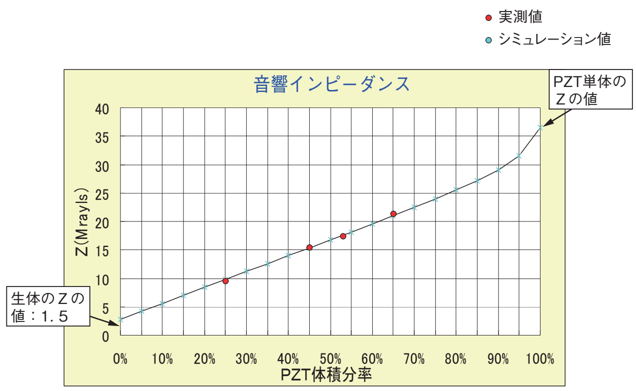


図6　PZT体積分率と音響インピーダンスの関係
Fig.6　Relation between PZT volume fraction and acoustic impedance

3.　採用した技術

圧電材料の複合化に際し，振動子の構造及び材料を最適化した。複合圧電材の製造においては，圧電材に溝を入れ，樹脂で充填する「ダイス＆フィル法」を採用した。本法の実施においては，微細な圧電材の柱を形成する「ダイシング加工」の精度が重要となる。また，樹脂の選定に際しては，溝に充填しやすい粘度であることと電気的特性に影響しない硬さをもつことの両立性を考慮する必要がある。さ

らに，樹脂の温度耐性を考慮し，製造時の雰囲気温度を摂氏100 ℃以下に抑える必要がある。

図7に従来型の振動子を，また図8に新開発した複合圧電材による振動子の構造を示す。図8に示すとおり，複合圧電材による振動子はピラーがチャネルごとに並ぶ構造となっている。

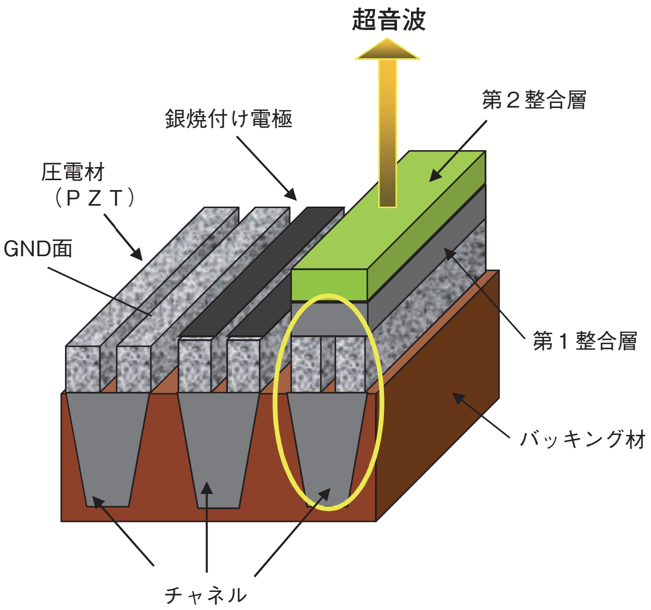


図7　従来型の振動子の構造
Fig.7　Structure of conventional transducer

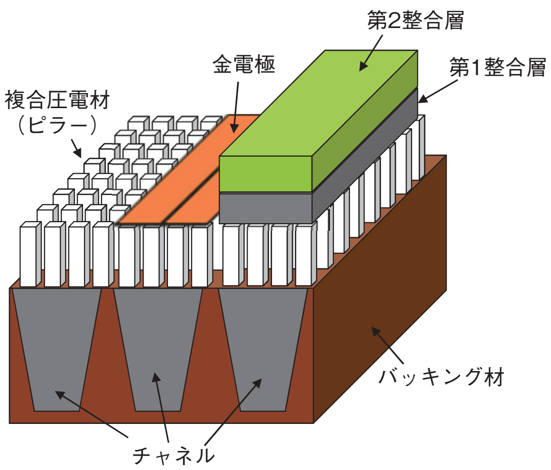


図8　複合圧電材による振動子の構造
Fig.8　Structure of transducer by composite piezoelectricity material

3.1　複合圧電材料の構成・形状

圧電材のサイズとダイシング加工条件を最適化した。図9は複合圧電材のカット状態を，また図10はチャネル断面を示す。

ピラーは少ない方が素子幅が広く加工性はよいが，結合係数が低く感度が低い。一方，ピラーが多いと素子幅が狭くなり加工性が悪くなるが，結合係数は高くなり感度が上がるという関係がある。

(1)　変換効率を考慮したピラー数の決定
　体積分率　－ アスペクト比　変換効率の選択
　　3ピラー／チャネル　高性能化困難
　　4ピラー／チャネル　採用

(2)　微細構造を実現するダイシング条件だし
　　（素子幅0.075 mm／溝0.025 mm）
　ブレード　0.05 mm → 0.025 mm
　カットスピード　5 m/s → 0.2 m/s

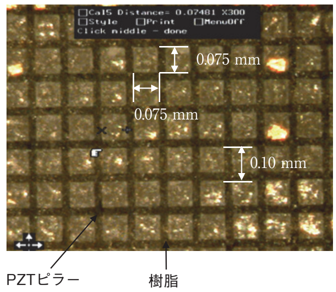


図9　複合圧電材
Fig.9　Composite piezoelectric material

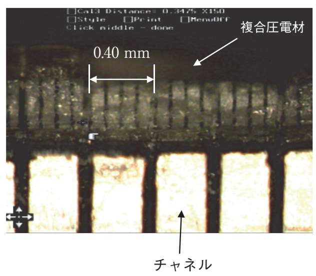


図10　チャネル断面
Fig.10　Channel cross section

3.2　充塡樹脂

複合圧電材全体が均一に振動するよう，振動の均一性を確保し，かつ隣接チャネルとの干渉を避けるために必要な条件を満たす充塡樹脂を選定した。

3.3　電極

従来，電極は700 ℃程度の高温による銀焼付け方法により形成していたが，複合圧電材においては振動子の構造体に樹脂が存在し，電極を高温で形成処理することが難しいため，100 ℃程度で形成処理が可能な金スパッタ（イオンプレーティング）へ変更した。また同様の理由により，電極の接合材を従来のはんだから導電性接着剤に変更した。

3.4　各種材料の音響インピーダンスの最適化

表1は振動子の構成材料についての従来品との比較である。開発品は複合圧電材の音響インピーダンスが低下するため，この特性に合わせた整合層，音響レンズの材料を新たに製作した。

表1　従来型振動子との構成材料特性比較
Table 1　Comparison of constituent material characteristics with conventional transducer

単位：10^6 [kg/m^2·s]

項目	従来品	開発品
音響レンズ	1.4	1.3
第2整合層	2.3	2.0
第1整合層	7.9	7.6
圧電材	21	15
バッキング材	6.5	6.5

4. 評価結果

今回，腹部臓器（肝臓や胆のうなど）の観察用に用いられる3.5 MHz帯の振動子において，複合圧電材を用いた振動子を試作した。その振動子の性能を従来品と比較した。

4.1 従来型振動子との特性比較

表2に振動子の総合特性の比較を，また図11に音響特性の比較を示す。

図11に示すとおり，音響周波数特性の広帯域化が図れ，目標とした「10 %以上の音響周波数帯域拡大」を実現した。また出力信号のパルス幅が短くなり，観測画質が向上した。

図12に新開発した複合圧電材による振動子の外観を示す。

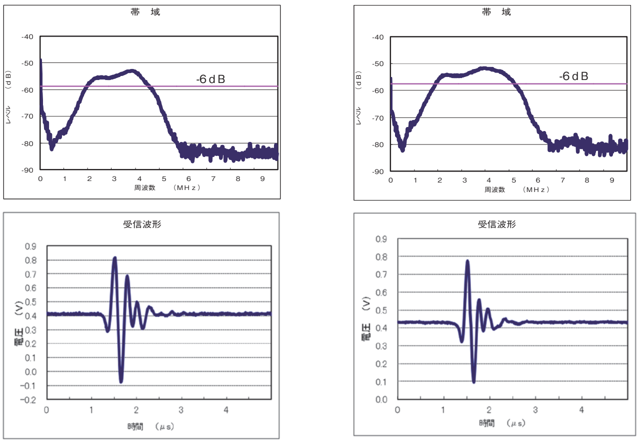


図11 音響特性比較（左：従来品，右：開発品）
Fig.11 Comparison of acoustic characteristics (left: conventional product, right: developed product)

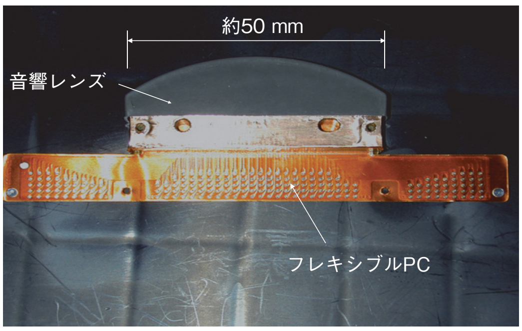


図12 新開発した複合圧電材による振動子の外観
Fig.12 Appearance of transducer by newly developed composite piezoelectricity material

表2 振動子の総合特性の比較
Table 2 Comparison of overall characteristics of transducers

項目	結果	
	従来品	開発品
中心周波数(-6 dB)	3.2 MHz 1.8-4.5 MHz	3.4 MHz 1.6-5.2 MHz
比帯域（-6 dB）	84 %	106 %
パルス幅（-20 dB）	1.1 μs	1.0 μs
送受信感度	-48 dB	-52 dB
曲率半径	60 mm	同左
チャンネル数	192	同左
チャンネルピッチ	0.4 mm	同左

4.2 画像

人体組織と同等性質を持つゲル状ファントムを被検体として用い，振動子をプローブに組み上げた画像診断装置により観測した超音波診断画像を図13に示す。新開発した複合圧電材による振動子を用いることにより，振動子の近傍部位から15 cmまでの領域において全体的にきめ細かな画像が得られ，観測用被検体として内設する直径1 mmの糸ターゲットも明瞭に表示されている。

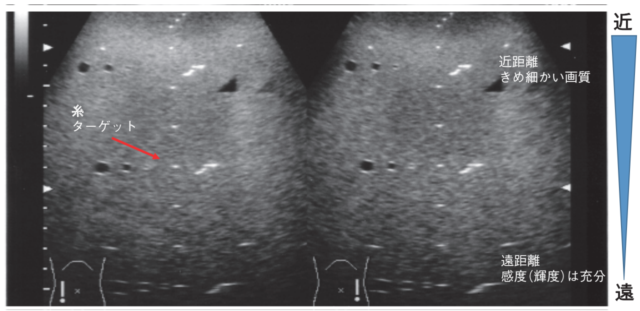


図13 被検体を用いた超音波診断画像比較
（左：従来型振動子を使用，右：新開発した振動子を使用）
Fig.13 Ultrasound diagnostic image comparison using subject (left: using conventional transducer, right: using newly developed transducer)

5. あとがき

永年にわたる医療用超音波振動子の開発により培ったノウハウを活かして複合圧電材を用いた振動子を新たに開発し，超音波プローブの高性能化を実現した。今回は，観測対象を腹部（肝臓や腎臓）として，比較的低周波域の超音波を扱う振動子の開発を行ったが，今後，心臓，血管などを観測対象とする形状の振動子や，高周波数帯（10 MHz～20 MHz）の振動子の開発に，本開発の技術を応用することが期待できる。

用　語　一　覧

複合圧電材：圧電材（PZT）に樹脂を充填した複合体
PZT：Pb(Zr, Ti)O_3（チタン酸ジルコン酸鉛）
音響インピーダンス：材料の密度と音速を掛け合わせたもの
整合層：人体へ効率よく超音波を伝えるための中間媒体
音響レンズ：超音波を所望の位置に集束させるためのもの
バッキング：圧電材背面の不要音を吸収し制動する
ピラー：複合圧電材におけるPZTの柱
スパッタ：電極形成手法の一つ。
真空蒸着に類する薄膜製造技術。
ダイス＆フィル：ダイシングブレードを用いて圧電材に切り溝を入れ，
樹脂で充填する方法