

cMUT技術による 超音波探触子「Mappie」の開発

Development of Ultrasonic Transducer "Mappie" with cMUT Technology

佐光 暁史 Akifumi Sako
深田 慎 Makoto Fukada
佐野 秀造 Shuzou Sano

石田 一成 Kazunari Ishida
浅房 勝徳 Katsunori Asafusa
泉 美喜雄 Mikio Izumi

株式会社日立メディコ USシステム本部

近年の著しい超音波診断技術の進歩に伴って、高分解能診断画像の描出に対する要求は高まりつつある。一般的に超音波診断における病変組織の描出能力は超音波探触子の空間分解能に大きく依存するため、探触子には高度な音響設計技術が必要とされてきた。しかしながら、圧電セラミック振動子を用いた従来の超音波探触子においては、その物理特性上、信号の短パルス化、広帯域化に限界があった。今回、われわれは超音波振動子にcMUTを用いることで、この物理的限界を打破し、分解能を向上させた乳腺用超音波探触子「Mappie」を世界に先駆けて実用化した。ここでは、その開発の背景、音響特性評価結果などに関して報告する。

Recently, the techniques in Ultrasound Diagnosis have made great advances, and there is a growing tendency toward more high-resolution imaging. Generally the ability to visualize a pathological tissue strongly depends on the spatial resolution of Ultrasound Probe, thus the requirement of designing ultrasound probe with high acoustic technology has become necessary. However, traditional probe using piezoelectric material has the limit of widening its frequency range and shortening its responded pulse width, due to its physical character. Then, the authors developed the novel mammary purposed probe "Mappie" with cMUT technology, which is beyond the limits of the traditional ultrasound probe, and is also first, recognized in the world's market. This paper reports on the background of this development and the examination results, leaving the details of its clinical usefulness to be described in other reports.

Key Words: cMUT, MEMS, Mammary Purposed Probe

1. はじめに

一般的に超音波診断における病変組織の描出能力は超音波探触子の空間分解能に大きく依存する。この空間分解能は、距離方向および方位方向の分解能によって決まるものであり、超音波探触子の周波数帯域、ビーム形状、パルス幅などと強い相関を有する。したがって、これまで高分解能画像を描出するために高度な探触子音響設計技術が要求されてきた。

従来、超音波探触子における振動子材料には、PZT(Lead Zirconate Titanate)等を用いた圧電セラミック材料が用いられてきた。この材料の歴史は長く、近年はコンポジット化技術や単結晶化技術などにより、その音響特性の向上が図られている。

これら圧電セラミック振動子を用いた超音波探触子においては、生体への超音波伝播効率を向上させるために、振動子と生体間に数層の音響整合層を設ける手法が一般的に用いられている。この手法は伝送線のインピーダンス整合を利用した方法であるが、原理上単一周波数においてのみ最適化されるため、伝播信号の短パルス化、広帯域化に限界があった。

一方、cMUT(Capacitive Micro-machined Ultrasonic Transducers)は半導体技術を応用した容量性超音波トランスデューサであり、その優れた音響特性のため近年実用化が注目されている技術である¹⁾。cMUTはシリコン基板上にリソグラフィ技術を用いて多数の微小センサ(cMUTセル)をパター

ニングすることにより作製される(図1)。各cMUTセルの構造は絶縁材料内に真空間隙を閉じ込め、セル上下に電極を設けた構造となっている(図2)。そして、電極間に静電気を印加し、電極膜を振動させることにより超音波信号を送信し、受信時は電極膜の変位量を静電容量の変化として信号を検出する。

このcMUTの振動膜は圧電セラミック振動子と比較し、非常に軽く、柔らかい特長がある。そのため、音響整合層を用いずともcMUT-生体間において良好な音響整合が実現できる²⁾。それゆえ、短パルス、広帯域の信号を送受信することができる。また、cMUTは量産性に優れた半導体プロセスを用いているため、特性ばらつきの少ないアレイ構造が得られる特長がある。これらの特長により、cMUTは従来探触子以上の高分解能診断画像の描出が可能となる³⁾⁴⁾。

今回、われわれはcMUTのデバイス設計および探触子への

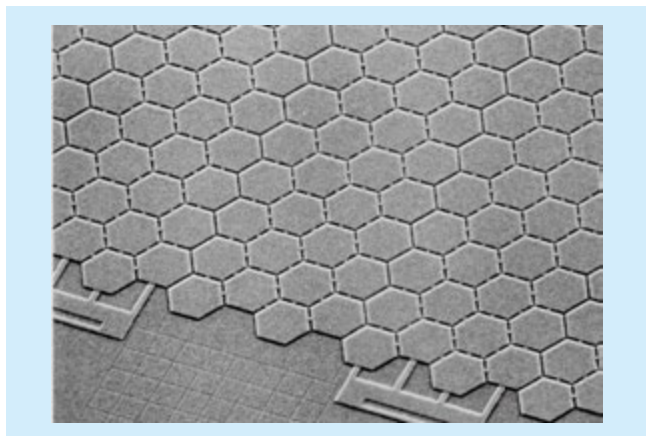


図1：cMUTアレイ鳥瞰図

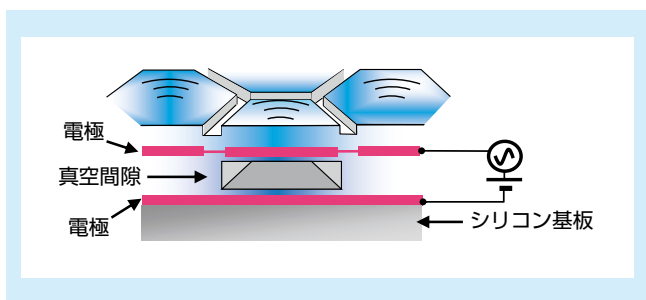


図2：cMUTセルの構造と駆動回路



図3：cMUT探触子「Mappie」外観

実装を行い、世界に先駆けてcMUT探触子「Mappie」の実用化に成功した(図3)。臨床有用性の詳細に関しては別の報告に譲ることとし、ここではその開発の背景と音響特性評価結果などに関して報告する。

2. 開発内容

(1) 音響特性解析

cMUTとPZT探触子の等価回路図を図4に示す。

PZT探触子の構造は、基本的に構成部品を波長スケールの伝送路とした多層構造として表現される。しかし、多くの構成デバイスの物性は固定されているため、その設計の自由度は多くはない。

一方、cMUTでは伝送路部位がなく、薄膜振動子が直接媒質と作用しており、振動子の広帯域特性が直接音響媒質に反映される。また、膜の構造パラメータを変えることでその特性を大きく変えることができ、設計の自由度が大きい。

そこで、上記の等価回路を用いたcMUTの送受信解析を行い、PZT探触子との音響特性比較を行った。図5にパルス波形、図6に周波数特性および群遅延特性計算結果を示す。この結果より、cMUTでは尾引きの少ない短パルス応答、広帯域特性、そして広い周波数領域で平坦な群遅延特性が得られた。一方、PZT探触子の場合には整合層を設けることで特定の周波数付近では整合効果が得られ帯域幅が増加するものの、パルス尾引き(2次、3次の極)が発生してしまいパルス特性に

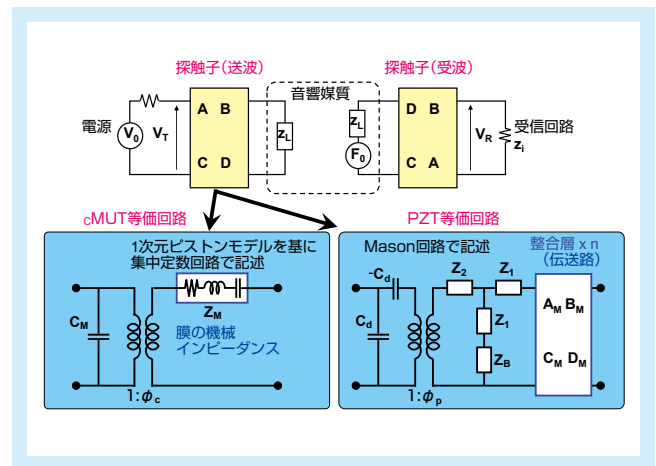


図4：cMUT探触子とPZT探触子の等価回路比較

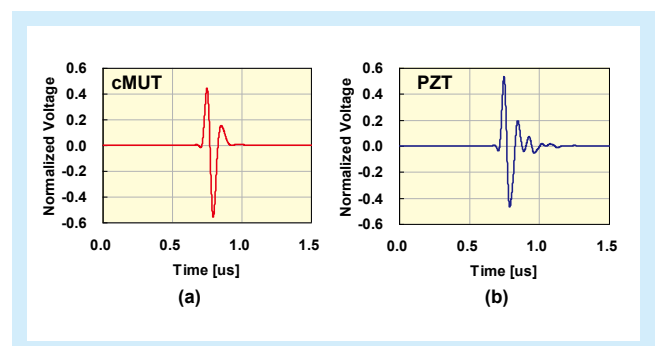


図5：送受パルス特性シミュレーション結果
(a)cMUT探触子 (b)PZT探触子

限界があることが分かる。したがって、cMUTではPZT探触子と同等の帯域幅でありながら、パルス幅が短く、薄膜の広帯域特性、パルス特性を生体にダイレクトに反映することができる。

次にこのパルス特性差と分解能との相関をPSF(ポイントスプレッドファンクション)による解析で調査した(図7)。PSF解析はcMUT探触子とPZT探触子において、それぞれのパルス特性と点ターゲットの拡がりの相関性を解析したものである。図7の上側はフォーカス点付近、下側は非収束(デフォーカス)点を模擬した解析結果であり、各図において高レベルのマッピング領域が距離方向の分解能(縦軸)および方位方向の分解能(横軸)を示している。本結果より、cMUT探触子においては、全体的に大きく距離分解能が向上しているほか、非収束領域においては方位方向の分解能も優れていることが分かる。したがって、cMUTの優れたパルス特性によって画像全体において、空間分解能の向上が得られる。

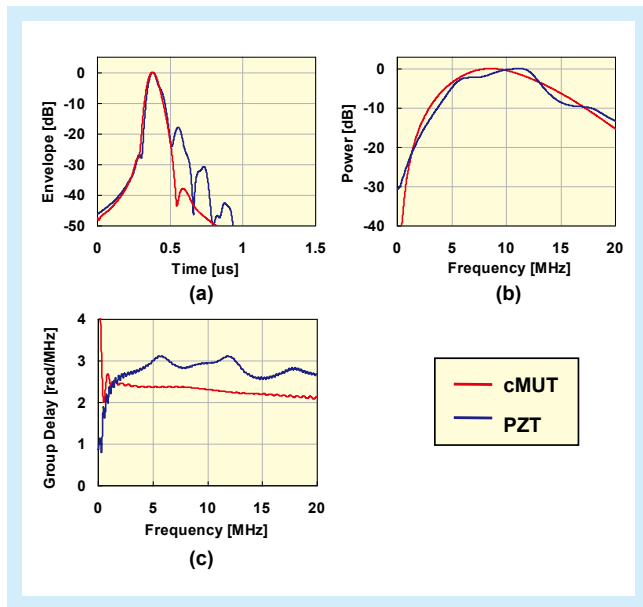


図6：音響特性シミュレーション結果
(a)パルス包絡線 (b)周波数特性 (c)群遅延特性

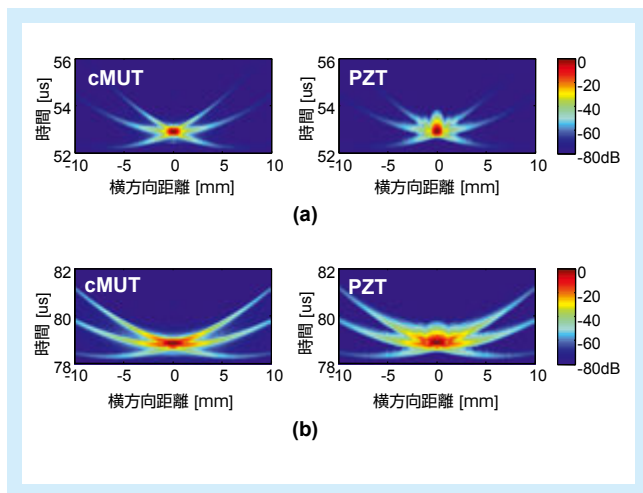


図7：PSF解析結果
(a)フォーカス条件送波40mm、受波40mm
(b)フォーカス条件送波40mm、受波60mm

(2) 実装機能

cMUTチップの製造プロセスは半導体製造プロセスを用いているため、微細加工技術を応用した自由度の高い駆動素子選択設計が可能である。そこで今回開発のcMUTチップは、約10万素子のセルを集積し、短軸可変口径機能を実装した。

この機能の特長は、着目深度ごとにビームを絞ることにより空間分解能向上を図るものである。従来のリニア探触子においては、長軸チャンネル方向には電子フォーカスで着目深度ごとにビーム形状を最適化することができるが、短軸方向には音響レンズを利用した固定フォーカスとなっているため、焦点から外れた領域では分解能の低下を避けられなかった。

一方、cMUT探触子に実装した可変口径機能においては、例えば体表近傍では開口径を狭める、あるいは深部組織観察時は開口径を広げるといった具合に、ビーム幅を高い自由度でチューニングすることが可能である(図8)。

この機能により、着目病変部位ごとにビーム形状を最適化することで、常に空間分解能の高い画像の描出が可能である。

(3) 実測評価結果

cMUT探触子と従来PZT探触子との生体近似ファントムを用いた画質比較を行った結果を図9に示す。ワイヤターゲットの分解能およびスペckルの細かさにおいてcMUT探触子が高い空間分解能を有していることが確認できる。

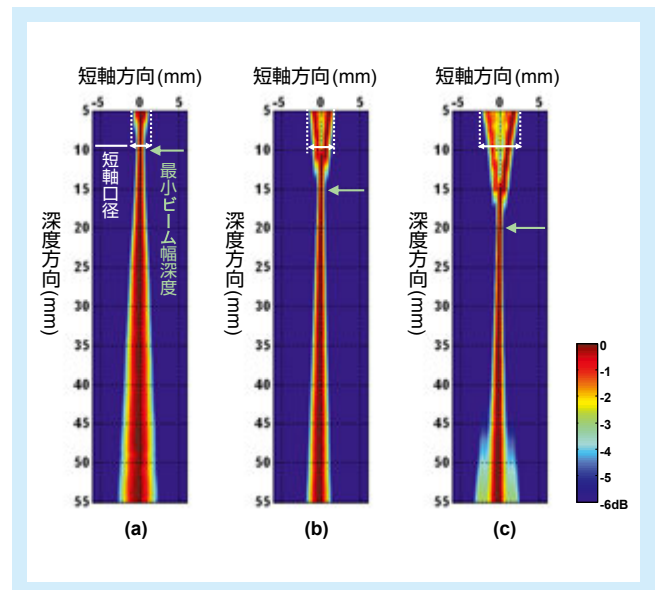


図8：cMUT探触子短軸ビームプロファイル測定結果
短軸開口比率 (a)40% (b)70% (c)100%

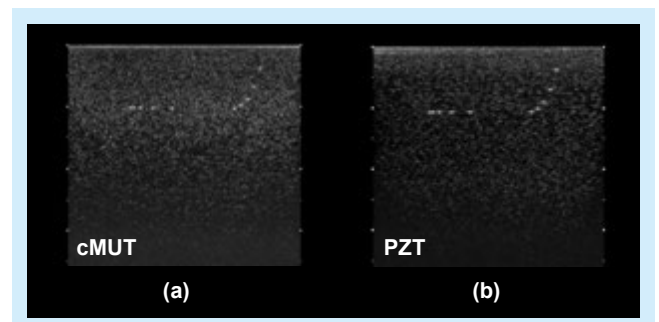


図9：生体近似ファントム撮像結果
(a)cMUT探触子 (b)PZT探触子

これは、先述したcMUT探触子の優れたパルス特性に由来するものであり、臨床現場においても従来探触子以上の高分解能画像が得られると考えられる。

(4) オプション品開発

今回、「Mappie」専用穿刺ガイドブラケットおよびエラストカプラを同時開発した(図10、図11)。

穿刺ガイドブラケットは穿刺角度を選択可能とする仕様とし、広いターゲット深度において、より安全な穿刺術を実現する仕様とした。また、エラストカプラはElastography像を描出する際にターゲットを計測面から逃げにくくするために用いる圧迫板であり、圧迫面形状最適化やワンタッチ着脱動作を可能とするなど、ユーザビリティの向上を行った。



図10：穿刺ガイドブラケット装着時外観



図11：エラストカプラ装着時外観

3. まとめ

今回、超音波振動子としてcMUT用いた探触子を世界に先駆けて実用化した。この探触子は圧電セラミックを振動子に用いた探触子と比較し、優れた短パルス特性、広帯域特性を示し、超音波画像において高い空間分解能を有している。cMUT探触子の優れた音響特性は、浅部から深部に至る広範囲の領域を高分解能に描出する能力が必要とされている乳腺領域において特に有効である。今回開発したcMUT探触子「Mappie」は、乳腺専用探触子として仕様を最適化した。乳腺診断領域に関しては、これまでに新規の組織弾性イメージング技術「Real-time Tissue Elastography*」で診断技術の向上に大いに貢献してきたが、今後「Mappie」による高分解能画像の描出と併せることで、より一層の鑑別能の向上が期待できる。

また、cMUTはその製造プロセスの特質上、エレクトロニクスとの融合に関して相性がよい。今後は、cMUTと他デバイスとのハイブリッド化といった探触子の高機能化が実現されるのと同時に、新規アプリケーションの開拓が期待されるなど、大きな可能性を秘めた探触子であるといえよう。

4. 謝辞

cMUT探触子の実用化に際して、株式会社日立製作所中央研究所より橋場邦夫主任研究員、小林孝主任研究員、町田俊太郎主任研究員、田中宏樹研究員、同機械研究所より永田達也主管研究員、吉村保廣主任研究員、同生産技術研究所より天野泰雄主任研究員をはじめとする関係諸氏にご協力いただき、ここに謝意を表します。

※ Real-time Tissue Elastographyは株式会社日立メディコの登録商標です。

参考文献

- 1) Machida S, et al. : Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer With Driving Voltage Over 100 V And Vibration Durability Over 10^{11} Cycles. in Proc. IEEE Transducers '09, 2218-2221, 2009.
- 2) 田中宏樹, ほか : CMUTのパルス特性解析. 日本超音波医学会 第82回学術集会 82-A-031, 2009.
- 3) 橋場邦夫, ほか : CMUTの画質性能に関するシミュレーション評価. 日本超音波医学会 第82回学術集会 82-A-033, 2009.
- 4) 佐光暁史, ほか : cMUT技術による超音波プローブの評価. 日本超音波医学会 第82回学術集会 82-A-032, 2009.