

# 4G CMUT (CMUTリニア SML44 プローブ)の開発

Development of 4G CMUT (CMUT Linear SML44 Probe)

|                     |                |                     |               |
|---------------------|----------------|---------------------|---------------|
| 大竹 剛 <sup>1)</sup>  | Tsuyoshi Otake | 田中 宏樹 <sup>2)</sup> | Hiroki Tanaka |
| 佐光 暁史 <sup>1)</sup> | Akifumi Sako   | 深田 慎 <sup>1)</sup>  | Makoto Fukada |
| 今川 健吾 <sup>1)</sup> | Kengo Imagawa  | 佐藤 雅洋 <sup>1)</sup> | Masahiro Sato |

<sup>1)</sup>株式会社日立製作所 ヘルスケアビジネスユニット 開発統括本部 第一技術開発本部

<sup>2)</sup>株式会社日立製作所 研究開発グループ テクノロジーイノベーション統括本部

日立は、2009年に半導体技術を用いたCMUT(Capacitive Micro-machined Ultrasound Transducers)を採用した乳腺用探触子 Mappie<sup>\*1</sup>を世界に先駆けて実用化し、広帯域特性による高画質画像を提供してきた<sup>1)</sup>。今回、新たに開発したCMUTリニア SML44 プローブは、さらに進化した高度な設計技術、緻密なプロセス制御、および超音波診断装置 ARIETTA<sup>\*2</sup> 850に搭載された新技術により、超音波診断で主流となっているTHI(Tissue Harmonic Imaging)画像やカラードプラ、エラストグラフィ(Real-time Tissue Elastography<sup>\*3</sup>)、RVS(Real-time Virtual Sonography<sup>\*4</sup>)などのさまざまなアプリケーションに対応した第4世代CMUT(4G CMUT)である。本稿では4G CMUTで採用した最新の技術について紹介する。

In 2009, we commercialized the world's first ultrasound probe "Mappie<sup>\*1</sup>" applied with CMUT technology, and it has provided high quality diagnostic images of mammary glands, thanks to its broadband characteristic<sup>1)</sup>. This year, the 4th generation CMUT (4G CMUT) probe "SML44" has been developed, realized by advanced design and precise control on fabrication process. By combining with the new imaging technologies in ARIETTA<sup>\*2</sup> 850, the SML44 is able to provide excellent ultrasound images of widely used THI (Tissue Harmonic Imaging), CFM (Color Flow Mapping), RTE (Real-time Tissue Elastography<sup>\*3</sup>), RVS (Real-time Virtual Sonography<sup>\*4</sup>) and so forth. In this report, the CMUT-related leading-edge technologies are introduced.

**Key Words:** 4G CMUT, MEMS, High-power Cell, True Pulse Shaping

## 1. はじめに

超音波診断装置において、電気信号と超音波信号のエネルギー変換の役割を果たすプローブは、装置性能を大きく左右するキーコンポーネントとなっている。近年、プローブの技術改良が進み、高機能、高性能なプローブが医療の現場で利用

され始め、診断効率の向上に大きく貢献している。今回、当社ではCMUT技術を用いた超広帯域プローブを新たに開発した。CMUTとは、プローブ内に組み込まれる振動子部品であり、いわばプローブのエンジンとも言える重要部品の一種

である。

CMUTはMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)の一種で、半導体技術を用いて作製される微小な機械デバイスである(図1)。CMUTはシリコン基板上に多数の微小センサ(CMUTセル)をパターンニングすることにより作製される。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おり、上下の電極に電圧を印加すれば電荷が蓄えられる仕組みとなっている。超音波を送信する際は、電極間に電圧を印加することで上下電極間に静電気を発生させ、真空間隙上部の振動膜を振動させることにより超音波信号を放射する。受信時は、反射エコーによって振動膜が変位し、このとき蓄えられた電荷量の変化を電気信号として検出する。

当社は、2009年にCMUTを用いたプローブを世界に先駆けて実用化し、以降も継続的にCMUTの研究開発を続けてきた。今回、さらに進化したCMUT技術と最新の技術を搭載した超音波診断装置の登場により、より高いレベルの高画質画像が得られた。本稿では、これら技術に関して紹介する。

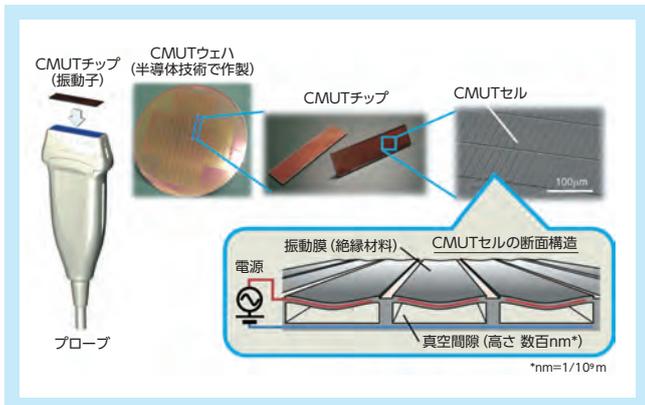


図1：CMUTの構造

## 2. 音響特性

図2に従来の圧電セラミックス振動子とCMUTを用いたプローブの音響特性の違いを示す。圧電セラミックスの場合は、硬質なセラミック材料が振動子に用いられているため、柔らかい生体組織へ超音波を伝播させるためには、中間に音響整合層と呼ばれる両者の中間的な硬さを有する材料を設ける必要がある。音響整合層は超音波波長に対する共振の原理に基づいて最適な厚みに設計されるため、適した周波数帯から逸脱した場合、超音波の伝播効率は急激に低下する。結果として、圧電セラミックスでは周波数帯域は制限され、帯域外の周波数成分は音響整合層内で反射を繰り返す。この影響により、パルス波形は尾引きが発生し、周波数特性は多少の凹凸を含んだ形状となる。

一方、CMUTの振動膜は薄くて軽いため、生体の音響特性に近い。この特徴により、CMUTは音響整合層を介在させずとも、尾引きのない理想的な超短パルス波形、滑らかな超広帯域特性を示し、優れた距離分解能、良好なペネトレーションが得られる。特に、CMUTの滑らかな帯域特性は、高周波

帯で顕著化する生体内超音波減衰の影響を受けた場合においても、深部まで滑らかな周波数特性を維持することができ、超音波ビームによる良好な結像性が深部まで維持される利点を有すると考えられる<sup>2)</sup>。

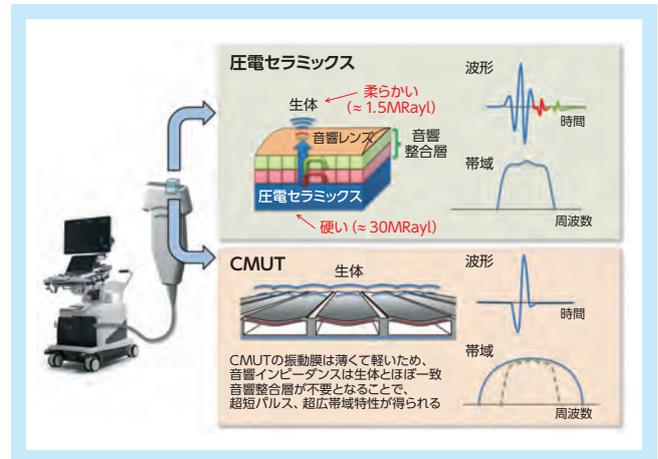


図2：CMUT技術を搭載したプローブと従来プローブにおける音響特性の違い

## 3. 4G CMUTに採用した最新技術

当社では、日立独自のCMUT技術に改良を重ねた4G CMUTを新たに製品化した。4G CMUTは最新のプレミアムクラスの超音波診断装置と接続対応し、CMUTの超広帯域特性を生かした高画質化を実現している(図3)。また、従来のCMUTには適用が難しかった高調波イメージング(Tissue Harmonic Imaging : THI) やCFM(Color Flow Mapping)等の撮像モードに対応し、さまざまな診断領域への適応を可能とした。次節より採用した技術の一例を紹介する。



図3：4G CMUT(左)とARIETTA 850(右)

### 3.1 4G CMUT用THI技術

THIは、比較的高い音圧で生体へ超音波を送信し、生体より発生する微弱な高調波信号のみを抽出、画像化する手法であり、超音波診断における高画質化技術として現在主流の撮

像技術となっている。CMUTにTHIを適用するにあたり、4G CMUTではHigh-power CellとTrue Pulse Shapingという2つの技術を新たに採用した(図4)。

High-power Cellとは緻密なセル設計とプロセス制御によりCMUTセル構造を最適化する技術である。高度な半導体製造技術を駆使して、送信と受信のバランスが最適となるように真空隙幅を高精度に最適値制御しつつ、さらに振動膜接触時の動作安定性を担保した微細なスペーサ構造を振動膜に設けている。本技術により、THIに必要なとされるプローブの高感度化と高音圧送信の両立を可能としている<sup>3)4)</sup>。

また、True Pulse Shapingは入力電気波形に対して、複雑な動きをするCMUTであっても理想的な超音波パルス波形の送信を可能とする技術である。THIにおいて、プローブから発生する超音波信号の歪みは受信信号に混入すると、生体で発生した高調波信号からの分離が難しくなり画像ノイズとなる。そこで、本機能は、入力する電気信号に対するCMUTの特殊な応答特性を独自の計算方式で高精度に予測し、CMUTから発生する歪みをキャンセルした送信を行う。

上記の二つの技術は、CMUTにTHIを適用するにあたって必要不可欠な技術であるとともに、CMUTのセル構造が緻密に制御されて初めて実現可能となる高度な技術である。

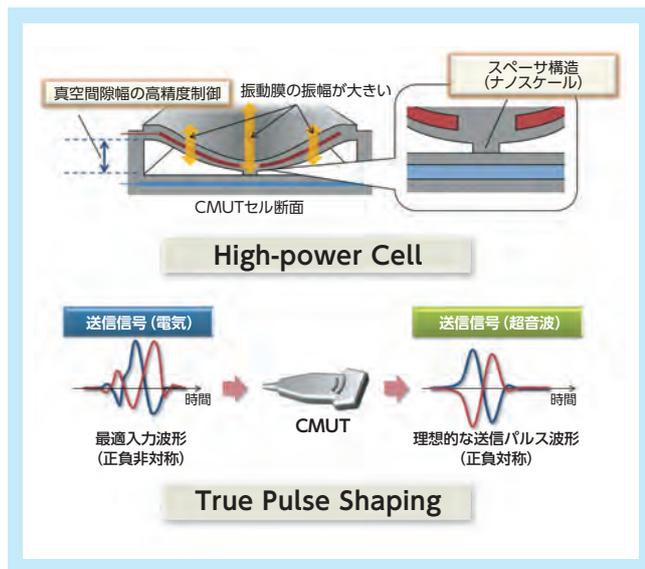


図4：4G CMUT用THIに採用した技術

### 3.2 Matrix

従来のプローブの超音波ビームは、エレベーション(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おり、焦点から外れた領域では分解能の低下が避けられなかった。これに対し、4G CMUTに採用したCMUTチップは、数万個のCMUTセルをMatrix状(基盤目状)に集積し、高い自由度で駆動制御することができる。その結果、診断画像上で着目する深度ごとにエレベーション方向の超音波ビームをチューニングすることが可能となり、空間分解能向上を図ることができる(図5)。ARIETTA 850では、短軸ビーム形状は自動的に制御され、いかなる表示領域に対しても常に高画質画像が得られる。

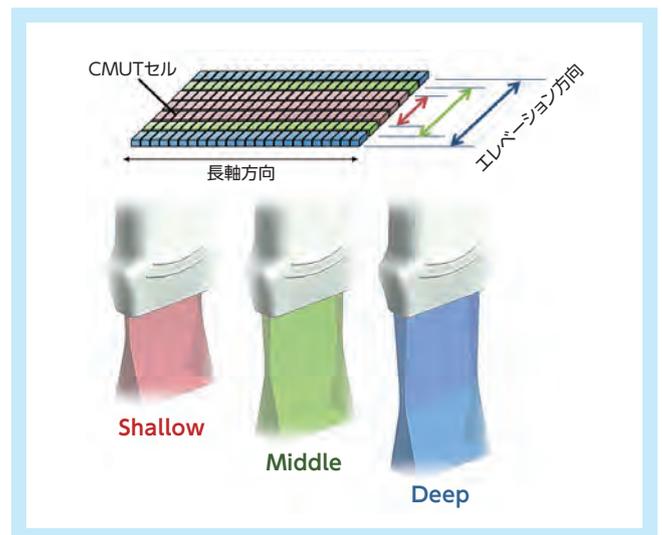


図5：4G CMUTに採用したMatrix

## 4. 画像例

4G CMUTを用いて超音波診断装置ARIETTA 850にて撮像した画像例を図6、図7に示す。図6のファントム画像において、4G CMUTは従来プローブと比較してスペックルパターンが細かく、ワイヤーターゲットの距離、および方位分解能が極めて高い画像が得られている。図7には、生体画像の数例を示した。表在、乳腺などの浅い診断領域から、腹部などの深い診断領域に至るまで、幅広く分解能とペネトレーションを両立した高画質画像の描出が可能であることが分かる。

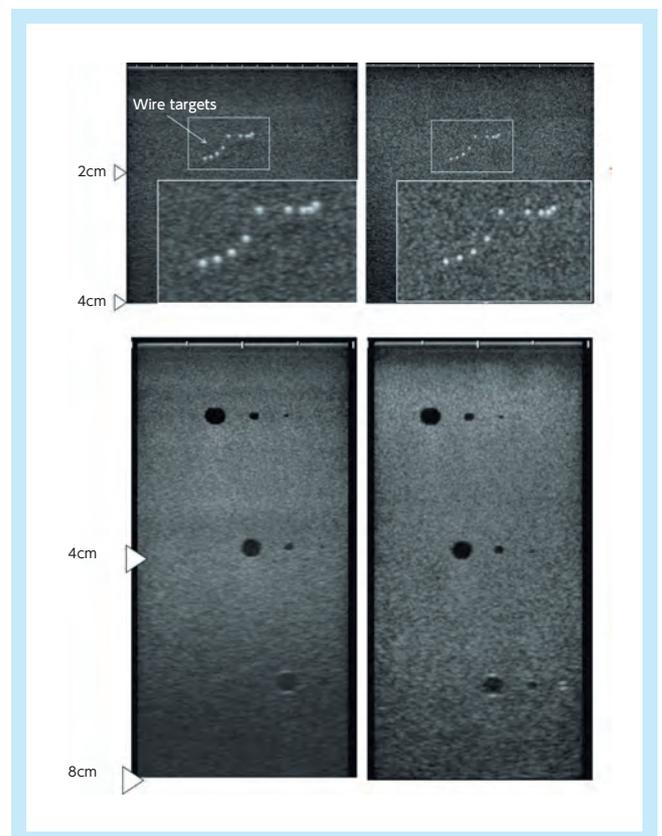


図6：ファントム画像例(左：従来プローブ、右：4G CMUT)

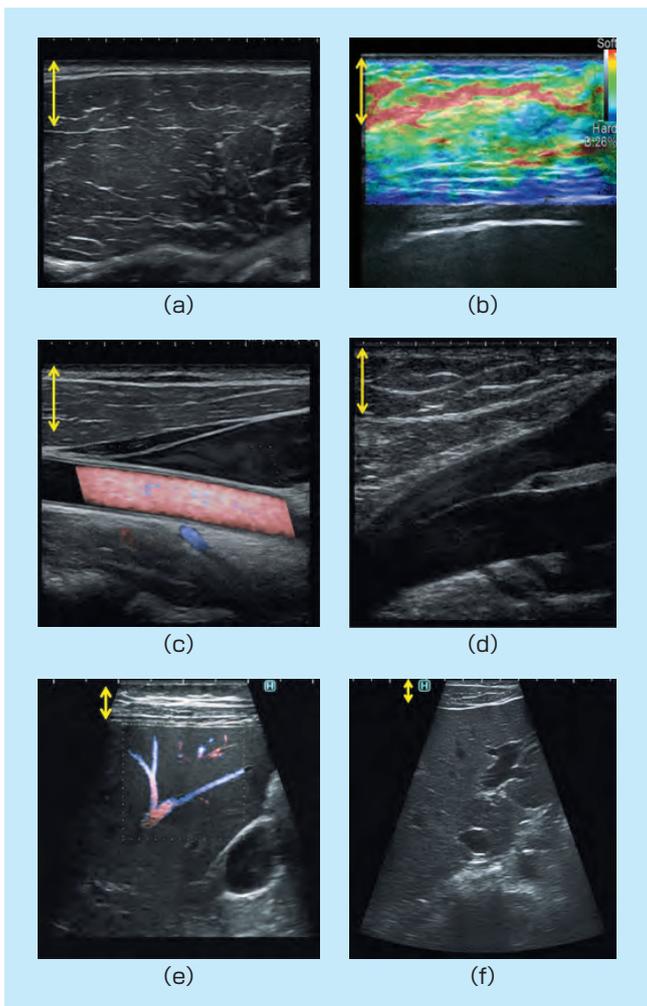


図7：4G CMUTの臨床画像例

(a)表在組織 (b)乳腺画像(エラストグラフィ) (c)頸動脈  
(d)下肢静脈 (e)(f)腹部画像(各画像図中矢印は10mmに相当する)

ARIETTA 850で新開発された機能であるeFocusingは、視野全体の方角分解能のコントラストを向上させる効果があり、CMUTのMatrix機能、および超広帯域特性との相乗効果により、3次元方向に分解能の向上を図ることができる。これにより、一層の空間分解能の向上に寄与し、高画質画像を提供することを可能とした。4G CMUTは、これまで複数のプローブを用いて診断していた幅広い診断領域に対し、1本で適応可能な「ユーティリティリニアプローブ」となっており、超音波診断における新たな検査スタイルを切り開くものと期待される。

## 5. まとめ

進化したCMUT技術を搭載したプローブ“4G CMUT”は、種々のモードへ対応し、最新の超音波診断装置に搭載された新機能とともに、診断画像のさらなる高画質化をもたらした。これにより、4G CMUTはより多くの正確な情報を検査者へ提供可能となると同時に、複数の診断領域にプローブ1本で対応できる「ユーティリティリニアプローブ」を実現した。

超広帯域プローブは診断シーンの影響を受けづらく、超音

波診断技術の客観性向上、検査者の身体的負担低減、検査効率の向上、といったさまざまなメリットにつながることを期待される。

今後もCMUT技術がさらに進化し、多様な形態のプローブに適用され、医療技術のイノベーションに貢献することを期待する。

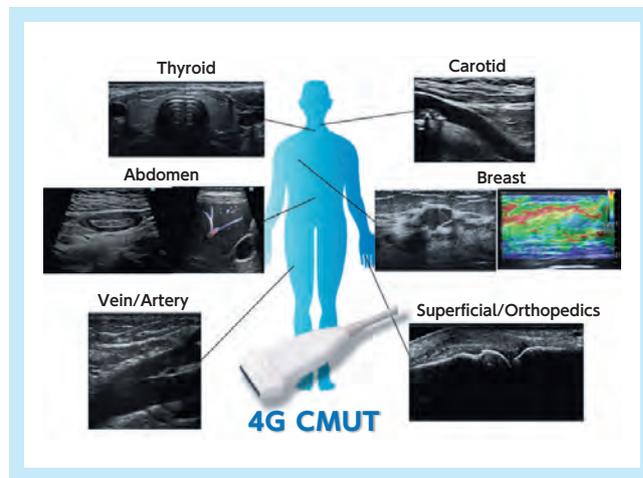


図8：「ユーティリティリニアプローブ」“4G CMUT”

## 6. 謝辞

4G CMUTの実用化に際して、株式会社日立製作所 研究開発グループより龍崎大介リーダ主任研究員、町田俊太郎主任研究員、竹崎泰一主任研究員、長谷川浩章研究員、吉村保廣主任研究員をはじめとする関係諸氏に御協力いただき、ここに謝意を表します。

販売名：CMUTリニア SML44 プローブ

認証番号：228ABBZX00154000

販売名：超音波診断装置 ALOKA ARIETTA 850<sup>\*5\*</sup>

認証番号：228ABBZX00147000

※1 Mappie、※2 ARIETTA、※3 Real-time Tissue Elastography、  
※4 Real-time Virtual Sonographyおよび※5 ALOKAは株式会社日立製作所の登録商標です。

\* ALOKA ARIETTA 850はARIETTA 850と呼称します。

## 参考文献

- 1) 佐光暁史, ほか: “eMUT技術による超音波探触子「Mappie」の開発”, MEDIX 51, 31-34, 2009.
- 2) 橋場邦夫: “MEMS技術を用いた超音波トランスデューサ”, 日本音響学会誌 第71巻5号, 239-246, 2015.
- 3) S. Machida, et al.: “Highly reliable CMUT cell structure with reduced dielectric charging effect”, in Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 2015.
- 4) H. Tanaka, et al.: “Acoustic characteristics of CMUT with rectangular membranes caused by higher order modes”, in Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 2009.