

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「MEMS技術による新しい医療診断用超音波プローブデバイスの開発」

## 研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人大阪科学技術センター

# 目 次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	1
1-3	成果概要	4
1-4	当該プロジェクトの連絡窓口	4
第2章	高効率デバイスの構造設計	5
2-1	デバイス構造設計	5
2-2	動作解析	8
第3章	実装システム開発	19
3-1	実装システム開発	19
3-2	送受信回路システム	20
3-3	実装システムの評価	21
3-4	結論	22
第4章	デバイス評価	22
4-1	デバイスの Capacitance	22
4-2	まとめ	24

# 第1章 研究開発の概要

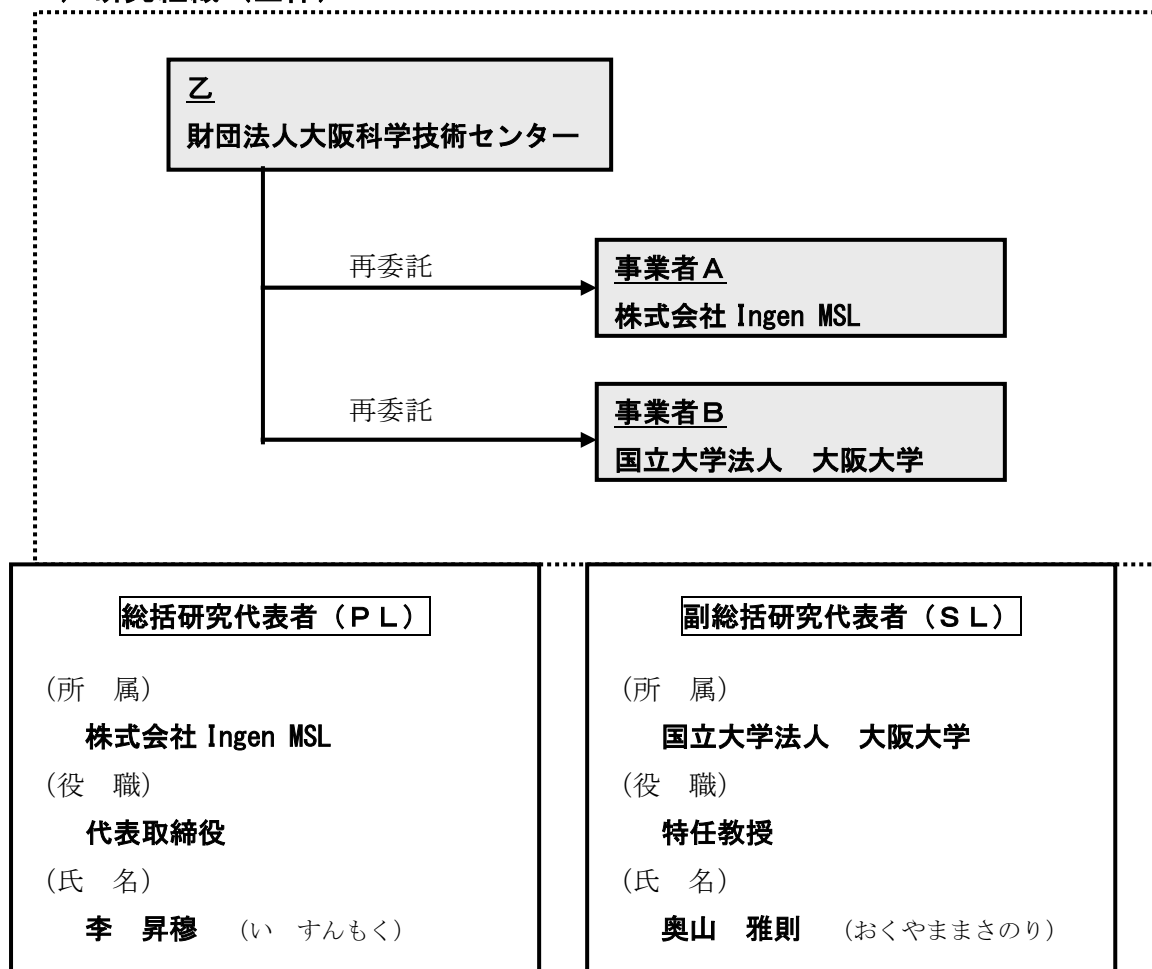
## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

MEMS の設計及び作製プロセス技術を用いて、医療診断用の新しい超音波プローブデバイスを開発する。従来の超音波診断用プローブは圧電セラミックス素子で作製され、最近開発されて普及されている高機能（3D・4D）の超音波診断装置においては、診断映像での解像度や安全性、コスト、信頼性などの面で課題がある。そのため、超音波診断装置の業界では根本的技術革新を求めているのが現状である。MEMS 技術による超音波プローブデバイスは、指摘された従来技術の課題を解決し、将来的には X 線被爆の危険性がある CT 検査などを代替できる診断装置に発展できる、高いポテンシャルを有する技術である。本研究開発では、超音波プローブデバイスの設計及び基本作製プロセス技術を開発し、プローブとしての基本性能が発揮できるデバイスを実現することが目標である。

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

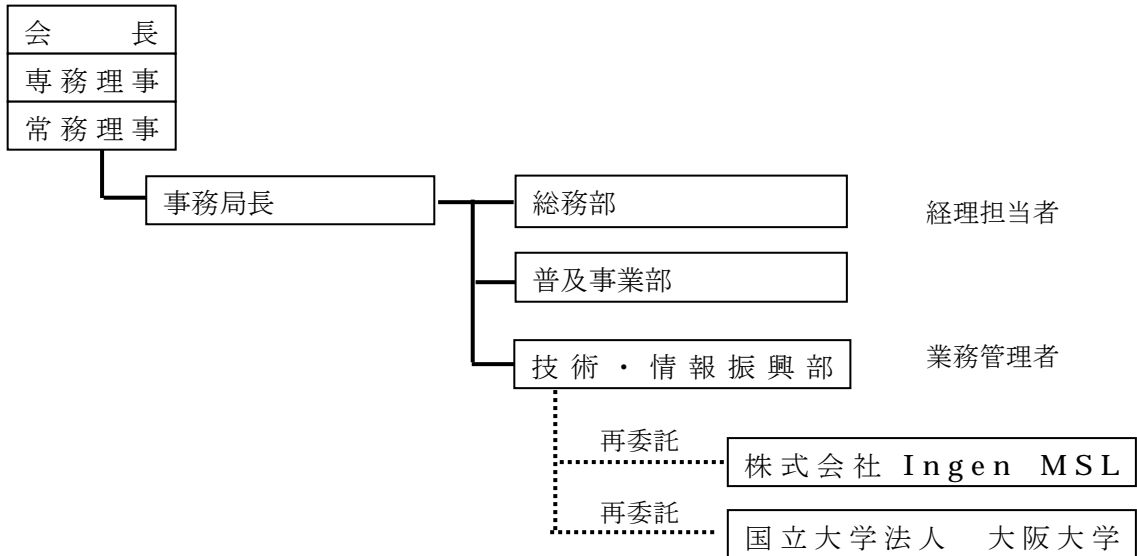
#### 1) 研究組織（全体）



## 2) 管理体制

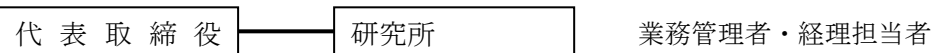
### ①事業管理者

[財団法人大阪科学技術センター]

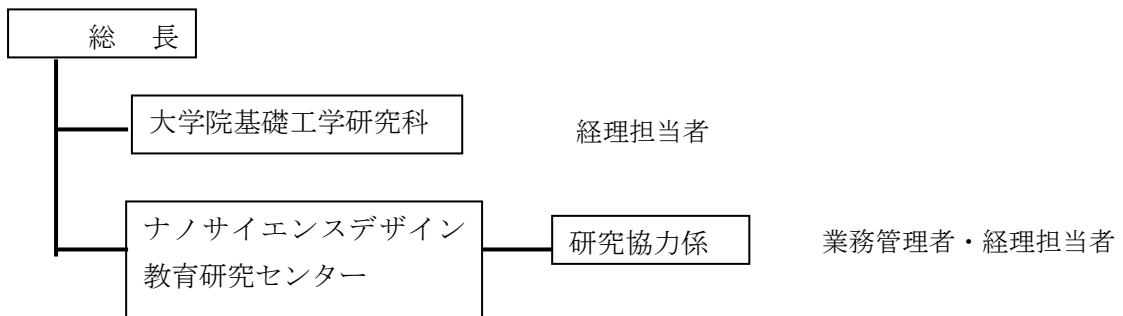


### ②再委託先

**株式会社 Ingen MSL**



**国立大学法人 大阪大学**



## (2) 管理員及び研究員

### 【事業管理者】財団法人大阪科学技術センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
鳥山 博司	技術・情報振興部 調査役	【5】
脇坂 啓司	技術・情報振興部 課長	【5】
渡邊 敬介	技術・情報振興部	【5】

(注) 【5】 プロジェクトの管理運営など

### 【再委託先】

#### 株式会社 Ingen MSL

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
◎李 昇穆	代表取締役	【1】、【2】、【3】、【4】
山口 南海夫	研究員	【3】、【4】
高田 功	研究員	【1】
Lee dong-hun	研究員	【2】、【3】、【4】

#### 国立大学法人 大阪大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
奥山 雅則	ナノサイエンスデザイン教育研究センター・特任教授	【1】、【2】、【4】
寒川 雅之	基礎工学研究科・助教	

(注) ◎プロジェクト リーダー

- 【1】 高効率デバイスの構造設計
- 【2】 作製プロセス開発
- 【3】 デバイスの周辺回路及び実装システム開発
- 【4】 テストシステム構築及び性能評価

### 1-3 成果概要

現在、診断用超音波装置のプローブとして使用されるのは **PZT** 圧電セラミックスを送受信素子として構成した製品である。この **PZT** 素子には次のような課題がある。

- 各アレイ素子の特性ばらつきが比較的大きいため、十分な空間分解を發揮できない。
- 作製コストが高い。
- 周波数帯域が狭く、高周波用の素子作製が困難である。
- 送信 **power** が高いため、安全性に問題がある。

既存の **PZT** 素子に比べて本研究で作製する **MEMS** 型 **CMUT** デバイスは次のようなメリットがある。

- **MEMS** 技術で作製するため、素子間ばらつきが少なく、空間分解能が優れる。
- 作製コストが比較的低い
- 周波数帯域が広く、高い周波数の素子作製が比較的容易である。
- 安全性が優れる。

本研究では、高効率の **CMUT** デバイスを開発するためにデバイスの最適構造設計及び作製プロセス開発、デバイス作製、実装・測定システムの開発などを行った。21年度の研究では、デバイス設計・作製を行い、測定システムも開発してデバイスの基本特性を確認することを目標とした。デバイスの構造設計では、作製するデバイス構造に対して有限要素解析を行い、デバイスの主な役割であるエネルギー変換効率の向上を図った。作製プロセスでは、デバイスの量産性及び高い変換効率を実現することを目標としてプロセス開発を行った。一方、デバイスは高電圧で超音波の送信を行い、比較的微小な受信信号を受けるため、受信信号の **loss** 及び素子間の **cross talk** が少ない高精度の送受信システムが必要である。そこでまず、**loss** が少なく機械的安定性が高いデバイス実装システム設計・作製を行った。また、デバイス特性に最適である実装及び送受信システムを開発してデバイスの評価を実施した。

### 1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号

(財)大阪科学技術センター

技術・情報振興部 TEL : 06-6443-5322 FAX : 06-6443-5319

## 第2章 高効率デバイスの構造設計

### 2-1 デバイス構造設計

#### (1) デバイスの基本構造及び作動原理

超音波を送受信する CMUT(Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer)デバイスは、Si wafer などの基板に薄膜型のメンブレンを形成し、メンブレンと基板上に電極を設けてその電極に電圧を加えて駆動する。メンブレンの中は真空である。CMUT デバイスの基本断面構造を次に示す。

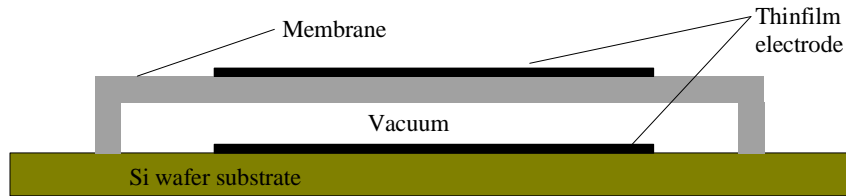


図 2-1-1. CMUT デバイス構造の断面図

CMUT デバイスの動作では、一定の DC 電圧がメンブレンにかかって静電力が生じ、機械的音圧あるいは電圧によってメンブレンが振動し、電極間の静電容量が変化することになる。超音波の受信では、媒質の弾性振動によるメンブレンの振動が電極間距離の変化を齎し、それによる電極間の容量変化を電圧変化に変換することによってセンシングができる。一方、特定の DC+AC 電圧をデバイスに加えてメンブレンを振動させることによって音波の送信が行われる。これらの動作は、可逆的に行われる。CMUT デバイスの作動原理を次に示す。

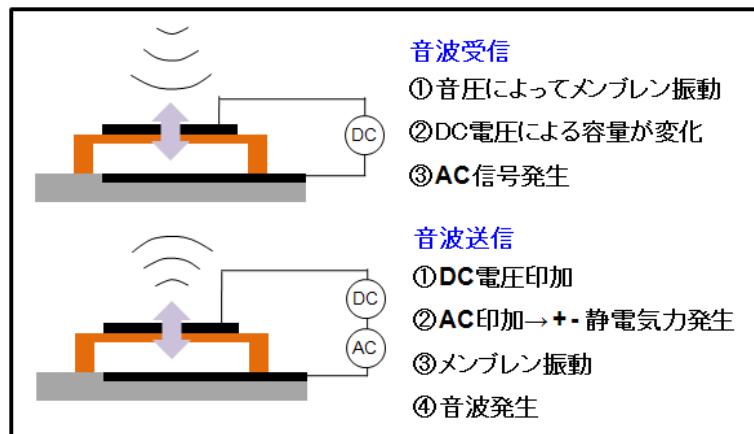


図 2-1-2. CMUT デバイスの送受信原理

## (2) デバイスの変換効率

CMUT デバイスが真空中で振動する場合、メンブレンに与えられる力 (Force :  $F_{mem}$ ) はメンブレンの機械的 spring force ( $F_{mech}$ ) と静電気力 (Electrostatic force:  $F_{elec}$ ) で示される。

$$F_{mem} = F_{mech} + F_{elec} \quad (1)$$

静電気力はメンブレンのポテンシャルエネルギー (Potential energy) を微分することによって求められる。電圧による静電気力は次のように示される。

$$F_{elec} = -\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2} CV^2 \right) = \frac{\epsilon S V^2}{2(d_0 - x)^2} \quad (2)$$

ここで、 $V$  は電圧、 $C$  は capacitance、 $\epsilon$  は誘電率、 $S$  は電極の面積、 $x$  はメンブレンの変位量、 $d_0$  はメンブレンと下部電極のギャップ (gap) である。機械的 spring force は次のように示される。

$$F_{mech} = -kx \quad (3)$$

この式で  $k$  は spring constant である。式 2 及び 3 を 1 に入れると、メンブレン振動での機械的力の関係が求められる。メンブレンに与えられる全体機械的力は次のように示される。

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} - \frac{\epsilon S [V(t)]^2}{2[d_0 - x(t)]^2} + kx(t) = 0 \quad (4)$$

デバイスの受信モードで DC バイアスがかかる場合、メンブレン変位量の時間依存性はゼロになり、式 4 の最初項はゼロになる。DC バイアスが高くなってある限界を過ぎると機械的 spring force の復元力が無くなり、メンブレンは破壊される。メンブレンを破壊する電圧を破壊電圧といい、式 4 から破壊電圧は次のように示せる。



$$V_{coll} = \sqrt{\frac{8kd_0^3}{27\varepsilon_0 S}} \quad (5)$$

式 5 から、破壊電圧は電極面積及び誘電率、メンブレンのギャップ (gap) の関数であることが分かる。CMUT デバイスは基本的に機械的エネルギー (音波) と電気的エネルギー (信号) との変換機能を果たす装置である。そのため、各エネルギー形態に変換するときの変換効率がデバイスの性能を決める最も重要な factor になる。CMUT デバイスの機械—電機的エネルギーの変換は一般的に等価回路で示す。その等価回路を次に示す。[1]

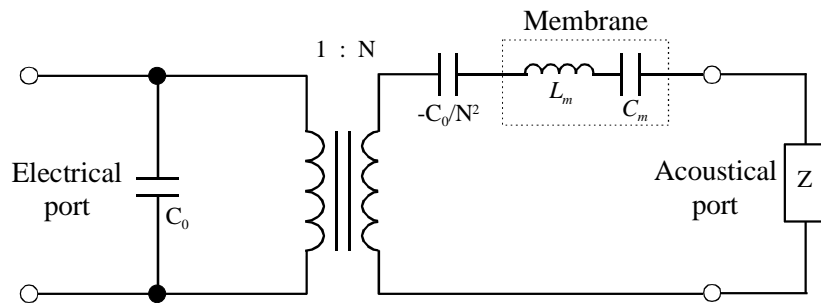


図 2-1-3. 機械 - 電気エネルギー変換の等価回路

図 2-1-3 の等価回路で、音響端(Acoustical port)の  $L_m$  及び  $C_m$  はメンブレンの機械的総合インピーダンスを示し、 $Z$  は音響インピーダンスとしてメンブレンが振動する時の周辺媒質との機械的抵抗 (インピーダンス) を意味する。実際の振動では、 $L_m$  と  $C_m$  はそれぞれメンブレンの質量、ばね定数の関数である。 $-C_0/N^2$  項はメンブレンの振動によるものの、振動によるばね定数の変化を示している。一方、等価回路で CMUT デバイスの機械—電気的エネルギー変換効率である  $N$  は、次のように示される[2]。

$$N = V \frac{\varepsilon_0 A}{(d_{eff} - x)} \quad (6)$$

$$d_{eff} = \frac{d_m}{\varepsilon_m} + d_0$$

$V$ : DC 電圧、 $\varepsilon_0$ :空気 (真空) の誘電率、 $\varepsilon_m$ :メンブレン材料の誘電率、 $d_m$ :メンブレン厚み、 $A$ :電極面積、 $d_{eff}$ :電極間の距離、 $x$ :メンブレン振動距離

式 6 から、変換効率  $N$  はデバイスにかかる DC 電圧と電極の面積に比例し、電極間の距離には反比例することが分かる。デバイスに印加する DC 電圧の限界値は破壊電圧  $V_{coll}$  で決められ、電極及びメンブレンの寸法、メンブレンの電気・機械的特性などの関数である。すなわち、変換効率が DC 電圧に比例するため、高効率のためには高い電圧の作動条件が必要となる。破壊電圧は式 5 に示すように電極面積及びメンブレン材料の誘電率、素子の寸法など関数である。破壊電圧及び変換効率を考慮してデバイスの構造、作製プロセスを設計する必要がある。

## 2-2 動作解析

### (1) はじめに

本節では、提案の静電型超音波トランスデューサの電氣的機械的応答を理論解析する。本トランスデューサは MEMS 技術を用いて作製された微小な平行平板コンデンサのアレイからなり、これに電圧や圧量を印加した時の変位を理論解析することを目的とする。本解析はトランスデューサの設計の指針を与えるとともに、製作されたトランスデューサの動作特性の評価を行い、トランスデューサ改良の指針を与える上で重要である。

### (2) メンブレン応答の解析法

#### -1.有限要素法

有限要素解析は、構造物を有限個の要素に分割し、各々の領域に対して機械的電氣的な関係式を満たすように膨大な Matrix 演算を繰り返し行って、最終状態をもとめる数値計算法である。すなわち、対象物体を簡単な幾何学的な形を持つ小さな要素に分けて、各要素内での力学的な応答などを計算した後、これを System 内で全部合わせることで対象物体の全体的な力学的応答を求める方法である。これを cMUT に応用し構造解析を行う。

#### -2.解析 Tool

解析対象の cMUT の動作に必要な駆動源を電圧とする。電圧による静電気力は cMUT の Membrane を振動させ、membrane の振動より超音波が発生される。この cMUT の membrane の変形構造解析と静電気を考慮した電氣的解析を、有限要素解析で複合的に解析する。

複合解析では、互いに作用する 2 つ以上の物理現象を考えなくてはならず、複雑なものとなる。しかし、本研究で使われた有限要素解析プログラム Intellisuite を使用することで複合解析を簡単に行うことができる。Intellisuite と、別の有限要素解析プログラム COMSOL を用いて、静電気力によるある構造体の変形を解析することにより、両解析プログラムを比較した。

### -3.解析モデル

解析対象として図 2-2-1 に示した cMUT の 1 要素である六角形の平板 3D 構造を考える。次に、本 3D 構造を有限要素解析を行うため小さい断片に分ける。

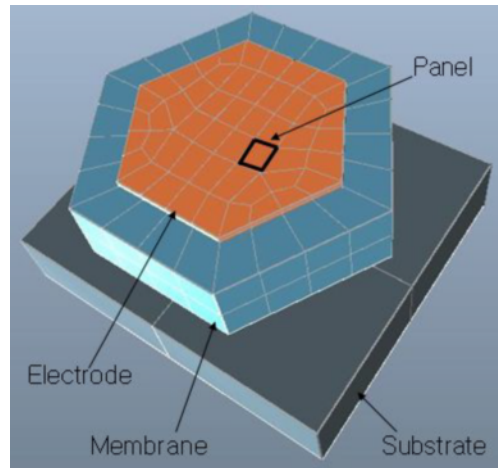


図 2-2-1 3D structure and generated panel

この 3D 構造を構成する各部分の物質定数、負荷条件、境界条件を入力して計算を行う。図 2-2-2 に示すように、Device のキャパシタンスを計算したあと、計算されたキャパシタンスを利用して membrane に作用する静電気力を求める。静電気力による membrane の変位を求め、さらに Membrane の変形によりキャパシタンスが変わるため、キャパシタンスを再び計算する。そして、再び計算できたキャパシタンスを利用して静電気力をまた計算して、これによる membrane の変位を求める。このような過程を繰り返して静電気力による membrane の振動を計算する。

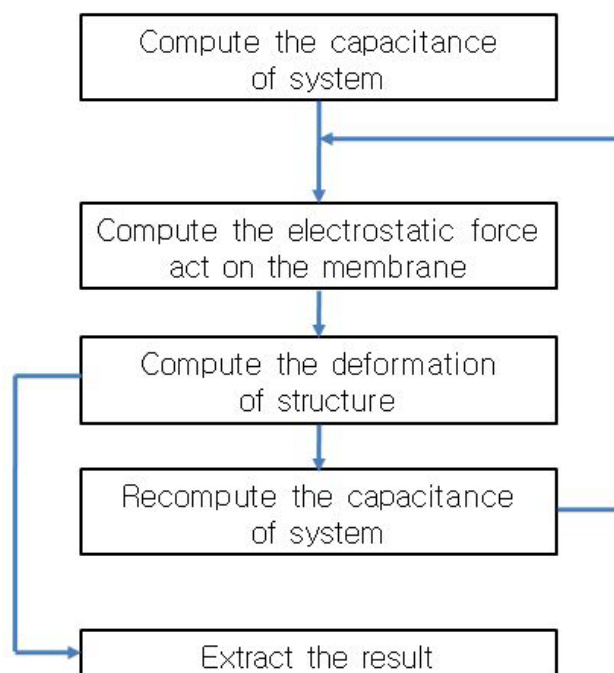


図 2-2-2 Flow of analysis process

-4.解析結果の比較

図 2-2-3 に見られるように、両解析プログラムを用いてほぼ同じ振幅と振動周期が得られた。しかし、COMSOL の場合 Intellisuite と比べ設定する条件の数が 3 倍多く、2 倍の解析時間が必要であり、問題である。従って、Intellisuite を用いて有限要素解析を行うのが、COMSOL のような他のプログラムを利用するより効果的だと考えられる。

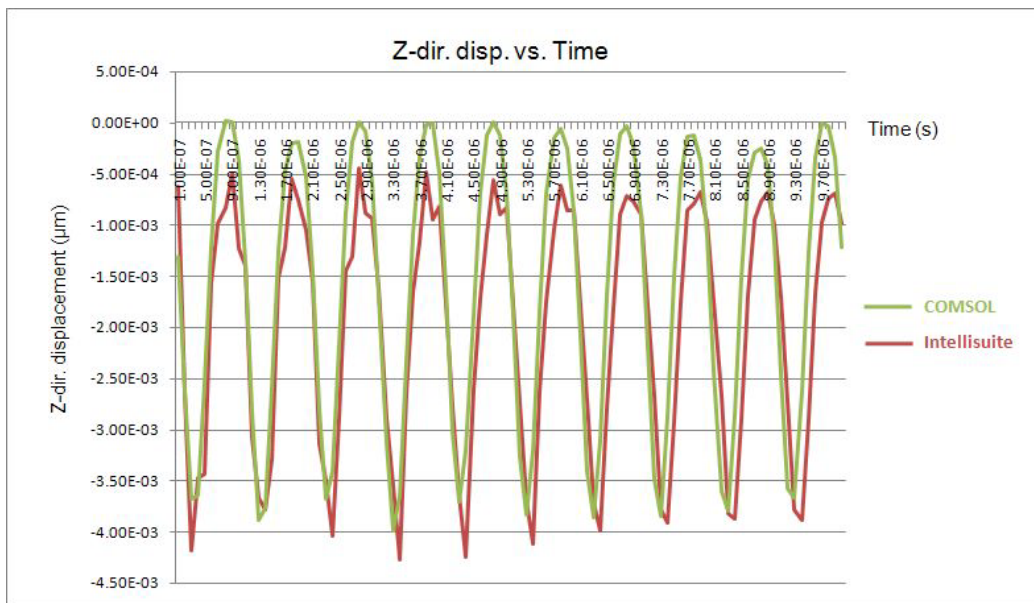


図 2-2-3 Result of electrostatic FEM analysis with Intellisuite and COMSOL

(3) Membrane 振動誘起用印加入力

-1. 静電気印加

本研究の対象の cMUT は超音波を発生させる駆動力として静電気力を用いる。cMUT を構成する 2 つの電極間で電圧をかけると静電気力が発生し、この力は 2 つの電極を引っ張る引力で membrane は動く。直流電圧がかかったとき、静電気力による membrane の変位は membrane による抗力と平衡する位置で停止する。しかし、時間とともに変化する電圧を掛けた時、膜が振動して超音波が発生する。従って、cMUT 最適化設計のために、直流電圧と交流電圧同時印加に対する電氣的解析を通

じて cMUT membrane の振動特性を調べなければならない。

静電氣的解析を行うため 100V の振幅の電圧を設定した。Voltage load の波形を図 2-2-4~9 に示す。Voltage load は Pulse と Square wave で設定し、1 つの波形の長さは各々  $1.102 \mu\text{s}$  と  $1.103 \mu\text{s}$  である。

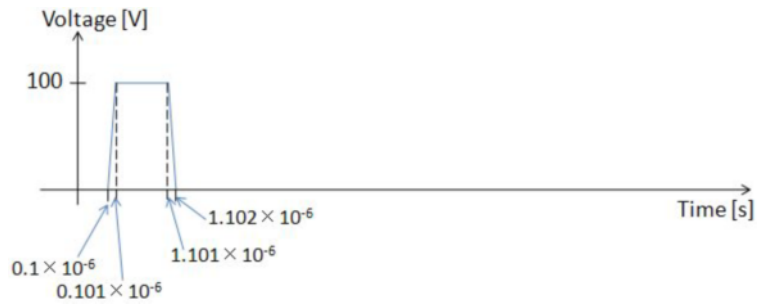


図 2-2-4 Single pulse of voltage

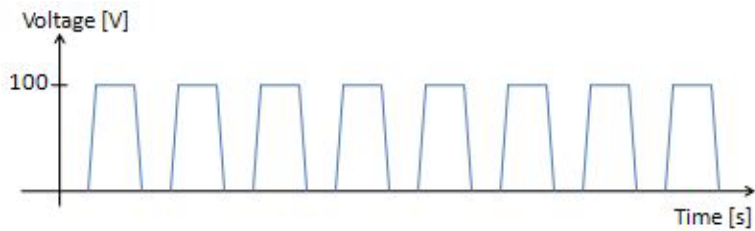


図 2-2-5 Burst pulse of voltage

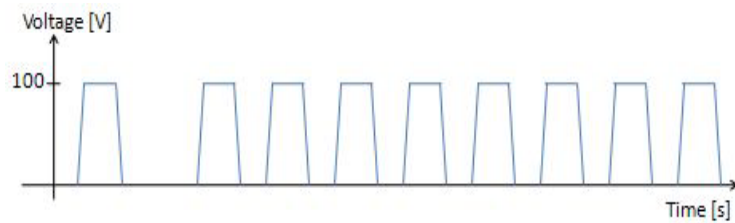


図 2-2-6 Single + Burst pulse of voltage

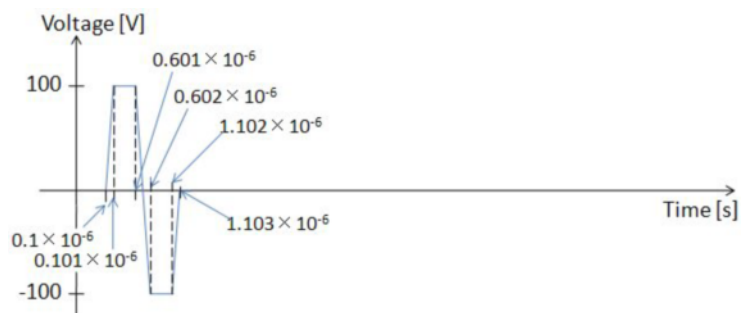


図 2-2-7 Single square wave of voltage

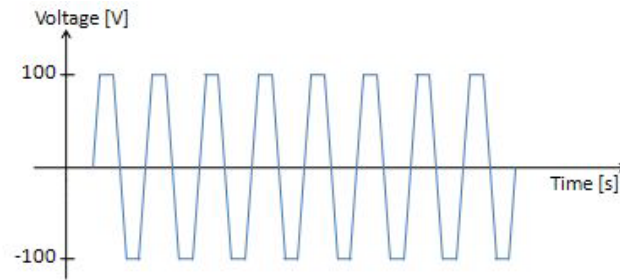


図 2-2-8 Burst square wave of voltage

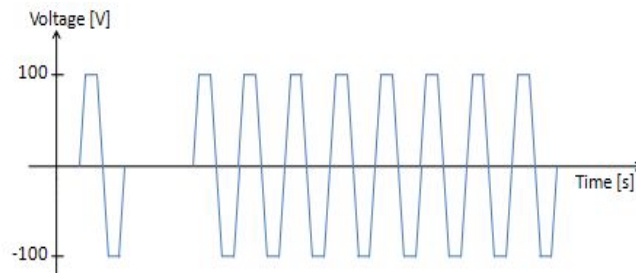


図 2-2-9 Single + Burst square wave of voltage

## -2. 圧力印加

超音波を利用して映像を得る技術は音波の反射、吸収、屈折を用いる。すなわち、probe から対象物に音波を照射し、対象物はこれを反射(echo)する現象に基づいたものである。音波による membrane の変位はキャパシタンスを変化させ、このようなキャパシタンスの変化を検出することにより超音波を受信する。

それで、音波の反射による membrane の振動特性を理解することは cMUT 設計に必須であり、本節ではこれを解析するため、圧力が印加されたときの membrane 振動をもとめる。

Pressure load の波形は図 2-2-10~15 に示した。Pressure load は Pulse と Square wave で設定し、一周期の長さは各々  $1.102 \mu\text{s}$  と  $1.103 \mu\text{s}$  である。

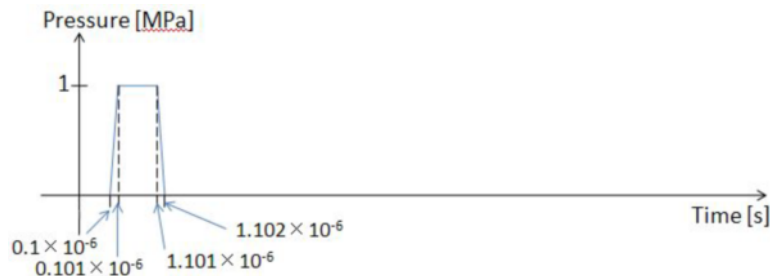
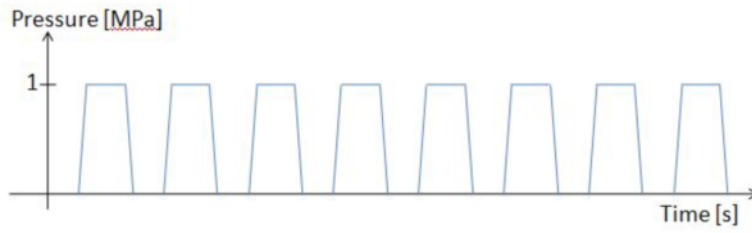
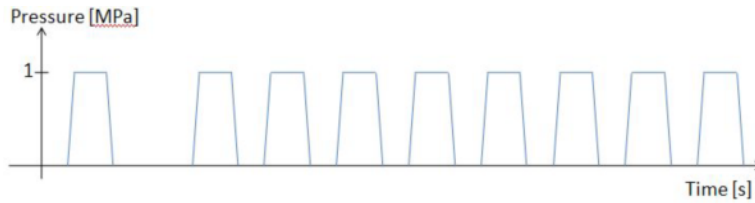


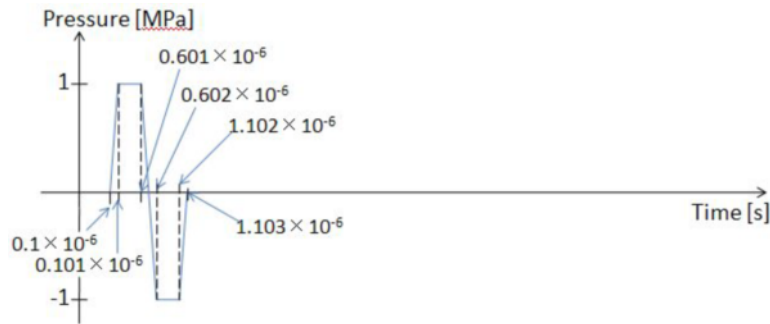
図 2-2-10 Single pulse of pressure



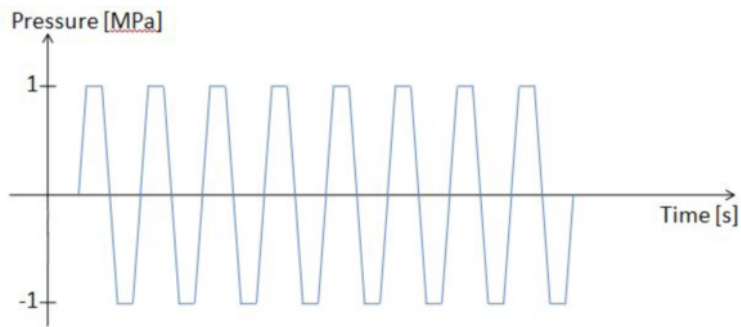
☒ 2-2-11 Burst pulse of pressure



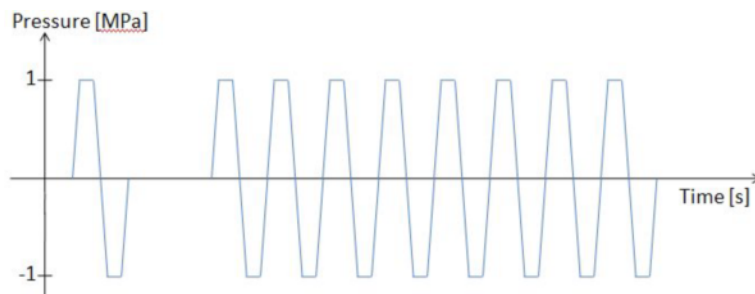
☒ 2-2-12 Single + Burst pulse of pressure



☒ 2-2-13 Single square wave of pressure



☒ 2-2-14 Burst square wave of pressure



☒ 2-2-15 Single + Burst square wave of pressure

#### (4) 解析結果及び考察

##### -1. 静電気入力時の解析結果

Membrane は voltage load により振動する。解析結果から変位の peak 値は約 6nm で、振動の変位は減衰により緩やかに減少する。

図 2-2-16~18 から、membrane の振動は印加した voltage の波形と似ていることが分かる。しかし、図 2-2-19~21 で分かるように square wave の voltage が印加される場合、振動現象は voltage の波形と違って、pulse の波形を持つ。これは静電気力が掛かった voltage の 2 乗に比例するためだと考えられる。

すなわち、100V による静電気力は -100V のものと方向と大きさが同じであるため、square wave の voltage による静電気力は pulse 波形で発生されると考えられるし、このため membrane の振動は pulse 波形だと考えることが出来る。

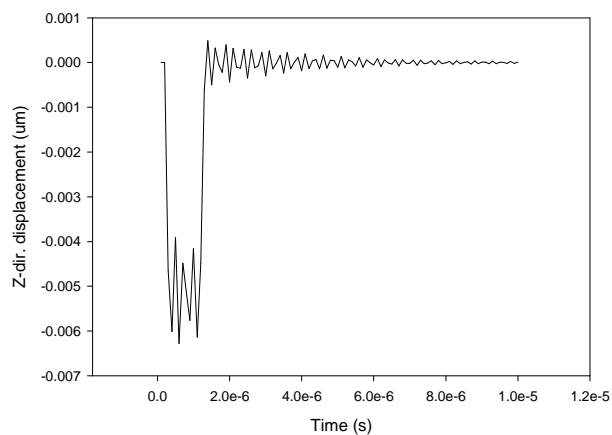


図 2-2-16 Single pulse of voltage が掛かった時、membrane の振動

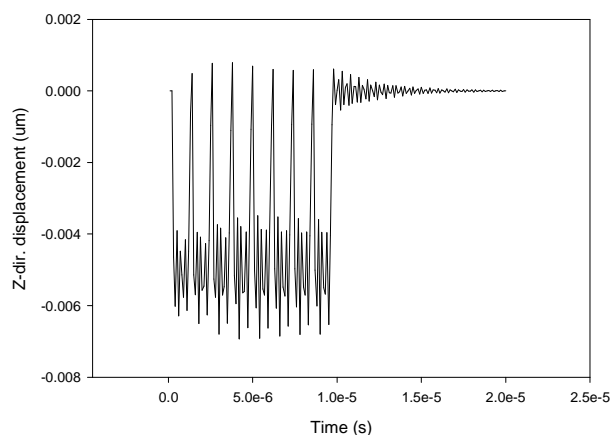


図 2-2-17 Burst pulse of voltage が掛かった時の membrane の振動



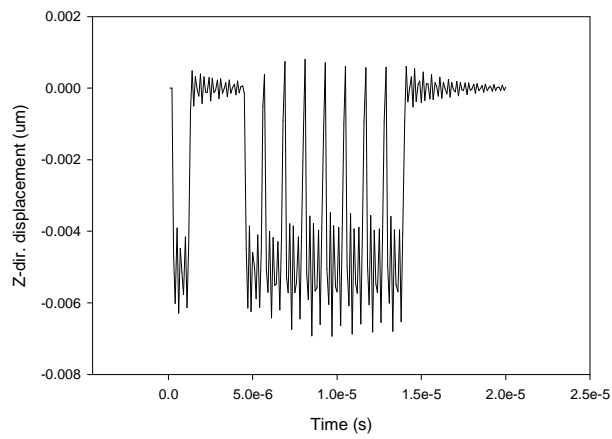


図 2-2-18 Single + Burst pulse of voltage が掛かった時の membrane の振動

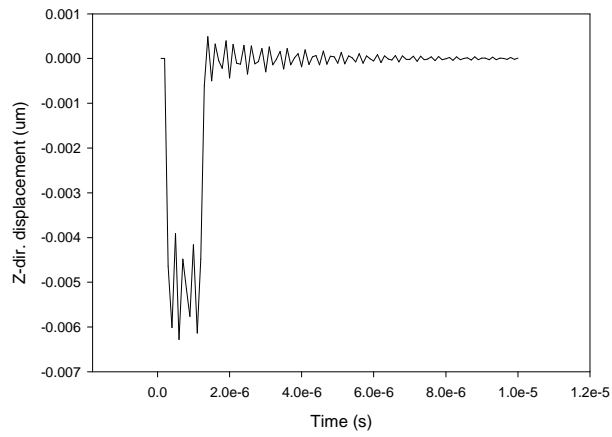


図 2-2-19 Single square wave of voltage が掛かった時の membrane の振動

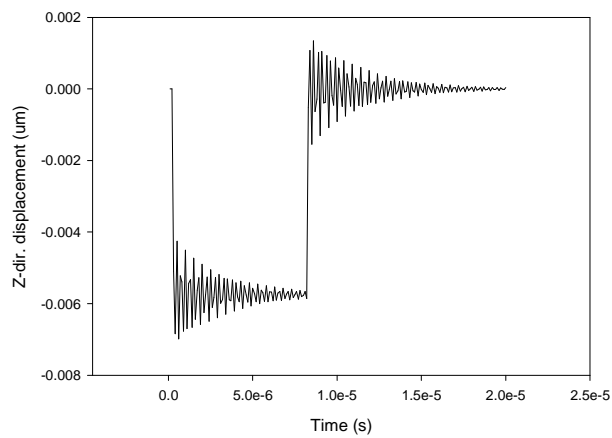


図 2-2-20 Burst square wave of voltage が掛かった時の membrane の振動

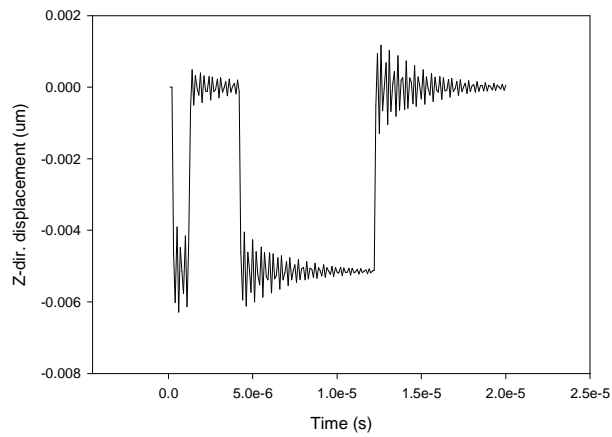


図 2-2-21 Single + Burst square wave of voltage が掛かった時の membrane の振動

## -2.圧力印加時の解析結果

Membrane は pressure load によって振動する。図 2-2-22～27 から、変位の peak 値は約  $0.15 \mu\text{m}$  で、振動の変位は減衰により次第に減少することが分かる。また、pressure load が掛かる間で membrane は load と同じ方向に変形し、同時に振動することを分かる。

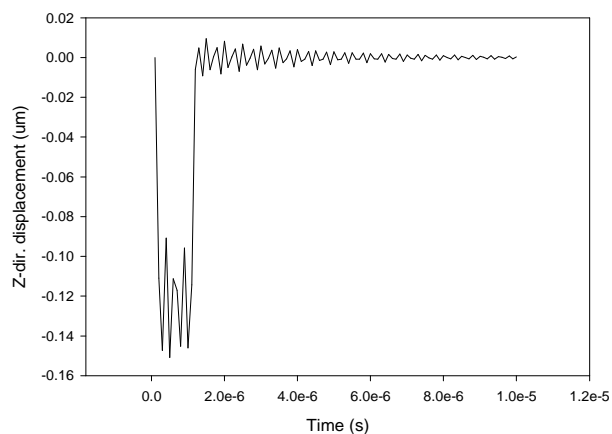


図 2-2-22 Single pulse of pressure が掛かった時の membrane の振動

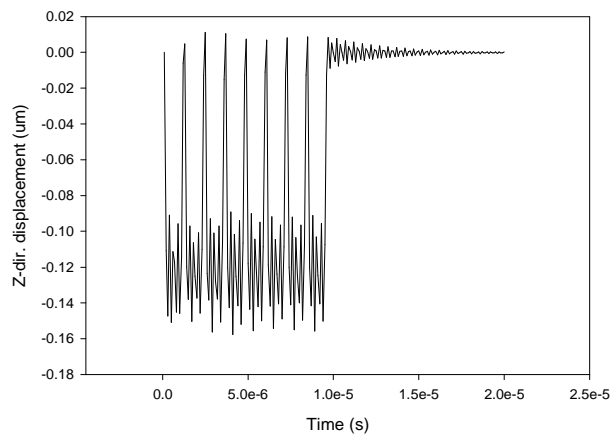


図 2-2-23 Burst pulse of pressure が掛かった時の membrane の振動

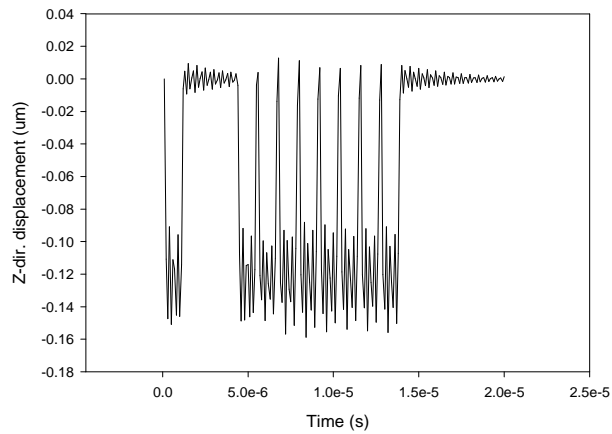


図 2-2-24 Single + Burst pulse of pressure が掛かった時の membrane の振動

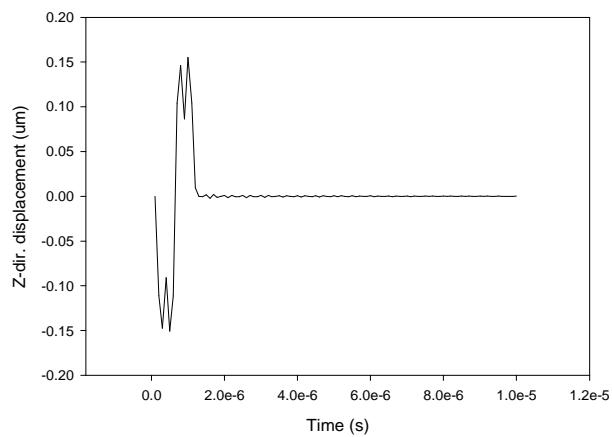


図 2-2-25 Single square wave of pressure が掛かった時の membrane の振動

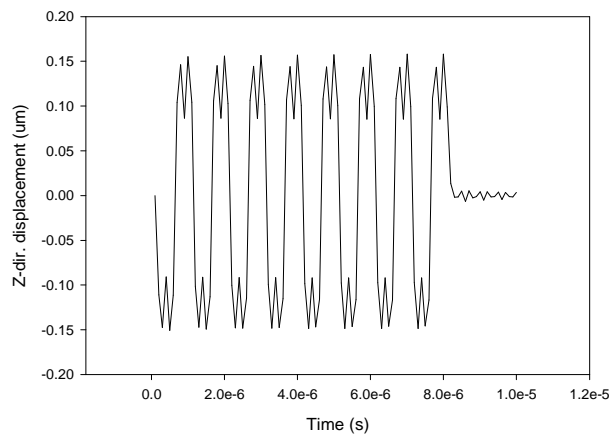


図 2-2-26 Burst square wave of pressure が掛かった時の membrane の振動

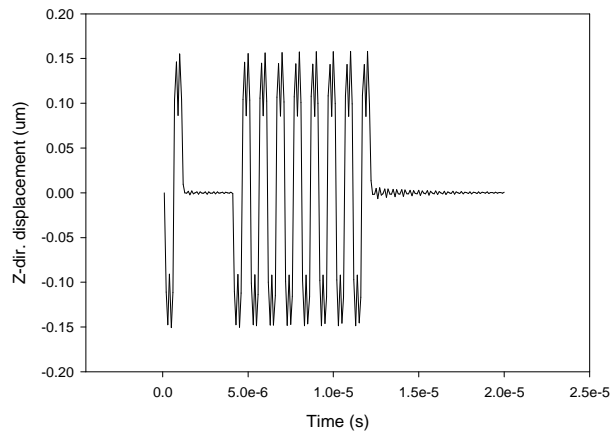


図 2-2-27 Single + Burst square wave of pressure が掛かった時の membrane の振動

## (5) 結論

本研究では、有限要素解析プログラムである Intellisuite を利用して、cMUT の membrane に load (負荷) がかった時の振動を解析した。解析に使った load 条件で、時間とともに変化する電圧と圧力を使用した。

解析結果から分かるように、load が設定された間で、membrane の変位は load の方向と同じ方向で、同時に振動する。Load が掛からない場合、membrane は load が掛かる前の位置を基準にして小さく振動する。これは、membrane の固有振動数帯域から離れた load 条件を使用したからだと考えられる。従って、load 条件を membrane の固有振動数帯域に合わせるように修正する必要がある。固有振動数帯域に合う load 条件を使用したら、もっと振動の少ない解析結果が出来ると考えられる。

## 参考文献

- [1] W. Mason, *Electromechanical transducers and wave filters*, Van Nostrand, London, 1948.
- [2] G. Yaralioglu et al., 'Finite-Element analysis of capacitive micromachined ultrasonic transducer', *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 52 (2005) 2185-2198.
- [3] S. Olcum et al., 'Optimization of the gain-bandwidth product of capacitive micromachined ultrasonic transducers', *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 52 (2005) 2211-2219.

## 第3章 実装システム開発

デバイスの特性を考慮した実装システムを開発した。プローブデバイスの出力インピーダンスが高い可能性がある。通常のPZT素子のようにケーブルを接続して信号を取り出すことができない場合を考えた場合プローブデバイスを実装した基板にC/V変換回路、増幅回路等を実装しなければならない。その場合を想定してプローブデバイス実装システムを開発する。

### 3-1 デバイス実装

デバイスの送受信特性を評価するために実装システムを開発した。電氣的に **loss** が少なく機械的に安定性が高い実装システムが必要である。本研究では今回作製するデバイス専用の実装用基板を設計・作製して実装システムを構成した。次に作製した実装用基板を示す。

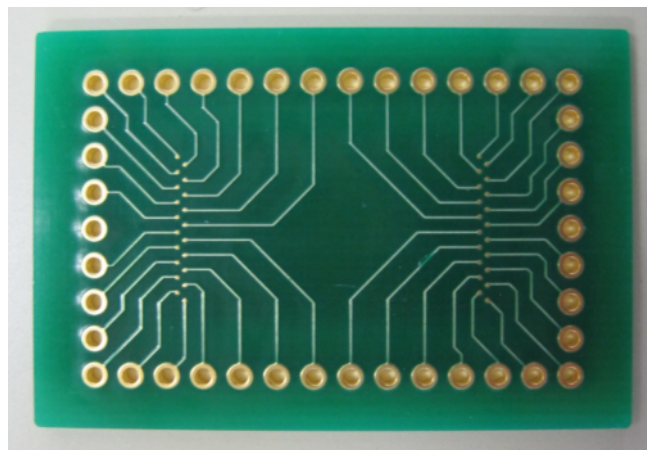


図 4-1. デバイス実装用 PCB 基板

デバイスは 20 素子を作製し、それぞれ素子には上部・下部電極が設けられる。各電極用の pad が基板に設けられ、それぞれの pad は基板から各 pin へ連結される。デバイスの電極から基板の電極 pad までには wire bonding で連結し、デバイスと基板は専用の接着剤で接着する。Wire bonding を行った基板を次に示す。

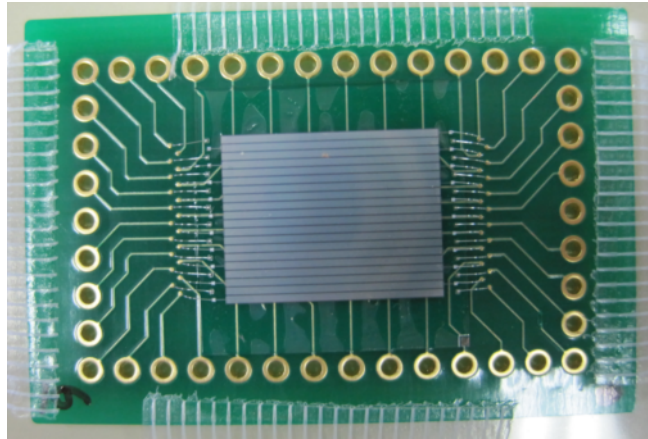


図 4-2. 作製した CMUT デバイスを Wire bonding で基板上に実装したイメージ  
各電極 Pad から引いた線は送受信システムとつながる。

### 3-2 送受信回路システム

図 4-3 に実装システムの回路を示す。本回路はデバイスに印加するバイアス電圧とバーストパルスを印加する送信回路部 (Transmit Pulse) とダイオードブリッジにパルスをかけて信号を抜き出す回路を持った受信回路部 (Signal Out) からなっている。3 個のデバイスが測定できるように 3 回路を実装した。

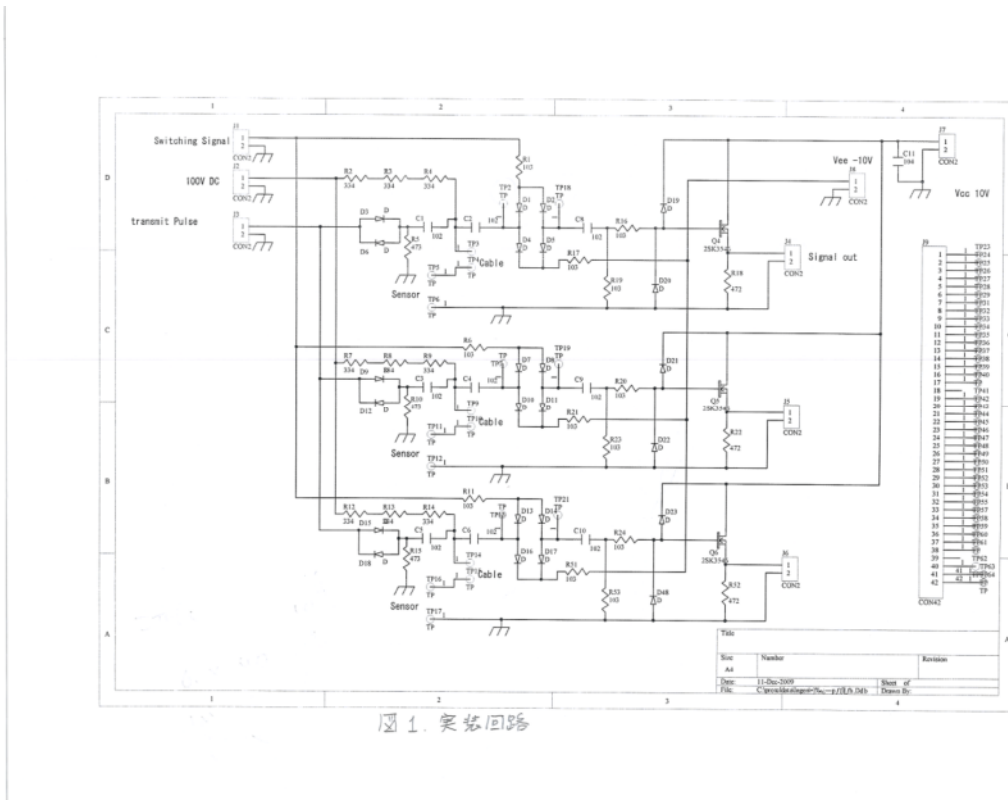


図 4-3 実装システム回路図

図 4-4 に実装ボードを示す。これは図 4-3 の回路が 3 回路実装されている。

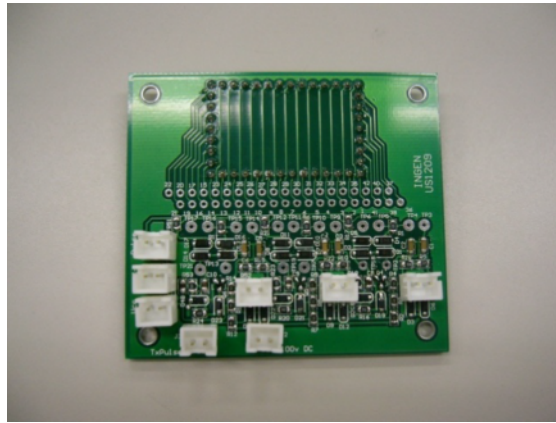


図 4-4. 実装システム外観図（左は回路部分、右はデバイス部分。素子はまだ実装されていない。）

### 3-3 実装システムの評価

図 4-5 に、回路図 4-3 の周波数特性を示す。

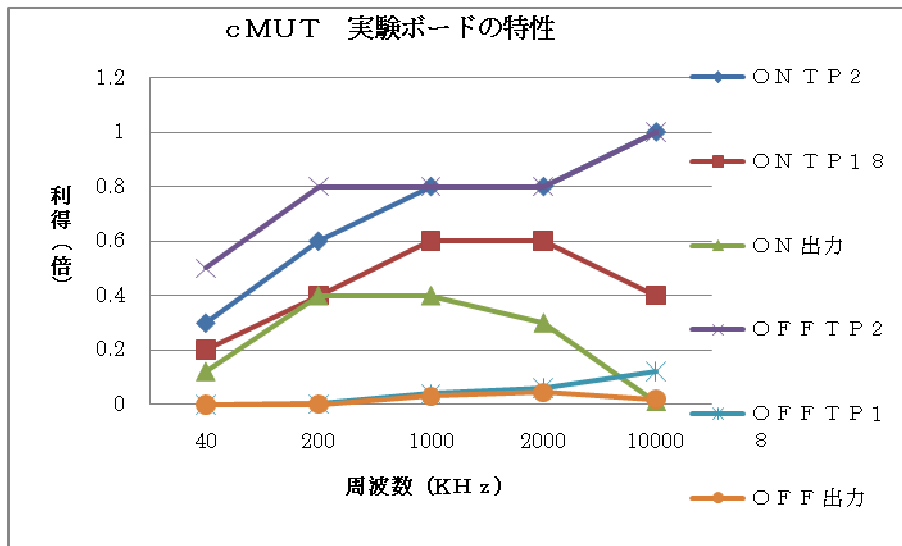


図 4-5. 実装回路の周波数特（入力は Transmit Pulse 入力より印加した）

ONとはダイオードブリッジが導通して受信信号が通過している状態、OFFとは非導通になっている状態を表す。ON,OFF 動作は正常に働いていることがわかった。ON 時の出力が 2 MHz から高いところで減衰しているので回路定数 C 8 を 1000pf から 10000pf へ、R 1 6 を 1 0 K Ω から 1 K Ω に変更して修正した。結果は 1 0 MHz で 0.2 の利得が得られた。

プローブデバイスからの信号レベルが小さいときにあらかじめ増幅する必要があるときのために F E T 増幅器を実装システムに導入した場合を実験した。その時の特性を図 4-6 に示す。

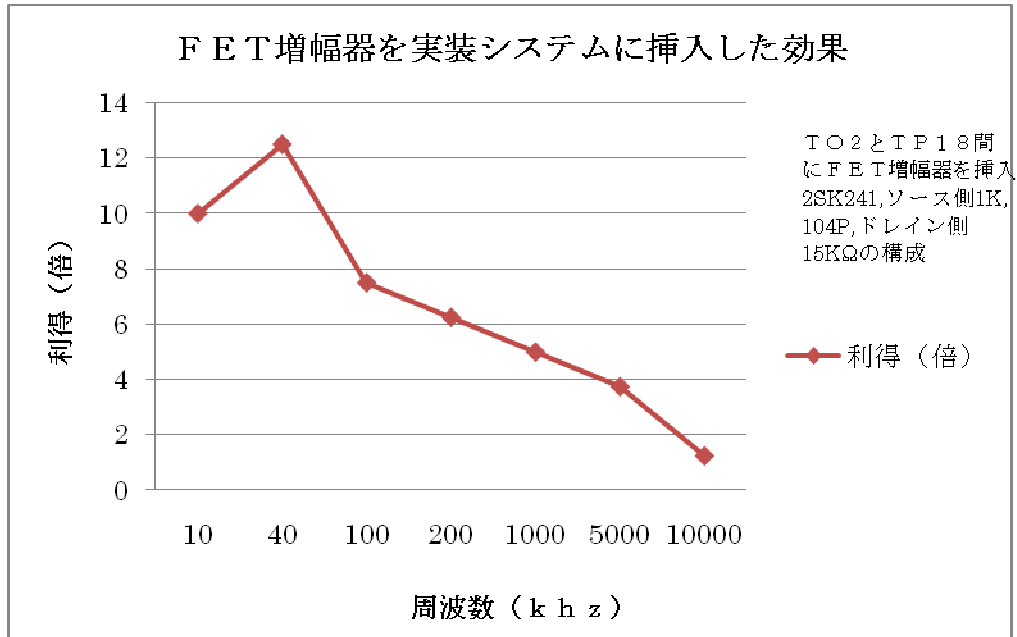


図 4-6. 入力回路にF E T増幅器を実装した特性

この結果F E T増幅器では1 0 MHz以上の高い周波数では利得が落ちるので、できるだけ使わずに実装回路を実現する必要がある事がわかった。

### 3-4 結論

- 実装回路の原型回路が決まった。
- プローブデバイスの特性が得られて以降、結果に応じて実装システムの導入を検討する。
- とくに今回のデバイスでは数MHz~1 0 MHz で使用する予定であるのでF E T増幅器の導入には注意する必要がある。

## 第4章 デバイス評価

デバイスの試作を行い、その特性を評価した。まず、CMUT デバイスのメンブレンが振動しない時（固定時）のCapacitanceを測定し、素子からの信号を測定した。

### 4-1 デバイスのCapacitance

基板に実装されたCMUT デバイスの表面イメージを図 3-9 に示した。このデバイスの各素子（セル）ことのCapacitanceを測定した。Impedance Analyzer (Agilent, 4294A)を用いて測定可能な素子に対してVDC 10V, f: 1kHzの条件でCapacitanceを測定し、その結果を次に示す。



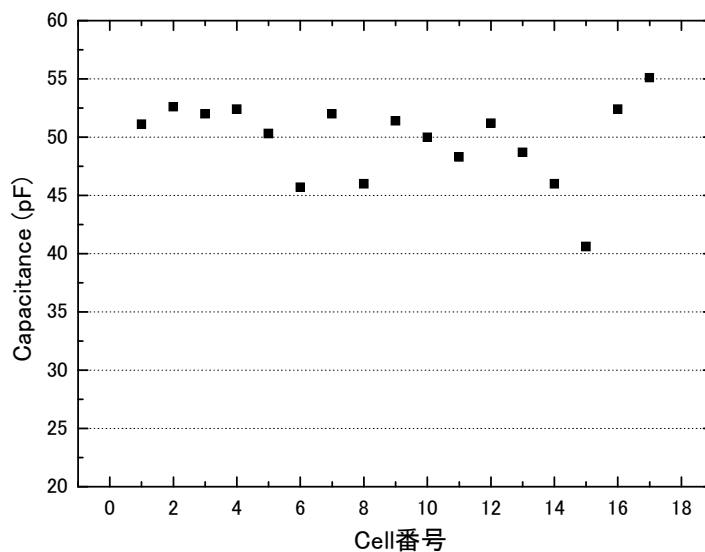


図 6-1. CMUT デバイスの各セルの Capacitance 測定結果

各セルは 50pF を中心に約±10%以内に Capacitance 値が分布していることが分かる。比較的一定な Capacitance 分布を示している。これは各デバイスセルが非常に再現性よく作製され、歩留まりが良いことを意味する。一方、メンブレンへの DC 電圧変化による Capacitance(Cp)変化を測定し、その結果を次に示す。

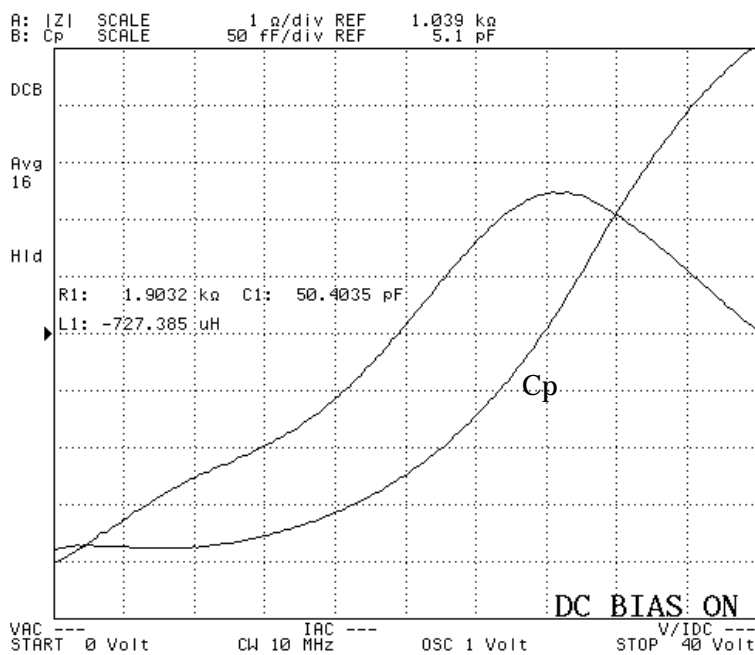


図 6-2. DC バイアス変化による Capacitance 変化

VDC が 0V から 40V まで変化する時、全体 Capacitance で 0.5pF の増加が見えた。これは全体 Capacitance(50.4pF)の約 1%である。すなわち、電圧変化によってデバイスのメンブレンが変動することが分かる。他の条件の変動はないため、DC バイアスによってメンブレンの Gap が最大約 1% 変動したことが推定できる。

## 4-2 まとめ

本研究では、デバイスの設計及び作製、測定システム開発などを行い、デバイスの特性評価を実施した。デバイスの作製及び周辺システムの設計・作製が最初であったが、当初の目標であるデバイス及び評価システムの設計・作製を達成することが出来た。デバイスの振動解析では、静電気力の変化によるメンブレンの振動をシミュレーションし、メンブレンの寸法及び材料、駆動条件などの変化によるデバイス変換効率を検討してデバイス構造の最適設計に関して考察した。デバイスの送受信システムでは、高電圧をデバイスへ印加して微弱信号を受信するため、ノイズを極力抑えた回路システムが必要になり、素子間の信号の影響を低減させる高精度のシステム設計・作製技術が必要である。本研究ではその作製に成功し、そのシステムを用いたデバイス評価にも成功した。これから一つの素子に送受信が出来るシステムが（送受信 switching システム）プローブ開発には必要になるが、今回の開発結果に基づいて作製する方針である。メンブレン材料の検討では、Sputter で蒸着した Si, SiO<sub>2</sub>, SiN<sub>x</sub> 薄膜の熱処理による応力変化を調べ、CMUT のメンブレン材料としての可能性を検討した。特に、Si 薄膜は 1000°C, 8 時間の熱処理で -70MPa まで応力が低減することが確認できた。一方、デバイスの作製では、独自の生産性の良いデバイスの開発に成功した。独自のデバイス構造開発は本研究で最もハードルが高い key technology である。本研究ではデバイス構造に関して二つの特許を出願した。デバイスの特性評価では、デバイスの基本作動及び受信信号が確認できた。今後、作製した CMUT デバイスの特性を調べて適切な音響システムを構成し、さらなるデバイス特性向上を図り、超音波診断用プローブの開発及び製品化を進める方針である。