

平成 3 1 年度防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書

「MUT型音響メタマテリアルによる音響インピーダンスの
アクティブ制御の研究」

令和 2 年 5 月

株式会社 日立製作所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、株式会社 日立製作所が実施した平成31年度「MUT型音響メタマテリアルによる音響インピーダンスのアクティブ制御の研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1. 0 委託業務の目的

物質内を伝搬する音波は、物性が異なる物質の境界面で散乱や屈折、反射を繰り返し伝搬、減衰していくため、物質界面での音響透過性や散乱を制御することが、音波の高効率な伝搬にとって非常に重要である。

音波を活用したソナーや、医療用のエコー装置などの非破壊検査システムでは、音波の送信や受信を行う素子材料として圧電セラミックスが広く使われており、圧電セラミックスに電圧を印加することによる固体振動を利用している。圧電セラミックスは、音波を伝搬させる水や空気、人体などの音響媒質と比べて、音波を伝搬させるための物性値が大きく異なるため、圧電素子と音響媒質との界面で音波の大半が反射されることになる。音波の伝搬を表す物理量は材料の密度と音速の積で表され、固有音響インピーダンスと呼ばれ、電気回路のインピーダンスと同様に、固有音響インピーダンスが異なる材料の界面では音波は反射され、固有音響インピーダンスが等しければ、音波は界面を透過できる。例えば、圧電セラミックスの固有音響インピーダンスは $20\sim 40 \times 10^6$ Rayls ($=\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) であるのに対して、空気の固有音響インピーダンスは約 4×10^2 Rayls、水の固有音響インピーダンスは約 1.5×10^6 Rayls であり、圧電セラミックスから空気や水には、その界面で音波が反射されてしまいほとんど伝搬できない。ソナーや、医療用のエコー装置などの非破壊検査システムは、音波の伝搬経路に存在する複数の物質の界面の反射や透過の情報を利用するものであり、したがって、これらのシステムの高度化には、音波が伝搬する物質界面での音響インピーダンスの制御が非常に重要である。

現状の音波を活用したソナーや検査システムでは、音響素子である圧電セラミックスと、空気や水などの媒質の界面に、両者の音響インピーダンスを整合するための整合層と呼ばれる材料を界面に挿入して界面での透過効率を向上させている。しかし現状の整合層には下記の課題がある。

- (1) 特定の波長に対しては音響整合を取ることができるが、広い周波数領域帯域にわたる整合ができないために整合効率が低く、さらに音波パルスの劣化の大きな原因となっている。
- (2) 界面を構成する物質の組み合わせ毎に整合すべき音響インピーダンスが変わるため、組み合わせ毎に異なる整合層が必要である。
- (3) システムによっては、整合層が厚く、重量も重いこと音響システムの小型化を阻害する要因の一つとなっている。

上記(1)の課題に対しては、整合層内部での音響インピーダンスを段階的、連続的に変化させて物質間の音響インピーダンスを整合する技術として、整合層を多層構造とすることや[1]、音響メタマテリアルと呼ばれる整合層の内部に固有音響インピーダンスが異なる材料で微細な構造を作り込んだ材料の研究、開発が進められ[2]、一部は実用化に至っている。しかし、これらの技術は、上記課題(2)を解決するものではない。

物質界面での理想的な音響の制御という観点から考えると、課題(1)の克服はもちろんのこと、整合できる音響インピーダンスのアクティブな可変性が重要である。その実現により、音波が伝搬する物質に依存することなく音響インピーダンス整合が可能となり、様々な音響システムに適用できることになる。また、物質界面での音響インピーダンスを制御し、界面での反射性や透過性が平面内の場所によって異なる平面的なパターンを作製することができれば、将来的な音響ディスプレイや無反射デバイスなどのこれまでにない新規なデバイスを実現できる可能性がある。しかし、固有音響インピーダンスは物質の密度と物質内の音速の積で表され、物質固有の物理量であるため、通常物質を用いたアクティブな音響インピーダンス整合は非常に困難であり、前述した整合層の多層化や、物性値が異なる材料の微細構造を作り込んだ材料では、アクティブな音響インピーダンス整合の実現は不可能である。

近年、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれる半導体微細加工技術を応用して、半導

体基板上に微細な可動構造を作るデバイスの研究，開発が進展してきており，自動車のエアバッグを作動させる加速度センサや，ゲーム機器のコントローラなどに搭載されている。MEMS 技術による音響デバイスの研究，開発も進められており，可聴域の MEMS 型のマイクロフォンは携帯端末に搭載されている。音波を活用したソナーや検査システムで使用される超音波域に関しても MUT (Micromachined Ultrasonic Transducer) と呼ばれる MEMS 型の送受信素子の研究，開発が行なわれており，医療分野においては，エコーシステムでの探触子として実用化されている [3]。図 1.0.1 に静電容量型の MUT (CMUT: Capacitive MUT) の模式図とデバイスの電子顕微鏡像を示す [4, 5]。CMUT は，半導体基板上に作り込んだ空洞の上部の薄膜メンブレンで構成される。空洞とメンブレンの厚さは，ナノからマイクロメートルオーダーであり，従来の圧電セラミックによる送受信素子と比較して非常に薄い構造とすることができる。空洞を挟む電極に直流電圧と交流電圧を重畳印加することで，空洞上部の薄膜メンブレンが振動し，メンブレンに接している媒質へ音波を送信する。音波の受信の場合は，デバイス表面に到達した音波の圧力による薄膜メンブレンの振動を，空洞を挟む電極間の静電容量の変化として検出する。

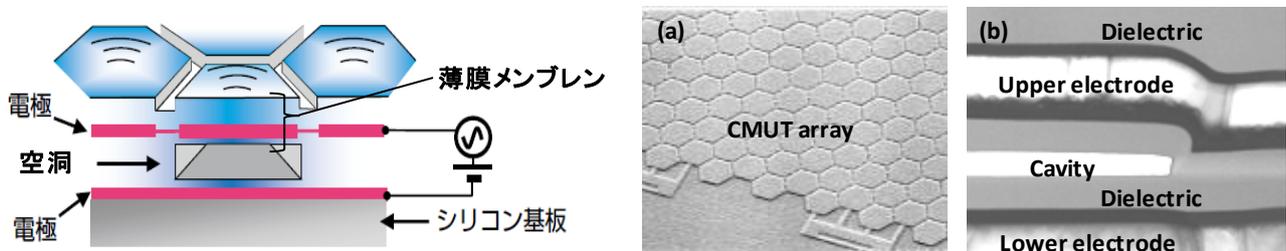


図 1.0.1 左側：CMUT の断面模式図 [4]， 右側：CMUT の電子顕微鏡像 (a) 鳥瞰像， (b) 断面像 [5]

CMUT の 1 つの特徴は，音響インピーダンスを含む音響特性が，材料の物性値ではなく構造に大きく依存する点である。図 1.0.2 は，CMUT と圧電セラミックを用いた探触子の等価回路モデルである [4]。

圧電セラミック探触子では，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，圧電セラミック材料と整合層等は質量，剛性，減衰機能を有した弾性体として介在する。多くの構成部品が存在しているものの，殆どの物性は固定されているため，設計の自由度は小さい。本モデルで重要な点は，音響整合層は伝送線のインピーダンス整合を用いているため，振動子と媒質の間での機械エネルギーの整合状態は波長/4 の整数倍に対応した周波数毎に変化を繰り返すことである。これにより，周波数軸上では感度帯域が制限される。一方，CMUT を用いた探触子では伝送路部品がなく，簡単な集中定数回路で表現される。これは，CMUT の構造寸法が取り扱う音波の波長よりも圧倒的に小さいことによる。CMUT における振動膜である薄膜メンブレンは直接媒質と作用するため，振動子の広帯域特性を直接音響媒質に反映させることが可能であり，薄膜メンブレン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，設計の自由度は大きい [6]。また，印加する直流電圧による静電引力に依存してメンブレンのバネ定数，電極間の静電容量が変化するため，音響インピーダンスを含むメンブレンの機械インピーダンスをアクティブに制御することができる。したがって，CMUT のような薄膜メンブレンで構成される MEMS 型の音響素子を，音響整合層としてその内部に作り込むことにより，音響インピーダンスをアクティブに制御できる音響メタマテリアルを実現できる可能性があると考えられる。

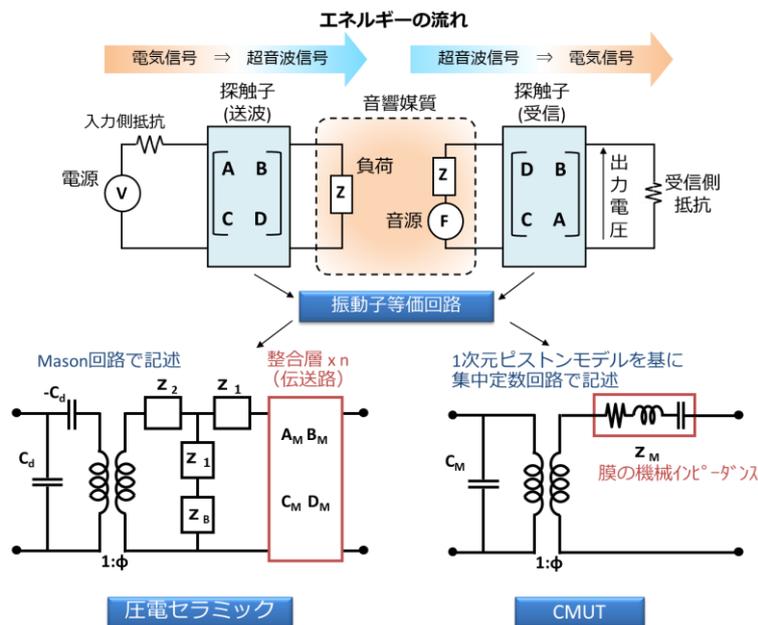


図 1.0.2 圧電セラミックと CMUT の等価回路モデル[4]

本研究では、MEMS 技術を駆使した MUT 構造による音響インピーダンスのアクティブ制御の実現性を検証した。研究目標は、(1)音響インピーダンス可変制御のための物理モデルの構築、(2)構築した物理モデルに基づいて設計、試作を行った MUT 型音響メタマテリアルデバイスの音響インピーダンス可変性の検証である。可変性の検証は、MUT 型音響メタマテリアルデバイスの水中での超音波透過性の計測により実施した。

物質境界面での音響インピーダンスを MUT 構造で制御するための基本技術を確立できれば、音響媒質に依存しない高感度な音響システムの構築が可能となる。例えば、医療向けの超音波検査において、現状に振動子として広く使われている圧電セラミックと人体の間の音響インピーダンスの整合に用いることにより、従来よりも高効率な音波のやり取りが可能となり、さらに人体の部位や個人差によって異なる音響インピーダンスを最適に整合することが可能となるため、従来を超える高分解能な検査画像の取得でき、病変の超早期発見につながる。さらには、頭蓋骨により頭皮を介した検査では解像精度が低い画像しか現状では取得できない脳の検査において、頭蓋骨の音響インピーダンスとの最適整合を行うことで、高解像度の脳の超音波画像の取得が可能となり、腫瘍や血栓の早期発見に繋がる。産業分野の非破壊検査においても、様々な材質の検査対象に対して最適な音響整合が一つのシステムで可能となり、高解像化は勿論のこと、システムの小型化にも繋げることができる。非破壊検査においては、検査対象がいくつかの材質で構成された複合材である場合もあり、その場合にも同様な効果を得ることが可能である。ソナーに適用した場合は、薄膜で構成される MEMS 型音響メタマテリアルによって、ソナーシステムの小型化、軽量化に寄与することができる。さらには、MEMS 型音響メタマテリアルを平面上にアレイ配列し、アレイ内の MEMS 素子を個々に変化させることが原理的には可能となるため、将来的には、物質界面での音波の透過・反射率を制御し、物質の無反射化や、平面上に擬似物体をアクティブに生成する音響ディスプレイの実現にも繋がる研究である。

1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

音響インピーダンスのアクティブ制御を目的としたMUT (Micromachined Ultrasonic Transducer) 型音響メタマテリアルは、絶縁膜の中に配置された複数の微細な空洞並びに空洞の上部及び下部に配置された電極で構成される。空洞上部の電極とその周囲の絶縁膜材料は薄膜メンブレンと呼び、MUT型音響メタマテリアルによる音響インピーダンスのアクティブ制御において主要な役割を果たす。また、薄膜メンブレン、空洞、空洞の下部の電極及びその周囲の絶縁膜からなる部位をMUTセルと呼ぶことで、MUT型音響メタマテリアルは複数のMUTセルから構成されるものと定義できる(図1.1.1-1.1.2)。

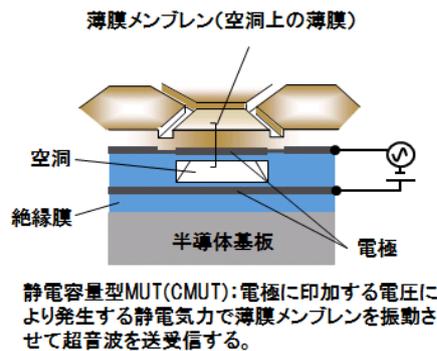


図1.1.1 MUT(鳥瞰図)

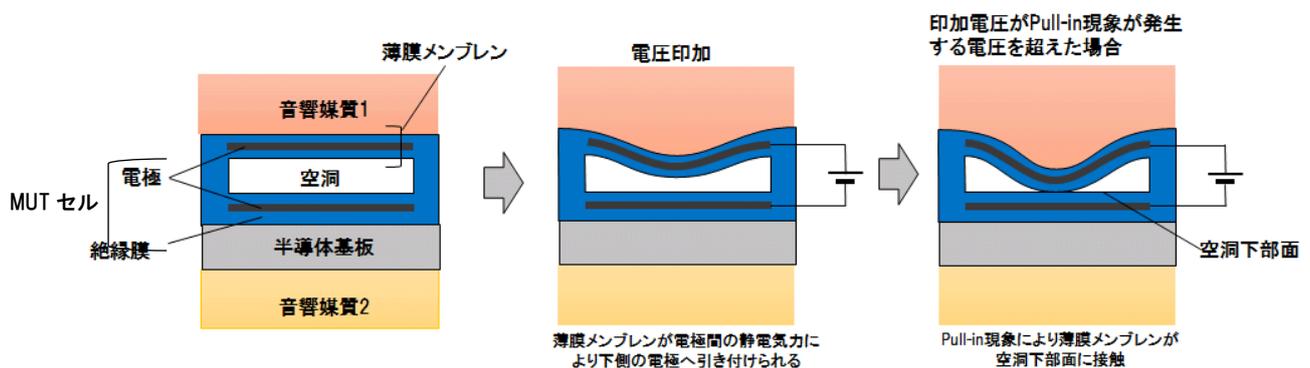


図1.1.2 MUTの基本動作(CMUTの場合、断面図)

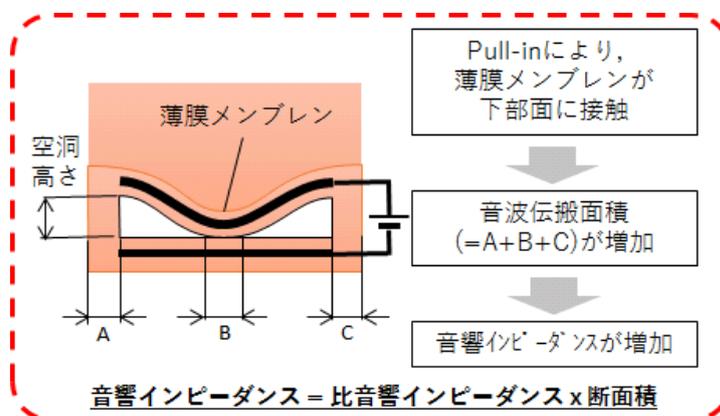


図1.1.3 音響インピーダンス可変制御の原理

本研究においては、半導体製造プロセスによりMUT型音響メタマテリアルを作り、MUTセルへの電圧印加による薄膜メンブレンのPull-in現象（薄膜メンブレンの剛性による復元力と静電気力の釣り合いが破れ、薄膜メンブレンが空洞下部面に接触する状態）の制御によって、巨視的に見た音波伝搬面積をアクティブに変化させることによる、音響インピーダンスのアクティブ制御に関する基礎研究を実施した(図1.1.3)。

本研究の最終目標はMUT型音響メタマテリアルによる音響インピーダンス整合層の可変制御性の原理検証にある。まず、MUT型音響メタマテリアルにおけるMUTセルの物理モデルを構築してシミュレーション等を行い、MUTセルのパラメータと水中における音響インピーダンスのアクティブな可変制御性の基本原理を検証した。また、MUTセルの物理モデルの精度向上に資するためのMUTセルでの音波の散乱等に起因する減衰評価手法を確立した。それらの結果を踏まえ、MUT型音響メタマテリアルの試作品による実証を試みたが、試作における不具合の発生により期間内では未完了となった。

MUT型音響メタマテリアル試作品の機能及び性能は、医療用超音波プローブで実績のある超音波周波数範囲（5MHz～10MHz）において、以下を最終目標とした。

- ・音響インピーダンスの可変制御の実現：可変制御範囲1.5～10MRayls

最終目標を実現するために克服又は解明すべき4つの要素課題（詳細は後述）と評価について、下表の実施項目を定め研究を推進した。

表1.1.1 本研究の実施項目

番号	課題区分	実施項目
①	要素課題1	実施項目1：MUT構造モデルの構築に関わる研究
②	要素課題2	実施項目2：MUTセルにおける空洞高さの高精度制御
③	要素課題3	実施項目3：水中環境下における材料選定に関わる研究
④	要素課題4	実施項目4：MUT型音響メタマテリアルでの減衰率評価に関わる研究
⑤	評価	実施項目5：試作したMUT型音響メタマテリアルによる検証

各実施項目の研究目標に対する達成度を表1.1.2にまとめる。

表1.1.2 研究目標に対する達成度

実施項目	年度	実施内容	マイルストーン/研究目標	達成度
1	H29	<ul style="list-style-type: none"> ・MUTの基礎理論構築 ・MUTの概念設計シミュレーション ・音響伝搬特性に対する構造設計パラメータ依存性評価による設計指針の策定 ・MUT型音響インピーダンス整合層の基本構造の整合特性 	マイルストーン：等価回路モデル構築とMUT基本構造モデル構築 目標：Pull-in前後の特定周波数の音波透過率50%変動	100%
	H30	<ul style="list-style-type: none"> ・詳細シミュレーションモデルの構築と音響インピーダンス整合特性 ・設計指針の再評価 ・Pull-in時の接触面積と音響インピーダンス整合性の関係および設計解 ・Pull-in時の接触面積率50%を実現する構造パラメータの探索 ・平成31年度（令和元年度）試作用チップの設計 	マイルストーン：試作デバイス設計完了 目標：Pull-in時の接触面積率最大50%	100%
	H31	<ul style="list-style-type: none"> ・試作品詳細設計 	マイルストーン：設計完了	100%

表1. 1. 2 研究目標に対する達成度(つづき)

実施項目	年度	実施内容	マイルストーン/研究目標	達成度
2	H29	薄膜メンブレンの薄膜単体応力の成膜パラメータ依存性取得	マイルストーン：薄膜応力安定化成膜パラメータ抽出 目標：プロセス変動幅±10%での応力安定性（中心値±10%以下）	100%
	H30	MUT構造での空洞高さ安定性評価	マイルストーン：高精度空洞径製プロセス構築 目標：空洞高さ：設計中心値±10%以下	100%
	H31	MUT型音響メタマテリアルの製造プロセス構築及び試作	マイルストーン：MUT型音響メタマテリアル完成	50%
3	H29	MUT材料の耐環境性，強度特性の評価	マイルストーン：MUT材料の耐油性評価 目標：温度範囲（保管条件）-10度～60度における耐油性評価完	100%
	H30	MUT材料の耐環境性，強度特性の評価	マイルストーン：水中環境下における水密材料選定 目標：耐水圧0.1MPa以上，絶縁油，モールド共に使用可	100%
	H31	・簡易型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の性能検証 ・MUT型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の動作検証	簡易型音響メタマテリアルおよびMUT型音響メタマテリアルの音響インピーダンス評価完/音響インピーダンス対象範囲：1.5～10Mrayls 対応超音波周波数範囲：5MHz～10MHz	50%
4	H29	・MUT型音響メタマテリアルの減衰率評価手法の検討（机上検討）	机上検討資料，検討計画書	100%
	H30	・MUT型音響メタマテリアルの減衰率評価手法検討（シミュレーション） ・MUT型音響メタマテリアル内部の音響伝搬過程の把握	バルク材料における音響シミュレーションと実測の差異：±10%	100%
	H31	・簡易型音響メタマテリアルのシミュレーションと実測の差異分析 ・MUT型音響メタマテリアルのシミュレーションと実測の差異分析	MUT型音響メタマテリアルにおけるシミュレーションと実測の差異：±10%	50%
5	H29	実施事項無		
	H30	実施事項無		
	H31	・簡易型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の性能検証 ・MUT型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の動作検証	簡易型音響メタマテリアルおよびMUT型音響メタマテリアルの音響インピーダンス評価完/音響インピーダンス対象範囲：1.5～10Mrayls 対応超音波周波数範囲：5MHz～10MHz	50%

以下課題区分に従って詳細に示す。

① 要素課題 1

(1) 課題

音響インピーダンスは材料の固有音響インピーダンスと音波伝搬面積の積で表される（詳細は後述）。本研究においては、MUT型音響メタマテリアルに用いる絶縁膜材料は、半導体プロセスが適用可能なシリコン系化合物を用いるため、材料の固有音響インピーダンスはほぼ一定とみなせる。従って、音響インピーダンスの制御は音波伝搬面積で行うことになるが、インピーダンスの可変範囲を拡大するためには、絶縁膜中に作り込まれたMUTセルの薄膜メンブレンの空洞下部面への接触面積（音波伝搬面積）を制御する必要がある。しかし、従来のMUTセルでは、Pull-in電圧で薄膜メンブレンが空洞下部面に接触する時の接触面積が非常に小さく、音響インピーダンスを十分に可変することができない。従来MUTセルで、さらなる接触面積を拡大するためには、2度目のPull-inが必要であり、理論的には1度目のPull-in電圧の約4倍の電圧を要する。この場合、極めて高い電圧（kVオーダ）が必要となり、MUTセルの電氣的な破壊電圧に達する。これらの課題を解決するためには、試作を繰り返して検討することは困難であることから、シミュレーションにより、MUTセルの破壊電圧以下となる低電圧で接触面積を拡大可能なMUTセルの物理モデル構築が課題となる。

(2) 実施項目 1：MUT構造モデルの構築に関わる研究

上記の要素課題 1 を解決するために、実施項目 1 では以下の検討を行った。

平成29年度成果：

平成29年度は、MUT型音響インピーダンス整合の基礎理論を構築し、それに基づいた薄膜メンブレン変形を反映した概念設計シミュレーションを実施した。概念設計シミュレーションでは、MUT型音響メタマテリアルの原理的な見通しを得ること、および設計パラメータが音響整合性能へ与える影響を把握することを目的として、有限要素法による簡易（空洞構造を含まない、非アクティブ）なMUTセルモデルを作成しパラメトリックスタディを実施した。さらにMUT基本構造の等価回路モデルを考案し、音響整合を目的としたMUTセルの基本設計指針を得た。一例として簡易なMUT型音響インピーダンス整合層の設計を行い、従来技術である $1/4\lambda$ 整合層モデル（ λ ：波長）と比較した。その結果、MUT型は $1/4\lambda$ 整合層に対し広帯域な整合特性が得られることを確認した。

(a)MUTの基礎理論構築

はじめにMUTの音響物理に基づく基礎理論を整理する。それに基づいて薄膜メンブレン変形モデルを反映した概念設計シミュレーションを実施し、音響整合を目的としたMUT型音響メタマテリアルの原理的な見通し、設計指針を得た。

音波の整合について改めて図1.1.1.1を用いて簡単に説明する。ここでは音波の伝搬材料としては均質な弾性体を、また伝搬する音波のモードとしては縦波（粗密波）を仮定する。弾性体を伝搬する音波は、通常異なる材料の境界面で反射する。これは、異なる材料間の音響インピーダンスが異なるからに他ならない。材料固有の固有音響インピーダンス z は、音波の伝搬速度（音速） c [m/s]と密度 ρ [kg/m³]の積で表され、音響インピーダンス Z は、これに音波が伝播する断面積 s [m²]を掛け合わせたものになる（すなわち、 $Z = s \times z$ ）。従って、音波が伝搬する断面積 s が材料間で一定であるときには、固有音響インピーダンス z の差がそのまま音響インピーダンス Z の差となる。当然、断面積 s を変化させることで音響インピーダンスを調整する方法もあり得るが、弾性体内部での急激な伝搬面積の変化を起こすことは難しく、通常波長サイズより大きな距離で徐々に変換させる必要がある。また多くの用途においては放射面積等の制限により伝搬面積を大きく変えること自体が問題となる。そこで従来、音響インピーダンスの整合を取る方式の一つとして、圧電セラミクスと伝播させたい材料との間に音響整合層が挿入され、一定の効果を得ていたことはすでに述べたとおりである。

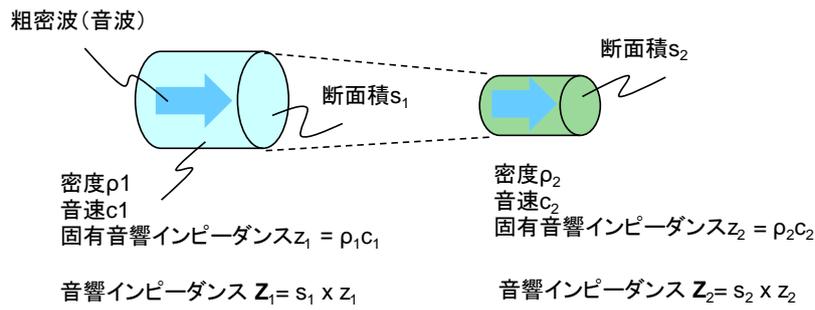


図 1. 1. 1. 1 異なる音響媒質の音波伝搬

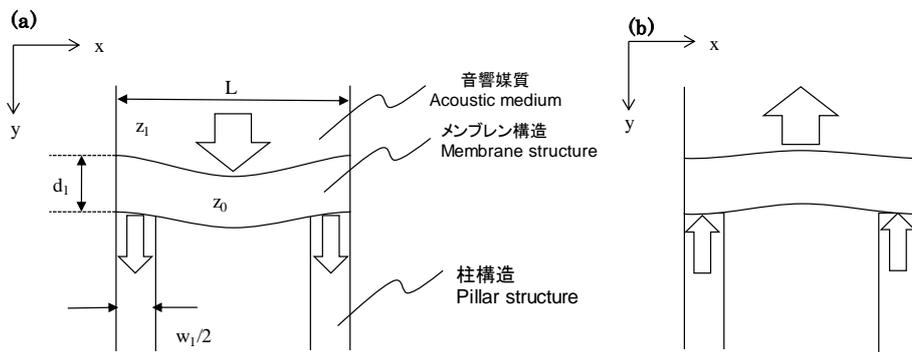


図 1. 1. 1. 2 MUT 基本構造

次に、本研究におけるMUT構造を活用した音響整合の原理について説明する。図1. 1. 1. 2は、固有音響インピーダンス z_1 を有する「音響媒質 (Acoustic medium)」と固有音響インピーダンス z_0 を有する薄膜メンブレン構造部 (Membrane structure, 以後「メンブレン構造部」) とが接合し、メンブレン構造部の左右の端部にメンブレン構造部と同じく固有音響インピーダンス z_0 を有する材料で作製された柱構造部「柱構造部 (Pillar structure)」が接合した構造体である。実際の構造体は3次元構造を有するが、ここでは説明の便宜上、2次元平面で考える。音響媒質とメンブレン構造部との接合面積は、2次元平面では幅 L に相当する。また、メンブレン構造部と一つの柱構造部との接触面積は、2次元平面では幅 $w_1/2$ に相当する。図ではメンブレン構造と柱構造の接触箇所が2か所存在するため、全体では $w_1/2$ の2倍 (w_1) が総接触面積となる。さらに、メンブレン構造部の厚さ d_1 は、メンブレン構造部を構成する材料の内部において、想定している周波数帯域の波長よりも十分に小さいものとする。このようなメンブレン構造部と柱構造部とからなる構造体が音響媒質と接触しているとき、音響媒質中を音波 (粗密波) が y 方向 (図の下方) に伝搬することを考える。音波の粗の状態がメンブレン構造部の境界に到達したとき、図(a)のように、メンブレン構造部の中心部は瞬時に y の正方向に変形する。このとき、弾性体であるメンブレン構造部の両端には、音波をメンブレン構造部全体で受けた力が伝わり、曲げモーメントが発生する。この曲げモーメントによりメンブレン構造部と柱構造部との境界面には、柱構造部を y の正方向に押す力が発生する。一方、粗密波の密の状態がメンブレン構造部の境界に到達したときには、図中(b)のようにメンブレン構造部の中心部が瞬時に y の負方向に変形する。このとき、図中(a)の場合とは逆に、メンブレン構造部と柱構造部との境界には、柱構造部を y の負方向に引っ張る力が発生する。このように、音波から見れば、メンブレン構造部による曲げの力を介して瞬時に音波が柱構造部へと伝わる。すなわち、音響媒質を伝搬する縦波モードは、一旦メンブレン構造にて曲げ (横波) モードに変換され、柱構造の部分で再度縦波モードへと変換さ

れる。これを波長より十分小さいスケールで行うことによって音を伝える。本構造は、静電気力を用いてアクティブに振動膜を制御するものではなく、電気音響変換機能を含まないためMUT(Micromachined Ultrasound Transducer)型という名前とかい離がある。しかし、将来的にはアクティブ型へと発展する計画であるため、本構造も含めてMUT型と定義している。アクティブ型の構造については平成30年度以降の成果にて説明する。

上記の原理を用いて、図1.1.1.2で説明した整合理論に従い、以下のように、幅Lと柱構造幅 w_1 を音響インピーダンスが一致するように設計すれば、特定の周波数や材料に制限されることなく、音響媒質を音響的に整合させることが可能となると思われる。すなわち、

$$L \times z_1 = (2 \times w_1/2)z_0 \quad (1)$$

$$w_1 = L(z_1/z_0) \quad (2)$$

となるように w_1 を設定すればよい。

図1.1.1.3に本提案による音響整合デバイスの一形態を示す。上下の二つの音響媒質は、それぞれ異なる固有音響インピーダンス z_1 、 z_2 を持つ弾性体の音響媒質であり、これらの間にあるのが固有音響インピーダンス z_0 を有する材料で構成された本提案の音響整合構造である。音響整合構造と音響媒質との境界には、或る幅Lおよび厚さ d_1 を持つ第1のメンブレン構造部があり、音響整合デバイスと第2の音響媒質との境界には、幅Lおよび或る厚さ d_2 を持つ第2のメンブレン構造部がある。第1と第2のメンブレン構造部それぞれの左右の端部は、長さhを持つ柱構造部を介して連結されている。また、図1.1.1.3では、奥行き方向に長さDを持ち、上面から見た場合、面積 $S=D \times L$ を持つ長方形構造をしている。図1.1.1.3(c)に示すように、第1のメンブレン構造部と柱構造部の2箇所の接合面は、それぞれ幅が $w_1/2$ 、接合面積は $s_1/2$ とする。ここで、音響整合を実現するために以下のように各寸法を設定する。まず、第1の音響媒質と第1のメンブレン構造部とが接触する面積Sと接合面積 $s_1/2$ との関係を以下となるようにする。

$$S/(2 \times s_1/2) = z_1/z_0 \quad (3)$$

すなわち、

$$s_1 = S(z_1/z_0) \quad (4)$$

または、

$$s_1/S = Z_1/Z_0 \quad (5)$$

となる。ここで、 $S=DL$ であり、また $s_1=Dw_1$ であることから、これらを式(4)に代入すると、

$$w_1 = L(z_1/z_0) \quad (6)$$

の関係が成り立つ。同様にして、図1.1.1.3(c)に示すように、第2のメンブレン構造部と柱構造部の2箇所の接合面を検討する、それぞれ幅が $w_2/2$ 、接合面積は $s_2/2$ とする。ここで、第2の音響媒質と第2のメンブレン構造部とが接触する面積Sと接合面積 $s_2/2$ との関係を以下となるようにする。

$$S/(2 \times s_2/2) = z_2/z_0 \quad (7)$$

すなわち、

$$s_2 = S(z_2/z_0) \quad (8)$$

または、

$$s_2/S = Z_2/Z_0 \quad (9)$$

となる。ここで、 $S=DL$ であり、また $s_2=Dw_2$ であることから、これらを式(8)に代入すると、

$$w_2 = L(z_2/z_0) \quad (10)$$

の関係が成り立つ。本研究の目的は、異なる固有音響インピーダンスを持つ材料間の整合であることから、 z_1 および z_2 は互いに異なる値となることを想定する。便宜的に $z_1 < z_2$ の関係となるとき、式(4)、(6)、(8)、(10)より、 $s_1 < s_2$ 、 $w_1 < w_2$ の関係が成り立つ。

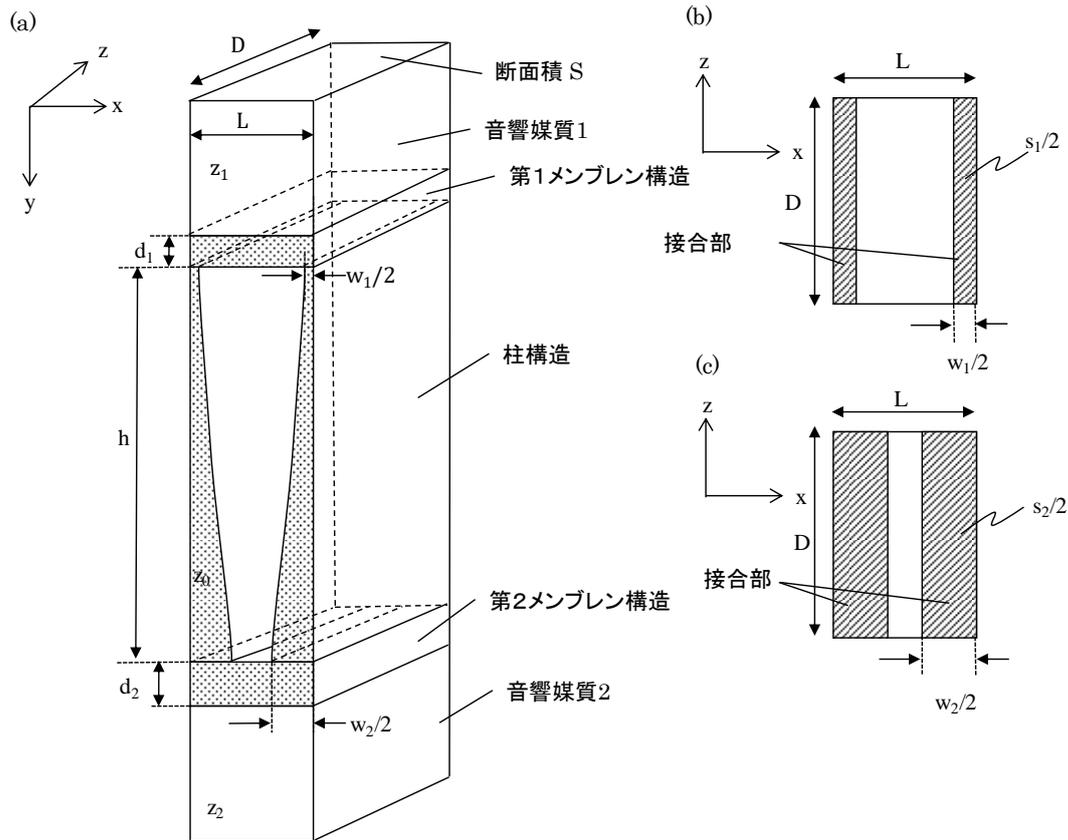


図 1.1.1.3 MUT 型音響インピーダンス整合層の基本構造

(b)MUT概念設計シミュレーション

図1.1.1.2で示したMUT基本構造の音波伝搬過程を検証するため、図1.1.1.4に示す有限要素法による簡易なMUTシミュレーションモデルを構築した。シミュレータは市販のPZFlex (PZFlex LLC) を用いた。モデルは均質なシリコン (Si) で形成された膜構造と柱構造から成る。ここでは、膜構造から柱構造への音響伝搬特性を調べることを目的とするため、膜構造上部は無負荷とし、柱構造の端部は吸収境界とした。柱構造の左右方向は対称境界とし、実効的には無限のアレイ構造を形成している状態を模擬した (左右方向のエネルギー拡散ゼロ)。また、材料減衰は仮想的にゼロとする。計算条件を表1.1.1.1に示す。

解析の手順は次の通りである。モデルの膜構造の表面にインパルス状 (三角波) の圧力波を印加する。本研究では対象とする周波数領域を医療用超音波診断機で主に使われるMHz帯域 (1~数十MHz) を想定し、-3dBカットオフが約200MHzとなる十分広帯域なものとする。シミュレーション結果として、膜構造内部および柱構造内部の2次元応力分布を時系列に出力する。また、図1.1.1.4の点A (膜構造の中心) のy方向の速度、および点B (膜構造から50 μm 下方の柱構壁面) におけるx方向とy方向の変位速度を計測することで、前節で示した原理、すなわち膜構造部の横波から柱構造部で縦波へと振動モードを変換し、その後柱構造に沿って縦波が伝搬することを定性的に確認する。設計自由度としては、単位幅L、柱構造長さh、膜構造厚さd、柱構造幅 w_1 がある。これらの設計値を表1.1.1.2に示す。単位幅Lは水負荷を想定した際、基準となる周波数を10MHzとしたときの水中の縦波音速の波長である150 μm よりも十分小さい10 μm に固定し、単位幅の影響が無視できると思われるスケールとした。また、柱構造長さhに関しては、柱構造端部を吸

収境界としているため、いかなる数値でも原理的には問題ないが、パルス状の波形が伝搬する様子を視覚的に確認できる200 μm とした。柱構造幅 w_1 およびメンブレン構造厚さ d はそれぞれ暫定的に1.0 μm とした。また、これらの設計値におけるメンブレン構造の共振周波数 (f_{res}) を求めたところ66.9MHz (基本波モード) であった。

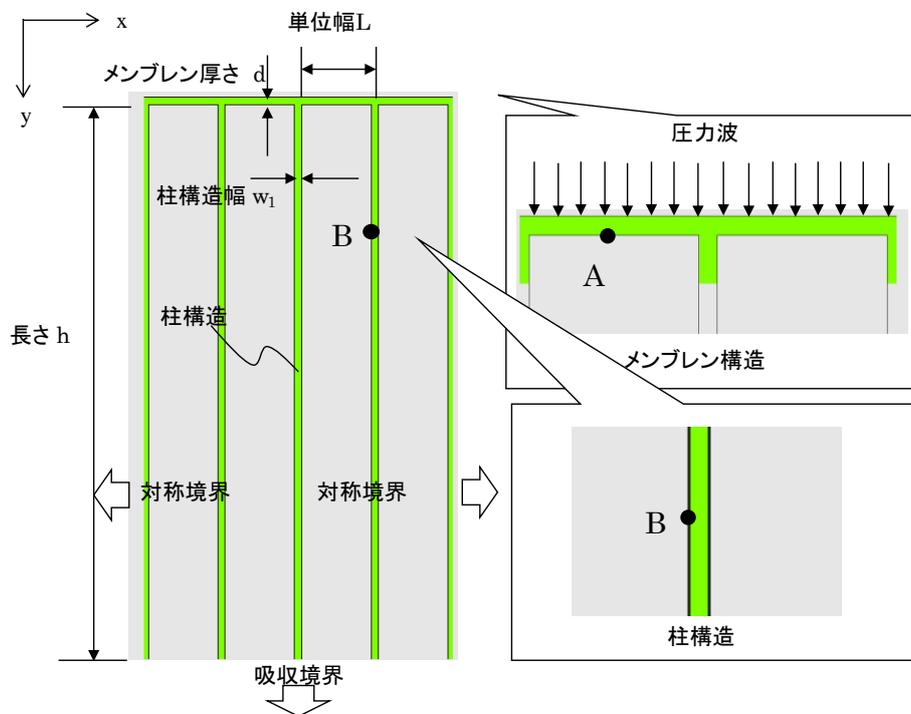


図 1.1.1.4 MUT 型音響インピーダンス整合層の基本構造

表 1.1.1.1 シミュレーション条件

計算条件	値 [単位]
材料定数	密度:2330 [kg/m ³] ヤング率:130 [Gpa] ポアソン比:0.28 固有音響インピーダンス:20.2 [MRayl] 減衰定数:0 [dB/MHz/mm]
境界条件	上部, 下部: 吸収境界 左右: 対称境界

表 1.1.1.2 シミュレーション設計パラメータ

パラメータ	値 [単位]
L	10 [μm]
h	200 [μm]
w_1	1.0 [μm]
d	1.0 [μm]
f_{res}	66.9 [MHz]

図1.1.1.5に簡易MUTモデルのメンブレン構造部に圧力波を印加した際のメンブレン構造部近辺および柱構造の内部応力分布を示す。上段に振動膜が振動した際の特徴的な応力分布を示す。膜が凹変位時にはメンブレン構造の下面側が引き伸ばされ引っ張り状態となり（カラーマップで赤）、逆に上面側は圧縮される（カラーマップで緑）。メンブレン構造と柱構造部の境界部分（図中の丸で囲んだ部分）は振動膜部とは逆にメンブレン構造の曲げの力の反作用で上面側部分が強く引っ張られる。一方、メンブレン構造が凸変位しているときは、凹変位時とは完全に逆の応力分布となる。このようなサイクルでメンブレン構造が振動した際、図1.1.1.5下段の柱構造の圧力分布図の時間変化を見ると、柱構造の下方側に向けてパルス状の圧力波が伝搬していく様子が確認できる。

図1.1.1.6にはメンブレン構造部および柱構造の境界部のx方向（水平方向）とy方向（垂直方向）の速度変位波形（圧力波形）を示す。図の左に示すメンブレン構造部中心（点A）はy方向にのみ大きく振動する（x方向は対称モデルのため原理的に変形しない）。一方、点Bの速度波形を見ると、y方向にインパルス状の音波が伝搬していることが分かる。点Bにおけるx方向の振動も確認できるが、y方向と比較するとその振幅は1/50以下であり、ほとんどが縦波振動である。これらの結果から、考案構造は、メンブレン構造による横波（曲げ波）が柱構造端部で縦波の振動に変換し、柱構造を伝搬していくことが定性的に確認できた。

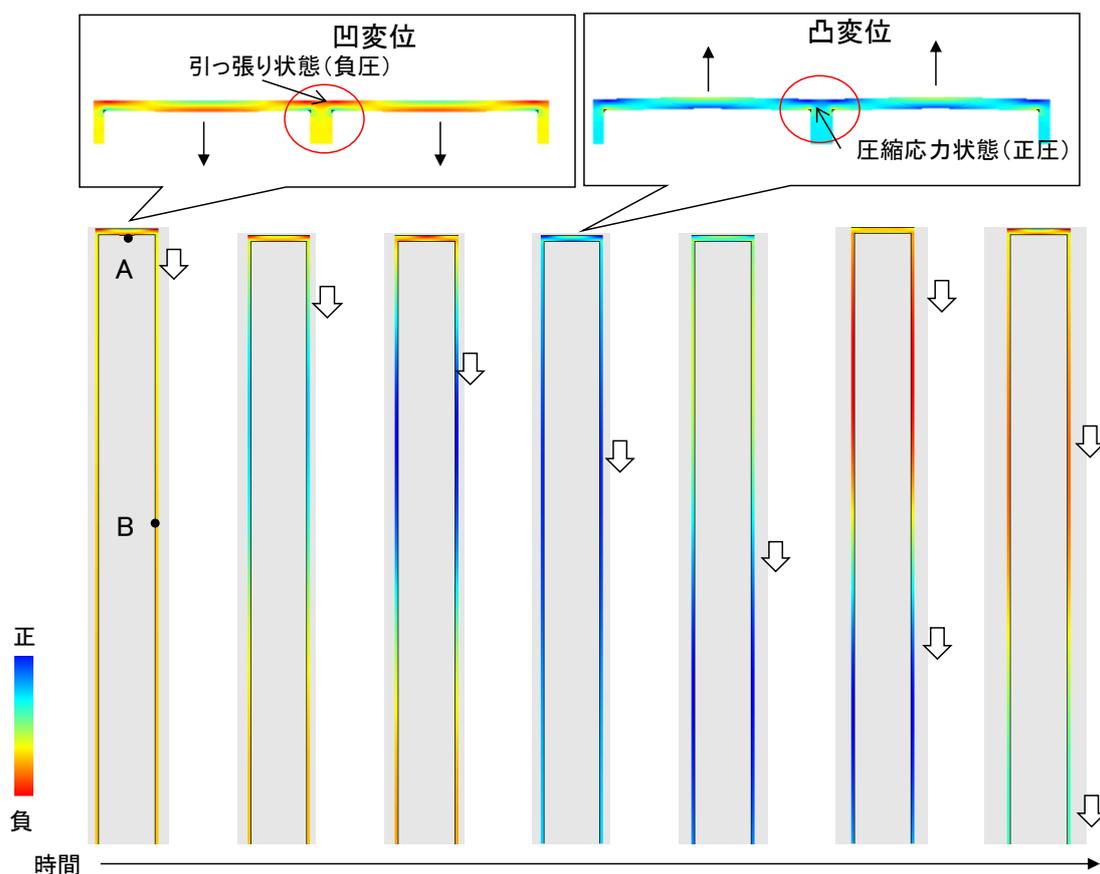


図 1.1.1.5 MUT 内部応力時間変化

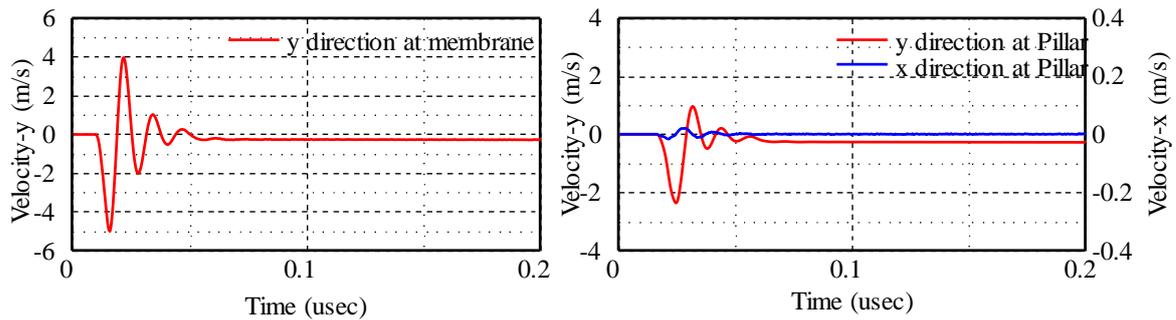


図 1. 1. 1. 6 x および y 方向の時間変化

(左：点 A における y 方向変位速度，右：点 B における x および y 方向変位速度)

(c) 音響伝搬特性に対する構造設計パラメータ依存性評価による設計指針の策定

上述 (b) にて構築したシミュレーションモデルを使い、構造パラメータを変えた計算を行うことで音響伝搬特性へ及ぼす影響を定量的に解析した。この結果に基づき提案構造の設計指針を得た。設計パラメータを表 1. 1. 1. 3 に示す。ここでは (b) での検討と同様に単位幅 L と長さ h は固定とするが、長さ h の影響については後述する平成 30 年度の検討において考慮する。従って、本節における変更可能な設計パラメータは振動膜厚 d と柱構造幅 w の二つに限られる (設計パラメータの振り幅については後述)。

解析方法は次の如くとする。図 1. 1. 1. 7 に解析例を示す。はじめに (b) での検討と同様にメンブレン構造にインパルス状の圧力波を印加し、点 A における速度を計測する。次に、点 A の速度信号をフーリエ変換し周波数スペクトラムとする。図 1. 1. 1. 7 に示すように、ある周波数にピークを持った分布が得られる。本シミュレーションモデルにおいては、メンブレン構造に入力されたエネルギーはデバイス外部への放射や材料減衰は存在しないため、エネルギーはメンブレン構造部にとどまるか、もしくは柱構造を伝搬し、最終的に吸収境界となっている柱構造の端部で吸収される。メンブレン構造に与えられた音響エネルギーが広帯域かつ効率的に柱構造に伝搬する状態とは、言い換えればメンブレン構造部の点 A の信号が広帯域かつ効率的に減衰することを意味する。この場合、解析例 1 (Analysis 1) に示したように点 A の信号は直ちに減衰する。これを周波数スペクトラムで観察すると所謂 Q 値が低く、また振幅が相対的に小さいスペクトラムとなる。一方、効率的に柱構造にエネルギーが伝搬しない場合は、メンブレン構造が振動し続け、周波数スペクトラムで観察すると Q 値が高く、また振幅が相対的に大きくなる (Analysis 2)。このような傾向から、本検討では、柱構造への伝搬効率を測る指標として、点 A で観測される信号の周波数スペクトラムの Q 値の逆数を取った損失係数 (Loss factor) を採用する。ここで、設計パラメータによってメンブレン構造の剛性が変化するため、同じ圧力値を入力したとしてもその変位速度は大きく異なり、各設計パラメータの比較評価にならない (静的には同じ圧力に対してはメンブレン構造の曲げ剛性に反比例して変位量が小さくなる)。そこで、解析の際は入力パルスが印加された際の時間波形の最初のピーク値で規格化した。実際は動的な解析であるため、厳密な規格化ではないが、設計パラメータ依存性の傾向をつかむ上では十分有効であると考えられる。また、提案したデバイス構造のようなメンブレン構造は共振周波数が音響エネルギー伝搬に対して大きな影響を及ぼす可能性が高いため、各設計パラメータのメンブレン構造の共振周波数についても別途計算し、その依存性を解析した (ただしここで言う共振周波数は振動膜の 1 次の基本波モード)。図 1. 1. 1. 7 の解析例 1 では約 70MHz、解析例 2 では約 37MHz であった。

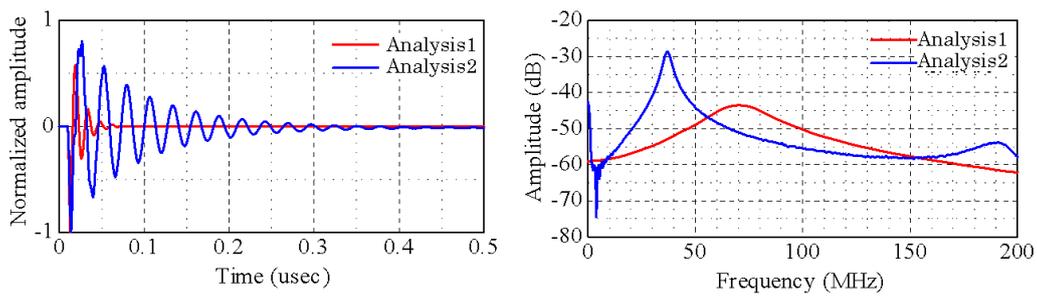


図 1.1.1.7 解析例

表 1.1.1.3 シミュレーション設計パラメータ

設計パラメータ	値 [単位]
単位幅 L	10 [μm] ※constant
長さ h	200 [μm] ※constant
柱幅 w	0.5, 0.75, 1.0, 1.5 [μm]
メンブレン厚さ d	0.25 w , 0.5 w , 0.75 w , 1.0 w , 1.25 w , 1.5 w [μm]

設計パラメータの振り幅については次のように設定した。本手法の最終的な適用先を医療用超音波診断装置や水中ソナーと仮定した上で、デバイスの対象負荷を「水（固有音響インピーダンス 1.5MRayls）」と設定した。上述の(a)で示した理論によれば、デバイス材料のSi（固有音響インピーダンス 20MRayls）に対し音響整合を成立させるためには、理論的には柱構造の幅 w は式（6）に従い次のようになる。

$$w_1=L(z_1/z_0)=10\ \mu\text{m}\times(1.5/20)=0.75\ \mu\text{m}$$

ここで単位長さ L は10 μm としている。そこで、設計パラメータの一つである柱構造の幅 w は0.75 μm 近辺を中心に0.5, 0.75, 1.0, 1.5 μm の4段階とした。また、もう一つの設計パラメータである振動膜厚 d については、柱構造の幅 w との関係性（ d と w の大小関係の依存性）を確認するため、幅 w を基準としてその0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5倍の6段階とした。計4 \times 6 = 24通りのシミュレーションおよび得られた結果の解析を行った。

図1.1.1.8(a)-(d)に振動膜部の点Aにおける周波数スペクトラムの計算結果を示す。各図から分かる通り、柱構造部幅 w に対し振動膜厚 d が厚くなるに従って、振幅ピーク位置が高周波化するとともに広帯域化および低振幅化する。また、柱構造幅 w が大きくなるに従い、周波数帯域全体が高周波側にシフトする。ピーク位置の移動に関しては、振動膜厚が厚くなることで振動膜の剛性が増すため、共振周波数が高周波化することは当然である。次に、図1.1.1.9にloss factorの解析結果を示す。 d/w （柱構造幅 w に対する振動膜厚 d ）および共振周波数を横軸として柱構造幅別にプロットした。図1.1.1.9左図からは、 d/w を高く設定するほどloss factorが大きくなり、また図1.1.1.9右図からは、共振周波数が高いほどより効率的にメンブレン構造部のエネルギーを柱構造に伝えることが可能となると示唆される。一方、柱構造幅 w に対する依存性に注目すると、図1.1.1.9左図中のa-bの方向、すなわち同じ d/w のとき、より w が大きいほどloss factorが大きくなること分かる。一方、右図からは、同じ共振周波数のとき、より w が小さいほどloss factorが大きい傾向があり、 d/w と一見逆方

向の傾向のように見える。しかし、右図中に左図中のa-bに対応する方向性を示したとおり、同じd/wでwを上げる方向は実は、共振周波数方向には高い方向に移動しており、このときloss factorは下がっておらず、矛盾しない。

以上の傾向が得られるメカニズムとしては以下のように考えられる。まず、共振周波数付近にピークを持つ理由であるが、膜振動における1次の共振周波数の状態は曲げモードの半波長がちょうど柱と柱の幅(単位幅)が合致するがために起こる現象であって、いわば共振周波数付近のエネルギーは振動膜により閉じ込められやすい条件を満たしている。ここで、d/wが大きいほどloss factorが高くなる理由であるが、これはd/wが大きいほど柱構造の剛性に対する膜の曲げ剛性が高くなり、メンブレン構造がより変形しにくくなるためと考えられる。入力されたy方向の力が柱の剛性に負けて曲げ方向の変形に使われることなく、より柱のy方向の圧縮膨張の縦波エネルギーへと変換されやすくなると解釈できる。逆にd/wが小さい場合、共振周波数付近においてはメンブレン構造の剛性が柱構造の剛性に負け大きく変形するため、よりエネルギーの閉じ込めが起こる。d/wを高くし、剛性が高まることは当然ながら共振周波数が高い方向に移動するため、共振周波数が高いほどloss factorが大きくなる。しかし、同じ共振周波数であっても、柱幅wが小さいほどloss factorが大きくなる傾向が見られた。これはwが小さいほど同じ共振周波数となるために振動膜の質量は小さくなるためと考えられる。機械振動論から導出されるように、振動子のQ値はバネ剛性と質量の比の平方根に比例し、共振系においてはバネと質量でエネルギーの交換が行われる。従って、同じ共振周波数であっても、より軽い構造の方がloss factorが大きくなると考えられる。

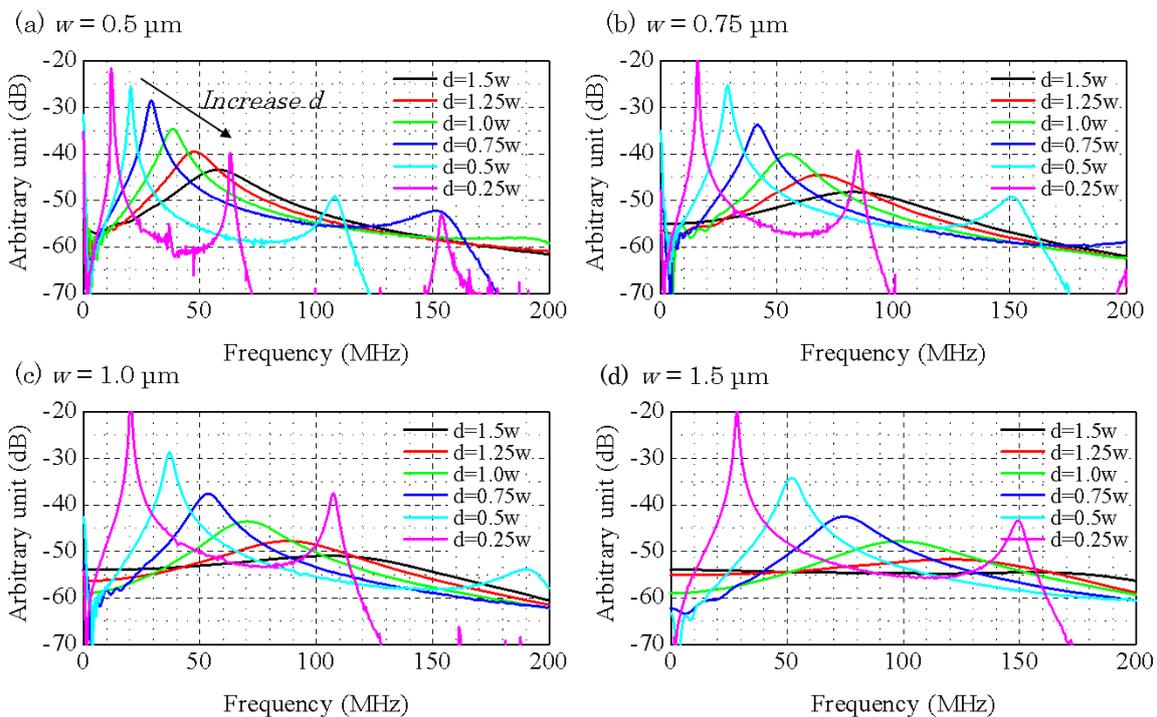


図 1. 1. 1. 8 点 A における変位速度の周波数解析

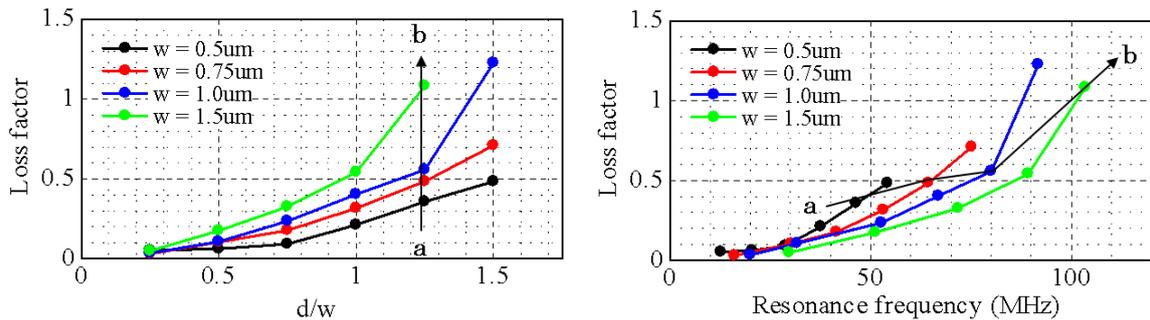


図 1.1.1.9 Loss factor 解析, 左図: d/w 依存性, 右図:共振周波数依存性

以上の原理は図1.1.1.10に示したような等価回路的に考えると理解しやすい。図においてメンブレンの質量をコイル、剛性をコンデンサ、柱構造を伝送路として示している。メンブレンのバネと質量はLCの直接の共振系を作り、メンブレンと柱構造部が結合しておりエネルギー分配を行うため並列に分岐することになる。メンブレン構造と接合部共振状態とはコイルとコンデンサでエネルギーをやり取りする現象である。機械系の質量はコイルのインダクタンスLに比例し、バネ定数kはコンデンサの静電容量Cに反比例する。従って、よりエネルギーを柱構造側に伝達するには、Lを小さく、すなわちメンブレンの質量mを小さくしてインピーダンスを小さくするほどよい。また、メンブレン構造のバネ部にエネルギーをため込まないためには、静電容量Cを小さく、すなわちバネ定数kを大きくすることが重要となる。このことは図1.1.1.8および図1.1.1.9の結果とも整合する。共振周波数を高くかつメンブレンの質量をより軽くする設計としては、単位幅Lをより小さくすることでも可能となる。この方向性はメンブレンの剛性を高めることにもなる。

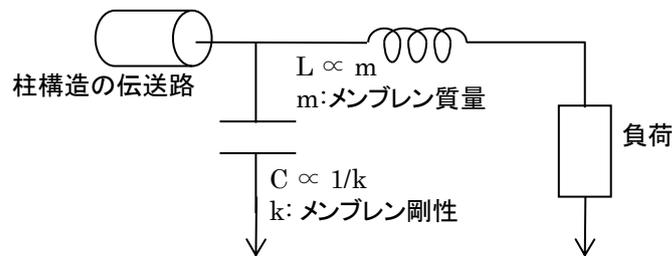


図 1.1.1.10 MUT 型整合層の等価回路モデル

また、音響整合させたい所望の帯域を想定したとき、図1.1.1.8の解析結果から、対象周波数帯域より共振周波数を高くすることが望ましいと言える。

以上、整理すると、音響伝搬の観点からはMUT型音響整合デバイスの設計指針としては以下の方向性が示唆された。

- <1>d/w を高くする。
- <2>共振周波数を対象帯域より高くする。
- <3><1><2>を満たした上で、よりメンブレン部の剛性を高く、質量を小さくする構造とする(単位幅Lを小さくするなど)

(d) MUT型音響インピーダンス整合層の基本構造の整合特性

得られた設計指針に基づき図1.1.1.3に示したMUT型音響インピーダンス整合層の基本構造(非アクティブ)のデバイス設計を行い、従来技術である $1/4\lambda$ 整合層と整合特性に関する比較を行った。図1.1.1.11に設計モデル(以降デバイスと称す)を示す。デバイスの上部側の負荷を水とし、デバイス下部側をSiと同じ固有音響インピーダンスを有する圧電材料を想定している。水からデバイス下部側のバルクSiに到達する音波の透過特性を計算した。図1.1.1.11に示したように、柱構造部は下部面に接する固有音響インピーダンスに応じて、徐々に(線形に)柱構造の幅を増加させる。ここでは、下部側負荷はSiと同じであるため、 w_2 は単位幅 L と一致する。

シミュレーションおよび解析の手順は次の通りである。はじめに水負荷に上述(b)と同様のインパルス状の圧力波を入力する。圧力波がデバイスのメムブレン構造部に到達すると、一部のエネルギーはメムブレン構造、柱構造へと伝搬し、最終的に下部のバルクSi層まで到達する。また一部のエネルギーはメムブレン構造や柱構造の途中や端部で反射し、水負荷側へと戻る。本検討においては、デバイスの音響インピーダンス整合性能を評価する方法として、入力波および下部側(バルクSi層)への透過波をそれぞれ周波数スペクトラムに変換し、周波数空間上で入力に対する透過波の割合を算出する。これを透過率として性能の指標とする。構造設計パラメータを表1.1.1.4に示す。単位幅 L は2.2節のモデルと同じ $10\mu\text{m}$ 、上部側の柱構造幅 w_1 は水負荷を想定した場合の理論的な最適値を式(2)より求め $0.743\mu\text{m}$ とした。ここで、水およびSiの固有音響インピーダンスはそれぞれ 1.5MRayls 、 20.2MRayls としている。メムブレン構造厚さ d は事前の検討によりメムブレン構造の共振周波数が注目する周波数帯域である 10MHz 付近より十分高くなるよう $1.5\mu\text{m}$ とした。長さ h の依存性については、Siの音速から 10MHz の波長である $870\mu\text{m}$ とした。メムブレン構造の共振周波数(f_{res})を求めたところ、 113.8MHz (基本波モード)であった。

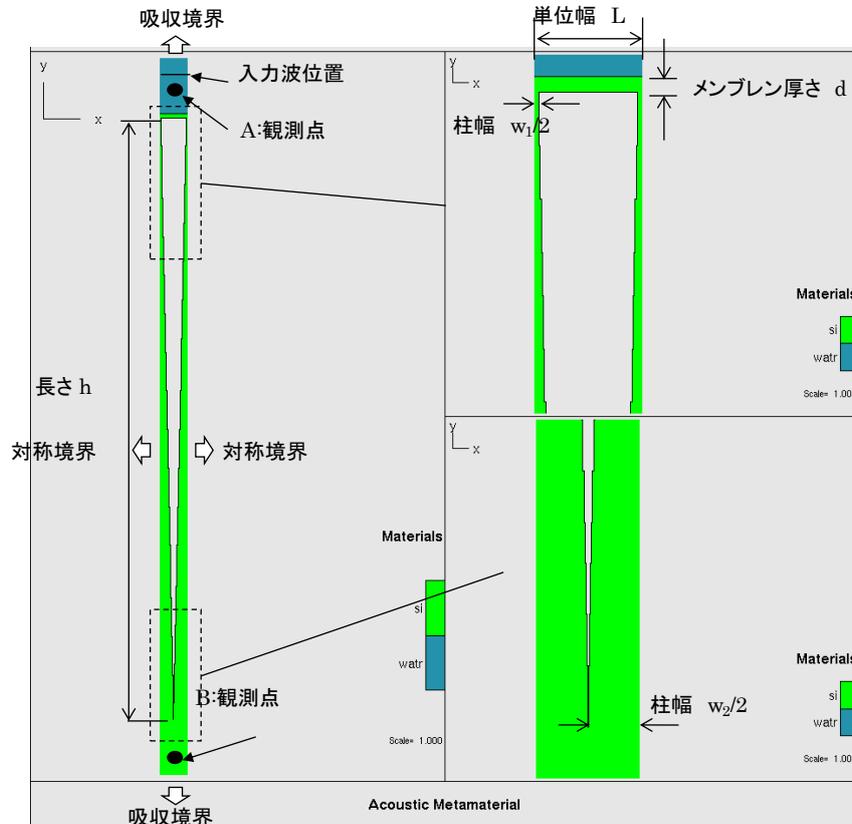


図 1.1.1.11 MUT 型音響インピーダンス整合層のシミュレーションモデル

表 1.1.1.4 MUT 型音響インピーダンス整合層の構造設計パラメータ

Design parameter	Value [Unit]
L	10 [μm]
h	870 [μm]
w	0.743 [μm]
d	1.5 [μm]
z_0 (Silicon)	20.2 [MRayl]
z_1 (Water)	1.5 [MRayl]
fres	113.8 [MHz]

次に、図1.1.1.12に示すような従来の1/4 λ 整合層方式1層モデルと2層モデルを作成し(10MHz共振)、透過特性をMUT型音響インピーダンス整合デバイスと比較した。従来整合層方式においては、各整合層の固有音響インピーダンスを理論的に最適な値とした。ここでの最適値とは、材料減衰が無く、接着層が無く、さらに理論的に求まる最適な固有音響インピーダンスとなる仮想的な材料を用いることである。これは原理的に提案構造が音響インピーダンス整合性能の点で優れているかどうかを確認するためである。最適な固有音響インピーダンス設計はいくつかの手法が存在するが、ここでは Desilets[7]の方式を採用した。表1.1.1.5に整合層の物理パラメータを示す。

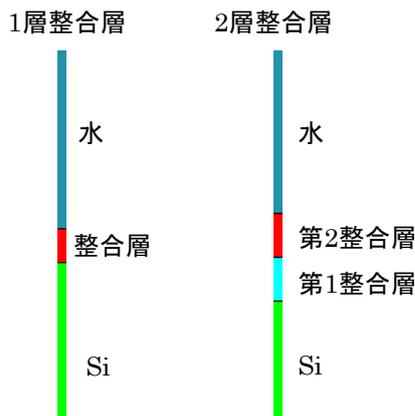


図 1.1.1.12 1/4 λ 整合層モデル

表 1.1.1.5 1/4 λ 整合層モデルの材料定数

パラメータ	1層構造 第1 ML	2層構造 第1 ML	2層構造 第2 ML
c [m/s]	1500	1500	1500
ρ [kg/m ³]	2380	1447	4420
z [MRayl]	3.57	2.17	6.63

ML: Matching layer (整合層)

図1.1.1.13に設計したMUT型音響インピーダンス整合デバイスと従来1/4λ整合層の透過特性（1が全透過）を示す。ここで、透過率の算出にあたっては、水からシリコンに音波が伝搬することで、同じエネルギーであっても固有音響インピーダンスの差によりシリコン内での音圧振幅が入力波よりみかけ大きくなり得る。そこで、本評価においては水における音圧基準となるよう規格化している。図から分かる通り、提案構造は1/4λ整合層と比較し、透過率が高く広帯域な透過特性であることが確認できる。1/4λ整合層は共振周波数（10MHz）とその奇数整数倍の周波数は透過率が高いが、偶数倍の周波数付近で大きく透過率が落ち込む。2層化により広帯域化はするが、原理的に大幅な広帯域化は難しい。それに対し、本提案によるMUT型音響整合デバイスは、極めて広帯域な音響整合性能が得られている。0.95以上の透過率となるのは8.5MHzから61MHzであった。

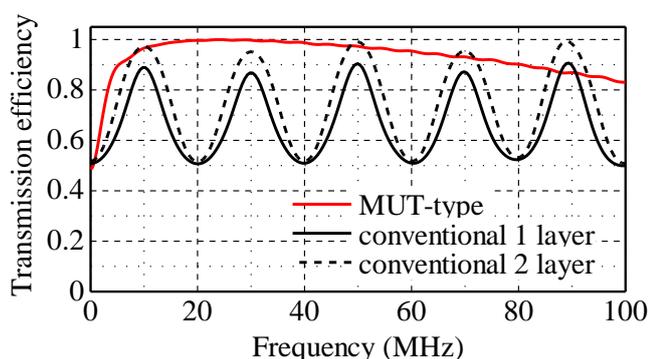


図 1. 1. 1. 13 透過率シミュレーション結果

(e)MUT型音響インピーダンス整合層の簡易アクティブモデルの構築

上述の(d)で検討したMUT型音響インピーダンス整合層の基本構造をベースに、Pull-in ONとOFFを仮想的に模擬した簡易的なアクティブモデルを作成し、その効果を確認した。図1.1.1.14に作成したシミュレーションモデルを示す。本モデルでは図1.1.1.12で示した基本構造の孔（空洞）部に別途柱を立て、Pull-in OFFの場合は、薄膜メンブレンと孔部の柱構造が物理的に離れている状態であり、図1.1.1.12の構造と基本的には同じ状態となる。左右の柱の幅は水負荷を想定した1.5MRaylsに最適なものとなっている。一方、Pull-in ONの場合は、メンブレンと孔部の柱をモデル上で人為的に結合させる。孔部の柱の幅は負荷の上限である10MRaylsに最適なものとなるようにしている。図1.1.1.15に透過率の結果を示す。図からわかる通り、Pull-in OFFを想定したときには1.5MRaylsの透過率が10MRaylsよりも高い状態となり、Pull-in ONを想定したときには1.5MRaylsの透過率は下がり、10MRaylsの方がより低い透過率となることがわかる。目標周波数の5-10MHzの中心である7.5MHzで評価したとき、Pull-in ONとOFF時の変動差は±50%以上となり、マイルストンの目標達成を確認した。平成30年度により詳細なモデル構築と解析を行い、試作に向け設計を行う。

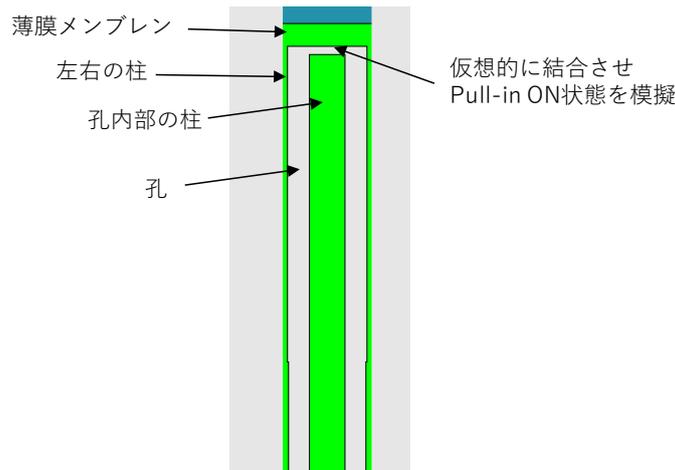


図 1.1.1.14 MUT 型音響インピーダンス整合層の簡易アクティブモデル

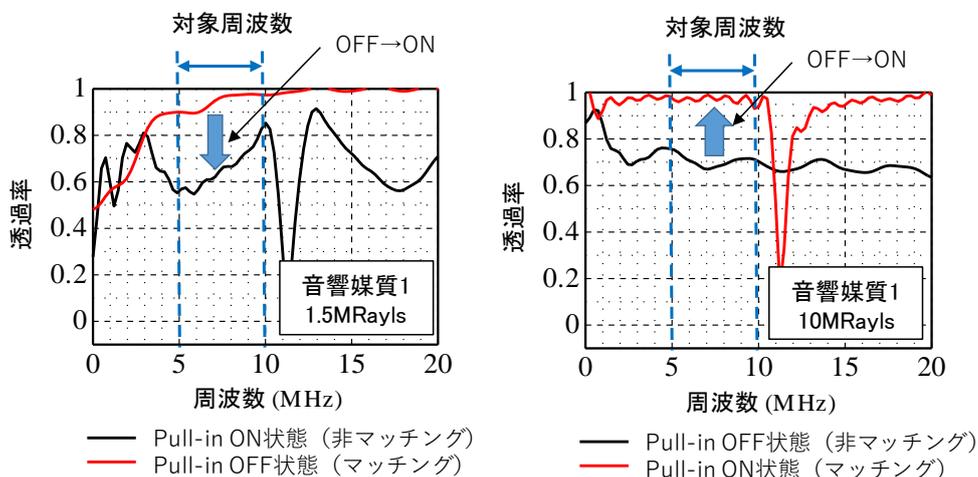


図 1.1.1.15 簡易アクティブモデルにおける Pull-in 前後の透過率計算結果

(左：音響媒質 1 が 1.5 MRayls の場合、右：音響媒質 1 が 10 MRayls の場合)

平成 30 年度成果：

より実的な構造でMUT型音響整合層の評価を行うため、平成29年度に作成したシミュレーションモデルをベースに、MUT特有の空洞構造を有し、Pull-in現象を利用したアクティブ制御可能な詳細シミュレーションモデルを作成した。シミュレーションの結果、平成29年度の設計指針の妥当性を再確認するとともにMUTセル内の音響伝搬過程を把握した（音響伝搬過程については実施項目4で詳述）。本検討プロセスにおいては、Pull-in ONとPull-in OFFのスイッチング制御により、音響整合状態と非整合状態の切り替えが可能であることを副次的に見出した。さらに、電圧印加によるPull-in時の薄膜メンブレンと空洞下部面の接触率と音響整合特性の関係、MUTの破壊電圧以下でPull-in時の接触率50%達成する構造的条件を明らかにした。これらの成果と実施項目2の検討で得られた製造プロセスの知見を踏まえ、平成31年度に試作する構造の設計モデルを構築した。

また、平成30年度は平成29年度の成果と合わせて特許出願、学会発表1件を行った。

(a) 詳細シミュレーションモデルの構築と音響インピーダンス整合特性

平成29年度に作成した概念設計シミュレーションモデル（図1.1.1.4）に対し、今年度は図

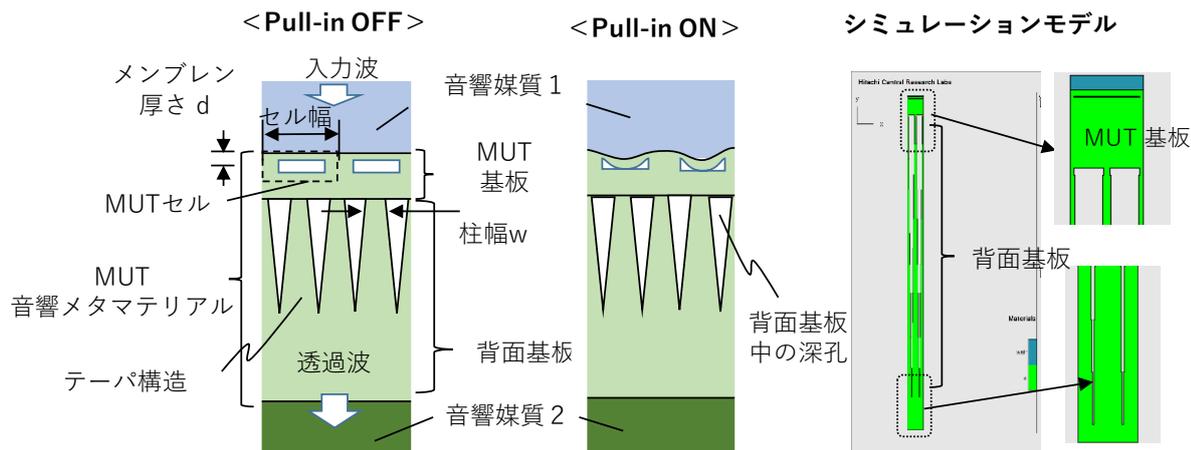


図 1. 1. 16 MUT 型音響インピーダンス整合層のシミュレーションモデル

1. 1. 1. 16に示すようなMUT型音響メタマテリアルの詳細設計シミュレーションモデルを作成した。ここで提案する構造は、空洞部を有するMUTセルを含むMUT基板の下部に図1. 1. 1. 3および図1. 1. 1. 11に示したような音響インピーダンスが徐々に変化するテーパ構造を有する背面基板を結合したものとなっている。本構造では電圧印加によりMUTセル部の薄膜メンブレンをPull-in現象により接触させることで、上部媒質から見た音響インピーダンスを制御することを狙う。

本詳細設計シミュレーションモデルを用いて、アクティブインピーダンス制御性を確認した。その一例を図1. 1. 17に示す。ここでは、平成29年度の理論構築の検討で示した式(2)に従い音響媒質1が水である場合に最適化した構造となっている。図1. 1. 1. 17において、横軸が周波数、縦軸は入力波に対するデバイス下部側まで透過した音波の割合を示しており、音響インピーダンス整合性の指標となる(値が1で透過率(Transmission efficiency)100%であり、音響インピーダンスが完全にマッチングした状態を表す)。図にはモデル上部に設置した音響媒質1の固有音響インピーダンスが1.5MRayls(水)の場合と、10MRaylsの場合を示す。本シミュレーションでは、1.5MRaylsに最適な設計パラメータとしている。具体的には、下部基板の上部側の柱幅を最適な値としている。図よりメンブレンのPull-in off状態(メンブレンが空洞下部面に接触していない状態)では、10-15MHzの共振周波数を中心に透過率が極めて低く、音波はほとんど全反射状態(音響インピーダンスミスマッチ)となっている。一方、メンブレンがPull-in ON状態になると音波の透過率が大きく向上し、音響インピーダンスマッチング状態になっていると判断できる。また狙い通り1.5MRaylsの負荷に対して最適化した場合により高い透過率を示した。10MRaylsの場合には、Pull-inで透過率が向上するものの1.5MRayls負荷時よりは小さい透過率となり、提案構造の設計妥当性が示された(柱幅と透過率の詳細な関係については本実施項目(c)にて後述)。また透過率の周波数特性を決定するメカニズムについては、その構造と音響伝搬特性の関係性を明らかにした((実施項目4)にて報告)。

(b) 設計指針の再評価

平成29年度の検討において、MUT型音響メタマテリアルの透過効率を向上するためには、(1)柱幅に対するメンブレン厚さをより大きくする、(2)メンブレンの共振周波数をより高くするという設計指針を得た。そこで、あらためて上述(a)で示した詳細モデルシミュレーションにより、平成29年度と同様の解析を行い、設計指針の妥当性を検証した。その結果、パラメータの傾向が示す限界点はあるものの、平成29年度に得られた設計指針同様に(1)「MUT基板と背面基板との接合部におけるリム幅」に対する「メンブレン厚さ」をより大きくすること、および(2)「メンブレンの共振周波数」をより高くすることにより、高い透過効率が得られることを確認した。

図1. 1. 1. 18に解析結果を示す。解析方法は図中(a)に示した周波数領域における透過率

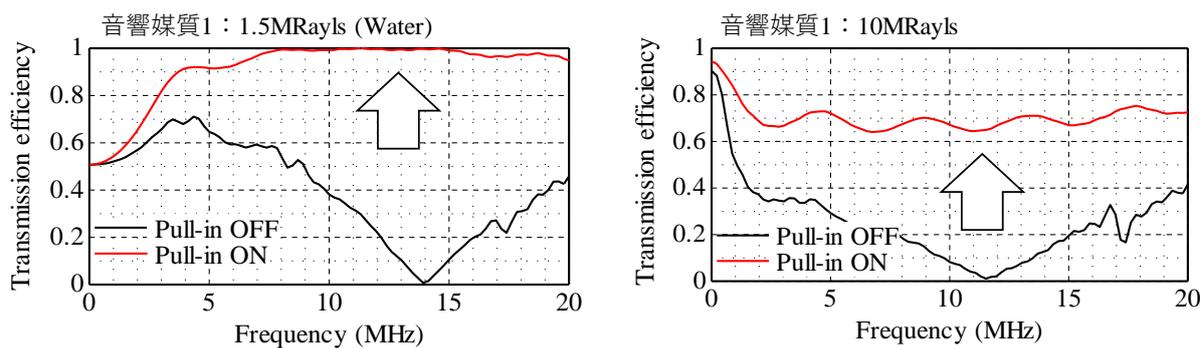


図 1. 1. 1. 17 MUT 型音響インピーダンス整合層のシミュレーション結果の一例
 左：音響負荷が 1.5MRayls の場合 右：音響負荷が 10MRayls の場合

(Transmission efficiency: TE)と帯域幅B (-3dB位置) の積(TEB)を指標として、「膜厚 d /柱幅 w 」と「共振周波数」をパラメータに評価した(図中(b)および(c))。図よりわかる通り、各パラメータに対して、TEBの増加傾向が見られた。しかし、ある一定値に到達すると、逆にTEBは下がり始めることが明らかになった。これは、膜厚が厚くなると、同時に共振周波数も増加するが、そのとき波長に対して膜厚方向の振動が無視できず、効率的に柱へエネルギーの伝達が行われなくなるものと考えられる。考案したMUT型音響メタ材料の構造に依存する音波の反射や減衰が特性にどのように透過効率に影響を及ぼすかについては、課題4(実施項目4)にてまとめて説明する。以上、設計指針の妥当性を再確認するとともに、さらに構造パラメータにおける限界値についても把握した。

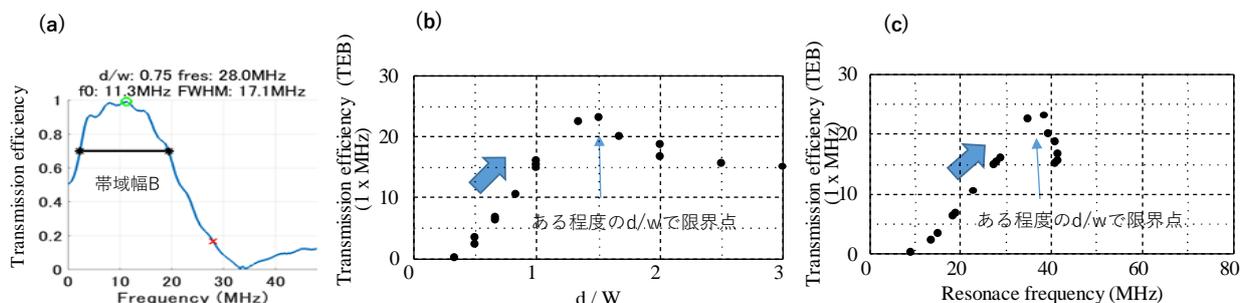


図 1. 1. 1. 18 シミュレーションによる解析結果：(a)詳細モデルシミュレーションモデルによる透過率の計算例、(b) d/W に対する透過効率、(c) 共振周波数に対する透過効率

(c) Pull-in時の接触面積と音響インピーダンス整合性の関係および設計解

詳細設計シミュレーションモデルを用いて、Pull-in時の膜厚の空洞幅(Gap width ここでは $40\mu\text{m}$)に対する接触幅(Contact ratio)を変え、透過率(インピーダンス整合性)との比較により、接触率と透過率との相関性を解析した。図1.1.1.19の(a)に接触率の定義、(b)に解析結果を示す。解析の結果、接触率が20%以上になると、接触率を変えても透過率の変化量は極めて小さく、接触率と透過率の相関は低いことがわかった。そこで、さらに解析を追加し、図中(c)に示すように、柱幅と透過率の関係性を調べた。音響負荷は1.5MRayls(水)と10MRaylsの2種類について実施した。その結

果、両者の相関性が高いことが明らかとなった。本シミュレーションによる設計値では、1.5MRaylsと10MRaylsに対する柱幅の最適値はそれぞれ約1.5 μm および約10 μm である。シミュレーションでも同様の結果が得られた。つまり、透過率を理想的にするためには、対象負荷に対して柱幅を最適に設計する必要がある。本結果を踏まえ、音響インピーダンスの可変制御として次の二つの方式を考案した。

方式1：デバイスの中に多数存在する全てのMUTセルの接触率を同様に変えるのではなく、Pull-inさせるセル（音響インピーダンスを大きくする場合）とPull-inさせないセル（音響インピーダンスを小さくする場合）の割合を変えることで、下部面に接触するメンブレンの量を変え、平均的に最適な音響インピーダンスとする（図1.1.1.20参照）

方式2：リム幅を1.5 μm ~10 μm の間に設計することで（図1.1.1.19(c)では4 μm ）、すべてのMUTセルをPull-inした状態で1.5~10MRaylsの負荷に対して幅広く高い透過効率となる構造を実現する。Pull-inさせない状態は音波を全反射させることも可能となり、MUT型音響メタマテリアルの新たな活用の可能性を広げるものである。本構造を活用した将来構想については1.3の「研究課題の発展性」で論じたい。

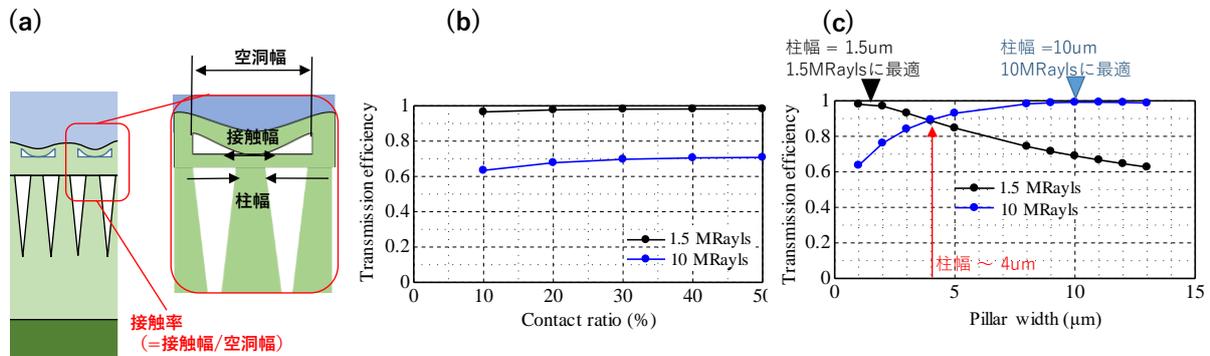


図 1.1.1.19 シミュレーションによる解析結果：(a)詳細モデルシミュレーションモデルにおける接触率の定義，(b)透過率の接触率依存性，(c)透過率の柱幅依存性（負荷 1.5MRayls および 10MRayls）共振周波数に対する透過効率

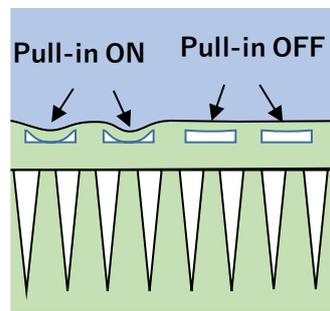
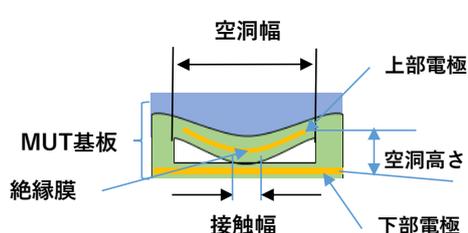


図 1.1.1.20 インピーダンス可変制御方式 1

(d) Pull-in時の接触面積率50%を実現する構造パラメータの探索

詳細設計シミュレーションモデルを用いて、MUT型音響メタマテリアルの破壊電圧以下において、本実施項目におけるマイルストーンの一つであるPull-in時の接触面積率50%を実現する構造パラメー

タの探索を完了した。図1.1.1.21に解析に用いたMUT構造，表1.1.1.6に構造パラメータを示す。上部および下部電極に電圧を印加し，メンブレンの下部面への接触以降の電圧および接触率（幅）を算出する。MUT構造における印加可能な電圧は，絶縁膜の破壊強度である約400 V/ μm から決まる。この限界電圧に達したときの接触率と各種構造パラメータとの関係を図1.1.1.22に示す。図にはMUTセルの形状が矩形の場合と円形の場合の2種類について示した。図より，マイルストンの接触率50%以上を実現する設計解が存在することを確認した。また，空洞幅が広がるほど，メンブレン厚さが薄いほど，また空洞高さが小さいほど接触率が高くなる傾向を得た。一方，MUTセルの形状による有意な差は認められなかった。本結果を踏まえ，（実施項目2）で実施する試作設計における設計の方向性を明確にした。一方，上述の(c)の検討により，音響インピーダンス整合においては，接触面積率50%は必須実効ではないことが明らかとなった。したがって，（実施項目2）で実施する試作設計および（実施項目5）で実施する試作品による検証においては，接触率50%で拘束せず，インピーダンス整合に最適な設計および検証条件とした。



■破壊電圧の定義

（実施項目2）で検討中の製造プロセスにおいて用いる予定の上下電極間の絶縁膜の破壊電界強度は物性値として400V/ μm であることが分かっている。そこで，上下電極に電圧を印加しPull-inした状態において，上下電極間の電界強度を算出する。電界強度が400V/ μm を超えたときの印加電圧を破壊電圧と定義する。

■接触率の定義

MUT基板内の電極に電圧を印加しPull-inさせる。さらに電圧を印加し続け，定義した破壊電圧に到達した時点の接触幅を計測し，接触率（接触幅/空洞幅）を算出する。

図 1.1.1.21 接触率と破壊電圧の関係の解析モデルと定義

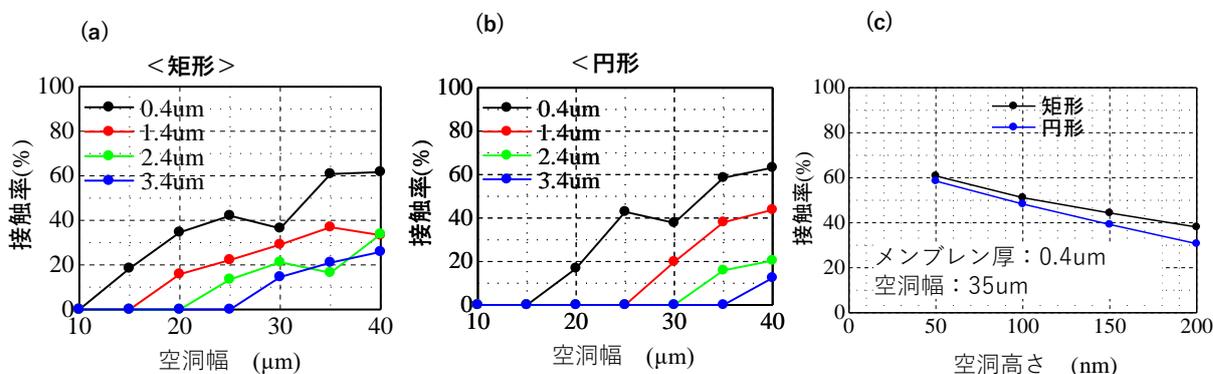


図 1.1.1.22 破壊電圧時の接触率と構造パラメータの関係：(a)矩形セルの空洞幅と薄膜メンブレン厚さ依存性，(b)円形セルの空洞幅と薄膜メンブレン厚さ依存性，(c)空洞高さ依存性

表 1.1.1.6 Pull-in 時における電圧および接触率調査シミュレーションの設計パラメータ.

設計パラメータ	値 [単位]
MUT セル形状	矩形, 円形
メンブレン厚さ d	0.4, 1.4, 2.4, 3.4 [μm]
空洞幅 L	10, 15, 20, 25, 35, 40 [μm]
空洞高さ hg	50, 100, 150, 200 [μm]

(e)平成31年度（令和元年度）試作用チップの設計

（実施項目2）で構築する高精度空洞形成プロセス条件や（実施項目3）で決定する材料条件なども加味し、平成31年度（令和元年度）実施予定の1次試作の設計値を設定した。設計するにあたり、MUT部に関しては、図1.1.1.23に示すように製造プロセスで用いる材料定数、仕上がり形状を加味した構造を模擬し、より詳細な構造を反映した試作設計用シミュレーションモデルを作成した。シミュレーションモデルは矩形および円形の二つのモデルで構築した。MUT部以下のテーパ構造リム部を含む背面基板部に関してはSi材料のみの構造体を想定しており、これまでに作成した詳細シミュレーションモデルにて解析可能である。

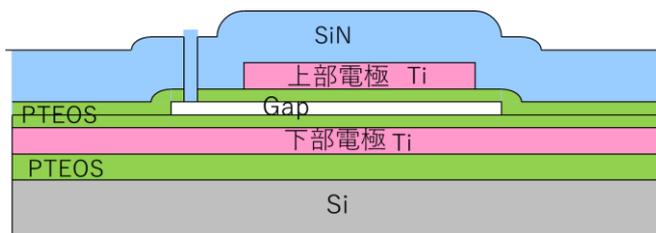


図 1.1.23 試作設計用シミュレーションモデル

作成した試作設計用シミュレーションモデルを用いて、MUT部の基本特性としてPull-in電圧および共振周波数を解析した。設計パラメータとしては空洞(Gap)厚、空洞(Gap)幅、薄膜メンブレン膜厚がある。このうち、空洞(Gap)厚に関しては、上述(d)の検討により50nmが最も低い電圧で駆動できることが分かっていることから50nm固定とした。空洞幅に関しても(d)の検討により幅の広い方がPull-in電圧が低いことが分かっていたため、(d)で調査した最大幅40 μ mを下限として60 μ mまでを調査対象とした。メンブレン厚さに関しては、上部電極上部のSiNの厚さで制御することとするが、プロセスの制限から1.3 μ mが最小となり、また過去の実績を加味して5 μ m厚までを上限として設定した。図1.1.1.24に解析結果を示す。Pull-in電圧に対しては、絶縁膜(図1.1.1.23のPTEOS)中の電界強度(上限：破壊電界強度 $E = 400\text{V}/\mu\text{m}$)を併記した。矩形モデルにおいては、探索した範囲において破壊電界に至る結果とはならなかった。一方、円形モデルにおいては、メンブレン厚が5 μ mのときの空洞幅40~50 μ mで破壊電界に達するため、使用不可となることを確認したため、この範囲における設計は不適となる。

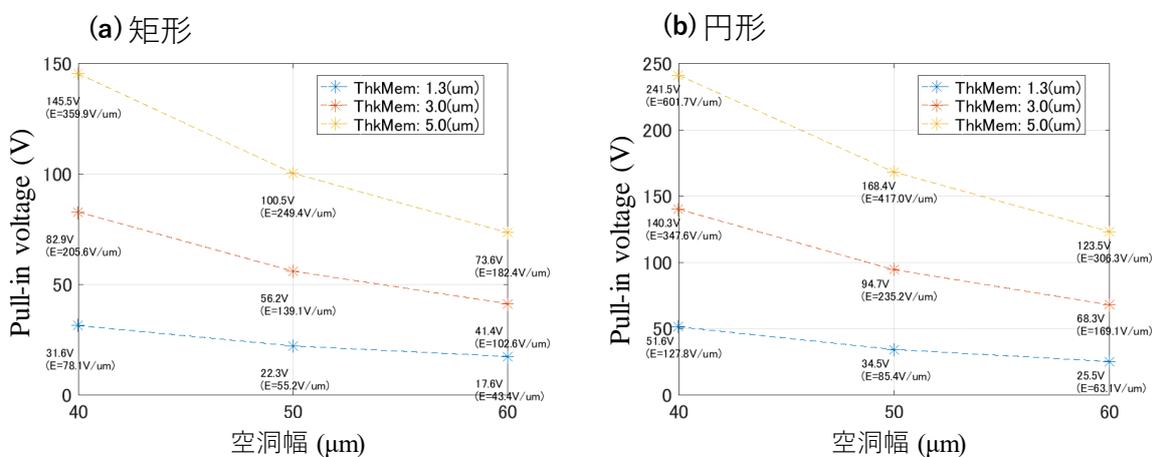


図 1.1.1.24 試作設計シミュレーションモデルによる Pull-in 電圧：

(a)矩形モデル、(b)円形モデル

次に、Pull-in後の共振周波数について検討した結果を示す。設計指針として明らかにしたように、共振周波数が高いほど透過率が高い。しかし、図1.1.1.18に示したように、約40MHz以上で透過率が高止まりすることが明らかとなっているため、基準値を40MHz付近と設定する。図1.1.1.25には矩形モデルおよび円形モデルそれぞれについて、Pull-in ON/OFF時の共振周波数を示す。尚、Pull-in ON時の絶縁膜の電界強度は破壊電界である400V/um以下となるよう設定している。図(b)に示すように矩形モデルについては、探索したパラメータ範囲において40MHzを超えることが分かった。円形については、膜厚が5um未満では、十分40MHzを下回るパラメータがあり、また全体的に基準値以上のマージンはないため、3um以下が望ましいと判断した。以上を鑑み、MUT部の設計においてはある程度広い範囲に設計解が存在する。そこで、可能な限り複数段階の設計値の試作を行い評価する方針とした。

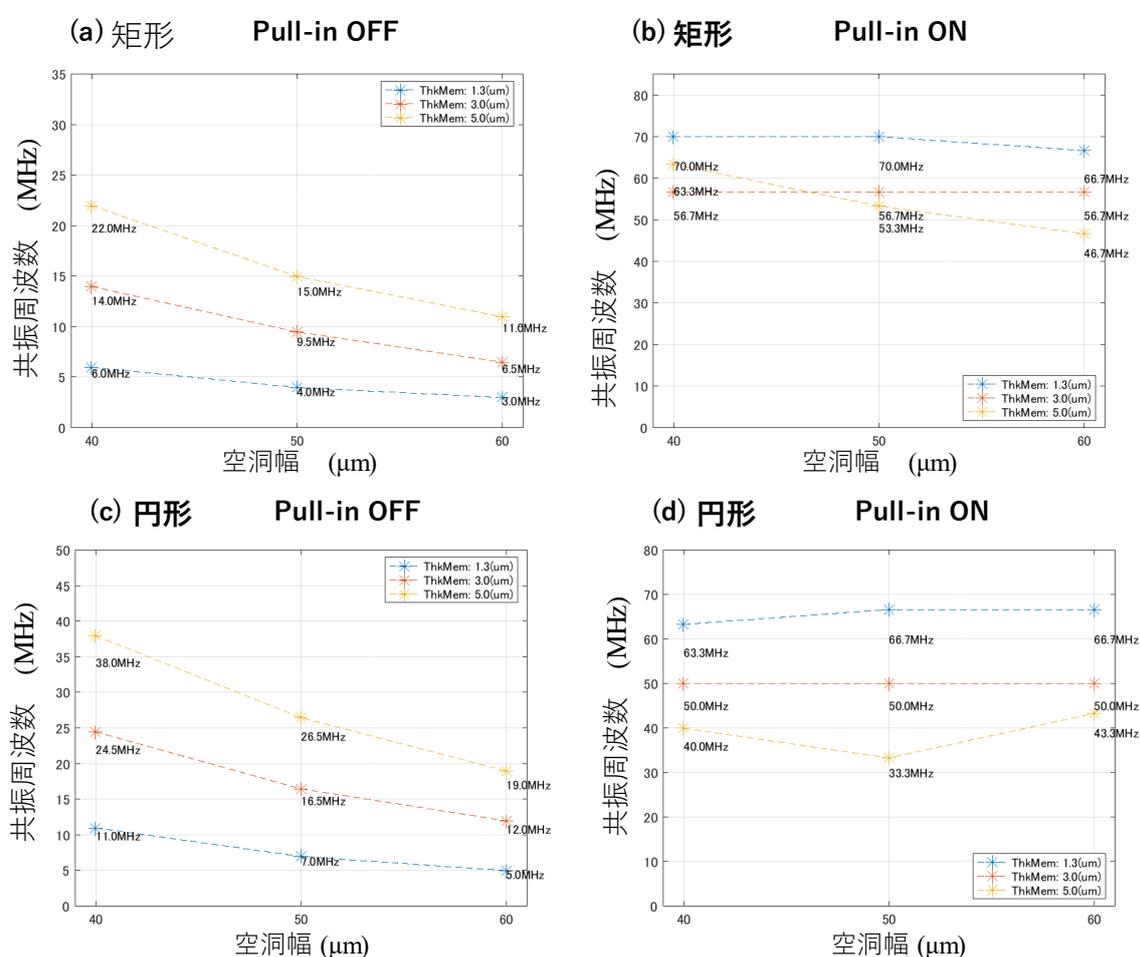


図 1.1.1.25 試作設計シミュレーションモデルによる共振周波数：
 (a) 矩形モデル Pull-in OFF, (b) 矩形モデル Pull-in ON (破壊電界以下),
 (c) 円形モデル Pull-in OFF, (d) 円形モデル Pull-in ON (破壊電界以下)

図1.1.1.16に示したMUTセル下の基板厚およびテーパ構造をした柱部の長さについては、(実施項目4)で示すが、それぞれ透過率の周波数特性に影響を及ぼすことを明らかとしている。その結果も踏まえ、表1.1.1.7に示すように1次試作設計値を設定した。最終値に関しては平成30年度の(実施項目2)の検討も踏まえ、平成31年度に確定させることとした。

表 1.1.1.7 MUT型音響メタマテリアル一次試作設計値.

設計パラメータ	値
空洞高さ	50 nm
空洞幅	矩形：40-50 μ m 円形：40-60 μ m
メンブレン厚(最上部のPSiN厚)	矩形：1.3-5 μ m 円形：1.3-3 μ m
MUT下部基板厚さ	< 10 μ m
柱長さ	> 652 μ m

平成31年度成果：

平成31年度については、後述の2章との重複を避けるため、端的に結果と結論を述べる。詳細については2章を参照されたい。

平成31年度は、平成30年度の(実施項目2)で構築した製造プロセス及び平成30年度の(実施項目3)で選定された材料・方式を反映し、(実施項目2)で試作する「MUT型音響メタマテリアル」の詳細設計を行った。また、原理確認用に試作する「簡易型音響メタマテリアル」の最適設計を行った。

また、平成31年度は前年度までの成果を含めて、学会発表1件、展示会発表1件、論文投稿2件(掲載決定)を行った。さらに、平成31年度の実験的評価結果もふまえて新たに学会発表と論文投稿を行う予定である。

試作品詳細設計

シミュレーションによる試作品詳細設計とその性能評価を行った。試作品設計ではMUTセルの形状が矩形のもの2種、円形のもの2種の設計を行った。その結果、目標性能(負荷の音響インピーダンスが1.5~10MRaylsかつ周波数5~10MHzの範囲において透過率が高い)を満たす設計を完了し、(実施項目2)の試作設計に反映した。シミュレーションモデルおよび結果の1例を図1.1.1.26および図1.1.1.27に示す。評価帯域である5 - 10MHzにおいて、Pull-in ON, OFF制御により、透過率をアクティブに制御できることを確認した。パラメータ解析の結果、最適な構造を決定し、(実施項目5)の試作に反映した。また、目標の一つである、Pull-in ON時の接触率50%実現を確認した。さらに、事前の原理確認用に「簡易型音響メタマテリアル」の最適設計を行い、(実施項目2)の試作設計に反映した。図1.1.1.28にシミュレーションモデルを示す。簡易型ではMUT部の空洞がなく、平成29年度に実施したモデル(図1.1.1.11)と基本的には同様の構造で、アクティブな制御はできないが、基本構造の妥当性検証が可能となっている。

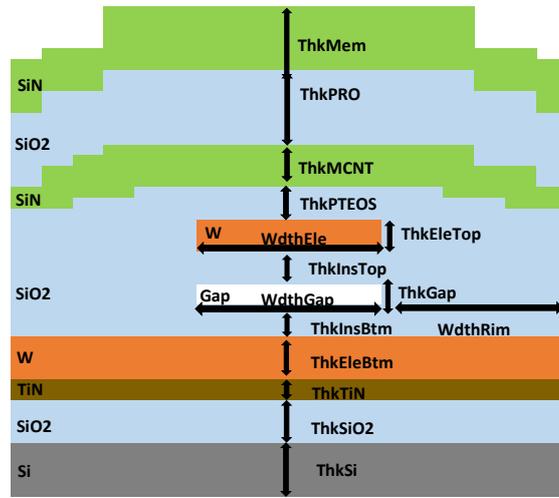


図 1.1.1.26 試作品詳細設計のシミュレーションモデル (MUT 部)

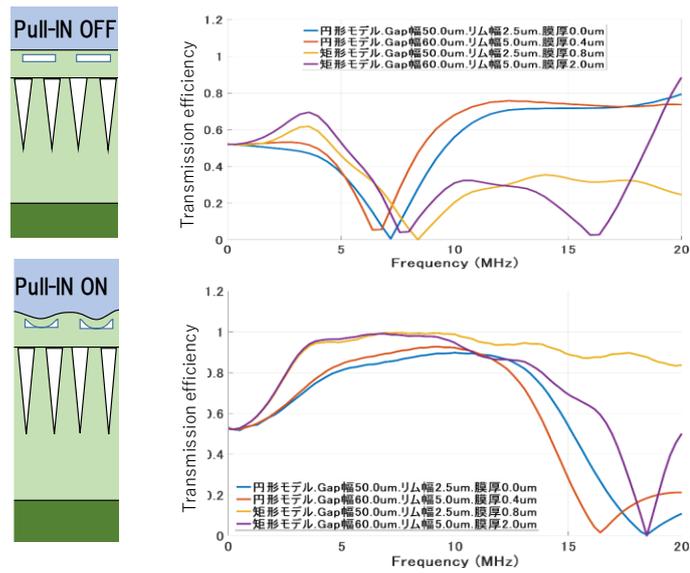


図 1.1.1.27 試作品詳細設計のシミュレーション結果 (一部抜粋)

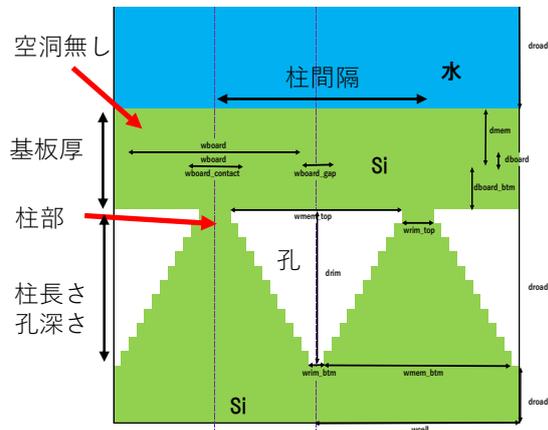


図 1.1.1.28 簡易型音響メタマテリアルのシミュレーションモデル

(3) 達成度

要素課題 1 に対する実施項目 1 の達成度は以下の通り。

年度	実施内容	マイルストーン/目標	達成度
H29	<ul style="list-style-type: none"> ・ MUTの基礎理論構築 ・ MUTの概念設計シミュレーション ・ 音響伝搬特性に対する構造設計パラメータ依存性評価による設計指針の策定 ・ MUT型音響インピーダンス整合層の基本構造の整合特性 	マイルストーン：等価回路モデル構築とMUT基本構造モデル構築 目標：Pull-in前後の特定周波数の音波透過率：50%変動	100%
H30	<ul style="list-style-type: none"> ・ 詳細シミュレーションモデルの構築と音響インピーダンス整合特性 ・ 設計指針の再評価 ・ Pull-in時の接触面積と音響インピーダンス整合性の関係および設計解 ・ Pull-in時の接触面積率50%を実現する構造パラメータの探索 ・ 平成31年度（令和元年度）試作用チップの設計 	マイルストーン：試作デバイス設計完了 目標：Pull-in時の接触面積率：最大50%	100%
H31	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試作品詳細設計（簡易型音響メタマテリアル，MUT型音響メタマテリアル） 	マイルストーン：設計完了	100%

②要素課題 2

(1) 課題

Pull-in現象による薄膜メンブレンの空洞下部面への接触面積は、MUTセルの空洞高さに依存する。従って、空洞高さが設計値から外れた場合、所望の接触面積とはならず、音響インピーダンスの制御性が低下する。実際にMUT型音響メタマテリアルを試作した場合、薄膜メンブレンは内部応力により歪み、MUTセルの空洞高さが設計値から変化する。内部応力は各種製造プロセスパラメータやMUT型音響メタマテリアルを構成する材料強度と複雑な関係性を持ち、製造プロセスの変動によって大きく変わるため、所望の内部応力を持つ薄膜メンブレンを作製することが困難である。従って、設計値どおりの内部応力となるような薄膜メンブレンを一定面積にわたり均一に製造するプロセス制御技術の確立が課題となる。

(2) 実施項目 2 : MUTセルにおける空洞高さの高精度制御

上記の要素課題 2 を解決するために、(実施項目 2) では以下の検討を行った。

平成 29 年度成果 :

薄膜メンブレンを構成する薄膜の内部応力は、薄膜を形成した単結晶シリコン基板の反り量を測定することにより算出できるため、まず薄膜を形成する際のガス圧力、ガス流量、成膜温度などを成膜パラメータとして、内部応力が設計値を中心として安定化する成膜パラメータを抽出した。得られた結果は、(実施項目 1) に反映した。

(a) 薄膜メンブレンの薄膜単体応力の成膜パラメータ依存性取得

薄膜メンブレンを構成する絶縁膜であるシリコン窒化膜(SiN)、シリコン酸化膜(SiO₂)と、電極(A)の成膜パラメータ(表1.1.2.1)と各薄膜の内部応力値の感度解析を行い、薄膜内部応力が安定する成膜パラメータを抽出した(図1.1.2.1)。

表 1.1.2.1 薄膜内部応力の感度解析に用いた成膜パラメータ

膜種		成膜パラメータ			
絶縁膜	SiN	ガス圧力	放電パワー	成膜ガス組成	—
	SiO ₂	ガス圧力	放電パワー	成膜ガス組成	放電電極間距離
電極	A(非公開)	ガス流量	放電パワー	成膜温度	—

注) 絶縁膜 SiN, SiO₂, 電極 A(非公開)は医療用静電容量型 MUT で実績の有る材料を選択

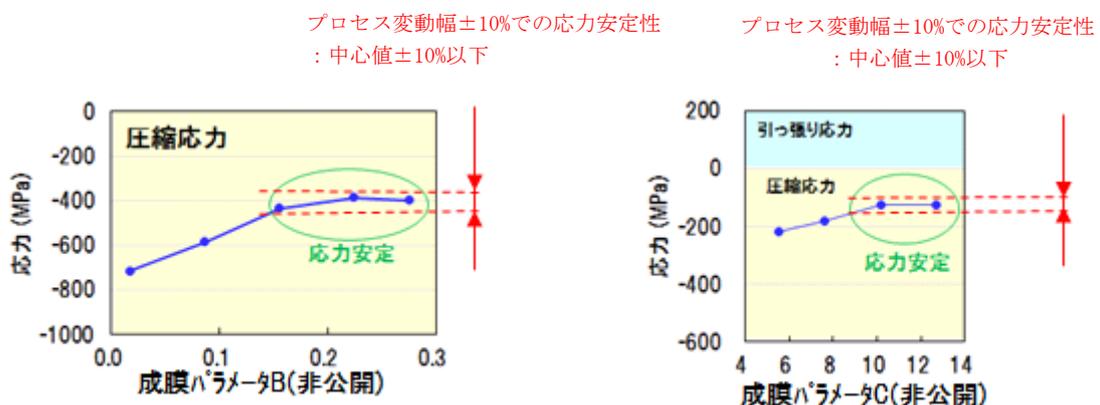


図 1.1.2.1 薄膜メンブレンの薄膜単体応力の成膜パラメータ依存性取得結果 (パラメータ変動幅±10%で応力が安定する領域あり)

(b) 成膜パラメータDにおける応力安定性確認

(a)の試験の結果、パラメータDにて応力が大きく変化することが判明した(図1.1.2.2)。そこで、成膜装置のパラメータ制御性確認のため、図2.6の成膜パラメータDの値が0.25, 0.5の成膜条件において、シリコンウェハ上に10枚連続して成膜した場合の応力データを取得した(図1.1.2.3)。その結果、連続して成膜した膜の内部応力は平均値に対して±10%以下の変動に抑制されており、成膜装置は成膜パラメータDを安定して制御できることを確認した。これにより、内部応力が大きく変化するパラメータにおいても、成膜条件を固定すれば薄膜の内部応力を安定して成膜できることを確認した。

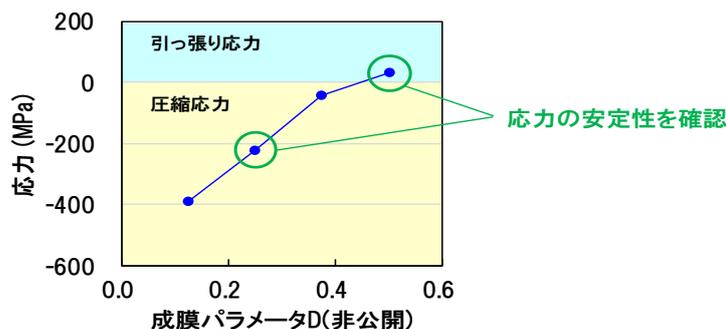


図 1.1.2.2 薄膜メンブレンの薄膜単体応力の成膜パラメータ依存性取得結果
(パラメータ変動幅±10%で応力が安定する領域なし)

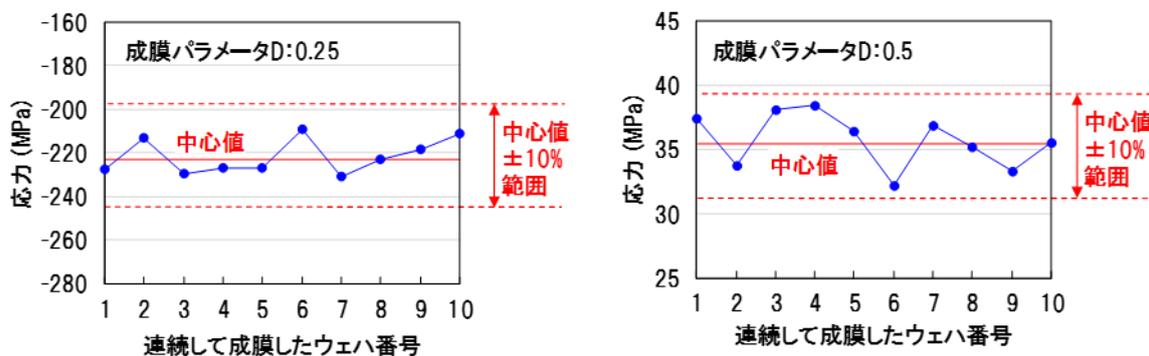


図 1.1.2.3 成膜パラメータ D における応力安定性確認結果

平成30年度成果：

平成29年度の抽出した成膜パラメータで形成する薄膜を導入し、(実施項目1)の詳細設計を反映した簡易なMUTセルを試作し、空洞上下に設けた電極間の静電容量を測定した。電極間の静電容量から空洞高さを算出することにより、試作したMUT型音響メタマテリアルのMUTセルの空洞高さの設計値に対する変動幅を評価した。目標とした空洞の高さ制御 中心値±10%以下を実測にて確認した。

(a) 簡易なMUTセル試作

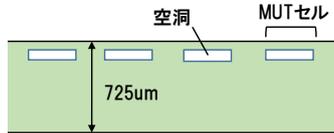
図1.1.2.4に(実施項目1)の詳細設計シミュレーションで得られたMUT型音響メタマテリアルの基本構造を実現するための製造プロセスフローを示す。MUTセルを作製したMUT基板の下部に音響インピーダンスを徐々に変化させるためのテーパ構造の溝を有する背面基板を接合するプロセスとなっている。

平成30年度には、高精度空洞形成プロセスの構築のため、図1.1.2.4の(a)-①に示す直径8インチのシリコン基板(基板厚さ:725 μ m)の表面に(実施項目1)の詳細設計シミュレーションを反映し

た簡易なMUTセルを試作して、MUTセルの空洞高さの変動幅の評価を行った。また、図1.1.2.4の (a)-②に示すMUTセルを作製したシリコン基板の薄化と、(a)-③に示すMUT基板の下部に接合する孔が形成されたシリコン基板を作製するための要素プロセスの構築が、MUT型音響メタマテリアルの製造プロセス構築には必要であることが判明したため確認を行った。

Step-1: MUT基板の作製

(a)-① MUTセルを直径8インチのシリコン基板(基板厚さ: 725um)の表面に作製。

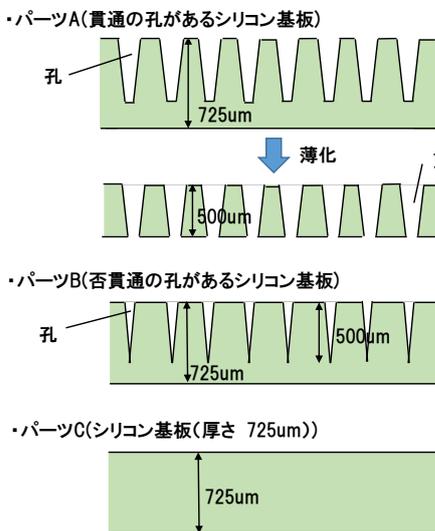


(a)-② (a)-①を厚さ10umまで薄化。

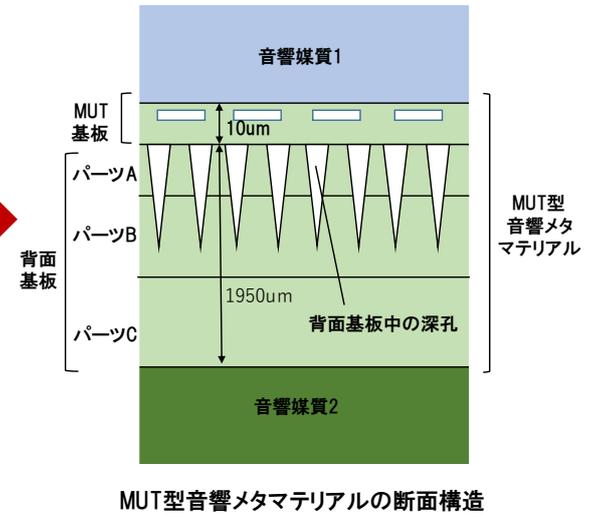


Step-2: 背面基板の作製

(a)-③ 孔加工を行ったシリコン基板を作製。



接合



MUT型音響メタマテリアルの断面構造

図 1. 1. 2. 4 MUT 型音響メタマテリアルの製造プロセスフロー

(b) MUTセルの空洞高さの変動幅の確認

試作した簡易な MUT セルの空洞上下に設けた電極間の静電容量の測定値から空洞高さを見積もった。まず、MUT セルに隣接させて、MUT セルの空洞のみ金属で埋め込まれているリファレンスセルも作製した (図 1. 1. 2. 5)。

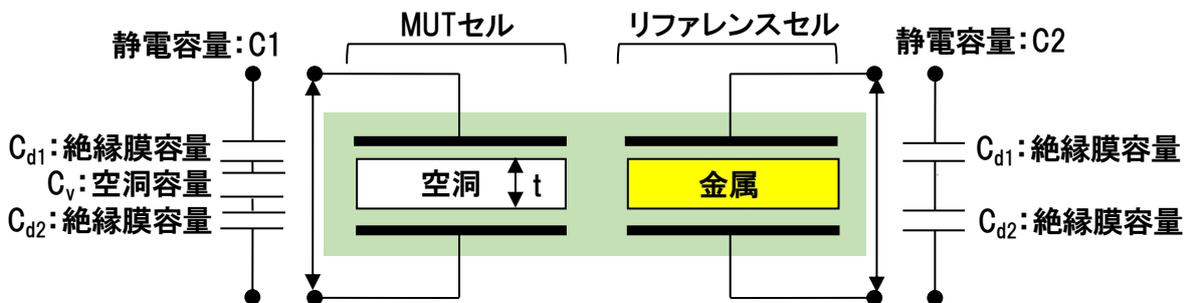


図 1. 1. 2. 5 MUTセルの空洞高さを見積もるためのリファレンスセル手法

表 1. 1. 2. 2 試作した MUT セルの空洞高さ変動幅

MUTセルの 空洞高さ	設計値		170nm
	試作結果	平均値	169.9nm
		最大値	175.5nm
		最小値	158.0nm
		変動幅	±5.2%

(c) シリコン基板の深孔加工の検討

厚さ 725 μ m のシリコン基板に対して陽極酸化処理を行うことによる深孔形成の検討を行った (図 1. 1. 2. 7)。陽極酸化処理は、ふっ酸溶液中で、シリコンに電界を印加し酸化させることにより、シリコンを溶かす処理であり、電界の強さや電界を印加する位置を制御して孔を生成できる。陽極酸化処理を行ったシリコン基板を分析した結果、深さ 400 μ m 以上の孔が加工できることを確認し、陽極酸化処理を行う時間を長くすることで、より深い孔の形成も可能である。また、貫通孔形成には 200 μ m 程度のシリコン基板の研磨が必要であることを判明した。したがって、深さ 700 μ m 以上の否貫通孔を作製することで、深さ 500 μ m の貫通孔は作製できると考える。図 1. 1. 2. 4 に示した MUT 型音響メタマテリアル構造は、孔はテーパ形状になっているが、テーパ形状の孔加工は加工プロセスの調整で達成見込みである。したがって陽極酸化処理によるシリコン基板への孔形成プロセスを構築できた。一方で、陽極酸化処理によるシリコン基板への孔形成は、数十時間といった加工時間を要するため、製造時間の短縮を目的として、平成 3 1 年度もさらに効率の良い作製方法の有無を継続検討することとした。

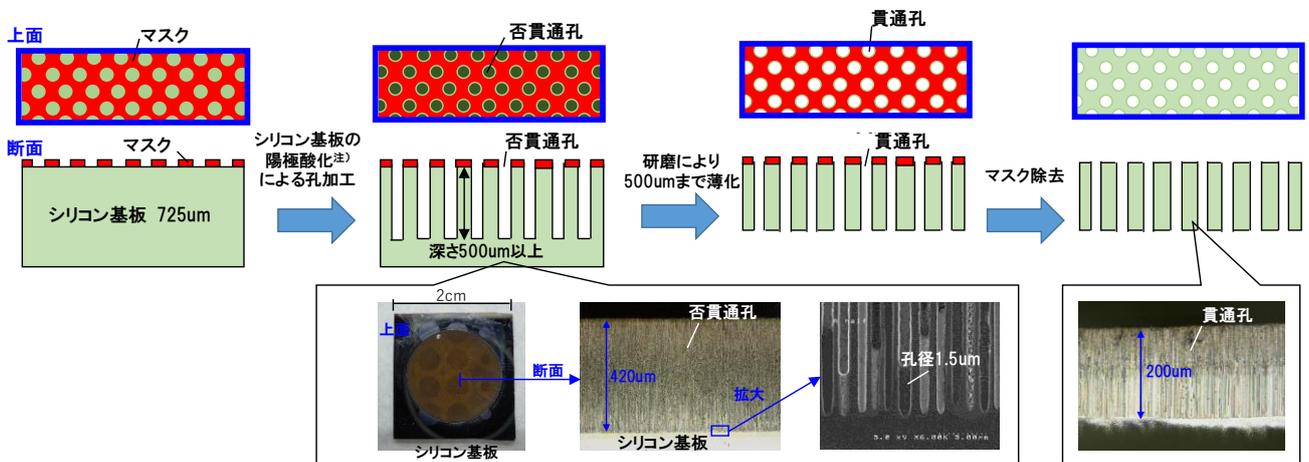


図 1. 1. 2. 7 シリコン基板の孔加工プロセスと陽極酸化処理による加工検討の結果

平成 3 1 年度成果：

平成 3 0 年度の (実施項目 1) にて設計した MUT セルの詳細設計シミュレーションによる微細構造に基づき、同じく平成 3 0 年度の (実施項目 2) で構築した製造プロセスの変動に対してロバストな高精度空洞形成プロセスにより、図 1. 1. 2. 4 に示した MUT 型音響メタマテリアルの試作を行う計画であった。しかし、1. 2 項 (2) で後述する製造プロセスにおける不具合が発生し、その対策に時間を要したことにより試作が遅延し、図 1. 1. 2. 8 に示した簡易構造型音響メタマテリアルは完成したものの、目標構造である MUT 型音響メタマテリアルは未完成に終わった。ただし、発生した不具合の対策は完

了しており、図1. 1. 2. 8のMUT基板と背面基板は完成しており、残すは両者の接合プロセスのみである。この接合プロセスは、完成した簡易型音響メタマテリアルの試作において実績があるため、目標構造であるMUT型音響メタマテリアルの試作での不具合発生リスクは小さいと考える。図1. 1. 2. 9には、完成した簡易構造型音響メタマテリアルの外観写真を示す。

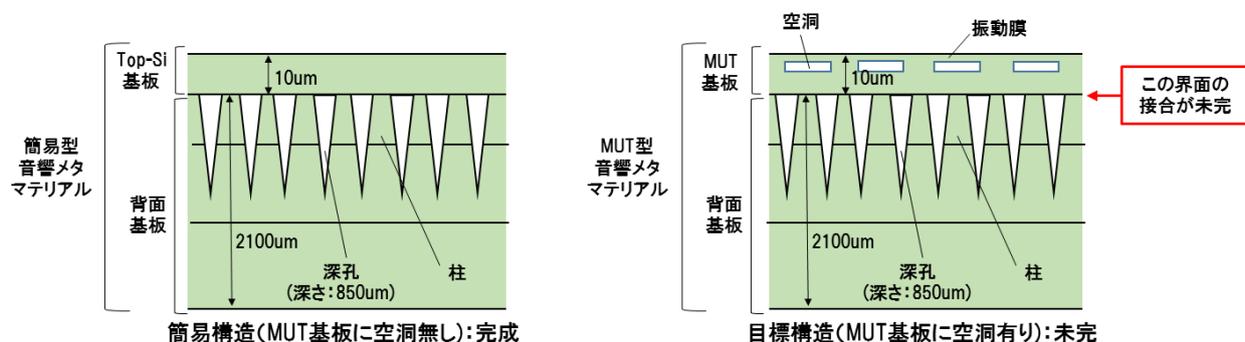


図 1. 1. 2. 8 簡易型およびMUT型音響メタマテリアルの断面模式図

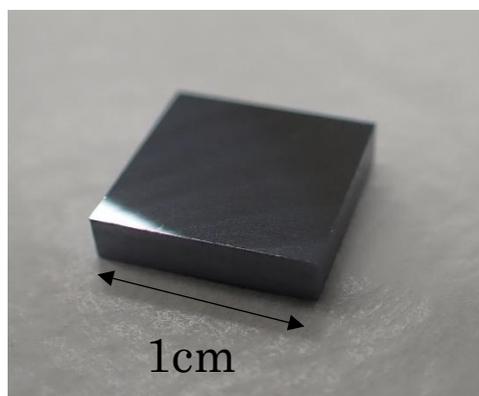


図 1. 1. 2. 9 完成した簡易型音響メタマテリアルの外観写真

(3) 達成度

要素課題 2 に対する実施項目 2 の達成度は以下の通り。

年度	実施内容	マイルストーン/目標	達成度
H29	薄膜メンブレンの薄膜単体応力の成膜パラメータ依存性取得	マイルストーン：薄膜応力安定化成膜パラメータ抽出 目標：プロセス変動幅±10%での応力安定性（中心値±10%以下）	100%
H30	MUT 構造での空洞高さ安定性評価	マイルストーン：高精度空洞径製プロセス構築 目標：空洞高さ：設計中心値±10%以下	100%
H31	MUT型音響メタマテリアルの製造プロセス構築及び試作	マイルストーン：MUT型音響メタマテリアル完成	50%

③要素課題 3

(1) 課題

本MUT型音響メタマテリアルは、水中環境下での使用を想定している。一方、音響インピーダンスを制御するためにMUTセルの電極に電圧を印加するため、水との電気絶縁性を確保する水密構造が必要になる。従来の水中音響装置の場合、電極部分は、水との電気絶縁性を確保するために絶縁油で覆う、又はウレタン樹脂等によりモールドを実施している。しかしながら、絶縁油とMUT型音響メタマテリアルの相性やモールドした場合に薄膜メンブレンが変形するか否かについて、現状では十分に把握されていない。一方、水中環境下では、空中と異なり薄膜メンブレンにも水圧が印加されるため、空中で想定した音響特性を確保できない可能性があり、水圧に応じたPull-in電圧の制御、又は薄膜メンブレンに水圧がかからないような構造が必要になる。よって、水中環境下にて、水密性（電気絶縁性）を確保しつつ音響性能を劣化させないための構造及びにそれを構成する材料選定が課題となる。

(2) 実施項目 3：水中環境下における材料選定に関する研究

上記の要素課題 3 を解決するために、実施項目 3 では以下の検討を行った。

平成 29 年度成果：

絶縁油が接触するMUT型音響メタマテリアルの絶縁膜材料の耐油性について、水中装置の一般的な保管条件下での温度サイクル（目標としては、温度範囲（保管条件） -10 度 ~ 60 度を実測により確認する）で、絶縁膜材料に対して絶縁油を用いた浸漬試験を実施し、絶縁膜材料が耐油性を有することを確認した。

（実施項目 1）で導出された簡易なMUTセルモデルに対して、水圧印加時の条件のもと、（実施項目 1）の概念設計シミュレーションにより水圧と薄膜メンブレン変形量の関係を計算し、水圧 0.1MPa 印加時の発生応力が 35MPa 以下（安全率3以上）、変形量が微小（5%以下）で、問題ないことを確認した。

(a) MUT 型音響メタマテリアルの絶縁膜材料の耐油性

下記条件にて、絶縁油を用いた温度サイクル浸漬試験を実施し（図 1.1.3.1）、MUT 型音響メタマテリアルの絶縁膜材料が耐油性を有することを確認した（図 1.1.3.2）。

- ・ 温度範囲： -10 度 ~ 60 度
- ・ 絶縁油：ひまし油、アセチル化ひまし油（ソーナーで使用）
- ・ 膜材料：SiN, SiO₂（静電容量型 MUT で使用）
- ・ 測定項目：応力，屈折率，質量を測定

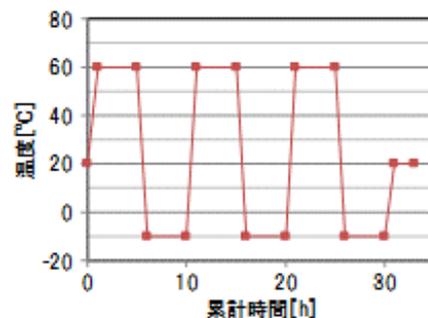
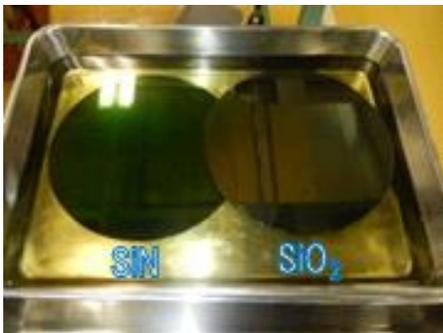


図 1.1.3.1 温度サイクル浸漬試験(左：実施状況の様子，右：温度サイクル試験条件)

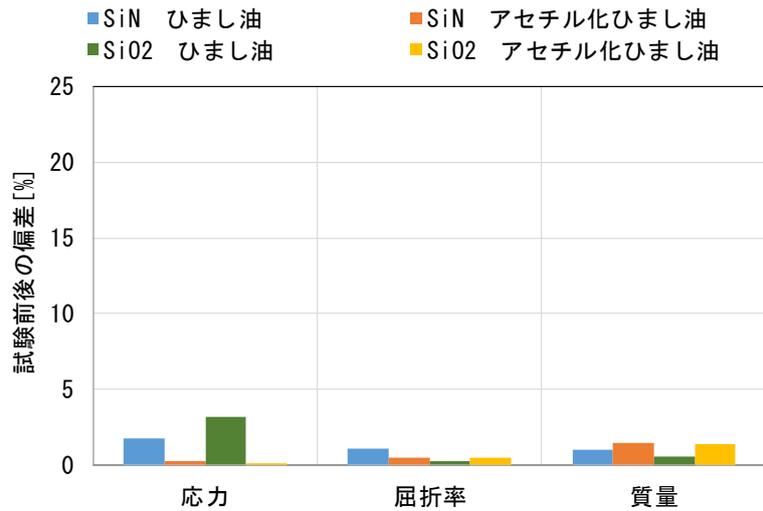


図 1. 1. 3. 2 温度サイクル浸漬試験前後の各測定項目の偏差

(b) 簡易型 MUT セルの水圧特性

簡易型 MUT セルモデルの設計指針の条件にて、艦船の船底搭載(ソナー深度)に相当する水圧 0. 1MPa 印加時の発生応力及び変形量を概念設計シミュレーションにより評価を実施し、水圧 0. 1MPa 印加時の発生応力が 35MPa 以下(安全率 3 以上)、変形量が微小 (5%以下) で、問題ないことを確認した (図 1. 1. 3. 3)。

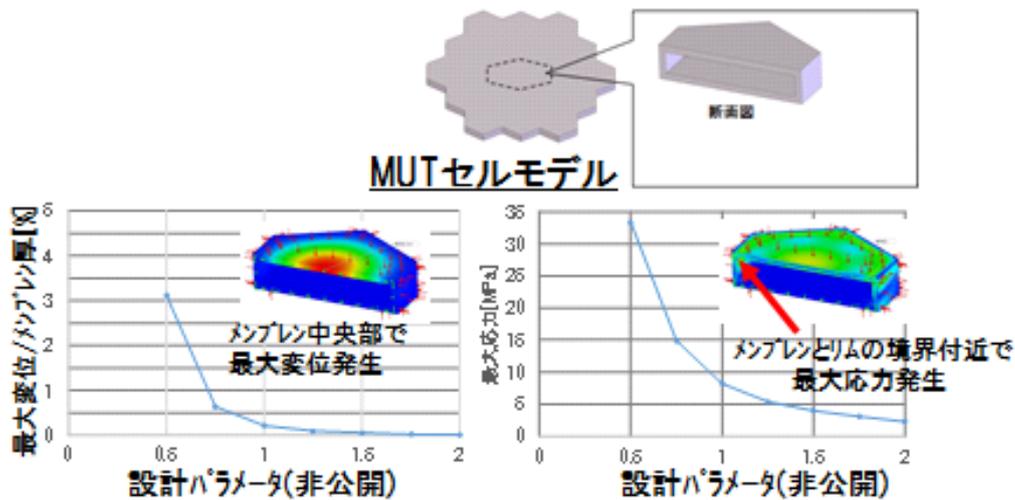


図1. 1. 3. 3 簡易MUTセルのにおける0. 1MPa印加時の変位量と最大応力

平成30年度成果：

実施項目 1 で構築したMUT構造の詳細設計シミュレーションモデルに絶縁油方式とモールド方式の構造を反映し、詳細設計シミュレーションにて両方式の音響特性を評価し、音響透過率に差異が無いことを確認した。また、水圧0. 1MPa+大気圧0. 1MPaを印加した状態でも、音響透過率に差異が無いことを確認した。

(a) 音響性能の水密方式比較

実施項目 1 で構築した MUT 構造の詳細設計シミュレーションモデルに絶縁油方式とモールド方式の構造を反映し (図 1. 1. 3. 4, 表 1. 1. 3. 1 参照), 詳細設計シミュレーションにて両方式の音響透過率

を比較した（図 1.1.3.5 (A) 参照）。評価の結果，モード方式の低周波数域 1MHz 付近（本研究の対象周波数帯域外）にリップルがみられるものの，対象周波数帯域内（5～10MHz）では，絶縁油方式，モード方式ともに水の場合と比較し，音響透過率に差異が無いことを確認した。

表 1.1.3.1 水密材料の材料定数

材料名	密度 [kg/m ³]	音速(縦波) [m/s]	音速(横波) [m/s]
絶縁油	970	1498	0
モード剤	1040	1500	900

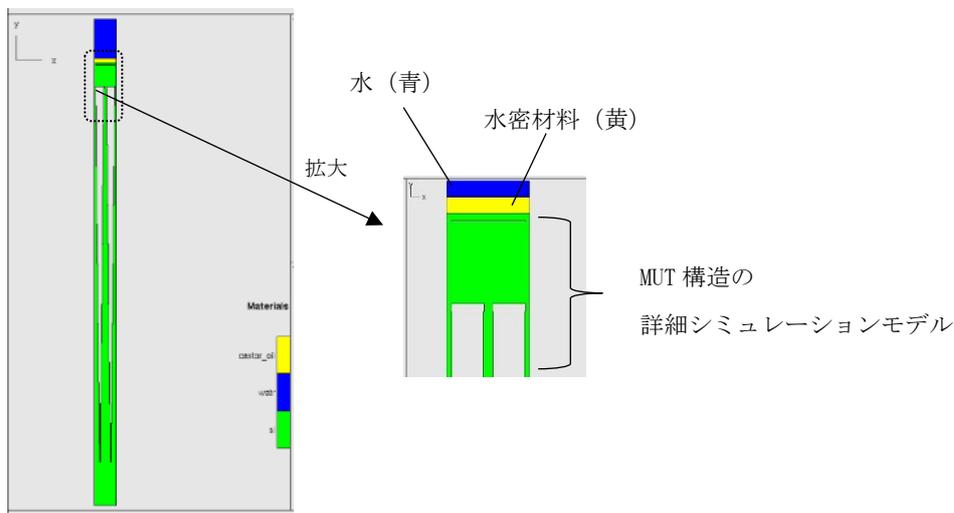


図 1.1.3.4 水密構造を反映した MUT 構造の詳細設計シミュレーションモデル

(b) 水圧印加時の音響性能

次に Pull-in ON 状態の詳細設計シミュレーションモデルに水圧 0.1MPa+大気圧 0.1MPa の 0.2MPa を印加し音響透過率を比較した。結果，水圧印加の有無に関係なく，周波数 5～10MPa の範囲で音響透過率がほぼ 1.0 になることを確認した（図 1.1.3.5，図 1.1.3.6）。

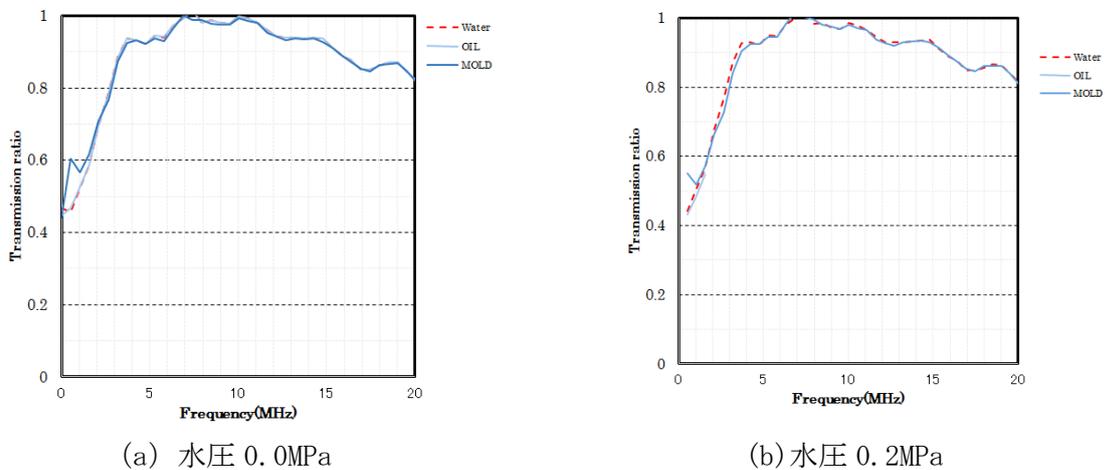


図 1.1.3.5 水密構造を反映した MUT 構造の音響透過率計算結果(水密材料比較)

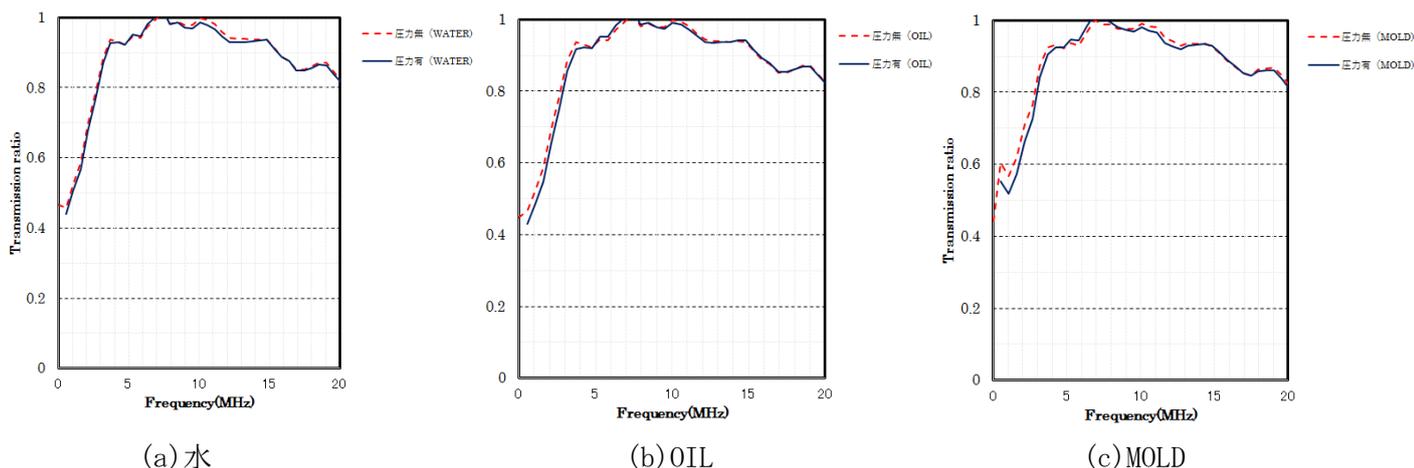


図 1. 1. 3. 6 水密構造を反映した MUT 構造の音響透過率計算結果(水圧有無比較)

平成 31 年度成果：

⑤評価で、MUT 型音響メタマテリアルの水中における音響インピーダンスの可変制御性を確認することで、水中での絶縁性を評価完の予定であったが、試作した「簡易音響メタマテリアル」と「MUT 型音響メタマテリアル」の内、「簡易型音響メタマテリアル」の音響水槽内での動作検証のみ完了した（詳細は⑤評価による）。

(3) 達成度

要素課題 3 に対する実施項目 3 の達成度は以下の通り。

年度	実施内容	マイルストーン/目標	達成度
H29	MUT材料の耐環境性，強度特性の評価	マイルストーン： MUT材料の耐油性評価 目標： 温度範囲（保管条件）-10度～60度 における耐油性評価完	100%
H30	MUT材料の耐環境性，強度特性の評価	マイルストーン： 水中環境下における水密材料選定 目標： 耐水圧0.1MPa以上，絶縁油，モールド共に使用可	100%
H31	<ul style="list-style-type: none"> 簡易型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の性能検証 MUT型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の動作検証 	簡易型音響メタマテリアルおよびMUT型音響メタマテリアルの音響インピーダンス評価完/音響インピーダンス対象範囲：1.5～10Mrayls 対応超音波周波数範囲：5MHz～10MHz	50%

④要素課題 4

(1) 課題

試作するMUT型音響メタマテリアルの透過効率評価の際には、MUT型音響メタマテリアルに音波を入射し、そこからの反射波又は透過波を測定し、透過効率を算出する。

一方、MUT型音響メタマテリアル内部では、MUTセルの空洞以外の材料を音波が伝搬する際の材料減衰と、MUTセルの空洞により音波が反射や散乱することで生じる減衰の2種類の減衰現象が存在するが、後者についてはその現象を直接測定するのは困難である。したがってMUT型音響メタマテリアルによる音響インピーダンスのアクティブ制御の原理の詳細な解明のためには、MUTセル物理モデルを用いたシミュレーションにより、2種類の減衰現象を切り分け、MUT型音響メタマテリアルの減衰率を評価する手法の確立が必要である。しかし現状ではその手法は確立されていない。

要素課題4に対し、MUT内部の反射と散乱による音波の減衰量とその物理的過程を調べるため、実施項目1で作成した詳細設計シミュレーションを用いて行う。詳細設計シミュレーションにおいては、MUTセルの空洞以外に用いられている材料減衰率を仮想的にゼロとし、材料減衰の影響を排除することができる。この状態でMUT型音響メタマテリアルに音波を入射し、MUT型音響メタマテリアルを透過する音波を計測することで、散乱と反射による減衰量を算出する。次に、より詳細な散乱と反射の原理を明らかにするため、MUT型音響メタマテリアル内部の複数の点において伝搬する音波を計測し、音響メタマテリアル内部の音波伝搬過程を把握する。シミュレーションと実測との減衰率（入射波から透過波と反射波を差し引いた振幅の、入射波の振幅に対する割合）の差異を±10%以下とすることを目標とする。散乱もしくは反射の大きさは、MUTセルの設計パラメータである、空洞幅、空洞高さ、および薄膜メンブレン厚に依存すると考えられるため、これらの設計パラメータに対する依存性を明らかにする。

(2) 実施項目4：MUT型音響メタマテリアルの減衰率評価

上記の要素課題4を解決するために、実施項目4では以下の検討を行った。

平成29年度成果：

(a) 散乱体が材料内部にある物質の音響特性評価の方法論の検討

上記に関する文献及び複合材料(多孔質材、マイクロバルーン含有材)の減衰に関する文献を調査(表1.1.4.1)し4件抽出し、平成30年度に実施する減衰率計測のための技術資料を取得した。

表1.1.4.1 複合材料(多孔質材、マイクロバルーン含有材)の減衰に関する文献調査

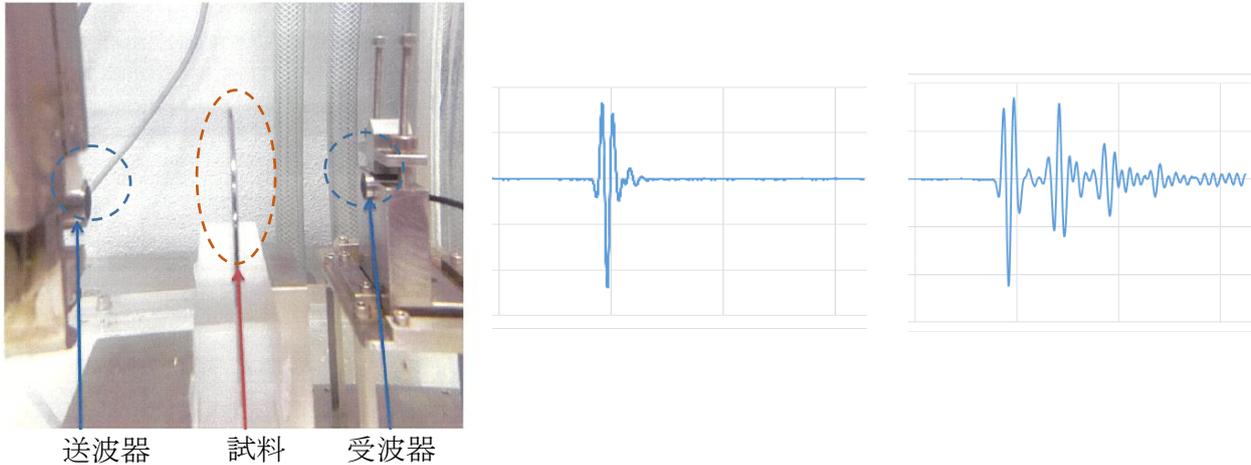
番号	文献名	内容
1	Measurement of the Apparent Attenuation of Longitudinal Ultrasonic Waves by Immersion Method1 [8]	水中に設置した試験片に対して超音波を放射し、反射波の振幅から見かけ上の減衰率を算出する手法について規定。
2	Sound and Vibration Damping with polymers[9]	減衰材料中の音波伝搬の基礎について記述。波長に対して大きい空隙では、反射と吸収による減衰が大きく、波長に対し小さくなると、散乱の影響が大きくなる。
3	A predictive model for ultrasonic attenuation coefficient in particulate composites[10]	樹脂に内蔵物(ガラス球、マイクロバルーン)を充填し試験片の減衰率を測定。減衰成分を吸収項と散乱項に分けて数値計算した理論式と比較し数値モデルの妥当性を検証。
4	Underwater Electroacoustic Measurement[11]	音響ドームや吸音材の音響材料の減衰は反射波と透過波から算出する方法が一般的である。減衰した成分に関しては散乱や回折等に分けず全てロスと捉えることが多い。

平成30年度成果：

(a) MUT型音響メタマテリアル材料単体（空洞のないバルク）の音速と減衰量の測定

表 1.1.4.1 の文献を参考に，MUT 型音響メタマテリアル材料単体（空洞のないバルク）の音速と減衰量を測定した。

試料（シリコンバルク）の音速は，図 1.1.4.1 に示す測定系にて，試料を間に挟み音波の送受波を行う透過法により音波伝搬時間を測定し，次の式から計算した。



(a) 測定系

(b) 受信波形(左：試料無，右：試料有)

図 1.1.4.1 音速と減衰量の測定系と試料有無での受信波形

水の音速 (V_w) は，

$$V_w = \Delta t_w / (T_p - T_n) \quad (16)$$

ここで，

Δt_w ：水距離の増加分

T_p, T_n ：水距離増加前後の伝搬時間

試料（シリコン）の音速 (V) は，

$$V = 1 / [1/V_w - (T_w - T_s)/t_s] \quad (17)$$

ここで，

t_s ：試料の厚み

T_w ：試料無しでの伝搬時間

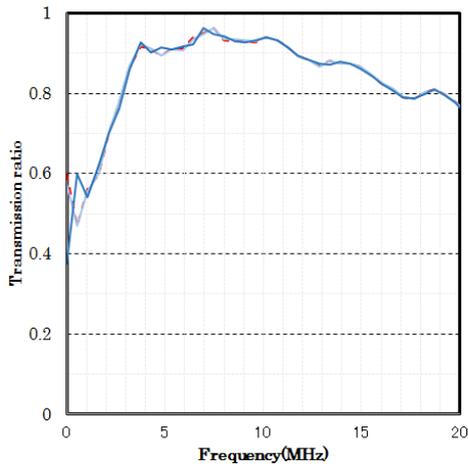
T_s ：試料有りの伝搬時間

試料（シリコン）の減衰量 α は，図 1.1.4.1 の受信波形の m 番目の振幅 A_m ， n 番目の振幅 A_n より次の式から計算した。

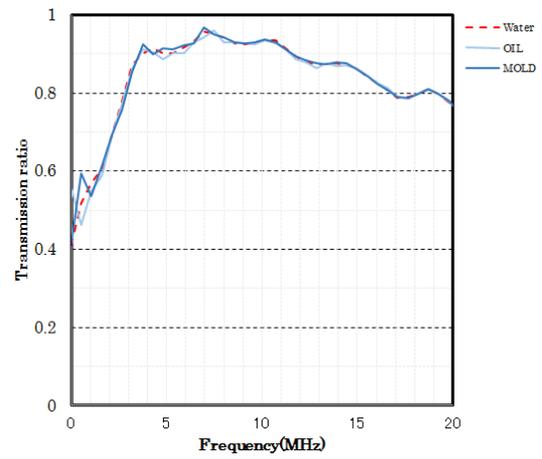
試料（シリコン）の減衰量 α は

$$\alpha = 20 \log \frac{A_m}{A_n} / 2(n - m)t_s \quad (18)$$

測定結果，音速：8, 223m/s(@7.5MHz)，減衰量：0.5dB/mm(@7.5MHz)を詳細シミュレーションに反映し音響透過率を計算した結果を図 1.1.4.2～1.1.4.4 に示す。

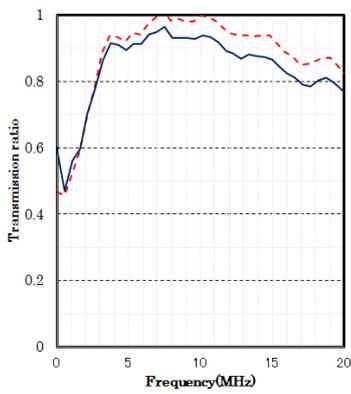


(a) 水圧 0.0MPa

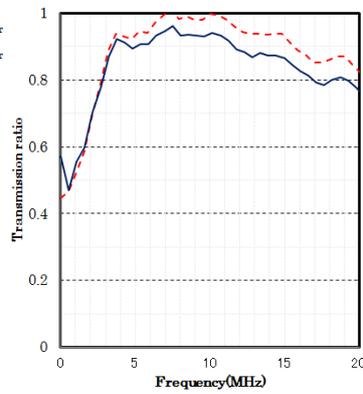


(b) 水圧 0.2MPa

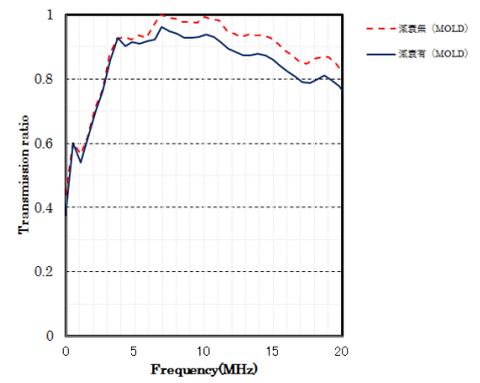
図 1.1.4.2 減衰量を反映した MUT 構造の音響透過率計算結果(水密材料比較)



(a) 水

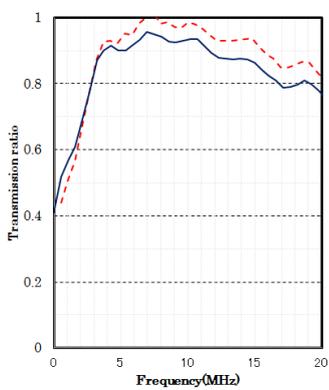


(b) OIL

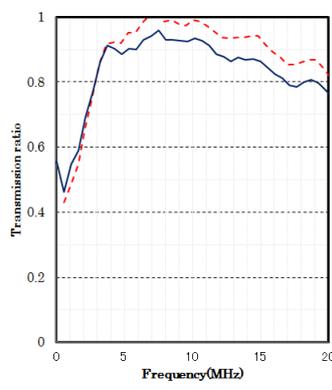


(c) MOLD

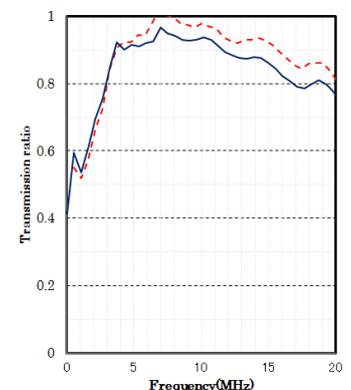
図 1.1.4.3 減衰量を反映した MUT 構造の音響透過率計算結果
(減衰量有無比較 水圧 0.0MPa)



(a) 水



(b) OIL



(c) MOLD

図 1.1.4.4 減衰量を反映した MUT 構造の音響透過率計算結果
(減衰量有無比較 水圧 0.2MPa)

Pull-in ON状態の詳細シミュレーションにて減衰量の反映有無における音響透過率を比較すると、減衰量の反映有で無しに対して約5~6%音響透過率(7.5MHzにて)が悪くなる。これは、バルク材の実験で求めた減衰量0.5dB/mmと整合し、材料の減衰量だけがMUT型音響メタマテリアルの減衰量に重畳される音波伝搬となることを詳細シミュレーションで確認した。

(b) 音響伝搬特性を決めるメカニズムと影響因子

平成30年度(実施項目1)で構築した詳細シミュレーションモデルを用いて、MUT型音響メタマテリアルの構造体における各部の寸法が音響伝搬特性に与える影響を調べ、そのメカニズムを明らかにした。今回の設計においては、MUT部の寸法は、MUTセルサイズが数十 μm 、薄膜メンブレンやMUT基板の厚さが数 μm から数十 μm 、薄膜メンブレンを支える柱が数 μm である。一方、ここで評価対象としている周波数が5~10MHzであり、波長にすると約800-1600 μm となる(Siの音速を8223m/sと仮定)。つまり構造スケールが波長の数十から100分の1のオーダーとなる。唯一、柱長さのみが波長サイズオーダーとなる。このことから構造体内部の各点においてその伝搬波形を見ても、波長サイズに埋もれてしまい反射や散乱の信号を分離することが困難である。研究開始時の課題に「MUT型音響メタマテリアル内部の複数の点において伝搬する音波を計測し、音響メタマテリアル内部の音波伝搬過程を把握する」としたが、本検討においては、各構造パラメータを独立に変えたときの、MUT部全面の入力波に対する柱通過後の透過波を見ることで、その構造体における影響を間接的に調査することとした。

はじめに図1.1.4.5に全体をまとめたものを示す。左図が構造図で、右図が透過率特性の周波数特性の一例である。図中Aの柱長さについては、低周波のカットオフを決めている。図中Bの柱上部の幅については透過率レベル全体を決めている。図中CのMUT基板厚さは高周波側の落ち方を決めている。図中Dの薄膜メンブレンの厚さや空洞幅は、結果的にはメンブレンの共振周波数を決めることになり、この共振周波数が、透過率の急激な落ち込み位置を決めている。

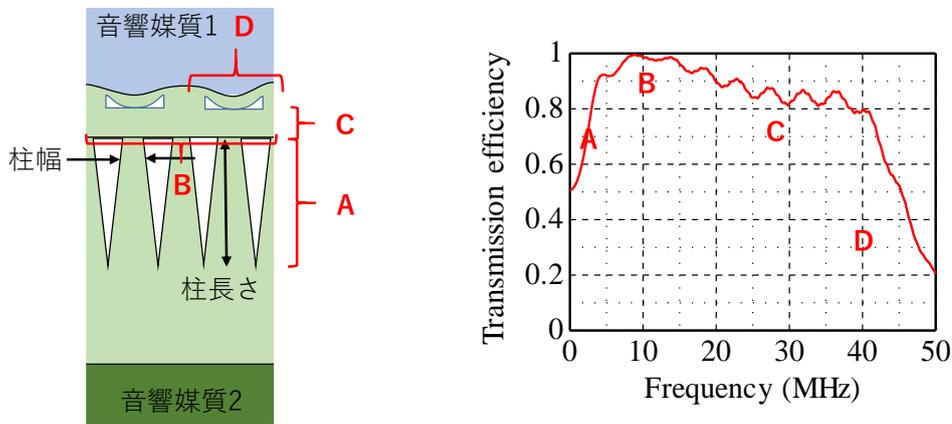


図 1.1.4.5 音響伝搬特性を決めるメカニズムと影響因子

次に、A~Dの各部のメカニズムについて説明する。A部の柱長さを変えた場合の透過率を図1.1.4.6に示す。図中には設定した柱長さと同じシリコン内を伝搬する音波の波長に対応する周波数を併記した。図から分かる通り、MUT型音響メタマテリアルの透過特性は低周波側にカットオフを持つが、柱が短いほどよりカットオフが高い周波数に移動する。一方、高周波側の特性はほとんどこの影響を受けない。これは、柱構造が短いほど、波長の長い低周波成分からは水負荷側からMUT部のメンブレン構造を介して柱構造下部側のバルクのSiが見えるようになるためと考えられる。この傾向は本提案構造における柱構造と本質的には同等の構造と考えられるLi等による結果とも一致している[12]。本

解析においては透過率が0.95の周波数と柱長さが一致する波長に対応する周波数が概ね一致した。より低周波側の透過率を高めるためには、柱長さを波長サイズよりも大きくする必要がある。

B部の柱幅と透過率の関係については、平成30年度（実施項目1）の図1.1.1.19 (c)に示した通り、平成29年度（実施項目1）で構築したMUTの基礎理論から求めた音響媒質に最適な幅をピークとしそこから外れるに従い透過率が落ちていく。この事象をより精密に検証するため、以下の解析を行った。柱幅 w_1 と基本幅 L を変化させた場合（10段階）の透過特性を図1.1.4.7(a)に示す。水が音響負荷の場合、理論式から求めた最適値 $w_1/L = 0.0743$ の設計に対して、小さい値となる $w_1/L = 0.0186$ から $w_1/L = 1$ となるバルク状態までを示している。図から分かる通り、 $w_1/L = 0.0186$ では透過特性が全帯域で0.8以下となり、提案設計に近づくにしたがって全帯域の透過率が増加している。また提案設計よりも大きな w_1/L となるに従い再び透過率が下がる傾向が見られる。しかし、 w_1/L が増加する方向では高域側がやや持ち上がったような周波数特性となる。 $w_1/L = 0.148$ のとき、50MHz以下では提案設計より透過特性は下がるが、50MHz以上では提案設計と逆転する。そこで、得られた透過特性について、0-50MHzと0-100MHzの範囲で平均透過率を求めた。図1.1.4.7(b)にその結果を示す。図から分かる通り、0-50MHzの範囲においては、提案設計が最も透過率が高かった。一方、0-100MHzの範囲においては提案設計 $w_1/L = 0.743$ のときの値0.932に対し、 $w_1/L = 0.143$ のときの値が0.953とやや高く、分析対象とする周波数帯域依存性が見られた。しかし、概ね設計思想および音響伝搬メカニズムの妥当性は示されたと考えられる。

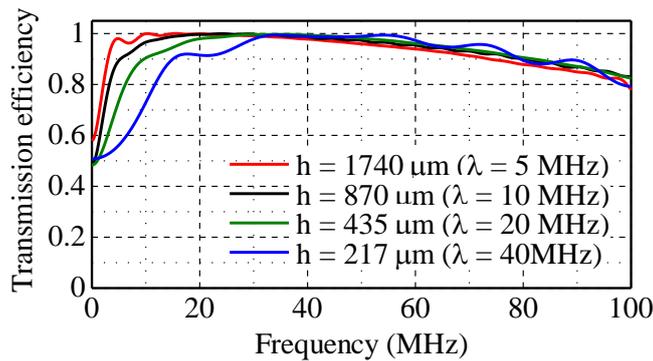


図 1.1.4.6 柱長さと透過率特性の関係

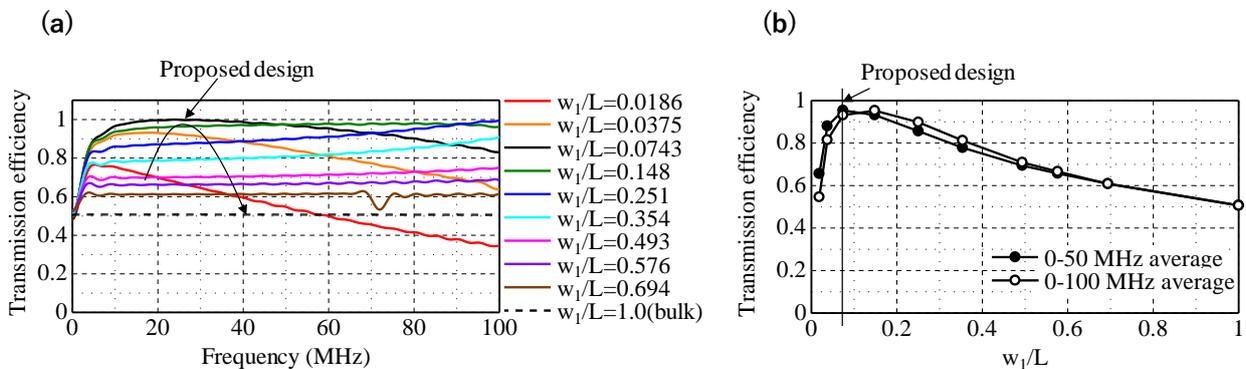


図 1.1.4.7 柱長さと透過率特性の関係

C部のMUT基板厚と透過率の関係を図1.1.4.8に示す。MUT基板厚さを1, 5, 10, 15, 20, 30 μm の値として透過率の解析を行った。図から分かる通り、セル下基板厚さが厚くなることに伴って透過率の高周波領域の帯域が狭くなる。このことは以下のように考えることができる。入力された音波は最初に薄膜メムブレン構造で力を受け、その力がメムブレンを支える周囲の壁やPull-in時には空洞下部面に伝達される。その力はMUT基板に伝達される。したがって、柱構造へ力の伝達は一旦このMUT基板を介することになる。この状態は、実施項目1の図1.1.1.4の構造において、MUT基板がメムブレン構造に相当することになる。したがって、平成29年度（実施項目1）で示した設計指針<3>の「よりメムブレン部の剛性を高く、質量を小さくする構造とする」とあるように、メムブレンの厚みが増すことで質量が増加し高域の帯域を狭くすることになる。

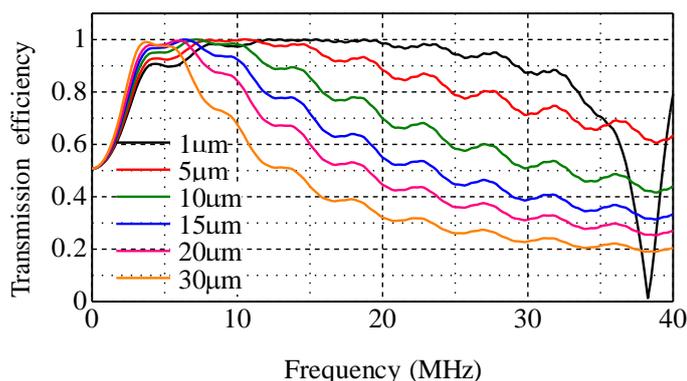


図 1.1.4.8 MUT 基板厚さと透過率の関係

次に、メムブレン厚さ d の依存性を図1.1.4.9に示す。図中には各設計条件における膜構造の共振周波数（基本波モード）も併記した。図から分かる通り、メムブレン厚さが小さくなるに従い、透過率がほぼゼロとなるノッチ状の領域が低周波側に移動する様子がわかる。また、このノッチ位置と共振周波数は近い値となっており、関係性が高いことが示唆される。共振周波数はメムブレン部に定在波が立ち振動振幅が大きくなる周波数であり、メムブレン部に接している媒質に対する音響放射効率が高い。このため、水側から入射した振動エネルギーがメムブレンを振動させた際、高効率に水側へ再放射され壁構造側へのエネルギー透過効率が低下するものと考えられる。しかし、共振周波数とノッチ周波数は完全に一致はしておらず、特に周波数が高いほど差が大きくなる傾向がある。この原因として、共振周波数の算出時は無負荷状態で計算し、透過特性の計算時は水負荷状態で計算していることも考えられる。水負荷時にはメムブレンと水との音響カップリングによる表面波放射なども考えられ、これによるメムブレン部近辺のインピーダンス特性が大きく変化する可能性がある。メムブレン特有の現象に関しては今後さらに詳細な検討が必要であるが、設計上は共振周波数を所望の帯域より十分高い領域に設定することで、性能を担保することができる。

以上の知見をもって平成30年度（実施項目1）の試作設計指針へと反映した。

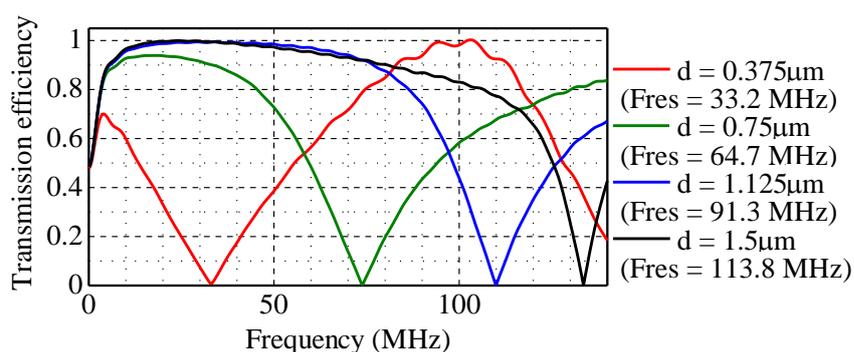


図 1.1.4.9 メンブレン厚さと透過率の関係

平成31年度成果：

試作した「簡易型音響メタマテリアル」について（実施項目5）で実施し評価結果と、シミュレーション結果を比較した。その結果、目標値の誤差±10%に入らなかったため、両者の結果の差異について原因分析を行った。原因分析の結果に基づき、シミュレーションモデルを修正し再比較を行った結果、目標誤差を実現し、設計技術の妥当性を確認した。一方、最終形状となる「MUT型音響メタマテリアル」については、試作工程の不具合により試作が遅延し、評価完了に至らなかったため、本実施項目であるシミュレーションとの比較評価を行うことができなかった。

(a)簡易型音響メタマテリアル試作品の比較評価

（実施項目2）で試作した「簡易型音響メタマテリアル」を（実施項目5）で実験的に評価した結果とシミュレーション結果を比較した。その結果、評価指標である透過率において目標誤差±10%以下とならなかった。そこで、原因分析として試作品の仕上がり状態及び実験条件による差異を加味して、シミュレーションモデルの修正とデータ解析の修正を行った。その結果、修正モデルによる実測結果との比較では平均誤差が9.9%（矩形セル）と5.9%（円形セル）となり、目標設計精度を達成した。

(3) 達成度

要素課題4に対する実施項目4の達成度は以下の通り。

年度	実施内容	マイルストーン/目標	達成度
H29	・MUT型音響メタマテリアルの減衰率評価手法の検討（机上検討）	机上検討資料，検討計画書	100%
H30	・MUT型音響メタマテリアルの減衰率評価手法検討（シミュレーション） ・MUT型音響メタマテリアル内部の音響伝搬過程の把握	・バルク材料における音響シミュレーションと実測の差異：±10%	100%
H31	・簡易型音響メタマテリアルのシミュレーションと実測の差異分析 ・MUT型音響メタマテリアルのシミュレーションと実測の差異分析	MUT型音響メタマテリアルにおけるシミュレーションと実測の差異：±10%	50%

⑤評価

(1) 実施項目5：試作したMUT型音響メタマテリアルによる検証

実施項目2で最適化された製造プロセス及び実施課題3で選定された材料・構造を反映した実施項目1の設計結果に基づき、MUT型音響メタマテリアルを試作する。

試作したMUT型音響メタマテリアル及び実施項目3で検討した方式を用いて、水中における透過効率を用いて音響インピーダンスの可変制御性を検証する。MUTセルの物理モデルの精度向上に資するために実施項目4で確立した減衰率評価手法を用い、MUT型音響メタマテリアルによる音響インピーダンスのアクティブ制御についての原理検証を行う。なお、音響インピーダンスの計測は超音波周波数範囲5MHz～10MHzにおいて行う。また、超音波周波数範囲については、シミュレーション等によって拡張性を検討する。

平成31年度の成果：

(a) 簡易型音響メタマテリアル試作品の評価

(実施項目2)で試作した「簡易型音響メタマテリアル」の音響的な特性を実験的に評価した。図1.1.5.1に実験系を示す。また、図1.1.5.2に計測結果を示す。本結果を実施項目4でシミュレーション結果と比較し、その差異の分析とシミュレーションモデルの修正を行った結果、目標誤差を達成した。

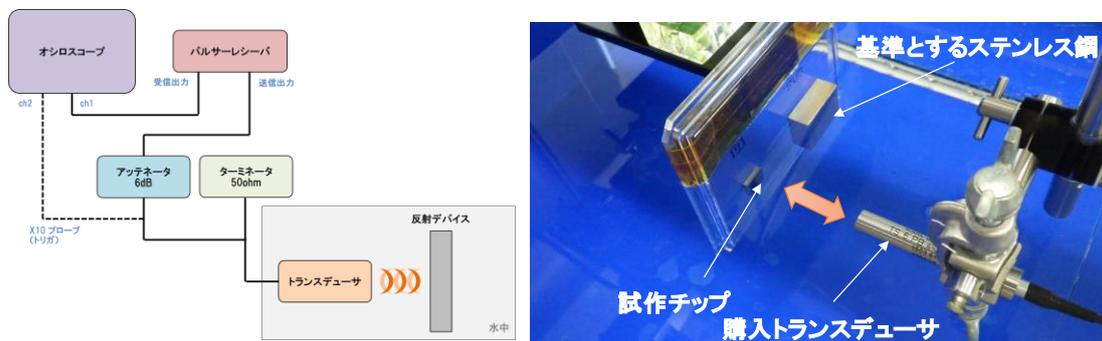


図 1.1.5.1 簡易型音響メタマテリアル実験系（一部抜粋）

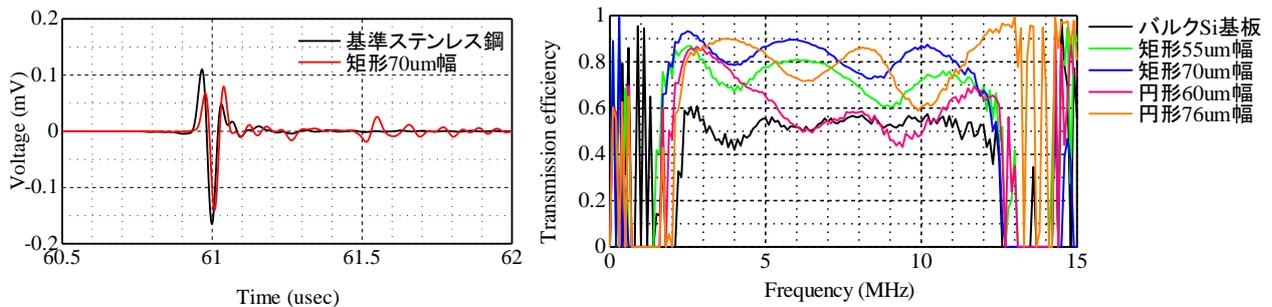


図 1.1.5.2 簡易型音響メタマテリアル実験結果

(b)MUT型音響メタマテリアル試作品の評価

当初予定していた最終形状であるMUT型音響メタマテリアルに関しては、試作が遅延したため、音響的な特性の実験的評価に至らなかった。

(c)超音波周波数範囲の拡張性検討

本研究全体を通して得たMUT型音響メタマテリアルに関する知見，特に（実施項目4）で行ったMUT型音響メタマテリアル内部の音響伝搬特性の把握から，より低周波化する（例えば海洋音響ソーナーのkHz～100kHz，可聴域<20kHz）への拡張可能性を検討した。本研究で得られた設計知見をもとに簡易音響メタマテリアルの低周波化をシミュレーションで検討した。その結果数kHz～数百kHzという極めて広帯域な音響整合層が可能であることが明らかになった。一方，整合層の各部の寸法は低周波化に伴い大型化する（設計ノウハウのため本冊では非開示とする）。特に柱長さは波長サイズで決まるため，低周波化するほど大きくなり，もはや半導体プロセスのスケールではなくなる。おそらく機械加工法や3Dプリンタを活用した製造技術で可能となるが，それに応じて構造や材質も変える必要があると考えられる。

(2) 達成度

要素課題5に対する実施項目5の達成度は以下の通り。

年度	実施内容	マイルストーン/目標	達成度
H29	実施事項無		
H30	実施事項無		
H31	・簡易型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の性能検証 ・MUT型音響メタマテリアル試作と音響水槽内での試作品の動作検証	簡易型音響メタマテリアルおよびMUT型音響メタマテリアルの音響インピーダンス評価完/音響インピーダンス対象範囲：1.5～10Mrayls 対応超音波周波数範囲：5MHz～10MHz	50%

1. 2 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

(1) 要素課題1：音波伝搬面積の変動幅の向上

(a) 柱構造分離型の検討

MUT型音響メタマテリアルのアクティブ制御の候補として、平成29年度は図1.1.1.14に示すように、MUT空洞部の下側の孔の中に別の柱を立て、Pull-in ONによってこの柱への接触面積を増やすことで音響インピーダンスを可変にしようとした。しかしながら、平成30年度の当初、下図1.2.1.1(a)のような全体構造をモデル化しその音響特性を評価したところ、Pull-in OFF時において柱下型面を介した回折波と多重反射波により透過特性に多数のノッチが発生し広帯域性が失われる結果となった（図1.2.1.1(b)）。そこで図1.1.1.19(a)のようにMUT基板を介して柱がすべて接触している構造を採用し検討を進めた。さらに、次の(b)項で述べるように、接触面積に対する依存性が当初予想より小さい結果が得られたため、アクティブ制御方式としては別方式を採用した。

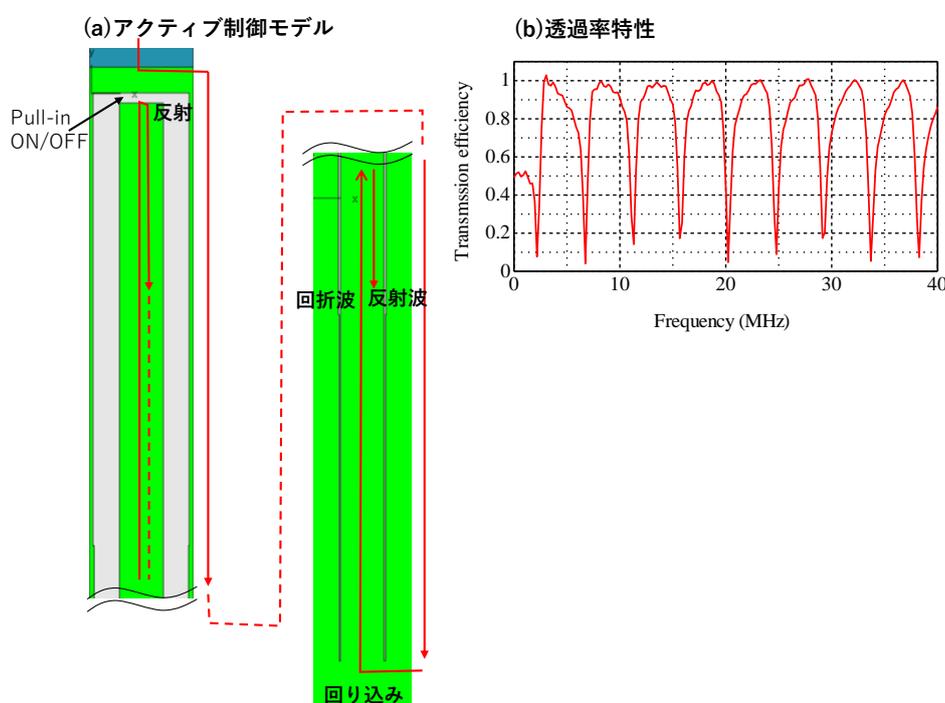


図 1.2.1.1 当初検討のアクティブ制御構造

(b) アクティブ制御性における接触面積依存性とスイッチ型制御

平成30年度（実施項目1）図1.1.1.19(b)に示したように、音波の透過率すなわち音響インピーダンスのマッチング特性は薄膜メンブレンが空洞下部面に接触した際の接触面積（接触率）の依存性が小さいことが分かった。一方で、研究開始時点で想定していなかった事象として、薄膜メンブレンの共振周波数付近で入力音波がほぼ全反射状態となることが分かった。一方、Pull-in ONによって、その共振周波数は大きく高周波側にシフトする現象は依然からの知見として持っていた。また一方でさらに図1.1.1.19(c)に示したように、柱幅を1.5MRaysと10MRaysなど個別に最適化するのではなく、その中間値の柱幅とすることで、1.5-10MRaysの全範囲の音響負荷に対してかなり高い（90%以上の）透過率が得られることも分かった。そこで、このPull-in ON時の接触面積の連続的な変化で音響インピーダンスマッチングを図るのではなく、Pull-in ONとOFFをスイッチ的に用いる方式を基本案として採用した。

本発見と考案方式は応用範囲が極めて広いと考えられるため、1.3の将来課題の発展性にて詳細に説明する。

(2) 要素課題2：MUTセルにおける空洞高さの高精度制御

(a)MUT型音響メタマテリアル試作で発生した不具合

平成31年度に実施したMUT型音響メタマテリアルの試作において、図1.2.2.1に示した不具合が発生した。不具合は下記の4つであり、(a)は製造装置が故障し、復旧に長期を要したことによる遅延であって、装置復旧により解消された。(b)から(c)は製造プロセスでの不具合であり、以下に原因と実施した対策とその結果、およびそこから得られた副次的成果を述べる。

- (a)MUT基板の製造装置の一部が故障し、復旧に2か月を要した
- (b)MUT基板の空洞形成後の水分除去のための熱処理で振動膜の破れ
- (c)深孔加工プロセスの加工条件決定が長期化
- (d)深孔加工後の後処理で柱部が破壊

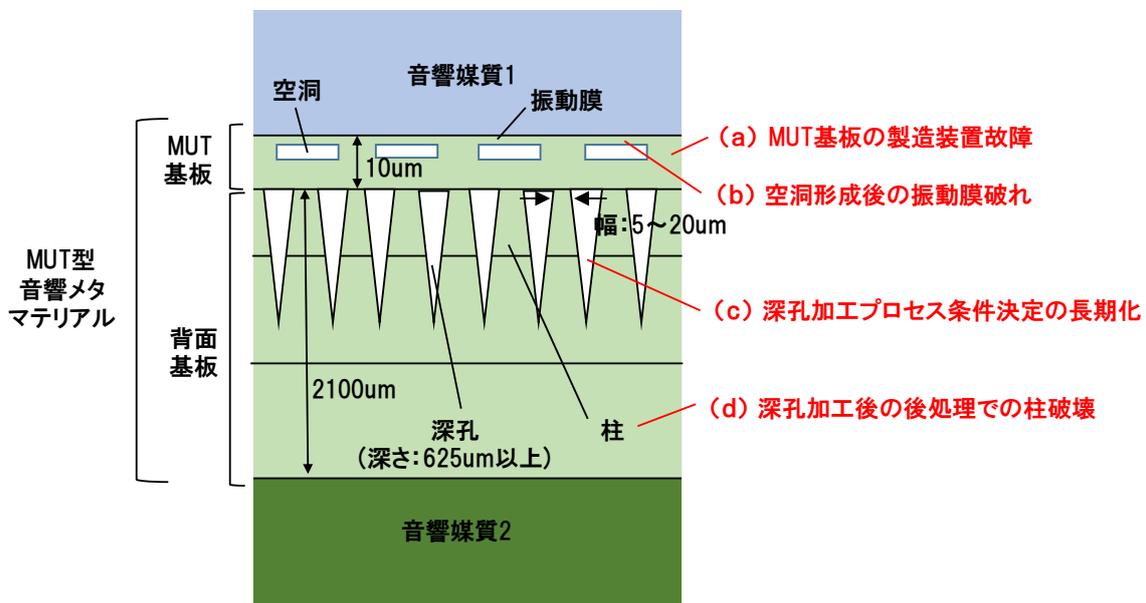


図1.2.2.1 MUT型音響メタマテリアルの断面模式図と発生した不具合

(b)MUT基板の空洞形成後の水分除去のための熱処理で振動膜の破れ

MUT基板の試作において、空洞を形成した後に空洞上のメンブレンの破れが発生した。図1.2.2.2に空洞を形成する製造プロセスとメンブレン破れの推定原因を示す。

空洞の型となる犠牲層をシリコン基板上に作製し、絶縁膜と電極を犠牲層の上部に形成した後に、薬液によって犠牲層のみを溶解、除去することで空洞とその上部のメンブレンを作製する。犠牲層を薬液で溶解した後は、残留薬液や水分を除去するためにMUT基板に対して熱処理を行う必要がある。この熱処理での熱応力によりメンブレンを構成する絶縁膜と電極が縮むことで、メンブレンが破れたと推定した。そこで、メンブレンを構成する絶縁膜と電極の成膜パラメータを調整することで膜質を変更し熱による縮みを抑制した。具体的には、SiO₂膜とSiN膜、電極膜の積層構造になっているメンブレンにおいて、それぞれの膜の応力を調整し、熱処理後も全体として歪が発生しない構造とした。再試作の結果、図1.2.2.3に示すように、メンブレン破れを抑制することができた。メンブレンを構成する膜の応力値は、デバイスの構造や各膜の厚さなどに依存するが、空洞上のメンブレンの破れを抑制するには、メンブレンを構成する膜の応力のバランスが重要であるという知見を得た。

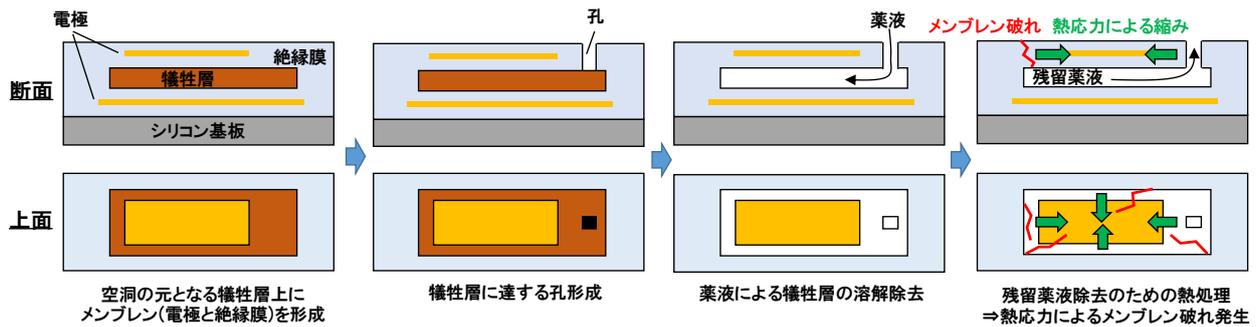


図1. 2. 2. 2 MUT基板の空洞形成プロセスとメンブレン破れの推定原因

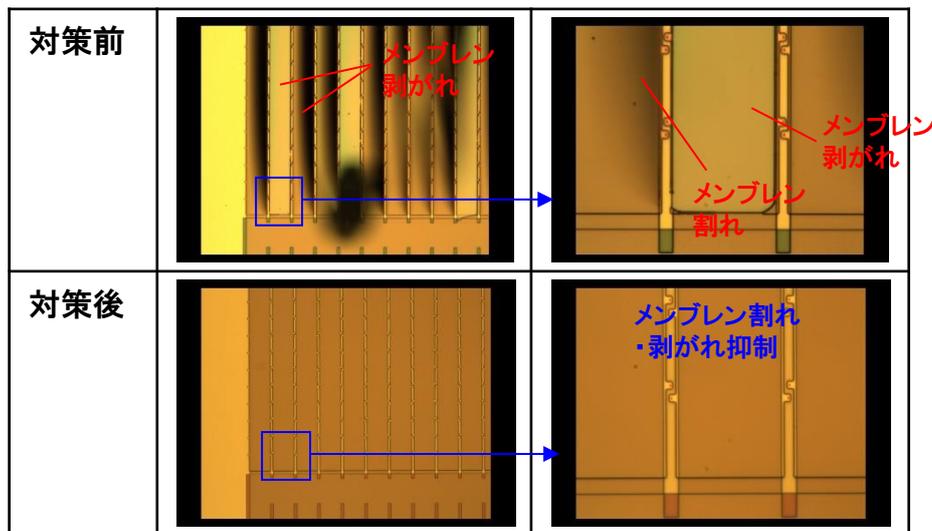


図1. 2. 2. 3 メンブレン破れ対策前後の矩形MUTセルの顕微鏡写真（上面）

(c) 深孔加工プロセスの加工条件決定が長期化

平成30年度に検討を実施した陽極酸化によるシリコン基板の深孔加工は、幅寸法が数 μm 以下の孔の加工に適しており、加工には数十時間といった加工時間を要するプロセスであった。一方で、実施項目1で平成30年度に行ったMUT型音響メタマテリアルの試作チップ設計において、背面基板へは幅が数十 μm の孔を加工することになった。そこで、陽極酸化のような特殊なプロセスによるシリコン基板の加工に代えて、ドライエッチングによりシリコン基板を加工する方針とした。設計された孔は、幅寸法が数十 μm で深さが850 μm 以上であり、孔のアスペクト比（深さ/幅）は数十となる。1mm近い深さのドライエッチング加工の実績はなかったが、孔のアスペクト比としては、半導体チップ製品で実績があるシリコン基板の加工プロセスでカバーできる範囲であったためである。ドライエッチングでの加工を行ったところ、加工深さに関しては850 μm 以上を実現できる見込みとなり、孔のアスペクト比が数十であれば、ドライエッチングにより1mm近い深さの加工ができることがわかった。一方で、図1.2.2.1に示したように孔の側壁にテーパ角を持たせた形状とすることは、半導体チップ製品では一般的に行っておらず、最適なテーパ角度(88°)を持った形状となるドライエッチング条件の決定に時間を要した。図1.2.2.4に最終的に採用した条件で加工した孔と、エッチング条件を決定する過程における孔の断面形状の電子顕微鏡写真を示す。ボッシュプロセスと呼ばれる、フロロカーボン膜のシリコン表面への堆積とシリコンのエッチングを

数秒毎に繰り返すプロセスで加工を行った。プロセス中のフロロカーボン膜の堆積とエッチングの時間比や、プロセスガスの圧力やガス種の比率等により孔の側壁のテーパ角度が変化して、逆テーパ形状から垂直形状、さらには、テーパ角が大きくなりエッチングが停止してしまうなど、加工形状がエッチング条件に依存して大きく変化した。最適なテーパ角度である88° とするために、サンプルのエッチングと断面形状の観察、エッチングでのパラメータの微妙な調整を繰り返して行った。最適なテーパ角度とするためには時間を要したが、1mm近い深い孔の加工において、エッチング条件の調整により逆テーパ形状からテーパ形状までのテーパ角度を高精度に加工できることがわかった。

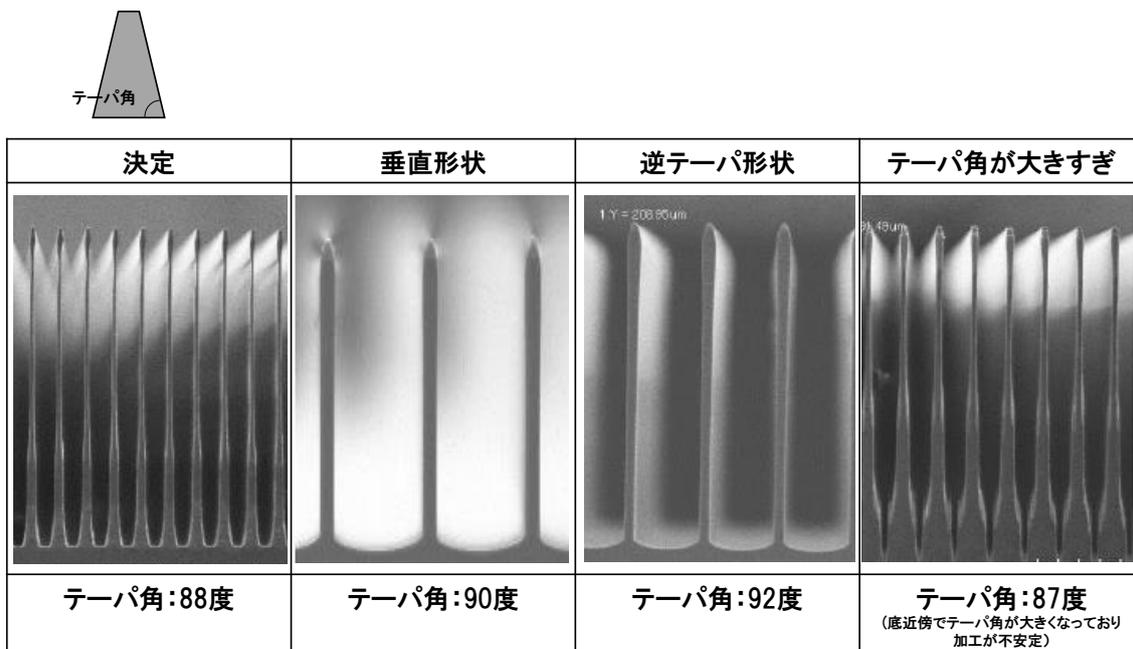


図1.2.2.4 深孔加工での孔形状の電子顕微鏡写真（断面）

(d) 深孔加工後の後処理で柱部が破壊

上述した深孔の加工条件によりシリコン基板の加工を行った後に、深孔加工時のマスク層であるSiO₂膜を除去するプロセス処理を行ったところ、深孔加工によってできた柱構造の破壊が発生した。図1.2.2.5に深孔加工後のSiO₂膜を除去するプロセス処理と柱構造破壊の推定原因の模式図を示す。フッ酸水溶液によるSiO₂膜の除去後に純水で置換を行い、乾燥するプロセスであるが、純水が掃除する際の水の表面張力によって柱構造に力が印加され破壊されたと推定した。水の表面張力が柱構造の曲げ剛性よりも大きく、柱構造の破壊に至るメカニズムである。柱構造の曲げ剛性はデバイスの構造設計として変更ができない。そこで、柱構造に印加される表面張力を下げるために、フッ酸水溶液ではなく、フッ酸蒸気を吹き付けることによるSiO₂膜の除去を行った。その結果を図1.2.2.6に示す。フッ酸蒸気による除去であり、表面張力が柱構造に印加されることないため柱構造の破壊が抑制されたことを確認した。フッ酸蒸気によるSiO₂膜の除去は、MEMSデバイス製造の分野では、厚さ数μm以下の薄い犠牲層を用いて空洞とメンブレンを形成する際に適用されるプロセスであるが、本検討のようなSi基板に深い孔を加工することで、今回の柱構造のような微細なSi構造を形成する場合にもフッ酸蒸気によるSiO₂膜の除去が効果的であることがわかった。

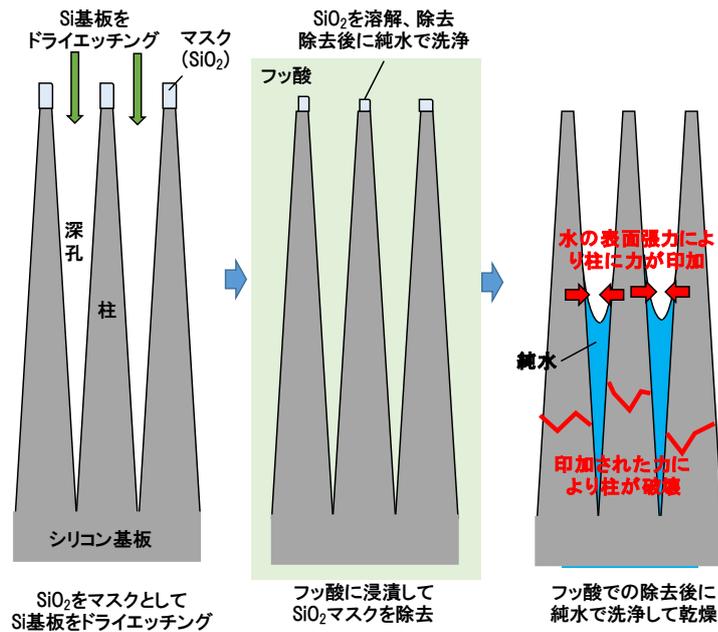


図 1. 2. 2. 5 深孔加工後の後処理と柱構造破壊の推定原因の模式図

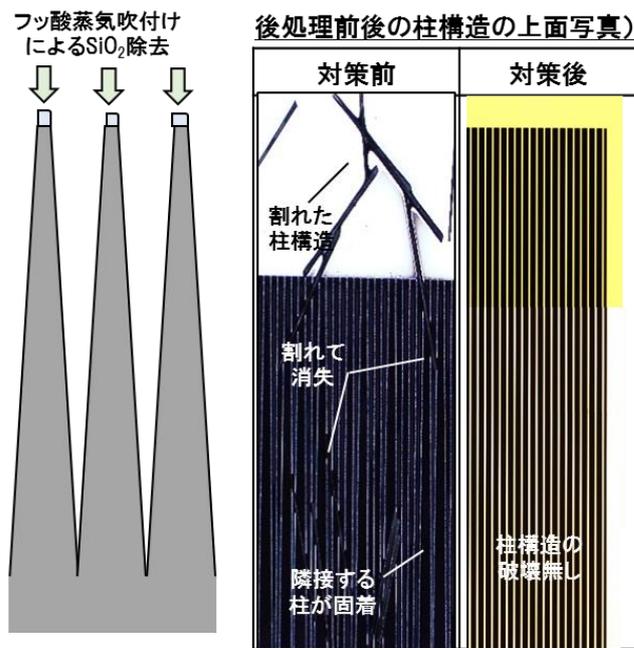


図 1. 2. 2. 6 柱構造破壊の対策プロセスと対策前後の柱構造写真

(3) 要素課題 3 : 水中環境下における材料選定

特筆すべき事項は特にない。

(4) 要素課題 4 : MUT 型音響メタマテリアルの減衰率評価

特筆すべき事項は特にない。

(5) 評価

特筆すべき事項は特にない。

1. 3 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

（1）非破壊検査，空中音響関連分野での発展性

非破壊検査分野や医療分野においては，多様な測定対象物が存在する。非破壊検査分野では水やプラスチックなどの固有音響インピーダンスが低い物質から，コンクリートや金属などの固有音響インピーダンスが大きなものまでが評価対象となる。医療分野では，軟組織はほぼ水に近い物性であり，現在のところ軟組織しか評価対象となっておらず，頭蓋骨などの骨がある場合などはほとんど音波が表面で反射され検査することができない。

本研究では，アクティブ制御性を最終目標としたが，図1.1.1.19(c)に示したとおり，その前段階の非アクティブ状態においても水の固有音響インピーダンスである1.5MRaylsから骨（7～8MRayls），樹脂（2～3MRayls），コンクリート（9～10MRayls）やマグネシウムのような軽金属（10MRayls）の固有音響インピーダンスをカバーする10MRayls程度まで高効率かつ広帯域に透過が可能，すなわち音響インピーダンス整合が可能，音響メタマテリアル構造を見出し，また設計手法も確立した。10MRaylsより大きく離れた物性については，詳細に検討はしていないが，そもそも高い固有音響インピーダンスの材料は圧電セラミックスの固有音響インピーダンス（20～30MRayls）と大きな乖離がないため，音響インピーダンス整合性において大きな課題になっていない。本研究の目標設定についてはこのことも考慮し，より大きな音響インピーダンスの差が存在する領域をターゲットとした。

また，周波数の低い可聴域においても音響的な制御が可能となれば様々な応用が考えられる。例えば，音楽ホールや映画館などは音響的な反射を考慮した設計がなされているが，演奏する楽器や楽曲に合わせた反射状態を制御することで，臨場感などの音響的な効果をより高めることが可能になる。あるいは，自動車などの騒音対策として，今回見出した共振周波数における全反射モードなどを使えば，エンジンルームの音の閉じ込めや，走行音や風切り音の室内への侵入の抑制なども可能な音響シートの実現の可能性もある。

一方，本研究で示した音響メタマテリアルの実用化における課題としては，（実施項目2）で検討したように，特に柱構造が長くなることにより，極めて高い縦横比（アスペクト比）となることで製造上の安定性が求められる点である。また，アクティブ化によって各固有音響インピーダンスに理想的な音響インピーダンスマッチングが可能となれば，より高い性能で多様な材料に一つの設計で対応可能となり，より用途が広がるものと考えられる。

（2）水中音響分野での発展性

（a）音響スイッチ

要素課題1の平成30年度の成果であるPull-in ONとPull-in OFFのスイッチング制御により，音響整合状態と非整合状態の切り替えできるMUT（以下，音響スイッチとする）を提案する。

図1.3.2.1の破線部に示すようにPull-in ONで全透過，Pull-in OFFで全反射状態となる。

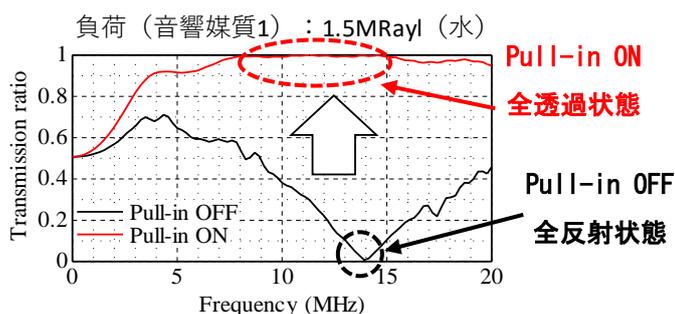


図1.3.2.1 Pull-in ONとOFF時の音響透過率

間接的な成果となるが、この現象を応用することで水中用ソナーの低周波化、小型・軽量化に資する成果が期待できる。

水中用ソナーは、医療用超音波診断装置と比較し、その対象レンジが長い為、音波伝搬損失の小さな低周波で運用する。音波を送受波するセンサに、医療用超音波診断装置では通常圧電セラミックスの $\lambda/2$ 厚み共振を利用しているが、周波数が低くなると波長 λ が長くなるため、センサが大きくなってしまふ。そこで、水中用ソナーのセンサ(特に遠距離全周スキャンニング用)は、図1.3.2.2に示す圧電セラミックスの両端にマスを負荷したトンピルツ振動子(Tonpiltz transducer)をよく利用し、全周のスキャンニング、分解能向上のため図1.3.2.3に示す円筒アレイ状に配列する。また、トンピルツ振動子の感度は、送受共に比較的高感度で、送受兼用センサとして利用でき、送受分離方式よりも小型化に有利とされていたが、昨今、更なるレンジ延伸化のニーズが高まり、これに合わせて使用周波数の低周波化が求められている。トンピルツ振動子も厚み振動を利用してゐるため、低周波化すればするほど振動子の寸法・質量は大きくなる。

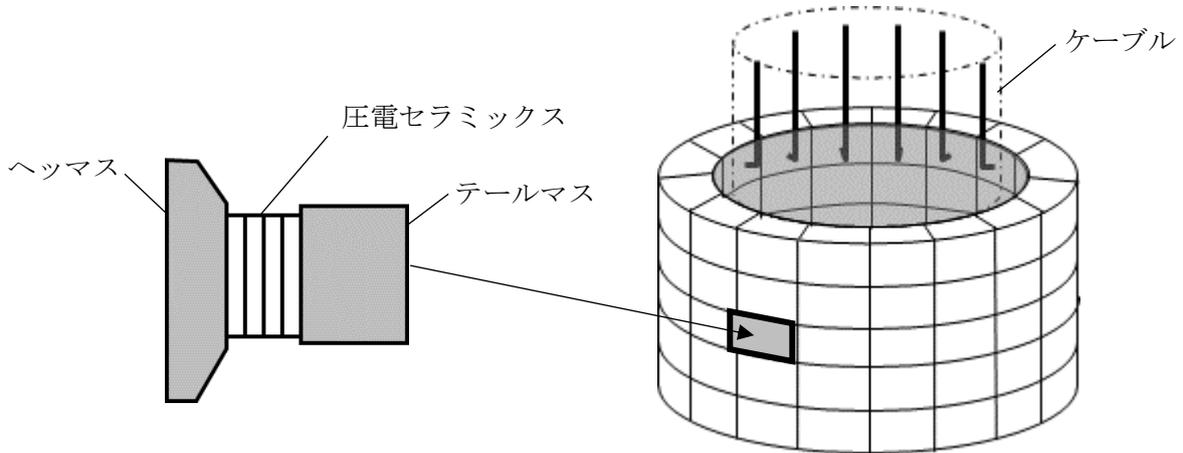


図1.3.2.2 トンピルツ振動子

図1.3.2.3 円筒アレイ

そこで、諸外国では、送波器の低周波化、小型・軽量化用の振動子として、フリーフラッドリング振動子(図1.3.2.4)あるいは屈曲振動子(図1.3.2.5)を採用している。フリーフラッドリング振動子は円筒振動子の内部に水が入るようになっており、円筒振動子内部の水の共振と円筒の共振モードを利用し音波を送波する方式で、屈曲振動子は圧電セラミックスを楕円形のシェルに装着し、圧電セラミックスの厚み振動を屈曲振動(シェルの屈曲共振モード)に変換して音波を送波する方式である。しかしながら、これらの方式は、トンピルツ振動子と比較し、受波感度が低いため受波用に別のアレイが必要になる。

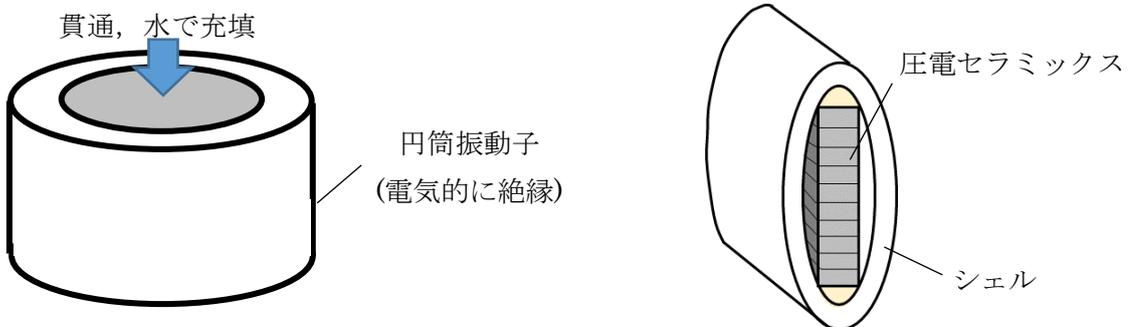


図1.3.2.4 フリーフラッドリング振動子

図1.3.2.5 屈曲振動子

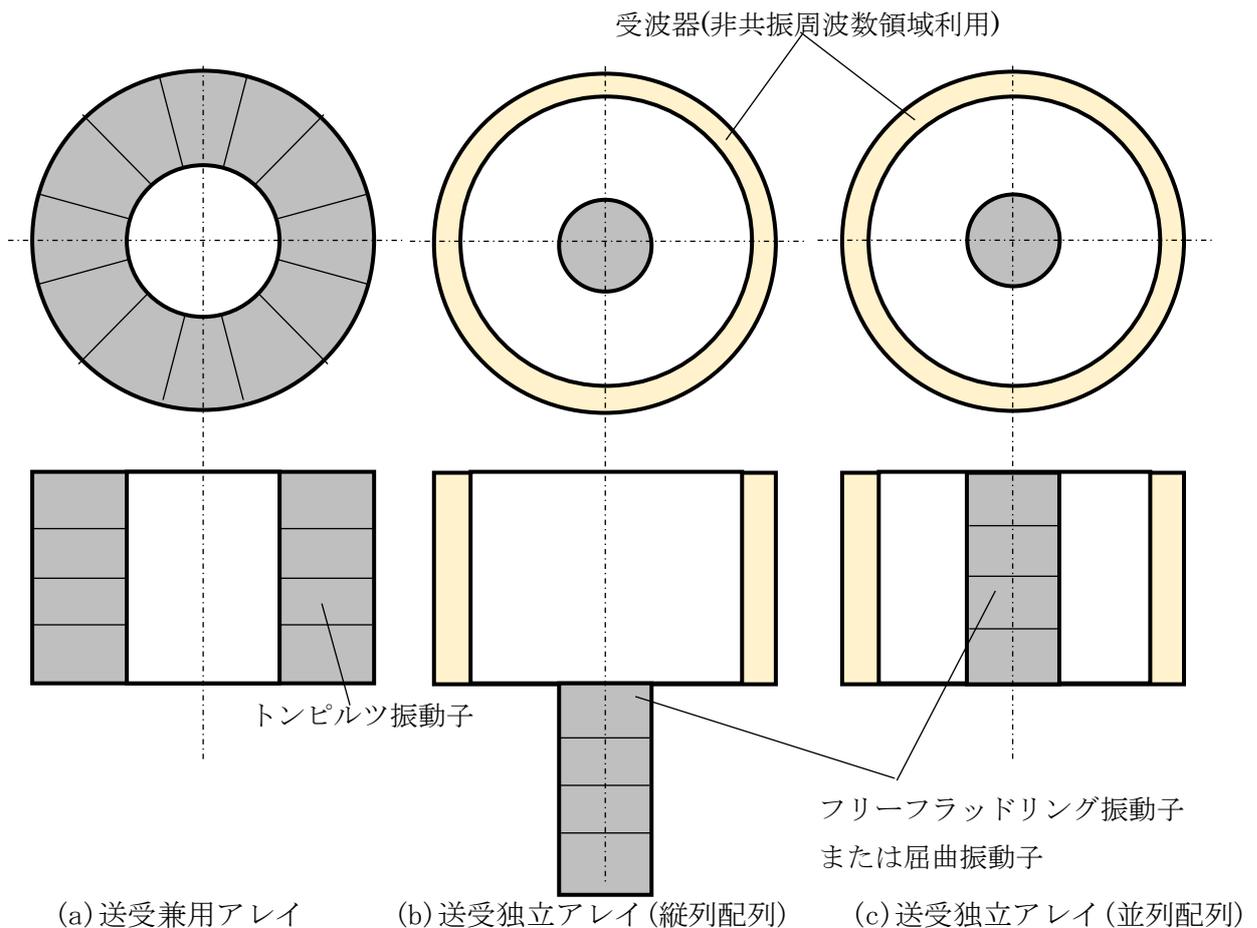
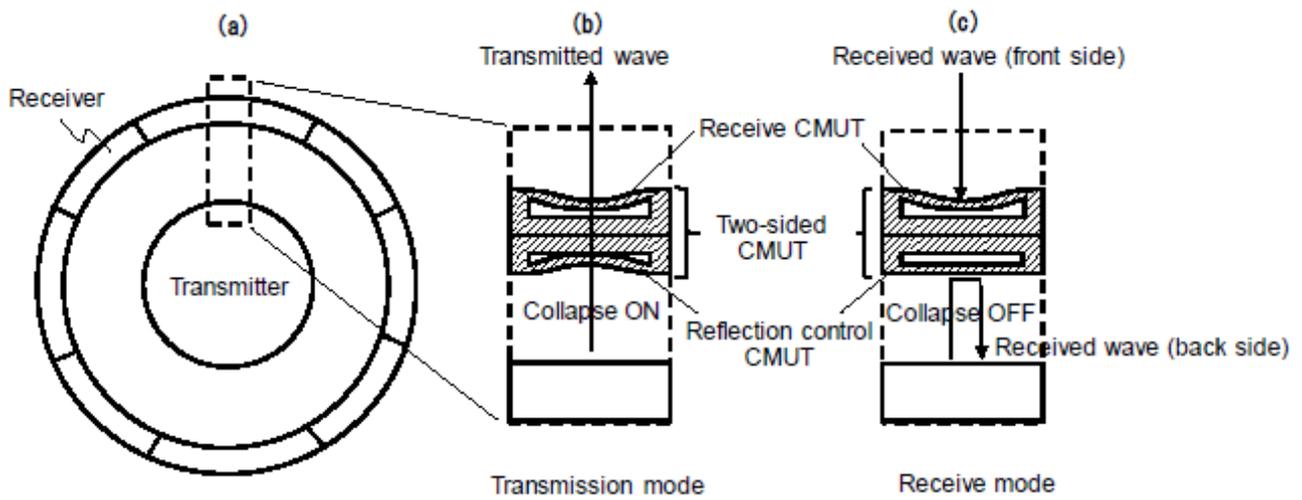


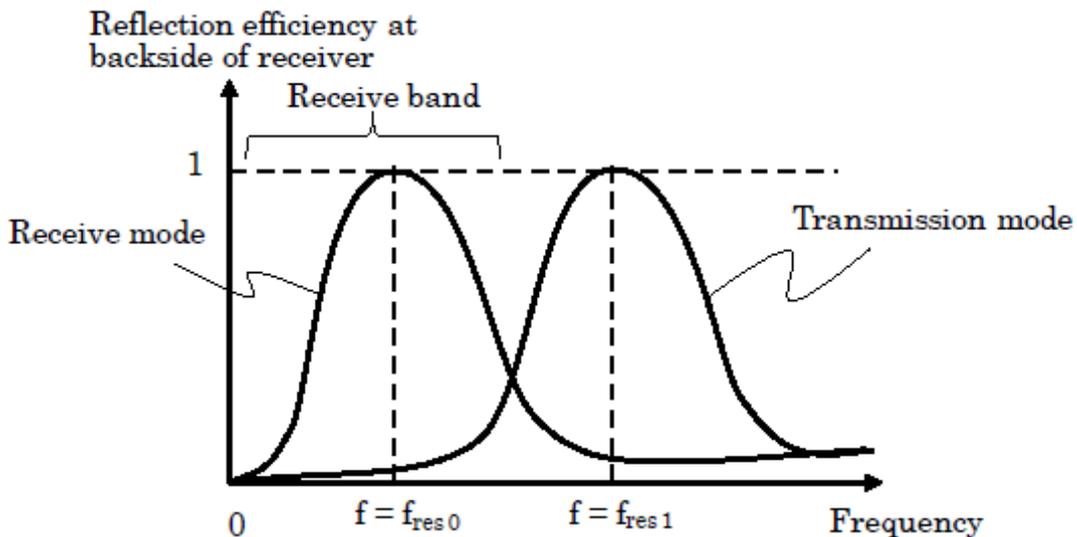
図 1.3.2.6 アレイ配列パターン

圧電セラミックスを受波専用で使う場合、共振を使わずとも共振周波数より低域の周波数ではフラットで高感度を実現できるため、薄く小型化ができる。トンプルツ振動子でアレイを構成した場合を図 1.3.2.6(a)に、フリーラッドリング振動子あるいは屈曲振動子と薄型受波器でアレイを構成した場合を図 1.3.2.6(b), 1.3.2.6(c)に示す。送波する音波の波長に対して十分小さな受波器であれば、受波器が送波時の音波を透過できるので、図 1.3.2.6(c)の構成が実現でき、低周波化、小型・軽量化に資する水中ソナー用アレイが実現できる。ここでの技術課題は、受波時の受波器背面(送波器中心)方向からの音の遮音である。受波器が音を透過するだけだと、受信時の音波も透過してしまい、透過した音波やアレイ内部での反射波が反対方向の受波器に到来し S/N が劣化する。この課題解決のために音響スイッチの適用を提案する。

Pull-in OFF で全反射状態となる周波数は、振動膜の共振周波数と一致している。これは振動膜の共振付近は定在波が立ち大きく振動するため、媒質と接している振動膜から直ちに媒質側に音波が再放射されるためである。あるいは、等価回路的な観点からは、共振周波数では振動膜の機械インピーダンスがゼロになり、自由端に見えるため媒質からの音波が反射するという理解も可能である。一方、Pull-in 振動膜の共振周波数はコラプス前に比べて高い周波数帯にシフトする。これに伴い、共振周波数付近の音波はそれまで高い反射状態から透過状態へと移行する(図 1.3.2.7)。本現象を利用し、バイアス電圧による Pull-in と Pull-off のスイッチング制御を行うことで、透過状態(Pull-in ON = Collapse ON)と反射状態(Pull-in OFF = Collapse OFF)を制御する。



(a)Sonar structure (b)Transmisson mode (C)Receive mode



(d)Acoustic Switch Principle

図 1.3.2.7 音響スイッチの原理概要

本音響スイッチ実用化のための今後の課題は、CMUTの低周波化と耐水圧にある。本研究では、超音波周波数範囲 5MHz~10MHz ターゲットに研究を進めているため、水中用ソナーの適用周波数範囲(約 1/1000)で共振する振動膜と運用水圧に耐える設計が必要と考える。

(b)音響ディスプレイ

音響スイッチの原理を応用した音響ディスプレイ、音響迷彩を提案する。音響スイッチの ON, OFF で音響透過率が変化することを示したが、ON(全透過)と OFF(全反射)の 1, 0 ではなく、反射強度が 1 と 0 の間、青い領域が存在する(図 1.3.2.8)。この範囲は、音響スイッチの ON, OFF の MUT 数の割合で変化する。

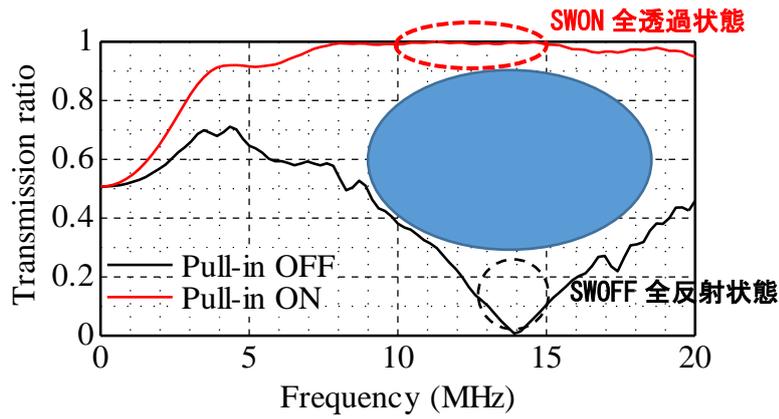


図 1.3.2.8 音響反射強度の可変範囲

水中において、水中物体の遠距離での可視化に、減衰の大きな光よりも、減衰の小さい音響を用いる。音響の可視化では、音響の反射強度の大小で輝度を表現するため、水中物体の表面に音響反射強度の異なるシートをはるることにより、物体形状をごまかすことができ、また電氣的に制御できれば、海底の残響ごとにマッチさせる音響迷彩のような効果が期待できる (図 1.3.2.9)。

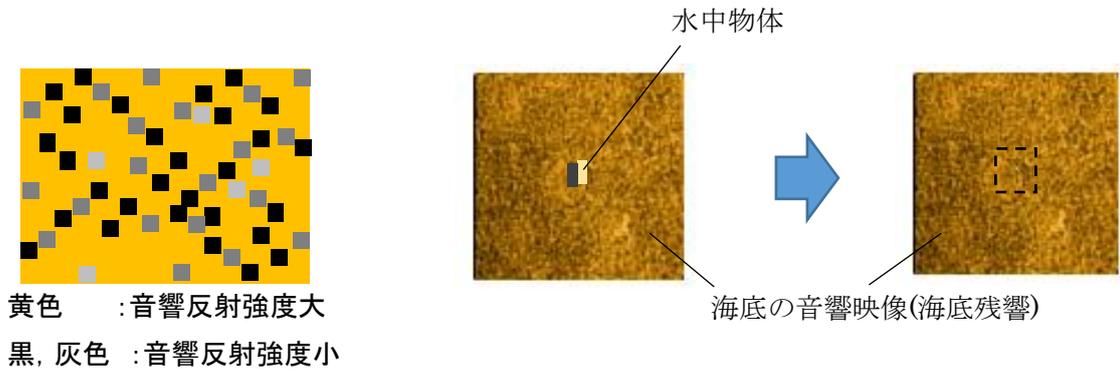


図 1.3.2.9 音響ディスプレイ, 音響迷彩 (イメージ図)

実現する上での今後の課題は、音響スイッチと同様、水中用ソナーの適用周波数範囲(約 1/1000)で共振する振動膜と運用水圧に耐える設計及び反射強度(輝度)を制御するための、適用周波数に対する音響スイッチの ON, OFF の MUT 数の割合と輝度の関係のデータ取得, 調整が必要と考える。

1. 4 論文, 特許, 学会発表等の研究の成果

国内外の2本の論文投稿を行い採択・掲載された。アクティブ性を含む音響メタマテリアルの基本原理について特許出願した。また、本研究の成果を国内のMEMS関連や音響関連の主要学会にて発表した。nano tech 2020における防衛装備庁 安全保障技術推進制度ブースに出展し、研究成果ならびに安全保障技術研究推進制度について広報活動を実施した。特に、安全保障技術研究推進制度の制度そのものに興味のある大学関係者、企業の研究者に多く接することができ、その後も継続的なやりとりが生まれるなど、認知度向上と幅広い応用研究へとつながった。

1. 5 研究実施体制とマネジメント

研究者がすべて日立製作所社員であり、メール、社内Web会議システム、アクセス制限のある共有フォルダ使った研究者間でのデータ共有化など社内の情報インフラを十分活用した。また、シミュレーションを実施するにあたり、理論や基本設計を研究者が行い、プログラミングやデータ管理を専門の派遣外注を使うことで作業分担し多くの内容を検討することを可能とした。以上のような効率的な研究マネジメントを推進した。

1. 6 経費の効率的執行

経費の効率的な執行のため、日立製作所内の資産(半導体製造設備, FEM解析ソフト, 解析・音響・耐環境評価用実験設備)を有効に活用し、経費節減に努めた。研究者の拠点が横浜と国分寺の2拠点に分散しているが、各拠点の経費担当者間の情報の共有化、社内共通の原価管理手順に従い、経費の管理に努めた。

2. 平成31年度（報告対象年度）の実施内容

2.1 平成31年度の実施計画

(1) 実施項目1：MUT構造モデルの構築に関わる研究

前年度（平成30年度）の（実施項目2）で構築した製造プロセス及び前年度（平成30年度）の（実施項目3）で選定された材料・方式を反映し、（実施項目2）で試作するMUT型音響メタマテリアルの詳細設計を行う。また、試作されたデバイスについて（実施項目5）で実測する評価結果と、前年度（平成30年度）の（実施項目1）で行った詳細設計シミュレーション結果を比較し、両者の結果の差異について原因分析を行う。続いて、原因分析の結果に基づき、シミュレーション内容及び試作方法のそれぞれに修正を加え、（実施項目2）の試作デバイスに対する再設計を行う。次に、（実施項目2）にて再試作したデバイスについて、（実施項目5）において最初の評価と同様な評価を行い、修正内容の妥当性の確認を行う。

(2) 実施項目2：薄膜内部応力の高安定性成膜技術の開発に関わる研究

前年度（平成30年度）の（実施項目1）にて設計したMUTセルの詳細設計シミュレーションによる微細構造に基づき、同じく前年度（平成30年度）の（実施項目2）で構築した製造プロセスの変動に対してロバストな高精度空洞形成プロセスにより、MUT型音響メタマテリアルの試作を行う。また、試作したデバイスの（実施項目5）での評価結果に基づいて（実施項目1）で行う再設計を反映し、MUT型音響メタマテリアルの再試作を行う。

(3) 実施項目3：水中環境下における材料選定に関わる研究

（実施項目5）でMUT型音響メタマテリアルの水中における音響インピーダンスの可変制御性を検証することで、前年度に選定した材料・方式について水中での絶縁性を確認する。

(4) 実施項目4：MUT型音響メタマテリアルでの減衰率評価に関わる研究

シミュレーションと実測との減衰率（入射波から透過波と反射波を差し引いた振幅の、入射波の振幅に対する割合）の差異が±10%以下となることを目標に、前年度（平成30年度）の（実施項目1）で構築した詳細シミュレーションモデルを精緻化する。また、MUT型音響メタマテリアル内部の複数の点における音波伝搬過程を精緻化した詳細シミュレーションモデルを用いて調べることにより、MUTセルの設計パラメータ（MUTセルの空洞幅、空洞高さ及び薄膜メンブレン厚、また背面基板のリム幅及び長さ）の透過率に対する影響について、定量的に明らかとする。

(5) 実施項目5：試作したMUT型音響メタマテリアルによる検証

前年度（平成30年度）の（実施項目1）の詳細設計結果に基づき、（実施項目2）で試作するMUT型音響メタマテリアルを用いて、MUTセルの物理モデルの精度向上に資するために前年度（平成30年度）の（実施項目4）で確立した減衰率評価手法により、MUT型音響メタマテリアルによる音響インピーダンスのアクティブ制御について機能の検証を行う。具体的には、（実施項目2）で試作したデバイスに水中において音波を入射し、反射波から内部への透過率を算出する。また、算出した透過率から、音響インピーダンスがアクティブに変化することを確認する。

なお、音響インピーダンスのアクティブ制御に関する目標性能は、音響インピーダンスの可変制御範囲は1.5~10Mrayls、計測超音波周波数は5~10MHzとする。また、超音波周波数範囲については、前年度（平成30年度）の（実施項目1）で得られた知見（透過効率を向上するための設計指針など）を基に詳細シミュレーション等によって拡張性を検討する。

(6) プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、定期的に研究従事者が集まって(毎月1回以上)研究開発会議を実施して進捗を確認するとともに、サーバー上にアクセス制限を行った共有フォルダを設定し、データの即時共有を図る。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知する。

2.2 平成31年度の研究実施日程

表2.1 研究実施日程

業務項目	実 施 日 程												
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
(1) (実施項目1) MUT構造モデルの構築に 関わる研究	→												
(2) (実施項目2) 薄膜内部応力の高安定 性成膜技術の開発に関 わる研究	→												
(3) (実施項目3) 水中環境下における材 料選定に関わる研究												↔	
(4) (実施項目4) MUT型音響メタマテリア ルの減衰率評価に関わ る研究												↔	
(5) (実施項目5) 試作したMUT型音響メタ マテリアルによる検証												↔	
(6)プロジェクトの総合 的推進	→												
研究開発会議の実施 ()内回数	△(1)		△(1)		△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(4)		△(2)

2.3 平成31年度の研究成果の説明

(1) 実施項目1：MUT 構造モデルの構築に関わる研究

試作品検証に向けては二つのステップで進めることとした。はじめに MUT 構造によるアクティブ制御性を含まない簡易的な構造にて基本原理の検証を行い、次に前年度（平成30年度）の（実施項目2）で構築した製造プロセス及び前年度（平成30年度）の（実施項目3）で選定された材料・方式を反映した最終形の MUT 型音響メタマテリアルの検証を行う。（実施項目1）では、「簡易型音響メタマテリアル」と「MUT 型音響メタマテリアル」の最適設計を行い、（実施項目2）の試作へと反映した。尚、当初計画では、シミュレーション結果と実験結果の差異の原因分析を行う予定であったが、実施項目4と重複するため、実施項目4に含めた。

(a) 簡易型音響メタマテリアルの詳細設計

基本原理検証に向け「簡易型音響メタマテリアル」を設計した。図 2.3.1.1 に「簡易型音響メタマテリアル」のシミュレーションモデルと設計パラメータであるメンブレン基板厚の透過率への影響を示す。簡易型では MUT 特有の空洞構造が無く、バイアス電圧制御によるアクティブ性はないが、シンプルな構成のため、メンブレン構造と柱構造による本研究の基本構造による音響インピーダンス整合原理と製造プロセスの新規要素の確認ができる。本構造における設計パラメータはメンブレン基板厚のみであり、柱構造は後述する (b) の MUT 型音響メタマテリアルと同じである。図 (b) に透過率のメンブレン基板厚依存性を示す。すでに平成30年度の実施項目4で明らかにしたように（図 1.1.4.8）、柱に接触する基板厚は透過率の高周波側特性に影響を及ぼす。本シミュレーションでは基板厚を 10, 20, 30 μm と変え計算したところ、評価対象周波数である 10MHz まで理想的な特性が得られるのは 10 μm であることがわかった。ただし、20 μm であっても透過率約 0.9 (90%) と高いレベルを持つ。製造プロセス上の技術的限界次第のところもあるため、目標を厚さ 20 μm 以下、望ましくは 10 μm と設定した。

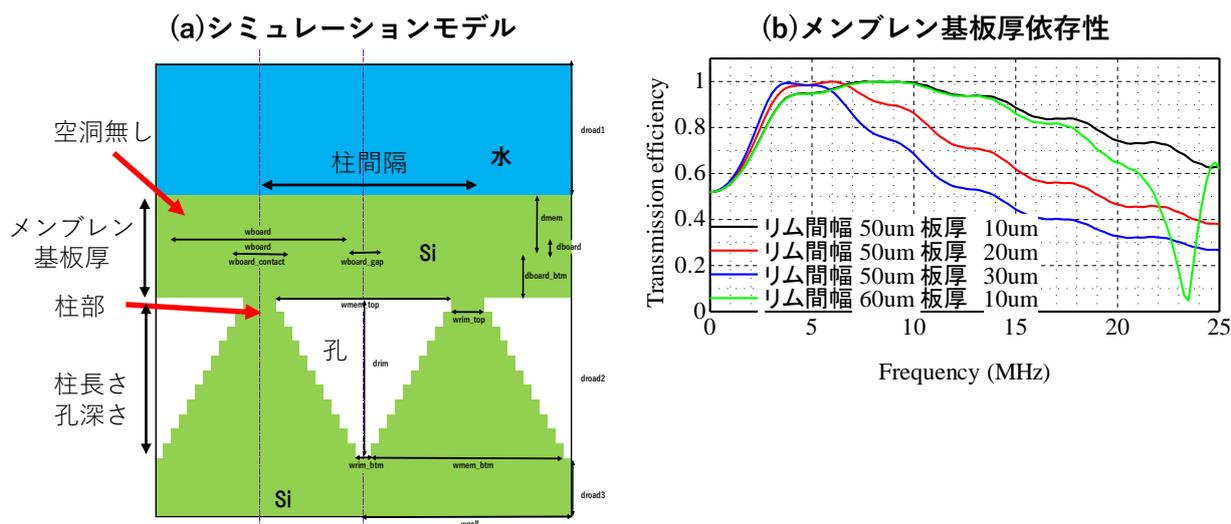


図 2.3.1.1 簡易型メタマテリアルのシミュレーションモデル

(a) : シミュレーションモデル, (b) : 透過率のメンブレン基板厚依存性

(b) MUT 型音響メタマテリアルの詳細設計

平成30年度の(実施項目1)で得られた設計値と実施項目2の製造プロセス上の制約および実施項目4で得られた材料の減衰特性を加味して、試作品向けの詳細設計と音響特性のシミュレーション評価を行った。図2.3.1.2にシミュレーションモデルと材料物性値を示す。設計に際し、セルの形状として矩形と正六角形の2種類を想定した。正六角形については、シミュレーション上は円形モデルで近似した。また、想定する音響負荷としては、ターゲットが1.5-10MRaylsであるが、実験環境上の制約から水(1.5MRayls)を中心に評価する方針として、1.5MRaylsに最適な設計と、平成30年度(実施項目1)で示した。音響インピーダンス制御方式2の1.5-10MRayls平均として最適な設計の2種類を行った。設計パラメータとしては、空洞幅、空洞高さ、メンブレン膜厚、柱長さがある。柱長さについては目標帯域が5-10MHzであることから低周波側のカットオフとして5MHzと設定し、その波長の1/2である870um固定とした。空洞幅は平成30年度の(実施項目1)の結果から、50um前後が最適であるが、製造プロセス上のリスクから、それよりもやや大きいセルサイズを加え、矩形および円形でそれぞれ2種類のサイズを評価した。空洞高さは同じく平成30年度(実施項目1)の中で絶縁膜破壊が起こらさずに十分にメンブレンが空洞下部基板に接触可能(目標接触率50%)となるよう、50nmと設定した。残るパラメータとしてメンブレン膜厚であるが、これについてはPull-inのONとOFFの制御においてもっとも差が生じことを狙い、評価帯域の5-10MHzの帯域中心である7.5MHzに共振周波数が設定されるよう調整する方針とした。メンブレン膜厚はメンブレンの最上部のSiN層にて調整することとし、4種の厚さで検討した(0.0, 0.4, 0.8, 2.0um)。さらに追加検討として、柱のMUT構造に対する位置関係について、MUTの空洞構造中心に接触させる場合とMUTのメンブレン構造を支える周囲の壁(リム部、空洞端部)に設置する場合の2通りを検討した。以上、まとめると、設計構造として矩形と正六角形(2種)×セルサイズ(2種)×柱構造位置(2種※矩形のみ)×メンブレン膜厚(4種)のパラメータについて網羅的な解析を行った。

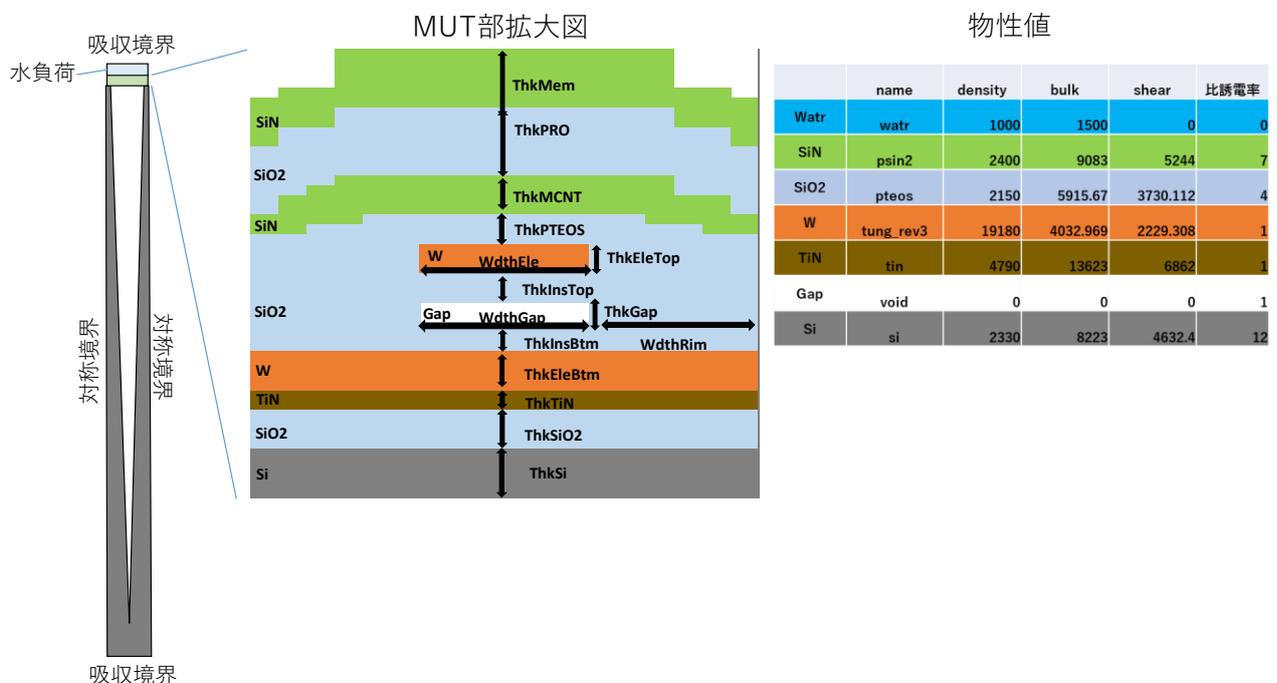


図 2.3.1.2 試作品詳細設計シミュレーションモデル

(a) : シミュレーションモデル, (b) : 物性値

柱位置:MUTセルリム部(空洞端部)

柱位置:MUTセル空洞中心

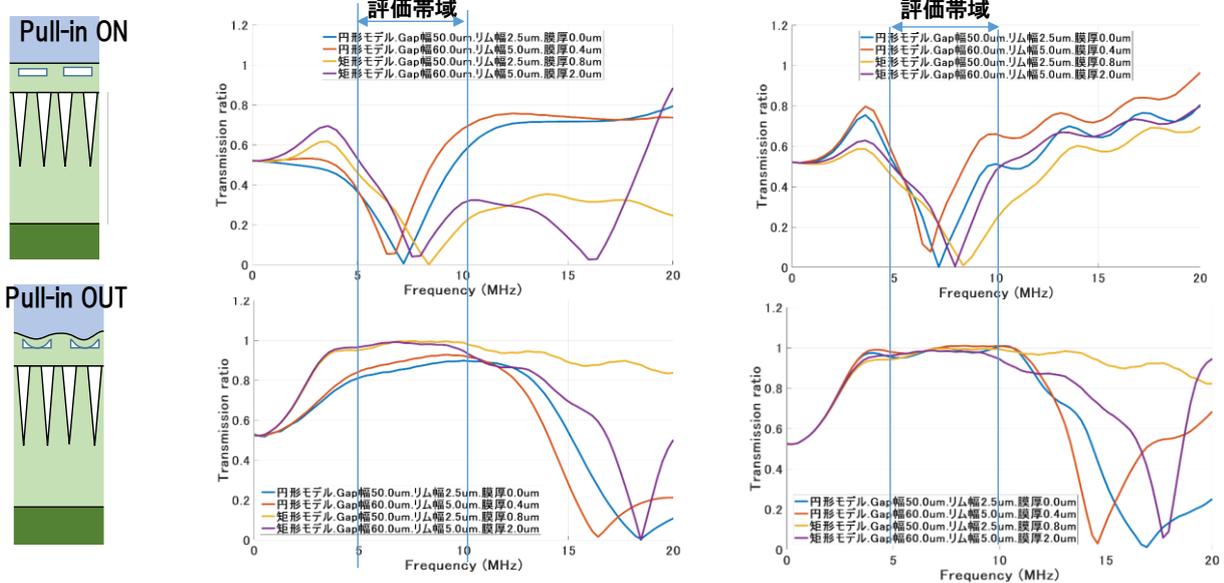


図 2.3.1.3 試作品詳細設計シミュレーション結果 1 (音響負荷 1.5MRayls)

柱位置:MUTセルリム部(空洞端部)

柱位置:MUTセル空洞中心

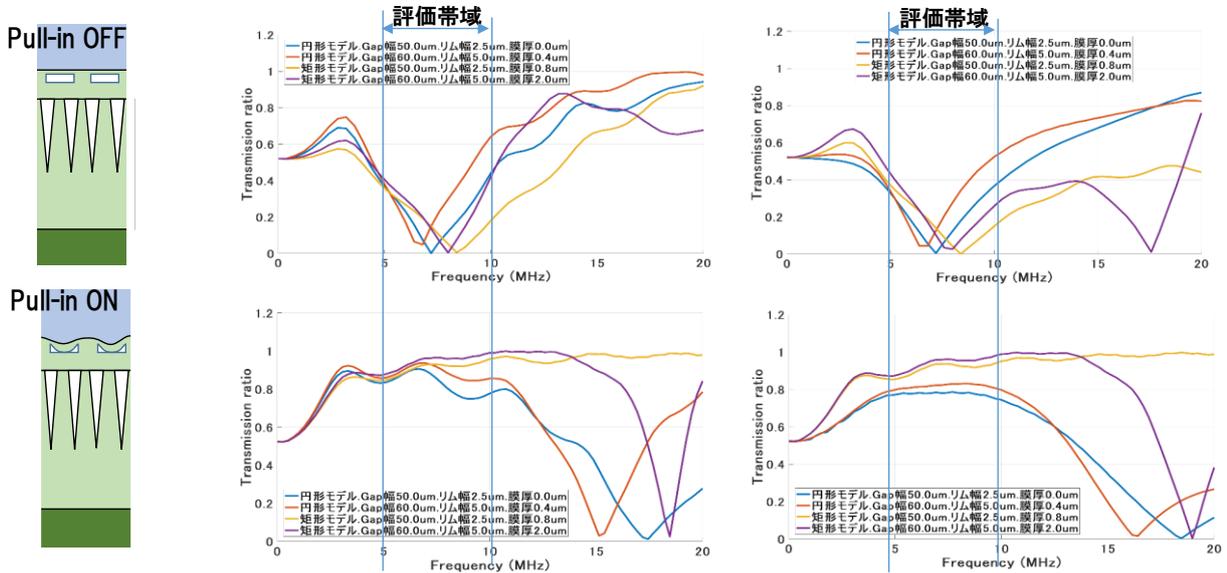


図 2.3.1.4 試作品詳細設計シミュレーション結果 2 (音響負荷 1.5-10MRayls 平均)

図 2.3.1.3 および図 2.3.1.4 に設計した構造における Pull-in ON および OFF 時の透過率特性を示す (図 2.3.1.3 が水負荷 1.5MRayls, 図 2.3.1.4 が音響負荷 1.5-10MRays 平均)。また参考結果として図 2.3.1.5 に共振周波数, 図 2.3.1.6 にメムレン接触率の結果を示す。共振周波数の結果から, 評価帯域中心である 7.5MHz あたりに共振周波数となるメムレン厚さを矩形セルと円形セルから選択し, その結果を透過率の結果に示している (図 2.3.1.5 にサークルで示している)。図 2.3.1.3 および図 2.3.1.4 の結果から, Pull-in OFF ではおおむね狙った 7.5MHz に透過率が極めて低い (ほぼ全反射の) 領域ができており, Pull-in ON のときに, 高い透過率となっている。音響負荷が 1.5MRayls

と 1.5-10MRayls の平均値の比較では、より最適な 1.5MRayls の方が高い値傾向を示すが、1.5-10MRayls 平均であっても、パラメータによってはかなり高い透過率値を示すものが確認された。また、柱位置の依存性は大きくなかったが、メンブレン中心位置の場合がより特性がフラットで安定していた。本結果より、評価帯域 (5-10MHz) において最も ON と OFF の差が大きく、ON 時の透過率が高いものを選定し、設計値とした。その結果を表 2.3.1.1 に示す。また、図 2.3.1.6 のメンブレン接触率は決定した設計値における結果を示しているが、絶縁膜の破壊電界(400V/um)以下において、すべての設計構造が目標値である接触率 50%以上を実現し、メンブレンの接触が十分可能である。

以上の最適設計結果を(実施項目2)の試作プロセスへと反映させた。ただし、試作プロセスの検討プロセス上、特性に顕著な影響がない範囲において多少の設計値の変更は適宜行うものとする。

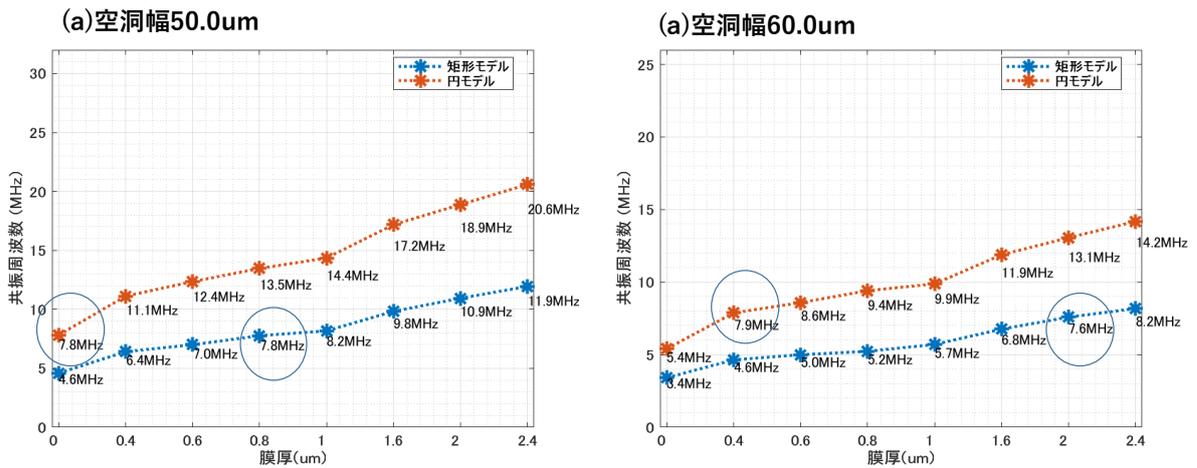


図 2.3.1.5 試作品詳細設計シミュレーション (共振周波数)

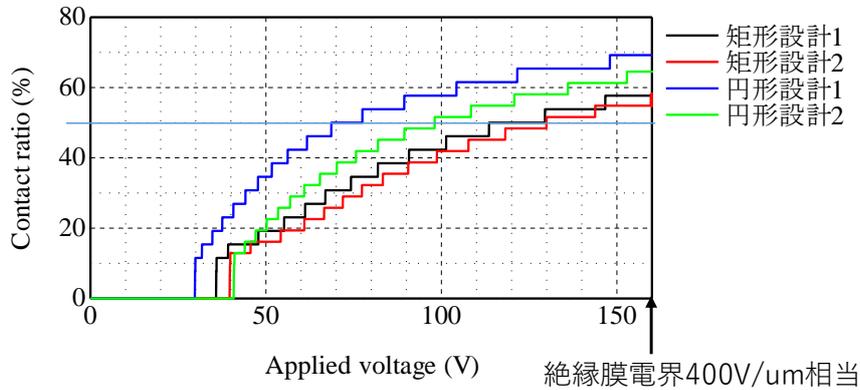


図 2.3.1.6 試作品詳細設計シミュレーション (接触率)

表 2.3.1.1 MUT 型音響メタマテリアル試作品推奨設計値

形状	空洞幅 (um)	セルリム幅 (um)	膜厚 (um)	柱幅(矩形), 柱直径(円形) (um) ※柱は空洞中心
矩形 1	50	2.5	0.8	1.5MRay:3.9, 1.5-10MRay 平均: 14.9
矩形 2	60	5.0	2.0	1.5MRay:4.8, 1.5-10MRay 平均: 18.5
円形 1	50	2.5	0	1.5MRay:14.3, 1.5-10MRay 平均: 28.0
円形 2	60	5.0	0.4	1.5MRay:17.7, 1.5-10MRay 平均: 34.7

(2) 実施項目2：薄膜内部応力の高安定性成膜技術の開発に関わる研究

平成30年度の(実施項目2)で構築した製造プロセスの変動に対してロバストな高精度空洞形成プロセスにより、(実施項目1)で設計を行った簡易型音響メタマテリアルとMUT型音響メタマテリアルの試作を行った。しかし、1.2項(2)で述べた試作における不具合とその対策に時間を要したことにより試作が遅延し、簡易構造型音響メタマテリアルは完成したものの、目標構造であるMUT型音響メタマテリアルは未完成に終わった。以下、(a)簡易型音響メタマテリアルと(b)MUT型音響メタマテリアルの試作結果について述べる。

(a)簡易型音響メタマテリアルの試作

図2.3.2.1に簡易型音響メタマテリアルの設計断面構造を示す。最表面のメンブレン基板の厚さは10 μm である。また、背面基板はMUT型音響メタマテリアルと同様であり、溝深さが652 μm 以上である。

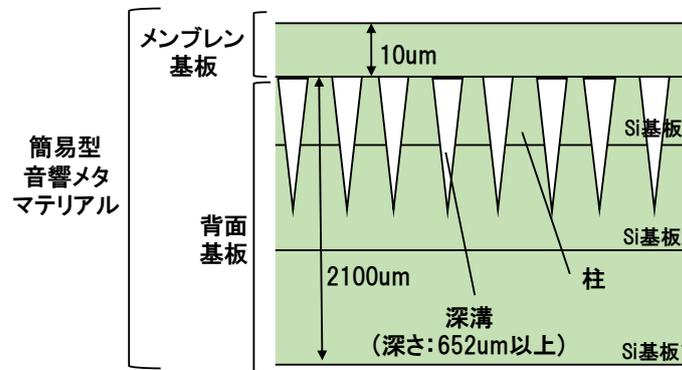


図2.3.2.1 簡易型音響メタマテリアルの設計断面構造

試作した簡易型音響メタマテリアルの外観像は図1.1.2.9に示した通りである。1cm角のチップであり、見た目では単なるシリコンの板であるが、図2.3.2.1に示した柱構造が内蔵されている。内部の構造を確認するために、チップをへき開して観察した断面構造の顕微鏡写真を図2.3.2.2に示す。メンブレン基板と、3枚のシリコン基板の積層構造である背面基板がしっかりと接合されていることがわかる。全体の厚さは2235 μm であった。メンブレン基板の厚さは20 μm であり、設計値の10 μm よりも厚くなった。メンブレン基板を薄化するプロセス条件の最適化により、10 μm までの薄化は可能であると考えられる。チップをへき開する際に、チップ表面側の微細な溝パターンが破壊してしまったが、溝の深さは900 μm となっており、設計値を満たしている。溝底の先端部の形状もくさび型となっていて想定通りである。溝の形状を評価するために、隣接する柱間の溝幅の寸法を測定した。図2.3.2.3に結果を示す。横軸は溝の中央を原点としている。溝形状は、単純なテーパ形状ではなく、表面近傍ではほぼ垂直形状となっており、溝が深くなるにつれて徐々にテーパ角を持つ形状である。溝深さ650 μm より深い部分では、テーパ角度は85°であるが、溝全体としては、テーパ角度は88°となっており、図1.2.2.4で示した加工形状が再現できている。

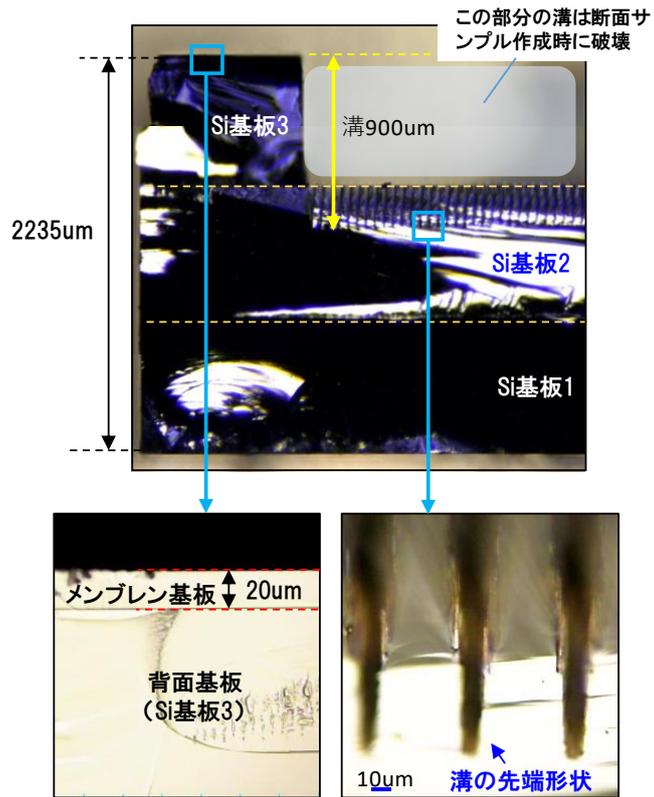


図 2.3.2.2 試作した簡易型音響メタマテリアルの断面写真

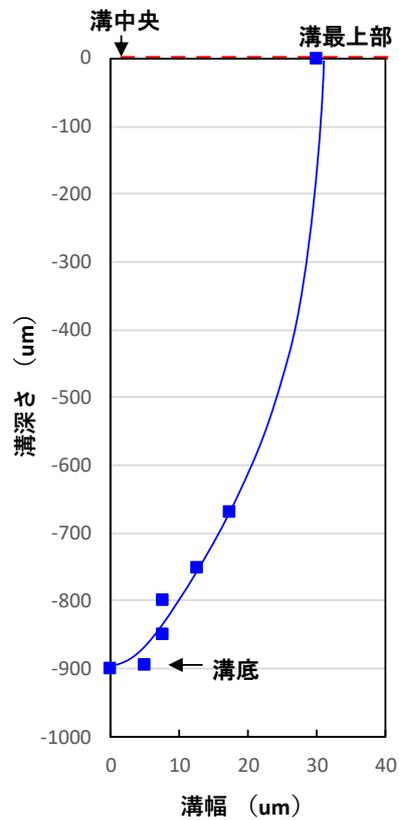


図 2.3.2.3 試作した簡易型音響メタマテリアルの背面基板の溝形状

(b) MUT 型音響メタマテリアルの試作

MUT 型音響メタマテリアルに関しては、MUT 基板と背面基板となるウェハの試作まで実施した。試作した MUT 基板ウェハと背面基板ウェハの外観写真と、MUT 型音響メタマテリアルの完成までに残された工程の模式図を図 2.3.2.4 に示す。

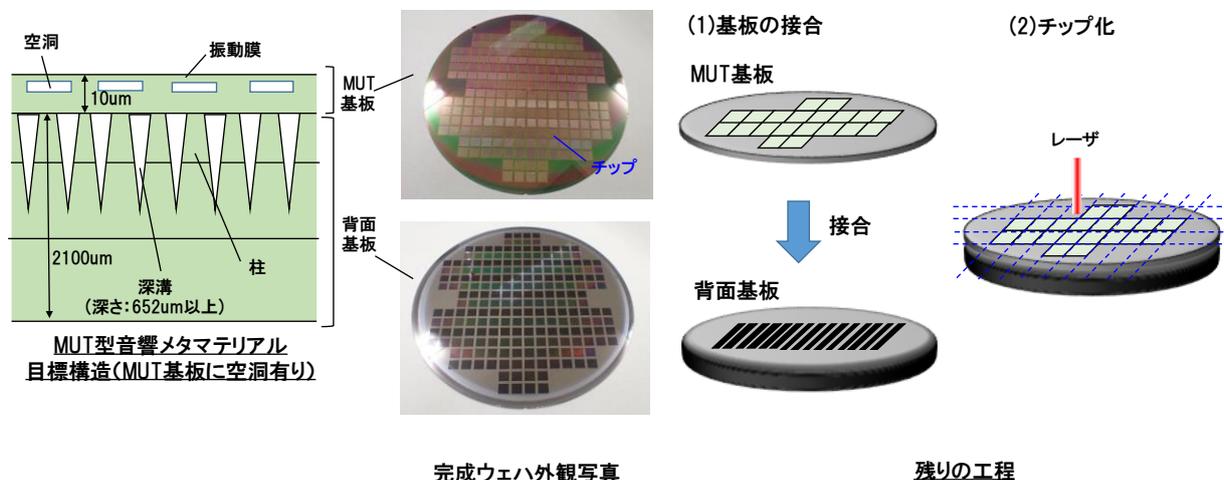


図 2.3.2.4 MUT 型音響メタマテリアル試作の進捗結果

MUT 基板では、直径 8 インチのシリコン基板表面に、MUT セルアレイを配置した 216 個の 1cm 角チップを作製した。背面基板は、直径 8 インチのシリコン基板に、深溝を形成した 216 個の 1cm 角のチップを作製した。両シリコン基板を接合することで、それぞれの基板上の同じ位置に配置された MUT 基板チップと背面基板チップが接合されることになる。接合したウェハからレーザーを用いてチップを切り出すことにより、MUT 型音響メタマテリアルが完成予定であったが、1. 2 項(1)で述べた不具合により、MUT 基板と背面基板の接合工程と、接合した基板のチップ化は平成 31 年度内に実施することができなかった。ただし残る 2 つの工程では、簡易型音響メタマテリアルの試作における工程、つまりメンブレン基板と背面基板の接合工程、接合した基板のチップ化工程と同じプロセスを適用するため、不具合が発生するリスクは小さいと考える。

MUT 基板と背面基板を接合する前段階として、図 2.3.2.4 に示した MUT 基板上に作製した MUT セルにおいて、空洞上のメンブレンの Pull-in 現象が起きることを確認するために、MUT セルの電極間に電圧を印加して掃引しながら電極間の静電容量を測定した (C-V 測定)。測定した MUT セルは、表 2.3.1.1 の矩形 1 に対応するセルである。図 2.3.2.5 に結果を示す。横軸は電極間に印加した DC 電圧、縦軸は電極間の静電容量である。

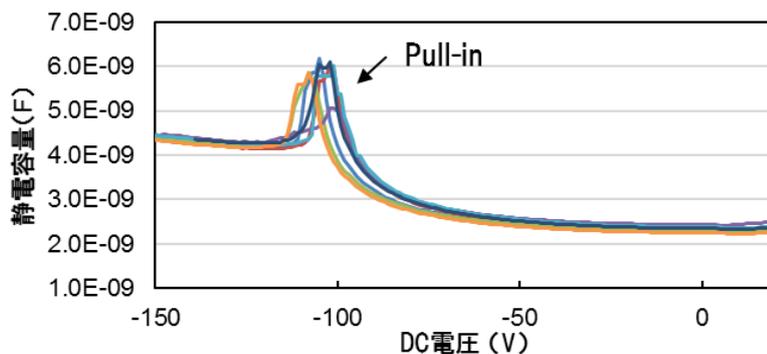


図 2.3.2.5 MUT 基板上に作製した MUT セルの C-V 測定結果

C-V 測定は MUT 基板ウェハ上の 7 つのチップで行った。電極間の DC 電圧を大きくしていくにしたがい、電極間の静電引力が大きくなるため、空洞上部の上部電極を含むメンブレンが空洞下部の下部電極に引き付けられて電極間の静電容量が大きくなる。DC 電圧が約 100V になると、静電容量が急激に上昇し、静電容量値がピークを持った。このグラフ形状は、MUT セルが Pull-in 現象を起こした際の典型的な形状を示しており、試作した MUT セルが約 100V で Pull-in 現象が起きることが確認できた。したがって、図 2.3.2.4 に示した背面基板と接合すれば、MUT セルの Pull-in ON/OFF により、音響的な透過率をアクティブに制御できると考える。

(3) 実施項目 3 : 水中環境下における材料選定に関わる研究

実施項目 5 で、MUT 型音響メタマテリアルの水中における音響インピーダンスの可変制御性を確認することで、水中での絶縁性を評価完の予定であったが、試作した「簡易型音響メタマテリアル」と「MUT 型音響メタマテリアル」の内、「簡易型音響メタマテリアル」の音響水槽内での動作検証のみ完了した（詳細は実施項目 5 による）。

(4) 実施項目 4 : MUT 型音響メタマテリアルでの減衰率評価に関わる研究

(実施項目 1) にて設計した「簡易型音響メタマテリアル」を (実施項目 2) で製作し、(実施項目 5) にて減衰率 (透過率) の評価を行った。減衰率は本研究の試作品と基準となるステンレス鋼 (ほぼ全反射する) に対して入射した音波の反射波の振幅比から求めており、減衰率とはどれだけ試作品に音波が吸収されたかであり、これまで述べてきた透過率に他ならない。本実施項目においては、実測結果とシミュレーション結果を比較した。結果の違いに関し、構造上の違いを明確にした上で、それによる音響メタマテリアル内部の音波伝搬過程を考察した。実測結果を踏まえてシミュレーションの精緻化を行った。

(a) シミュレーションモデルの精緻化

図 2.3.4.1 に設計当初のシミュレーションによる透過率と実測により求めた透過率を示す (表示は矩形セル 2, 実測は後述する実施項目 5 に示すものと同じである)。本シミュレーションには平成 30 年度 (実施項目 4) で明らかとした材料減衰を反映させており、透過率は材料減衰を差し引いた純粋に音響メタマテリアル背面側へ伝搬した成分のみとしている。また、同図には評価対象である 5-10MHz の透過率の平均値について、シミュレーションに対する差を示している。目標である誤差 ±10% 以内とはならなかった。

そこで、シミュレーションモデルを精緻化すべく、試作品の仕上がり形状を (実施項目 2) において調査した結果を図 2.3.4.2 に示す。調査は矩形セルおよび円形セルそれぞれ 2 種類の空洞幅を持つが、そのうち空洞幅が広いものを示している (空洞幅が狭いものは時間の都合上調査することができなかった)。同図にはシミュレーションに用いた設計値も示す。本結果から分かる通り、特に大きな差異が見られたものとして次の二つが挙げられる、(1) メンブレン基板厚がシミュレーションでは 10 μ m であったものが、実際の仕上がりでは 20 μ m であったこと、(2) 柱構造がシミュレーションではテーパ構造が直線的かつ最下部では隙間なく柱と柱が接触するのに対し、実際の仕上がりでは比較的下側で湾曲し、かつ最下部ではやや隙間ができています。前者 (1) の違いについては、すでに平成 30 年度の (実施例 4) で示したように、基板厚は高周波側の特性を決め、厚くなるほど透過率が落ちていく。実測結果も同様の傾向が見られる。後者 (2) については、柱の長さが低周波側の特性を決めるが、途中で急激に湾曲することおよび最下部に隙間があることでインピーダンスがマッチングせず多重反射が発生すると考えられる。多重反射は帯域内にその周期のノッチを作る。実験結果も同

様の傾向が見られる。

仕上がり形状を加味して、新たにシミュレーションモデルを修正した。修正したモデルを図 2.3.4.3 に示す。また修正モデルによる透過率の結果を図 2.3.4.4 に示す。図から分かる通り、当初シミュレーションより実測結果近い特性を得ることができた。また、シミュレーションモデル修正前後の透過率（5-10MHz 平均）とシミュレーションとの誤差は 9.9% となり、目標誤差 ±10% 以内の精度を達成した。同様の修正を円形モデル 2（正六角形セル 2）にも適用した結果を図 2.3.4.5 に示す。本結果においてもシミュレーションに対する実測の誤差は 5.9% 下となり、シミュレーションの妥当性が示されたと考えられる。逆に言えば、当初設計の仕上がり形状を実現できれば、より透過特性の高い性能を得ることができる。

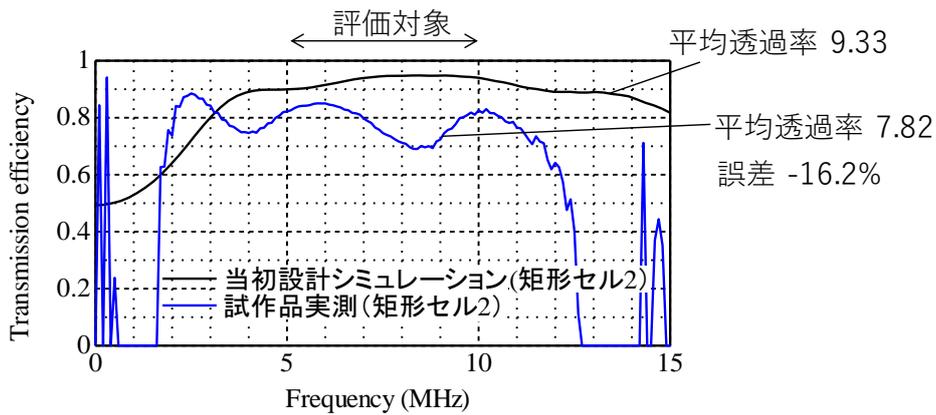


図 2.3.4.1 簡易型音響メタマテリアルの透過率

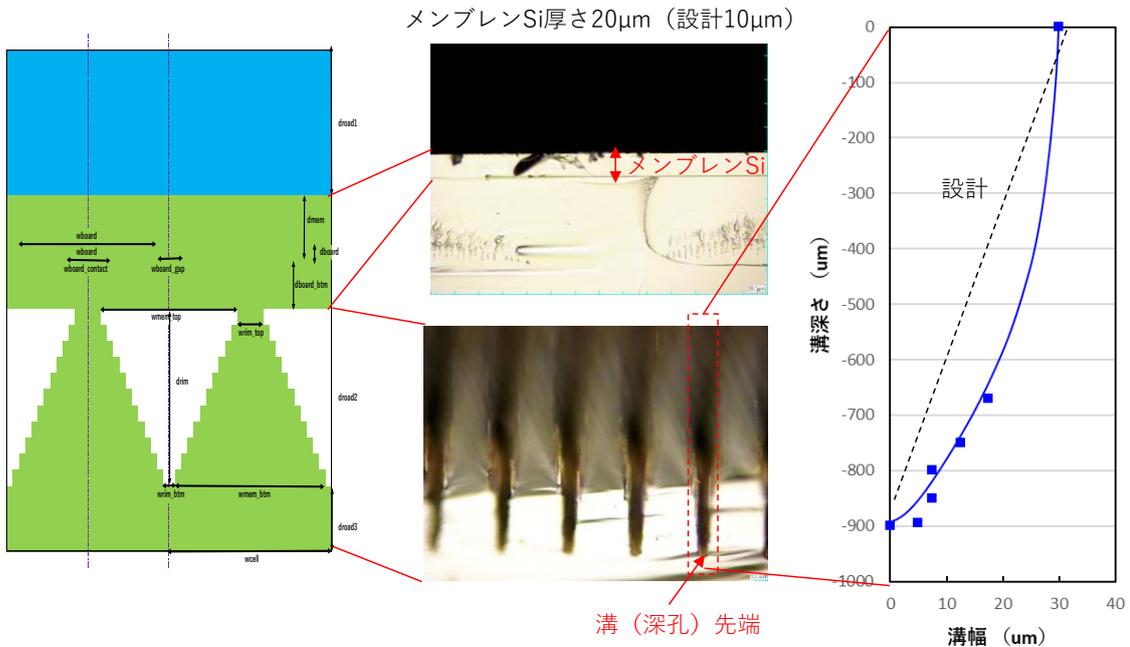


図 2.3.4.2 簡易型音響メタマテリアルの仕上がり形状 (矩形セル 2)

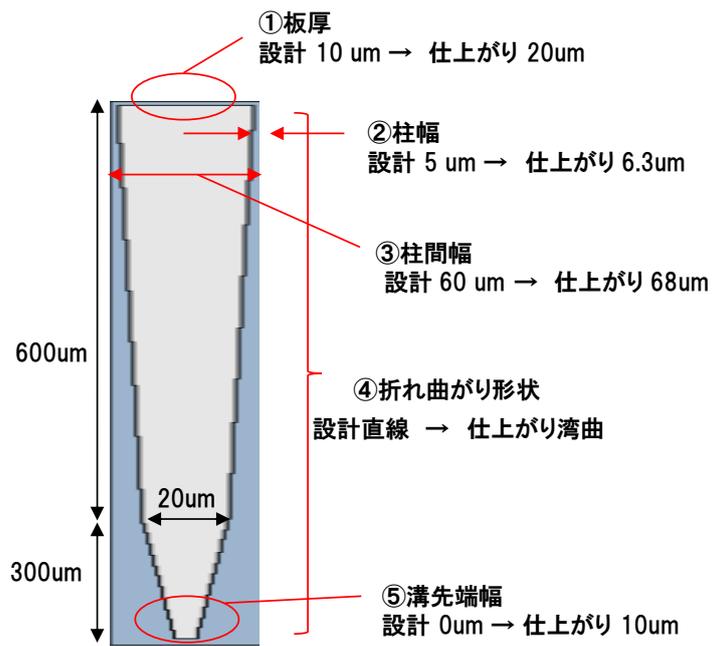


図 2.3.4.3 簡易型音響メタマテリアルの修正シミュレーションモデル (矩形セル2)

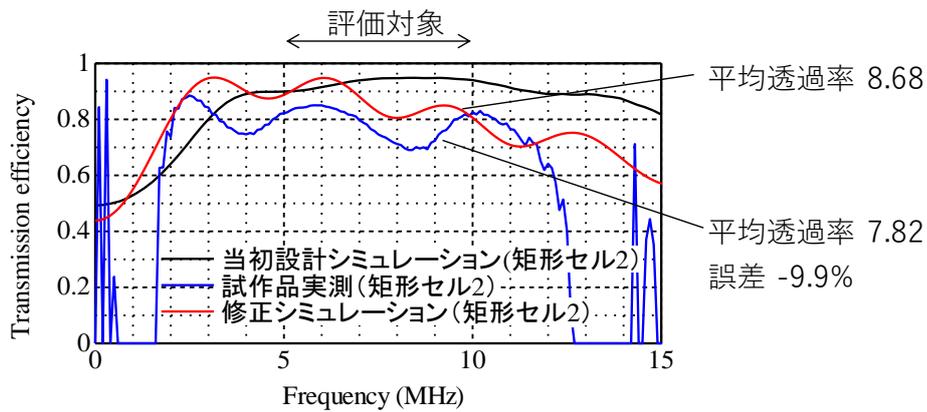


図 2.3.4.4 簡易型音響メタマテリアルの透過率 (矩形セル2 修正モデル)

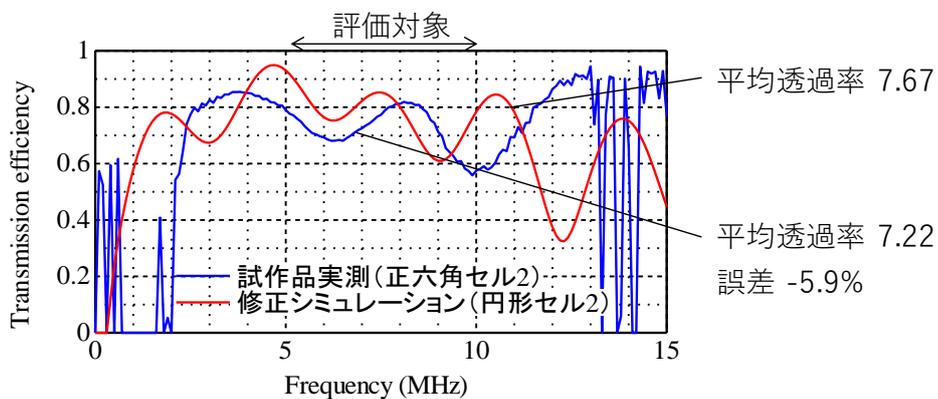


図 2.3.4.5 簡易型音響メタマテリアルの透過率 (円形セル2 修正モデル)

(5) 実施項目5：試作した MUT 型音響メタマテリアルによる検証

(a) 簡易型音響メタマテリアルの試作品の性能評価

(実施項目2) で試作した「簡易型音響メタマテリアル」の音響性能を評価した。音響性能評価の実験系の模式図を図 2.3.5.1 に、実験外観写真を図 2.3.5.2 に示す。実験手順は次の通りである。試作したチップをプラスチック基板に張り付け水槽の中に浸しておく。このとき音響的に影響のない位置に基準となるステンレス鋼 (SUS, 固有音響インピーダンス約 40MRayls) も同プラスチック基板に張り付けておく。試作チップに正対する形で水浸トランスデューサ (カールドイチュ社, TS6PB2-7P30, フォーカス深度約 25mm) を設置する。またこのときの距離はトランスデューサのフォーカス深度とする。パルサーレーザ (オリンパス社, 5073PR) よりトランスデューサに 6dB アッテネータを介してパルス電圧を印加する。トランスデューサから放射された超音波ビームは試作チップにあたり一部が透過し一部が反射する。反射波はトランスデューサで受信され、電気信号となる。この電気信号をオシロスコープにてアベレーシング処理を行った後記録する。本実験を基準となるステンレス鋼でも同様に行う。実験は試作チップ 4 種 (矩形セル 2 種, 正六角セル 2 種) および試作チップの性能比較用としてバルク Si 基板を加えた計 5 種について行った。

解析手順は次の通りである。得られたステンレス鋼と試作チップの反射信号は試作チップ透過後の Si 基板背面のプラチップ基板との間の音響インピーダンスミスマッチにより反射を起こす。本反射信号は評価外となるため、その時間領域以降はカット (ゼロ値化する)。また、平成 30 年度 (実施項目 4) で得られた Si の材料減衰 0.5dB/mm を考慮し、信号振幅に処理した時間波形信号それぞれ周波数領域へと変換する。得られた周波数領域における試作チップの信号振幅をステンレス鋼の信号振幅で除す。ステンレス鋼は水の固有音響インピーダンス (約 1.5MRayls) に対して極めて高い固有音響インピーダンス (約 40MRayls) を有するためほぼ全反射する。したがって、ステンレス鋼を基準とすれば、その差分が試作チップを透過した信号ということになる。これを透過率 (1 で 100%透過)。ただし、ここでいう透過率とは水を基準媒質としている。

図 2.3.5.3 に実験で得られた反射信号波形と上記解析方法によって得られた透過率を示す。バルク Si の結果より、理論値 (約 0.5 一定) と解析値はよく一致しており、実験及び解析の妥当性が高いことが示唆される。2MHz 以下および 12MHz 以上はトランスデューサの感度帯域から大きく外れ SN が不足しており、評価対象外である。図より、各試作チップは評価対象周波数 (5-10MHz) において、バルク Si に対し透過率が高く、提案構造が音響インピーダンスマッチング機能を有することを確認できた。一方、全試作チップにおいて、当初設計シミュレーションと実測値は目標誤差である ±10%以内となっていなかった。そこで、(実施項目 4) にてその原因分析を行い、シミュレーションモデルを修正した。(実施項目 4) の図 2.3.4.4 および図 2.3.4.5 には修正したシミュレーションモデルと実測結果を示しており、目標誤差 ±10%以内を達成した。

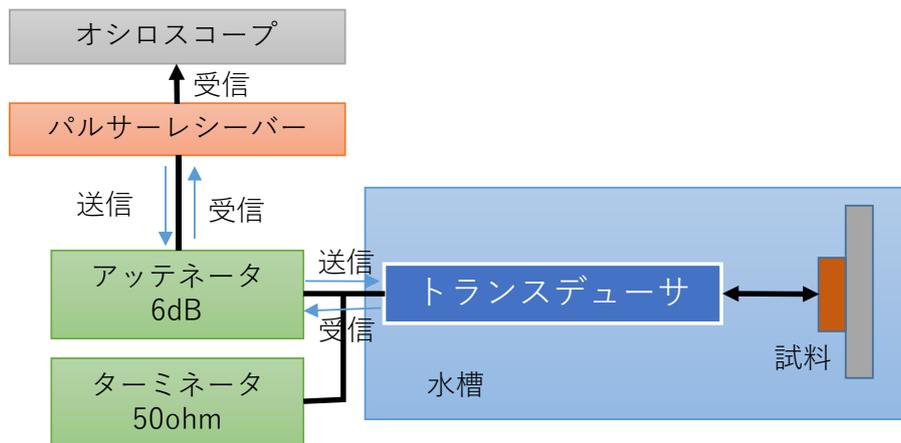


図 2.3.5.1 音響評価実験系

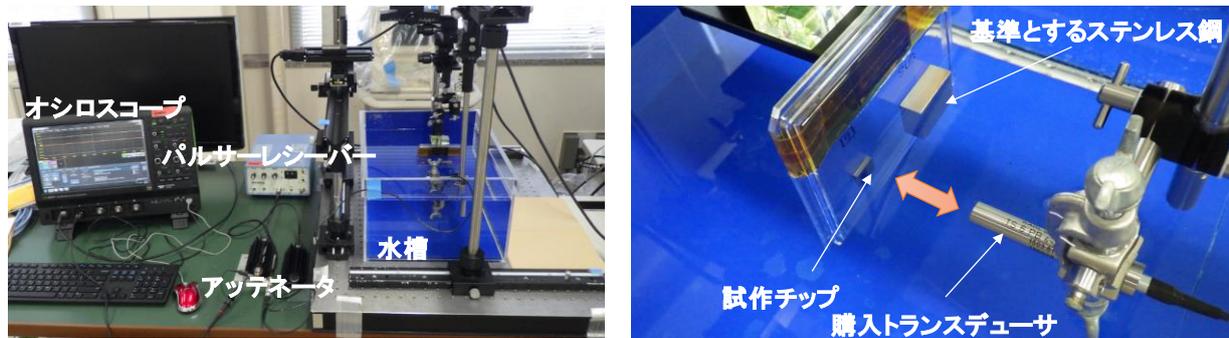


図 2.3.5.2 音響評価実験系 外観写真

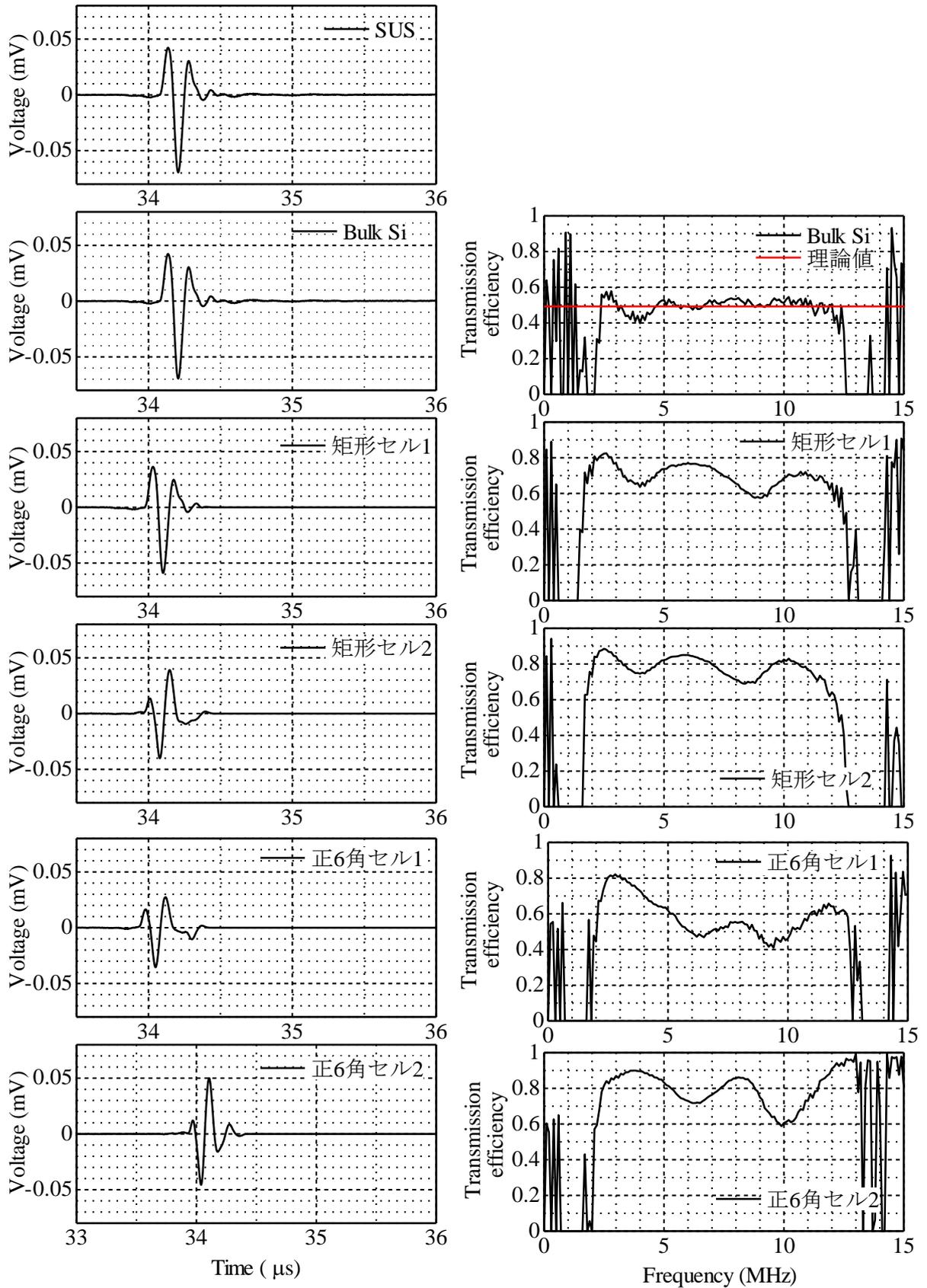


図 2.3.5.3 実測結果および解析結果

(b) MUT 型音響メタマテリアルの性能評価

試作遅延により期間内にて音響評価を実施することができなかった。

(c) 超音波周波数範囲の拡張性検討

本研究で得られた音響メタマテリアルの設計知見を基に、医療用超音波の周波数帯域である MHz 帯域からソナーで使われる kHz~100kHz 帯域への拡張を試みた。得られた設計指針によれば以下の3点が重要となる。(1) 所望帯域より高周波側に共振周波数となるよう空洞幅とメンブレン厚を設定する。(2) このときメンブレン厚>柱幅となるようにする。(3) 柱長さを所望帯域の低周波側カットオフ周波数の波長程度とする。本設計指針に基づき次のようにソナー帯域に対応する音響メタマテリアルのシミュレーションモデルを構築した。指針(1)の共振周波数についてはメンブレン厚に比例し、空洞幅の-2.5乗に比例(矩形板)することが材料力学的には分かっていることから、空洞幅で調整することが効率的である。これまでの共振周波数 7.5MHz 帯域から数百 kHz へ約 1桁落とすためには空洞幅をこれまでの数十 μm から (1/10) (-1/2.5) ~ 2.5 倍程度にすればよい。指針(2)については、(1)で決めた空洞幅に対し、柱幅が式(6)から水負荷に最適な柱幅が自動的に求まる。この柱幅より大きい膜厚とする。その際共振周波数が大きく変動する場合は、指針(1)に戻り空洞幅を改めて調整する。指針(3)については仮に 10kHz の波長とすると、従来の 10MHz に対し 1000 倍の 870mm となる。このように、周波数に対し単に全体的に比例したスケールにはならず、縦方向と横方向の伸縮率が異なることが特徴である。

上記の設計手順にて簡易音響メタマテリアルのシミュレーションを行った。その結果メンブレンの共振周波数は 5.5MHz となり、透過率は図 2.3.5.4 に示す結果となった。尚、本テーマに Si の材料減衰率 (0.5dB/mm, 7.5MHz) を明らかとしたが、周波数帯が大きく異なるためそのままは適用できない。しかし一般的に低周波化するほど減衰率は下がることが予想される。従って、図は減衰を加味しない理想的な特性を示している。図より 5~100kHz まで 0.9 以上の高い透過率となった。ソナー帯域でも極めて高効率かつ広帯域な特性を得ることができ、設計手法の妥当性が示された。

以上の検討を踏まえ、低周波化における課題として次のことが挙げられる。空洞幅が数倍のオーダーで増加するのに対し、柱長さは 1000 倍となり、アスペクト比が大きく増大する。このことから製造技術的にも半導体プロセスにもハードルが上がる。したがって、波長の短い、すなわち音速の小さい材料を探索する必要がある。また、サイズも大きくなることから半導体プロセスではなく微細な機械加工や 3D プリンタを活用した設計などの検討も必要であろう。

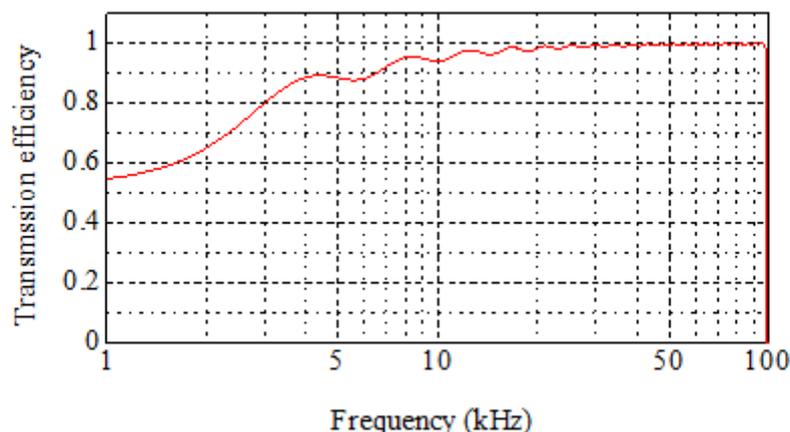


図 2.3.5.4 ソナー帯域用音響メタマテリアル整合層の特性

(6) プロジェクトの総合的推進

定期的に研究開発会議を実施し、またアクセス制限を行った共有フォルダを使って、研究者間でのデータ共有化を図った。

3. 成果の外部への発表及び活動

表 3.1 成果の外部への発表及び活動一覧

成果区分	成果の内容
論文 1	<p>■発表題目：MUT 型音響メタマテリアルによる超広帯域な音響インピーダンス整合特性</p> <p>■学 会：電気学会</p> <p>■発表形式：論文，電気学会誌E部門（センサ・マイクロマシン部門誌），Vol.139 No.10，pp.346-353，2019.</p> <p>■内 容：本委託業務において考案したMUT型音響メタマテリアルの音響インピーダンス整合特性について，シミュレーションを用いて音波伝搬の様子および従来と比較して広帯域な音波透過特性を示した。</p>
論文 2	<p>■発表題目：Super Broadband Acoustic Impedance Matching by MUT-type Acoustic Metamaterial</p> <p>■学 会：Institute of Electrical Engineers of Japan</p> <p>■発表形式：論文，Electronics and Communications in Japan，volume 103 issue 1-4(April)，pp.38-47，2020</p> <p>■内 容：本委託業務において考案したMUT型音響メタマテリアルの音響インピーダンス整合特性について，シミュレーションを用いた音波伝搬の様子および従来と比較して広帯域な音波透過特性を示した。</p>
特許 1	<p>■発明名称：音響整合デバイスおよびそれを用いた音響プローブシステム</p> <p>■出願番号：特願 2018-110014</p> <p>■内 容：様々な比音響インピーダンスを持つ広範囲な異種材料間で広帯域な音響的整合特性を得ることを可能とする音響整合デバイスおよびそれを用いた音響プローブシステムに関する特許を出願した。</p>
学会発表 1	<p>■発表題目：MUT 型音響メタマテリアルによる超広帯域な音響整合特性の実現</p> <p>■学 会：第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム（2018.10.31）</p> <p>■発表形式：ポスター</p> <p>■内 容：本委託業務において考案したMUT型音響メタマテリアルの音響整合特性について，シミュレーションを用いて音波伝搬の様子および従来と比較して広帯域な音波透過特性を示した。</p>
学会発表 2	<p>■発表題目：MUT 型音響メタマテリアルによる音響インピーダンス整合に関する基礎検討</p> <p>■学 会：日本音響学会 2019年秋季研究発表会（2019.9.4）</p> <p>■発表形式：口頭発表</p> <p>■内 容：本委託業務において考案したMUT型音響メタマテリアルの音響整合特性について，シミュレーションを用いて音波伝搬の様子および従来と比較して広帯域な音波透過特性を示した。また，MUT 型音響メタマテリアルによる音響整合理論解析の妥当性を示した。</p>
展示会 1	<p>■展 示 会：nano tech2020(防衛装備庁 安全保障技術推進制度ブース)</p> <p>■時 期：令和2年1月29日から31日</p> <p>■場 所：千葉県千葉市「幕張メッセ」</p> <p>■内 容：パネル展示し，本研究の研究成果ならびに安全保障技術研究推進制度について広報活動を実施した。</p>

4. まとめ、今後の予定

(1) 研究開始時に設定した研究目標の達成度

製造プロセスにおける不具合が発生し、その対策に時間を要したことにより(不具合対策は完了)MUT型音響メタマテリアルの試作および最終評価に至っていないが、下記成果を得た。

- (a)最終目標である超音波周波数範囲(5MHz~10MHz)において、可変制御範囲1.5~10MRaylsの音響インピーダンスの可変制御を実現するMUT型音響メタマテリアルの詳細設計を完了した。
- (b)薄膜応力安定化成膜パラメータを抽出し、目標のプロセス変動幅±10%以内の薄膜応力安定性と空洞高さ設計値±10%以下を実現するMUT型音響メタマテリアルの製造プロセスを構築した。
- (c)目標とした水中環境下(温度範囲-10~60度(保存温度)、水圧0.1MPa)において、MUT型音響メタマテリアルの耐環境性に問題ないことを材料評価試験、シミュレーションにて確認した。
- (d)MUT型音響メタマテリアルの減衰率評価手法および音波伝搬メカニズムを明らかにした。
- (e)簡易型音響メタマテリアルを試作評価し、シミュレーションと実測の誤差、目標±10%以内を実現し、設計手法の妥当性を示した。

(3) 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果

研究を推進するに当たり、下記想定外の成果を得ることができた。

- (a)薄膜メンブレンの接触面積をPull-inのONとOFFで制御せずとも、目標値である1.5-10MRayls全範囲の音響負荷に対して高い(90%以上の)透過率が得られる設計パラメータを導出した。
- (b)Pull-inのONとOFFをスイッチ的に用いることにより、音波を全透過と全反射する音響スイッチの動作メカニズムを解明した。
- (c)深さ1mmに近いシリコン基板のテーパ付き深穴加工プロセスならびにシリコン基板の4層積層プロセスを構築した。

(4) 研究課題の発展性(間接的成果を含む)

非破壊検査関連分野、水中音響関連分野での本研究課題の発展性を以下に示す。

- (a)非破壊検査関連分野で、水の固有音響インピーダンスである1.5MRaylsから骨(7~8MRayls)、樹脂(2~3MRayls)、コンクリート(9~10MRayls)やマグネシウムのような軽金属(10MRayls)の固有音響インピーダンスをカバーする10MRayls程度まで高効率かつ広帯域に透過が可能な音響メタマテリアル(マルチ超音波プローブ)が期待できる。
- (b)空中音響関連分野で、演奏する楽器や楽曲に合わせた反射状態を制御することで、臨場感などの音響的な効果の向上や、自動車などの騒音対策として、今回見出した共振周波数における全反射モードなどを使えば、エンジンルームの音の閉じ込めや、走行音や風切り音の室内への侵入の抑制なども可能な音響シートが期待できる。
- (c)水中音響関連分野で、音響スイッチを使った低周波、小型・軽量ソーナールならびに音響ディスプレイや音響迷彩が期待できる。

(4) 論文、特許、学会発表等の研究の成果

論文2件、口頭発表2件、特許1件、展示会1件

(5) 効率的な研究実施体制とマネジメント

社内の情報インフラや派遣外注を活用し効率的な研究マネジメントを推進した。

(6) 経費の効率的執行

日立製作所内の資産の有効活用、社内共通の原価管理手順で複数拠点の経費管理を実施した。

(7) 今後の予定

今後は、MUT型音響メタマテリアルの試作ならびに最終評価を完遂し、研究の確証を得るとともに、研究課題の発展性、超音波周波数範囲の拡張性で示した、非破壊検査装置関連、空中・水中音響関連装置実現に向け研究を継続したい。

参考文献：

- [1] 谷口哲哉 他, “超音波診断装置 SONIMAGE HS1: 超広帯域プローブ特性を最大活用する送受信技術 ～Tried Tissue Harmonic Imaging～”, KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, vol.12, 2015
- [2] Zheng Li, et al., “Broadband gradient impedance matching using an acoustic metamaterial for ultrasonic transducers”, Scientific Reports, 7, 42863, 2017.
- [3] 日立製作所ホームページ, <http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/contents/us-tech/mappie/index.html>
- [4] 佐光暁史 他, “cMUT技術による超音波探触子「Mappie」の開発”, MEDIX 51, pp.31-34, 2009
- [5] S. Machida, et al. “Capacitive micromachined ultrasonic transducer with driving voltage over 100V and vibration durability over 10¹¹ cycles”, IEEE Transducers 2009, pp. 2218-2221, 2009.様式4-2, [M2]
- [6] Hiroki Tanaka, et al. “Beam structure for CMUT with desired frequency spectrum”, IEEE Ultrason. Symp, pp. 500-503, 2008.
- [7] Desilets, et al., “The Design of Efficient Broad-Band Piezoelectric Transducers”, Trans. Sonics and Ultrasonics, vol. SU-25, No.3, (1978).
- [8]” Measurement of the Apparent Attenuation of Longitudinal Ultrasonic Waves by Immersion Method”, ASTM Standard E664-93
- [9] Rober D. Corsaro, et al., “Sound and Vibration Damping with Polymers”, ACS Symposium Series, pp.165-207, 1990
- [10] Phani Mylavarapu, et al., “A predictive model for ultrasonic attenuation coefficient in particulate composites”, Composites Part B, Vol.41, pp.42-47, 2010
- [11]Robert J. Bobber, “Underwater Electroacoustic Measurements”, Peninsula Pub, pp. 287-313, 1990.
- [12] Z. Li, D. Yang, S. Liu, S. Yu, M. Lu, J. Zhu, S. Zhang, M. Zhu, Z. Guo, H. Wu, Z. Wang, and Y. Chen, “Broadband gradient impedance matching using an acoustic metamaterial for ultrasonic transducers”, Scientific Reports, 7, 42863 (2017).

以上