

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5342005号
(P5342005)

(45) 発行日 平成25年11月13日 (2013.11.13)

(24) 登録日 平成25年8月16日 (2013.8.16)

(51) Int.Cl.	F I
H O 4 R 19/00 (2006.01)	H O 4 R 19/00 3 3 0
H O 4 R 7/00 (2006.01)	H O 4 R 7/00 3 3 0
A 6 1 B 8/00 (2006.01)	A 6 1 B 8/00
G O 1 N 29/24 (2006.01)	G O 1 N 29/24 5 0 2

請求項の数 12 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2011-531855 (P2011-531855)	(73) 特許権者	000153498
(86) (22) 出願日	平成22年8月11日 (2010.8.11)		株式会社日立メディコ
(86) 国際出願番号	PCT/JP2010/063607		東京都千代田区外神田四丁目14番1号
(87) 国際公開番号	W02011/033887	(74) 代理人	100091096
(87) 国際公開日	平成23年3月24日 (2011.3.24)		弁理士 平木 祐輔
審査請求日	平成23年11月16日 (2011.11.16)	(74) 代理人	100105463
(31) 優先権主張番号	特願2009-215755 (P2009-215755)		弁理士 関谷 三男
(32) 優先日	平成21年9月17日 (2009.9.17)	(74) 代理人	100102576
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		弁理士 渡辺 敏章
		(72) 発明者	田中 宏樹
			東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地
			株式会社日立製作所 中央研究所内
		(72) 発明者	町田 俊太郎
			東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地
			株式会社日立製作所 中央研究所内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超音波探触子及び超音波撮像装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第1の電極を備える基板と第2の電極を備える振動膜を有し、前記振動膜は前記基板から立ち上がった支持壁によって周縁部が前記基板に固定され、前記基板と前記振動膜の間に空隙層が形成されており、前記振動膜の中心から前記振動膜が固定されている周縁部までの距離が不均一であるセル形状である静電容量型マイクロマシンを複数配列した超音波探触子アレイにより形成される超音波探触子であって、

前記振動膜の第1の軸方向の長さとは当該第1の軸と直交する第2の軸方向の長さの比を代表アスペクト比とするととき、

前記代表アスペクト比は、前記超音波探触子による送受信の少なくとも一方の帯域幅内において、局所的に発生する振幅低下あるいは感度低下する周波数の信号レベルを所定値よりも抑制し得る値に設定され、

前記代表アスペクト比は、前記超音波探触子の送信又は受信帯域内に 6dB以上のディップを形成しなくなるような値に設定され、

前記代表アスペクト比が、必要とされる最小限のダイナミックレンジ (DR) と、送受エンベロープの最大点とリングングレベルとの差 (DE) に基づいて算出される比以上に設定される

ことを特徴とする超音波探触子。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の超音波探触子において、

10

20

前記代表アスペクト比は、前記超音波探触子の送信又は受信帯域内に 3dB以上のディップを形成しなくなるような値に設定される

ことを特徴とする超音波探触子。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の超音波探触子において、

前記代表アスペクト比は、前記振動膜の振動モードのうち、腹の数が奇数個存在する振動モードの周波数を基本モード周波数で割った値が 2 以下になる振動モードの数が 6 個以上存在するような値に設定される

ことを特徴とする超音波探触子。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の超音波探触子において、

前記代表アスペクト比が “ 8 ” 以上である

ことを特徴とする超音波探触子。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の超音波探触子において、

前記代表アスペクト比は、送信音波又は受信信号のリングングレベルが 50dB 以下となるに設定される

ことを特徴とする超音波探触子。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の超音波探触子において、

前記代表アスペクト比は、送信音波又は受信信号のリングングレベルが 25dB 以下となるに設定される

ことを特徴とする超音波探触子。

【請求項 7】

請求項 1 に記載された超音波探触子と、

直流電源部および交流電源部と、

前記超音波探触子から超音波ビームを送波する手段である送信ビームフォーマと、

前記超音波探触子で受信した超音波信号から受信ビームを形成する受信ビームフォーマと、

前記受信ビームフォーマからの信号を処理する信号処理部と、

前記信号処理部の処理結果に応じた画像データを表示する表示手段と

を有することを特徴とする超音波撮影装置。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の超音波撮影装置において、

前記代表アスペクト比は、前記超音波探触子の送信又は受信帯域内に 3dB以上のディップを形成しなくなるような値に設定される

ことを特徴とする超音波撮影装置。

【請求項 9】

請求項 7 に記載の超音波撮影装置において、

前記代表アスペクト比は、前記振動膜の振動モードのうち、腹の数が奇数個存在する振動モードの周波数を基本モード周波数で割った値が 2 以下になる振動モードの数が 6 個以上存在するような値に設定される

ことを特徴とする超音波撮影装置。

【請求項 10】

請求項 7 に記載の超音波撮影装置において、

前記代表アスペクト比が “ 8 ” 以上である

ことを特徴とする超音波撮影装置。

【請求項 11】

請求項 7 に記載の超音波撮影装置において、

前記代表アスペクト比は、送信音波又は受信信号のリングングレベルが 50dB 以下となる

10

20

30

40

50

に設定される

ことを特徴とする超音波撮影装置。

【請求項 12】

請求項 7 に記載の超音波撮影装置において、

前記代表アスペクト比は、送信音波又は受信信号のリングングレベルが25dB以下となる

に設定される

ことを特徴とする超音波撮影装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、超音波探触子及び超音波撮像装置に関し、例えば静電容量型マイクロマシンを用いた超音波探触子及び超音波撮像装置に関する。

【背景技術】

【0002】

超音波トランスデューサは可聴域（約20Hz～20kHz）以上の音波の放射と受信を行うデバイスであり、医療用や非破壊検査などに広く利用されている。現在、超音波トランスデューサとして最も広く利用されているのはPZT（Lead Zirconate Titanate；チタン酸ジルコン酸鉛）に代表される圧電デバイス（piezoelectric devices）である。しかし近年、静電容量型マイクロマシン超音波トランスデューサ（Capacitive Micro-machined Ultrasonic Transducers：CMUT、以下CMUTと呼ぶ）と呼ばれる圧電型とは異なる動作原理を利用した超音波デバイスの開発が進み、実用化されつつある。CMUTは、半導体技術を応用して作製される。通常はシリコンなどの半導体プロセスで用いられる部材でできた基板上に電極材を埋め込み（基板そのものが電極となることもある）、微細（例えば50μm）かつ薄い（例えば数μm）振動膜を振動膜周囲の支持壁などで固定して形成する。振動膜が振動できるよう、振動膜と基板との間には空隙を設ける。この振動膜内にも電極材を埋め込む。このように基板及び振動膜に独立した電極が配置されることで、基板と振動膜は、静電容量（キャパシター）として機能する。両電極に電圧を印加することで（通常バイアス電圧を予め印加しておく）、超音波トランスデューサとして動作する。両電極に交流電圧を印加すれば電極間の静電気力が変化し、振動膜が振動する。このときに振動膜に接するなんらかの媒質があれば、振動膜の振動が媒質内に音波として伝搬する。すなわち音を放射することができる。逆に、振動膜に音波が伝われば振動膜がそれに

応じて振動し、両電極間の距離が変わることで両電極間に電流が流れる、もしくは両電極間の電圧が変化する。この電流または電圧等の電気信号を取り出すことで音波を受信することができる。

超音波トランスデューサの性能を決める重要な指標として、送信される音圧と受信感度がある。音圧と受信感度の増加には、振動する面積が大きいほどよい。振動する面積は振動膜の形状に依存する。振動膜の形状が円形や正方形あるいは正六角形の場合、膜は周囲からほぼ均等に固定されるため、振動膜の中心付近しか振動できない。このため、実効的には空隙面積の30～40%程度しか有効利用されていない。一方、細長い長方形（矩形）膜のような場合、周囲から拘束される程度が緩和され、円形などの場合よりも平坦に変位することが可能となる。この場合、約60%の面積が有効に振動する。従って、音圧および受信感度向上の観点からは細長い長方形が望ましい。しかし、長方形膜のようなある程度細長い形状にすると、特有の高次の振動モードが発生する。膜に発生する様々な振動モードは音響的な特性、たとえば放射音圧、周波数特性やパルス特性、に影響を与えるため、振動モードの制御は極めて重要となる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】米国特許第6,359,367号明細書

10

20

30

40

50

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】Formulas for natural frequency and mode shape, Robert D. Blevins, ISBN 1-57524-184-6

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

C M U T の振動膜には様々な振動モードが励起されうる。通常超音波トランスデューサの使用上は、無数に存在する振動モードのうち、基本モードと呼ばれる、膜全体が同位相で振動するモードが望ましい。なぜならば、膜全体が同位相で動くため最も効率的に音と電気を変換することができるからである。高次モードと呼ばれる膜の中に腹となる部分が複数できるようなモードの場合、振動膜内において振動する位相が180度異なる場所ができる。このようなモードでは、音を放射する場合、振動膜のある領域においては振動膜に接する媒質を圧縮する方向に振動し、正圧（圧縮波）を放射しようとするが、同時に膜の他の領域では媒質を膨張し、負圧（膨張波）を放射しようとするため、正負の音が打ち消し合い、正味として放射される音圧が低下する。受信の場合も同様に、入力された音圧に対して、膜が変位する方向が逆になる領域ができると、受信電流または電圧の正負が打ち消し合うため感度低下となる。

【0007】

このような現象は、個々の振動モードにおける問題ではなく、別々の振動モード間の干渉という形でも影響する。一般的に、振動膜にエネルギーを放射する何らかの媒質が接している場合、個々の振動モードはある程度の帯域幅を持つ。従って、基本モードの帯域と高次モードの帯域が重なる領域が存在する。このとき基本モードの位相と高次モードの位相が一致しない周波数が発生し、前述と同様の機構により放射音圧や感度の低化が発生する。従って、使用可能な周波数帯域を広げるためには、振動モード間の干渉を考慮しなくてはならない。

【0008】

一方、膜の振動モードは膜の形状と境界条件に依存する。膜の中心から膜を拘束する支持壁までの距離が均等とみなせる形状の場合、たとえば広く利用される円形や正六角形のような正多角形では、基本モードと高次のモードの共振周波数は常に一定の比率となる。従って、形状が決まると、周波数特性は一意に決まる。一方、膜の中心から周囲の支持壁までの距離が等しくなく、異方性がある場合、たとえば膜形状が細長い長方形の場合、励起される振動モードの周波数は、その振動膜の短い方の幅に対する長い方の長さの比（長短の代表長さのアスペクト比（代表アスペクト比）、長方形の場合は縦横アスペクト比）により大きく異なる。従って、使用可能な帯域幅を確保するためには、膜の代表長さのアスペクト比を適切に設定する必要がある。

【0009】

本発明の目的は、静電容量型マイクロマシンの振動膜の形状が膜中心から膜を拘束する支柱までの距離が等方性を持たない場合でも、個々の振動モードや振動モード間の干渉による音響特性への影響を低減することである。

【課題を解決するための手段】

【0010】

長方形膜に代表される振動膜がある程度細長い形状をしている場合、振動膜の長い方向と短い方向で励起される振動モードを分離して考えることができる。振動膜の短い側の方向の幅で決まる振動モードのうち最も低周波なものが、基本モードの共振周波数になる。一方、振動膜が長い方向の振動モード周波数は、通常基本モードの共振周波数よりも高いが、その長さが短い方向の幅に対して長くなる（長短のアスペクト比が大きくなる）に従い、高次モードの共振周波数が基本モードの共振周波数に近づいてくる。有限のアスペクト比の場合、基本モードの帯域内に高次モードとの干渉により著しく感度低下を発生する点が存在する。一方、無限にアスペクト比が長い場合、振動膜の長い方向に励起される全

10

20

30

40

50

ての高次モードの共振周波数は基本モード周波数に収束する。この場合、モード間の干渉は全て打ち消し合うため基本モードのみが振動している状態と等価となる。実際の振動膜は無限のアスペクト比は作ることができない。しかし、アスペクト比をある値よりも大きくすることで、利用上において無限のアスペクト比と同じと見なせる状態を作りうる。このとき、モード間干渉により発生する局部的な感度低下領域を抑制できるため、実用上より広帯域な特性を実現することができる。

【0011】

そこで、本発明は、振動膜の中心から支持壁までの距離が不均等である場合に、振動膜の第1の軸方向の長さ L_1 と第1の軸に直交する第2の軸方向の長さ L_2 の比（代表アスペクト比）を、超音波探触子による送受信の少なくとも一方の帯域幅内において、局所的に発生する振幅低下又は感度低下する周波数の信号レベルを所定値よりも抑制できる値に設定する。

10

【0012】

本発明の超音波探触子は、第1の電極を備える基板と第2の電極を備える振動膜を有し、振動膜は基板から立ち上がった支持壁によって周縁部が基板に固定され、基板と振動膜の間に空隙層が形成されている静電容量型マイクロマシンおよび当該静電容量型マイクロマシンと接する少なくとも一つ以上の音響媒質を備えた超音波探触子であって、超音波探触子の振動膜の代表寸法のうち長い方向に対する短い方向の比が、使用感度帯域内において音響性能を劣化させないような値以上としていることを特徴としている。

【発明の効果】

20

【0013】

本発明は、高次振動モードによる不要応答を抑制し、より広帯域で使用できる超音波探触子を実現する。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】静電容量型マイクロマシン超音波トランスデューサの断面模式図。

【図2】静電容量型マイクロマシン超音波トランスデューサアレイの平面模式図（長方形）。

【図3】静電容量型マイクロマシン超音波トランスデューサアレイの平面模式図（正六角形）。

30

【図4】静電容量型マイクロマシン超音波トランスデューサを用いた超音波探触子の外観図。

【図5】超音波撮像装置のシステム構成例を示す図。

【図6】正六角形セルCMUTの振動モードを示す図。

【図7】正六角形セルCMUTのインピーダンスを示す図。

【図8】長方形セルCMUTの振動モードおよびインピーダンスを示す図。

【図9】長方形セルCMUTの振動モード周波数を示す図。

【図10】複数の振動モードが存在するときのdip形成機構を示す図。

【図11】長方形セルCMUTおよび六角セルCMUTの送信ゲインおよびパルス応答を示す図。

【図12】複数の振動モード周波数間隔が狭くなった場合のdip形成機構を示す図。

40

【図13】CMUTの周波数特性とdipを示す図。

【図14】エンベロープのメインパルスとリングング（尾引き）の関係を示す図。

【図15】エンベロープのメインパルスとリングング（尾引き）のレベル差（ダイナミックレンジ）の縦横比依存性を示す図。

【図16】長方形に準ずる様々なセル形状を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下に本発明の実施の形態を説明する。なお、後述するセル構造や装置構成の内容は一例であり、実施の形態と既知の技術との組み合わせや置換により他の実施の形態を実現することもできる。

50

【 0 0 1 6 】

[第 1 実施形態]

図 1 は、第 1 実施形態の C M U T (1 0) の垂直断面図であり、図 2 はその平面図である。図 2 中の A A 断面が図 1 に相当する。なお、説明の便宜上、C M U T (1 0) が超音波を送信する方向、すなわち図 1 の上方、及び図 2 の紙面に対して垂直上方向を z 方向とする。また、図 1 及び図 2 の右手方向を x 方向とし、図 1 の紙面に対して垂直下方向及び図 2 の上方向を y 方向とする。

【 0 0 1 7 】

図 1 及び図 2 に示すように、この C M U T (1 0) は、シリコン単結晶などの絶縁体又は半導体からなる平板上の基板 1 に、アルミニウムやタングステンなどの導電体からなる薄膜状の下部電極 2 が形成され、下部電極 2 の上に振動膜 5 が形成されている。シリコン基板が下部電極を兼ねる場合もある。振動膜 5 はその周縁部が基板から立ち上がった支持壁 8 によって基板に固定され、振動膜 5 と基板 1 の間には、周囲が支持壁 8 によって密閉された空隙層 7 が形成されている。振動膜 5 の中には、絶縁膜 4 で被覆された上部電極 3 が配置されている。上部電極 3 は、下部電極 2 と上部電極 3 の間に電圧を印加した際、静電気力により基板側に変位する。この変位が過剰になり、上部電極 3 が下部電極 2 と接触したときに導通することを防ぐために、下部電極 2 の上部もしくは上部電極 3 を絶縁膜 4 で被覆するのが好ましい。C M U T を実際使用する場合、振動膜 5 の表面は通常空気や水など超音波を伝搬させるなんらかの音響媒質 6 に接触させる。また、基板 1 の下には音の減衰を目的とした背面材 (パッキング材) 9 を接着させることもある。

【 0 0 1 8 】

図 2 は、図 1 で示した C M U T (1 0) を 1 素子とするならば、同様の無数の素子がアレイ状に並べられている C M U T アレイ 3 0 0 を示している。このように、C M U T は 1 素子だけでなく、複数の素子を並べて使用することもできる。また複数の素子の上部電極同士 (図 2 中の C 1 や C 2) を電氣的にコネクタ部 3 0 で接続し、一つのチャンネルとして使用することもできる。通常、電気回路への上部電極 3 の接続は引出線 3 1 を介して上部電極接続パッド 3 2 で接続される。同様に、下部電極接続パッド 3 3 により下部電極も電気回路に接続できるようにする。

【 0 0 1 9 】

なお、本実施形態の振動膜 5 及び上部電極 3 は同じサイズの長方形で描かれている。しかし、本発明において、これらの形状やサイズは必ずしも図 2 のような長方形である必要はなく、たとえば図 3 のような他の多角形でもよい。また、C M U T アレイ 3 0 0 を構成する振動膜 5 及び上部電極 3 のサイズも全て一定である必要はない。すなわち、サイズの異なる振動膜 5 及び上部電極 3 が C M U T アレイ 3 0 0 内に混在しても良い。

【 0 0 2 0 】

基板 1、下部電極 2、振動膜 5、支持壁 8、絶縁膜 4 及び上部電極 3 は、半導体プロセス技術で加工可能な材料で作られる。例えば、米国特許第 6, 3 5 9, 3 6 7 号明細書に記載された材料が使用可能である。例示すると、シリコン、サファイア、あらゆる形式のガラス材料、ポリマ (ポリイミドなど)、多結晶シリコン、窒化シリコン、酸窒化シリコン、金属薄膜 (アルミニウム合金、銅合金、又はタングステンなど)、スピン・オン・ガラス (S O G)、埋め込み (implantable) ドープ剤又は拡散ドープ剤、ならびに酸化シリコン及び窒化シリコンなどから成る成長フィルムである。空隙層 7 の内部は真空でもよいし、空気又は何らかの気体を充填してもよい。定常時 (非動作時) において、空隙層 7 の間隔 (z 方向) は、主に基板 1、振動膜 5、支持壁 8、及び上部電極 3 の剛性によって維持されている。

【 0 0 2 1 】

図 4 は、C M U T アレイ 3 0 0 を超音波探触子 (プローブ) 2 0 0 0 として組み立てた場合の外観図である。C M U T アレイ 3 0 0 の媒体 (被検体) 側には、超音波ビームを収束させる音響レンズ 2 1 0 と、C M U T と媒体 (被検体) との音響インピーダンスを整合する音響整合層 2 2 0 や、電氣的なシールド層として導電性膜 2 4 0 を配置し、また背面

側（媒体側に対して逆）には、超音波の伝播を吸収する背面材（バックング材）9を設けて使用することができる。

【0022】

図5は、超音波撮像装置の装置構成例を示す図である。図1-3に示したように、個々の、又は所定個数毎にまとめられたCMUT素子は、送受切替スイッチ40を介して、この超音波探触子2000を具備した超音波撮像装置の送信ビームフォーマ48及び受信ビームフォーマ49に接続されている。超音波探触子2000は、電源42によって駆動する直流電源45、送信アンプ43及び受信アンプ44により超音波ビームを形成するアレイとして動作し、超音波の送受信のために利用される。送受信の信号は制御部50により、目的に応じて制御される。例えば制御部50は、信号の波形制御、振幅制御、遅延制御、チャンネル重み制御等を実行する。送信信号は制御部50で制御され、個々のセルやセルを束ねたチャンネルの電極に、送信ビームフォーマ48、D/Aコンバータ46、送信アンプ43を介して任意の波形や振幅及び遅延時間が設定された状態で電圧が印加される。また、探触子に過大な電圧を印加しないよう、あるいは送信波形制御の目的で、電圧リミッター41を具備している。受信信号は受信アンプ44、A/Dコンバータ47や受信ビームフォーマ49を介した後、信号処理部51にて、Bモード断層像処理あるいはドップラー処理を経てビデオ信号に変換され、スキャンコンバータ52を介して表示部53に表示される。

【0023】

なお、図2に示したCMUTアレイ300の配列は一例であって、同心円状、碁盤目（grid）状、不等間隔など、他の配列形態でもよい。また配列面は、平面状又は曲面状のいずれでもよく、その面形状も、円形状又は多角形状などにすることができる。あるいは、CMUT（10）を、直線状又は曲線状に並べてもよい。また、図5に示す機能の一部が超音波探触子2000内に搭載されていてもよい。例えば、送受切り替えスイッチ及び受信アンプ等の電気回路が超音波探触子2000の中に組み込まれていても機能的な差異はない。

【0024】

次にCMUTの動作原理について説明する。CMUT（10）は、空隙層7及び絶縁膜4を挟んで、下部電極2と上部電極3とを配置した可変容量キャパシターとして機能する。上部電極3に力が加わりz方向に変位すると、下部電極2と可動する上部電極3の間隔が変わり、CMUTの静電容量が変化する。上部電極3と振動膜5は結合しているため、振動膜5に力が加わっても、上部電極3は変位する。このとき、下部電極2と上部電極3の間に電圧が印加されて電荷が蓄積されていると、下部電極2と上部電極3の間隔の時間変化は静電容量の時間変化となり、両電極間に新たに電圧が発生する。このようにして、超音波などの何らかの力学的変位をもたらす力が振動膜5に伝播すると、その変位が電気信号（電圧もしくは電流）に変換される。また、下部電極2と上部電極3に電位差を与えると、各々異なる符号の電荷が各電極に蓄積し、静電気力により電極間に引力が発生し、上部電極3が基板1側に変位する。このとき、上部電極3と振動膜5は結合しているため、振動膜5も同時に変位する。こうして、振動膜上部（z方向）に、空気、水、プラスチック、ゴム、生体など音響伝播媒体が存在すれば、振動膜5の変位が媒質に伝わる。電極に印加する電圧を時間的に変動させることで変位も時間的に変動し、結果的に音が放射される。すなわち、このCMUT（10）は、入力された電気信号を振動膜5に隣接した媒体へ超音波信号として放射し、逆に媒体からの超音波信号を電気信号に変換して出力する機能を有する電気音響変換素子として機能する。

【0025】

次に、CMUTの振動膜の振動モードについて説明する。CMUTの振動膜は様々な振動モードが励起されうる。図6には正六角形セルの振動モードの例を示す。図左は基本モードと言われる振動モードの振動形態を示している。基本モードは膜全体が同位相で振動するモードである（（1：1）モードと呼ぶ）。従って振動の腹は一つである。一方図右には振動膜の中央付近と振動膜中央から離れた位置にある支持壁付近に位相が約180度逆

10

20

30

40

50

になる腹が存在する（（１：３）モードと呼ぶ）。図７には上述した正六角形セルの膜の空気中におけるインピーダンス特性を示す。図中の低周波側のピークが基本モードの共振点、高周波側のピークが（１：３）モードの共振点である。この基本モードと高次モードの共振周波数の絶対値はセルのサイズによって変わるが、高次モードの共振周波数を基本モードの共振周波数で規格化した値は変わらない。基本モードの共振周波数を f_{11} とし、（１：３）モードの共振周波数を f_{13} とすると、 f_{13}/f_{11} は常に一定値（約３．８）となる。ここには、セル形状が正六角形の場合を示したが、高次モードの規格化した周波数は円形であってもほぼ変わらない。つまり、振動膜の中心から支持壁までの距離が方向に依存せず均等となる場合は、基本モードと高次モードの共振周波数の比は近い値になる（非特許文献１）。

10

【００２６】

一方、図２に示したような細長い長方形セルの場合は、励起される振動モード特性が、セル形状が正六角形や円形の場合とは大きく異なる。セル形状が長方形の場合、全体のサイズ以外に幅が長い方向と短い方向のパラメータが存在する（ここでは、長い方を縦、短い方を横とする）。縦横アスペクト比（図２中における l/w ）が“４”と“８”の場合の振動モードの例を図８に示す。図８からわかるとおり、基本モードの共振周波数 f_{11} は縦横アスペクト比を変えても同じだが、高次モード周波数は変わる。長方形セルの場合、基本モードの周波数は横幅 w で決まるが、高次モードは縦方向に沿って複数の腹を作るように発生するため、周波数は縦方向の長さで決まる。このため同じ横幅であっても縦横比が違うと、高次モードの周波数が変わり、従って基本モードの周波数に対する高次モードの周波数の比も変わる。長方形の周囲が固定端の場合、励起される振動モードは理論的に以下の式で表される。

20

【数１】

$$f_{res} \propto \frac{\pi}{2} \left[\frac{G_1^4}{w^4} + \frac{G_2^4}{l^4} + \frac{2J_1J_2}{w^2l^2} \right]^{1/2}$$

【００２７】

ここで、 w および l は長方形の横と縦の長さ、 G および J は境界条件によって決まる定数である。長方形の振動モードには、縦横アスペクト比が大きくなるにつれ、高次モードは基本モードの周波数に集中していく性質がある。図９には長方形の縦横アスペクト比を変えたときの高次モード周波数の周波数を基本モード周波数で規格化した結果を示す。図９から分かるとおり、縦横アスペクト比が大きくなるに従い高次モードの周波数が基本モード周波数に集中していくため（１に近づくため）、図の曲線の傾きが小さくなっていく。仮に無限に大きな縦横アスペクト比の場合、全てのモードが一つの周波数に集中することになる（全てのモードがNormalized frequency=１になる）。尚、図９には表示の都合上１：２，１：４，１：８，１：１６しか示していないが、他の縦横アスペクト比に対する曲線は図９に表示した曲線の間に連続的に存在する。例えば縦横アスペクト比が、１：３，１：５，１：６，１：７，１：９，１：１０，１：１１，１：１２，１：１３，１：１４，１：１５，１：１７，１：１８...に対応する曲線も存在する。さらに、縦横アスペクト比は前述したような整数比に限定されず、例えば１：１６．１、１：１６．５のように小数点以下の数値で表される場合も含まれる。

30

40

【００２８】

次に、この振動モードに起因する課題を説明する。図１０には基本モードの共振周波数を f_{11} とし、腹が二つある高次モードの共振周波数を f_{13} としたときのＣＭＵＴの音響的な周波数特性を示す。ここでは負荷として水や音響レンズなどの媒質に接している状態を想定している。図中の上側が送信音圧もしくは感度を示し、図中の下側には各振動モードの位相を示している。ここで言う位相とは、ＣＭＵＴの電極間に印加される交流電圧に対する音圧（もしくは膜の速度や変位）の位相差である。位相が０の点が共振点となり、共振

50

点を境目に低周波側と高周波側の極限では、位相が180度異なる。高次モードの位相は、振動膜の位置によって異なる。しかし、ここでは、最終的に放射される音圧に注目するため、正味の位相を定義する。たとえば、長方形膜における(1:3)モードの場合、振動膜の中心とその長手方向の両側に位相が180度異なる腹ができる。中心の腹は一つであるが、周囲には2つの腹ができる。このため、正味の振幅としては、腹が二つとなる方向が意味を持つ。従って、(1:3)モードの位相は腹が二つとなる方向として定義する。基本モードは膜全体が同位相で振動するため、一般的に高次モードよりも正味の振幅が大きく、感度が高い。図10から分かるとおり、 f_{11} と f_{13} の間に局所的に振幅が落ち込む(感度が低化する)周波数 f_d が存在する(以下dip、ディップと呼ぶ)。このようなdipが発生する理由は、基本モードと高次モードが打ち消し合うためである。すなわち、基本モードの位相と高次モード位相の差が大きくなる(180度に近くなる)周波数が存在するためである。位相差が0度の場合はお互いに強め合うため振幅は上がるが、位相差が互いに反転(180度)に近くなるに従い、お互いの振幅が打ち消し合う状態を作り出す。ただし、位相差が十分大きくても、振幅が小さい場合、その影響は小さい(たとえば、 f_{11} 付近は f_{13} の振幅が小さく、位相差は大きい打ち消す振幅が小さい)。従って、位相差と振幅の兼ね合いにより局所的にdipが形成される。

【0029】

一般的に、超音波トランスデューサはより高感度かつ広帯域な特性が望まれる。従って、基本モード周辺の帯域が広いことが望ましい。しかし、高次モードの存在により、dipが発生し、帯域幅が狭められることは望ましくない。またdipの周波数付近のみ局所的に送信音圧が落ちることは様々な周波数の音波を利用する超音波探触子として不適当である。すでに述べたように、円形や正多角形のようなセル形状の場合、高次モードの周波数は基本モードの周波数に対して一定の比率で固定されるため、dipの位置は一意に決まる。

【0030】

そのため帯域の向上は原理的に困難である。一方、長方形のような細長いセル形状の場合、各高次の振動モードの周波数は縦横アスペクト比で決まる。従って縦横アスペクト比を変えることでdipの位置を制御することができる。しかし、長方形の高次モードは円形や正多角形の高次モードよりも基本モード周波数に近い位置に発生する。つまり、長方形のdipはむしろ基本モードの帯域を狭める方向となり、広帯域性の向上とは逆方向となる。

【0031】

一例として、縦横アスペクト比が“2”、“4”、“8”、“16”のCMUTセルの送信感度の実験結果を図11に示す。比較として、正六角形セルの結果(HEX)も示す。正六角形セルの場合、基本モードの帯域中心は約9MHzとなっており、20MHz付近に大きなdipが発生している。一方、長方形セルの場合、基本モードの帯域は正六角形セルよりも広く25MHz以上あるが、縦横アスペクト比が小さい場合には基本モード帯域内に鋭いdipの発生が認められる。たとえば、縦横アスペクト比が“2”のときは11MHz付近、“4”のときは5MHzおよび8MHz付近に鋭いdipが存在する。一般的に超音波探触子の周波数帯域は送受信の場合、ピーク値から-6dBとなる周波数の幅で規定される。送信のみ、あるいは受信のみの場合、その半分の-3dBで規定される。しかし、図11中の縦横アスペクト比が“2”や“4”の場合、dipの深さが10[dB]以上あるため、六角形セルよりも相当狭い帯域幅になってしまう。

【0032】

一方、本実験データからは、長方形の縦横アスペクト比が大きいほどdipとdipの間隔が狭くなり、dipの深さも小さくなるのが分かる。例えば縦横アスペクト比が“8”の場合のdipの深さは、縦横アスペクト比が“4”の場合の数分の1であり、縦横アスペクト比が“16”の場合のdipの深さは更に小さくなるのが分かる。図12にその原理を示す。図12には3つの振動モードが関係する周波数特性を示している。各振動モードの周波数の間隔は縦横アスペクト比が大きいほど基本モードに近づくため、dipのできる間隔も狭まる。また、各振動モードの共振周波数が近づくことで、振動モードの位相差も小さくなる(図中 f_{d1})。さらに2つ以上の振動モードが重なる領域では、基本モードに同位

10

20

30

40

50

相に近いモードと逆位相に近いモードがそれぞれ存在するため、極端なdip形成は抑制される（図中fd2）。このように2つ以上の振動モードの干渉により、dipの位置や深さは変化する。

【 0 0 3 3 】

以上の長方形振動膜の振動モード間の干渉の性質を利用し、長方形でありながらdipの影響を低減させることができる。縦横アスペクト比が大きくなるに従い、基本モードの帯域内に発生するdipの数は増えるが、dipの深さは小さくなる。従って究極的には、無限に大きい縦横アスペクト比であればdipは発生しない。実際には無限の縦横アスペクト比はあり得ないが、dipが十分小さくなれば実際の使用上に問題がない閾値が存在する。図 1 1 に示した縦横アスペクト比が“ 8 ”の場合、基本モード帯域内に数個のdipが発生するが、dipの深さは最大値に対して-2dB程度である。また縦横アスペクト比が“ 1 6 ”ではほぼ1dB以下のdipとなる。図 1 1 の縦横アスペクト比が“ 8 ”および“ 1 6 ”の結果より、dipが十分無視できれば、長方形セルは六角セルよりも広帯域な特性を有していることが分かる。縦横アスペクト比をある値以上（長方形セルの場合、縦横アスペクト比を“ 8 ”以上）にすることで、不要応答を低減し、従来のCMUTよりも広帯域な超音波探触子を実現することができる。実際の設計においては、次のように縦横アスペクト比を設定すればよい。図 1 3 はある縦横アスペクト比の場合のCMUTの送受信感度を周波数特性として示している。縦横アスペクト比が有限の場合、必ず周波数特性上に一つ以上のdipが発生する。全てのdipの深さが最大6 dB以下であれば（送信もしくは受信のみの場合3 dB）、実用上、超音波トランスデューサの帯域はdipに依存しないと言える。従って、基本モードと長い方向に発生する高次モードの干渉によるdipの深さ（図 1 3 中のDF）が送受信で6 dB以下となるような縦横アスペクト比とすればよい。

【 0 0 3 4 】

[第 2 実施形態]

図 1 1 には、周波数特性だけではなく、送信される音波の時間応答のエンベロープ（包絡）も示している。超音波画像装置等ではエンベロープの幅が画像の分解能に大きく影響する。このためエンベロープの幅は重要な評価要素となる。縦横アスペクト比が小さくdipが大きい場合、メインパルスの後の信号レベルが六角形セルの場合よりも高く、いわゆるリングング（尾引き）が発生している。このようなリングングが発生すると、超音波診断装置等で画像化する際のノイズ成分となりうる。従って、実際の利用上においてはリングングを極力低減した波形が必要になる。図 1 1 より、縦横アスペクト比が“ 8 ”以上では、ほぼ六角形セルと同様のリングングレベルになることが分かる（約-25 dB以下）。

【 0 0 3 5 】

通常、超音波診断装置で用いられる信号のダイナミックレンジは50-60 dB以上ある。生体の撮像を目的とするならば、標準的な撮像領域は体表より深さ10 cm程度であり、このような深さで最もよく使用する探触子の感度帯域は概ね10 MHz以下である。生体の減衰係数は水とほぼ同じで約0.5[dB/cm/MHz]といわれている。たとえば、5 MHzで10 cmの深さまで撮像しようとするとき、探触子から送信された信号は、生体内の反射点からの往復で、 $0.5[\text{dB/cm/MHz}] \times 10[\text{cm}] \times 2 \times 5[\text{MHz}] = 50$ dBの減衰が起こる。従って、このような場合、探触子の持つ信号のダイナミックレンジ（DR）は50dB程度要求される。このような理由から、通常、医療用超音波診断装置等では、送受感度のダイナミックレンジ（DR）として50 dB程度は保持している。従って、送受で少なくとも送信パルス50 dB以上のレベルにリングング等の不要応答が存在すると、画像の分解能の劣化等の性能低下を引き起こす可能性がある。このような観点から、基本モードと高次モードの干渉によるリングングは送受で50 dB以下、送信のみや受信のみの場合、その半分である25dB以下であることが要求される。

【 0 0 3 6 】

実際の設計においては、本発明により以下のように縦横アスペクト比を設定することができる。図 1 4 は送信音波あるいは受信信号の時間波形のエンベロープを示している。この波形の最大点からリングングレベルとの差（図中DE）が25 dB以上、送受信の場合50 dB以上、となるような縦横アスペクト比とすることである。これにより、実用上パルス幅の

狭い時間波形を実現することができる。

【 0 0 3 7 】

[第 3 実施形態]

第 2 実施形態ではある特定の用途に応じた周波数と深さを設定しているが、他の用途においては条件が変わりうる。例えば、同じ生体撮像目的であっても、より高周波を用いて浅い領域を高分解能で撮像する場合がある。このとき、20MHzで3cm程度までの撮像の場合、最低限必要なダイナミックレンジは $0.5[\text{dB}/\text{cm}/\text{MHz}] \times 3[\text{cm}] \times 2 \times 20[\text{MHz}] = 60 \text{ dB}$ となる。図 1 1 の結果より、縦横アスペクト比が “ 1 6 ” のときの送信ゲインのリングングレベルは -30 dB 程度となっている。つまり、送受で約 60 dB の DE に相当する。従って、本条件における長方形の縦横アスペクト比は “ 1 6 ” 以上ということになる。

10

【 0 0 3 8 】

上記をまとめると、より一般的に以下のように縦横比の設定方法を規定することが可能である。実験データに基づき、縦横アスペクト比と送受の DE の関係を図 1 5 に示す。図中の各点が実験データ、曲線 1 5 0 は対数曲線でフィッティングしている。図 1 5 を用いれば、最低限必要なダイナミックレンジ (DR) が決まれば、自ずと必要となる送受エンベロープの最大点とリングングレベルとの差 (DE) が決まり、その結果、必要となる縦横アスペクト比 (Aspect ratio) が求まる。必要となるダイナミックレンジは上記のように、送受信の減衰の式、つまり、減衰係数 $[\text{dB}/\text{cm}/\text{MHz}] \times \text{撮像深さ}[\text{cm}] \times 2 \times \text{使用周波数}[\text{MHz}]$ から求めればよい。しかし、当然ながら DE が必ずしも一意の値に決まるとは限らない。つまり、分解能を犠牲にして良い場合などにおいては、リングングレベルは変わりうる。しかしその場合は、目的に応じて要求されるリングングレベルに対して、改めて図 1 5 と同様の曲線を求め、基準を設定し直せばよく、本発明の趣旨である縦横アスペクト比の設定方法自体が変わるものではない。例えば、図 1 5 では、図 1 1 に示した六角形セルのエンベロープの -10 dB の位置におけるパルス幅以降に存在するピークをリングングレベルと認定したが、分解能が六角形セルの場合ほど要求されない仕様においては、リングングレベルと見なす値が下がり、結果として DE は全体的に増加する。その結果、図 1 5 の曲線 1 6 0 のようになることがある。このとき、同じ DR であっても、必要となる縦横アスペクト比 (Aspect ratio) は約 “ 4 ” 以上ということになる。

20

【 0 0 3 9 】

[第 4 実施形態]

本発明は各振動モードの共振周波数からも最適な縦横アスペクト比を設定することができる。第 1 および第 2 実施形態では、長方形の縦横アスペクト比が “ 8 ” 以上にするこ
とを示した。一方、縦横アスペクト比が大きくなることは、図 8 の結果より、基本モードに対する各振動モードの共振周波数が小さくなることに対応する。縦横アスペクト比が “ 8 ” の場合、(1 : 1) モードから 5 個目の (1 : 1 1) モードが、(1 : 1) モードの共振周波数の 2 倍以下となっている。言い換えれば、Normalized frequency が 2 以下の領域に腹の数が奇数個存在する振動モードの数が 6 個以上存在するとき縦横アスペクト比が “ 8 ” 以上となる。

30

【 0 0 4 0 】

従って、正六角形セル以上の広帯域性を実現する場合の実際の設計においては、Normalized frequency が 2 以下の領域に腹の数が奇数個存在する振動モードの数が 6 個以上存在するような縦横アスペクト比とすべきである。

40

【 0 0 4 1 】

[第 5 実施形態]

第 1 から第 4 実施形態では、セル形状が長方形の場合について縦横アスペクト比の設定方法を示した。しかし、実際のセル形状は必ずしも厳密な意味での長方形に限らない。図 1 6 に示したように、振動膜の中心から支持壁までの距離が均一でないセル形状は無数に存在する。因みに、A は長方形、B は八角形、C は六角形、D は微細な凹凸を有する長方形、E は楕円形の例を示している。勿論、形状は図 1 6 以外の形状でも良い。しかし、図

50

から分かるとおり、支持壁間の狭い方向(W)と長い方向(L)の長さを代表アスペクト比($=l/w$)として定義すれば、第1から第4実施形態で述べた方法により最適なアスペクト比を設定することができる。因みに、微細な凹凸を有する場合における支持壁間の狭い方向(W)と長い方向(L)の長さは、微細な凹凸を無視した各辺又は頂点間の長さ又は平均的な長さで与えるものとする。また、Dの例は、微小な凹凸が元図形である長方形の外縁を拡張するように形成した例を表しているが、各辺の外縁を元図形よりも内側に狭めるように形成することもできる。また、微小な凹凸の幅や深さは、支持壁間の狭い方向(W)と長い方向(L)の長さに対して十分に小さいものとする。ここでの十分に小さいとは、元図形を損なわない程度又は例えば図11に示すような時間応答のエンベロップを元図形の特性から大きく変化させない程度をいう。

10

【符号の説明】

【0042】

- 1：基板
- 2：下部電極
- 3：上部電極
- 4：絶縁膜
- 5：振動膜
- 6：音響媒質
- 7：空隙層
- 8：支持壁
- 9：背面材（バッキング材）
- 10：静電容量型マイクロマシン超音波トランスデューサ
- 30：コネクタ部
- 31：引出線
- 32：上部電極接続パッド
- 33：下部電極接続パッド
- 40：送受切替スイッチ
- 41：電圧リミッター
- 42：電源
- 43：送信アンプ
- 44：受信アンプ
- 45：直流電源
- 46：D/Aコンバータ
- 47：A/Dコンバータ
- 48：送信ビームフォーマ
- 49：受信ビームフォーマ
- 50：制御部
- 51：信号処理部
- 52：スキャンコンバータ
- 53：表示部
- 54：ユーザインターフェース
- 150：送受波形のエンベロップのピークとリングングレベルの差に関するアスペクト比依存性（正六角形セルの送信エンベロップの-10 dBの時間を基準）を示す曲線
- 160：送受波形のエンベロップのピークとリングングレベルの差に関するアスペクト比依存性（正六角形セルの送信エンベロップの-10 dBの時間以上を基準）を示す曲線
- 210：音響レンズ
- 220：音響整合層
- 240：導電性膜
- 300：CMUTアレイ
- 2000：超音波探触子（プローブ）

20

30

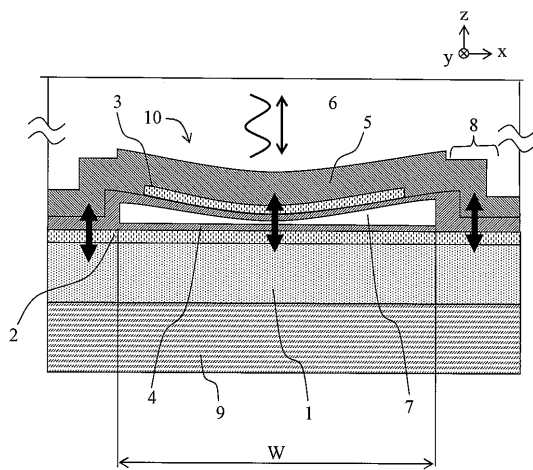
40

50

- A : 長方形
 B : 八角形
 C : 六角形
 D : 微細な凹凸のある長方形
 E : 楕円形

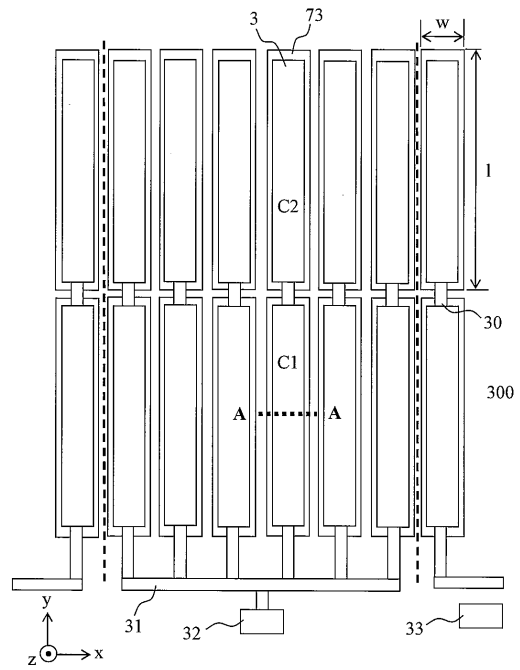
【図 1】

図 1



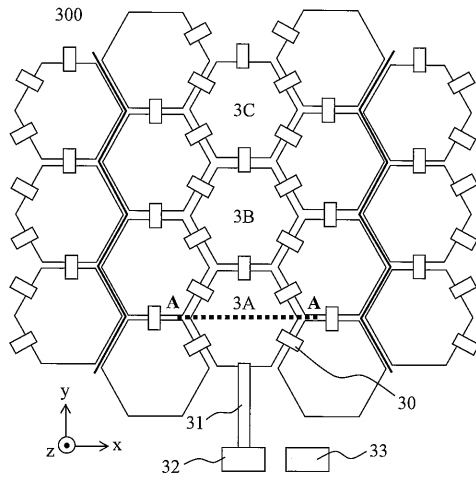
【図 2】

図 2



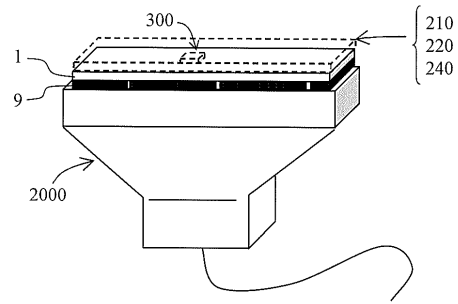
【図 3】

図 3



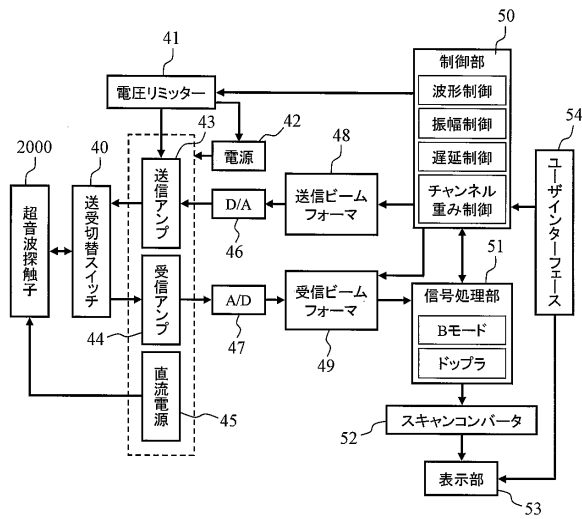
【図 4】

図 4



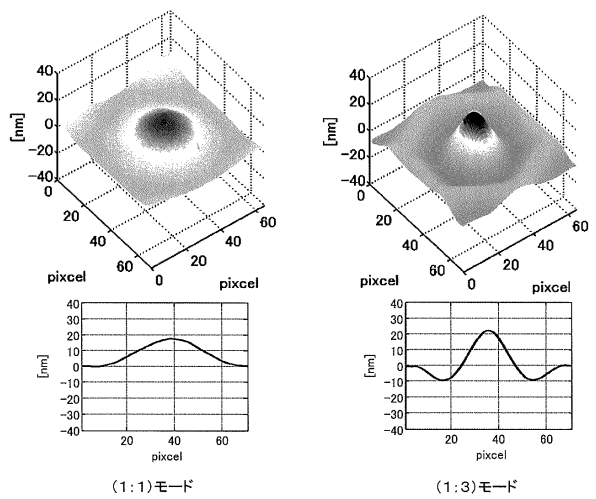
【図 5】

図 5



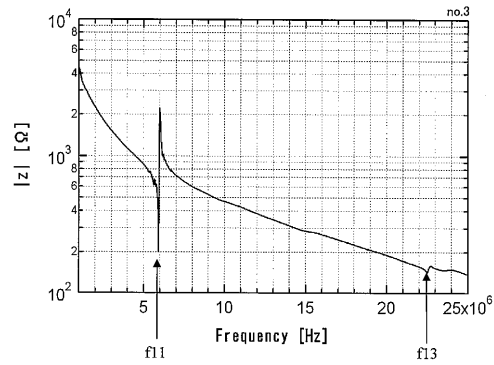
【図 6】

図 6



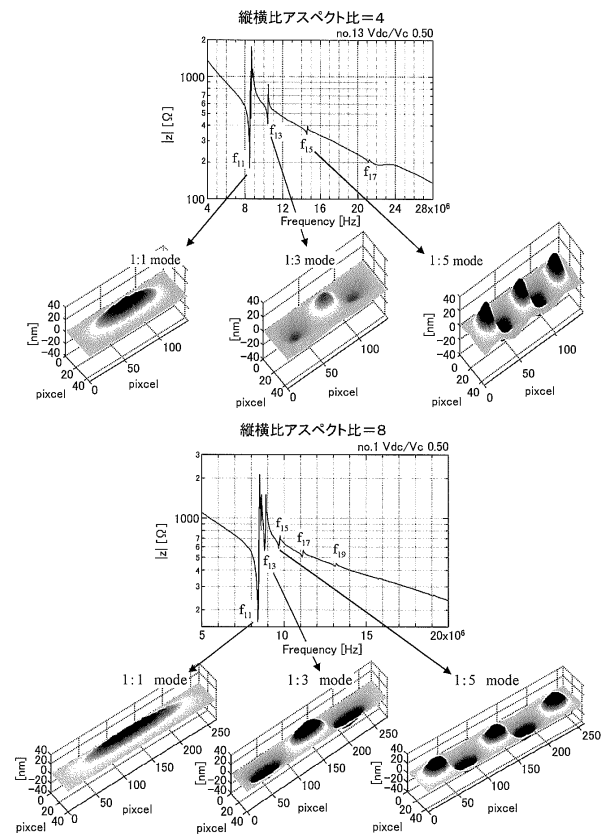
【図 7】

図 7



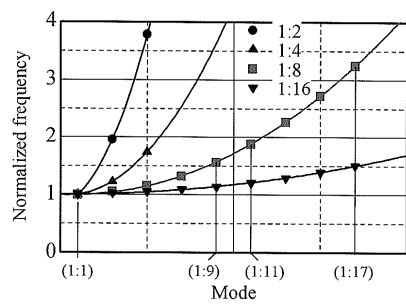
【図 8】

図 8



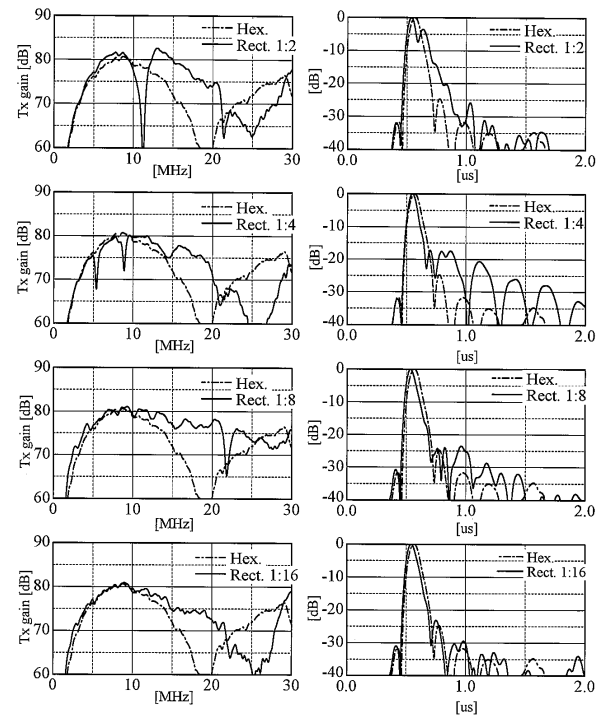
【図 9】

図 9



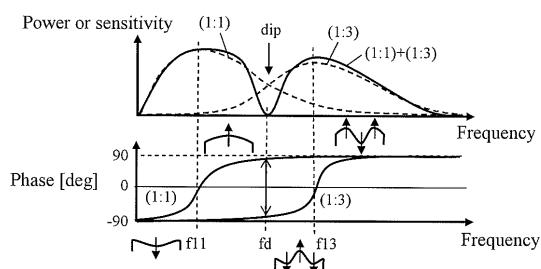
【図 11】

図 11



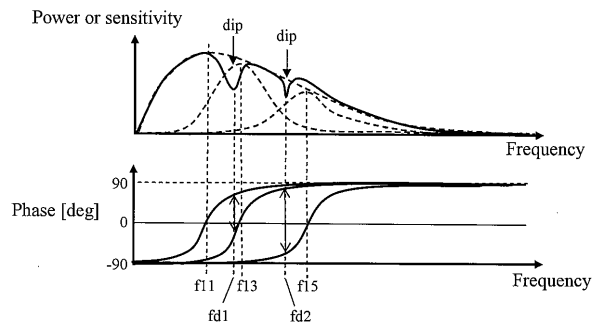
【図 10】

図 10



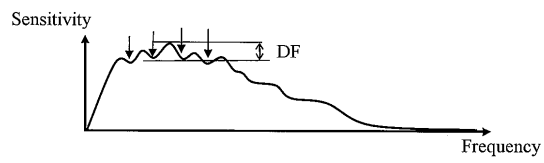
【図 1 2】

図 1 2



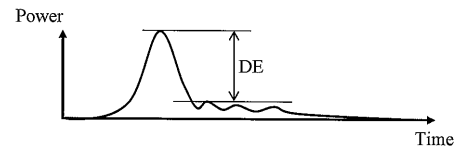
【図 1 3】

図 1 3



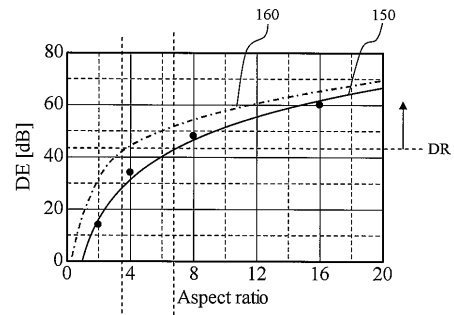
【図 1 4】

図 1 4



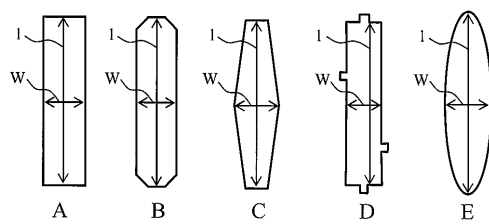
【図 1 5】

図 1 5



【図 1 6】

図 1 6



フロントページの続き

審査官 富澤 直樹

(56)参考文献 再公表特許第2007/046180(JP,A1)
特開2008-510324(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04R 19/00

A61B 8/00

H04R 7/00

G01N 29/24

专利名称(译)	超声探头和超声成像装置		
公开(公告)号	JP5342005B2	公开(公告)日	2013-11-13
申请号	JP2011531855	申请日	2010-08-11
[标]申请(专利权)人(译)	株式会社日立医药		
申请(专利权)人(译)	株式会社日立メディコ		
当前申请(专利权)人(译)	株式会社日立メディコ		
[标]发明人	田中宏樹 町田俊太郎		
发明人	田中 宏樹 町田 俊太郎		
IPC分类号	H04R19/00 H04R7/00 A61B8/00 G01N29/24		
CPC分类号	B06B1/0292		
FI分类号	H04R19/00.330 H04R7/00.330 A61B8/00 G01N29/24.502		
代理人(译)	渡辺 敏章		
审查员(译)	富泽 直树		
优先权	2009215755 2009-09-17 JP		
其他公开文献	JPWO2011033887A1		
外部链接	Espacenet		

摘要(译)

当静电容量型微机械超声换能器的单元形状具有各向异性时，减少由高阶振动模式引起的不必要响应。当构成静电容量微机械超声换能器的薄膜的长方向（ l ）和短方向（ w ）的比率作为代表纵横比（ l/w ）时，它在探头的发送/接收带宽内。代表性的纵横比被设定为不会形成6dB或更大的下降的值。或者，在基本模式频率的频率为2或更小时存在的反节点数是奇数的振动模式的数量被设置为6或更多。

下の式で表される。

【数1】

$$f_{res} \propto \frac{\pi}{2} \left[\frac{G_1^4}{w^4} + \frac{G_2^4}{l^4} + \frac{2J_1 J_2}{w^2 l^2} \right]^{1/2}$$