

氏 名	岡 崎 英 次
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年3月15日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭 和 2 8 年 3 月 東北大学大学院特別研究生（第1期）修了
学 位 論 文 題 目	PbTiO ₃ 系圧電磁器を用いた縦効果縦振動子の結合振 動特性に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 清水 洋 東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 山之内和彦 東北大学教授 中村 僖良

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

従来、超音波診断装置や超音波探傷装置などの探触子材料には、Pb(Zr, Ti)O₃系の圧電磁器が用いられてきた。これらの圧電磁器は、縦効果の電気機械結合係数 k_{33} に比べて横効果の電気機械結合係数 $|k_{31}|$ にある程度の大きさがあるため、不要振動が発生し易く、超音波探触子の高周波化が難しかった。特に、最近超音波診断装置で用いられる電子走査形アレー探触子に用いる短冊形圧電振動子では、不要振動を避けるために厚さ（分極方向の長さ）と幅の比を2程度以上にしなければならない。このため、探触子の高周波化を行う場合、振動子の幅が小さくなり、製作が困難になるという問題があった。そこで、 k_{33} に対して $|k_{31}|$ が極めて小さいPbTiO₃系圧電磁器が注目され始めた。

$|k_{31}|/k_{33}$ が極端に小さいPbTiO₃系圧電磁器を用いた振動子でも、縦方向（分極方向）の振動を励振するとそれに直角な方向の振動も材料の弾性的な結合を通して励振されるから、振動子の共振周波数と電気機械結合係数は振動子の寸法比に大きく依存する。このような結合振動特性、即ち共振周波数と電気機械結合係数の寸法比依存性は、PbTiO₃系磁器の場合充分には調べられていない。この研究では、PbTiO₃系磁器を用いた方形薄板、円柱、及び直方体縦効果縦振動子の結合振動特性を、等価結合回路による理論と実験の両面から詳しく調べた。また、調べられた特性を実用的見地から検討した。さらに、従来用いられてきたPb(Zr, Ti)O₃を用いた振動子の特性との差異を明らかにした。

第2章 等価結合回路による結合振動特性の計算方法

この章では、モード間結合のある振動子と、等価結合回路との関係、及びその振動子を等価結合回路として表す方法について述べてある。また、一般的な等価結合回路について、その回路から結合振動特性を計算する具体的な方法を示してある。

第3章 方形薄板及び円柱振動子の結合振動特性（直交二方向間の基本モードだけを考慮した場合）

方形薄板振動子や円柱振動子の結合振動特性はかなり複雑になることが予想される。この章では、 PbTiO_3 系及び $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系圧電磁器を用いた、分極方向が板面に平行な方形薄板と、両端面を電極とする円柱振動子の結合振動特性の概要を把握する目的の検討を行った。即ち、理論計算については、直交二方向間の基本モードだけの結合を考慮した場合（方形薄板の場合には分極方向とそれに直角方向の基本振動の結合した場合、円柱振動子の場合には軸方向の基本縦振動と半径方向の基本ラジアルモードの結合した場合）について計算を行い、これと実験とを比較した。その結果、寸法比即ち分極方向の寸法とそれに直角な方向の寸法の比（円柱の場合には軸長と直径の比）が1程度より大きい場合には、理論値と測定値はかなりよい一致をみたが、寸法比が1より小さくなると、共振周波数、電気機械結合係数ともに理論値と測定値が一致しない場合があった。これは、分極方向の基本縦振動モードに、分極に直角な方向の振動の高次モード（方形薄板の場合には高次の横効果縦振動モード、円柱では高次のラジアルモード）が結合しているのに、計算ではこのモードを考慮にいれなかったためと考えられる。したがってより厳密な計算値を得るには、高次モードも考慮に入れる必要がある。しかし、計算値は測定値の特徴的なことは表しているため、測定値のおおよそは説明できた。この結果、方形薄板と円柱振動子の結合振動特性がほぼ明らかになり、 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ の場合との差異もわかった。

第4章 短円柱／円板振動子の結合振動特性（高次のラジアルモードとの結合も考慮に入れた場合）

この章では、第3章で計算値と測定値のよい一致がえられなかった寸法比が1より小さい範囲での PbTiO_3 系及び $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系圧電磁器を用いた短円柱（または円板）振動子の結合振動特性が調べられている。等価結合回路による計算では、軸方向の基本モードと3次までのラジアルモードの結合を考慮に入れた。測定値には、計算で考慮に入れていないラジアルモード以外の振動モードとの結合による共振が幾つも現れたため、計算値は測定値に充分一致したとは云えない。しかし、第3章の計算のように、基本モードだけの結合を考えた場合とは異なり、電気機械結合係数の測定値が寸法比によって変化する様子をかかなりのところまで表すことができた。この研究により、 PbTiO_3 系磁器を用いた円柱振動子の結合振動特性が寸法比が1よりも小さい範囲でも明らかとなり、 PbTiO_3 系の振動子と $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系の振動子の結合振動特性には著しい差異のあることがわかった。即ち PbTiO_3 系の場合には、特定の寸法比の範囲で k_a （細棒の縦効果縦振動の基本モードに対する電気機械結合係数の値）に近い大きな結合係数をもつ共振モードがある反面、結

合係数 k の値がかなり小さく零に近いような共振モードも多い。一方、 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系の場合にはどの共振モードの k 値も k_a よりはかなり小さいが、 k 値が極端に小さいような共振モードはない。 PbTiO_3 の場合、 k_a に近い k 値が得られる共振モードでは、そのモードはほぼ単一共振特性となる。これに対して $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ の場合にはこのような特性を与える寸法比は存在しない。

第5章 方形薄板圧電振動子の結合振動特性（高次の横効果縦振動モードとの結合も考慮に入れた場合）

この章では、 PbTiO_3 系及び $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系圧電磁器を用いた、寸法比が1より小さい方形薄板振動子の場合について、第4章と同じような検討をしてある。即ち、分極方向の縦効果縦振動に対しては基本モードだけ、分極に直角方向の横効果縦振動に対しては5次のモードまでを考慮に入れた計算を行い、これと測定値を比較検討してみた。その結果、第4章の円柱の場合とほぼ同じ結果が得られた。即ち、 PbTiO_3 系磁器を用いた振動子の結合振動特性が寸法比が1よりも小さい範囲でも明らかとなり、 PbTiO_3 系の振動子と $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系の振動子の結合振動特性とは著しい差異のあることがわかった。しかし、単一共振特性を示す寸法比の範囲は円柱の場合よりやや広い。この範囲で円柱の場合には k_a の91%以下の k 値しか得られなかったが、方形薄板の場合には寸法比の選び方によって k_a と同程度の k 値が得られる。また、分極に直角な方向の長さが分極方向の長さの約25倍以上の PbTiO_3 系方形薄板振動子には、みかけ上細棒の基本縦振動モードの結合係数 k_a に等しい k 値を持つ振動モードがあることもわかった。

第6章 直方体振動子の結合振動特性（3次元結合の場合）

この章では3章と5章の研究結果を参考にして、 PbTiO_3 系圧電磁器を用いた直方体縦効果縦振動子の結合振動特性を調べた。振動子の形状は次の場合とした。

- (1) 分極に直角な一方の長さが無限長とみなせる場合
- (2) 電極面が正方形の場合
- (3) 一方の分極方向の長さ分極に直角方向の長さの比を約0.4(方形薄板の場合単一共振特性の得られる寸法比)一定とした場合

この研究で、 PbTiO_3 を用いた直方体振動子の結合振動特性が、広い寸法比の範囲で明らかになった。したがって単一共振特性が得られる3種の比も明らかとなり、寸法比が1より小さい範囲、即ち分極方向の寸法よりもこれに直角な方向の寸法が大きい振動子でもかなりの範囲で単一共振特性を示すことがわかった。この範囲は、(1)(2)(3)ともに大きい差異はなかった。また、第5章の方形薄板の場合ともほぼ同じであった。

(1) については、 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ の場合についても結合振動特性を調べてみた。この結果 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ の場合には、1より小さい寸法比の範囲では単一共振特性を示す寸法比は無かった。

第7章 結合理論による圧電磁器諸定数の決定

結合係数 k_{31} や k_{33} , ポアソン比 σ_{11} などの圧電磁器材料諸定数を決定する場合には, 一般には極限形状の振動子が必要である。したがって定数決定に用いる振動子については, 極限形状とみなせる寸法比を知る必要がある。結合振動特性を調べれば, 必要なモードに対して極限形状とみなせる寸法比の限界を知ることができる。

結合振動特性を求める諸式を利用すれば, 極限形状とはみなせない振動子の諸特性から磁器定数を定めることもできる。

また, 分極方向が板面に垂直で, 正方形に近い寸法の方形薄板の縦と横の基本共振周波数から材料の σ_{11} を決定する方法のように, 結合を積極的に利用した測定法も考えられる。

本章では, このような圧電磁器諸定数の決定に対する結合振動特性の利用について述べた。また, 決定例について示した。

第8章 結合振動特性の具体的活用例

$\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系の直方体や円柱形縦効果縦振動子では, 寸法比即ち分極方向の寸法とこれに直角な方向の寸法の比が1より小さい場合には, 縦効果縦振動を励振しても横効果縦振動も励振されるため, 単一共振特性を得るには, 細棒の形状にしなければならなかった。このため, 高い周波数の振動子の作製が困難になる欠点があった。 PbTiO_3 を用いた円柱や直方体振動子は, その寸法比が1より小さい場合でも(分極方向の長さより直角方向の長さが大きい振動子でも)その寸法比を適当に選べば単一共振特性を示すことがわかった。したがって, 高い周波数の振動子が作り易くなる。このような振動子は, フィルタの共振子や, 超音波送受波用のトランスデューサなど幅広い活用が考えられ, これらの振動子を用いた装置の性能を高め得ることが期待できる。本章では, 各振動子の単一共振特性を示す寸法比の範囲を比較した。また, このような特性を持つ PbTiO_3 系振動子の具体的な活用例として, 医用診断装置の電子走査型アレー探触子用振動素子として, 及び複合圧電材料の圧電素子としての活用を考えてみた。

第9章 結 論

本研究により得られた成果と今後の課題について述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

PbTiO₃系圧電磁器は、横効果電気機械結合係数が極端に小さく不要振動応答の少ない振動子を得易いため、近年超音波診断装置などの探触子の材料として注目されるようになった。振動子の共振周波数と電気機械結合係数は、互いに直角の方向の振動が弾性的に結合するため、振動子の寸法比に大きく依存する。著者は、この結合振動特性を、円柱、方形薄板、直方体の各形状について、理論と実験の両面から詳細に調べ、単一共振に近い良好な振動子特性が得られる寸法比の範囲を明らかにしている。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編9章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、本論文の理論計算に採用した等価結合回路による結合振動特性の計算方法を説明している。

第3章では、軸方向に分極した円柱と一辺に平行に分極した方形薄板の結合振動特性を、2つの基本縦振動モード間の結合だけを考慮した計算と実験により調べている。分極方向と直角方向との寸法比（以下単に寸法比と呼ぶ）が1以上の特性はこれでほぼ明らかになったが、寸法比が1以下の範囲に対してはさらに詳細な検討が必要なが示された。

第4章では円柱の場合、第5章では方形薄板の場合について、寸法比が1以下の範囲での結合振動特性を、高次の横効果縦振動モードとの結合も考慮に入れた計算と詳細な実験により調べている。この結果、Pb(Zr, Ti)O₃系の場合には、単一共振に近い縦効果縦振動モードは寸法比が1以下では得られないのに対し、PbTiO₃系磁器の場合には、縦効果縦振動モードがほぼ単一共振の特性を示す寸法比が二、三存在し、そこでは細棒の場合とほぼ同等の電気機械結合係数が得られることが明らかになった。

第6章では、直方体振動子の3次元的結合振動特性を同様の方法で調べ、方形薄板で単一共振特性の得られる寸法比を組み合わせた形状の直方体もやはり単一共振特性を示すことを見出した。これは有用な新知見である。

第7章では、結合振動特性を利用して、圧電磁器の諸定数を決定する方法を提案し、適用例を示している。

第8章では、結合振動特性を応用面に活用する二、三の例を述べている。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、PbTiO₃系圧電磁器を用いた円柱及び直方体の縦効果縦振動子について、結合振動特性を寸法比の広い範囲にわたって詳細に調べ、単一共振に近い良好な振動子特性が得られる寸法比を明らかにしたもので、通信工学及び音響工学の発展に寄与することが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。