

氏 名	くさ か べ ち はる 日 下 部 千 春
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 54 年 4 月 11 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 32 年 3 月 山形大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	圧電駆動音片振動子とその応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柴山 乾夫 東北大学教授 清水 洋 東北大学教授 城戸 健一 東北大学教授 斎藤 秀雄

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

両端自由の鋼製音片は単位体積内に蓄積されるエネルギーが純電氣的素子より大きく、また、高い共振の尖鋭度と周波数安定度を保有し、音片発振器や各種音片を複合構成したメカニカルフィルタの共振子として広く実用に供されているが、近年、通信網の多重化、電子装置の集積回路化と共に、より小形で低周波用（50 KHz 以下）のメカニカルフィルタが要望されている。このような要求にそったメカニカルフィルタの変換・共振子として、厚さの薄い素地音片に圧電セラミックを部分接着した圧電駆動形の横振動音片が有効であるが、一般に素地音片に及ぼす圧電セラミックの影響が無視できない。すなわち、見かけの共振周波数や振動モードが素地音片固有の場合とは異なってくるため、モード変化も含めた圧電駆動音片の諸解析が必要となるが、従来の解析ではこの点がほとんど考慮されていない。第 2 章では圧電セラミック部分接着・横振動音片について、圧電セラミックの影響を考慮した諸特性の解析と実験的な検討を行ない、この種音片の設計指針を与えると共に低周波用メカニカルフィルタの設計に利用しようとしている。一方、音片振動子は振動子に固有の多くの高次モードで共振し、目的とするモード以外の高次モードは単一共振を利用する発振子やメカニカルフィルタにとってスプリアスとなり、この種のスプリアス除去対策は重要な課題となっている。従来、横振動系の振動子に関して、高次モードを抑圧する振動モードの制御については部分的な対策が行なわれているだけで、広帯域にわたる対策

は全くなされていない。第3章では電極形状を工夫することにより、振動子に固有の所望の単一モードのみを励振する振動モードの制御法を明らかにし、それを実験検証してスプリアス対策としての有効性を明らかにすると共に、この種振動子の設計指針を述べている。第4章では主として低周波用のメカニカルフィルタとして開発した振り結合子・横振動共振子形の音片フィルタについて詳述し、設計法や試作結果など実用化のための基礎資料を与え、さらに、振動モード制御形音片を用いたフィルタの試作結果も示して、スプリアス対策としての関数形電極の有効性を明らかにすると共に、その他二三のメカニカルフィルタの構成についても言及している。

## 第2章 圧電セラミック部分接着・横振動音片の解析

図1は対象とする圧電駆動・横振動音片で、図示の場合奇数次モードだけが励振される。初めに、運動方程式に基づき諸特性を解析し、次に機械系の電気回路網類推考察によって解析して、両法の解析結果の比較から、複雑な機械系の振動解析も電気回路網に類推して比較的容易に解析できることが示されている。なお、機械系の電気回路網類推考察では変位速度としてたわみ変位速度  $v$  と傾斜速度  $\dot{\theta}$  とお、端子力として

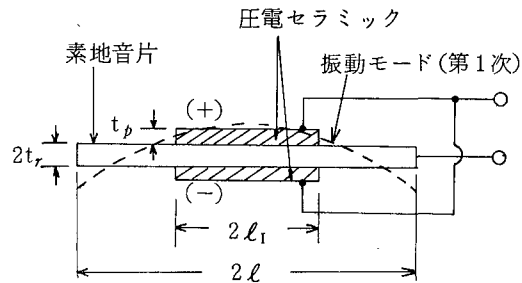


図1. 圧電駆動・横振動音片

力  $P$  と曲げモーメント  $M$  とを考え、圧電駆動音片を素地音片部と圧電セラミック接着部の2つに分割し、各部を等価8端子回路網で表示して、音片全体を端条件の異なる等価8端子回路網の直列あるいは縦続接続とみなして行列計算によって解析しており、圧電駆動音片の解析には曲げモーメント駆動の場合が便利であることも指摘している。上記2法の解析により圧電セラミックと素地音片の寸法比が与えられた場合の共振周波数や振動モード、等価回路定数などが与えられ、数値計算と実験結果の対応が示されている。すなわち、寸法比（厚さ比  $t_p/t_r$ 、長さ比  $l_1/l$ ）によって共振周波数や振動モードが変化し、第1次モードに関しては  $l_1/l = 0.7$  のとき共振周波数が最高となり、節点が音片の長さの中央部に最も移動すること、厚さ比によって第3次モード抑圧の長さ比が異なった値をとることが分り実測によっても確認している。

後半では偶数次モードについても解析と実験的検討が行なわれており、本章で得られた結果は振り結合子形音片フィルタの結合子の接着位置や支持位置の決定など、音片フィルタ設計に直接活用される。

## 第3章 電気・機械振動子の電極形状による振動モードの制御

従来、駆動力分布の制御による単一共振系の実現が提案されているが、横振動子に関しては、部分電極配置により特定次数の横振動のみを抑圧する部分的な対策以外、広帯域にわたり単一の共振系を実現する具体的な手法は現在まで得られていない。

筆者は振動子が圧電駆動され第 $m$ 次の規準関数形で振動しているとき、そのひずみ分布が端条件の異なる第 $m$ 次の規準関数と相似であることに着目して、ひずみによる励起電荷が規準関数の直交特性を保存するように電極形状を工夫して、第 $m$ 次のみの単一共振を励振する振動モードの制御法を実現している。

初めに、図2のバイモルフ形横振動音片について、次に図3の分割電極・横振動圧電振動子について、それぞれ所望のモードのみを励振する関数形の電極形状 $F(x)$ を決定してその実験検証を行っている。また、関数形電極振動子の等価回路定数や容量比などを、全面電極形や部分電極形などの均一幅電極振動子のそれとも比較している。容量比については図2の場合、第3次モード抑圧・部分電極振動子にくらべて約19%大きい、全面電極形より8.9%小さいこと、図3(a)の場合は均一幅電極振動子より小さいこと、A形で

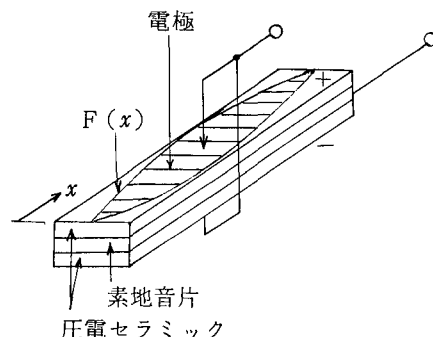


図2. 関数形電極を有するバイモルフ形横振動音片（第1次モード利用）

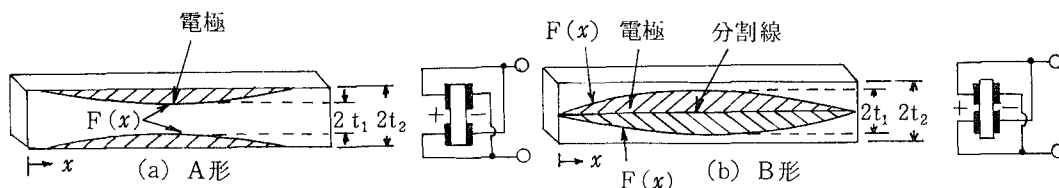


図3. 関数形電極を有する分割電極・横振動圧電振動子（第1次モード利用）

$t_1/t_2 \div 0.173$  のとき、B形で  $t_1/t_2 = 1.0$  のときそれぞれ容量比が最小となること、さらにA形とB形の等価回路定数は  $t_1/t_2 \div 0.707$  のとき相等しいことなど理論及び実験的にも検討し、実用上重要な4端子構成についても言及している。

また、Vormerの提案による縦振動子の振動モード制御についても検討し、モード制御の限界や等価回路定数、高次モードの駆動について述べている。さらに圧電駆動縦振動音片の振動モード制御についても言及し、圧電セラミックの影響を考慮した共振周波数を算出して実用に便利な設計図表を与え、周波数降下を指摘して実測値とも比較している。本章での解析と実験結果は、関数形電極振動子が近似的に単一共振子として取扱うこと、また、単一共振回路の使用範囲も従来にくらべて拡張できることを示している。

#### 第4章 音片フィルタへの応用

本章では主として低周波用メカニカルフィルタとして開発した、振り結合子・横振動共振子形の音片フィルタについて、構成原理と設計法並びに試作結果について述べている。

図4は振り結合子形音片フィルタの構成図で、共振子が第1次の横振動を行ない、共振子間のエネルギー伝達が結合子の振りインピーダンスを介して行なわれるもので、結合子の接着点が共振子の節点に一致しているため、共振子の横振動に応じて結合子は振り振動を行なって次の共振子へ振動エネルギーを伝達する。電気・機械変換は共振子として第2章、第3章で述べたバイモルフ形の横振動音片を用いて行なわれ、前章での設計資料が直接活用されて音片フィルタが構成される。

フィルタの比帯域幅は結合子の振りスチフネスをえることにより任意に選定でき、比帯域幅が5.7~10%の音片フィルタが実現されている。また、関数形電極振動子を変換・共振子とした試作結果を示し、関数形電極が広帯域にわたるスプリアス除去対策として十分有効であることが示されている。

次に、圧電駆動音片を差動接続したフィルタの構成と設計並びに試作結果も示し、前同様に関数形電極のスプリアス除去に対する有効性が実証されている。後半では横振動圧電共振子あるいは両端圧電駆動縦振動子を横振動結合子で結合したフィルタについても言及し、両端圧電駆動縦振動子については共振周波数や等価回路定数なども算出して、フィルタ設計に対する基礎を与えている。

## 第5章 結 論

圧電駆動音片振動子について圧電セラミックの影響を考慮した諸特性の解析とその音片フィルタへの応用について述べた。圧電セラミック部分接着・横振動音片について振動モードの変化も含めた解析を行ない、振動モード計算式や等価回路定数、第3次モード抑圧の条件などこの種音片の設計諸式を与え、さらに、実験的な検討を行なって音片フィルタ設計に対する基礎を与えた。

また、横振動子について所望の次数の横振動のみを励振する振動モードの制御法を実現し、振動モード制御のための関数形の電極形状を決定してその実験検証を行なった。さらに、関数形電極振動子の等価回路定数や容量比なども算出して、この種の振動子の設計指針も明らかにした。本論文で明らかにされた振動モードの制御法は、本論文で取扱った振動子だけでなく広く単一の共振を目的とするほかの振動子の設計にも役立つものと考えられる。

また、低周波用の振り結合子形音片フィルタを開発して試作結果を示し、実用に供しうることを明らかにすると共に、振動モードを制御する関数形電極が音片フィルタのスプリアス除去対策として有効であることを確認している。

以上の解析と実験結果から圧電駆動音片振動子の具体的な設計資料が与えられ、スプリアスの少ない音片フィルタの構成が可能となり、その実用化の可能性が示された考えられる。

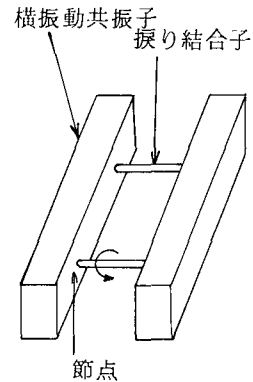


図4. 振り結合子・横振動共振子形音片フィルタ

## 審査結果の要旨

音片振動子は電磁駆動形を原形として発展してきたが、最近では圧電セラミック等を接着した圧電駆動形のものが増えている。この場合、素地音片に及ぼす駆動用セラミックの影響を無視することは出来ない。また一方、音片振動子があるモードのみに着目して利用する場合、高次モード等はスプリアスとなって現われる。従来この種のスプリアスモードの抑圧は部分的になされていただけで、広帯域にわたる対策は全くなされていない。本論文は、このような問題点を解決し、圧電駆動音片振動子の設計法を確立することを目的として行った研究の成果をまとめたもので、全編5章より成る。

第1章は緒論で、本研究の意義と目的を明らかにしている。

第2章では、圧電駆動音片振動子の特性を圧電セラミックのインピーダンスの影響を考慮し、かつ部分接着によるモード変化を含めて、運動方程式ならびに電気回路網類推により解析している。

第3章では、単一共振特性を広帯域にわたって維持出来る振動子の構成法について述べている。著者は、音片振動子が圧電駆動されている場合、第 $m$ 次振動のみを励振するためには、振動のひずみにより誘起される電荷の分布形に駆動力分布が一致するように電極形状を工夫すればよいことに着目して、スプリアス抑圧の手法を確立した。さらに本手法を確認する実験の一例として、第1次モード(7 kHz)を対象とした励振に対し、第3, 5, 7および9次モードは全く励振されず、0~200 kHzにわたって単一共振系が実現された結果を示している。これらは重要な新しい知見である。

第4章では、前章で与えた関数形電極手法を適用した、横振動形メカニカルフィルタの設計式ならびに手順を与え、これに基づく試作結果を示している。例えば、ねじり結合子形音片フィルタについての実験結果では、中心周波数7.25 kHz、比帯域幅5.7%に対して、-70 dB以上のスプリアス特性を200 kHzの帯域にわたって維持しており、またバイモルフ形関数電極横振動音片2個を差動接続したフィルタではスプリアスは全く検出されないなどの好結果を得ている。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は圧電駆動横振動音片に対する設計法を与え、かつ目的とする振動モードのみを励振するような電極形状を理論的、実験的に追求して、その設計の手法を確立し、メカニカルフィルタへ応用するなど、いくつかのすぐれた知見を加えたものであって、電気音響工学ならびに通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

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。